

# Schallemissionsanalyse zur Zustandsüberwachung von heißen Metallkomponenten

Eberhard SCHULZE \*

\* Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme,  
Institutsteil Materialdiagnostik IKTS-MD Dresden

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

Für die Anwendung der Schallemissionsanalyse an heißen Komponenten wie Rohrleitungen sind besondere Applikationstechniken notwendig, um den Sensor vor der Hitze zu schützen. Das Fraunhofer IKTS-MD hat dafür eine Wellenleiterlösung entwickelt, die diese Anforderungen erfüllt.

Wesentliche Herausforderung bei der Anwendung der Schallemissionsanalyse in industrieller Umgebung ist das starke Umgebungsrauschen. Dieser Anforderung begegnet das am Fraunhofer-Institut entwickelte akustische Messsystem durch eine hohe Messwertdynamik, Speicherung und Bewertung der vollständigen Wellenformen sowie durch spezielle Auswertalgorithmen.

Die Attraktivität des Verfahrens liegt in der vergleichsweise geringen Anzahl von Sensoren, mit denen die Integrität großer Anlagenbereiche (z.B. mehrere Meter unter hoher Wechsellast stehender Heißdampfleitung) dauerhaft überwacht werden kann. In den vorgestellten Forschungsarbeiten sollten Zusammenhänge zwischen den über längere Zeiträume ermittelten Schallemissions-Häufigkeiten bzw. – Parametern und Gefügeständen aufgedeckt werden. Die zuverlässige Ermittlung von Kriechporen in Bauteilen – als Frühstadium der Kriechschädigung – ist nach dem heutigen Stand der Technik und Wissenschaft nur mit der Gefügeabdrucktechnik („Replica“) möglich. Ein Problem stellt die geringe Einflusszone eines Replica-Abdrucks dar, die keineswegs repräsentativ für das gesamte Bauteil sein muss. Auch aus diesem Grund sind neue, möglichst integrale Verfahren zur Bewertung der Restlebensdauer von zeitstandbelasteten Kraftwerkskomponenten von großem Interesse.

Zur Aufklärung der Quellmechanismen der akustischen Emissionen wurden Zugversuche an unterschiedlich vorgeschädigten Laborproben bei hohen Temperaturen mit Schallemissionsmessungen begleitet. Für die Verifizierung des Verfahrens erfolgten Erprobungsphasen des Gesamtmesssystems unter den Betriebsbedingungen eines Kraftwerks an einem Bypass.

## Einführung

Kraftwerke sind bestrebt, zur Verbesserung ihres Wirkungsgrades die Betriebstemperatur zu steigern, wodurch der Einsatz neuer Stahlsorten und die dauerhafte Überwachung der



Bauteile an kritischen Stellen notwendig werden. Hinsichtlich der Materialermüdung treten zunehmend Kriechvorgänge im Stahl in den Vordergrund, deren Bewertung nach wie vor sehr schwierig ist. Es existiert außer der punktuellen Spannungs-Dehnungsmessung kein Standardverfahren, welches Rohrleitungen im Hochtemperaturbereich zuverlässig überwachen kann.

Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes „Hot Pipes“ wurde untersucht, wie sich das Ermüdungsverhalten von Zugproben aus 9%Cr-Stahl im Labormaßstab im Ergebnis von Schallemissionsmessungen abzeichnet. Dafür standen eine niederzyklische Zugmaschine der Firma Zwick und ein integrierter Hochtemperaturofen zur Verfügung (Abbildung 1). Die in Kriechversuchen vorgeschädigten Zugproben wurden bei verschiedenen Temperaturen und Zugspannungen mit Schallemissionsmessungen überwacht. Bei diesen Untersuchungen wurden akustische Signale, die in der Probe durch die niederzyklische Belastung und die damit verbundenen Relaxationsprozesse entstehen, erfasst.

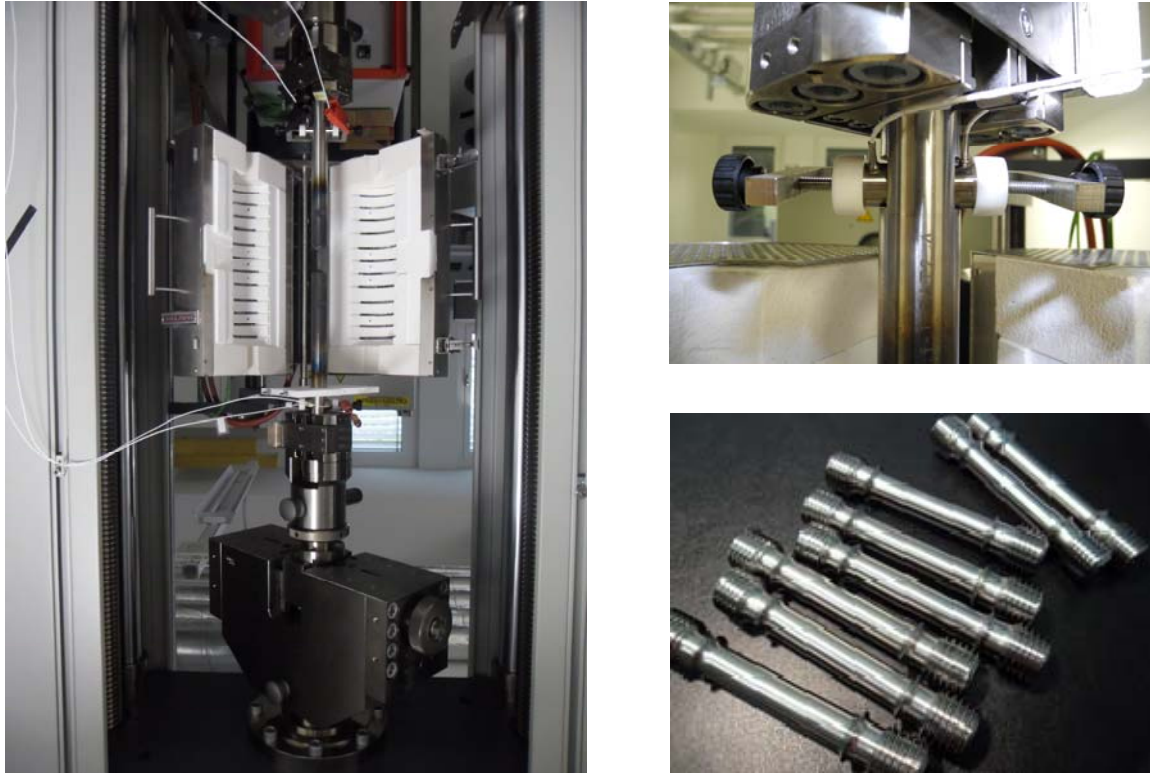
Zur in situ Erprobung des Schallemissionsverfahrens wurde die am Fraunhofer IKTS-MD entwickelte Wellenleiterlösung unter den Betriebsbedingungen eines Kraftwerks an einem Bypass getestet.

## **1. Hochtemperatur-Zugexperimente im Labormaßstab**

Die Technik der Schallemissionsanalyse an Metallkomponenten basiert darauf, dass dynamische Verschiebungen im Nanometer-Bereich an der Oberfläche von belasteten Prüfobjekten mittels hochempfindlicher piezoelektrischer Sensoren im Frequenzbereich von ca. 50 kHz bis 1 MHz detektiert und in elektrische Signale umgewandelt werden. Diese Oberflächenverschiebungen werden durch akustische Wellen verursacht, welche durch kurzzeitige, sehr kleine Materialverschiebungen, zum Beispiel infolge Rückfederung des Materials bei schnell ablaufenden Prozessen, wie Mikrorissbildung, Rissfortschritt, Rissuferreibung etc. entstehen.

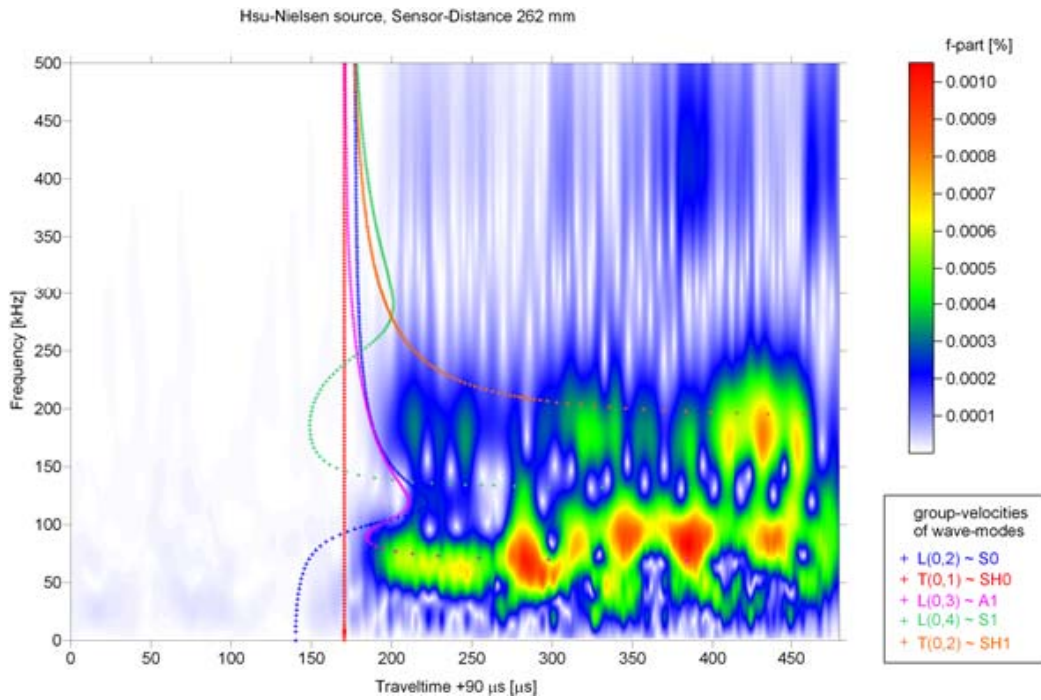
Aus der Laufzeit der Signale von den einzelnen schallemittierenden Quellen (aktive Risse, Verbundstörungen, Reibung) zu je einem der beidseits der Zugprobe angebrachten Sensor kann mittels linearer Ortung auf die Position der aktiven Schädigung zurückgerechnet werden und es können Störgeräusche im Einspannbereich ausgegliedert werden. Um eine hohe Ankoppelgüte der Sensoren zu gewährleisten wurden je zwei Sensoren beidseits der Zugprobe instrumentiert und die Sensorpaarung mit den geringeren Laufzeitdifferenzen zur Auswertung herangezogen. Aufgrund der Temperaturen bis 600°C während des Experimentes wurden die Sensoren außerhalb des Hochtemperaturofens angebracht und das Zuggestänge als Wellenleiter genutzt. Wegen der hohen Schalldämpfung in Verschraubungen musste für die Schallemissionsmessungen ein massives Zuggestänge gefertigt werden, das in der Folge mit planen Auflageflächen zur Sensorankopplung versehen wurde.

Dem starken Umgebungsrauschen unter dynamischer Strukturbelastung begegnet das akustische Messsystem durch eine hohe Messwertdynamik, Speicherung und Bewertung der vollständigen Wellenformen sowie speziellen Signalverarbeitungsroutinen, wie z.B. dem Beseitigen von Frequenzspitzen bei Messungen in elektromagnetisch gestörter Umgebung. Ziel der Untersuchungen war es, Korrelationsansätze zwischen dem Grad der Probenvorschädigung und spezifischen Schallemissionsparametern so weiterzuentwickeln, dass eine Restlebensdauerabschätzung des Werkstoffs auf Basis der AT-Messdaten möglich wird.

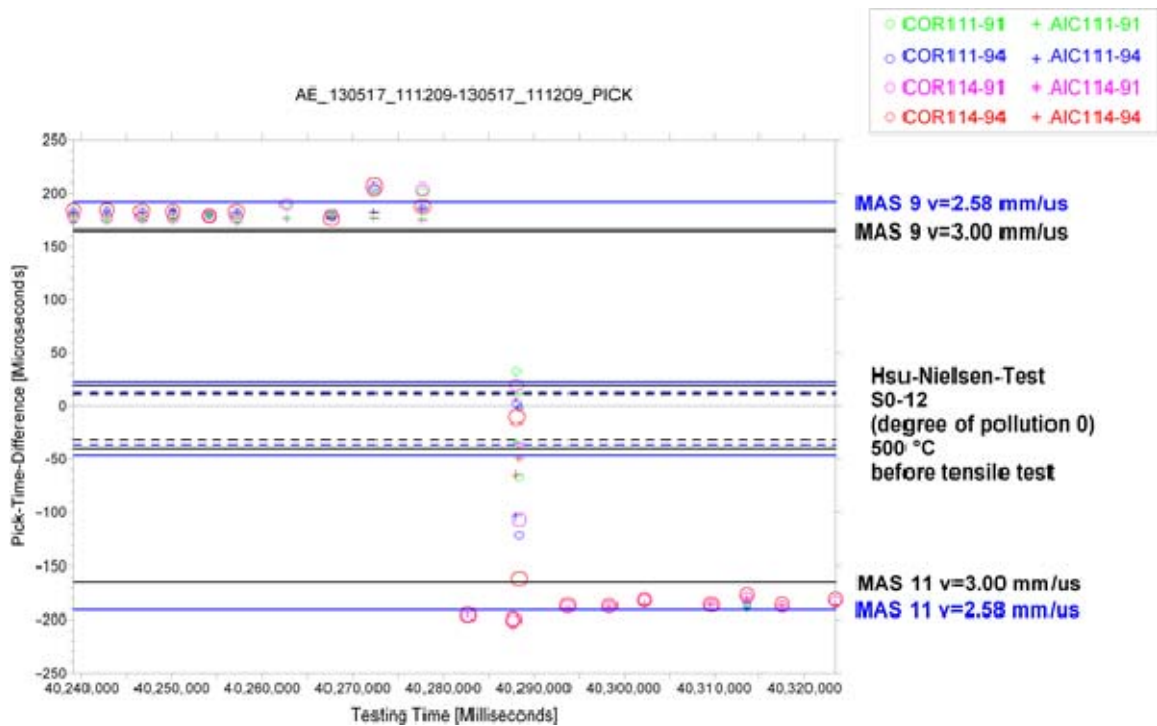


**Abb. 1.** Akustische Instrumentierung an der Zugmaschine, links.: Sensoren 111 und 114 oberhalb des Hochtemperaturofens, Sensoren 91 und 94 unterhalb, rechts oben: modifiziertes Hochtemperatur-Gestänge mit einem Durchmesser von 28 mm, rechts unten: Kriechproben von 10 mm x 90 mm

Vor den Zugmaschinentests erfolgten an den Sensorpositionen Messungen zur Funktionstüchtigkeit und Ankopplungsgüte der Sensorik mit einer Hsu-Nielsen Quelle (Bleistiftminenbruch). Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurden die Geschwindigkeiten der Wellenmoden bestimmt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft das Spektrogramm eines Signals am oberen Sensor 91, welches durch Bleistiftminenbruch in der Probenmitte angeregt wurde. Durch die Art der Anregung, bei der überwiegend Scherkomponenten in die Probe eingetragen werden, sind bei der vorliegenden Gestänge und Probengeometrie nur die amplitudenstarken asymmetrischen Moden der geführten Wellen nutzbar. Die in allen bisherigen Tests ermittelte Gruppenwellengeschwindigkeit des asymmetrischen Grundmodes der geführten Wellen lagen im Intervall zwischen  $2,58 \text{ mm}/\mu\text{s}$  und  $3,0 \text{ mm}/\mu\text{s}$ , bei einer Probentemperatur von  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  im Mittel  $2,8 \text{ mm}/\mu\text{s}$ . Diese mittlere Geschwindigkeit wurde zur Umrechnung der Laufzeitdifferenzen zwischen den Ersteinsätzen der Burstsignale zwischen den Sensoren ober- und unterhalb der Zugprobe befindlichen Sensoren in die Versuchsgeometrie genutzt. Im Zentrum von Abbildung 3 ist die Probengeometrie für die Variationsbreite der Geschwindigkeit durch blaue und schwarze Rechtecke abgegrenzt, der Bereich des Probengewindes durch gerissene Linien.



**Abb. 2.** Spektrogramm des Empfangssignals am oberen Sensor 91 mit den Gruppengeschwindigkeiten der Wellenmoden niedriger Ordnung für die Anregung durch eine Hsu-Nielsen Quelle in der Probenmitte

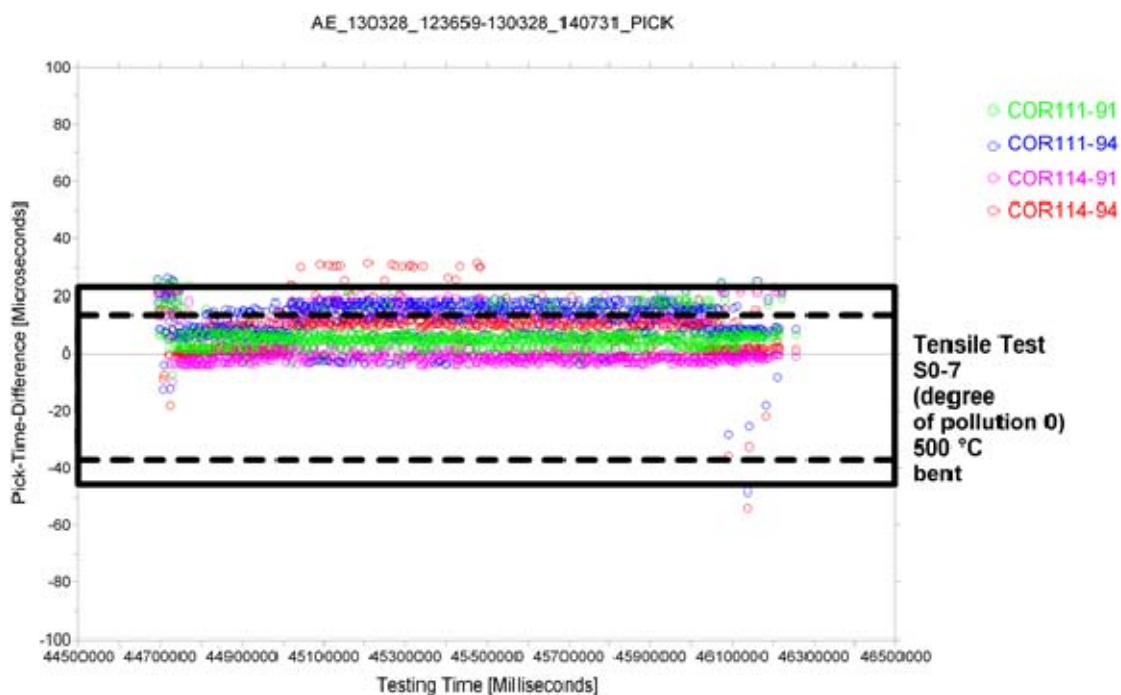


**Abb. 3.** Laufzeitdifferenzen von Burst-Ersteinsätzen der Signale von Hsu-Nielsen-Tests an den Sensoren 91 bzw. 94 (oberhalb der Zugprobe) und 111 bzw. 114 (unterhalb der Zugprobe), Probentemperatur 500 °C, Koppelmittel MoS, farbkodiert: Sensor-Paarungen, Ersteinsatzbestimmung mittels statistischem Akaike-Kriterium (AIC) und Korrelation der Einhüllenden des Burst-Signales (COR)

Beim verwendeten Hochtemperaturstahl P91 handelt es sich um einen 9%-Cr-Stahl mit martensitischem Gefüge. Er wurde in den 1980er Jahren für den Einsatz in Kraftwerken entwickelt und ist für einen Einsatzbereich bis 593°C zugelassen. Aus einem vom Projektpartner RWE gelieferten Rohrstück wurde am Institut für Werkstoffkunde an der TU Graz Zugproben hergestellt (Abb. 1) und anschließend im Dauerkriechversuch belastet. Es wurden verschiedene Schädigungszustände durch variierende Zeiten im Kriechofen erreicht. Es wurden folgende Kriechproben untersucht:

Schädigungsgrad	Probenanzahl	Dauer im Kriechofen (650°C)
ungeschädigt (0)	11	0 h
leicht geschädigt (1)	6	4000 h
mittel geschädigt (2)	3	7000 h
stark geschädigt (3)	4	9200 h.

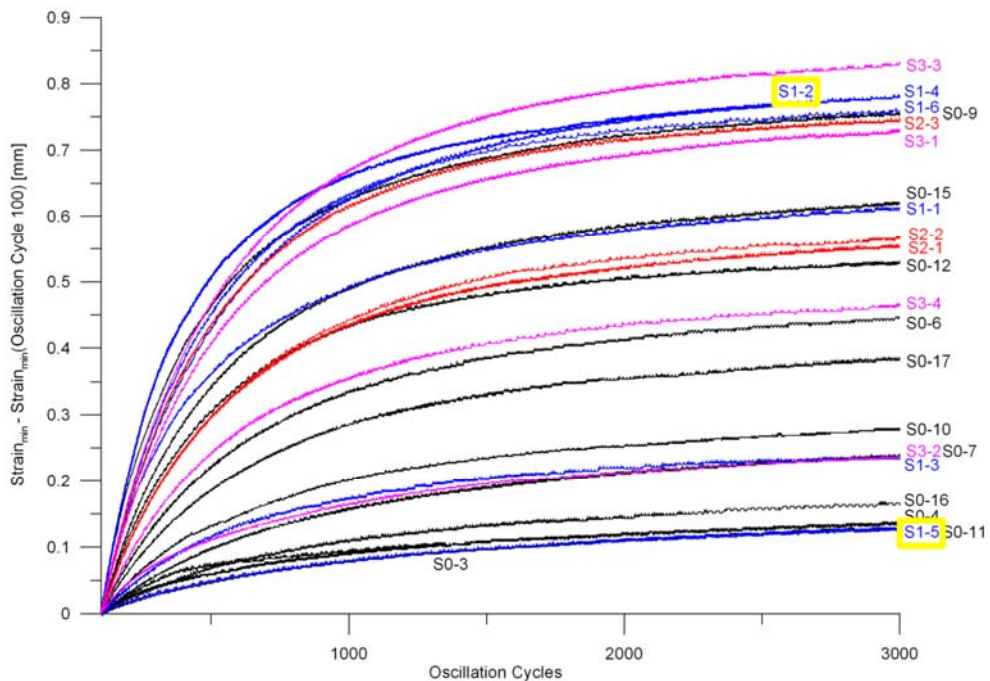
Nach Versuchen mit unterschiedlichen Koppelmedien wurden die Proben nicht mehr bis an die Stirnseiten in das Zuggestänge eingeschraubt, sondern nur noch auf der Länge des Probengewindes. Dies erhöhte zwar aufgrund des längeren Laufweges und des schlechteren akustischen Übergangs von der Probe zum Gestänge die Dämpfung der geführten Wellen, zeitigte aber geringere Schallemissionsraten aus dem Verschraubungsbereichen. Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein Ergebnis der linearen Ortung bei diesem Versuchsaufbau.



**Abb. 4.** Probe S0-7, Laufzeitdifferenzen von Burst-Ersteinsätzen der Signale an den Sensoren 91 bzw. 94 (oberhalb der Zugprobe) und 111 bzw. 114 (unterhalb der Zugprobe), Koppelmittel Graphitpulver nur auf Gewinde, Probe nur auf der Probengewindelänge in das Zuggestänge eingeschraubt, farbkodiert: Sensor-Paarungen

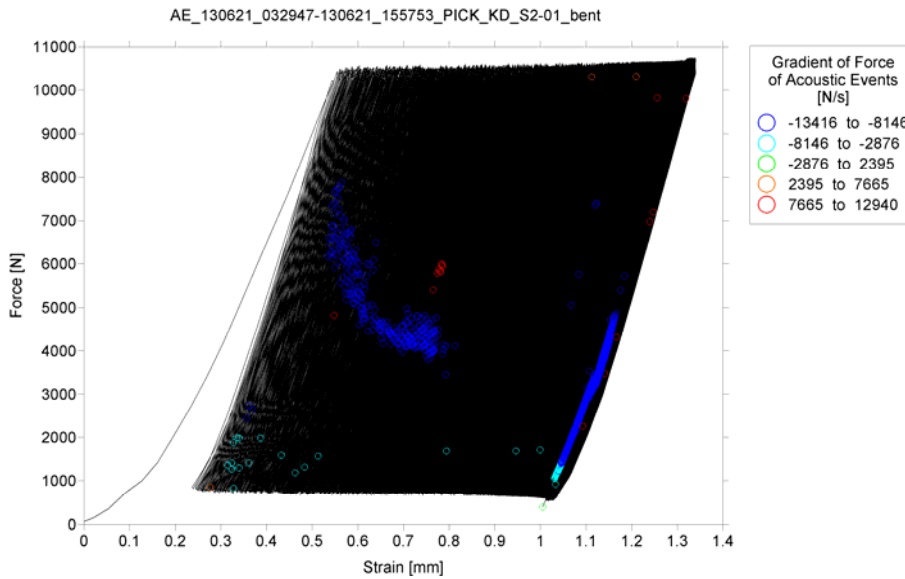
Es wurden insgesamt 24 Zugversuche mit Schallemissionstests begleitet. Bereits während der Versuchsdurchführung zeigten sich deutliche Unterschiede in den Burstraten der akustischen Emissionen, die nicht mit den unterschiedlichen Schädigungsgraden (0 bis 3) der Kriechproben in Zusammenhang gebracht werden konnten. Die während der Zugversuche erstellten Kraft-Dehnungs-Diagramme liefern Informationen über die Elastizität und plastische Verformung der Werkstoffproben. Die bleibenden Deformationen

entstehen im Bauteil wenn die Elastizitätsgrenze überschritten wird, aufgrund von Versetzungsbewegungen, die temperatur- und dehnratenabhängig sind. Am Anfang der Zugversuche weisen starke plastische Verformungen auf Deformationen der Proben-Zuggestänge-Verbindungen hin. Um diese Einfahreffekte auszugliedern wurden die Dehnungen im Entlastungspunkt auf die Werte nach 100 Lastzyklen bezogen. Diese plastischen Dehnungen sind für die untersuchten Zugproben S(Schädigungsgrad-Probennummer) in Abbildung 5 dargestellt. In dieser Darstellung zeigen sich deutliche Unterschiede im Verfestigungsverhalten der Proben, die nicht mit der Probendauer im Kriechofen korrespondieren.



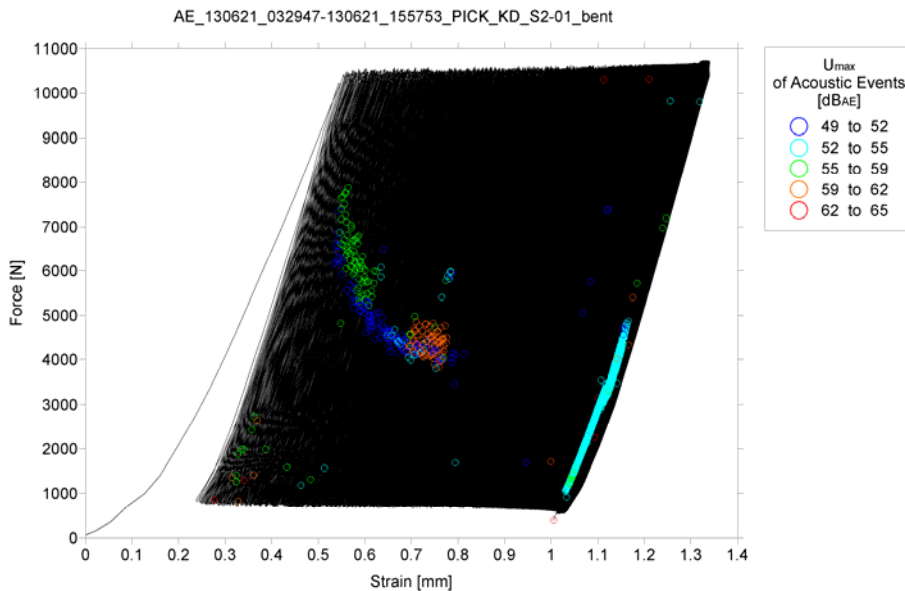
**Abb. 5.** Dehnung im Entlastungspunkt in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastzyklen, bezogen auf die Dehnung nach 100 Lastzyklen, für die untersuchten Zugproben S(Schädigungsgrad-Probennummer)

Schallemissionsrate und Burstparameter werden in der Regel von den bleibenden Deformationen der Probe aufgrund von Versetzungsbewegungen bestimmt, die aufgrund der Verhärtung der Proben im Laufe der Zugversuche insbesondere zu Versuchsbeginn beobachtet werden können. In der Folge werden typische Ergebnisse der Schallemissionsanalyse am Beispiel der Probe S2-01, mit einem mittleren Grad der Kriechschädigung, vorgestellt. In den Abbildungen 6 und 7 ist die Lage der akustischen Emissionen im Kraft-Dehnungs-Verlauf des Zugversuches mit farbcodierten Versuchsgrößen oder Burstparametern dargestellt. Es zeichnen sich zwei Ereignisgruppen ab. Eine Gruppe von Schallemissionen zu Versuchsbeginn lässt sich nach den Ortungsergebnissen Versetzungsbewegungen in der Probe zuordnen. Die zweite Gruppe gegen Versuchsende hat mit ziemlicher Sicherheit Bruchvorgänge am Probengewinde als Ursache. In Abbildung 6 ist der Kraftgradient zum Zeitpunkt des jeweiligen georteten Schallereignisses farblich gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass die akustischen Ereignisse fast ausnahmslos beim Nachlassen der Zugkraft auftreten, also Versatzzonen beim Rückgang in den Grundzustand aneinander reiben.



**Abb. 6.** Probe S2-01 (mittlerer Schädigungsgrad), Lage der akustischen Emissionen im Kraft-Dehnungs-Verlauf, farbkodiert: Kraftgradient zum Zeitpunkt des Events

In Abbildung 7 ist die Maximalamplitude der Schallemissions-Burstsignale farbkodiert. Bei den zu Versuchsbeginn beobachteten Versetzungsbewegungen in der Probe treten drei Intensitäts-Klassen auf. Am Ende der Reibungsvorgänge, beim Krafrückgang bei niedrigen Zugkräften, werden nur sehr amplitudenschwache Bursts emittiert. Die Signale mit den höchsten Amplituden werden, abhängig von der Geometrie der Versatzzonen, am Ende der Versatzbewegungen abgestrahlt.

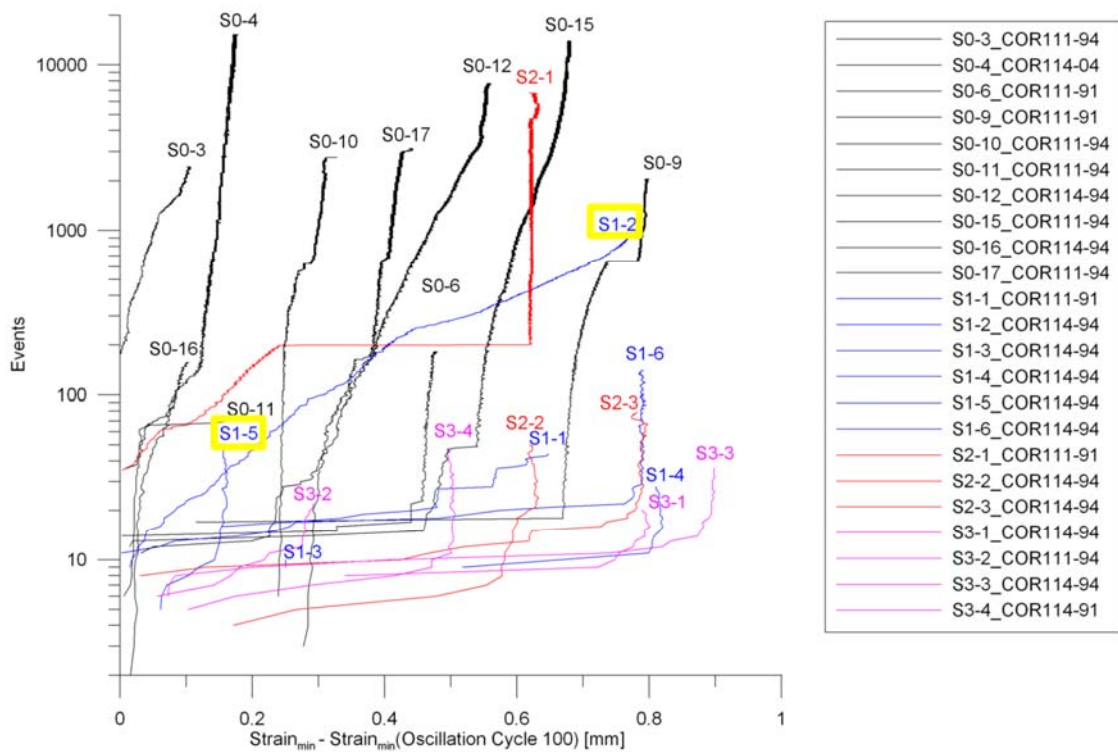


**Abb. 7.** Probe S2-1 (mittlerer Schädigungsgrad), Lage der akustischen Emissionen im Kraft-Dehnungs-Verlauf, farbkodiert: Kraftgradient zum Zeitpunkt des Events

Die am Beispiel der Probe S2-1 vorgestellten Ergebnisse der Schallemissionstests belegen die Eignung der erarbeiteten Prüftechnologie zur Erfassung spezifischer Schadenszustände an den Zugproben während der niederzyklischen Versuche. Das Hauptziel der Zugversuche war es aber die Schallemissionsparameter mit den, den Schädigungszustand beschreibenden metallographischen Daten zusammenzuführen und Auswerteroutinen zu entwickeln, die aus der Vielzahl der gemessenen Signale jene herausfiltern, die ein Indiz für eine beginnende Schädigung liefern und letztendlich eine

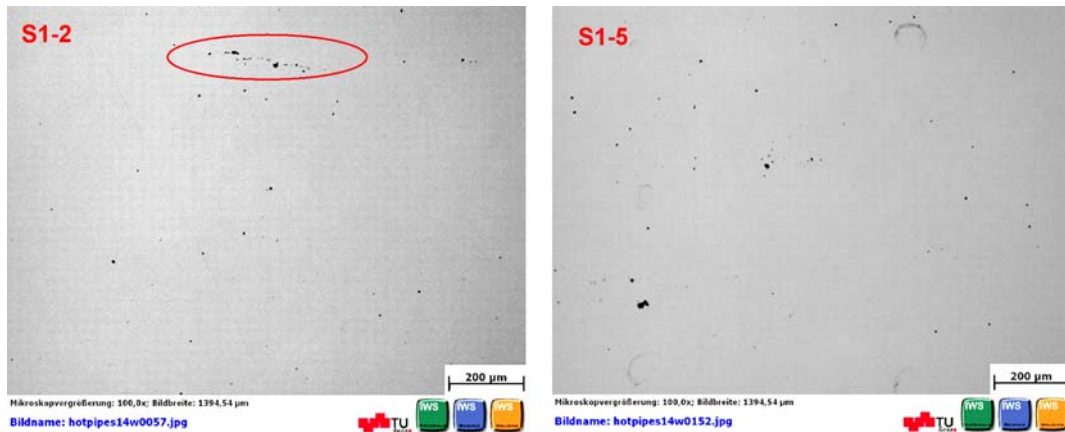
Zeitstandbewertung des Stahls zulassen. Aufgrund der starken Variationsbreite der mechanischen Kennwerte, welche die Effekte der Zeitstandschädigung der Proben überlagert, konnten aus den bisherigen Messergebnissen nur ansatzweise Zusammenhänge zwischen Schallemissionsparametern und der induzierten Kriechschädigung sichtbar werden. Abbildung 8 zeigt für alle untersuchten Zugproben den Verlauf der kumulativen Anzahl an Burstereignissen, die zwischen den Probengewinden geortet werden konnten. Der unterschiedliche Anstieg dieser Kurven, bis zum makroskopischen Versagen der Proben, welches sich durch eine rapide Zunahme der Burstrate abzeichnet, korrespondiert wahrscheinlich mit starken räumlichen Belastungswechseln des Rohres für die Probenherstellung. In der Abbildung sind die leicht kriechgeschädigten Proben S1-2 und S1-5 hervorgehoben, die gemäß Abbildung 5 eine extrem unterschiedliche Steifigkeit aufwiesen. Die geringere Steifigkeit der Probe S1-2 korrespondiert mit einer deutlich erhöhten Schallemissionsrate und zeigt in den metallographischen Daten eine fortgeschrittene Kriechschädigung. In der in Abbildung 9 gezeigten Lichtmikroskopaufnahme der Zugprobe S1-2 sind nach Ende der niederzyklischen Belastung im Gegensatz zur Probe S1-5 bereits Porenketten zu erkennen.

Der Verfahrensansatz akustische Emissionen in dem vorgeschädigten Material zu induzieren hat sich zwar als tragfähig erwiesen, so war z.B. die Aufklärung von Quellmechanismen eine wesentliche Aufgabe des Projekts. Die aus der Belastungsgeschichte des beprobten Rohrs resultierende starke Streuung der mechanischen Kennwerte der Zugproben überdeckt jedoch die Zusammenhänge zur eingebrachten Kriechschädigung. In einem aktuellen Forschungsprojekt werden die Zugexperimente deshalb mit kriechgeschädigtem fabrikneuem Stahl fortgeführt.



**Abb. 8.** Anzahl georteter Schallereignisse (Events) in Abhängigkeit von der Dehnung im Entlastungspunkt, bezogen auf die Dehnung nach 100 Lastzyklen, für die untersuchten Zugproben S(Schädigungsgrad-Probennummer)





**Abb. 9.** Lichtmikroskopaufnahmen der polierten Oberflächen der Zugproben S1-2 und S1-5 nach Ende der niederzyklischen Belastung (Institut für Werkstoffkunde der TU Graz), hervorgehoben: Bildung von Porenketten in Probe S1-2

## 2. Schallemissionsanalyse in realer Kraftwerksumgebung

Für die Anwendung akustischer Verfahren an heißen Komponenten wie Rohrleitungen hat das Fraunhofer IKTS-MD eine Wellenleiterlösung entwickelt. Um die hitzeempfindliche Elektronik zu schützen, wird der Sensor an einem Wellenleiter befestigt, der auf das Rohr punktgeschweißt wird. Die akustische Welle koppelt am Rohr in den Wellenleiter ein und am Sensor wieder aus. Dazwischen können 1 bis 2 m Wellenleiter liegen.

Es wurden 2 Messkampagnen am Bypass im Kraftwerk in Neurath durchgeführt. Für die zweite Messkampagne wurden von RWE neue abnehmbare Isolationen im Bereich des Bogens angebracht und 10 Wellenleiter auf das Bypassrohr aufgeschweißt. Das installierte Messsystem ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Wellenleiter wurden umlaufend auf dem Rohr angeordnet. Abbildung 11 zeigt die Messgeometrie mit der Lage der aufgeschweißten Wellenleiter auf einer abgewinkelten Rohroberfläche. Abhängig von der Lage des Triggerkanals wurde eine von vier Ebenen für die planare Ortung gewählt. Parallel zu den Schallemissionssignalen erfolgte die Aufzeichnung der Bypass-Temperatur. In Abbildung 12 ist neben dem Verlauf der Rohrtemperatur, der kumulativen Anzahl georteter Ereignisse sowie der kumulativen Anzahl der akustischen Ereignisse als Burstparameter die Energie aller Hits über der Messzeit dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass viele der Schallemissionen durch Temperaturänderungen induziert werden. Deutliche Änderungen von Emissions-Anzahl und –Energie im Bereich des 400 °C-Plateaus lassen aber auch nach veränderten Druck- oder Strömungs-Parametern als Ursache suchen.

Die in den Abbildungen 13 und 14 dargestellten Ortungsplots lassen sehr gut die räumliche Beanspruchung des Bypass erkennen, farbkodiert ist die gemessene Bypass-Temperatur. Bereits im planaren Ortungsplot Abb. 13 wird ein differenziertes Strömungsbild im Bypass erkennbar, das die räumliche Darstellung Abb. 14 noch verdeutlicht. Aufgrund der Verwirbelung werden spezifische Rohrpartien durch Temperaturwechsel und Druck- oder Strömungsvorgänge stärker beansprucht als andere. In Zukunft können Zusammenhänge zwischen den über längere Zeiträume ermittelten Schallemissions-Häufigkeiten und –Parameter und den über Replica-Techniken bestimmten Gefügeständen gesucht werden

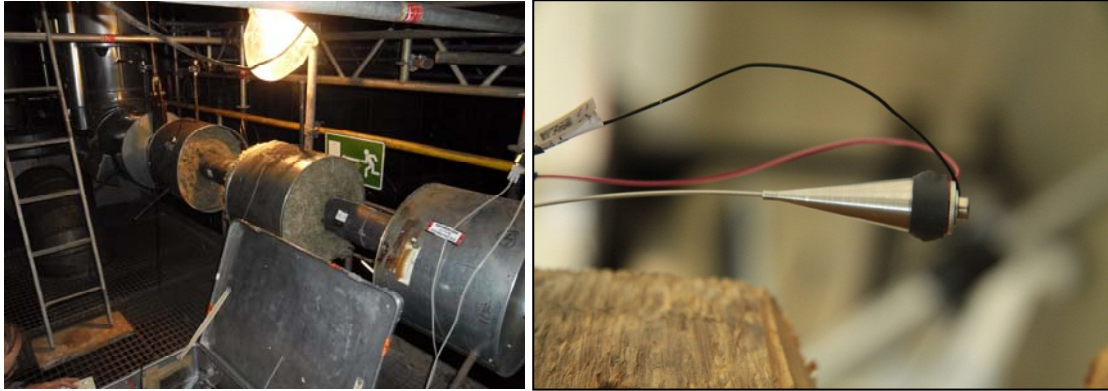


Abb. 10. Installation am Bypass mit aufgeschweißten Wellenleitern

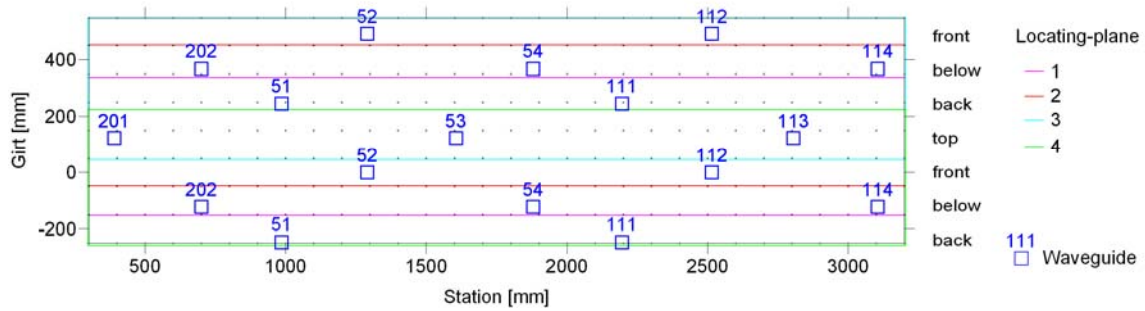


Abb. 11. Messgeometrie mit Lage der aufgeschweißten Wellenleiter auf einer abgewickelten Rohroberfläche, Ortungsebenen

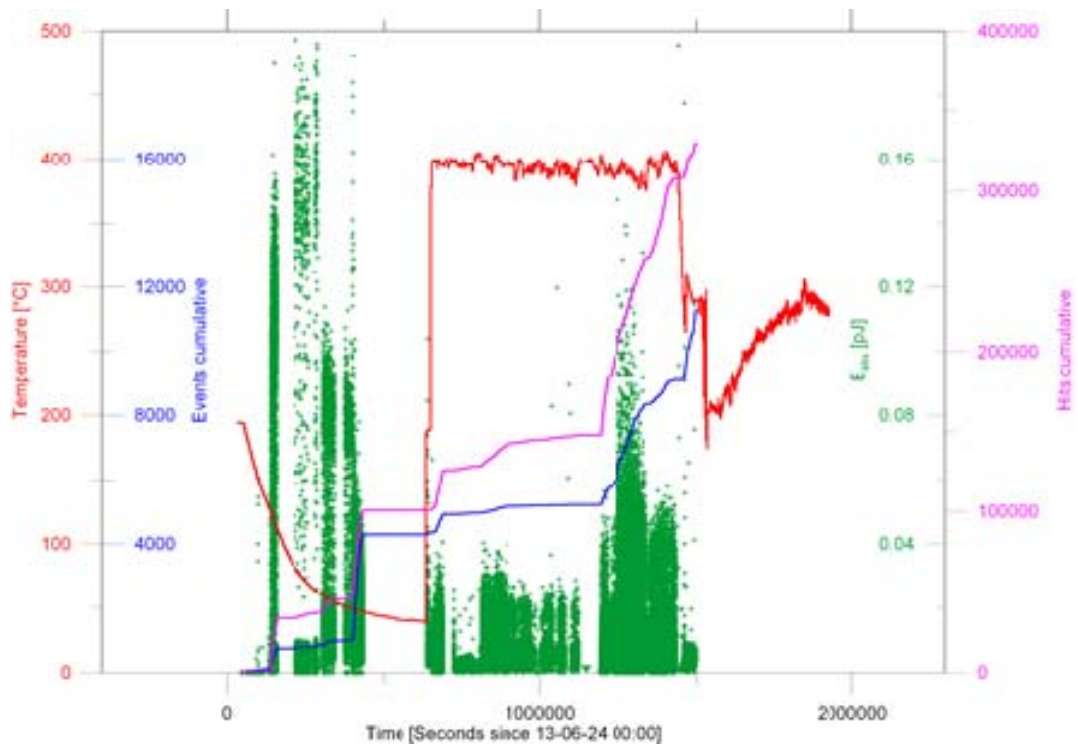
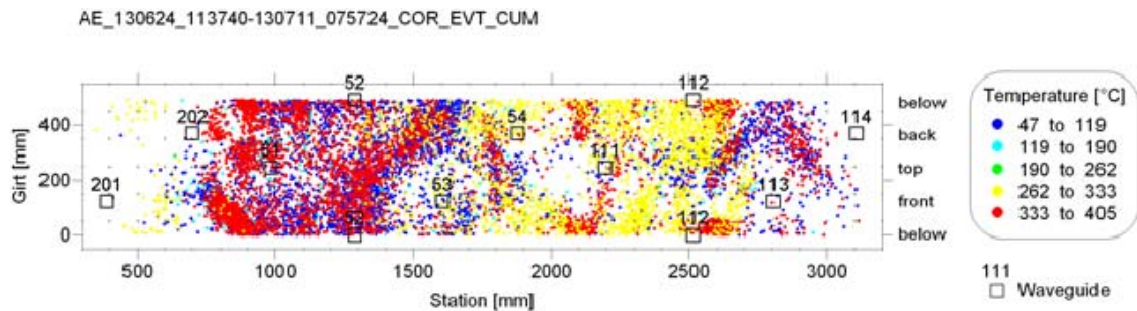
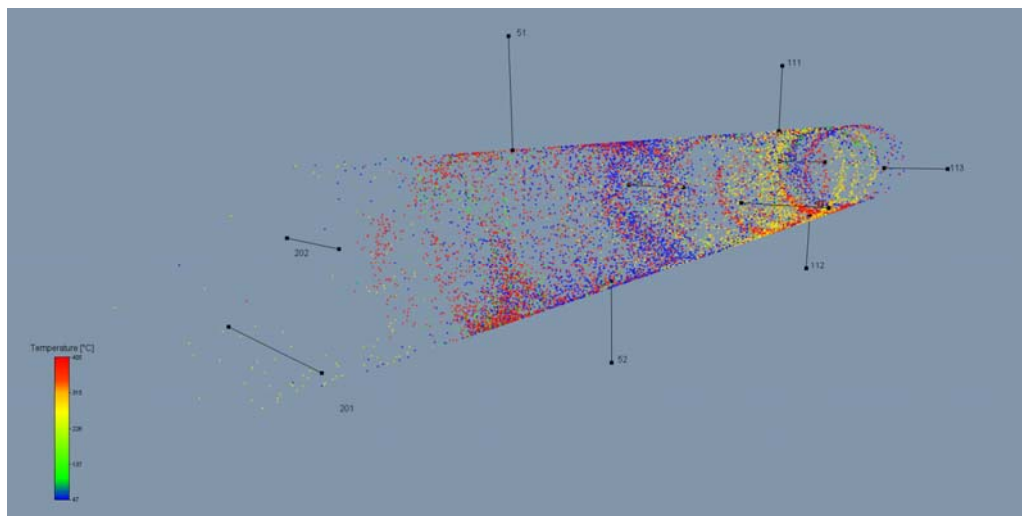


Abb. 12. Verlauf der Rohrtemperatur (rot), der kumulativen Anzahl georteter Ereignisse (Events, blau), der Burstenergie (grün) sowie der kumulativen Anzahl der akustischen Ereignisse (Hits, magenta) über der Messzeit



**Abb. 13.** Schallemissions-Ortungsplot auf der abgewickelten Rohrwand, farbcodiert: Rohrtemperatur beim Auftreten von Events



**Abb. 14.** 3D-Ortungsplot der Schallemissionen, farbcodiert: Rohrtemperatur beim Auftreten von Events

## Danksagung

Das F+E-Projekt „Hot Pipes“ wurde vom VDI/VDE unter der Projektnummer 161NE035 gefördert.

## Referenzen

- [1] B. Weihnacht, B. Frankenstein, E. Schulze: Schallemissionsmessungen zur Prüfung von Hochtemperaturstählen bezüglich ihres Kriechverhaltens (»Hot Pipes«), DACH-Jahrestagung 2012, Graz, 17.-19. September 2012
- [2] L. Schubert, B. Weihnacht, T. Klesse, B. Frankenstein: Monitoring of high temperature steel pipes by ultrasonic waveguide solutions, IEEE International Ultrasonics Symposium, Dresden, 7.-10. Oktober 2012
- [3] B. Weihnacht, T. Klesse, R. Neubeck, L. Schubert: Monitoring of hot pipes at the power plant Neurath using guided waves, conference "Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems", San Diego (USA), 11.-14.3.2013
- [4] B. Weihnacht, E. Schulze, B. Frankenstein: Entwicklung eines Schallemissionssystems für Kraftwerksanwendungen im Hochtemperaturbereich bis 600°C, DGZFP-Jahrestagung 2013, Dresden, 6.-8.5.2013