



## Materialbelastung in flexiblen Kraftwerken

Flexible und belastungsabhängige Inspektionsintervalle für Komponenten unter Wechsellast



*Für klassische Kohle- und Erdgaskraftwerke ändern sich die Einsatzbedingungen durch den Verbund mit den erneuerbaren Energien erheblich. Sie laufen künftig häufiger unter Teillast, weisen erheblich mehr An- und Abfahrzyklen auf und die Komponenten werden stärker und anders belastet. Wissenschaftler haben die thermische und mechanische Belastung dickwandiger Bauteile in Kraftwerken unter den neuen Bedingungen untersucht. Ziel ist, bei gleichem Sicherheitsniveau die Stabilität von Komponenten gegenüber Schädigungen exakter zu berechnen und damit deren Einsatzzeiten wirtschaftlich zu optimieren.*

Dampfkraftwerke auf Basis von Kohlen oder Erdgas sind bisher auf möglichst konstante Betriebsphasen mit stabilen Temperatur- und Innendruckverhältnissen ausgelegt. Üblicherweise herrschen im Bereich der Dampfturbinen 540–600 °C sowie 240–290 bar. Ein Kraftwerk sollte für den Volllastbetrieb diesen Zielbereich möglichst schonend erreichen und lange einhalten.

Die Energiewende verlangt aber eine deutlich höhere Flexibilität dieser Kraftwerke. Sie stehen im Netz im engen Verbund mit Windparks und Photovoltaikanlagen und müssen den restlichen, durch die Erneuerbaren nicht abgedeckten Strombedarf sowie den größten Teil der Systemdienstleistungen zur Netzstabilität decken. In der Folge werden diese Kraftwerke durch häufige Starts und Übergänge in den Teillastbereich beansprucht. Das bedeutet jedes Mal für die Bauteile einen Temperaturwechsel von mehreren hundert Grad in vergleichsweise kurzen Zeiträumen. Diese neuen Bedingungen belasten die Komponenten stärker und anders. Wissenschaftler haben daher im Forschungsprojekt THERRI die Belastungen durch zyklische Temperaturänderungen unter den veränderten Lastgängen in Kraftwer-

ken untersucht und eine neue Methode zur bruchmechanischen Schadenstoleranzanalyse experimentell und numerisch entwickelt und getestet. Dank der Projektergebnisse lässt sich die Restlebensdauer von zentralen Anlagenkomponenten erstmalig genauer kalkulieren, ohne bei der technischen Sicherheit Abstriche vorzunehmen. Für die wirtschaftliche Kalkulation der Kraftwerksbetreiber sind diese Erkenntnisse wichtig, weil die Anlagen einerseits durch den häufigeren Teillastbetrieb und zahlreiche Stillstände geringere Erlöse erzielen als im Volllastbetrieb und andererseits durch diese Lastwechsel aber höhere Wartungs- und Instandhaltungskosten entstehen. Die Ergebnisse der Untersuchungen flossen in einen neuen Richtlinienentwurf zum bruchmechanischen Konzept ein. Der TÜV Nord hat das Projekt gemeinsam mit der Universität Rostock und dem Forschungszentrum Jülich durchgeführt. Die Praxistests fanden am KNG Kraftwerk Rostock statt. Es wurden lastabhängige Inspektionsintervalle für die Kesselumwälzpumpe und den Überhitzer-Sammler ermittelt.

### Neue Methode zur Schadensbewertung

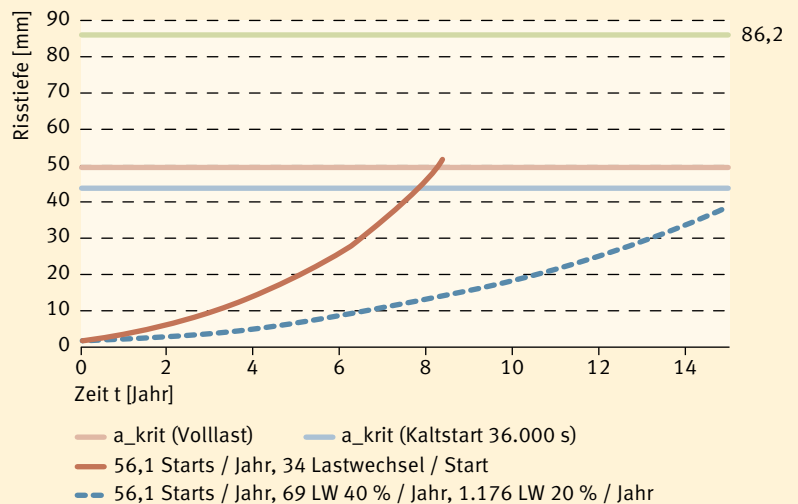
Unter Teillast arbeitet auch ein klassisches Kraftwerk längere Zeit im Temperaturbereich zwischen 300 und 550 °C. Das führt zu anderen Formen der Materialbelastungen: Oberhalb von etwa 550 °C dominieren bei gleichbleibend hohen Temperaturen Kriechrisse, während unterhalb durch die häufigeren Temperatur- und Druckwechsel Ermüdungsrisse das Hauptrisiko darstellen. In der Praxis überlagern sich beide Formen und der Übergangspunkt liegt bei etwa 500 °C.

Durch den häufigeren Teillastbetrieb ist eine Komponente in der Praxis anders belastet als es die Standardannahmen der Regelwerke vorsehen. Daher entwickelten die Projektpartner eine Methode der bruchmechanischen Bewertung, die die Einsatzpraxis berücksichtigt. Sie ist geeignet, bei unverändert hohem Sicherheitsniveau eine längere Restlebensdauer der Komponenten zu ermöglichen (Abb. 1). Dazu haben die Partner die notwendigen Grundlagen durch experimentelle, numerische und materialwissenschaftliche Untersuchungen sowie Praxistests erarbeitet, die bisher fehlten.

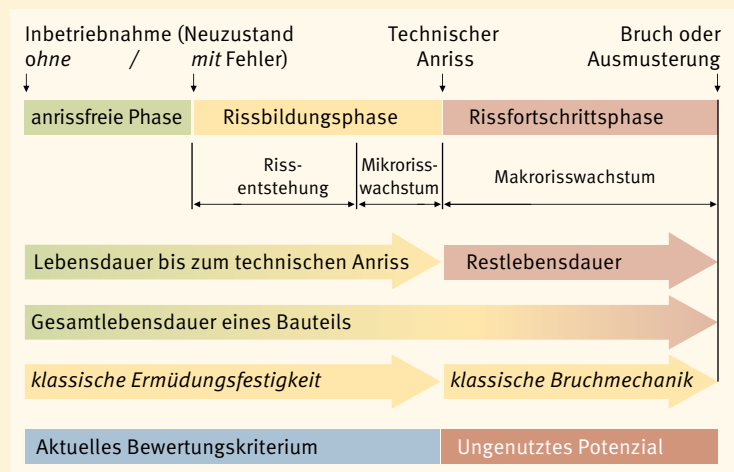
Im Fokus stehen die dickwandigen Kraftwerkskomponenten, wie z. B. Kugelformstücke, Hochdruckumleitstationen und Kesselumwälzpumpen. Überwiegend bestehen sie aus besonders widerstandsfähigen Kraftwerkstählen, z. B. ferritisch-martensitischem Stahl. Die Rissbildung erfolgt in verschiedenen Phasen (Abb. 2). Die Wissenschaftler gingen bei ihrer Methode von einem hypothetischen Riss aus, der als technischer Anriss mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren detektiert werden kann. Und sie stellten sich die Frage, wie schnell und beeinflusst durch welche Parameter würde sich dieser Riss ausbreiten und wie lange ließe sich das Bauteil noch sicher nutzen. Für diesen rein virtuellen Riss erarbeiteten sie die Schadenstoleranzanalyse. Die THERRI-Methodik kann aber auch bei Bauteilen mit realen Rissen eingesetzt werden, das wäre dann eine Schadensanalyse.

### Grundlagen experimentell ermitteln

Die Wissenschaftler untersuchten u. a. den Einfluss von Beanspruchungstemperatur und -druck, Frequenz, Größe des Lastwechsels, Maximalspannung und Verweilzeit in den Belastungszyklen auf die Beanspruch-



**Abb. 1** Das Schadenstoleranzdiagramm zeigt beispielhaft, wie sich die Restlebensdauer einer Komponente verlängern kann, wenn statt der rein rechnerischen Ermüdungsanalyse (rot) das tatsächliche Einsatzprofil des Kraftwerks zugrunde gelegt wird (blau) und in die bruchmechanische Analyse eingeht.



**Abb. 2** Lebensdauer eines Bauteils und Phasen der Rissentstehung. Bis zum Auftreten eines technischen Anrisses (etwa 2 mm) soll eine Komponente gemäß der Ermüdungsanalyse geprüft werden. Nach dessen Auftreten greift dann die bruchmechanische Methode.

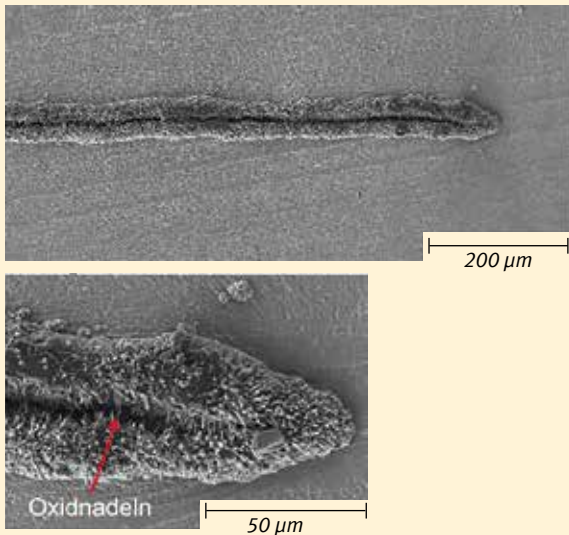
barkeit. Weitere Fragestellungen waren die Auswirkungen wechselnder Atmosphären, z. B. Wasserdampf, sowie eines transienten und eines isothermen Lastverlaufs. Transient bedeutet, dass die Temperatur kontinuierlich steigt oder fällt, während sie bei isotherm stabil bleibt. Auch die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs beim Anfahren und die Kaltstartauswirkungen waren ein Thema.

Für die umfangreichen materialwissenschaftlichen Untersuchungen entnahmen sie zwei außer Dienst gestellten, mehr als 20 Jahre alten Hochdruckumleitstationen des Kraftwerks Rostock Materialproben (Stahl: X 20 Cr Mo V 12 1). Dabei galt das Interesse auch der Rissausbreitung auf der mikroskopischen Ebene, d. h., wo und wie sich Spannungen auf die Risspitze und deren Wachstum auswirken. Die Ergebnisse dienten u. a. zur Berechnung von Spannungsintensitätsfaktoren. Der Spannungsintensitätsfaktor ist ein Maß für die Intensität des Spannungsfeldes in der Umgebung der Risspitze. Seine Höhe ist von der äußeren Belastung, der Geometrie des Risses und des Bauteils abhängig. Von der Höhe des Spannungsintensitätsfaktors hängt das Risswachstum ab.

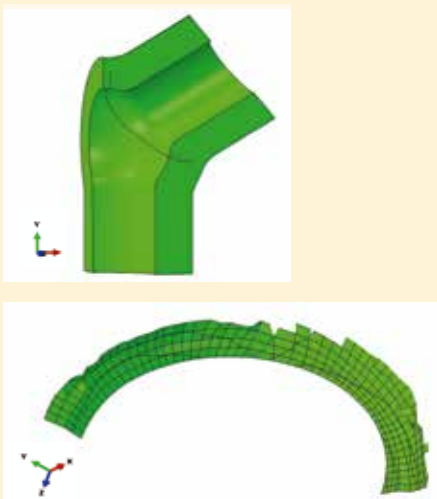


## Verfahren zur Sicherheitsbewertung

Bisher bewerten die technischen Regelwerke für die Sicherheit von Kraftwerken die Ermüdungslasten rein rechnerisch und gehen dabei von den Randbedingungen des früheren Volllastbetriebs aus. Überschreitet eine Kraftwerkskomponente den zulässigen Wert von 100 % für die Ermüdung, verschärfen sich die Prüfbedingungen. Ab einem bestimmten Schadensbild wird der Komponentenaustausch zwingend. Diese Regelwerke lassen aber bereits als Alternative zur reinen Ermüdungsanalyse differenzierte, betriebsbegleitende Untersuchungsmethoden mit einem erhöhten Umfang an zerstörungsfreien Materialprüfungen zu, wie sie jetzt in THERRI entwickelt worden sind.



**Abb. 3** Mit Rasterelektronenmikroskop erstellte Vergrößerung der Risspitze bzw. des rissspitzennahen Bereichs an der Oberfläche der nicht aufgezogenen C (T)-Probe des Schwellenwertversuchs bei 600 °C,  $R = 0,1$ ,  $f = 20$  Hz unter Wasserdampfatosphäre



**Abb. 4** Beispiel für einen Rissverlauf und die Form der Rissfläche in einem Kugelformstück. Dies sind Ergebnisse einer Berechnung mit der extended finite element method (XFEM).

Weiterhin werteten die Wissenschaftler die Betriebsdaten des Kraftwerks Rostock aus, um typische Lastverläufe aus dem Zusammenspiel von klassischen Kraftwerken mit der erneuerbaren Stromerzeugung zu ermitteln. Diese bildeten die Grundlagen für die Simulation eines typischen Kraftwerksbetriebs. Ziel war, hochbelastete Bauteile zu identifizieren und deren Belastungsprofile für den Einsatz in Simulationsprogrammen erstellen zu können.

### Prüfkonzept und Softwaretools

Zentrales Ergebnis ist, dass für den Temperaturbereich bis 550 °C die Zuverlässigkeit der strukturmechanischen Methode für dickwandige Bauteile mit gekrümmten Oberflächen experimentell, numerisch und im Praxistest am Kraftwerk Rostock bestätigt wurde. Das Konzept bietet fünf Vorteile: Es ermöglicht, Komponenten länger zu benutzen, es trägt zur Optimierung der An- und Abfahrtprozesse bei, es ermöglicht flexible Inspektionsintervalle und längere Prüfzeiten und es hilft, vorzeitige Prüfungen und Austausch von Komponenten zu vermeiden. Für Kraftwerke bedeutet das einen

Paradigmenwechsel, weil künftig die Wechsellerschöpfung für Komponenten wichtiger wird als die Langzeitstabilität gegenüber Kriechrissen. Im Rahmen der zerstörungsfreien Materialprüfung, einem zentralen Bestandteil des Konzepts, haben sich Ultraschalluntersuchungen bewährt.

Die Einzelergebnisse aus den Untersuchungen sind komplex und sehr kleinteilig. Beispielsweise hat die Untersuchung der Korrosion ergeben, dass unter einem Lastverhältnis von  $R = 0,1$  auch oxidbedingte risssschließende Effekte auftreten. In der Praxis bedarf es Einzelfallanalysen am jeweiligen Kraftwerk. Eine ausführliche Darstellung enthält der Abschlussbericht des TÜV Nord (siehe: S. 4 Literatur).

Auf Basis der experimentellen Daten wurden ein neues, ganzheitliches Prüfkonzept (Smart Inspection Concept – SIC), Simulationsprogramme und andere Softwaretools (z. B. Rissfortschritts Tool) entwickelt. Diese lassen sich beispielsweise in das Online Monitoring von Kraftwerken integrieren, berücksichtigen den tatsächlichen Betriebsverlauf und kalkulieren die nächsten Prüftermine.

Aus den Ergebnissen lassen sich auch Empfehlungen zur anlagenschonenden Fahrweise für Kraftwerke ableiten. So lassen sich beispielsweise die An- und Abfahrgradienten in Bezug auf Lebensdauerverbrauch und Brennstoffkosten optimieren.

### Neuer Richtlinienentwurf

Die Forschungspartner haben für das Schadenstoleranzkonzept die Richtlinie „Festlegung von Prüfintervallen für dickwandige Kraftwerkskomponenten mittels einer Schadenstoleranzanalyse“ entworfen und veröffentlicht. Hier sind auch die Standards anderer Branchen und Länder eingeflossen. Der Entwurf definiert im ersten Teil die Methodik. Die Anlagen im zweiten Teil des Berichts bieten alle für die Berechnung benötigten Standardwerte, Berechnungs- und Prüfansätze und Eingabewerte.

Der Entwurf wurde intensiv in den Gremien des VGB Power Tech, einem Interessenverband von Unternehmen aus der Elektrizitäts- und Wärmeversorgungsbranche, diskutiert. Aktuell arbeiten Verbände der Kraftwerkstechnik, wie der VGB Power Tech, und Überwachungsstellen an der Prüfung, Kommentierung und Validierung des Entwurfs.





## Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Die bruchmechanische Methodik bietet ein anwendungsnahes Verfahren für die Kraftwerkspraxis. Es ist interessant für Kraftwerks- und Anlagenbetreiber von Stadtwerken und großen Energieversorgern sowie für Komponentenhersteller, Überwachungsstellen und Bauteilprüfer.

Zyklisch belastete Komponenten aus Stahl mit hohen Wechsellasten gibt es nicht nur in Wärmekraftwerken, sondern auch in weiteren Branchen der Energietechnik und anderen Industriebereichen. Die Methodik lässt sich in Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien, wie z. B. in Solarthermischen Kraftwerken, Brennstoffzellen, Wärmepumpen und Wärmeübertragern einsetzen. Auch bei einigen Speichertechnologien ist ein Einsatz möglich, wie etwa bei adiabaten Druckluftspeichern und Thermischen Speichern. Im Rahmen der Power-to-Gas Technologie sind Anwendungen in den Teilsystemen der Elektrolyseure und Methanerzeuger möglich. Stählerne Komponenten, Rohre und Behälter gibt es auch in der chemischen Industrie und der Pharmaindustrie. Hier wurde die Methode bereits erfolgreich für die Durchführung von Prüffristverlängerungen eingesetzt. Lastabhängige und realitätsnahe Inspektionsintervalle sind in diesem Zusammenhang ein wesentlicher Baustein für die behördlichen Genehmigungsverfahren.

Ein vergleichsweise junges Einsatzgebiet ist der sogenannte 3D-Druck. Bei diesen additiv gefertigten Bauteilen wird eine Komponente Schicht für Schicht – beispielsweise aus pulverisiertem Metall – aufgebaut und mit Lasern verschmolzen. Bei dem beschriebenen Fertigungsprozess entstehen kleinste Poren, die die erforderlichen Zulassungs- und Genehmigungsverfahren für einen Einsatz unter Belastung erschweren bzw. ganz unmöglich machen. In diesem Zusammenhang erweist sich die bruchmechanische Schadenstoleranzanalyse als eine äußerst effektive Methode zur Bewertung porenbehafteter 3D-Bauteile.

## Projektbeteiligte

- » **Projektleitung:** TÜV Nord, Hamburg, Axel Schulz, [aschulz@tuev-nord.de](mailto:aschulz@tuev-nord.de) | [www.tuev-nord.de](http://www.tuev-nord.de)
- » **Experimentelle, numerische und analytische Untersuchungen:** Universität Rostock – Lehrstuhl für Strukturmechanik, Prof. Dr.-Ing. Manuela Sander, [manuela.sander@uni-rostock.de](mailto:manuela.sander@uni-rostock.de)
- » **Simulation des Kraftwerksbetriebs:** Universität Rostock – Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Prof. Dr. Egon Hassel | [www.uni-rostock.de](http://www.uni-rostock.de)
- » **Experimentelle Untersuchungen des Atmosphären- und Kriecheinflusses:** Forschungszentrum Jülich – Institut für Energie- und Klimaforschung, Werkstoffstruktur und -eigenschaften (IEK-2), Dr.-Ing. Bernd Kuhn, [b.kuhn@fz-juelich.de](mailto:b.kuhn@fz-juelich.de) | [www.fz-juelich.de](http://www.fz-juelich.de)

## Literatur

- » Schulz, A.; Czubanowski, M.; Mathes, F., Rieck, D.: Verbundprojekt THERRI – Ermittlung von Kennwerten zur Bewertung thermischen Ermüdungsrisswachstums in Kraftwerken. Teilprojekt 4: Numerische Untersuchungen, zerstörungsfreie Prüfmethode sowie Regelungen zur Bewertung thermischen Ermüdungsrisswachstums in Kraftwerken. FKZ 03ET7024D. Abschlussbericht. TÜV Nord EnSys GmbH & Co. KG, Hamburg (Hrsg.). Hannover: Verl. TÜV Nord, 2017. 134, 98 S., ISBN 978-3-939002-00-0. Im Anhang dieses Buches ist der Richtlinienentwurf „Festlegung von Prüfintervallen für dickwandige Kraftwerkskomponenten mittels einer Schadenstoleranzanalyse“ abgedruckt.
- » Sander, M.: Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen. Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage. Heidelberg: Springer Vieweg, 2018. XV, 244 S., 2., aktualisierte u. erg. Aufl., ISBN 978-3-662-54442-6

## Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Trockenbraunkohle erhöht die Flexibilität. BINE-Projektinfo 07/2016
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter [www.bine.info/Projektinfo\\_01\\_2018](http://www.bine.info/Projektinfo_01_2018)

BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter [www.bine.info/abo](http://www.bine.info/abo)

## Impressum

**Projektorganisation**  
Bundesministerium  
für Wirtschaft und Energie (BMWi)  
11019 Berlin

Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Annette Weiß  
52425 Jülich

**Förderkennzeichen**  
03ET7024A-D

**ISSN**  
0937-8367

**Herausgeber**  
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut  
für Informationsinfrastruktur GmbH  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

**Autor**  
Uwe Milles

**Urheberrecht**  
Titelbild, Abb. 1, 4 : TÜV Nord  
Abb. 2: Uni Rostock, Prof. M. Sander  
Abb. 3: Forschungszentrum Jülich

Eine Verwendung von Text und Abbildungen aus dieser Publikation ist nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion gestattet. Sprechen Sie uns an.

## Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?  
Wir helfen Ihnen weiter:

**0228 92379-44**  
**[kontakt@bine.info](mailto:kontakt@bine.info)**

**BINE Informationsdienst**  
Energieforschung für die Praxis  
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185–197  
53113 Bonn  
[www.bine.info](http://www.bine.info)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages