

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Schadensanalyse
Schäden an Metallprodukten
durch Korrosion in wässrigen Medien
Failure analysis
Failures of metallic products caused by
corrosion in aqueous media

VDI 3822
Blatt 1.2 / Part 1.2
Entwurf / Draft

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich. /

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Einsprüche bis 2025-06-30

- vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchsportal <http://www.vdi.de/3822-1-2>
- in Papierform an
VDI-Gesellschaft Materials Engineering
Fachbereich Werkstoff- und Nanotechnik
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung	2	Preliminary note.....	2
Einleitung.....	2	Introduction.....	2
1 Anwendungsbereich.....	5	1 Scope.....	5
2 Normative Verweise.....	6	2 Normative references.....	6
3 Korrosionsbegriffe in Anlehnung an DIN EN ISO 8044.....	6	3 Definitions of corrosion according to DIN EN ISO 8044.....	6
4 Ordnung von Korrosionsarten.....	7	4 Characterisation of types of corrosion.....	7
5 Korrosionsarten.....	8	5 Types of corrosion.....	8
6 System der Korrosionsarten.....	9	6 Classification of types of corrosion.....	9
6.1 Korrosionsarten ohne mechanische Belastung	9	6.1 Types of corrosion without mechanical stress	9
6.2 Korrosionsarten unter mechanischer Belastung	17	6.2 Types of corrosion involving mechanical stress	17
6.3 Wasserstoffinduzierte Korrosion	23	6.3 Hydrogen-induced corrosion	23
7 Merkmale von Korrosionsarten in Elektrolyten.....	25	7 Characteristics of types of corrosion in electrolytes.....	25
8 Bilder.....	42	8 Figures.....	42
Schrifttum	60	Bibliography	60

VDI-Gesellschaft Materials Engineering (GME)
Fachbereich Werkstoff- und Nanotechnik

VDI-Handbuch Werkstofftechnik
VDI-Handbuch Fabrikplanung und -betrieb, Band 1: Betriebsüberwachung/Instandhaltung
VDI-Handbuch Produktentwicklung und Konstruktion
VDI-Handbuch Raumluftechnik
VDI-Handbuch Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Band 3: Verfügbarkeit/Schadensanalyse
VDI-Handbuch Wärme-/Heiztechnik

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Produkte werden unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für einen funktionssicheren und gefahrlosen Einsatz während der vorgesehenen Betriebsdauer hergestellt. Trotz sorgfältiger Konstruktion und Fertigung sowie eingehender Erprobung gelingt es auch bei Einhalten der vorgesehenen Betriebsweise nicht immer, Fehler und Schäden an derartigen Erzeugnissen zu vermeiden. Schadensfälle verursachen im Allgemeinen wirtschaftliche Verluste durch Produktionsausfall, Folgeschäden sowie notwendige Reparaturmaßnahmen und können darüber hinaus Menschen gefährden.

Gezielte Maßnahmen zur Schadensabhilfe und -verhütung können nur dann eingeleitet werden, wenn die Schadensursachen und Fehlereinflüsse durch systematische Untersuchungen aufgeklärt werden. Schadensanalysen können zu Verbesserungen bei der Werkstoffentwicklung, der Werkstoffauswahl, der Konstruktion, der Fertigung und der Betriebsweise führen. Darüber hinaus können die gewonnenen Erkenntnisse sofort in die Qualitätssicherung eingehen, der Schadensprävention dienen und Entwicklungen einleiten, beispielsweise bei der Werkstoffproduktion und -entwicklung, Ver- und Bearbeitung, Prüfung und Anwendung von Werkstoffen. Schadensanalysen dienen dazu, für ein technisches Erzeugnis ein Optimum aus Werkstoff-, Konstruktions-, Fertigungs- und Bauteileigenschaften unter Kostengesichtspunkten zu finden.

Der Erfolg einer Schadensanalyse hängt weitgehend von der Sorgfalt ihrer Planung, von der Art und dem Umfang der einzelnen Untersuchungsschritte sowie der Qualität ihrer Durchführung ab. Um Erfahrungen aus Schadensanalysen systematisch auswerten und zugänglich machen zu können, sind Vereinheitlichungen erforderlich. Hierfür werden in der Richtlinienreihe

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

Introduction

Products are manufactured under economic considerations for functionally reliable and safe use during their intended period of use. Despite careful design, manufacturing, and testing, it is not always possible to avoid defects and failures, even when the intended operating conditions are adhered to. Failures generally cause economic losses due to loss of production, consequential damage, and the necessary repair. Moreover, they may threaten lives.

Targeted measures to rectify or prevent failures can only be introduced when the causes of the failure, and any contributing influences, have been identified through systematic investigation. Failure analyses can lead to improvements in the development of materials, the choice of materials, design, production, and the manner of operation. In addition, the knowledge gained can be applied in quality control immediately, help to prevent failures and introduce innovations, for example in material production and development, processing, and manufacturing, testing and use of materials. Failure analyses help to determine the optimal combination of material, design, production, and component properties for a technical product, in view of the relative cost.

The success of a failure analysis depends to a great extent on the care with which it is planned, the type and extent of the individual steps in the investigation process and how well it is carried out. In order to assess experience gained through failure analyses systematically, and to share this experience with others, uniformity is required. For this, this series of standards

- Begriffe definiert,
- Schadensarten einheitlich benannt und beschrieben,
- systematische Vorgehensweisen bei der Schadensanalyse dargelegt,
- die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Untersuchungsstellen gewährleistet und
- Voraussetzungen zur nachvollziehbaren Dokumentation geschaffen.

Den Anwendern der Richtlinienreihe werden kennzeichnende Schadensbilder, Schadensbeschreibungen und Schadensmechanismen zum Vergleich mit dem zu untersuchenden Schadensfall zur Verfügung gestellt. Die Richtlinien folgen in ihrer Gliederung der Situation bei der Schadensanalyse: Ausgehend von einem Schadensbild unterstützen sie bei der Findung potenzieller Schadenshypothesen und -mechanismen, um anschließend Hinweise zur Feststellung der Schadensursachen zu geben. Dabei berücksichtigt die Richtlinie nicht nur individuelle Schadensfälle (das heißt singuläre Schäden an einzelnen Produkten), sondern auch Serienschäden (das heißt Schäden, die in gleicher Art an vielen Produkten aufgetreten sind).

Einteilung der Richtlinienreihe

In der Richtlinie VDI 3822 werden Grundlagen, Begriffe, der Ablauf einer Schadensanalyse und ihre Dokumentation behandelt, die sich in dem Grundlagenblatt für die verschiedenen Werkstoffgruppen nicht unterscheidet:

VDI 3822 Schadensanalyse; Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse

In den werkstoffspezifischen Blättern werden Schadensarten, Schadensmerkmale, Schadensabläufe und Schadensmechanismen beschrieben. Dabei werden – die Realität stark vereinfachend – verschiedene Beanspruchungsarten in den Blättern separat behandelt. Dem Schadensanalytiker und der Schadensanalytikerin ist damit die Möglichkeit gegeben, nachzuschlagen, welche Wirkungen die verschiedenen Beanspruchungen auf ein Produkt haben können. Ihm obliegt aber weiterhin die Verantwortung, durch Abgleich mit dem Schadensumfeld die Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Beanspruchungsarten zu bewerten und die Wirkung kollektiver Beanspruchungen zu berücksichtigen.

In den nachfolgend aufgelisteten Blättern werden die verschiedenen Schadensarten, die Schadensmerkmale, die Schadensursachen und die Schadensabläufe im Fall von Schäden an Metallprodukten beschrieben:

Blatt 1.1 Schäden an Metallprodukten durch mechanische Beanspruchungen

- provides definitions of terms,
- designates and describes types of failure in a uniform manner,
- gives examples of the systematic performance of failure analyses,
- ensures the comparability of the results obtained by different analytical laboratories, and
- establishes requirements for comprehensible documentation.

The series of standards provides its users with characteristic failure symptoms, failure descriptions, and failure mechanisms for comparison with the failure at hand. The standards are organised according to the situation encountered in analysing failures – beginning with the failure mode, they go on to provide support in determining potential failure hypotheses and failure mechanisms and, subsequently, provide information for determining the source of the failure. This refers not only to cases of individual failure (i.e. the singular failure of an individual product), but also serial failures (i.e. failures that occur in the same way in many products).

Structure of the series of standards

The standard VDI 3822 deals with fundamentals, terms and definitions, as well as the procedure and documentation of failure analysis, which do not differ in the basic part for the different material groups:

VDI 3822 Failure analysis; Fundamentals and performance of failure analysis

The subsequent parts, dedicated to specific material types, describe types of failure, failure characteristics, failure processes, and failure mechanisms. In extremely simplified terms, the different standard parts each deal with different types of stress. The failure analyst, therefore, is able to refer to these standards in determining which effects different types of stress can have on a product. However, the analyst is still responsible for assessing the probability of the occurrence of individual types of stress by comparing the information provided with the failure environment and taking the effect of collective stress into consideration.

The following parts describe the different types of failure, failure characteristics, failure causes and failure processes for failed metallic products:

Part 1.1 Failures of metallic products caused by mechanical stress

- Blatt 1.2** Schäden an Metallprodukten durch Korrosion in wässrigen Medien
- Blatt 1.3 Schäden an Metallprodukten durch tribologische Beanspruchungen
- Blatt 1.4 Schäden durch thermische Beanspruchungen
- Blatt 1.5 Schäden an geschweißten Metallprodukten
- Blatt 1.6 Flüssigmetallinduzierte Rissbildung

In den nachfolgend aufgelisteten Blättern werden die verschiedenen Schadensarten, die Schadensmerkmale, die Schadensursachen und die Schadensabläufe im Fall von Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten beschrieben:

- Blatt 2.1.1 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch fehlerhafte Konstruktion
- Blatt 2.1.2 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch fehlerhafte Verarbeitung
- Blatt 2.1.3 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch fehlerhafte Werkstoffauswahl und Fehler im Werkstoff
- Blatt 2.1.4 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch mechanische Beanspruchung
- Blatt 2.1.5 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch thermische Beanspruchung
- Blatt 2.1.6 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch tribologische Beanspruchung
- Blatt 2.1.7 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch mediale Beanspruchung
- Blatt 2.1.8 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch Witterungsbeanspruchung
- Blatt 2.1.9 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch mikrobielle Beanspruchung
- Blatt 2.1.10 Bedeutende instrumentelle Analysemethoden für die Schadensanalyse an Kunststoffprodukten

In den nachfolgend aufgelisteten Blättern werden die verschiedenen Schadensarten, die Schadensmerkmale, die Schadensursachen und die Schadensabläufe im Fall von Schäden an Elastomerprodukten beschrieben:

- Part 1.2** Failures of metallic products caused by corrosion in aqueous media
- Part 1.3 Failures on metal products by tribology working conditions
- Part 1.4 Failures caused by thermal loading
- Part 1.5 Failures in welded metallic components
- Part 1.6 Liquid-metal-induced crack formation

The following parts describe the different types of failure, failure characteristics, failure causes and failure processes for failed thermoplastic products made of plastics:

- Part 2.1.1 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by faulty design
- Part 2.1.2 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by faulty processing
- Part 2.1.3 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by an unfavourable choice of material and by defects in the material
- Part 2.1.4 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by mechanical stress
- Part 2.1.5 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by thermal stress
- Part 2.1.6 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by tribology-induced stress
- Part 2.1.7 Defects in thermoplastic products made of plastics caused by chemical stress
- Part 2.1.8 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by weather-induced stress
- Part 2.1.9 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by microbial stress
- Part 2.1.10 Significant instrumental analysis methods for failure analysis of products made of plastics

The following parts describe the different types of failure, failure characteristics, failure causes and failure processes for failed elastomeric products:

Blatt 2.2.1	Schäden an Elastomerprodukten durch Alterung
Blatt 2.2.2	Schäden an Elastomerprodukten durch Fehler bei der Compound-Herstellung
Blatt 2.2.3	Schäden an Elastomerprodukten durch Fertigungsfehler
Blatt 2.2.4	Schäden an Elastomerprodukten durch Fehler bei der Konstruktion
Blatt 2.2.5	Schäden an Elastomerprodukten durch mechanische Beanspruchung
Blatt 2.2.7	Schäden an Elastomerprodukten durch thermische Beanspruchung
Blatt 2.2.8	Schäden an Elastomerprodukten durch mediale Beanspruchung
Blatt 2.2.9	Schäden an Elastomerprodukten durch klimatische Beanspruchung
Blatt 2.2.10	Bedeutende instrumentelle Analysemethoden für die Schadensanalyse an Elastomerprodukten

Alle werkstoffspezifischen Blätter gelten jeweils eigenständig nur zusammen mit dem Grundlagenblatt VDI 3822.

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter www.vdi.de/3822.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie behandelt Schäden durch Korrosion bei Temperaturen, die in der Regel maximal beim Siedepunkt des jeweiligen, zumeist wässrigen Elektrolyten liegen.

Hierbei handelt es sich überwiegend um Korrosionsarten, die als Folge elektrochemischer Reaktionen auftreten. Diese laufen ausschließlich in Gegenwart ionenleitender Phasen (Elektrolytlösungen) ab und bewirken einen elektrolytischen Metallabtrag oder eine Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften.

Korrosionsreaktionen können jedoch auch in Abwesenheit ionenleitender Phasen ablaufen. In diesem Fall handelt es sich um chemische oder metallphysikalische Vorgänge. Diese Richtlinie berücksichtigt Korrosionsarten dieses Typs nicht.

Korrosionsarten, die durch chemische Korrosionsreaktionen bei hohen Temperaturen oder metallphysikalische Reaktionen ausgelöst werden, sind in VDI 3822 Blatt 1.4 und Blatt 1.6 beschrieben.

Bei den in dieser Richtlinie behandelten Korrosionsarten kann zwischen solchen unterschieden werden, deren Initiierung keine mechanische Beanspruchung

Part 2.2.1	Defects on elastomeric products caused by aging
Part 2.2.2	Defects on elastomeric products caused by faulty compounding
Part 2.2.3	Defects on elastomeric products caused by faulty processing
Part 2.2.4	Defects on elastomeric products caused by faulty design
Part 2.2.5	Defects on elastomeric products caused by mechanical stress
Part 2.2.7	Defects on elastomeric products caused by thermal-induced stress
Part 2.2.8	Defects on elastomeric products caused by media-induced stress
Part 2.2.9	Defects on elastomeric products caused by climate-induced stress
Part 2.2.10	Significant instrumental analysis methods for failure analysis of elastomeric products

All material-specific parts are each of them only applicable in conjunction with the basic standard VDI 3822.

A catalogue of all available parts of this series of standards and those in preparation as well as further information, if applicable, can be accessed on the Internet at www.vdi.de/3822.

1 Scope

This standard deals with failures due to corrosion that occur in, for the most part, aqueous electrolytes at temperatures generally below their boiling points.

Most of the types of corrosion discussed are a result of electrochemical reactions. Most of these take place in the presence of ionically conducting phases (electrolyte solutions) and cause the electrolytic loss of metals or the impairment of the material's properties.

Corrosion reactions can also take place in the absence of ionically conducting phases. In such cases corrosion is the result of chemical or metal physical processes. This standard does not address this type of corrosion.

Types of corrosion caused by chemical corrosion reactions at high temperatures or by metal physical reactions are described in VDI 3822 Part 1.4 and Part 1.6.

In the case of the types of corrosion addressed in this standard we can distinguish between types that are initiated without mechanical stress and those for

voraussetzt und solchen, bei denen eine mechanische Belastung des Bauteils Vorbedingung ist. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Bis auf tribochemische Schäden, die in VDI 3822 Blatt 1.3 behandelt werden, sind mechanisch initiierte Korrosionsarten in dieser Richtlinie berücksichtigt.

which mechanical stress on a component is a necessary precondition. It does not claim to be complete.

All types of mechanically initiated corrosion with the exception of tribochemical failures, which will be addressed in VDI 3822 Part 1.3, are considered in this standard.