

# Ein neues Rohrkonzept für Anwendungen in konventionellen Kraftwerken – Überwachung eines Langzeitversuchs im Kohlekraftwerk mit Schallemissionsmessungen

Anne JÜNGERT<sup>1</sup>, Meike MAYLANDT<sup>1</sup>, Maximilian FRIEDRICH<sup>1</sup>, Min HUANG<sup>1</sup>,  
Andreas KLENK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MPA Universität Stuttgart, Stuttgart

Kontakt E-Mail: [anne.juengert@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:anne.juengert@mpa.uni-stuttgart.de)

**Kurzfassung.** Drucktragende Rohrleitungen in thermischen Anlagen haben bei hohen Betriebstemperaturen eine begrenzte Lebensdauer. Unter Betriebsbelastung kriechen die Rohrleitungen unter der Bildung von Poren und versagen schließlich, wenn nicht rechtzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Heutige fossil befeuerte Kraftwerke werden flexibel und mit möglichst hohem Wirkungsgrad betrieben. Hohe Wirkungsgrade erfordern höhere Prozesstemperaturen. Um Kriechschäden entgegenzuwirken, werden daher größere Wanddicken benötigt. Zum anderen werden die Kraftwerke zur Kompensation der wetterbedingten Schwankungen der Stromerzeugung durch Wind- und Sonnenenergie öfter an- und abgefahren. Die vermehrten Abkühl- und Aufheizvorgänge führen bei großen Wandstärken zu thermische Zusatzbeanspruchung, die wiederum Ermüdungsprozesse begünstigen. Eine Lösung dieses Dilemmas ist der Einsatz neuer Materialkonzepte.

Ein derartiges Materialkonzept wird aktuell in einem Langzeitversuch im Grosskraftwerk Mannheim (GKM) erprobt. Ein Verbund aus einem Stahlrohr, das mit einem Keramikfaserverbund (ceramic matrix composite) CMC ummantelt ist, ist dort als Bypass einer Frischdampfleitung in Betrieb. Der Keramikmantel kriecht bei der Betriebstemperatur des Kraftwerks nicht und entlastet so längerfristig das Stahlrohr im Betrieb.

Während des Langzeitversuchs wird das Versuchsrohr mit verschiedenen Methoden überwacht. In einem nicht ummantelten Bereich des Stahlrohrs sind Hochtemperaturdehnmessstreifen (HT-DMS) aufgebracht, die die Kriechdehnung des Rohrs überwachen. Im Fasermantel sind außerdem Widerstandsdrähte eingewickelt, über die die Dehnung des Fasermantels überwacht wird. Zusätzlich sind insgesamt sechs temperaturbeständige Schallemissionssensoren auf dem Stahlrohr und dem Fasermantel angebracht. Insbesondere die dauerhafte Instrumentierung des 530 °C heißen Fasermantels mit den Schallemissionssensoren stellte eine große Herausforderung dar. Im Folgenden werden die Voruntersuchungen zur Ankopplung, Ergebnisse von Versuchen im Labormaßstab sowie erste Ergebnisse vom laufenden Bauteilversuch vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei auf den Schallemissionsmessungen.

## **Einführung**

In fossil befeuerten Kraftwerken ist die Lebensdauer der Komponenten durch gleichzeitige Wirkung von Druck- und Temperaturlasten bestimmt. Die Betriebsbelastungen der Rohrleitungen führen zu Kriechen zur Bildung von Kriechporen und letztendlich zum Versagen des Bauteils [1]. In der Praxis wird der Zustand der Rohrleitungen über regelmäßige Kontrolle des Gefügebildes bewertet und stark geschädigte Komponenten ausgetauscht. Durch die Energiewende werden fossil befeuerte Kraftwerke heutzutage flexibler betrieben als in der Vergangenheit [2]. Gleichzeitig wird die Erhöhung der Wirkungsgrade durch den Betrieb bei hohen Temperaturen und Drücken angestrebt [3]. Beides stellt besondere Anforderungen an die verwendeten Werkstoffe und Wanddicken der Rohrleitungen. Für einen flexiblen Betrieb wären kleine Wandstärken ideal um thermisch bedingte Ermüdungsprozesse möglichst zu minimieren. Andererseits erfordern die hohen Betriebsdrücke und Temperaturen beim Einsatz etablierter Werkstoffe große Wanddicken. Nickelbasislegierungen, die für höhere Temperaturen geeignet sind, haben den Nachteil, dass sie sehr teuer und sehr anspruchsvoll zu verarbeiten sind, weswegen sie nur in Einzelfällen eingesetzt werden. Als Alternative zu diesen Werkstoffen wird in einem laufenden Forschungsprojekt ein Materialverbund aus einem gegen Kriechdehnung beständigen Keramikfasermantel (Jacket) und einem Stahllinnenrohr (Liner) aus P91 Stahl erprobt [4 bis 6]. Neben Versuchen, die bei erhöhten Temperaturen im Labormaßstab durchgeführt werden, läuft seit Ende August 2018 ein Versuch im Bauteilmaßstab im Grosskraftwerk Mannheim (GKM). Hier ist ein Rohrbogen aus dem Materialverbund als Bypass zu einer Frischdampfleitung  $T = 530 \text{ °C}$  eingebaut. Zur Überwachung des Rohrbogens kommen verschiedene Überwachungstechniken zum Einsatz. Die Kriechdehnung des Stahlliners wird über Hochtemperaturdehnungsmessstreifen überwacht. Im CMC-Jacket sind Widerstandsdrähte eingebracht, die den globalen Dehnungszustand des Jackets erfassen. Auf der Oberfläche des Stahlrohrs sind zwei und auf der Oberfläche des CMC-Jacket weitere sechs hochtemperaturbeständige Schallemissionssensoren angebracht. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit den bisherigen Ergebnissen der kontinuierlichen Überwachung eines Laborversuchs und eines Bauteilversuchs mit Schallemissionsmessungen.

## **1. Materialverbund und Überwachungstechnik**

### *1.1 Materialverbund*

Das neue Materialkonzept, das im Rahmen des Bauteilversuchs erprobt wird, besteht aus einem Stahlrohr (Liner), der mit einem Keramikfaserverbund (CMC)-Jacket ummantelt ist. Der Stahlliner sorgt für die notwendige Gasdichtheit und stellt im Falle von Überlasten eine plastische Verformbarkeit zur Verfügung. Außerdem stellt er die nötige Korrosionsbeständigkeit des Gesamtsystems gegenüber dem im Inneren strömenden Fluides sicher. Beim Ablufen von Kriechprozessen des Liners wirkt das CMC-Jacket als hoch kriechbeständige Stützstruktur. Der Aufbau ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

Das Jacket wird in Form vorimprägnierter Bänder (Prepregs) um den Stahlliner gewickelt und anschließend bei Temperaturen unterhalb von  $770 \text{ °C}$  (maximale Anlasstemperatur von P91 nach dem Schweißen) vernetzt und pyrolysiert. Neben den bereits genannten Komponenten des Materialverbunds ist der Liner zusätzlich mit einer keramischen Beschichtung versehen, durch die die Oxidation der Lineroberfläche und somit auch abplatzende Oxidschichten verhindert werden soll. Zwischen Liner und Jacket ist außerdem ein dünnes Keramikfließ eingebracht, das die unterschiedliche Wärmedehnung von Liner

und Jacket im Pyrolyseprozess und während des Betriebs ausgleicht und eine vorzeitige Schädigung des Jackets verhindert.

**Keramische Zwischenschichten:**

- Kompensation verschiedener Ausdehnungskoeffizienten
- Oxidationsschutz
- Homogenisierung der Kräfteinleitung
- Keramische Beschichtung + Keramikvlies



Abb. 1: Aufbau des Materialverbunds

## 1.2 Überwachungstechnik

Der Materialverbund wird in Laborversuchen an kleinen hohlzylindrischen Proben und einem Bauteilversuch in realen Dimensionen im Kraftwerksbetrieb erprobt. Zur Überwachung des Materialverbunds und zur Sicherstellung des gefahrlosen Betriebs, werden die Untersuchungsobjekte mit verschiedener Überwachungstechnik instrumentiert. Direkt auf dem Liner werden Thermoelemente zur Temperaturüberwachung und hochtemperaturgeeignete Dehnmessstreifen (HT-DMS) angebracht, mit denen die Dehnung des Liners aufgezeichnet wird. Im CMC-Jacket sind Drähte mit eingewickelt worden, anhand deren Widerstandsänderung während des Betriebs der globale Dehnungszustand des Jackets zu erkennen ist.

Als weitere Überwachungstechnik für das CMC-Jacket kommen Schallemissionsmessungen zum Einsatz. Die Sensoren zeichnen Knackgeräusche im Jacket auf und lassen über deren Häufigkeit auf die bereits erfolgte Schädigung im Jacket schließen. Im Bauteilversuch, der bei Temperaturen von etwa 530°C durchgeführt wird, kommen hochtemperaturbeständige Sensoren zum Einsatz, die auf dem Jacket mit einem keramischen Klebstoff angebracht werden. Die Laborversuche werden mit erhöhter Temperatur von 625°C durchgeführt, für die die Schallemissionssensoren nicht mehr geeignet sind. Deshalb kommen hier Wellenleiter aus austenitischem Stahl zum Einsatz, sodass die Sensoren außerhalb des Ofens platziert werden können.

## 2. Vorversuche im Labormaßstab

Im Labor werden in Vorbereitung auf den Bauteilversuch verschiedenen Untersuchungen durchgeführt. Zur Ermittlung der Kriechbeständigkeit des verwendeten Stahlwerkstoffs des Liners werden Zeitstandsversuche (Zugversuche unter Temperaturlast) am Linerwerkstoff durchgeführt.

Um den Materialverbund im Labormaßstab zu untersuchen, werden zylindrische Hohlkörper mit dem CMC umwickelt und anschließend mit Innendruck und Temperatur beaufschlagt. Die Versuche werden zum Teil statisch, d.h. mit konstantem Innendruck und

konstanter Temperatur, oder mit sich zyklisch änderndem Druck und Temperatur durchgeführt. Die zyklischen Versuche sollen die realen An- und Abfahrten infolge der flexiblen Fahrweise heutiger konventioneller Kraftwerk nachstellen. Alle Versuche finden bei gegenüber dem Bauteilversuch erhöhten Beanspruchungen statt, um die ablaufenden Kriechprozesse zu beschleunigen. In Abb. 2 ist eine Laborprobe, an der zwei Wellenleiter für die Schallemissionsmessungen angebracht sind, vor einem statischen Versuch im Ofen zu sehen. In Abb. 2 rechts ist zu sehen, wie die Wellenleiter aus dem Ofen geführt werden. Ein zusätzlicher Wellenleiter wurde im Ofen platziert, um Ofengeräusche aufzuzeichnen. Die Probe wurde für den Versuch mit einem Innendruck von 290 bar und einer konstanten Temperatur von 625 °C beaufschlagt.

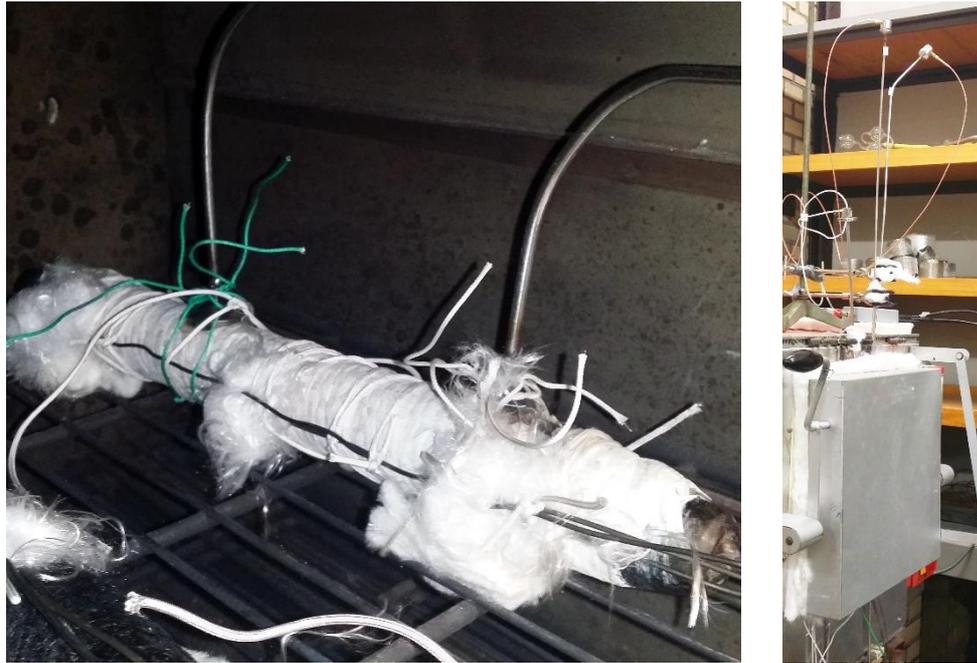


Abb. 2: Probe mit Wellenleitern im Ofen

Die Schallemissionsmessung über die an den Wellenleitern angebrachten Sensoren (Vallen VS150-L) wurden für einen Zeitraum von rund 2600 Stunden durchgeführt. Die Sensoren wurden entfernt, als das Messsystem für die Installation am Bauteilversuch benötigt wurde. Eine weitere Probe mit quasi identischer Wicklung wurde bis zum Versagen weiter belastet. Nach 5700 h Betriebszeit wurde bei dieser eine Leckage festgestellt. Gegenüber einer identisch geprüften Vergleichsprobe ohne CMC-Jacket konnte die Lebensdauer durch das Jacket mehr als verdreifacht werden.

Die Auswertung der Schallemissionsüberwachung gestaltete sich sehr aufwendig und ist bisher noch nicht vollständig abgeschlossen, da die aufgezeichnete Datenmenge aufgrund der langen Versuchsdauer enorm ist. Im Versuch wurde außerdem eine große Anzahl von Schallemissionen aufgezeichnet, die auf Störgeräusche aus dem Ofenbetrieb zurückzuführen sind. Die elektrische Ofensteuerung und die Heizung im Ofen führen zum einen zu elektrischen Störsignalen, die zum Teil direkt auf die Vorverstärker oder die Verkabelungen wirken, zum anderen erzeugen die Heizvorgänge Vibrationen und Klappergeräusche im Ofen. Durch die Verwendung eines weiteren Sensors zur Aufzeichnung der Störgeräusche im Ofen, konnte ein Teil der Störgeräusche in der Auswertung eliminiert werden. Da von einigen elektrischen Störgeräuschen nur einer der beiden Sensoren betroffen war, wurden in der Auswertung nur diejenigen Schallemissionen betrachtet, die an beiden auf der Probe angebrachten Wellenleitern registriert wurden. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Signale handelt, die in der Probe erzeugt wurden. In Abb. 3 sind die derart gefilterten Daten dargestellt. Zeiten mit erhöhter Schallemissionsaktivität sind hier fast immer auf

erhöhte Ofenstörgeräusche zurückzuführen, die sich noch nicht zufriedenstellend herausfiltern ließen. Zu Beginn des Versuchs nach Aufbringen von Druck und Temperatur ist ebenfalls eine erhöhte Schallaktivität erkennbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass unter Last zunächst herstellungsbedingte Imperfektionen und Spannungen zu minimalen Schädigungen führen. Sobald sich ein Gleichgewicht eingestellt hat, nimmt die Schallaktivität ab.

Darüber hinaus ist auffällig, dass die Schallaktivität im Laufe des Versuchs abzunehmen scheint. Es wäre zu erwarten, dass die Aktivität bei zunehmender Versuchslaufzeit und Schädigung des Verbunds zunimmt. Die Aktivitätsabnahme ist nun auf zwei Dinge zurück zu führen. Zum einen hat die Probe, zieht man die bis zum Versagen belastete Probe mit quasi identischer Wicklung zum Vergleich heran, zum Versuchsende noch nicht die Hälfte ihrer Lebensdauer erreicht, so dass mit fortschreitender Schädigung noch nicht zu rechnen war. Zum anderen hat sich vermutlich mindestens einer der Wellenleiter durch die konstanten Vibrationen im Ofen mit der Zeit gelöst. Da hier nur Schallereignisse aufgetragen wurden, die an beiden Sensoren angekommen sind, nimmt mit nachlassender Haftung eines Sensors die dargestellte Schallaktivität ab. Im Moment werden die Filter überarbeitet, um zukünftig genauere Aussagen machen zu können.

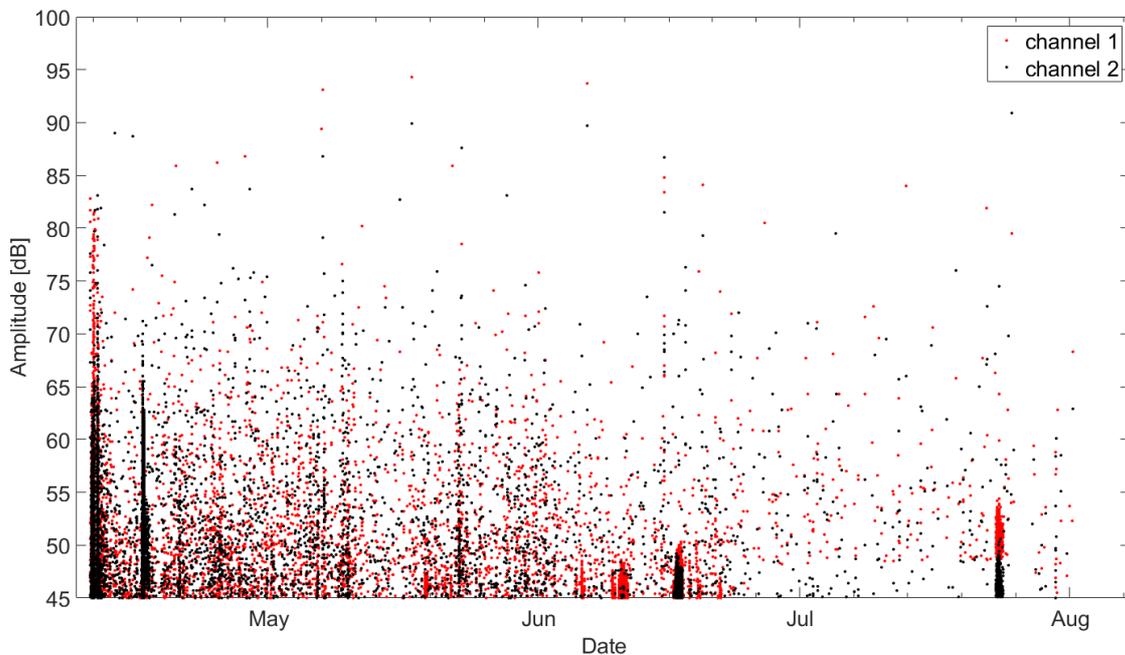


Abb. 3: Schallemissionsdaten, die an beiden auf der Laborprobe angebrachten Sensoren registriert werden konnten.

### 3. Bauteilversuch

#### 3.1 Vorbereitung des Bauteilversuchs

Für den Bauteilversuch wurde ein Stahlrohr mit üblichem Rohrlitungsdurchmesser von 325 mm und mit einer Wanddicke von 14,2 mm zunächst induktiv gebogen. Anschließend wurde das CMC-Jacket auf den Rohrbogen gewickelt. Das CMC lag hierfür in Form von Prepregs vor, die in Handarbeit um den Rohrbogen gewickelt wurden. Aufgrund der komplizierten Geometrie war der Einsatz einer automatisierten Wickelmaschine nicht möglich. Die Arbeiten fanden beim Projektpartner Schunk Kohlenstofftechnik GmbH statt. Zwischen den CMC-Lagen wurden Widerstandsdrähte für die spätere Dehnungsmessung des Jackets eingebracht. Nach dem Wickeln des Jackets wurde der Bogen einer speziellen

Wärmebehandlung unterzogen, wodurch die Matrix des Verbundwerkstoffs in eine Keramik umgewandelt wurde. Im Anschluss erfolgte der Transport zum GKM, wo der Rohrbogen in den Bypass eingepasst und eingeschweißt wurde.

### 3.2 Instrumentierung

Zur Zustandsüberwachung des Rohrbogens kommen verschiedene Sensoren zum Einsatz. Die Widerstandsdrähte zur Überwachung des Jacket sind bereits bei der Wicklung des CMC-Jackets eingebracht worden. Nach Einbau des Rohrbogens im GKM wurden außerdem HT-DMS, Thermoelemente und Schallemissionssensoren am Rohrbogen installiert. Die HT-DMS und die Thermoelemente sind in einem nicht ummantelten Bereich auf dem Stahlliner aufgefunktet. In Abb. 4 sind die Sensorpositionen auf dem Rohrbogen schematisch dargestellt.

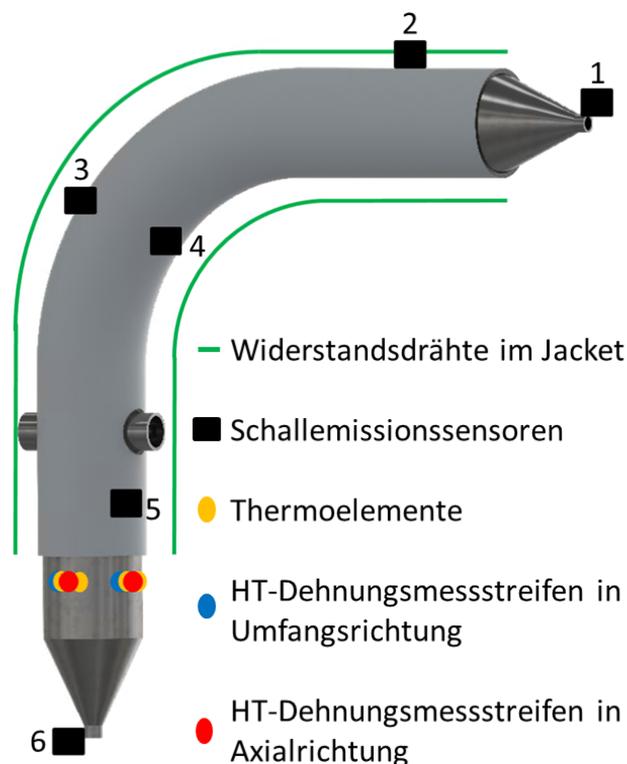


Abb. 4: Versuchsrohrbogen mit Instrumentierung

Für die Schallemissionsmessungen wurden sechs hochtemperaturbeständige Schallemissionssensoren (Physical Acoustics D9215) mithilfe eines keramischen Klebstoffs auf der Rohroberfläche angebracht. Die Sensoren können bei Temperaturen bis 540°C eingesetzt werden. Zusätzlich werden die Sensoren durch austenitische Halterungen und Bänder fixiert (vgl. Abb. 5). Die Auswahl des Klebstoffes erfolgte nach zahlreichen Versuchen mit verschiedenen Klebstoffen [5]. Die dauerhafte Fixierung der metallischen Sensorgehäuse auf dem CMC-Jacket ist aufgrund der stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Metall und Keramik generell schwierig.

Die Sensorpositionen sind in Abb. 4 markiert. Vier der sechs Sensoren befinden sich auf dem CMC-Jacket (Kanalnummer 2-5), zwei Sensoren befinden sich oben und unten auf dem Stahlrohr (Kanalnummern 1 und 6).

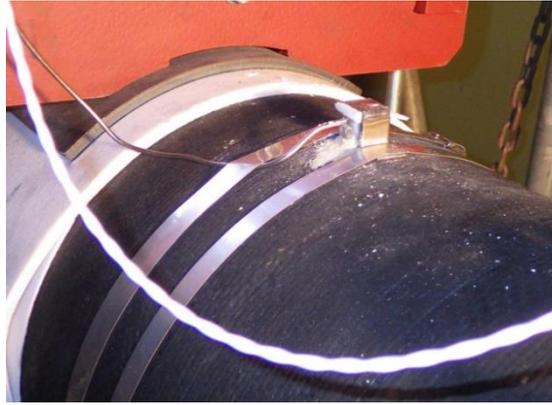


Abb. 5: Auf dem CMC-Jacket applizierter und mit Stahlbändern fixierter Schallemissionssensor

### 3.3 Ergebnisse der Überwachung mit Schallemissionssensoren

Die Überwachung des Versuchsrohrbogens mit Schallemissionsmessungen wurde Ende August 2018 gestartet. Zu diesem Zeitpunkt waren die Schieber zur Frischdampfleitung noch geschlossen und wurden erst am nächsten Tag geöffnet. Der Rohrbogen erfuhr bis zur Öffnung der Schieber weder eine Temperatur- noch eine Drucklast. Durch Öffnung der Schieber wurde Druck und Temperatur im Rohrbogen den Werten der Frischdampfleitung angeglichen. Diese lagen unterhalb von Betriebsdruck und -temperatur des Lastbetriebs aber deutlich über Umgebungsdruck und -temperatur. Der Rohrbogen erfuhr also eine erste mechanische und thermische Belastung.

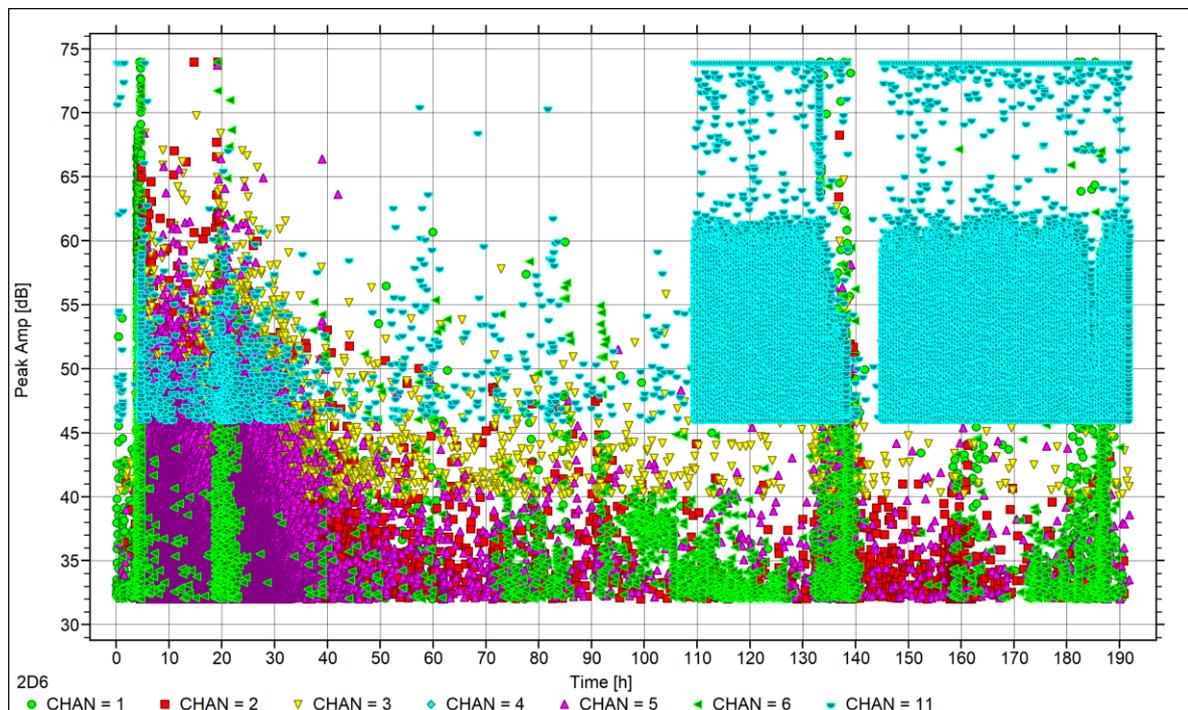


Abb. 6: Ungefilterte Schallemissionsdaten aus der ersten Woche des Bauteilversuchs

In Abb. 6 sind die in der ersten Woche nach Inbetriebnahme des Rohrbogens aufgezeichneten Schallemissionssignale aufgezeichnet. Kanal 1 und Kanal 6, die zwei Sensoren, die auf dem Stahlrohr angebracht sind, sind im Bild als grüne Punkte und Dreiecke dargestellt. Die anderen vier Sensoren sitzen auf dem CMC-Jacket. Zunächst ist zu bemerken, dass eine sehr große Menge an Schallemissionen aufgezeichnet wurde, die nicht auf Schädigungen im CMC-Jacket zurück zu führen sind. Insbesondere der Kanal 4 fällt

durch hohe Aktivität auf. Bereits in der ersten Woche wurden 60 GB an Daten aufgezeichnet. Eine Filterung der Daten ist für die weitere Auswertung ist daher unbedingt notwendig.

Zur Reduktion der aufgezeichneten Datenmenge wurde zunächst die Samplingfrequenz der transienten Signale reduziert. Der Sensor an Kanal 4 wurde auf Kanal 11 umgelegt, da hier mehr Möglichkeiten einer Frequenzfilterung bestehen. Anschließend wurde ein Frontend-Filter so eingestellt, das die vollständigen Signalformen von Hits, die nur eine Schwellwertüberschreitung enthalten, herausfiltert. Dadurch konnten die Dateigrößen deutlich reduziert werden.

Im Kraftwerksbetrieb ist die Aufzeichnung von Störgeräuschen nicht zu vermeiden, insbesondere da der Versuchsrohrbogen sehr nahe am Kessel installiert ist. Die Störquellen sind sehr vielfältig und bisher nur schwer zu klassifizieren. Die Messdaten, die regelmäßig abgerufen werden, werden deshalb nach verschiedenen Kriterien gefiltert, die sich bei Betrachtung der Signale und der Signalparameter als sinnvoll zeigten. Eine Vielzahl an Störgeräuschen, wie auf Kanal 4/11 ab 110 h zu erkennen, kann so eliminiert werden. Die Reduktion der Datenmenge und die teilautomatisierte Trennung von Störsignalen und Nutzsignalen ist bei der Dauerüberwachung mit Schallemissionsmessungen eine der Hauptaufgaben. Für die Filterung zeigten sich folgende Kriterien sinnvoll:

1. Nur Signale, zu denen ein transientes Signal aufgezeichnet wurde, werden dargestellt. Hierdurch werden die Datensätze herausgefiltert, die bereits vom Frontendfilter aussortiert wurden und diejenigen Datensätze, zu denen aus anderen Gründen kein transientes Signal aufgezeichnet wurde.
2. Signale, bei denen die Messkette in Sättigung gegangen ist, werden nicht berücksichtigt.
3. Nur Signale mit einer Dauer von mehr als 5  $\mu$ s werden berücksichtigt.
4. Nur Signale deren maximale Amplitude im Frequenzspektrum bei mehr als 90 kHz liegt werden berücksichtigt.
5. Das Produkt aus der Frequenz der maximalen Amplitude im Frequenzspektrum und dem Schwerpunkt des Frequenzspektrums (weighted peak frequency<sup>2</sup>) ist kleiner als 29.000 kHz<sup>2</sup>.

Es zeigte sich schnell, dass eine Filterung allein über die Frequenzen mit maximaler Amplitude oder den Schwerpunkt im Spektrum nicht zielführend ist. Stattdessen zeigte sich die weighted peak frequency als geeignet einen großen Teil der Störsignale zu eliminieren. Die weighted peak frequency ist das Produkt aus Frequenz mit maximaler Amplitude und dem Schwerpunkt des Spektrums und wird bei anderen Anwendungen zur Klassifizierung von Schallemissionsquellen verwendet [7].

In Abb. 7 sind nun die gefilterten Schallemissionen, die in der ersten Versuchswoche an den Sensoren, die auf dem Jacket angebracht wurden (Kanal 2-5), aufgezeichnet wurden, dargestellt. Man erkennt sehr deutlich im Anstieg der Aktivität den Zeitpunkt, als am 30.8. die Schieber geöffnet wurden und der Bauteilversuch in Betrieb ging. Zu dem Zeitpunkt war der Kraftwerksblock zwar nicht in Lastbetrieb, dennoch waren Druck und Temperatur des Rohrleitungssystems gegenüber der Umgebung deutlich erhöht. Druck und Temperatur im Versuchsrohrbogen wurden demnach ebenfalls erhöht, was sich in einer Zunahme der Schallemissionsaktivität zeigt.

Ebenfalls deutlich zu erkennen ist der Zeitpunkt, an dem der Kraftwerksblock seinen Betrieb am 31.8. wiederaufnahm. Der Rohrbogen erfuhr nun zum ersten Mal Betriebstemperatur und Betriebsdruck. Die Schallemissionsaktivität nahm im Laufe des ersten Betriebstags wieder ab und pendelte sich auf ein einigermaßen konstantes Level ein. Es ist ebenfalls zu sehen, dass jede Änderung des Betriebszustands des Kraftwerksblocks

sich in erhöhter Schallaktivität bemerkbar macht (z.B. am 5.9.). Die Betrachtung der Schallemissionsdaten ohne Kenntnis der Betriebsdaten ist also nicht sinnvoll.

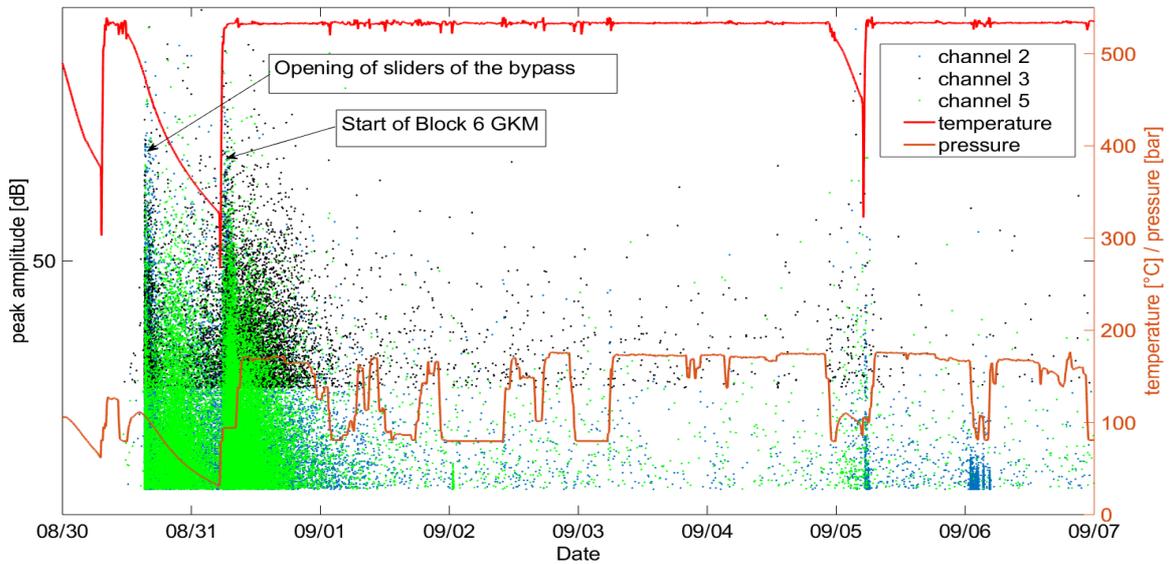


Abb. 7: Gefilterte Schallemissionsdaten der ersten Versuchswoche, die an den Sensoren auf dem Jacket aufgezeichnet wurden. Die Betriebsdaten sind ebenfalls dargestellt.

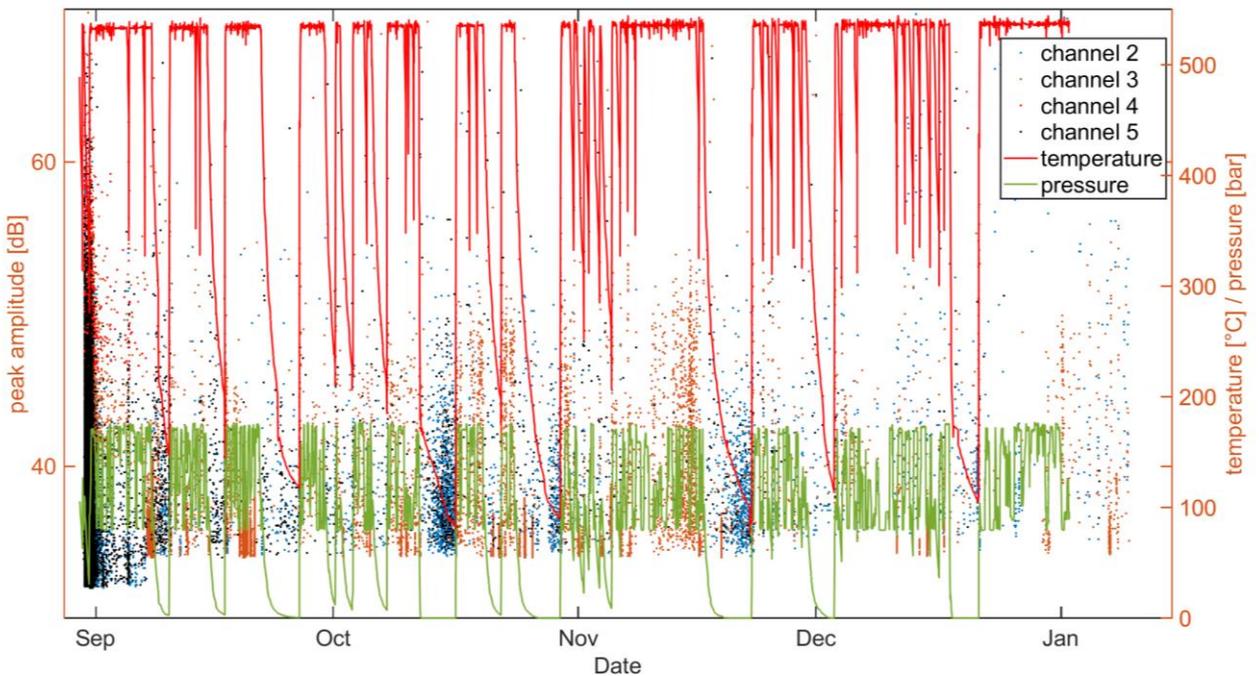


Abb. 8: Gefilterte Schallemissionsdaten von Versuchsbeginn bis Anfang 2019, die an den Sensoren auf dem Jacket aufgezeichnet wurden. Die Betriebsdaten sind ebenfalls dargestellt.

In Abb. 8 sind die gefilterten Schallemissionsdaten der Kanäle 2 bis 5 von Versuchsbeginn bis Anfang Januar 2019 dargestellt. Es ist zu sehen, dass weiterhin die meiste Aktivität durch die Änderung der Betriebszustände des Kraftwerksblocks zustande kommt. Jede Druck- und Temperaturänderung korreliert mit einer Anhäufung von Schallemissionen. Auffällig ist jedoch, dass bei kompletter Abkühlung des Kraftwerksblocks, was im Oktober und im November zu beobachten ist, im Abkühlvorgang Schallemissionen hauptsächlich an Kanal 2 und 5 zu beobachten sind. Kanal 2 und 5 sitzen auf den geraden Bereichen des Rohrbogens (vgl. Abb. 4). Bei Abkühlung des Kraftwerksblocks kommt es zu großen

Relativbewegung des gesamten Rohrleitungssystems. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass es aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnung von Liner und Jacket zu Reibgeräuschen im Materialverbund kommt. Diese sind in den geraden Bereichen des Rohrs ausgeprägter als im Bogen. Im Dauerbetrieb im November sind dagegen hauptsächlich Schallemissionen an Kanal 3 im Rohrbogen aufgetreten. Kanal 4 liefert seit einiger Zeit nur noch sehr wenige Daten, so dass davon ausgegangen wird, dass er sich vom Jacket gelöst hat.

#### **4. Zusammenfassung und Ausblick**

Schallemissionsmessungen werden neben anderen Verfahren in einem aktuell laufenden Forschungsvorhaben zur Überwachung eines Rohrbogens, der mit einem Keramikfaserverbund ummantelt ist, zur Dauerüberwachung des Materialverbunds eingesetzt. Die grundsätzliche Machbarkeit konnte bereits in einem Laborversuch gezeigt werden. Im Laborversuch kamen Schallemissionssensoren für Raumtemperatur zum Einsatz, die auf Wellenleitern angebracht waren, die auf dem Prüfkörper fixiert waren. Der Laborversuch wurde für die Installation des Bauteilversuchs vorzeitig unterbrochen, so dass eine katastrophale Schädigung nicht zu beobachten war.

Im Bauteilversuch sind hochtemperaturbeständige Schallemissionssensoren direkt auf der Oberfläche des Jackets und auf dem metallischen Liner über einen keramischen Klebstoff fixiert. Der Versuch liefert seit August 2018 Messdaten. Über eine Filterung der Daten, kann ein Großteil der betriebsbedingten Störgeräusche herausgefiltert werden. Eine erhöhte Schallemissionsaktivität wird beim Versuchsstart beobachtet und bei jeder Änderung des Betriebszustands des Kraftwerksblocks. Zum aktuellen Zeitpunkt sind die Kriechdehnungen im Liner noch zu gering, als dass das Jacket signifikant Last trägt. Schallemissionen, die auf Schädigungen zurück zu führen sind, wurden demnach bisher nicht erwartet. Der Versuch soll nun weiterlaufen, bis ausreichende Kriechdehnungen im Liner erreicht sind.

Die Entwicklung der Schallemissionsaktivität wird bis zum Versuchsende weiter beobachtet. Bei einer plötzlichen Zunahme der Aktivität unabhängig vom Betriebszustand ist von einer fortschreitenden Schädigung auszugehen. Für die weitere Auswertung, sollen die verschiedenen Betriebszustände im Detail voneinander getrennt betrachtet werden. Unterscheiden kann man hier den Dauerbetrieb, das Abkühlen und das Wiederauffahren. Darüber hinaus sollen die Daten auch mit den Messdaten der anderen Überwachungsverfahren (HT-DMS und Widerstandsdrähte) korreliert werden.

#### **Danksagungen**

Die vorgestellten Untersuchungen fanden in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter der Projektnummer 03ET7029F geförderten Projekt statt.

Wir bedanken uns außerdem bei unseren Projektpartnern Bilfinger Engineering and Technologies, CME Universität Bayreuth, Fraunhofer ISC-HTL Bayreuth, Grosskraftwerk Mannheim, Schunk Kohlenstofftechnik, Technion Haifa Israel und TÜV SÜD Mannheim für die produktive Zusammenarbeit.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Referenzen

- [1] Bürgel, R.: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen. Kapitel 3.10 Kriechschädigung und Kriechbruch. Vieweg+Teubner Verlag 2013
- [2] Flexibility in Thermal Power Plants - With a focus on existing coal-fired power plants, AGORA Energiewende, Berlin 2017
- [3] Umweltbundesamt: Konventionelle Kraftwerke und erneuerbare Energien, 2018. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/konventionelle-kraftwerke-erneuerbare-energien#textpart-1>, abgerufen am: 31.01.2019
- [4] DE 10 2006 038 713 A1
- [5] Jüngert, A., Friedrich, M., Huang, M., Klenk, A. u. Weihe, S.: Monitoring of CMC-Jacketed Pipes for High-Temperature Applications. PVP2018-85023. Pressure Vessels and Piping Conference. PVP2018. 2018
- [6] Spatz, C., Langhof, N., Schmidt, J. u. Krenkel, W.: CMC jackets for metallic pipes – A novel approach to prevent the creep deformation of thermo-mechanically loaded metals. Journal of the European Ceramic Society 38 (2018) 8, S. 2954–2960
- [7] Sause, M.G.R., Gribov, A., Unwin, A. R. u. Horn, S.: Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals. Pattern Recognition Letters 33 (2012) 1, S. 17–23