

Parallele Erfassung von Dehnungen und Schallemissionen zur Zustandsüberwachung von heißen Metallkomponenten

Eberhard SCHULZE¹, Mareike STEPHAN¹

¹ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden

Kontakt E-Mail: eberhard.schulze@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Die Schallemissionsprüfung gilt insbesondere für die Analyse der Strukturintegrität ausgedehnter Rohrleitungssysteme und Lagertanks als gängige Methode der Zustandsüberwachung. Der Vorteil besteht in der Verwendung weniger Sensoren, die Schallemissionsereignisse aus dem Material aufzeichnen und orten. Parallel dazu kann in kritischen Bereichen kapazitive Dehnmesstechnik angebracht werden. Die Kombination beider Verfahren verspricht eine hohe Sicherheit bezüglich der gewonnenen Aussagen. Ziel eines im Sommer 2016 abgeschlossenen Forschungsprojektes war die Entwicklung eines Zustandsüberwachungsverfahrens, das Schallemissionsmesstechnik und Dehnungsmesstechnik zur Bewertung der Strukturintegrität von 600°C heißen Bauteilen in Kraftwerken und in Anlagen der chemischen Industrie nutzt. Die Schwerpunkte lagen auf der Sensortechnik, der sensornahen Elektronik, der Datenübertragung, dem Datenmanagement, den Auswertearithmen, der Interpretation der Messergebnisse hinsichtlich einer Prognose der Restnutzungsdauer. Durch Einsatz neuer Materialien für die Sensorik und die AVT wurden Schallemissionssensoren entwickelt, die direkt auf das heiße Überwachungsobjekt aufgebracht werden können.

Das Projekt umfasste umfangreiche Schallemissionstests während beheizter niederzyklischer Zugversuche an Zugproben unterschiedlicher Vorschädigung sowie den Aufbau einer Demonstrationsmessanlage unter Laborbedingungen. Als finaler Test in industrieller Umgebung wurden mehr als einjährige Kriechversuche an zwei druck-, temperatur- und zugbelasteten Rohrproben im Technikums-Maßstab durchgeführt. Die Ergebnisse dieser kombinierten Schallemissions- und Dehnungsmessungen belegen die prinzipielle Eignung dieses ZfP-Verfahrens zur Erfassung des Schädigungsgrades von heißen Strukturkomponenten aus warmfesten Stählen. Im Unterschied zu den unbefriedigenden Resultaten der AT-Messungen während niederzyklischer Versuche an beheizten Zugproben, bildet sich die Entwicklung von Strukturschäden auf Komponentenebene im Messbild gut ab. Die starke Streuung der elastischen Eigenschaften, die an Zugproben gleicher Kriechschädigung beobachtet wurde, fällt für die Messungen an größeren Strukturkomponenten nicht ins Gewicht oder ist sogar ein Vorteil für die Bewertung von deren Schwachstellen.

Einführung

Der zuverlässige Betrieb heißer Anlagen wie Rohrleitungen, Turbinen und Dampfkessel hängt in der Praxis von der Integrität des Materials ab. Dieses sicherzustellen, stellt insbesondere bei starker Wechselbelastung, wie sie durch häufiges Ab- und Anfahren in den Kraftwerken derzeit notwendig ist, eine große Herausforderung dar.

Die Schallemissionsprüfung gilt insbesondere für die Detektion des Rissfortschritts zur Überwachung ausgedehnter Rohrleitungssysteme und Lagertanks als gängige Methode der Fehlererkennung. Der Vorteil besteht in der Verwendung weniger Sensoren, die alle Schallemissionsereignisse aus dem Material aufzeichnen und orten. Parallel dazu können in kritischen Bereichen kapazitive Dehnmessstreifen angebracht werden. Die Kombination beider Verfahren verspricht eine hohe Sicherheit bezüglich der gewonnenen Aussagen.

Die Arbeiten zum hier vorgestellten Forschungsprojekt „Entwicklung eines dualen Hochtemperatursensorsystems für Schallemissions- und Dehnungsmessungen „HotConSens“ schließen direkt an die Untersuchungen im Vorgängerprojekt „HotPipes“ an, deren Ergebnisse auf dem 20. Kolloquium Schallemission vorgestellt wurden [1].

Projektschwerpunkte lagen auf Entwicklungsarbeiten zur Sensortechnik, der sensornahen Elektronik, der Datenübertragung, dem Datenmanagement sowie den Bewertungsalgorithmen. Einerseits erfolgten umfangreichen Schallemissionstests während beheizter niederzyklischer Zugversuche an Zugproben unterschiedlicher Kriechschädigung. Andererseits wurden mehr als einjährige Kriechversuche an zwei druck-, temperatur- und zug-belasteten Rohrproben im Technikums-Maßstab durchgeführt.

Schallemissionsmessungen während beheizter Zugversuche an Kriechproben

Vom österreichischen Projektpartner IWS–Institut für Werkstofftechnik und Schweißtechnik der TU-Graz wurden Proben aus 9% Cr-Stahl mit unterschiedlicher Kriechschädigung für die mit Schallemissionsmessungen begleiteten niederzyklischen Zugversuche erzeugt. Es wurden folgende Kriechproben untersucht:

<i>Schädigungsgrad</i>	<i>Probenanzahl</i>	<i>Dauer im Kriechofen (650°C)</i>
ungeschädigt (0)	5	0 h (nur wärmebehandelt)
leicht geschädigt (1)	5	66 MPa, 6000 h
mittel geschädigt (2)	5	66 MPa, 8000 h
stark geschädigt (3)	5	90 MPa, 1600 h.

Abb. 1 zeigt den Messaufbau der beheizten Zugversuche und die Probengeometrie. In den Darstellungen der Dehnung in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastzyklen in Abb. 2 ist das Verspröden der Proben im Verlauf der Zugversuche erkennbar. Der Sprödbbruch der Probe zeichnet sich in Abb. 3 durch einen steilen Anstieg der kumulativen Schallemissionen (Events), die im freiliegenden Teil der Probe geortet wurden, ab. Parametrisierbare Schallemissionen, die durch Versatzvorgänge in den Proben initiiert werden, treten vor dem Bruchzeitpunkt auf. In Abb. 4 ist die Lage der Schallemissionen im Kraft-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Aus dem Vergleich aller Emissionen (Hits, Abb. 4 links) und den im freiliegenden Teil der Probe georteten Ereignissen (Events, Abb. 4 rechts) lässt sich ebenfalls der Sprödbbruch im Gewindebereich der Probe S3-26 nach ca. 10000 Lastzyklen abschätzen.

Wie die Abb. 3 zeigt, ist die Ausbeute an akustischen Emissionen vor dem makroskopischen Bruch bei den steiferen Proben entsprechend geringer. Für die Probenserie 3 (Proben 21-26) schließen die Dehnraten durch die niederzyklische Belastung gut an die der

Kriechversuche an, dies war im Vorgängerprojekt nicht der Fall. Proben der Kriechbelastungsstufe 3 zeigen allerdings bereits plastische Deformationen, d.h. Verjüngungen im Zentrum der Proben, die sich erheblich auf die Dehnungen bei den niederzyklischen Zugversuchen auswirken. Für die Probenserie 1 mit der geringsten Kriechbelastung gilt dies allerdings nicht. Beispielsweise sind an Probe 12 mit der geringsten Kriechdehnung die stärksten Verformungen im niederzyklischen Zugversuch aufgetreten. Belastungsstufenübergreifend konnte keine deutliche Abhängigkeit zwischen Kriechdehnung und Dehnrate bei den niederzyklischen Zugversuchen ermittelt werden. Wie bei den Messungen im Vorgängerprojekt „Hot Pipes“ überlagert die unterschiedliche Elastizität der Einzelproben bei den niederzyklischen Zugversuchen die Einflüsse der Kriechschädigung. Im Vorgängerprojekt war dafür eine unterschiedliche Vorbelastung der Proben verantwortlich gemacht worden.

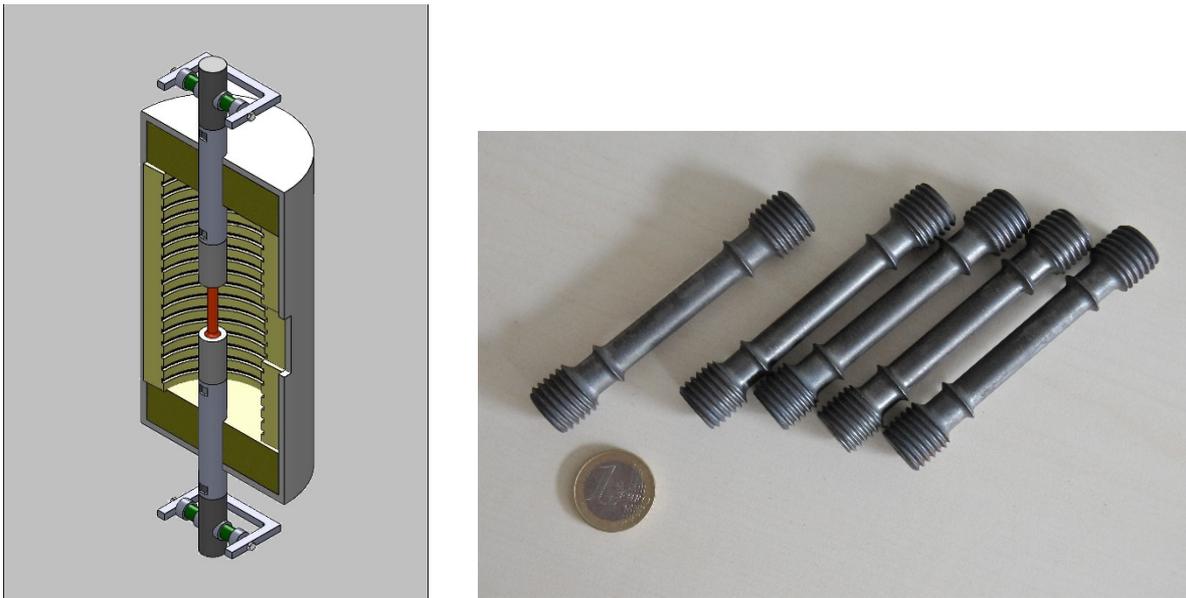


Abb. 1: links.: Akustische Instrumentierung mit je zwei Sensoren ober- und unterhalb des Hochtemperaturofens am Gestänge der Zugmaschine, rechts: Kriechproben 10 mm x 90 mm

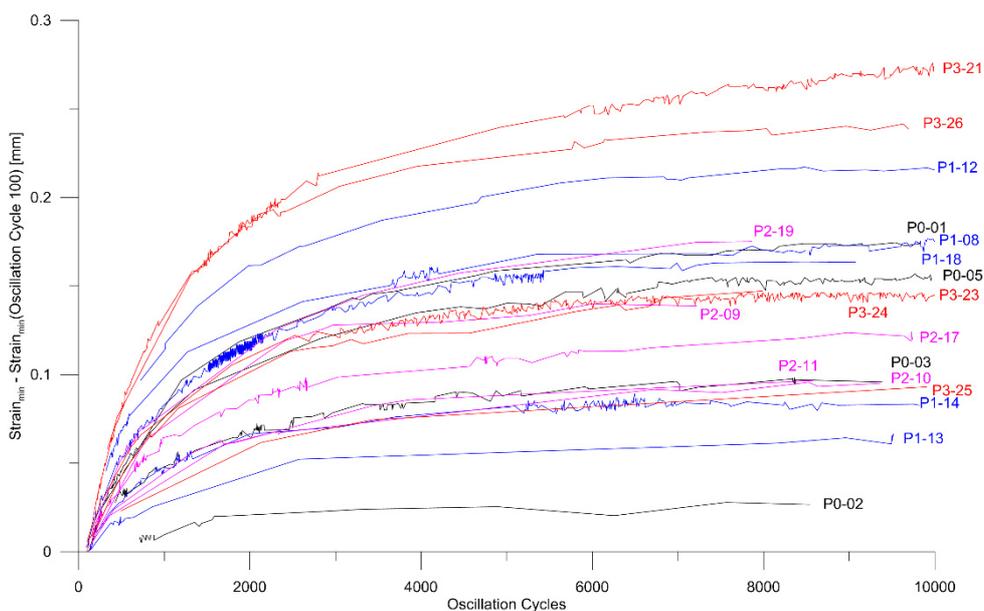


Abb. 2: Dehnung im Entlastungspunkt in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastzyklen, bezogen auf die Dehnung nach 100 Lastzyklen, für die untersuchten Zugproben P (Schädigungsgrad-Probennummer)

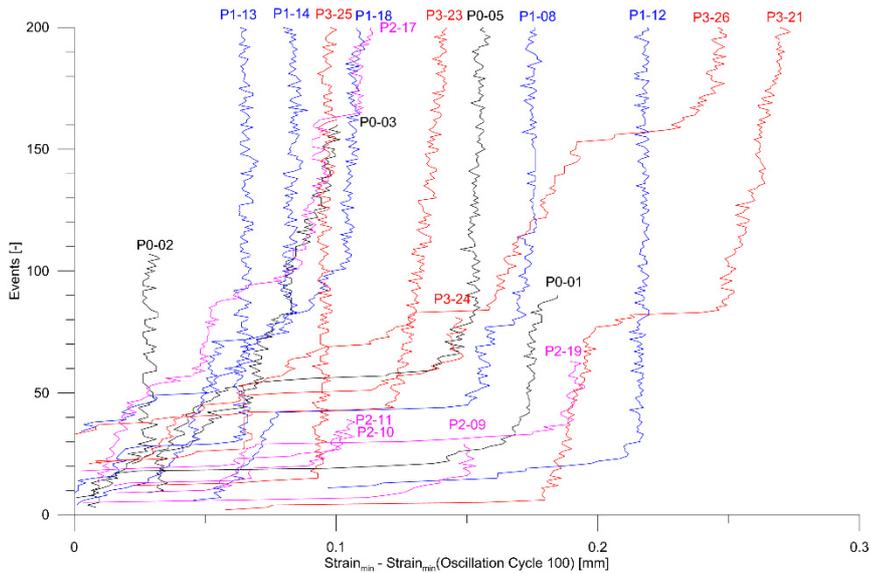


Abb. 3: geortete akustische Emissionen in Abhängigkeit von der Dehnung der Probe, bezogen auf die Dehnung nach 100 Lastzyklen, für die untersuchten Zugproben P (Schädigungsgrad-Probennummer)

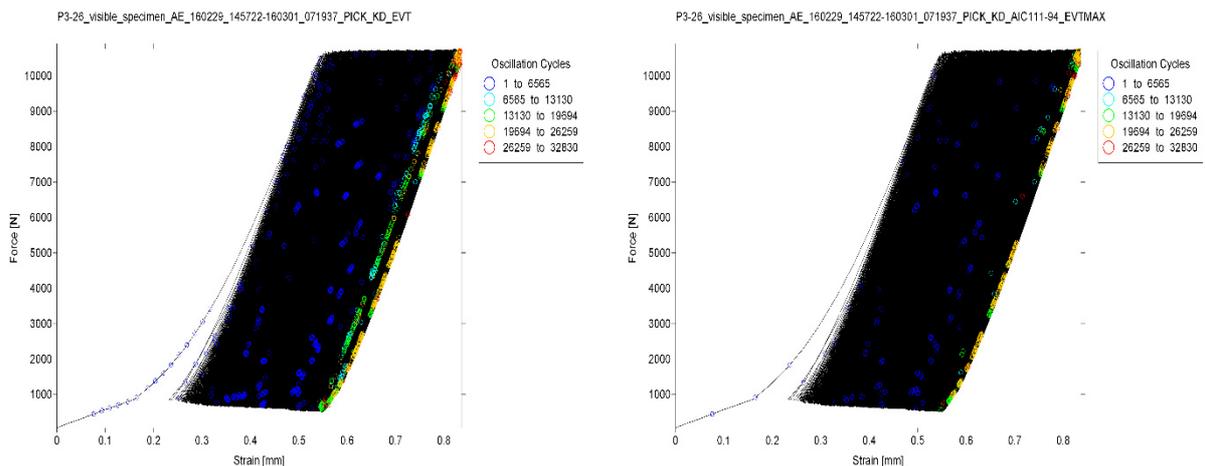


Abb. 4: Probe S3-26 (hoher Schädigungsgrad), Lage der akustischen Emissionen im Kraft-Dehnungs-Verlauf, farbkodiert links Kraftzyklus zum Zeitpunkt des Hits, recht: Kraftzyklus zum Zeitpunkt des Events

Die Proben im aktuellen Projekt sind allerdings aus Neumaterial gefertigt worden. Eine Probenvorbehandlung vor den Kriechversuchen sollte die Homogenität des Probenmaterials verbessern. Durch Austenitisieren mit anschließendem Abschrecken auf Temperaturen oberhalb der Martensitstarttemperatur wurden Eigenspannungen im warmfesten Stahl vermindert und die Zähigkeit erhöht. Da einerseits die unterschiedliche Elastizität der Einzelproben bei den niederzyklischen Zugversuchen die Einflüsse der Kriechschädigung überlagert und andererseits die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse maßgeblich von der Steifigkeit der Probe abhängen ist zumindest die Schallemissionsrate nicht direkt mit der Kriechschädigung korrelierbar. Auch das Einbeziehen weiterer Schallemissionskenngrößen wie z.B. von Energie und Frequenzparametern ergab keine deutliche Korrelation zur Kriechschädigung der Proben. Einziger Ausweg den Grad der Kriechschädigung mit der Schallemissionsanalyse zu analysieren bleiben Untersuchungen auf Bauteilebene, die aufgrund des größeren Messvolumens gezielt lokale Elastizitätsänderungen nachweisen können. Dieser Ansatz wurde mit dem im Anschluss dargestellten kombinierten Test von Schallemissions- und Dehnungsmessungen an druck-, zug- und temperaturbelasteten Rohrproben im Technikumsversuch realisiert.

AT-begleitete Kriechversuche an Rohrproben im Technikums-Maßstab

Die Installation des Schallemissionssystems und der Dehnungssensorik erfolgte in Zusammenarbeit mit der Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH Dresden. Es wurde ein am IKTS entwickeltes modulares Schallemissionsmesssystem eingesetzt. Abb. 5 veranschaulicht den Messaufbau der beiden Versuche mit je 8 über Wellenleiter angekoppelten Schallemissionssensoren pro Probe, Abb. 6 zeigt die Probengeometrie.



Abb. 5: Teststand für Kriechversuche an zwei P91-Rohrproben, links Probe 1, rechts Probe 2,) Instrumentation pro Probe: zwei kapazitive Hochtemperatur-DMS (longitudinal, in Umfangsrichtung), zwei Thermoelemente zur Temperaturmessung, 8 senkrecht auf die Probenwandung aufgeschweißte, durch die Wärmeisolation geführte Wellenleiter bis hin zu Exponentialtrichtern mit Piezosensoren für die Schallemissionsanalyse (im Vordergrund)

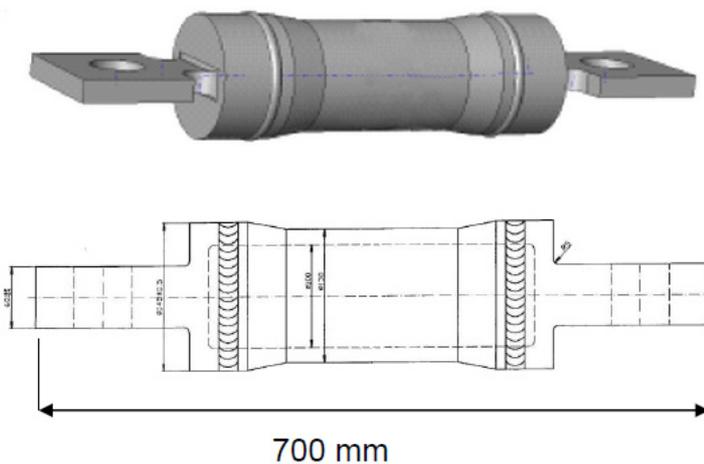


Abb. 6: Geometrie der P91-Rohrproben, Innendurchmesser 100 mm, Außendurchmesser 130 mm

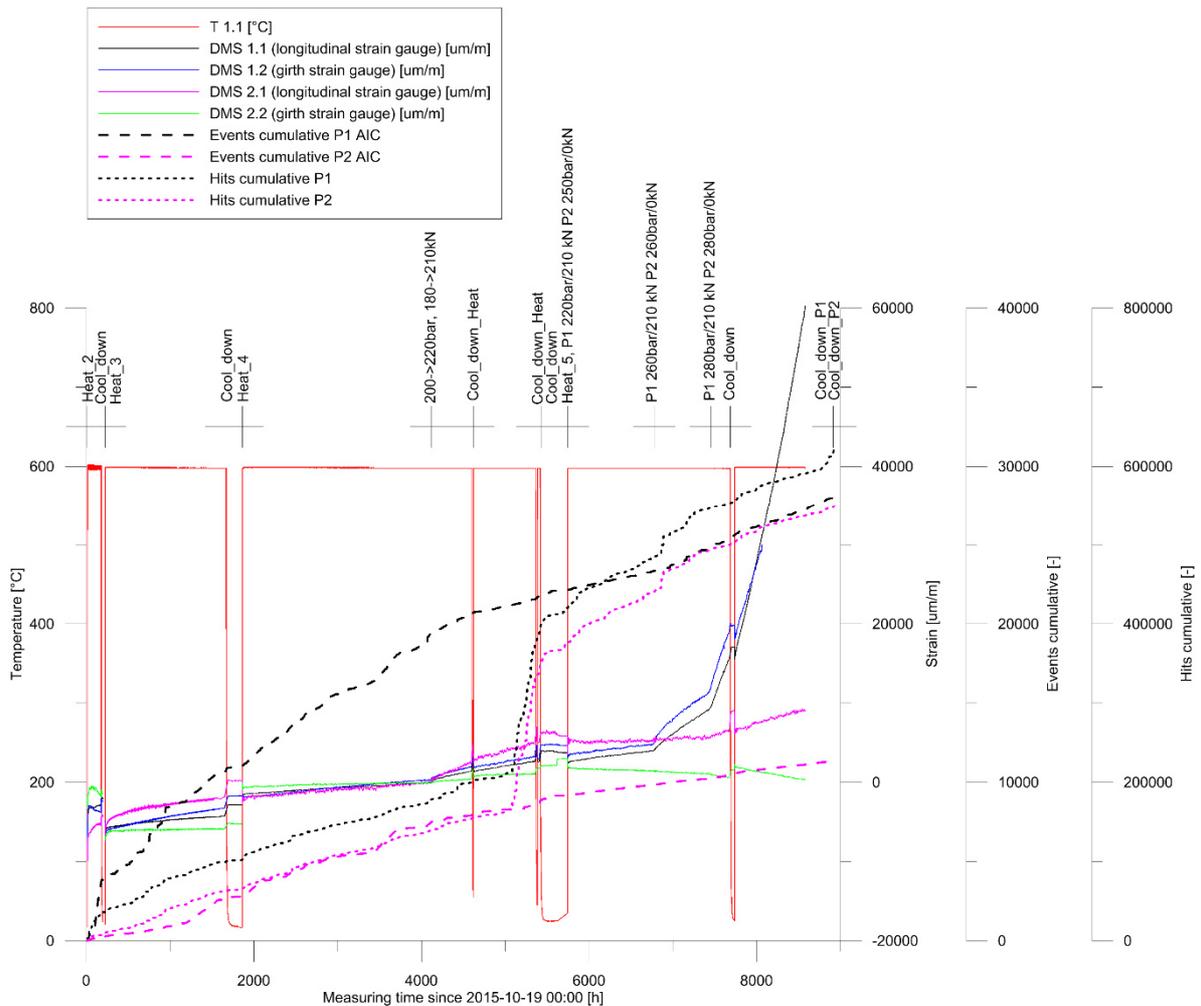


Abb. 7: kumulierte Anzahl der an Probe 1 und 2 georteten Schallemissionen im Messzeitraum vom zweiten Aufheizen am 19.10.2015 bis zum Versuchsstopp von Probe 1 am 24.10.2016 bzw. von Probe 2 am 25.10.2016 im Zusammenhang mit Betriebsparametern

Die Schallemissionsuntersuchungen und Dehnungsmessungen an den beiden druck-, temperatur- und zug-belasteten Rohrproben bei Siempelkamp liefen vom 19.10.2015 nahezu unterbrechungslos bis zum 24. (Probe 1) bzw. 25.10.2016 (Probe 2). Es wurden Schallemissionsdaten, Dehnungswerte sowie Druck und Temperatur aufgezeichnet.

Abb. 7 zeigt die kumulierte Anzahl der an Probe 1 und 2 georteten Schallemissionen im gesamten Messzeitraum seit dem 2. Aufheizen am 19.10.2015 bis zum 24.10.2016 (Probe 1) bzw. 25.10.2016 (Probe 2) im Zusammenhang mit Änderungen der Betriebsparameter sowie den Verläufen von Temperatur und Dehnungen. Am 7.4.2016 war der Innendruck für beide Proben von anfänglich 200 bar auf 220 bar gesteigert und die Längskraft von 180 auf 210 kN erhöht worden, um die Rohrproben schneller zu schädigen. Dies hatte bei beiden Proben deutlich stärkere Dehnungen zur Folge (in Abbildung 44 ab 4113 h). Die Anzahl der georteten Schallemissionen folgen diesem Trend nicht, hier kann im Gegenteil ein Abflachen der Kurven kumulativer Events in diesem Zeitbereich beobachtet werden. Am 1.06.2016 kam es zum Bersten des Druckzylinders zum Aufbringen der Längskraft an Probe 2. Ab diesem Tag wurde die Probe 1 mit 220 bar und 210 kN Längskraft beaufschlagt, die Probe 2 mit 250 bar und ohne Längskraft. Der Innendruck wurde bei beiden Versuchen am 27.07.2016 auf 260 bar und am 05.09.2016 auf 280 bar gesteigert. Gleichzeitig wurde die Längskraft für Probe 1 am 05.09.2016 von 210 kN auf 220 kN erhöht. Diese Belastungssteigerungen führten an Probe 1 zu einer Erhöhung der gemessenen Dehnungen und einer deutlichen Steigerung der Schallemissionsrate. Der Versuch an Probe 1 musste am 24.10.2016 gestoppt werden,

weil ein deutlicher Abfall des Innendruckes aufgetreten war, der seine Ursache in dem in Abb. 8 zu erkennenden Querriss an der Rückseite der Probe hat. An Probe 2 konnte das Belastungsregime aufgrund der fehlenden Längskraft nicht bis zum makroskopischen Versagen der Probe gesteigert werden. Wie Abb. 9 zeigt, sind bis zum Versuchsstopp am 25.10.2016 keine sichtbaren äußeren Schäden an Probe 2 entstanden.



Abb. 8: Probe 1 nach Versuchsstopp am 24.10.2016 mit Ausbeulung und Querriss an der Rückseite, der zu einem Abfall des Probeninnendruckes führte



Abb. 9: Probe 2 ohne erkennbare makroskopische Schäden nach Versuchsstopp am 25.10.2016

Als Hauptproblem der Messungen hat sich der extrem hohe Anteil von über die Wellenleiter eingekoppelten elektromagnetischen Störimpulsen herausgestellt. Nur etwa fünf Prozent aller Hits konnten als akustische Ereignisse geortet werden. Besonders deutlich ist in Abb. 7 ein markanter Anstieg in beiden Kurven der kumulativen Schallemissionen (Hits) nach ca. 5100 Versuchsstunden zu erkennen, der auf eine extrem hohe Anzahl elektromagnetischer Störimpulse zurückführbar ist und sich deshalb nicht in den Kurven georteter Ereignisse (Events) abzeichnet. Zur Abschirmung elektromagnetischer Störungen wurde deshalb vom IKTS ein Exponentialtrichter für eine Wellenleiterlösung mit gehaustem Piezoelement entwickelt und getestet.

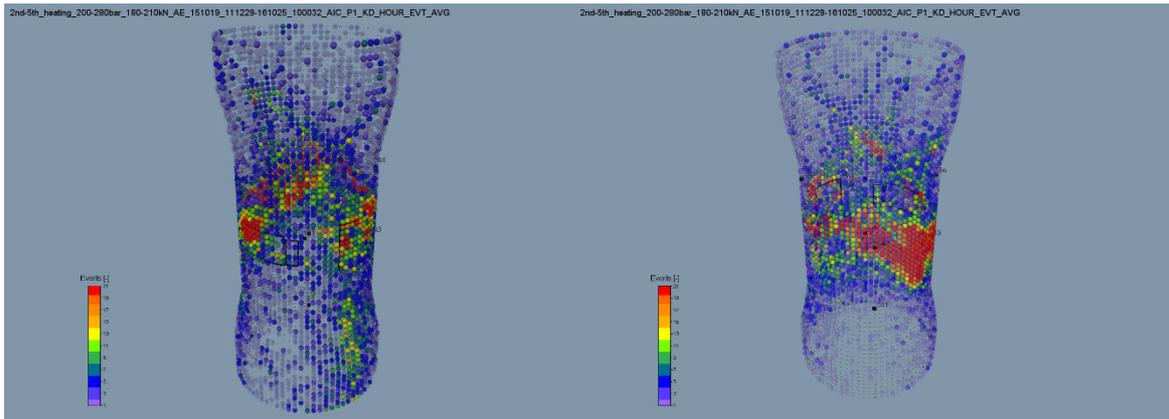


Abb. 10: Lage der an Probe 1 im gesamten Messzeitraum vom zweiten Aufheizen am 19.10.2015 bis zum 24.10.2016 georteten Schallemissionen, farbcodiert: Anzahl der Events in den 5mmx5mmx5mm großen Volumenelementen, links: Frontalansicht, rechts: Rückansicht

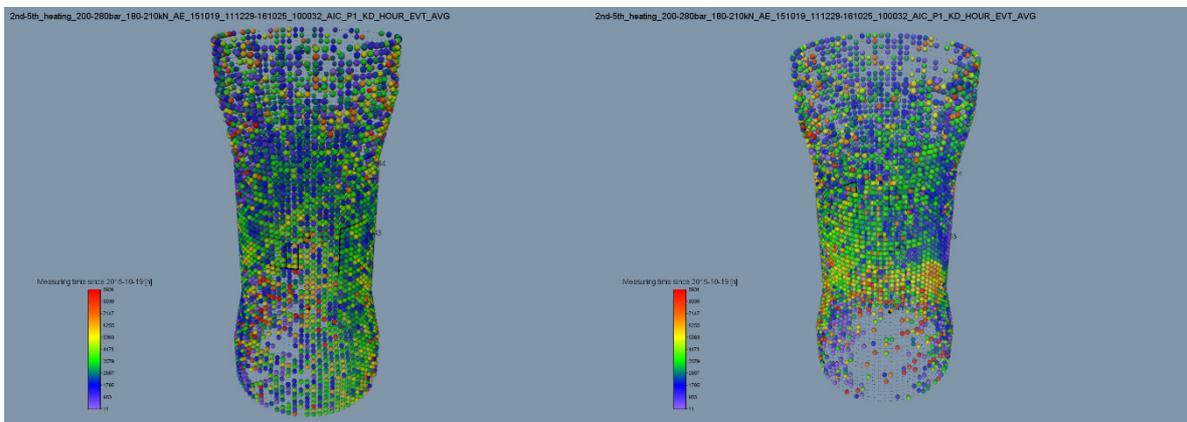


Abb. 11: Lage der an Probe 1 im gesamten Messzeitraum vom zweiten Aufheizen am 19.10.2015 bis zum 24.10.2016 georteten Schallemissionen, farbcodiert: Messzeit seit Versuchsbeginn in Stunden, links: Frontalansicht, rechts: Rückansicht

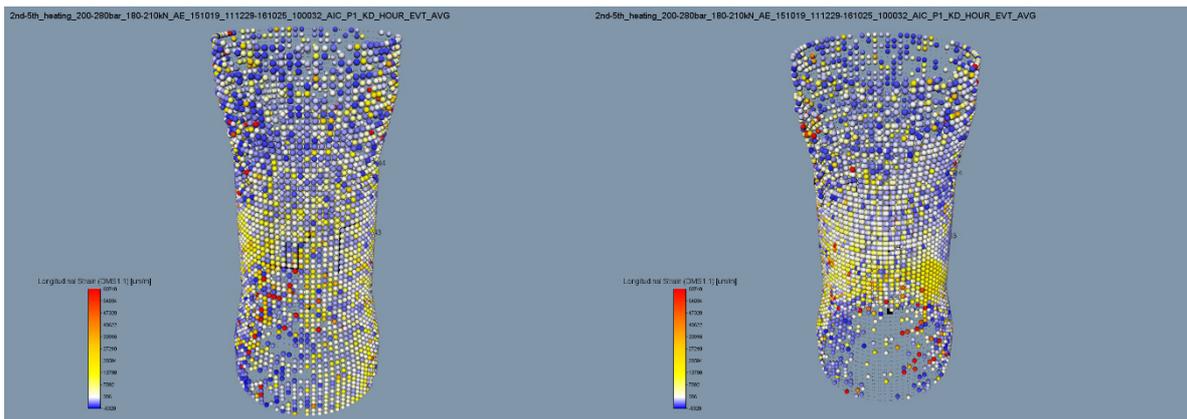


Abb. 12: Lage der an Probe 1 im gesamten Messzeitraum vom zweiten Aufheizen am 19.10.2015 bis zum 24.10.2016 georteten Schallemissionen, farbcodiert: Longitudinal-Dehnung (DMS1.1), links: Frontalansicht, rechts: Rückansicht

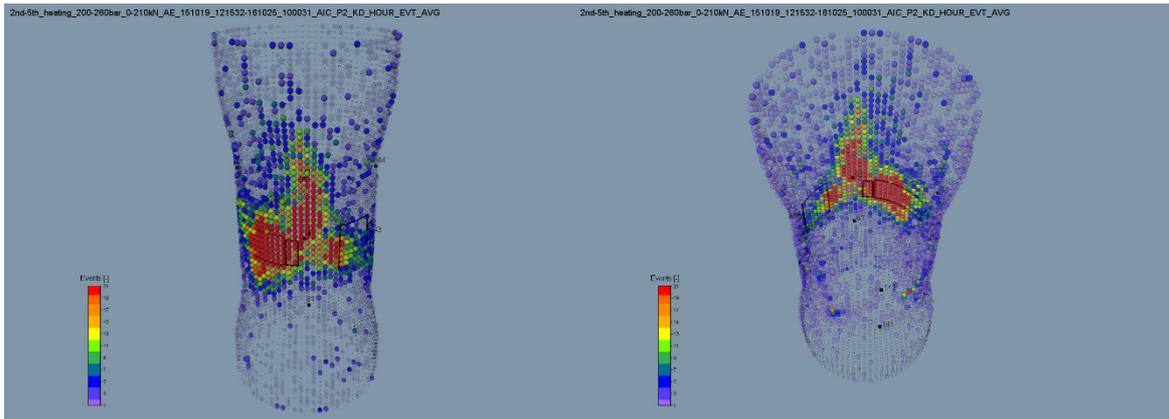


Abb. 13: Lage der an Probe 2 im gesamten Messzeitraum vom zweiten Aufheizen am 19.10.2015 bis zum 25.10.2016 georteten Schallemissionen, farbcodiert: Anzahl der Events in den 5mmx5mmx5mm großen Volumenelementen, links: Frontalansicht, rechts: Rückansicht

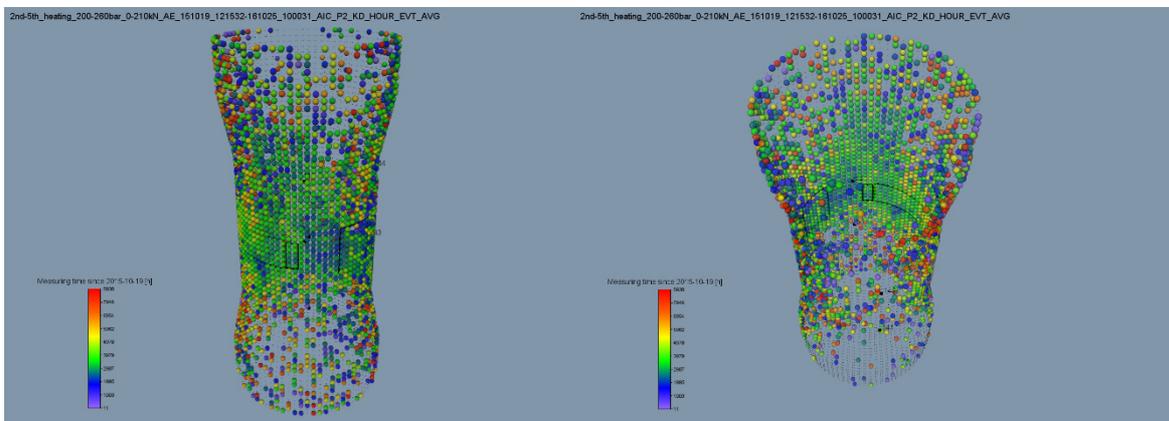


Abb. 14: Lage der an Probe 2 im gesamten Messzeitraum vom zweiten Aufheizen am 19.10.2015 bis zum 25.10.2016 georteten Schallemissionen, farbcodiert: Messzeit seit Versuchsbeginn in Stunden, links: Frontalansicht, rechts: Rückansicht

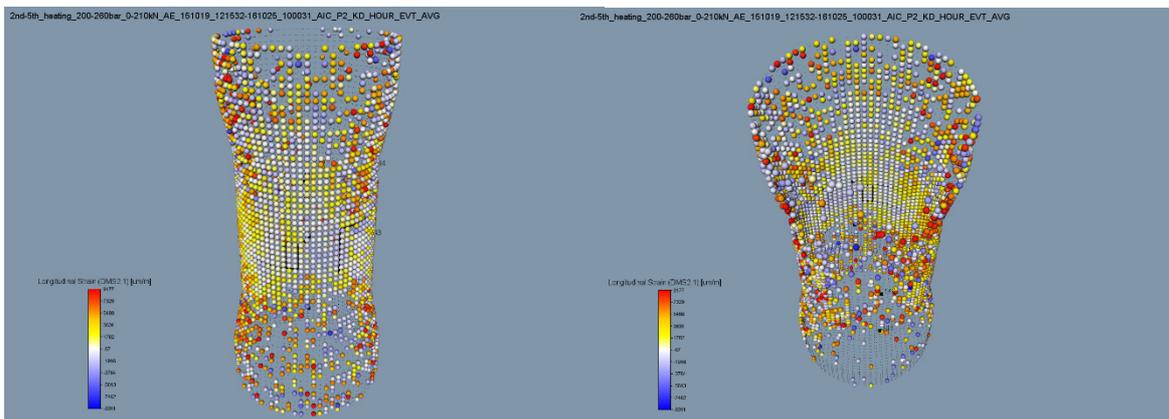


Abb. 15: Lage der an Probe 2 im gesamten Messzeitraum vom zweiten Aufheizen am 19.10.2015 bis zum 25.10.2016 georteten Schallemissionen, farbcodiert: Longitudinal-Dehnung (DMS2.1), links: Frontalansicht, rechts: Rückansicht

Abb. 10 bis Abb. 15 enthalten 3-D-Ortungsplots der Schallemissionen an beiden Proben im gesamten Messzeitraum vom zweiten Aufheizen am 19.10.2015 bis zum Versuchsstopp am 24.10.2016 (Probe 1) bzw. 25.10.2016 (Probe 2). Farbcodiert sind die Anzahl der georteten Schallemissions-Bursts (Events) in den 5mmx5mmx5mm großen Volumenelementen, der zeitliche Verlauf in Stunden seit Versuchsbeginn sowie Mittelwerte der Längsdehnung zum Zeitpunkt der Events.

Die parametrisierten Ortungsplots zeigen deutliche Unterschiede zwischen Probe 1 und Probe 2, die zeitlich und räumlich gut mit der Schadensentwicklung korrelieren. Im Versuchsablauf an Probe 1 tritt im Winkelbereich um 9:00 (frontal gesehen links, in Rückansicht rechts) frühzeitig eine Häufung von Schallemissionen auf (s. Abb. 11 rechts), die zu einem wesentlich steileren Anstieg der kumulativen Events in Abbildung 44 führt, als dies bei Probe 2 der Fall ist. Weitere hier nicht dargestellte parametrisierte Ortungsplots zeigen, dass in diesem Probenbereich höherfrequente, amplitudenschwache Bursts emittiert wurden, die durch Temperaturanstiege provoziert wurden. Im weiteren Versuchsverlauf treten Schallemissionen gehäuft an der Rückseite im Zentrum der Probe 1 auf, im finalen Versuchsabschnitt vermehrt im unteren Teil der Probe (Abb. 11 rechts). Die Mittelwerte der Längsdehnungen in den Volumenelementen bilden die Rissbildung beim makroskopischen Versagen der Probe nur unzureichend ab (Abb. 12 rechts).

An Probe 2 konnten Häufungen von Schallemissionen vor allem im Frontalbereich der Probe geortet werden (Abb. 13), die auf vermehrte Rissbildungen nach einer Versuchszeit von ca. 2500 h hindeuten (Abb. 14). Leider verhinderte der Ausfall der Längskraft an dieser Probe stärkere Dehnungen bis hin zum makroskopischen Versagen.

Die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse im Rahmen der mehr als einjährigen Kriechversuche an den beiden druck-, temperatur- und zug-belasteten Rohrproben bei Siempelkamp belegen die prinzipielle Eignung dieses ZfP-Verfahrens zur Erfassung des Schädigungsgrades von heißen Strukturkomponenten aus warmfesten Stählen. Im Unterschied zu den oben dargestellten unbefriedigenden Ergebnissen der AT-Messungen während niederzyklischer Versuche an beheizten Zugproben, bildet sich die Entwicklung von Strukturschäden im Messbild gut ab. Die starke Streuung der elastischen Eigenschaften, die an Zugproben gleicher Kriechschädigung beobachtet wurde, fällt für die Messungen an größeren Strukturkomponenten nicht ins Gewicht oder ist sogar ein Vorteil für die Bewertung von deren Schwachstellen.

Danksagung

Das F+E-Projekt „Entwicklung eines dualen Hochtemperatursensorsystems für Schallemissions- und Dehnungsmessungen – HotConSens“ wurde vom BMWi als Kooperationsprojekt im Rahmen des „Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM)“ gefördert.

Deutsche Projektpartner waren das Fraunhofer IKTS, die MaTecK GmbH, die Teletronic Rossendorf GmbH und Thomas Werner Industrielle Elektronik e. Kfm. Im Rahmen des „Transnational Programme EraSME, 14th Call“ waren die österreichischen Projektpartner VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, IWS - Institut f. Werkstofftechnik & Schweißtechnik TU-Graz und TÜV Austria Services GmbH einbezogen.

Referenzen

[1] E. Schulze: Schallemissionsanalyse zur Zustandsüberwachung von heißen Metallkomponenten, 20. Kolloquium Schallemission, 18. - 19. Juni 2015, Garmisch-Partenkirchen, Vortrag 2

[2] M.R. Ahmadi, B. Sonderegger, S. D. Yadav, M.C. Poletti, Institute of Materials Science and Welding, Graz University of Technology: Modeling and Simulation of Pores during Creep, THERMEC Conference, Graz 01/06/2016