

Schallemissionsmessungen zur Prüfung von Hochtemperaturstählen bezüglich ihres Kriechverhaltens („Hot Pipes“)

Bianca WEIHNACHT*, Eberhard SCHULZE*, Bernd FRANKENSTEIN*
* Fraunhofer IZFP Dresden, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden,
bianca.weihnacht@izfp-d.fraunhofer.de

Kurzfassung. Kraftwerke erhöhen zur Steigerung ihres Wirkungsgrades die Betriebstemperatur, wodurch der Einsatz neuer Stahlsorten und die dauerhafte Überwachung der Bauteile an kritischen Stellen notwendig werden. Dabei treten zunehmend Kriechvorgänge im Material in den Vordergrund, deren Bewertung nach wie vor sehr schwierig ist. Es existiert außer punktuellen Spannungs-Dehnungsmessungen kein Standardverfahren, welches Rohrleitungen im Hochtemperaturbereich zuverlässig überwachen kann. Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes „Hot Pipes“ wird das Kriechverhalten von Zugproben aus 9%Cr-Stahl im Labormaßstab untersucht. Dafür stehen eine niederzyklische Zugmaschine der Firma Zwick und ein integrierter Hochtemperaturofen zur Verfügung. Die in Kriechversuchen vorgeschädigten Zugproben wurden bei verschiedenen Temperaturen und Zugspannungen mit Schallemissionsmessungen überwacht. Bei diesem Verfahren werden akustische Signale, die in der Probe durch die niederzyklische Belastung und die damit verbundenen Relaxationsprozesse entstehen, erfasst. Die Technik der Schallemissionsprüfung 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 schallemitternden Quellen (aktive Risse, Verbundstörungen, Reibung) zu mehreren Sensoren (mindestens zwei bei linearer Ortung in der Zugprobe), kann auf die Position der aktiven Schädigung zurückgerechnet werden und Störgeräusche im Einspannbereich ausgegliedert werden. Wegen der Temperaturen bis 600°C während des Experimentes wurden die Sensoren außerhalb des Hochtemperaturofens angebracht und das Zuggestänge als Wellenleiter genutzt. Die Auswertung der Signale erfolgt bezüglich üblicher Schallemissionsparameter wie z.B. Burstlänge, Maximalamplitude, Energiegehalt und Frequenzspektrum. Die Ergebnisse demonstrieren die Eignung des Verfahrens. Erste Korrelationsansätze zwischen dem Grad der Probenschädigung und spezifischen Schallemissionsparametern wurden bereits untersucht.

Einführung

Das Hauptziel für eine nachhaltige Gestaltung der globalen Klimapolitik ist die Verringerung des Schadstoffausstoßes bei der Elektroenergieerzeugung. Eine zuverlässige Energieversorgung kann jedoch nicht ausschließlich durch Nutzung regenerativer



Energiequellen, wie Wind- und Solarenergie garantiert werden, da diese nicht kontinuierlich zur Verfügung stehen. Besonders zur Erzeugung der Grundlast sind Gas- oder Kohlekraftwerke noch für eine längere Zeit unentbehrlich. Bei herkömmlichen, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken steht dabei die Steigerung des Wirkungsgrades im Mittelpunkt der Technologieentwicklung. Dieses kann vor allem durch die Anhebung der Dampfparameter (Druck und Temperatur) des Frischdampfes sowie im Zwischenüberhitzer erreicht werden. Die typische Frischdampftemperatur lag in den 1980-er Jahren bei 540°C. In modernen Kraftwerken werden Temperaturen bei ca. 600°C genutzt, womit ein Wirkungsgrad von etwa 43-45% erzielt wird. In Zukunft werden Temperaturen von mehr als 700°C angestrebt, wodurch eine Verbesserung des Wirkungsgrades auf bis zu 55% erwartet wird.

In fossil befeuerten Kraftwerken wird die Integrität druck- und zeitstandsbelasteter Komponenten durch zyklische Prüfung gewährleistet. Dabei spielt die frühzeitige Erkennung beginnender Kriechschädigung eine wesentliche Rolle. Nach dem heutigen Stand der Technik und Wissenschaft ist die zuverlässige Ermittlung von Kriechporen in Bauteilen nur mit der Gefügeabdrucktechnik („Replica“) möglich. Diese Technik stellt ein aufwändiges Verfahren da, das nur bei Stillstand anwendbar ist und dessen Erfolg davon abhängt, dass die am stärksten belastete Stelle des Bauteils untersucht wird. Das Einrüsten und Abisolieren der zu prüfenden Komponenten verringert die Verfügbarkeit der Kraftwerke. Auch andere zerstörungsfreie Prüfverfahren (Ultraschall, Wirbelstrom oder Röntgen) erfordern den Zugang zu den zu prüfenden Bauteilen und verursachen ebenfalls aufwändige, mit Stillstandszeiten verbundene Inspektionen.

Die für die Erhöhung des Wirkungsgrades angestrebten Dampfparameter von > 600°C erfordern den Einsatz neuer Materialien. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass bei hochfesten Stählen veränderte Schadensbilder auftreten, die an die Zuverlässigkeit der etablierten Methoden höhere Ansprüche stellen.

Aus diesen Gründen ist ein möglichst integral arbeitendes Verfahren notwendig, dass zusätzlich zu den zyklischen Wartungen und Inspektionen eine permanente zerstörungsfreie Überwachung sicherheitsrelevanter Kraftwerkskomponenten gewährleistet. Das geplante System soll die Bewertung des aktuellen Materialzustandes ermöglichen. Nur mit Hilfe von präzisen Vorhersagen zur Restlebensdauer der Komponenten, ist es möglich, Sicherheit und Zuverlässigkeit bei gesteigerter Effizienz des Kraftwerks sicherzustellen.

Der methodische Ansatz des Projekts liegt in der Kombination verschiedener Methoden zur Erfassung von Strukturänderungen. Bei der Belastung eines Werkstoffes werden durch submikroskopische Defekte bereits vor der Entstehung makroskopischer Defekte elastische Wellen im Frequenzbereich von 50 bis 300 kHz abgestrahlt, die als akustische Emission erfasst werden können. Die Amplituden und Häufigkeiten solcher Ereignisse können für die Beurteilung des bei der Belastung auftretenden Schädigungsfortschritts herangezogen werden. Durch zusätzliche Erfassung modaler Parameter, kombiniert mit Simulationsrechnungen und Testmessungen an Bypass-Rohrleitungen sind Aussagen über globale Längenänderungen möglich. Diese Verbindung von Methoden zur Nutzung von hochfrequenten (akustische Emission) und niederfrequenten (modale Parameter) Wirkparametern ist wesentlicher Bestandteil des Projektes. Eine Untersuchung der materialwissenschaftlichen Aspekte der Schädigungsvorgänge bei den angestrebten Temperaturen ist für die Entwicklung und Verifizierung des Verfahrens unabdingbar. Die Zusammenführung dieser Informationen gewährleistet zuverlässigere Aussagen über die Restlebensdauer der Komponenten.

1 Schallemission

Schallemission wird angewendet, wenn im Material durch Schädigungen Emissionsereignisse verursacht werden. Die durch Sensoren detektierten Wellen werden somit im Material selbst durch Schädigungsmechanismen hervorgerufen. Der Anfangszeitpunkt ist dadurch unbekannt, was eine Auswertung der Daten auf der Basis von Laufzeitdifferenzen notwendig macht. Eine Auswertung erfolgt in der Regel nach den in Abb. 1 dargestellten Parametern wie Dauer des Signals, Stärke/Energie oder auch Amplituden-Maximum-.

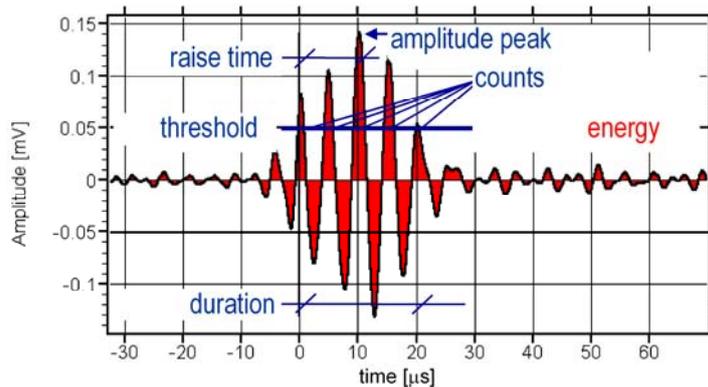


Abbildung 1: Schallemissionsparameter

2 Hochtemperatur Versuchszplatz

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurde am Fraunhofer IZFP Dresden ein Hochtemperatur-Versuchszplatz aufgebaut (Abb. 2).



Abbildung 2: Hochtemperatur-Messplatz mit Hochtemperaturofen und Zugmaschine

Dieses beinhaltet eine ZWICK-Zugmaschine für die niederzyklischen Belastungszyklen, einen integrierten Hochtemperaturofen bis 900°C, für die im Kraftwerk auftretenden Temperaturbereiche sowie das akustische Messsystem MAS (Abb. 3) zur Erfassung der Schallemissionsereignisse, die mit am Fraunhofer IZFP entwickelten Schallemissionssensoren im oberen und unteren Bereich außerhalb des Ofens aufgezeichnet werden. Das Zuggestänge wird hierbei als Wellenleiter benutzt.



Abbildung 3: Messsystem MAS zur Datenerfassung

Das Mehrkanalige Akustische Messsystem (MAS) ist für die autonome Langzeitüberwachung von technischen Strukturen und Anlagen konzipiert und wird ebenfalls am Fraunhofer IZFP gebaut. Das Messsystem kann für aktive und passive akustische Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung genutzt werden. Es basiert auf einer universellen digitalen und auf anwendungs-spezifischen analogen Baugruppen. Ein Digitaler Signal Prozessor (DSP), standardisierte Datenübertragungsschnittstellen und Erweiterungssteckplätze sowie die rekonfigurierbare Logik und Software garantieren die individuelle Systemanpassbarkeit. Weiterhin wurden für diese Messungen eigens entwickelte Vorverstärker mit einer Verstärkung von 40dB benutzt. Die detaillierten Angaben zum Messsystem sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Spezifikation des Messsystems

Analoge Eingänge <ul style="list-style-type: none"> • 4 Kanäle, Körperschallsensoren • 12 Bit Auflösung • 12,5 MHz Summenabtastrate • Eingangspannung 10 Vpp, 100 Ohm • Standard-Frequenzbereich 10...500 kHz • Standard-Verstärkung -22...+20 dB • Sensor-Identifikation 	Analoge Ausgänge <ul style="list-style-type: none"> • 4 Kanäle, Piezoaktoren • Max. 160 Vpp bei 10 nF Last • Arbitrary Waveform Generator, • 500 k Samples Datenspeicher • 14 Bit Auflösung • 18,75 MHz Ausgabefrequenz
Aufnahmemodi <ul style="list-style-type: none"> • Single • Average • Burst • Continue for Lower Sampling Rates 	Signalverarbeitung <ul style="list-style-type: none"> • Statistik (MAX, MIN, MEAN, RMS) • Digitale Filter FIR • FFT • Spektrogramm
Netzwerk/ Kommunikation <ul style="list-style-type: none"> • CAN 2.0B 1 Mb < 40 m • Max. 64 DMASxx pro Netzwerk • Clock-Synchronisation • Trigger-Bus • CF-Card Datalogger • Real-Time Clock • Optional: USB, Bluetooth 	System-Triggerung <ul style="list-style-type: none"> • Free Run • Extern Trigger In • Waveform Generator • Signal Trigger RMS Fix, RMS Slide, RMS Window für jeden Kanal • TTL Trigger Output
Gerät <ul style="list-style-type: none"> • 24 V DC Input 300 mA • H*B*T: 45*111*115 mm • Gewicht: 430 g 	

3 Probenmaterial

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 dem vom Projektpartner RWE gelieferten Rohrstück wurde am Institut für Werkstoffkunde an der TU Graz Zugproben hergestellt (Abb. 4) und anschließend im Dauerkriechversuch belastet.



Abbildung 4: Hochtemperatur-Zugproben

So stehen für die Zugexperimente 4 Probenserien mit unterschiedlichen Schädigungsgraden zur Verfügung (Tab. 2).

Tabelle 2. Probenserien

Schädigungsgrad	Probenanzahl	Dauerkriechversuch
ungeschädigt	5	0
leicht geschädigt	5	4000h
mittel geschädigt	5	8000h
stark geschädigt	5	12000h

4 Ergebnisse

Bisher wurden nur ungeschädigte und leicht geschädigte Proben bei einer Zugkraft von 10 kN und einer Temperatur von 500°C vermessen. Exemplarisch sind die Ergebnisse in den Abb. 5 bis 8 zusammengefasst.

Abb. 5 zeigt die Anzahl der registrierten Schallemissionsereignisse über dem zeitlichen Ablauf des Experimentes. Die Probenbereich ist mit einem schwarzen Rechteck markiert, so dass nur die in diesem Rechteck registrierten Ereignisse aus der Probe stammen. Außerhalb dieses Bereiches dargestellte Signale wurden im Hochtemperatur-Zuggestänge und in den Verschraubungen verursacht. Da die Probe nicht symmetrisch zu den Sensoren gelagert ist, befindet sich der Nullpunkt auf der Laufzeitskala nicht in der Mitte der Probe.

Deutlich erkennbar sind die in den Verschraubungen verursachten Ereignisse bei ca. 20 und -40 μ s, die während des Versuchs abklingen.

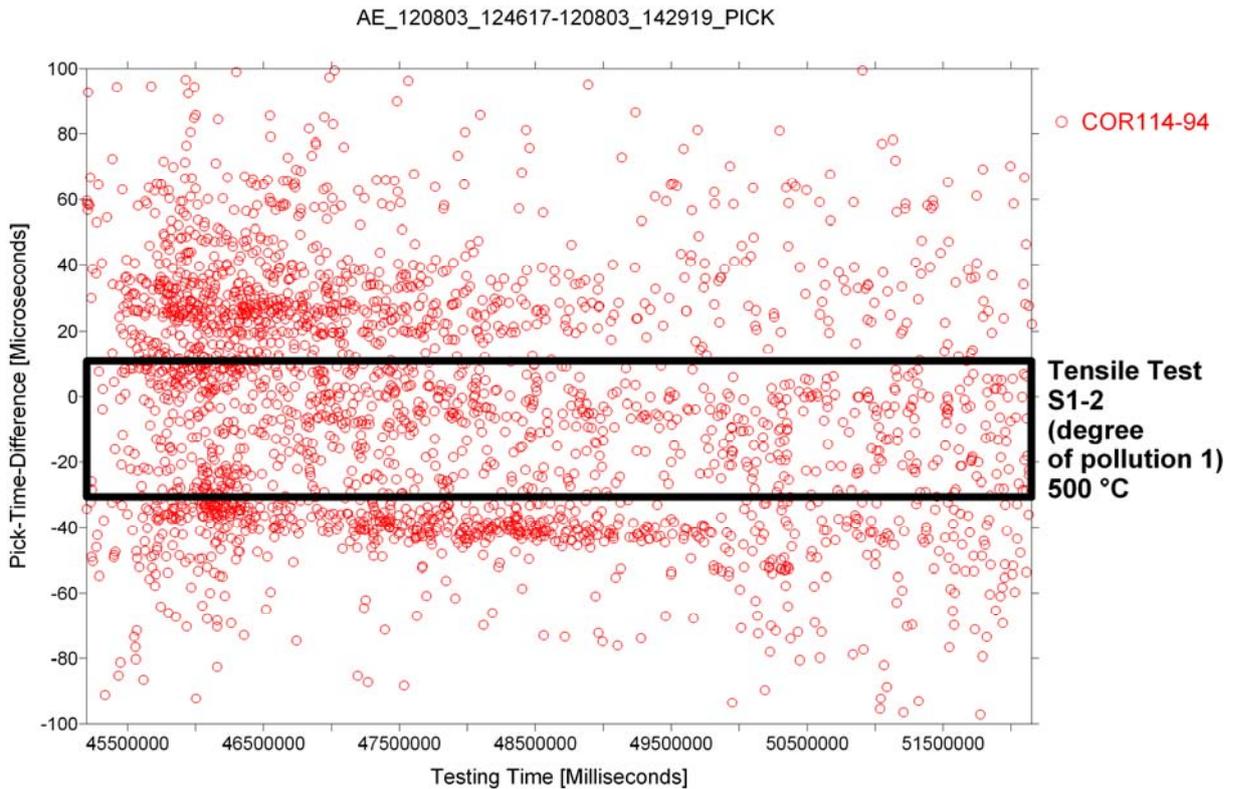


Abbildung 5: Schallereignisse während eines Zugversuches

Abb. 6 zeigt die Auswertung der Daten bezüglich des Energiegehalts der Signale, wobei die einen höheren Energiegehalt aufweisenden magentafarbenen Ereignisse besonders im Bereich der Verschraubungen auftreten. Die Proben verfestigen sich während der Versuche.

Abb. 7 verdeutlicht die Frequenzhalte der Signale, wobei im Laufe des Experimentes eine deutliche Verschiebung der Vorzugsfrequenzen der Signale hin zu niederfrequenten Gehalten zu beobachten ist.

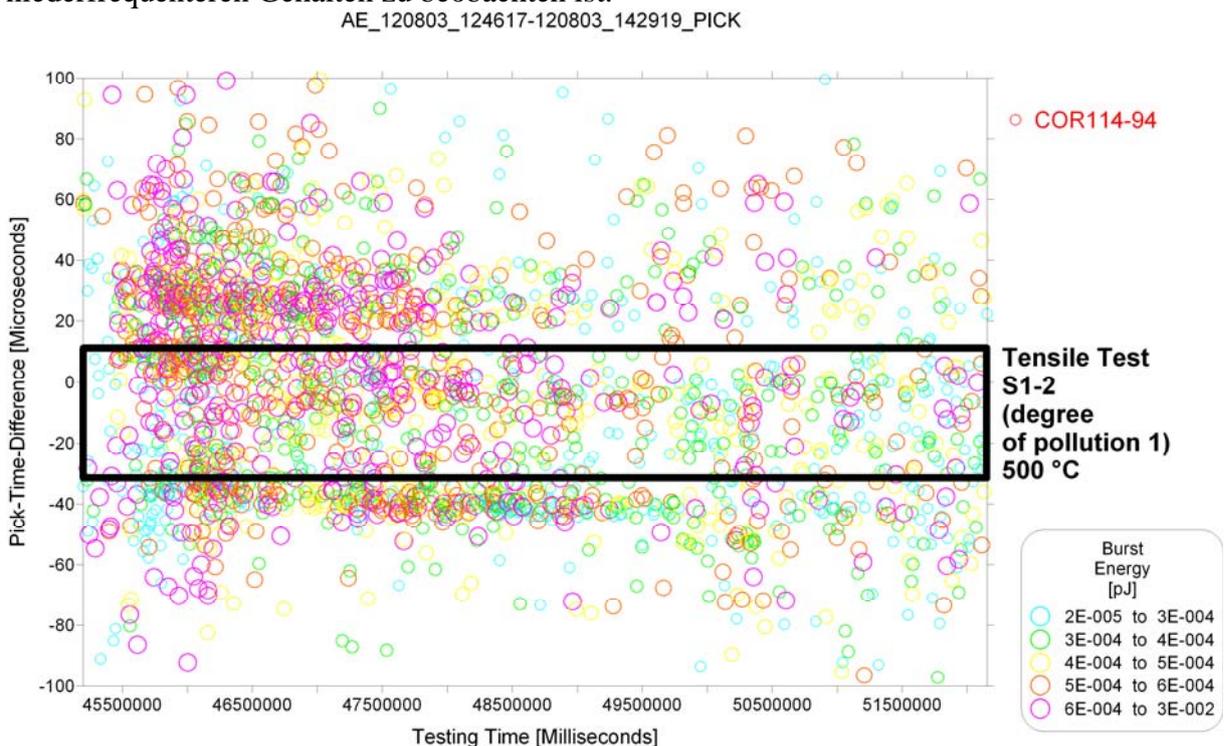


Abbildung 6: Energiegehalt der Signale aus Abb. 5

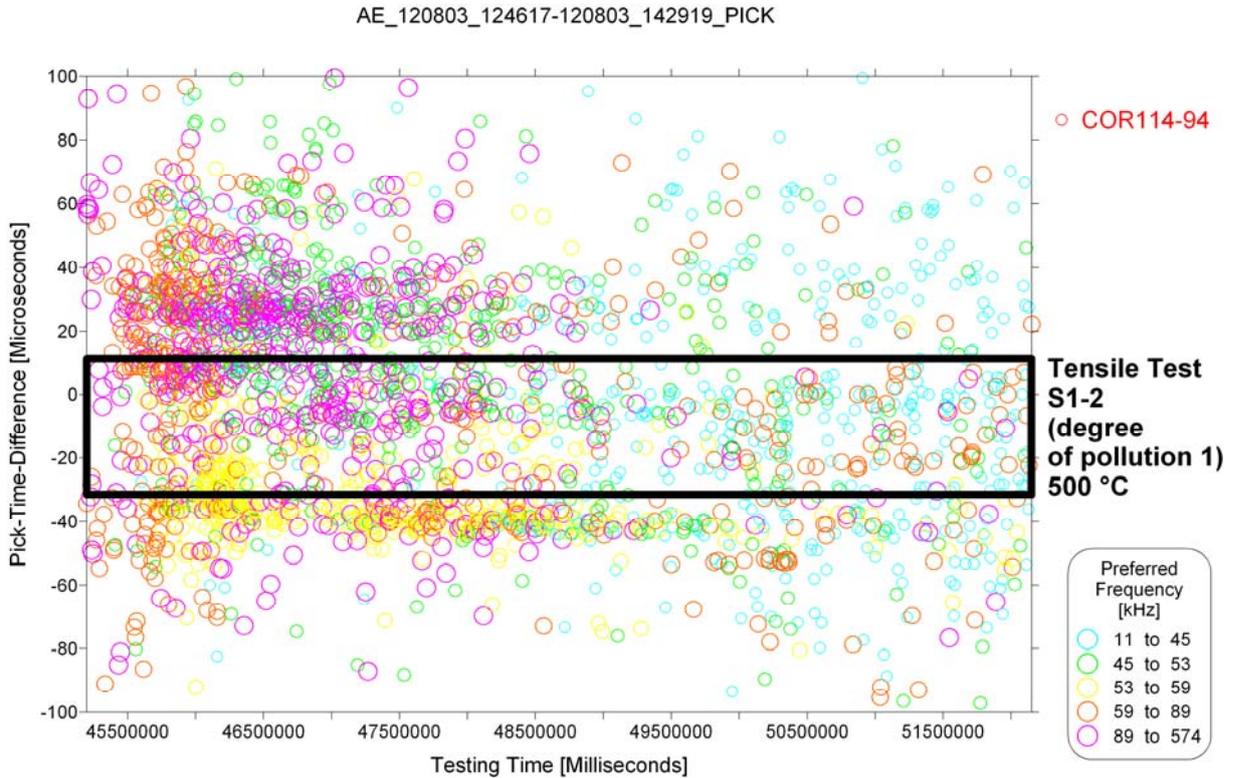


Abbildung 7: Frequenzgehalt der Signale aus Abb. 5

Abb. 8 zeigt das Verhalten des Amplitudenmaximums während des Experimentes. Die Signalamplituden nehmen ab, was durch insbesondere anfängliche Relaxationen innerhalb des Werkstoffes, die im Laufe des Experimentes deutlich abnehmen, begründet werden kann.

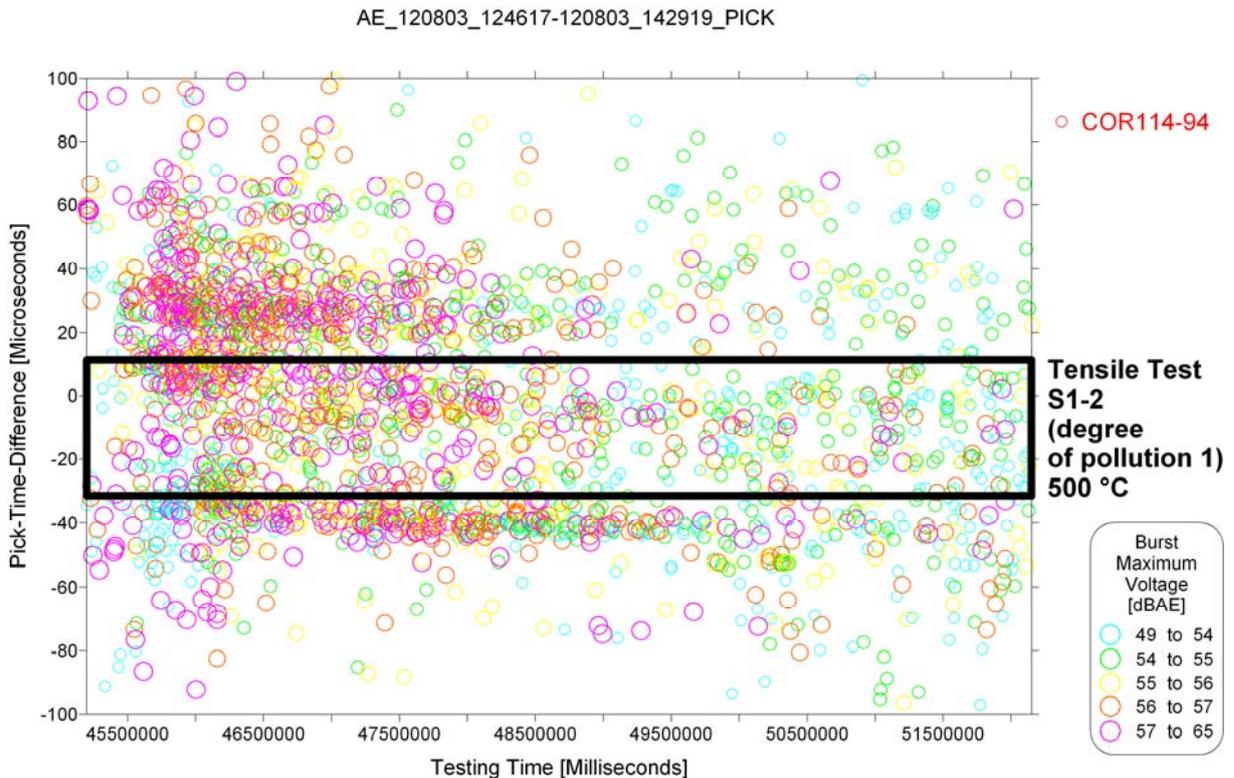


Abbildung 8: Amplitudenmaximum der Signale aus Abb. 5

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend wurde mit den Ergebnissen gezeigt, dass die Versuchsanordnung für derartige Experimente geeignet ist und bereits Schallemissionsereignisse aus der Probe detektiert werden konnten. Besonders starke Signale wurden im Bereich der Verschraubungen nachgewiesen, die im Laufe des Experimentes fast vollständig verschwinden.

Eine weitere statistische Auswertung der Ergebnisse bezüglich weiterer Parameter wird derzeit durchgeführt. Die nächste Probenserie ist bis Ende 2012 zu erwarten, so dass dann vergleichende Untersuchungen zwischen den Schädigungszuständen und möglicherweise eine Korrelation von Schallemissionsereignissen mit dem Schädigungsgrad möglich werden.

Die untersuchten Proben werden beim Projektpartner IWS in Graz mit Dünnschliffen untersucht.

Danksagung

Das Autorenteam bedankt sich bei RWE für die Bereitstellung des Probenmaterials und bei dem IWS der TU Graz für die Herstellung der Zugproben sowie die materialwissenschaftliche Begleitung der Experimente.

Das Projekt „Hot Pipes“ wird vom VDI/VDE unter der Projektnummer 161NE035 gefördert.