

# Die Anwendung von ZFP-Methoden im Spannungsfeld von Normforderungen.

Gerhard HECK<sup>1</sup>, Friedrich GREIMEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingenieurbüro für Werkstofftechnik Zivilingenieur für Hüttenwesen, Weiz

<sup>2</sup> Andritz Hydro GmbH, Weiz, Österreich

**Kurzfassung.** In bestimmten Anwendungsbereichen gerät der Prüfer an den Rand von Anwendungsgrenzen bestehender Normforderungen. Er steht damit auch nicht selten im Widerspruch zu Kundenforderungen, die sich in den überwiegenden Fällen strikt an den Normangaben orientieren und für Abweichungen davon nur in seltenen Fällen zugänglich sind. Dabei werden oft spezielle geometrische und/oder beanspruchungsrelevante Randbedingungen gerne außer Acht gelassen und den allgemeinen Forderungen in Verträgen geopfert.

Mit einigen Beispielen wird anhand der Magnetpulver- und Ultraschallprüfung von geschweißten bzw. gewalzten Stahlprodukten für den Kraftwerksbereich versucht, diese starren Grenzen etwas zu durchbrechen und zu weiteren Diskussionen anzuregen.

## 1. Einleitung

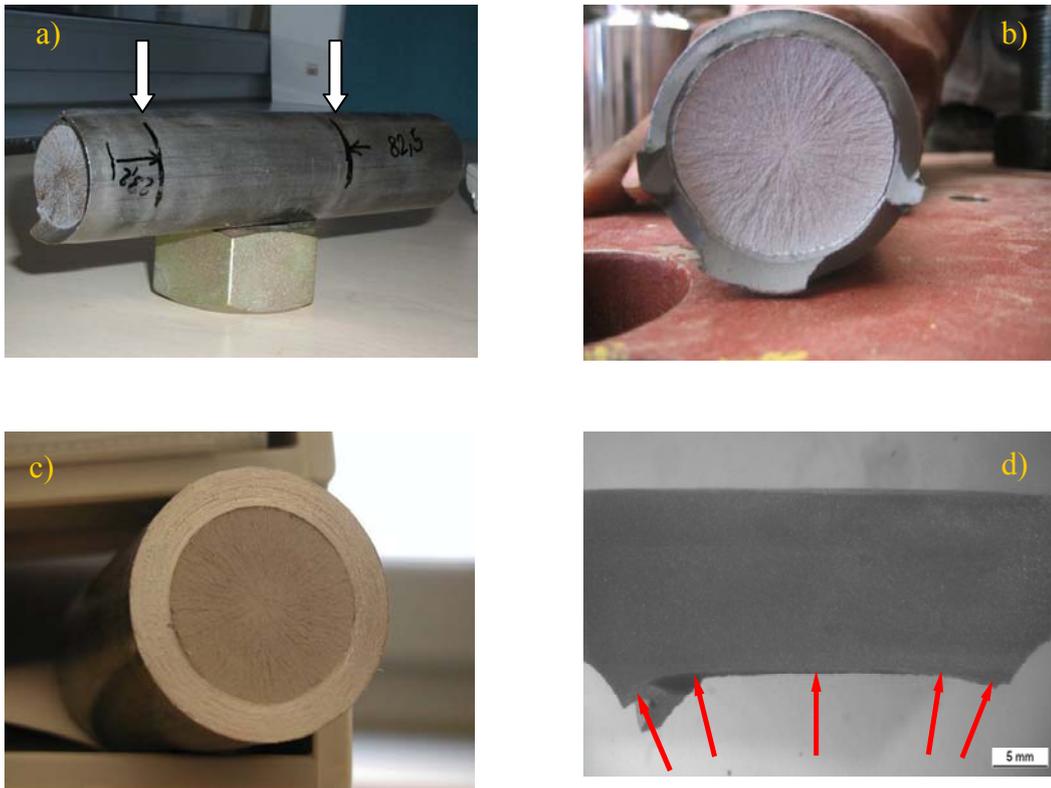
In bestimmten Anwendungsbereichen gerät der Prüfer an den Rand von Anwendungsgrenzen bestehender Normforderungen. Er steht damit auch nicht selten im Widerspruch zu Kundenforderungen, die sich in den überwiegenden Fällen strikt an den Normangaben orientieren und für Abweichungen davon nur in seltenen Fällen zugänglich sind.

Mit drei Beispielen wird anhand der Magnetpulver- und Ultraschallprüfung von geschweißten bzw. gewalzten Stahlprodukten für den Kraftwerksbereich versucht, diese starren Grenzen etwas zu durchbrechen und zu weiteren Diskussionen anzuregen. In allen 3 Fällen gibt es keine bzw. eine nur unscharfe Bindung zu einer Norm oder einem Regelwerk. Die Durchführungs- und Annahmestandards mussten bauteilspezifisch mit Versuchen eruiert werden.

## 2. Fall 1: Ultraschallprüfung von hoch beanspruchten Bolzen im Generatorenbau

Statorblechpaket-Pressbolzen (42CrMo4) dienen zum Verpressen des Statorbleches bei Generatoren und können je nach Größe des Generators eine Länge bis zu 3 m mit einem Durchmesser von 45 mm aufweisen. Mehrere dieser Bolzen sind im Zuge der Montage gebrochen. In Abb. 1a ist ein Teilstück eines derart gebrochenen Bolzens zu sehen. Die Bruchfläche zeigt eine strahlenförmigen Struktur und Scherlippen im Randbereich (Abb. 1b), ähnlich einer gebrochenen Zugprobe nach dem Zugversuch. Auffallend ist, dass keine wesentlichen Verformungen (Einschnürung) an der Bolzenoberfläche zu erkennen sind und dass die Bruchfläche knapp unter der Oberfläche endet.

Die Vermutung, dass innen liegende Querrisse die Ursache für die Brüche sein könnten, wurde durch eine Ultraschallprüfung am verbliebenen Teilstück in axialer Richtung bestätigt. Im Abstand von etwa 23 mm und 140 mm von der Bruchfläche wurden zwei querliegende Anzeigen festgestellt, die etwa 5 mm unter der Oberfläche endeten. Die Pfeile in Abb. 1a kennzeichnen die Lage der Ultraschallanzeigen.

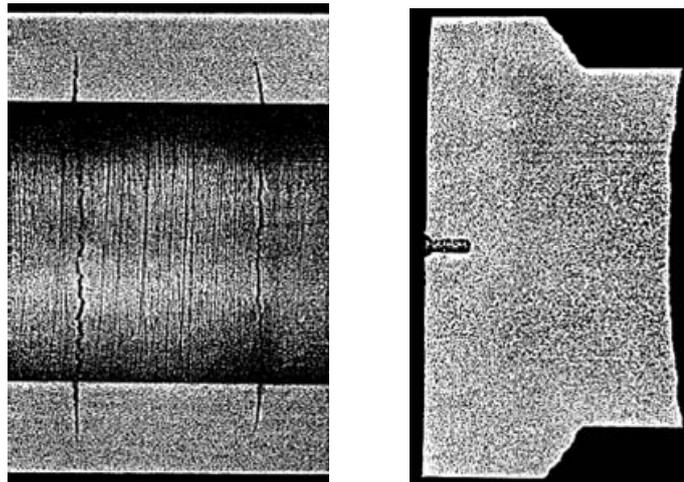


**Abb. 1:** Teilansichten des geschädigten Pressbolzens

- a: Teilstück eines gebrochenen Bolzens. Die Pfeile markieren zwei weitere Anzeigen
- b: Strahlenförmige Bruchstruktur mit Scherlippen im Randbereich
- c: Strahlenförmige Bruchstruktur nach dem Öffnen des mit Ultraschall gefundenen Risses
- d: Gewölbte Bruchfläche (in Ziehrichtung) im Querschnitt

An einer der beiden im Bild 1a gekennzeichneten Ultraschallanzeigen wurde der Bolzen durch Drehen bearbeitet bis die Ultraschallanzeige erreicht wurde und der Bolzen auseinander brach. Auch an dieser Bruchfläche (Abb. 1c) zeigte sich dieselbe strahlenförmige Struktur wie bei dem ursprünglichen, im Zuge der Montage aufgetretenen Bruch. Abb. 1d zeigt im Querschnitt eine leicht gewölbte Bruchfläche, was für Ziehrisse typisch ist. Das Ausgangsmaterial für die Pressbolzen ist ein Stangenmaterial, das durch Ziehen auf den geforderten Durchmesser verformt wird. Dabei werden die oberflächennahen Bereiche stärker verformt als die innenliegenden, wodurch die Festigkeitseigenschaften im äußeren Bereich höher liegen und der Riss knapp unter der Oberfläche zum Stillstand kommt

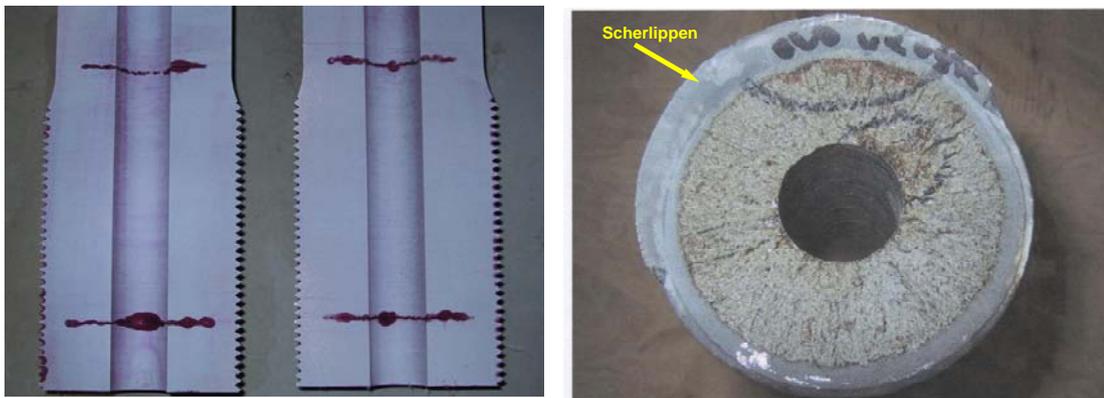
Nach einigen Recherchen konnte eine Literaturstelle ausfindig gemacht werden, in der auf einen ähnlichen Fall hingewiesen wird [1]. Aufgrund der gekrümmten Bruchfläche wird auf Ziehrisse geschlossen (Abb. 2).



**Abb. 2:** Ziehrisse. Gekrümmte Bruchfläche in Ziehrichtung [1]

Dass es sich bei dieser Fehlerart nicht um Einzelfälle handelt, beweisen mehrere Brüche der gleichen Art: Sie treten immer durch die Beanspruchungen im Zuge der Montage auf.

In Abb. 3 ist die Bruchfläche eines gebrochenen Bolzens (42CrMo4) für eine Rotorverschraubung zu sehen. Trotz der Zentralbohrung erkennt man aufgrund der Bruchstruktur, dass der Riss vom Zentrum ausgegangen sein muss, d.h. der Riss muss schon vor der Fertigung der Zentralbohrung vorhanden gewesen sein. Im Zuge der Montage ist nur mehr der Restquerschnitt durchgebrochen mit den typischen Scherlippen unter 45°, wie sie bei einem Zugversuch entstehen.

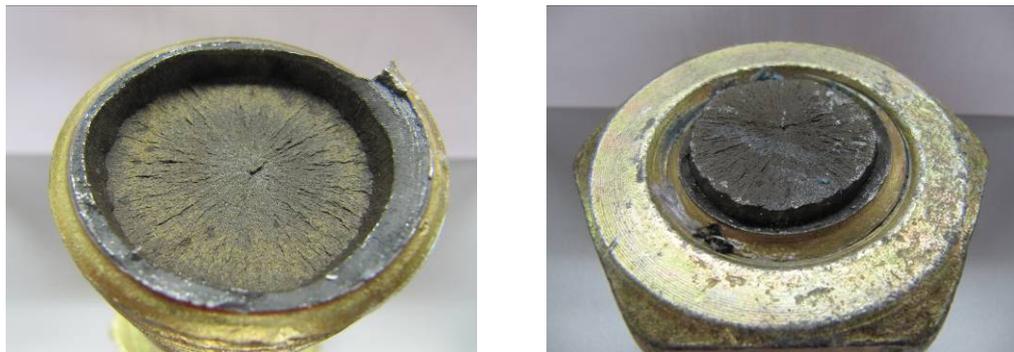


**Abb. 3:** Innen liegende Querrisse (Farbeindringprüfung) an einem noch nicht eingebauten Bolzen für die Rotorverschraubung und Bruchfläche.

Im Zuge des Zusammenbaus von einzelnen Armsternteilen kam es zum Bruch einer Sechskantschraube (Abb. 4). In der Detaildarstellung (Abb. 5) ist die vom Zentrum ausgehende strahlenförmige Bruchstruktur mit leicht gewölbter Bruchfläche zu erkennen. Der Bruch ist vom Zentrum gestartet und knapp unter der Oberfläche zum Stillstand gekommen.



**Abb. 4:** Gebrochene Sechskantschraube in Übersichtsdarstellung

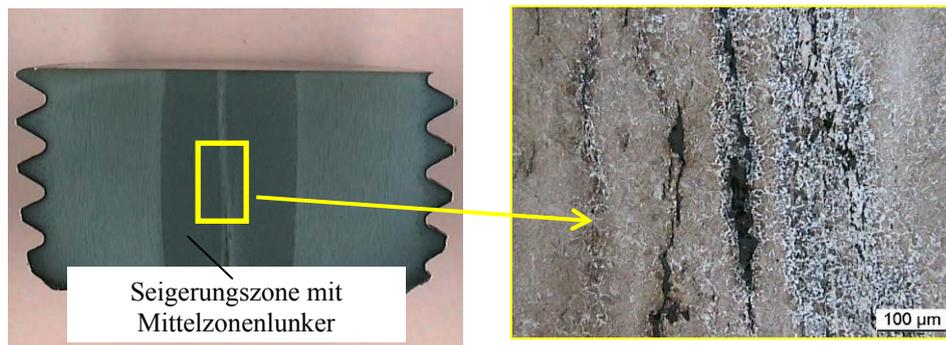


**Abb. 5:** Detailansicht der korrespondierenden Bruchflächen

Bei allen involvierten Bolzen / Schrauben konnten in begleitenden metallographischen Untersuchungen verschiedene Mängel im Gefüge, wie z. B. Seigerungen, Anteile von Martensit, usw., nachgewiesen werden. Die stärksten Gefügeheterogenitäten wurden im Schraubenwerkstoff nach Abb. 5 gefunden.

Im Längsschliff ist durch unterschiedliches Ätzverhalten die ausgeprägte (dunkle) Seigerungszone mit einem Mittelzonenlunker zu erkennen. In der Gefügedarstellung ist eine relativ hohe Einschlussdichte in Verbindung mit den Seigerungen deutlich zu sehen (Abb. 6).

Das Bruchbild (Abb. 5) der untersuchten Sechskantschraube weist auf einen Fehler hin, der seine Ursache ebenfalls bereits in der Herstellung des Stabmaterials hat. Der Bruch startet ähnlich wie bei einer Zugprobe im Zentrum und verläuft bis knapp unter die Außenoberfläche.



**Abb. 6:** Längsschliff / Seigerungszone mit Mittelzonenlunker

Dieser Vorgang läuft bereits während des Walz- oder Ziehvorganges ab, d.h. das Stabmaterial ist vor Fertigung der Sechskantschraube bereits vorgeschädigt (Ziehfehler). Diese Fehlerart kann im Vorfeld nur durch eine Ultraschallprüfung in Axialrichtung erfasst werden.

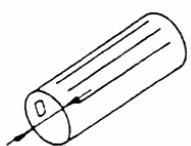
Im Zuge der Montage ist der verbleibende Restquerschnitt (Ring) nicht in der Lage die auftretenden Spannungen aufzunehmen und es erfolgte der Bruch der Schraube.

Fazit:

Die Ultraschallprüfung von Langprodukten wird in den Herstellerwerken in der Regel mit automatischen Ultraschallanlagen durchgeführt, wo die nur in radialer Richtung möglich ist. Die Prüfung in axialer Richtung muss somit nachträglich als Handprüfung durchgeführt werden, was zumeist erhebliche logistische Schwierigkeiten nach sich zieht.

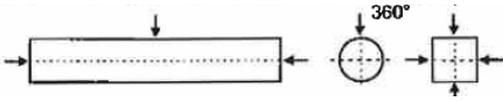
Basierend auf diesen Untersuchungen und weitgehend fehlende Vorgaben in den internationalen Normen wurde schon vor längerer Zeit eine Liefervorschrift für hoch beanspruchte Bolzen erarbeitet, in der eine Ultraschallprüfung auch in axialer Richtung festgeschrieben wurde. Geprüft wird mit 4MHz, und je nach Länge der Bolzen, entweder nur von einer Stirnseite oder bei Längen von mehr als 1500mm von beiden Stirnseiten. Die schon übliche radiale Prüfung im Herstellerwerk bleibt weiterhin bestehen.

In Abb. 7 ist ein Ausschnitt aus EN 10308 [2] zu sehen, wo nur eine Prüfung in radialer Richtung vorgeschrieben ist, und diese auch nur über 180° und nicht über 360°, wie dies für das Auffinden oberflächennaher Fehler nötig wäre.

Typ	Rasterprüfung <sup>a,b</sup>		Vollständige Prüfung <sup>a,b</sup>
	Durchmesser $D$ oder Dicke $t$ mm	Prüfbahnen <sup>c</sup>	
1a 	$D \leq 200$	2, um 90° versetzt	Vollständige Abtastung über mindestens 180° der zylindrischen Oberfläche
	$200 < D \leq 400$	3, um jeweils 60° oder 120° versetzt	

**Abb. 7:** EN 10308: Auszug aus Tabelle 1 - Prüfumfang bei der Senkrechteinschallung

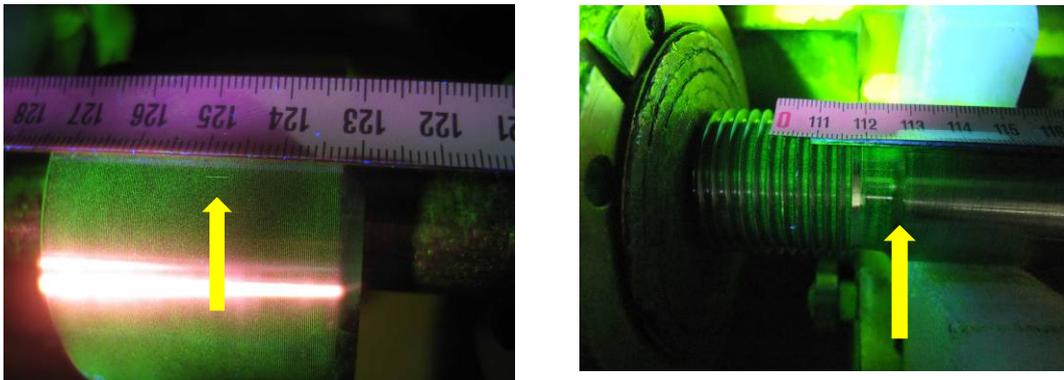
Eine Ausnahme ist in dieser Hinsicht die ÖNORM M 3002, die für Stabstahl sowohl eine Prüfung in radialer Richtung über 360° als auch eine Prüfung von beiden Stirnseiten in axialer Richtung vorsieht (Abb. 8).

Kennbuchstabe	Kennziffer	Prinzipiskizze	Prüfumfang
A	6		Ganze Mantelfläche und beide Stirnflächen <sup>2)</sup>

**Abb. 8:** ÖNORM M 3002: Auszug aus Tabelle 1 - Gruppe A: Stabstahl [3]

### 3. Fall 2: Magnetpulverprüfung auf lineare Oberflächenfelle in Stabmaterialien

Im Zuge von Magnetpulverprüfungen an Stabmaterial (Bolzen verschiedener Arten) werden immer wieder lineare Anzeigen an der Oberfläche gefunden, die die zulässigen Längen lt. diverser Normen überschreiten. In Abb. 9 sind beispielhaft zwei typische lineare Magnetpulveranzeigen in Längen von 5mm bis 20 mm zu sehen.



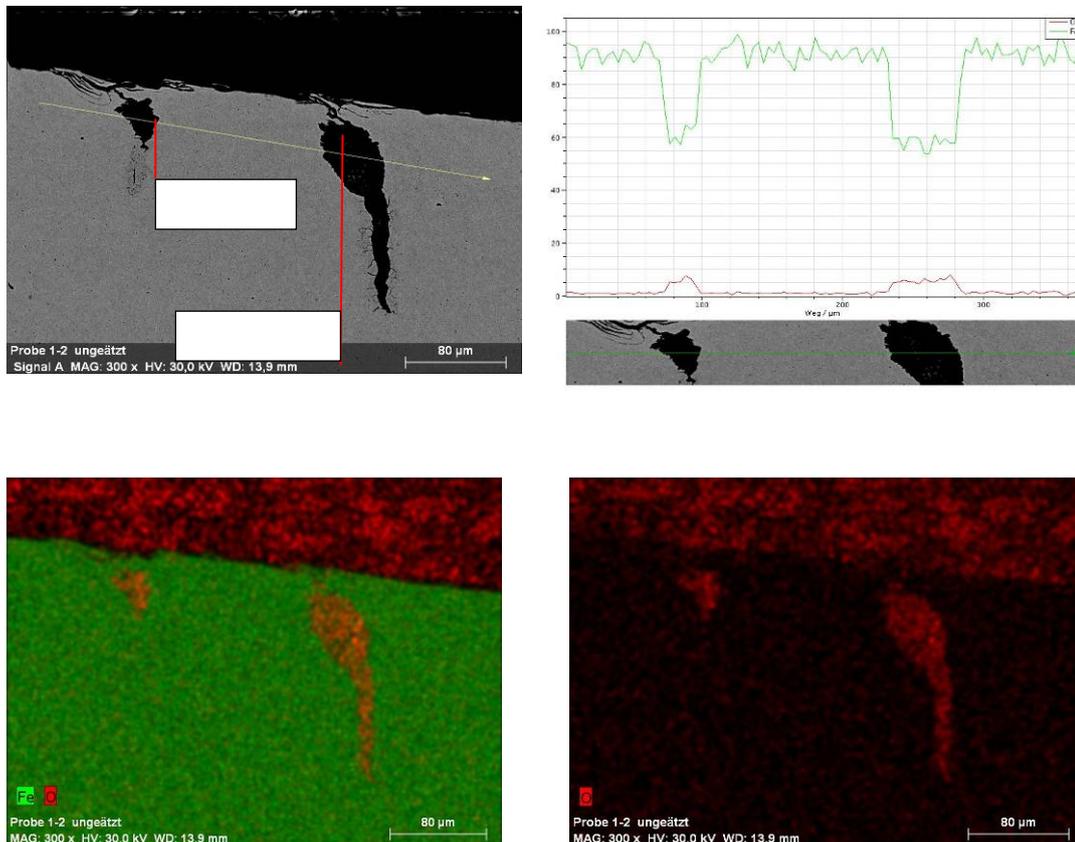
**Abb. 9:** Typische Anzeige bei der fluoreszierenden Magnetpulverprüfung (Pfeile)

Die Bolzen werden vorwiegend aus dem Werkstoff 42CrMo4 gefertigt, werden überwiegend, bis auf den Gewindebereich, im geschälten Zustand eingesetzt und sind nur auf Zug beansprucht (z.B. Statorpressbolzen, Rotorpaketpressbolzen).

Diskussionen, ob es sich bei den nachgewiesenen Anzeigen um Risse oder andere Inhomogenitäten handelt, wurden zum Anlass für weitere Untersuchungen genommen. Durch mikroskopische und chemische Untersuchungen wurden die Natur und die Tiefenausdehnung der Magnetpulveranzeigen geklärt.

Nähere Hinweise erhält man dazu, wenn man die Anzeigen im Lichtmikroskop betrachtet. Dazu wurden an mehreren Stellen der Bolzen Querschliffe angefertigt und die einzelnen Anzeigen untersucht. Bemerkenswert sind die Strukturen, die an bzw. knapp unter der Oberfläche zu beobachten sind. Die an der Oberfläche als linear sichtbare Anzeigen sind in den meisten Fällen auf voluminöse Einschlüsse (knapp) unter der Oberfläche zurückzuführen.

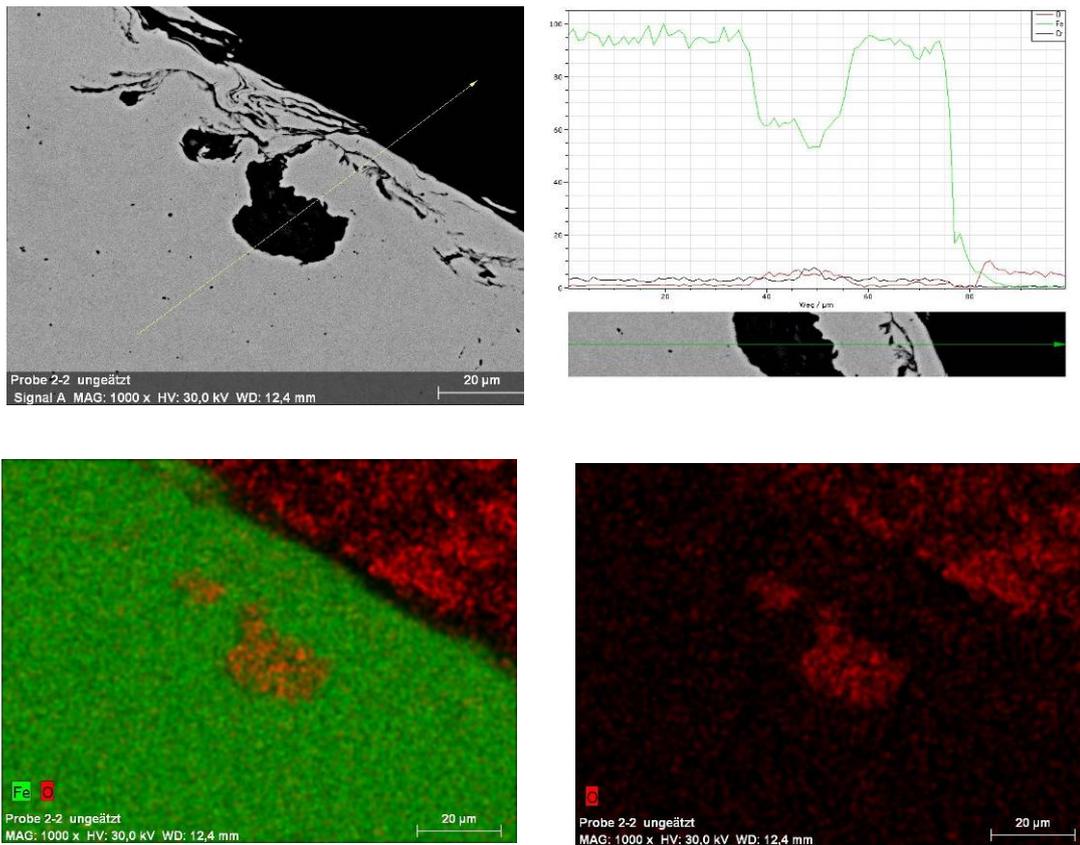
Abb. 10 zeigt repräsentativ derartige Anzeigen im Querschliff mit Tiefenausdehnungen von etwa 50  $\mu\text{m}$  bis 150  $\mu\text{m}$  und unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen. Die größte nachgewiesene Anzeige hatte eine Tiefenausdehnung von etwa 300  $\mu\text{m}$ .



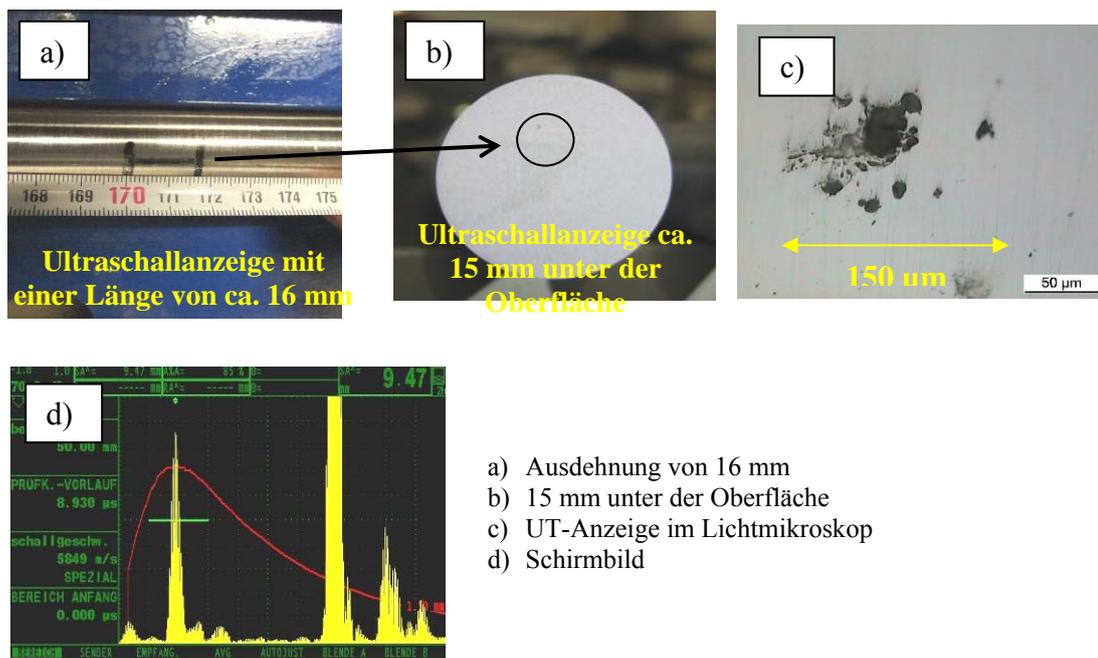
**Abb. 10:** Tiefenausdehnung und Linienspektrum zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Anzeige und Flächenspektrum zur Bestimmung der Elementverteilung.

Das voluminöse Aussehen der Einschlüsse ist verblüffend, da ursprünglich angenommen wurde, dass die Magnetpulveranzeigen auf ausgewalzte Mangansulfide zurückzuführen sind. Diese Annahme wurde durch die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Einschlüsse widerlegt. In keinem der untersuchten Fälle wurde Mangan oder Schwefel nachgewiesen, sondern nur Sauerstoff und Eisen. Dies bedeutet, dass es sich um Eisenoxideinschlüsse handelt. Diese sind im Vergleich zu den Mangansulfiden eher spröde und schwerer verformbar. Daher erklärt sich auch z. T. ihr voluminöses Aussehen (Abb. 11).

Eine bei der Ultraschallprüfung detektierte Anzeige (radiale Einschallung) wurde ebenfalls denselben metallographischen Untersuchungen unterzogen und ist in Abb. 12 zu sehen. Die Ultraschallanzeige ist ebenfalls auf Oxideinschlüsse derselben Art zurückzuführen. Die Größe von 1,5 mm KSR (Kreisscheibenreflektor) der Ultraschallprüfung stimmt mit dem gemessenen Wert in der metallographischen Abbildung von 150  $\mu\text{m}$  sehr gut überein.



**Abb. 11:** Wie Abb. 10, doch ist die voluminöse Ausbildung der an der Oberfläche linearen Anzeige knapp unter der Oberfläche zu beachten.



**Abb. 12:** Ultraschallanzeige mit KSR 1,5 mm

Im Zuge der Magnetpulverprüfung hat nun das Prüfpersonal die schwere Aufgabe zu beurteilen, ob diese Anzeigen aufgrund ihrer Struktur auf Risse zurückzuführen sind oder auf nichtmetallische Einschlüsse und ob sie zulässig sind oder nicht.

Die erste Antwort darauf gibt die Norm oder die Prüfanweisung, wo nur von linearen Anzeigen gesprochen wird. In zweiter Linie ist die Lage der Anzeigen zur Beanspruchungsrichtung ausschlaggebend. Alle festgestellten und untersuchten Magnetpulveranzeigen sind parallel zur Stabachse orientiert und liegen daher in Beanspruchungsrichtung (Zugbeanspruchung) der eingesetzten Bolzen (z.B. Rotorverschraubungen). Die Schwierigkeit besteht nun darin die Prüfer Anzeigen- und Produktorientiert zu schulen. Die Normen sind dahingehend keine Hilfe.

Eine weitere Hürde ist darin zu sehen, dass Langprodukte (Stabmaterial) in großem Umfang einer automatisierten Wirbelstromprüfung unterzogen wird. Die Beurteilungskriterien beziehen sich bei diesem Verfahren auf die Fehlertiefe, im Gegensatz zur Magnetpulverprüfung, wo es um Anzeigenlängen geht.

Auch eine Norm wie die EN 10277 ist keine große Hilfe, da sie Anzeigen dieser Art nicht berücksichtigt. Bewertet wird z. B. nach EN 10228-1 und hier sind in 4 Qualitätsklassen (QK) längliche Anzeigen zwischen 2mm (QK 4) und 20mm (QK1) zulässig. Ob dies Risse sind oder nicht sei dahingestellt.

#### Fazit:

Eine Schulung des Prüfpersonals speziell auf die unterschiedliche Ausbildung von Magnetpulveranzeigen von Rissen und derartig ausgewalzten nichtmetallischen Einschlüssen ist sinnvoll, ändert aber nichts, solange einerseits die Normvorgaben nicht geändert bzw. die Ansicht über den Einfluss diese Anzeigen auf die Gebrauchseigenschaften der Produkte nicht geklärt werden kann.

In entsprechenden Liefervorschriften wird dies bereits versucht, stößt aber immer noch auf Skepsis. Weitergehende Diskussionen sind mit Sicherheit zu erwarten

#### **4. Fall 3: Magnetpulverprüfung an lackierten Schweißverbindungen**

Im Rahmen der Betriebsüberwachung werden Schweißverbindungen periodisch einer Magnetpulverprüfung unterzogen. Bei einem Großteil der Schweißkonstruktionen sind die Schweißnähte nicht überschliffen und auch noch mit einem Korrosionsschutzanstrich (Lackierung) versehen. Außerdem sind die meisten Komponenten mehrere Jahrzehnte im Einsatz und daher besteht nicht die Notwendigkeit, Magnetpulveranzeigen von 2 mm, wie bei Neuanlagen, zu detektieren. Vielmehr besteht sehr oft die Aufgabe darin, Anzeigen größerer Längen (im cm-Bereich) zu finden, ohne den Korrosionsschutzanstrich zu entfernen.

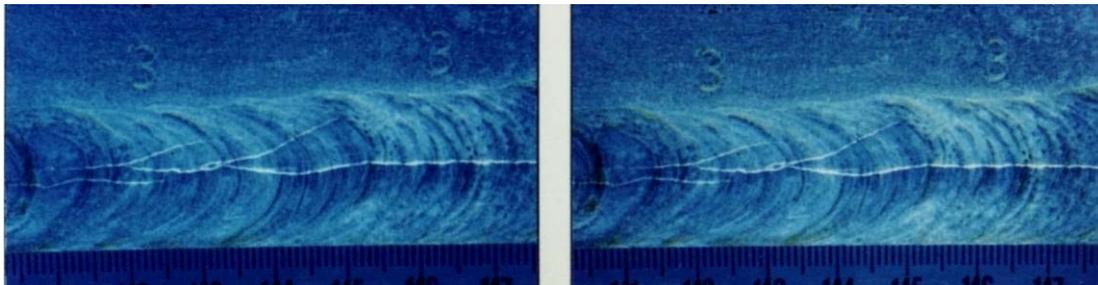
Da es dennoch in bestimmten Fällen notwendig sein kann, feine Risse unter Lackschichten entsprechend neuer Normforderungen nachzuweisen, wurden schon vor einigen Jahren aufgrund verschiedener Kundenwünsche eingehende Untersuchungen an lackierten Schweißverbindungen durchgeführt [4].

Im Zuge von Revisionen ist oft unter sehr beengten Platzverhältnissen (Abb. 13) eine Vielzahl von Schweißnahtmetern zu prüfen. Alle diese Nähte müssten vor der Prüfung durch Beizen von den Lackschichten entfernt werden. Dieser Aufwand, verbunden mit extremer Geruchsbelästigung in den engen Platzverhältnissen und anschließendem Anbringen eines neuen Anstriches, sollte dort vermieden werden, wo es technisch vertretbar ist.



**Abb. 13:** Beengte Platzverhältnisse im Inneren eines Generatorrotors

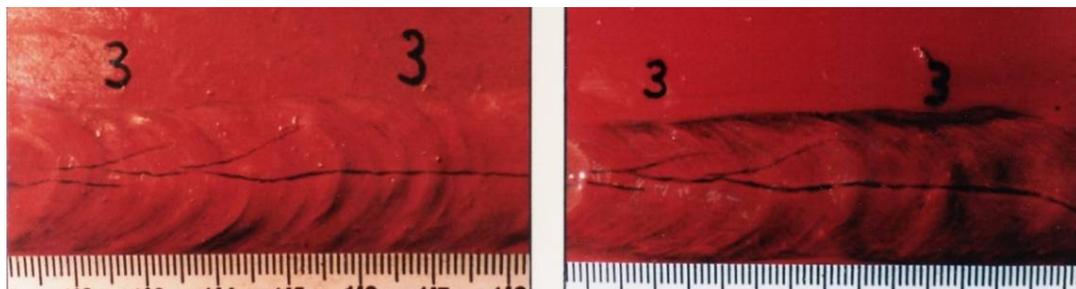
Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abb. 14 und Abb. 15 zu sehen. Es ist jeweils der unbeschichtete Ausgangszustand unterschiedlich starken Beschichtungen gegenübergestellt. Unter Lackschichten von bis zu 300µm sind noch feinste Risse nachweisbar. Das Gros der Risse hat eine Breite von 10µm bis 60µm und eine Tiefenausdehnung von 0,5mm bis 5mm.



geschweißt und gebürstet

fluo./nass

sandgestrahlt

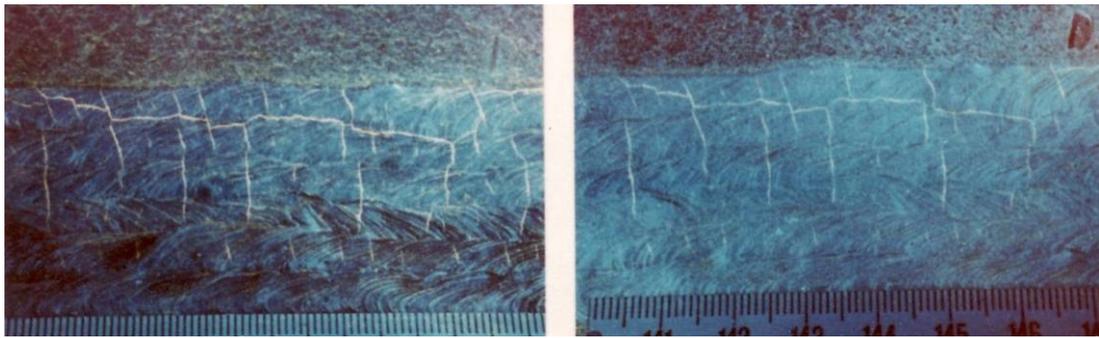


lackiert 120µm

schwarz/nass

lackiert 300µm

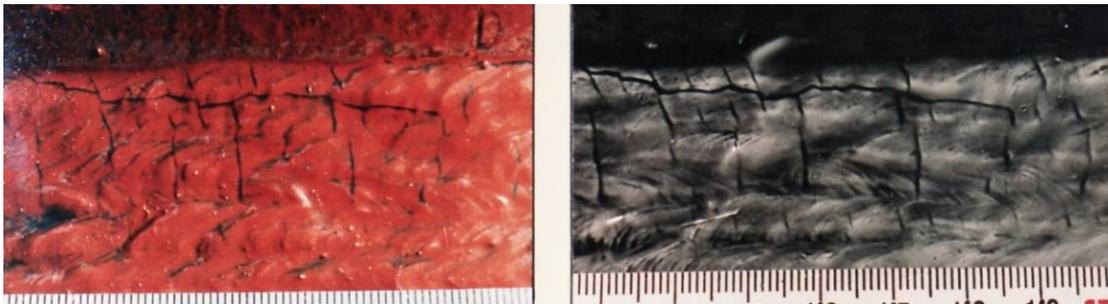
**Abb. 14:** Nachweis von feinsten Rissen auch noch bei 300µm Beschichtungsstärke



geschweißt und gebürstet

fluo./nass

sandgestrahlt



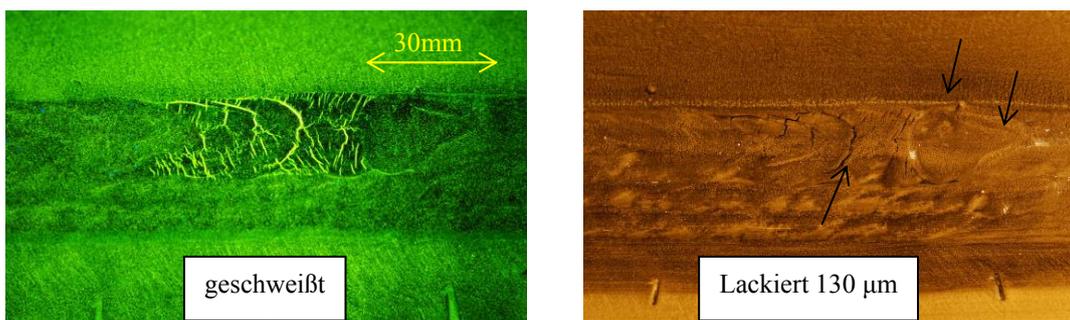
lackiert 100µm

schwarz/nass

lackiert 235µm

**Abb. 15:** Nachweis von feinsten Rissen auch noch bei 235µm Beschichtungsstärke

Jüngste Untersuchungen an rissbehafteten Schweißnähten mit unterschiedlichen Lacksystemen bestätigen diese Ergebnisse. Abb. 16 zeigt eine Stumpfnah, wo nach einer Beschichtungsstärke von 130µm auch noch feinste Risse nachgewiesen wurden (Pfeile).



**Abb. 16:** Nachweis von feinsten Rissen auch nach jüngsten Untersuchungen hier bei einer Beschichtungsstärke von 130µm

#### Fazit:

Nach Angaben in EN ISO 9934-1 [5] beeinflussen nichtferromagnetische Schichten bis zu einer Schichtstärke von 50µm nicht die Nachweisempfindlichkeit.

Aus den eigenen Untersuchungen ist zu erkennen, dass auch bei größeren Beschichtungsstärken als 50µm noch sehr kleine Risse nachgewiesen werden können.

Berücksichtigt man die ursprüngliche Forderung, dass bei Revisionen von Anlagen z.T. nur Risse größerer Dimensionen (im cm-Bereich) detektiert werden sollen, so kann diese Aufgabe unter Einhaltung gewisser Randbedingungen zufriedenstellend erfüllt werden.

Die wichtigsten Randbedingungen sind:

- Lackstärke bestimmen
- Verwendung von schwarzer Suspension
- Jochmagnetisierung (Wechselstrom)
- Längere Magnetisierungsdauer (etwa 5 bis 10sek.)
- Achtung bei Kehlnähten (größere Lackstärken am Übergang zum GW)

Positiv anzumerken ist, dass in den vergangenen Jahren bereits sehr viele Projekte unter Einbeziehung dieser Versuchsergebnisse und mit Zustimmung unserer Kunden zufriedenstellend durchgeführt werden konnten.

## **5. Zusammenfassung**

Im praktischen Prüferalltag kommt es hin und wieder vor, dass die Durchführung von Prüfungen und die damit in Zusammenhang stehenden Zulässigkeitsgrenzen zu Interpretationsschwierigkeiten und auch Diskussionen mit Kunden und/oder deren Vertretern führen. Dies umso mehr für die Fälle, wo es keine anwendbaren Normvorgaben gibt und auf Erfahrungs- und Versuchsergebnisse zurückgegriffen werden muss. Durchführungs- und Annahmestandards müssen anwendungsspezifisch durch Versuche festgelegt werden und oft sehr viel Überzeugungsarbeit geleistet werden.

Mit diesem Beitrag wollen die Verfasser die Diskussion für diese und ähnlich gelagerte Anwendungsfälle eröffnen bzw. schon begonnene Diskussionen weiterführen. Die Adaptierung einzelner Normen wäre in diesem Zusammenhang wünschenswert.

## **6. Referenzen**

- [1] Das Buch der Schadensfälle, Friedrich Karl Naumann, Dr. Riederer-Verlag GmbH Stuttgart 1976, Seiten 201-203.
- [2] EN 10308: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung von Stäben aus Stahl.
- [3] ÖNORM M 3002: Ultraschallprüfung von Umformprodukten (geschmiedet oder gewalzt) mit höheren Anforderungen aus Stahl und anderen metallischen Legierungen - Durchführung, Prüfumfang, Güteklassen.
- [4] Heck, G.: Schweißtechnik Heft 10/1985, 39. Jahrgang, Seiten 170-177
- [5] EN ISO 9934-1: Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung, Teil 1: Allgemeine Grundlagen