

# Neue Prüfkonzeppte und Verfahren zur Schweißnaht-Nachbehandlung

## Erschließung wichtiger Optimierungspotenziale im Anlagenbau

Hans Christian Schröder, Peter Gerster und Frank Schäfers

### Abstract

#### New Testing Concepts and Post-weld Procedures Tap Important Optimisation Potential in Plant Construction

Newly developed testing concepts and innovative procedures for post-weld treatment cut costs. Their application often requires a pragmatic approach to the existing codes and standards. Examples are the TÜV SÜD testing concept "gAte4optimisation" for evaluating the remaining service life of power and process plants, and modern post-weld procedures like hammer peening with "Pneumatic Impact Treatment (PIT)" by PITEC.

When using new inspection procedures and technologies, pragmatic decisions on the basis of individual case analysis and scientific studies are essential. Globalised, deregulated markets increase competition and cost pressure in power plant construction, especially for suppliers of plant components. Quality variations in delivered components such as boilers, turbines and generators also occur despite comprehensive guidelines.

Adapted testing and inspection procedures, and plant evaluation based on a structural reliability risk analysis provide extensive opportunities for cost reduction. Post-weld treatment increases the remaining service and fatigue life of steel constructions and components. In contrast to the traditional approach, a new mindset concerning regulatory issues is becoming more and more important.

Under the direction of the Institute of Structural Design at the University of Stuttgart, steel fabricators and manufacturers conducted extensive studies on PIT technology. For example, the steel grades S355 and S690 were tested on PIT-treated and untreated cross and butt joints.

### Autoren

**Hans Christian Schröder**  
Leiter Kraftwerks- und Anlagenservice  
Branchenmanager Kraftwerke  
TÜV SÜD Industrie Service GmbH  
Mannheim/Deutschland

**Peter Gerster**  
ö. b. u. v. Sachverständiger für  
Schweißtechnik und -schäden  
GEC Gerster Engineering Consulting  
Ehingen/Deutschland

**Frank Schäfers**  
Sales Manager und Technical Consultant  
PITEC GmbH  
Kerpen/Deutschland

### Einleitung

Neu entwickelte Prüfkonzeppte und innovative Verfahren zur Nachbehandlung von Schweißnähten sparen Kosten. Ihre Anwendung verlangt oft einen pragmatischen Umgang mit den bestehenden Regelwerken. Beispiele sind das Prüfkonzeppt von TÜV SÜD zur Bewertung der Restlebensdauer von Anlagen „gAte4optimisation“ und pneumatische Hämmerverfahren zur Nachbehandlung von Schweißnähten wie Pneumatic Impact Treatment (PIT) von PITEC.

Bei der Anwendung neuer Prüfverfahren und Technologien sind pragmatische Entscheidungen auf Grundlage von individuellen Fallanalysen und wissenschaftlichen Studien erforderlich. Globalisierte, deregulierte Märkte erhöhen den Wettbewerbs- und Kostendruck im Kraftwerksbau – insbesondere für die Zulieferer von Anlagenkomponenten. Qualitätsabweichungen bei angelieferten Komponenten wie Dampfkesseln, Turbinen und Generatoren treten trotz umfangreicher Vorgaben auf.

Angepasste Prüfverfahren und die Anlagenbewertung anhand einer Struktur-Zuverlässigkeits-Risikoanalyse bieten umfassende Möglichkeiten zur Kostensenkung. Die Nachbehandlung von Schweißnähten erhöht die Lebensdauer und Ermüdungsfestigkeit von Stahlkonstruktionen und Komponenten. Im Gegensatz zum herkömmlichen Vorgehen wird ein neues Denken in Regelwerksfragen immer wichtiger.

Für die PIT-Technologie haben Stahlbauer und -hersteller in Zusammenarbeit unter Leitung des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart umfangreiche Untersuchungen vorgenommen. Verglichen wurden unter anderem mit PIT behandelte und unbehandelte Kreuz- und Stumpfstoße an den Werkstoffen S355 und S690.

### Systemischer Ansatz bei der Qualitätssicherung

Moderne Kraftwerke unterliegen höheren Beanspruchungen und besitzen geringere Auslegungssreserven. Für den Anlagenbau wird die

Komponentenintegrität zwar bei der Herstellung und auf Basis der geltenden Regelwerke wiederkehrend geprüft. Doch wie wird sichergestellt, dass Bauteile und Komponenten tatsächlich fehlerfrei hergestellt werden? Und wie wird dies geprüft? Vielfach besteht der Wunsch, späteren Schäden beim Anlagenbetrieb durch detaillierte Spezifikationen und hohe Qualitätsanforderungen bei der Herstellung vorzubeugen. Das gelingt in der Praxis oft jedoch nicht. Ein ingenieurtechnischer Ansatz muss daher auch betrachten, in wie weit ertragbare Fehler zu tolerieren sind.

Bisherige Abnahmen und Prüfungen der Komponentenintegrität müssen durch ganzheitliche Systembetrachtungen und Gewährleistungs- oder Garantiemessungen ergänzt werden, um die hohen Sicherheitsstandards auch künftig aufrechterhalten zu können. Hier gilt es, die Betriebserfahrungen mit einer Komponente frühzeitig in den Prozess zur Qualitätssicherung einzubeziehen. Das Prinzip: Eine gewünschte Qualitätsstufe lässt sich nicht nachträglich erprüfen, sondern muss frühzeitig planerisch berücksichtigt und auch geprüft werden. Dazu müssen die Qualitätsanforderungen bereits im Vorfeld auf die spezifischen Bedingungen des späteren Anlagenbetriebs abgestimmt werden. Wichtige Punkte sind:

- Verfahrenstechnische Auslegung und das Anlagendesign.
- Konstruktive Ausführung.
- Erkennen und Aufdecken von „Montage-Sünden“.
- Beanspruchung im Betrieb.
- Künftige Fahrweise der Anlage.
- EMSR-Konzepte (Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik).
- Strategien bei der Wartung und Instandhaltung.

Welche Ereignisse bereits in der Planung zur Schadensprävention zu berücksichtigen sind, zeigt das Bild 1.

### Schadensmechanismen im Überblick

Hinsichtlich der Einflussparameter auf das jeweilige Bauteil lassen sich die methodischen

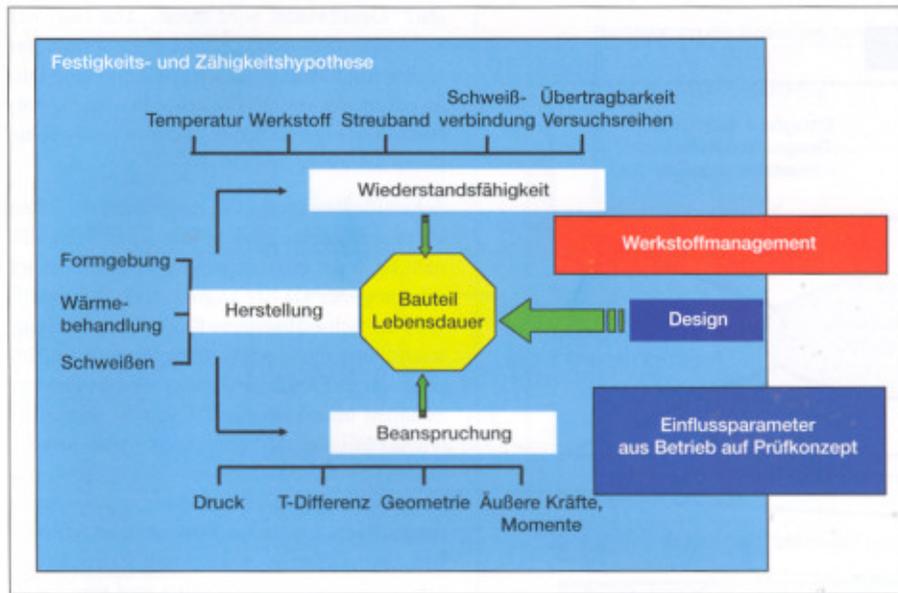


Bild 1. Einflussparameter auf das Design von Bauteilen.

Prüfsätze und die Anforderungen an die Qualitätssicherung beschreiben. Neben der Herstellung und Widerstandsfähigkeit eines Bauteils kommt dabei die Beanspruchung in den Blick. Wesentliche Schadensmechanismen resultieren aus:

- Verschleiß durch Abrasion, Erosion, Kavitation, Korrosion.
- Hohe Temperaturen und Überlagerung von Zusatzbeanspruchungen (Zeitstand- und Wechselbeanspruchung).
- Überschreitung von Gradienten durch nicht geplante An- und Abfahrtransienten.
- Schwingungs- und Überbeanspruchung.
- Veränderte Betriebsweise gegenüber den Planungsvorgaben.
- Verschleißerscheinungen durch eine besondere Betriebsweise oder eingesetzte Betriebsstoffe (zum Beispiel Kohlemahlanlagen, Feuerräume).
- Verdeckte Montage- und Herstellfehler.

Das Bild 2 beschreibt relevante Einflussgrößen auf betriebliche Schädigungsmechanismen in der Kombination zwischen Einwirkungen von Belastungen und Medium.

### Risikoorientierte Umsetzung

Aus wirtschaftlichen Gründen können die Qualitätsanforderungen an einzelne Bauteile risikoorientiert auf ihre sicherheitstechnische Relevanz im Gesamtsystem abgestimmt werden – ohne Sicherheitseinbußen. Die betriebliche Beanspruchung und die zu erwartenden Ist-Zustände der Komponenten sind hierfür zusammen zu analysieren. Dabei sind auch etwaige Montage- und Herstellfehler zu berücksichtigen. Das ermöglicht eine systemische Gesamtbetrachtung, anhand derer die momentane Betriebsfähigkeit und die daraus

abzuleitenden Risiken beurteilt werden können. Eine bauteilspezifische Struktur-Zuverlässigkeits-Risikoanalyse (Bild 3) ist die Basis, um Optimierungspotenzial auszuschöpfen für:

- Ein optimal auf die Anlage abgestimmtes Design.
- Eine hohe Produktqualität.
- Eine hohe Betriebstauglichkeit.
- Ein optimal angepasstes Überwachungs-, Prüf- und Instandhaltungskonzept.
- Die Bewertung und Erkennung möglicher Ausfälle.
- Eine optimale Bewertung des erforderlichen Kosten-Nutzen-Aufwands in Form einer angepassten Lebenszyklusbetrachtung über den geplanten Betriebszeitpunkt.
- Eine mögliche Reduzierung von Maßnahmen und Aufwand.

### Neue Prüfkonzepte und -verfahren

Traditionelle Prüfungen nach den gängigen Regelwerksanforderungen sind punktuell und bilden nur den jeweiligen Ist-Zustand einer Anlage ab. Eine Prognose des langfristigen Anlagenverhaltens ist aufgrund dieses Vorgehens kaum möglich. In der prognostischen Tätigkeit liegt jedoch der Schlüssel zur Kostenminimierung. Hierfür sind neue Prüfkonzepte nötig, die wesentlich früher ansetzen als die traditionellen Regelwerk-Prüfungen.

Das Prüfkonzept „gAte4optimisation“ von TÜV SÜD dient der Restlebensdauer-Abschätzung von Kraftwerken und Anlagen (gAte steht für ganzheitliche Anlagentechnik). Kernstück des Prüfkonzepts für die Prognose des langfristigen Anlagenverhaltens sind geeignete zerstörungsfreie Prüfverfahren, die exakt auf die jeweilige Anlage zugeschnitten sind. Darunter fallen beispielsweise Durchstrahlungsprüfungen, Ultraschallprüfungen mit Phased Array oder die Wirbelstromprüfung.

Weil die in modernen Kraftwerken eingesetzten neuen Werkstoffkonzepte die Anforderungen an die verwendeten Prüfverfahren erhöhen, müssen viele dieser Prüfverfahren für ihren praktischen Einsatz weiterentwickelt oder auf neue Anwendungsgebiete übertragen werden.

Ein Beispiel ist die Wirbelstromprüfung für hochwarmfeste nickelbasierte Stähle. Prüfverfahren wie die ambulante Metallografie sind aufgrund der besonderen Materialeigenschaften nur bedingt anzuwenden. Denn die Gefügeveränderungen über die Zeitstandbeanspruchung sind hier nicht so stark ausgeprägt wie bei den bisher üblichen ferritischen und martensitischen Stählen. Gefragt sind hochauflösendere und zugleich kostengünstigere Verfahren. Die Wirbelstromprüfung diente

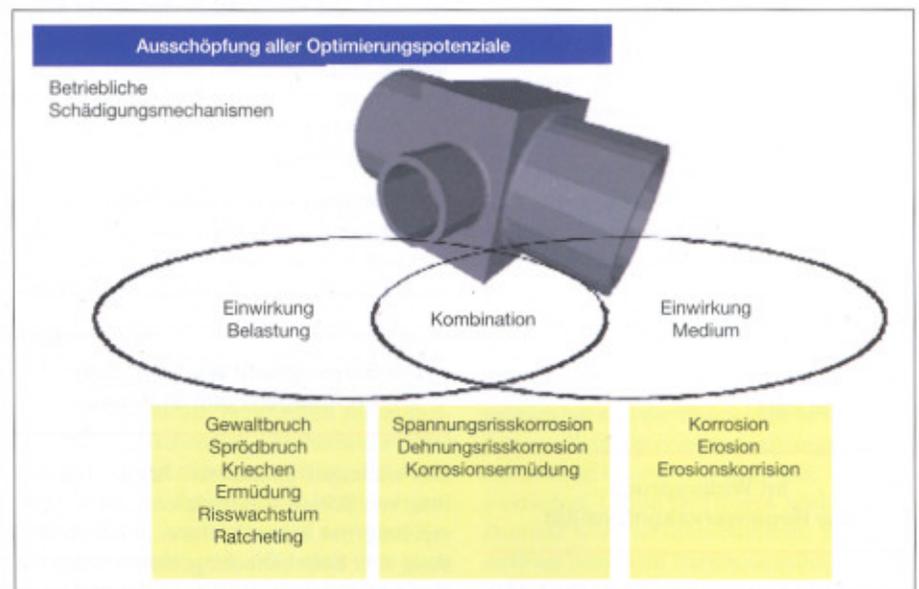


Bild 2. Einflussparameter auf betriebliche Schädigungsmechanismen.

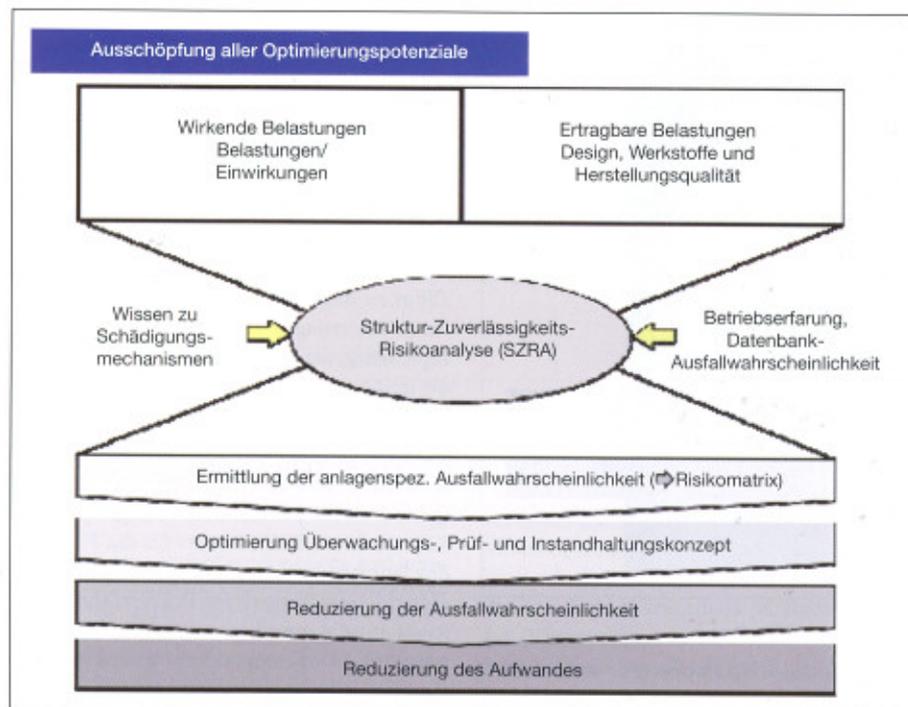


Bild 3. Einflussgrößen einer Struktur-Zuverlässigkeits-Risikoanalyse zur Ausschöpfung von Optimierungspotenzialen.

bisher dazu, Inhomogenitäten im oberflächennahen Bereich zu detektieren. TÜV SÜD hat den Einsatz des Verfahrens auf ein neues Anwendungsgebiet übertragen. Dort liefert es die Datenbasis für ein gezielteres Vorgehen bei der Prüfung von zeitstandbeanspruchten Komponenten. Grundlage hierfür ist die Korrelation von zeit- und temperaturabhängigen werkstoffspezifischen Veränderungen und veränderten Wirbelstromsignalen.

Die von TÜV SÜD optimierte Ultraschallprüfung mit Phased Array ist ein weiteres Beispiel. Phased Array integriert mehrere Prüfmodifikationen in einem Prüfkopf. Der große Einzelschwinger wurde durch Schneiden in viele einzeln ansteuerbare Elemente unterteilt. Die Einschallwinkel lassen sich so stufenlos regeln, was eine umfassende Detektierung von Rissen oder Bindefehlern erlaubt. Denkbar ist überdies die Prüfung kleinerer Schweißnähte (ab 4 bis 5 mm Wanddicke bei weniger als 80 mm Durchmesser). Sonst erforderliche Durchstrahlungsprüfungen (Röntgen) werden so auf ein Minimum reduziert, vergleichsweise aufwändige Schutzmaßnahmen können entfallen. Die Anwendung von Phased Array verlangt vom Prüfer allerdings große Erfahrung. Eine Vielzahl an Informationen muss qualifiziert beurteilt werden – insbesondere wenn ein unkritischer Fehler belassen werden kann.

### Im Widerspruch zur Regelwerkskonformität

Neue Prüfkonzepte bieten – bei gleich bleibendem Sicherheitsniveau – die Möglichkeit,

Kosten zu senken, erfordern aber zugleich ein neues Denken in Regelwerksfragen. Die Befunde sind nach kritischen und unkritischen Fehlern zu unterscheiden, wobei unkritische Fehler belassen werden können, wenn ein qualifizierter Nachweis zur Unbedenklichkeit vorliegt. Diese kann beispielsweise bei Rissen durch bruchmechanische Analysen und Risikoanalysen belegt werden. In jedem Fall ist die Ursache des Fehlers zu klären und zu beseitigen. Die konkrete Auswirkung muss daraufhin bewertet werden, ob sie die Sicherheit oder Verfügbarkeit einer Anlage beeinträchtigt. Ein solch pragmatisches Vorgehen steht oft im Widerspruch zur Regelwerkskonformität. Um das hohe Sicherheitsniveau bei Kraftwerken auch künftig aufrechterhalten zu können, muss der Prüfer daher vom reinen Kontrolleur zum umfassenden Betriebsanalysten werden. Erfahrung und integriertes Know-how gewinnen dabei an Bedeutung. Nur so lassen sich neue Prüfkonzepte und -verfahren zuverlässig einsetzen.

Die Bedeutung qualifizierter Nachweise zur Wirksamkeit innovativer Technologien und praxisorientierter Verfahren zeigt sich auch bei der Nachbehandlung von Schweißnähten.

### Die Schweißnaht als Achillesferse im Anlagen- und Stahlbau

Das wichtigste „Leitmotiv“ bei der Herstellung von Schweißkonstruktionen ist die Vermeidung von Schweißnähten. In der Ausbildung zum Schweißfachingenieur werden die Studenten oft gefragt: „Was ist das wichtigste Schweißkriterium bei Konstruktionsbautei-

len?“ Geantwortet wird meist: „Die Güte der Schweißnaht“ oder „eine konstruktionsgerechte Ausführung“. Doch die Auflösung lautet paradoxerweise: „Die beste Schweißkonstruktion ist eigentlich die, in der sich möglichst keine Schweißnähte befinden!“

Schweißnähte innerhalb eines Bauteils gelten als unerwünschte „Störgröße“. Jede Schweißnaht ist in der qualitativen Ausführung immer inhomogener als der angrenzende Werkstoff. Und der Schweißprozess führt zu einer Beeinträchtigung des geschweißten Bauteils im Bereich der Schweißverbindung. Das begünstigt Schäden innerhalb eines Bauteils. Wesentliche schädigende Mechanismen sind hierbei einerseits die „Kerbgeometrien“ bzw. die Kerbwirkungen und andererseits Zugeigen- spannungen. Letztere entstehen beim Schweißen zwangsläufig, wenn das kurzfristig geschmolzene Material erkalte und sein Volumen abweichend zum Grundwerkstoff ändert.

Diese hohen Zugeigen- spannungen ergeben sich beim Schweißen im Nahtübergang vom Schweißgut zum angrenzenden Grundwerkstoff im Bereich der Wärmeeinflusszone (WEZ), die üblicherweise Werte bis zur Streckgrenze erreichen können. Deshalb gibt es schon seit Langem Bestrebungen, die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch geeignete Nachbehandlungsverfahren der Schweißnähte zu verbessern. Eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen gewinnt daher in vielen Bereichen der Industrie zunehmend an Bedeutung – auch bei Anwendungen von höher- und hochfesten Stählen.

Schweißkonstruktionen leiden insbesondere bei Beanspruchungen durch hohe Temperaturen, Lastwechsel, Schwingungen und die damit verbundene Materialermüdung. Den Mechanismen der Kerbeinwirkung versuchen Experten durch eine hohe Qualität von Schweißverfahren und -ausführung zu begegnen. Zudem werden die geschweißten Oberflächen anschließend oft aufwendig beschliffen. Das soll ungünstige Übergänge zwischen den Schweißnähten und dem angrenzenden Grundwerkstoff beseitigen. Ziel ist die blecheben beschliffene Schweißnaht. Aber auch hier liegen im Bereich der Wärmeeinflusszone weiterhin sogenannte metallurgische Kerben zwischen dem Grundwerkstoff und der Schweißnaht. Auch die während des Schweißprozesses eingebrachten Zugeigen- spannungen bleiben weiterhin erhalten.

### Praxisbeispiel: Speisewasserbehälter

Das praktische Beispiel eines Speisewasserbehälters verdeutlicht die Problematik diverser Spannungsverhältnisse. Sie sind die Summe aus konstruktiv bedingten Spannungen und zusätzlichen Spannungen durch unter-

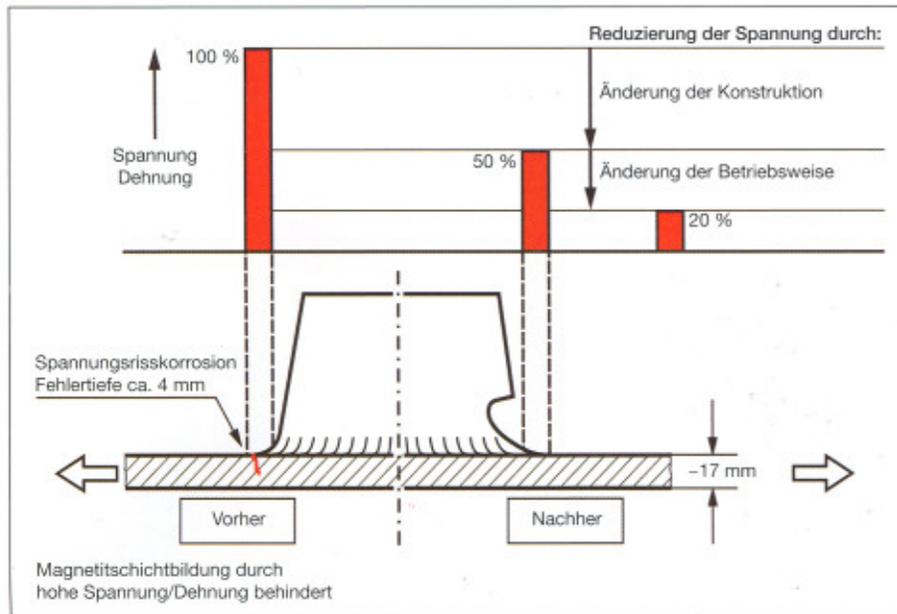


Bild 4. Beeinflussung der Spannungsverhältnisse am Beispiel eines Anschweißteils.

schiedliche Temperaturverhältnisse, wie sie innerhalb eines Speisewasserbehälters auftreten können (Bild 4). Möglichkeiten zur Reduzierung der Spannung sind die konstruktive Veränderung und die Änderung der Betriebsweise.

Im Rahmen einer Revision sind hier an den innen anliegenden Ringversteifungen bereits nach kurzer Betriebszeit Risse mit einer Tiefe von rd. 4 mm festgestellt worden. Daraufhin wurden alle Anschweißteile kerbfrei beschliffen und einer Oberflächenrisssprüfung unterzogen. Als mögliche Schadensursache kam eine dehnungsinduzierte Spannungsrissskorrosion in Betracht. Für einen längeren Betriebszeitraum wurden begleitende Dehnungs- und Temperaturmessungen vereinbart. Da die konstruktive Ausführung im Bereich des geschädigten Bereiches bereits einen Hinweis auf eine Spannungskonzentration ergab, wurde ein Teilbereich dieser Konstruktion geometrisch optimiert, indem größere Radien in Form einer Hohlkehle angeschliffen wurden.

Mit den implementierten betriebsbegleitenden Messungen, die rd. ein Jahr im Einsatz waren, konnte mit den folgend genannten Maßnahmen die Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger Schädigungen erheblich reduziert werden:

- Eine optimierte Konstruktion der Ringsteifen mit beidseitigen Entlastungsnuten und tangentialem Beschleifen.
- Reduzierung der festgestellten Temperaturdifferenzen zwischen dem Wasserraum und dem Dampfraum des Behälters durch eine Änderung der Betriebsweise des Speisewasserbehälters für die Betriebsfälle „Abschlammung und Deionateinspeisung“.

Die vorgenannten Maßnahmen haben einen sicheren Betrieb auch in den Folgejahren ermöglicht.

### Verbesserte Ermüdungsfestigkeit durch Nachbehandlungsverfahren wie Hämmern

Aus der Praxis ist bekannt: Zugspannungen in Schweißnähten werden durch ein nachträgliches Hämmern günstig beeinflusst. Das zählt nicht nur zum Grundwissen jedes Stahlbau-schlossers, sondern lässt sich auch bei lokalen Ausbesserungen und Reparaturen an geschweißten Gussteilen immer wieder zeigen. An vielen Schweißkonstruktionen vom Brückenbau über den Fahrzeugbau bis hin zu Windkraftwerken werden Hämmerverfahren zur Nachbehandlung von Schweißnähten eingesetzt. Das Hämmern hat zwei zentrale Vorteile:

- Es verbessert die Nahtgeometrie durch plastische Verformung (beim klassischen Hämmern allerdings nur bedingt).
- Es wandelt die in der Schweißnaht vorhandenen Zugeigenspannungen in Druckspannungsfelder.

In Kombination verbessern diese Mechanismen die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnaht, was die Lebensdauer verlängert. Dies gilt nachweislich selbst bei vorgeschädigten Bauteilen. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Einsatz von härtesten Stählen mit großen Streckgrenzen im Vergleich zu herkömmlichen Baustählen wirtschaftlicher wird. Hämmerverfahren eignen sich daher insbesondere für Maßnahmen zur präventiven Instandhaltung und zur Behandlung hochbeanspruchter Bauteile, beispielsweise solcher, die durch Schwingungen dynamisch belastet werden. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Reproduzierbarkeit sowie der hohen Belastung des Anwenders können klassische Hämmerverfahren nicht immer eingesetzt werden.

### Nachbehandlung mittels Pneumatic Impact Treatment

Ein neues Verfahren zur Nachbehandlung von Schweißnähten ist das weltweit zum Patent angemeldete Pneumatic Impact Treatment (PIT) der PITEC GmbH, Heudorf. Mit dem höherfrequenten Hämmerverfahren lassen sich Schweißnahtoberflächen und Übergänge plastisch modulieren. Vorteile gegenüber dem klassischen Hämmern sind eine deutlich höhere Intensität sowie durch die Frequenz eine hohe Reproduzierbarkeit. So lassen sich alle Nahtübergänge optimal geometrisch gestalten, sodass sie entsprechend harmonisch in den anschließenden Grundwerkstoff übergehen. Ein weiterer Anwendungsfall wären beispielsweise Stützeinschweißungen: Die Schweißspalte zwischen dem Stutzen und dem Mantel bzw. Rohr kann optimal moduliert werden und ergibt einen minimalen und umlaufend gleichen Spalt (Bild 5).

Gehärtete Stahlbolzen arbeiten hierfür mit Schlagfrequenzen zwischen 80 und 120 Hz. Im Gegensatz zu herkömmlichen Technologien ermöglicht PIT in einem Arbeitsgang sowohl die Kerboptimierung als auch die Umwandlung von Zug- in Druckspannungen. Diese werden im oberflächennahen Bereich induziert (abhängig von den Materialeigenschaften in bis zu einer Tiefe von  $> 2$  mm). Neben der signifikant höheren Dauer- und Schwingfestigkeit sind Materialeinsparungen von bis zu 40 % möglich sowie entsprechende Reduzierungen vom Schweißgut, weil die Bauteile bei gleicher Festigkeit geringer dimensioniert werden können. Schweißkonstruktionen lassen sich so wirtschaftlicher herstellen.

Im Bild 6 wird der Umwandlungsmechanismus vorhandener Zugeigenspannungen in Druckspannungen verdeutlicht. Die Untersuchungen erfolgten an der Karl-Franzens-Universität Graz.

Die PIT-Nachbehandlung von Schweißnähten erhöht die Ermüdungslebensdauer und -festigkeit nicht nur bei neuen, sondern auch bei bestehenden (bereits vorbelasteten) Konstruktionen. Das bringt besonders für dynamisch belastete Bauteile Vorteile und lässt sich in unterschiedlichen Industriebereichen einsetzen wie im Brückenbau, in der Petrochemie, im Rohrleitungs- und Behälterbau, im Kranbau oder bei Windkraftanlagen. Vor allem bei Reparaturschweißungen und Sanierungsmaßnahmen hat sich die Technologie bewährt. Reparierte Bauteile erreichen oft sogar höhere Lastwechsel als die ursprünglichen Neukonstruktionen. Davon profitieren hochbelastete Bauteile wie Turbinenschaufeln, Schienenweichen oder auch Bergbauausrüstungsteile. PIT eignet sich darüber hinaus für die im modernen Kraftwerksbau zunehmend eingesetz-

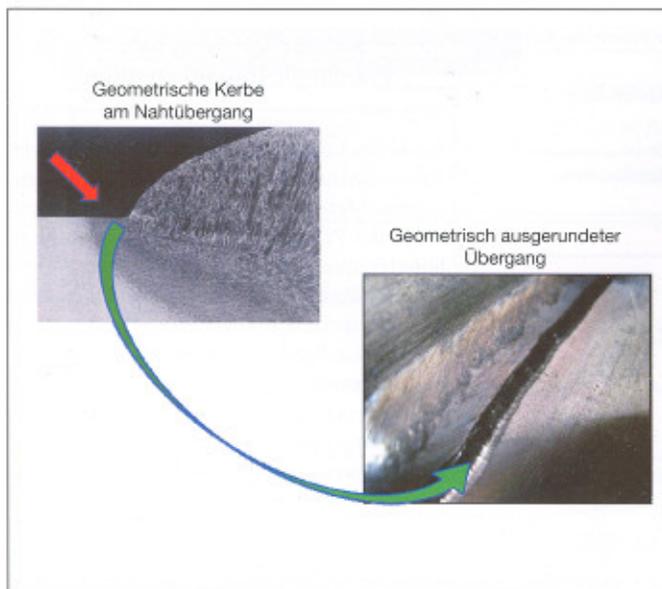


Bild 5. Behandlung von Kerben im Nahtübergang mit dem Hämmerverfahren.

ten hochfesten nickelbasierten Stähle. Weitere Vorteile des PIT-Verfahrens sind die Reduzierung und Kontrolle des Schweißverzugs, eine höhere Oberflächenhärte und eine nahezu auf das Doppelte gesteigerte Dauerfestigkeit.

#### Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen

Die europaweit vereinheitlichten Regeln zur Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten (Eurocode 3, Punkt 1.9 Ermüdung) fordern Nachweise für die Betriebsfestigkeit – unabhängig von der eingesetzten Stahlgüte, der Anzahl der Belastungszyklen, der Art des Belastungskollektivs und vom Spannungsverhältnis. Im Stahlbau nicht zu vermeidende Schweißungen reduzieren allerdings die Schwingfestigkeit auch von hochfesten Stählen. Gleiches gilt für Imperfektionen wie Geometrieänderungen durch Kerben, Bohrungen oder Oberflächendefekte. Die Dauerschwingfestigkeit wird im Extremfall auf das bei normalfesten Stählen übliche Maß reduziert. Umso wichtiger ist es, positive Erfahrungen mit bisherigen Nachbehandlungsverfahren zu nutzen. Grundsätzlich lassen sich diese in zwei Hauptgruppen einteilen:

- Verfahren zur Verbesserung der Nahtgeometrie.
- Verfahren zur Verbesserung des Spannungsprofils (durch Eigenspannungsabbau).

Bisherige Nachbehandlungen optimieren meist nur einen Mechanismus wie die Ermüdungsursache, die Kerbwirkung oder die Zugeigenspannungen. PIT hingegen kombiniert die Verbesserung der Nahtgeometrie mit der Verbesserung des Spannungsprofils.

#### Die Wirkungsweise von PIT

Beim PIT-Verfahren übertragen gehärtete Bolzen mechanische Impulse auf die zu behandelnde Oberfläche. Die Bolzen sind in der

Geometrie auf die jeweilige Anwendung hin angepasst. Auch die Frequenz und Schlagkraft lassen sich unabhängig voneinander regeln, um unterschiedlichen Materialanforderungen gerecht zu werden.

Um die Vibrationen durch das höherfrequente Hämmern für den Bediener möglichst gering zu halten, arbeitet das System gegen ein weiteres Federsystem, sodass das Handgerät von der Schlagkraft entkoppelt ist. Ergebnisse über die Prüfung der sicherheitstechnischen Anforderung „Schutz gegen schädliche Schwingungen“ durch das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (BGIA) bestätigen einen sehr geringen Wert von rd.  $5 \text{ m/s}^2$ . Durch die Feder ist – selbst bei unterschiedlichen Bedienern – eine gleichbleibende Anpresskraft des Systems gegeben, was eine hohe Reproduzierbarkeit des Nachbehandlungserfolgs ermöglicht. Die Vorschubgeschwindigkeit bei Stahl beträgt rd. 20 bis 30 cm/min.

#### Technische Ausstattung

Die erforderliche Ausrüstung für eine PIT-Behandlung umfasst ein Steuergerät und ein Handgerät. Die Frequenz kann von 0 bis 120 Hz eingestellt werden, die Druckluft – und damit die Schlagkraft – ist stufenlos regelbar. Im Gegensatz zu anderen Verfahren funktioniert das Gerät bereits bei 4 bis 6 bar Luftdruck, was einen geringen Luftverbrauch von rund 175 bis 250 l/min bedeutet. Zudem wird die Abluft nach vorne zum Bolzen abgeführt. Die Vorteile sind:

- Lackpartikel oder Metallspänchen und sonstige Verunreinigungen werden weggeblasen und nicht unbeabsichtigt ins Material eingedrückt.
- Die ausströmende Luft kühlt den oder die Bolzen und erhöht die Standzeit, weil keine weitere Kühlung erforderlich ist.

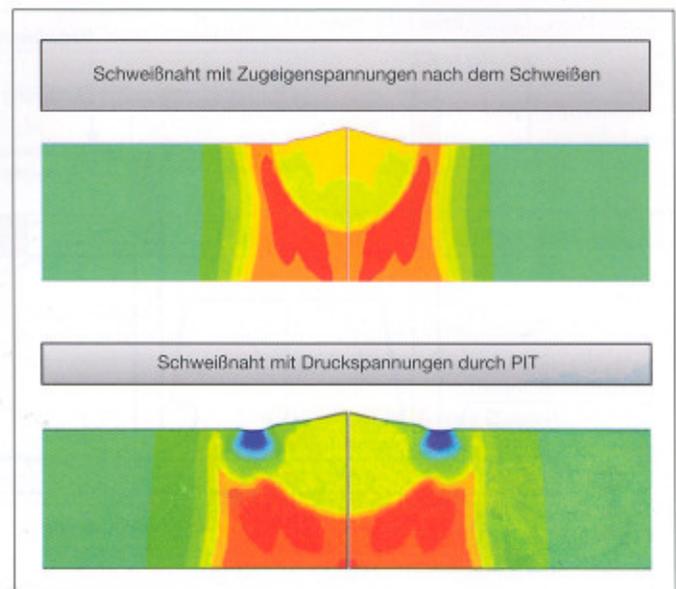


Bild 6. Schematische Darstellung des Umwandlungsmechanismus von Zugeigen- in Druckspannungen.

Eine Weiterentwicklung des Steuergeräts mit einer SPS-Steuerung ermöglicht, die Behandlungsparameter für unterschiedliche Werkstoffe und Schweißnahtarten über ein Touchscreen-Display einzugeben.

#### PIT als Weiterentwicklung von UIT

Das PIT-Verfahren basiert auf der Grundidee des Ultrasonic Impact Treatment (UIT), mit dem das PITEC-Team bereits umfangreiche Erfahrungen gesammelt hat. Auf Basis zahlreicher Forschungs- und Industrieprojekte sowie Praxisanwendungen wurde PIT in den vergangenen Jahren weiterentwickelt und mit UIT verglichen. Die Untersuchungen zeigen, dass bei mit PIT nachbehandelten Schweißnähten ebenso gute Ergebnisse wie mit UIT erreicht werden konnten – bei geringerem gerätetechnischem Aufwand. Die einfache Bedienbarkeit und die hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sind weitere Vorteile.

#### Forschungsergebnisse zu PIT- und UIT-Behandlung

Sowohl das PIT- als auch das UIT-Verfahren erhöhen die Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten signifikant. Während PIT Druckluft als Kraftquelle nutzt, arbeitet UIT mit hochfrequenter Ultraschallenergie. Um die Erhöhung der Schwingfestigkeit durch die beiden Verfahren zu ermitteln, hat unter anderem die Fachhochschule für Technik in Esslingen eine sogenannte Wöhlerversuchsreihe durchgeführt. Geschweißte Versuchskörper wurden hierfür teilweise nachbehandelt und zyklisch belastet.

Das Bild 7 zeigt, dass die PIT-Behandlung um rd. 5 % bessere Ergebnisse als die UIT-Behandlung erreicht. Die nur geschweißte Probe kommt bei einer Lastspielzahl von 2 Millionen auf eine Ermüdungsfestigkeit von rund 60 MPa, bei UIT-behandelten Proben

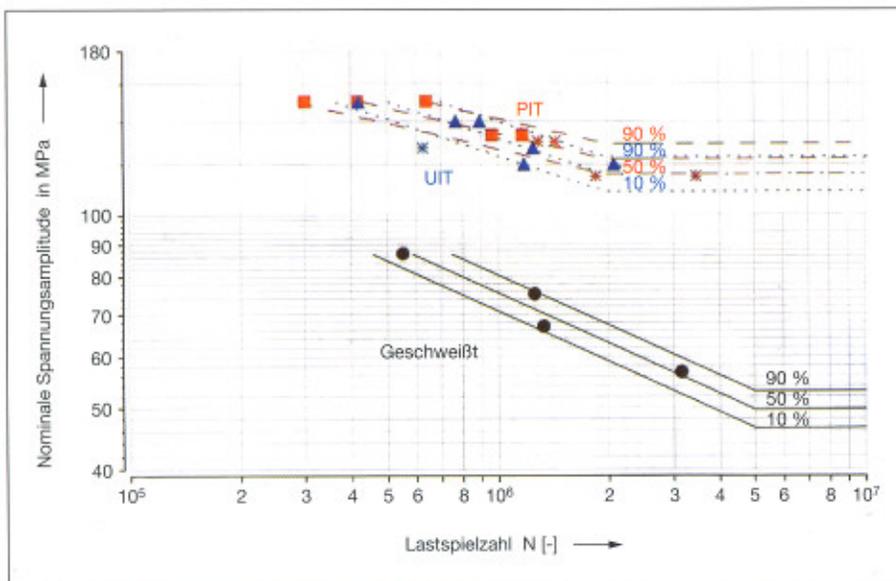


Bild 7. Wöhlerlinienvergleich UIT : PIT.

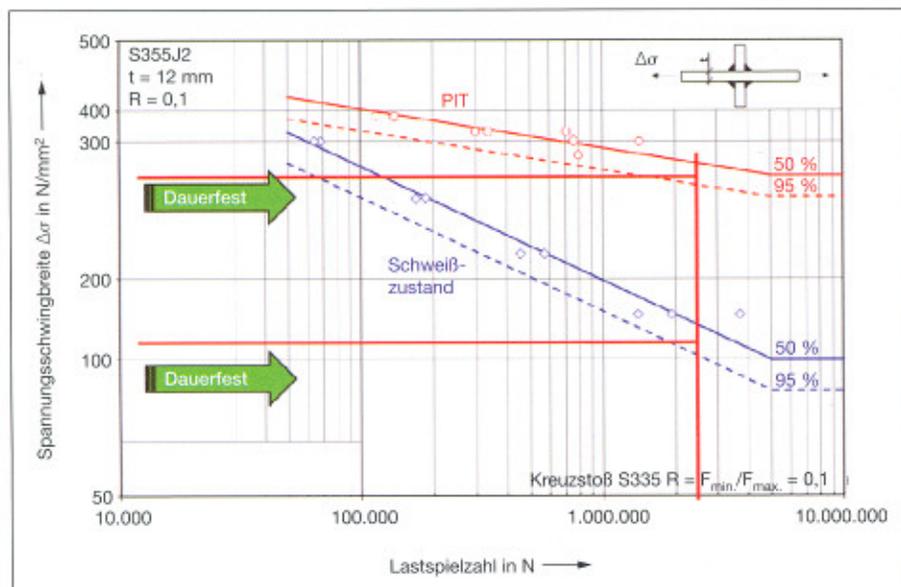


Bild 8. Kreuzprobe S335 zur Erhöhung der Lebensdauer.

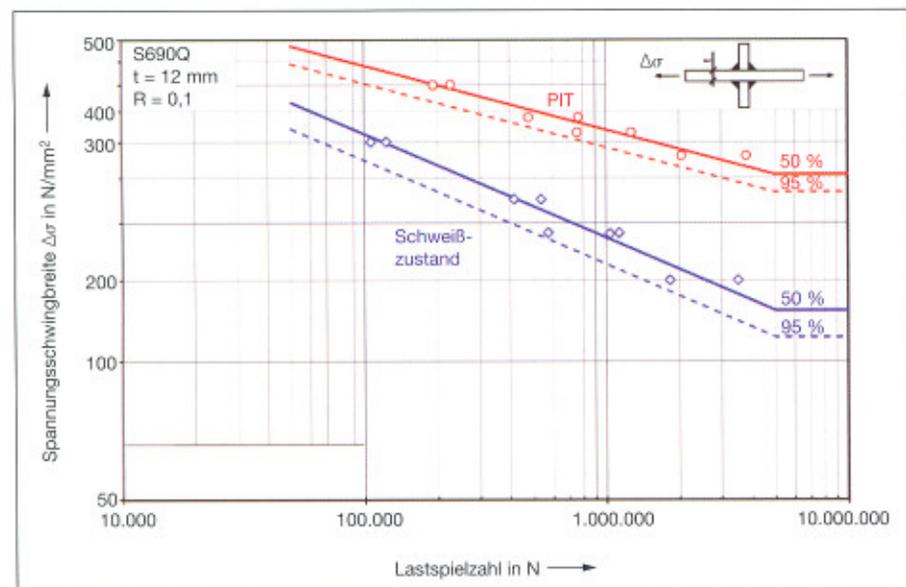


Bild 9. Kreuzprobe S690Q.

sind dies 108 MPa und bei PIT-behandelten Proben 122 MPa.

Unter Leitung des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart wurde im Jahr 2009 das Forschungsvorhaben „P 620“ zusammen mit ausgewählten Unternehmen aus Stahlbau und -herstellung umgesetzt. Die Beteiligten haben zunächst die Stähle S355, S460 und S690 mit der UIT-Nachbehandlung untersucht. In Anlehnung an diese Untersuchungen wurde dann die PIT-Technologie getestet mittels Kreuz- und Stumpfstoßen an den Werkstoffen S355 und S690. Die Schweißarbeiten hat das Labor für Schweißtechnik der Hochschule Ulm mit Schweißautomaten ausgeführt. Ergebnisse der Untersuchungen zur Schwingfestigkeit zeigen die Bilder 8 und 9. In ihnen ist zu erkennen, dass die Nachbehandlung mit dem Hämmerverfahren zu einer Verdopplung der Spannungsschwingbreite führt.

Wie bereits bei den UIT-behandelten Proben zeigt sich, dass die PIT-relevante Ermüdungsfestigkeit bei zwei bis fünf Millionen Lastwechseln nahezu verdoppelt werden kann. Die Neigung der Wöhlerlinie verläuft deutlich flacher. Auch die gemessenen Eigenstressungen sind mit denen der UIT-Behandlung vergleichbar. Beim Werkstoff S690 treten Brüche vorwiegend im Grundwerkstoff auf. Bereits bei den Stumpfstoßen S355 waren die nachbehandelten Schweißnähte so gut, dass die Brüche überwiegend im Grundmaterial aufgetreten sind. Bei den Stumpfstoßen S690Q trat kein Bruch mehr in der Schweißnaht auf.

Die Ergebnisse bestätigen auch vergleichbare Untersuchungen der Universität Graz. Diese hatte im Rahmen des Forschungsprojekts Join A11 am Werkstoff S700MC Eigenstressungen an gestrahlten Blechen gemessen (Bild 10). Hierzu wurden an der Blechoberfläche zunächst ein Feld mit PIT und ein Feld mit UIT behandelt. Mit der Bohrlochmethode wurden dann die Eigenstressungen gemessen. Die ermittelten Druckeigenstressungen sind bei beiden Verfahren nahezu gleich.

Im Bild 11 sind die mit dem Nachbehandlungsverfahren möglichen Optimierungspotenziale beschrieben. Durch die Nachbehandlung wird das Zusammenspiel zwischen Kerbwirkung und Druckbeanspruchungen optimiert. Die Vorteile sind:

- Steigerung der Lebensdauer.
- Verdopplung der Ermüdungsfestigkeit.
- Wanddickenreduzierung um bis zu 40 %.
- Höhere Wirtschaftlichkeit.

Fallbeispiel einer Umformpresse

In einem Produktionswerk waren Reparaturarbeiten an einer hochbelasteten Umformpresse nötig. Hier sollte ein neues, 150 mm dickes Lager in die je 25 mm dicke Doppel-

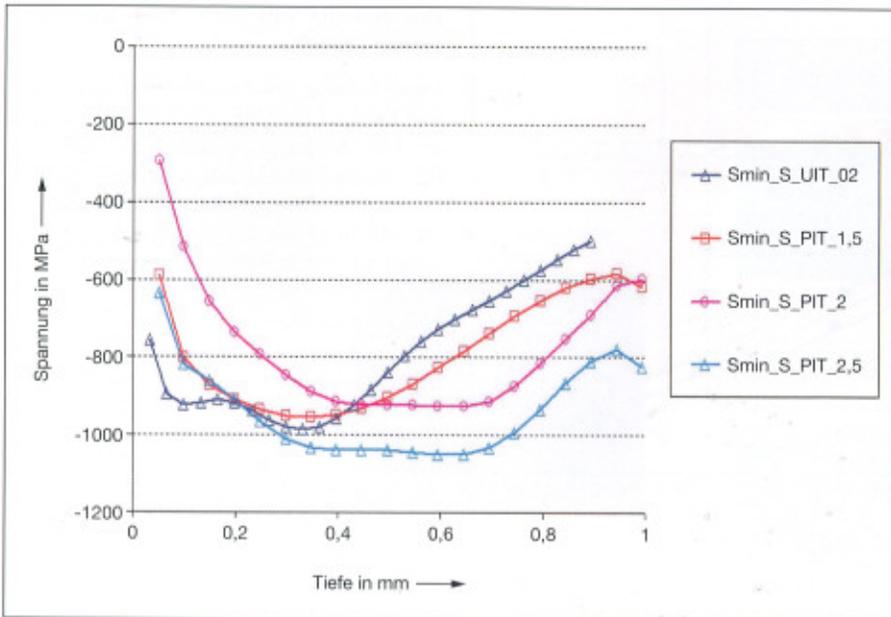


Bild 10. Vergleich der Eigenspannungen UIT – PIT Behandlung.

	S235 Schweißzustand	S690 PIT - behandelt
Skizze		
Ermüdung	1.0	1.0
Stat. Festigkeit	1.0	2.9
Gewicht/Mat.	1.0	0.7
Schweißvol.	1.0	0.5

Bild 11. Optimierungspotenziale am Beispiel von Schweißungen.

wand des Getriebegehäuses eingeschweißt werden. Um die Kerbwirkung zu verringern, wurde die Schweißnaht im Durchmesser von 950 mm komplett verschliffen. Zusätzlich haben die PITEC-Fachleute die komplette Oberfläche im Schweißnahtbereich auf einer Breite von 35 mm mit PIT behandelt. Die Behandlungsdauer der rund 3 m langen Schweißnaht auf der gesamten Oberfläche von 35 mm Breite betrug rund 1 h (Bild 12).

**Fallbeispiel einer Autobahnbrücke: Sanierung der Unterkonstruktion aus Stahl**

Die Geschnitztal-Brücke in Österreich ist Teil der Brennerautobahn. Aufgrund gestiegener Verkehrsbelastungen sowie der Verbreiterung der rd. 30 Jahre alten Brücke von je zwei auf je drei Fahrspuren sind an der Unterkonstruktion aus Stahl zunehmend Schäden entstanden, wie Anrisse an den Querstreifen von Schweißnaht-Übergängen. Beim Sanierungskonzept sollte zunächst das UIT-Verfahren zum Einsatz kommen. Aufgrund der geringen Kosten wurde jedoch das PIT-Verfahren vorgezogen.

Schwingversuche an der Universität Innsbruck haben die verbesserte Lebensdauer an den Konstruktionsdetails bestätigt (Bild 13). Bei Prüfstandversuchen wurden an unbehandelten Proben nach einer Laufzeit von rund 300.000 bis 568.000 Lastwechseln bei einer Schwingbreite von 200 N/mm<sup>2</sup>, R = 0,1, Anrisse festgestellt. Ein Prüfkörper, der bereits 568.000 Lastwechsel ohne Nachbehandlung gelaufen war, wurde repariert und die Schweißnaht nachbehandelt. Nach weiteren 1.800.000 Lastwechseln unter gleicher Belastung ist später die gegenüberliegende, nicht reparierte Schweißnaht gerissen.

### Erschwerte Anwendung neuer Prüfkonzepte und innovativer Technologien

Die praktische Anwendung neuer Prüfkonzepte und Technologien im Anlagenbau kommt immer wieder mit der Regelwerkskonformität in Konflikt. Zugleich sind technische Innovationen nötig, um wichtige Optimierungspotenziale zu erschließen. Qualifizierte



Bild 12. PIT-Behandlung eines eingeschweißten Lagers.



Bild 13. Stahlunterkonstruktion der Geschnitztal-Brücke.

Nachweise zur Wirksamkeit der angewendeten Verfahren und ein pragmatisches Vorgehen werden immer wichtiger. Das setzt ein hohes Maß an Ingenieur-Know-how voraus. Zwischen Betreiber und Abnahmegesellschaften ist konstruktiv zu klären:

- Sind diese Verfahren geeignet?
- Liegen ausreichende Erfahrungen und Untersuchungen hierzu vor?
- Lassen die vorhandenen Regelwerke das Verfahren zu?
- Welche Risiken bestehen, wenn das Verfahren unwirksam ist?

Grundsätzlich gilt: Regelwerke können die Anwendung innovativer Verfahren generell nicht abbilden, weil sie auf bestehenden Ergebnissen basieren und somit nicht die neuesten Erkenntnisse widerspiegeln können.

Weil die Regelwerke zwangsläufig nur mit zeitlicher Verzögerung auf technische Innovationen reagieren können, ist ein neues Denken erforderlich. Die Anwendung neuer Prüfverfahren und Technologien verlangt pragmatische Entscheidungen auf der Grundlage von individuellen Fallanalysen und wissenschaftlichen Studien. Die Wirksamkeit der Verfahren muss von unabhängigen Dritten nachgewiesen werden. Eine frühzeitige Zertifizierung fördert die Markteinführung eines Verfahrens. Experten von TÜV SÜD erarbeiten spezifische Lösungen bei neu entwickelten Prüfverfahren sowie bei Nachbehandlungsverfahren für Schweißnähte und qualifizieren die praktische Anwendung im individuellen Fall. □