

Dissertation

Entwicklung einer Werkstoffformulierung zur Robotersanierung von undichten Muffen in Trinkwasserversorgungsleitungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie - E308

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. Christoph Schoberleitner

0326146

Niederpuchheim 16

4901 Ottmang am Hausruck

Wien, am _____

(C. Schoberleitner)

(V.-M. Archodoulaki)

(R. Liska)

Danksagung

Während der Entstehung dieser Arbeit wurde ich von vielen Menschen in direkter aber auch in indirekter Weise unterstützt. Euch allen gebührt großer Dank, denn es ist vollbracht!

Ein besonderes Dankeschön gilt meiner Projektgruppe am Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie an der TU Wien.

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki, herzlichen Dank für die tolle Betreuung und die Unterstützung während der gesamten Dissertation sowie für den ehrlichen und direkten Umgang. Rückblickend hat sich für mich dein Motto „Man wächst mit seinen Herausforderungen“ bewahrheitet. Danke dafür!

Bei Herrn Dr. Thomas Koch und Frau Dr. Sigrid Lüftl möchte ich mich für die Co-Betreuung bedanken. Durch die vielen fachlichen Gespräche konnte ich vor allem im Bereich der experimentellen Versuchsdurchführung von eurer Erfahrung profitieren. Danke!

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Liska, herzlichen Dank für die Begutachtung der Dissertation.

Durch die gemeinsame Teilnahme am Projekt DeWaLoP mit Wiener Wasser und die Teilfinanzierung durch den europäischen Fonds für regionale Zusammenarbeit im Programm zur grenzüberschreitenden Zusammenarbeit Österreich-Slowakei 2007-2013 „Creating the future“ wurde diese Arbeit möglich gemacht. Danke.

Meinen KollegInnen am Institut möchte ich besonders danken. Mit euch waren die letzten drei Jahre mehr als nur eine Dissertationszeit. Die gegenseitige Motivation, gemeinsame Konferenzaufenthalte, Diskussionen bei Kaffee oder Feierabendbier haben ein Arbeitsklima geschaffen, das ich nicht missen möchte, aber mit Sicherheit vermissen werde.

Meine Freunde und Studienkollegen verdienen ebenfalls ein großes Dankeschön. Denn ihr seid es gewesen, die für mich in schwierigen Phasen stets ein offenes Ohr hattet. Aus kurzen Treffen wurden teilweise lange Abende, wo ihr euch so einiges anhören musstet. Sorry dafür und danke dafür!

Großer Dank gebührt meinen Eltern, die mir das Studium als Grundstein für diese Dissertation ermöglicht haben, und meiner ganzen Familie als wichtiger Ruhepol.

Ich danke meinem Freund Lukas, der immer wusste, mich in den richtigen Momenten zu motivieren. Während des Entstehens einer solchen Arbeit gibt es viele Hochs und Tiefs. Vor allem die Tiefs musste er in Form von schlechter Laune ertragen. Dein Beitrag an dieser Arbeit ist größer, als du denkst. Danke dafür!

wenn ich nicht hier bin, bin ich auf'm sonnendeck
(by Meinrad Jungblut – Sonnendeck)

in herzlicher Erinnerung an Christian Wagner

Kurzfassung

Im Rahmen des Projektes „Developing Water Loss Prevention“ (DeWaLoP) wurde ein zusammenfassendes Konzept für die Sanierung undichter Stemmuffen von Graugussrohren erstellt. Dieses Konzept beinhaltet die Entwicklung eines angepassten Dichtungswerkstoffes und eines Roboters, der folgende Aufgaben ausführen soll: Inspektion, Reinigen und Aufbringen des Dichtungswerkstoffes. Diese Dissertation umfasst den Teilbereich des Projektes, der sich mit der Entwicklung, Prüfung und Modifizierung von einem Dichtungswerkstoff für diesen Anwendungsfall befasst.

Die Muffen der ca. 150 Jahre alten Graugussrohre von Wiener Wasser (Magistratsabteilung 31) wurden bis in die 1920er Jahre mit einer Hanfpackung, die mit einem Bleiring verstemmt ist, abgedichtet. Der gequollene Hanf gewährleistet die Abdichtung. Der Bleiring stabilisiert den Hanf in der Muffe und verhindert das Herausdrücken durch den im Rohr herrschenden Druck. Eine Beschädigung des Bleiringes und/oder auch die Zersetzung des Hanfs verursacht Undichtheiten. Dennoch ist der statische und metallurgische Zustand dieser Graugussrohre unkritisch. Die verbleibende durchschnittliche Restlebensdauer ist ausreichend, um eine Sanierung durchzuführen und um auch die Wirtschaftlichkeit dieses Vorhabens zu garantieren. Undichtheiten, also austretendes Wasser unterspült die Rohrbettung. Durch schlechte Bettung werden im Rohr Spannungen induziert, womit die Wahrscheinlichkeit von Rohrbrüchen steigt.

Ein dermaßen spezielles Anwendungsfeld verlangt, dass eine Vielzahl von Anforderungen und Randbedingungen erfüllt werden müssen. Der Dichtungswerkstoff muss trinkwassertauglich sein und somit die nationale Anforderung der ÖNORM B5014-1:2012 erfüllen, um eine Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität zu verhindern. Der Betriebsdruck in den Verteilerleitungen ist im Bereich von 4 bis 6 bar und wird vom Höhenunterschied zwischen Wasserbehälter und Rohrleitungsniveau bestimmt. Durch außerordentliche Ereignisse wie z.B. das Schließen eines Schiebers können Druckstöße mit bis zu 10 bar entstehen. Für eine erfolgreiche Abdichtung ist es notwendig, dass ein Muffenspalt vorhanden ist. Deswegen wurde für die Durchführung der Sanierung eine Spaltbreite von mindestens 5 mm bis maximal 30 mm als Randbedingung gesetzt. Unter Berücksichtigung der genannten Betriebsbedingungen müssen die mechanischen Eigenschaften der Dichtmasse wie Festigkeit und Steifigkeit des Dichtungswerkstoffes ausreichend sein, wobei aber auch ein gewisses Maß an Elastizität für den Ausgleich von minimalen Rohrbewegungen unbedingt erforderlich ist.

Der Vorteil dieses Sanierungskonzeptes ist, dass sämtliche Arbeitsschritte von außen gesteuert und überwacht werden. Unter widrigen Bedingungen im Rohr arbeitende Personen gehören somit der Vergangenheit an. Ein kommerziell angebotenes und funktionierendes Sanierungskonzept für diesen Anwendungsfall ist z.B. die EPDM-Manschette von AMEX®. Diese erfüllt alle gesetzten Anforderungen, jedoch ist die Montage nur mit „Manpower“ möglich. Da diese Problematik schon länger besteht, wurde von Wiener Wasser seit mehreren Jahren nach einer Lösung gesucht. So ist z.B. eine Polyethylen-Manschette mit einem Silan-modifizierten Polymer eingeklebt worden. Dieses weitere angepasste Sanierungskonzept zur

Muffensanierung hat bereits nach zwei Jahren aufgrund von biologischen und Umwelteinflüssen versagt [1].

Gegenstand dieser Dissertation ist die Entwicklung, Prüfung und Modifizierung von einem Dichtungswerkstoff. So wurden in einem ersten Schritt sieben kommerziell erhältliche und von Firmen angebotene Dichtungswerkstoffe mit einem breiten Spektrum an mechanischen und physikalischen Eigenschaften auf ihre Eignung untersucht. Im Zuge der Untersuchungen wurden mechanische Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Elastizitätsmodul, Biegesteifigkeit und Haftzugfestigkeit bestimmt, zusätzlich noch dynamisch-mechanische Analyse, dynamische Differenz Thermoanalyse (best. der Glasübergangstemperatur) und Thermogravimetrie (best. des Abbauverhaltens und des Wassergehaltes). Eine Änderung der mechanischen sowie physikalischen Eigenschaften nach der Auslagerung in Wasser war zu beobachten. Auch die Bearbeitung der Oberfläche der Haftzugproben zeigte Einfluss auf die Haftzugfestigkeit, besonders verbleibender Rost kann diese stark negativ beeinflussen. Aufgrund der Erkenntnisse des Einflusses einer „Grenzschicht“ auf die Haftzugfestigkeit wurden Rohrreinigungsversuche mit Wasserhöchstdruckstrahlreinigung durchgeführt. Die Druckbeständigkeit als wichtiges Kriterium wurde ebenfalls an zwei Dichtungswerkstoffen überprüft, wobei diese nur von einem Epoxid erfüllt wird.

Bei der Applikation eines Dichtungswerkstoffes auf Grauguss liegt die Befürchtung nahe, dass die Adhäsion durch Unterwanderung beeinträchtigt wird. Die zu diesem Zweck durchgeführten Untersuchungen sollten das Langzeitverhalten der Haftung bzw. ob das Epoxid durch Korrosion unterwandert wird, klären. Die quantitative Auswertung der zum Brechen notwendigen Biegespannung nach 14-monatiger Versuchsdauer zeigt, dass weder die Dauer, die Temperatur noch das Medium der Auslagerung, noch die Probengeometrie einen Einfluss auf die Festigkeit des Werkstoffverbundes haben.

Aufbauend auf diese Ergebnisse wurde eine zusammenfassende Prüfmethodik für die Untersuchung des Dichtungswerkstoffes entwickelt. Die beschriebenen Ergebnisse [2, 3] zeigen, dass auf Epoxid basierende Dichtungswerkstoffe Vorteile für diesen Anwendungsfall aufweisen. Duroplaste sind aufgrund ihrer Struktur spröde und verfügen über gute mechanische Eigenschaften wie Druckbeständigkeit, Steifigkeit und Hafteigenschaften. Entgegengesetzt dazu bewirkt die geringe Bruchdehnung, dass kaum Verformungen aufgenommen werden können.

Demzufolge ist die weitere Herausforderung eine angepasste Werkstoffformulierung zu entwickeln, die bei erhöhter Flexibilität nach wie vor über die guten Eigenschaften von Epoxid verfügt. Somit wurde ein im Sanierungsbereich angewendetes Epoxidsystem durch die Zugabe von Zusatzkomponenten modifiziert, um die Flexibilität zu erhöhen. Die Beimengung folgender Zusatzkomponenten ist Bestandteil der Untersuchungsergebnisse: EPDM-Gummimehl, reaktives Flüssigpolymer und Zusatzkomponenten mit epoxidreaktiven-Endgruppen. Zusätzlich wurden zwei auf dem Markt befindliche und bereits modifizierte Epoxide, die für andere Applikationen bereits Verwendung finden, der definierten Prüfmethodik unterzogen.

Die Ergebnisse differenzieren je nach Art der Modifizierung. Der Einfluss von Wasser ist für alle untersuchten Formulierungen groß und muss unbedingt berücksichtigt werden. Der Vergleich mit dem Ausgangs-Epoxid zeigt, dass das Ziel, den Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit aller Formulierungen zu reduzieren, erreicht werden kann. Allerdings, im Gegensatz zu den anderen Formulierungen zeigt die Zugabe von EPDM-Gummimehl keinen positiven Einfluss auf die Erhöhung der Bruchdehnung. Die Aufnahme von Wasser bewirkt einen Weichmachereffekt, wodurch sich mechanische und physikalische Eigenschaften ändern. Eine Applikation der Formulierungen auf Grauguss zeigt, dass die mechanischen Eigenschaften des Verbundes weitaus geringer sind als jene der Formulierung selbst. Somit ist es unerlässlich für diesen Anwendungsfall Haftzugversuche durchzuführen. Eine Formulierung mit reaktivem Flüssigpolymer und ein customized Epoxid zeigten im Haftzugversuch die höchsten Bruchdehnungen. Das Hauptkriterium der Druckbeständigkeit bis zu 10 bar wurde an diesen zwei Formulierungen untersucht. Beide Werkstoffe haben diese Anforderung erfüllt [4].

Für den Einsatz des Dichtungswerkstoffes zur Muffensanierung sind noch weitere anwendungsorientierte Optimierungen wie z.B. das Einstellen der Viskosität oder die Verarbeitung mit dem Roboter notwendig.

Abstract

This research was conducted as part of the project “Developing Water Loss Prevention” (DeWaLoP), which includes a comprehensive concept for repairing leaking lead joint sockets. This concept requires the development of a matched sealing material modification and an in-pipe robot that crawls into water pipes and completes the following tasks: inspection, cleaning and applying the sealant. The goal of this PhD thesis was to develop, test and modify a sealing material for this specific application.

The sockets of the 150 year-old grey cast iron pipes of Vienna’s water supply system were caulked until the 1920s with a hemp pack and a lead ring, which now require replacement. The swollen hemp pack acted as the sealing and the lead ring stabilized the hemp in the socket. A possible displacement of the lead ring and decomposition of the hemp pack eventually cause leakage. However, the static and metallurgical conditions of these grey cast iron pipes are uncritical. Leakage leads to erosion in the pipe bedding and, furthermore, creates stress on the pipe. As a result, the likelihood of pipe breaks increases. Also a financial loss arises in terms of damages to the foundations of roads, buildings and the water supply system.

Such a special situation demands that numerous requirements and boundary conditions are met. The material has to be food safe and comply with the requirements of the national standard ÖNORM B5014-1:2012 in order to prevent the deterioration of its quality. The operating pressure ranges from 0.4 to 0.6 MPa in supply systems and varies with altitude. In the event of closing a gate valve in the transport pipes, the pressure can increase up to 1 MPa. Inexact alignment during assembly may cause rehabilitation problems due to a varying socket gap clearance. A feasible socket gap is necessary for successful rehabilitation. Thus, a 5 to 30 mm gap clearance was set as the boundary condition for the rehabilitation. Considering the above, the mechanical properties like stiffness and strength have to be sufficient. Appropriate elasticity is also required to compensate for elongation due to minimal pipe movements.

The benefit of the rehabilitation method described above is that all the working steps can be completed externally without any workers inside a pipe. There are also other commercially available functional sealing systems. For example, an EPDM sleeve that is clamped into the pipe with stainless steel rings fulfils all of the technical requirements, but manpower is still required for the installation. The issue of leaky pipe joints has existed for a long time and solutions have been sought for years. For example, a customized solution (polyethylene sleeve adhered with a silan modified polymer by workers) was tested. This system failed after two years in operation with both biological and environmental influences causing the failure.

The objective of this PhD thesis was therefore to develop, test and modify a sealing material. As a first step, seven commercial sealing materials with a broad spectrum of mechanical and physical properties were tested. For this purpose, a series of tests were carried out to measure tensile strength, bending and adhesion; in addition, dynamic mechanical analyses, differential scanning calorimetry and thermogravimetric analyses were also conducted. A change in the mechanical and physical properties of these materials after

water exposure could be observed. Furthermore, the surface preparation and remaining contaminants, e.g. rust, can affect the adhesive properties of the sealant. Based on findings about the influence of a "boundary layer" on adhesive tensile strength, pipe cleaning experiments were carried out with high pressure water jet cleaning. The pressure resistance of the sealing material, as an important criterion, was checked using two sealing materials, which can only be achieved by using an epoxy.

By applying a sealing material on cast iron is close to the apprehension, that the adhesion is impaired by corrosion creep. Research on this issue should clarify the long-term behavior of the adhesion and the possible influence of corrosion creep. A qualitative evaluation of the bending strength (which is necessary to break the corrosion sample in three point bending mode) after the experiment's 14-month duration shows that neither the duration of the test, the temperature, the medium nor the sample geometry influence the strength of the composite.

Based on these initial investigations, a comprehensive method of testing for material characterization was developed. Additionally this investigation showed that epoxy materials have proved advantageous for this application. The thermoset materials form a rigid network and largely have proper material properties like pressure resistance, high stiffness and adhesion. Adversely, the high stiffness reduces the materials' capability to absorb relative movements between the pipe segments.

The task is thus to develop a matched material formulation which combines toughness enhancement and good performance of the epoxy material. Therefore, epoxy resin was modified by the addition of different components to improve flexibility. Hence, the addition of EPDM rubber powder (grain size 63-100 μm), reactive liquid polymer (RLP, amine-terminated butadiene-acrylonitrile copolymer) or epoxidized modifiers (flexibiliser with epoxy end-groups) was investigated. The results of tests on two customized materials are also included in the thesis

The effect of the modifications as well as the influence of water absorption on the mechanical and physical properties are analysed in terms of: tensile strength, modulus of elasticity, adhesion performance, pressure resistance, glass transition temperature and water content. A comparison with neat epoxy shows that the modulus of elasticity and strength decreases for all materials. Unlike other tested modification methods, modification with rubber powder did not enhance flexibility. All materials absorb water and a plasticisation effect arises with further changes to the mechanical and physical properties. The application of the sealant on the grey cast iron leads to a reduction of the strain at break (in comparison to the common tensile test of the pure materials) and has to be evaluated. The main requirement of pressure resistance up to 1 MPa was tested on two chosen materials, both of which fulfilled this requirement.

Further application-oriented optimizations are necessary for the final application of the sealing material during socket rehabilitation. For example, adjusting the viscosity and test runs in a real pipe are needed to check the process ability of the material with a robot.

Abkürzungen

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
1K-PUR		Einkomponenten Polyurethan
2D		zweidimensional
2K-PUR		Zweikomponenten Polyurethan
3D		dreidimensional
AG		ausgelagerter Zustand
ATBN		Amin-terminierter Butadien-Acrylnitril Kautschuk
AZ		Ausgangszustand
C-Gehalt	%	Kohlenstoffgehalt
CTBN		Carboxyl-terminierter Butadien-Acrylnitril Kautschuk
d		Tag (engl. day)
DeWaLoP		Developing Water Loss Prevention
DGEBA		Diglycidylether auf Basis von Bisphenol A
DIN		Deutsches Institut für Normung
DMA		Dynamisch-mechanische Analyse
DN	mm	Nenndurchmesser
DSC		Dynamische Differenz Thermoanalyse
DVGW		Deutscher Verband für Gas und Wasser
E'	MPa	Speichermodul - Dynamisch-mechanische Analyse
E''	MPa	Verlustmodul - Dynamisch-mechanische Analyse
E-Modul	MPa	Elastizitätsmodul
EN		Europäische Normen
EP		Epoxid
EPDM		Ethylen-Propylen-Dien Kautschuk
Fe ₃ C		Zementit
Fe-C Legierungen		Eisen-Kohlenstoff Legierungen
HTBN		Hydroxyl-terminierter Butadien-Acrylnitril Kautschuk
ISO		Internationale Organisation für Normung
LM	MPa	Verlustmodul - Dynamisch-mechanische Analyse
m.-%	%	Massenprozent
MA 31		Magistratsabteilung 31 der Stadt Wien, Wiener Wasser
MW		Arithmetischer Mittelwert
NaCl-Lösung		Natrium-Clorid Lösung, Kochsalzlösung
ÖNORM		Norm des Austrian Standards Institute
ÖWAV		Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
PUR		Polyurethan
RLP		Reactive Liquid Polymer, reaktives Flüssigpolymer
SMP		Silan-modifiziertes Polymer
STABW		Standardabweichung
STP		Silan-terminiertes Polymer
tanδ		Verlustfaktor - Dynamisch-mechanische Analyse
T _g	°C	Glasübergangstemperatur

<i>Abkürzung</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
TGA		Thermogravimetrische Analyse
VTBN		Vinyl-terminierter Butadien-Acrylnitril Kautschuk
ZMA		Zementmörtelauskleidung
ε	%	Dehnung
σ	MPa	Spannung

Inhaltsverzeichnis

Titelblatt	
Danksagung	
Widmung	
Kurzfassung	I
Abstract	IV
Abkürzungsverzeichnis	VI
Inhaltsverzeichnis	i
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	1
1.3 Herangehensweise	2
2 Grundlagen	3
2.1 Allgemeine Informationen über das Wiener Trinkwasserversorgungssystem	3
2.2 Die Stemmmuffe	4
2.3 Grauguss und Graugussrohre	4
2.3.1 Gusseisen mit Lamellengraphit, Grauguss bzw. graues Gusseisen	4
2.4 Versagensmechanismen und mögliche Schadensbilder bei Graugussrohren	7
2.5 Verfahren zur Rohr- und Muffensanierung	10
2.5.1 Begriffsdefinitionen	10
2.5.2 Reparaturverfahren	11
2.5.3 Renovierungsverfahren	13
2.5.4 Erneuerungsverfahren	14
3 Werkstoffe und Methoden	16
3.1 Werkstoffe	16
3.1.1 Polyurethan, PUR	16
3.1.2 Silan-modifiziertes Polymer, SMP	17
3.1.3 Epoxid, EP	17
3.1.4 Grundsätzliche Möglichkeiten der Flexibilisierung (Weichmachung)	18
3.1.5 Flexibilisierung von Epoxid	19
3.1.6 Füllstoffe und Viskositätsmodifikatoren	21
3.1.7 Österreichische Bestimmungen zur Trinkwassertauglichkeit und geforderte Prüfungen	21

3.2	Werkstoffcharakterisierung	22
3.2.1	Zugversuch	22
3.2.2	3-Punkt Biegeversuch	22
3.2.3	Haftzugversuch	22
3.2.4	Prüfung der Druckbeständigkeit	23
3.2.5	Dynamisch-mechanische Analyse, DMA	24
3.2.6	Dynamische Differenz Thermoanalyse, DSC	25
3.2.7	Thermogravimetrische Analyse, TGA	25
3.2.8	Korrosionsuntersuchungen	25
4	Ergebnisse	28
4.1	Aufbau und Gliederung des Ergebnisteiles	28
4.2	Charakterisierung von sieben auf dem Markt befindlichen Dichtungswerkstoffen	29
4.2.1	Ausgewählte Dichtungswerkstoffe	29
4.2.2	Bestimmung der Zugeigenschaften	29
4.2.3	Bestimmung der Glasübergangstemperatur	29
4.2.4	Bestimmung des Elastizitätsmoduls	31
4.2.5	Bestimmung des Wassergehaltes	33
4.2.6	Haftzugfestigkeit und Beurteilung der Versagensbilder	37
4.2.7	Dehnungsverhalten von Haftzugproben	45
4.2.8	Korrelation der Bruchdehnung aus Zugversuch und Haftzugversuch	47
4.2.9	Schlussfolgerungen aus den bisherigen Untersuchungen	49
4.2.10	Druckbeständigkeit im Laborversuch	51
4.3	Rohrreinigungsversuche auf der Baustelle	55
4.4	Korrosionsversuche	58
4.4.1	Korrosionsversuche, Auslagerungszeit 3 Monate	58
4.4.2	Korrosionsuntersuchungen, Auslagerungszeit 6 Monate	62
4.4.3	Korrosionsuntersuchungen, Auslagerungszeit 14 Monate	66
4.4.4	Qualitative Beurteilung der max. Biegespannung in Abhängigkeit von der Auslagerzeit und Probenart	72
4.5	Modifizierung von Epoxidharzen	74
4.5.1	Modifizierungen	74
4.5.2	Charakterisierung der modifizierten Epoxide	76
4.5.3	Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen der modifizierten Epoxide	94

5	Diskussion der Ergebnisse	96
6	Verzeichnisse	104
6.1	Abbildungen	104
6.2	Tabellen	111
6.3	Referenzen	116
7	Anhang	120
7.1	Anhang zum Kapitel „Charakterisierung von sieben auf dem Markt befindlichen Dichtungswerkstoffen“ - (Kapitel 4.2)	120
7.2	Anhang zum Kapitel „Korrosionsversuche“ - (Kapitel 4.4)	126
7.3	Anhang zum Kapitel „Modifizierung von Epoxidharzen“ - (Kapitel 4.5)	127
	Curriculum Vitae	132

1 Einleitung

1.1 Motivation

Undichte Muffen von Graugussrohrleitungen sind bereits seit längerer Zeit eine Schwachstelle im Transportleitungssystem von Wiener Wasser, wo sich in diesen Rohrab-schnitten nicht zu vernachlässigende Wasserverluste ergeben.

Laut der Mitteilung „Antworten auf die Herausforderungen von Wasserknappheit und Dürre in der Europäischen Union“ [5] von der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat beträgt das Wassereinsparpotential ca. 20 %. Um dieses Potential auszuschöpfen, muss nicht nur der unachtsame Umgang mit der Ressource verhindert werden, sondern auch der Wasserverlust in Grenzen gehalten werden. Dadurch kann man zukünftig eine faire Wasserversorgung in allen Mitgliedsländern gewährleisten [5].

Trotz einiger Pilotprojekte der Wiener Wasserwerke zur Abdichtung von Leckstellen konnte bisher keine nachhaltige Sanierungsmaßnahme entwickelt werden. Es sind zahlreiche Methoden zur Sanierung von Trinkwasserrohren bekannt. Allerdings hat sich in der Praxis gezeigt, dass die Anwendung dieser Methoden zu keiner dauerhaften Lösung führt oder insgesamt sehr teuer und aufwendig durchzuführen ist.

Um nun die Entwicklung einer nachhaltigen Sanierungsmethode für die nachträgliche Überbrückung von undichten Muffen voranzutreiben, wurde von Wiener Wasser das Projekt „Developing Water Loss Prevention - DeWaLoP“ gestartet. Dieses Projekt läuft im Rahmen des europäischen Fonds für regionale Zusammenarbeit im Programm zur grenzüberschreitenden Zusammenarbeit Österreich-Slowakei 2007-2013 „Creating the future“ und wird davon teilfinanziert. Eines der Ziele des Projektes DeWaLoP ist die Sanierung von lecken Muffen mit Hilfe eines eigens entwickelten Roboters, welcher eine speziell dafür zusammengestellte Dichtmasse appliziert. Die Aufgaben des Roboters liegen darin, den Muffenbereich zu inspizieren und für die Applikation der Dichtmasse vorzubereiten. Die Innovation besteht darin, dass „mannlos“ und grabenlos gearbeitet wird: mannlos, d.h. die Notwendigkeit von Personal im Rohr ist nicht gegeben, und grabenlos bzw. teilweise grabenlos, d.h. ohne das Rohr vollständig freizulegen. Es müssen nur entsprechende Zugänge zum Rohr gegraben werden. Die Dichtmasse muss nicht nur die technischen Anforderungen hinreichend erfüllen, sondern auch für die Applikation durch den Roboter optimiert werden.

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung dieser Dissertation ist die Formulierung eines geeigneten Werkstoffes zur Muffensanierung für unter Druck betriebene Graugussrohre. Der entwickelte Dichtungswerkstoff für so ein spezielles Anwendungsgebiet muss einer Reihe von Systemeigenschaften genügen und gewisse Randbedingungen erfüllen. Neben Lebensmitteltauglichkeit, Wasserbeständigkeit und einer Lebensdauer von mind. 50 Jahren muss der Dichtungswerkstoff eine Fülle an mechanischen und physikalischen Eigenschaften wie z.B. ausreichende Steifigkeit und Festigkeit (Rohrinnendruck von bis zu 10 bar), entsprechende Elastizität (Ausgleich von minimalen Rohrbewegungen), passende Glasübergangstemperatur, etc. aufweisen. Der Einsatz eines ungeeigneten Dichtungswerkstoffes in dieser Umgebung mit unbekannten Umwelteinflüssen (z.B. mikrobiologische Einflüsse) kann bereits nach zwei Jahren zu einem Versagen führen [1]. Weitere Herausforderungen sind die Korrosion und die Oberflächenvorbereitung im

Muffenspalt für eine entsprechend langfristige Anhaftung der Dichtmasse. Die Verarbeitbarkeit des Dichtungswerkstoffes mittels Roboter muss ebenfalls gewährleistet sein. Die variierende Breite des Spaltes in der Muffe stellt eine Einschränkung für diese Sanierungsmethode dar. Denn aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Verlegung kann der Fall auftreten, dass der Muffenspalt nicht vorhanden ist (d.h. Spitze des Rohres ist auf Anschlag in der Muffe) und somit die Sanierungsmethode nicht greift. Eine Variation der Spaltbreite über den Umfang (durch schiefe Rohrverlegung) kann ebenfalls zu Schwierigkeiten bei der Sanierung führen. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Anpassbarkeit der am Roboter angebrachten Werkzeuge zu erwähnen. Aufgrund dessen wurde die Randbedingung festgelegt, dass ausschließlich Spalte mit einer Breite im Bereich von 5-30 mm saniert werden. Für den Fall, dass eine Muffe nicht durch die „DeWaLoP“-Methode saniert werden kann, könnte zum Beispiel die bereits langjährig im Einsatz befindliche Innenmanschette (AMEX®-10, siehe Kapitel 2.5.2) zum Einsatz kommen.

1.3 Herangehensweise

Zu Beginn der Arbeit wurden Systemeigenschaften und Randbedingungen (siehe Kapitel 1.2) definiert, um ein Anforderungsprofil von dem zu entwickelnden Dichtungswerkstoff zu erstellen. Weiters wurde eine Recherche über bestehende Sanierungsverfahren (siehe Kapitel 2.5) durchgeführt und diese Verfahren evaluiert. Der nächste Schritt war eine Auswahl und Entwicklung von Methoden zur Werkstoffprüfung, um z.B. den Wassereinfluss auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften, Druckbeständigkeit oder die Haftzugfestigkeit zu bestimmen. Darüber hinaus wurden Korrosionsuntersuchungen durchgeführt, um das Langzeitverhalten der Haftung von Epoxid auf Grauguss, in Wasser, zu evaluieren. Im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung wurden sieben kommerziell erhältliche und von Firmen empfohlene Dichtungswerkstoffe auf ihre Eignung für den gegebenen Anwendungsfall untersucht. Aufbauend auf den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurde im Labor und gemeinsam mit Herstellern von Epoxidformmassen an der Elastifizierung gearbeitet und eine angepasste Formulierung eines Dichtungswerkstoffes entwickelt. Zur Werkstoffcharakterisierung wurden die in Tabelle 1 angeführten Methoden angewendet mit der Absicht, die folgenden Ergebnisse zu erlangen.

Tabelle 1: Methoden zur Werkstoffcharakterisierung

Methoden zur Werkstoffcharakterisierung	erhoffte Ergebnisse
Zugversuch nach DIN 527	grundsätzliche Charakterisierung
Dynamisch-mechanische Analyse	Elastizitätsmodul, Glasübergangstemperatur
Thermogravimetrische Analyse	Wassergehalt, Füllstoffgehalt, Abbauverhalten
Dynamische Differenz Thermoanalyse	Glasübergangstemperatur
Haftzugversuch	Festigkeit der Haftung auf Grauguss und der Einfluss von Oberflächenbearbeitung zur Bestimmung der Reinigungsmethode
Druckversuch	Druckbeständigkeit bis 10 bar, Haftung bei hohem Druck
Korrosionsversuch	Langzeitverhalten - Beeinträchtigung der Haftung durch Korrosion in Wasser
Viskosität	für den Roboter optimierte Dichtmasse

2 Grundlagen

2.1 Allgemeine Informationen über das Wiener Trinkwasserversorgungssystem

Die Trinkwasserversorgung der österreichischen Bundeshauptstadt Wien wird durch zwei Hochquellwasserleitungen sowie durch mehrere Grundwasserspeicher gewährleistet (siehe Abbildung 1). 95 % des Wasser-Jahresverbrauchs der Stadt werden mit Hochquellwasser gedeckt und müssen aufgrund der großflächigen Quellenschutzgebiete nicht mehr aufbereitet werden. Täglich werden ca. 590 000 m³ Trinkwasser gewonnen, welches in die Bundeshauptstadt fließt und dort in 32 Wasserbehältern mit einem Speichervolumen von 1 600 000 m³ gesammelt wird. Derzeit beträgt der durchschnittliche Tagesverbrauch ca. 375 000 m³ und somit ist in den Wasserbehältern Trinkwasser für vier Tage vorrätig.



Abbildung 1: Trinkwasserversorgung der Stadt Wien, (Quelle: <http://www.wien.gv.at/wienwasser/versorgung/weg/>, Zugriff: 25.03.2013)

Von dort aus wird das Wasser über das Hauptrohrsystem in der Stadt verteilt. Der Druck in diesen Transportleitungen kann in dem Fall, dass ein Haupthahn geschlossen wird, auf bis zu 10 bar steigen. Der Druck in den Verteilerleitungen ist abhängig vom Höhenunterschied zwischen Wasserbehälter und Seehöhe des Versorgungsgebietes. Dadurch wurde das Rohrsystem der Stadt in verschiedene Druckzonen eingeteilt in denen Drücke von 4 - 6 bar herrschen [6].

Die Länge des gesamten Trinkwasserleitungssystems in Wien beträgt ca. 3280 km, wovon jährlich ca. 0,6 bis 0,8 %, also ca. 20 bis 25 km saniert werden können. Aufgrund von massiven baustellenbedingten Störungen des Verkehrs sowie mangelnden finanziellen Mitteln ist eine Steigerung des Sanierungsumfanges nicht möglich.

Der Wasserverlust des Wiener Trinkwasserleitungssystems kann mit ca. 8 % des Jahresverbrauchs beziffert werden. Ungefähr 100 km des Hauptrohrsystems bestehen heute

noch aus Graugussrohren, die am Ende des 19. Jahrhunderts verlegt wurden. Diese Rohre sind nur äußerst schwer oder gar nicht zugänglich, z.B. aufgrund von Überbauungen oder deren Lage unter Hauptverkehrsadern. Die statische Lebensdauer von Graugussrohren kann mit mehr als 150 Jahren angenommen werden. Jedoch führt nach über hundertjähriger Einsatzdauer die damals standardmäßig ausgeführte Muffenverbindung zu Problemen.

2.2 Die Stemmmuffe

Die sogenannte Stemmmuffe besteht zum einen Teil aus einem Hanfstrick und zum anderen Teil aus einem eingestemmt Bleiring (siehe Abbildung 2). Der quellende Hanf dehnt sich nach allen Richtungen aus, füllt alle Hohlräume, und das Austreten von Wasser ist nicht mehr möglich. Das Verstemmen der Muffe mit Blei dient dazu, den Hanf vor Verschmutzungen und gegen Herausdrücken durch den Innendruck zu schützen. Diese Rohrverbindung ist dicht und in Grenzen abwinkelbar.

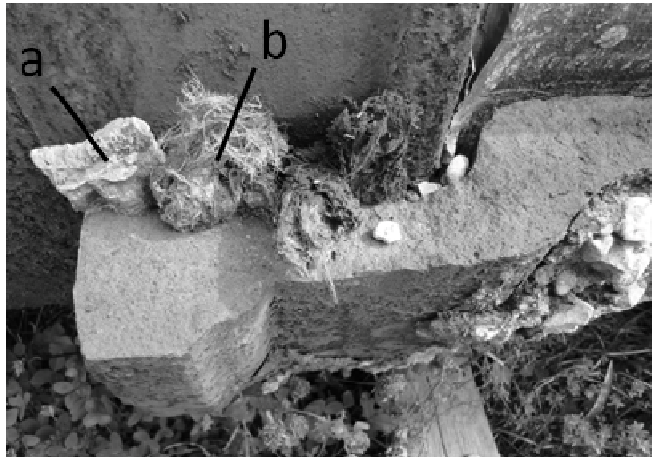


Abbildung 2: Stemmmuffe, a: Bleiring, b: Hanfstrick

Bodenbewegungen verursachen das Auftreten von großen Kräften in der Muffe. Durch die hohe Belastung kriecht das verformbare Blei und baut Spannungen ab, die zu Rohrbrücken führen können. Jahreszeitlich bedingte Bodenbewegungen, Winkeländerungen und Druckstöße in Rohrleitungen großer Nennweiten führen zur Beschädigung bzw. zum Herausdrücken der Bleiverstemmung. Mikroorganismen beginnen den Hanf abzubauen, der sozusagen in der Muffe verrottet. Die Kombination dieser beiden Schadensmechanismen führt dazu, dass die Stemmmuffe undicht wird und Wasser aus der Rohrleitung austritt und möglicherweise die Bettung beeinträchtigt [7].

2.3 Grauguss und Graugussrohre

2.3.1 Gusseisen mit Lamellengraphit, Grauguss bzw. graues Gusseisen

Allgemein werden mit dem Begriff Gusseisen Eisenwerkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt von mehr als 2 % bezeichnet. Eisen und Kohlenstoff bilden eine intermediäre Phase aus Zementit (Fe_3C). Durch langsame Abkühlung und/oder lange Haltezeiten zerfällt das Fe_3C in Eisen und Kohlenstoff. Technisch bedeutend sind Fe-C Legierungen bis zu einem Kohlenstoffgehalt von ca. 5 %. Eine wesentliche Wirkung des Kohlenstoffes ist, dass mit zunehmendem Gehalt die Schmelztemperatur abnimmt [8].

Durch die langsame Abkühlung von Gussstücken erstarrt die Schmelze überwiegend im stabilen System. Dabei wird der Kohlenstoff vorwiegend als Graphit unterschiedlicher Form ausgeschieden. Hier wird zwischen Gusseisen mit Lamellengraphit, Vermiculargraphit und Kugelgraphit unterschieden. Genauen Aufschluss darüber liefert die Norm „Mikrostruktur von Gusseisen - Teil 1: Graphitklassifizierung durch visuelle Auswertung“, EN ISO 945-1 [9]. Grauguss ist durch die Norm „Gießereiwesen - Gusseisen mit Lamellengraphit“,

DIN EN 1561 [10] definiert. Metastabile Erstarrung von Eisen führt zu in Zementit gebundenem Kohlenstoff. Durch die weiß aussehende Bruchfläche spricht man hier, bei einem C-Gehalt von ca. 2,4 bis 4,5 %, von Weißem Gusseisen und bei einem C-Gehalt von weniger als 2 % von Stahlguss.

Die mechanischen Eigenschaften von Grauguss werden hauptsächlich durch folgende Einflüsse bestimmt:

- Aufbau des metallischen Grundgefüges
- Art der Graphitausscheidung

Prinzipiell werden die Eigenschaften durch das Grundgefüge beeinflusst. Perlitisches Gefüge hat eine höhere Festigkeit als ferritisches Gefüge. Graphitausscheidungen beeinflussen das mechanische Verhalten des Werkstoffes durch deren Menge, Verteilung sowie Größe und Form des Graphits. Gusseisen mit lamellarem Graphit kann nur geringe Zugkräfte übernehmen, da die Lamellen innere Kerben darstellen und dadurch Spannungskonzentrationen auftreten, die zum Werkstoffversagen führen (siehe Abbildung 3). Aufgrund der vielen „inneren Kerben“ ist lamellarer Grauguss gegen zusätzliche äußere (konstruktiv gegeben) Kerben nicht so empfindlich wie etwa Stahl. Durch den heterogenen Gefügebau ist Grauguss mit Lamellengraphit kaum verformungsfähig. Weiters zeigt Grauguss ein sehr gutes Dämpfungsverhalten. Schwingungen klingen im Gegensatz zu Stahl in einem Viertel der Zeit ab. Kugelförmige Graphitausscheidungen führen zu einer homogenen Spannungsverteilung im Gefüge und somit sind auch die höhere Zugfestigkeit und ein höheres Maß an Verformungsfähigkeit erklärbar [8, 11, 12].

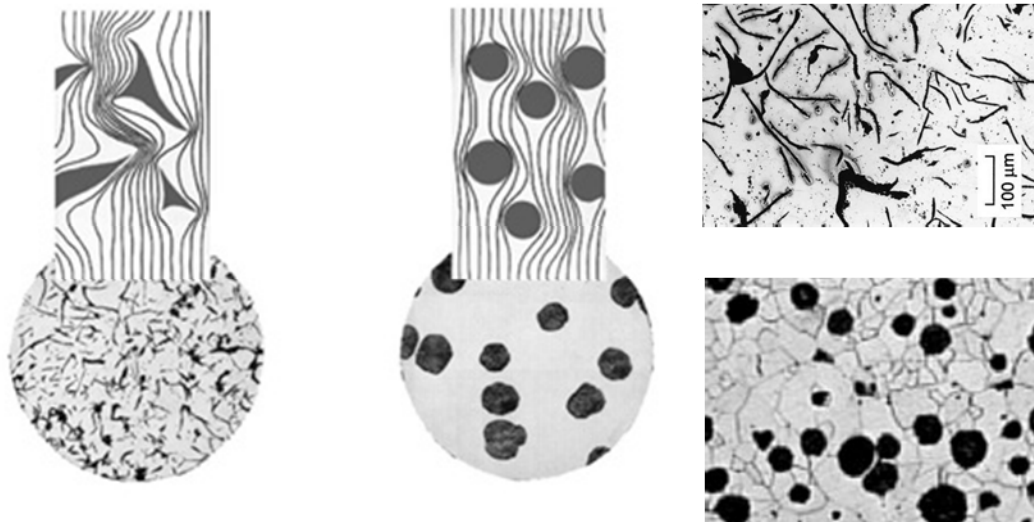


Abbildung 3: Graphitausscheidungen; links: Spannungslinien in Abhängigkeit der Graphitausbildung [11]; rechts: Gefügebild von Gusseisen mit Lamellengraphit [13] und Kugelgraphit [11]

Die inkompressiblen Graphitlamellen von Grauguss können auf Druck um ca. ein Vierfaches höher belastet werden als auf Zug. Dieses unterschiedliche Verhalten von Zug- gegenüber Druckbelastung beeinflusst auch den Elastizitätsmodul. Der E-Modul hängt sowohl von der Höhe und Art der Beanspruchung als auch von der Festigkeit der Graugussorte ab (siehe Abbildung 4). Der Elastizitätsmodul ist in der Druckzone, bei einem auf Biegung beanspruchten Rohr, bei weitem höher als in der auf Zug beanspruchten Zone [7, 8, 11, 12].

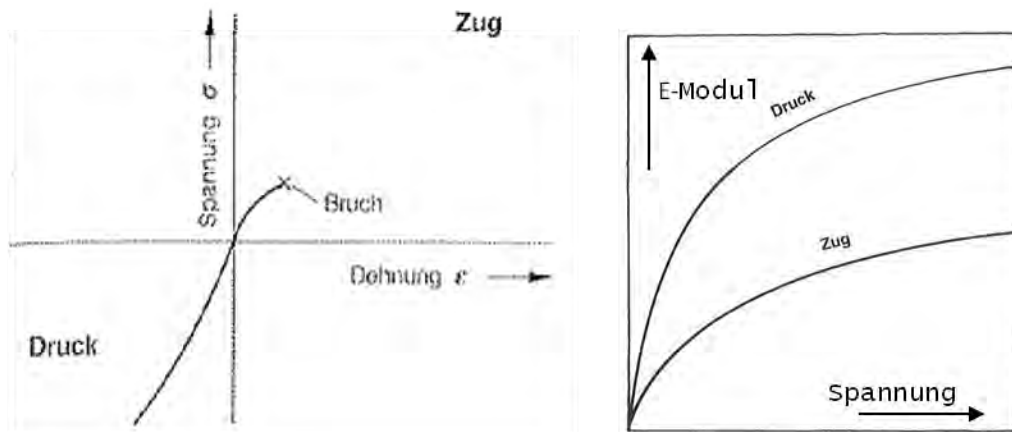


Abbildung 4: Zug- und Druckabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Grauguss mit Lamellengraphit [8]

An Graugussrohren durchgeführte Biegeversuche zeigen die Abhängigkeit der Bruchzahlen vom Rohrdurchmesser. Das Widerstandsmoment ist ebenfalls in Abhängigkeit von der Nennweite aufgetragen (siehe Abbildung 5). Graugussrohre unter einer Nennweite DN 100 sind sehr bruchanfällig. Steigt der Nenndurchmesser über DN 150, sind kaum mehr nennenswerte Unterschiede in der geringen Bruchhäufigkeit zu sehen. Ein Grund dafür ist das mit dem Durchmesser stark ansteigende Widerstandsmoment [7]. Diese sinkende Bruchhäufigkeit bei zunehmendem Rohrdurchmesser von Graugussrohren wird auch in [14] und [15] anhand von statistischen Daten gezeigt.

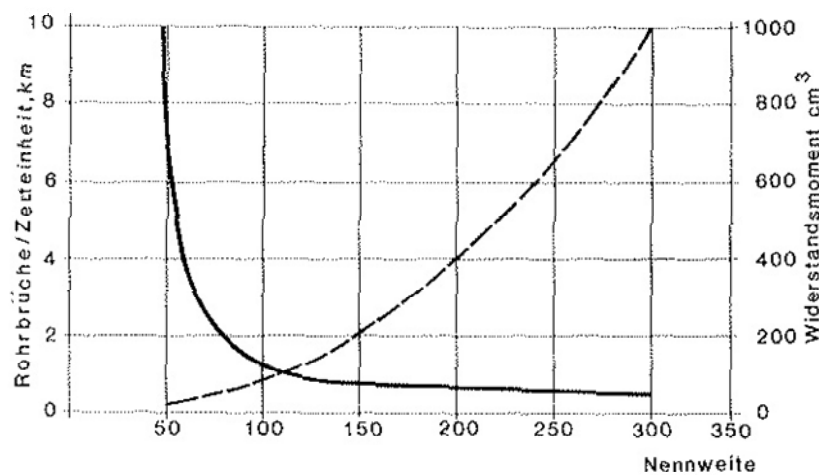


Abbildung 5: Einfluss des Rohrdurchmessers auf Rohrbrüche und Widerstandsmoment [7]

2.4 Versagensmechanismen und mögliche Schadensbilder bei Graugussrohren

Ein Versagen bzw. Gebrechen in einem Graugussrohrsystem wird meist durch eine Kombination von unterschiedlichen Versagensmechanismen, die über einen längeren Zeitraum auf das Rohr einwirken, eingeleitet. Der Zeitpunkt des Versagens wird dann durch ein einzelnes, vielleicht auch außergewöhnliches Ereignis festgelegt. Prinzipiell können lt. [16] folgende Hauptgründe für ein Rohrgebrehen genannt werden:

- unzureichende Planung
- unsachgemäße Verlegung
- Druckanstiege und Druckstöße
- Bodenbewegungen bzw. Bodensetzungen
- Korrosion
- Temperaturschwankungen
- fertigungsbedingte Defekte im Rohr
- Belastungen von außen

Unzureichende Planung: Die angemessene Planung eines Leitungssystems umfasst den Bereich von Bodenanalysen zur Korrosionsabschätzung, Art und Bauweise der Bettung oder die Verlegetiefe des Rohres. Aber auch die Betriebsverhältnisse sind bereits bei der Planung einer Rohrleitung zu beachten [16]. Öffnungs- und Schließzeiten von Absperrorganen sowie plötzlich eintretende Betriebsfälle wie z.B. Pumpenstillstände und dadurch hervorgerufene dynamische Druckschwankungen müssen beachtet werden. Eventuell müssen Vorkehrungen in Form von Anlagen zur Begrenzung von dynamischen Druckschwankungen getroffen werden [17]. Einfach gesagt muss ein Rohr folgenden Belastungen standhalten und auf diese Belastungen ausgelegt sein: Kräfte durch innere Druckbeaufschlagung, Kräfte durch Druckbelastung von außen, Biegebelastung und auf Spannungen induziert durch Bodenbewegungen oder Temperaturänderungen [18].

Bei der **Verlegung** von starren bzw. spröden Rohren ist zu beachten, dass in der Rohrbettung alle größeren Steine und gröberes Geröll entfernt sind, um kleine Auflagerpunkte am Rohr zu vermeiden. Solche Auflagerpunkte führen zur Erhöhung der Spannung durch Biegung (resultieren in einer Erhöhung der axialen Zugspannungen) im Rohr mit der möglichen Folge eines Rohrbruches [16, 19].

Druckschwankungen im Rohrleitungssystem werden durch Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit, z.B. durch tageszeitlich bedingte Verbrauchsschwankungen, hervorgerufen und können im Bereich von Schwachstellen bereits zu Schäden führen. Solche Änderungen sind aber auch infolge von Anfahr- und Abstellvorgängen unvermeidbar, sollten aber angepasst und langsam geschehen. **Druckstöße** werden insbesondere durch rasche Durchflussänderungen wie z.B. durch schnelles Schließen und Öffnen von Absperrorganen oder unerwartet eintretende Ereignisse wie ein Pumpenstillstand in der Rohrleitung verursacht [16, 17].

Bodenbewegungen werden meistens auf folgende Eigenschaft von Erdreich bzw. Schüttmaterial im Rohrbereich zurückgeführt: Quellen bei Nässe und Schrumpfen bei Trockenheit. Weiters führen Unterschiede des Bodenaufbaues (Übergang zwischen einzelnen

Bodenschichten) im Rohrbereich durch unterschiedliche Feuchtigkeitsaufnahme und damit verbundene Bewegungen zu ungleichmäßiger Belastung [16].

Bei der **Korrosion** wird zwischen Korrosion von innen und von außen unterschieden, wobei man Korrosionsvorgänge wiederum in chemische oder elektrochemische Reaktionen einteilen kann. Zum Beispiel finden an erdverlegten Graugussrohren folgende Korrosionsmechanismen statt: chemische Korrosion durch korrosive Stoffe in Wasser, galvanische Korrosion durch schlechte Auswahl der Werkstoffpaarungen, Streustromkorrosion oder bakterielle anaerobe Korrosion [16]. Von Gedge wird in [20] detailliert die Korrosion von Grauguss in Trinkwasserleitungen beschrieben. McNeil beschreibt in [21], dass die Korrosion in Rohrleitungen extrem kompliziert ist und von rohrleitungsspezifischen physikalischen, chemischen und biologischen Einflüssen abhängt. Bei Graugussrohren im Speziellen treten hauptsächlich Lochkorrosion und Spongiose in Erscheinung [18]. Wobei Grauguss aufgrund der heterogenen Struktur (Graphitausscheidungen in Lamellenform) weitgehend unempfindlicher gegen Lochkorrosion ist als Stahl. Diese heterogene Struktur führt jedoch auch dazu, dass eine spezielle Korrosionserscheinung – die sogenannte Spongiose – beim Grauguss auftritt. Spongiose (auch Graphitierung genannt) ist eine selektive Korrosion des Gusseisens. Ferrit und Zementit korrodieren und werden in der nicht korrodierenden Graphitstruktur eingelagert. Dieser Prozess geht ohne äußere Formänderung vonstatten. Der Grauguss verliert in diesem Bereich vollständig seine Festigkeit und es ist möglich, diesen mit einem Messer zu schneiden [22].

Fitzgerald zeigt in [23], dass die Gebrechen, die durch Korrosion ausgelöst werden, mit dem Alter des Rohres zunehmen. Im Gegensatz dazu verläuft die Anzahl von Schäden, die durch andere Mechanismen verursacht werden, meist über die Lebensdauer des Rohres konstant. Schadensfälle, verursacht durch Korrosion, treten an allen Rohrdurchmessern von Graugussrohren gleich häufig auf [18].

Temperaturschwankungen führen dazu, dass Graugussrohre bruchanfälliger werden. Die meisten Gebrechen finden statt, wenn die Temperaturen extreme Werte annehmen. Während Hitzeperioden werden die Rohrleitungen aufgrund des hohen Wasserverbrauchs meist an der oberen Leistungsgrenze betrieben, was dann zu Schäden führt. Extreme Temperaturen führen zu Spannungen im Rohr, die sich mit anderen Belastungen überlagern, wodurch mehr Gebrechen auftreten [16]. Auch Habibian beschreibt in [24] sehr deutlich den Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Gebrechenshäufigkeit, vor allem wenn Temperaturänderungen auftreten. Rohre können sich in axialer Richtung kaum bewegen. Somit wird bei Temperaturschwankungen eine Spannung in axialer Richtung induziert, die sich mit externen und internen Belastungen überlagert. Plötzliche Temperaturänderungen führen zu Spannungen zwischen Rohrrinnen- und Außenwand.

Für die Fertigung von Graugussrohren gab es um 1900 zwei gängige Methoden: das Schleudergussverfahren und das Sandformgießen in stehenden Formen mit Kern [25]. Daraus resultierende **fertigungsbedingte Defekte** sind unter anderem Einschlüsse oder Lunker im Grauguss, die während des Fertigungsprozesses entstehen und diesen schwächen. Eine weitere Möglichkeit solcher Defekte sind Einschlüsse im Gefüge wie zum Beispiel Eisenphosphide (Eisenphosphid ist viel spröder als Grauguss). Es traten aber auch ganz grundlegende Fehler, wie starke Schwankungen der Wandstärke, durch ungenaue Zentrierung

des Kernes in der Form auf [18]. Rohre mit solchen Defekten sollten durch eingehende Rohrprüfung bereits vor der Verlegung ausgemustert worden sein. Diese stellen nicht nur eine Sollbruchstelle im Rohr dar, sondern bieten auch Angriffspunkte für Korrosion [16].

Belastungen von außen können zum Beispiel durch Baumaßnahmen im Bereich des Rohres entstehen. Auch das Verkehrsaufkommen von darüber liegenden Straßen verursacht Belastungen auf das Rohr [16]. In diesem Zusammenhang wurde von Wiener Wasser im Jahr 2009 eine Studie in Auftrag gegeben, die den Einfluss des Verkehrs auf die Gebrechenshäufigkeit von Graugussrohren untersucht. Darin wird gezeigt, dass darunter liegende Rohrleitungen vermehrt im Kreuzungsbereich und hier speziell unter Fahrspuren mit erhöhtem LKW-Verkehrsaufkommen versagen [26].

Bei Graugussrohren zeigen sich laut [18, 27] folgende **Schadensbilder** (siehe Abbildung 6):

Umfangsbrüche treten hauptsächlich bei Graugussrohren mit Durchmessern von weniger als 380 mm aufgrund von Biege- oder Zugkräften auf. Rohre mit größerem Durchmesser haben ein zu großes Widerstandsmoment, wodurch kaum Umfangsbrüche auftreten.

Muffenrisse treten vermehrt bei Rohren mit kleinen Durchmessern auf, die mit einer Leadite Dichtung versehen wurden (Bleiersatz in den 1940er und 1950er Jahren). Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnung kann es bei tiefen Temperaturen zu Muffenrissen kommen.

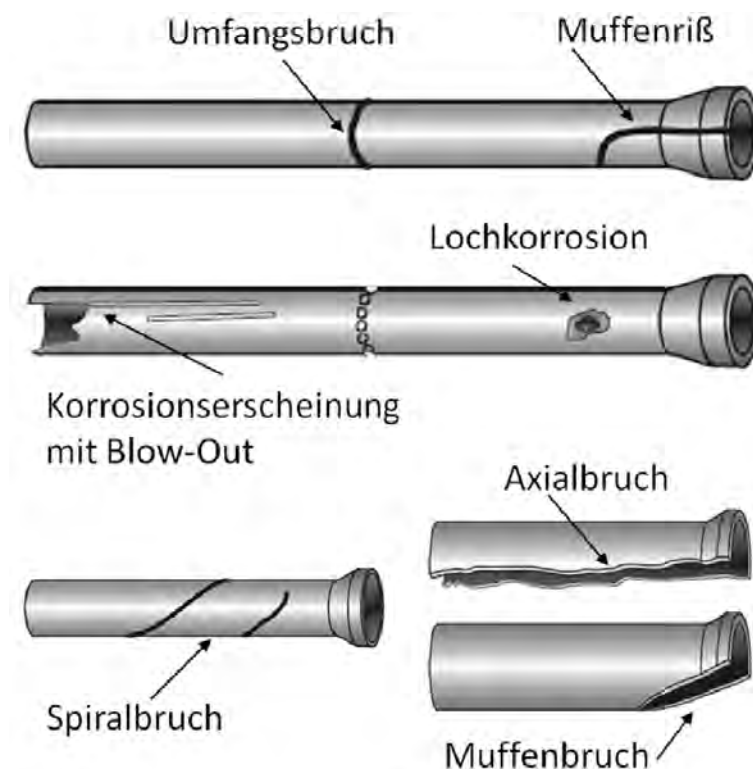


Abbildung 6: Erscheinungsformen von Brüchen bei Graugussrohren; oben: Umfangsbruch; Mitte: Korrosionserscheinungen mit Blow-out und Lochkorrosion (sind beispielsweise auf einem Rohr gemeinsam dargestellt – treten nicht gezwungenermaßen gemeinsam auf); unten links: Spiralbruch; unten rechts: Muffen- oder Axialbruch (Abbildung abgeändert aus: J.M. Makar, R. Desnoyers, S.E. McDonald, Failure modes and mechanisms in gray cast iron pipe, in: Int. Conf. on Underground Infrastructure Research, Ontario, 2001, pp. 1-10)

Lochkorrosion schwächt die Rohrwand, bis es durch den Innendruck des Rohres zu einem sogenannten „Blow-out“, also zu einem Durchbruch der Rohrwand kommt. Auch ein Splitterbruch in diesem Bereich ist möglich.

Axialbrüche treten fast ausschließlich bei Rohren mit großen Durchmessern auf. Gründe dafür sind der Rohrrinnendruck und Druckbelastungen von außen. Ist der Riss erst entstanden, wird er über die ganze Rohrlänge entlang laufen.

Spiralbrüche werden bei Rohren mit Durchmessern von 380 - 500 mm beobachtet. In [18] wurden zwei Fälle dokumentiert, wo diese Versagensform Druckstößen zugeordnet werden konnte. Allgemein deutet darauf hin, dass eine Kombination von Biegebelastung und innerer Druckbelastung für diese Art des Versagens verantwortlich ist.

Ebenfalls bei Rohren mit großen Durchmessern werden Muffenbrüche beobachtet. Dabei wird ein Teil der Muffe buchstäblich abgeschert. Eine mögliche Ursache dafür ist, wenn das Rohrende in die Muffe gedrückt wird und es zu einer Überbelastung kommt, jedoch noch wahrscheinlicher sind auftretende Biegekräfte.

Rajani und Kleiner beschreiben in [28] ebenfalls, dass bei Rohren mit großen Durchmessern hauptsächlich Axial- und Muffenbrüche auftreten. Da diese Brüche aber meist plötzlich ohne Vorwarnung auftreten und bei Begutachtung der Bruchflächen keine Anzeichen von Korrosion zu finden sind, kann auch Ermüdung der Grund für derartige Rohrbrüche sein. Ermüdung tritt auf, wenn Belastungen immer wieder in unterschiedlicher Höhe auftreten und nie ein Niveau erreichen, die einen Bruch auslösen, zum Beispiel durch Betriebsdruckschwankungen, jahreszeitlich bedingt auftretende Belastungen oder auch durch Verkehrsbelastung.

2.5 Verfahren zur Rohr- und Muffensanierung

Dieses Kapitel zeigt einen Überblick über die gängigsten und derzeit in der Praxis verwendeten Sanierungsverfahren.

2.5.1 Begriffsdefinitionen [29, 30]

Die Einteilung bzw. Begriffsbestimmungen für Sanierungsverfahren von Leitungen sind im ÖWAV – Regelblatt 28 [30] (ÖWAV – Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband) wie folgt definiert.

Werden örtlich begrenzte Schäden behoben, ohne einer Veränderung der Bauwerkstruktur, spricht man von einer **Reparatur**.

Eine **Renovierung** schließt Maßnahmen (nicht statisch tragend) ein, mit denen eine Verbesserung der Funktionsfähigkeit von Leitungen erreicht wird, und zwar unter vollständiger oder teilweiser Einbeziehung der ursprünglichen Substanz.

Bei der **Erneuerung** werden neue Leitungen in der bisherigen oder in einer anderen Linienführung hergestellt und sind unabhängig vom Bestand selbst statisch tragend. Diese werden aus Gründen der Vollständigkeit angeführt und im Folgeteil kurz erklärt.

2.5.2 Reparaturverfahren

Durch eine intensive Literaturrecherche von auf dem Markt befindlichen und in der Praxis angewendeten Verfahren zur Rohr- und Muffensanierung kann im folgenden Kapitel darüber ein Überblick gegeben werden. Es gibt sehr wohl auch Bücher im Bereich der Instandsetzung von Rohrleitungen. Jedoch war hier zusätzlich eine Internetrecherche notwendig, um auch die Situation am Markt, bzw. welche Methoden sich in der Praxis bewährt haben, zu eruieren. Diese Methoden werden vorrangig im Bereich der Kanalsanierung angewendet. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht jedoch nicht.

Mit einem selbstfahrenden und ferngesteuerten **Roboter** werden bildüberwacht (Kamerasystem) Schadstellen repariert.



Abbildung 7: Roboterverfahren; links: Verpressen von Dichtmasse in einen Spalt; rechts: Roboter mit Fräswerkzeug, (Quelle: <http://www.swietelsky-faber.de/leistungsspektrum/roboter-sanierung/?lang=de>, Zugriff: 19.03.2013)

Dazu verfügt der Roboter über die Möglichkeit, verschiedene auswechselbare Werkzeuge zu verwenden, und kann somit fräsen, Dichtmassen verpressen oder verspachteln und planschleifen (siehe Abbildung 7). Dieses Verfahren wird insbesondere bei der Entfernung von Abflusshindernissen in Kanälen und bei der Reparatur von Muffen, Rissen und Einmündungen verwendet [31, 32].

Innenmanschetten eignen sich zur punktuellen Reparatur von Schadstellen. Dabei handelt es sich einerseits um Gummimanschetten, die mittels Metallspannbändern in das Rohr geklemmt werden (AMEX[®] Innendichtsystem für begehbare Rohrleitungen, siehe Abbildung 8, links). Andererseits gibt es auch die Möglichkeit von Metallmanschetten mit Gummidichtring (Quick Lock Manschette, Abbildung 8, rechts) oder Metallmanschetten, die mit Reaktionsharz in das Rohr geklebt werden. Packer (ein aufblasbares Rohrstück aus Elastomer) sind dabei behilflich, um die Metallmanschetten an die Rohrwand zu drücken, bis das Spannschloss einrastet. Weist das Rohr eine zu große Rauigkeit bzw. zu viele Unebenheiten auf, besteht die Möglichkeit, die Dichtfläche mit einer Schicht aus Reaktionsharz zu begradigen, um eine bessere Dichtung der Manschette zu gewährleisten [32].



Abbildung 8: Sanierung mit Innenmanschette; links: AMEX®-10 MONO-Manschette, (Quelle: http://www.amex-10.de/de/mono_manschette.html, Zugriff: 19.03.2013); rechts: Quick Lock Manschette (Quelle: http://www.sksgmbh.de/kanalsanierung_quick-lock_edelstahlmanschetten.html, Zugriff: 25.03.2013)

Bei der **partiellen Auskleidung** wird eine mit Reaktionsharz getränkte Fasermatte mehrmals um einen Packer gewickelt, über der Schadstelle positioniert und an die Rohrwand gepresst. Der Packer kann nach Aushärten des Reaktionsharzes wieder entfernt werden (siehe Abbildung 9). Für eine optimale Haftung an der Rohroberfläche ist eine Vorbehandlung der Rohroberfläche notwendig [31, 32].

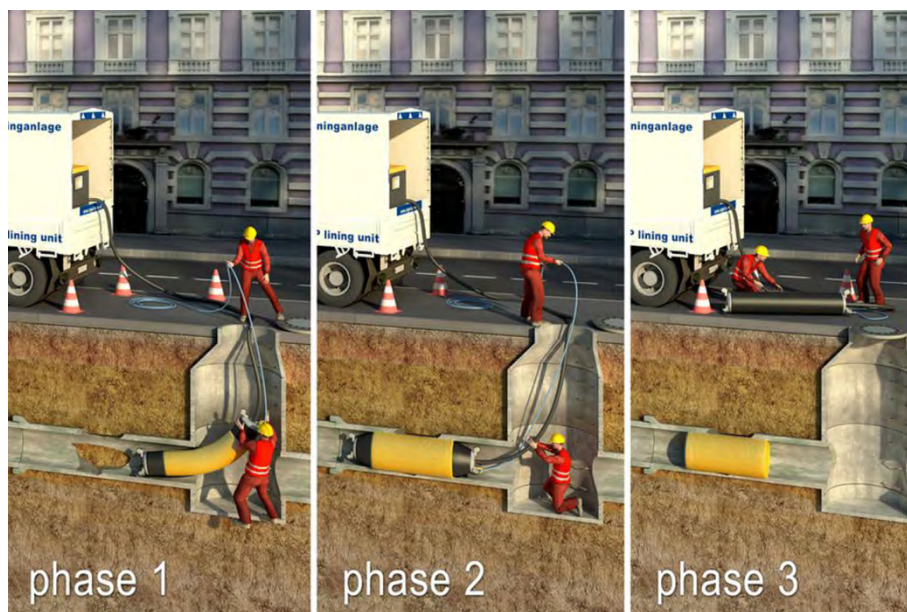


Abbildung 9: Einbau von einem Kurzliner (Quelle: http://www.angerlehner.at/leistungen/leitungssanierung/punktuelle_sanierung/, Zugriff: 20.03.2013)

Packer werden zur Sanierung von einzelnen Schadstellen eingesetzt. Zuerst können undichte Stellen mittels Luft- oder Wasserbeaufschlagung lokalisiert werden. Im zweiten Arbeitsschritt wird Injektionsgut in die Leckstelle eingepresst, welches auch in das umgebende Erdreich eindringt und somit eine undurchlässige Schicht bildet [32, 33].

2.5.3 Renovierungsverfahren

Beim **Schlauchlining** wird ein zunächst flexibler Textilschlauch mit Harz getränkt und im Inversionsverfahren in das Altrohr eingestülpt (siehe Abbildung 10). Der Schlauch wird durch Druckluft- bzw. Wasserbeaufschlagung auf die Rohr-/Profilform aufgeweitet. Durch Aufheizen des Wassers oder der Druckluft wird das Harz ausgehärtet. So entsteht ein nahtloses Rohr, welches die Funktion des Altrohres übernimmt [25, 32].



Abbildung 10: r.tec® Schlauchlining – Verfahren von der Rabmer Bau Gruppe (Quelle: http://www.rabmer.com/deutsch/rabmer_holding/rabmer_rohrsanieierungtiefbau/no_dig_rohrsanieierung/druckleitungen/rtec_schlauchliner.html, Zugriff: 21.03.2013)

Verformte Rohre werden bereits bei der Produktion verformt. Dabei wird der Durchmesser um ca. 30 % verjüngt oder das Rohr U-förmig gefaltet (siehe Abbildung 11). Das Rohr wird in das Altrohr eingezogen und nach dem Einbau mit Heißluft unter Druck rückverformt. Somit entsteht ein close-fit Verbund mit dem Altrohr [25, 32].



Abbildung 11: Verformtes Rohr, r.tec® Close Fit – Verfahren von der Rabmer Bau Gruppe (Quelle: http://www.rabmer.com/deutsch/rabmer_holding/rabmer_rohrsanieierungtiefbau/no_dig_rohrsanieierung/freispiegelleitungen/rtec_close_fit_rohr.html, Zugriff: 20.03.2013)

Eine **Beschichtung** wird maschinell aufgetragen und ist entweder mineralisch oder aus Kunststoff. Die Wahl der Beschichtung richtet sich nach dem Zustand des Altrohres sowie nach den chemischen und mechanischen Anforderungen [32]. Ein Beispiel dafür wäre eine Zementmörtelauskleidung (ZMA) von Rohren aus Eisenwerkstoffen (Stahl, Guss), wie diese in [25] im Detail beschrieben ist. Ein großer Vorteil dabei ist der aktive Korrosionsschutz, der

dadurch erreicht wird. Dieser Schutzmechanismus ist folgendermaßen zu erklären: zunächst wird die Rohrwand durch eine ZMA mit geringem Porenanteil weitgehend von Wasser abgeschirmt. Eine geringfügige Diffusion von Wasser findet jedoch statt und führt dazu, dass es zur Lösung von Calciumhydroxid kommt. Das Porenwasser wird basisch, mit einem pH-Wert von mehr als 12 und somit wird das Eisen passiviert [20, 34].



Abbildung 12: Zementmörtelauskleidung; links: Reinigung mittels Kratzer; rechts: Anschleudern der Zementmörtelauskleidung (Quelle: <http://www.brochier.cz/de/16553/zementm%C3%B6rtelauskleidung/>, Zugriff: 20.03.2013)

Wickelrohre werden aus endlosen Kunststoffprofilen mittels einer Wickelmaschine im Schacht zu einem Spiralrohr geformt und in das Altrohr vorgeschoben (siehe Abbildung 13). Die Verbindung der Profilränder wird durch Kleber und/oder durch mechanisches Einrasten einer Schlossverbindung sichergestellt. Wird dieses Verfahren mit Ringspalt zwischen Altrohr und Wickelrohr ausgeführt, ist dieser mit einer Dämmung zu verfüllen [31, 32].



Abbildung 13: EVOLOC-Wickelrohr; links: Doppelschlossprofil mit Kaltschweißmittel; Mitte: Rohrwickelmaschine im Schacht; rechts: Aufbau in Schnittdarstellung – Altrohr, Wickelrohr und Ringspaltdämmung (Quelle: <http://www.unitracc.de/aktuelles/artikel/swp-evoloc-2013-das-wickelrohr-mit-eigenstatik>, Zugriff: 20.03.2013)

2.5.4 Erneuerungsverfahren

Beim **Lang- und Kurzrohrrelining** werden bestehende Rohrstränge durch den Einzug von einem geringfügig kleineren Rohr erneuert. Nach einer Reinigung wird beim Langrohrrelining ein endloses (stumpfverschweißtes) „flexibles“ Rohr eingezogen. Im Gegensatz dazu werden beim Kurzrohrrelining kurze „starre“ Rohrstücke in der Startbaugrube verbunden und in das

Altrohr eingeschoben bzw. gezogen. Der Ringspalt kann mit geeigneten Materialien verpresst werden [25, 32].

Wird der Altrohrbestand zerstört und gleichzeitig ein neues Rohr in die bestehende Trasse eingezogen, spricht man von **Rohrauswechselverfahren**. Verfahrensvarianten, wie z.B. Pipe Eating (Abbruch des Rohres durch eine Mikrotunnel-Vortriebsmaschine und Neueinzug von Rohren), Berstlining (Altrohre aus spröden Materialien werden zerbrochen und die Scherben radial im Erdreich verdrängt) oder Press-Ziehverfahren, kommen hier zum Einsatz [25, 32].

3 Werkstoffe und Methoden

3.1 Werkstoffe

Im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung für die Muffensanierung wurden in einem ersten Schritt sieben kommerziell erhältliche Dichtungswerkstoffe auf Basis von Epoxid, Polyurethan (ein- und zweikomponentige Polyurethane) sowie ein Silan-modifiziertes Polymer untersucht. Diese Dichtungswerkstoffe wurden aufgrund von einer Literaturrecherche und Empfehlungen von Unternehmen aus dem Bereich Rohrsanierung ausgewählt. In einem weiteren Schritt wurden aufgrund vieler Vorteile von Epoxid, aber der zu geringen Bruchdehnung verschiedene Möglichkeiten der Modifizierung bzw. Elastifizierung angewendet.

3.1.1 Polyurethan, PUR

Zweikomponentige Polyurethandichtstoffe (2K-PUR) bestehen aus einer Harzkomponente mit einer Isocyanat-Gruppe als reaktionsfähiges Ende. Diese besitzt die Eigenschaft, mit einer weiteren Harzkomponente zu reagieren, an der eine Hydroxid-Gruppe vorhanden ist. Durch die Polyaddition der beiden Komponenten werden diese über die sogenannte Urethan-Gruppe als Wiederholungseinheit verknüpft (siehe Abbildung 14) [35-37].

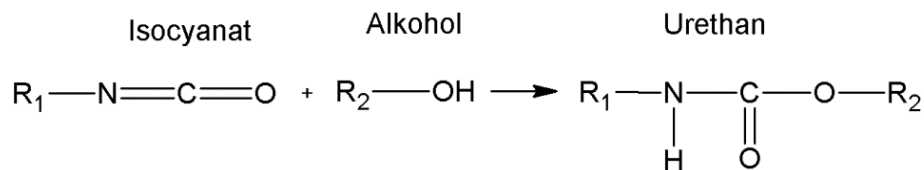


Abbildung 14: Reaktionsprinzip eines zweikomponentigen Polyurethans

Einkomponentige Polyurethandichtstoffe (1K-PUR) bestehen aus vorvernetztem, hochmolekularem Polyurethan und liegen in flüssiger oder pastöser Form vor. Das Polyurethan-Präpolymer verfügt über endständige reaktive Isocyanat-Gruppen und reagiert mit der Luft- bzw. Umgebungsfeuchte unter Abspaltung von Kohlendioxid (siehe Abbildung 15). Die Wassermoleküle dienen somit als zweite Komponente für die Vernetzung. Die freien und reaktiven Isocyanatgruppen liegen nur beschränkt vor, damit es zu keiner Blasenbildung im Dichtstoff während der Abbindung kommt [35-37].

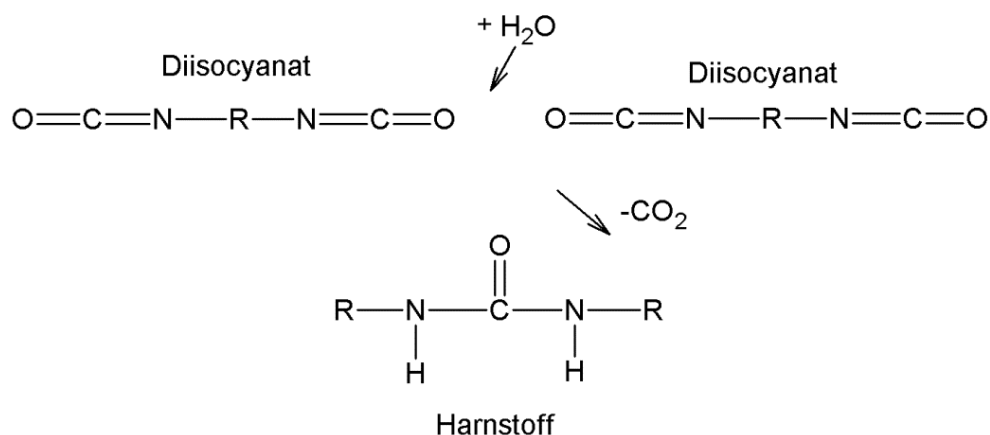


Abbildung 15: Kettenverlängerung von Polyurethan Präpolymeren durch Reaktion mit Wasser

3.1.2 Silan-modifiziertes Polymer, SMP

Dichtungswerkstoffe auf Basis von Silan-modifiziertem Polymer bestehen aus einem Polymerrückrat und modifizierten Silangruppen an den Enden. Dadurch wird dieser Dichtungswerkstoff auch des Öfteren in der Literatur als Silan-terminiertes Polymer (STP) bezeichnet. Das Polymerrückrat besteht aus einem flexiblen, mehr oder minder langen und eventuell mit Verzweigungen versehenen Polyether. Die Silangruppe besteht aus zwei reaktiven Alkoxysilan-Gruppen und einer Methyl-Gruppe (siehe Abbildung 16). Die Vernetzung zu einem elastischen Dichtstoff erfolgt über die Reaktion mit Luft- und Umgebungsfeuchte ohne Gasentwicklung. Neben den Silan-terminierten Polyether gibt es auch noch Silan-terminierte Polyurethane, die über drei Alkoxysilan-Gruppen verfügen, und durch die höhere Reaktivität entstehen höhere Vernetzungsdichten im Polymer [36-38].

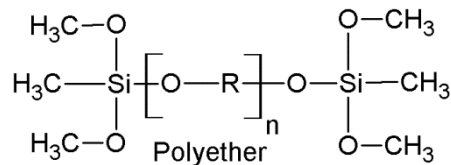


Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau eines Silan-modifizierten Polymers

3.1.3 Epoxid, EP [36, 39-42]

Die Präpolymere des Epoxidharzes enthalten mindestens eine, meistens aber zwei endständige Epoxid-Gruppen oder Hydroxyl-Gruppen. Diese dienen als funktionelle Gruppen und sind für den Aufbau von Makromolekülen verantwortlich. Die zweite Komponente, der Härter, enthält aktive Wasserstoffatome, welche in der Polyadditionsreaktion mit den Epoxid-Gruppen des Harzes reagieren. Entstandene Hydroxyl-Gruppen können mit einer Epoxid- oder anderen aktiven Gruppen weiterreagieren (siehe Abbildung 17).

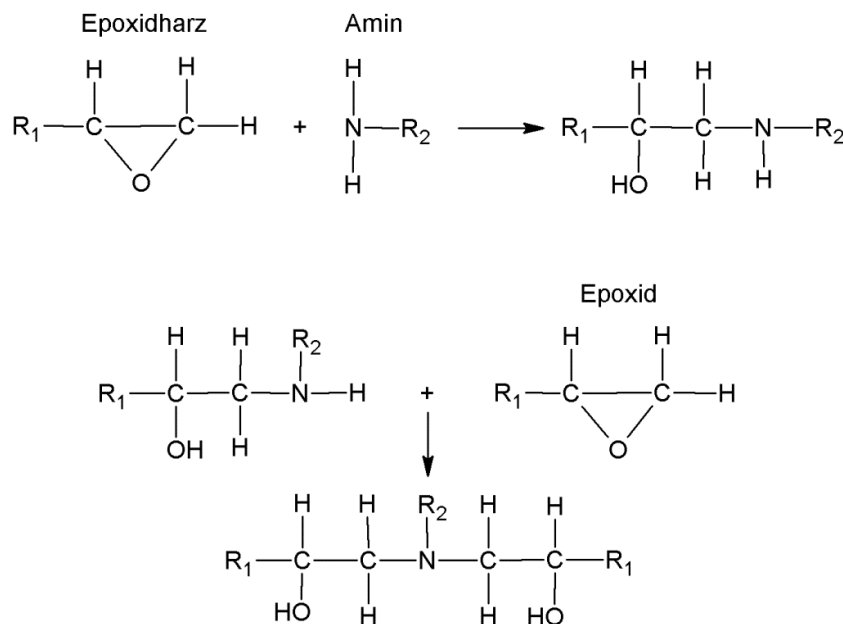


Abbildung 17: Schematischer Reaktionsablauf von kalthärtendem Epoxid; oben: Reaktion eines Epoxidharzes mit einem Amin; unten: Fortsetzung der Addition, weitere Epoxidgruppen am Stickstoffatom

Gebräuchliche Epoxidharze sind fast ausschließlich Umsetzungsprodukte auf Basis von Bisphenol A und Epichlorhydrin, sogenannte Diglycidylether (DGEBA).

Die Härterkomponente, z.B.: Amine, Phenole, Alkohole, etc., enthält aktive Wasserstoffatome, die mit den Epoxid-Gruppen des Harzes in größenordnungsvergleichbaren Mengen reagieren. Daher müssen EP-Harz und Härter in streng stöchiometrischem Verhältnis miteinander gemischt werden. Aufgrund dessen werden folgende Angaben über das Harz-Härter-System gemacht:

Epoxidäquivalent: Harzmenge in Gramm, die 1 Mol Epoxid-Gruppen enthält

Epoxidwert: entspricht der Anzahl Mole der Epoxid-Gruppen in 100 g Harz

$$\text{Epoxidwert} = \frac{100}{\text{Epoxidäquivalent}} \quad (1)$$

H-aktiv Äquivalent: Härter-Gewicht in Gramm, das 1 Mol aktiven Wasserstoff enthält

Der Härteranteil berechnet sich nun wie folgt:

$$\text{Härteranteil (für 100 g Harz)} = \text{Epoxidwert} \times \text{Aminäquivalent} \quad (2)$$

(Aminäquivalent entsprechend H – aktiv Äquivalent)

3.1.4 Grundsätzliche Möglichkeiten der Flexibilisierung (Weichmachung)

Polymere verfügen oft von sich aus nicht über die notwendigen flexiblen Eigenschaften für den Gebrauch im jeweiligen Einsatzgebiet und müssen modifiziert werden. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten. Erstens die äußere Weichmachung durch Zugabe von physikalisch wirkenden Substanzen oder die innere Weichmachung durch chemisch eingebaute molekulare Gruppen. Molekular betrachtet bedeutet Weichmachung, dass die Beweglichkeit von Kettensegmenten erhöht wird und sich dies auf die Eigenschaften des Polymers auswirkt. Es werden die Bruchdehnung und Zähigkeit dadurch erhöht und der E-Modul, die Härte und die Glasübergangstemperatur werden gesenkt [43].

Neben der gezielten Weichmachung kann es auch durch das ungewollte Eindiffundieren von Stoffen, wie z.B. Wasser, zu einer Flexibilisierung des Polymers mit den bereits genannten Eigenschaftsänderungen kommen [39, 43].

Äußere Weichmachung bedeutet, dass der Weichmacher nicht kovalent an die Polymerketten gebunden ist, sondern physikalisch über polare Gruppen. Verfügt der Weichmacher über zweiseitigen Dipolcharakter, können beide Enden mit einer Polymerkette in Wechselwirkung treten und es kommt zu einer Übertragungswirkung zwischen den Polymerketten. Weichmacher mit einer nicht polarisierbaren Gruppe binden sich physikalisch nur an eine Polymerkette. Dadurch werden die Polymerketten auseinander geschoben, die Nebenvaleanzkräfte unterbrochen und die Kettenbeweglichkeit in diesen Bereichen durch eine Trennwirkung stark erhöht [43].

Bei der **inneren Weichmachung** wird eine zweite Komponente durch einen Copolymerisationsprozess in der Polymerkette chemisch gebunden. Dadurch erhöht sich die Kettensegmentbeweglichkeit. Verfügt die zweite Komponente über raumfüllende Seitenketten, werden auch die Abstände zwischen den Polymerketten vergrößert, also die Nebenvaleanzkräfte verringert, und somit die Kettenbeweglichkeit erhöht [43].

3.1.5 Flexibilisierung von Epoxid

Die Anwendung des Prinzips der **inneren Weichmachung** bei Epoxiden führt, wie bereits erwähnt, zu einer erwünschten Erhöhung der Verformungsfähigkeit. Möglichkeiten dafür sind zusätzliche Komponenten mit epoxidreaktiven-Endgruppen. Durch die Funktionalität können diese in das molekulare Netzwerk mit eingebaut werden. Grundsätzlich unterscheidet man mono-, bi- und mehrfachfunktionelle Zusatzkomponenten. Bei Monofunktionalität reagiert nur die eine Epoxidgruppe und der Rest bleibt unvernetzt. Bei Bi- oder Mehrfachfunktionalität reagieren diese gleich wie die Epoxidharze ohne einen Kettenabbruch und somit werden sie in das 3-dimensionale Netzwerk mit eingebaut. Nachteilig auswirken kann sich hier eine Möglichkeit der Verringerung der Glasübergangstemperatur. Dadurch fällt die Festigkeit des Epoxids bei steigenden Temperaturen ab (kann bereits bei Raumtemperatur eintreten) [36, 41].

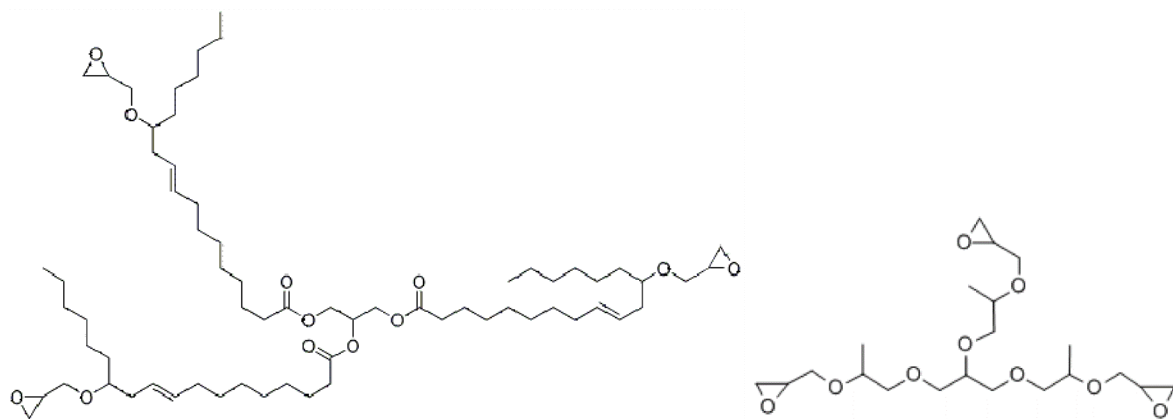
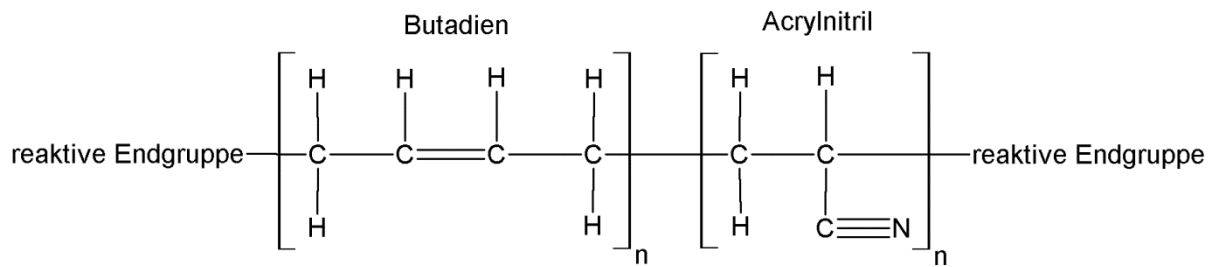


Abbildung 18: links: Strukturformel des Glycidyl Ether auf Basis von Rizinusöl mit epoxidreaktiven-Endgruppen (trifunktionell) ERISYS™ GE-35; rechts: Strukturformel des Glycerol Propoxylate Triglycidyl Ether mit epoxidreaktiven-Endgruppen (trifunktionell), ERISYS™ GE-36

Zwei handelsübliche Zusatzkomponenten für die Modifizierung des Ausgangsharzes sind z.B. ERISYS™ GE-35 (Glycidyl Ether auf Basis von Rizinusöl) oder ERISYS™ GE-36 (Glycerol Propoxylate Triglycidyl Ether). Damit kann die Flexibilität der Epoxidformulierung beeinflusst werden. Diese Komponenten verfügen natürlich über ein Epoxidäquivalent und müssen somit in der Harz/Härter-Rechnung berücksichtigt werden.

Eine ergänzende Möglichkeit zur Elastifizierung und Erhöhung der Zähigkeit ist die Ausbildung eines **Zweiphasensystems**. Dafür weit verbreitet sind Polybutadien oder Butadien-Acrylnitril Copolymere mit reaktiven Endgruppen. Dieses Zweiphasensystem bildet sich durch einen Entmischungsvorgang in der Schmelze aus. Es bilden sich kautschukelastische Partikel mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern, die über kovalente Bindungen in die Epoxidmatrix eingebaut sind. Dadurch entsteht ein Epoxidwerkstoff mit verbesserter Fähigkeit, Dehnungen und Zugkräfte aufzunehmen. Grundlegende Matrixeigenschaften wie Glasübergangstemperatur werden durch diese Art der Modifizierung nur gering beeinflusst. Um eine chemische Bindung zwischen Epoxidharz und der Zähelelastifizierungskomponente zu erlangen, müssen die Kautschukmoleküle (Homopolymere aus Butadien und Copolymere des Butadien und Acrylnitril) mit reaktiven Endgruppen versehen werden (Abbildung 19). Derartige Modifikatoren werden als reaktive Flüssigpolymere oder als Reactive Liquid Polymers (RLP) bezeichnet [36, 41].



Terminierung durch:



Abbildung 19: Butadien-Acrylnitril Kautschuk mit funktionellen Endgruppen an beiden Seiten der Polymerkette

Je nach funktioneller Endgruppe und der Verbindung eines Kautschukpolymers (Butadien-Nitril) werden die reaktiven Flüssigpolymere folgendermaßen bezeichnet [36]:

Carboxyl-terminierter Butadien-Acrylnitril Kautschuk: CTBN

Hydroxyl-terminierter Butadien-Acrylnitril Kautschuk: HTBN

Vinyl-terminierter Butadien-Acrylnitril Kautschuk: VTBN

Amin-terminierter Butadien-Acrylnitril Kautschuk: ATBN

Die Reaktion verläuft wie folgt: Durch die Mischung des reaktiven Flüssigpolymers mit dem Epoxidharz erfolgt eine Umsetzung der Komponenten zu einem elastifizierten Epoxidharzpräpolymer. Nach der Zugabe der Härter-Komponente erfolgt die endgültige Aushärtung des Epoxids durch 3-dimensionale Vernetzung zu einem Duomer. Nach Reaktionsende liegt das Zweiphasensystem bestehend aus der Epoxidmatrix und den feinverteilten Kautschukpartikeln vor. Grundlegende Voraussetzungen für die Elastomermodifizierung von Duroplasten sind, dass die Elastomerphase und die Polymermatrix nicht mischbar sind, um die Vernetzungsdichte und die damit verbundenen Eigenschaften zu gewährleisten. Zusätzlich müssen beide Systeme über kovalente Bindungen miteinander verbunden sein [36].

Da das reaktive Flüssigpolymer einen Teil der Epoxidgruppen des Harzes umsetzt, muss dieses auch in der stöchiometrischen Harz/Härter-Rechnung berücksichtigt werden.

Reaktive Flüssigpolymere auf Basis von Butadien-Acrylnitril Copolymeren werden mit unterschiedlichem Acrylnitrilgehalt angeboten. Das rührt daher, dass die Eigenschaften wie z.B. die Glasübergangstemperatur vorwiegend vom Acrylnitrilgehalt des Copolymers abhängen. Mit steigendem Acrylnitrilgehalt steigt die Glasübergangstemperatur des Copolymers [44].

3.1.6 Füllstoffe und Viskositätsmodifikatoren

Füllstoffe für Epoxide sind meist von inerter Natur und können organisch, anorganisch oder metallisch sein. Über die Wahl der Füllstoffe, Füllstoffgehalt und Füllstoffform können Eigenschaften wie Schrumpfung, Wasseraufnahme, Wärmeausdehnung, Verschleißfestigkeit, mechanische Eigenschaften, Fließverhalten, etc. beeinflusst werden [41]. Füllstoffe sind auch von den Kosten niedriger einzustufen als das Polymer und somit kommt es durch den Einsatz von Füllstoffen auch zu einer Kostenreduktion.

Allgemein kann laut [45] gesagt werden, dass eine Thixotropierung von Epoxid nicht über Harzkomponenten, sondern über Zusätze erreicht wird. Für eine Erhöhung der Viskosität bei bereits geringen Zusätzen kommen folgende Füllstoffe in Frage [42]: Aerosil®, Glimmer-Pulver, Vulkanasche, Korkmehl, Glasfasern, Baumwollflock. Aerosil® ist eine hochdisperse Kieselsäure (pyrogene Kieselsäure) und wird am häufigsten für die Thixotropierung von Epoxiden verwendet.

3.1.7 Österreichische Bestimmungen zur Trinkwassertauglichkeit und geforderte Prüfungen

In einem vom Bundesministerium für Gesundheit herausgegebenen Dokument [46] mit der Bezeichnung „Empfehlung betreffend Anforderungen an Materialien in Kontakt mit Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser) in Hinblick auf die Bestimmung der Trinkwasserverordnung“ ist für die Verwendung von organischen Materialien im Trinkwasserbereich Folgendes angegeben.

„In Ermangelung von rechtlich verbindlichen Vorgaben für Materialien in Kontakt mit Trinkwasser (Gemeinschaftsrecht bzw. Nationales Recht) werden folgende nationale Normen herangezogen. ÖNORM B5014-1:2012: Sensorische und Chemische Anforderungen und Prüfungen von Werkstoffen im Trinkwasserbereich – Teil 1: Organische Werkstoffe...“ [46]

Unter anderem sind folgende Punkte in der genannten Norm [47] zu finden:

- Eine Bewertung der Rezeptur des Werkstoffes ist durchzuführen, um festzustellen, ob auch nur Ausgangsstoffe und Hilfsstoffe eingesetzt wurden, die den geltenden lebensmittelrechtlichen Bestimmungen entsprechen. Angaben zur Rezepturbewertung und über Positivlisten der Ausgangsstoffe sind im Anhang D der Norm zu finden.
- Ebenfalls untersucht werden muss das mikrobiologische Verhalten von organischen Werkstoffen. Es ist eine bestandene Prüfung von einer akkreditierten Prüfstelle laut DVGW-Arbeitsblatt W270 (Arbeitsblatt W270 beschrieben in [48, 49]) vorzuweisen.
- Durchzuführen sind Prüfmethoden wie: Geruchs-/Geschmacksprüfung, Migrationsprüfung, Chlorzehrung, etc.

Werden die Anforderungen der ÖNORM B5014-1 von organischen Materialien erfüllt, entsprechen diese den nationalen (österreichischen) Anforderungen für den Kontakt mit Trinkwasser [47]. Somit soll bereits bei der Wahl aller Komponenten der Formulierung auf diese Norm Rücksicht genommen werden.

3.2 Werkstoffcharakterisierung

3.2.1 Zugversuch

Werkstoffkenngrößen wie die Bruchdehnung, Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul wurden in Anlehnung an die Norm EN ISO 527-1 [50] mittels eines herkömmlichen Zugversuchs bestimmt. Jede Charge bestand aus jeweils 6 Zugproben der Form 5A, welche in der Norm EN ISO 527-2 [51] definiert ist. Die Zugfestigkeit berechnet sich aus dem Verhältnis des Kraftmaximums zum Ausgangsquerschnitt. Die Bruchdehnung beschreibt die Längenänderung zum Zeitpunkt des Bruches dividiert durch die Ausgangslänge. Der Elastizitätsmodul wird nach dem Hooke'schen Gesetz berechnet. Dazu wird die Änderung der Spannung im Bereich von 0,05 % und 0,25 % Dehnung herangezogen. Während der Messung des Elastizitätsmoduls betrug die Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min, gefolgt von 50 mm/min während des restlichen Prüfverlaufes, wie vorgeschlagen in [52]. Zur Bestimmung des E-Moduls wurde die Dehnung mittels Extensiometer aufgezeichnet, gefolgt durch die Wegaufnahme über die Traverse. Die Zugversuche wurden mit einer Zugprüfmaschine der Firma Zwick & Roell, Modell Z050 durchgeführt.

3.2.2 3-Punkt Biegeversuch

Quasistatische Biegeversuche werden hauptsächlich zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von spröden Werkstoffen herangezogen, da es hierbei durch den Versagensmechanismus der Werkstoffe im Zugversuch meist zu Problemen kommt [52]. Um Vergleichswerte festzustellen, wurde an den spröden Werkstoffen ein 3-Punkt Biegeversuch, in Anlehnung an die Norm EN ISO 178 [53], durchgeführt. Der Auflagerabstand betrug 50 mm und die Prüfgeschwindigkeit wurde während des gesamten Prüfverlaufes mit 8,4 mm/min gewählt (berechnet aus den Prüfbedingungen der DMA: 1 Hz Frequenz, 70 μ m Amplitude). Der Elastizitätsmodul im Biegeversuch wird wie beim Zugversuch als Sekantenmodul in den Grenzen von 0,05 % bis 0,25 % Randfaserdehnung bestimmt. Durchgeführt wurde der 3-Punkt Biegeversuch mit einer Zugprüfmaschine der Firma Zwick & Roell, Modell Z050. Die Durchbiegung an der Probenmitte wurde mittels Extensiometer (Zwick & Roell, multisens) gemessen. Die Probenabmessungen sind 10 mm $\times$ 3 mm $\times$ 60 mm (Breite $\times$ Höhe $\times$ Länge) und jede Charge bestand aus 6 Biegeproben.

3.2.3 Haftzugversuch

Um die Hafteigenschaften der Dichtungswerkstoffe auf unterschiedlich präparierten Graugussoberflächen zu untersuchen, wurden Haftzugversuche durchgeführt (in Anlehnung an [54] und [55]). An einer Probenserie wurden sämtliche losen Korrosionsprodukte mit einer Drahtbürste entfernt. Für weitere Untersuchungen wurde die Oberfläche der Graugussgrundkörper mit einem Winkelschleifer blank geschliffen (siehe Abbildung 20, rechts). In Abbildung 20, links ist der Prüfkörperaufbau schematisch dargestellt. Während des Haftzugversuchs an der Zugprüfmaschine (Zwick & Roell, Z050) wurden die Haftzugfestigkeit sowie die Bruchdehnung bei einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min aufgezeichnet. Die Haftzugfestigkeit berechnet sich aus dem Verhältnis der maximalen Kraft zum Probenquerschnitt. Die Bruchdehnung, also das Verhältnis der Länge zum Zeitpunkt des Bruches dividiert durch die Ausgangsdicke der Dichtungswerkstoffschicht des Verbundes, wurde ebenfalls bestimmt. Um das Verformungsverhalten genauer zu untersuchen, wurden

mit dem Verfahren der 2D-Bildkorrelation im Aramis (GOM) Verformungsbilder berechnet. Dabei wird ein Punktmuster auf die Probe aufgebracht, die Verschiebung der Punkte bei Deformation relativ zum undeformierten Zustand der Probe bestimmt (Aufnahmefrequenz der Fotos: 1 Hz) und daraus die Dehnung berechnet. Dieses Verfahren wird von Pan et al. in [56] ausführlich beschrieben. Zusätzlich zur Berechnung von den mechanischen Kennwerten wurden auch die Erscheinungsformen der Bruchflächen nach Norm EN ISO 10365 [57] beurteilt.

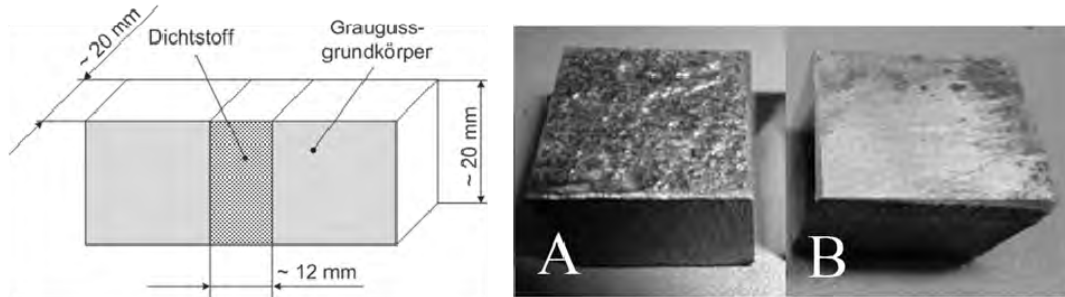


Abbildung 20: Haftzugversuch; links: schematische Darstellung der Haftzugprobe; rechts: Darstellung der Oberflächenpräparation, A: lose Korrosionsprodukte entfernt, B: geschliffene Oberfläche

3.2.4 Prüfung der Druckbeständigkeit

Aufgrund der mangelnden anwendungsorientierten Prüfbedingungen, betreffend die Druckbeständigkeit, war dafür die Entwicklung einer Prüfmethode notwendig. Die eigens konzipierte und konstruierte Druckkammer für die Durchführung von Vorversuchen bezüglich Druckbeständigkeit von Dichtungswerkstoffen besteht aus folgenden Komponenten: einer Druckkammer, einem Luftkompressor und zur Beurteilung der Deformation einem 3D-Bildkorrelationssystem (Aramis, Fa. GOM) (siehe Abbildung 21).

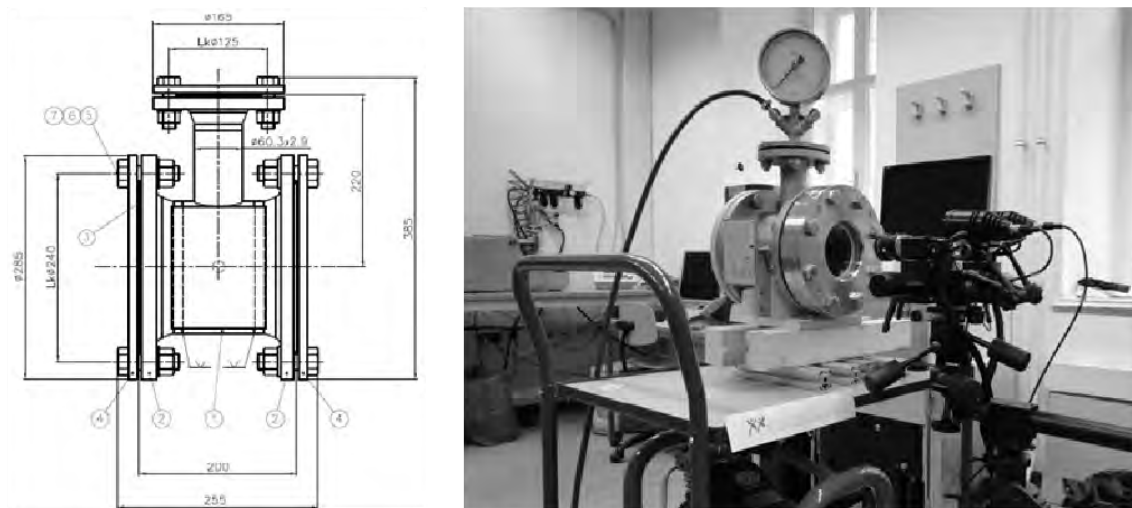


Abbildung 21: Druckkammer; links: Konstruktionszeichnung der Kammer; rechts: Prüfaufbau bestehend aus Druckkammer und Kamerasystem

Die Druckbeständigkeit ist so definiert, dass einerseits der Dichtungswerkstoff und die Verbindung zum Testflansch den Prüfdruck unbeschadet überstehen muss. Andererseits muss bei elastischen Dichtungswerkstoffen die Dehnung im Bereich der zulässigen Dehnungen (siehe technisches Datenblatt) bleiben. Jede dieser 22 mm dicken Stahlflansche weist eine

65 mm lange Nut auf, die entweder 10 mm oder 30 mm breit ausgeführt ist (unter Berücksichtigung der Randbedingung, dass nur Spaltbreiten von 5 - 30 mm saniert werden). Dadurch kann die Druckbeständigkeit der Dichtungswerkstoffe bis zu einem Prüfdruck von 10 bar (1 MPa) untersucht werden. Die Deformation des Dichtungswerkstoffes in der Prüfnut wurde mit dem 3D-Bildkorrelationssystem Aramis untersucht. Vor der Messung muss das System mit einer definierten Prüfplatte kalibriert werden. Das auf der Prüfplatte aufgebrachte Punktmuster wird von zwei Kameras, mit definiertem Prüfabstand und Anstellwinkel, mit einer Bildaufnahmefrequenz von 1 Hz dokumentiert (siehe Abbildung 22). Durch das an der Druckkammer montierte Schauglas kann die Bildaufnahme direkt auf der Flanschsinnenseite erfolgen. Aus den Änderungen des Punktmusters der Bildaufnahmen (von beiden Kameras aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen) relativ zum undeformierten Zustand kann die Dehnung berechnet und in einem dreidimensionalen Bild dargestellt werden.

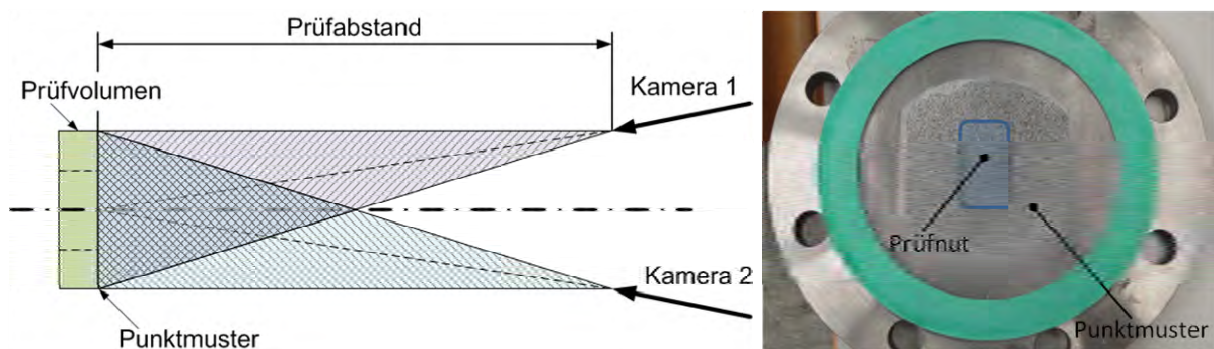


Abbildung 22: 3D-Bildkorrelation mit ARAMIS (GOM); links: schematische Darstellung der Prüfanordnung des Kamerasystems; rechts: Testflansch mit 30 mm breitem Prüfpalt und bereits aufgebrachtem Punktmuster

3.2.5 Dynamisch-mechanische Analyse, DMA

Bei der dynamisch-mechanischen Analyse (DMA) wird der Verlauf der mechanischen Eigenschaften unter geringer, meist sinusförmiger, dynamischer Belastung als Funktion der Temperatur, Zeit und/oder Frequenz bestimmt. Die DMA ist allgemein durch die Norm DIN EN ISO 6721-1 [58] und die Prüfung im Biegemodus speziell in der EN ISO 6721-5 definiert. Beim Versuch wird eine sinusförmige Deformation vorgegeben und dabei die Spannung gemessen (weg- bzw. deformationsgesteuert). Aus den Kurven des Speichermoduls, des Verlustmoduls sowie des Verlustfaktors kann die Glasübergangstemperatur T_g ermittelt werden. Jene T_g , die aus dem Speichermodul sowie aus dem Verlustmodul ermittelt werden, sind in etwa ident und stimmen meistens gut mit dem aus der dynamischen Differenz Thermoanalyse (DSC) ermittelten T_g überein. Die Glasübergangstemperatur aus der Kurve des Verlustfaktors $\tan\delta$ liegt bedingt durch die Berechnungsmethode immer höher. Die Dichtungswerkstoffe wurden im Temperaturbereich und im Prüfmodus lt. Tabelle 38 (siehe Anhang) geprüft, um grundsätzlich den T_g zu bestimmen und zu untersuchen, ob dieser im Anwendungstemperaturbereich liegt. Weiters werden Proben für 28 Tage bei 40 °C in Wasser ausgelagert, um die daraus resultierende Verschiebung der Glasübergangstemperatur zu ermitteln. Durch die erhöhte Temperatur von 40 °C wird die Wasseraufnahme des Werkstoffes beschleunigt und der Sättigungszustand früher erreicht. Bei dieser Temperatur treten noch keine Veränderungen im Werkstoff durch den thermischen Einfluss auf. Es kommt somit zu keiner Überlagerung von Effekten, verursacht durch den Einfluss der Temperatur und des Prüfmediums Wasser. Denn ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt verschiebt

die T_g hin zu niedrigeren Temperaturen. Dieser Weichmachungseffekt kann durch die erhöhte Kettenbeweglichkeit aufgrund der Wassereinlagerungen erklärt werden. Unter den gewählten Messbedingungen entspricht der Speichermodul sehr gut dem im Zugversuch (nach DIN 527) ermittelten E-Modul. Es wurde ein Arbeitsgerät der Marke TA Instruments, 2980 verwendet.

3.2.6 Dynamische Differenz Thermoanalyse, DSC

Die dynamische Differenz Thermoanalyse (DSC), die durch die Norm EN ISO 11357-1 [59] allgemein definiert ist, erlaubt die Bestimmung der für einen Kunststoff charakteristischen Temperaturen wie z.B. Glasübergangstemperatur T_g (definiert im Teil 2 von EN ISO 11357 [60]), Schmelztemperatur sowie von kalorischen Größen wie z.B. Wärmekapazität oder spezifische Wärme. Dazu werden kleine Proben mit einer Masse von ca. 10 mg in Aluminium-Tiegel eingepresst, einem definierten Temperaturprogramm (Heizrate 20 K/min) unterzogen. Es wird der Wärmestrom auf die Probe, als Differenz zu dem Wärmestrom auf einem leeren Aluminium-Tiegel gemessen. Die Prüftemperaturbereiche sind in Tabelle 39 im Anhang angegeben. Für alle Messungen wurde ein Arbeitsgerät der Marke TA Instruments, Q2000 verwendet.

3.2.7 Thermogravimetrische Analyse, TGA

Bei der Thermogravimetrie wird die Änderung der Masse in Abhängigkeit von Temperatur und/oder Zeit ermittelt. Massenänderungen treten bei Verdampfung, Zersetzung und chemischen Reaktionen in Erscheinung. Die Grundlagen der Thermogravimetrie sind durch die Norm DIN 51006 [61] und speziell die Thermogravimetrie von Kunststoffen in EN ISO 11358 [62] definiert. Aus den Daten der TGA können Werkstoffkenngrößen wie Werkstoffzusammensetzungen, Füllstoffgehalt wie zum Beispiel die Menge an anorganischen Stoffen oder Glasfasern im Werkstoff oder der Feuchtigkeitsgehalt nach Lagerung in Wasser ermittelt werden. Die Dichtungswerkstoffe werden im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 600 °C mit einer Heizrate von 20 K/min untersucht. Die Einwaage beträgt ca. 50 mg. Durch die Verwendung von Luft als Spülgas findet nicht nur eine thermische, sondern auch eine oxidative Zersetzung statt. Um TGA Vergleichsdaten zu ermitteln, wurden Untersuchungen an den Proben des Ausgangszustandes (AZ) durchgeführt. Dieser Ausgangszustand ist je nach Dichtungswerkstoff durch eine bis zu einwöchige Aushärtezeit der Probe definiert. Um Inhomogenität sowie Messfehler auszuschließen, wurden jeweils zwei Messungen durchgeführt. Ein Arbeitsgerät der Marke TA Instruments, 2050 wurde für die Messungen verwendet.

Weitere Untersuchungen wurden an Proben nach vierwöchiger Auslagerung in Wasser gemacht. Dadurch kann der Wassergehalt bzw. die Wasseraufnahme der jeweiligen Dichtungsstoffe ermittelt werden.

3.2.8 Korrosionsuntersuchungen

Eine Auslagerung der Proben in einer Mischung aus Eisenfeilspänen und Wasser (100 ml Wasser, 20 g Eisenfeilspäne) wurde ebenfalls durchgeführt, um eventuelle Abbaureaktionen im Dichtstoff durch die Korrosion von Eisen (und der damit verbundenen Freisetzung von Eisen-Ionen) zu erkennen (in Anlehnung an EN ISO 175 [63]). Anschließend wurden

thermogravimetrische Analysen nach vier, neun und siebzehn Monaten durchgeführt und der Wassergehalt bestimmt sowie die Abbaukurven bewertet.

Unterwanderung des Dichtungswerkstoffes durch Korrosion ist im Falle einer Sanierung von Rohren aus Eisenwerkstoffen wie Grauguss mit Sicherheit ein wichtiges Thema. Aufgrund dessen wurden diese Korrosionsversuche in Anlehnung an [64], jedoch im Gegensatz zur Norm an Proben (siehe Abbildung 23) mit einem Verbund aus Graugussgrundkörper und Dichtungswerkstoff, durchgeführt.

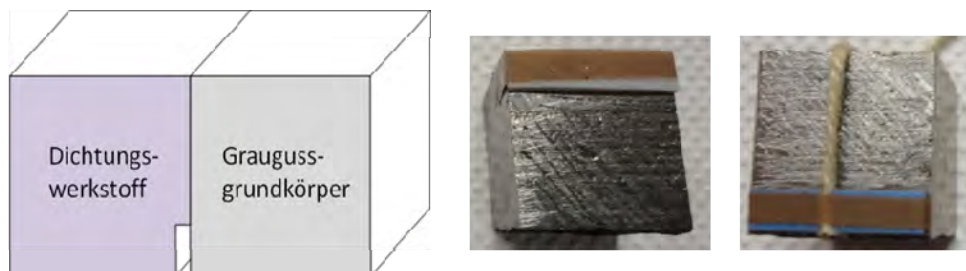


Abbildung 23: Aufbau der Proben für den Korrosionsversuch; links: schematische Darstellung; Mitte: Probe mit Initiiierungsspalt; rechts: Probe mit Initiiierungsspalt und Dochtfaden

An der Grenzfläche wurde zusätzlich bei einer Probenserie ein Initiiierungsspalt mit einer Breite von 0,7 mm und einer Tiefe von 5 mm eingebracht, bei der zweiten Probenserie ein Initiiierungsspalt und zusätzlich noch ein Dochtfaden, der Wasser in die Grenzfläche ansaugen kann. Die Sauerstoffkonzentration im Spaltgrund sinkt, es kommt zu einem pH-Wert Unterschied zwischen Kathode (Oberfläche) und Anode (Spalt), wodurch die Auflösung verstärkt wird. Dadurch herrscht ein besonderes Milieu, d. h. die Korrosionsbedingungen im Spalt werden verschärft [65]. Die Korrosionsversuche wurden an vier Chargen der beiden Probenserien jeweils parallel durchgeführt. Drei davon in Wasser bei 7 °C, bei 40 °C und bei 60 °C und eine bei 60 °C in 3%iger Salzlösung (siehe Abbildung 24, links).

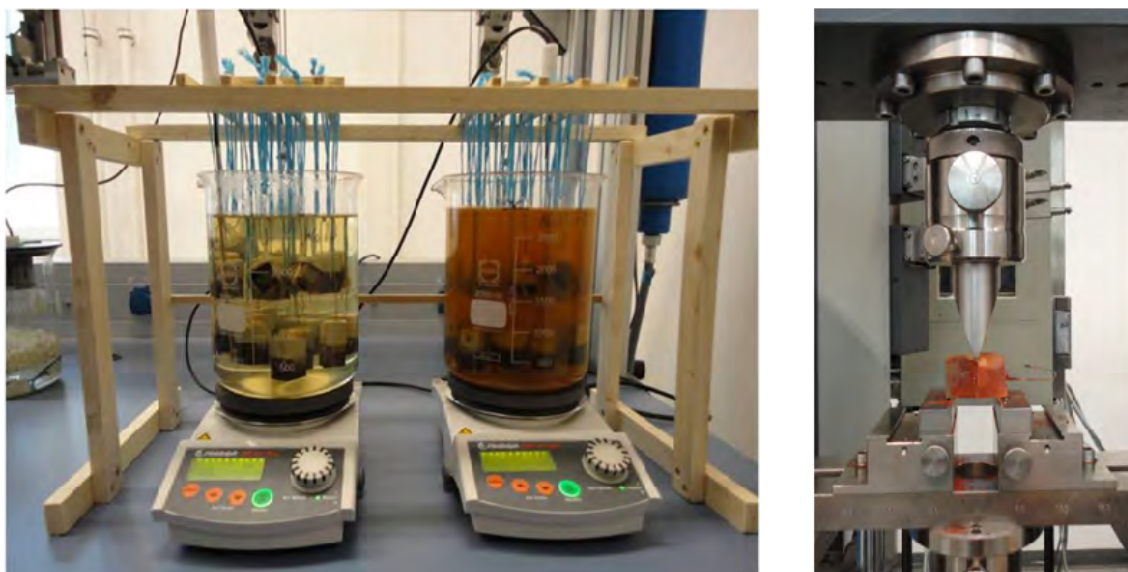


Abbildung 24: Korrosionsuntersuchungen; links: Versuchsaufbau von Korrosionsversuchen; rechts: 3-Punkt Biegevorrichtung an der Zugprüfmaschine (ZWICK, Z050) zum Brechen der Korrosionsproben

Die Wahl der Temperaturen wurde aus folgenden Gründen so gewählt: Die Temperatur von 7 °C liegt im unteren Bereich der Einsatztemperatur des Dichtungswerkstoffes für den gegebenen Anwendungsfall. Durch die Erhöhung der Temperatur auf 40 °C und 60 °C wird die Wasseraufnahme des Werkstoffes beschleunigt, zudem laufen auch Korrosionsvorgänge schneller ab. Die Versuche können somit beschleunigt werden. Die Auslagerung bei 60 °C findet, im Gegensatz zur Auslagerung bei 40 °C, bereits über der Glasübergangstemperatur des Epoxides statt. Bei einer Auslagerung oberhalb des T_g kann es zu einer sprunghaften Änderung der Beständigkeit des Kunststoffes kommen. Ein möglicher Einfluss dadurch sollte durch einen Vergleich dieser Proben (Auslagerung bei 40 °C und 60 °C) erkennbar sein. Um die Versuchsbedingungen weiter zu verschärfen, wurde ein Satz Probekörper in 3%iger Salzlösung bei 60°C gelagert. Durch die parallele Auslagerung von Proben bei 60 °C in Wasser kann der Einfluss der Temperatur von dem der Prüfliquidität unterschieden werden können.

Nach 3, 6, und 14 Monaten wurden die Proben mit einer 3-Punkt Biegevorrichtung an der Zugprüfmaschine (Zwick Z050) gebrochen (siehe Abbildung 24, rechts). Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min, der Auflagerabstand 30 mm. Eine Untersuchung der Bruchflächen auf Spuren von Korrosion und Unterwanderung wurde mittels Stereomikroskopie durchgeführt. Die zum Brechen der Probe nötige Kraft wurde ebenfalls qualitativ beurteilt.

4 Ergebnisse

4.1 Aufbau und Gliederung des Ergebnisteiles

Das System zur Muffensanierung kann in die drei Teilsysteme Muffenspalt, Wasser und den Dichtungswerkstoff aufgespalten werden, die interagieren (siehe Abbildung 25).

Durch die Interaktion von **Werkstoff und Wasser** ist eine breit gefächerte Werkstoffcharakterisierung notwendig. Es wurden mechanische und physikalische Eigenschaften wie Festigkeit, Dehnfähigkeit, E-Modul und Glasübergangstemperatur ermittelt. Wichtig in diesem Zusammenhang ist der Einfluss von Wasser auf den Dichtungswerkstoff und inwiefern sich die Wasseraufnahme auf die genannten Eigenschaften sowie auf das Abbauverhalten auswirkt.

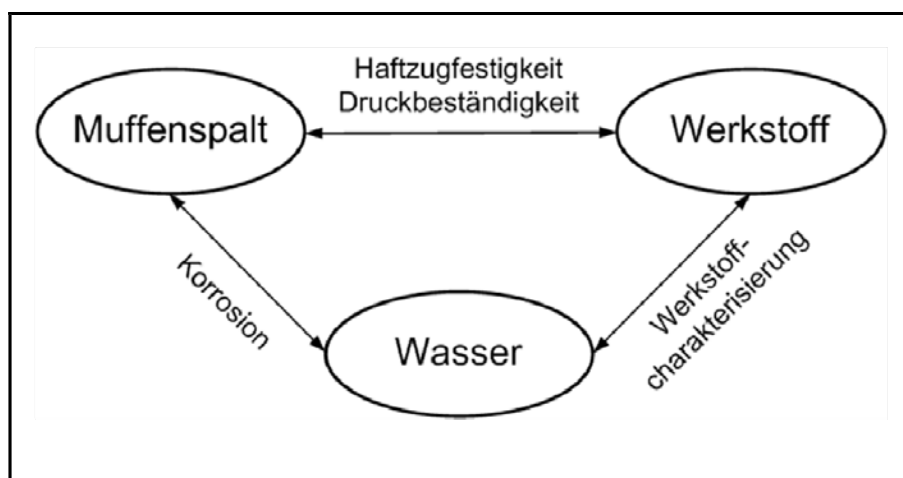


Abbildung 25: Das System Muffensanierung, die Einteilung in Untersysteme und deren Interaktion

Der **Dichtungswerkstoff und der Muffenspalt** sind durch die Interaktion in Form von Haftzugfestigkeit und Druckbeständigkeit verknüpft. Aufgrund dessen wurde die Haftzugfestigkeit der Dichtungswerkstoffe auf unterschiedlich präparierten Grauguss-oberflächen durchgeführt. Ein zusätzliches und überaus wichtiges Kriterium ist die Druckbeständigkeit der Dichtungswerkstoffe. Diese wurde anhand von Laborversuchen in der Druckkammer ermittelt.

Das Wasser beeinflusst jedoch nicht nur den **Dichtungswerkstoff**, sondern interagiert auch mit dem **Muffenspalt** in Form von Korrosion. Dadurch kann der Verbund aus Muffenspalt und Dichtungswerkstoff beeinflusst werden. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden Korrosionsversuche durchgeführt.

Aufgrund der Basis dieses Interaktionsmodelles der Muffe wurden in einem ersten Schritt sieben herkömmliche und auf dem Markt befindliche Dichtungswerkstoffe auf ihre Eignung für die Anwendung zur Muffensanierung von Graugussrohren untersucht.

4.2 Charakterisierung von sieben auf dem Markt befindlichen Dichtungswerkstoffen

4.2.1 Ausgewählte Dichtungswerkstoffe

Aufgrund der gängig angewendeten Sanierungsmethoden wurden sieben herkömmliche, auf dem Markt befindliche und von Firmen empfohlene Dichtungswerkstoffe untersucht. Diese sind auf der Basis von Polyurethan (PUR 1, PUR 2, PUR 3), Epoxid (EP 1, EP 2, EP 3) und Silan-modifiziertem Polymer (SM 1). Die Eigenschaften der Dichtungswerkstoffe jeder Gruppe sind sehr unterschiedlich betreffend Elastizität, Steifigkeit, Füllstoff, Füllstoffgehalt und Form (einkomponentig oder zweikomponentig).

4.2.2 Bestimmung der Zugeigenschaften

In Abbildung 26 ist die Zugfestigkeit der Dichtungswerkstoffe dargestellt. Der Ausgangszustand beschreibt vollständig ausgehärtete Proben, das heißt, dass durch weitere Aushärtung keine Steigerung der Festigkeitswerte erzielt werden kann. Diese Zugfestigkeitswerte sind den Ergebnissen von Proben, die in Wasser für 28 Tage bei 40 °C ausgelagert wurden, gegenübergestellt. Durch diese Messungen kann der Einfluss von Wasser auf die Zugfestigkeitswerte gezeigt werden.

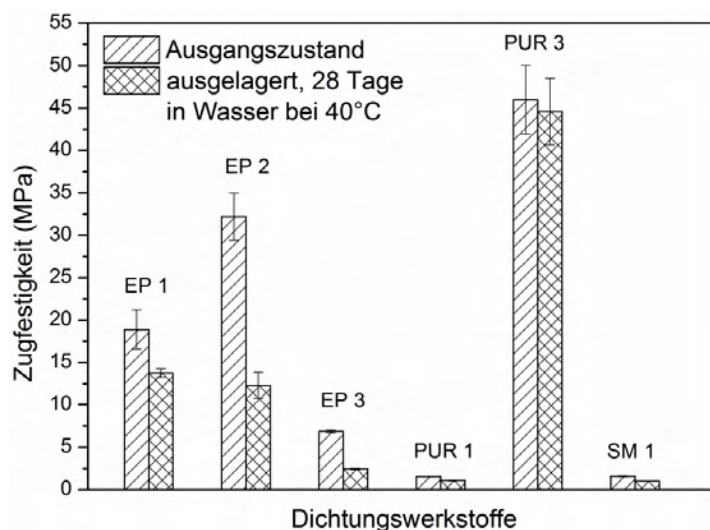


Abbildung 26: Zugfestigkeit: von Proben des Ausgangszustandes und von Proben, die für 28 Tage in Wasser bei 40 °C ausgelagert wurden (ein Zugversuch nach DIN 527 konnte am Dichtungswerkstoff PUR 2 nicht durchgeführt werden; elastische Probekörper konnten nicht eingespannt werden); Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 41 angegeben

Eine Verringerung der Zugfestigkeit kann sehr deutlich bei den Epoxid Dichtungswerkstoffen sowie bei dem Polyurethan PUR 1 und dem Silan-modifizierten Polymer SM 1 beobachtet werden.

4.2.3 Bestimmung der Glasübergangstemperatur

Die Glasübergangstemperatur T_g eines Polymers definiert dessen Anwendungsbereich. So werden Elastomere oberhalb und Duromere unterhalb der Glasübergangstemperatur verwendet. Da mit der Glasübergangstemperatur Veränderungen

der Festigkeit und Duktilität einhergehen, sollten im Fall des Dichtungswerkstoffes die Anwendungstemperatur und der T_g nicht im selben Bereich liegen.

Prinzipiell wurde der T_g mit den Ergebnissen aus DSC und DMA Untersuchungen bestimmt. Aus den Daten der DMA gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten zur Auswertung: am Maximum des Verlustmodules E'' (Loss Modulus, LM) oder am Peak-Maximum des Verlustfaktors $\tan\delta$ oder an der Stufe des Speichermodules. In Abbildung 27 sind Ergebnisse von drei unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung des T_g gegenübergestellt.

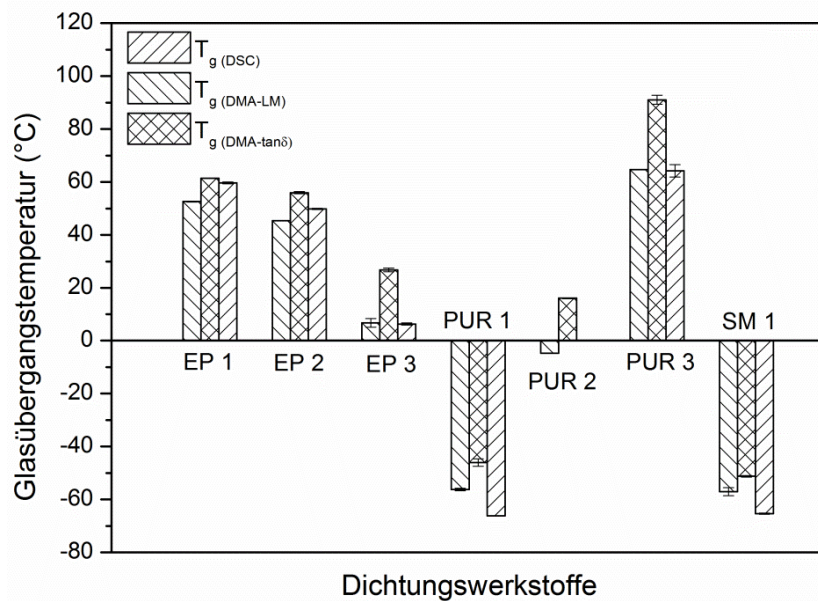


Abbildung 27: Glasübergangstemperatur: ermittelt aus den Daten der DMA am Maximum des Verlustmodules LM, am Maximum des Verlustfaktors $\tan\delta$ und der DSC; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 42 angegeben

Es ist eine gute Korrelation zwischen den Werten $T_{g(DSC)}$ und $T_{g(DMA-LM)}$ zu beobachten. Bei dem Dichtungswerkstoff PUR 2 war keine Stufe zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur in der DSC - Kurve zu erkennen. Diese Beobachtung stimmt mit den gezeigten Untersuchungen in [66] von anderen polymeren Werkstoffen sehr gut überein. Aufgrund dessen wurde entschieden, für zukünftige Untersuchungen die Glasübergangstemperatur immer am Maximum des Verlustmodules $T_{g(DMA-LM)}$ anzugeben.

Durch die Wasseraufnahme wird die Glasübergangstemperatur des Polymers laut Literatur hin zu niedrigeren Temperaturen verschoben [39]. Dieser Effekt wurde auch bei den untersuchten Dichtungswerkstoffen beobachtet. In Abbildung 28 wird der T_g des Ausgangszustandes mit jener von Proben, die für 28 Tage bei 40 °C in Wasser ausgelagert wurden, verglichen. Eine signifikante Verringerung dieser ist bei allen Dichtungswerkstoffen zu beobachten.

Zusätzlich wird deutlich, dass bei den Dichtungswerkstoffen EP 3 und PUR 2 der T_g und die Anwendungstemperatur überlappen. Aufgrund dieser Beobachtung sind diese beiden Dichtungswerkstoffe für den aktuellen Anwendungsfall nicht geeignet. Auch der T_g von EP 1 wird durch die Wasseraufnahme sehr nahe hin zum Anwendungstemperaturbereich verschoben. Jedoch bleiben die mechanischen Eigenschaften dieses Werkstoffes weiterhin interessant.

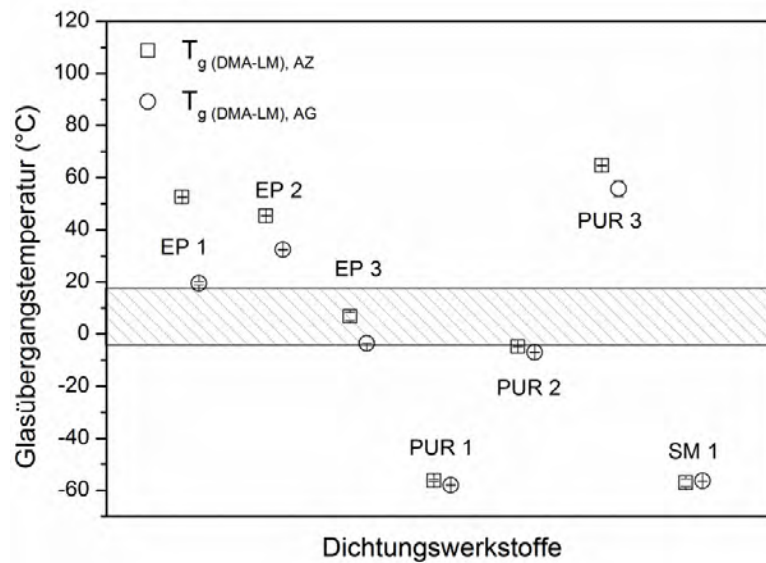


Abbildung 28: Glasübergangstemperatur: ermittelt aus den Daten der dynamisch-mechanischen Analyse und bestimmt am Maximum des Verlustmoduls LM; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 43 angegeben

4.2.4 Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls können unterschiedlichste Methoden herangezogen werden (Zugversuch, 3-Punkt Biegeversuch oder dynamisch-mechanische Analyse). Der Vergleich der Ergebnisse der Methoden zur Bestimmung des E-Moduls ist in Abbildung 29 dargestellt. Wie auch in der Literatur beschrieben wird, ist der Zugversuch für spröde Werkstoffe (EP 1, EP 2, EP 3) nicht die beste Wahl für die Bestimmung des E-Moduls [52]. Bei diesen genannten Dichtungswerkstoffen sind, aufgrund der guten Korrelation der Ergebnisse, die DMA und der 3-Punkt Biegeversuch zu bevorzugen.

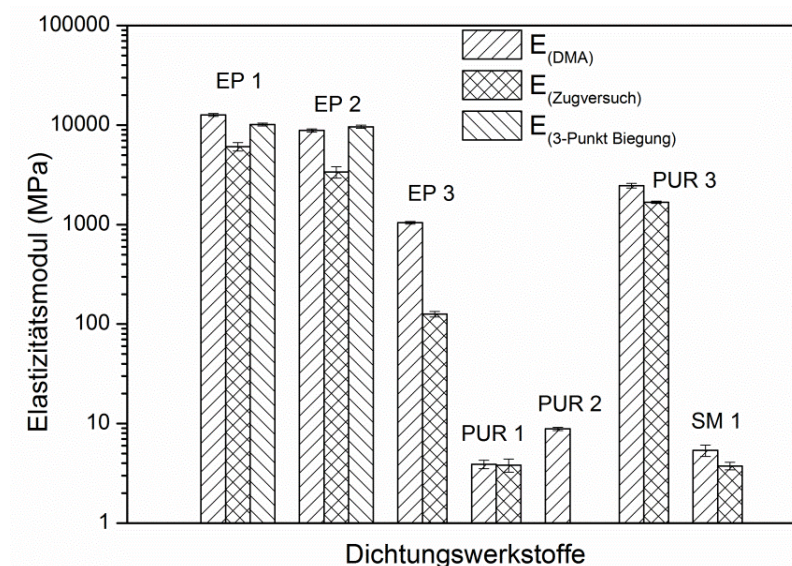


Abbildung 29: Bestimmung des Elastizitätsmoduls: Vergleich der Methoden (dynamisch-mechanische Analyse, Zugversuch, 3-Punkt Biegeversuch) bei 23 °C; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 44 angegeben

Elastische Dichtungswerkstoffe (wie PUR 1 und SM 1) zeigen einen nur geringen Einfluss der angewandten Methode auf das Ergebnis. Aufgrund dessen wurde die dynamisch-

mechanische Analyse im 3-Punkt Biegemodus als Methode zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls für alle Dichtungswerkstoffe festgelegt.

Wie in Abbildung 30 dargestellt, wird auch der Elastizitätsmodul durch die Auslagerung der Dichtungswerkstoffe in Wasser bei 40 °C für 28 Tage teilweise stark beeinflusst. Die auf Epoxid basierenden Dichtungswerkstoffe EP 1 und EP 2 zeigen einen starken Modulabfall, aber dieser ist nach wie vor auf einem hohen Niveau zu finden. Der stärkste Abfall des E-Modules ist bei dem Dichtungswerkstoff SM 1 zu beobachten. Dieser beträgt ca. 75 % von jenem des Ausgangszustandes.

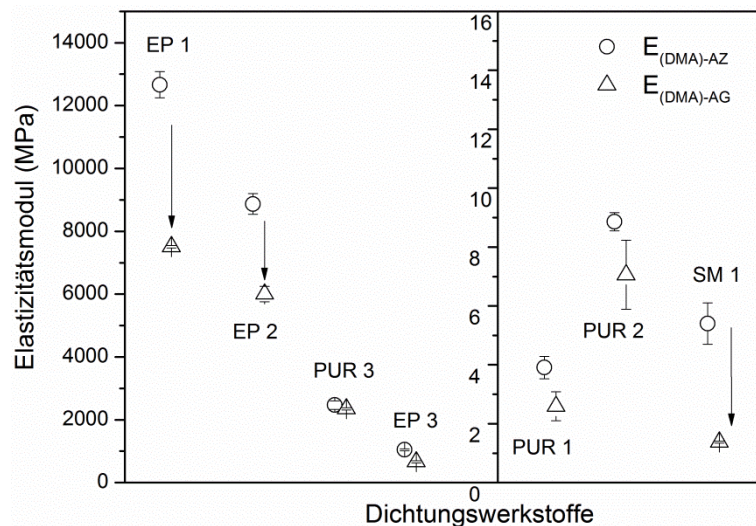


Abbildung 30: Elastizitätsmodul: gemessen mit dynamisch-mechanischer Analyse, Ausgangszustand (AZ) und nach 28 Tagen bei 40 °C in Wasser ausgelagert (AG), ausgewertet bei 23 °C; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 45 angegeben

Der mittels DMA ermittelte Elastizitätsmodul, ausgewertet bei der mittleren Einsatztemperatur von 12 °C (siehe Abbildung 31) zeigt teilweise deutliche Unterschiede zum Elastizitätsmodul ausgewertet bei 23 °C. Bereits eine Temperaturänderung von 10 °C kann die Eigenschaften des Dichtungswerkstoffes beeinflussen.

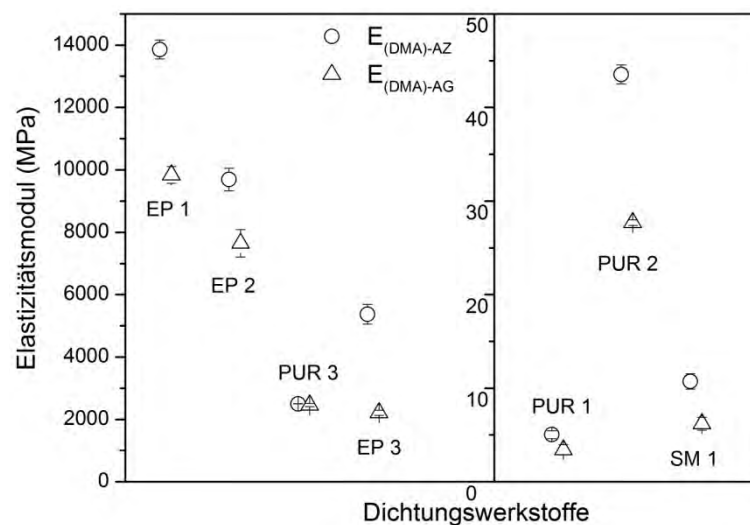


Abbildung 31: Elastizitätsmodul: gemessen mit dynamisch-mechanischer Analyse, Ausgangszustand (AZ) und nach 28 Tagen bei 40 °C in Wasser ausgelagert (AG), ausgewertet bei 12 °C; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 46 angegeben

4.2.5 Bestimmung des Wassergehaltes

Wie in den Ergebnissen gezeigt wurde, werden die Werkstoffeigenschaften wie Zugfestigkeit, E-Modul und Glasübergangstemperatur durch die Aufnahme von Wasser beeinflusst. In Abbildung 32 wird gezeigt, dass kein Dichtungswerkstoff resistent gegen die Aufnahme von Wasser ist. Aufgrund dessen wurde der Wassergehalt aller Dichtungswerkstoffe bestimmt.

Eine Auslagerung bei 7 °C führt zu einer geringeren Wasserabsorption als die Auslagerung bei 40 °C für dieselbe Zeitspanne. Dies kann durch eine Steigerung der Diffusionsrate bei höheren Temperaturen erklärt werden. Der Wassergehalt der Dichtungswerkstoffe liegt im Bereich von bis zu 4 Massenprozent (m.-%) mit Ausnahme des SM 1. Da kann ein Wassergehalt von bis zu 13 m.-% nach bereits 44 Tagen gemessen werden.

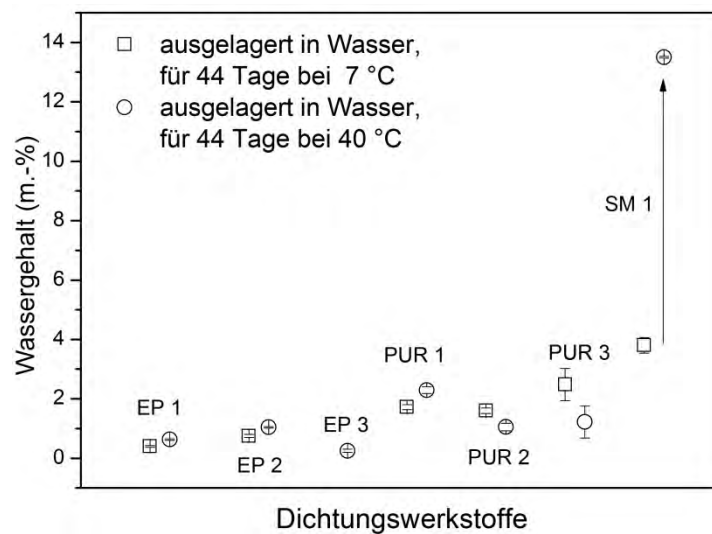


Abbildung 32: Wassergehalt: ermittelt mit der thermogravimetrischen Analyse, TGA; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 47 angegeben

Das eingelagerte Wasser in der Polymermatrix wirkt wie der Mechanismus der äußeren Weichmachung. Dieser Weichmachungseffekt konnte durch die Summe folgender Beobachtungen bei den Dichtungswerkstoffen gezeigt werden:

- Verringerung der Zugfestigkeit
- Erhöhung der Bruchdehnung
- Verringerung des Elastizitätsmoduls
- Verschiebung der Glasübergangstemperatur hin zu niedrigeren Temperaturen

Um den Einfluss von langanhaltendem Wassereinfluss auf die Dichtungswerkstoffe möglichst praxisnahe zu untersuchen, wurden Langzeituntersuchungen durchgeführt. Als Auslagerungsmedium wurde eine Mischung bestehend aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspänen gewählt. Eisenfeilspäne deswegen, da der Dichtungswerkstoff in der Muffe neben Wasser ständig mit Grauguss in Kontakt ist. Die Ergebnisse der Langzeitauslagerungen sind in Abbildung 33 bis Abbildung 35 dargestellt.

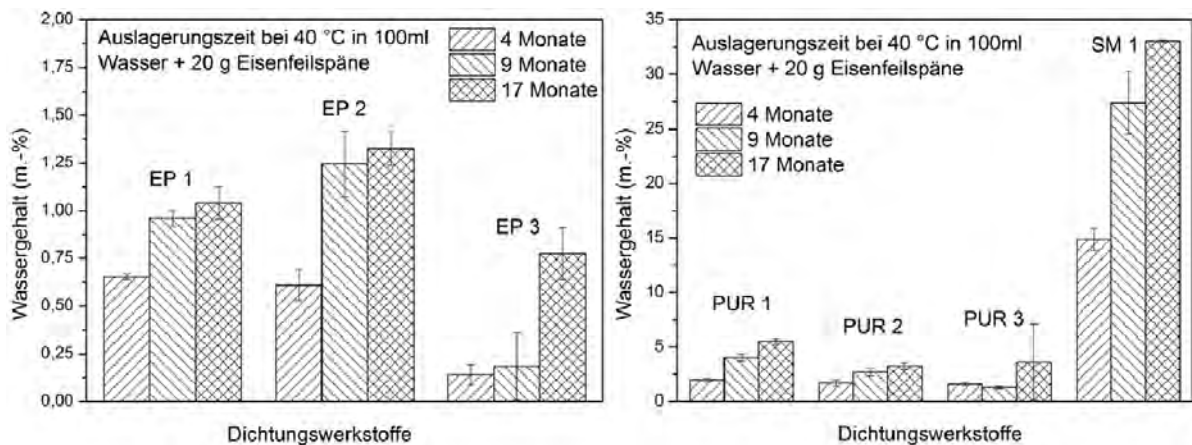


Abbildung 33: Langzeitauslagerungsversuche - Wassergehalt: 4, 9 und 17 Monate bei 40 °C in einem Medium mit einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspäne; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 48 angegeben

Wie in Abbildung 33 ersichtlich ist, nimmt der Wassergehalt über einen längeren Zeitraum zu. EP 1 und EP 2 scheinen nach spätestens 9 Monaten den Sättigungszustand erreicht zu haben. EP 3 zeigt starke Schwankungen und teilweise hohe Standardabweichungen der Mittelwerte (z.B. nach 9 Monaten Auslagerung). Betrachtet man die TGA-Kurvenverläufe der epoxidbasierenden Dichtungswerkstoffe in Abbildung 34, ist deutlich zu sehen, dass sich das thermische Abbauverhalten dieser nicht ändert.

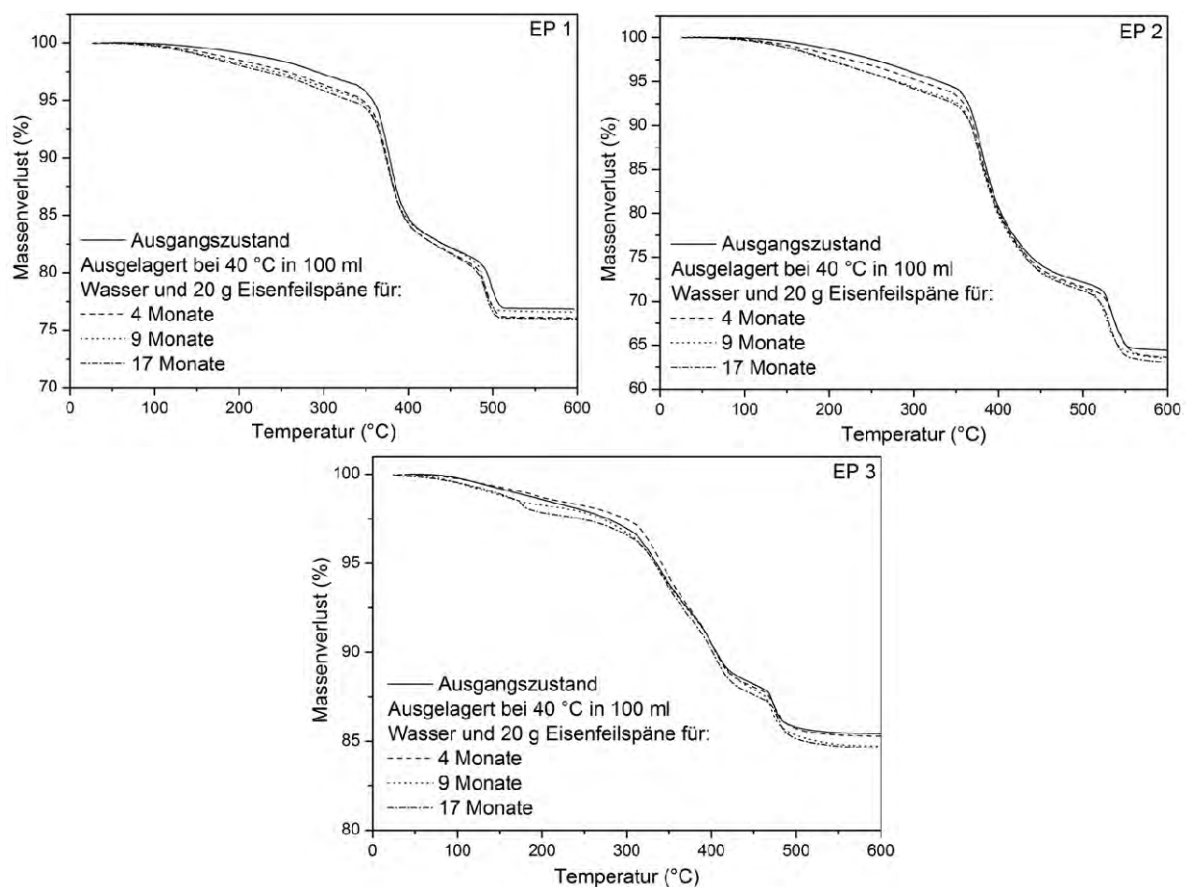


Abbildung 34: TGA-Kurven der Dichtungswerkstoffe EP 1, EP 2 und EP 3 des Ausgangszustandes sowie nach Langzeitauslagerungen bei 40 °C für 4, 9 und 17 Monate in einem Medium mit einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspänen

Es ist weder die Starttemperatur der ersten noch der zweiten Stufe des thermischen Abbaus zu niedrigeren Temperaturen verschoben. Somit gibt es keinen Hinweis auf eine Degradation dieser Dichtungswerkstoffe nach der durchgeführten Langzeitauslagerung. Dies ist vor allem aufgrund von der Wasserauslagerung (Hydrolyse) in Kombination mit den Eisenfeilspänen interessant. Kurvenunterschiede, welche die Restmasse zwischen 500 °C und 600 °C betreffen, sind aufgrund von Inhomogenität in der Verteilung des hohen Füllstoffgehaltes zu erklären. Also werden diese Dichtungswerkstoffe unter den Bedingungen der Auslagerung bei erhöhter Temperatur nicht beeinflusst und sollten zumindest 17 Monate bei 40 °C bestehen.

Auch die auf Polyurethan basierenden Dichtungswerkstoffe verhalten sich ähnlich den epoxidbasierenden Dichtungswerkstoffen (siehe Abbildung 33, rechts und Abbildung 35, oben und links unten). PUR 1 zeigt auch nach 17 Monaten noch eine geringfügige Steigerung des Wassergehaltes. Bei PUR 2 und PUR 3 ist dieser nach 9- und 14-monatiger Auslagerung innerhalb der Schwankungsbreite der Mittelwerte. Eine Änderung der Starttemperatur des thermischen Abbaus der Polyurethandichtstoffe hin zu niedrigeren Temperaturen ist ebenfalls nicht zu beobachten. Jedoch auffällig ist, dass die Polyurethane bestehend aus zwei Komponenten ab ca. 350 °C leichte Variationen im Kurvenverlauf zeigen.

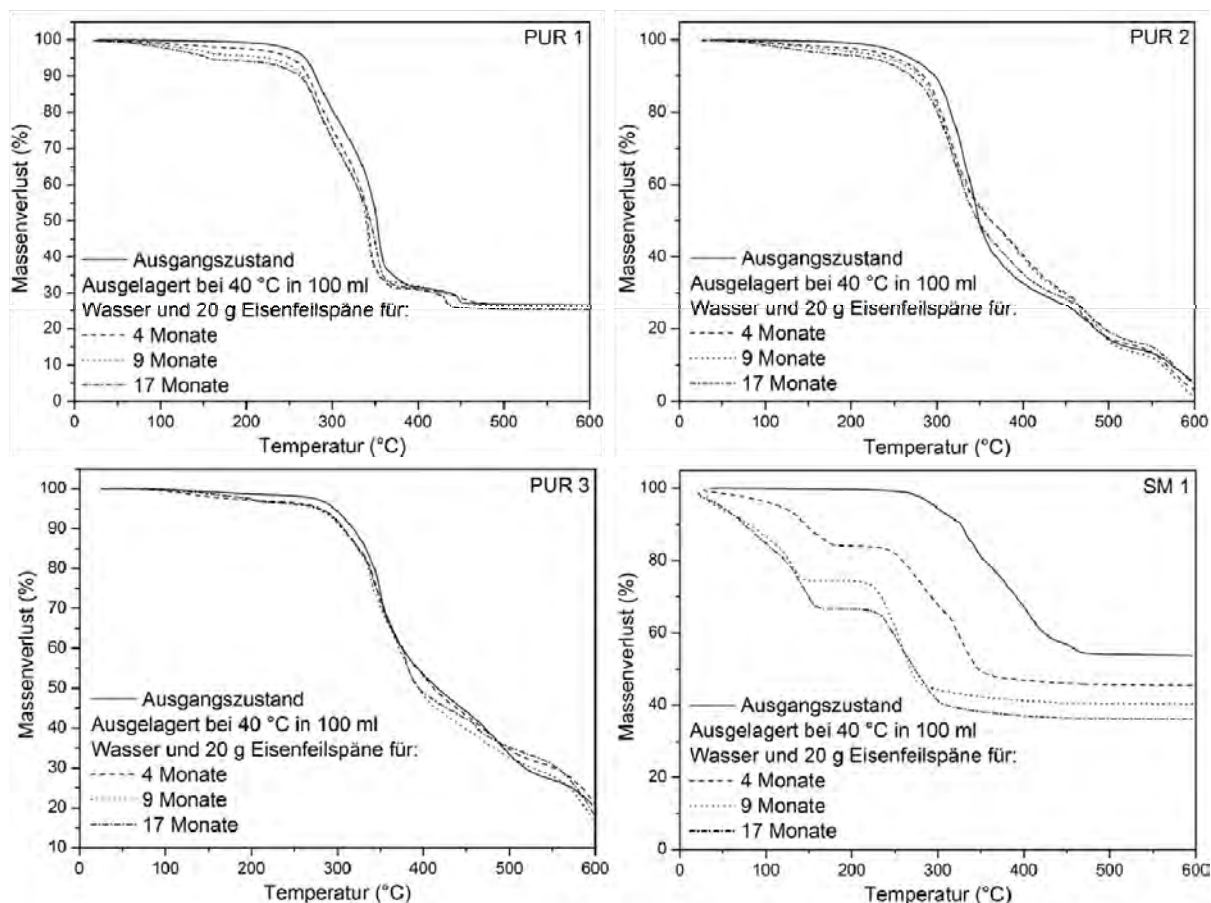


Abbildung 35: TGA-Kurven der Dichtungswerkstoffe PUR 1, PUR 2, PUR 3 und SM 1 des Ausgangszustandes sowie nach Langzeitauslagerungen bei 40 °C für 4, 9 und 17 Monate in einem Medium mit einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspänen

Ein völlig anderes Verhalten ist bei dem Dichtungswerkstoff SM 1 zu beobachten (siehe Abbildung 33, rechts und Abbildung 35, rechts unten). Es steigt nicht nur der Gehalt an absorbiertem Wasser in der Matrix stetig an, sondern es ist auch eine deutliche Degradation des Polymers zu erkennen. Dies zeigt sich dadurch, dass die Starttemperaturen der ersten und auch der zweiten Abbaustufe hin zu niedrigeren Temperaturen verschoben sind. Aufgrund dieses Langzeitverhaltens ist der Dichtungswerkstoff SM 1 nicht für den gegebenen Anwendungsfall in Wasser geeignet.

4.2.6 Haftzugfestigkeit und Beurteilung der Versagensbilder

Aufgrund des sehr stark korrodierten Zustandes im Inneren des Rohres ist es notwendig zu eruieren, wie die Oberfläche in der Muffe für eine optimale Haftung des Dichtungswerkstoffes zu präparieren ist. Dazu wurden die Haftzugversuche an Proben mit geschliffener Oberfläche durchgeführt, zusätzlich auch an Probekörpern, an denen nur die losen Korrosionsprodukte entfernt wurden.

Die Haftzugversuche dieser sieben geprüften Dichtungswerkstoffe zeigen in Abbildung 36 unterschiedliche Ergebnisse. Teilweise sind Abhängigkeiten der Haftzugfestigkeit von der Oberflächenpräparation sehr deutlich zu erkennen, jedoch gibt es auch Dichtungswerkstoffe, wo der Zustand der Oberfläche die Festigkeit des Verbundes zwischen Dichtungswerkstoff und Graugussgrundkörper kaum beeinflusst.

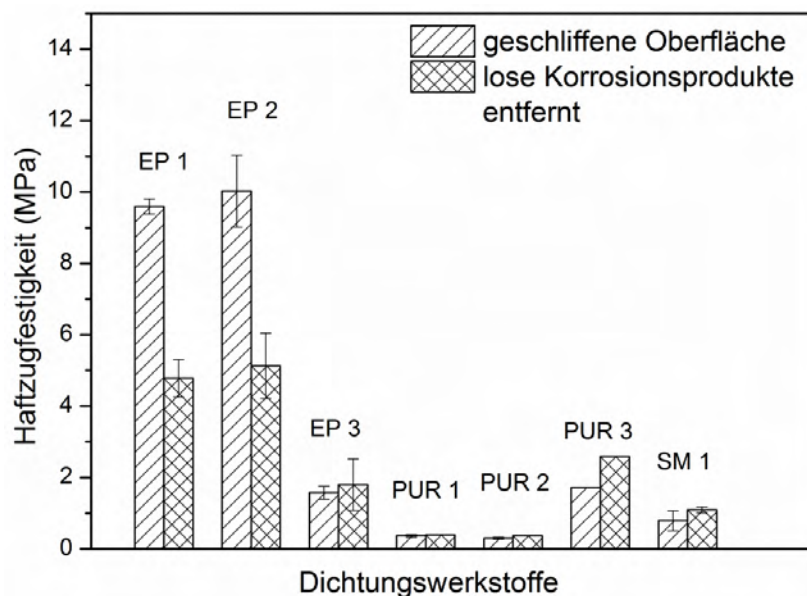


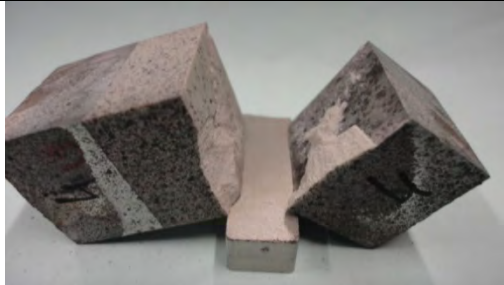
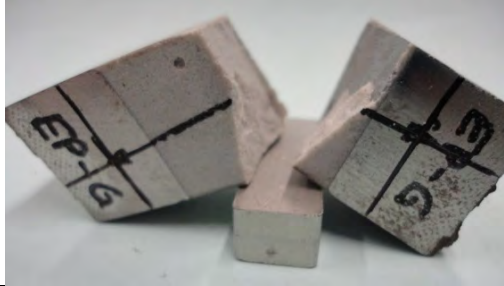
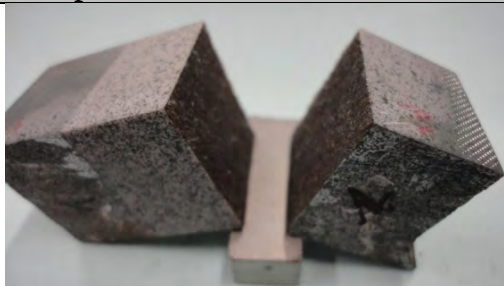
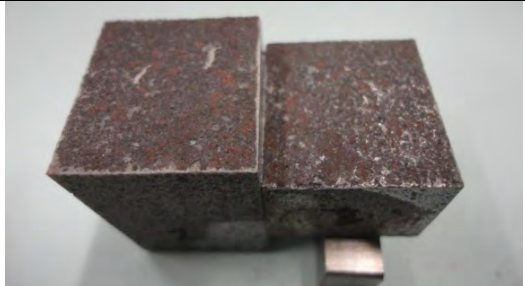
Abbildung 36: Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenpräparation, eine Testserie mit geschliffen ausgeführter Klebefläche, für die zweite Testserie wurden nur die losen Korrosionsprodukte entfernt; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 49 angegeben

Durch die Begutachtung der einzelnen Bruchbilder (Tabelle 2 bis Tabelle 8) können die Ergebnisse der Haftzugfestigkeit (siehe Abbildung 36) genauer interpretiert werden.

Die Verminderung der Haftzugfestigkeit um ca. 50 % der Dichtungswerkstoffe EP 1 und EP 2 beruht auf der Tatsache, dass bei einer geschliffenen Ausführung der Oberfläche ein teilweiser Kohäsionsbruch auftritt und sich somit die Haftzugfestigkeit der Festigkeit des Dichtungswerkstoffes selbst nähert. Werden nur die losen Korrosionsprodukte entfernt, tritt ein Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht mit stark verminderter Haftzugfestigkeit auf. Die Unterschiede bei den restlichen Dichtungswerkstoffen EP 3, PUR 1, PUR 2, SM 1 mit Ausnahme von PUR 3 sind aufgrund des Bruchverhaltens (rein adhäsives Versagen oder kohäsives Versagen), unabhängig von der Oberflächenpräparation, keine signifikanten Unterschiede in der Haftzugfestigkeit zu erkennen. PUR 3 zeigt ein eher untypisches Verhalten. Hier scheint die Festigkeit der Korrosionsschicht höher zu sein als die Haftfestigkeit des Dichtungswerkstoffes an geschliffenem Grauguss. Dafür verantwortlich ist

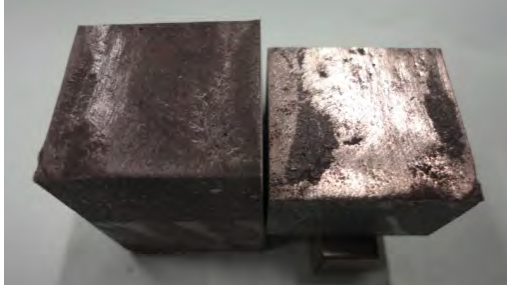
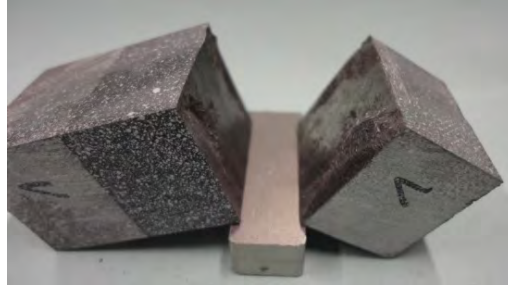
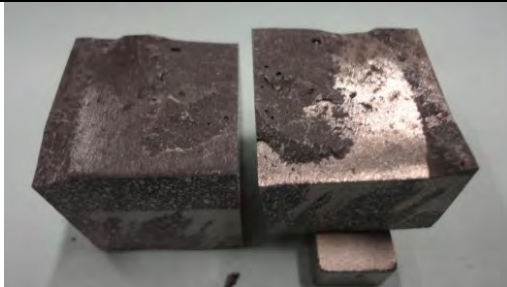
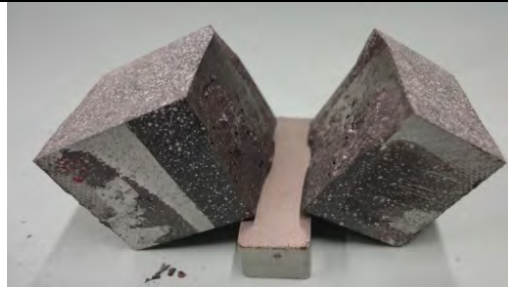
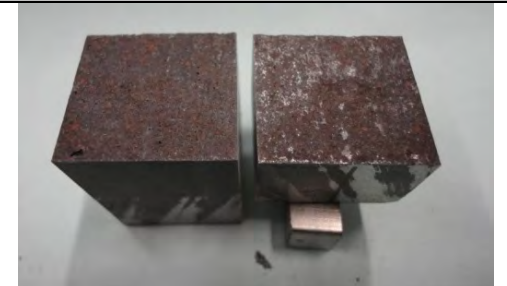
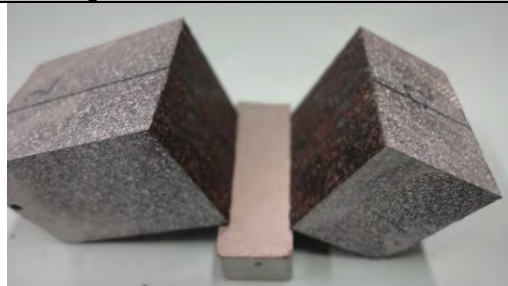
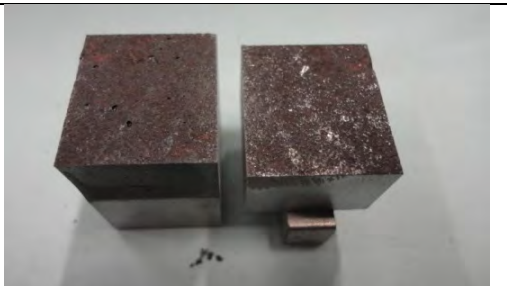
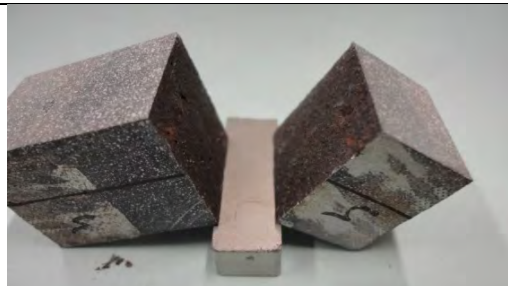
die gute mechanische Verankerung des dünnflüssigen Polyurethans mit der Korrosionsschicht und die schlechten Hafteigenschaften auf glattem bzw. geschliffenem Grauguss.

Tabelle 2: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt

Bruchbilder – geschliffene Oberfläche		
EP 1 Probe 1		
	teilweiser Kohäsionsbruch	
EP 1 Probe 2		
	teilweiser Kohäsionsbruch	
Bruchbilder – lose Korrosionsprodukte entfernt		
EP 1 Probe 1		
	Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht	
EP 1 Probe 2		
	Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht	

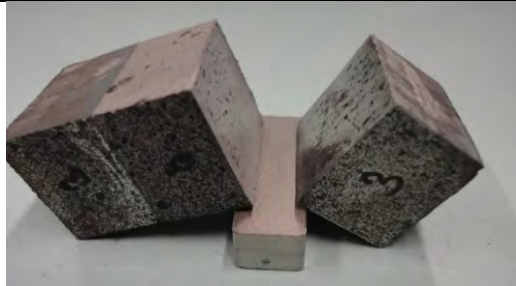
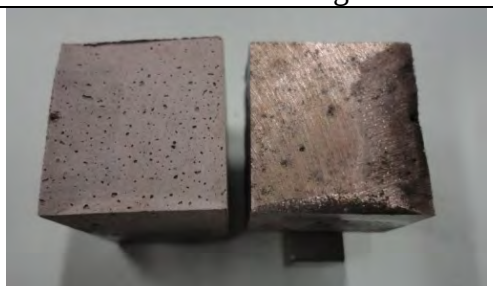
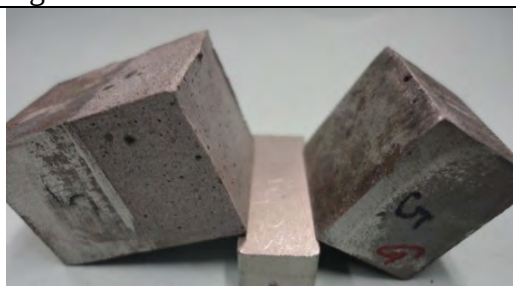
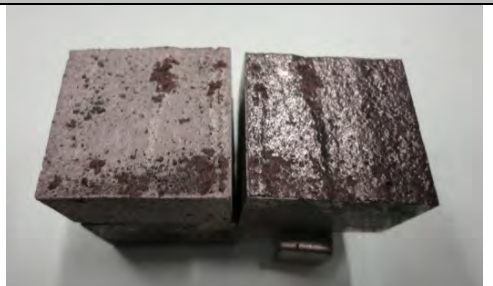
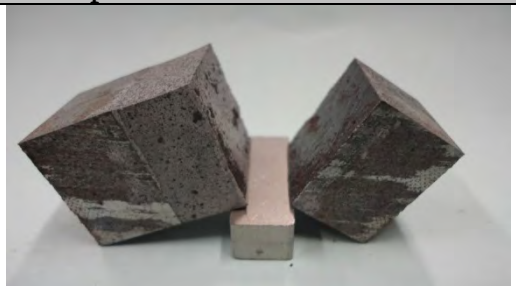
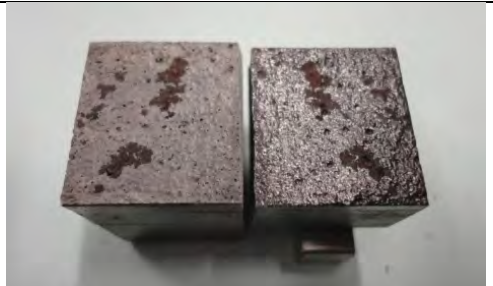
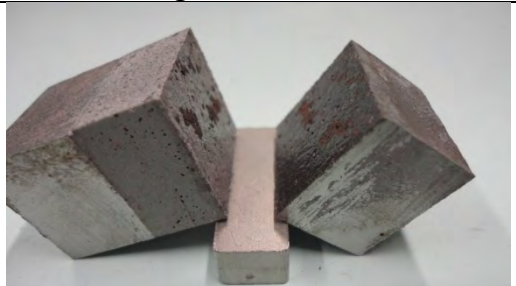
Die Bruchbilder des Dichtungswerkstoffes EP 1 sind in der Tabelle 2 dargestellt. Bei geschliffener Oberfläche tritt ein teilweiser Kohäsionsbruch in Erscheinung. Werden im Gegensatz dazu nur die losen Korrosionsprodukte entfernt, kommt es zu einem Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht, also zu einem Versagen innerhalb der Korrosionsschicht.

Tabelle 3: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt

Bruchbilder – geschliffene Oberfläche		
EP 2 Probe 1		
	teilweiser Kohäsionsbruch	
EP 2 Probe 2		
	teilweiser Kohäsionsbruch	
Bruchbilder – lose Korrosionsprodukte entfernt		
EP 2 Probe 1		
	Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht	
EP 2 Probe 1		
	Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht	

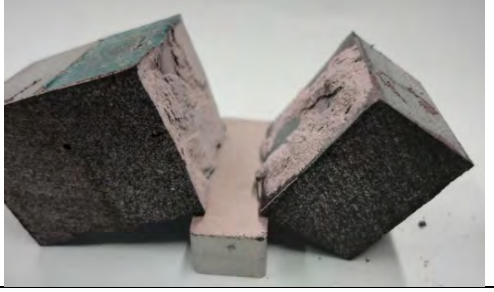
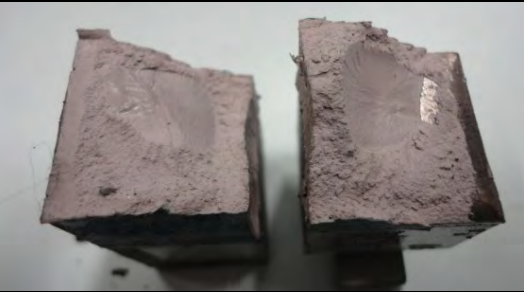
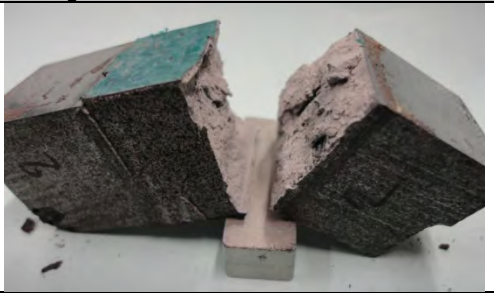
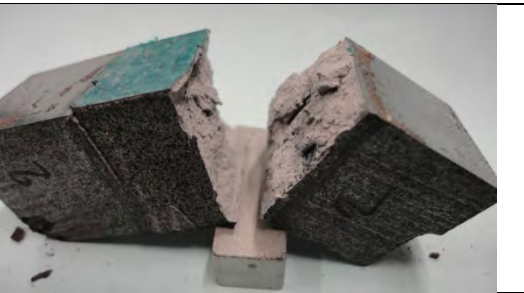
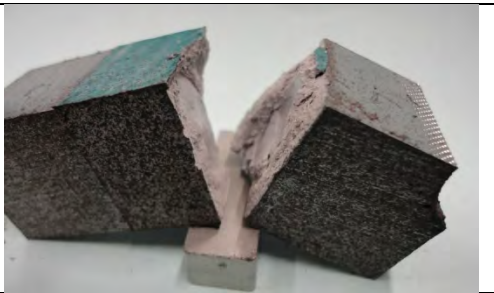
In der Tabelle 3 sind die Bruchbilder des Dichtungswerkstoffes EP 2 zu sehen. Auch in diesem Fall tritt bei geschliffener Oberfläche ein teilweiser Kohäsionsbruch auf. Ein Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht wird beobachtet, wenn nur die losen Korrosionsprodukte entfernt werden.

Tabelle 4: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP 3: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt

Bruchbilder – geschliffene Oberfläche		
EP 3 Probe 1		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	
EP 3 Probe 2		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	
Bruchbilder – lose Korrosionsprodukte entfernt		
EP 3 Probe 1		
	Mischform aus Adhäsionsbruch und kohäsivem Versagen der Korrosionsschicht	
EP 3 Probe 1		
	Mischform aus Adhäsionsbruch und kohäsivem Versagen der Korrosionsschicht	

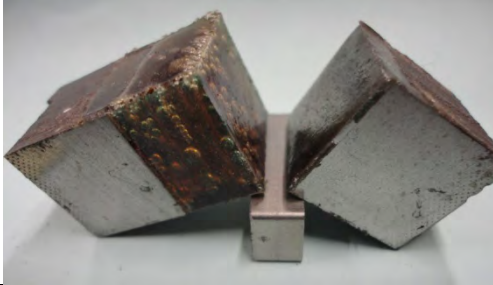
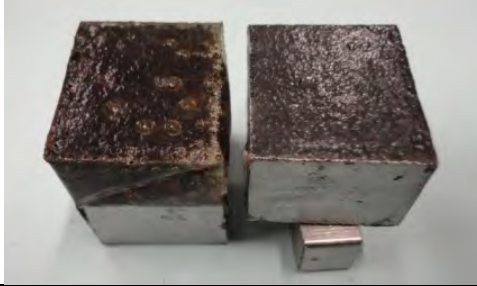
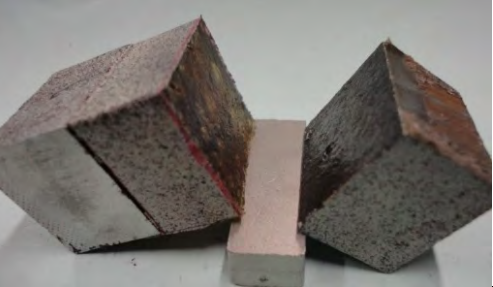
Der Dichtungswerkstoff EP 3 zeigt vollständig adhäsives Versagen, wenn die Klebefläche geschliffen wird. Eine Entfernung der losen Korrosionsprodukte führt zu einer Mischform aus adhäsivem Versagen und kohäsivem Versagen der Korrosionsschicht (siehe Tabelle 4).

Tabelle 5: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes PUR 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt

	Bruchbilder – geschliffene Oberfläche	
PUR 1 Probe 1		
	substratnahes kohäsives Versagen	
PUR 1 Probe 2		
	Kohäsionsbruch	
	Bruchbilder – lose Korrosionsprodukte entfernt	
PUR 1 Probe 1		
	Kohäsionsbruch	
PUR 1 Probe 1		
	substratnahes kohäsives Versagen	

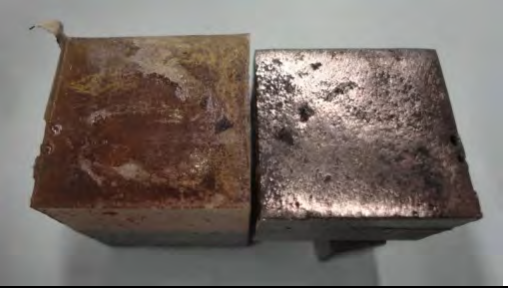
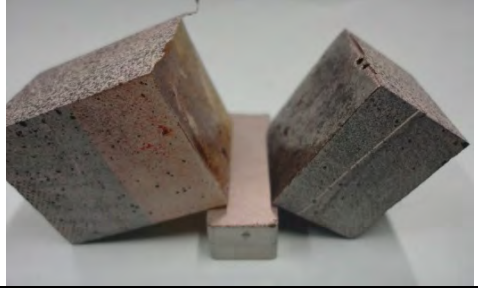
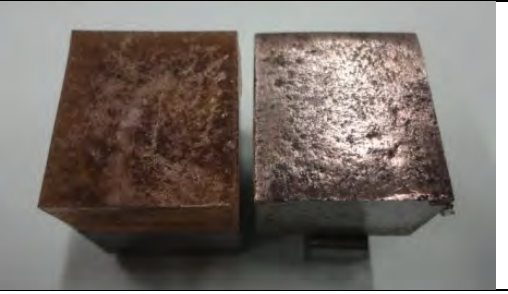
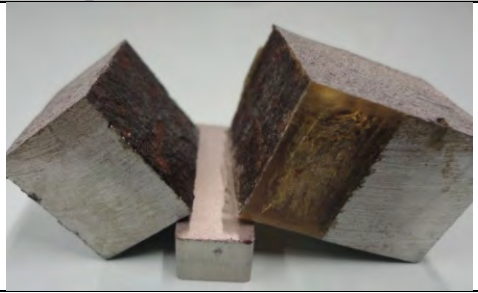
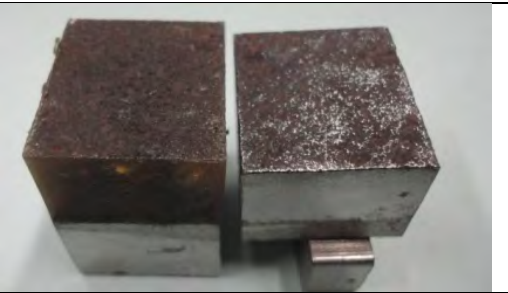
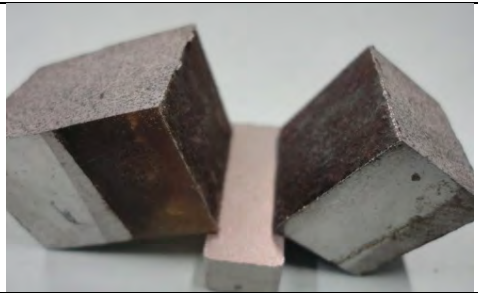
In Tabelle 5 sind die Versagensbilder des Dichtungswerkstoffes PUR 1 zu sehen. Unabhängig von der Oberflächenpräparation treten zwei mögliche Bruchformen auf: substratnahes kohäsives Versagen sowie rein kohäsives Versagen.

Tabelle 6: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes PUR 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt

	Bruchbilder – geschliffene Oberfläche	
PUR 2 Probe 1		
	reiner Adhäsionsbruch	
PUR 2 Probe 2		
	reiner Adhäsionsbruch	
	Bruchbilder – lose Korrosionsprodukte entfernt	
PUR 2 Probe 1		
	reiner Adhäsionsbruch	
PUR 2 Probe 1		
	reiner Adhäsionsbruch	

Die in Tabelle 6 abgebildeten Bruchbilder verdeutlichen, dass durch die Oberflächenpräparation die Art des Versagens bei dem Dichtungswerkstoff PUR 2 nicht beeinflusst werden kann. Es tritt unabhängig von der Oberflächenvorbehandlung in beiden Fällen rein adhäsives Versagen auf.

Tabelle 7: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes PUR 3: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt

	Bruchbilder – geschliffene Oberfläche	
PUR 3 Probe 1		
	reiner Adhäsionsbruch	
PUR 3 Probe 2		
	reiner Adhäsionsbruch	
	Bruchbilder – lose Korrosionsprodukte entfernt	
PUR 3 Probe 1		
	Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht	
PUR 3 Probe 1		
	Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht	

Die Bruchbilder des Polyurethan Dichtungswerkstoffes PUR 3 in Tabelle 7 zeigen eine Abhängigkeit zwischen Versagensart und Oberflächenvorbehandlung. Eine geschliffene Oberfläche führt zu rein adhäsivem Versagen. Werden die losen Korrosionsprodukte entfernt, tritt ein Versagen innerhalb der Korrosionsschicht auf, also ein Kohäsionsbruch der Korrosionsschicht.

Tabelle 8: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes SM 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt

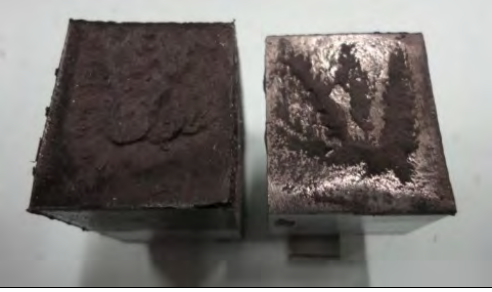
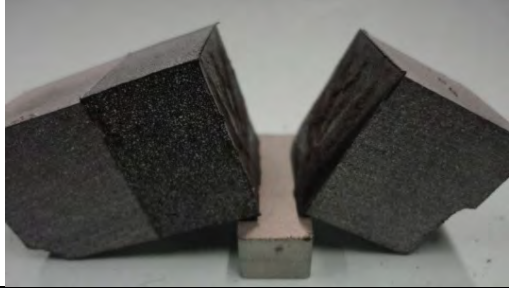
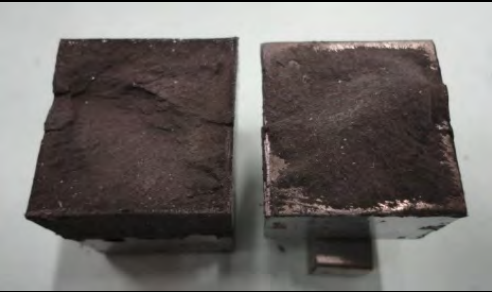
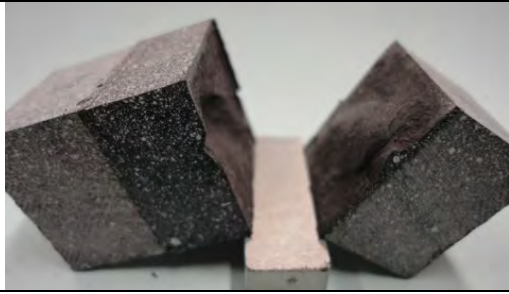
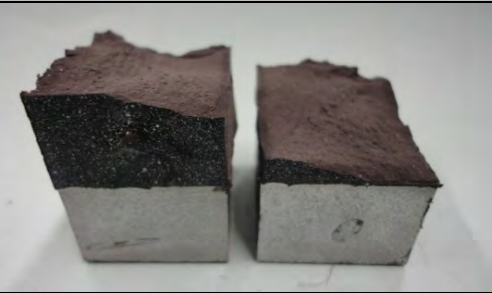
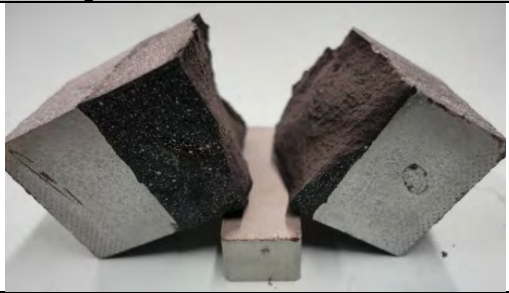
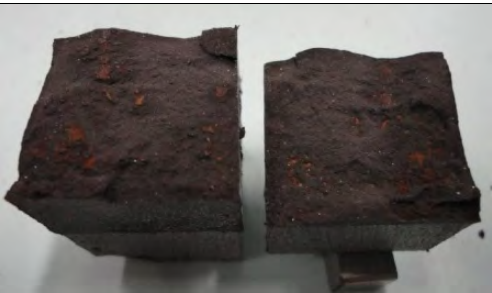
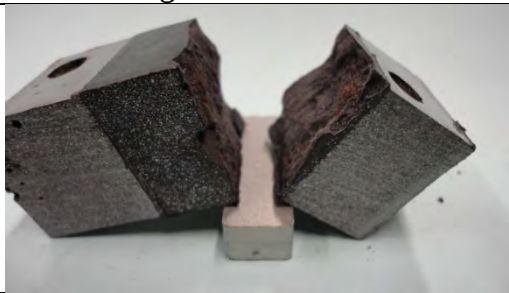
	Bruchbilder – geschliffene Oberfläche	
SM 1 Probe 1		
	substratnahes kohäsives Versagen	
SM 1 Probe 2		
	substratnahes kohäsives Versagen	
	Bruchbilder – lose Korrosionsprodukte entfernt	
SM 1 Probe 1		
	substratnahes kohäsives Versagen	
SM 1 Probe 1		
	substratnahes kohäsives Versagen	

Tabelle 8 zeigt die Bruchbilder des Haftzugversuches von dem Dichtungswerkstoff SM 1. In diesem Fall ist substratnahes kohäsives Versagen, unabhängig von der Oberflächenvorbehandlung, zu beobachten.

Zusammenfassend aus der Bewertung der Bruchbilder kann gesagt werden, dass jeder Werkstoff unterschiedliches Adhäsionsverhalten zeigt. Ein kohäsives Versagen ist zu bevorzugen (wenn auch die Dehnung entsprechend hoch ist), da in diesem Fall die

mechanischen Eigenschaften des Dichtungswerkstoffes besser ausgenutzt werden können. Dieser Fall tritt bei den favorisierten Epoxiden jedoch nur bei geschliffener Oberfläche ein. Verbleibt eine Korrosionsschicht auf der Klebefläche, wirkt sich diese negativ auf die Festigkeit des Verbundes aus und es kommt zu einem Versagen innerhalb der Korrosionsschicht. Die 2K-Polyurethane zeigen im Allgemeinen, unabhängig von der Oberflächenpräparation, rein adhäsives Versagen. Bei den elastischen 1K-Dichtungswerkstoffen kann, unabhängig von der Oberflächenbearbeitung, kohäsives Versagen beobachtet werden. Ein Verbleiben der Korrosionsschicht kann sich aber über längere Sicht nachteilig auf den Verbund auswirken.

4.2.7 Dehnungsverhalten von Haftzugproben

Die Dehnung der Haftzugproben wurde, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, über die Traverse der Zugprüfmaschine aufgenommen. Die Ergebnisse spiegelten jedoch nicht das erwartete Werkstoffverhalten wider. Durch Auswertung der Bildaufnahmen (welche für eine Auswertung mittels 2D-Bildkorrelation aufgenommen wurden) konnte festgestellt werden, dass es bei den spröden Dichtungswerkstoffen zu einer Verschiebung der Backen in den Klemmen der Zugprüfmaschine gekommen ist (siehe Abbildung 37).

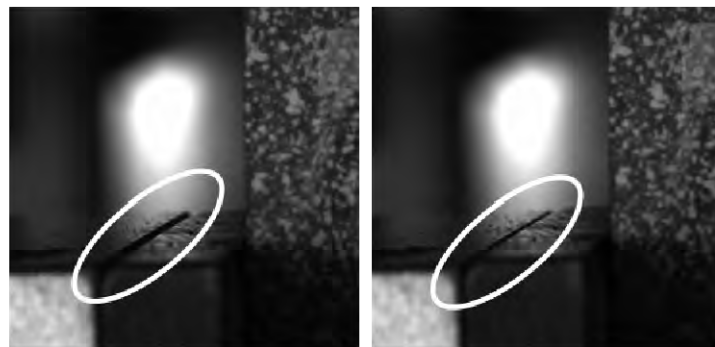


Abbildung 37: Verschiebung der Backen in der Klemme der Zugprüfmaschine

Deswegen entspricht die Dehnung, welche über die Traverse aufgenommen wurde, nicht den real auftretenden Dehnungen. Ein Vergleich der Bruchdehnung aus dem Spannungs-Dehnungsverhalten sowie jener aus der 2D-Bildkorrelation ermittelten Dehnung ist in Abbildung 38 dargestellt.

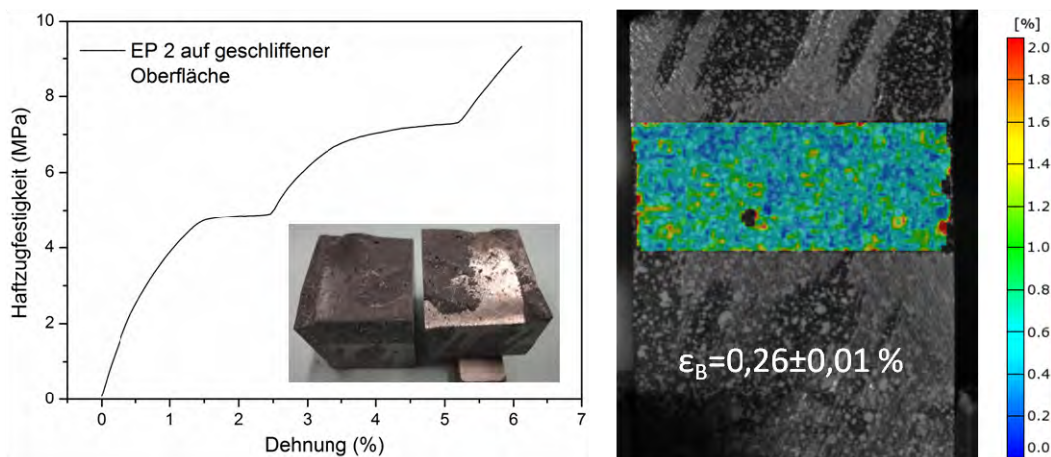


Abbildung 38: Haftzugversuch; links: Dehnungsverlauf im Haftzugversuch aufgenommen über die Traverse; rechts: mittels 2D-Bildkorrelation ermittelte Hauptformänderung

Es konnte gezeigt werden, dass bei der Bestimmung mittels Traverse Dehnungswerte von mehreren Prozent auftreten, denen die realen und auch erwarteten Werte im Bereich von 0,3 % gegenüberstehen. Aus diesem Grund wurden die Dehnungen für alle Haftzugversuche aus den Verformungsbildern ermittelt. Bei elastischem Verhalten der Dichtungswerkstoffe wurde die Dehnung zum Zeitpunkt der Rissinitiierung aus der 2D-Bildkorrelation berechnet. Die Dehnung bei Rissinitiierung wurde gewählt, da ab diesem Zeitpunkt ein Werkstoffversagen eintritt. Die weiterhin auftretende Dehnung kann nicht mehr als relevant betrachtet werden, da es sich nur mehr um Ablöse- und/oder Versagensvorgänge handelt. Dies kann anhand von Abbildung 39 nachvollzogen werden. Die Rissinitiierung tritt bei diesem Dichtungswerkstoff bereits kurz vor dem Maximum der Haftzugfestigkeit ein. Die in den Bildern gezeigten Schädigungen zum Zeitpunkt der Rissinitiierung bis hin zum vollständigen Versagen (Stufe 85, 110, 135, 160, 185, 210) sind im Diagramm der Abbildung 39 den jeweiligen Spannungs-Dehnungswerten zugeordnet.

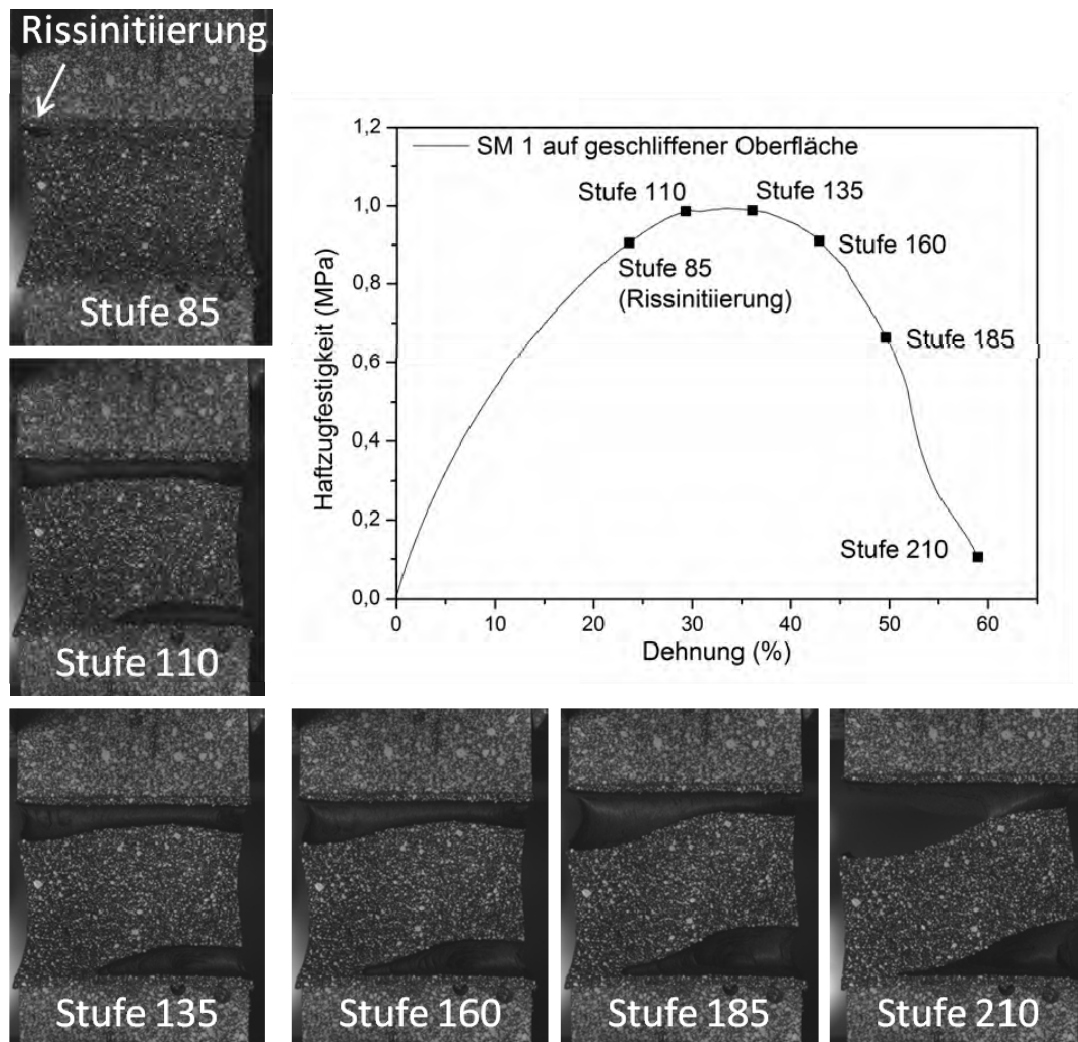


Abbildung 39: Spannungs-Dehnungskurve einer Haftzugprobe, SM 1 auf geschliffener Oberfläche mit Zuordnung der gezeigten Stufenbilder zu den jeweiligen Spannungs-Dehnungswerten

Die aus der 2D-Bildkorrelation ermittelten Dehnungen wurden nach folgender Methode berechnet: Entlang von drei Schnittlinien in Y-Richtung durch die Prüffläche wurde der Mittelwert des Verlaufes der Hauptformänderung bestimmt (siehe Abbildung 40). Es wurde

die Hauptformänderung gegenüber der Dehnung in Y-Richtung vorgezogen, da damit ein realeres Abbild der Dehnung betrachtet werden kann. Genauer gesagt fließen in die Hauptformänderung auch Dehnungen in die X-Richtung ein, die zum Beispiel bei elastischen Dichtungswerkstoffen in Form von Einschnürungen (siehe Abbildung 39, Bild: Stufe 85) auftreten. In diesem Fall zeigt die Hauptformänderung bei Rissinitiierung (ermittelt aus der 2D-Bildkorrelation) einen höheren Dehnungswert als die vergleichbare Dehnung in Zugrichtung (Y-Richtung) beim Zugversuch.

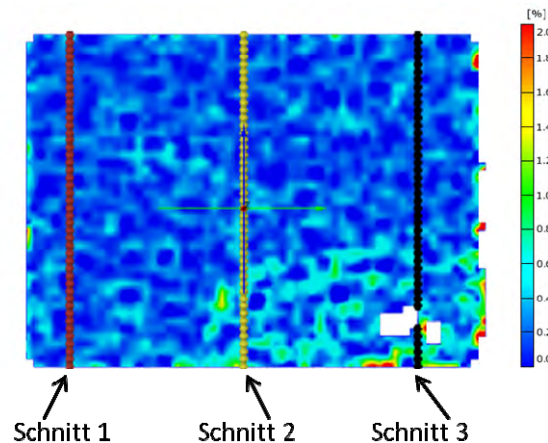


Abbildung 40: Bestimmung der Dehnung entlang von drei durch die Prüffläche gelegten Schnitten

In Tabelle 9 sind die Mittelwerte der Dehnungen bei Rissinitiierung aus zwei Haftzugproben des jeweiligen Oberflächenzustandes (geschliffen und lose Korrosionsprodukte entfernt) angegeben.

Tabelle 9: Dehnung (Hauptformänderung) der Haftzugproben, geschliffene Oberfläche und lose Korrosionsprodukte entfernt, * es war keine Auswertung der Dehnung mit 2D-Bildkorrelation möglich

Dichtungswerkstoffe	geschliffene Oberfläche Dehnung (%)		lose Korrosionsprodukte entfernt Dehnung (%)	
	arithm. MW	STABW	arithm. MW	STABW
EP 1	0,3	0,1	0,3	0,0
EP 2	0,3	0,0	0,3	0,1
EP 3	*	*	2,2	0,2
PUR 1	78,5	3,4	76,8	2,5
PUR 2	1,9	0,3	1,5	0,5
PUR 3	0,2	0,1	0,3	0,0
SM 1	13,6	1,7	35,7	2,7

4.2.8 Korrelation der Bruchdehnung aus Zugversuch und Haftzugversuch

Um das Dehnungsverhalten der Dichtungswerkstoffe zu untersuchen, wurde einerseits die Bruchdehnung beim Zugversuch ermittelt. Andererseits ist es jedoch wichtig, die mögliche Dehnung des Dichtungswerkstoffes in einem Verbund mit Grauguss zu kennen. Dieser muss die Eigenschaft besitzen, geringe Bewegungen aufgrund von Temperaturschwankungen zu

kompensieren, ohne dass im Verbund eine Schädigung auftritt. In Abbildung 41 sind eine Korrelation der Bruchdehnungswerte aus dem Zugversuch und jene aus dem Haftzugversuch doppellogarithmisch dargestellt. Es kann sehr deutlich gezeigt werden, dass die Dehnungswerte der Haftzugproben geringer sind als jene aus dem Zugversuch. Somit ist eine Untersuchung dieser in einem Haftzugversuch, woraus die Dehnung als Hauptformänderung aus der 2D-Bildkorrelation berechnet wird, für die folgende Werkstoffentwicklung unbedingt notwendig.

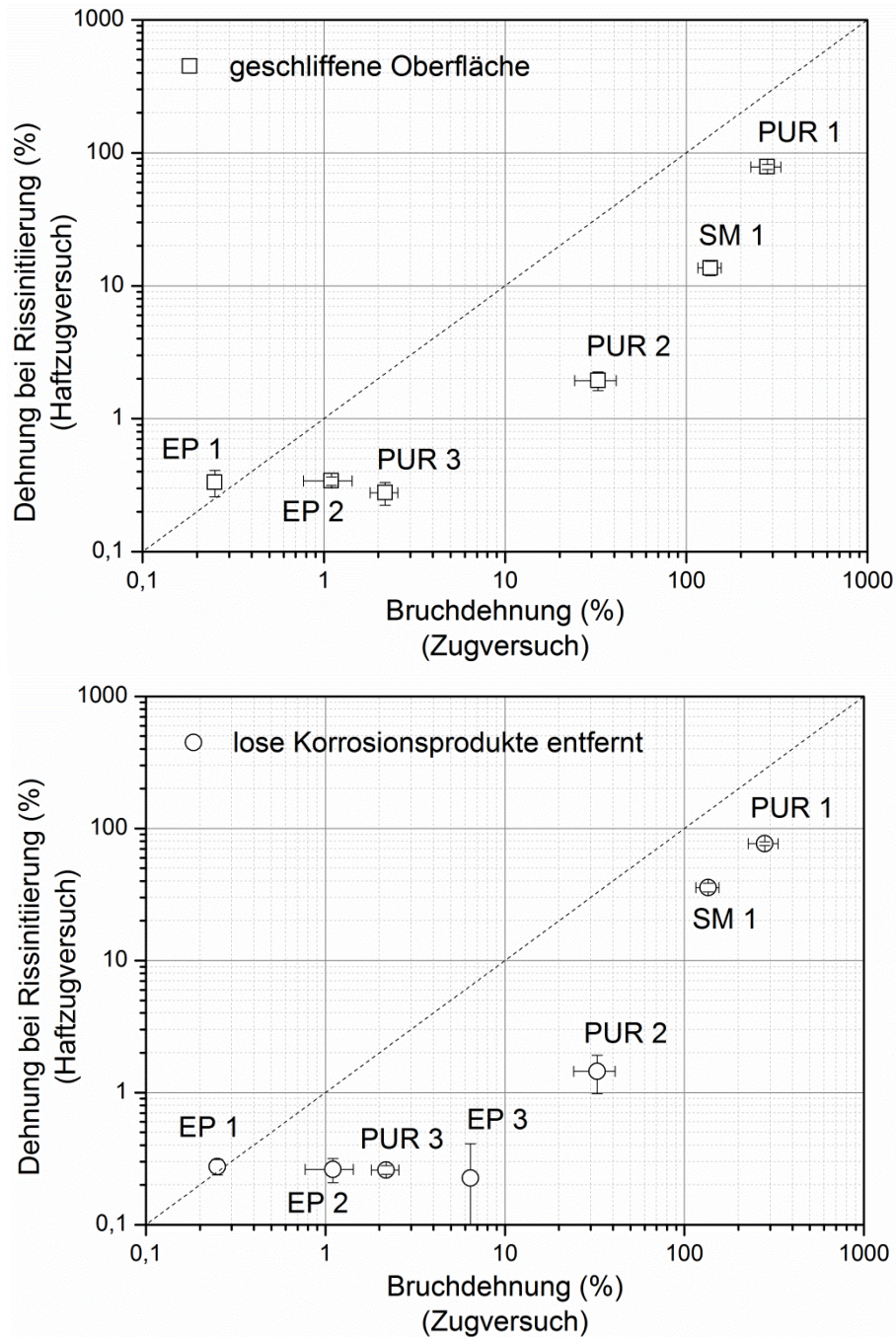


Abbildung 41: Korrelation der Bruchdehnungswerte aus Zugversuch und Haftzugversuch; oben: Klebefläche geschliffen ausgeführt; unten: die losen Korrosionsprodukte auf der Klebefläche entfernt; Daten zu den Diagrammen sind im Anhang in Tabelle 50 angegeben

4.2.9 Schlussfolgerungen aus den bisherigen Untersuchungen

Die Untersuchungen der kommerziellen Dichtungswerkstoffe haben gezeigt, dass mehrere davon die Anforderungen nicht erfüllen.

- Bei dem Dichtungswerkstoff EP 3 liegen der T_g sowie die Anwendungstemperatur im selben Temperaturbereich. Darüber hinaus tritt bei einer geschliffenen Graugussoberfläche rein adhäsives Versagen mit niedrigen Haftzugfestigkeiten auf.
- Das Polyurethan PUR 2 wird ebenfalls aufgrund der Lage des T_g und der niedrigen Haftzugfestigkeit (adhäsives Versagen) nicht weiter in Betracht gezogen.
- PUR 3 zeigt an der geschliffenen Graugussoberfläche einen niedrigen Wert der Haftzugfestigkeit sowie einen geringeren Wert der Dehnung (für den Ausgleich von Rohrbewegungen).
- Der Dichtungswerkstoff SM 1 zeigt nach Langzeitversuchen starke Degradation durch die Auslagerung in Wasser. Die hohe Wasseraufnahme und die daraus resultierende starke Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften machen diesen Werkstoff für die Anwendung ungeeignet.

Im Gegensatz dazu konnte durch die Untersuchungen des mechanischen und physikalischen Verhaltens bei den Dichtungswerkstoffen EP 1, EP 2 sowie PUR 1 gezeigt werden, dass diese die Grundanforderungen erfüllen.

- EP 1 und EP 2 zeigen trotz der Aufnahme von Wasser noch ein hohes Niveau an mechanischem Verhalten und beide Dichtungswerkstoffe verfügen über gute Haftzugeigenschaften auf geschliffenen Graugussoberflächen. Jedoch ist durch die geringe Bruchdehnung der notwendige Ausgleich von Längenänderungen durch den Dichtungswerkstoff im Muffenspalt nicht gewährleistet.
- Die Eigenschaften von PUR 1 zeigen ebenfalls gutes Werkstoffverhalten im Wassermilieu und auch das Bruchverhalten ist als positiv zu bewerten. Voraussichtlich wird sich die hohe Elastizität nachteilig auf die Druckbeständigkeit dieses Dichtungswerkstoffes auswirken.

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse wurden Laborversuche zur Druckbeständigkeit nur an den Dichtungswerkstoffen EP 2 und PUR 1 durchgeführt (siehe Kapitel 4.2.10). Diese Ergebnisse werden deutlich machen, welcher der Werkstoffe hinsichtlich einer Optimierung für den Anwendungsfall zu modifizieren ist.

- Speziell aus den Ergebnissen der Haftzugprüfung hat sich gezeigt, dass die Bearbeitung der Oberfläche durchaus eine wichtige Rolle für einen optimalen Verbund aus Dichtungswerkstoff und Muffe darstellt. Aufgrund dessen muss das in Kapitel 4.1 definierte System zur Muffensanierung um ein Teilsystem, einer sogenannten Grenzsicht zwischen Muffenspalt und Dichtungswerkstoff erweitert werden (siehe Abbildung 42).

Um diese Grenzsicht zu eliminieren und den Einfluss auf die Haftzugfestigkeit sowie auf die Druckbeständigkeit so gering wie möglich zu halten, ist eine ordentliche Reinigung des Muffenspaltes unerlässlich (siehe Kapitel 4.3).



Abbildung 42: Das System Muffensanierung, Erweiterung der Untersysteme um die Grenzschicht und deren Interaktion

Abschließend kann eine Prüfprozedur für die Beurteilung von Werkstoffen des Systems zur Muffensanierung (Abbildung 42) von druckbeaufschlagten Graugussrohren erstellt werden. Die wichtigsten Eigenschaften und die entsprechenden Prüfungen sind nachfolgend zusammengefasst.

Wasseraufnahme und Abbauverhalten:

- Thermogravimetrische Analyse

Mechanische Eigenschaften und Einfluss von Wasserabsorption:

- Zugversuch zur Bestimmung von Zugfestigkeit und Bruchdehnung
- Dynamisch-mechanische Analyse zur Bestimmung des E-Moduls und der Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften und Einfluss von Wasserabsorption:

- Dynamisch-mechanische Analyse zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur und somit des Anwendungstemperaturbereiches

Haftungseigenschaften auf Grauguss:

- Haftzugfestigkeit und Dehnungsfähigkeit des Dichtungswerkstoffes im Verbund mit Grauguss und Bestimmung des Einflusses der Oberflächenpräparation

Druckbeständigkeit von Dichtungswerkstoffen:

- Druckversuche zur Bestimmung des Verformungsverhaltens sowie auftretender Dehnungen in einem Spalt unter Druckbeaufschlagung

Darüber hinaus sollen die Lebensmitteltauglichkeit und die Verarbeitung mit dem Roboter ebenfalls erfüllt werden.

4.2.10 Druckbeständigkeit im Laborversuch

Wie in den Schlussfolgerungen in Kapitel 4.2.9 bereits erwähnt, wurde die Druckbeständigkeit im Laborversuch nach einer Vorauswahl nur mehr an den Dichtungswerkstoffen EP 2 und PUR 1 durchgeführt. Die Ergebnisse sind anhand von 3D-Verformungsbildern, welche die Verschiebung in Y-Richtung (senkrecht zur Druckscheibe) zeigen, dargestellt. Auch der Verlauf der Durchbiegung entlang einer Schnittlinie der 3D-Verformungsbilder wird nachfolgend gezeigt.

Die Ergebnisse der Druckbeständigkeit für den Dichtungswerkstoff EP 2 sind in Abbildung 43 für eine Spaltbreite von 10 mm und in Abbildung 44 für die Spaltbreite von 30 mm dargestellt.

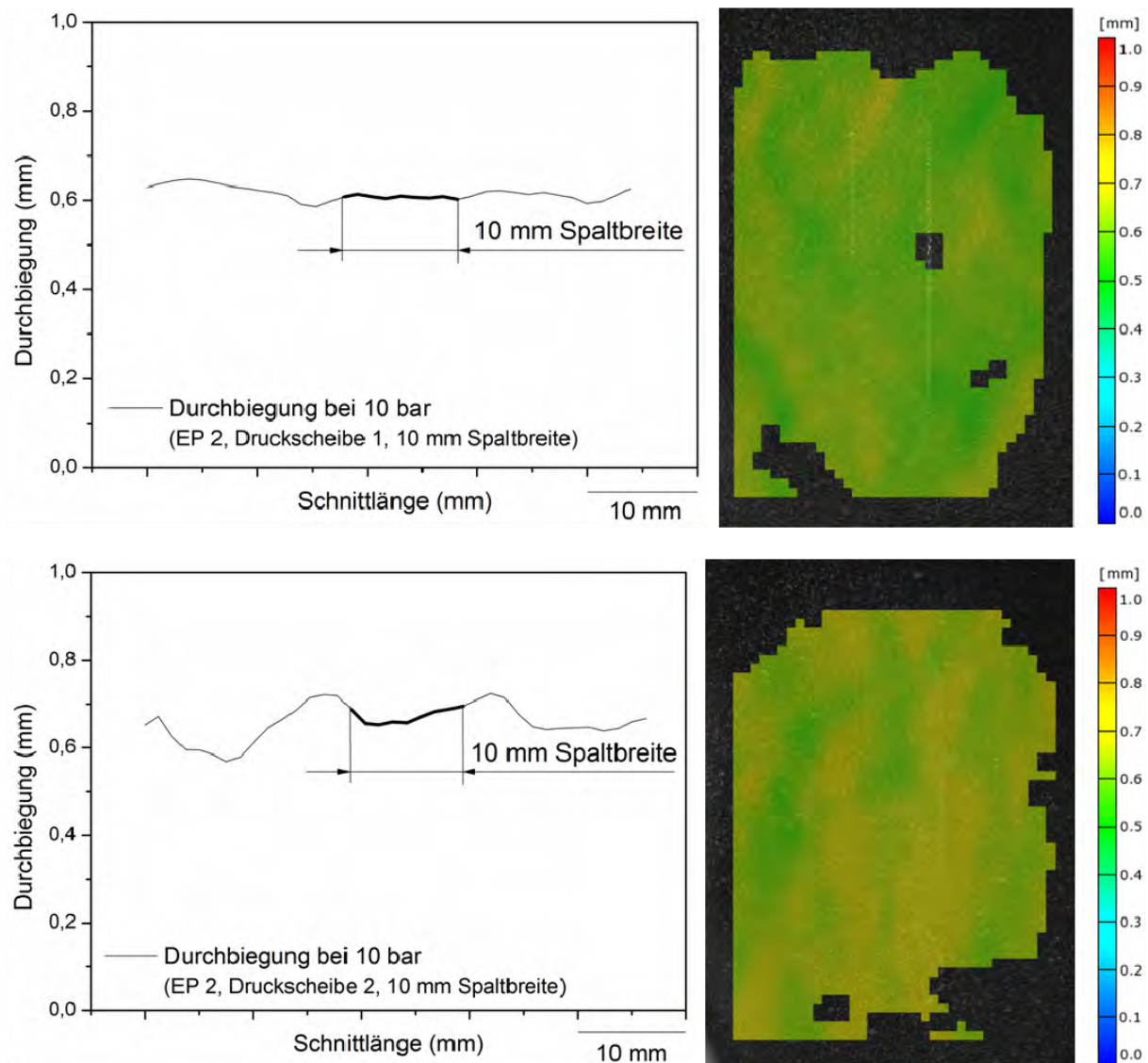


Abbildung 43: Druckbeständigkeit: EP 2, Spaltbreite 10 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; oben: Druckscheibe 1; unten: Druckscheibe 2; links: Darstellung der Verschiebung in einem Schnitt; rechts: 3D-Verformungsbild der Verschiebung senkrecht zur Druckscheibe

Unabhängig von den Spaltbreiten konnte in diesem Versuch gezeigt werden, dass die geforderte Druckbeständigkeit bis 10 bar durch den Dichtungswerkstoff EP 2 erfüllt werden kann. Die aufgetretene Durchbiegung im Zehntel-Millimeter-Bereich ist als Verschiebung der

gesamten Druckscheibe zu interpretieren. Am Übergang Druckscheibe/Dichtungswerkstoff sind keine Änderungen der Durchbiegung zu beobachten.

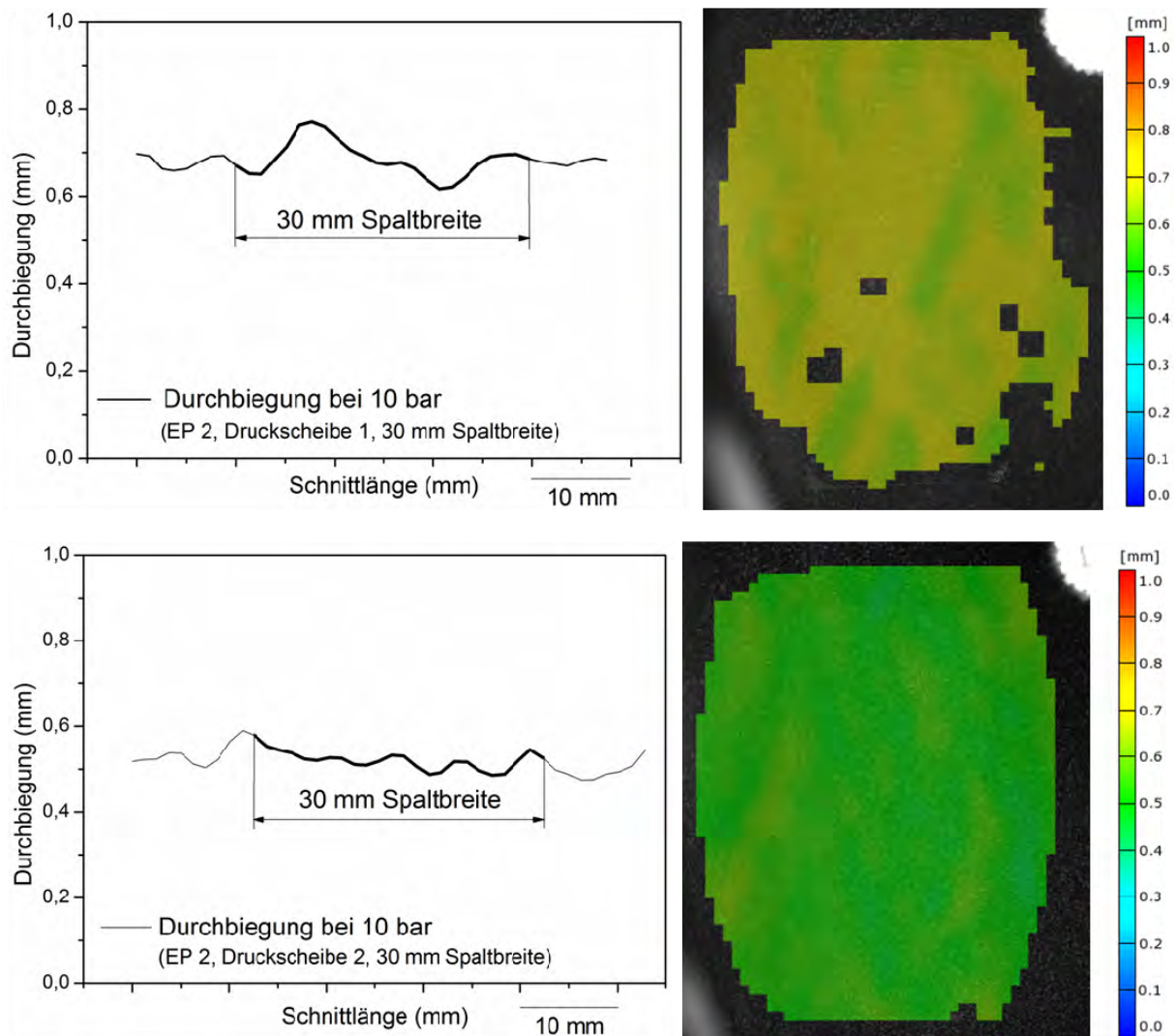


Abbildung 44: Druckbeständigkeit: EP 2, Spaltbreite 30 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; oben: Druckscheibe 1; unten: Druckscheibe 2; links: Darstellung der Verschiebung in einem Schnitt; rechts: 3D-Verformungsbild der Verschiebung senkrecht zur Druckscheibe als Projektion auf das Projektbild

Wie erwartet zeigt sich beim Dichtungswerkstoff PUR 1 im Druckversuch ein völlig anderes Verhalten (siehe Abbildung 45 und Abbildung 47). Bereits bei einem Prüfdruck von 2 bar treten Durchbiegungen des Dichtungswerkstoffes auf, die vor allem bei einer Spaltbreite von 30 mm nicht mehr zu vernachlässigen sind. Betrachtet man die Hauptformänderung bei einer Spaltbreite von 30 mm und einem Druck von 2 bar (siehe Abbildung 46), wird deutlich, dass im Bereich nahe der Klebefläche sehr große Dehnungen von 40 % bis 50 % auftreten. Ab einem Prüfdruck von 2 bar ist eine Schädigung des Verbundes zwischen der Druckscheibe des Dichtungswerkstoffes bei einer Spaltbreite von 30 mm zu beobachten (siehe Abbildung 48). Vollständiges Werkstoffversagen, also Undichtheit, tritt bei ca. 7 bar ein. Die Druckprüfung ist somit durch den Dichtungswerkstoff PUR 1 nicht bestanden. Es kann schlussgefolgert werden, dass derart elastische Dichtungswerkstoffe für diesen Anwendungsfall in druckbeaufschlagten Rohren völlig ungeeignet sind.

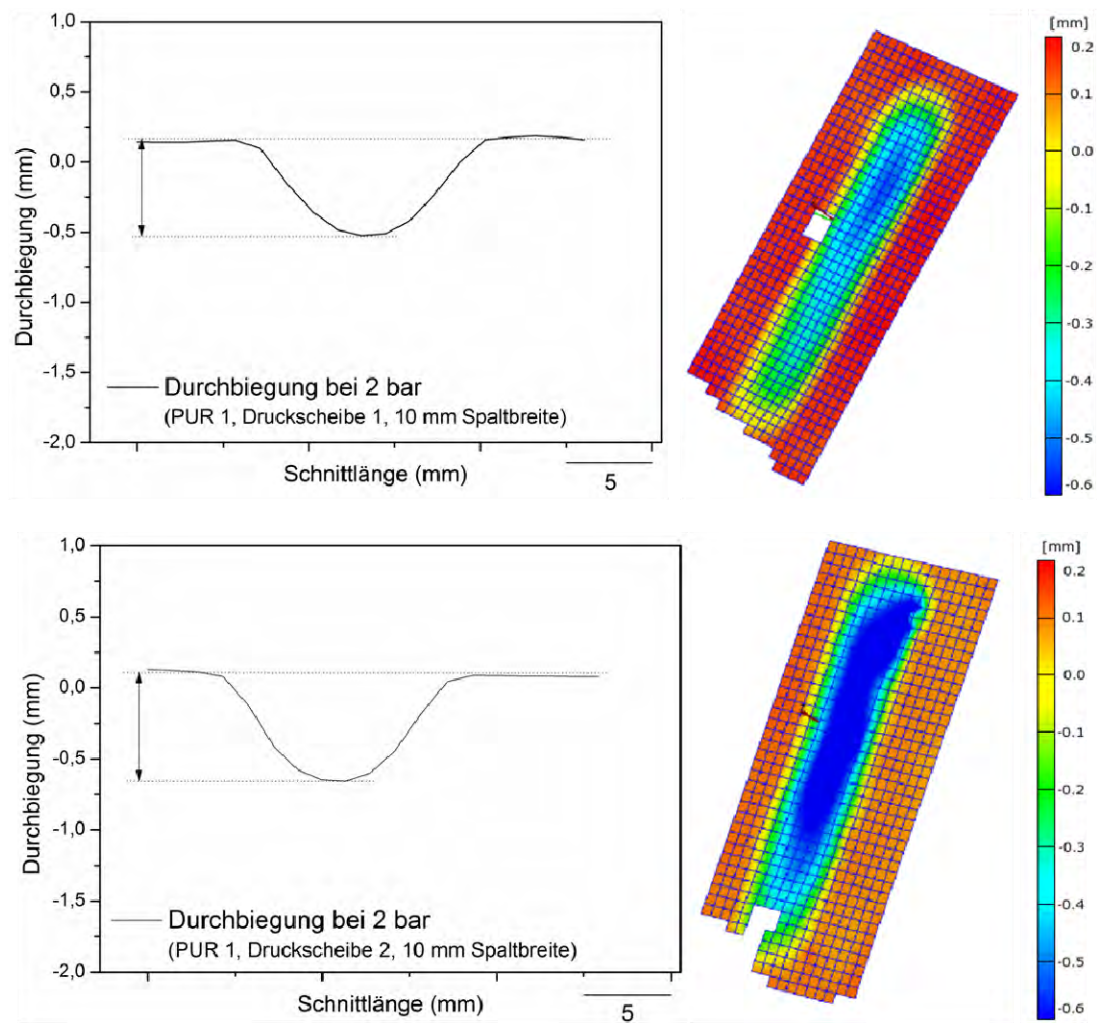


Abbildung 45: Druckbeständigkeit: PUR 1, Spaltbreite 10 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 2 bar; oben: Druckscheibe 1; unten: Druckscheibe 2; links: Darstellung der Verschiebung in einem Schnitt; rechts: 3D-Verformungsbild der Verschiebung senkrecht zur Druckscheibe

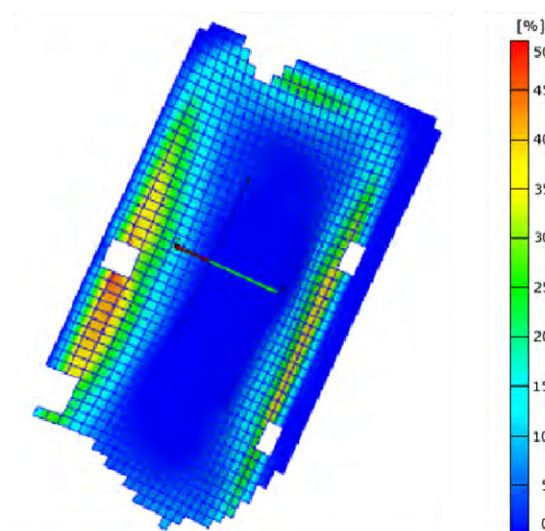


Abbildung 46: Druckbeständigkeit: PUR 1, Spaltbreite 30 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 2 bar, Druckscheibe 1, Darstellung der Hauptformänderung

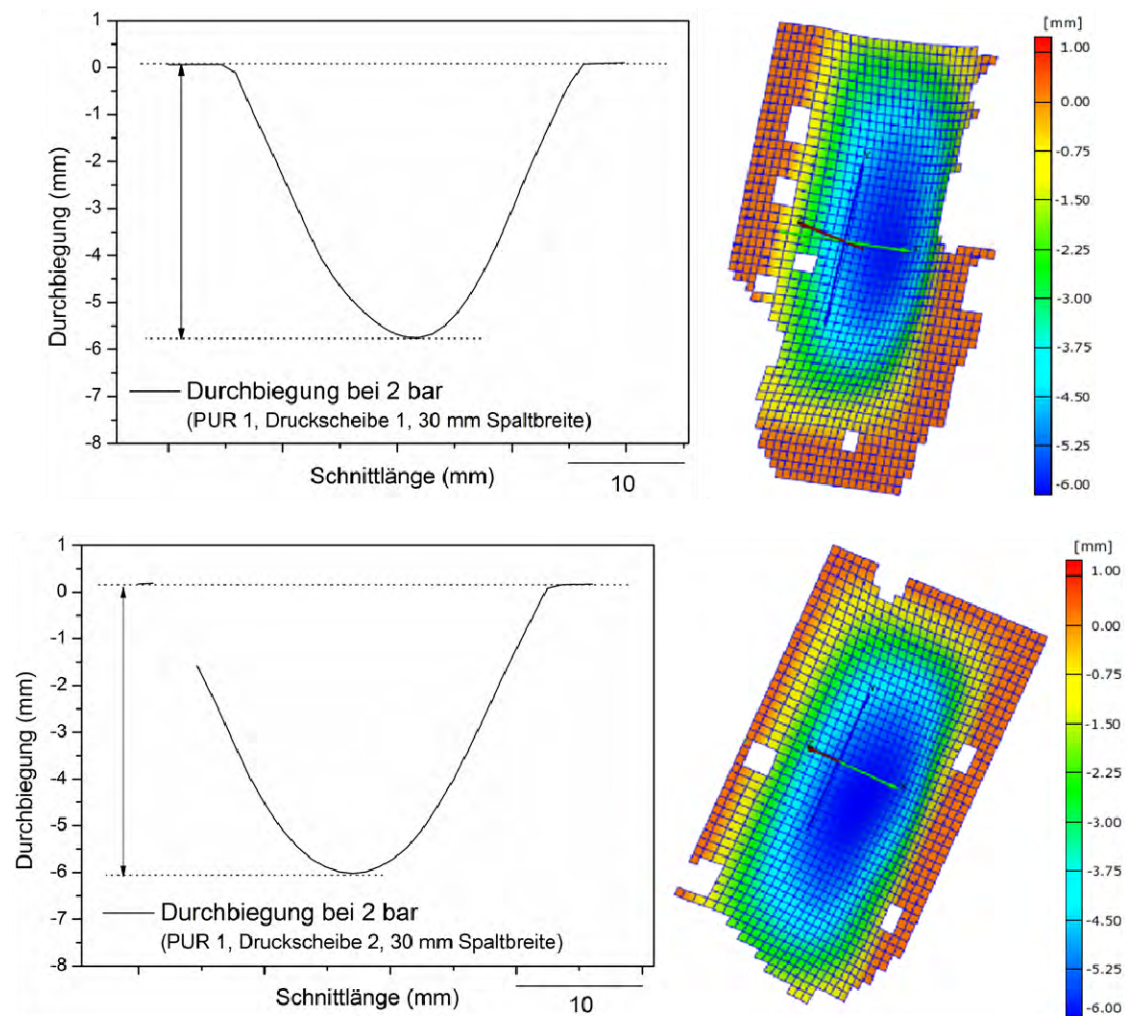


Abbildung 47: Druckbeständigkeit: PUR 1, Spaltbreite 30 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 2 bar; oben: Druckscheibe 1; unten: Druckscheibe 2; links: Darstellung der Verschiebung in einem Schnitt; rechts: 3D-Verformungsbild der Verschiebung senkrecht zur Druckscheibe

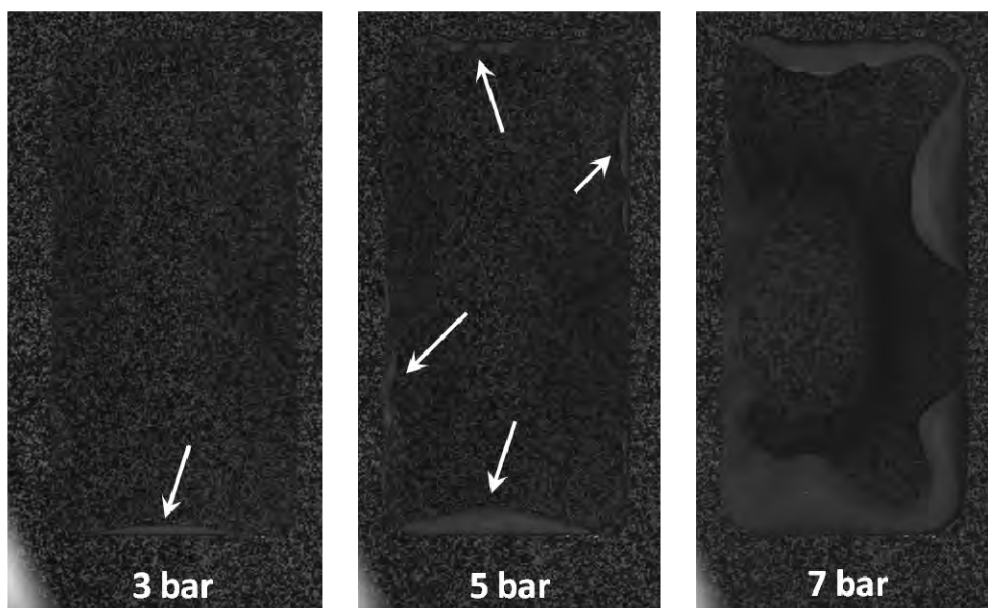


Abbildung 48: Versagensfortschritt des Dichtungswerkstoffes PUR 1 im Laborversuch zur Druckbeständigkeit, Druckscheibe 1, 30 mm Spaltbreite, gezeigt bei 3, 5 und 7 bar

4.3 Rohrreinigungsversuche auf der Baustelle

Aufgrund der Ergebnisse der Haftzugversuche wurde deutlich, dass eine einwandfreie Reinigung der Muffe im Graugussrohr für eine optimale Haftung unbedingt erforderlich ist. In Zusammenarbeit mit der Firma Röhsler wurden in einem kurz davor stillgelegten Wasserrohr von Wiener Wasser, mit einem Durchmesser von 900 mm, Versuche mittels Wasserhöchstdruckstrahlreinigung durchgeführt (siehe Abbildung 49).



Abbildung 49: Rohrreinigungsversuche; links: Einheben der Maschine in die ca. 4 m tiefe Baugrube; rechts: Reinigungsmaschine im Rohr

Der Zustand des Rohres, im Speziellen der des Muffenspaltes, wurde vor und nach der Rohrreinigung mittels Fotos dokumentiert (siehe Abbildung 50).



Abbildung 50: Rohrreinigungsversuche – Dokumentation des Zustandes vor und nach der Rohrreinigung

Vor der Rohrreinigung war der Muffenspalt vollkommen mit Korrosionsprodukten und Inkrustationen gefüllt und teilweise nicht mehr als Muffenspalt zu erkennen (siehe Abbildung 51). Also eine Sanierung, ohne davor eine Reinigung des Bereiches der Muffe durchzuführen, ist nicht möglich. Zusätzlich wurde deutlich, dass auch in einer stillgelegten Rohrleitung eine ganz geringe Menge an Restwasser an der Rohrsohle fließt (siehe Abbildung 51, links unten).

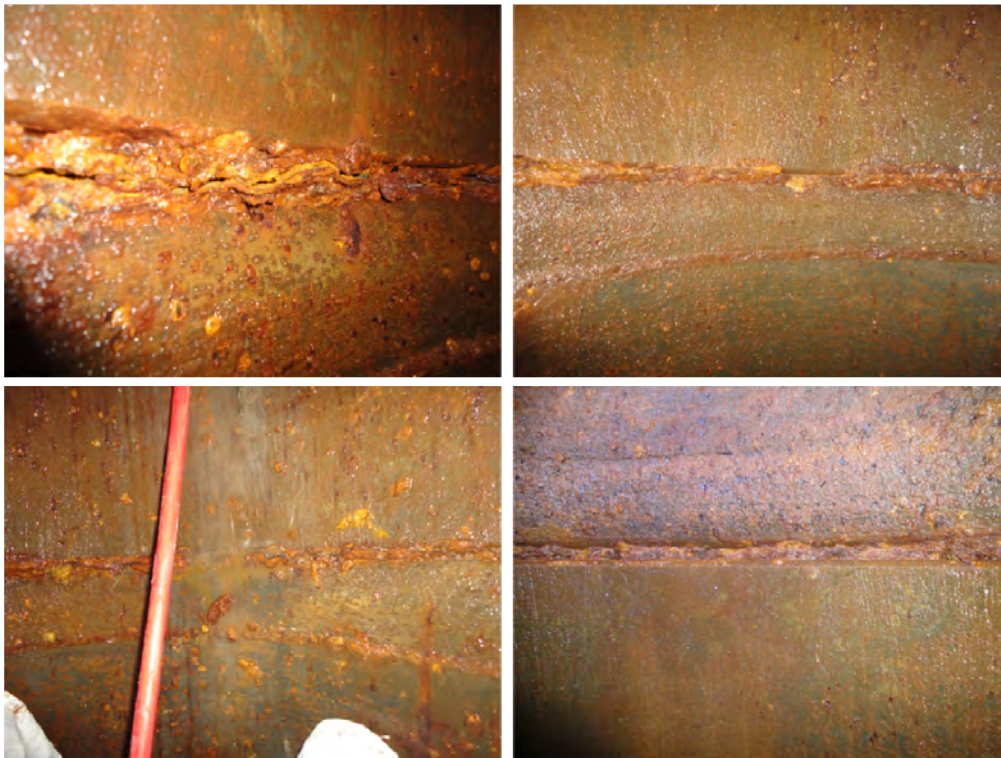


Abbildung 51: Muffenspalt vor der Rohrreinigung; Muffenspalt ist vollständig mit Korrosionsprodukten gefüllt und teilweise nicht mehr als dieser zu erkennen

Durch den Einsatz von speziellen Wasserstrahlköpfen konnte ein optimales Ergebnis erzielt werden. An einem vierarmigen Rotor sind vier Strahlköpfe exzentrisch montiert, wodurch der Rotor durch die Strahlkraft angetrieben wird.



Abbildung 52: Muffenspalt nach der Rohrreinigung; der Muffenspalt ist vollkommen von den Korrosionsprodukten freigelegt

Jeder Strahlkopf am Rotor dreht sich auch um die eigene Achse und die Wasserstrahlen verlassen den Strahlkopf in einem bestimmten Winkel. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass auch die teils senkrechten Flanken im Muffenspalt ausreichend gereinigt werden. Das Ergebnis nach der Rohrreinigung zeigt, dass der Muffenspalt vollkommen von Korrosionsprodukten befreit ist. Auch die senkrechte Flanke von dem Spitzende des Rohres scheint optimal gereinigt zu sein (siehe Abbildung 52).

Nach der erfolgreichen Reinigung der Muffe konnten zwei unerwünschte Vorkommnisse beobachtet werden, die nach der Rohrreinigung einer Lösung bedürfen. Erstens, kommt es durch den geringen Wasserfluss wieder zu einer Ansammlung von Wasser und Schmutz an der Rohrsohle (siehe Abbildung 53).



Abbildung 53: Ansammlung von Wasser und Schmutz nach der Rohrreinigung an der Rohrsohle

Zweitens, bildet sich nach dem Abtrocknen der mattfeuchten gereinigten Oberfläche Flugrost (siehe Abbildung 54), der beim Aufbringen von Dichtmasse wieder als Grenzschicht fungiert.



Abbildung 54: Bildung von Flugrost nach der Rohrreinigung

Um diese beiden negativen Erscheinungen so gut wie möglich nachträglich zu entfernen, sind zusätzliche Anforderungen an den Roboter notwendig geworden. Die Wasser- und Schmutzansammlung soll mittels eines Saugers entfernt werden. Der Flugrost wird durch eine rotierende Drahtbürste entfernt und der dabei entstehende Staub ebenfalls mit dem Sauger aufgefangen, um eine neuerliche Bildung einer Grenzschicht durch Staub zu verhindern.

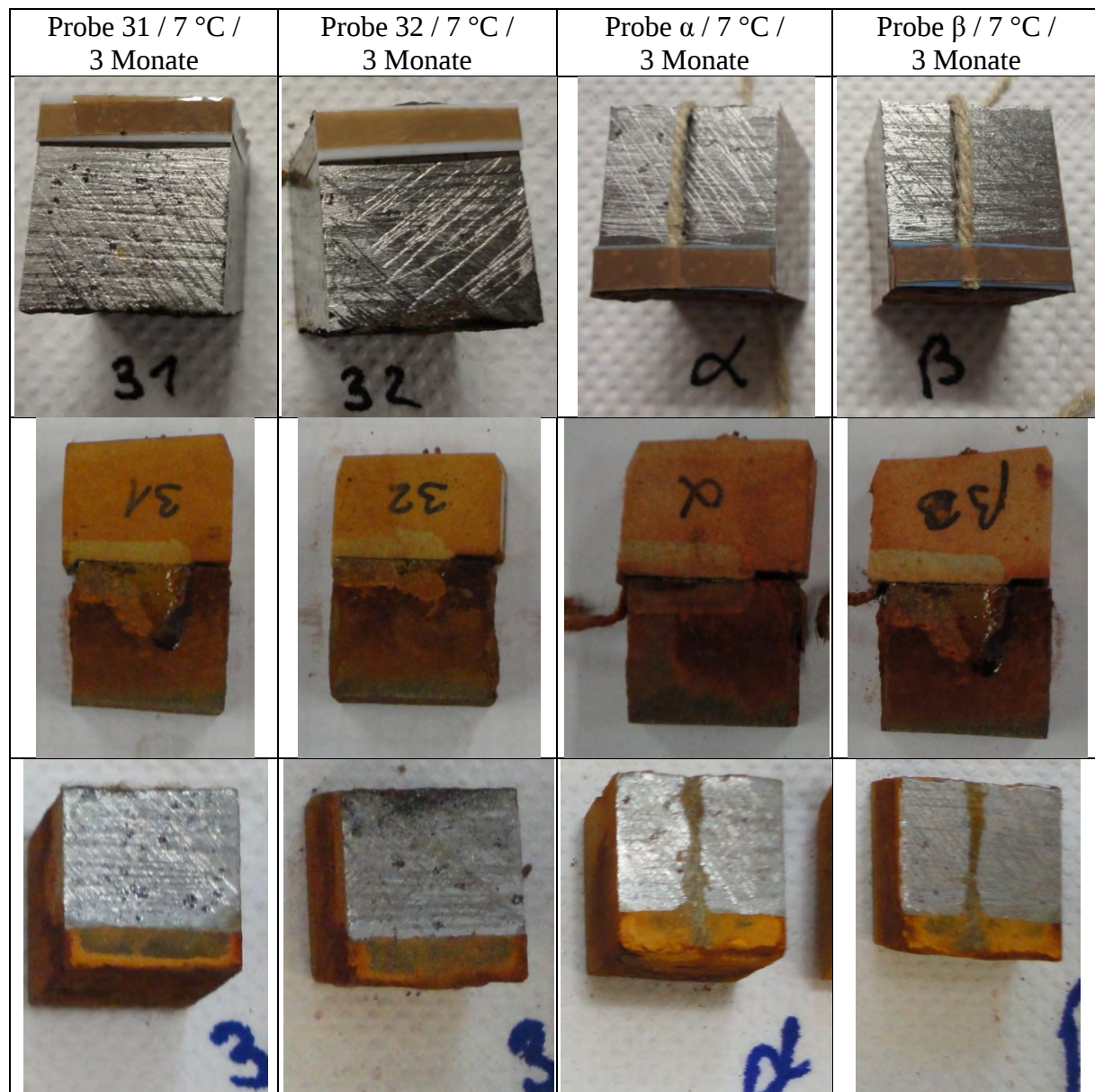
4.4 Korrosionsversuche

Die Ergebnisse aus den Korrosionsversuchen sind auf den folgenden Seiten in Form von Fotos und Aufnahmen mittels Stereomikroskopie dargestellt. Es ist der Ausgangszustand der Oberfläche des Graugussgrundkörpers dokumentiert (unmittelbar vor Aufbringen des Epoxidharzes). Weiters dargestellt sind der Zustand der Probe nach der Entnahme aus dem Auslagerungsmedium sowie die Oberfläche des Graugussgrundkörpers, nachdem das Epoxidharz mittels 3-Punkt Biegevorrichtung abgebrochen wurde.

4.4.1 Korrosionsversuche, Auslagerungszeit 3 Monate

In Tabelle 10 bis Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Korrosionsversuche nach einer Auslagerungszeit von 3 Monaten dargestellt. Detailaufnahmen der Oberfläche mittels Stereomikroskopie sind nur beispielhaft an zwei Proben (Probe 32 und 12) gezeigt.

Tabelle 10: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 3 Monate bei 7 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 3-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe



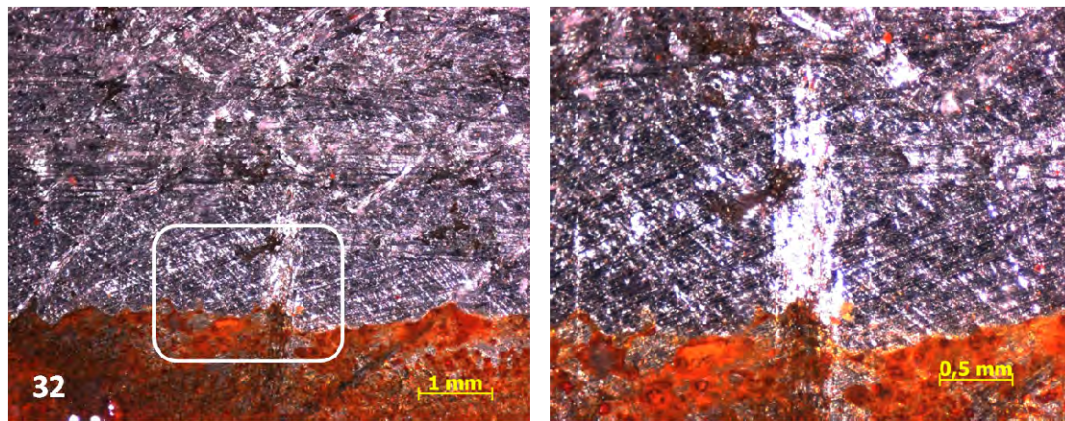
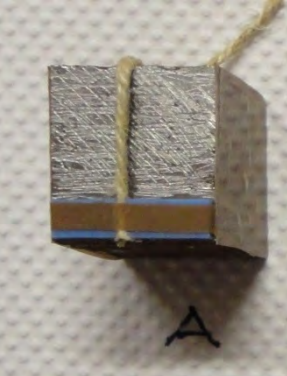
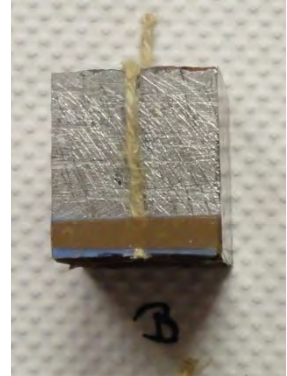


Abbildung 55: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 32, Darstellung des Überganges Initiierungsspalt /Klebefläche

Tabelle 11: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 3 Monate bei 40 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 3-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 21 / 40 °C / 3 Monate	Probe 22 / 40 °C / 3 Monate	Probe Q / 40 °C / 3 Monate	Probe R / 40 °C / 3 Monate

Tabelle 12: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 3 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 3-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 1 / 60 °C / 3 Monate	Probe 2 / 60 °C / 3 Monate	Probe A / 60 °C / 3 Monate	Probe B / 60 °C / 3 Monate
			
			
			

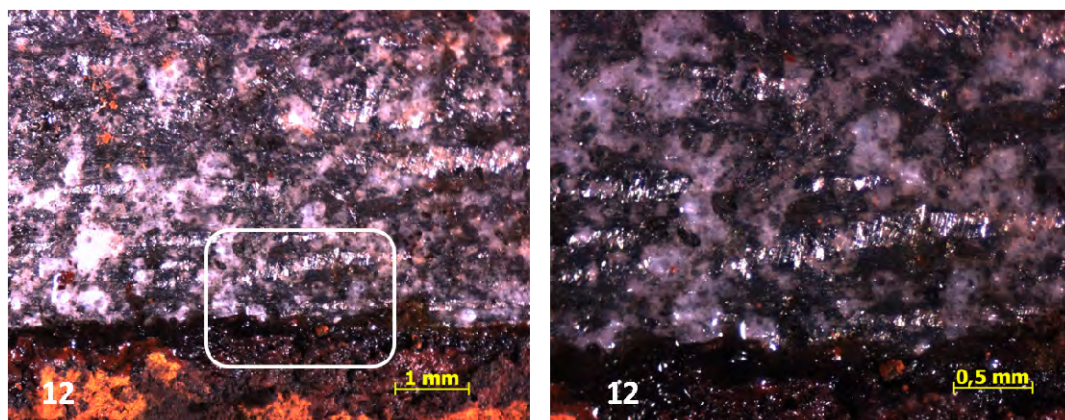
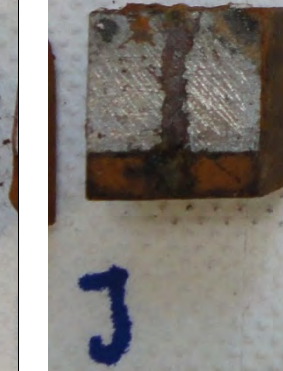


Abbildung 56: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 12, Darst. des Überganges Initiierungsspalt /Klebefläche

Tabelle 13: Korrosionsproben: Lagerung in 3%iger Salzlösung für 3 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 3-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

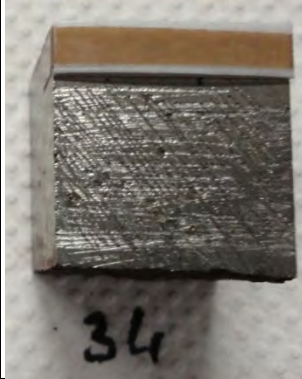
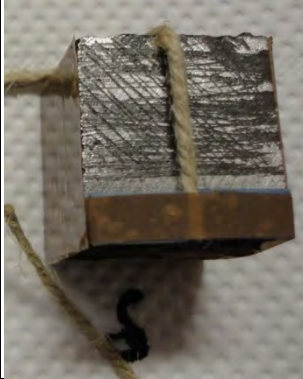
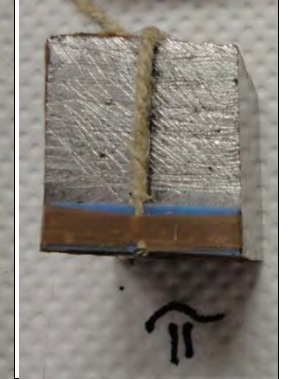
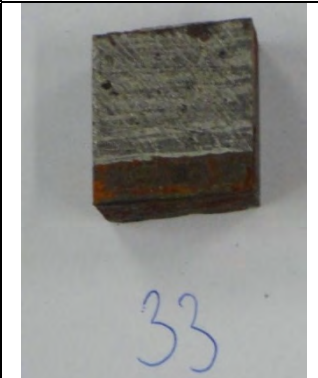
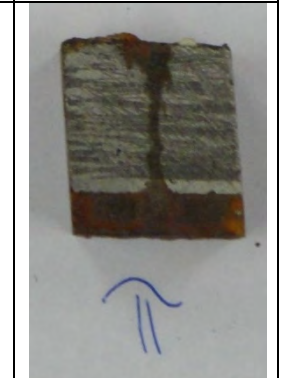
Probe 11 / 60 °C- NaCl / 3 Monate	Probe 12 / 60 °C- NaCl / 3 Monate	Probe I / 60 °C- NaCl / 3 Monate	Probe J / 60 °C- NaCl / 3 Monate
			
			
			

Eine Auslagerung der Proben für 3 Monate, in den jeweiligen Medien, bei den angegebenen Temperaturen, zeigt keinerlei Einfluss in Form von Unterwanderung durch Korrosion im Interface Graugussgrundkörper/Epoxidharz. In Abbildung 55 und Abbildung 56 ist die deutliche Abgrenzung am Grund des Initiierungsspalt weiterhin zu erkennen. Einzelne Korrosionsprodukte sind auf der Haftfläche zu erkennen, diese sind jedoch durch einen Fehler bei dem Versuchsablauf entstanden. Es handelt sich um Rostpartikel, von den Außenflächen der Proben, die beim Brechen der Probe auf die Klebefläche gelangt sind. Um das bei den weiteren Untersuchungen zu vermeiden, wurden alle Korrosionsproben nach der Fotodokumentation gewaschen.

4.4.2 Korrosionsuntersuchungen, Auslagerungszeit 6 Monate

Tabelle 14 bis Tabelle 17 zeigen die Proben nach sechsmonatiger Lagerung in den entsprechenden Medien. Detailaufnahmen werden jeweils von den Proben 33, S, 3 und 14 gezeigt (jeweils eine aus jeder Temperaturcharge).

Tabelle 14: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 6 Monate bei 7 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 6-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe, * keine Bilder vorhanden

Probe 33 / 7 °C / 6 Monate	Probe 34 / 7 °C / 6 Monate	Probe δ / 7 °C / 6 Monate	Probe π / 7 °C / 6 Monate
			
*	*	*	*
			

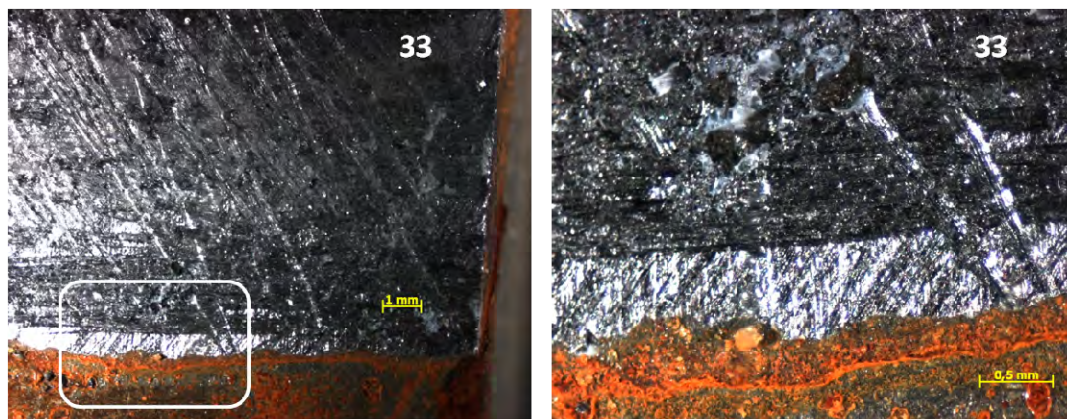
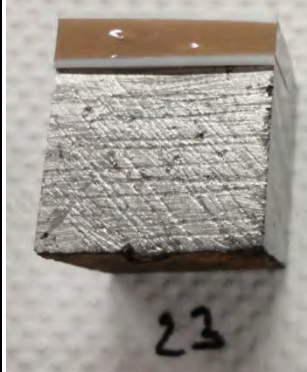
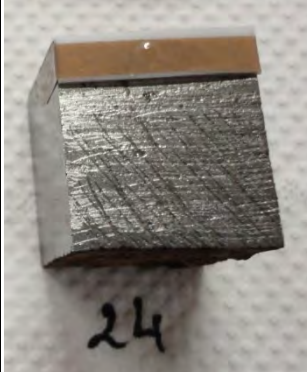
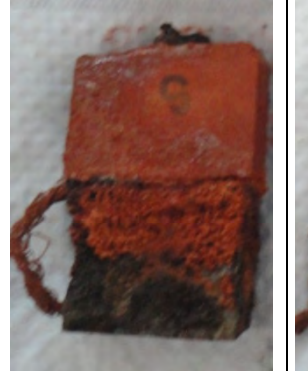
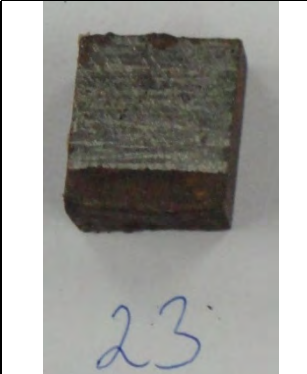


Abbildung 57: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 33; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme

Tabelle 15: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 6 Monate bei 40 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 6-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 23 / 40 °C / 6 Monate	Probe 24 / 40 °C / 6 Monate	Probe S / 40 °C / 6 Monate	Probe T / 40 °C / 6 Monate
			
			
			

Eine Auslagerung für 6 Monate bei 7 °C und 40 °C in Wasser führt, wie in Abbildung 57 und Abbildung 58 gezeigt wird, nach wie vor zu keinerlei Unterwanderung des Dichtungswerkstoffes. Eine deutliche Abgrenzung am Initiierungsspalt und am Dochtfaden ist zu erkennen. Auf der Klebefläche des Grundkörpers ist keine Korrosion aufgetreten und darauf sind keine/kaum Rückstände des Epoxids zu erkennen. Das Erscheinungsbild der Klebefläche ist nach der Auslagerung blank metallisch-glänzend. Die in Kapitel 4.4.1 erwähnten Probleme bei dem Versuchsablauf konnten erfolgreich eliminiert werden.

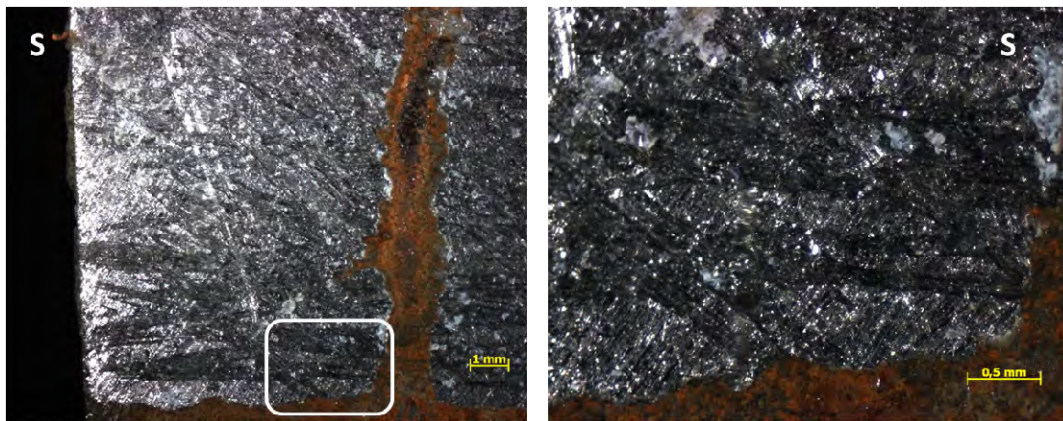


Abbildung 58: Stereomikroskopieaufnahme der Probe S; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme

Tabelle 16: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 6 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 6-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 3 / 60 °C / 6 Monate	Probe 4 / 60 °C / 6 Monate	Probe C / 60 °C / 6 Monate	Probe D / 60 °C / 6 Monate

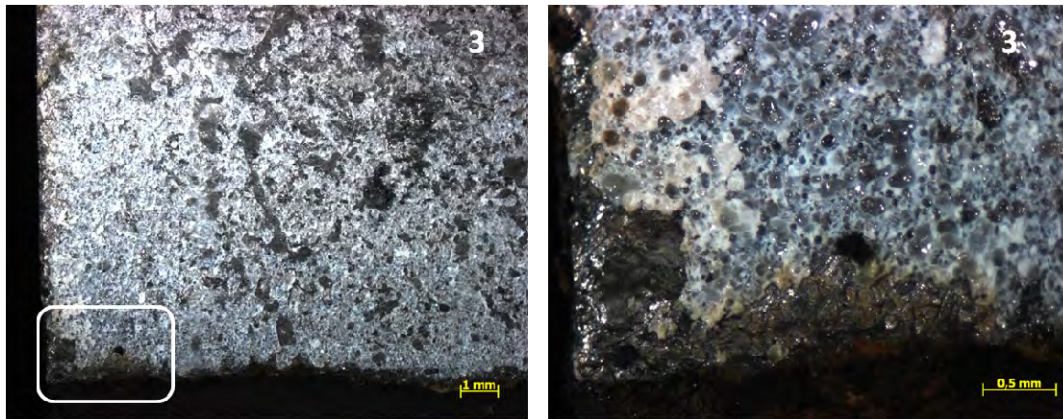


Abbildung 59: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 3; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme

Tabelle 17: Korrosionsproben: Lagerung in 3%iger Salzlösung für 6 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 6-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 13 / 60 °C- NaCl / 6 Monate	Probe 14 / 60 °C- NaCl / 6 Monate	Probe K / 60 °C- NaCl / 6 Monate	Probe L / 60 °C- NaCl / 6 Monate

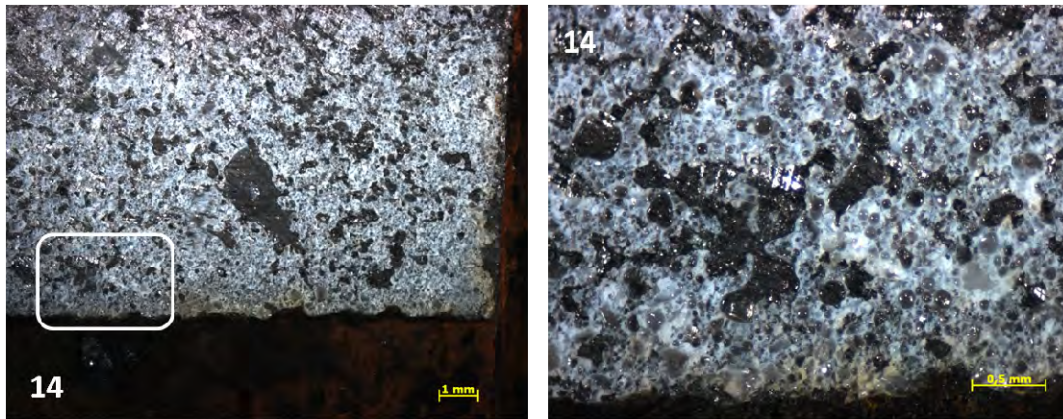


Abbildung 60: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 14; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme

Eine Auslagerung bei höheren Temperaturen, also bei 60 °C in Wasser und in 3%iger NaCl-Lösung führt zu einer Veränderung des Erscheinungsbildes der Bruchfläche. Auf der gesamten Oberfläche bleibt eine teils unterbrochene und dünne Schicht des Epoxids zurück. Wie auch in der Literatur [67] beschrieben wird, kommt es bei Anwesenheit von Wasser zu einer Verlagerung der Bruchfläche in den grenzflächennahen Bereich. Die Abgrenzung hin zum Initiierungsspalt ist dennoch scharf. An jenen Bereichen, an denen die Metalloberfläche einsehbar ist, ist keine Korrosion auf der Metalloberfläche zu sehen. Im Randbereich treten leichte Verfärbungen der Epoxidschicht auf (siehe Abbildung 59 und Abbildung 60).

4.4.3 Korrosionsuntersuchungen, Auslagerungszeit 14 Monate

Der Zustand der Proben, vor und nach der Auslagerung für 14 Monate unter den angeführten Bedingungen, ist in Tabelle 18 bis Tabelle 21 dokumentiert. Von den Oberflächen der Proben γ , 25, 8 und 17 werden Stereomikroskopieaufnahmen auf den folgenden Seiten gezeigt.

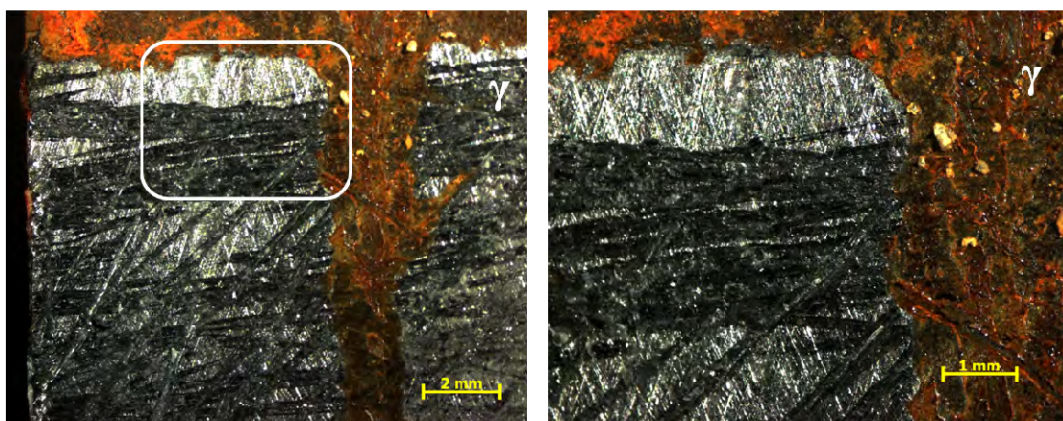
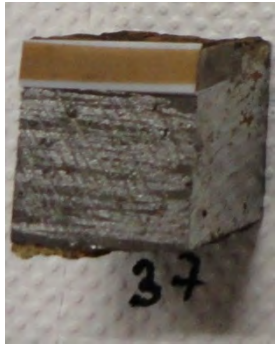
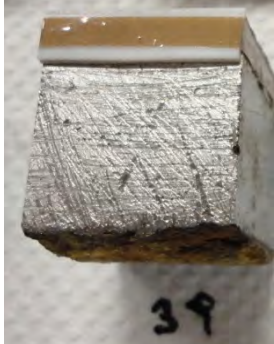


Abbildung 61: Stereomikroskopieaufnahme der Probe γ ; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme

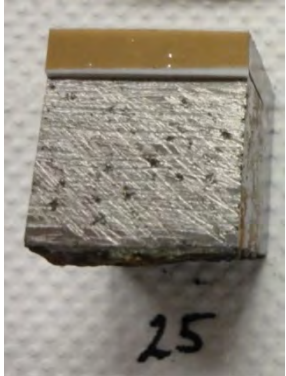
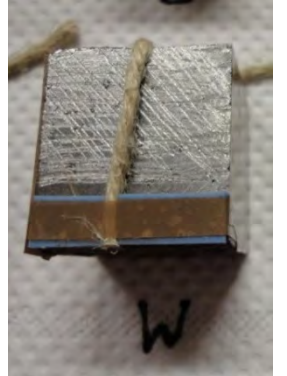
Keinerlei Epoxid-Rückstände auf der Oberfläche sind nur mehr nach 14 Monaten bei einer Auslagerung bei 7 °C zu beobachten. Die Abgrenzung zum Initiierungsspalt und Dochtfaden ist weiterhin scharf und es tritt keine Unterwanderung des Dichtungswerkstoffes auf. Die Klebefläche erscheint nach wie vor blank metallisch-glänzend ohne jegliche Korrosionserscheinungen (siehe Abbildung 61).

Tabelle 18: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 14 Monate bei 7 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 14-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 37 / 7 °C / 14 Monate	Probe 39 / 7 °C / 14 Monate	Probe γ / 7 °C / 14 Monate	Probe ν / 7 °C / 14 Monate
			
			
			

Auch die ausgelagerten Proben bei 40 °C, 60 °C und 60 °C in 3%iger Salzlösung zeigen eine scharfe Grenze zu den Korrosionserscheinungen im Initiierungsspalt. Eine metallisch-blanke Oberfläche der Bruchfläche tritt nicht mehr auf. Zusätzlich bleiben bei diesen Proben nach dem Brechen ebenfalls Rückstände bzw. eine dünne Schicht von Epoxid auf der Klebefläche zurück. Bei 6-monatiger Auslagerung konnten diese Rückstände noch auf der gesamten Klebefläche festgestellt werden. Nach 14 Monaten treten diese Epoxidrückstände im Bereich der Ecken nicht mehr auf. Die Epoxidrückstände sind im Randbereich teilweise verfärbt (siehe Abbildung 62 bis Abbildung 64).

Tabelle 19: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 14 Monate bei 40 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 14-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 25 / 40 °C / 14 Monate	Probe 27 / 40 °C / 14 Monate	Probe W / 40 °C / 14 Monate	Probe X / 40 °C / 14 Monate
			
			
			

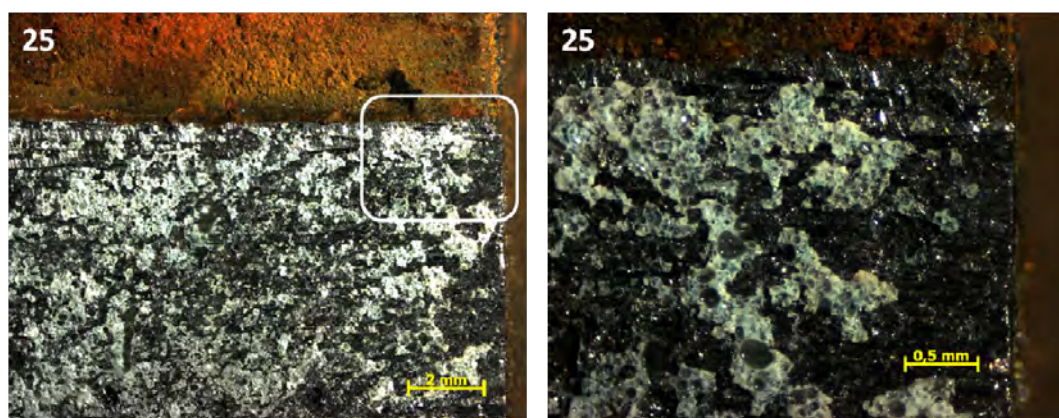
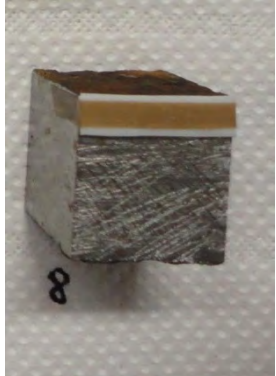
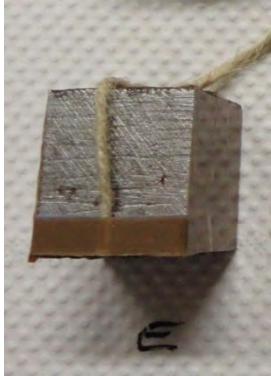
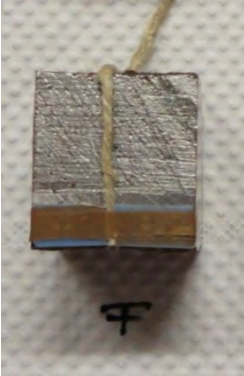


Abbildung 62: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 25; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme

Tabelle 20: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 14 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 14-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 8 / 60 °C / 14 Monate	Probe 10 / 60 °C / 14 Monate	Probe E / 60 °C / 14 Monate	Probe F / 60 °C / 14 Monate
			
			
			

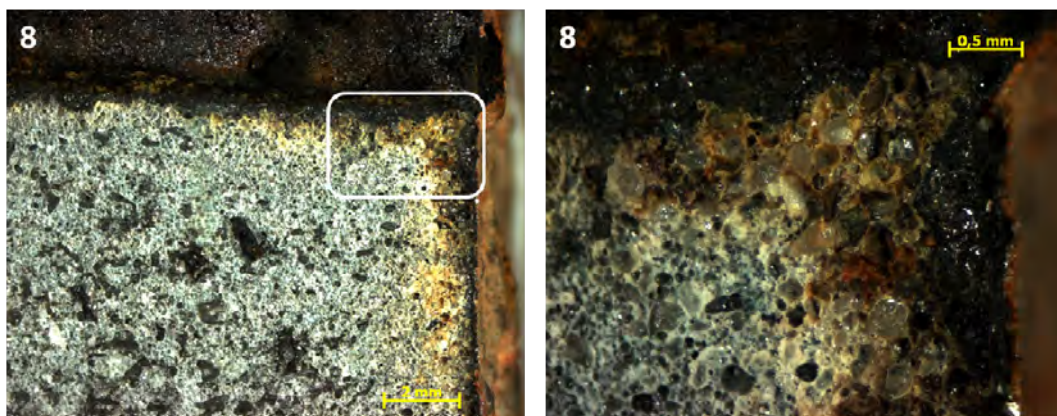
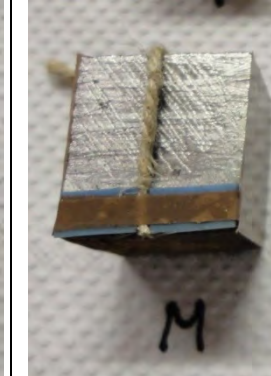
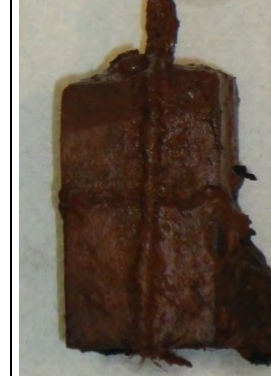
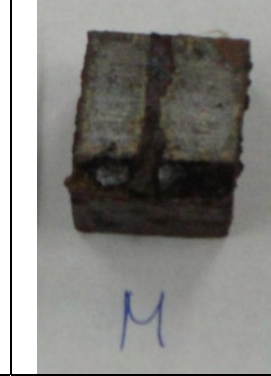


Abbildung 63: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 8; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme

Tabelle 21: Korrosionsproben: Lagerung in 3%iger Salzlösung für 14 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 14-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe

Probe 17 / 60 °C- NaCl / 14 Monate	Probe 19 / 60 °C- NaCl / 14 Monate	Probe N / 60 °C- NaCl / 14 Monate	Probe M / 60 °C- NaCl / 14 Monate
			
			
			

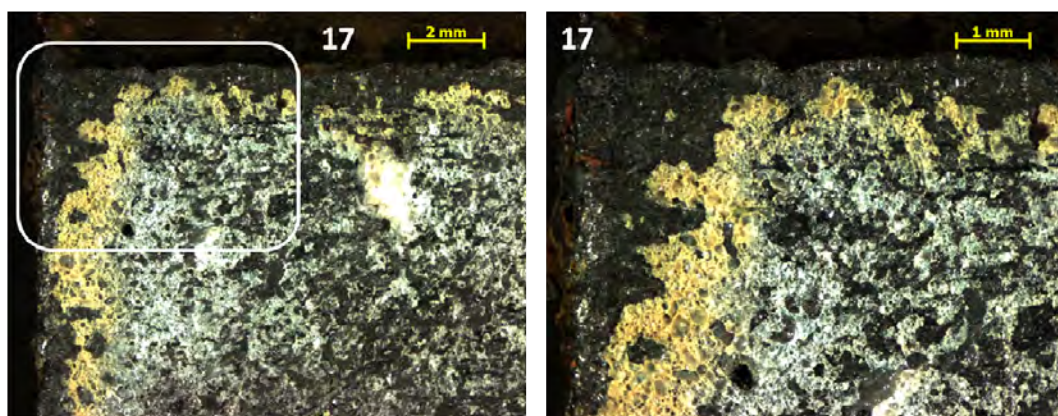
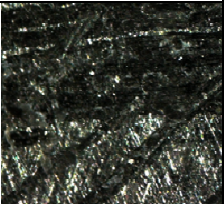
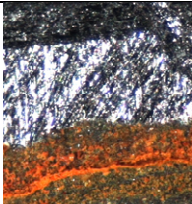
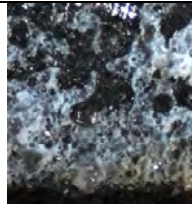
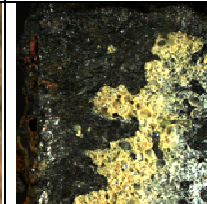


Abbildung 64: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 17; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme

In Tabelle 22 sind sämtliche Ergebnisse der Korrosionsversuche noch einmal zusammengefasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Auftreten von Epoxidrückständen auf der Klebefläche, Verfärbungen des Epoxids sowie scheinbare Ablösung im Randbereich bei höheren Temperaturen, aggressiveren Medien und bei steigender Dauer der Auslagerung häufiger werden.

Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrosionsversuche, a: 7 °C in Wasser, b: 40 °C in Wasser, c: 60 °C in Wasser, d: 60 °C in 3%iger Salzlösung; ✓... Ereignis ist eingetreten, × ... Ereignis ist nicht eingetreten

Erscheinungsbild der Kleboberfläche nach Auslagerung						
		blank, metallisch-glänzende Klebefläche, keine Korrosionserscheinung auf der Grenzfläche	scharfe Abgrenzung am Initiierungsspalt und am Dochtfaden	keine Epoxid-Rückstände auf der Klebefläche	keine Verfärbung des Epoxids im Randbereich	keine scheinbare Ablösung des Epoxids im Randbereich
	Dauer	Medium				
						
3 Monate	a	✓	✓	✓	✓	✓
	b	✓	✓	✓	✓	✓
	c	✓	✓	×	✓	✓
	d	✓	✓	×	✓	✓
6 Monate	a	✓	✓	✓	✓	✓
	b	✓	✓	✓	✓	✓
	c	×	✓	×	×	✓
	d	×	✓	×	×	✓
14 Monate	a	✓	✓	✓	✓	✓
	b	×	✓	×	×	×
	c	×	✓	×	×	×
	d	×	✓	×	×	×

Der blanke, metallisch-glänzende Zustand der Klebefläche ist nur bei niedriger Temperatur über die gesamte Auslagerungsdauer zu beobachten. Für eine Zeitraffung wurden die Auslagerungen auch bei erhöhten Temperaturen durchgeführt, denn eine Steigerung der Temperatur um 10 °C führt zu einer Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit [68]. Das Erscheinungsbild der Proben bzw. der Kleboberfläche ändert sich bei höheren Temperaturen signifikant. Dadurch liegt die Vermutung nahe, dass hier Reaktionen in Erscheinung treten, die nach langer Auslagerung bei niedriger Temperatur nicht zu beobachten sein werden. Die Auslagerung bei 60 °C erfolgte im Temperaturbereich des T_g des Epoxides.

4.4.4 Qualitative Beurteilung der max. Biegespannung in Abhängigkeit von der Auslagerzeit und Probenart

Um den Einfluss der Korrosionsbedingungen und der Korrosionszeit auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundes zu untersuchen, wurden die Unterschiede der maximal auftretenden Biegespannung in Abbildung 65 dargestellt.

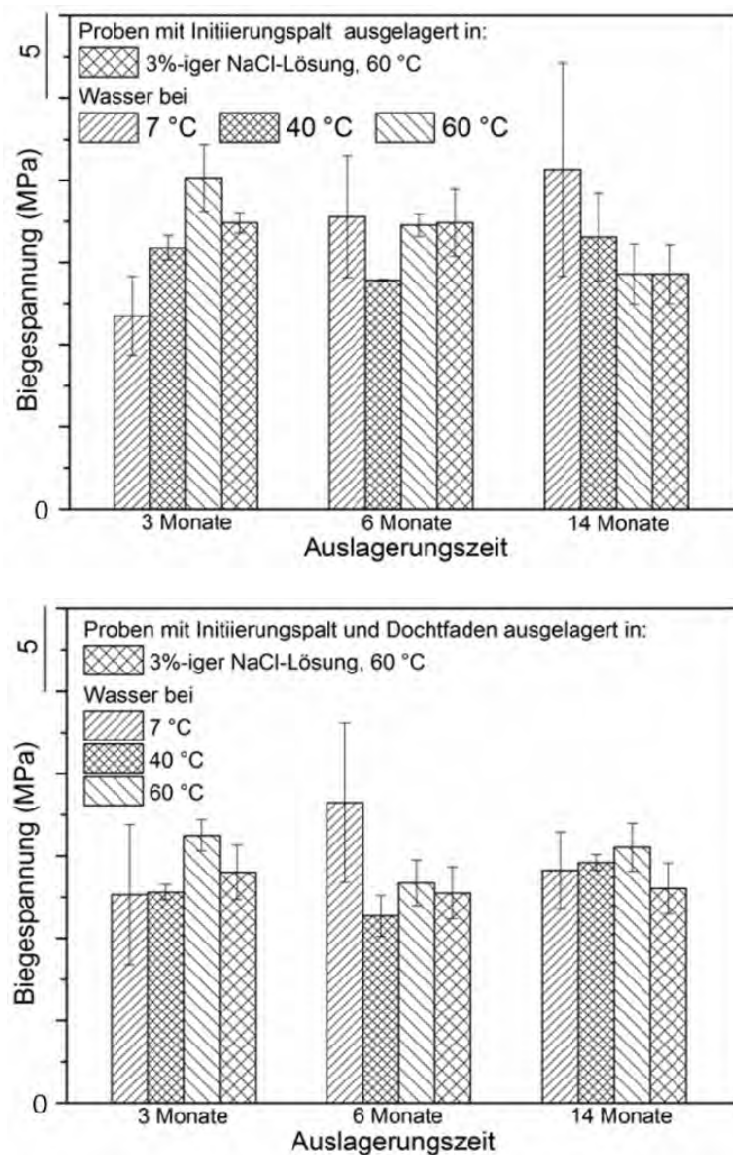


Abbildung 65: Darstellung der maximalen Biegespannung beim Brechen der Korrosionsproben mit einer 3-Punkt Biegeanordnung nach 3, 6, 14 Monaten Auslagerungszeit; oben: Proben mit Initiierungspalt; unten: Proben mit Initiierungspalt und Dochtfaden; Daten lt. Anhang, Tabelle 51

Ein Vergleich der Ergebnisse der Auslagerungsbedingungen bei den jeweiligen Auslagerungszeiten verdeutlicht, dass aufgrund der Schwankungsbreite der Ergebnisse kaum Unterschiede zu erkennen sind. Eine Ausnahme sind die Proben mit Initiierungsspalt bei einer Auslagerungszeit von 3 Monaten. In diesem Zusammenhang muss noch folgendes verdeutlicht werden: Jede Messserie besteht aufgrund des beträchtlichen Probenpräparationsaufwandes nur aus zwei Proben und nicht aus fünf, wie in der Norm [53] für den 3-Punkt Biegeversuch vorgesehen.

In Abbildung 66 wird der Mittelwert der maximalen Biegespannung der unterschiedlichen Auslagerungsarten dargestellt. Vergleicht man die unterschiedliche Probengeometrie sowie die Auslagerungszeiten, ist kein Einfluss auf die Biegespannung zu erkennen.

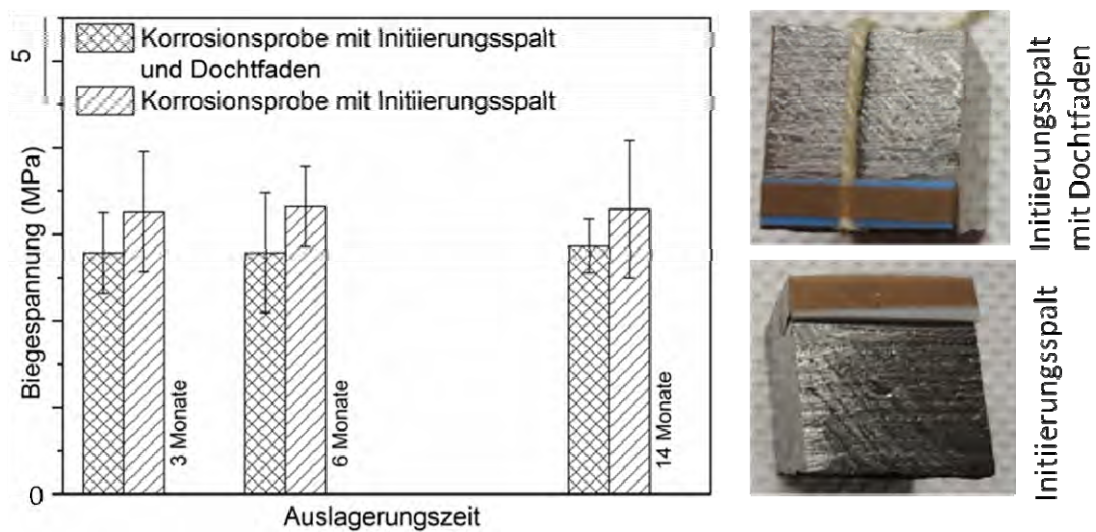


Abbildung 66: Mittelwerte der maximalen Biegespannung der unterschiedlichen Auslagerungsarten (ermittelt durch Brechen der Korrosionsproben mit einer 3-Punkt Biegeanordnung) nach 3, 6 und 14 Monaten; Daten lt. Anhang, Tabelle 52

Da nach 14-monatiger Auslagerung bei höheren Temperaturen keine signifikante Verringerung der Biegespannung auftritt, können die in Abbildung 62 bis Abbildung 64 interpretierten „Ablöse-Effekte“ in den Ecken der Probe nicht als solche erkannt werden. Es scheint so zu sein, als würde die bereits beschriebene Verlagerung der Bruchfläche (bei Anwesenheit von Wasser) in den grenzflächennahen Bereich nicht mehr stattfinden.

4.5 Modifizierung von Epoxidharzen

Der erste Teil der Untersuchungen (Kapitel 4.2.9) hat gezeigt, dass eine Sanierung der Muffen mit kommerziell erhältlichen Systemen nicht möglich ist. Epoxidwerkstoffe als Werkstoffgruppe zeigen deutliche Vorteile. Die hohe Steifigkeit und damit verbundene geringe Duktilität ist ein gravierender Nachteil. Eine Optimierung diesbezüglich durch Modifizierung ist möglich und wird im folgenden Kapitel behandelt.

4.5.1 Modifizierungen

Als Ausgangsstoff wurde ein kommerziell erhältliches Epoxidsystem verwendet, das auch im Bereich der Rohr-sanierung angewendet wird, genauer gesagt als Imprägnier-Harz von Nadelfilzschläuchen für die Inliner-Sanierung (Sanierungsmethode beschrieben in Kapitel 2.5.3). Das flüssige Epoxidsystem, welches für die gesamten Modifizierungsversuche dieser Arbeit verwendet wurde, besteht aus einem:

- Diglycidylether Bisphenol-A Harz (DGEBA) mit 1,6-hexandiglycidylether als Verdünner (das Epoxidäquivalent beträgt lt. Hersteller 200 g/eq) und
- einem angepassten Amin Härter.

Die Modifizierung wurde durch Beimengung folgender Zusatzkomponenten durchgeführt, welche in Abbildung 67 dargestellt sind:

- Gummimehl aus Ethylen-Propylen-Dien Kautschuk (EPDM) mit einer Korngröße von 63-100 μm und einer Shore A Härte von 40
- Reaktives Flüssigpolymer: Amin-terminiertes Butadien-Acrylnitril Copolymer (ATBN) mit 16 % Acrylnitrilgehalt; das Aminäquivalent beträgt 900 g/eq
- Glycidyl Ether auf Basis von Rizinusöl, (ERISYS™ GE-35), Zusatzkomponente mit drei epoxidreaktiven-Endgruppen und einem Epoxidäquivalent 656 g/eq, EM 1
- Glycerol Propoxylate Triglycidyl Ether, Zusatzkomponente mit drei epoxidreaktiven-Endgruppen, (ERISYS™ GE-36), und einem Epoxidäquivalent 644 g/eq, EM 2



Abbildung 67: Zusatzkomponenten zur Epoxid Modifizierung; links: die Zusatzkomponenten mit den epoxidreaktiven-Endgruppen (ERISYS™ GE-35 und ERISYS™ GE-36); Mitte: reaktives Flüssigpolymer (ATBN); rechts: EPDM-Gummimehl mit einer Korngröße von 63-100 μm

Die Zusammensetzung der angefertigten Mischungen und die dafür verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 23 angegeben.

Tabelle 23: Akronyme und Formulierung der modifizierten Epoxide

Akronym	Harzmenge (g)	Zusatzkomponente		Silica (ml)
		Bezeichnung	Menge (g)	
EP/EPDM 1	100	EPDM	10	60
EP/EPDM 2	100	EPDM	40	-
EP/ATBN 1	100	ATBN	20	60
EP/ATBN 2	100	ATBN	40	60
EP-EM 1	90	EM 1	10	60
EP-EM 2	90	EM 2	10	60
C-EP 1	Modifiziertes Epoxidsystem 1			
C-EP 2	Modifiziertes Epoxidsystem 2			
EP	Epoxidsystem – verwendet für Modifizierung			

Darüber hinaus wurden zwei modifizierte Epoxidharzsysteme (C-EP 1, Herstellerfirma: EPOXONIC und C-EP 2, Herstellerfirma: RESINNOVATION) der Prüfung unterzogen. Nach Bekanntgabe der Anforderungen wurden diese Werkstoffe von den Herstellern aus dem Produktportfolio ausgesucht und als „Modellwerkstoff“ zur Verfügung gestellt. Von Seiten des Herstellers besteht die Bereitschaft, nach der eingehenden Prüfung für den Anwendungsfall Änderungen an der Formulierung vorzunehmen. Beide Epoxidsysteme sind vermutlich nach der Methode der inneren Weichmachung modifiziert und die Viskosität ist für eine Verarbeitung mit dem Roboter bereits eingestellt. Diese Werkstoffsysteme verfügen über keine Zulassungen für den Trinkwasserbereich.

Silica wurde als Tixotropiemittel zur besseren Verarbeitung der Formulierung während der Probenfertigung beigegeben. Die Mischungen wurden in einem Becherglas bei Raumtemperatur 5-10 min per Hand vermengt. Selbst angefertigte Silikonformen kamen bei der Probenfertigung zum Einsatz (siehe Abbildung 68). Um Planparallelität, Rechtwinkeligkeit und die entsprechende Oberflächengüte an den Proben herzustellen, waren manuelle Korrekturen durch Schleifen notwendig.

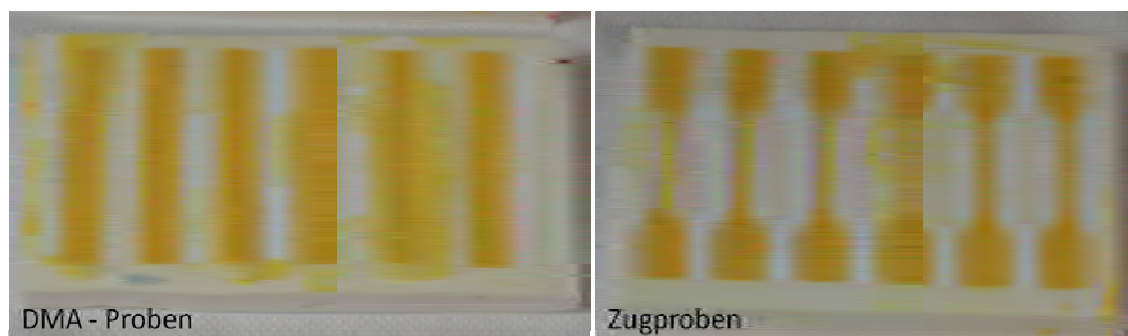


Abbildung 68: Silikonformen zur Probenfertigung (links: DMA-Proben; rechts: Zugproben der Form 5A)

4.5.2 Charakterisierung der modifizierten Epoxide

Die modifizierten Epoxide wurden nach der in Kapitel 4.2.9 definierten Prüfprozedur in Hinblick auf ihre Werkstoffeigenschaften untersucht. Als wichtiges Kriterium ist auch hier die Lage der Glasübergangstemperatur zu beachten. Unerwünschte Änderungen der mechanischen Eigenschaften sollen auf keinen Fall auftreten und somit darf der T_g nicht im Anwendungstemperaturbereich liegen.

In Abbildung 69 wird beispielhaft der Verlauf des Elastizitätsmoduls (gemessen mittels dynamisch-mechanischer Analyse) in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Eine Modifizierung mit reaktivem Flüssigpolymer (EP/ATBN) oder EPDM-Gummimehl (EP/EPDM 1) führt zu einem Zweiphasensystem. Das heißt, dass zwei separat ausgeprägte Glasübergangstemperaturen auftreten. Die bei hohen Temperaturen auftretende Glasübergangstemperatur ist dem Epoxid zuzuordnen, die bei niedrigen Temperaturen auftretende dem Flexibilisator. Der Elastizitätsmodul wird durch die Modifizierung gesenkt – verglichen mit dem reinen Epoxid (EP) – und es können im Anwendungstemperaturbereich nahezu konstante mechanische Eigenschaften beobachtet werden. Das bereits vom Hersteller modifizierte Epoxidsystem C-EP 1 scheint ein Copolymer aus Epoxid und einer Zusatzkomponente zu sein. Durch den für Epoxide relativ niedrigen T_g und der Tatsache, dass nur eine Glasübergangstemperatur auftritt, scheint es, dass in diesem Fall die Methode der inneren Weichmachung zur Anwendung gekommen ist. Der Elastizitätsmodul steigt im Anwendungstemperaturbereich sehr stark an, wodurch zwischen minimaler und maximaler Anwendungstemperatur starke Schwankungen der mechanischen Eigenschaften (auch Zugfestigkeit, Bruchdehnung) zu erwarten sind.

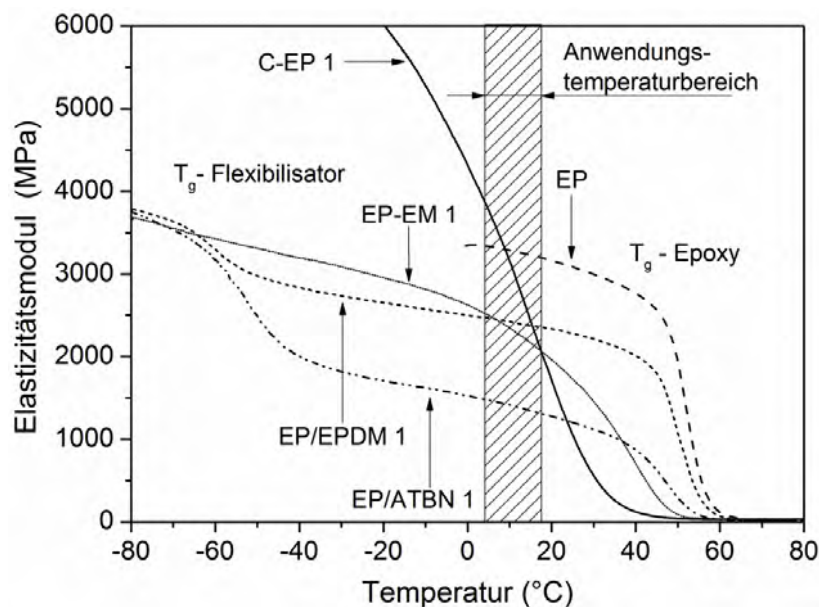


Abbildung 69: Elastizitätsmodul ermittelt mittels dynamisch-mechanischer Analyse; charakteristische Modul-Verläufe (Speichermodul - E') von modifizierten Epoxiden.

Modifizierung von Epoxiden durch Zusatzkomponenten mit epoxidreaktiven-Endgruppen (EP-EM 1) ist ebenfalls der Methode der inneren Weichmachung zuzuordnen. Die Steigung des Elastizitätsmoduls im Anwendungstemperaturbereich ist weitaus geringer im Vergleich zu C-EP 1.

Wie in Abbildung 70 zu sehen ist, wird durch die Modifizierung des Epoxides mit den bereits genannten Zusatzkomponenten die Glasübergangstemperatur deutlich verringert. Eine Erhöhung der Menge einer jeweiligen Zusatzkomponente (vgl. EP/EPDM 1 und EP/EPDM 2, resp. EP/ATBN 1 und EP/ATBN 2) verstärkt das Absinken der Glasübergangstemperatur. Dieser Einfluss durch die Modifizierung auf den T_g wird auch in der Literatur [69-72] beschrieben.

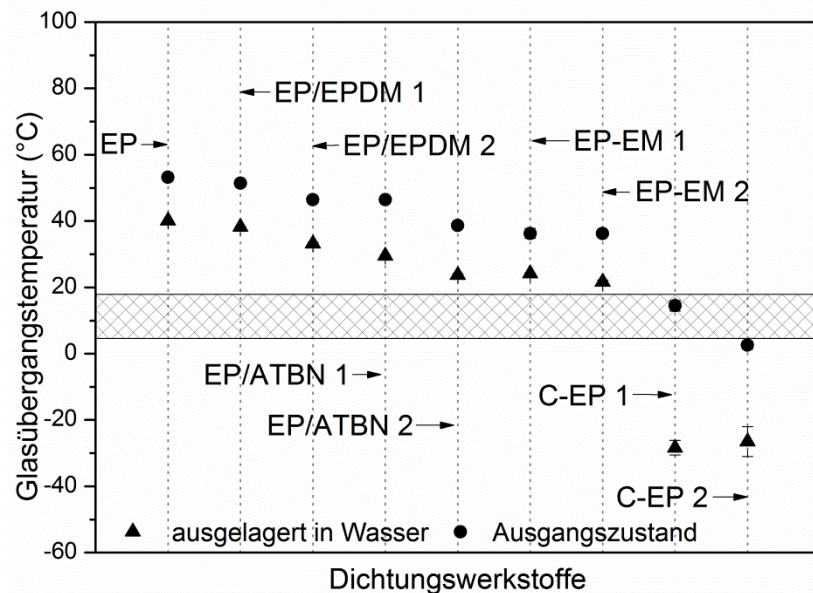


Abbildung 70: Änderung der Glasübergangstemperatur T_g aufgrund von Auslagerung des modifizierten Epoxides in Wasser für 28 Tage bei 40 °C, ermittelt mittels dynamisch-mechanischer Analyse; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 53 angegeben

Bei der Modifizierung mit dem reaktiven Flüssigpolymer ATBN (EP/ATBN 1, EP/ATBN 2) oder EPDM-Gummimehl (EP/EPDM 1, EP/EPDM 2) zeigen die Polymerblends neben dem T_g des Epoxides auch noch einen zweiten T_g der Gummiphase (siehe auch Abbildung 69). Reaktives Flüssigpolymer (mit der Formulierung 40 g Zusatzkomponente auf 100 g Harz) verursacht ein stärkeres absinken der Glasübergangstemperatur als EPDM-Gummimehl (selbe Formulierung). Copolymere aus Epoxid und den Zusatzkomponenten mit epoxidreaktiven-Endgruppen (EP-EM 1, EP-EM 2) zeigen bei einem Modifier-Anteil von 9 bis 10 % eine viel stärkere Verringerung des T_g als eine Modifizierung mit EPDM-Gummimehl. Die beiden von Firmen empfohlenen und bereits modifizierten Epoxidsysteme (C-EP 1, C-EP 2) zeigen, dass der T_g bei vollständig in Luft ausgehärteten Proben im Anwendungstemperaturbereich liegt. Der Einfluss von einer Auslagerung in Wasser für 28 Tage bei 40 °C auf den T_g ist ebenfalls in Abbildung 70 dargestellt. Zusätzlich zur Modifizierung wird der Glasübergang durch eine Auslagerung der Proben in Wasser hin zu niedrigeren Temperaturen verschoben. Dieser Effekt korreliert auch mit Angaben aus der Literatur [73, 74].

Vergleicht man in Abbildung 71 den Elastizitätsmodul des reinen Epoxides mit jenem der modifizierten Epoxide, wird deutlich, dass alle Arten der angewendeten Modifizierungen zu einer Verringerung des Elastizitätsmoduls führen. Diese Änderung der mechanischen Eigenschaften wird in [70, 75, 76] ausführlich beschrieben. Reaktives Flüssigpolymer führt bei gleicher Formulierung zu einer stärkeren Verringerung des Elastizitätsmoduls, als durch die Zugabe von EPDM-Gummimehl erreicht wird. Vergleicht man die Mischungen mit den

epoxidreaktiven-Zusatzkomponenten wird deutlich, dass Glycerol Propoxylate Triglycidyl Ether (EP-EM 2) den Elastizitätsmodul um bis zu 50 % herabsetzt und somit bei gleicher Formulierung effektiver als Glycidyl Ether auf Basis von Rizinusöl (EP-EM 1) ist. Alle geprüften Werkstoffe zeigen nach der Auslagerung in Wasser für 28 Tage bei 40 °C eine zusätzliche Verringerung des Elastizitätsmoduls. Der Einfluss des Wassers auf das Werkstoffverhalten ist auch in [73, 77, 78] beschrieben. Der Elastizitätsmodul des Dichtungswerkstoffes C-EP 2 ist bereits auf sehr niedrigem Niveau und wird durch die Wasserauslagerung noch zusätzlich um mehr als 50 % herabgesetzt. Aufgrund dessen ist dieses modifizierte Epoxidsystem für den gegebenen Anwendungsfall nicht geeignet. Bei dem zweiten von einer Firma angebotenen und fertig modifizierten Epoxidsystem C-EP 1 zeigt sich ebenfalls ein starker Einfluss des Wassers auf den Elastizitätsmodul. Der mittels DMA ermittelte Elastizitätsmodul, ausgewertet bei der mittleren Einsatztemperatur von 12 °C (siehe Anhang, Tabelle 54 und Abbildung 87), zeigt teilweise deutliche Unterschiede zum Elastizitätsmodul ausgewertet bei 23 °C. Bereits eine Temperaturänderung von 10 °C kann die mechanischen Eigenschaften des Dichtungswerkstoffes beeinflussen.

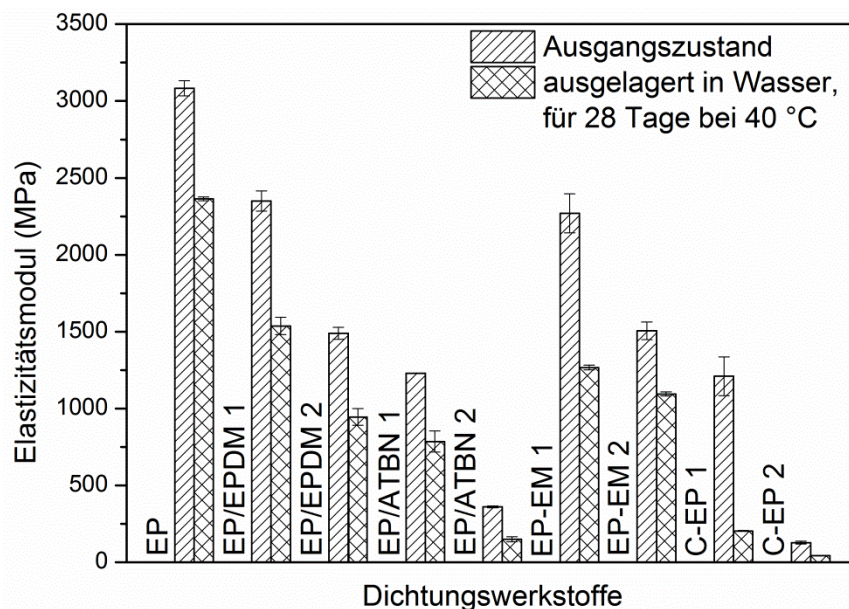


Abbildung 71: Elastizitätsmodul ermittelt durch dynamisch-mechanische Analyse an Proben des Ausgangszustandes (vollständig ausgehärtete Proben) und an Proben ausgelagert in Wasser bei 40 °C für 28 Tage; Speichermodul E' ausgewertet bei 23 °C; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 55 angegeben

Wie auch in der Literatur [70, 75, 76] gezeigt wird, ist bei der Zugfestigkeit der modifizierten Epoxide ähnliches Werkstoffverhalten wie bei dem Elastizitätsmodul zu beobachten (siehe Abbildung 72). Die Zugfestigkeit kann im Vergleich zu dem reinen Epoxid EP durch die Modifizierung mit EPDM-Gummimehl oder Flüssigpolymer (Formulierung: 40 g Zusatzkomponente auf 100 g Harz) um bis zu 50 % herabgesetzt werden. Andererseits führt eine Modifizierung mit epoxidreaktiven-Zusatzkomponenten zu keiner so starken Verringerung der Zugfestigkeit als die Zugabe von reaktivem Flüssigpolymer und Gummimehl. Nur sehr geringe Zugfestigkeitswerte konnten bei den beiden elastifizierten Epoxidsystemen (C-EP 1, C-EP 2) gemessen werden.

Der Hauptgrund für die Durchführung der Modifizierung bzw. Elastifizierung von Epoxiden in dieser Arbeit ist die Notwendigkeit, dass ein Dichtungswerkstoff für den gegebenen

Anwendungsfall geringe Rohrbewegungen kompensieren muss. Diese Rohrbewegungen können durch Temperaturschwankungen oder minimale Setzungen des Bodens entstehen. Somit muss der im Muffenspalt eingebrachte Dichtungswerkstoff zu einem gewissen Maß verformbar sein. Aus diesem Grund wurde die Bruchdehnung der modifizierten Epoxide mittels Zugversuch ermittelt und in Abbildung 73 dargestellt.

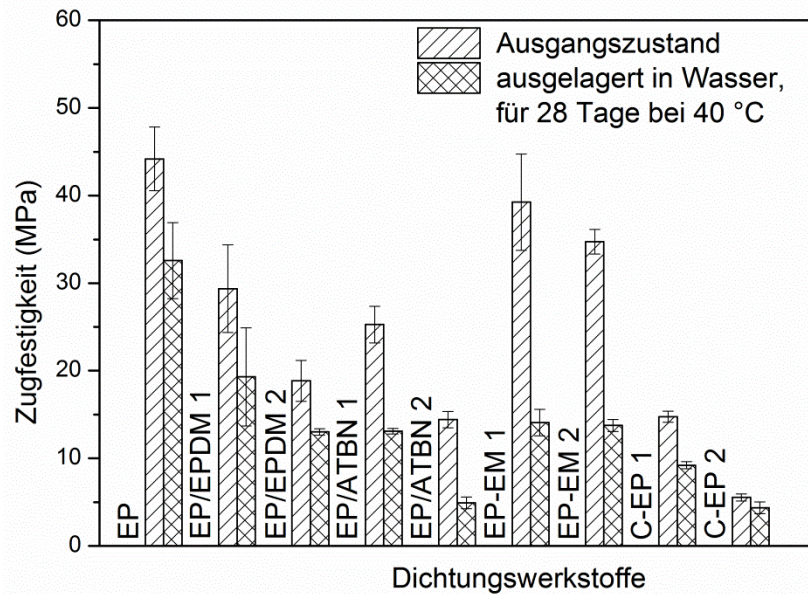


Abbildung 72: Zugfestigkeit ermittelt durch Zugversuche (bei 23 °C) an Proben des Ausgangszustandes (vollständig ausgehärtete Proben) und an Proben ausgelagert in Wasser bei 40 °C für 28 Tage; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 56 angegeben

Betrachtet man die Ergebnisse in der Abbildung 73, so ist die erfolgversprechendste Methode zur Modifizierung von Epoxiden, unter dem Gesichtspunkt, ein gewisses Maß an Verformbarkeit zu erreichen, die Zugabe von reaktivem Flüssigpolymer ATBN oder von den epoxidreaktiven-Zusatzkomponenten EM 1 und EM 2.

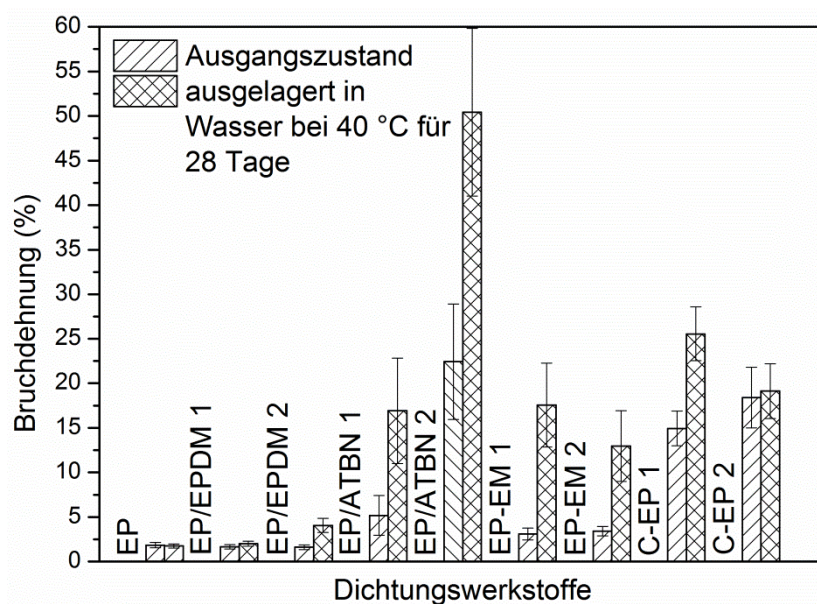


Abbildung 73: Bruchdehnung ermittelt durch Zugversuche (bei 23 °C) an Proben des Ausgangszustandes (vollständig ausgehärtete Proben) und an Proben ausgelagert in Wasser bei 40 °C für 28 Tage; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 57 angegeben

Durch die Beimengung von EPDM-Gummimehl konnte bei beiden Formulierungen keine Erhöhung der Bruchdehnung erreicht werden. In diesem Zusammenhang ist auf die große Korngröße des EPDM-Gummimehles hinzuweisen, wodurch eine Erhöhung der Bruchdehnung nicht erreicht werden konnte. Aufgrund dessen sind Polymerblends aus Epoxid und EPDM-Gummimehl für diesen Anwendungsfall nicht geeignet. Wie deutlich in Abbildung 72 und Abbildung 73 zu erkennen ist, werden auch die Zugeigenschaften durch den Einfluss von Wasser stark verändert. Die Zugfestigkeit nimmt ab und die Bruchdehnung wird erhöht. Somit tritt ein Weichmachereffekt auf.

Dass alle geprüften Werkstoffe Wasser aufnehmen, wird in Abbildung 74 deutlich gezeigt. Vergleicht man das Ausgangsharz mit den Formulierungen, wird deutlich, dass die Wasseraufnahme durch die Zugabe von Zusatzkomponenten zur Weichmachung erhöht wird. Diese Beobachtung ist unabhängig davon, ob es sich um einen Polymerblend oder ein Copolymer handelt. Eine Erhöhung des Anteiles an Zusatzkomponenten führt zu einem weiteren Anstieg der Wasseraufnahme im Polymer. Bei den Copolymeren wird das Netzwerk aus Polymerketten weitmaschiger sowie beweglicher, und somit wird die Diffusion von Wasser in das Polymernetzwerk erleichtert. Bei dispers eingelagerten Phasen sollte nicht das Netzwerk dominierend sein, sondern die zweite Phase selbst und auch die Grenzflächen.

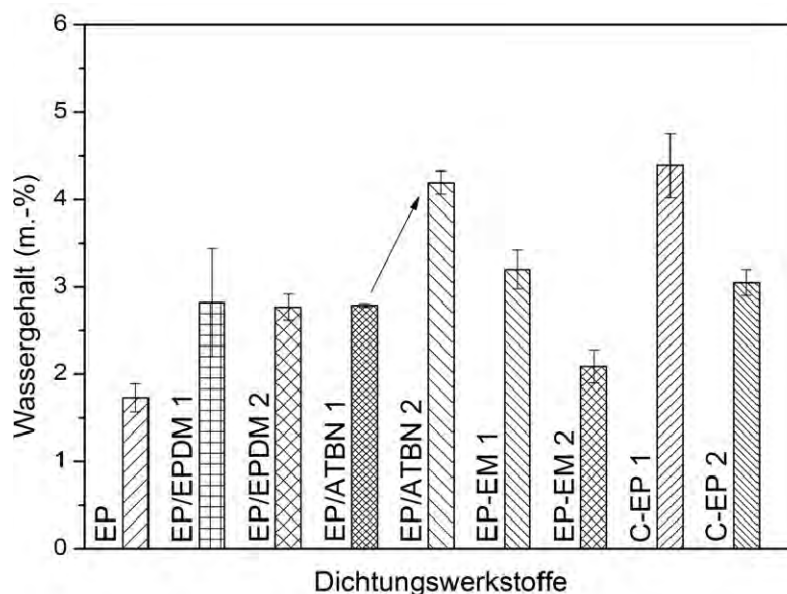


Abbildung 74: Wassergehalt der modifizierten Epoxide nach 28 Tagen bei 40 °C, untersucht mittels thermogravimetrischer Analyse; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 58 angegeben

Die Formulierungen EP/ATBN 2 sowie C-EP 1 zeigen die höchste Wasserabsorption mit einem Wassergehalt von ca. 4,5 Massenprozent (m.-%). Vergleicht man nun die dargestellten Messergebnisse, kann ganz klar gezeigt werden, dass die Erhöhung der Bruchdehnung, die Verringerung der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls sowie die Verschiebung der Glasübergangstemperatur mit dem Wassergehalt der Werkstoffformulierungen zusammenhängen.

Auch bei den modifizierten Epoxidformulierungen wurden zusätzlich zu herkömmlichen Werkstoffprüfungen wie Zugversuch oder dynamisch-mechanischer Analyse, etc. für den Anwendungsfall spezifische Prüfungen wie Haftzugversuche durchgeführt. Notwendig ist diese Prüfung deswegen, da die Werkstoffkennwerte des Zugversuches sehr deutlich von jenen nach Applikation der Formulierungen auf Grauguss abweichen. Durch die Rohrreinigungsversuche (Kapitel 4.3) wurde gezeigt, dass keine losen Korrosionsschichten im Muffenspalt zurückbleiben. Geringe Mengen an Flugrost können durch eine automatisierte Reinigung mit dem Roboter entfernt werden. Aufgrund dessen wurden diese Haftzugversuche ausschließlich an Proben mit geschliffener Graugussoberfläche durchgeführt und die Ergebnisse in Abbildung 36 dargestellt. Die Haftzugfestigkeiten der Formulierung EP/ATBN 2 sowie jene des modifizierten Epoxides C-EP 1 liegen im Bereich des reinen Epoxides (EP). Alle anderen Formulierungen zeigen eine Verringerung der Haftzugfestigkeit.

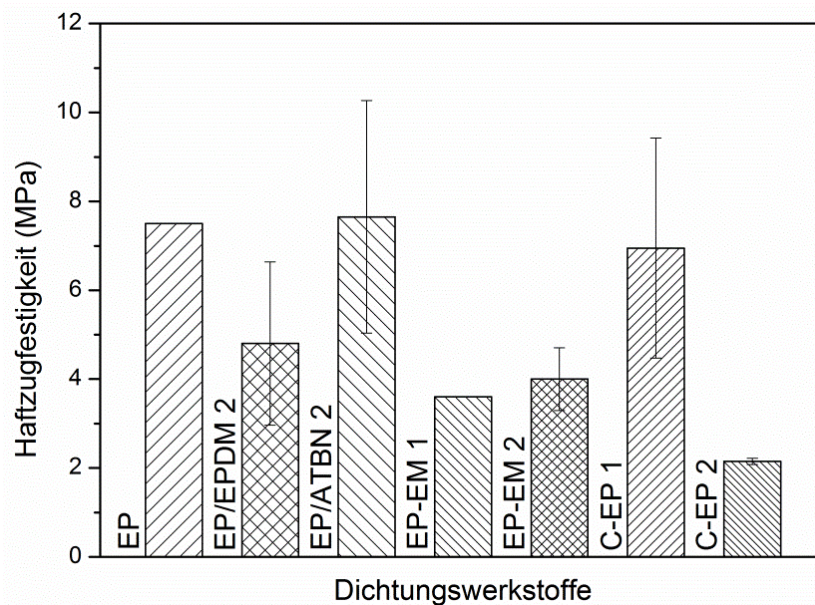


Abbildung 75: Haftzugfestigkeit der modifizierten Epoxide; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 59 angegeben

Das Bruchverhalten bzw. die Bruchbilder der Haftzugproben sind lt. EN ISO 10365 - Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder [57] bewertet und in Tabelle 24 bis Tabelle 30 für die jeweiligen Proben dargestellt.

Tabelle 24: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche

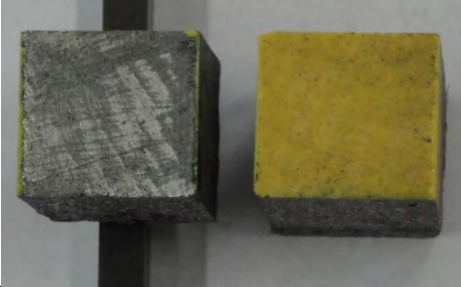
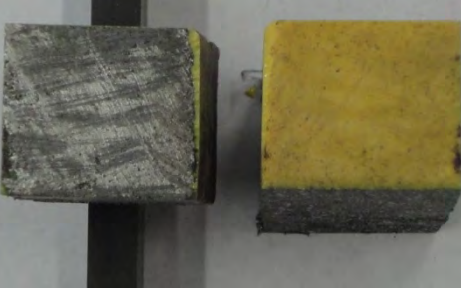
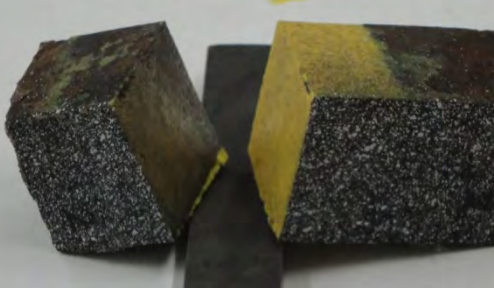
	EP			
Probe 1				
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch			
Probe 2				
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch			

Tabelle 25: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP/EPDM 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche

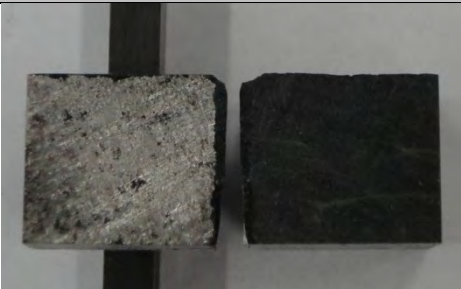
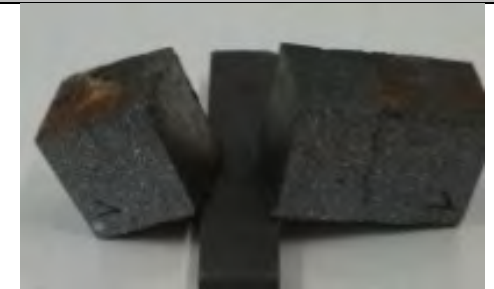
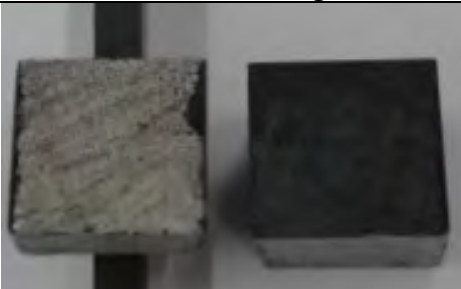
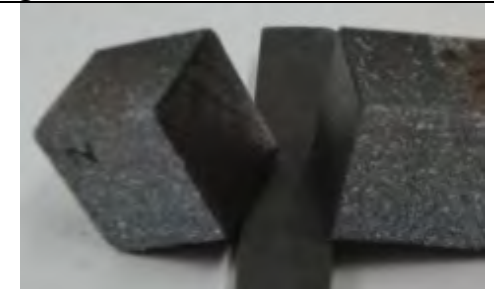
	EP/EPDM 2			
Probe 1				
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch			
Probe 2				
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch			

Tabelle 26: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP/ATBN 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche

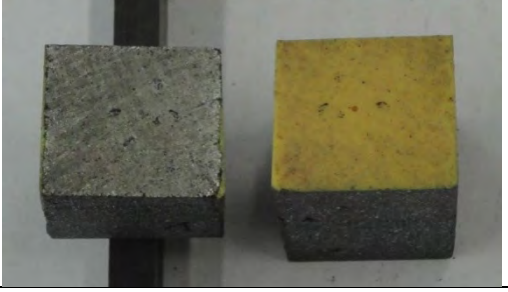
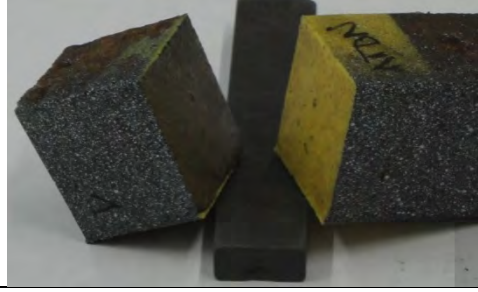
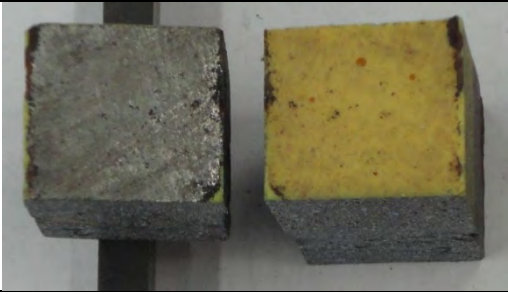
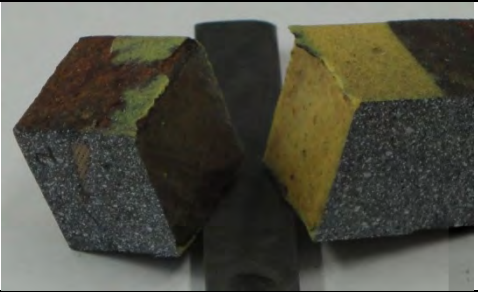
	EP/ATBN 2	
Probe 1		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	
Probe 2		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	

Tabelle 27: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP-EM 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche

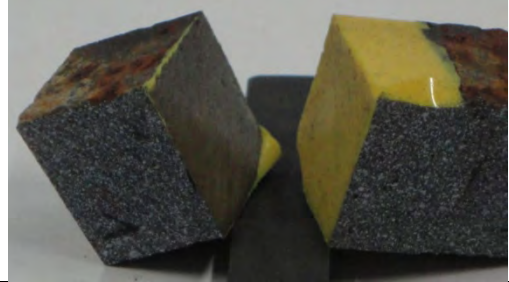
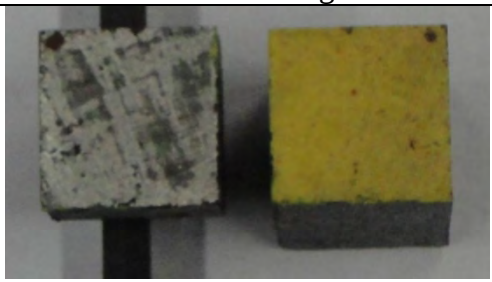
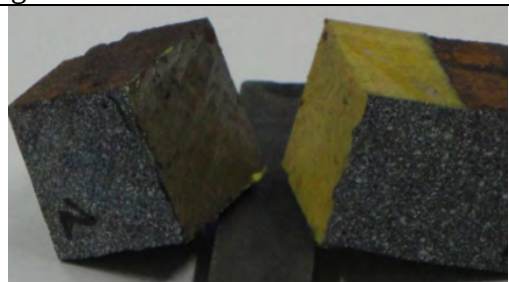
	EP-EM 1	
Probe 1		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	
Probe 2		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	

Tabelle 28: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP-EM 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche

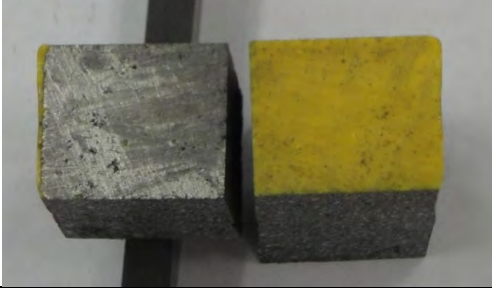
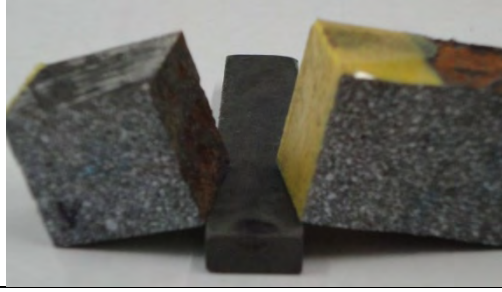
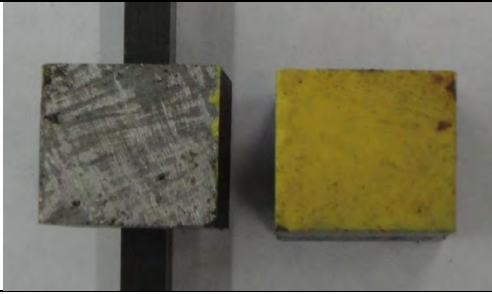
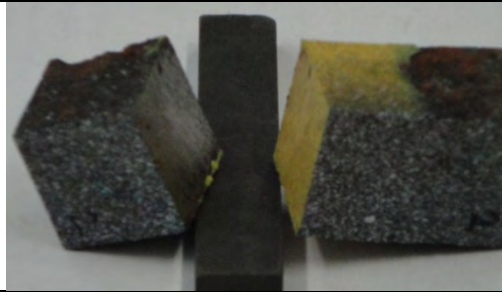
	EP-EM 2	
Probe 1		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	
Probe 2		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	

Tabelle 29: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes C-EP 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche

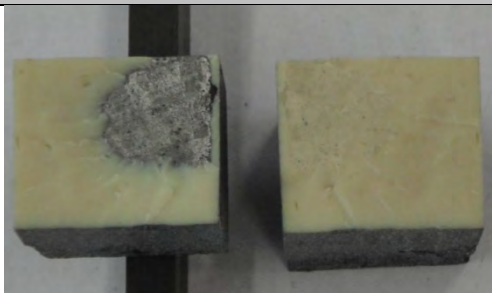
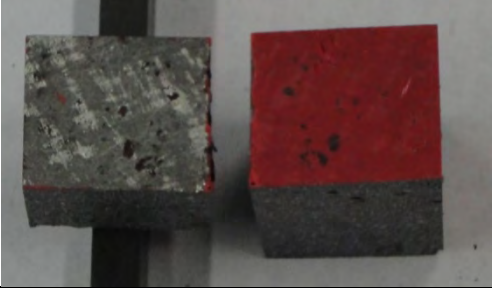
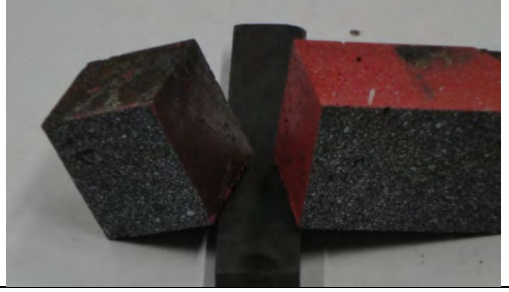
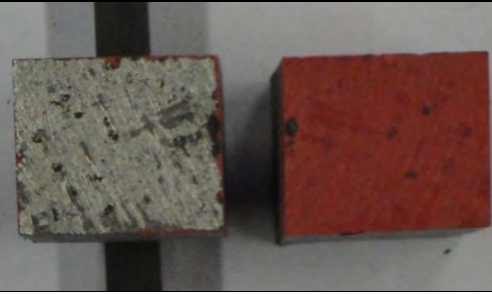
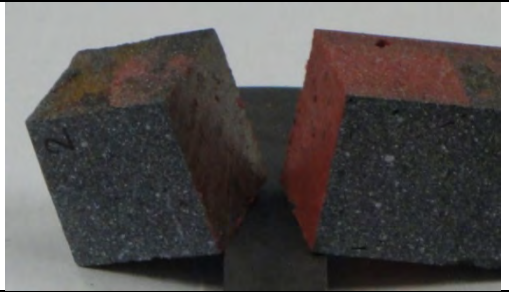
	C-EP 1	
Probe 1		
	Mischform aus Adhäsionsbruch und kohäsivem Versagen	
Probe 2		
	substratnaher Kohäsionsbruch	

Tabelle 30: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes C-EP 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche

	C-EP 2	
Probe 1		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	
Probe 2		
	vollständig adhäsives Versagen – Adhäsionsbruch	

Eine zusammenfassende Bewertung der Bruchbilder macht deutlich, dass nur bei dem modifizierten Epoxid C-EP 1 kohäsives bzw. substratnahes kohäsives Versagen zu beobachten ist und somit auch die höhere Haftzugfestigkeit erklärt werden kann. Bei allen anderen Werkstoffen trat unter Zugbelastung adhäsives Versagen, also ein rückstandsloses Ablösen des Dichtungswerkstoffes von der Grauguss-Klebefläche auf. Die aufgetretenen Haftzugfestigkeiten bei diesen Werkstoffen sind starken Schwankungen unterworfen. Somit ist in diesem Fall eine Korrelation zwischen Haftzugfestigkeit und Art des Versagens nicht ersichtlich.

Notwendig ist die Untersuchung der Haftzugfestigkeit deswegen, da die Werkstoffkennwerte des Zugversuches sehr deutlich von jenen nach Applikation der Formulierungen auf Grauguss abweichen. Der Vergleich dieser Untersuchungsergebnisse wird als Korrelation in doppellogarithmischer Darstellung in Abbildung 76 gezeigt. Die Zugfestigkeit aller Werkstoffformulierungen kann nach Applikation auf Grauguss bei weitem nicht vollständig in Form einer hohen Haftzugfestigkeit ausgenutzt werden. Die Formulierungen EP/ATBN 2 und C-EP 1 zeigen bei dieser Bewertungsmethode das beste Verhalten.

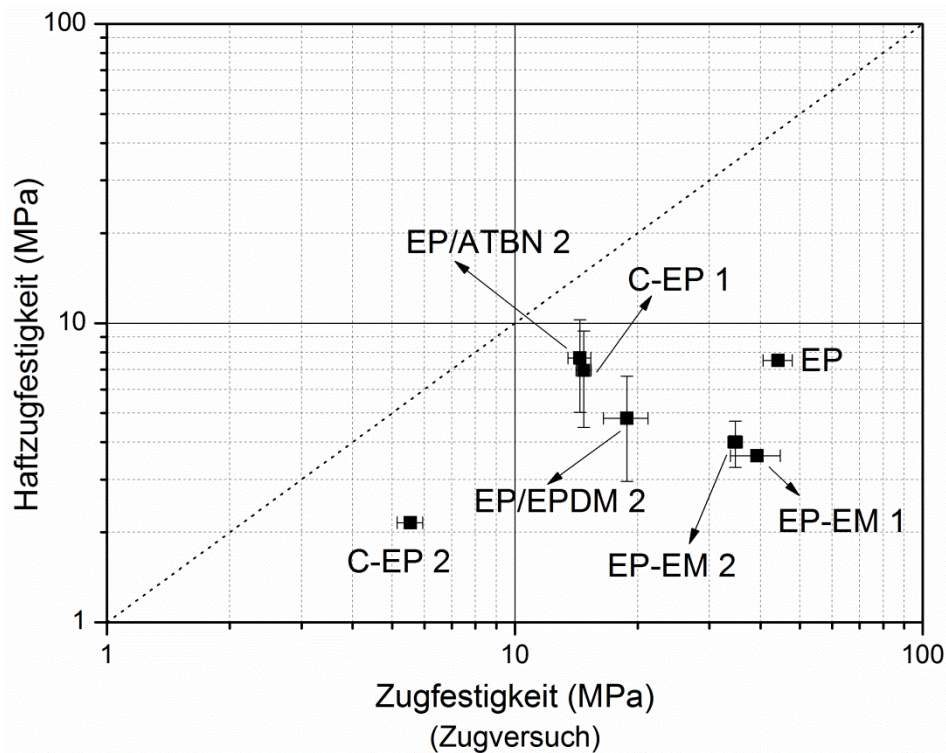


Abbildung 76: Korrelation der Zugfestigkeitswerte aus Zugversuch und Haftzugversuch, Oberfläche der Haftzugproben geschliffen ausgeführt; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 60 angegeben

Wie bereits beschrieben, muss der Dichtungswerkstoff die Anforderung erfüllen, geringe Verformungen aufzunehmen. Diese Anforderung muss der Werkstoff auch im Verbund mit dem Grauguss erfüllen. Somit muss ein gewisses Maß an Verformungsfähigkeit gewährleistet sein, bevor die Klebeverbindung versagt.

Für die Untersuchung der Dehnung wurde die Hauptformänderung mittels 2D-Bildkorrelation aus den stets während der Versuche aufgenommenen Bildern, nach der in Kapitel 4.2.7 beschriebenen Methode, berechnet. Die Verteilung der Hauptformänderung an den Haftzugproben ist in Tabelle 31 bis Tabelle 37 aller untersuchten Proben dargestellt.

Tabelle 31: Hauptformänderung bei Rissinitiierung des Epoxides EP

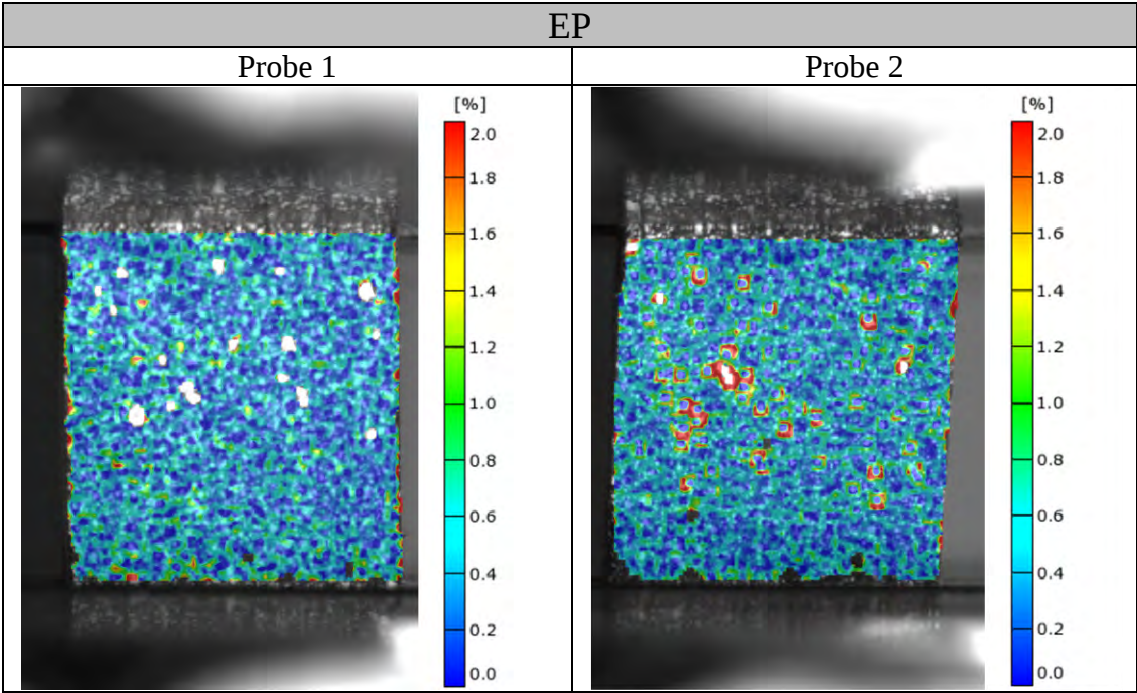


Tabelle 32: Hauptformänderung bei Rissinitiierung des modifizierten Epoxides EP/EPDM 2

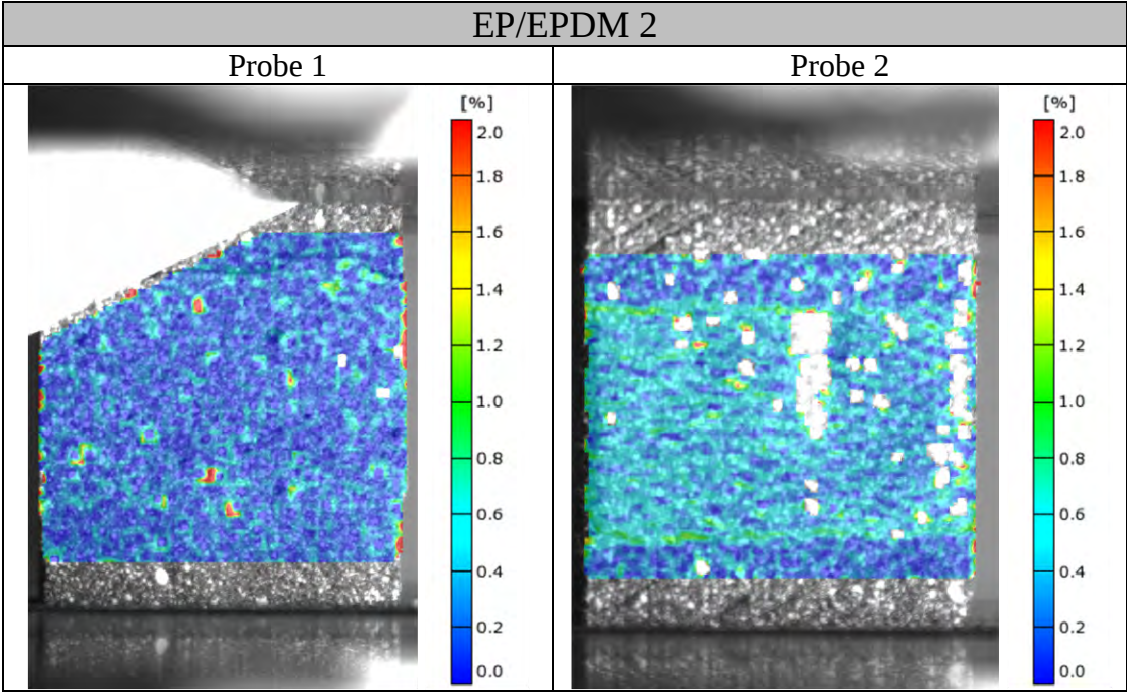


Tabelle 33: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides EP/ATBN 2

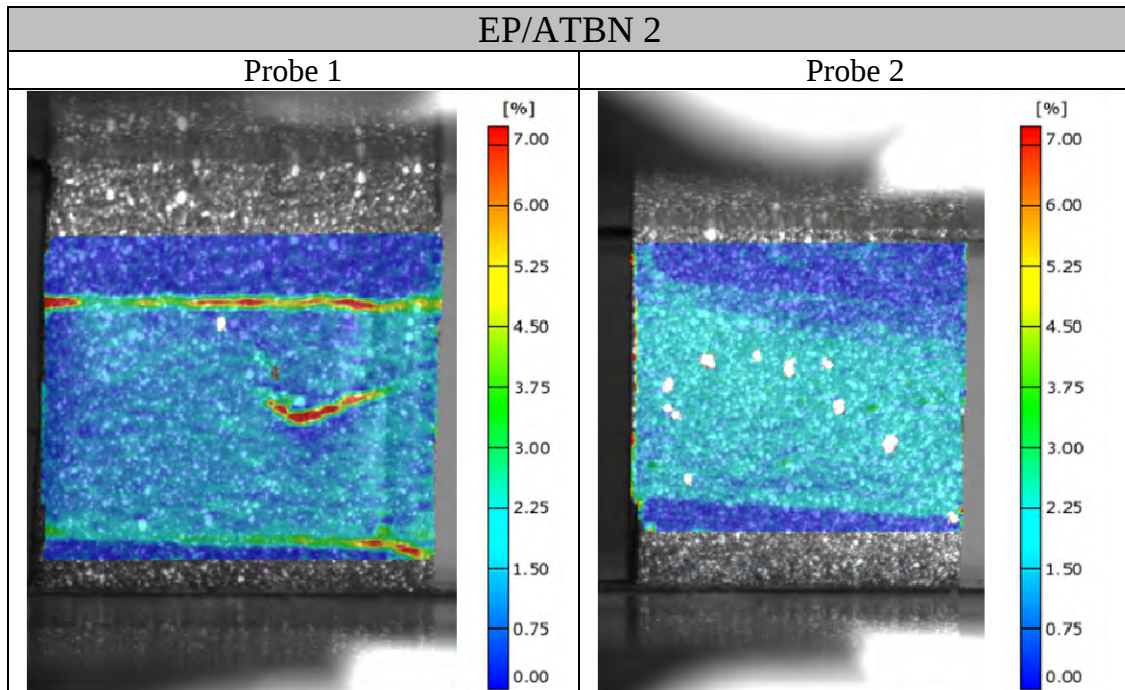


Tabelle 34: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides EP/EM 1

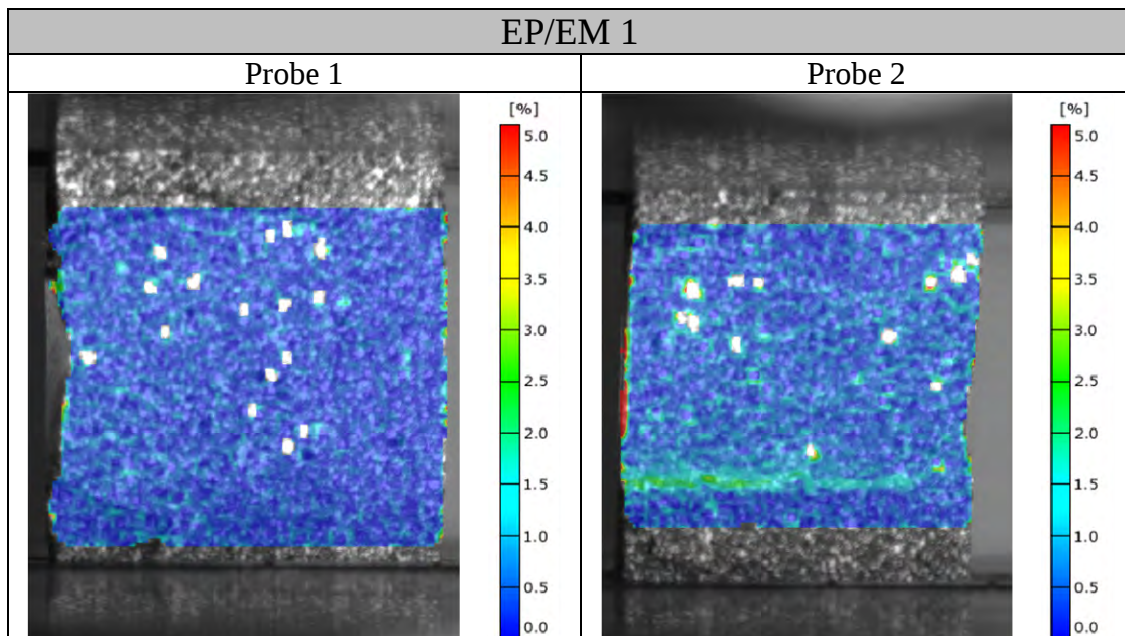


Tabelle 35: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides EP/EM 2

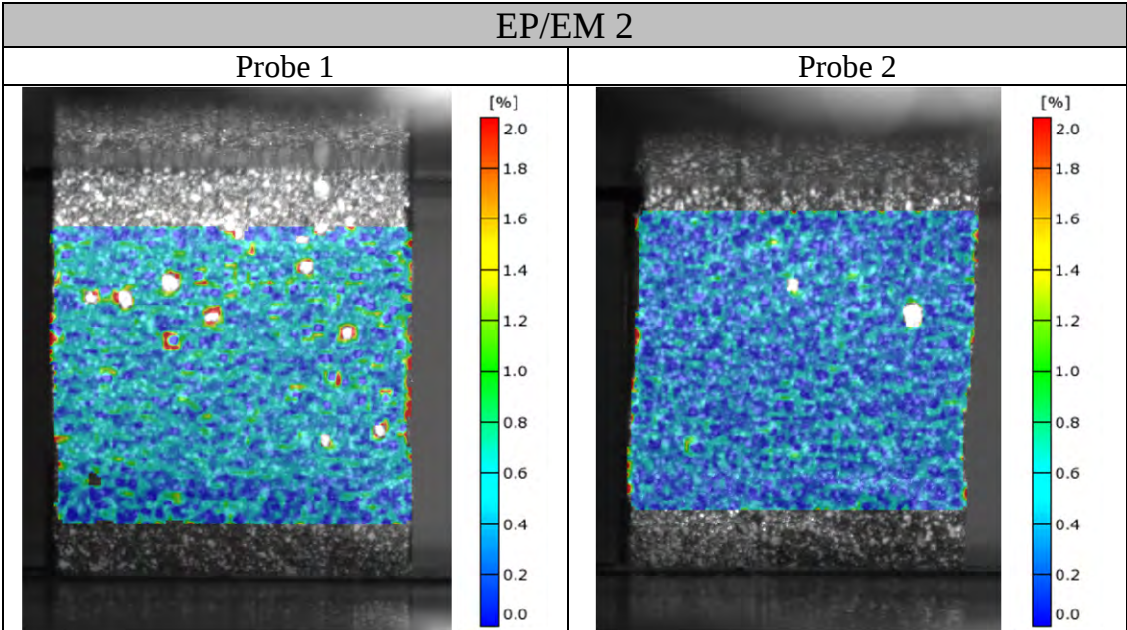


Tabelle 36: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides C-EP 1

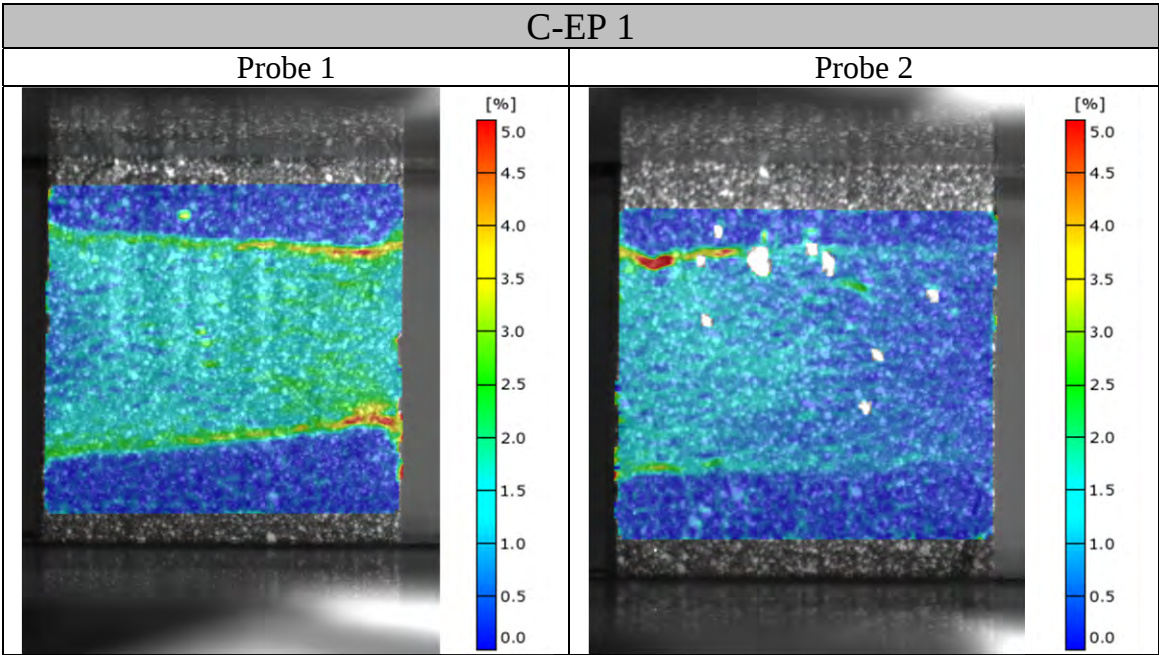
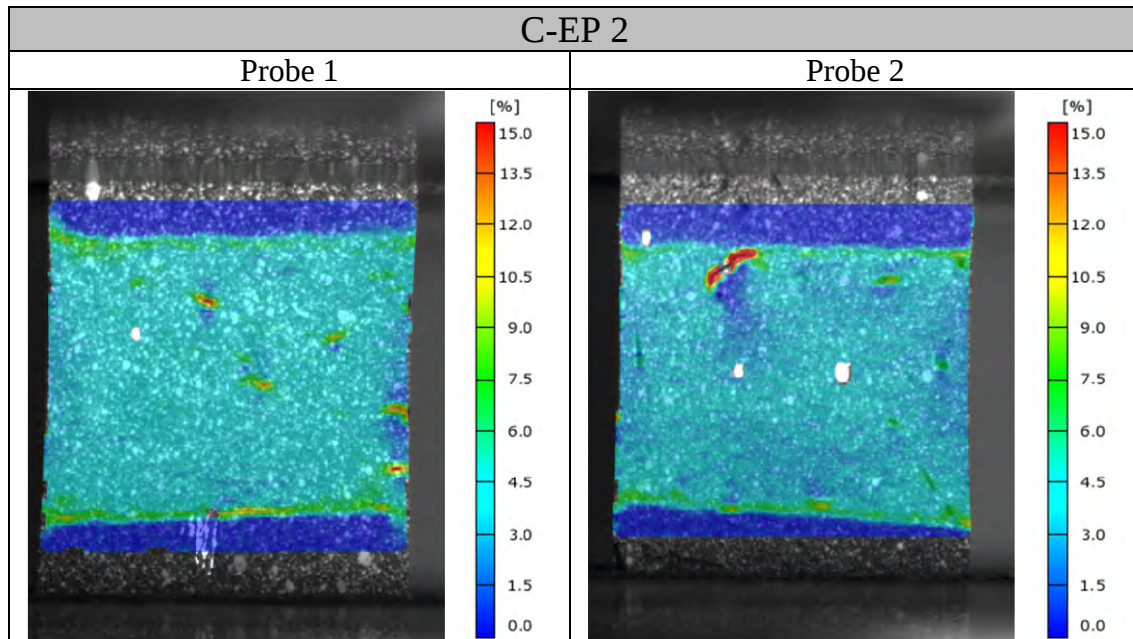


Tabelle 37: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides C-EP 2



Die Darstellung der Hauptformänderungen verdeutlicht, dass die Dehnungen innerhalb der Epoxidschicht nicht homogen verteilt sein müssen. Vor allem im substratnahen Bereich treten höhere Dehnungen auf als im zentralen Bereich der Epoxidschicht. Sehr deutlich ausgeprägt ist dieses Verhalten bei den modifizierten Epoxiden, die auch bereits im Zugversuch ein höheres Maß an Dehnungen zeigen.

Die Korrelation der Bruchdehnungswerte aus dem Zugversuch mit den Dehnungen bei Rissinitiierung aus dem Haftzugversuch ist in Abbildung 77 dargestellt. In einem Grauguss-Polymer-Grauguss-Verbund erreicht keine der untersuchten Formulierungen die Bruchdehnungswerte des herkömmlichen Zugversuches. Die modifizierten Epoxide C-EP 1, C-EP 2 sowie die Formulierung EP/ATBN 2 zeigen bei dieser Gegenüberstellung die beste Performanz. Da aber der Werkstoff C-EP 2 bereits aufgrund der geringen mechanischen Eigenschaften ausgeschieden worden ist, wird der finale Druckversuch an den Formulierungen C-EP1 und EP/ATBN 2 durchgeführt.

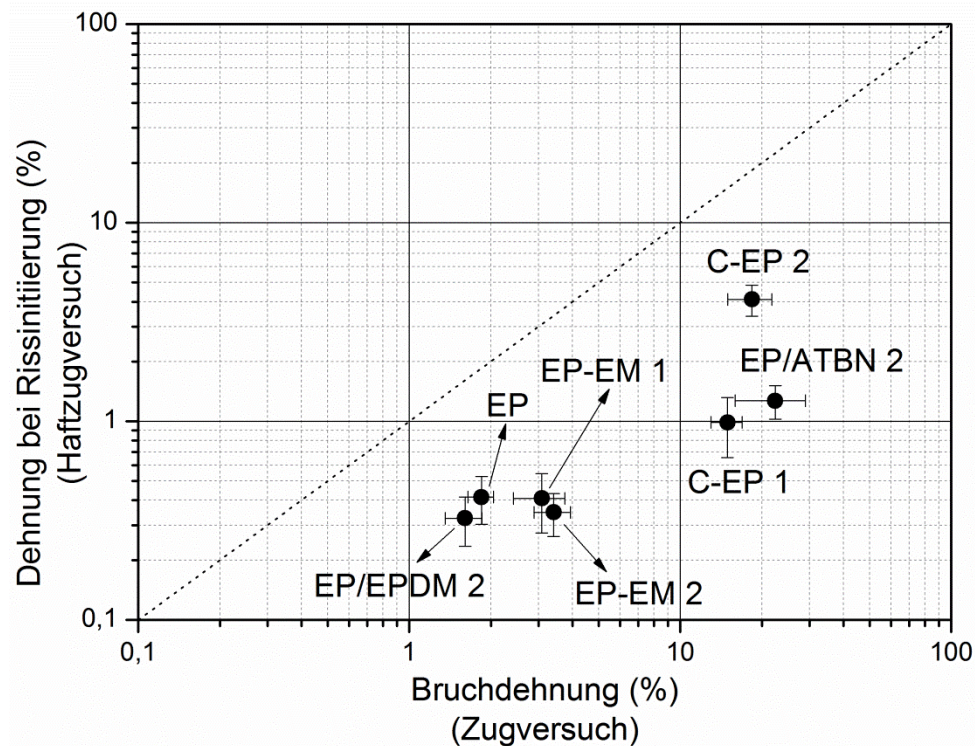


Abbildung 77: Korrelation der Bruchdehnungswerte aus Zugversuch und Dehnung bei Rissinitiierung aus dem Haftzugversuch, Oberfläche der Haftzugproben geschliffen ausgeführt; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 61 angegeben

Ein wichtiges Hauptkriterium, das für den Einsatz im Bereich der Muffensanierung erfüllt werden muss, ist neben der möglichen Verformbarkeit auch die Druckbeständigkeit der Formulierung. Die Ergebnisse der Druckbeständigkeit der Formulierung EP/ATBN 2 sind in Abbildung 78 für eine Spaltbreite von 10 mm und in Abbildung 79 für eine Spaltbreite von 30 mm dargestellt. Der Prüfdruck betrug 10 bar und die Verteilung der Hauptformänderung wird in der rechten Bildhälfte gezeigt.

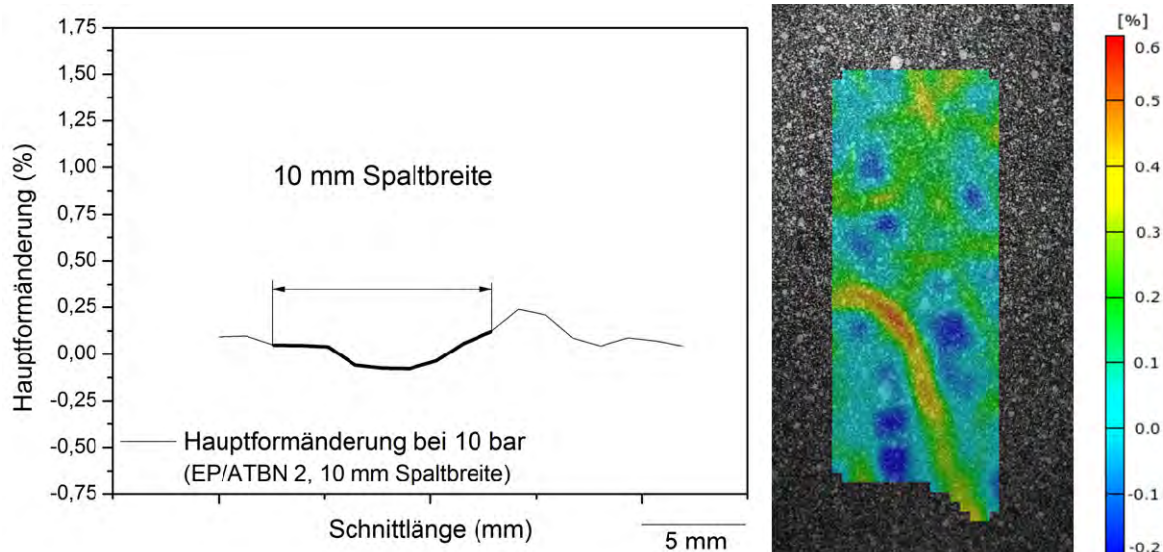


Abbildung 78: Druckbeständigkeit: EP/ATBN 2, Spaltbreite 10 mm dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; links: Darstellung der Hauptformänderung in einem Schnitt; rechts: Verteilung der Hauptformänderung

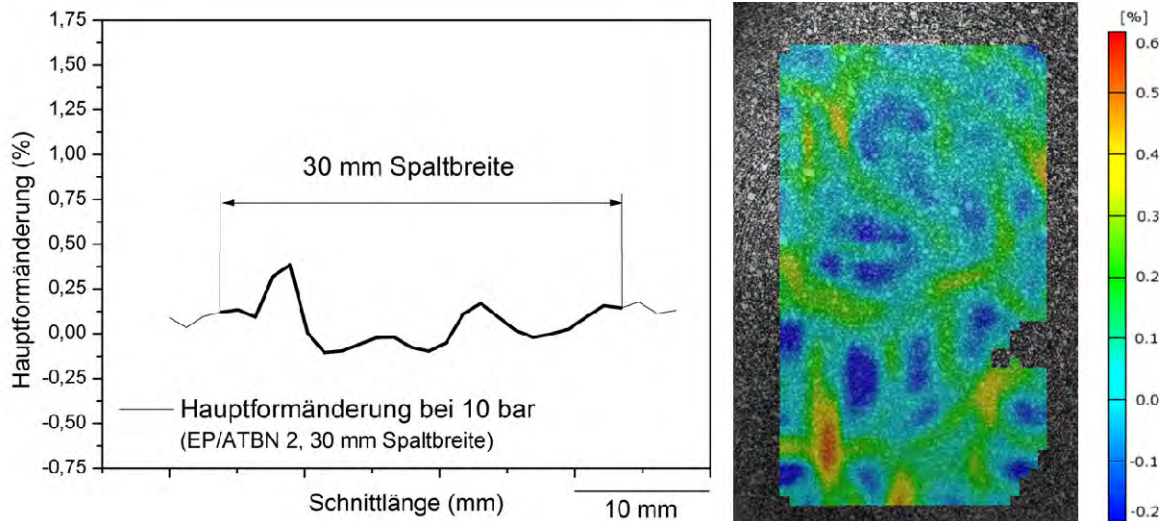


Abbildung 79: Druckbeständigkeit: EP/ATBN 2, Spaltbreite 30 mm dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; links: Darstellung der Hauptformänderung in einem Schnitt; rechts: Verteilung der Hauptformänderung

Die Formulierung EP/ATBN 2 zeigt unabhängig von den Spaltbreiten keine Veränderungen in der Verteilung der Hauptformänderung. In den Haftzugversuchen hat sich bei dem Werkstoff EP/ATBN 2 gezeigt, dass im substratnahen Bereich höhere Dehnungen im Dichtungswerkstoff auftreten. Im Druckversuch ist diese Art der Spannungsverteilung nicht zu beobachten und es ist auch keine Veränderung der Dehnung am Übergang zwischen Prüfflansch und geprüfem Werkstoff erkennbar.

In Abbildung 80 ist das Ergebnis der Druckbeständigkeit, bei 10 bar Prüfdruck, der Formulierung C-EP 1 für eine Spaltbreite von 10 mm und in Abbildung 81 für eine Spaltbreite von 30 mm dargestellt.

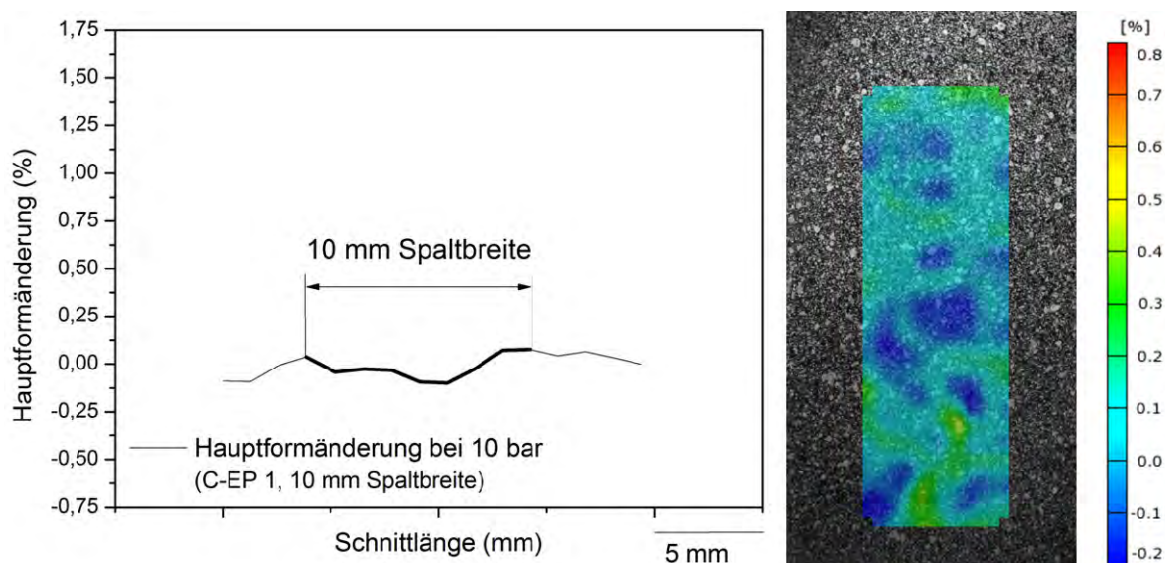


Abbildung 80: Druckbeständigkeit: C-EP 1, Spaltbreite 10 mm dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; links: Darstellung der Hauptformänderung in einem Schnitt; rechts: Verteilung der Hauptformänderung

Der Prüfdruck von 10 bar führt bei einer Spaltbreite von 10 mm noch zu keiner Erhöhung der Dehnungswerte des modifizierten Epoxides in der Prüfnut.

Beträgt die Breite der Prüfnut 30 mm, kann in der Verteilung der Hauptformänderung (Abbildung 81) die Form der Prüfnut durch gering erhöhte Dehnungswerte nahe dem Übergangsbereich erkannt werden. Diese sehr schwach ausgeprägten und unbedenklichen Verformungsspitzen von 0,2 bis 0,3 % sind auch in der Schnittdarstellung deutlich zu sehen.

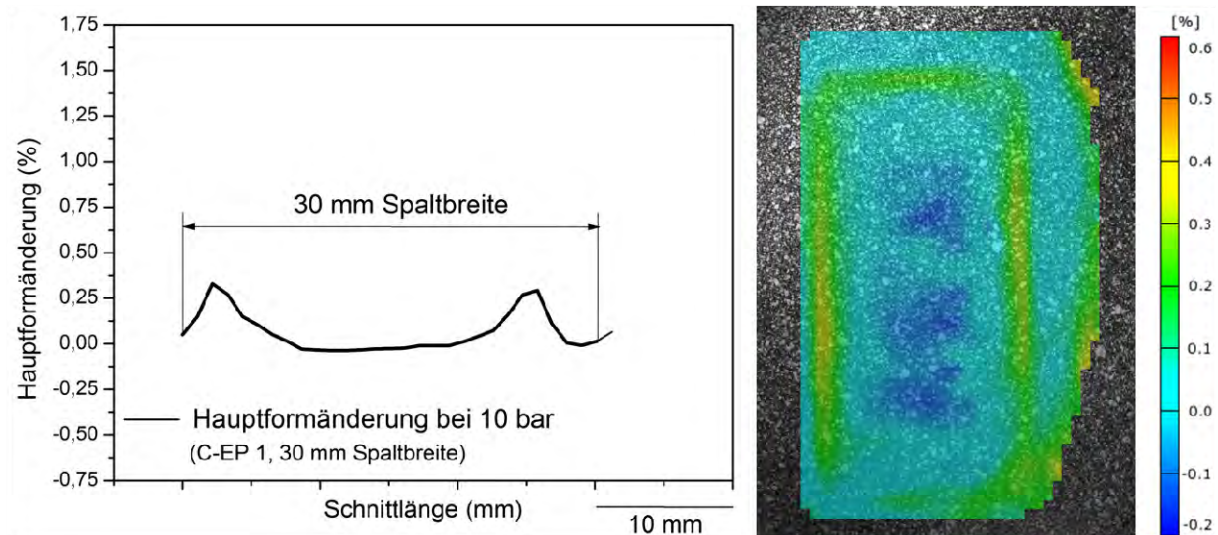


Abbildung 81: Druckbeständigkeit: C-EP 1, Spaltbreite 30 mm dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; links: Darstellung der Hauptformänderung in einem Schnitt; rechts: Verteilung der Hauptformänderung

Beide Werkstoffe, das Epoxid-System, modifiziert mit reaktivem Flüssigpolymer EP/ATBN 2 sowie das fertig modifizierte, von einem Unternehmen angebotene Epoxid C-EP 1, haben die Druckprüfung bestanden. Der Einfluss der Spaltbreite spielt bei der Formulierung mit reaktivem Flüssigpolymer keine Rolle. Das modifizierte Epoxidsystem zeigt nur bei der maximalen Spaltbreite von 30 mm nahe an der Klebefläche Flansch/Dichtungswerkstoff leicht erhöhte und vernachlässigbare Verformungswerte. Bei beiden Werkstoffsystemen wirkt sich eine Erhöhung der Spaltbreite nicht negativ auf die Druckbeständigkeit aus.

4.5.3 Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen der modifizierten Epoxide

Die Untersuchung der Formulierungen mit den definierten Prüfmethoden zeigen folgende Ergebnisse.

- Eine Erhöhung der Flexibilität durch die Modifizierung mit den genannten Zusatzkomponenten geht immer mit einer Verringerung der Glasübergangstemperatur einher.
- Nach der Auslagerung in Wasser wurde mit der TGA festgestellt, dass alle untersuchten Proben Wasser aufnehmen. Durch die Modifizierung wird eine höhere Wasseraufnahme möglich.
- Mit der Auslagerung in Wasser treten auch eine Verringerung der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls sowie eine Erhöhung der Bruchdehnung ein.
- Unter Berücksichtigung des letzten angeführten Punktes in Kombination mit der Verringerung der Glasübergangstemperatur T_g , kann von einem Weichmachereffekt ausgegangen werden.
 - Der Einfluss auf modifizierte Epoxide ist bei weitem stärker als jener auf das Ausgangs-Epoxidsystem.
 - Eine zusätzliche Änderung der Einsatztemperatur durch die Wasseraufnahme muss somit für die Anwendung im Unterwasserbereich berücksichtigt werden.

Der Haftzugversuch zeigt, dass die im Zugversuch ermittelten Festigkeiten im Haftzugversuch nicht erreicht werden. Zusätzlich zeigt die 2D-Bildkorrelation, dass die Verformungsverteilung nicht homogen ist. Es kommt zu Spannungserhöhungen an der Grenzfläche zwischen Epoxid und Grauguss, somit zur Rissinitiierung und zum Versagen der Verbindung.

Beurteilt man die untersuchten Formulierungen nach den gesetzten Anforderungen, zeigt sich Folgendes:

- Die Zugabe von EPDM-Gummimehl führt zu keiner nennenswerten Erhöhung der Flexibilität und somit sind die Formulierungen EP/EPDM 1 und EP/EPDM 2 ungeeignet.
- Die Korrelation der Ergebnisse aus dem Zugversuch und dem Haftzugversuch zeigen, dass die Formulierungen EP-EM 1 und EP-EM 2 (Zusatzkomponente mit epoxid-reaktiven-Endgruppen) im Verbund mit Grauguss nur sehr geringe Dehnungen aufweisen. Diese reichen für den Anwendungsfall nicht aus.
- Die bereits modifizierten Werkstoffe C-EP 1 und C-EP 2 sind unterschiedlich zu bewerten. C-EP 1 hat aufgrund der Lage des T_g und des starken Wassereinflusses Nachteile, jedoch die gute Performanz im Haftzugversuch erlaubt eine weitere Berücksichtigung dieser Formulierung. Die geringe Festigkeit und Steifigkeit von C-EP 2 und die zusätzlich auftretende Verringerung durch die Wasseraufnahme zeigt, dass dieser modifizierte Werkstoff nicht geeignet ist.
- Die Herstellung eines Blends mit reaktivem Flüssigpolymer bietet den Vorteil, dass durch das Zwei-Phasensystem nahezu konstante mechanische Eigenschaften im Anwendungstemperaturbereich zu beobachten sind. Der Haftzugversuch zeigt, dass

nicht nur die Haftzugfestigkeit auf einem hohen Niveau ist. Auch die Dehnung bei Rissinitiierung liegt im Vergleich zu den anderen Formulierungen höher.

Aufgrund dieser Resultate wurden die Druckversuche bis zu 10 bar an diesen beiden Formulierungen durchgeführt und die Hauptformänderung mittels der 3D-Bildkorrelation ausgewertet.

- EP/ATBN 2 und C-EP 1 erfüllen die Anforderung der Druckbeständigkeit unabhängig von der Spaltbreite.
- Nur der bereits modifizierte Werkstoff C-EP 1 zeigt bei einer Spaltbreite von 30 mm eine leicht erhöhte Hauptformänderung, die dem Verlauf der Prüfnut entspricht. 0,25 % Hauptformänderung im Bereich nahe der Klebefläche ist auf einem unbedenklichen Niveau. Alle anderen Ergebnisse zeigen keinen Unterschied zwischen Prüfplatte und Dichtungswerkstoff.

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ausgangssituation für diese Arbeit waren einerseits lecke Muffen von Graugussrohren, die abgedichtet werden sollen, andererseits eine Vielzahl von Anforderungen (teilweise unkonkret) an das zukünftige Dichtungssystem. In einem ersten Schritt war es notwendig, alle Anforderungen zu identifizieren, denn die speziellen Bedingungen in unter Druck betriebenen Trinkwasserrohren stellen besondere Anforderungen an einen Dichtungswerkstoff.

Diese sind eine Fülle von mechanischen und physikalischen Eigenschaften, wie ausreichende Steifigkeit und Festigkeit (bis zu 10 bar Rohrinnendruck), ausreichende Elastizität (Ausgleich von Rohrbewegungen) oder passende Glasübergangstemperatur (bestimmt die Einsatztemperatur). Der Dichtungswerkstoff muss wasserbeständig sein, d.h. die Änderungen der mechanischen und physikalischen Eigenschaften sollen gering und abschätzbar für die Dimensionierung sein.

Die Applikation des Dichtungswerkstoffes erfolgt auf Grauguss, also muss dieser darauf eine entsprechende Haftung aufweisen. Diese wird jedoch durch die Beschaffenheit der Oberfläche, z.B. durch Rost, beeinflusst. Dadurch spielt die Präparation der Oberfläche in diesem Anwendungsfall eine wichtige Rolle. Auftretende Korrosion sowie eine mögliche Unterwanderung des Dichtungswerkstoffes müssen ebenfalls beachtet werden.

Das Werkstoffsystem muss den Anforderungen der Trinkwassertauglichkeit genügen. Das heißt, Ausgangsstoffe müssen entsprechend der in der Norm (ÖNORM B5014-1) genannten Positivlisten gewählt werden. Da der Dichtungswerkstoff nur im Muffenbereich, also sehr kleinflächig aufgebracht wird und es sich um Kaltwasserleitungen mit großem Durchmesser handelt, dürfen die Migrationswerte von Ausgangsstoffen im Laborversuch höher sein als die angegebenen Grenzwerte, und zwar deswegen, weil die Migration bei niedrigen Temperaturen im Rohr langsamer abläuft, die migrierten Stoffe durch große Wassermenge stärker verdünnt werden und somit die Belastung des Wassers durch migrierte Stoffe sinkt.

Eine Lebensdauer von 50 Jahren soll erreicht werden, außerdem muss auch die Wirtschaftlichkeit der Methode gegeben sein.

Auch die Einstellung des Dichtungswerkstoffes hinsichtlich der Verarbeitung mit dem Roboter ist zu beachten. Damit ist sowohl die Viskosität als auch die Topfzeit des Dichtungswerkstoffes von Bedeutung.

Als Randbedingung für eine mögliche Sanierung wurde eine Muffenspaltbreite von 5 bis 30 mm festgelegt, da in diesen Spaltbreiten eine bestmögliche Sanierung gewährleistet werden kann. Da Rohrbewegungen unabhängig von der Spaltbreite aufgenommen werden müssen, soll die resultierende Dehnung für den Dichtungswerkstoff nicht zu groß sein. Somit ergibt sich eine untere Spaltbreite von 5 mm. Bei großen Spaltbreiten wird der Dichtungswerkstoff in der Muffe durch den Innendruck stärker belastet. Hier wurden 30 mm als Obergrenze gewählt, da es im Anwendungsfall auch noch zu einer Überlagerung mit Kräften in axialer Richtung, durch Längenänderungen des Rohres, kommen kann.

Zusätzlich kann durch ungenaue Verlegung der Rohre die Spaltbreite entlang des Umfanges variieren. Bei Extremfällen, wie z.B. dass das Rohrende vollständig im Glockenende der Muffe steckt, ist kein Muffenspalt vorhanden und die Sanierungsmethode greift nicht. In so einem Fall könnte alternativ eine Sanierung mit einer EPDM-Manschette von AMEX® durchgeführt werden.

Nach der Präzisierung der Anforderungen und Randbedingungen, wodurch sich ein Eigenschaftsprofil für den Dichtungswerkstoff ableiten lässt, war es notwendig, eine Prüfprozedur für Dichtungswerkstoffe zu entwickeln. Durch eine Summe an konventionellen und für diesen Anwendungsfall speziell entwickelten Untersuchungsmethoden war es möglich, Dichtungswerkstoffe entsprechend den Anforderungen zu charakterisieren.

Wasseraufnahme und Abbauverhalten:

- Thermogravimetrische Analyse

Mechanische Eigenschaften und Einfluss von Wasserabsorption:

- Zugversuch zur Bestimmung von Zugfestigkeit und Bruchdehnung
- Dynamisch-mechanische Analyse zur Bestimmung des E-Moduls und der Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften und Einfluss von Wasserabsorption:

- Dynamisch-mechanische Analyse zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur und somit des Anwendungstemperaturbereiches

Haftungseigenschaften auf Grauguss:

- Haftzugfestigkeit und Dehnungsfähigkeit des Dichtungswerkstoffes im Verbund mit Grauguss und Bestimmung des Einflusses der Oberflächenpräparation

Druckbeständigkeit von Dichtungswerkstoffen:

- Druckversuche zur Bestimmung des Verformungsverhaltens sowie auftretender Dehnungen in einem Spalt unter Druckbeaufschlagung

Aufgrund der gängig angewendeten Sanierungsmethoden wurden sieben herkömmliche, auf dem Markt befindliche und von Firmen empfohlene Dichtungswerkstoffe untersucht. Diese sind auf der Basis von Epoxid, Polyurethan und Silan-modifiziertem Polymer. Die Dichtungswerkstoffe weisen unterschiedliche Eigenschaften in jeder Gruppe betreffend Elastizität, Steifigkeit, Füllstoff, Füllstoffgehalt und Form (einkomponentig oder zweikomponentig) auf. Diese Dichtungswerkstoffe wurden zur Beurteilung ihrer Eignung für den Anwendungsfall mit der oben angeführten Prüfprozedur untersucht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von den kommerziellen Dichtungswerkstoffen mit der definierten Prüfprozedur sind unterschiedlich.

Das Silan-modifizierte Polymer zeigt eine hohe Wasseraufnahme und die damit verbundene starke Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften. Zusätzlich konnte starke Degradation durch die Wasserauslagerung im Langzeitversuch beobachtet werden. Diese Werkstoffgruppe konnte somit nicht weiter in Betracht gezogen werden.

Jedes der beiden untersuchten zweikomponentigen Polyurethane zeigte eine niedrige Haftzugfestigkeit auf geschliffenen Graugussoberflächen. Somit war eines der Hauptkriterien nicht mehr erfüllt. Zusätzliche Nachteile waren bei einem dieser Werkstoffe die Lage der Glasübergangstemperatur sowie eine zu geringe Dehnung beim anderen. Das einkomponentige Polyurethan zeigt ein gutes Werkstoffverhalten in Wasseratmosphäre, und auch das Bruchverhalten im Haftzugversuch ist als positiv zu bewerten. Nachteilig wird sich

jedoch die hohe Nachgiebigkeit auf die Druckbeständigkeit dieses Dichtungswerkstoffes auswirken.

Zwei der untersuchten Epoxide zeigen trotz der Aufnahme von Wasser noch ein hohes Niveau an mechanischem Verhalten und beide Dichtungswerkstoffe verfügen über gute Haftzugeigenschaften auf geschliffenen Graugussoberflächen. Jedoch ist durch die geringe Dehnbarkeit der notwendige Ausgleich von Längenänderungen des Rohres durch den Dichtungswerkstoff im Muffenspalt nicht gewährleistet. Ein weiteres untersuchtes Epoxid verhält sich grundlegend anders, denn die Glasübergangstemperatur liegt im Bereich der Anwendungstemperatur des Dichtungswerkstoffes. Zusätzlich tritt bei geschliffener Graugussoberfläche rein adhäsives Versagen mit einer niedrigen Haftzugfestigkeit auf.

Bei zwei der epoxidbasierenden Dichtungswerkstoffe und dem 1K-Polyurethan konnte durch die Untersuchungen des mechanischen und physikalischen Verhaltens gezeigt werden, dass diese die Grundanforderungen erfüllen.

Aufgrund der angeführten Resultate wurden Laborversuche zur Druckbeständigkeit nur an einem epoxidbasierenden Dichtungswerkstoff und dem einkomponentigen Polyurethan durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass durch die hohe Flexibilität des Polyurethans die Druckbeständigkeit nicht gegeben ist. Bereits bei einem Prüfdruck von 2 bar treten nicht zu vernachlässigende Durchbiegungen und damit verbundene Dehnungen im Dichtungswerkstoff auf. Der epoxidbasierende Dichtungswerkstoff zeigt bei einem Prüfdruck von 10 bar keine Verformung.

Speziell aus den Ergebnissen der Haftzugprüfung hat sich gezeigt, dass die Bearbeitung der Oberfläche, vor allem bei Epoxiden, durchaus eine wichtige Rolle für einen optimalen Verbund aus Dichtungswerkstoff und Muffe darstellt.

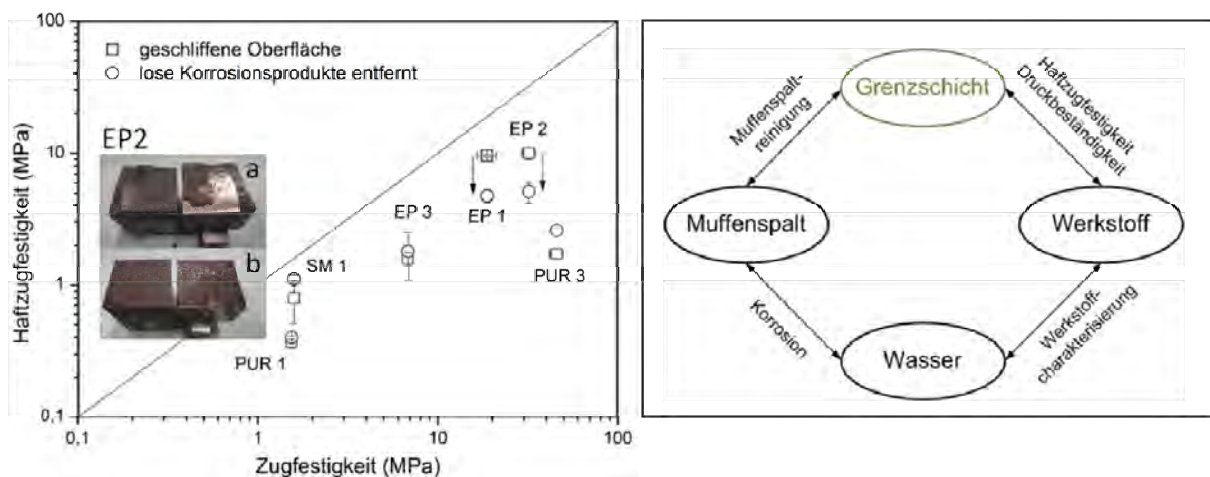


Abbildung 82: links: Korrelation Zugfestigkeit - Haftzugfestigkeit, Oberfläche geschliffen ausgeführt oder lose Korrosionsprodukte entfernt; rechts: erweitertes Konzept zur Muffensanierung um die Grenzschicht und deren Interaktion

Wird die Korrosionsschicht nicht entfernt, kommt es wie zum Beispiel bei EP 2 zu einem Versagen innerhalb der Korrosionsschicht mit dem Resultat einer geringeren Haftzugfestigkeit (siehe Abbildung 82, links). Aufgrund dessen muss das definierte System

zur Muffensanierung um ein Teilsystem, eine sogenannte Grenzschicht zwischen Muffenspalt und Dichtungswerkstoff, erweitert werden (siehe Abbildung 82, rechts).

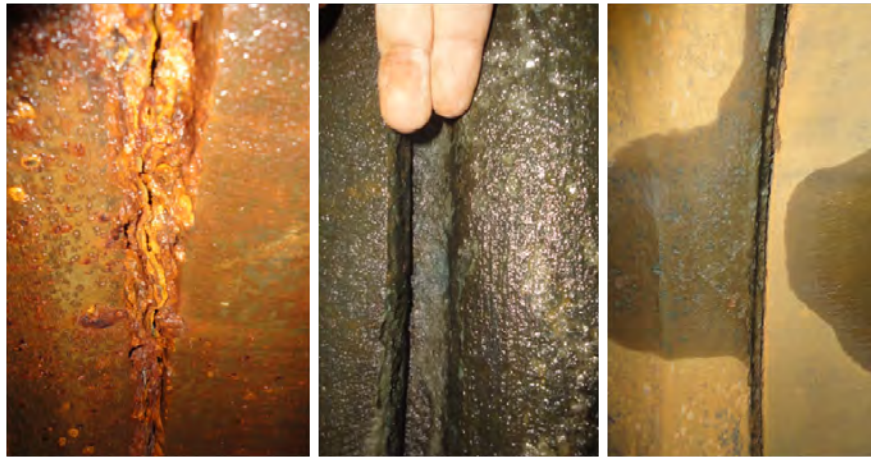


Abbildung 83: Zustand des Rohres in den unterschiedlichen Phasen der Rohrreinigung; vor der Reinigung - kurz nach der Reinigung - nach der Reinigung, im trockenen Zustand mit gebildetem Flugrost

Um diese beschriebene Grenzschicht zu eliminieren und vor allem den Einfluss auf die Haftzugfestigkeit unter realen Bedingungen im Rohr sowie auf die Druckbeständigkeit so gering wie möglich zu halten, ist eine ordentliche Reinigung des Muffenspalt unerlässlich. Eine mittels Höchstdruckwasserstrahl durchgeführte Rohrreinigung (siehe Abbildung 83) zeigt, dass eine vollständige Freilegung des Muffenspalt sowie die Entfernung der Korrosionsschicht möglich sind. Im Anschluss bildet sich Flugrost, der eine zusätzliche Anforderung an den Roboter stellt, da die Möglichkeit bestehen muss, diesen zu entfernen.

Bei der Applikation eines Dichtungswerkstoffes auf Grauguss liegt die Befürchtung nahe, dass die Adhäsion durch Unterwanderung beeinträchtigt wird. Zu diesem Zweck wurden Korrosionsversuche durchgeführt. Diese Untersuchungen sollten das Langzeitverhalten der Haftung bzw. ob das Epoxid durch Korrosion unterwandert wird, klären. Korrosionsproben wurden dafür bei 7 °C, 40 °C, 60 °C in Wasser und bei 60 °C in 3%iger Salzlösung ausgelagert.

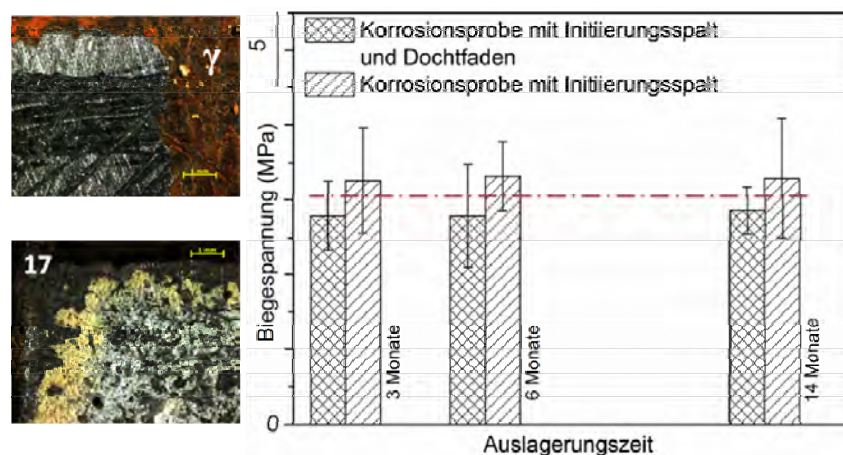


Abbildung 84: Langzeitkorrosionsverhalten; links: Stereomikroskopieaufnahmen, Probe γ - 7 °C in Wasser, Probe 17 - 60 °C in Salzlösung; rechts: Mittelwerte der maximalen Biegespannung beim Brechen der Proben

Die Ergebnisse in Abbildung 84, links zeigen, dass nach 14 Monaten bei 7 °C keinerlei Korrosion in der Grenzfläche bzw. keine Unterwanderung festzustellen ist. Höhere Temperaturen führen zu Veränderungen, wie z.B. Verfärbungen des Epoxides, Epoxidrückstände an der Klebefläche, die im Randbereich jedoch nicht mehr auftreten. Die quantitative Darstellung der zum Brechen notwendigen Biegespannung zeigt, dass weder die Dauer, die Temperatur, das Medium der Auslagerung noch die Probengeometrie einen Einfluss auf die Festigkeit des Werkstoffverbundes haben.

Die Schlussfolgerung aus den dargestellten Ergebnissen ist, dass konventionelle Dichtungswerkstoffe die Kriterien nicht erfüllen, jedoch Epoxid deutliche Vorteile aufweist. Aufgrund der hohen Steifigkeit von Epoxiden ist eine Optimierung des Dichtungswerkstoffes hinsichtlich Flexibilitätserhöhung notwendig. Somit wurde ein im Sanierungsbereich angewendetes Epoxidsystem (DGEBA Harz / angepasster Amin Härter) durch die Zugabe von Zusatzkomponenten modifiziert, um die Flexibilität zu erhöhen. Die Beimengung folgender Zusatzkomponenten war Bestandteil der Untersuchungen:

- EPDM-Gummimehl (Korngröße 63-100 µm)
- reaktives Flüssigpolymer, ATBN (Amin-terminiertes Butadien-Acrylnitril Copolymer)
- Zusatzkomponenten mit epoxidreaktiven-Endgruppen (Glycidyl Ether auf Basis von Rizinusöl und Glycerol Propoxylate Triglycidyl Ether)
- Zusätzlich wurden zwei auf dem Markt befindliche und bereits modifizierte Epoxide der definierten Prüfmethode unterzogen. Nach Bekanntgabe der Anforderungen wurden diese von den Herstellern aus dem Produktportfolio ausgesucht und als „Modellwerkstoff“ zur Verfügung gestellt. Diese Werkstoffsysteme verfügen über keine Zulassungen für den Trinkwasserbereich.

Die Werkstoffformulierungen wurden nach der oben definierten Prüfmethode untersucht. Aus den Ergebnissen der Formulierungen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Modifizierung mit den genannten Zusatzkomponenten führt immer zu einer Verringerung der Glasübergangstemperatur.
- Alle untersuchten Proben zeigen eine Wasseraufnahme und durch die Modifizierung wird die Wasseraufnahme erhöht.
- Die Wasseraufnahme bewirkt eine Änderung der im Zugversuch ermittelten Eigenschaften. Die Zugfestigkeit sinkt und die Bruchdehnung steigt.
- Die Änderung des Elastizitätsmoduls bezogen auf jenen des Ausgangszustandes ist bei den untersuchten Formulierungen beinahe linear abhängig von der Wasseraufnahme (siehe Abbildung 85).

Das oben angeführte Werkstoffverhalten der modifizierten Epoxide korreliert sehr gut mit dem in der Literatur beschriebenen Verhalten. Durch die Kombination von sinkender Zugfestigkeit, verringertem Elastizitätsmodul und Glasübergangstemperatur sowie steigender Bruchdehnung kann von einem Weichmachereffekt ausgegangen werden. Dieser beobachtete Weichmachereffekt ist bei modifizierten Epoxiden stärker ausgeprägt als bei dem Ausgangs-

Epoxidsystem. Somit ändern sich nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern es muss auch eine Änderung des Einsatztemperaturbereiches der Formulierung berücksichtigt werden.

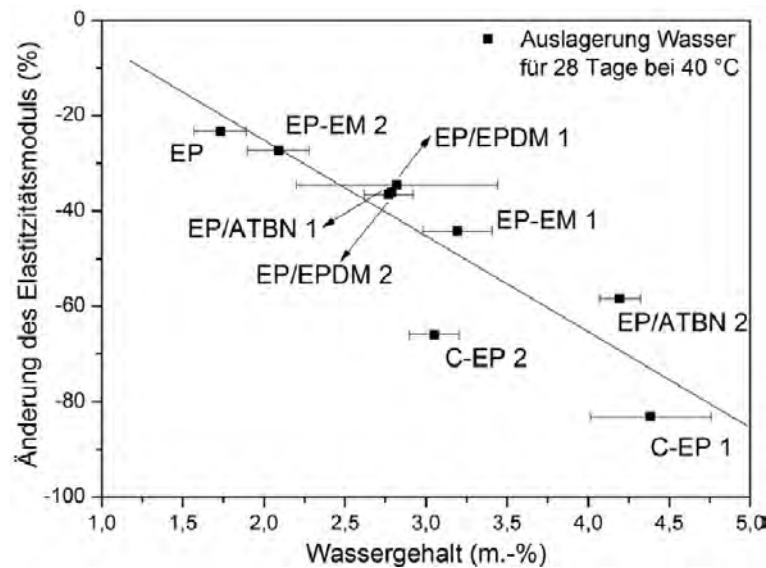


Abbildung 85: Änderung des Elastizitätsmoduls bezogen auf jenen des Ausgangszustandes ist abhängig von der Wasseraufnahme

Die Haftzugversuche sind eine für diesen speziellen Anwendungsfall notwendige Prüfmethode. Denn wie die Ergebnisse zeigen, wird die im Zugversuch ermittelte Festigkeit der Formulierungen im Haftzugversuch nicht erreicht. Diese ist durch die Adhäsion der Formulierung auf Grauguss limitiert und wirkt sich auch auf das Dehnungsverhalten aus. Die 2D-Bildkorrelation zeigt eine ungleichmäßige Dehnungsverteilung im Dichtungswerkstoff. Es kommt zu Spannungserhöhungen an der Grenzfläche zwischen Epoxid und Grauguss (siehe Abbildung 86, links), somit zur Rissinitiation und zum Versagen der Verbindung. Die Korrelation in Abbildung 86, rechts zeigt, dass die im Haftzugversuch ermittelten Dehnungen für die Werkstoffauswahl berücksichtigt werden müssen. Diese Werte sind immer auf einem niedrigeren Niveau als jene aus dem Zugversuch.

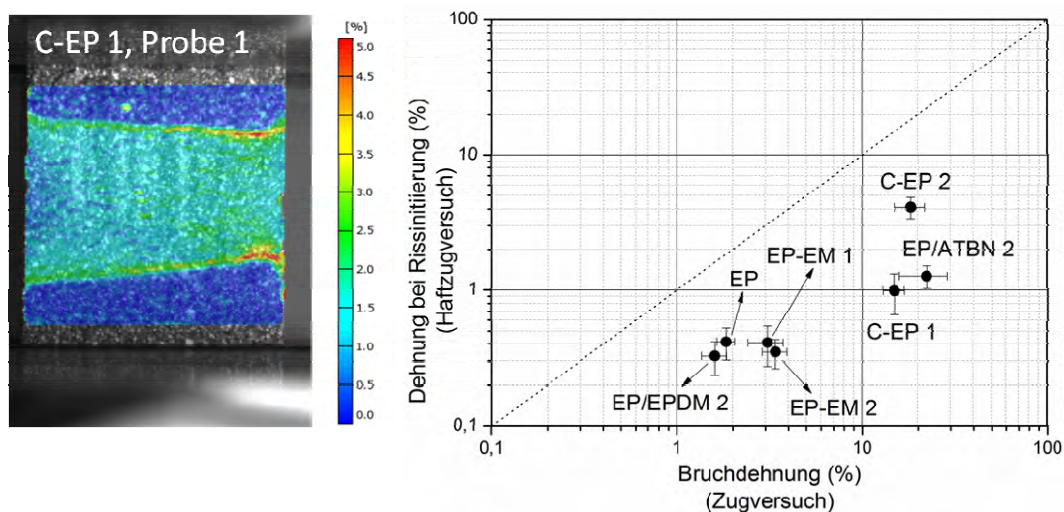


Abbildung 86: links: Dehnungsverhalten aus 2D-Bildkorrelation der Probe C-EP 1; rechts: Korrelation der Dehnung bei Rissinitiation aus dem Haftzugversuch und der Bruchdehnung ermittelt aus dem Zugversuch

Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse jeder Formulierung mit den für diesen Anwendungsfall definierten Anforderungen zeigt, dass aus unterschiedlichen Gründen Formulierungen nicht geeignet sind.

EPDM-Gummimehl mit der Korngröße von 63-100 μm ist eine Möglichkeit der Modifizierung, mit der keine Erhöhung der Flexibilität erreicht wurde. Diese Formulierungen (EP/EPDM 1 und EP/EPDM 2) sind ungeeignet.

Zusatzkomponenten mit epoxidreaktiven-Endgruppen zeigen, dass diese Formulierungen im Verbund mit Grauguss nur sehr geringe Dehnungen aufweisen. Für den Anwendungsfall sind die Formulierungen EP-EM 1 und EP-EM 2 nicht geeignet.

Die **modifizierten Epoxidsysteme C-EP 1 und C-EP 2** sind unterschiedlich zu bewerten. Die Nachteile von **C-EP 1** sind die Lage des T_g und die starke Quellung in Wasser, jedoch die gute Performanz im Haftzugversuch erlaubt eine weitere Berücksichtigung. **C-EP 2** weist eine zu geringe Festigkeit und Steifigkeit auf, welche zusätzlich durch die Wasseraufnahme reduziert wird. Dieser Werkstoff wird ausgeschlossen.

Reaktives Flüssigpolymer und die damit hergestellten Blends bilden ein Zwei-Phasensystem. Die nahezu konstanten mechanischen Eigenschaften im Anwendungstemperaturbereich sind ein Vorteil. Die Haftzugfestigkeit ist auf einem hohen Niveau, ebenso liegt die Dehnung bei Rissinitiierung im Vergleich zu den anderen Formulierungen höher.

Ein dominantes „Knock-out“ Kriterium für einen Dichtungswerkstoff im Trinkwasserrohr ist die Druckbeständigkeit. Ein fertig modifiziertes Epoxidsystem und eine Formulierung mit reaktivem Flüssigpolymer, die nach der vorangegangenen Werkstoffcharakterisierung die übrigen Anforderungen nahezu erfüllen, wurden einer Druckprüfung bis zu 10 bar unterzogen. Mit 3D-Bildkorrelation konnte zusätzlich noch die Belastung des Dichtungswerkstoffes hinsichtlich Verformung unter Druck untersucht werden.

- Das bereits fertig modifizierte Epoxid (C-EP 1) zeigt im Bereich nahe der Klebefläche eine erhöhte Hauptformänderung von 0,25 %.
- Die Formulierung mit reaktivem Flüssigpolymer (EP/ATBN 2) zeigt keinen Unterschied in der Verformungsverteilung zwischen Prüfplatte und Dichtungswerkstoff.
- Beide Dichtungswerkstoffe, sowohl das fertig modifizierte Epoxid als auch die Formulierung mit reaktivem Flüssigpolymer, erfüllen die Anforderung der Druckbeständigkeit von bis zu 10 bar.

Auf Basis der Untersuchungen von kommerziellen Dichtungswerkstoffen konnte eine Prüfprozedur erstellt werden, um sämtliche Anforderungen an den Dichtungswerkstoff zu

überprüfen. Die Anwendung dieser Prüfprozedur auf die modifizierten Epoxide hat gezeigt, dass zwei Werkstoffe (C-EP 1 und EP/ATBN 2) den Anforderungen genügen.

Für den Einsatz des Dichtungswerkstoffes zur Muffensanierung sind noch weitere anwendungsorientierte Optimierungen notwendig. Die Viskosität des Dichtungswerkstoffes wurde bereits für die Probenfertigung erhöht. Nun muss noch eine genaue Einstellung der Viskosität für die Verarbeitung durch den Roboter durchgeführt werden. Zusätzlich zu dem bestandenen Laborversuch der Druckprüfung wird ein Drucktest auf einer Test-Rohrstrecke von Wiener Wasser durchgeführt. Die Applikation der Dichtungsmasse mit dem Roboter ist in umfangreichen Tests in einer Rohrstrecke von Wiener Wasser zu prüfen. Eine Untersuchung der Trinkwassertauglichkeit nach der entsprechenden Norm soll schlussendlich von einem Hersteller durchgeführt werden. An einer Erweiterung des Anwendungsfeldes des Dichtungswerkstoffes von Graugussrohren auf Faserzementrohre wird ebenfalls geforscht.

6 Verzeichnisse

6.1 Abbildungen

Abbildung 1: Trinkwasserversorgung der Stadt Wien, (Quelle: http://www.wien.gv.at/wienwasser/versorgung/weg/ , Zugriff: 25.03.2013)	3
Abbildung 2: Stemmuffe, a: Bleiring, b: Hanfstrick.....	4
Abbildung 3: Graphitausscheidungen; links: Spannungslinien in Abhängigkeit der Graphitausbildung; rechts: Gefügebild von Gusseisen mit Lamellengraphit und Kugelgraphit	5
Abbildung 4: Zug- und Druckabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Grauguss mit Lamellengraphit	6
Abbildung 5: Einfluss des Rohrdurchmessers auf Rohrbrüche und Widerstandsmoment	6
Abbildung 6: Erscheinungsformen von Brüchen bei Graugussrohren; oben: Umfangsbruch; Mitte: Korrosionserscheinungen mit Blow-out und Lochkorrosion (sind beispielsweise auf einem Rohr gemeinsam dargestellt – treten nicht gezwungenermaßen gemeinsam auf); unten links: Spiralbruch; unten rechts: Muffen- oder Axialbruch (Abbildung abgeändert aus: J.M. Makar, R. Desnoyers, S.E. McDonald, Failure modes and mechanisms in gray cast iron pipe, in: Int. Conf. on Underground Infrastructure Research, Ontario, 2001, pp. 1-10).....	9
Abbildung 7: Roboterverfahren; links: Verpressen von Dichtmasse in einen Spalt; rechts: Roboter mit Fräswerkzeug, (Quelle: http://www.swietelsky-faber.de/leistungsspektrum/roboter-sanierung/?lang=de , Zugriff: 19.03.2013)	11
Abbildung 8: Sanierung mit Innenmanschette; links: AMEX®-10 MONO-Manschette, (Quelle: http://www.amex-10.de/de/mono_manschette.html , Zugriff: 19.03.2013); rechts: Quick Lock Manschette (Quelle: http://www.sksgmbh.de/kanalsanierung_quick-lock_edelstahlmanschetten.html , Zugriff: 25.03.2013)	12
Abbildung 9: Einbau von einem Kurzliner (Quelle: http://www.angerlehner.at/leistungen/leitungssanierung/punktueller_sanierung/ , Zugriff: 20.03.2013).....	12
Abbildung 10: r.tec® Schlauchlining – Verfahren von der Rabmer Bau Gruppe (Quelle: http://www.rabmer.com/deutsch/rabmer_holding/rabmer_rohrsaniefungtiefbau/no_dig_rohrsaniefung/druckleitungen/rtec_schlauchliner.html , Zugriff: 21.03.2013).....	13
Abbildung 11: Verformtes Rohr, r.tec® Close Fit – Verfahren von der Rabmer Bau Gruppe (Quelle: http://www.rabmer.com/deutsch/rabmer_holding/rabmer_rohrsaniefungtiefbau/no_dig_rohrsaniefung/freispielleitungen/rtec_close_fit_rohr.html , Zugriff: 20.03.2013).....	13
Abbildung 12: Zementmörtelauskleidung; links: Reinigung mittels Kratzer; rechts: Anschleudern der Zement-mörtelauskleidung (Quelle: http://www.brochier.cz/de/16553/zementm%C3%B6rtelauskleidung/ , Zugriff: 20.03.2013)	14

Abbildung 13: EVOLOC-Wickelrohr; links: Doppelschlossprofil mit Kaltschweißmittel; Mitte: Rohrwickelmaschine im Schacht; rechts: Aufbau in Schnittdarstellung – Altrohr, Wickelrohr und Ringspалtdämmung (Quelle: http://www.unitracc.de/aktuelles/artikel/swp-evoloc-2013-das-wickelrohr-mit-eigenstatik , Zugriff: 20.03.2013)	14
Abbildung 14: Reaktionsprinzip eines zweikomponentigen Polyurethans	16
Abbildung 15: Kettenverlängerung von Polyurethan Präpolymeren durch Reaktion mit Wasser	16
Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau eines Silan-modifizierten Polymers	17
Abbildung 17: Schematischer Reaktionsablauf von kalthärtendem Epoxid; oben: Reaktion eines Epoxidharzes mit einem Amin; unten: Fortsetzung der Addition, weitere Epoxidgruppen am Stickstoffatom	17
Abbildung 18: links: Strukturformel des Glycidyl Ether auf Basis von Rizinusöl mit epoxidreaktiven- Endgruppen (trifunktionell) ERISYS™ GE-35; rechts: Strukturformel des Glycerol Propoxylate Triglycidyl Ether mit epoxidreaktiven-Endgruppen (trifunktionell), ERISYS™ GE-36.....	19
Abbildung 19: Butadien-Acrylnitril Kautschuk mit funktionellen Endgruppen an beiden Seiten der Polymerkette	20
Abbildung 20: Haftzugversuch; links: schematische Darstellung der Haftzugprobe; rechts: Darstellung der Oberflächenpräparation, A: lose Korrosionsprodukte entfernt, B: geschliffene Oberfläche	23
Abbildung 21: Druckkammer; links: Konstruktionszeichnung der Kammer; rechts: Prüfaufbau bestehend aus Druckkammer und Kamerasystem.....	23
Abbildung 22: 3D-Bildkorrelation mit ARAMIS (GOM); links: schematische Darstellung der Prüfanordnung des Kamerasystems; rechts: Testflansch mit 30 mm breitem Prüfspalt und bereits aufgebrachtem Punktmuster	24
Abbildung 23: Aufbau der Proben für den Korrosionsversuch; links: schematische Darstellung; Mitte: Probe mit Initiierungsspalt; rechts: Probe mit Initiierungsspalt und Dochtfaden	26
Abbildung 24: Korrosionsuntersuchungen; links: Versuchsaufbau von Korrosionsversuchen; rechts: 3-Punkt Biegevorrichtung an der Zugprüfmaschine (ZWICK, Z050) zum Brechen der Korrosionsproben	26
Abbildung 25: Das System Muffensanierung, die Einteilung in Untersysteme und deren Interaktion	28
Abbildung 26: Zugfestigkeit: von Proben des Ausgangszustandes und von Proben, die für 28 Tage in Wasser bei 40 °C ausgelagert wurden (ein Zugversuch nach DIN 527 konnte am Dichtungswerkstoff PUR 2 nicht durchgeführt werden; elastische Probekörper konnten nicht eingespannt werden); Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 41 angegeben	29

Abbildung 27: Glasübergangstemperatur: ermittelt aus den Daten der DMA am Maximum des Verlustmoduls LM, am Maximum des Verlustfaktors $\tan\delta$ und der DSC; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 42 angegeben	30
Abbildung 28: Glasübergangstemperatur: ermittelt aus den Daten der dynamisch-mechanischen Analyse und bestimmt am Maximum des Verlustmoduls LM; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 43 angegeben	31
Abbildung 29: Bestimmung des Elastizitätsmoduls: Vergleich der Methoden (dynamisch-mechanische Analyse, Zugversuch, 3-Punkt Biegeversuch) bei 23 °C; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 44 angegeben	31
Abbildung 30: Elastizitätsmodul: gemessen mit dynamisch-mechanischer Analyse, Ausgangszustand (AZ) und nach 28 Tagen bei 40 °C in Wasser ausgelagert (AG), ausgewertet bei 23 °C; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 45 angegeben	32
Abbildung 31: Elastizitätsmodul: gemessen mit dynamisch-mechanischer Analyse, Ausgangszustand (AZ) und nach 28 Tagen bei 40 °C in Wasser ausgelagert (AG), ausgewertet bei 12 °C; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 46 angegeben	32
Abbildung 32: Wassergehalt: ermittelt mit der thermogravimetrischen Analyse, TGA; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 47 angegeben	33
Abbildung 33: Langzeitauslagerungsversuche - Wassergehalt: 4, 9 und 17 Monate bei 40 °C in einem Medium mit einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspänen; Zahlenwerte zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 48 angegeben	34
Abbildung 34: TGA-Kurven der Dichtungswerkstoffe EP 1, EP 2 und EP 3 des Ausgangszustandes sowie nach Langzeitauslagerungen bei 40 °C für 4, 9 und 17 Monate in einem Medium mit einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspänen.....	34
Abbildung 35: TGA-Kurven der Dichtungswerkstoffe PUR 1, PUR 2, PUR 3 und SM 1 des Ausgangszustandes sowie nach Langzeitauslagerungen bei 40 °C für 4, 9 und 17 Monate in einem Medium mit einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspänen.....	35
Abbildung 36: Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenpräparation, eine Testserie mit geschliffen ausgeführter Klebefläche, für die zweite Testserie wurden nur die losen Korrosionsprodukte entfernt; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 49 angegeben	37
Abbildung 37: Verschiebung der Backen in der Klemme der Zugprüfmaschine	45
Abbildung 38: Haftzugversuch; links: Dehnungsverlauf im Haftzugversuch aufgenommen über die Traverse; rechts: mittels 2D-Bildkorrelation ermittelte Hauptformänderung.....	45
Abbildung 39: Spannungs-Dehnungskurve einer Haftzugprobe, SM 1 auf geschliffener Oberfläche mit Zuordnung der gezeigten Stufenbilder zu den jeweiligen Spannungs-Dehnungswerten.....	46
Abbildung 40: Bestimmung der Dehnung entlang von drei durch die Prüffläche gelegten Schnitten.....	47

Abbildung 41: Korrelation der Bruchdehnungswerte aus Zugversuch und Haftzugversuch; oben: Klebefläche geschliffen ausgeführt; unten: die losen Korrosionsprodukte auf der Klebefläche entfernt; Daten zu den Diagrammen sind im Anhang in Tabelle 50 angegeben .	48
Abbildung 42: Das System Muffensanierung, Erweiterung der Untersysteme um die Grenzschicht und deren Interaktion	50
Abbildung 43: Druckbeständigkeit: EP 2, Spaltbreite 10 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; oben: Druckscheibe 1; unten: Druckscheibe 2; links: Darstellung der Verschiebung in einem Schnitt; rechts: 3D-Verformungsbild der Verschiebung senkrecht zur Druckscheibe	51
Abbildung 44: Druckbeständigkeit: EP 2, Spaltbreite 30 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; oben: Druckscheibe 1; unten: Druckscheibe 2; links: Darstellung der Verschiebung in einem Schnitt; rechts: 3D-Verformungsbild der Verschiebung senkrecht zur Druckscheibe als Projektion auf das Projektbild.....	52
Abbildung 45: Druckbeständigkeit: PUR 1, Spaltbreite 10 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 2 bar; oben: Druckscheibe 1; unten: Druckscheibe 2; links: Darstellung der Verschiebung in einem Schnitt; rechts: 3D-Verformungsbild der Verschiebung senkrecht zur Druckscheibe	53
Abbildung 46: Druckbeständigkeit: PUR 1, Spaltbreite 30 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 2 bar, Druckscheibe 1, Darstellung der Hauptformänderung.....	53
Abbildung 47: Druckbeständigkeit: PUR 1, Spaltbreite 30 mm, dargestellt bei einem Prüfdruck von 2 bar; oben: Druckscheibe 1; unten: Druckscheibe 2; links: Darstellung der Verschiebung in einem Schnitt; rechts: 3D-Verformungsbild der Verschiebung senkrecht zur Druckscheibe	54
Abbildung 48: Versagensfortschritt des Dichtungswerkstoffes PUR 1 im Laborversuch zur Druckbeständigkeit, Druckscheibe 1, 30 mm Spaltbreite, gezeigt bei 3, 5 und 7 bar.....	54
Abbildung 49: Rohrreinigungsversuche; links: Einheben der Maschine in die ca. 4 m tiefe Baugrube; rechts: Reinigungsmaschine im Rohr	55
Abbildung 50: Rohrreinigungsversuche – Dokumentation des Zustandes vor und nach der Rohrreinigung.....	55
Abbildung 51: Muffenspalt vor der Rohrreinigung; Muffenspalt ist vollständig mit Korrosionsprodukten gefüllt und teilweise nicht mehr als dieser zu erkennen.....	56
Abbildung 52: Muffenspalt nach der Rohrreinigung; der Muffenspalt ist vollkommen von den Korrosionsprodukten freigelegt	56
Abbildung 53: Ansammlung von Wasser und Schmutz nach der Rohrreinigung an der Rohrsohle	57
Abbildung 54: Bildung von Flugrost nach der Rohrreinigung	57
Abbildung 55: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 32, Darstellung des Überganges Initiierungsspalt /Klebefläche	59

Abbildung 56: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 12, Darst. des Überganges Initiierungsspalt /Klebefläche	60
Abbildung 57: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 33; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme	62
Abbildung 58: Stereomikroskopieaufnahme der Probe S; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme	64
Abbildung 59: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 3; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme	65
Abbildung 60: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 14; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme	66
Abbildung 61: Stereomikroskopieaufnahme der Probe γ ; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme	66
Abbildung 62: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 25; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme	68
Abbildung 63: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 8; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme	69
Abbildung 64: Stereomikroskopieaufnahme der Probe 17; rechts: Detailaufnahme des markierten Bereiches der linken Aufnahme	70
Abbildung 65: Darstellung der maximalen Biegespannung beim Brechen der Korrosionsproben mit einer 3-Punkt Biegeanordnung nach 3, 6, 14 Monaten Auslagerungszeit; oben: Proben mit Initiierungsspalt; unten: Proben mit Initiierungsspalt und Dochtfaden; Daten lt. Anhang, Tabelle 51	72
Abbildung 66: Mittelwerte der maximalen Biegespannung der unterschiedlichen Auslagerungsarten (ermittelt durch Brechen der Korrosionsproben mit einer 3-Punkt Biegeanordnung) nach 3, 6 und 14 Monaten; Daten lt. Anhang, Tabelle 52	73
Abbildung 67: Zusatzkomponenten zur Epoxid Modifizierung; links: die Zusatzkomponenten mit den epoxidreaktiven-Endgruppen (ERISYS™ GE-35 und ERISYS™ GE-36); Mitte: reaktives Flüssigpolymer (ATBN); rechts: EPDM-Gummimehl mit einer Korngröße von 63- 100 μm	74
Abbildung 68: Silikonformen zur Probenfertigung (links: DMA-Proben; rechts: Zugproben der Form 5A)	75
Abbildung 69: Elastizitätsmodul ermittelt mittels dynamisch-mechanischer Analyse; charakteristische Modul-Verläufe (Speichermodul - E') von modifizierten Epoxiden.	76
Abbildung 70: Änderung der Glasübergangstemperatur T_g aufgrund von Auslagerung des modifizierten Epoxides in Wasser für 28 Tage bei 40 °C, ermittelt mittels dynamisch- mechanischer Analyse; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 53 angegeben	77

Abbildung 71: Elastizitätsmodul ermittelt durch dynamisch-mechanische Analyse an Proben des Ausgangszustandes (vollständig ausgehärtete Proben) und an Proben ausgelagert in Wasser bei 40 °C für 28 Tage; Speichermodul E' ausgewertet bei 23 °C; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 55 angegeben	78
Abbildung 72: Zugfestigkeit ermittelt durch Zugversuche (bei 23 °C) an Proben des Ausgangszustandes (vollständig ausgehärtete Proben) und an Proben ausgelagert in Wasser bei 40 °C für 28 Tage; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 56 angegeben.....	79
Abbildung 73: Bruchdehnung ermittelt durch Zugversuche (bei 23 °C) an Proben des Ausgangszustandes (vollständig ausgehärtete Proben) und an Proben ausgelagert in Wasser bei 40 °C für 28 Tage; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 57 angegeben.....	79
Abbildung 74: Wassergehalt der modifizierten Epoxide nach 28 Tagen bei 40 °C, untersucht mittels thermogravimetrischer Analyse; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 58 angegeben.....	80
Abbildung 75: Haftzugfestigkeit der modifizierten Epoxide; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 59 angegeben	81
Abbildung 76: Korrelation der Zugfestigkeitswerte aus Zugversuch und Haftzugversuch, Oberfläche der Haftzugproben geschliffen ausgeführt; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 60 angegeben.....	86
Abbildung 77: Korrelation der Bruchdehnungswerte aus Zugversuch und Dehnung bei Rissinitiiierung aus dem Haftzugversuch, Oberfläche der Haftzugproben geschliffen ausgeführt; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 61 angegeben.....	91
Abbildung 78: Druckbeständigkeit: EP/ATBN 2, Spaltbreite 10 mm dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; links: Darstellung der Hauptformänderung in einem Schnitt; rechts: Verteilung der Hauptformänderung	91
Abbildung 79: Druckbeständigkeit: EP/ATBN 2, Spaltbreite 30 mm dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; links: Darstellung der Hauptformänderung in einem Schnitt; rechts: Verteilung der Hauptformänderung	92
Abbildung 80: Druckbeständigkeit: C-EP 1, Spaltbreite 10 mm dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; links: Darstellung der Hauptformänderung in einem Schnitt; rechts: Verteilung der Hauptformänderung	92
Abbildung 81: Druckbeständigkeit: C-EP 1, Spaltbreite 30 mm dargestellt bei einem Prüfdruck von 10 bar; links: Darstellung der Hauptformänderung in einem Schnitt; rechts: Verteilung der Hauptformänderung	93
Abbildung 82: links: Korrelation Zugfestigkeit - Haftzugfestigkeit, Oberfläche geschliffen ausgeführt oder lose Korrosionsprodukte entfernt; rechts: erweitertes Konzept zur Muffensanierung um die Grenzschicht und deren Interaktion.....	98
Abbildung 83: Zustand des Rohres in den unterschiedlichen Phasen der Rohrreinigung; vor der Reinigung - kurz nach der Reinigung - nach der Reinigung, im trockenen Zustand mit gebildetem Flugrost.....	99

Abbildung 84: Langzeitkorrosionsverhalten; links: Stereomikroskopieaufnahmen, Probe γ - 7 °C in Wasser, Probe 17 - 60 °C in Salzlösung; rechts: Mittelwerte der maximalen Biegespannung beim Brechen der Proben	99
Abbildung 85: Änderung des Elastizitätsmoduls bezogen auf jenen des Ausgangszustandes ist abhängig von der Wasseraufnahme.....	101
Abbildung 86: links: Dehnungsverhalten aus 2D-Bildkorrelation der Probe C-EP 1; rechts: Korrelation der Dehnung bei Rissinitiierung aus dem Haftzugversuch und der Bruchdehnung ermittelt aus dem Zugversuch	101
Abbildung 87: Elastizitätsmodul ermittelt durch dynamisch-mechanische Analyse an Proben des Ausgangs-zustandes (vollständig ausgehärtete Proben) und an Proben ausgelagert in Wasser bei 40 °C für 28 Tage, Speichermodul E' ausgewertet bei 12 °C; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 54 angegeben	128

6.2 Tabellen

Tabelle 1: Methoden zur Werkstoffcharakterisierung	2
Tabelle 2: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt	38
Tabelle 3: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt	39
Tabelle 4: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP 3: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt	40
Tabelle 5: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes PUR 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt	41
Tabelle 6: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes PUR 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt	42
Tabelle 7: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes PUR 3: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt	43
Tabelle 8: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes SM 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche und alle losen Korrosionsprodukte entfernt	44
Tabelle 9: Dehnung (Hauptformänderung) der Haftzugproben, geschliffene Oberfläche und lose Korrosions-produkte entfernt, * es war keine Auswertung der Dehnung mit 2D-Bildkorrelation möglich	47
Tabelle 10: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 3 Monate bei 7 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 3-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe	58
Tabelle 11: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 3 Monate bei 40 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 3-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe	59
Tabelle 12: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 3 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 3-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe	60

Tabelle 13: Korrosionsproben: Lagerung in 3%iger Salzlösung für 3 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 3-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe.....	61
Tabelle 14: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 6 Monate bei 7 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 6-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe, * keine Bilder vorhanden	62
Tabelle 15: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 6 Monate bei 40 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 6-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe	63
Tabelle 16: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 6 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 6-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe	64
Tabelle 17: Korrosionsproben: Lagerung in 3%iger Salzlösung für 6 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 6-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe.....	65
Tabelle 18: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 14 Monate bei 7 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 14-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe	67
Tabelle 19: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 14 Monate bei 40 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 14-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe	68
Tabelle 20: Korrosionsproben: Lagerung in Wasser für 14 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 14-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe	69
Tabelle 21: Korrosionsproben: Lagerung in 3%iger Salzlösung für 14 Monate bei 60 °C; Reihe oben: Ausgangszustand der Oberfläche vor Auftrag der Dichtmasse; Mitte: Zustand der Probe nach 14-monatiger Auslagerung; unten: Oberfläche des Graugussgrundkörpers nach dem Brechen der Korrosionsprobe.....	70
Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrosionsversuche, a: 7 °C in Wasser, b: 40 °C in Wasser, c: 60 °C in Wasser, d: 60 °C in 3%iger Salzlösung; ✓ ... Ereignis ist eingetreten, × ... Ereignis ist nicht eingetreten	71
Tabelle 23: Akronyme und Formulierung der modifizierten Epoxide.....	75

Tabelle 24: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche	82
Tabelle 25: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP/EPDM 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche.....	82
Tabelle 26: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP/ATBN 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche.....	83
Tabelle 27: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP-EM 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche.....	83
Tabelle 28: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes EP-EM 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche.....	84
Tabelle 29: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes C-EP 1: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche.....	84
Tabelle 30: Haftzugversuche des Dichtungswerkstoffes C-EP 2: Bezeichnung der Bruchbilder lt. EN ISO 10365, Probegrundkörper mit geschliffener Oberfläche.....	85
Tabelle 31: Hauptformänderung bei Rissinitiierung des Epoxides EP	87
Tabelle 32: Hauptformänderung bei Rissinitiierung des modifizierten Epoxides EP/EPDM 2	87
Tabelle 33: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides EP/ATBN 2	88
Tabelle 34: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides EP/EM 1 ...	88
Tabelle 35: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides EP/EM 2 ...	89
Tabelle 36: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides C-EP 1	89
Tabelle 37: Hauptformänderung vor Rissinitiierung des modifizierten Epoxides C-EP 2	90
Tabelle 38: Dynamisch-mechanische Analyse (DMA): Angabe des Prüftemperaturbereiches und des Prüfmodus	120
Tabelle 39: Prüftemperaturbereich für die Bestimmung der Glasübergangstemperatur mittels dynamischer Differenz Thermoanalyse (DSC)	120
Tabelle 40: Füllstoffgehalt angegeben als Prozent-Restmasse der TGA, ausgewertet bei 600 °C.....	120
Tabelle 41: Ergebnisse aus dem Zugversuch: Zugfestigkeit (MPa), Ausgangszustand und nach Auslagerung in Wasser für 28 Tage bei 40 °C in Wasser.....	121
Tabelle 42: Ergebnisse der Glasübergangstemperatur ausgewertet aus den Daten der DSC ($T_{g(DSC)}$) und der DMA beim Maximum des Verlustmoduls LM ($T_{g(DMA-LM)}$) und des Verlustfaktors $\tan\delta$ ($T_{g(DMA-\tan\delta)}$)	121
Tabelle 43: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Glasübergangstemperatur; ausgewertet beim Maximum des Verlustmoduls LM ($T_{g(DMA_LM)}$), Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage für 40 °C in Wasser	122

Tabelle 44: Ergebnisse des Elastizitätsmoduls ausgewertet aus den Daten der dynamisch-mechanischen Analyse $E_{(DMA)}$, des Zugversuches $E_{(Zugversuch)}$ und der 3-Punkt Biegeprüfung $E_{(3\text{-Punkt Biegung})}$	122
Tabelle 45: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Elastizitätsmodul $E_{(DMA)}$, ausgewertet bei 23 °C, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser	123
Tabelle 46: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Elastizitätsmodul $E_{(DMA)}$, ausgewertet bei 12 °C, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser	123
Tabelle 47: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse: Wassergehalt, ausgelagert bei 7 °C und 40 °C für 28 Tage in Wasser.....	124
Tabelle 48: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse: Wassergehalt nach Langzeitauslagerung in einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspänen bei 40 °C für 4, 9, und 17 Monate.....	124
Tabelle 49: Ergebnisse der Haftzugversuche: Haftzugfestigkeit, Oberfläche geschliffen ausgeführt oder alle losen Korrosionsprodukte entfernt	125
Tabelle 50: Ergebnisse aus Zugversuch und Haftzugversuch: Dehnungswerte; Werte entsprechen der Bruchdehnung bei dem Zugversuch und der Dehnung bei Rissinitiierung aus dem Haftzugversuch.....	125
Tabelle 51: maximale Biegespannung der Korrosionsproben mit Initiierungsspalt sowie Proben mit Initiierungsspalt und Dochtfaden.....	126
Tabelle 52: durchschnittliche maximale Biegespannung der Korrosionsproben mit Initiierungsspalt sowie Proben mit Initiierungsspalt und Dochtfaden	126
Tabelle 53: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Glasübergangstemperatur (°C) der modifizierten Epoxide, ausgewertet beim Maximum des Verlustmoduls $LM - E''$, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser	127
Tabelle 54: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Elastizitätsmodul (MPa) der modifizierten Epoxide, Speichermodul E' bei 12 °C ausgewertet, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser	127
Tabelle 55: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Elastizitätsmodul (MPa) der modifizierten Epoxide, Speichermodul E' bei 23 °C ausgewertet, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser	128
Tabelle 56: Ergebnisse des Zugversuches: Zugfestigkeit (MPa), Ausgangszustand und nach Auslagerung in Wasser für 28 Tage bei 40 °C.....	129
Tabelle 57: Ergebnisse des Zugversuches: Bruchdehnung (%), Ausgangszustand und nach Auslagerung in Wasser für 28 Tage bei 40 °C.....	129
Tabelle 58: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse: Wassergehalt (%-m), ausgelagert bei 40 °C für 28 Tage in Wasser	130
Tabelle 59: Ergebnisse der Haftzugversuche: Haftzugfestigkeit (MPa), Oberfläche geschliffen ausgeführt	130

Tabelle 60: Ergebnisse aus Zugversuch und Haftzugversuch: Spannungswerte (MPa), Werte entsprechen der Zugfestigkeit bei dem Zugversuch und der Haftzugfestigkeit aus dem Haftzugversuch.....	131
Tabelle 61: Ergebnisse aus Zugversuch und Haftzugversuch: Dehnungswerte (%), Werte entsprechen der Bruchdehnung aus dem Zugversuch und der Dehnung bei Rissinitiierung aus dem Haftzugversuch.....	131

6.3 Referenzen

- [1] Lüftl S, Archodoulaki V-M, Kuschig G, Werderitsch M. Silane modified polyether sealant failure in drinking water pipes. In: MoDeSt2010. Athen, Griechenland: 2010. p. 2.
- [2] Schoberleitner C, Archodoulaki V-M, Koch T *et al.* Development of a sealing material and robot for automatic socket rehabilitation of grey cast iron pipes in drinking water supply systems. *Water Science & Technology: Water Supply* 2013; 13:924-931.
- [3] Schoberleitner C, Archodoulaki V-M, Koch T *et al.* Evaluation of a polymer based sealing material for socket rehabilitation. In: *Polymeric Materials*. Germany, Halle: 2012. p. 7.
- [4] Schoberleitner C, Archodoulaki V-M, Koch T *et al.* Developing a sealing material: Effect of epoxy modification on the specific physical and mechanical properties. In: *5th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials*. Kos, Griechenland: 2013. p. 12.
- [5] Kommission der Europäischen Union, Antworten auf die Herausforderung von Wasserknappheit und Dürre in der Europäischen Union. In: *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat*, KOM (2007) 414. Brüssel: 2007.
- [6] Werderitsch M. Personal Communication: 17.10.2012.
- [7] Kottmann A. *Rohre und Rohrwerkstoffe in der Gas- und Wasserversorgung*. Essen, Germany: Vulkan-Verlag; 1997.
- [8] Bargel HJ, Hilbrans H, Krüger O, Schulze G. *Werkstoffkunde: mit 85 Tabellen*. Springer; 2005.
- [9] Mikrostruktur von Gusseisen - Teil1: Graphitklassifizierung durch visuelle Auswertung (ISO 945-1:2008 + Cor. 1:2010); Deutsche Fassung EN ISO 945-1:2008 + AC:2010.
- [10] Gießereiregeln - Gusseisen mit Lamellengraphit (DIN EN 1561:2012); Deutsche Fassung EN 1561:2011.
- [11] Fachgemeinschaft Guss-Rohrsysteme (FGR) e.V. *Guss-Rohrsysteme - Rohre, Formstücke und Armaturen aus duktilem Gusseisen*. Griesheim: 2010.
- [12] Weißbach W, Dahms M. *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Vieweg & Teubner Verlag; 2012.
- [13] Makar JM, Rajani B. Gray cast-iron water pipe metallurgy. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2000; 12:245-253.
- [14] Kettler AJ, Goulter IC. Analysis of pipe breakage in urban water distribution networks. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1985; 12:286-293.
- [15] Pelletier G, Milhot A, Villeneuve JP. Modeling Water Pipe Breaks - Three Case Studies. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2003; 129:115-123.
- [16] Morris RE. Principal Causes and Remedies of Water Main Breaks. *American Water Works Association* 1967; 59:782-798.
- [17] Mutschmann J, Stimmelmayer F. *Taschenbuch der Wasserversorgung*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007.
- [18] Makar JM, Desnoyers R, McDonald SE. Failure Modes and Mechanisms in Gray Cast Iron Pipes. In: *Int. Conf. on Underground Infrastructure Research*. Ontario: 2001. pp. 1-10.
- [19] Rajani B, Zhan C, Kuraoka S. Pipe-soil interaction analysis of jointed water mains. *Canadian Geotechnical Journal* 1996; 33:393-404.

-
- [20] Gedge G. Corrosion of Cast Iron in Potable Water Service. In: Proceedings of Institute of Materials Conference London, United Kingdom: 1992. pp. 18-28.
- [21] McNeil LS, Edwards M. Iron pipe corrosion in distribution systems. Journal / American Water Works Association 2001; 93:88-100.
- [22] Institut für Korrosion Dresden. Vorlesungen über Korrosion und Korrosionsschutz von Werkstoffen, Teil1: Korrosion. Wuppertal: TAW-Verlag; 1996.
- [23] Fitzgerald III JH. Corrosion as a Primary Cause of Cast-Iron Main Breaks. Journal / American Water Works Association 1968; 60:882-897.
- [24] Habibian A. Effect of temperature changes on water-main breaks. Journal of Transportation Engineering 1994; 120:312-321.
- [25] Richter HW. Instandsetzung von Rohrleitungen 1: Rehabilitation von Druckrohrleitungen. Essen: Vulkan-Verlag GmbH; 2004.
- [26] Wiener Wasserwerke, Magistratabteilung 31, Einfluss des Verkehrs auf die Gebrechenshäufigkeit von Graugussrohren. In: GZ 541/09. Wien, Österreich: nast consulting Ziviltechniker GmbH für Verkehr, Umwelt und Infrastruktur; 2009.
- [27] Makar JM. A preliminary analysis of failures in grey cast iron water pipes. Engineering Failure Analysis 2000; 7:43-53.
- [28] Rajani B, Kleiner Y. Fatigue failure of large-diameter cast iron mains. In: 2012. pp. 1146-1159.
- [29] Kitzberger J. das ÖGL Regelwerk. In: ÖGL Symposium Grabenlos 2012. Kitzbühel: 2012. pp. 57-72.
- [30] ÖVAW-Regelblatt 28.
- [31] Richter HW. Instandsetzung von Rohrleitungen 2: Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen. Essen: Vulkan-Verlag GmbH; 2006.
- [32] Jodl HG, Hohenauer R. Grabenlose Technologien. ÖIAZ - Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift 2008; 153: 231-244.
- [33] Jung P. Kanalsanierung: Bestandsaufnahme, Planung, Ausführung. Würzburg: Vogel Verlag; 1998.
- [34] Rammelsberger J. Rolle der ZM-Auskleidung von Druckrohren aus Gusseisen und Stahl. RSV-Sonderdruck, 50 Jahre Rohrleitungssanierung mit Zementmörtelauskleidung in Deutschland 2006:6.
- [35] Habenicht G. Kleben - Erfolgreich und Fehlerfrei: Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. Vieweg & Teubner Verlag; 2012.
- [36] Habenicht G. Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2009.
- [37] Pröbster M. Moderne Industrie-Dichtstoffe. Essen: Vulkan-Verlag GmbH; 2006.
- [38] Meier-Westhues U. Polyurethane Lacke, Kleb- und Klebstoffe. Vincentz Network; 2007.
- [39] Ehrenstein GW, Pongratz S. Die Beständigkeit von Kunststoffen. München: Hanser; 2007.
- [40] Flemming M, Ziegmann G, Roth S. Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 1995.

-
- [41] Adam W, Wuebcken W. Duroplaste - Kunststoff Handbuch. Wien, München: Hanser; 1988.
- [42] Elsner P, Eyerer P, Hirth T. Domininghaus - Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer; 2007.
- [43] Ehrenstein GW. Polymer Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendungen. München: Carl Hanser Verlag; 2011.
- [44] Röthemeyer F, Sommer F. Kautschuk Technologie: Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte. München Wien: Carl Hanser Verlag; 2006.
- [45] Ehrenstein GW. Faserverbund-Kunststoffe. München Wien: Carl Hanser Verlag; 2006.
- [46] Bundesministerium für Gesundheit, Empfehlung betreffend Anforderungen an Materialien in Kontakt mit Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser) in Hinblick auf die Bestimmung der Trinkwasserverordnung. In: BMG-75210/0006-II/B/13/2013. Wien: 2013.
- [47] Sensorische und chemische Anforderungen und Prüfungen von Werkstoffen im Trinkwasserbereich - Teil1: Organische Werkstoffe (ÖNORM B5014-1:2012).
- [48] Gerhardy K. Vermehrung von Mikroorganismen auf Werkstoffen für den Trinkwasserbereich - Prüfung und Bewertung. Energie Wasser-Praxis 2008; 59:31-33.
- [49] Tuschewitzki G-J. W 270 - Ein Beitrag zur europäischen Produktprüfung. GWF Wasser/Abwasser 2005; 146:47-49.
- [50] Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:1993 einschließlich Corr 1:1994); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:1996.
- [51] Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionmassen (ISO 527-2:1993 einschließlich Corr 1:1994); Deutsche Fassung EN ISO 527-2:1996.
- [52] Grellmann W, Seidler S. Polymer testing. Hanser Gardner Publications; 2007.
- [53] Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 178:2010); Deutsche Fassung EN ISO 178:2010.
- [54] Hochbau - Fugendichtstoff-Bestimmung des Zugverhaltens unter Vorspannung nach dem Tauchen in Wasser (ISO 10590:2005); Deutsche Fassung EN ISO 10590:2005.
- [55] Hochbau - Fugendichtstoffe-Bestimmung des Haft- und Dehnverhaltens nach dem Tauchen in Wasser (ISO 10591:2005); Deutsche Fassung EN ISO 10591:2005.
- [56] Pan B, Qian K, Xie H, Asundi A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. Measurement Science and Technology 2009; 20.
- [57] Kunststoffe - Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder (ISO 10365:1992); Deutsche Fassung EN ISO 10365:1992.
- [58] Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundlagen (EN ISO 6721-1:2011).
- [59] Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 11357-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 11357-1:2009.
- [60] Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 2: Bestimmung der Glasübergangstemperatur (ISO 11357-2:1999).
- [61] Thermische Analyse (TA) - Thermogravimetrie (TG) - Grundlagen; DIN 51006:2005.

-
- [62] Kunststoffe - Thermogravimetrie (TG) von Polymeren - Allgemeine Grundlagen (ISO 11358: 1997); Deutsche Fassung EN ISO 11358:1997.
- [63] Kunststoffe - Prüfverfahren zur Bestimmung des Verhaltens gegen flüssige Chemikalien (ISO 175:2010); Deutsche Fassung EN ISO 175:2010.
- [64] Mohebbi H, Li CQ. Experimental Investigation on Corrosion of Cast Iron Pipes. International Journal of Corrosion 2011; 2011:17.
- [65] Wendler-Kalsch E, Gräfen H. Korrosionsschadenkunde. Berlin, Heidelberg, New York: Springer; 1998.
- [66] Ehrenstein GW, Riedel G, Trawiel P. Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen. München, Germany: Carl Hanser Verlag; 2003.
- [67] Wapner K. Grenzflächenchemische und elektrochemische Untersuchungen zur Haftung und Enthaftung an modifizierten Klebstoff/Metall - Grenzflächen In: Dissertation, Fakultät für Chemie. Bochum. Deutschland: Ruhr-Universität; 2006.
- [68] Kurzweil P, Scheipers P. Chemie: Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente. Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag; 2012.
- [69] Ikram S, Munir A. Mechanical and Thermal Properties of Chemically Modified Epoxy Resin. Open Journal of Synthesis Theory and Applications 2012; 1:36-43.
- [70] Chikhi N, Fellahi S, Bakar M. Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber. European Polymer Journal 2002; 38:251-264.
- [71] Park SJ, Jin FL, Lee JR. Thermal and mechanical properties of tetrafunctional epoxy resin toughened with epoxidized soybean oil. Materials Science and Engineering A 2004; 374:109-114.
- [72] Jin FL, Park SJ. Thermomechanical behaviour of epoxy resins modified with epoxidized vegetable oils. Polymer International 2008; 57:577-583.
- [73] de Nève B, Shanahan MER. Effects of humidity on an epoxy adhesive. International Journal of Adhesion and Adhesives 1992; 12:191-196.
- [74] Zhou J, Lucas JP. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part II: variations of glass transition temperature. Polymer 1999; 40:5513-5522.
- [75] Balakrishnan S, Start PR, Raghavan D, Hudson SD. The influence of clay and elastomer concentration on the morphology and fracture energy of preformed acrylic rubber dispersed clay filled epoxy nanocomposites. Polymer 2005; 46:11255-11262.
- [76] Miwa M, Takeno A, Hara K, Watanabe A. Volume fraction and temperature dependence of mechanical properties of silicone rubber particulate/epoxy blends. Composites 1995; 26:371-377.
- [77] Moy P, Karasz FE. Epoxy-water interactions. Polymer Engineering and Science 1978; 20:315-319.
- [78] Brun E, Rain P, Teissèdre G *et al.* Hygrothermal aging of a filled epoxy resin. In: 2007 International Conference on Solid Dielectrics. Winchester; United Kingdom: 2007. pp. 239-242.

7 Anhang

7.1 Anhang zum Kapitel „Charakterisierung von sieben auf dem Markt befindlichen Dichtungswerkstoffen“ - (Kapitel 4.2)

Tabelle 38: Dynamisch-mechanische Analyse (DMA): Angabe des Prüftemperaturbereiches und des Prüfmodus

Dynamisch-mechanische Analyse, DMA		
Dichtungswerkstoff	Prüftemperaturbereich	Prüfmodus
PUR 1	-110 °C bis 50 °C	Double - Cantilever
PUR 2	-50 °C bis 80 °C	Double - Cantilever
PUR 3	-50 °C bis 100 °C	3-Punkt Biege
EP 1	-50 °C bis 80 °C	3-Punkt Biege
EP 2	-50 °C bis 80 °C	3-Punkt Biege
EP 3	-50 °C bis 80 °C	3-Punkt Biege
SM 1	-110 °C bis 50 °C	Double - Cantilever

Tabelle 39: Prüftemperaturbereich für die Bestimmung der Glasübergangstemperatur mittels dynamischer Differenz Thermoanalyse (DSC)

Dynamische Differenz Thermoanalyse, DSC	
Dichtungswerkstoffe	Prüftemperaturbereich
PUR 1	-80 °C bis 40 °C
PUR 2	-40 °C bis 80 °C
PUR 3	-20 °C bis 100 °C
EP 1	-20 °C bis 100 °C
EP 2	-20 °C bis 100 °C
EP 3	-40 °C bis 80 °C
SM 1	-80 °C bis 40 °C

Tabelle 40: Füllstoffgehalt angegeben als Prozent-Restmasse der TGA, ausgewertet bei 600 °C

Füllstoffgehalt (%-Restmasse)							
Dichtungs- werkstoff	EP 1	EP 2	EP 3	PUR 1	PUR 2	PUR 3	SM 1
Füllstoffgehalt	76,6 ±0,29	65,6 ±0,21	85,5 ±0,16	26,8 ±0,06	3,9 ±2,85	20,2 ±1	53,5 ±0,25

Tabelle 41: Ergebnisse aus dem Zugversuch: Zugfestigkeit (MPa), Ausgangszustand und nach Auslagerung in Wasser für 28 Tage bei 40 °C in Wasser

Zugfestigkeit (MPa)				
Dichtungs- werkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	18,9	2,3	13,8	0,5
EP 2	32,2	2,8	12,3	1,6
EP 3	6,9	0,2	2,4	0,1
PUR 1	1,5	0,03	1,1	0,04
PUR 2	*	*	*	*
PUR 3	46,0	4,1	44,6	3,9
SM 1	1,6	0,1	1,00	0,03

Tabelle 42: Ergebnisse der Glasübergangstemperatur ausgewertet aus den Daten der DSC ($T_{g(DSC)}$) und der DMA beim Maximum des Verlustmoduls LM ($T_{g(DMA-LM)}$) und des Verlustfaktors $\tan\delta$ ($T_{g(DMA-\tan\delta)}$)

Glasübergangstemperatur T_g (°C), ausgewertet bei						
Dichtungs- werkstoffe	$T_{g(DSC)}$		$T_{g(DMA-LM)}$		$T_{g(DMA-\tan\delta)}$	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	59,7	0,4	52,6	0,2	61,4	0,1
EP 2	49,8	0,3	43,4	0,1	55,9	0,4
EP 3	6,4	0,4	6,8	1,7	26,8	0,7
PUR 1	-66,2	0,00	-56,2	0,5	-46,1	1,4
PUR 2	-	-	-4,8	0,1	16,1	0,2
PUR 3	64,2	2,3	64,7	0,1	91,0	1,7
SM 1	-65,3	0,2	-57,0	1,5	-51,2	0,3

Tabelle 43: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Glasübergangstemperatur; ausgewertet beim Maximum des Verlustmoduls LM ($T_{g(DMA_LM)}$), Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage für 40 °C in Wasser

Glasübergangstemperatur $T_{g(DMA-LM)}$ (°C)				
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	52,6	0,2	19,5	0,7
EP 2	43,4	0,1	32,5	0,1
EP 3	6,8	1,7	-3,6	0,01
PUR 1	-56,2	0,5	-57,9	0,1
PUR 2	-4,8	0,1	-7,1	0,2
PUR 3	64,7	0,1	55,8	3,1
SM 1	-57,0	1,5	-56,3	0,04

Tabelle 44: Ergebnisse des Elastizitätsmoduls ausgewertet aus den Daten der dynamisch-mechanischen Analyse $E_{(DMA)}$, des Zugversuches $E_{(Zugversuch)}$ und der 3-Punkt Biegeprüfung $E_{(3-Punkt Biegung)}$

Elastizitätsmodul E (MPa) ermittelt mit						
Dichtungswerkstoffe	DMA $E_{(DMA)}$		Zugversuch $E_{(Zugversuch)}$		3-P. Biegeprüfung $E_{(3-Punkt Biegung)}$	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	12666	412	6630	983	10152	334
EP 2	8870	327	3319	398	9636	355
EP 3	1045	29,0	126	4,3	-	-
PUR 1	3,9	0,4	3,8	0,6	-	-
PUR 2	8,9	0,3	0,3	0,3	-	-
PUR 3	2468	134	1668	158	-	-
SM 1	5,4	0,7	3,6	0,3	-	-

Tabelle 45: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Elastizitätsmodul $E_{(DMA)}$, ausgewertet bei 23 °C, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser

Elastizitätsmodul $E_{(DMA)}$ (MPa) bei 23 °C				
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	12666	412	7512	37,5
EP 2	8870	327	6003	245
EP 3	1045	29,0	662	37,2
PUR 1	3,9	0,4	2,6	0,5
PUR 2	8,9	0,3	7,1	1,2
PUR 3	2468	134	2347	31,8
SM 1	5,4	0,7	13,6	0,03

Tabelle 46: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Elastizitätsmodul $E_{(DMA)}$, ausgewertet bei 12 °C, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser

Elastizitätsmodul $E_{(DMA)}$ (MPa) bei 12 °C				
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	13859	303	9841	268
EP 2	9692	360	7649	438
EP 3	5370	315	2214	84,1
PUR 1	5	0,4	3,4	0,5
PUR 2	43,5	1	27,7	0,3
PUR 3	2498	2,8	2461	50,9
SM 1	10,7	0,8	6,2	0,7

Tabelle 47: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse: Wassergehalt, ausgelagert bei 7 °C und 40 °C für 28 Tage in Wasser

Wassergehalt (m.-%)				
Dichtungswerkstoffe	ausgelagert, 28 d, 7 °C, Wasser		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	0,40	0,03	0,63	0,03
EP 2	0,75	0,05	1,04	0,03
EP 3	*	*	0,25	0,05
PUR 1	1,72	0,09	2,29	0,11
PUR 2	1,60	0,09	1,05	0,12
PUR 3	2,48	0,54	1,22	0,54
SM 1	3,80	0,26	13,5	0,03

Tabelle 48: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse: Wassergehalt nach Langzeitauslagerung in einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspänen bei 40 °C für 4, 9, und 17 Monate

Wassergehalt (m.-%) nach Langzeitauslagerung bei 40 °C in einer Mischung aus 100 ml Wasser und 20 g Eisenfeilspäne						
Dichtungswerkstoffe	4 Monate		9 Monate		17 Monate	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	0,66	0,02	0,96	0,04	1,04	0,09
EP 2	0,61	0,08	1,25	0,17	1,33	0,09
EP 3	0,14	0,05	1,19	0,18	0,78	0,14
PUR 1	1,99	0,16	4,03	0,34	5,50	0,28
PUR 2	1,70	0,27	2,69	0,36	3,26	0,28
PUR 3	1,59	0,15	1,28	0,13	3,59	3,48
SM 1	14,86	1,00	27,38	2,86	33,05	0,14

Tabelle 49: Ergebnisse der Haftzugversuche: Haftzugfestigkeit, Oberfläche geschliffen ausgeführt oder alle losen Korrosionsprodukte entfernt

Haftzugfestigkeit (MPa)				
Dichtungswerkstoffe	geschliffene Oberfläche		lose Korrosionsprodukte entfernt	
	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	9,6	0,2	4,8	0,5
EP 2	10,0	1,0	5,1	0,9
EP 3	1,6	0,2	1,8	0,7
PUR 1	0,4	0,0	0,4	0,0
PUR 2	0,3	0,0	0,4	0,00
PUR 3	1,7	*	2,6	*
SM 1	0,8	0,3	1,1	0,1

Tabelle 50: Ergebnisse aus Zugversuch und Haftzugversuch: Dehnungswerte; Werte entsprechen der Bruchdehnung bei dem Zugversuch und der Dehnung bei Rissinitiation aus dem Haftzugversuch

Dehnungswerte (%) aus Zugversuch und Haftzugversuch						
Dichtungswerkstoffe	Zugversuch Bruchdehnung (%)		Haftzugversuch Dehnung bei Rissinitiation (%)			
			geschliffen		lose Korrosionsprodukte entfernt	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
EP 1	0,3	0,00	0,3	0,1	0,3	0,0
EP 2	1,1	0,3	0,3	0,0	0,3	0,1
EP 3	6,4	0,2	*	*	2,2	0,2
PUR 1	279	52,6	78,5	3,4	76,8	2,5
PUR 2	32,6	8,4	1,9	0,3	1,5	0,5
PUR 3	2,2	0,4	0,3	0,1	0,3	0,0
SM 1	135	20,1	13,6	1,7	35,7	2,7

7.2 Anhang zum Kapitel „Korrosionsversuche“ - (Kapitel 4.4)

Tabelle 51: maximale Biegespannung der Korrosionsproben mit Initiierungsspalt sowie Proben mit Initiierungsspalt und Dochtfaden

Maximale Biegespannung (MPa) der Korrosionsproben					
Auslagerzeit	Bedingungen * 3%ige Salzlösung	mit Initiierungsspalt und Dochtaden		mit Initiierungsspalt	
		MW	STABW	MW	STABW
3 Monate	7 °C	12,7	4,3	11,8	2,4
	40 °C	12,8	0,5	15,9	0,8
	60 °C	16,3	1,0	20,2	2,0
	60 °C *	14,0	1,7	17,4	0,6
6 Monate	7 °C	18,2	4,8	17,8	3,7
	40 °C	11,4	1,3	13,9	0,1
	60 °C	13,4	1,4	17,3	0,7
	60 °C *	12,8	1,6	17,4	2,1
14 Monate	7 °C	14,1	2,3	20,7	6,5
	40 °C	14,6	0,5	16,6	2,7
	60 °C	15,5	1,5	14,3	1,8
	60 °C *	13,0	1,5	14,3	1,8

Tabelle 52: durchschnittliche maximale Biegespannung der Korrosionsproben mit Initiierungsspalt sowie Proben mit Initiierungsspalt und Dochtfaden

Durchschnittliche max. Biegespannung (MPa) der Korrosionsproben				
Auslagerzeit	mit Initiierungsspalt und Dochtaden		mit Initiierungsspalt	
	MW	STABW	MW	STABW
3 Monate	13,9	2,4	16,3	3,5
6 Monate	13,9	3,5	16,6	3,3
14 Monate	14,3	1,5	16,5	4,0

7.3 Anhang zum Kapitel „Modifizierung von Epoxidharzen“ - (Kapitel 4.5)

Tabelle 53: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Glasübergangstemperatur (°C) der modifizierten Epoxide, ausgewertet beim Maximum des Verlustmoduls $LM - E''$, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser

Glasübergangstemperatur T_g (DMA-LM) (°C)				
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP	53,2	0	40,1	0
EP/EPDM 1	51,4	0,5	38,3	0,1
EP/EPDM 2	46,4	0,2	33,1	0,4
EP/ATBN 1	46,4	0,2	29,5	0,2
EP/ATBN 2	38,6	0,5	23,8	0,3
EP-EM 1	36,3	1,5	24,2	0,1
EP-EM 2	36,2	0,4	21,6	0,6
C-EP 1	14,5	1,6	-28,4	2,2
C-EP 2	2,5	1,2	-26,5	4,5

Tabelle 54: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Elastizitätsmodul (MPa) der modifizierten Epoxide, Speichermodul E' bei 12 °C ausgewertet, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser

Elastizitätsmodul E (DMA) (MPa) bei 12 °C				
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP	3229	48,1	2765	41
EP/EPDM 1	2462	85,6	1827	57,3
EP/EPDM 2	1567	36,8	1181	75
EP/ATBN 1	1392	8,5	1070	110
EP/ATBN 2	485	9,3	301	28,8
EP-EM 1	2776	115	2056	60,8
EP-EM 2	1962	86,3	1693	9,2
C-EP 1	2824	69,3	878	12,5
C-EP 2	788	153	167	9,1

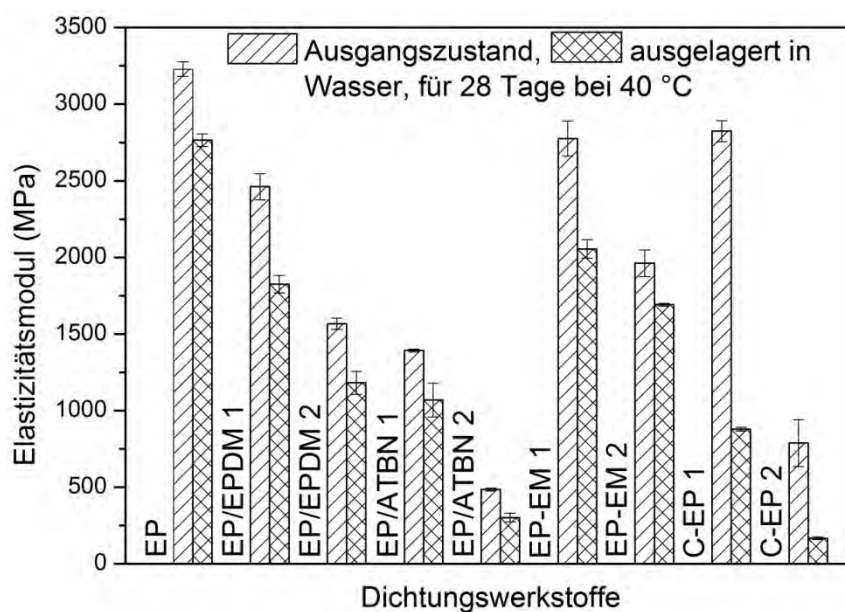


Abbildung 87: Elastizitätsmodul ermittelt durch dynamisch-mechanische Analyse an Proben des Ausgangszustandes (vollständig ausgehärtete Proben) und an Proben ausgelagert in Wasser bei 40 °C für 28 Tage, Speichermodul E' ausgewertet bei 12 °C; Daten zum Diagramm sind im Anhang in Tabelle 54 angegeben

Tabelle 55: Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse: Elastizitätsmodul (MPa) der modifizierten Epoxide, Speichermodul E' bei 23 °C ausgewertet, Ausgangszustand und ausgelagert für 28 Tage bei 40 °C in Wasser

Elastizitätsmodul $E_{(DMA)}$ (MPa) bei 23 °C				
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP	3083	48,8	2364	12,7
EP/EPDM 1	2349	65,8	1538	56,6
EP/EPDM 2	1489	39,6	994	54,1
EP/ATBN 1	1229	2,8	785	68,0
EP/ATBN 2	361	6,2	150	17,0
EP-EM 1	2269	126	1266	14,9
EP-EM 2	1506	58,0	1094	13,4
C-EP 1	1210	125	204	3,1
C-EP 2	128	9,6	43,8	0,7

Tabelle 56: Ergebnisse des Zugversuches: Zugfestigkeit (MPa), Ausgangszustand und nach Auslagerung in Wasser für 28 Tage bei 40 °C

Zugfestigkeit (MPa)				
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP	44,2	3,6	32,6	4,3
EP/EPDM 1	29,4	5,0	19,3	5,6
EP/EPDM 2	18,8	2,3	13,0	0,4
EP/ATBN 1	25,3	2,1	13,1	0,3
EP/ATBN 2	14,4	0,9	4,9	0,7
EP-EM 1	39,3	5,5	14,1	1,5
EP-EM 2	35,7	1,4	13,8	0,7
C-EP 1	14,8	0,6	9,2	0,4
C-EP 2	5,5	0,4	4,4	0,7

Tabelle 57: Ergebnisse des Zugversuches: Bruchdehnung (%), Ausgangszustand und nach Auslagerung in Wasser für 28 Tage bei 40 °C

Bruchdehnung (%)				
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand		ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW	MW	STABW
EP	1,9	0,3	1,8	0,2
EP/EPDM 1	1,7	0,2	2	0,3
EP/EPDM 2	1,6	0,3	4,0	0,8
EP/ATBN 1	5,2	2,2	16,9	5,9
EP/ATBN 2	22,4	6,5	50,4	9,4
EP-EM 1	3,1	0,7	17,6	4,7
EP-EM 2	3,4	0,5	13,0	4,0
C-EP 1	14,9	2,0	25,6	3,0
C-EP 2	18,4	3,4	19,1	3,1

Tabelle 58: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse: Wassergehalt (m.-%), ausgelagert bei 40 °C für 28 Tage in Wasser

Wassergehalt (m.-%)		
Dichtungswerkstoffe	ausgelagert, 28 d, 40 °C, Wasser	
	MW	STABW
EP	1,73	0,16
EP/EPDM 1	2,82	0,62
EP/EPDM 2	2,77	0,15
EP/ATBN 1	2,79	0,02
EP/ATBN 2	4,20	0,13
EP-EM 1	3,20	0,22
EP-EM 2	2,09	0,19
C-EP 1	4,39	0,37
C-EP 2	3,05	0,15

Tabelle 59: Ergebnisse der Haftzugversuche: Haftzugfestigkeit (MPa), Oberfläche geschliffen ausgeführt

Haftzugfestigkeit (MPa)		
Dichtungswerkstoffe	Ausgangszustand	
	MW	STABW
EP	7,5	-
EP/EPDM 2	4,8	1,8
EP/ATBN 2	7,7	2,6
EP-EM 1	3,6	-
EP-EM 2	4	0,7
C-EP 1	7,0	2,5
C-EP 2	2,15	0,1

Tabelle 60: Ergebnisse aus Zugversuch und Haftzugversuch: Spannungswerte (MPa), Werte entsprechen der Zugfestigkeit bei dem Zugversuch und der Haftzugfestigkeit aus dem Haftzugversuch

Spannungswerte (MPa) aus Zugversuch und Haftzugversuch				
Dichtungs- werkstoffe	Zugversuch Zugfestigkeit (MPa)		Haftzugversuch Haftzugfestigkeit (MPa)	
	MW	STABW	MW	STABW
EP	44,2	3,6	7,5	-
EP/EPDM 2	18,8	2,3	4,8	1,8
EP/ATBN 2	14,4	0,9	7,7	2,6
EP-EM 1	39,2	5,4	3,6	-
EP-EM 2	34,7	1,4	4	0,7
C-EP 1	14,7	0,6	7,0	2,5
C-EP 2	5,5	0,4	2,15	0,1

Tabelle 61: Ergebnisse aus Zugversuch und Haftzugversuch: Dehnungswerte (%), Werte entsprechen der Bruchdehnung aus dem Zugversuch und der Dehnung bei Rissinitiierung aus dem Haftzugversuch

Dehnungswerte (%) aus Zugversuch und Haftzugversuch				
Dichtungs- werkstoffe	Zugversuch Bruchdehnung (%)		Haftzugversuch Dehnung bei Rissinitiierung (%)	
	MW	STABW	MW	STABW
EP	1,8	0,2	0,4	0,1
EP/EPDM 2	1,6	0,3	0,3	0,1
EP/ATBN 2	22,4	6,5	1,3	0,2
EP-EM 1	3,1	0,7	0,4	0,1
EP-EM 2	3,4	0,5	0,3	0,1
C-EP 1	14,9	2,0	1,0	0,3
C-EP 2	18,4	3,4	4,1	0,7