

Andreas Neidel

Schadensfallanalysen metallischer Bauteile

Eine Sammlung von 31 realen Beispielen
aus der Praxis



HANSER

Andreas Neidel

Schadensfall- analysen metallischer Bauteile

Eine Sammlung von 31 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: 978-3-446-44572-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-44609-0

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 2015

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Cornelia Rothenaicher

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: FIRMENGRUPPE APPL, aprinta druck GmbH, Wemding

Printed in Germany

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 erschienenen „Hand-

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 recently 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 intended by design as well as the actual loading situation of the failed part, is not the aim of this book,

buch 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 (z. B. Methode der finiten Elemente) und die genaue Kenntnis der konstruktiv vorgesehenen sowie der

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 “Handbuch Metallschäden”, whose second edition was published in 2012, 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. For these situations, this book may be a trustworthy companion and a regularly used textbook.

Berlin, July 2015

Andreas Neidel

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 2012 im gleichen Verlag in zweiter Auflage erschienenen „Handbuch Metallschäden“ verstanden werden. Auch im Zentrum jenes Buches standen die Schadensfallstudien. Das Neue in dieser Neuerscheinung ist ihre Zweisprachigkeit, die insbesondere neuen Kolleg(inn)en im Fachgebiet die Einarbeitung erleichtern werden, 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 vorgeschrieben. Für diese Anwendungsfälle möge dieses Buch ein treuer Begleiter und ein gerne genutztes Nachschlagewerk sein.

Berlin, im Juli 2015

Andreas Neidel

Table of Contents

Inhaltsverzeichnis

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

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 Fracture Investigation of an HPC Rotor Drum <i>Bruchuntersuchung am HPC Rotor Drum</i>	17
2 Intercrystalline and Transcrystalline Vibration Fatigue Failure in the Inconel 718 Nickel-Based Alloy <i>Inter- und transkristalliner Schwingbruch in der Nickelbasis-Legierung Inconel 718</i>	33
3 Fracture Investigation on a "Rotating Air Seal" of an Aircraft Engine <i>Bruchuntersuchung an einem „Rotating-Air-Seal“ eines Flugzeugtriebwerkes</i>	47
4 Forced Fracture of "Witch Hat" Fuel Oil Filters of a Gas Turbine Engine Test Rig <i>Gewaltbruch bei „Hexenhut“-Heizölfiltern eines Gasturbinenprüfstands</i>	61
5 Metallurgical Failure Investigation of Minor Leakage in a Fuel Oil Return Line of a Combined Cycle Gas Turbine Engine <i>Metallurgische Fehleruntersuchung einer kleinen Leckage an einer Heizölrückleitung einer Kombizyklus-Gasturbine</i>	71
6 Failure Analysis of a Hydraulic Manifold Plate <i>Schadensanalyse an einer Hydraulikverteilerplatte</i>	89

TEIL II

Corrosion Failures | Schäden durch Korrosion in Elektrolyten . . . 99

- 1 Pitting Corrosion Induced Fatigue Fracture on a Gas Turbine Compressor Blade |
Durch Lochkorrosion induzierter Schwingbruch einer Gasturbinen-Verdichterschaukel . . . 101
- 2 Fracture Analysis of HPT Shroud Retaining Clips | *Bruchuntersuchung an
HPT Shroud Retaining Clips* 117
- 3 Moving Blade Failure in the Low-Pressure Turbine of a Steam Turbo Set |
Schaukelschaden in der Niederdruckteilturbine eines Dampfturbosatzes 127
- 4 Fracture of a Compressor Stator Blade in a Gas Turbine Engine | *Bruch einer
Verdichterleitschaukel im Vorleitrad einer Gasturbine* 139
- 5 Multiple Fractures of Used In-Service Disc Springs in a Stationary Gas Turbine Engine |
Multiple Brüche an betriebsbeanspruchten Tellerfedern für stationäre Gasturbinen 149
- 6 Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking in 316Ti Fuel Oil Pipes of a Gas Turbine
Power Plant | *Chloridinduzierte Spannungskorrosionsrisse in 316Ti Heizölrohren eines
Gasturbinenkraftwerks* 159
- 7 Intergranular Corrosion in Retaining Rings Made of X39CrMo17-1 and X39Cr13 |
Interkristalline Korrosion in Sicherungsringen aus X39CrMo17-1 und X39Cr13 173
- 8 Examples of Damage: Fractures and Crack Formation in Zinc Die Casting Components |
Schadensbeispiele: Brüche und Rissbildung an Bauteilen aus Zink-Druckguss 187

TEIL III

Failures due to Thermal Overload | Schäden durch thermische Beanspruchungen 205

- 1 Liquation Cracks in Hot Upset Low Alloy Steel Screw Heads | *Wiederaufschmelzungs-
risse in warmangestauchten Schraubenköpfen aus einem niedriglegierten Stahl* 209
- 2 High-Temperature Corrosion on Turbine Rotor Blades | *Hochtemperaturkorrosion
an Turbinenlaufschaufeln* 219
- 3 Thermal Fatigue Cracks in Gas Turbine Heat Shield Plates | *Thermoermüdungsrisse
in Hitzeschildplatten von Gasturbinen* 231
- 4 Metallurgical Failure Investigation of Overheated and Fractured Investment Cast
Nickel-base Bolts Made of Inconel 939 | *Metallurgische Schadensuntersuchung an
überhitzten und gebrochenen Bolzen aus Nickelbasis-Feinguss aus Inconel 939* 241

5	Embrittlement of Fuel Gas Piping Made of Wrought Nickel-Based Superalloy Due to Inadequate Heat Treatment <i>Versprödung von Brenngasleitungen aus Nickelbasis-knetlegierung durch ungeeignete Wärmebehandlung</i>	255
6	Transformation of Delta Ferrite Into Sigma Phase in Metastable Austenitic Stainless Steels After Long-Term High-Temperature Service Exposure <i>Umwandlung von Deltaferrit in Sigma-Phase in metastabilen rostfreien austenitischen Stählen nach Langzeitbeanspruchung durch Hochtemperaturen</i>	267
7	Seizing of Gas Turbine Vane Fixing Bolts Made of X22CrMoV12-1 <i>Festsitzende Gasturbinenschaufel-Fixierbolzen aus X22CrMoV12-1</i>	291
8	Selective Laser Melting – Additive Manufacturing’s “New Kid on the Block”; TMF Failure of a Y-shaped Pipe in a Burner Test Rig <i>Selektives Laserschmelzen – die neue Technik unter den additiven Fertigungsverfahren; TMF-Versagen eines Y-Rohrs in einem Brennerversuchsstand</i>	307
9	Metallurgical Failure Investigation of Quench Cracking in Hexagonal Bolt Head Fasteners <i>Metallurgische Schadensanalyse von Härterissen in Innensechskant-Schrauben</i>	321
10	Uncharacteristic Circumferential TMF Cracking in a Heavy-duty Stationary Gas Turbine Engine Burner Outlet <i>Ungewöhnliche Temperaturwechselrisse in Umfangsrichtung des Brenneraustritts einer Großgasturbine</i>	335
11	LCF Coupling Failure in a Two-Foot Light Railway <i>Niederzyklischer Kupplungsbruch einer Parkeisenbahn</i>	347

TEIL IV

Failures due to Tribological Loading | Schäden durch tribologische Beanspruchung 361

1	An Analysis of the Failure of a Wheel Hub <i>Schadensanalyse an einer Radnabe</i>	363
2	Adhesive Wear on the Combination Shaft/Bearing Bush of a Valve Actuator <i>Adhäsionsverschleiß der Welle-Lagerbuchse-Paarung eines Ventilantriebes</i>	371

TEIL V

Hydrogen Embrittlement | Wasserstoffversprödung 383

1	Failure of Large High-strength Fasteners by Hydrogen Embrittlement <i>Versagen großer hochfester Verbindungselemente infolge Wasserstoffversprödung</i>	385
---	---	-----

TEIL VI

Material Defects Werkstofffehler	397
1 The Metallurgical Causes of Structural Inhomogeneities in Hot Rolled Bars of Martensitic 12% Chromium Steels Gefügeinhomogenitäten in warmgewalzten Stäben aus martensitischen 12%-Chromstählen und ihre metallkundlichen Ursachen	399
2 Metallurgical Failure Investigation of Cracked Hook Nuts Used for Upending Gas Turbine Rotors on Site Metallkundliche Schadensuntersuchung gebrochener Hakenmuttern, die dem Aufrichten von Gasturbinenläufern vor Ort dienen	415
Index Sachregister	427

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).

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 Werkslabore 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.

