

Risslängenbestimmung in Hochdruckbauteilen durch dreidimensionale Ultraschallabbildung

Martin SCHICKERT*, Rayk THUMSER*, Uwe GERTH*, Susanne KLEEMANN*

* Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystr. 4, 99423 Weimar, martin.schickert@mfpa.de, www.mfpa.de

Kurzfassung. Zyklisch belastete Hochdruckbauteile werden z. B. in den Einspritzanlagen von *Common-Rail*-Dieselmotoren eingesetzt. Um ein Simulationsmodell für Rissentstehung und Risswachstum in diesen Bauteilen experimentell zu überprüfen, wurden Dauerschwingversuche an nicht autofrettierten und an autofrettierten Testkörpern mit gekreuzten Bohrungen durchgeführt. Die induzierten Volumenrisse wurden mit einem Ultraschall-Abbildungssystem abgebildet und die Risslängen bestimmt. Die Messungen erfolgten in einem Tauchtechnik-Scansystem auf planaren Rastern mit 0,2 mm Auflösung durch einen fokussierenden 10 MHz-Prüfkopf. Aus den Messsignalen wurden Volumenabbildungen der Risse generiert, die anschließend durch dreidimensionale Iso-Oberflächenbilder dargestellt wurden. Unterschiede zwischen der realen Geometrie der Risse und ihrer Ultraschallanzeige werden im Beitrag diskutiert. Dazu gehört auch die akustische Transparenz der Risse unter Umgebungsbedingungen (Riss-schließeffekt), die bei Innendrücken zwischen einem und 2.120 bar untersucht wurde. Die Länge der Ultraschall-Rissanzeigen wurde halbautomatisch aus Tiefenschnitten anhand verschiedener Amplitudenkriterien bestimmt. Eine vorläufige Kalibrierung auf lichtmikroskopisch bestimmte Risslängen erfolgte durch lineare und quadratische Regressionskurven.

1 Einleitung

Der Wirkungsgrad von Dieselmotoren lässt sich durch *Common-Rail*-Einspritzanlagen steigern, in denen der Kraftstoff unter möglichst hohem Druck eingespritzt wird. Die aktuell verwendeten Drücke von bis zu 2.000 bar sollen deshalb in Zukunft noch erhöht werden. Dadurch steigen die Anforderungen an die zyklisch belasteten Hochdruckbauteile in den Einspritzanlagen weiter, wobei vor allem die Widerstandsfähigkeit gegen Rissbildung und Risswachstum von Bedeutung ist.

Eine Erhöhung der Festigkeit der Bauteile gegen Volumenrisse kann durch eine Nachbehandlung des verwendeten Stahls erreicht werden. Eine Nachbehandlungsmöglichkeit ist die Autofrettage, bei der der Innendruck der Bauteile während der Herstellung über die Streckgrenze hinaus erhöht wird. Nach dem Ablassen des Druckes bleiben im Bauteil Eigenspannungen bestehen, die das Risswachstum hemmen.

Am berichtenden Institut wurde ein Simulationsmodell zur Verfolgung von Rissbeginn und Risswachstum entwickelt, mit dem die Lebensdauer der Bauteile in Abhängigkeit von Material- und Betriebsparametern vorhergesagt werden kann [1, 2]. Das Modell wurde bisher durch Dauerschwingversuche an Testkörpern überprüft, in denen innenliegenden Risse an Bohrungskreuzungen entstehen. Zum Vergleich mit den Simulationsergebnissen wurden die Bauteile aufgebrochen und die Risslängen lichtmikroskopisch vermessen.

Für eine genauere Untersuchung des Risswachstums ist eine zerstörungsfreie Untersuchung wünschenswert. Nach Voruntersuchungen wurde dazu die bildgebende Ultraschallprüfung ausgewählt. Der Beitrag beschreibt Aufbau und Messergebnisse eines Ultraschall-Abbildungssystems zur Bestimmung der Länge von Volumenrissen in Hochdruck-Testkörpern. Die gezeigten Messungen sind vorbereitende Untersuchungen zur Verifizierung des Messprinzips und der Abschätzung des Einflusses der Messparameter. Nach einer Einführung in die Betriebsfestigkeit von hochfesten Stählen und ihre Untersuchung durch Dauerschwingversuche wird der Aufbau des Messsystems beschrieben. Messergebnis sind Volumenanzeigen der Risse, die als zweidimensionale Schnittbilder und dreidimensionale Iso-Oberflächenbilder dargestellt werden. Es wird gesondert auf die Problematik der genauen Bestimmung von Risslängen aus Ultraschallanzeigen eingegangen, insbesondere auf den Risschließeffekt, der einen Nachweis der Risse mit Ultraschall erst bei relativ hohen Innendrücken erlaubt. Für die Messung der Längen der Ultraschall-Rissanzeigen wird ein halbautomatischer Algorithmus eingesetzt, der die Umfangslinien von Anzeigen nach wählbaren Kriterien berechnet. Auf Grundlage von lichtmikroskopisch gemessenen Risslängen werden vorläufige Kalibrierkurven berechnet.

2 Betriebsfestigkeit von hochfesten Stählen

Die Lebensdauer druckbelasteter Stahlrohre wird durch Rissbildung begrenzt. Um die Dauerfestigkeit von Stählen gegenüber Schwingbeanspruchung unter kontrollierten Bedingungen zu beschreiben, werden Dauerschwingversuche durchgeführt, deren Ergebnis als Wöhlerlinien dargestellt wird. Wöhlerlinien geben die Anzahl der Schwingspiele an, bei der bei einem bestimmten Druck Rissbildung bzw. das Versagen des Bauteils erreicht wird.

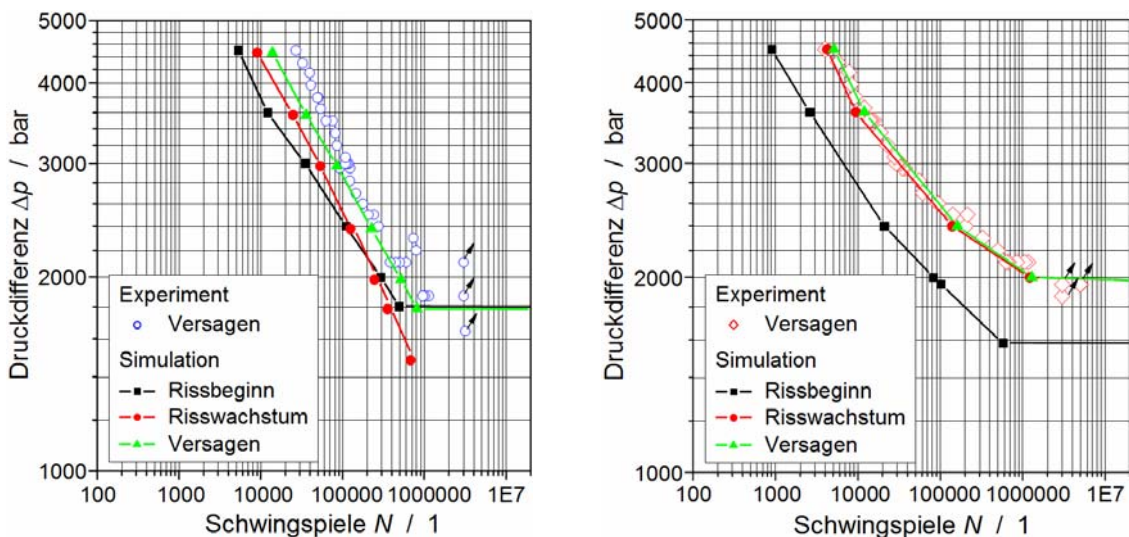


Bild 1. Aus Simulationen und mechanischen Experimenten ermittelte Wöhlerlinien für nicht autofrettierte Bauteile (links) und für autofrettierte Bauteile (rechts)

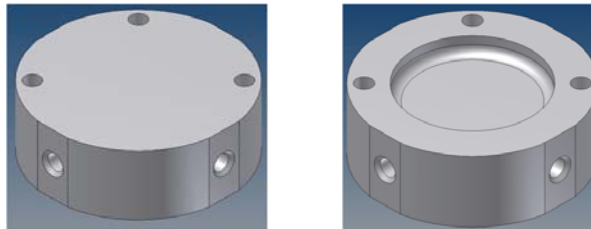
Zur Dimensionierung von Bauteilen und zur Berechnung ihrer Lebensdauer werden Modelle zur Rissentstehung und zum Risswachstum eingesetzt. Ein solches Modell wurde am berichtenden Institut entwickelt [1]. Bild 1 zeigt Beispiele für die Ergebnisse von Simulationsrechnungen für zwei verschiedene Stähle. Im linken Bild sind die Wöhlerlinien eines nicht autofrettierten Stahls dargestellt [2]. Man erkennt, dass bis zu einer Druckdifferenz von 1800 bar eine praktisch unbegrenzte Zahl von Schwingspielen ohne Versagen möglich ist, jedoch bei größeren Druckdifferenzen Risse initiiert werden, die anschließend wachsen und schließlich zum Versagen führen. Bei autofrettierten Bauteilen (rechtes Bild) setzt zwar

die Rissentstehung früher ein, das Risswachstum wird jedoch durch die Eigenspannungen gebremst. Die Bauteile können so mit höheren Druckdifferenzen von hier 2000 bar beansprucht werden, ohne dass vorzeitiges Versagen eintritt.

Zur Absicherung der Simulationsrechnungen ist ein Vergleich mit mechanischen Experimenten notwendig, die als Dauerschwingversuche an Testkörpern mit Bohrungskreuzungen vorgenommen werden [3]. Da die Risse bevorzugt am Verschnitt der Bohrungen entstehen, ist die Rissgeometrie gut vorhersagbar. Die Messung der Risslänge wurde bisher durch Aufbrechen der Testkörper und optische Vermessung der Risse durchgeführt. Um die Übereinstimmung zwischen Simulation und mechanischem Experiment vor allem im Bereich des Risswachstums genauer untersuchen zu können, soll die Risslänge zerstörungsfrei durch Ultraschallmessungen bestimmt werden.

Die Testkörper für die Dauerschwingversuche werden in zwei Serien aus nicht autofrettiertem Stahl und aus autofrettiertem Stahl hergestellt. Die Kennwerte der Testkörper sind in Tabelle 1 zusammengefasst. In den Testkörpern kreuzen sich jeweils zwei Bohrungen, die in halber Höhe eingebracht sind, im rechten Winkel. Bei den autofrettierten Testkörpern beträgt die Wanddicke über und unter den Bohrungen nur 2,5 mm.

Tabelle 1. Kennwerte der nicht autofrettierten und der autofrettierten Testkörper



Testkörper	nicht autofrettiert	autofrettiert
Material	42CrMo4 (1.7725), vergütet und gehärtet	
Durchmesser	58 mm	
Materialstärke	20 mm	10 mm
Bohrungsdurchmesser	5 mm	
Wanddicke über Bohrung	7,5 mm	2,5 mm
Autofrettage	–	6000 bar

In den Dauerschwingversuchen zur Risserzeugung werden die Testkörper Druckwechseln zwischen $p_{\min} = 50$ bar und $p_{\max} = 3.000$ bar ausgesetzt. Die Druckwechselfrequenz beträgt 15 Hz. Pro Versuch werden je nach Stahl und gewünschter Risslänge zwischen 15.000 und 100.000 Schwingspiele durchgeführt.

3 Ultraschall-Messsystem für Volumen-Scans

Zur Rissabbildung wurde ein Ultraschall-Volumen-Scansystem in Tauchtechnik aufgebaut. Es besteht aus einem Ultraschallgerät des Ing.-Büros Dr. Hillger, einem schrittmotorgesteuerten Dreiachs-Scanner der Firma isel und einem 10 MHz-Tauchtechnikprüfkopf der Firma General Electric. Zur Steuerung des Scan-Vorgangs wurde die Schrittmotorsteuerung modifiziert und über eine Digital-I/O-Schnittstelle an den Steuerrechner angeschlossen. Das Volumen-Scansystem wird mit einem eigenen Scan-Programm gesteuert, das auch die Definition geschützter Verfahrbereiche erlaubt, um Kollisionen durch Bedienfehler zu vermeiden.

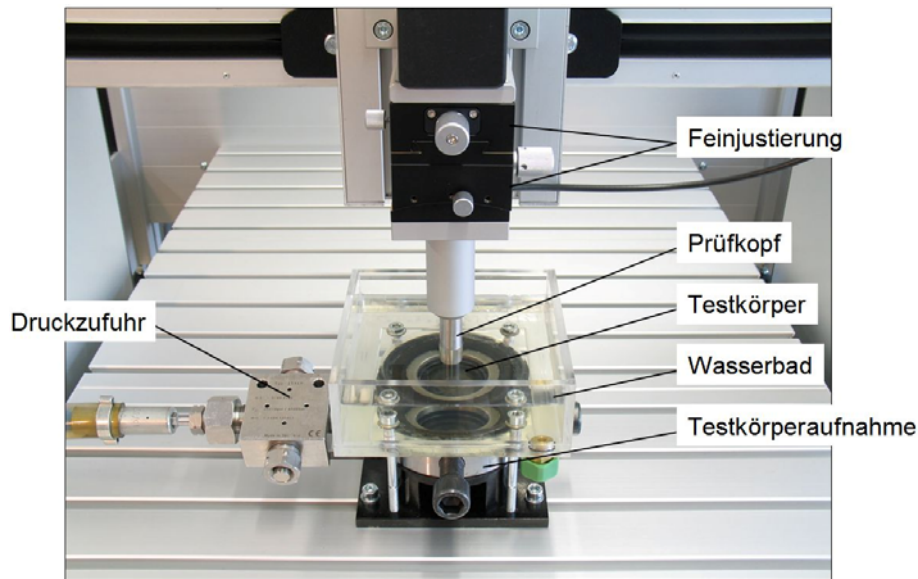


Bild 2. Mechanischer Aufbau des Scansystems

Bild 2 zeigt einen Ausschnitt des Messaufbaus. Der Testkörper wird in eine Testkörperaufnahme eingebaut, auf die ein kleines Tauchtechnikbecken aufgesetzt ist. Die Druckzufuhr erfolgt von der Seite. Der Tauschtechnikprüfkopf kann im Wasserbad in drei Achsen verfahren werden. Der Prüfkopf ist über eine Feinjustierung zur senkrechten Ausrichtung mit dem Dreiachs-Scanner verbunden. Es wird ein Prüfkopf mit Punktfokussierung auf 50 mm in Wasser verwendet; der berechnete und messtechnisch bestätigte Schallbündeldurchmesser im Fokuspunkt beträgt 0,7 mm für einen Amplitudenabfall auf -6 dB. Durch Variation des Prüfkopfabstandes wird der Fokuspunkt für jede Testkörpergeometrie auf die Rissebene gelegt.

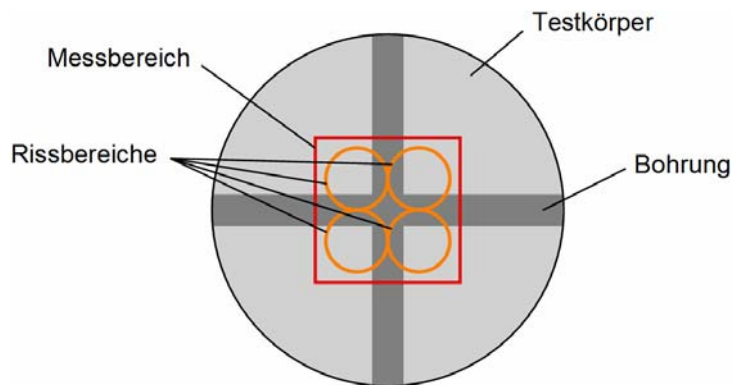


Bild 3. Lage des Messbereichs über der Bohrungskreuzung

Durch die Dauerschwingversuchen werden im Testkörper Risse in den vier Verschnittpunkten der Bohrungskreuzung induziert (Aufsicht in Bild 3). Der Messbereich wurde entsprechend so festgelegt, dass er die Rissbereiche in allen vier Quadranten abdeckt. Er umfasst einen Bereich von 24 mm x 24 mm, in dem die Messpunkte linienweise in einem Raster von 0,2 mm x 0,2 mm aufgenommen werden. Bei geringen Risslängen wurde das Raster bis auf 0,05 mm x 0,05 mm verfeinert. Bei einer Messrate von 20 Messungen pro Sekunde beträgt die Messzeit 14 min für 14.641 Messungen. Das Messergebnis ist ein dreidimensionaler Datensatz in x,y,t -Koordinaten.

4 Rissabbildung

Die interessierenden Risslängen liegen im Bereich von 0,3 bis 10 mm. Bei einer Wellenlänge von ca. 0,6 mm in Stahl sollte der größte Teil der Risse prinzipiell abbildbar sein. Für eine genaue Bestimmung der Risslänge aus einer Ultraschallanzeige sind aber einige Voraussetzungen notwendig, die zu den folgenden Fragen führen:

- Reflektieren die Risse spiegelnd mit gleichmäßiger Amplitudenverteilung?
- Ist die Risskante auch bei dreidimensionalem Rissverlauf eindeutig bestimmbar?
- Welches Amplitudenkriterium ist zur Bestimmung der Risslänge geeignet?
- Welche minimale Risslänge ist in den rauschbehafteten Messungen nachweisbar?
- Gibt es Beugungs- oder Fokussierungsartefakte?
- Sind die Risse durch Eigenspannungen geschlossen und damit akustisch transparent (Riss-schließeffekt)?
- Ist der Riss-schließeffekt druckabhängig; evtl. mit einer Hysterese der Rissanzeige zwischen Druckanstieg und Druckabfall?

Die Fragen betreffen den generellen Unterschied zwischen der realen Geometrie eines Risses und seiner Ultraschallanzeige, der bei Ultraschallmessungen immer zu beachten ist. Daher ist zur Bestimmung der Risslänge aus Ultraschallanzeigen eine Kalibrierung notwendig.

Die Messergebnisse liegen nach Skalierung mit der Pulsgeschwindigkeit als $x,y,-z$ -Quader vor und lassen sich als Quer- oder Tiefschnitte visualisieren. Einen Gesamtüberblick über das Messergebnis erhält man durch eine dreidimensionale Iso-Oberflächen-Darstellung [4], die man durch Berechnung der Einhüllenden in $-z$ -Richtung und Verbindung aller Punkte eines bestimmten Amplituden-Schwellenwertes durch Oberflächen erhält. Die Datenverarbeitung und die zwei- und dreidimensionale Bild-darstellung werden mit dem institutseigenen Programm REKONS z. B. direkt im Anschluss an die Messung vorgenommen.

Bild 4 zeigt als Beispiel das Messergebnis eines nicht autofrettierten Testkörpers. Die z -Koordinate ist auf die Pulsgeschwindigkeit in Stahl skaliert, beinhaltet aber den Wassertorlauf, so dass die Positionen im Testkörper aus den relativen, nicht aus den absoluten z -Werten zu bestimmen sind. Das Eintrittsecho der Testkörperoberfläche ist aus dem Bild ausgeblendet worden. Man erkennt die Oberfläche der Bohrungskreuzung (gelb), die die Rückwand des Testkörpers (dunkelbraun) abschattet. Bei der roten Anzeige handelt es sich um die erste Mehrfachreflexion der Bohrungsoberflächen an der Oberfläche des Testkörpers. Die Rissanzeigen werden hier orange dargestellt. In diesem Beispiel wurden in allen vier Quadranten ähnlich große Risse erzeugt, die teilweise (z. B. vordere Rissanzeige) noch durch kleine eingebettete Risse strukturiert sind. Die Lage der einzelnen Anzeigen lässt sich durch Drehen des Bildes im Raum noch besser bestimmen.

Die Ultraschallabbildung der Risse entsprach in den Experimenten sehr gut den Fotografien aufgebrochener Risse. Unterschiede traten durch die besonderen Eigenschaften der Ultraschallabbildung auf. So entsprach der Beginn der Anzeigen durch Beugung an den Bohrungen nicht dem Rissbeginn.

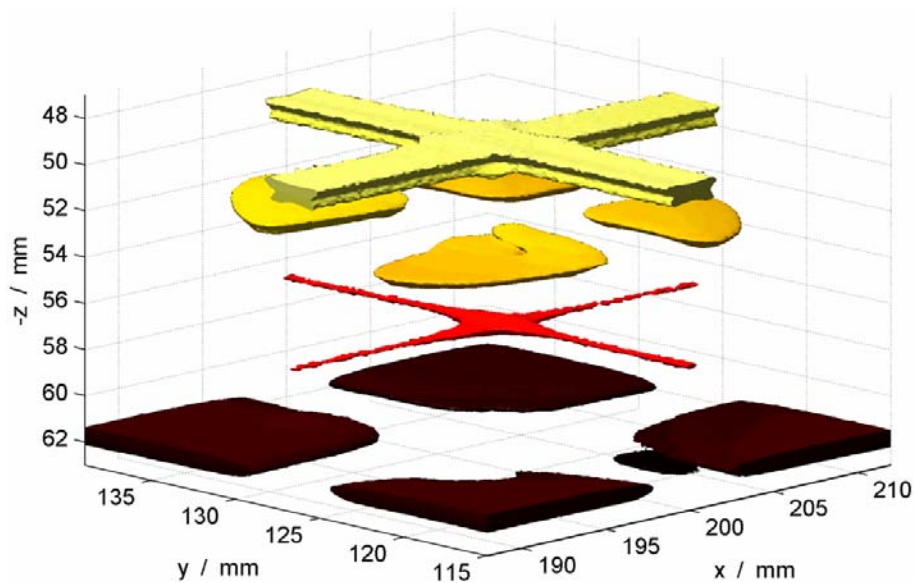


Bild 4. Dreidimensionale Iso-Oberflächen-Darstellung eines nicht autofrettierten Testkörpers

An den Anzeigen der Bohrungsoberflächen (Bild 4), aber auch an den Rissspitzen traten Artefakte auf, die vermutlich auf die Abbildungseigenschaften des punktfokussierten Prüfkopfs zurückzuführen sind. Durch die oft gekrümmte Lage der Risse im Raum waren die reflektierten Amplituden nicht gleichmäßig. Weitere Besonderheiten bei der Bestimmung der Risslänge und durch den Riss-schließeffekt werden im folgenden Kapitel beschrieben.

5 Messung der Längen der Ultraschall-Rissanzeigen

Die dreidimensionale Iso-Oberflächen-Darstellung gibt eine gute Übersicht über das Messergebnis, eignet sich durch den global eingestellten Schwellenwert jedoch nicht für eine quantitative Auswertung der Risslänge. Diese wurde an xy -Tiefenschnitten vorgenommen, nachdem wieder die Einhüllende in $-z$ -Richtung berechnet worden war. Für jede Rissanzeige wurde zunächst die Tiefenlage der größten Anzeigenlänge bestimmt. Mit einem halbautomatischen Verfahren, das ebenfalls in der REKONS-Software implementiert ist, wurden dann im xy -Tiefenschnitt die Umfangslinien der Rissanzeigen berechnet, bei denen die Amplitude auf einen bestimmten Anteil des Maximums abgefallen war (Bild 5).

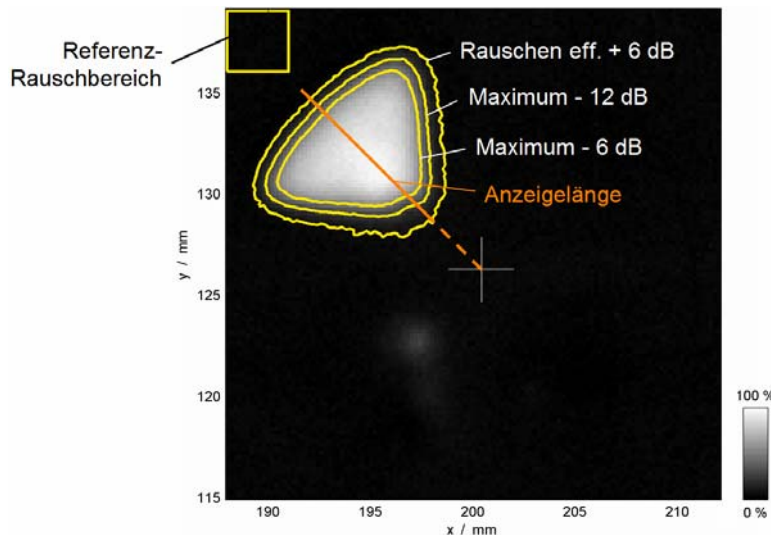


Bild 5. Bestimmung der Länge der Ultraschall-Rissanzeigen nach verschiedenen Kriterien

Als Kriterien wurden ein Abfall auf -6 dB und ein Abfall auf -12 dB des Maximalwertes verwendet, sowie als Vergleich ein Abfall auf das Doppelte des Effektivwertes des Rauschens in einem Referenzbereich ohne Anzeige. Die Länge der Ultraschallanzeige wurde als Differenz der Anzeigenlinie unter 45° und dem Rissbeginn an der Bohrungsver-schneidung bestimmt.

Bei den autofrettierten Testkörpern waren bei Umgebungsdruck keine Ultraschall-Rissanzeigen nachweisbar. Daraufhin wurden Untersuchungen mit wachsendem und fallendem Innendruck im Bereich von 1 bis 2.120 bar durchgeführt.

Bild 6 zeigt das Messergebnis für die vier Risse eines autofrettierten Testkörpers. Danach sind die Rissanzeigen erst bei einem Innendruck von mindestens 900 bar nach dem Kriterium „Maximum – 6 dB“ messbar. Bei noch größeren Innendrü-cken steigt die gemessene Anzeigenlänge bei drei Rissen an, bis bei 1.700 bar die maximale Anzeigenlänge erreicht wird. Bei dem vierten Riss wird die maximale Anzeigenlänge sprunghaft erreicht. Es zeigte sich keine signifikante Hysterese, d. h. die gemessenen Anzeigenlängen waren bei ansteigendem und bei abfallendem Innendruck bei den meisten Rissen gleich groß. Bei dem Kriterium „Maximum – 12 dB“ waren die Anzeigenlängen erst bei höheren Innendrü-cken messbar, und die Kurven verliefen steiler. Die maximale Anzeigenlänge wurde bei 1.800 bar erreicht.

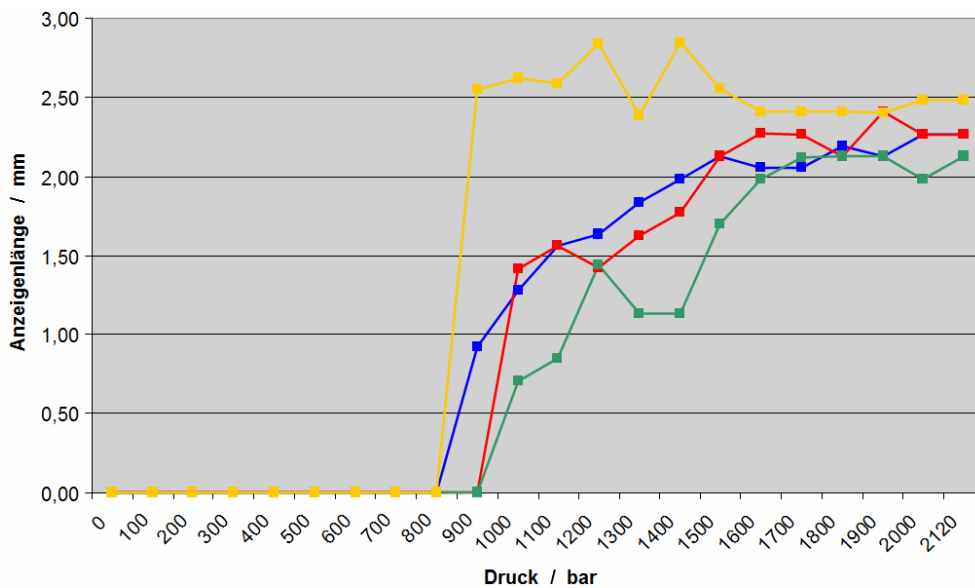


Bild 6. Rissöffnung von vier Rissen mit zunehmendem Innendruck (autofrettiertes Testkörper, Kriterium „Maximum – 6 dB“)

Das Messergebnis lässt sich nur so interpretieren, dass die Rissflanken in autofrettierten Testkörpern bei Umgebungsdruck durch die Eigenspannungen direkt aufeinander liegen und damit akustisch transparent sind. Erst bei relativ hohen Innendrücken öffnen sich die Risse und reflektieren einfallende Wellen.

Bei den nicht autofrettierten Testkörpern waren die Risse schon bei Umgebungsdruck nachweisbar, und die gemessene Anzeigenlänge stieg nur sehr leicht mit dem Innendruck an. Überraschend war, dass sich ein Riss von 1,7 mm Länge erst bei 600 bar öffnete.

6 Vorläufige Kalibrierung der Risslängen

Die bisherigen Messungen der Risslänge dienten vor allem der Verifizierung des Messprinzips und der Abschätzung des Einflusses der Messparameter, um die eigentlichen Untersuchungen vorzubereiten. Die Kalibrierung wurde daher nur an wenigen Testkörpern durchgeführt; die Ergebnisse sind vorläufig.

Zur Kalibrierung wurden die mit Ultraschall ermittelten Anzeigenlängen mit den lichtmikroskopischen, zerstörend gemessenen Ergebnissen in Beziehung gesetzt. Danach ergab sich bei den nicht autofrettierten Testkörpern und dem Kriterium „Maximum – 12 dB“ für Risslängen über 2,5 mm ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Messmethoden (Bild 7, links). Bei geringeren Risslängen zeichnet sich ein quadratischer Zusammenhang ab (Bild 7, rechts). Die Messunsicherheit wird vorläufig auf 0,2 mm abgeschätzt. Aus weiteren Messungen mit erhöhter Ortsauflösung in lateraler Richtung wurden die Nachweisgrenze (ebenfalls vorläufig) zu 0,6 mm und die Messgrenze für die Risslänge zu 1,0 mm bestimmt.

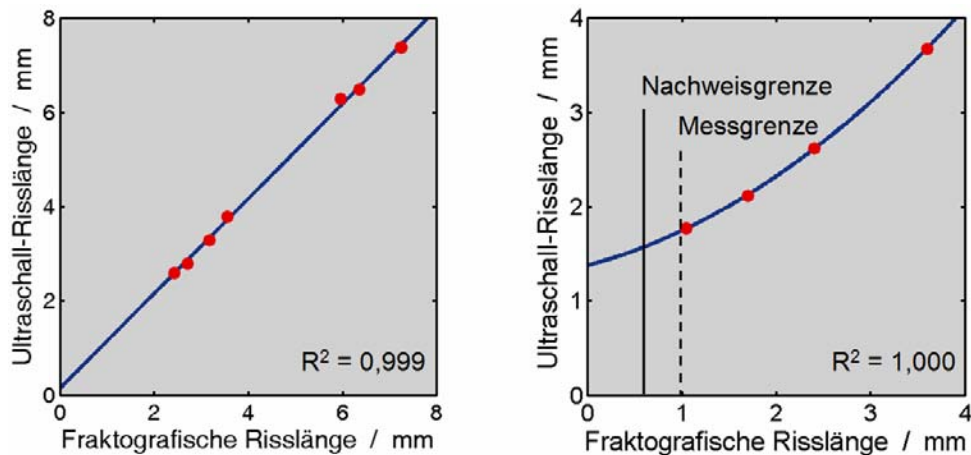


Bild 7. Vorläufige Kalibrierkurven für nicht autofrettierte Testkörper, Kriterium „Maximum – 12 dB“: Lineare Näherung für größere Risslängen (links; bei 640 bar Innendruck) bzw. quadratische Näherung für kleinere Risslängen (rechts; bei 1800 bar Innendruck)

Bei den autofrettierten Testkörpern wurde bisher nur ein geringer Risslängenbereich abgedeckt, so dass eine Kalibrierung nicht aussagekräftig ist. Nach einer ersten Einschätzung scheinen die Ergebnisse aber etwas stärker zu streuen als bei den nicht autofrettierten Testkörpern.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde ein Ultraschall-Abbildungssystem zur Messung der Risslängen von Volumenrissen in nicht autofrettierten und in autofrettierten Hochdruckbauteilen beschrieben. Damit wurden Messungen an Testkörpern mit gekreuzten Bohrungen durchgeführt, in denen durch Dauerschwingversuche Risse induziert wurden. Die Ultraschallanzeigen der Risse wurden in dreidimensionalen Iso-Oberflächen-Darstellungen und in zweidimensionalen Schnittbildern abgebildet. Während die dreidimensionale Darstellung zurzeit eher für einen Überblick über die Anzeigen geeignet ist, erfolgte die Auswertung in xy -Schnitten. Dabei mussten Abbildungsartefakte durch Fokussierungs- und Beugungseffekte berücksichtigt werden. Durch den Riss-schließeffekt waren die Risse in autofrettierten Bauteilen bei Umgebungsdruck nicht mit Ultraschall nachweisbar. Anhand von Messungen mit im Bereich von einem bis 2.120 bar variiertem Innendruck zeigte sich, dass vollständige Rissöffnungen bei 1800 bar erreicht wurden. Während sich die Rissöffnung bei einzelnen Rissen unterschiedlich verhielt, konnte kein Hystereseeffekt zwischen ansteigenden und abfallenden Drücken nachgewiesen werden. Zu denken gibt, dass in einem Fall auch bei nicht autofrettiertem Stahl ein Riss mit einer Länge von 1,7 mm unter Umgebungsbedingungen nicht nachweisbar war. Diese Besonderheiten betreffen den generellen Unterschied zwischen der realen Geometrie eines Risses und seiner Ultraschallanzeige, der bei Ultraschallmessungen immer zu beachten ist. Daher ist zur Bestimmung der Risslänge aus Ultraschallanzeigen eine Kalibrierung notwendig.

Zur Kalibrierung wurden Regressionskurven über mikroskopisch gemessenen Risslängen berechnet. Dabei wurden verschiedene Kriterien für die Bestimmung der Länge der Ultraschall-Rissanzeigen getestet. Das Kriterium „Maximum – 12 dB“ zeigte gut angepasste Regressionskurven, aber ein geringeres Detektionsvermögen bei schwachen Anzeigen. Umgekehrt war das Kriterium „Maximum – 6 dB“ auch für schwache Anzeigen geeignet, die Anpassung an die Kalibrierkurve war aber ungleichmäßiger. Rauschbasierte Kriterien bewährten sich nicht. Wegen der geringen Zahl an zur Kalibrierung geeigneten Risslängenmessungen sind die Kalibrierkurven vorläufig. In den Experimenten waren Risse ab

0,6 mm Länge nachweisbar und Risslängen ab 1,0 mm mit Ultraschall messbar. Die Messunsicherheit wird vorläufig mit ca. 0,2 mm abgeschätzt.

Im nun folgenden Regelbetrieb der Risslängenmessung sollen einige dutzend Testkörper zum Teil mehrfach untersucht werden. Aus der umfangreicheren Datenbasis werden die endgültigen Kalibrierkurven abgeleitet. Dabei wird auch über das zu verwendende Risslängenkriterium entschieden.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des BMWi/AiF-Projektes „Betriebsfestigkeit von Hochdruckbauteilen mit kleinen Schwingspielen großer Häufigkeit“ mit der Laufzeit 1.4.2009 bis 31.3.2011 durchgeführt. Die Autoren danken außerdem den Herren U. Tümmler und J. Winge (MFPA Weimar) sowie Herrn K. Fricke und Frau M. Huber (FH Jena) für Ihre Mitarbeit bei den Messungen.

Referenzen

- [1] R. Thumser, E. Herz, O. Hertel, J.W. Bergmann, M. Vormwald: *Betriebsfestigkeit Hochdruckbauteile: Vorhaben Nr. 880 – Betriebsfestigkeit gekerbter Hochdruckbauteile ohne und mit Autofrettage; Abschlussbericht*. Frankfurt am Main: FVV, 2009.
- [2] R. Thumser, M. Schickert, S. Kleemann, J. Winge, U. Gerth: Crack Growth Measurements in Notches Under Cyclic Internal Pressure Loading. In: *Proceedings 18th European Conference on Fracture*, Dresden, 30.8.– 3.9.2010. Dresden: 2010.
- [3] R. Thumser, W. Scheibe: Review of 20 Years Research in Fatigue of High Pressure Loaded Components. *Materials Testing* 53 (2011), S. 82–90.
- [4] M. Schickert, M. Krause: Ultrasonic Techniques for Evaluation of Reinforced Concrete Structures. In: Ch. Maierhofer *et al.*: *Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*. Vol. 2: Non-destructive Testing Methods. Cambridge: Woodhead, 2010, pp. 490–530.