

Onlinesysteme zur Zustandsüberwachung von Rohrleitungen und dickwandigen Bauteilen in Neuanlagen

Joël Wagner

STEAG Energy Services GmbH

Germany

1. Herausforderungen im Bereich der Zustandsüberwachung

Der Betrieb und die Überwachung hochbeanspruchter Rohrleitungen und dickwandiger Kesselbauteile stehen vor neuen Herausforderungen. Durch die Europäische Union ist die Gesetzgebung für die Herstellung und den Betrieb der Komponenten von Druckgeräten europaweit teilweise erheblichen Änderungen unterworfen. In Deutschland wird die Zustandsüberwachung betroffener Geräte durch die Druckgeräterichtlinie, die als Druckgeräteverordnung (14. GPSGV) in das deutsche Recht eingeführt wurde, bestimmt. [1] Mindestanforderung für den Bereich des Betriebes sind die Arbeitsschutzrichtlinien, die in Deutschland entsprechend der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) umgesetzt und durch Änderungen im technischen Regelwerk ergänzt werden. Der Bereich der Zustandsüberwachung ist neu zu betrachten, um als Kraftwerksbetreiber die von BetrSichV und TRBS (Technische Regeln für Betriebssicherheit) vorgesehenen erweiterten Gestaltungsspielräume in ihrer Gänze zu nutzen. [1]

Was bedeutet das konkret? §15, Absatz 5 der BetrSichV schreibt Höchstfristen für bestimmte Anlagenkomponenten vor, die in Abstimmung mit der zuständigen Behörde und der inzwischen frei wählbaren Überwachungsstelle (ZÜS) verlängert werden können (vgl. BetrSichV § 15 Abs. 17). Die VGB Richtlinie 506 beschreibt einen „Maßnahmenkatalog in Form verschiedener Bausteine zur Gestaltung der Prüfungen [...]“. Auf Basis der vom Betreiber ausgewählten Bausteine [sei] eine effektive Gestaltung der Prüfungen von Komponenten [...] einschließlich einer Prüffristverlängerung (vgl. VGB-R 104 O) möglich.“ [1] Im Bereich des Dampferzeugers ist eine Verlängerung der gesetzlich vorgeschriebenen Prüffristen für innere Prüfungen von 3 auf 5 Jahre denkbar. Bei Neuanlagen kann die Prüffristverlängerung ggf. schon mit der Genehmigung beantragt werden (siehe VGB-Richtlinie R 104 O) – vorausgesetzt die Betriebssicherheit kann in ausreichender Weise gewährleistet werden. [1,2]

Darüber hinaus stehen Standorte vor der Herausforderung, dem durch häufigere Aufgabenwechsel hervorgerufenen Know-How-Abfluss in geeigneter Form zu begegnen und betriebliche Erfahrung und Vorfälle für eine Betriebsdauer von über 200.000 Stunden zu konservieren.

Folgender Aspekt beschäftigt vor allem Betreiber neuer Anlagen. Aufgrund hoher Frischdampfparameter kommen in modernen Dampferzeugern neue Werkstoffe zum Einsatz, deren Festigkeitskennwerte teilweise nur in extrapolierte Form vorliegen. Es ist also durchaus denkbar, dass spätere Korrekturen der Materialwerte eine Auf- oder Abwertung des Erschöpfungsergebnisses der Komponenten notwendig machen.

Die für konventionelle Kraftwerke zunehmende Notwendigkeit im nationalen Netz flexibler auf Lastschwankungen reagieren zu können, fordert für bestehende Anlagen unter Umständen häufigere An- und Abfahrten als ursprünglich im Rahmen der Auslegung zugrunde gelegt wurden. Die zusätzliche Wechselbeanspruchung der Komponenten muss erfasst und bewertet werden.

In Summe fordern die geänderten Rahmenbedingungen für die Zustandsüberwachung neue Methoden und Instrumente. Der Einsatz von Onlinesystemen soll im Folgenden anhand bisheriger Betriebserfahrungen erläutert werden.

2. Onlinesysteme als zentraler Bestandteil der Zustandsüberwachung

In Anlehnung an die VGB Richtlinie 506 kann die Zustandsüberwachung in folgende Bestandteile gegliedert werden:

- **Auslegung**
Definition und zeitliche Eingrenzung des bestimmungsgemäßen Betriebes und Berücksichtigung unvermeidbarer Zusatzbeanspruchungen
- **Dokumentierte Qualität**
Alle relevanten Unterlagen aus der Herstellung und dem Betrieb der Komponenten (vollständige Auslegungsdokumentation, Werkstoffnachweise, Maßprotokolle, ZfP-Protokolle, Einstellprotokolle, technische Änderungen, etc.)
- **Diagnose im laufenden Betrieb**
Ermittlung der statischen und instationären Belastung (z.B. durch Eigengewicht, Kriechschädigung und Wechselbeanspruchung, Zusatzkräfte)
- **Diagnose im Rahmen eines Stillstandes**
Äußere und Innere Prüfungen
- **Zustandsbewertung**
Beurteilung des Komponentenzustandes, um anschließend erforderliche Prüf- und Instandhaltungsmaßnahmen unter Einbeziehung der zuvor genannten Quellen festlegen zu können

Die VGB-R 506 beschreibt in Kapitel 5.6 (Ausgabe 2009) zwei Verfahren, die über die in der Vergangenheit praktizierte Vorgehensweise hinaus gehen und im Sinne der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie in punkto Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit gegenüber zeitbasierten Instandhaltungszyklen eine deutliche Verbesserung darstellen. Das Onlinesystem SR::SPM (SPM = steam pipe monitoring) der Firma STEAG Energy Services GmbH folgt dem Verfahren 2 der Richtlinie (siehe Kapitel 3).

Online-Systeme erfüllen durch eine zentrale Datenerfassung, Datenarchivierung und kontinuierliche Berechnungen die Anforderung an die Diagnose im laufenden Betrieb vollständig. Betriebszustände können direkt bewertet und Zustandsverläufe historisch verfolgt werden. Zusätzlich eignen sich solche Systeme zur Verwaltung und Verknüpfung relevanter Unterlagen, wie z.B. As-build-Maßprotokolle, Einstellprotokolle und Werkstoffnachweise. Technische Änderungen können im System direkt berücksichtigt und in die weitere Überwachung einbezogen werden. Kurz: Die Dokumentierte Qualität wird gewährleistet.

3. Verfahren zur Überwachung der Rohrleitungsbeanspruchung

Infolge hoher Betriebstemperaturen entstehen im Bereich der hoch beanspruchten Rohrleitungen Ausdehnungen, welche messbar sind und eine Rückwirkung auf die Beanspruchung der Leitung haben. Grundsätzlich gilt: Je höher die Beanspruchung, umso kürzer ist die Lebensdauer. Zur quantitativen Ermittlung der Restlebensdauer müssen aus den Bewegungen bzw. den gemessenen Lagerkräften Spannungen ermittelt werden.

Die VGB Richtlinie R 506 beschreibt in Kapitel 5.6 zwei geeignete Verfahren zur Zustandsüberwachung von Rohrleitungen, die über die Anforderungen des Regelwerkes hinausgehen und basierend auf einer Modellbildung der Rohrleitung die Beanspruchungsgrößen ermitteln. Beide Verfahren setzen eine kontinuierliche messtechnische Erfassung von Kräften und Wegen an ausgewählten Hängern und Stützen der Rohrleitung voraus.

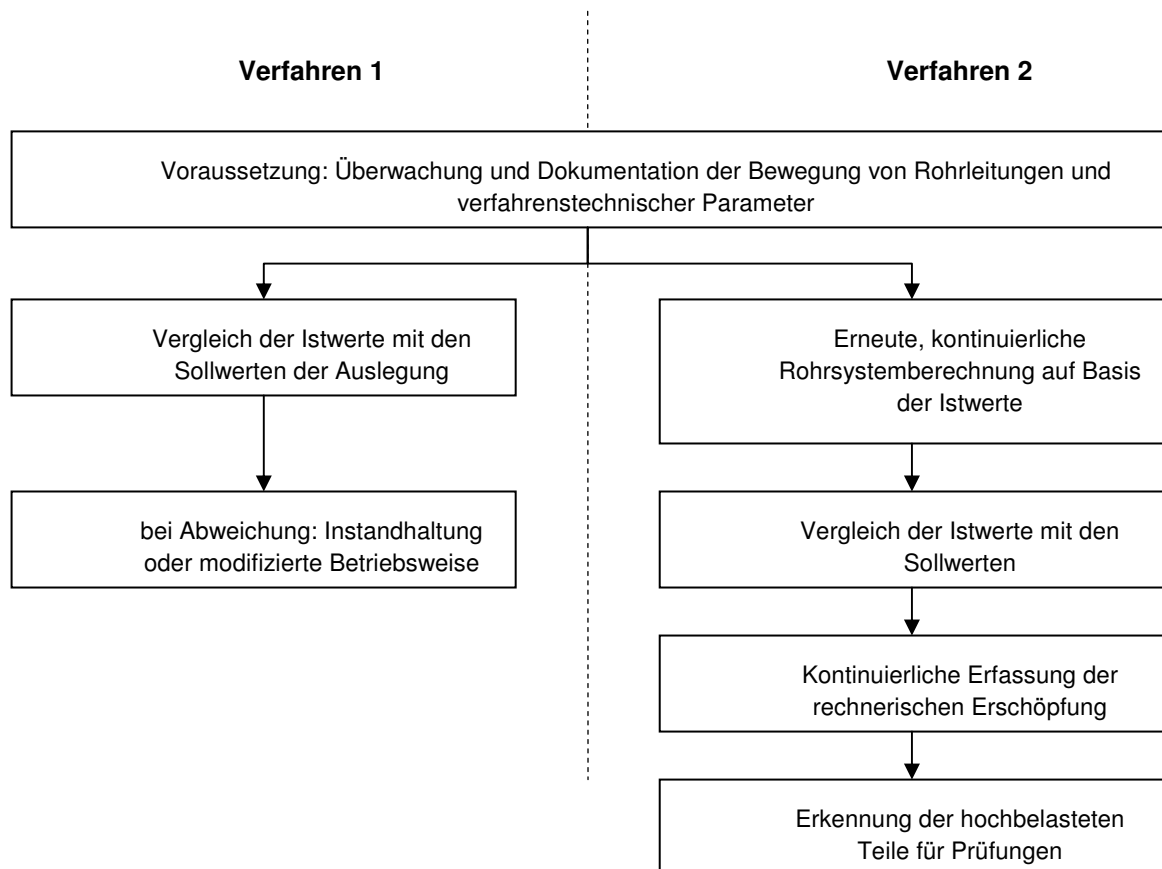
Verfahren 1

Der funktionale Zusammenhang zwischen Bewegungen/Auflagerkräften zu Spannungen oder Dehnungen wird aus Ähnlichkeitsbeziehungen abgeleitet. Diese Beziehungen werden im Planungsstadium der Rohrleitung ermittelt. Bei einer Übereinstimmung der gemessenen Istwerte mit den Sollwerten der Auslegung kann der planmäßige Betrieb abgeleitet werden.

Eine verlässliche Aussage über den tatsächlichen rechnerischen Erschöpfungsgrad kann jedoch nur getroffen werden, wenn der bestimmungsgemäße Betrieb eingehalten wird. Wenn ein davon abweichendes Verhalten (z.B. Blockieren, Verschmutzen von Konstanthängern) vorliegt, welches in der Planungsphase nicht berücksichtigt wurde, müssen die auftretenden Spannungen mittels aufwändiger Offline-Nachrechnungen ermittelt werden.

Verfahren 2

Der funktionale Zusammenhang zwischen Bewegungen/Kräften zu Spannungen wird nicht aus Ähnlichkeitsbeziehungen abgeleitet, sondern durch kontinuierliche Rohrsystemberechnungen ermittelt. In bestimmten Zeitintervallen (z.B. 5 Minuten) fließen die Überwachungsgrößen (Druck, Temperatur, Kräfte und Wege) als Berechnungsrandbedingung in die Simulation ein. „Dieses im Vergleich zum Verfahren 1 erweiterte Vorgehen erlaubt die Erfassung von Rohrleitungszuständen, welche vor Inbetriebnahme nicht planbar waren oder erwartet wurden.“ [1]



4. Rohrleitungsmonitoring SR::SPM

Das System SR::SPM folgt dem oben beschriebenen Verfahren 2 und wird zur kontinuierlichen Überwachung und Berechnung von hochbeanspruchten Rohrleitungen (z.B. FD und HZÜ) eingesetzt. Die Beanspruchung der Rohrleitung wird neben den Betriebsgrößen Druck und Temperatur zusätzlich durch Kraft- und Wegmessungen, die in horizontaler und vertikaler Richtung entlang der Leitung installiert sind, erfasst. Die Messwerte fließen als Randbedingung in eine vollständige Rohrsystemberechnung mit Hilfe des Rohrstatikprogramms ROHR2 ein. Das ROHR2-Modell bildet den vollständigen Rohrleitungsverlauf ab und wurde für die Onlineberechnung (z.B. alle 5...15 Minuten) in SR::SPM eingebunden und qualifiziert (Abb. 2).

Die Sollbeanspruchung der Leitung wird unter Berücksichtigung von Druck und Temperatur bestimmt und mit der tatsächlichen Belastung auf Basis der gemessenen Kräfte und Wege verglichen. Wirkende Zusatzlasten werden so mit ihren Auswirkungen (Spannung aus äußerer Belastung und behinderter Wärmedehnung) bestimmt. Durch die kontinuierlichen vollständigen Rohrsystemberechnungen werden auch solche Betriebsweisen berücksichtigt, die vor Inbetriebnahme nicht vorausgesagt werden konnten – beispielsweise hervorgerufen durch das Blockieren eines Konstanthängers.

Die zusätzlich wirkenden Momente fließen zusammen mit der tatsächlichen Geometrie der Rohrbögen (Wanddicken, Durchmesser, Ovalität) in die Primär- und Sekundärspannungsbewertung und damit in die Erschöpfungsberechnung ein. Die Berechnung der Zeitstanderschöpfung orientiert sich im Wesentlichen an den Vorgaben der DIN EN 12952-4 unter zusätzlicher Berücksichtigung der äußeren Momente und As-build-Geometrien.

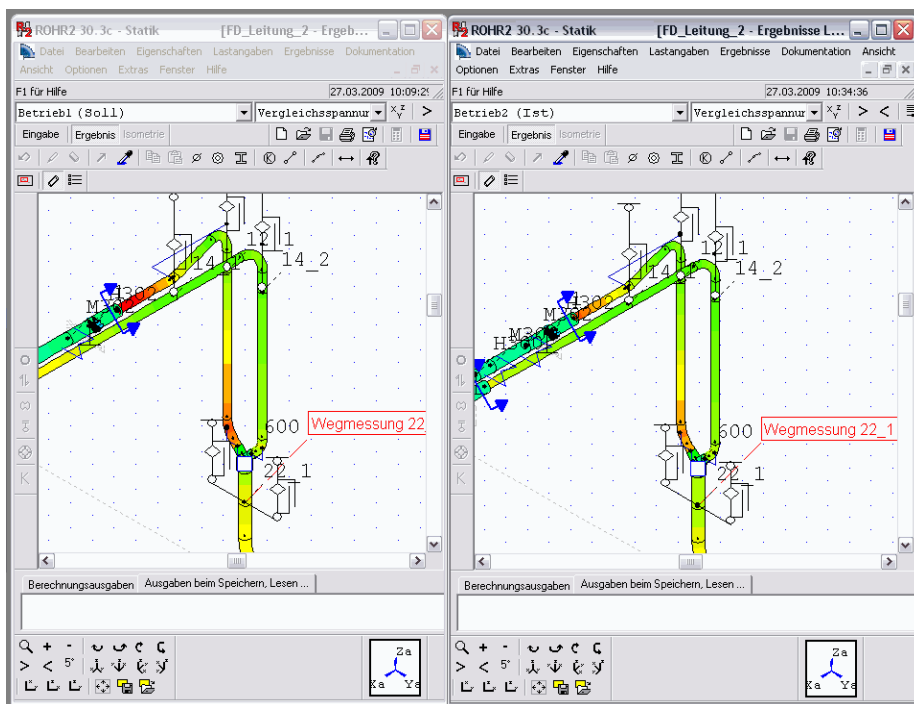


Abbildung 1: Vergleich der online berechneten Schnittergebnisse für das erwartete (links) und das tatsächliche (rechts) Verhalten der Rohrleitung

Darüber hinaus stehen folgende anlagenspezifische Prozessbilder und Diagramme zur Verfügung:

- Gesamtstatusübersicht und Statusdiagramme für die Überwachung und Beurteilung des bestimmungsgemäßen Betriebes
- Statusübersicht der Kraft- und Wegmessungen (Abb. 3) sowie der überwachten Rohrbögen
- Ergebnisdarstellung (Erschöpfung, Spannungen und Momente der Rohrbögen)
- Überwachung aller Konstant- und Federhänger (Abb. 5)
- Excel-Erschöpfungsübersicht (Einzelergebnisse, Anzahl überwachter Stunden, Klassierung der Drücke, Temperaturen und Momente zur Nachrechnung gemäß TRD 508 bzw. DIN EN 12952-4)

- Ergebnisdiagramme aller Rohrbögen, sowie Kraft- und Wegmessungen für beliebige Zeiträume und Verdichtungsstufen (z.B. 5-Minuten, Stunden-, Tages- oder Wochenwerte)

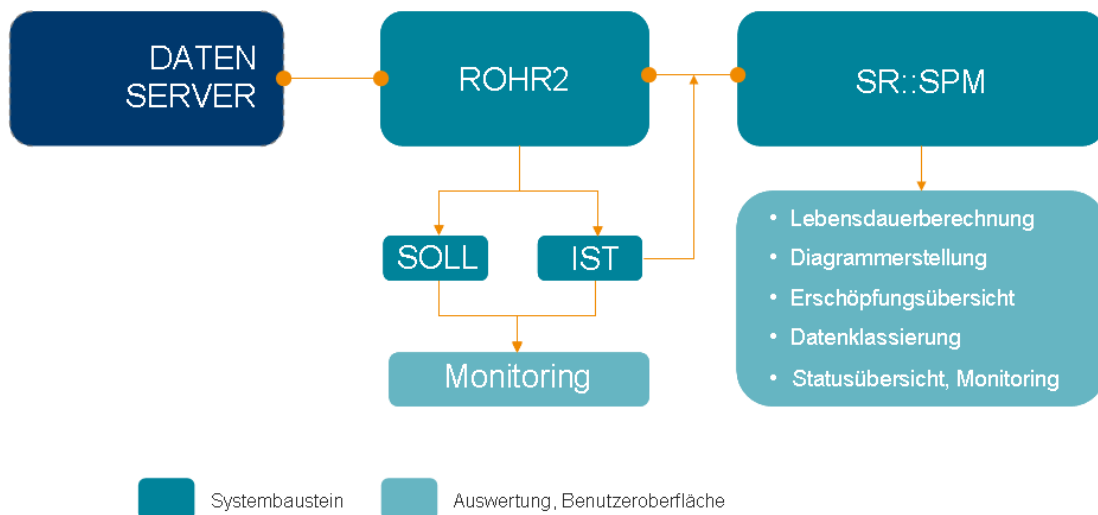


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Systems SR::SPM

5. Überwachung des bestimmungsgemäßen Betriebes

Das Vermeiden unplanmäßiger Beanspruchungen ist für die Betriebssicherheit von entscheidender Bedeutung – setzt aber voraus, dass kritische Vorfälle sofort erkannt, bewertet und behoben werden können. Im Bereich der Rohrleitung können unplanmäßige Zustände beispielsweise durch Blockieren oder Verschmutzen von Konstanthängern auftreten. Wie das nachfolgende Beispiel zeigt, ist auch der einseitige Abriss eines Festpunktes denkbar. Für die Überwachung ist eine Unterteilung in die Belastung der Rohrbögen und das Verhalten der mit Weg- bzw. Kraftsensoren bestückten Hänger und Festpunkte sinnvoll.

Als Kriterium für die planmäßige Beanspruchung von Rohrbögen können die FDBR-Gleichungen 10-1, 10-4 und 10-5 herangezogen werden. Werden alle drei Gleichungen erfüllt, wird im System der Zustand der Rohrbögen als planmäßig eingestuft und angezeigt.

Für das bestimmungsgemäße Verhalten der Kräfte und Wege wird für jeden Messwert ein Toleranzbereich definiert. Wird dieser Bereich verlassen, erhält der Nutzer einen entsprechenden Hinweis. Abbildung 3 zeigt eine solche Situation, die sich am 01.06.2008 in einer der überwachten Anlagen ereignete. Dargestellt wird der Soll-Ist-Vergleich der gemessenen Lagerkräfte und Wege entlang der FD- bzw. KZÜ-Leitung (Wegmessung 21.2 und 22.2). Der von ROHR2 berechnete Sollwert gibt an, wie sich die Rohrleitung im entsprechenden Abschnitt erwartungsgemäß ausdehnen bzw. mit welcher Kraft sie beansprucht wird – jeweils unter Berücksichtigung der aktuellen Betriebsdrücke und -temperaturen.

Die Ergebnisse (Ist) der beiden Doppel-Kraftmessungen 30.1 (Festpunkt im Volllaststrang unterhalb des Kreuzventils) und 30.5 weichen zum kritischen Zeitpunkt vom tolerierten Bereich ab – die Messung 30.5 um 68 kN. Die unplanmäßigen Ist-Werte werden im Prozessbild rot hinterlegt. Auf Wunsch kann das Anlagenpersonal per Nachricht informiert werden.

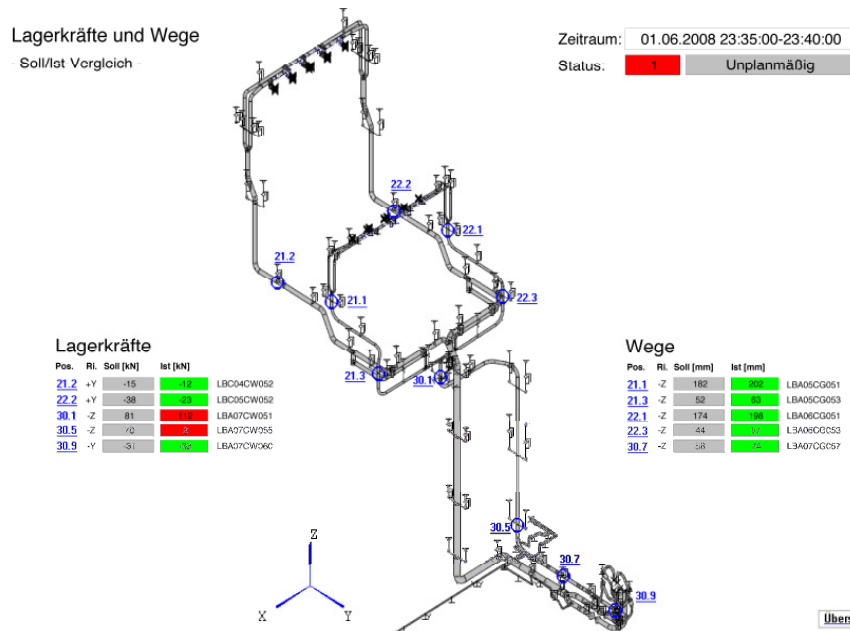


Abbildung 3: Prozessbild zur Überwachung der Lagerkräfte und Wege

Der Festpunkt 30.5 besteht aus zwei Halterungen, die um 180 Grad versetzt an der Rohrleitung angreifen und am anderen Ende am Stahlbau montiert sind. Beide Streben sind mit einer Kraftmessung ausgestattet, die in Summe die Gesamtkraft der Halterung ergeben. Abbildung 4 zeigt das hinterlegte Diagramm der Kraftmessung während des kritischen Zeitraumes (X-Achse). Die zugehörige HD-Temperatur und die Soll- und Ist-Ergebnisse der Kraftmessungen sind auf der Y-Achse aufgetragen. Um 23:25 Uhr fallen die Istwerte plötzlich ab. Der Grund ist der einseitige Abriss des Festpunktes (A). Vor dem Abriss stimmte die Summe der beiden Messungen mit dem ermittelten Sollwert überein.

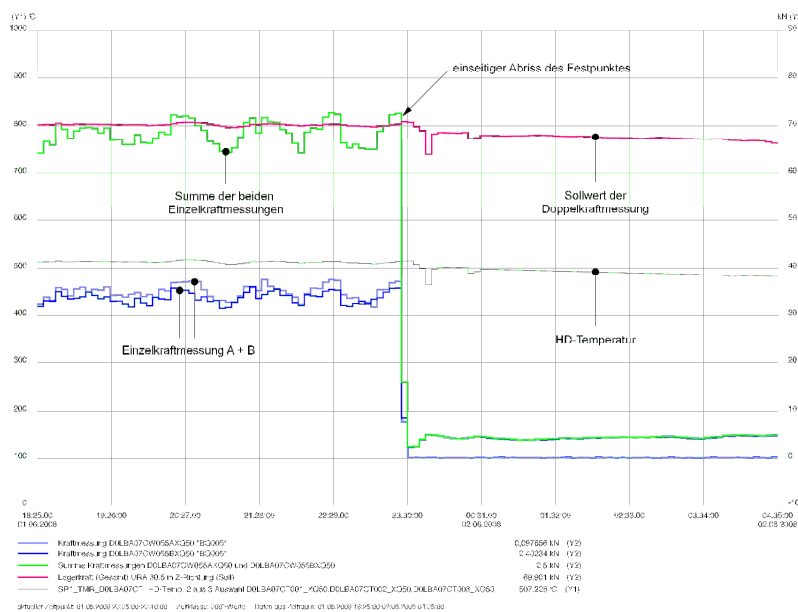


Abbildung 4: Diagramm der Doppelkraftmessung 30_5

Der Soll-Ist-Vergleich aller Hänger (Abb. 5) zeigt den Einfluss des Vorfalles auf die benachbarten Unterstützungen (30_2 bis 30_9). Die an fünf Hängern in Z-Richtung gemessene Ist-Auslenkung wird in Abb. 5 durch dunkle Balken dargestellt. Die Auslenkung aller anderen Hänger wird berechnet. Durch das hinterlegte Rohrleitungsmodell kann die Messtechnik reduziert werden, da einige Kraft- und Wegmessungen an zentralen Positionen als Randbedingung ausreichen, um die Bewegung und Belastung der dazwischen liegenden Abschnitte zu ermitteln. So wird für den Festpunkt 30_5 (Sollauslenkung = 5mm) eine tatsächliche Auslenkung von -129mm berechnet.

Mit Hilfe der Übersichten konnte der Vorfall am Standort erkannt werden. Auf Basis der detailliert zur Verfügung stehenden Schnittlasten (Spannungen, Kräfte, Momente, Verdrehung, Verschiebung) wurden benachbarte Rohrsegmente analysiert und bewertet. Dabei stellte sich heraus, dass durch das günstige Unterstützungskonzept und den optimalen Verlauf der Rohrleitung in diesem Abschnitt voraussichtlich keine Lebensdauer verkürzenden Belastungen auftraten.

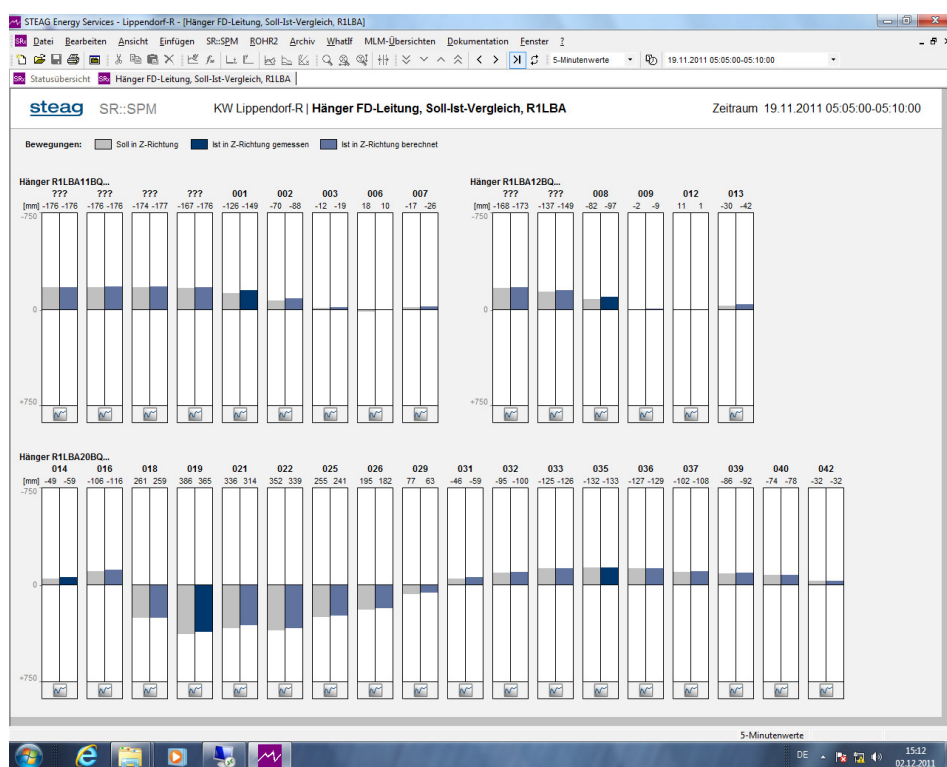


Abbildung 5: Soll-Ist-Vergleich der Hängerauslenkung

6. Zusammenfassung

Onlinesysteme leisten in Zukunft einen wichtigen Beitrag für das Betriebs- und Instandhaltungsmanagement. Je genauer auf Basis der in Kapitel 2 benannten Bausteine der Anlagenzustand erfasst und bewertet wird, desto genauer lassen sich die Prüfmethode, -umfänge und -fristen für die wiederkehrenden Prüfungen planen. [1] Bei Neuanlagen bzw. beim Austausch von Komponenten sind die Überwachung und damit die Erfassung kritischer Betriebsweisen von Beginn an zu empfehlen, um individuelle Prüfristen (Verlängerung oder Verkürzung) argumentieren und den Instandhaltungsaufwand planen und reduzieren zu können. Bei bestehenden Anlagen ist eine Nachrechnung der bisher verstrichenen Betriebszeit möglich – sofern die erforderlichen Betriebsdaten zur Verfügung stehen.

Die kontinuierliche Überwachung des Rohrleitungszustands meldet unplanmäßige Beanspruchungen. Eine Verkürzung der Lebensdauer und Gefahren infolge unerwarteter Beanspruchung können daraufhin verhindert werden. Betriebszustände, die im Rahmen der Auslegung nicht berücksichtigt wurden, fließen durch die kontinuierliche Rohrsystemberechnung mit SR::SPM in die Zustandsbewertung ein.

Beim Einsatz moderner Werkstoffe liefert die kontinuierliche Datenerfassung und Berechnung der Zeitstand-, Wechsellerschöpfung und der Kriechdehnung die Grundlage für eine spätere Nachrechnung – beispielsweise, wenn die bisher hinterlegten Festigkeitskennwerte aktualisiert werden.

7. Literatur

- [1] VGB Richtlinie 506, Zustandsüberwachung und Prüfung der Komponenten von Dampfkesselanlagen und Wasser oder Dampf führenden Hochdruckrohrleitungen, VGB PowerTech e.V., April 2008

- [2] VGB Richtlinie 104 O, Leitfaden zur Umsetzung der Betriebssicherheitsverordnung in Kraftwerken, Onlinerichtlinie, VGB PowerTech e.V.

- [3] J. Weber, M. Rieke
Berechnungsmethode zur Beurteilung des Festigkeitsverhaltens von Rohrbögen und –biegungen im Zeitstandsbereich, Gemeinschaftsforschungsvorhaben VGB-Nr. 201, MPA Universität Stuttgart, August 2004

- [4] TRBS 1201
Technische Regeln für Betriebssicherheit, Prüfung von Arbeitsmitteln und überwachungsbedürftigen Anlagen, Dezember 2006

- [5] Richtlinie 97/23/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte

- [6] DIN EN 12952-4:2000
Betriebsbegleitende Berechnung der Lebensdauererwartung

- [7] D. Gocht, J. Wagner
Systembeschreibung Modul Kriechdehnung, Evonik Energy Services GmbH, März 2010

Kontakt:

STEAG Energy Services GmbH
Rütterscheider Straße 1 – 3
45128 Essen

Dr. Georg Händel
Tel.: +49 201 801 4110
georg.haendel@steag.com
www.steag-systemtechnologies.com