Werkstoff- sowie Werkstück-Festigkeit und -Prüfung von Schmiedestücken für Wellen von Turboaggregaten. Die Bewertung von inneren Ungänzen beziehungsweise von Ultraschallanzeigen

Autor(en): **Schlant, Rudolf**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG**

Band (Jahr): **56 (1985)**

PDF erstellt am: **01.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-378183

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Werkstoff- sowie Werkstück-Festigkeit und -Prüfung von Schmiedestücken für Wellen von Turboaggregaten.
Die Bewertung von inneren Ungänzen beziehungsweise von Ultraschallanzeigen.

Vortrag von Herrn Dr.-Ing. E.h. Rudolf Schinn†, Ahrensburg,
vorgetragen von Dr.-Ing. Jürgen Ewald, Kraftwerk Union AG, Mülheim-Ruhr.

Dr.-Ing. E.h. Rudolf Schinn war es leider nicht mehr vergönnt, diesen Vortrag zu halten, denn er starb am 28. Juni dieses Jahres an den Folgen eines tragischen Verkehrsunfalles. Er wurde 73 Jahre alt.

Herr Dr. Schinn trat nach abgeschlossenem Hochschulstudium im Jahre 1935 in die Dienste der Firma Siemens-Schuckertwerke in Berlin als Werkstoffingenieur. Ab Februar 1940 war er im Turbinen- und Generatorenwerk der Siemens-Schuckertwerke in Mülheim a.d. Ruhr als Laborleiter, später als Leiter des zentralen Werksreferates für metallische Werkstoffe tätig.

Mit Gründung der Kraftwerk Union AG am 1. April 1969 wurde ihm die Leitung des Bereiches «Technik Werkstoffe» im Ressort «Werke Technik» übertragen.

Auch nach seinem Übertritt in den Ruhestand am 1. Juli 1973 stand er uns mit fachkundigem Rat zur Verfügung.

Sein Berufsleben war seit seinem Eintritt bei der Firma Siemens-Schuckertwerke AG untrennbar verbunden mit der Entwicklung grosser Schmiede- und Gussstücke für den Maschinenbau. Diese Entwicklung betrieb er mit der für ihn typischen vorwärtsdrängenden Dynamik. Seine weltweit beachteten Arbeiten und Veröffentlichungen haben entscheidend mit zu dem hohen internationalen Stand beigetragen, der heute auf diesem Gebiet erreicht wurde.

Alle, die Gelegenheit hatten, mit diesem hervorragenden Fachmann zusammenzuarbeiten, werden sich stets seiner begeisternden Arbeitsweise, seiner menschlichen Aufgeschlossenheit und seiner persönlichen Hilfsbereitschaft erinnern.

Wir fühlen uns verpflichtet, die Arbeiten auf seinem Gebiet so fortzuführen, dass sie vor seinem kritischen Urteil bestehen könnten.

Als heutiger Leiter des Bereiches «Technik Werkstoffe» habe ich es daher gerne übernommen, den noch von Dr. Schinn konzipierten Vortrag zu seinem Andenken zu halten.

Dr.-Ing. Jürgen Ewald

1. Werkstoff- und Werkstück-Prüfung

Wer ein Objekt – gleich welcher Art – verantwortlich für den Betrieb freigibt, muss zuvor prüfen, ob der eingesetzte *Werkstoff* die vorgesehene Festigkeit hat *und* ob das Objekt, das *Werkstück,* für den beabsichtigten Betrieb die erforderliche *Festigkeit* hat. Es gilt also, bei der Festigkeitsprüfung eine klare Aussage *zu beiden Fragen* zu erhalten. Der Ausdruck «Festigkeit» steht hier stellvertretend für alle «Gebrauchseigenschaften», die erforderlich sind, ein *Versagen zu verhindern.*

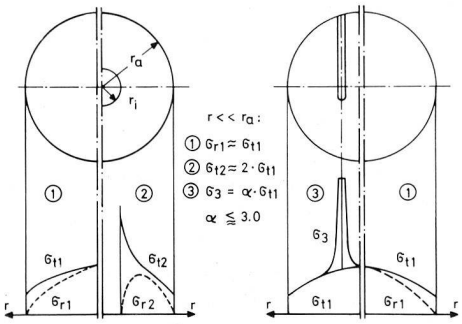


Bild 1: Spannungen in umlaufenden Wellen.

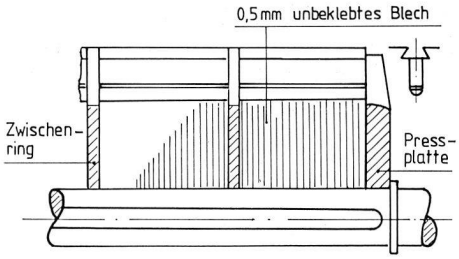


Bild 2: Prinzip der geblechten Turbowelle.

Um die Werkstückprüfung sinnvoll durchführen zu können, müssen die Beanspruchungen des Bauteiles bekannt sein. Der Vollständigkeit halber zeigt Bild 1 die Fliehkraft-Beanspruchungen in ungebohrten und gebohrten rotierenden Wellen.

2. Werkstück-Fehlstellen und Werkstück-Zähigkeit

Als um die Jahrhundertwende der Turbogeneratorenbau begann, fertigten die Elektrofirmen die Wellen aus gestanzten 0,5 mm dicken Blechen, die zu Paketen auf einer durchgehenden Achswelle verspannt wurden (Bilder 2 und 3).

Die Werkstoffprüfung der Bleche und der Achswelle bot keine Probleme. Die Festigkeit der zusammengebauten Welle – hier die Steifigkeit und Stabilität – war jedoch für Leistungen > 1000 KVA nicht ausreichend.

1907 wurde erstmalig eine geschmiedete Monoblockwelle eingesetzt. Es handelte sich um C-Stahl normalisiert, der bezüglich Durchvergütung und Versprödung wenig Probleme bietet, wohl aber bezüglich der *Makrostruktur* (Block- und Makroseigerung, Lunker, Risse) (Bilder 4 und 5).

Es wurde deshalb eine Überdrehzahlprobe von 25% durchgeführt, das entspricht einer um 50% überhöhten Betriebsbeanspruchung. Diese Probe überprüft sogleich eventuelle Konstruktions- und Fertigungsmängel,

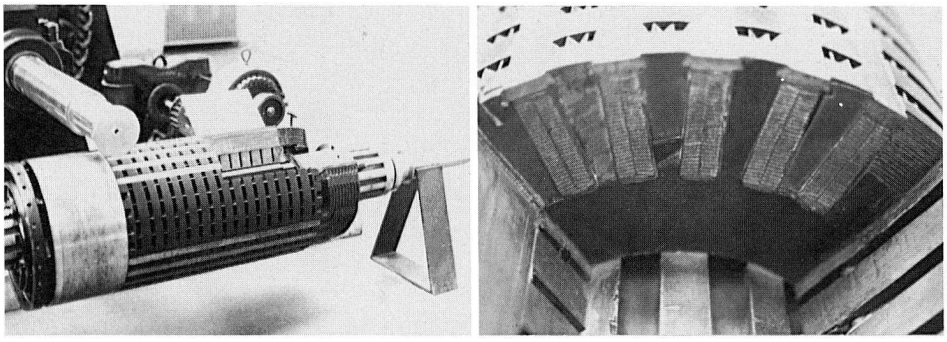


Bild 3: Turbowelle 1902 von Brown Boveri, 435 kW, 3000 U/min, Ballen 480 ⌀ × 760 mm, Achswelle 125 mm ⌀ (Deutsches Museum München).

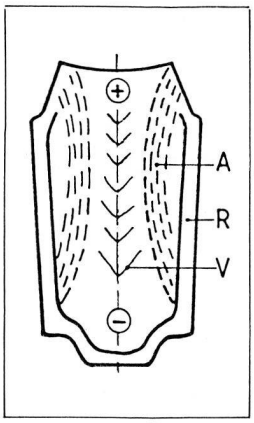


Bild 4: Seigerung im Rohblock.

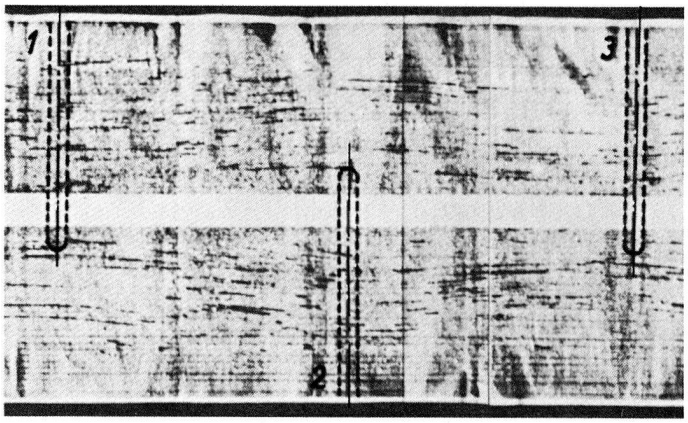
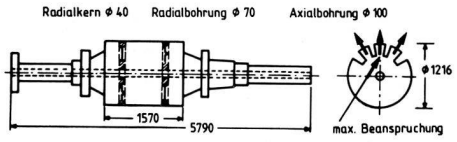


Bild 5: Seigerung des Rohblocks in der Welle und Lage der Radialkerne.



	$R_{p0,2}$ N/mm²	R_m N/mm²	A %	a_k[1]) J/cm²
Vorschrift:	*275–295*	*490–540*	*20–18*	*>29*
Kern ½:	*230/233*	*440/435*	*0/34*	*17/15*

Bruchflächen: *axial verlaufende Einschlüsse*
Ätzproben: *axial verlaufende Adern*

[1] *Die Kerbschlagzähigkeit wurde dabei auf einem Charpy-Hammer mit 5 m Pendellänge und Probenformen 30×30×160 mm, Kerbtiefe 15 mm, Radius 4 mm, durchgeführt.*

Bild 6: Radialkernprüfung 1913/1914

die hier nicht zur Diskussion stehen. Ausserdem war es eine «Ultima ratio», denn die Welle würde völlig zerstört, wenn dabei die Bruchfestigkeit überschritten würde. Dies trat 1911 auch ein. Daraufhin wurden Bohrkerne (axial und radial) zur Ermittlung der Eigenschaften im Inneren, der *Werkstück*eigenschaften, entnommen. Besonders gute Informationen gibt der Radialkern, weil er die Seigerungen schneidet und die Veränderung der Eigenschaften über den Wellenquerschnitt zeigt.

1913/14 wurden erstmals zwei derartige Radialkerne aus einer Turbowelle entnommen. Die Festigkeitsprüfung erfolgte mit Zug- und *Kerbschlagbiege-Proben am Ort und in Richtung höchster Betriebsbeanspruchung.*

Die Überprüfung der *Makrostruktur* durch Ätzen der Radial- und Axialkerne sowie durch Beurteilung der Probenbrüche zeigten den grossen *Einfluss der Seigerung* auf die Werkstückeigenschaft, insbesondere auf das Verformungsvermögen, wie Bild 6 offenbart.

Aus dem anschliessenden Schriftwechsel zwischen den Firmen Krupp und Siemens geht hervor, dass das Problem der Seigerung klar erkannt war, dass aber die Schmiedestück-Hersteller damals nicht in der Lage waren, eine Besserung zu garantieren. Sie lehnten deshalb *diese Werkstückprüfung als Grundlage der Abnahme ab.* Erfreulicherweise wurde diese Prüfung jedoch trotzdem zwecks Erfahrungssammlung fortgesetzt und beeinflusste die Entwicklung hochwertiger Schmiedestähle.

1924 wurden die Radialkerne auf 0,35×D gekürzt, um die Kerbwirkung infolge Überschneidung der Radial- mit der Axialbohrung zu vermeiden. Die Seigerungen wurden dadurch bei der Prüfung nicht mehr voll erfasst und somit die Werkstückprüfung stark eingeschränkt (Bild 7).

1944 wurden die Radialkerne auf 0,6×D verlängert und an der Axialbohrung tangential vorbei entnommen (Bild 8 und 9).

Die entscheidende Änderung war jedoch, dass der Kern nicht unterteilt, sondern in ganzer Länge zerrissen wird und so *automatisch an der schwächsten Stelle bricht.* Die ergänzenden Prüfungen ergeben die Qualität der Matrix, in die diese Schwachstelle eingebettet ist. *(Beispiele siehe später.)*

In der Erwartung, die Gebrauchseigenschaften zu verbessern, wurde 1914 eine Welle mit nur 760 mm ⌀, die üblicherweise in Ni-Stahl normalisiert ausgeführt wurde, versuchsweise aus NiCr-Stahl mit *Vergütung in Flüssigkeit* hergestellt:
C 0,44; Si 0,19; Mn 0,28; Ni 3,06; Cr 1,35%

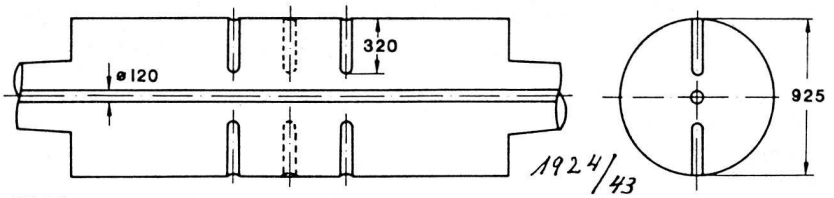


Bild 7.

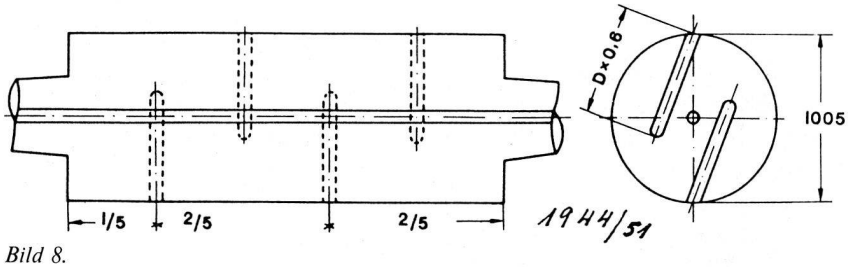


Bild 8.

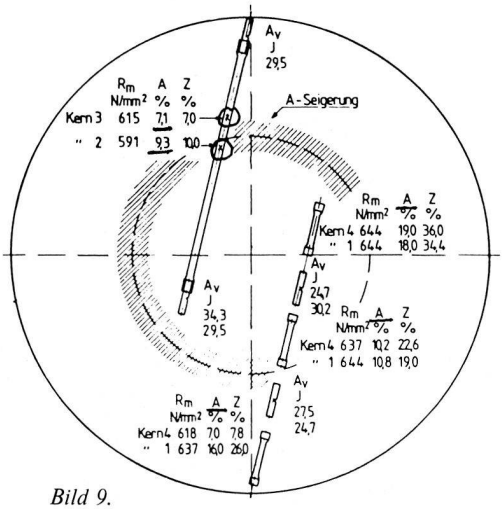


Bild 9.

dazu Krupp: «Die Verwendung der NiCr-Stähle hoher Zähigkeit kann geboten sein, wenn die *metallurgischen Schwierigkeiten* derart gross sind, dass die dadurch bedingte Einbusse durch den höheren Legierungsgrad *ausgeglichen werden* muss». Das heisst, nicht die Ursache wurde beseitigt, sondern nur die Fehlerverträglichkeit verbessert.

dazu Siemens-DW-Geschäftsbericht 1917/18: «Besonders beachtenswert ist die grosse Bedeutung der Vergütung in Öl. Die Kornverfeinerung, *die Zähigkeit,* und die Streckgrenze *gestatten, höhere Beanspruchungen anzuwenden.»*

dazu Skoda 1949: «Der Einfluss der Seigerung auf die Probenergebnisse kann durch das sekundäre Mikrogefüge gemildert werden.»

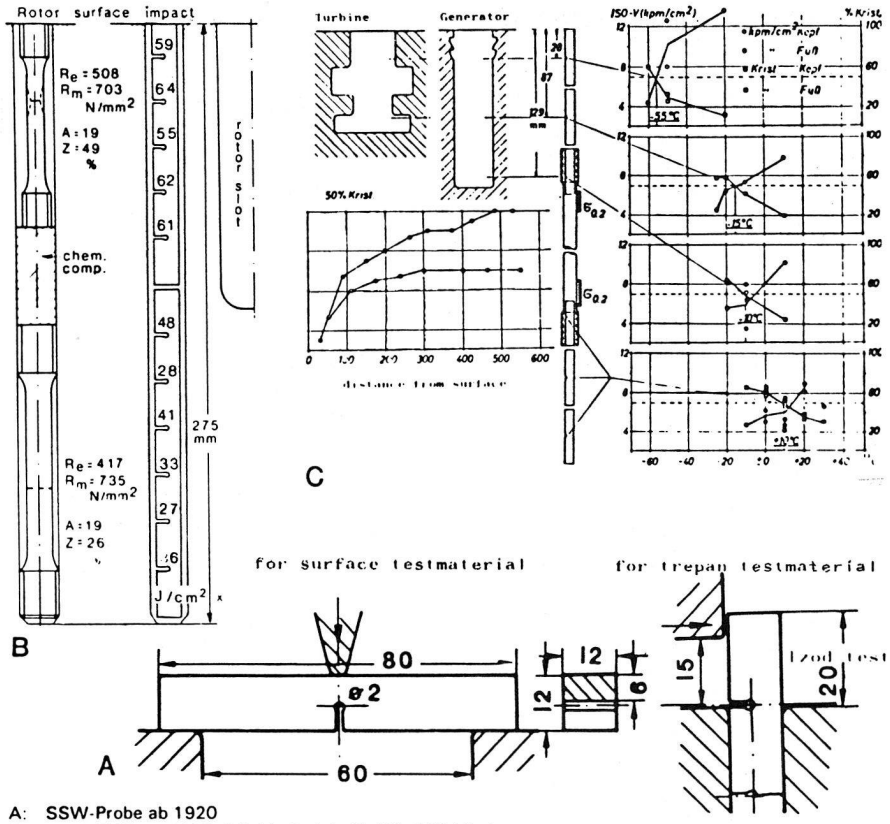
dazu Liefervorschrift 1921: «Durch das Vergüten in Flüssigkeiten nehmen die *oberflächennahen Schichten zu günstige, in der fertigen Welle gar nicht vorhandene Festigkeitseigenschaften an.»* Zur Kontrolle der Werkstück-Festigkeit, des -Verformungsvermögens und des -Gefüges genügte die bisherige Radialkernprüfung. Für die Werkstück-Zähigkeit wurde eine besondere Kerbschlagbiege-Probe entwickelt (Bild 10).

dazu Krupp ~ 1920: «Dynamische Überbeanspruchungen stellen die höchsten Anforderungen an das Formänderungsvermögen oder gar *die Brucharbeit der Stähle.* Für diese Belastungen bildet der *Schlagwiderstand von Kerbschlagproben* den besten Massstab.»

dazu Freigabe zur Überdrehzahlprobe 1925: «Im Rotorinneren sind *Flocken,* das Material ist *aber sehr kerbzäh.»*

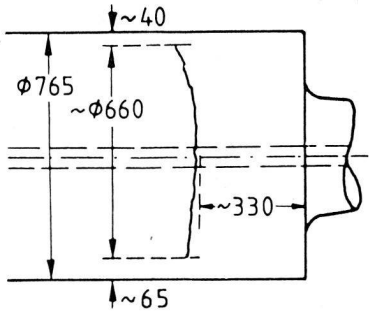
dazu Krupp 1925: «Die Fehlstellen sind nur insofern besorgniserregend, als sie im Laufe der Zeit zu einem Dauerbruch führen können. Es würde also nichts im Wege stehen, die Welle einige Monate in Betrieb zu nehmen und danach zu prüfen, *ob die Flocken sich etwa zu Rissen ausgebildet haben.»*

Fasst man diese Zitate von 1914–1925 zusammen, so war die Denkweise grundsätzlich nicht anders als heute. Allerdings war man bevorzugt auf Erfahrung und Fingerspitzengefühl bei der Bewertung eventueller Fehlstellen angewiesen, denn die heute



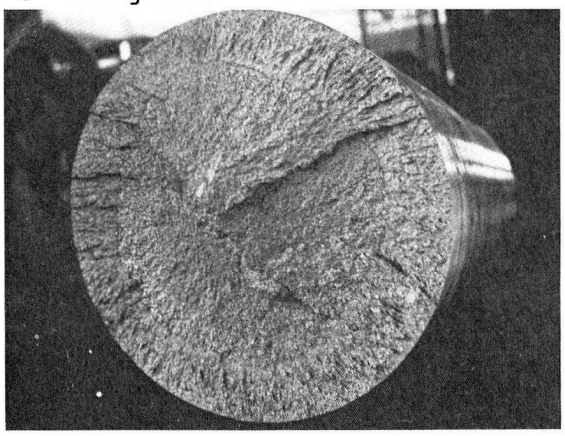
A: SSW-Probe ab 1920
B: Welle T 6111, 1928, C 0,31, Cr 1,1, Ni 3%, SSW-Probe
C: Abnahmeprüfung in den 60er Jahren FATT-Schätzung aus 4 Kernen, ISO-V-Probe

Bild 10: Kerbschlagzähigkeit über den Wellenquerschnitt.



1922			
C	Si	Mn	P
0,30	0,39	0,68	0,029
S	Cr	Ni	
0,038	0,47	1,7%	10 Mg

Kern: Korngrenzenbruch



Rand: duktiler Restbruch

Bild 11.

zur Verfügung stehenden Methoden zur Bewertung des dynamischen Wachstums von Fehlern und der kritischen Fehlergrösse standen ja nicht zur Verfügung. Sie hätten auch nicht angewendet werden können, da es nur sehr globale Informationen über die inneren Ungänzen gab, zum Beispiel aus den Ergebnissen der gerissenen Bohrkerne (Seigerungsgrösse, -häufigkeit, Seigerungsrisse, Flocken).

3. Zerstörungsfreie Volumenprüfung – Bewertung von Befunden

1920 traten bei der Fertigung von Wellen mit 925 mm ø aus ölvergüteten NiCr-Stählen durch zu schnelles Aufwärmen zum Schmieden beziehungsweise Vergüten mehrfach *«Herzsprünge»* (= Querbrüche) auf. Da diese nicht bis zur Oberfläche reichten, konnten sie auch mit den blind gebohrten Radialkernen nicht entdeckt werden (Bild 11).

dazu Siemens-DW-Mitteilung 1923: *«Die schönsten Festigkeitszahlen sind wertlos, wenn Ballenrisse vorhanden sind.* Die Prüfung auf Festigkeit allein würde daher nur eine einseitige, unzureichende sein.» Zum Auffinden solcher Querbrüche wurde nach dem Einfräsen der Wicklungsnuten als *«Gesundheitsprüfung»* eine Wasserdruckprobe (50 at., 10 Min.) von der Axialbohrung heraus eingeführt.

1947 wurde in den USA die Ultraschallprüfung *«for information only»* eingeführt.

1951 wurde in Deutschland erstmalig eine Welle mit Ultraschall geprüft. Nach weniger als einem Jahr wird diese Prüfung *verbindlich in die Abnahme einbezogen.* Die *Bewertung* einer US-Anzeige erfolgte jedoch damals erst *nach* der Entnahme und *Prüfung eines Radialkerns vom Anzeigenort* (Bild 12).

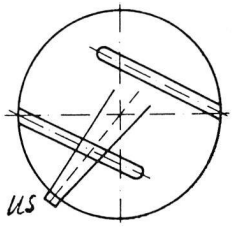


Bild 12: Ultraschallprüfung 1952–1979.

1956 stellten Rankin und Moriarty ihre «Acceptance Guides for Ultrasonic Inspection of Large Rotor Forgings» vor. *Der Sinn war offenbar,* aus der Zahl und dem Grössenverhältnis der Anzeigen *zu bestimmen, wieviel Radialkerne zu entnehmen waren.*

dazu Rankin u. Moriarty: «The ultrasonic inspection can reveal only the presence of a discontinuity, its magnitude, its location and its orientation, *it cannot reveal its nature* any more than radar alone can tell whether a plane is friendly or hostile. *Positive identification of the cause of a reflection can be obtained only by trepanning.»*

Die heute übliche Ultraschallprüfung kann Inhomogenitäten orten, wenn diese eine von der Matrix abweichende Schall-Leitfähigkeit und Dichte haben; sie kann natürlich auch deren Grösse und Richtung im Rahmen gewisser Toleranzen angeben.

In jedem Fall ist man aber bestrebt, Kerne zu entnehmen, die den Anzeigenort erfassen, *und* solche, die quer durch die A- und V-Seigerung reichen.

- An ersteren können die Anzeigenursache, die tatsächliche Fehlergrösse und die Matrixeigenschaften in ihrer unmittelbaren Umgebung ermittelt werden.
- Letztere werden in ganzer Länge – integral – zerrissen und ermitteln das Verhalten der Seigerung unter Beanspruchung.

Der heutige «weisse Baumann» bestätigt nur einen geringen S-Gehalt; die Seigerung: – Legierung, H_2-Gehalt, Einschlüsse, Versprödung – ist trotzdem nach wie vor vorhanden. Ihre Auswirkung ist jedoch erheblich vermindert (VCD, Reinheitsgrad).

4. Beispiele der Werkstückprüfung von Turbowellen

Die Welle 7557E (Si 0,03%) hatte einige wenige US-Anzeigen, deren Zahl und Ort genau bestimmt wurden (Bild 13). An einer repräsentativen Anzeige wurde ein Kern entnommen. Der Zerreissbruch trat am Ort der Anzeige mit Z = 5% ein. Die Bruchbildanalyse (REM, Mikro) ergab *örtliche Einschlüsse,* eingebettet in eine zähe Matrix. Mindestwert der übrigen Brüche Z ≧ 54%.

Aus den Wellen 8153 und 51393 (Si 0,20%) wurden je zwei Kerne an Orten ohne US-Anzeigen entnommen (Bild 14). Bei der Welle 8153 wichen bei den integralen Zugproben drei Brüche mit leicht verminderter Bruchverformung Z = 43/45/45% vom Mittelwert Z = 60% ab. Die Bruchanalyse ergab interkristalline *Versprödung der Seigerung.*

Bei der Welle 51393 (Bild 15) traten am Kern Kl drei Brüche mit Z = 29, 16 und 32% auf bei einem Mittelwert der übrigen Brüche von Z = 64%. Bei beiden Wellen muss damit gerechnet werden, dass die versprödeten Seigerungsbereiche *über das ganze Wellenvolumen* vorhanden sind und das Verformungsvermögen stark herabsetzen, aber nicht die Festigkeit. Dagegen führen die Einschlüsse, die von einer zähen Matrix umgeben sind, nur zu einer örtlichen Schwächung des Verformungsvermögens, so dass trotz des Ziffernunterschie-

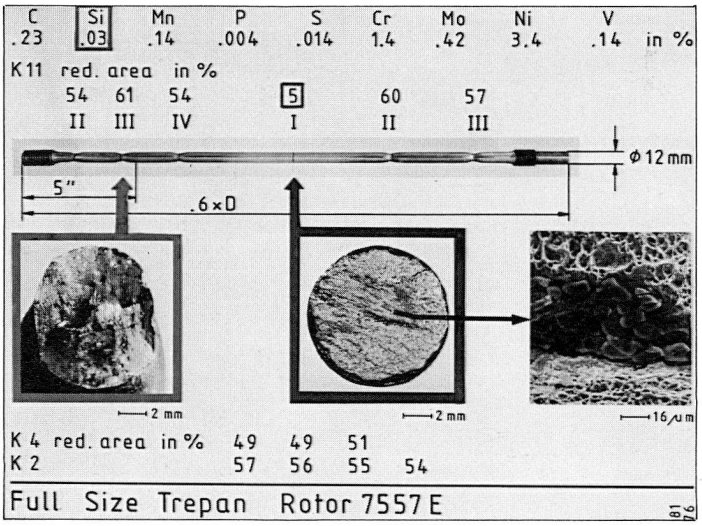


Bild 13.

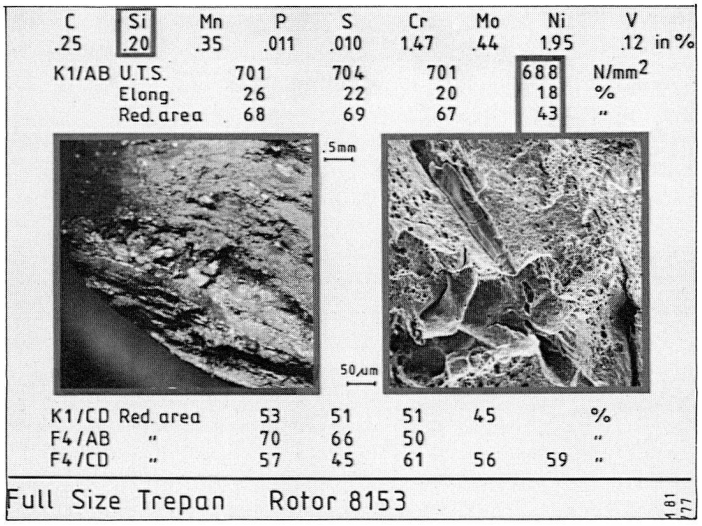


Bild 14.

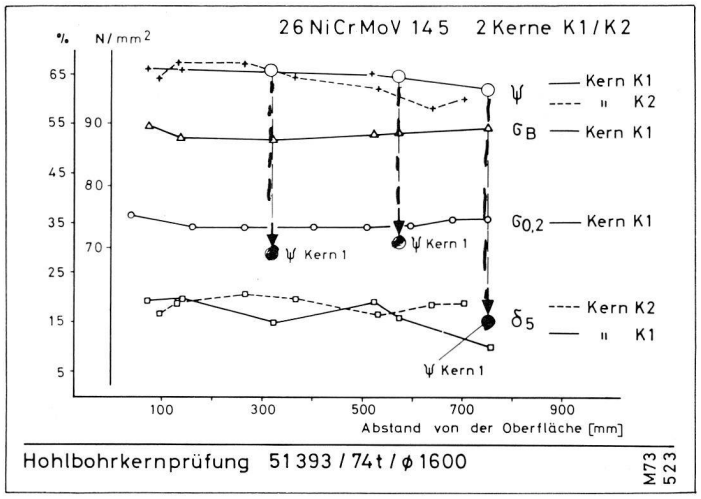


Bild 15.

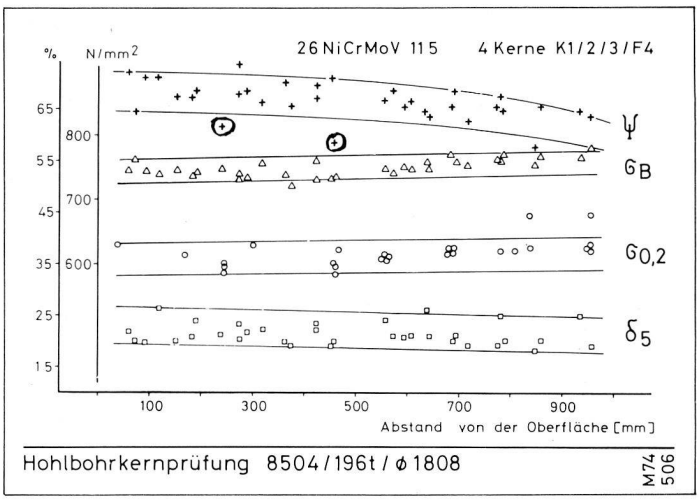


Bild 16.

des, 5 gegen 43%, die Homogenität der Welle 7557E höher zu bewerten ist als diejenige bei der Welle mit hohem Si-Gehalt.

Die Welle 8504 (Bild 16) ist eine von 21 Wellen (Si 0,01–0,07%) aus Rohblöcken von 400–500 Mg in moderner, metallurgisch verbesserter konventioneller Technik. An 46 Radialproben daraus wurden 420 Zugproben-Einschnürungen gemessen, alle waren grösser als 57%.

5. Schlussfolgerung

Prinzipiell sind die Probenahme und die Prüfung auch heute noch gleich. *Die entscheidende Änderung* besteht neben einigen zusätzlichen Prüfungen (Übergangstemperatur, Restspannung) in der Möglichkeit einer *quantitativen Bewertung* der Fehlstellen und der Prüfergebnisse mit Hilfe der Bruchmechanik.

Der Streit um die Belastungsproben eiserner Brücken

Prof. Dr. H. E. Lessing, Ulm

Ausgangs des letzten Jahrhunderts war man offenbar bereit, infolge der materiellen Festigkeit des Eisens[1] auch die strukturelle Festigkeit eines eisernen Bauwerks für garantiert zu nehmen. Ja, etwas davon hat sogar in die Umgangssprache Eingang gefunden: Als eiserner Wille gilt bekanntlich ein ganz und gar unzerstörbarer Wille.

In dem im Deutschen Reich erschienenen Centralblatt der Bauverwaltung findet sich 1892 eine Kontroverse über den Wert der Belastungsproben eiserner Brücken, die von der Schweizerischen Bauzeitung[2] referiert wurde. Die Belastungsprobe vor Übergabe der Brücke – heute geltende Regel in den Bauvorschriften aller Länder – war in jenen Tagen unter den Ingenieuren nicht unbedingt mehrheitsfähig. Die Auseinandersetzung wurde zunächst anonym geführt von einem Herrn Z. (es könnte sich um Ing. Conrad Zschokke oder um Oberingenieur Züblin gehandelt haben) mit der Aussage, dass die Belastungsproben von sehr zweifelhaftem Wert seien, weil bei günstigem Ausfall die Tragfähigkeit der Brücke noch keinesfalls bewiesen sei. Zumal Belastungsproben in zeitlichem Abstand seien sinnlos, da zunehmende Durchbiegung nur durch Änderung des Elastizitätsmoduls von Eisen zu erklären seien. Bei jahrzehntelanger Anwendung der Proben sei kein Fall bekannt geworden, wo die Probe zur Auffindung von Mängeln geführt habe, die nicht auch durch statische Berechnung oder genaue Besichtigung zu finden gewesen sei.

Dass die Diskussion von der Schweizerischen Bauzeitung aufgegriffen wurde, war ebenso wie der Zeitpunkt 1892 kein Zufall. Im Vorjahr, keine zwei Jahre nach der grössten Brükkenkatastrophe aller Zeiten im schottischen Firth of Tay (200 Menschenleben), erlebte die Schweiz die Münchensteiner Einsturzkatastrophe auf der Jura–Simplon-Eisenbahnlinie nahe Basel. Die gerade Fachwerkbrücke über der Birs mit 42 Meter Spannweite war 1874 von der Werkstätte Gustave Eiffels offenbar schludrig ausgeführt und ein Hochwasserschaden 1881 nur oberflächlich repariert worden. Auch als 1890 von einer Schweizer Firma die Brücke für höheres Verkehrsaufkommen verstärkt wurde, hielt man Belastungsproben für unnötig, und so unterblieben sie. Was der Erbauer des Eiffelturms angerührt hatte, war offenbar über kleinliche Nachprüfung so oder so erhaben. 1891