

# Entwicklung der Ultraschallprüfanforderungen an schweren Rotor-Schmiedeteilen über die letzten Jahrzehnte

Johannes VRANA<sup>1</sup>, Alexander ZIMMER<sup>2</sup>,  
Kevin BAILEY<sup>3</sup>, Paul ZOMBO<sup>3</sup>, Robert E. SHANNON<sup>3</sup>,  
Hans-Peter LOHMANN<sup>4</sup>, Werner HEINRICH<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siemens Energy, Huttenstraße 12, D-10553 Berlin, Germany

<sup>2</sup> Saarschmiede, Bismarckstraße 57-59, D-66333 Völklingen, Germany

<sup>3</sup> Siemens Energy, 4400 Alafaya Trail, Orlando, FL 32826, USA

<sup>4</sup> Siemens Energy, Rheinstr. 100, D-45478 Mülheim an der Ruhr, Germany

**Kurzfassung.** Schwere Rotor-Schmiedeteile, wie sie in landgestützten Turbinen und Generatoren für die Energieerzeugung eingesetzt werden, werden vor Inbetriebnahme unter anderem mit Ultraschall inspiziert. Diese Untersuchungen wurden vor mehreren Jahrzehnten zur Sicherstellung der Bauteilintegrität eingeführt. Dabei wurde am Anfang ausschließlich eine manuelle Untersuchung in Kontakttechnik mit Longitudinalwellen-Prüfköpfen im Impuls-Echo-Betrieb, zunächst ohne feste Registrier- oder Entscheidungsgrenzen, durchgeführt. Die Entwicklung der Inspektionsmöglichkeiten, die Veränderung der Konstruktionsanforderungen, die Weiterentwicklung der bruchmechanischen Berechnungen, die Erkenntnisse aus dem Betrieb der Rotoren, die Erfahrungen mit der Inspektionsmethode, und Betrachtungen zur Nachweiswahrscheinlichkeit (PoD) haben die Veränderungen bewirkt welche die heutzutage üblichen Inspektionsanforderungen aufweisen:

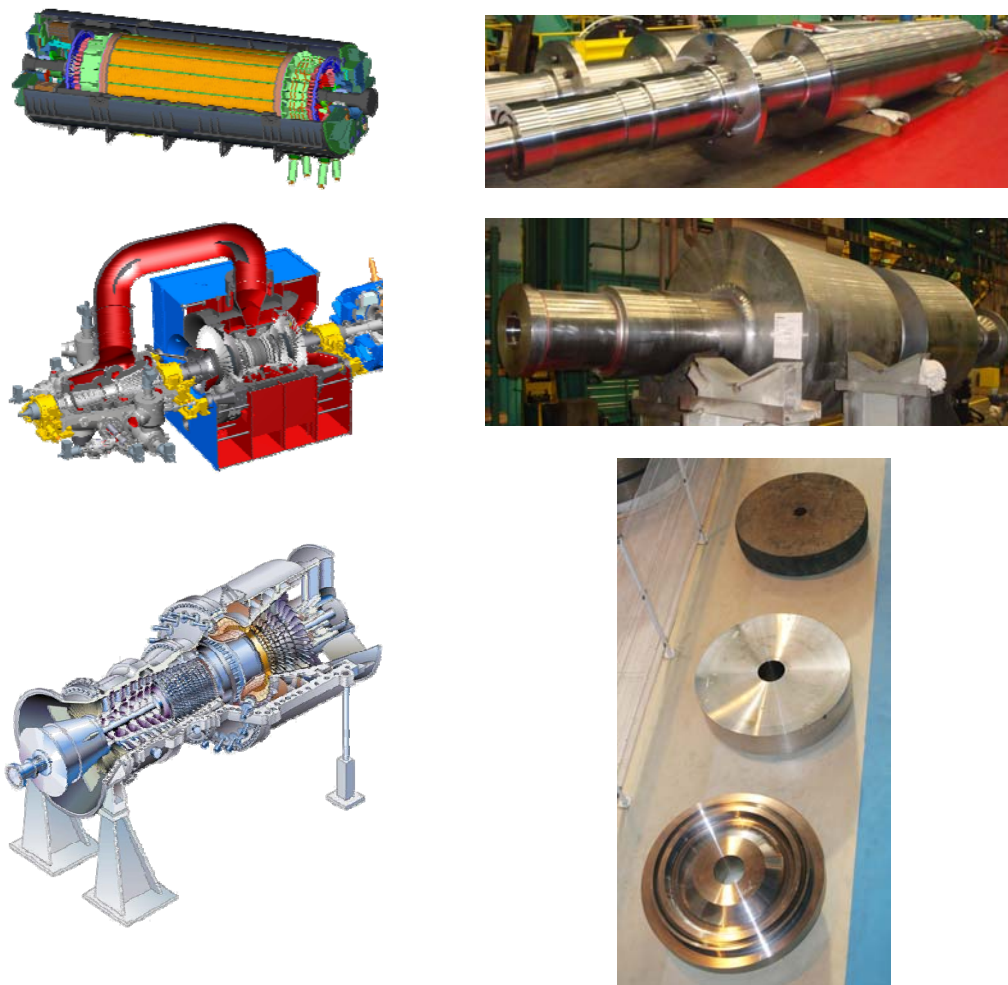
Nach Einführung der ersten Größenbestimmungsverfahren konnten Registrier- und Entscheidungsgrenzen etabliert werden. Winkel und Sender-Empfänger-Prüfköpfe wurden eingeführt und schließlich wurde automatisiertes Equipment gefordert. Durch all diese Veränderungen konnten Größenbestimmungstechniken verfeinert werden die auf theoretischen Vorgaben aufbauen (wie AVG) und moderne Ultraschallverfahren (wie Gruppenstrahler) global eingeführt werden.

Diese Veröffentlichung beschreibt dabei die Entwicklung der Ultraschall Inspektionsanforderungen über die letzten Jahrzehnte und gibt einen Ausblick auf die Zukunft.

## Einführung

SIEMENS Energy fertigt verschiedene Produkte für die Energieerzeugung und -verteilung. Das Produktportfolio für die Energieerzeugung umfasst Dampf- und Gasturbinen sowie die dazu passenden Generatoren (siehe Abbildung 1 links). Diese Veröffentlichung behandelt die Entwicklung der Prüfanforderungen bzw. Spezifikationen für die Ultraschallprüfung an den in diesen Siemens OEM Produkten verbauten schweren Schmiedeteilen (siehe Abbildung 1 rechts). Dabei wird sowohl die Geschichte der Siemens KWU als auch der Westinghouse Power Generation berücksichtigt.

Diese Veröffentlichung fasst in Anlehnung an [1] die Entwicklung der Ultraschallprüfanforderungen zusammen. Zimmer et al legen dagegen in [2] den Schwerpunkt auf die Entwicklung der Implementierung der Ultraschallprüfung.



**Abbildung 1.** Links: Illustration eines Generators, einer Dampfturbine und einer Gasturbine (von oben nach unten). Rechts: Die zu diesen Produkten passenden schweren Schmiedeteile. Dabei zeigt das Bild rechts unten den Herstellungsprozess einer Gasturbinenscheibe: nach dem Schmieden und der Wärmebehandlung, zur Ultraschallprüfung gedreht und in Lieferkontur.

## 1. Erste Entwicklungen der Ultraschallprüfung

Die Entwicklung des technischen Ultraschalls fing in der zweiten Hälfte des 19ten Jahrhunderts mit der Entdeckung des Magnetostriktiven (1847, J.P. Joule) und Piezoelektrischen Effekts (1880, J. & P- Curie) an. Etwas zur gleichen Zeit wurden auch

die ersten theoretischen Arbeiten zur Akustik durchgeführt und veröffentlicht, wie "The Theory of Sound" von J.W. Strutt (Lord Rayleigh) aus dem Jahre 1877.

Aber erst durch eine Katastrophe fand sich die erste Anwendung: Am 15. April 1912 kollidierte die Titanic mit einem Eisberg und führte zum Tod von 1517 Menschen. Auf Grund des Ausmaßes dieser Katerstrophe und der öffentlichen Reaktionen wurde sofort nach Lösungen gesucht wie man solche Ereignisse in der Zukunft verhindern kann. Daher wurde schon im Jahre 1912 ein Ultraschall Echoortungssystem von L.F. Richardson zum Patent angemeldet und J. Fessenden hat schließlich 1914 das erste auf Ultraschall basierende Eisberg Detektionssystem gebaut.

Im gleichen Jahr begann der erste Weltkrieg mit ihm das Interesse an der Entwicklung von U-Boot Detektionssystemen. Daher verschob sich der Anwendungs- und Entwicklungsfokus von Ultraschall Echoortungssystemen und P. Langevin entwickelte 1916 das sogenannte Hydrophon zur Detektion von U-Booten. Aber bevor die Entwicklung von SONAR (SOund NAvigation and Ranging) Systemen beendet war endete der erste Weltkrieg und die weitere Entwicklung verzögerte sich.

1928 schlug schließlich der russische Physiker S.Y. Sokolov vor, Ultraschall für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) von Materialien (oder um genauer zu sein: für die Fehlstellendetektion in Metallen) zu verwenden. In den folgenden Jahrzehnten und insbesondere im zweiten Weltkrieg wurde daher diese Technologie auf der ganzen Welt weiterentwickelt.

Aber erst durch die Weiterentwicklung der Elektronik und dem Wechsel von einem Dauerstrich (CW) auf einen Puls Echo Ansatz wurde die Ultraschallprüfung zu einem der wichtigsten Werkzeuge der ZfP. Dieser Wechsel wurde während des zweiten Weltkrieges von verschiedenen Forschern verschiedener Nationen unabhängig voneinander durchgeführt. D. Sproule verwendete dazu allerdings noch einen Prüfkopf mit zwei nebeneinander angeordneten Schwingern (das typische Sender-Empfänger Konzept). F. Firestone verwendete dagegen den gleichen Schwinger zum Senden und Empfangen.



**Abbildung 2.** Links: Sperry Reflectoscope von ca. 1945. Rechts: Siemens Reflectoscope von ca. 1950 [3].

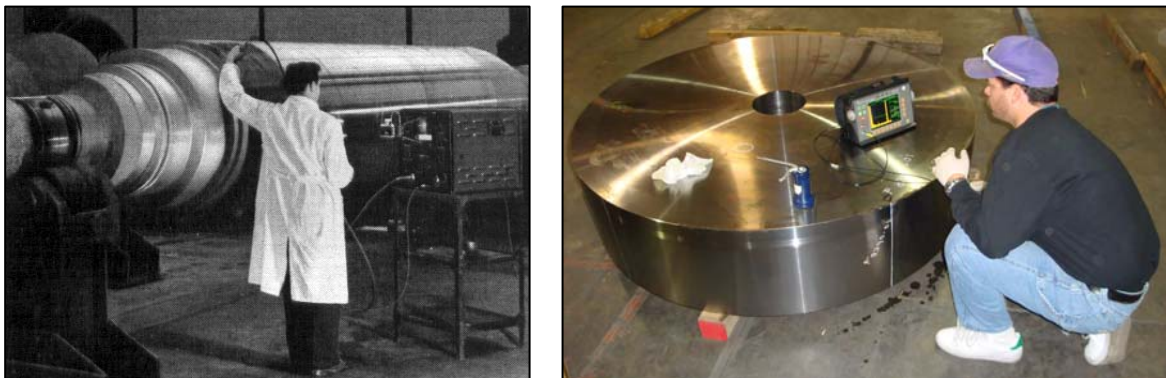
Diese Entwicklungen und die Verfügbarkeit erster kommerzieller Systeme von Sperry (in Abbildung 2 ist ein frühes Modell des Sperry Reflectoscope, entwickelt von F. Firestone, zu sehen) und Hughes führten nach dem zweiten Weltkrieg zum Start der industriellen Ultraschallprüfung. Basierend auf diesen Erfolgen fingen auch mehrere andere Firmen mit der Entwicklung und Produktion von Ultraschall Puls Echo Geräten an (Krautkrämer, Karl Deutsch und auch Siemens). Abbildung 2 zeigt beispielsweise auf der

rechten Seite ein Siemens Reflectoscope mit einer fortschrittlichen Bildschirmkamera [3]. Siemens hat zwar die Produktion von Ultraschallgeräten für die ZfP aufgegeben aber dies war mehr oder weniger der Start der Siemens Medizintechnik.

### *1.1 Anfänge der Ultraschallprüfung an schweren Schmiedeteilen bei Siemens*

Im Jahre 1952 haben R. Schinn und U. Wolff über die erste erfolgreiche Prüfung eines schweren Schmiedeteils mit einem eines Ultraschall Puls Echo Systems in den Siemens-Schuckertwerken berichtet [4]. Sie verwendeten dazu Geräte von Siemens und Krautkrämer und prüften die Generatorwelle mit radialer Senkrechteinschallung. Westinghouse fing etwa zur gleichen Zeit (ca. 1950) mit ersten Versuchen zur Ultraschallprüfung an verwendete dazu aber Geräte von Sperry. Auch wenn die Siemens und Westinghouse nur fünf Jahre nach dem Start der nicht-militärischen Systeme Ultraschallsysteme für die Prüfung der schweren Schmiedeteile verwendete, gehen Veröffentlichungen bis ins Jahre 1946 zurück in dem die Gebrüder Sülzer in der Schweiz ein Hughes System für die Ultraschallprüfung von Schmiedestücken verwendet haben [5].

Wie erfolgreich diese Anwendung ist, zeigt der Umstand dass die Ultraschallprüfung von schweren Schmiedestücken bei Siemens schon im Jahre 1954 verbindlich vorgeschrieben wurde und es bis heute ist (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3.** Ultraschallprüfung eines schweren Schmiedeteils in 1953 (links) [6] und 2008 (rechts).

## **2. Typische Ungängen**

Die Ultraschallprüfung brachte Werkstoffwissenschaftlern und Ingenieuren einen neuen Einblick in kritische Bauteile. Durch die Darstellung akustischer Signale mit Hilfe elektrischer Geräte konnten Anzeigen, die potentielle Defekte oder andere Ungängen im Material darstellen können, detektiert werden. Dadurch wurde es für Werkstoff und ZfP Ingenieure nötig Methoden zu entwickeln um diese zu kategorisieren. Außerdem wurde es wichtig, in Abhängigkeit von den verwendeten Prüfköpfen und Prüfparametern, die Detektierbarkeit verschiedener Ungängen bestimmen zu können. Der folgende Abschnitt zeigt einen Überblick über typische Ungängen die während des Schmiede- und Wärmebehandlungsprozesses entstehen können.

Metallische Einschlüsse gehören mit zu den am schwierigsten mit Ultraschall zu detektierenden Einschlüssen, da der geringe Kontrast zwischen den Materialeigenschaften des Grundwerkstoffes und denen der Fehlstelle nur zu einer geringen Amplitude des reflektierten Signals führt.

Bei nichtmetallischen Einschlüssen, die normalerweise in nicht konzentrischen Mustern oder Wolken auftreten, geht man normalerweise von einer guten Detektierbarkeit

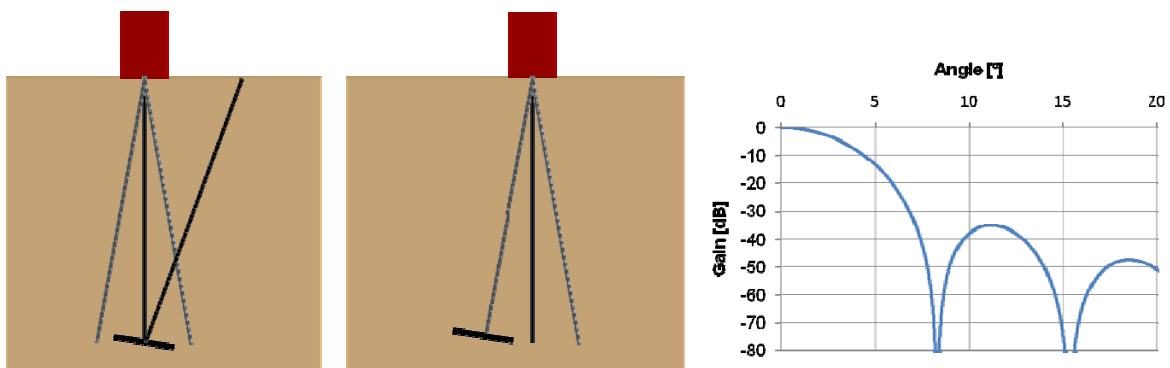
bei radialer oder axialer Einschallung aus, da diese Einschlüsse durch den Schmiedeprozess parallel zu den Oberflächen orientiert sind.

Wasserstoffflocken treten dagegen meistens an Gefügegrenzen auf und erscheinen meist als viele zufällig verteilte Einzelanzeigen. Die zufällige Ausrichtung könnte zwar zu einer schlechten Detektierbarkeit einer einzelnen Anzeige führen, aber durch die große Anzahl der Flocken ist die Detektionswahrscheinlichkeit sehr hoch.

Lunker (Secondary Pipes), die während des Erstarrens der Kokille entstehen, und Trennbrüche, die beim Umformen (durch das Schmieden an Stellen mit hoher Scherwirkung) oder bei zu schnellem Erwärmen entstehen können, sind normalerweise im Schmiedeteil zentriert solange der Schmiedeprozess homogen erfolgt. Daher sollten sie durch radiale Einschallung detektierbar sein. Es muss dabei aber berücksichtigt werden, dass das Ultraschallsignal an der, im Vergleich zur Wellenlänge, rauen Oberfläche dieser Ungängen diffus reflektiert wird, was zu Problemen mit der Größenbestimmung führen kann. Da bei solchen Anzeigen aber auch ein Abfall des Rückwandechos beobachtet werden kann, können mögliche Einschränkungen der direkten Detektion durch Reflexion ausgeglichen werden. Außerdem lassen sich solche Anzeigen durch den Rückwandechoabfall meist von Gruppenanzeigen unterscheiden, die durch viele kleine Reflektoren hervorgerufen werden.

Spannungsrisse werden durch das Abschrecken des Schmiedestücks während der Wärmbehandlung initiiert und wachsen von der Oberfläche in das Schmiedestück. Daher sind solche Anzeigen mit Ultraschall am besten durch Schrägeinschallung mit Transversalwellen oder mit Oberflächenwellen zu detektieren, idealerweise durch Ausnutzung des Winkelspiegel-Effektes. Normalerweise werden aber andere ZfP Methoden, wie Magnetpulverprüfung oder Farbeindringprüfung für die Oberflächenrissprüfung bevorzugt.

## 2.1 Schrägliegende Ungängen



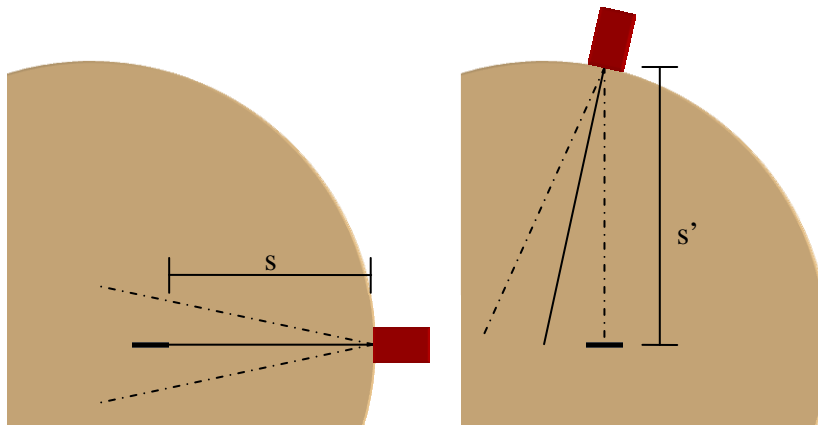
**Abbildung 4.** Links: Detektion von Ungängen die nicht im rechten Winkel zum Schallbündel liegen. Rechts: Divergenz eines 25 mm, 2 MHz Prüfkopfes (monochromatisch gerechnet).

Während die meisten typischen Ungängen durch radiale Einschallung detektiert werden können, gibt es Fälle bei denen die Anzeige nicht parallel zur Oberfläche liegt. In diesem Fall wird die Hauptwellenfront nicht in Richtung des Prüfkopfes reflektiert, die Amplitude des empfangenen Signals ist daher gering und kann aufgrund der begrenzten Dynamik des Prüfsystems möglicherweise nicht mehr detektiert werden. Dieses wird in Abbildung 4 dargestellt: wird der Prüfkopf senkrecht auf dem kürzesten Weg zur Ungänge angesetzt, dann wird die Hauptwellenfront der Reflexion am Prüfkopf vorbeilaufen und der Fehler wird nicht detektiert. Verschiebt man den Prüfkopf, dann kann es dazu kommen dass ein Randbereich des Schallfeldes die Ungänge senkrecht trifft und daher ein Signal zum Prüfkopf zurückläuft. Diese Reflexion wird allerdings gegenüber der Reflexion eines ideal senkrecht beleuchteten Reflektors eine (deutlich) geringere Amplitude aufweisen. Dies

führt zu zwei Problemen: erstens wird die Lage der Anzeige falsch und zweitens wird die Reflektivität und damit die Größe der Anzeige zu gering eingeschätzt. Bei einem typischen Prüfkopf mit 2 MHz und 25 mm Schwingerdurchmesser liegt der -6 dB Divergenzwinkel bei etwa  $4^\circ$ . Daher kommt es bei schrägliegenden Anzeigen mit einer relativen Abweichung von mehr als  $4^\circ$  zu einer erheblichen Unterschätzung der Größe.

## 2.2 Dezentrale Ungängen

Das gleiche gilt auch für dezentrale Ungängen in runden Bauteilen wie Scheiben oder Wellen. Wie Abbildung 5 zeigt werden solche Ungängen normalerweise nicht direkt detektiert. Erst wenn man den Prüfkopf um etwa  $90^\circ$  verschiebt kann die Anzeige mit einem Randbereich des Schallbündels detektiert werden. Das heißt aber dass die Ungänge sich nicht an dem Ort befindet an dem man sie erwarten würde. Zum einen ist der Ort um etwa  $90^\circ$  versetzt und die Anzeige befindet sich näher an der Oberfläche als der Schallweg erwarten lässt ( $s' > s$ ). Zusätzlich wird die durch die Reflektivität ermittelte Größe der Ungänge unterschätzt, da sie nicht mit dem Zentralstrahl des Schallbündels ermittelt wird. Im schlimmsten Fall kann es sogar dazu führen dass das Signal kleiner ist als das Rauschen und die Ungänge daher nicht zur Anzeige kommt.



**Abbildung 5.** Detektion einer dezentralen Ungänge in einem runden Bauteil mit dem Schallweg  $s$  bzw.  $s'$  zur Anzeige.

## 3. Größenbestimmungsverfahren & Bruchmechanik

Seit ca. 1960 fingen Konstrukteure an die bruchmechanischen Berechnungsmethoden für das Design und die Entwicklung neuer und existierender Rotor-Schmiedeteile anzupassen. Daraus entstand die Forderung nach einer Größenbewertung von Anzeigen die mit Hilfe der Ultraschallprüfung gefunden wurden.

Alle Methoden zur Größenbestimmung behelfen sich der Amplitude des Ultraschallsignals. Für Anzeigen die größer als das Schallbündel sind wird im Allgemeinen die Größe durch Prüfkopfbewegung ermittelt (z.B. Halbwertsmethode). Für Anzeigen die kleiner als das Schallfeld sind wird dagegen im Allgemeinen die maximale Echohöhe zur Größenabschätzung verwendet.

Bei beiden Größenbestimmungsverfahren hat sich gezeigt dass sie ausreichend konsistent und zuverlässig sind und bei Einsatz von Sicherheitsfaktoren eine konservative bruchmechanische Auslegung ermöglichen.

### 3.1 Größenbestimmung mit Prüfkopfbewegung

Bei der Größenbestimmung durch Prüfkopfbewegung wird der Prüfkopf in beiden Richtungen auf der Oberfläche des Bauteils verschoben, das Signal (Amplitude) beobachtet und die Größe anhand des Abfalls des Echos in zwei Dimensionen bestimmt. Die dritte Dimension wird durch den Schallweg bestimmt. Daher kann das Ausmaß der Anzeige in allen drei Raumrichtungen bestimmt werden, solange die Anzeige größer als das Schallbündel ist.

### 3.2 Größenbestimmung mit maximaler Echohöhe

Die Materialfehler, die in Schmiedestücken gefunden werden sollen, sind heute meist sehr klein. Aufgrund der Größe der Teile (Turbinenradscheiben besitzen Durchmesser von bis zu 3000 mm) und damit der Länge der Schallwege und folglich der großen Schallbündeldurchmesser, sowie der geringen Größe der zu detektierenden Ungängen ist eine Größenabschätzung mittels Prüfkopfverschiebung meist nicht durchführbar. Man ist daher gezwungen andere Informationen zur Abschätzung der Fehlergröße heranzuziehen und behilft sich üblicherweise mit der Signalamplitude. Dazu wird die Lage der Anzeige im Bauteil durch den Schallweg und die Position des Prüfkopfes an der Oberfläche und die Größe der Anzeige durch die reflektierte Amplitude an dieser Stelle bestimmt. Dabei wird die Amplitude in Abhängigkeit vom Schallweg korrigiert und mit der Reflektivität eines idealen Ersatzreflektors, wie der eines Kreisscheibenreflektors (KSR), verglichen. Die Größe einer Anzeige wird dann als äquivalente Ersatzreflektorgöße in mm KSR angegeben. Im Gegensatz zur Größenabschätzung mit Prüfkopfbewegung werden aber bei der Größenabschätzung mit maximaler Echohöhe je nach örtlichen Vorzügen und Qualifizierungen verschiedene Methoden verwendet.

Die traditionellste Methode, die seit dem Anfang der Ultraschallprüfung verwendet wird, verwendet eine abstandbasierte Amplitudenkorrektur (DAC) die an mehreren Flachbodenbohrungen kalibriert wird. Diese Methode wurde von einigen Spezifikationen der ehemaligen Westinghouse Power Generation explizit gefordert. Dabei wurde aber die DAC Kurve nur an Hand von zwei Messpunkten aufgenommen (eine bei ~76 mm und eine bei ~280 mm) und bis 560 mm und 840 mm auf der Basis des Quadratabstandsgesetzes extrapoliert.

Schon im Jahre 1950, fünf Jahre nach dem Start der Ultraschallprüfung, veröffentlichten Kinsler und Frey ihr Buch über die Grundlagen der Akustik [7] mit einer theoretischen Berechnung des Schallfeldes eines Kolbenschwingers im Fernfeld. Seki et al [8] führten diese Arbeit weiter und wendeten sie auf die Ultraschallprüfung an. Diese Arbeit wurde schließlich die Basis für alle theoriebasierten Größenbestimmungsmethoden bei Siemens und der ehemaligen Westinghouse Power Generation.

Neben der DAC Methode (bei der die Extrapolation auch auf dieser Theorie beruht) benutze eine der auf „theoretischen“ Methoden, die bei Westinghouse verwendet wurden, eine Justierung an einer Flachbodenbohrung (FBH) die einen Kreisscheibenreflektor simulieren soll [9]. Da diese Justierung aber nicht am tatsächlichen Bauteil durchgeführt wird (genauso wie die normale DAC Methode) mussten einige bauteilabhängige Faktoren in Betracht gezogen werden. Daher wurden in den folgenden Jahren mehrere Publikationen veröffentlicht um Effekte auszugleichen, die durch eine unterschiedliche Oberflächengüte, eine Oberflächenkrümmung und durch die Schallschwächung hervorgerufen wurden.

Ein weiterer Ansatz wurde von anderen Spezifikationen bei Westinghouse gewählt. Diese Spezifikationen forderten eine Kalibrierung an der Rückwand des Bauteils und bauteilabhängigen Faktoren wurden automatisch mit einbezogen. Diese Methode war aber relativ kompliziert in der Anwendung.

Im Jahre 1959 veröffentlichte J. Krautkrämer die Methode Amplitude - Verstärkung - Größe (AVG), die sich in großen Teilen Europas durchgesetzt hat. Diese Methode basiert auf den gleichen theoretischen Grundlagen und fasst die Information in einem praktischen Diagramm zusammen (insbesondere in einer Zeit in der der Zugang zu Rechnern und Computern noch sehr eingeschränkt war). Bei dieser Methode werden in einem Koordinatensystem in mehreren Kurven die Amplitudenabschwächung der Rückwand bzw. die von bestimmten KSR Größen gegenüber den Schallweg aufgetragen. Dabei ist im Allgemeinen die Rückwandkurve ganz oben (niedrige Verstärkungswerte), darunter kommen die KSR Kurven, angefangen mit den größten KSR Werten. Die KSR Kurven verlaufen dabei im Fernfeld parallel und die Abschwächung nimmt mit abnehmendem KSR Wert zu. Mit diesem Diagramm ist es nicht nur einfach zu justieren, sondern auch eine Größenabschätzung von Anzeigen durchzuführen [10]. Diese Methode wird bei Siemens derzeit für fast alle Scheiben und Wellen verwendet – auch auf dem amerikanischen Markt.

### *3.3 Einführung der Bruchmechanik*

Wie schon erwähnt wurde die Bruchmechanik in den 1960er Jahren eingeführt. Daher ist seit 1970 die Größenbestimmung per Prüfkopfbewegung und über die maximale Echohöhe eine Voraussetzung für die meisten großen Schmiedestücke für die Energieerzeugung. In den ersten (Material-)Spezifikationen die eine Ultraschallgrößenbestimmung forderten wurden die ZfP-Anforderungen in einem einzelnen Satz umgesetzt: „Bei der Ultraschallprüfung auftretende Zwischenechos, die einer Ersatzfehlergröße von  $> 5$  mm  $\varnothing$  und alle Anzeigen mit geschwächtem Rückwandecho sind zu melden.“. Daran sieht man deutlich die Entwicklung der Spezifikationen wenn man sich die derzeitigen 40seitigen ZfP Spezifikationen betrachtet (dabei sind die Bauteilspezifischen ZfP Spezifikationen nicht mitgezählt).

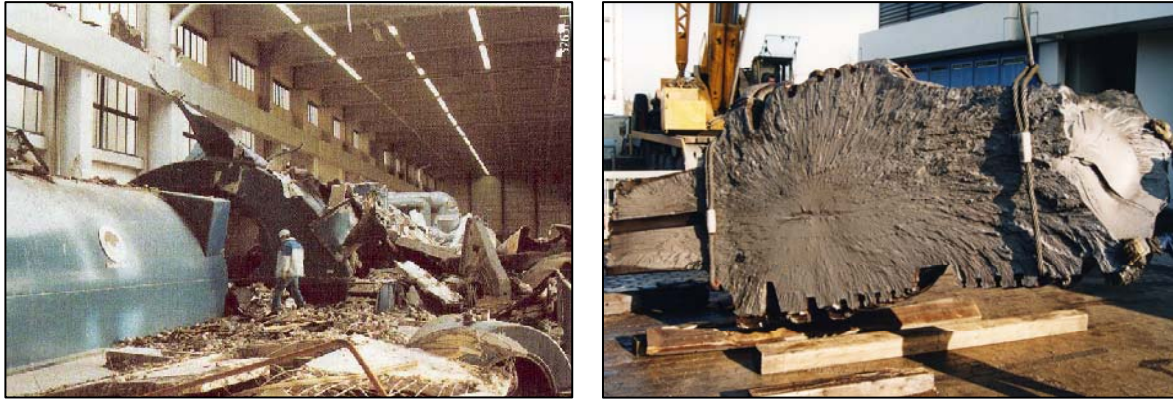
## **4. Erfahrungen während des Betriebes**

Mit genau diesen Prüfanforderungen wurde 1970 eine ND (Niederdruck) Welle für eine 330 MW Dampfturbine geschmiedet. Nach 16 Jahren Betrieb, am Neujahresmorgen im Jahre 1988 um 6:08, passierte einer der schlimmsten Unfälle in der Geschichte der Energieerzeugung (siehe Abbildung 6). Der Rotor zerbrach in mehrere Bruchstücke, wobei einige der Stücke das Gehäuse der Turbine und die Kraftwerksmauern durchschlugen und bis zu 1,3 km vom Kraftwerk entfernt gefunden wurden. Glücklicherweise wurde niemand verletzt [11, 12].

Die Analyse dieses Unfalls hat gezeigt, dass die Ursache ein Defekt war, der auch schon mit der Ultraschallprüfung während des Herstellungsprozesses des Schmiedeteils gefunden wurde. Zum Zeitpunkt der Prüfung hatte der Fehler eine Reflektivität entsprechend 5 mm KSR aufgezeigt und zu einem kompletten Einbruch des Rückwandsignals geführt. Die Anzeige wurde als Gruppenanzeige klassifiziert, die durch viele (eher kleine) nicht-metallische Einschlüsse hervorgerufen wurde. Wie sich aber durch metallurgische Untersuchungen nach dem Unfall herausgestellt hat, haben vier große Lunker zu dem Versagen geführt. Der größte Lunker war so groß wie eine menschliche Hand und dezentral. Durch diese dezentrale Lage wurde die Anzeige um etwa 50 bis 60 dB unterbewertet (siehe Abbildung 7 links und Abschnitt 2.2) [11, 12].

Dieser Befund führte zu einer sofortigen maßgeblichen Änderung der Richtlinie VGB-R 504 M, die Vorgaben zur Herstellung und Prüfung schwerer Schmiedeteile für die Energieerzeugung macht: bei der Ultraschallprüfung wurde eine Winkeleinschallung für die Detektion von dezentralen Ungängen vorgeschrieben.

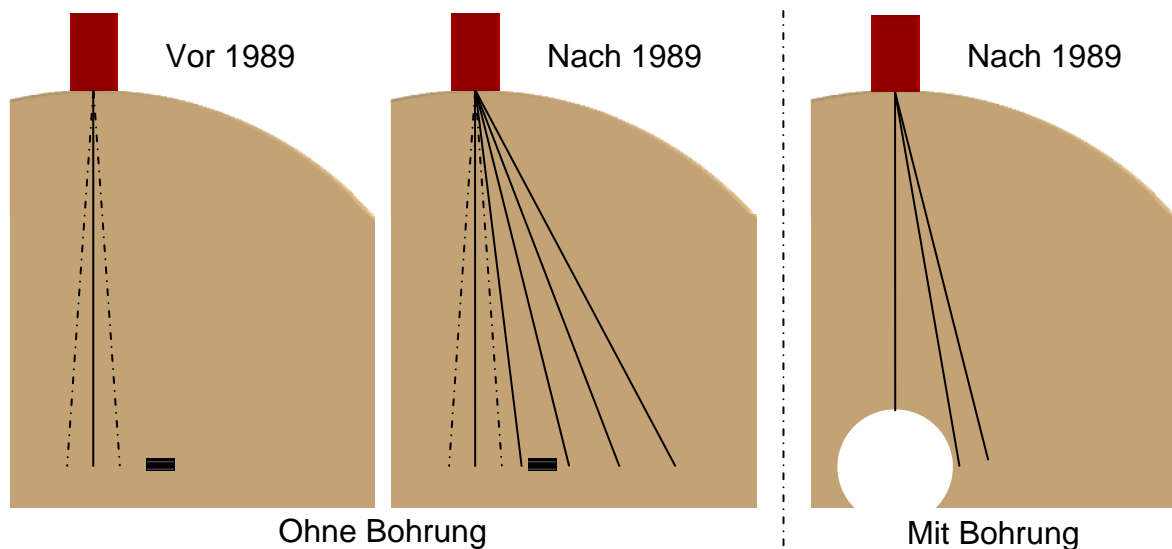




**Abbildung 6.** Schaden an einem Niederdruckrotor im Jahre 1988 [11, 12].

Bei Bauteilen ohne Bohrung wurde daher eine Winkelprüfung eingeführt, die in Winkelintervallen durchgeführt werden muss, die dem Doppelten des Divergenzwinkels entspricht. Dadurch werden in einem bruchmechanisch kritischen Bereich dezentrale oder schief liegende Anzeigen um nicht mehr als 6 dB unterbewertet. Für einen Standardprüfkopf mit 2 MHz und 25 mm  $\varnothing$  wurden daher Winkel mit  $7^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $21^\circ$  und  $28^\circ$  eingeführt (siehe Abbildung 7 in der Mitte). Außerdem müssen, sobald eine Anzeige gefunden wurde, Zwischenwinkel verwendet werden um die Anzeige zu maximieren um dadurch eine bestmögliche Größenbestimmung zu ermöglichen.

Bei Bauteilen mit Bohrung befindet sich eine der am höchsten belasteten Regionen im Bereich um die Bohrung, was dazu führt dass Ungängen mit Radial-Axialer Ausrichtung sehr kritisch sind. Daher wurde eine Einschallposition eingeführt bei der das Schallbündel tangential an die Bohrung angepasst wird um die bruchmechanisch kritische Zone um die Bohrung abzudecken (siehe Abbildung 7 rechts).



**Abbildung 7.** Links: Situation während der Prüfung des Rotors im Jahre 1970; Mitte: Winkelprüfungen die seit 1989 für Schmiedeteile ohne Bohrung vorgeschrieben sind; Rechts: Winkelprüfungen die für gebohrte Schmiedeteile vorgeschrieben sind um eine (hoch belastete) Zone abzudecken.

Ähnliche Veränderungen an den Spezifikationen wurden in Amerika, auf Grund eines anderen Vorfalls aus dem Jahre 1974, durchgeführt. Der Vorfall ereignete sich an einem Schmiedestück für eine MD (Mitteldruck) – ND (Niederdruck) Welle einer 225 MW Dampfturbine die 1957 in Betrieb genommen wurde. Nach 17 Jahren Betrieb wurde das Versagen der Welle durch eine Kombination aus Kriech- und Sprödbrechung ausgelöst und führte zu einem Zersplittern der Welle in viele Teile (siehe Abbildung 8). Metallurgische Untersuchungen ergaben einen Bereich mit MnS Abscheidungen als die Ursache des

Bruchs. Weiterhin wurden sowohl Anlass- als auch wasserstoffinduzierte Versprödung gefunden die zum Risswachstum beigetragen haben. Dieser Unfall führte schließlich zur Einführung der sogenannten Boresonic Prüfungen [13].

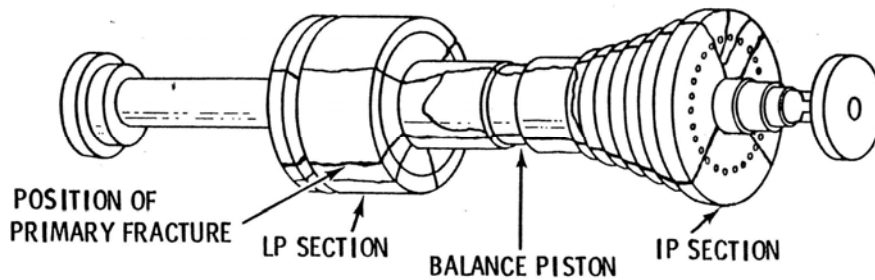


Abbildung 8. Schaden an einem MD-ND Rotor im Jahre 1974 [13].

## 5. Einführung weiterer Einschallrichtungen

Die Hersteller erster Gasturbinen benutzen für die Prüfung der schweren Schmiedeteile die Prüfspezifikationen der Dampfturbine. Erst Anfang der 1980er Jahre, als die Verbreitung landgestützter Gasturbinen für die Energieerzeugung zugenommen hat, wurden die Spezifikationen von Gas- und Dampfturbinen getrennt. In diesem Zuge wurden dann bei Gasturbinen, bei denen der Rotor aus mehreren aneinandergereihten Scheiben besteht, axiale Prüfungen eingeführt um die Nachweiswahrscheinlichkeit weiter zu erhöhen.

Zu etwa der gleichen Zeit wurden auch Winkelprüfungen eingeführt. Durch diese können insbesondere die kritischen Bereiche der Schaufelfußnuten, Wicklungsnuten und Kühlluftbohrungen genauer untersucht werden.

## 6. Neue Entwicklungen der Ultraschallprüfung



Abbildung 9. Automatisiertes Prüfungssystem das seit 1995 bei Saarschmiede zur Prüfung schwerer Schmiedeteile verwendet wird.

Mit der Entwicklung computerbasierter Ultraschallgeräte und Antriebe wurden automatisierte Ultraschallprüfungssysteme praktikabel. Automatisierte Systeme ermöglichten die präzisere Kontrolle einiger der Schlüsselfaktoren die eine Ultraschallprüfung zuverlässig machen. Dazu zählen insbesondere Prüfkopfpositionierung, Prüfungsgeschwindigkeit, Anpressdruck und Ausrichtung des Prüfkopfes. Mit der digitalen Aufzeichnung der Ultraschalldaten wurde außerdem das Auffinden von Anzeigen konsistenter und zuverlässiger. Schließlich wurde durch die Darstellung und Auswertung von A-, B- und C- Bildern, durch die Möglichkeit zur Offline-Auswertung und durch andere Auswertungsmethoden ein konsistenterer Vergleich mit anderen Prüfungen möglich. Das erste automatisierte Prüfungssystem das für Schmiedeteile für Siemens Rotoren verwendet wurde, wurde 1995 bei Saarschmiede GmbH Freiformschmiede in Völklingen installiert (siehe Abbildung 9) [2] und in 2004 wurde schließlich die

automatisierte Prüfung für einige hochkritische Bauteile von Siemens verpflichtend vorgeschrieben.

Neben weiteren automatisierten Prüfsystemen hat Saarschmiede im Jahre 2002 Gruppenstrahlerprüfköpfe eingeführt, um alle vorgeschriebenen Winkel mit einem Prüfkopf zu prüfen. Diese Prüfköpfe wurden schließlich in 2009 offiziell in die Prüfspezifikation übernommen.

Um mit den Energiemaschinen höhere Leistungen bzw. Wirkungsgrade zu verwirklichen, wurden die Anforderungen an die Integrität der Schmiedestücke kontinuierlich gesteigert und die Nachweisempfindlichkeit für kleine Fehler musste über die Jahre verbessert werden. Dies konnte zum einen durch einen besseren Schmiede- und Wärmebehandlungsprozess und zum anderen durch Weiterentwicklungen der Ultraschallprüftechnik verwirklicht werden. Daher konnten die Registrier- bzw. Entscheidungsgrenzen seit 1970 von 5 mm KSR auf bis zu 0,7 mm KSR verbessert werden.

Im Jahre 2009 hat Siemens begonnen die Spezifikationen global zu harmonisieren. Dabei mussten zum einen interne Unterschiede überwunden werden, die zumeist auf der unterschiedlichen Herangehensweise an die Größenabschätzung in Amerika und Europa zurückzuführen waren. Es wurden aber auch die Unterschiede in den lokalen Zertifizierungsregeln und insbesondere auch in den verschiedenen Normen offensichtlich.

## **7. Ausblick**

Wie diese Veröffentlichung zeigt, wurden zwar viele Entwicklungen in der Geschichte der Ultraschallprüfung durch Kriege und Katastrophen verursacht, aber es gibt mindestens genauso viele Entwicklungen die durch das technisch machbare bzw. erforderliche angestoßen wurden.

Für die Zukunft sehen wir, neben der schon angesprochenen internationalen Harmonisierung im Zuge der Globalisierung, folgende Punkte mit Entwicklungspotential für die zerstörungsfreien Prüfung schwerer Schmiedeteile:

- Reduktion der Prüfzeit um die Herstellungskosten und -dauer zu reduzieren (zur Zeit ist die kürzeste Prüfzeit etwa ein Tag für einfache Gasturbinenscheiben, für Generator bzw. Dampfturbinenwellen kann die Prüfzeit auch ca. 1-4 Wochen betragen)
- Bessere Charakterisierung von Anzeigen durch Verbesserung des Postprocessing- und Auswerteprozesses der Ultraschalldaten um die Schadenswahrscheinlichkeit weiter zu reduzieren und gleichzeitig die Produktionsausbeute zu verbessern
- 3D Datenverschmelzung von Ultraschall und anderen ZfP-Verfahren um eine genauere Größenbestimmung zu ermöglichen
- Für einfachere bruchmechanische Berechnungen wäre eine Darstellung und Einbeziehung der ZfP Ergebnisse in den 3D CAD und FE Daten hilfreich
- Außerdem wäre eine Einbeziehung von ZfP-Ergebnissen, die während des Betriebes gesammelt werden konnten, hilfreich um ein Feedback an Fabrikation und Technik geben zu können, um die Lebenszeit besser abschätzen zu können und für eine zustandsabhängige Wartung
- Und aufbauend auf diesen Punkten: Erleichterung der Prüfanforderungen durch ein probabilistisches Design

## Referenzen

- [1] J. Vrana, A. Zimmer, K. Bailey, R. Angal, P. Zombo, U. Büchner, A. Buschmann, R. E. Shannon, H.-P. Lohmann und W. Heinrich: "Evolution of the Ultrasonic Inspection Requirements of Heavy Rotor Forgings over the Past Decades", Rev. of Prog. in QNDE 29, pp. 1623-1630 (2010).
- [2] A. Zimmer, J. Vrana, J. Meiser und N. Blaes: "Evolution of the Ultrasonic Inspection of Heavy Rotor Forgings Over the Last Decades", Rev. of Prog. in QNDE 29, pp 1631-1638 (2010).
- [3] E.A.W. Müller: "Ultraschall als Hilfsmittel der Materialprüfung", Werkstatt und Betrieb 84., Heft 12 (1951).
- [4] R. Schinn und U. Wolff: "Einige Ergebnisse der Überschallprüfung schwerer Schmiedestücke mit dem Impulsecho-Verfahren", Stahl und Eisen 72, pp. 695-702 (1952).
- [5] W. Felix: "Die zerstörungsfreie Prüfung grosser Schmiedeteile mit Ultraschall", Schweiz. Arch. angew. Wiss. u. Techn. 17, pp. 107-113, (1952).
- [6] R. Schinn: "Erfahrungen mit der Ultraschallprüfung bei der Abnahme von Rotoren für Turbosätze", Metall 7, pp. 502-506 (1953).
- [7] Kinsler, Frey: "Fundamentals of Acoustics" (1950).
- [8] H. Seki, A. Granato und R. Truell: "Diffraction Effects in the Ultrasonic Field of a Piston Source and Their Importance in the Accurate Measurement of Attenuation", J. Acoust. Soc. Am. 28, pp. 230-238 (1956).
- [9] Ying, Baudry: "A Theoretical Approach to the Evaluation of Ultrasonically Detected Flaws in Rotor Forgings" (1963).
- [10] J. Krautkrämer: "Fehlergrößenermittlung mit Ultraschall", Archiv für Eisenhüttenwesen 30, pp. 693-703 (1959).
- [11] J. Ewald, C. Berger, G. Röttger und A.W. Schmitz: "Untersuchung an einer geborstenen Niederdruckwelle", VBG Konferenz „Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1989“ Vortrag 12 (1989).
- [12] A. Merz und R. Reifenhäuser: "Der Turbinenschaden im Kraftwerk Irsching", VGB Kraftwerkstechnik 69, pp. 255-259 (1989).
- [13] J.M. Schmerlin und J.V. Hammon: "Investigations of the Tennessee Valley Authority Gallatin Unit No. 2 Turbine Rotor Burst", American Power Conf., Chicago, Illinois, April 20-22 (1976).