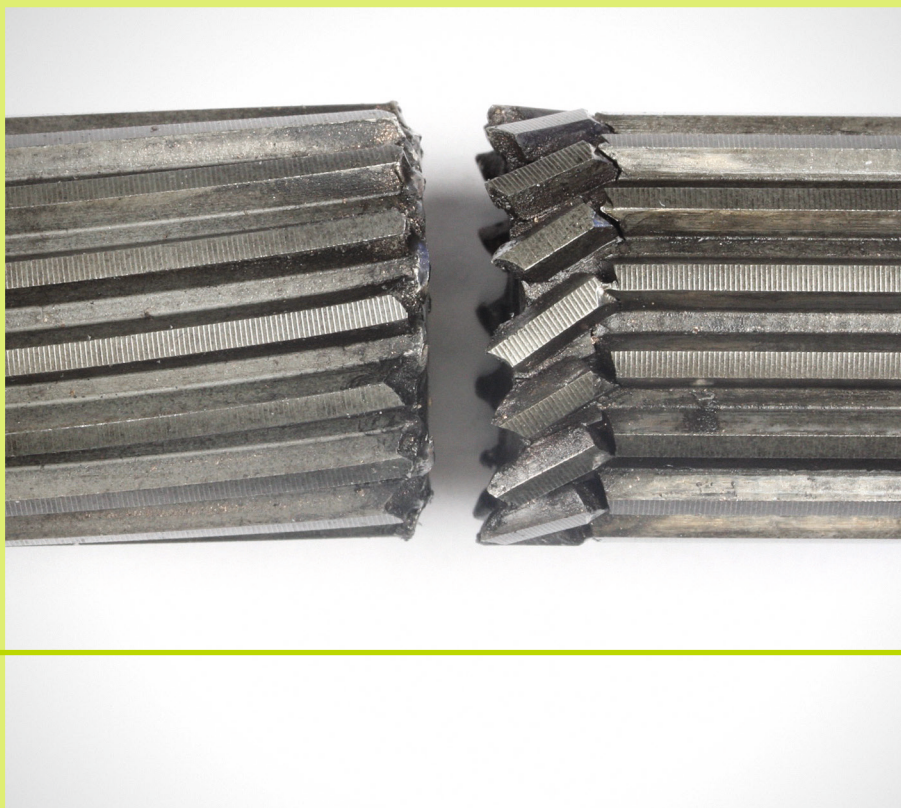


Andreas Neidel

Schadensfallanalysen metallischer Bauteile II

Eine Sammlung von 34 realen Beispielen aus der Praxis



HANSER

Neidel

Failure Analyses of Metal Components 2
Schadensfallanalysen metallischer Bauteile 2

Andreas Neidel

Failure Analyses of Metal Components 2

Schadensfallanalysen metallischer Bauteile 2

A collection of 34 case studies

Eine Sammlung von 34 realen

Beispielen aus der Praxis

HANSER

Der Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Neidel, Leiter Werkslaboratorien Gasturbinenwerk Berlin/Laboratory Manager Gas Turbine Plant Berlin, Honorarprofessor an der TU Berlin

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-47031-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-47053-8

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Verfahren und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Verfahren oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag, München 2021

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, Windach

Satz: Eberl & Kösel Studio GmbH, Krugzell

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © Andreas Neidel

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co. GmbH und Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

To my wife and my colleagues in the Materials
Testing Laboratory at the Gas Turbine Plant Berlin

Meiner Frau Christiane und meinen Kollegen im
Werkstoffprüflabor des Gasturbinenwerkes Berlin
gewidmet

Foreword

Vorwort

This book is a collection of case studies in failure analysis that were published, in the course of three and a half years, in the journal “Praktische Metallographie” that is also published by Hanser Verlag. In the 48th year of its existence, *Practical Metallography* received a facelift. The first issue with modernized layout was published in September 2011, just in time for the Metallography Conference in Karlsruhe. One of the new features was the inauguration of a separate “Failure Analysis” section. The publication of papers on this subject was by no means new to PM. In the 50 years since its foundation, several hundred articles on failure analysis were published. Between 1973 and 1997, very few issues appeared without a case study on the subject. The reasons for this are obvious. Fractographic and other investigations related to failure analysis are, essentially, performed using equipment that is available in materialographic laboratories. Fracture surfaces, if there are any, usually contain the most important data on the failure case. It therefore does not come as a surprise that papers on failure analysis were always an integral part of PM and continue to receive much attention. The latter fact manifests itself in the Top Ten Downloads listing in each issue of PM. What is more, the failure analysis sessions at the Metallography Conferences draw large audiences every year. That said, it should be emphasized that what is new about the “Failure Analysis” section is not innovation in the field, but the commitment that no issue except for the special ones shall be published without a case study on a failure. In the new section’s initial phase, when there were not yet enough regular authors available, this was ensured by reprinting suitable chapters from the textbook *Handbuch Metallschäden*, from the same publisher as PM. These are less complex

Das vorliegende Buch enthält eine Sammlung von Schadensfällen, die im Verlauf von dreieinhalb Jahren im monatlich erscheinenden und aus demselben Verlag stammenden Fachjournal „Praktische Metallographie“ abgedruckt wurden. Im 48. Jahr ihres Bestehens erhielt die *Praktische Metallographie* ein Facelift. Das erste Heft mit modernisiertem Layout erschien im September 2011, pünktlich zur Metallographietagung in Karlsruhe. Eine der Neuerungen war die Einführung einer separaten Rubrik „Failure Analysis“. Die Veröffentlichung von Aufsätzen zur Schadensanalyse war für die PM nicht neu. In den 50 Jahren ihrer Existenz sind mehrere hundert Beiträge zum Thema erschienen. Zwischen 1973 und 1997 gab es nur wenige Ausgaben ohne eine Schadensfallstudie. Die fachlichen Gründe dafür liegen auf der Hand. Fraktographische und Schadensfalluntersuchungen erfolgen im Wesentlichen mit den Mitteln des materialographischen Laboratoriums. Die Bruchflächen, so vorhanden, sind in den meisten Fällen der wichtigste Datenträger des Schadensfalles. Es ist deshalb wenig überraschend, dass Aufsätze über Schadensfallanalysen schon immer ihren festen Platz in der PM hatten und jederzeit auf reges Interesse stießen. Dies ist u. a. an der Resonanz bei den Top Ten Downloads abzulesen und äußert sich nicht zuletzt im großen Zulauf, den die Schadensanalyse-Sitzungen jedes Jahr auf den Metallographietagungen haben. Das eigentlich Neue an der Rubrik „Failure Analysis“ ist also nicht die fachliche Innovation, sondern die Garantie, dass keine Ausgabe außer den Themenheften ohne eine Schadensfall-Studie erscheinen wird. In der Anlaufzeit der neuen Rubrik, solange noch keine ausreichende Anzahl von Beiträgen zur Verfügung stand, wurde dies durch den Nachdruck geeigneter Fallstudien aus dem im gleichen Verlag

failure cases, aimed primarily at newcomers in the field.

All of us members of the materialographer community are proud of the high regard the field of materialography in Germany is held in worldwide. Likewise, the field of failure analysis in Germany is highly regarded in the scientific community all over the world. It is an integral part of German engineering and is proud of a tradition almost as long-lasting as that of metallography. By the way, engineering failure analysis is, as the name suggests, a field of engineering and not of the insurance companies. In 1975, the founding fathers of systematic engineering failure analysis in Germany began to network, held workshops, organized conferences, exchanged knowledge and thus established and developed this field of engineering. What is more, guidelines for failure analysts were published. Everybody in the failure analysis community knows *VDI-RL 3822*. This guide provides order and systematic knowledge for the wide field of engineering failure analysis. Like all VDI guidelines, it is updated every five years. Because of that, not only is it current but grew with the field of engineering failure analysis. Only recent new failure mechanisms and materials were added to this important document. Consequently, the case studies are categorized according to VDI-Richtlinie 3822 "Schadensanalyse", which is an important basis for failure analysis in the German-speaking community.

The focus of discussion of the failure cases in this book is the metallurgical evaluation of failure causes. This is the approach taken in many small and industrial laboratories. A holistic approach of a failure case, which includes calculation and simulation methods such as finite element analysis, and which also implies a knowledge of the service stresses in-

erschienenen „*Handbuch Metallschäden*“ sichergestellt. Es handelt sich um einfachere Schadensfälle geringer Komplexität, die sich vor allem auch an unerfahrenere, sich noch einarbeitende Fachkolleg(inn)en richten.

Wir alle, die wir dieser Fachgemeinde angehören, sind stolz darauf, dass die Materialographie in Deutschland weltweit hohes Ansehen genießt. Ebenso hohes Ansehen genießend und in fast ebenso langer Tradition stehend ist die Schadensanalyse ein integraler Bestandteil der deutschen Ingenieurwissenschaften und nicht etwa bei den Versicherungen angesiedelt, wie mancher annehmen mag. Auch die Querschnittsdisziplin der Schadensanalyse genießt weltweit hohe Anerkennung und dies vor allem auch deshalb, weil sich die Väter der systematischen Schadensanalyse 1975 in Arbeitskreisen zusammengefunden haben, um das Gebiet zu etablieren und weiterzuentwickeln. Tagungen wurden organisiert, Wissen ausgetauscht und Richtlinien herausgegeben. Alle mit dem Gebiet Vertrauten kennen die *VDI-RL 3822*, die Ordnung und Systematik in das so vielfältige Gebiet der systematischen Beurteilung technischer Schadensfälle gebracht hat. Die Richtlinie wird, wie alle VDI-RL, alle 5 Jahre überarbeitet und ist so hochaktuell geblieben und mit dem Wissensgebiet gewachsen. Erst vor kurzem sind eine Reihe neuer Werkstoffe und Schadensmechanismen hinzugetreten. Um der Sammlung von Beispielen eine nachvollziehbare Ordnung zu verleihen, wurden deshalb die Kapitel nach werkstofftechnischen Schadensursachen in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3822 „Schadensanalyse“ gegliedert, die eine wichtige Grundlage der Schadensanalytik im deutschen Sprachraum ist. Das Kapitel „Fallstudien“ wird man deshalb mit besonderem Gewinn in Verbindung mit jener VDI-Richtlinie lesen.

Im Zentrum der Diskussion der in diesem Buch besprochenen Schadensfälle steht die metallkundliche Bewertung der Schadensursachen, so wie sie in vielen kleineren industriellen Laboratorien routinemäßig im Tagesgeschäft durchgeführt wird. Die ganzheitliche Betrachtung eines Schadensfalles, die u. a. die Anwendung von Berechnungsverfahren

tended by design as well as the actual loading situation of the failed part, is not the aim of this book, even though only the latter elements bring failure analysts near to their ultimate target, which is the determination of primary causes of a failure, called root cause failure analysis. The reader is referred to the literature to learn about holistic approaches to failure analysis, about case studies in other areas of mechanical engineering, and about materials and failure causes that are not covered in this book.

Mistranslation is not completely avoidable in a book like this. The translated column is marked by the heading “Translation”. In case of doubt, the original text is applicable. This is the column opposite the translated one.

You may read this book as a sequel to “Schadensfallanalysen metallischer Bauteile” (Failure Analyses of Metal Components), published in 2015, also by Hanser Verlag. The focus of that book, too, were case studies in failure analysis. The novel approach of this new book is its bilingual presentation. This will facilitate studies in this field for newcomers. This is all the more important, because today it is mandatory in almost all fields of industry, all the more so in education and research, to master English vocabulary, without which it is impossible to read international scientific journals. What is more, English is the lingua franca today in many international businesses. In this second book on the subject, Failure Analyses of Metal Components², 34 new failure cases are discussed. Outline and overall idea of the book remained unchanged. The contents, however, are completely new. Insofar, this new book is the logically consistent continuation of the first one, i.e. a sequel. It is the express wish of the editor and all co-authors, that these new failure cases may become a wealth of valuable information for

(z.B. Methode der finiten Elemente) und die genaue Kenntnis der konstruktiv vorgesehenen sowie der tatsächlich vorhandenen Beanspruchungen des zu Schaden gekommenen Bauteils mit einschließt und sich erst dadurch dem eigentlichen Ziel jeder Schadensanalytik, nämlich der Ermittlung der primären Schadensursache (Root Cause Analyse) nähern kann, ist ausdrücklich nicht das Ziel der vorliegenden Sammlung von Fallstudien, obwohl in Einzelfällen auch auf diese Aspekte eingegangen wird. Für ein weiterführendes Studium aller Fragen zur ganzheitlichen Herangehensweise an Schadensfallanalysen, zu Schadensfällen in anderen Branchen des Maschinenbaus als den hier besprochenen und zu Schadensfällen mit anderen Werkstoffen und Ursachen als den hier diskutierten sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Übersetzungsfehler sind in einem Werk wie diesem nicht ganz zu vermeiden. Die übersetzte Kolumne ist jeweils gekennzeichnet durch die Überschrift „Translation“. Im Zweifelsfall gilt der Wortlaut des Originaltextes, der in der jeweils gegenüberliegenden Spalte steht.

Das vorliegende Buch kann als Fortsetzung des 2015 im gleichen Verlag erschienenen „Schadensfallanalysen metallischer Bauteile“ verstanden werden. Auch im Zentrum jenes Buches standen die Schadensfallstudien. Das Neue beider Bücher ist ihre Zweisprachigkeit, die insbesondere neuen Kolleg(inn)en im Fachgebiet die Einarbeitung erleichtern wird, da es heute in fast allen Industriebereichen, erst Recht in Forschung und Lehre, zwingend erforderlich ist, sich auch das englische Fachvokabular anzueignen, ohne das die Auswertung der internationalen Fachliteratur nicht möglich ist. Zudem ist in international tätigen Firmen der interne Schriftverkehr heute ausschließlich in Englisch vorgesehen. In den vorliegenden „Schadensfallanalysen metallischer Bauteile 2“ wurden 34 neue Schadensfälle aufgenommen. Die Struktur und die Idee des Buches sind die gleichen, aber der Inhalt ist ein ganz anderer. Insofern ist diese Neuerscheinung eine konsequente Fortsetzung des ersten Buches von 2015. So mögen auch die neuen Anwendungsfälle für den Leser genau die gleiche Fülle an wert-

the failure analyst, just in the same way the first edition provided this service. May this volume be a faithful companion and a frequently used reference book.

Berlin, July 2021

Andreas Neidel

vollen Informationen bereithalten, wie in der Vorauf-
lage. Dann wird auch dieser Band ein treuer Begleiter
und ein gerne genutztes Nachschlagewerk sein.

Berlin, im Juli 2021

Andreas Neidel

Table of Contents

Inhaltsverzeichnis

Foreword <i>Vorwort</i>	VII
About the Editor <i>Über den Herausgeber</i>	XV
List of Co-authors <i>Autorenverzeichnis</i>	XVII

TEIL 0

Introduction <i>Einleitung</i>	1
-----------------------------------------------	---

The Metallographer's Role in Damage Analysis <i>Die Rolle der Metallographen in der Schadensuntersuchung</i>	3
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

TEIL I

Mechanical Failures <i>Schäden durch mechanische Beanspruchungen</i>	15
-------------------------------------------------------------------------------------	----

1 Condition Monitoring of a Power Tower Using Metallurgical Investigations of Structural Members <i>Zustandsbewertung eines Stahlgittermastes anhand werkstofftechnischer Untersuchungen von Zugstäben</i>	19
2 Metallurgical Failure Investigation of a Deformed and Cracked Lashing-Load Ring of a Heavy-Duty Gas Turbine Engine <i>Werkstofftechnische Schadensklärung einer verformten und gerissenen Anhängöse einer Großgasturbine</i>	31
3 Metallurgical Failure Investigation of HCF Cracking in a Premix Fuel Oil Manifold of a Heavy-duty Combined Cycle Gas Turbine Engine <i>Werkstofftechnische Schadensuntersuchung eines hochzyklischen Schwingbruchs beim Ölverteiler einer Großgasturbine</i>	39
4 Metallurgical Failure Investigation of Cracking of a Vent Nozzle on a Pressure Pulsation Dampener of a Natural Gas Compressor <i>Werkstofftechnische Schadensuntersuchung des Risses am Entlüftungsstutzen eines Druckpulsationsdämpfers für einen Erdgasverdichter</i>	51
5 Fracture of a Leaf Chain for Lifting Clamps <i>Bruch der Flyerkette eines Allzweckgreifers</i>	67

6	Metallurgical Failure Investigation of a Pipe Connector Fracture of an Expansion Vessel <i>Werkstofftechnische Schadensuntersuchung des Abrisses einer Rohrverschraubung eines Ausgleichsbehälters</i>	73
7	LCF Failure of a Threaded Bolt <i>Niederzyklischer Ermüdungsbruch eines Gewindebolzens</i>	79
8	Fracture of an Industrial Steam Turbine Horizontal Joint Nut Upon Tightening <i>Bruch der Mutter einer Horizontalteilfugenverschraubung einer Industriedampfturbine beim Anziehen</i>	87
9	High Cycle Fatigue Failure of Burner Feeder Line in a Heavy-duty Gas Turbine Engine <i>Hochzyklischer Schwingbruch der Brennerzuführung einer Industriegasturbine</i>	95
10	Metallurgical Investigation of Cold-formed Fillet Pieces Made of Metastable Austenitic Stainless Steel, for the Turbine Exhaust Casing of a Heavy-Duty Gas Turbine Engine <i>Werkstofftechnische Untersuchung kaltumgeformter Übergangsformstücke aus einem metastabilen rostfreien austenitischen Stahl zum Einsatz in der Gehäuseauskleidung der Abgasstrecke einer Großgasturbine</i>	107
11	Failure of a Swivel Arm in a Turning Gear Assembly <i>Schaden des Schwenkarms einer Drehvorrichtung</i>	119
12	Component Loss due to the Fracture of an Indexable Insert <i>Bauteilverlust durch Wendeschneidplattenbruch</i>	131
13	LCF Fracture in Helical Tension Springs of Medium Voltage Switches <i>Niederzyklische Schwingbrüche in Spiralzugfedern von Mittelspannungsschaltern</i>	137
14	Low-cycle Fatigue Fracture of Stranded Ropes in Pantographs for Electrically Driven Trucks <i>Niederzyklische Schwingbrüche in Drahtseilen für Pantographen elektrisch angetriebener LKW</i>	143

TEIL II

	Corrosion Failures Schäden durch Korrosion in Elektrolyten . .	157
1	Intergranular Corrosion in Unserved Austenitic Stainless Steel Pipes Made of Alloy 904L <i>Kornzerfall in nicht betriebsbeanspruchten rostfreien austenitischen Rohren aus Alloy 904L</i>	159
2	Austenitic Stainless Steel Bolt Failure by Stress Corrosion Cracking <i>Versagen einer Schraube aus rostfreiem austenitischen Stahl durch Spannungsrisskorrosion</i>	169
3	Metallurgical Failure Analysis of the Fractured Ring of a Gland Seal: Hydrogen Embrittlement? Factography can be Ambiguous <i>Werkstofftechnische Schadensanalyse des gebrochenen Ringes einer Stopfbuchse: Wasserstoffversprödung? Mehrdeutige Fraktographie</i>	181

4	Metallurgical Failure Investigation of SCC in Leaking Piping System in a Combined Cycle Gas Turbine Power Plant <i>Werkstofftechnische Schadensuntersuchung der SpRK-bedingten Leckage eines Rohrleitungssystems in einem GuD-Gasturbinenkraftwerk</i>	199
---	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

TEIL III

	Failures due to Tribological Loading Schäden durch tribologische Beanspruchung	207
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

1	Fretting Fatigue Cracking of an Arresting Feature in a Turbine Disk of a Heavy-Duty Gas Turbine Engine <i>Riss durch Reiboxidation in einer Fixiernut der Turbinenradscheibe einer Großgasturbine</i>	209
2	Fretting Fatigue Cracking of a Center Guide Bolt Supporting the Combustion Chamber in a Heavy-duty Gas Turbine Engine <i>Durch Reiboxidation induzierter Schwingbruch des Führungsbolzens der Brennkammer einer Großgasturbine</i>	219
3	Erosion Damage to Impeller of Welding Fume Extraction System <i>Erosionsschaden des Lüferrades einer Schweißrauchabsaugung</i>	237
4	Erosion Damage to Last-Stage Compressor Disk of a Heavy-duty Gas Turbine Engine <i>Erosionsschaden der Verdichterradscheibe einer Großgasturbine</i>	245

TEIL IV

	Failures due to Thermal Overload Schäden durch thermische Beanspruchung	253
--	--------------------------------------------------------------------------------------------	-----

1	Metallurgical Failure Investigation of Overheated Brackets Made of Nimonic Alloy 90 <i>Metallurgische Schadensuntersuchung an überhitzten Befestigungselementen aus der Legierung Nimonic 90</i>	255
2	Burn-through of a Novel Coal Gasification Burner <i>Überhitzungsschaden eines neuartigen Kohlevergasungsbrenners</i>	269
3	Ageing Tests of Alloy 617 to Simulate Service Embrittlement <i>Auslagerungsversuche an Alloy 617 zur Simulation der Werkstoffversprödung im Betrieb</i>	281
4	Metallurgical Failure Analysis of Cracked First Stage Vane of Heavy-Duty Industrial Gas Turbine Engine for Power Generation <i>Werkstofftechnische Schadensuntersuchung einer gerissenen Turbinenleitschaufel Stufe 1 einer Kraftwerksgasturbine</i>	297
5	Solidification Cracking in Manually TIG-Brazed T/C Installations of Novel AM Gas Turbine Burner Component <i>Erstarrungsrisse in WIG-Hand-hartgelöteten Thermoelementbefestigungen eines neuartigen additiv gefertigten Gasturbinenbrennerteils</i>	307

6	Failure of Impingement Cooling Plates in Gas Turbine Vanes <i>Schäden an Prallkühlblechen von Gasturbinenleitschaufeln</i>	315
7	Beware of Hot Tearing in Lifting Lugs – a Case Study in Mechanical Engineering <i>Bei Warmrissen in Anhebepollern besser den Kopf einziehen – eine Fallstudie aus dem Großmaschinenbau</i>	327

TEIL V

Embrittlement | *Wasserstoffversprödung* 335

1	Hydrogen Induced Stress Corrosion Cracking of Fuel Oil Premix Burner Nozzles in a Heavy-duty Gas Turbine Engine <i>Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion in Heizölvormischbrennerdüsen einer Großgasturbine</i>	337
2	Failure of Large High-strength Fasteners by Hydrogen Embrittlement <i>Versagen großer hochfester Verbindungselemente infolge Wasserstoffversprödung</i>	351

TEIL VI

Miscellaneous | *Verschiedenes* 361

1	The Failure Analysts' Mightiest Tool – Thrilling Fractography of Metallic Components <i>Über des Schadenskundlers schärfstes Werkzeug – spannende Fraktographie metallischer Bauteile</i>	363
2	Computed Tomography Meets Failure Analysis – XCT, the Failure Analyst's Darling <i>Computertomographie trifft auf Schadensanalyse – XCT, des Schadenskundlers Liebling</i>	375
3	Best of Failure Analysis of Turbomachinery Components – Highlights From Two Decades' of Laboratory Practice <i>Best of Schadensanalyse an Turbomaschinen – die Highlights aus 20 Jahren Laborpraxis</i>	387
	Index <i>Sachregister</i>	405

About the Editor

Über den Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Andreas Neidel was born in 1961 and studied mechanical engineering at IH Berlin. He got his doctorate there in 1991 with a thesis on high speed heat treatment of low alloy steel. In 1992 he joined Siemens' Energy Sector. Having worked ever since in quality management functions, he has been manager of the metallography laboratory and later the entire materials testing laboratory. Since May of 2007 he heads the laboratories on the premises of the Berlin Gas Turbine Plant. From October 2015 on he has worked as a Senior Key Expert on Failure Analysis of Siemens Power and Gas Division. In 2012 he was appointed member of the expert workgroup on failure analysis of the society of materials engineering of the German society of engineers (Expertenkreis Schadensanalyse der Gesellschaft Materials Engineering des Vereins Deutscher Ingenieure). In July 2015 Dr. Neidel was appointed Honorary Professor for Metallic Materials of the Berlin Institute of Technology (Technische Universität Berlin). In 2018 Prof. Neidel was awarded the prestigious Roland-Mitsche-Preis of the German Materials Society (DGM) and the Austrian Society for Metallurgy and Materials. In the same year, he was appointed head of the workgroup on materialography of DGM.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Neidel, Jahrgang 1961, studierte Maschinenbau an der damaligen IH Berlin. Dort wurde er 1991 mit einer Arbeit über die Hochgeschwindigkeitswärmebehandlung niedriglegierter Vergütungsstähle im Fach Werkstofftechnik promoviert. 1992 trat er der Siemens AG bei. Seitdem bekleidet er dort verschiedene Funktionen im Qualitätsmanagement. Nachdem er zunächst das Metallographielabor und später das gesamte Werkstoffprüflabor leitete, ist er seit Mai 2007 Laborleiter der Werkstofflabore am Standort Berlin Huttenstraße. Seit Oktober 2015 ist er Fachexperte für Schadensanalyse. 2012 wurde er in den Expertenkreis Schadensanalyse der VDI-Gesellschaft Materials Engineering berufen. Im Juli 2015 wurde Dr. Neidel zum Honorarprofessor für das Fachgebiet metallische Werkstoffe der TU Berlin bestellt. Im Jahre 2018 wurde ihm der renommierte Roland-Mitsche-Preis der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM) und der Austrian Society for Metallurgy and Materials verliehen. Im selben Jahr wurde er zum Leiter des Fachausschusses Materialographie der DGM ernannt.

List of Co-authors

Autorenverzeichnis

List of Co-authors with the Siemens Berlin materials testing laboratory in alphabetical order | *Liste der Koautoren aus dem Berliner Siemens-Werkstoffprüflabor in alphabetischer Reihenfolge*

Cagliyan, Erhan, Berlin
Fischer, Boromir, Berlin
Gädicke, Tobias, Berlin
Giller, Madeleine, Berlin

Riesenbeck, Susanne, Berlin
Ullrich, Thomas, Berlin
Wallich, Sebastian, Berlin

With full paper contributions by | *Autoren anderer in diesem Buch enthaltener Aufsätze*

Weilhammer, Gabriele, München

TEIL 0

Introduction

Einleitung

The Metallographer's Role in Damage Analysis

Die Rolle der Metallographen in der Schadensuntersuchung

G. Weilhhammer

Translation: E. Engert

Abstract

The metallographer's role is of extraordinary importance when clarifying cases of damage. This statement is documented by means of an example of corrosion damage on a brewery pipe.

Several different methods have been applied in order to provide for a final result, such as emission spectroscopy analysis, examination of damage areas under the scanning electron microscope including an examination of coatings by means of EDX analysis and examination of the metallographic section.

The comprehensive formation of a metallographer allows for a responsible examination and a summary of results that provides for an overall picture to clarify beyond doubt the cause of the damage.

1. Preliminary Remark

In times in which production processes have to be more and more low-priced in order to withstand a constant competitive pressure, more cases of damage occur. These events of damage are caused by low quality materials, improper processing or insufficient formation of the "qualified personnel".

Kurzfassung

Bei der Klärung von Schadensfällen ist die Rolle der Metallographen außerordentlich wichtig. Dies wird dokumentiert am Beispiel eines Korrosionsschadens an einer Rohrleitung einer Brauereianlage.

Hier wurden verschiedene Methoden wie Emissionsspektralanalyse, Untersuchung der Schadensbereiche am Rasterelektronenmikroskop mit Überprüfung der Beläge mittels EDX-Analyse und Schliiffuntersuchung angewandt, um zu einem abschließenden Ergebnis zu kommen.

Die umfassende Ausbildung der Metallographen erlaubt es, eine solche Untersuchung verantwortlich durchzuführen und die Ergebnisse zu einem Gesamtbild zusammenzufassen, um die Schadensursache zweifelsfrei zu klären.

1. Vorbemerkung

Gerade heute, da immer preisgünstiger gefertigt werden muss, um dem ständigen Konkurrenzdruck standzuhalten, ereignen sich immer mehr Schadensfälle durch minderwertiges Material, unsachgemäße Verarbeitung oder unzureichende Ausbildung des „Fachpersonals“.

That is why it is of particular importance to employ qualified and well formed personnel for damage analysis in order to quickly achieve comprising and realistic results and thus avoid/prevent further events of damage.

A metallographer's formation does not just comprise the examination of metallographic sections of various materials. It also comprises all other examination methods such as spectral analyses, analyses by means of scanning electron microscopes, hardness tests and all types of non-destructive and destructive material testing.

In addition to that, most of the experienced metallographers are able to assess larger contexts of damage causes and to determine the necessary extent of examinations.

The following event of damage is an example for a comprehensive examination aiming at identifying the cause of the damage and at preventing further damage.

2. Case of Damage: Corrosion Damage on a Brewery Pipe

The present damage caused leakages on a brewery pipe. After visual inspection, the leakage can be attributed to ramified cracks in transverse direction.

The medium in the pipe was beer and a cleaning agent consisting of a 2–2.5% caustic soda NaOH at temperatures of up to 85 °C and 1–1.5% phosphoric acid at temperatures up to 30 °C.

Deshalb ist es besonders wichtig, im Rahmen der Schadensuntersuchung qualifiziertes und gut ausgebildetes Personal einzusetzen, um möglichst schnell zu einem umfassenden und realitätsnahen Ergebnis zu gelangen und damit weitere Schadensfälle zu vermeiden bzw. solchen vorzubeugen.

In der Ausbildung der Metallographen ist nicht nur die Untersuchung von metallographischen Schlifften an allen denkbaren Werkstoffen enthalten, sondern auch alle weiteren Untersuchungsmethoden wie Spektralanalysen, Rasterelektronenmikroskopuntersuchungen, Härteprüfungen und alle Arten von zerstörungsfreien und zerstörenden Werkstoffprüfungen.

Darüber hinaus sind die meisten erfahrenen Metallographen in der Lage, übergreifende Zusammenhänge im Hinblick auf die Schadensentstehung zu beurteilen und den erforderlichen Prüfumfang festzulegen.

Der folgende Schadensfall ist ein Beispiel für eine umfassende Untersuchung zur Klärung der Schadensursache und zur Vermeidung weiterer Schäden.

2. Schadensfall: Korrosionsschaden an Rohrleitung aus Brauereianlage

Bei dem vorliegenden Schaden waren an einer Rohrleitung im Bereich einer Brauereianlage Undichtigkeiten aufgetreten. Nach dem äußeren Augenschein sind die Undichtigkeiten zurückzuführen auf quer verlaufende, verästelte Risse.

Das Medium in der Rohrleitung war Bier bzw. Reinigungsmittel, bestehend aus Natronlauge NaOH 2–2,5%ig bei bis zu 85 °C und Phosphorsäure 1–1,5%ig bei bis zu 30 °C.

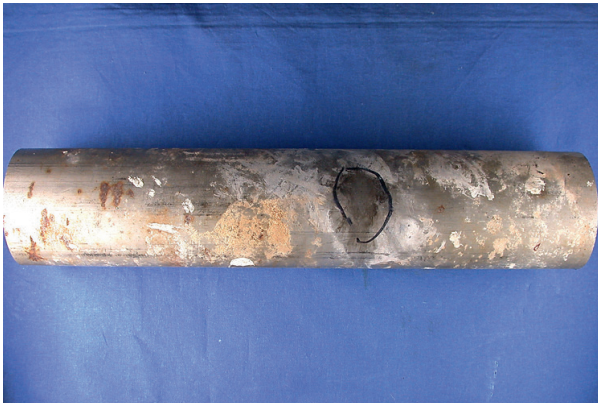


Fig. 1: Outer surface of the pipe with coatings and place of damage (encircled) $\approx 1:3$

Bild 1: Rohraußenseite mit Belägen und Schadensstelle (eingekreist) ca. 1:3

The medium around the pipe can be described as follows:

- damp cellar
- possible contact with rust from steel girder S235 (St37)
- Cleaning agent: alkaline and acid foam (containing chloride up to the year 2008).

The client specified 1.4301 (X5CrNi18-10) as material of the pipe.

Two pipe sections with cracks have been delivered for an examination in the laboratory (Figs. 1-4). After a first visual check, the cracks have been



Fig. 3: Another location on the outer surface of the pipe with coatings and places of damage (circle) $\approx 1:3$

Bild 3: Andere Stelle der Rohraußenseite mit Belägen und Schadensstelle (Kreis) ca. 1:3



Fig. 2: Detail from image 1: place of damage with crack field $\approx 3:1$

Bild 2: Ausschnitt aus Bild 1: Schadensstelle mit Rissfeld ca. 3:1

Das Medium außen war wie folgt:

- feuchter Keller
- möglicher Kontakt auch mit Rost aus Stahlträger S235 (St37)
- Reinigungsmittel alkalischer und saurer Schaum (bis 2008 chlorhaltig).

Als Werkstoff für die Rohrleitung war vom Auftraggeber 1.4301 (X5CrNi18-10) angegeben.

Zur Untersuchung im Labor wurden zwei rissbehaftete Rohrabschnitte angeliefert (Bilder 1-4), bei denen nach dem ersten Augenschein die Risse geöffnet



Fig. 4: Detail from image 3: place of damage with crack field $\approx 3:1$

Bild 4: Ausschnitt aus Bild 3: Schadensstelle mit Rissfeld ca. 3:1

opened and the corrosion products have been secured for subsequent electron beam microanalysis by means of a scanning electron microscope.

After a first visual check of the damage on the presented pieces by the specialist department in cooperation with a leading metallographer the following extent of examinations has been determined:

- Material test by means of emission spectral analysis
- Examination of crack areas under the scanning electron microscope in order to clarify damage characteristics including examination of the corrosion products by means of EDX analysis
- Metallographic examination of different locations in the damage area

3. Examination Results

The pipe material has spectrometrically been analyzed by a qualified materials tester. Here, the device had to be standardized beforehand by means of calibration samples in order to guarantee the measurement results to be unambiguous and correct.

The result of the complete emission spectrometry analysis of the pipe material in wt.% can be found in the following table.

One of the two crack fields has been split open and the crack area has been examined under the scanning electron microscope (SEM). For this case, the examination has been carried out and evaluated by an experienced metallographer with long-term experience in using SEM.

und die Korrosionsprodukte gesichert wurden, um sie später am Rasterelektronenmikroskop mittels Elektronenstrahlmikroanalyse zu untersuchen.

Nach der ersten Sichtung des Schadens an den vorgelegten Schadensteilen durch die Fachabteilung unter Mitwirkung der leitenden Metallographin wurde folgender Untersuchungsumfang festgelegt:

- Werkstoffüberprüfung mittels Emissionsspektalanalyse
- Untersuchung der Rissflächen am Rasterelektronenmikroskop zur Klärung der Schadenscharakteristik einschließlich der Überprüfung der Korrosionsprodukte mittels EDX-Analyse
- Metallographische Untersuchung im Schadensbereich an verschiedenen Stellen

3. Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Der Rohrwerkstoff wurde durch einen ausgebildeten Werkstoffprüfer spektrometrisch analysiert, wobei im Vorfeld das Gerät mittels Eichproben standardisiert werden musste um sicherzustellen, dass die Messergebnisse eindeutig und richtig sind.

Das Ergebnis der emissionsspektrometrischen Vollanalyse des Rohrwerkstoffes in Gew.-% ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Eines der beiden Rissfelder wurde aufgebrochen und der Rissbereich am Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Die Untersuchung wurde in diesem Fall durch eine ausgebildete Metallographin mit langjähriger Erfahrung am REM durchgeführt und ausgewertet.

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu
Wt.%	0,04	0,67	1,48	0,034	0,007	17,30	9,27	0,34	0,023	0,41
Target 1.4301	≤0,07	≤1,0	≤2,0	≤0,045	≤0,015	17,5 - 19,5	8,0 - 10,5	-	-	-

The damage is attributed to intergranular stress corrosion originating from the outer surface of the pipe. It was noticeable that also the pipe surface was affected by severe intergranular damages (Fig. 5). Here, individual grains also exhibit needle-shaped deformation structures (Fig. 6).

Es handelt sich dabei um interkristalline Spannungsrissskorrosion, ausgehend von der Rohraußen-seite. Es fiel dabei auf, dass auch die Rohroberfläche bereits stark interkristallin geschädigt war (Bild 5). Hier waren in einzelnen Körnern auch nadelförmige Verformungsstrukturen zu erkennen (Bild 6).

The coatings on the crack area and on the outer surface of the pipe have been examined by electron

Die Beläge auf der Rissfläche und auf der Rohroberfläche wurden mittels Elektronenstrahlmikroana-

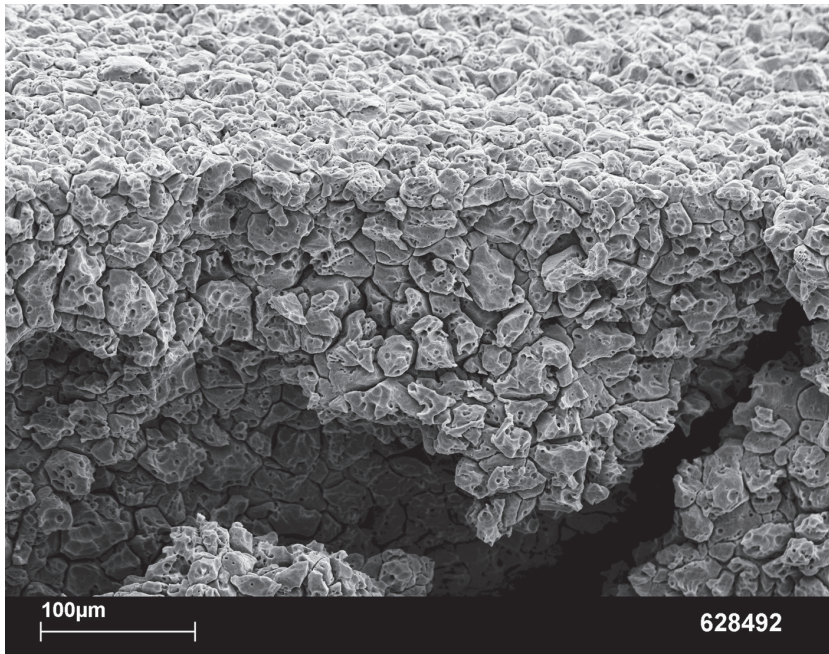


Fig. 5: Detail from crack area, surface intergranular pickled image: 250:1

Bild 5: Ausschnitt Rissbereich, Oberfläche interkristallin angebeizt Aufn.: 250:1

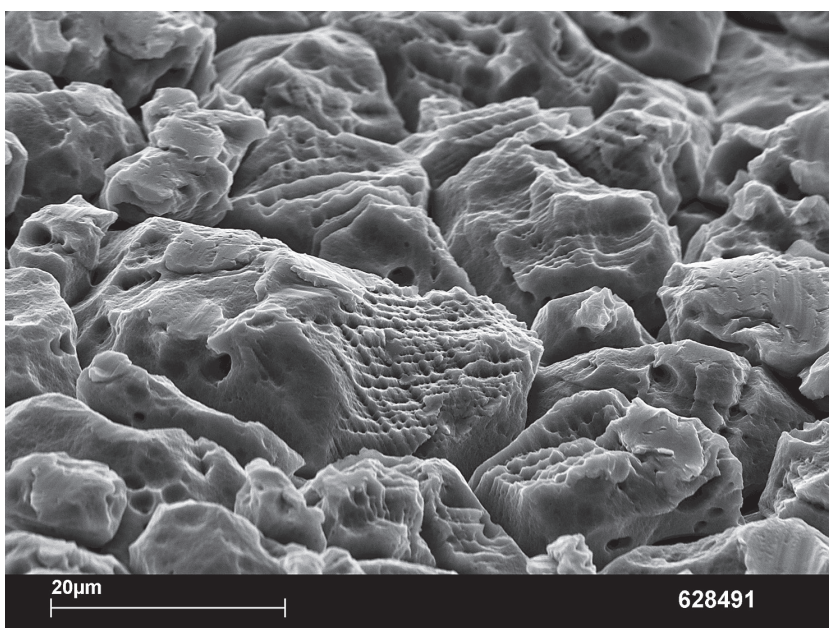


Fig. 6: Intergranular pickled surface with slip lines in the grains image: 2000:1

Bild 6: Interkristallin angebeizte Oberfläche mit Gleitlinien in den Körnern Aufn.: 2000:1

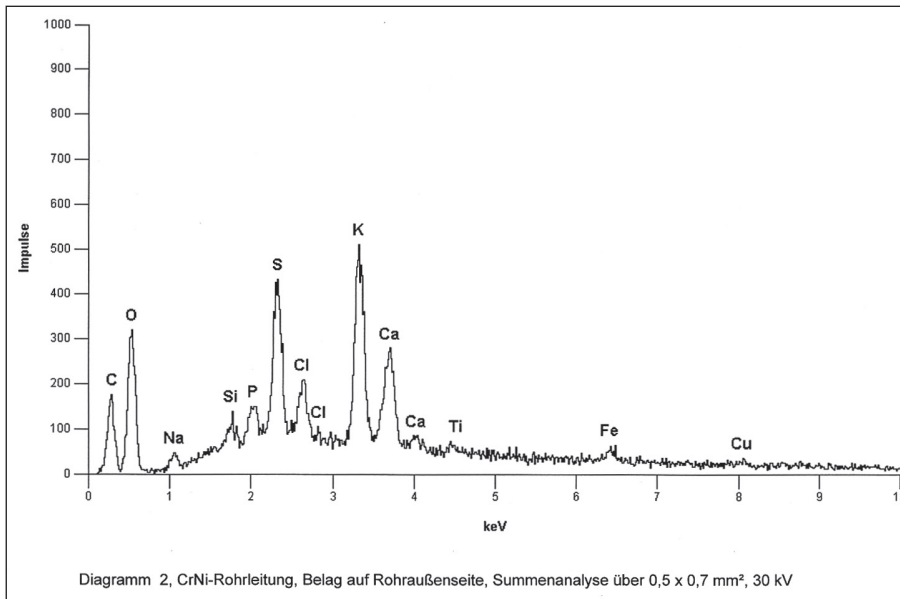


Fig. 7: EDX analysis of the coatings on the outer surface of the pipe

Bild 7: EDX-Analyse des Belages auf der Rohraußenseite

beam microanalysis (EDX). Besides relatively high K, S, O, Ca and C content values, proportions of Cl, P and S as well as traces of Na, Ti, Fe and Cu could be found (Fig. 7).

Microsections have been taken of the crack fields from the boundary areas in longitudinal pipe direction for metallographic examination.

The microstructure of the pipe materials consists of austenite with isolated δ -ferrite cells (Fig. 14). On the outer surface of the pipe cold deformed areas with deformation martensite are locally visible (Figs. 11, 12, and 13). The cracks can partially be attributed to transgranular and intergranular stress corrosion, originating from the outer surface of the pipe (Figs. 8, 9 and 10).

lyse (EDX) überprüft. Es waren dabei neben relativ hohen K-, S-, O-, Ca- und C-Anzeigen Anteile von Cl, P und S sowie Spuren von Na, Ti, Fe und Cu festzustellen (Bild 7).

Aus den Endbereichen der Rissfelder wurden Mikroschliffe in Rohrlängsrichtung zur metallographischen Untersuchung entnommen.

Das Gefüge der Rohrwerkstoffe besteht aus Austenit mit vereinzelt δ -Ferritzeilen (Bild 14). An der Rohraußenseite sind örtlich kaltverformte Bereiche mit Verformungsmartensit erkennbar (Bilder 11, 12 und 13). Bei den Rissen handelt es sich um teilweise trans-, teilweise interkristalline Spannungsrisskorrosion, ausgehend von der Rohraußenseite (Bilder 8, 9 und 10).

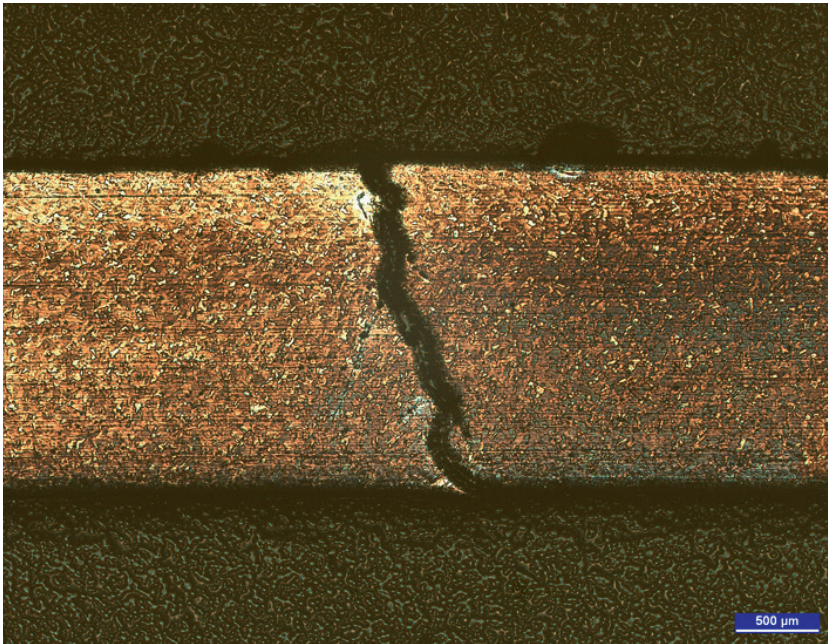


Fig. 8: Crack area in longitudinal section, overview, Image 12,5:1, Etchant: Beraha II

Bild 8: Rissbereich im Längsschliff, Übersicht, Aufnahme 12,5:1, Ätzmittel: Beraha II

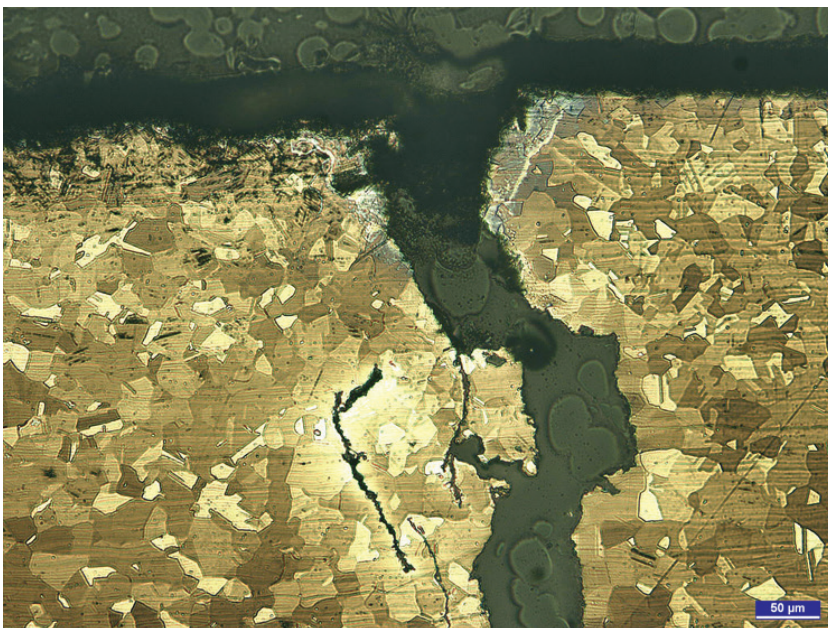


Fig. 9: Detail crack area outer surface of the pipe, Image 100:1, Etchant: Beraha II

Bild 9: Ausschnitt Rissbereich Rohraußenseite Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II

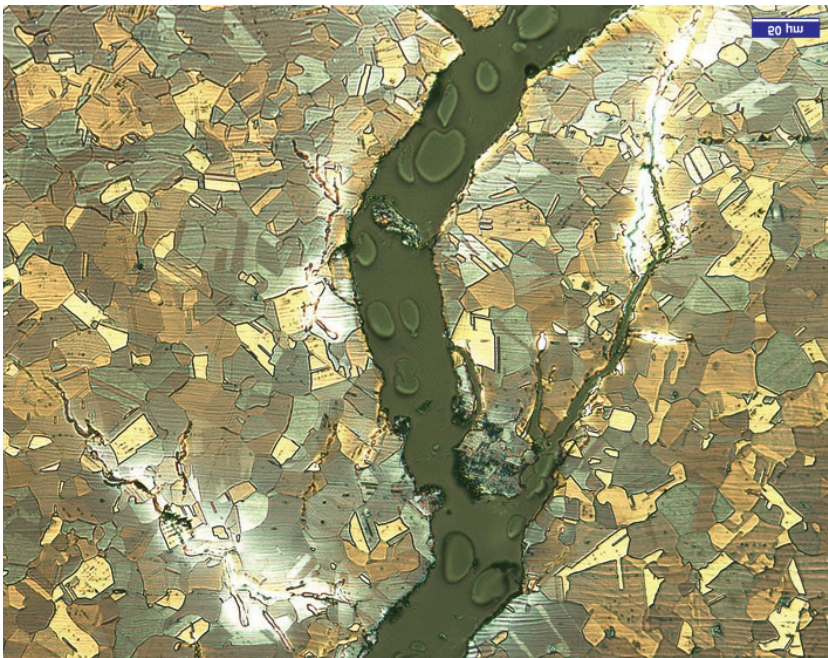


Fig. 10: Additional detail crack area, transgranular and intergranular cracks, Image 100:1, Etchant: Beraha II

Bild 10: Weiterer Ausschnitt Rissbereich, trans- und interkristalline Risse, Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II

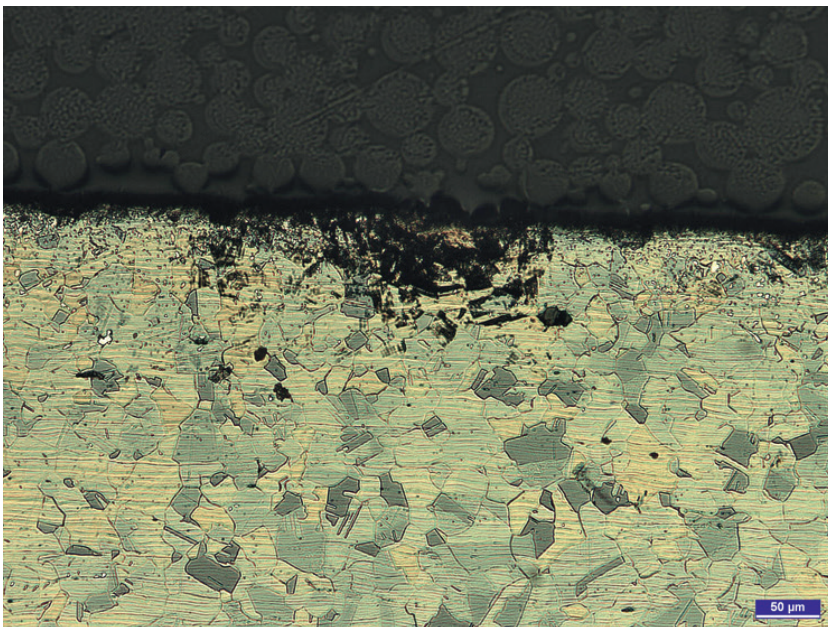


Fig. 11: Punctiform cold deformation on the outer surface of the pipe, Image 100:1 Etchant:, Beraha II

Bild 11: Punktförmige Kaltverformung an der Rohroberfläche außen, Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II

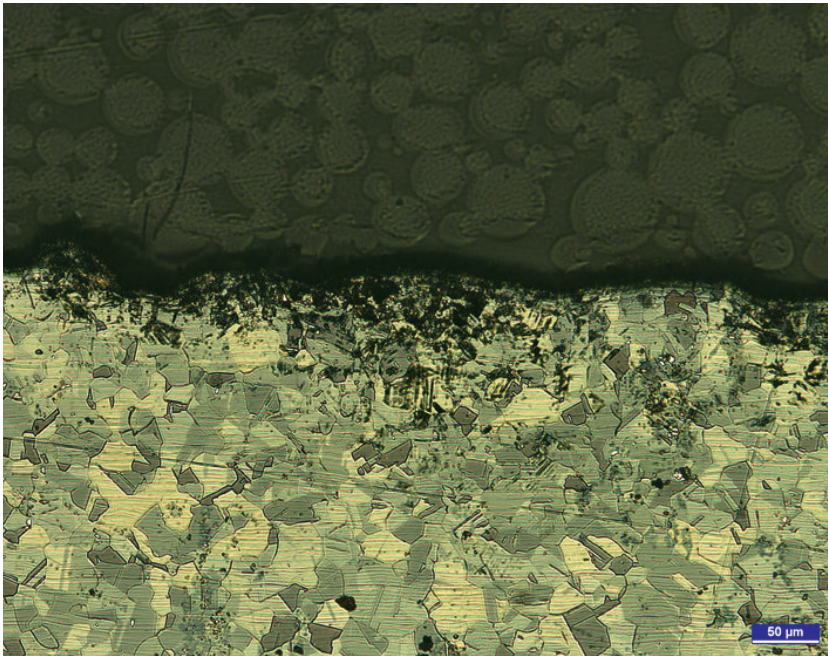


Fig. 12: Extensive cold deformation on the outer surface of the pipe, Image 100 :1, Etchant: Beraha II

Bild 12: Großflächige Kaltverformung an der Rohroberfläche außen, Aufnahme 100 :1, Ätzmittel: Beraha II

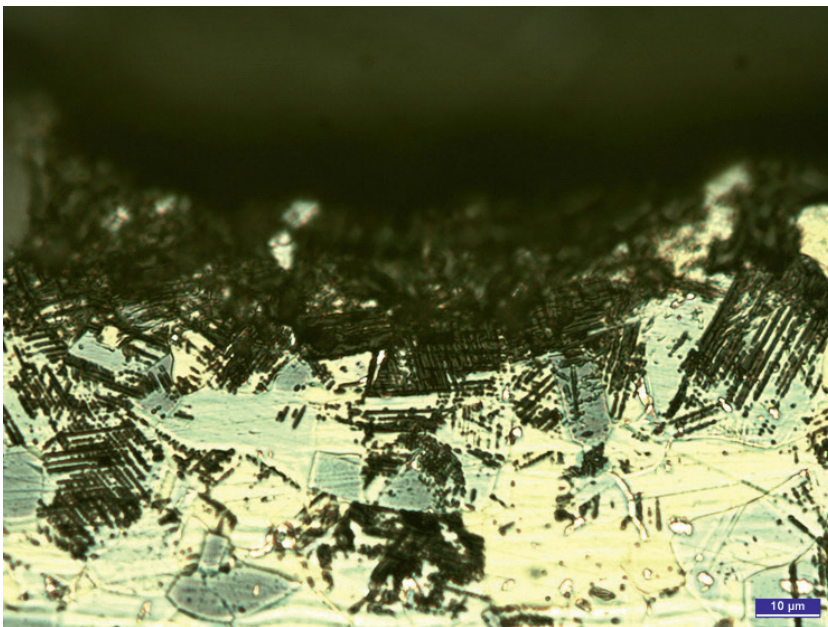


Fig. 13: Detail from image 11: deformation martensite on the surface, needle-shaped, Image 500 :1, Etchant: Beraha II

Bild 13: Ausschnitt aus Bild 11: Verformungsmartensit an der Oberfläche, nadelförmig, Aufnahme 500 :1, Ätzmittel: Beraha II

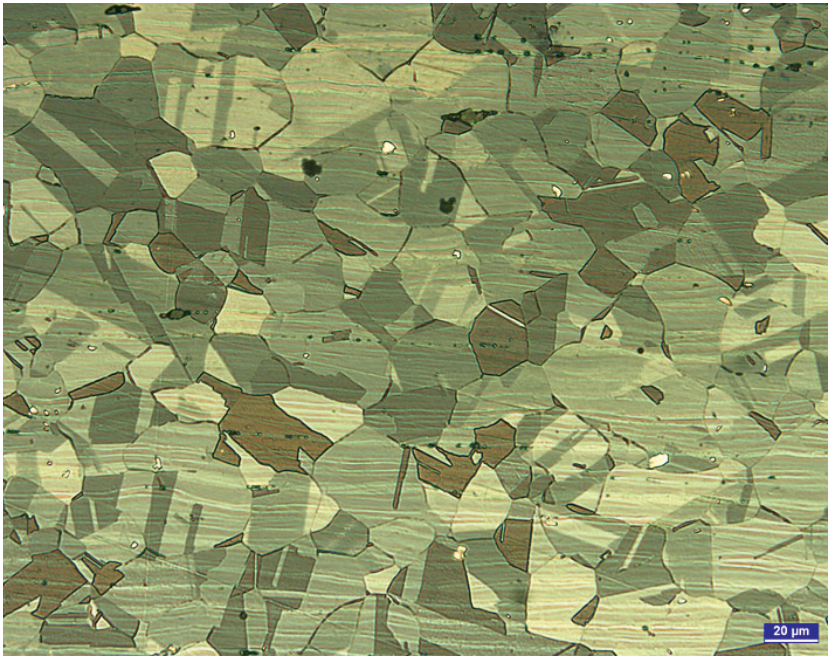


Fig. 14: Microstructure of the pipe material austenite with low δ -ferrite content, Image 200:1, Etchant: Beraha II

Bild 14: Gefüge Rohrwerkstoff Austenit mit wenig δ -Ferrit, Aufnahme 200:1, Ätzm.: Beraha II

4. Summary and Evaluation

The present damage can mainly be attributed to intergranular stress corrosion, originating from the outer surface of the pipe, whereby local cold deformations have probably promoted the damage formation.

The damage has been caused by media containing S and Cl, which have concentrated on the pipe surface in the area of mineral coatings containing K and Ca. These could possibly be residuals of cleaning agents and other harmful substances in humid atmosphere.

No residuals of foreign metal, e.g. rust from steel girder, were visible.

The present pipe material is - as specified - a 1.4301 (X5CrNi18-10) according to DIN EN 10088, whereby the Cr content was lower than the requested nominal value.

4. Zusammenfassung und Beurteilung

Bei dem vorliegenden Schaden handelt es sich um vorwiegend interkristalline Spannungsrisskorrosion, ausgehend von der Rohraußenseite, wobei örtliche Kaltverformungen die Schadensentstehung begünstigt haben dürften.

Der Schaden wurde ausgelöst durch S- und Cl-haltige Medien, die sich an der Rohroberfläche im Bereich von K- und Ca-haltigen, mineralischen Belägen aufkonzentriert haben. Dabei könnte es sich um Rückstände von Reinigungsmitteln und anderen Schadstoffen in feuchter Atmosphäre gehandelt haben.

Rückstände von Fremdmetall, z.B. Rost aus einem Stahlträger waren nicht erkennbar.

Bei dem vorliegenden Rohrwerkstoff handelt es sich - wie angegeben - um einen 1.4301 (X5CrNi18-10) nach DIN EN 10088, wobei der Cr-Gehalt etwas unter dem geforderten Sollwert lag.

A material of this kind is not optimally suited for the given application. In this case, a Mo containing CrNi steel such as the type 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) or a 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) can be recommended.

5. Closing Remark

Beside the engineering approach to the damage examination presented here, several evaluation aspects – particularly in microstructural analysis – require a qualified metallographer. The cold deformation, for example, which affects the damage formation on the pipe's surface is only recognizable by means of a metallographic section.

Ein Werkstoff dieser Art ist für den gegebenen Anwendungszweck nicht optimal geeignet. Hier ist ein Mo-haltiger CrNi-Stahl etwa der Art eines 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) oder eines 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) zu empfehlen.

5. Abschließende Bemerkung

Neben den durchaus ingenieurmäßigen Tätigkeiten im Zusammenhang mit der geschilderten Schadensuntersuchung gibt es – gerade in der Gefügeauswertung – einige Punkte, deren Auswertung eine/n versierte/n Metallographen/in verlangt. So ist z. B. die schadensbeeinflussende Kaltverformung an der Rohroberfläche nur durch den metallographischen Schliff erkennbar.

TEIL I

Mechanical Failures

Schäden durch mechanische Beanspruchungen

- 1 Condition Monitoring of a Power Tower Using Metallurgical Investigations of Structural Members | *Zustandsbewertung eines Stahlgittermastes anhand werkstofftechnischer Untersuchungen von Zugstäben* 19
- 2 Metallurgical Failure Investigation of a Deformed and Cracked Lashing-Load Ring of a Heavy-Duty Gas Turbine Engine | *Werkstofftechnische Schadensklärung einer verformten und gerissenen Anhängöse einer Großgasturbine* 31
- 3 Metallurgical Failure Investigation of HCF Cracking in a Premix Fuel Oil Manifold of a Heavy-duty Combined Cycle Gas Turbine Engine | *Werkstofftechnische Schadensuntersuchung eines hochzyklischen Schwingbruchs beim Ölverteiler einer Großgasturbine* 39

4	Metallurgical Failure Investigation of Cracking of a Vent Nozzle on a Pressure Pulsation Dampener of a Natural Gas Compressor <i>Werkstofftechnische Schadensuntersuchung des Risses am Entlüftungsstutzen eines Druckpulsationsdämpfers für einen Erdgasverdichter</i>	51
5	Fracture of a Leaf Chain for Lifting Clamps <i>Bruch der Flyerkette eines Allzweckgreifers</i>	67
6	Metallurgical Failure Investigation of a Pipe Connector Fracture of an Expansion Vessel <i>Werkstofftechnische Schadensuntersuchung des Abrisses einer Rohrverschraubung eines Ausgleichsbehälters</i>	73
7	LCF Failure of a Threaded Bolt <i>Niederzyklischer Ermüdungsbruch eines Gewindebolzens</i>	79
8	Fracture of an Industrial Steam Turbine Horizontal Joint Nut Upon Tightening <i>Bruch der Mutter einer Horizontalteilfugenverschraubung einer Industriedampfturbine beim Anziehen</i>	87
9	High Cycle Fatigue Failure of Burner Feeder Line in a Heavy-duty Gas Turbine Engine <i>Hochzyklischer Schwingbruch der Brennerzuführung einer Industriegasturbine</i>	95

10	Metallurgical Investigation of Cold-formed Fillet Pieces Made of Metastable Austenitic Stainless Steel, for the Turbine Exhaust Casing of a Heavy-Duty Gas Turbine Engine <i>Werkstofftechnische Untersuchung kaltumgeformter Übergangsformstücke aus einem metastabilen rostfreien austenitischen Stahl zum Einsatz in der Gehäuseauskleidung der Abgasstrecke einer Großgasturbine</i>	107
11	Failure of a Swivel Arm in a Turning Gear Assembly <i>Schaden des Schwenkarms einer Drehvorrichtung</i> . . .	119
12	Component Loss due to the Fracture of an Indexable Insert <i>Bauteilverlust durch Wendeschneidplattenbruch</i>	131
13	LCF Fracture in Helical Tension Springs of Medium Voltage Switches <i>Niederzyklische Schwingbrüche in Spiralzugfedern von Mittelspannungsschaltern</i>	137
14	Low-cycle Fatigue Fracture of Stranded Ropes in Pantographs for Electrically Driven Trucks <i>Niederzyklische Schwingbrüche in Drahtseilen für Pantographen elektrisch angetriebener LKW</i>	143

Condition Monitoring of a Power Tower Using Metallurgical Investigations of Structural Members

Zustandsbewertung eines Stahlgittermastes anhand werkstofftechnischer Untersuchungen von Zugstäben

A. Neidel, B. Fischer, M. Giller, C. Kramm, T. Weinbrenner, E. Wöhl

Abstract

A spectacular damage occurred at the end of 2005 in Münsterland when a large number of power towers in 110 kV transmission lines collapsed due to increased loads of ice and snow, which raised awareness amongst experts for the evaluation of a continuous safe operation of historical towers. At the time, it was found that embrittlement by strain ageing was a contributing factor. The in-house client ordered the condition evaluation of a power tower located on his premises. The evaluation was performed by testing four so-called structural members from this tower. Mechanical-technological material tests were performed exclusively on samples from the flat, mostly not cold-formed areas of the structural members' angle irons. The results of all these tests were inconspicuous, including the notch impact tests at -20°C . Therefore, it is safe to say that the material at hand is generally not in an embrittled condition. In this context it is also interesting that the nitrogen content of the batch the angle irons of the examined structural members were made from, did not exceed the embrittlement sensitivity threshold of 0.01 percent

Kurzfassung

Ein spektakulärer Schadensfall ereignete sich Ende 2005 im Münsterland, als eine große Anzahl von Stahlgittermasten in 110 kV-Übertragungsleitungen infolge erhöhter Eis- und Schneelasten der Leiterseile umknickten, was zu einer gewissen Sensibilisierung der Fachwelt bei der Beurteilung des sicheren Weiterbetriebes historischer Masten führte. Eine Versprödung durch Reckalterung wurde damals als schadensbegünstigend angesehen. Der firmeninterne Auftraggeber bestellte die Zustandsbewertung eines Stahlgittermastes, der sich auf seinem Betriebsgelände befindet. Diese wurde anhand einer Erprobung von vier sog. Zugbändern aus jenem Mast durchgeführt. Mechanisch-technologische Werkstoffprüfungen erfolgten ausschließlich anhand von Proben aus den flachen, weitgehend nicht kaltverformten Bereichen der Winkeleisen der Zugbänder. Die Ergebnisse aller dieser Versuche waren unauffällig, einschließlich der Kerbschlagbiegeversuche bei -20°C . Es kann deshalb mit Sicherheit gesagt werden, dass der vorliegende Werkstoff nicht generell in einem versprödeten Zustand vorliegt. Interessant in diesem Zusam-

by weight set by the Federal Institute for Materials Research. From a material-technological perspective, there is no objection to a continued safe operation of the power tower on the client's premises. Further tests and repairs were not considered necessary.

menhang ist auch, dass der Stickstoffgehalt der Charge, aus der die Winkeleisen der untersuchten Zugstäbe hergestellt wurden, nicht über der von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) genannten Versprödungs-Empfindlichkeitsgrenze von 0,01 Masse-% lag. Aus werkstofftechnischer Sicht bestanden deshalb keinerlei Bedenken gegen einen sicheren Weiterbetrieb des Stahlgittermastes auf dem Betriebsgelände des Auftraggebers. Weitere Erprobungen oder Reparaturen wurden als nicht erforderlich angesehen.

1. Introduction

A spectacular damage occurred at the end of 2005 in Münsterland when a large number of power towers in 110 kV transmission lines collapsed due to increased loads of ice and snow on the transmission lines [1–3]. An embrittlement, i.e. a decrease of ductility and toughness of the St 37 mass structural steel used in this case, was at the time considered a contributing factor to the damage.

The structural steel used in this historical damage case had been molten using the Thomas process, a technique that has not been used for decades. In the Thomas procedure, refining is not performed with oxygen, as it is today, but with air, which leads to a high nitrogen input into the steel melt. Thomas steels are therefore usually characterized by high nitrogen contents (>0.01 percent by weight) [4]. The embrittlement mechanism identified in the Münsterland case was strain ageing [2–4]. This generally means a decrease of ductility and toughness as a result of dislocation pinning which are caused by interstitial nitrogen and carbon atoms and above all by the segregation of different iron nitrides, e.g. Fe_3N [4]. Naturally, cold-formed areas with a high plastic deformation and correspondingly elevated dislocation density, are particularly sensitive to strain ageing. For the power towers, such areas are the punched mounting holes, the folded radii of the angle irons and the ends of the angle irons cut to length by scissors [2, 3]. The spectacular damage

1. Einleitung

Ein spektakulärer Schadensfall ereignete sich Ende 2005 im Münsterland, als eine große Anzahl von Stahlgittermasten in 110 kV-Übertragungsleitungen infolge erhöhter Eis- und Schneelasten der Leiterseile umknickten [1–3]. Eine Versprödung, d.h. ein Abfall von Duktilität und Zähigkeit, des in jenem Falle verwendeten Massenbaustahls St 37, wurde damals als schadensbegünstigender Faktor identifiziert.

Der in jenem historischen Schadensfall verwendete Baustahl war im Thomasverfahren erschmolzen worden, eine Technik, die seit Jahrzehnten nicht mehr angewandt wird. Beim Thomasverfahren erfolgt das Frischen nicht mittels Sauerstoff, wie heute üblich, sondern mit Luft, was zu einem hohen Stickstoffeintrag in die Stahlschmelze führt. Thomasstähle sind deshalb i.d.R. durch hohe Stickstoffgehalte (>0,01 Masse-%) gekennzeichnet [4]. Der im Münsterland-Fall identifizierte Versprödungsmechanismus war Reckalterung [2–4]. Darunter wird i.a. ein Duktilitäts- und Zähigkeitsabfall infolge von Versetzungsblockierungen verstanden, die durch interstitielle Stickstoff- und Kohlenstoffatome, vor allem aber durch die Ausscheidung verschiedener Eisennitride, u.a. Fe_3N , verursacht werden [4]. Gegen Reckalterung sind naturgemäß kaltverformte Bereiche mit hoher plastischer Verformung und entsprechend erhöhter Versetzungsdichte besonders empfindlich. Bei den Stahlgittermasten sind dies vor allem die gestanzten Befestigungsbohrungen, die abgekanteten Radien

case described here has raised the awareness of experts for the possibly restricted stability of such power towers. Therefore, the client ordered from the authors a condition evaluation of a power tower located on his premises [5]. This evaluation was performed by testing 4 so-called structural members from this tower (Fig. 1).

As part of the issuing of the original BAM expert report for the Federal Network Agency [2], structural members and framework diagonal elements were subjected to component tensile tests in assembled state to prove the embrittlement using the parameters of the tensile test. In consultation with the client, these tests were skipped in the current case. Instead it was tried to verify possible nitride segregations on etched microstructures from the edge of the hole via electron optics, by retracing the procedure of the original BAM examination [2–4].

Mechanical-technological examinations were performed exclusively on samples from the flat, mostly not cold-formed areas of the structural members' angle irons removed from the examined power tower in order to determine the basic material condition of the research object (Fig. 1–3).



Fig. 1: Structural members of a power tower in as-received condition Angle iron $60 \times 40 \times 5,5$.

Bild 1: Zugbänder des Stahlgittermastes im Anlieferungszustand. Winkeleisen $60 \times 40 \times 5,5$.

der Winkeleisen und die Enden der durch Scheren abgelängten Flach- und Winkeleisen [2, 3]. Der beschriebene spektakuläre historische Schadensfall hat zu einer gewissen Sensibilisierung der Fachwelt bezüglich eventuell eingeschränkter Standfestigkeit solcher Stahlgittermasten geführt. Der Auftraggeber bestellte deshalb bei den Autoren eine Zustandsbewertung eines Stahlgittermastes, der sich auf seinem Betriebsgelände befindet [5]. Diese sollte anhand einer Erprobung von 4 sog. Zugbändern aus jenem Mast durchgeführt werden, Bild 1.

Im Zuge der Erstellung des damaligen BAM-Originalgutachtens für die Bundesnetzagentur [2] wurden Zugbänder und Fachwerk-Diagonalelemente im zusammengebauten Zustand Bauteil-Zugversuchen unterzogen, um die Versprödung anhand der Kennwerte des Zugversuchs nachzuweisen. Dieser Aufwand wurde in Absprache mit dem Auftraggeber im aktuellen Fall nicht getrieben. Stattdessen wurde versucht, eventuell vorhandene Nitridausscheidungen elektronenoptisch an geätzten Gefügen aus dem Bohrrand nachzuweisen, durch Nachvollziehen der Vorgehensweise der originalen BAM-Untersuchung [2–4].

Mechanisch-technologische Untersuchungen wurden ausschließlich anhand von Proben aus den flachen, weitgehend nicht kaltverformten Bereichen der Winkeleisen der Zugbänder aus dem zu bewertenden Stahlgittermast durchgeführt, um den grundsätzlichen Werkstoffzustand des Untersuchungsgegenstandes zu ermitteln (Bilder 1–3).



Fig. 2: Part from sample ZB3 which was used for the metallographic surface section.

Bild 2: Abschnitt aus Probe ZB3, die für den metallographischen Oberflächenanschliff verwendet wurde.

2. Examinations

The four structural members (ZB1 to ZB4) from the power tower to be characterized (Fig. 1) that were received from the client, were subjected to thorough materials testing. Chemical analyses, microstructural investigations (Fig. 2), scanning electron microscope characterization of the sub-microstructure and mechanical testing using flat tensile specimens Form E, approx. 200 mm long, 6 mm thick, 20 mm wide, gauge length 60 mm, as well as Charpy V-notch impact specimens (Fig. 3) helped to form a general image of the power tower's material condition.

3. Results

Visual Findings

The visual findings of the structural members handed over for the examination are inconspicuous. The steel components are in good general condition. The paintwork is broadly still in place. Corrosion can only be found in the gaps between the formerly connected angle irons in the area of the mounting holes and at the edges of the holes (Figs. 1 and 2).

Chemical Analysis (Bulk Analysis)

The material of the angle irons handed over by the client as ZB1 and ZB4, was spark spectrometrically tested using Optical Emission Spectrometry (OES). An unalloyed mass structural steel was used. As a result of the chemical analysis, the steel can be categorized as St 37 (S 235 according to current nomenclature).

Chemical Analysis (Light Elements N, C)

Nitrogen and carbon were determined with high accuracy via infrared spectrometry. The carbon content was determined at 0.1 weight percent. The nitrogen

2. Untersuchungen

Die vom Auftraggeber erhaltenen 4 Zugbänder ZB1 bis ZB4 aus dem zu charakterisierenden Stahlgittermast (Bild 1) wurden umfangreich werkstofftechnisch untersucht. Chemische Analysen, Gefügeuntersuchungen (Bild 2), rasterelektronenmikroskopische Charakterisierung der Submikrostruktur und mechanisch-technologische Erprobungen anhand von Flachzugproben Form E, ca. 200 mm lang, 6 mm dick, 20 mm breit, Messlänge 60 mm sowie Charpy-V-Kerbschlagbiegeproben (Bild 3) ergaben ein Gesamtbild des Werkstoffzustandes des Stahlgittermastes.

3. Ergebnisse

Visueller Befund

Der visuelle Befund der für diese Untersuchung übergebenen Zugbänder ist unauffällig. Die Stahlteile befinden sich in einem guten Allgemeinzustand. Die Lackierung ist weitgehend noch vorhanden. Korrosion ist nur in den Spalten zwischen den ehemals verbundenen Winkeleisen im Bereich der Befestigungsbohrungen und an den Bohrungsrändern festzustellen (Bilder 1 und 2).

Chemische Analyse (Bulk-Analyse)

Der Werkstoff der Winkeleisen, die als Zugbänder ZB1 bis ZB4 vom Auftraggeber übergeben wurden, ist „funkenspektrometrisch“ mittels optischer Emissionsspektrometrie (OES) überprüft worden. Es handelt sich um einen unlegierten Massenbaustahl. Die chemische Analyse lässt die Einordnung als St 37 zu (nach heutiger Nomenklatur S 235).

Chemische Analyse (Leichtelemente N, C)

Stickstoff und Kohlenstoff wurden hochgenau infrarotspektrometrisch bestimmt. Der Kohlenstoffgehalt wurde mit 0,1 Gewichts-% ermittelt. Der Stickstoff-



Fig. 3: Tensile and Charpy V-notch impact testing specimens ZB1 (left) to ZB4 (right) machined in longitudinal direction from the structural members.

Bild 3: Aus den Zugbändern in Längsrichtung herausgearbeitete Zug- und Kerbschlagbiegeproben ZB1 (links) bis ZB4 (rechts).

content is 0.010 weight percent. Both results were obtained from chips exemplarily drilled from one of the structural members. Both results are plausible and consistent with an unalloyed and low-carbon steel. The nitrogen content is remarkably low for a Thomas steel. The sensitivity threshold for strain ageing of 0.01 % suggested by the BAM is not exceeded.

Mechanical Testing

All mechanical-technological examinations were performed as longitudinal tests, i.e. the fracture path was always perpendicular to the flow lines, which leads to higher values than for cross section tests. In this respect, these examinations are not conservative but „best-case“. For geometric reasons, a different procedure was not possible, besides the

gehalt beträgt 0,010 Gewichts-%. Beide Ergebnisse wurden an Spänen gewonnen, die aus einem der Zugstäbe exemplarisch ausgebohrt wurden. Beide Ergebnisse sind plausibel und passen zu einem unlegierten und niedriggekohlten Massenbaustahl. Der Stickstoffgehalt ist für einen Thomasstahl ausgesprochen niedrig. Die von der BAM angegebene Empfindlichkeitsgrenze für Reckalterung von 0,01 % übersteigt er nicht [1].

Mechanische Erprobung

Alle mechanisch-technologischen Prüfungen wurden als Längserprobung durchgeführt, d.h. der Bruchverlauf war immer senkrecht zum Faserverlauf, was zu höheren Werten führt als bei Quererprobung. Insofern waren diese Prüfungen nicht konservativ, sondern „best-case“. Aus Geometrie Gründen war aber keine andere Vorgehensweise möglich, ab-

fact that this is also the conventional procedure for the testing of steel profiles.

Tensile Properties: Strength and Ductility

The parameters of the tensile test determined for the flat tensile specimens removed from the 4 structural members are unremarkable. Due to the determined strength, the steel can be categorized as St 37. Tensile strength and yield strength $R_{p0,2}$ do not appear to be elevated with 380–392 N/mm² or 287–316 N/mm² respectively, e.g. as a result of embrittlement by strain ageing. The tensile strength R_m is only slightly above the minimum requirement of approx. 370 N/mm² (estimation, St 37, tensile strength 37 kp/mm² × 10). What is remarkable, however, is the good ductility (elongation A5 30–36% and reduction of area, ROA Z 52–58%). Signs of embrittlement were not found. Embrittlement of the material by ageing, e.g. by nitride segregations and/or interstitial nitrogen and carbon atoms, i.e. ageing in mostly undeformed areas with normal, not elevated dislocation density can thus be excluded.

Toughness

The toughness of the structural members' steel was determined using Charpy V-notch specimens (CVN) which were removed from the 4 structural members. The tests were performed at room temperature (RT) and –20 °C to also simulate the conditions of cold winters. The CVN impact toughness at room temperature (RT), determined on undersize samples due to the low wall thickness of only 6 mm of structural members' angle irons, is remarkably high. The reader is advised that the determined values of 47–52 J have to be doubled for comparison with standard specimens. The samples of all 4 structural members almost reach 100 J which is very much for a historical mass steel. Here again, no proneness to embrittlement can be found at first. Apart from that, what has already been said concerning tensile prop-

gesehen davon, dass dies auch die allgemein übliche Vorgehensweise bei der Prüfung von Stahlprofilen ist.

Kennwerte des Zugversuchs: Festigkeit und Duktilität

Die an den Flachzugproben, die aus den 4 Zugstäben entnommen wurden, ermittelten Kennwerte des Zugversuchs sind unauffällig. Die ermittelte Festigkeit lässt eine Einordnung als St 37 zu. Zugfestigkeit und Streckgrenze $R_{p0,2}$ erscheinen mit 380–392 N/mm² bzw. 287–316 N/mm² nicht erhöht, z.B. infolge von Versprödung durch Reckalterung. Die Zugfestigkeit R_m liegt nur geringfügig über der Mindestanforderung von ca. 370 N/mm² (Abschätzung, St 37, Zugfestigkeit 37 kp/mm² × 10). Bemerkenswert ist aber die gute Duktilität (Bruchdehnung A5 30–36% und Brucheinschnürung Z 52–58%). Anzeichen einer Versprödung waren also nicht zu beobachten. Eine Versprödung des Werkstoffes durch Alterung, z.B. durch Nitridausscheidungen und/oder interstitielle Stickstoff- und Kohlenstoffatome, d.h. eine Alterung in weitgehend unverformten Bereichen mit normaler, nicht erhöhter Versetzungsdichte, kann also ausgeschlossen werden.

Zähigkeit

Die Zähigkeit des Stahls der Zugbänder wurde anhand von Charpy V-Proben (Charpy V-notch specimens, CVN) ermittelt, die aus den 4 Zugstäben herausgearbeitet wurden, dies bei Raumtemperatur (RT) und –20 °C, um auch die Bedingungen in kalten Wintern abzubilden. Die Kerbschlagarbeit bei Raumtemperatur (RT), ermittelt an Untermaßproben, wegen der geringen Wanddicke von nur 6 mm der Winkeleisen der Zugbänder, ist bemerkenswert hoch. Der Leser sei darauf hingewiesen, dass die ermittelten Werte von 47–52 J zum Vergleich mit Normalproben verdoppelt werden müssen. Die Proben aller 4 Zugstäbe erreichten damit fast 100 J, was für einen historischen Massenstahl ausgesprochen viel ist. Auch hier ist also zunächst keinerlei Versprödungsneigung zu beobachten. Ansonsten gilt