

**Mikrostrukturbasierte  
Ermittlung der maximalen  
Einsatzdauer für  
korrosionsermüdungs-  
beanspruchte Werkstoffe  
und Komponenten  
der Kernenergie  
(MibaLeb II)**

**Teilvorhaben:  
Erweiterung der  
Berechnungsverfahren**

**Mikrostrukturbasierte  
Ermittlung der maximalen  
Einsatzdauer für  
korrosionsermüdungs-  
beanspruchte Werkstoffe  
und Komponenten  
der Kernenergie  
(MibaLeb II)**

**Teilvorhaben:  
Erweiterung der  
Berechnungsverfahren**

Abschlussbericht

Klaus Heckmann  
Jens Arndt  
Jürgen Sievers

September 2023

**Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen RS1594E durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

**Deskriptoren**

Data Mining, Dehnungssteigerungsversuch, Einstufenversuch, Ermüdung, Künstliche Intelligenz, Lebensdauer, Maschinelles Lernen, Schadensbewertung, Wöhlerlinie

## Kurzfassung

Im Rahmen des Vorhabens RS1594E (Teilprojekt des Verbundvorhabens MibaLeb II) wurden Beiträge zur Entwicklung einer Verfahrensweise zur Restlebensdauerbewertung von im Betrieb gealterten metallischen Kernkraftwerkskomponenten erarbeitet. Die Partner im Verbundvorhaben waren der Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik (WPT) der Technischen Universität Dortmund, das Fachgebiet Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung (WWHK) der Hochschule Kaiserslautern, der Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung (LZfPQ) der Universität des Saarlandes und die Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart.

Im Arbeitsschwerpunkt Simulationen zum Anriss in Ermüdungsproben hat die GRS Untersuchungen zum Lastabfall und der Anrissgröße bei dehnungsgeregelten Ermüdungsproben durchgeführt. Bei der generischen Studie zeigte sich, dass die Extensometerdehnungen stark von der Position des Extensometers relativ zum Anriss und der Länge des Extensometers abhängen.

Weiterhin wurden mit Techniken des Maschinellen Lernens, insbesondere neuronalen Netzwerken, Untersuchungen von instrumentierten Ermüdungsversuchen durchgeführt, um in vorhandenen Datenbeständen Muster, Trends oder Zusammenhänge zu erkennen. Das Erkennen der Ermüdungsschädigung wurde trainiert und auf andere Versuche angewendet. Der Ansatz des Maschinellen Lernens wurde verwendet, um die Ermüdungsschädigung anhand der Charakteristiken von Widerstands- und Wirbelstrommessungen vorherzusagen. Als Konsequenz ergibt sich ein Kurzzeitverfahren mit dem eine Wöhlerlinie bestimmt werden kann. Die Genauigkeit des erzielten Ergebnisses ist beim ersten Demonstrationsfall eher gering, aber dennoch gelingt es, die Schritte des Verfahrens umzusetzen.

Im Rahmen der zweiten Phase des MibaLeb-Vorhabens sollte ein Rohrstück unter realistischen Bedingungen thermisch beaufschlagt werden, wobei eine nennenswerte Ermüdungsschädigung durch Wechsellasten entstehen sollte. Ein Rohrsegment aus einem von RWE zur Verfügung gestellten Rohrstück wurde im FSI-Kreislauf der MPA Universität Stuttgart mit Thermozyklen beaufschlagt. Mit einem vereinfachten Analysemodell hat die GRS die Belastungen des Rohrsegments untersucht und die Lebensdauer abgeschätzt. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts waren die Versuche am FSI-Kreislauf der MPA infolge von technischen Problemen noch nicht abgeschlossen.



## **Abstract**

As part of the RS1594E project (subproject of the MibaLeb II joint project), contributions were made to the development of a procedure for assessing the remaining service life of metallic nuclear power plant components which have aged during operation. The partners in the joint project were the Chair of Materials Test Engineering (WPT) at the Technical University of Dortmund, the Department of Materials Science and Materials Testing (WWHK) at Kaiserslautern University of Applied Sciences, the Chair for Non-Destructive Testing and Quality Assurance (LZfPQ) at Saarland University and the Materials examination institute (MPA) of the University of Stuttgart.

In one of the focuses of work GRS has carried out investigations into the load drop and the size of initial cracks in strain-controlled fatigue samples. The generic study showed that the extensometer strains depend strongly on the position of the extensometer relative to the crack and the length of the extensometer.

Furthermore, investigations of instrumented fatigue tests were carried out using machine learning techniques, in particular neural networks, in order to recognize patterns, trends or connections in existing data sets. Recognition of fatigue damage was trained and applied to other experiments. The machine learning approach was used to predict fatigue damage based on the characteristics of resistance and eddy current measurements. The consequence is a short-term procedure with which a Wöhler curve can be determined. The accuracy of the result is rather low in the first demonstration case, but it is still possible to implement the steps of the procedure.

As part of the second phase of the MibaLeb project, a section of pipe was to be subjected to cyclic thermal stress under realistic conditions, with significant fatigue damage caused by alternating loads. A pipe segment made from a pipe provided by RWE was subjected to thermal cycles in the FSI circuit of the MPA University of Stuttgart. Using a simplified analysis model, GRS examined the loads on the pipe segment and estimated its service life. At the time of writing this report, the tests on the MPA's FSI circuit had not yet been completed due to technical problems.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung.....</b>	<b>I</b>
	<b>Abstract.....</b>	<b>II</b>
<b>1</b>	<b>Zielsetzung und Arbeitsprogramm.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Gesamtziel des Vorhabens.....	1
1.3	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Projekts.....	2
<b>2</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Simulationen zum Anriss in Ermüdungsproben .....</b>	<b>7</b>
3.1	Analyse von aufgebrochenen Ermüdungsproben .....	7
3.2	Analysen von nicht aufgebrochenen Ermüdungsproben .....	8
3.3	Risswachstum in den Proben mit vermessenen Anrissen .....	10
3.4	Simulationsmodell einer Ermüdungsprobe mit Anriss .....	13
3.5	Auswertung der Extensometerverschiebung.....	15
3.6	Bestimmung der Spannungsintensitätsfaktoren .....	17
<b>4</b>	<b>Data Mining Analyse von instrumentierten Ermüdungsversuchen mit Maschinellern Lernen .....</b>	<b>21</b>
4.1	Versuchsdaten MibaLeb I .....	21
4.1.1	Versuche an ungekerbten Proben .....	22
4.2	Datenaufbereitung .....	27
4.2.1	Zyklenzerlegung .....	27
4.2.2	Datenbehandlung .....	28
4.2.3	Datenladen und Präprozessing.....	32
4.3	Techniken und Werkzeuge des maschinellen Lernens .....	32
4.3.1	Keras Workflow .....	33
4.3.2	Aufbau des künstlichen Neuronalen Netzwerks .....	33
4.4	Anwendung von überwachtem Lernen.....	34
4.4.1	Analyse von Probe 8.1.....	34

4.4.2	Analyse mehrerer Einstufenversuche .....	35
4.4.3	Zeitbasierte Zyklenerlegung .....	37
4.4.4	Maximumbasierte Zyklenerlegung .....	38
4.5	Anwendung des Dehnungssteigerungsversuchs .....	39
4.5.1	Dehnungssteigerungsversuch 6.6.....	40
4.5.2	Dehnungssteigerungsversuch 10.5.....	43
4.6	Methodischer Ansatz zur Berechnung von Wöhlerlinien mit maschinellern Lernen.....	45
4.7	Anwendungsfall: Stückweiser Regressionsansatz bei Dehnungssteigerungsversuch 10.5.....	47
4.8	Analyse von Wirbelstromdaten .....	49
4.8.1	Versuchsübersicht .....	49
4.8.2	Datenaufbereitung .....	51
4.8.3	Wirbelstrommessung .....	51
4.8.4	Spannungsamplitude .....	58
4.8.5	Temperatur.....	58
4.8.6	Elektrischer Widerstand.....	59
4.8.7	Tensorgewinnung aus statistischen Werten der Wirbelstrommessung.....	60
4.8.8	Tensor aus Fourierzerlegung der Wirbelstrommessung.....	65
4.9	Training und Vorhersage .....	66
4.9.1	Relu-Variante.....	66
4.9.2	Sigmoid-Ausgabeschicht .....	66
4.9.3	Sensorfusion und Sigmoid-Ausgabeschicht.....	67
4.9.4	Anwendung auf den Dehnungssteigerungsversuch .....	68
4.10	Bestimmung von Wöhlerlinien aus dem Dehnungssteigerungsversuch ...	71
4.10.1	Bestimmung von Wöhlerlinien durch Fit der Schädigungsentwicklungsvorhersage .....	71
4.10.2	Bestimmung einer Wöhlerlinie aus der inkrementellen Schädigung .....	74
4.11	Fazit.....	75

<b>5</b>	<b>Ermüdungsbelastung im FSI-Komponentenversuch .....</b>	<b>77</b>
5.1	Versuchsbeschreibung .....	77
5.2	Beschreibung des Analysemodells (idealisierte Ansatz) .....	79
5.3	Simulation zum Komponentenversuch mit Ermittlung des Spannungsverlaufs .....	83
<b>6</b>	<b>Untersuchungen zu realen Schadensfällen mit der um StrainLife erweiterten Simulationsplattform PROST .....</b>	<b>95</b>
6.1	Übersichtsstudie zu ermüdungsbedingten Schadensfällen in Kernkraftwerken.....	95
6.1.1	KomPass-Datenbank.....	95
6.1.2	CODAP-Datenbank .....	96
6.1.3	TECDO.....	97
6.1.4	Analysen zu Schadensfällen in früheren GRS-Forschungsarbeiten .....	97
6.2	Rechnerische Ansätze zur Schadensbewertung.....	100
6.2.1	KTA-Auslegungskurve .....	100
6.2.2	Rechnerische Ermüdungsbewertung in der Kerntechnik: relevante Literaturstellen .....	101
6.3	Nachrechnung Civaux-Leckage .....	102
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>103</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>105</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>115</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>121</b>



# **1 Zielsetzung und Arbeitsprogramm**

## **1.1 Problemstellung**

Der sich 2011 in Fukushima ereignete Reaktorunfall hat weltweit für die laufenden Kernkraftwerke zu einer Überprüfung der Auslegungskonzepte und der Betriebsbedingungen unter Berücksichtigung der gesamten Anlageninfrastruktur geführt. In diesen sog. Stresstests wurde insbesondere die Fähigkeit der zuverlässigen Beherrschung von Störfallsituationen überprüft. Die Analyse des Ereignisses in Fukushima und des Sicherheitsstandards der Anlagen im In- und Ausland hat zu einer Vielzahl von Veränderungen im Betrieb von Kernenergieanlagen geführt. Infolge von Lastfolgebetrieb entsteht ein erhöhter Bedarf an Prüfung und Bewertung der Sicherheit bzw. Integrität von Strukturen und Komponenten, der primär mit Methoden der Werkstoffcharakterisierung und zerstörungsfreier Prüfung (zFP) sowie strukturmechanischen Analysemethoden einhergeht /KOM 13/.

## **1.2 Gesamtziel des Vorhabens**

Das Gesamtziel des Verbundprojekts MibaLeb II war die Entwicklung einer Verfahrensweise zur Restlebensdauerbewertung von im Betrieb gealterten metallischen Kernkraftwerkskomponenten. Dabei wurde berücksichtigt, dass sich bei Bauteilen die örtlichen Werkstoffeigenschaften aufgrund von mechanischen, thermischen und korrosiven Beanspruchungen verändern können. Die Auswirkungen solcher Einflüsse werden derzeit bei der Komponentenauslegung in Ermangelung weiterer Informationen pauschal über Sicherheitsfaktoren abgedeckt, wodurch die Beurteilung von Komponenten und Systemen vor dem Hintergrund variabler Betriebsbeanspruchungen erschwert wird. Ein Mehr an qualifizierten Informationen kann bei gleichbleibender Sicherheit einen flexibleren Umgang mit betroffenen Komponenten hinsichtlich deren Einsatzdauer ermöglichen.

Ziel der zweiten Projektphase des Verbundprojekts MibaLeb war die Übertragung der Ergebnisse, Erkenntnisse und Methoden auf reale und real beanspruchte Werkstoffe und Bauteile, um auf diese Weise zuverlässige Aussagen bezüglich der Integrität und der verbleibenden Restlaufzeit von Kernenergieanlagen bereitzustellen.

Die Partner der ersten MibaLeb-Projektphase waren der Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik (WPT) der Technischen Universität Dortmund, der Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung (LZfPQ) der Universität des Saarlandes, die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) und die Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart. In Phase II wurde das Konsortium um das Fachgebiet Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung (WWHK) der Hochschule Kaiserslautern erweitert, um die Kompetenzen hinsichtlich der Entwicklung des Lebensdauerbegriffes StrainLife /HEC 18/ und einer daraus abgeleiteten Strukturanalyse weiter zu stärken.

### **1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Projekts**

Das Gesamtvorhaben MibaLeb ist in vier Blöcke (B1-B4) unterteilt. In den Blöcken B1 und B2 (Phase I) standen die Methodenentwicklung und Validierung im Vordergrund /ACO 20/. Ziel des Fortsetzungsantrags (Phase II, B3-B4) war die Übertragung der in Phase I entwickelten Methoden auf reale und real beanspruchte Werkstoffe und Bauteile sowie die Übertragung von lokalen Schädigungen (mechanisch, thermisch, korrosiv) auf unbeanspruchtes Material mit vergleichbarer chemischer Zusammensetzung im Sinne eines Begleitversuchs. Hierdurch sollen zukünftig Versuche an Referenzproben zu jedem beliebigen Zeitpunkt im Bauteillebenszyklus mittels zerstörender und zerstörungsfreier Prüfung durchgeführt werden können, ohne die Strukturintegrität der zu bewertenden Komponente herabzusetzen. Eine solche Vorgehensweise eröffnet vollkommen neue Prüf- und Bewertungspotentiale, die eine umfangreiche Datenbasis für die Restlebensdauerbewertung kerntechnischer Anlagen bereitstellen könnte.

Die Feststellung des Schädigungszustandes erfolgte mittels der in Phase I auf Basis von nicht KTA spezifiziertem Stangenmaterial entwickelten zerstörungsfreien Prüfverfahren. In Phase II (B3-B4) wurde die Messtechnik um die Möglichkeit der magnetischen Hysteresemessung wie auch der Wirbelstrommessung ergänzt, um möglichst die gesamte Breite der elektromagnetischen Prüfverfahren einzubeziehen. Damit könnte ein breites Spektrum an Mikrostrukturinformationen am realen Bauteil erfasst werden, das perspektivisch auf Begleitproben „übertragen“ werden soll. Als reales Bauteil stand den Antragstellern in Phase II ein Geradrohrsegment (DN80) aus dem Lagerbestand der RWE Power AG zur Verfügung, deren Werkstoff die Normen und Standards KTA 3201, WS D 1000.1, KS D 1042/50 Rev. C, DIN 10216-5 erfüllte. Der „Übertrag“ des Schädigungszustandes erfolgte über die Beanspruchungshöhe und -dauer sowie die Temperatur. Beanspruchungshöhe und -dauer haben einen direkten Einfluss auf das plastische

Verformungsverhalten und die ablaufenden Versetzungsreaktionen. Die Variation der Versuchstemperatur, unter der die Wechselverformung stattfindet, gibt insbesondere die Möglichkeit, den Anteil der martensitischen Phasenumwandlung zu steuern und ggf. zu unterdrücken. Die in B1-B2 entwickelte und in die Simulationsplattform PROST /HEC 16/ implementierte Methode StrainLife wurde auf die aus der Bauteilbetrachtung resultierenden Randbedingungen angepasst und stellt zusammen mit der Simulationsplattform PROST einen zentralen Ausgangspunkt für dieses vorgangsorientierte Auslegungskonzept dar, das zukünftig auch auf andere austenitische Werkstoffe übertragen werden könnte. Gemäß der Vorgehensweise in StrainLife müssen jeweils nur 3 ausgewählte Ermüdungsversuche durchgeführt werden, um eine Wöhlerlinie als Eingangsgröße für eine Lebensdauerberechnung zu bestimmen und damit auf besonders schnelle Weise eine erforderliche Datenbasis bereitzustellen. Besteht die Möglichkeit zur Durchführung ergänzender Versuche, so können bspw. auch Streubänder ermittelt und Aussagen hinsichtlich statistischer Verteilungen getroffen werden. Gegenüber einer konventionellen Ermittlung verringert sich der Versuchsaufwand um bis zu 90 %. Damit wird es auch interessant, degradiertes Material effizient zu charakterisieren.

Die in MibaLeb I etablierte StrainLife-Methode wurde sukzessiv zu einem Multiparameteransatz erweitert, der für totaldehnungsgeregelte Versuche das Wechselverformungsverhalten beim Übergang vom LCF- zum HCF-Bereich besser abbilden kann und darüber hinaus die Möglichkeit bietet, mikrostrukturbeschreibende Parameter einzuschließen und diese bei der Berechnung der Lebensdauer zu berücksichtigen. Hierdurch werden nicht nur Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und herstellungsbedingte Einflüsse erfassbar, sondern auch thermische und/oder mechanische Vorschädigungen (Alterung) in der Lebensdauerberechnung wiedergegeben, so dass die Anwendbarkeit des Bewertungskonzepts kontinuierlich erweitert wird. In Phase II wurden die Schädigungen in Form von mikrostrukturellen Veränderungen in realen Bauteilen erfasst und auf unbeanspruchte ungekerbte Ermüdungsproben des Stangenmaterials aus Phase I übertragen.



Zur Abschätzung von Bauteilrestlebensdauern wurde in MibaLeb I die StrainLife-Methode entwickelt und diese an konventionell durchgeführten totaldehnungskontrollierten Ermüdungsversuchen validiert. StrainLife ist gezielt für den Einsatz unter totaldehnungskontrollierter Versuchsführung ausgelegt und verfügt über eine Möglichkeit zur sequenziellen Berechnung von relevanten Lebensdauerbereichen im LCF- und HCF-Bereich. Zur Erhöhung der statistischen Aussage bzw. zur sequenziellen Berechnung einzelner Lebensdauerbereiche (LCF, HCF) können darüber hinaus weitere Ermüdungsdaten als Eingangsgrößen unter StrainLife genutzt werden. In diesem Zusammenhang wurde in Phase II die Einbeziehung weiterer mikrostrukturbeschreibende Parameter in die Verfahrensweise und damit Lebensdauerberechnungen ermöglicht.

## 2 Stand von Wissenschaft und Technik

Zur Erfassung lokaler Ermüdungslasten haben sich Messprinzipien, z. B. basierend auf Temperaturmessungen wie bei FAMOS /RUD 12a/ /RUD 12b/, etabliert. Bei diesem Ermüdungsüberwachungssystem werden lokale Temperaturen an ausgewählten Punkten dauerhaft im Betrieb gemessen und rechnerisch in Wärmedehnungen und schließlich Ermüdungsschwingspiele übersetzt. International wird derzeit die Überwachung von Kernenergieanlagen zunehmend proaktiv, d. h. hinsichtlich der betriebsbegleitenden Kontrolle von Bauteilen und Komponenten, ausgelegt bzw. auf diese Vorgehensweise umgestellt. Dies wird durch die steigende Verfügbarkeit von Sensoren ermöglicht, die zunehmend zu attraktiven Preisen angeboten werden und inzwischen auch den für die betriebssichere Anwendung erforderlichen technischen Reifegrad erreicht haben. Darüber lassen sich Zustandsüberwachungssystemen im Sinne eines Structural Health Monitoring entwickeln. Hinzu kommen die signifikant steigenden Rechnerleistungen, die eine Simulation des Bauteilverhaltens, vielfach in Echtzeit, ermöglichen und das auch wiederum zu überschaubaren Kosten. Es liegt also nah, digitale Zwillinge selbst für alternde und beschädigte kerntechnische Anlagen zu entwickeln, wie z. B. für den havarierten Reaktor Fukushima Daiichi. Letzteres ist kein Einzelfall, sondern mehr einer der Anfänge hin zu Building Information Modeling (BIM-) Systemen, wie sie u. a. im Bauingenieurwesen zunehmend auch auf internationaler Ebene Verbreitung finden. Es ist somit angestrebt, diese Vorgehensweise längerfristig auf kerntechnische Anlagen im Ausland zu übertragen, denn in den angrenzenden Nachbarländern wird ein reaktives Anlagenmanagement verfolgt, das sich rein auf die der Auslegung zugrundeliegenden Beanspruchungsrandbedingungen stützt.

Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit von druckführenden Komponenten in deutschen Kernkraftwerken erfolgte entsprechend den Festlegungen des kerntechnischen Regelwerkes KTA 3201.2 /KTA 13/ und umfasste u. a. Ermüdungsdaten für ferritische und austenitische Werkstoffe. Mittels strukturmechanischer Analysen wurde der Nachweis geführt, dass der Erschöpfungsgrad  $D$  in vorgegebenen Grenzen bleibt ( $D \leq 1$ ). Derzeit ist keine zerstörende oder zerstörungsfreie Prüfmethode soweit ertüchtigt, dass sie für die Belange der Kernenergie die (makroskopisch) anrissfreie Phase von Werkstoffen und Bauteilen und somit die sich einstellende Schädigungsentwicklung „in-situ“ charakterisieren kann. Wöhlerlinien sind bis heute eine der wichtigsten Grundlagen zur Auslegung von schwingbeanspruchten Bauteilen, wobei zu deren Ermittlung i. d. R. eine große Anzahl von Ermüdungsversuchen erforderlich ist. Durch den Einsatz

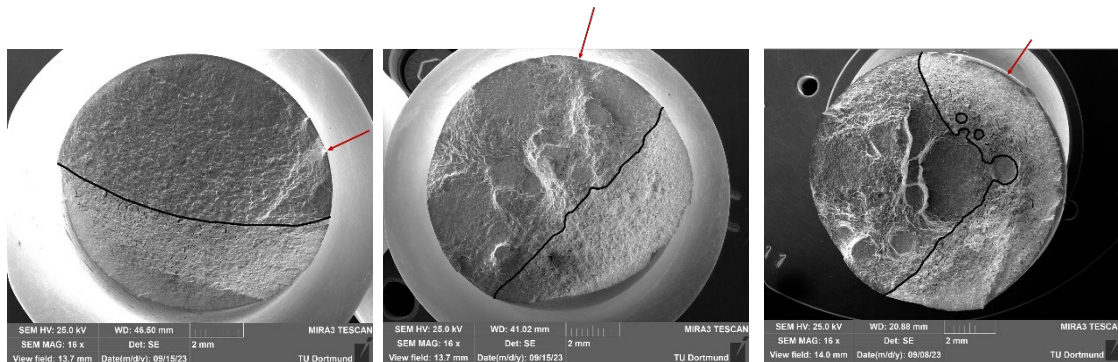
vorgangsorientierter Lebensdauerberechnungsmethoden, wie z. B. PhyBaL /STA 10/ und die in der MibaLeb I entwickelte StrainLife-Methode, kann durch den Einsatz der zfP und elektrochemischer Verfahren der Versuchsaufwand zur Ermittlung von Wöhlerlinien deutlich reduziert werden /ACO 18/ /KLE 16/. Zudem können durch die Kombination verschiedener physikalischer Messverfahren Ermüdungsmechanismen voneinander separiert werden. Mittels elektrochemischer Verfahren können erste durch Gleitbänder verursachte Schädigungsmerkmale auf der Werkstoffoberfläche oder die Entstehung und Ausbreitung von Oberflächenrissen detektiert und verfolgt werden /DON 22/ /KLE 19/ /MAG 95/ /TAD 04/. Auf der Magnetik beruhende Messverfahren erfassen Informationen zur oberflächennahen Versetzungsdichte und zur martensitischen Phasenumwandlung /DOB 13/. Resistometrische Verfahren sind hingegen in der Lage, Veränderungen der Defektdichte im Werkstoffvolumen integral zu detektieren /PIO 95/.

### 3 Simulationen zum Anriss in Ermüdungsproben

In diesem Kapitel sind die Untersuchungen zum Lastabfall und der Anrissgröße bei dehnungsgeregelten Ermüdungsproben zusammengefasst. Erste Untersuchungen zur Thematik wurden bereits in MibaLeb I (siehe /ACO 20/ und /HEC 21/) durchgeführt.

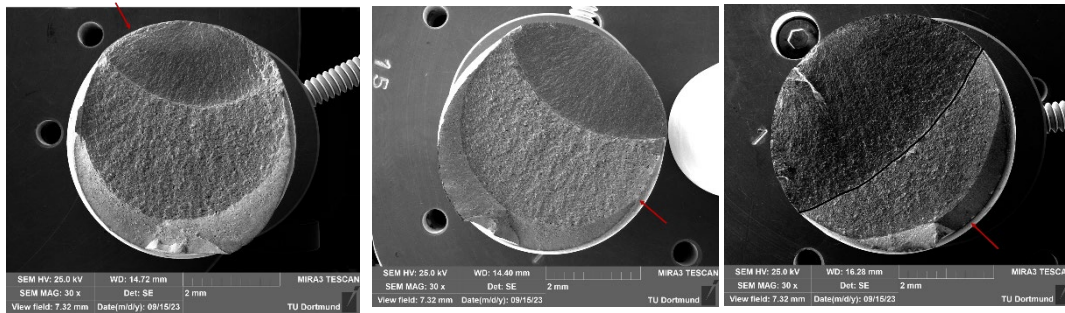
#### 3.1 Analyse von aufgebrochenen Ermüdungsproben

Am Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik wurden zur Anrissimulation totaldehnungsgeregelte Ermüdungsversuche wurden mit einem Lastabfallkriterium abgebrochen. Die Proben 24.3, 4.1 und 29.2 (Einstufenversuche mit 0,6 %, 0,8 % und 0,8 % Totaldehnungsamplitude) wurden am WPT nach Versuchsende im Ofen angelassen, um die Rissflankenflächen anlaufen zu lassen, dann aufgebrochen und die Bruchflächen analysiert. Die Bruchflächen sind in Abb. 3.1 dargestellt, wobei die Extensometerposition markiert ist. Die Form dieser Risse ist in zwei Fällen eher sehnenförmig, während Probe 29.2 eine komplexere Risskontur aber eher linsenförmig aufweist.



**Abb. 3.1** Bruchflächen der Proben (von links nach rechts) 24.3, 4.1 und 29.2 mit markierter Risskontur und der Extensometerposition.

Weitere Proben, die aus dem Rohrsegment im Ausgangszustand entnommen wurden und andere Abmessungen aufweisen, wurden auf die gleiche Weise analysiert. Diese Proben haben aufgrund der Wandstärke von 10 mm lediglich einen Durchmesser von 5,3 mm. Die Bruchflächen der Proben A6 (0,4 %), A19 (0,25 %) und C3 (0,5 %) sind in Abb. 3.2 dargestellt.

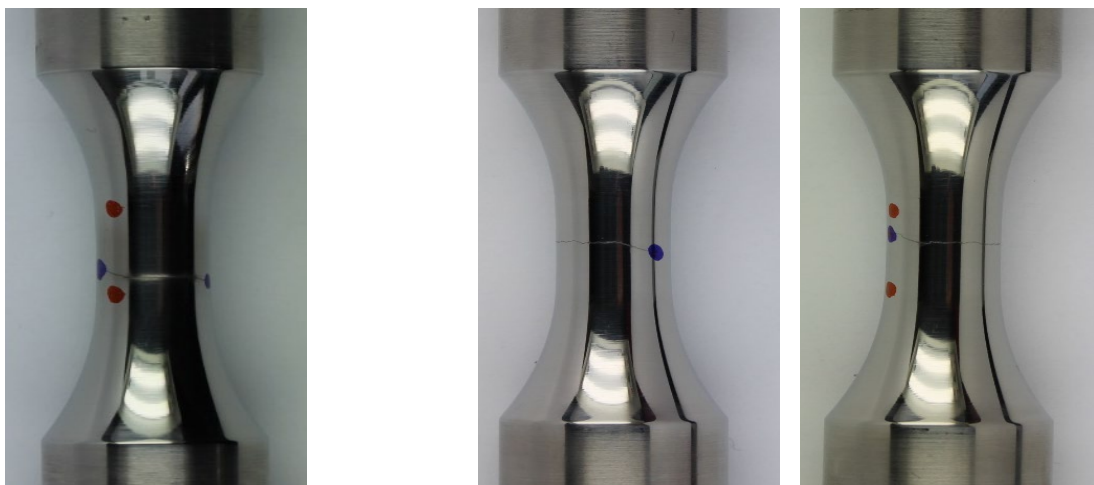


**Abb. 3.2** Bruchflächen der Proben (von links) A6, A19 und C3 mit Markierung der Extensometerposition

Die Form dieser Risse ist in zwei Fällen annähernd linsenförmig, während Probe C3 einen eher sehnenförmigen Riss aufweist.

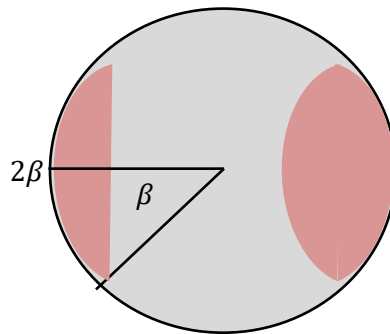
### 3.2 Analysen von nicht aufgebrochenen Ermüdungsproben

An den nicht weiter bearbeiteten Proben kann auch ohne Zerstörung von außen der Umfang des Risses abgeschätzt werden. Die Dehnung wurde jeweils mit einem Extensometer gemessen, wobei die Extensometerlänge 10 mm verwendet wurde. Die Position des Risses relativ zur Sensorposition wurde ausgewertet. Abb. 3.3 zeigt Fotos von zwei Proben mit Anriss, wobei die auf der Oberfläche sichtbaren Endpunkte des Anrisses (blau) und die Extensometerposition (rote Punkte) markiert sind.



**Abb. 3.3** Fotos der am WPT untersuchten Proben 26.1 (links) und 19.1 (rechts; von zwei Seiten)

Zur Bestimmung der Risstiefe muss eine Annahme bezüglich der Rissform getroffen werden. Je nach Form (Linse oder Sehne) wird daher eine andere Risstiefe ermittelt.



**Abb. 3.4** Skizze zur Bestimmung der Risstiefe anhand der Außenlänge

Für einen gemessenen Risswinkel an der Oberfläche ergibt sich bei Annahme der Linsenform im Vergleich zur Sehnenform die doppelte Risstiefe.

$$a_{\text{Sehne}} = R(1 - \cos \beta) \quad (3.1)$$

Dabei ist  $R$  der Probenradius und  $2\beta$  der volle Winkel des Risses an der Probenoberfläche. Die so ausgewerteten Proben sind in Tab. 3.1 aufgeführt.

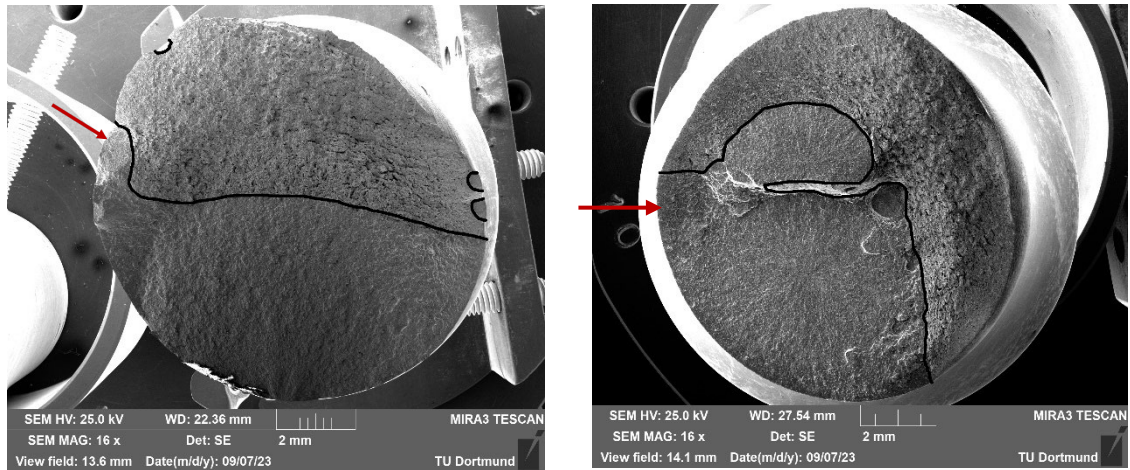
**Tab. 3.1** Auswertung von Ermüdungsproben zur Rissbildung

Probe	$\epsilon_a$ [%]	LD [%]	Zyklus- zahl	$2\beta$ [°]	$a_{\text{Sehne}}$ [mm]	$a_{\text{Linse}}$ [mm]	Pos [°]
19.1	0,4	50	30.580	184	5,2	-	92
26.1	0,8	50	647	138	3,2	6,4	44

LD – Lastabfall

Pos – Position des Extensometers, gemessen zur Mitte des Risses

An den Ergebnissen kann abgelesen werden, dass bei Probe 19.1 mit einem Risswinkel  $>180^\circ$  die Annahme der Linsenform nichtzutreffend ist, da sie den Bruch der Probe anzeigen würde. Zur Verifizierung wurden die Proben dann aufgebrochen und untersucht. Abb. 3.5 zeigt die Bruchflächen der Proben 19.1 und 26.1. Die Position des Extensometers ist jeweils markiert. Die in Tab. 3.1 enthaltenen Winkelangaben zum Riss und der Position des Extensometers sind konsistent mit der Bruchflächendarstellung in Abb. 3.5. Die Bruchfläche in der Probe 19.1 ist nahezu sehnenförmig und ergibt eine maximale Risstiefe von ca. 5,1 mm. In der Probe 16.1 ist die geometrische Form der Bruchfläche komplexer, eher linsenförmig, mit einer maximalen Risstiefe von ca. 6,9 mm.



**Abb. 3.5** Bruchflächen der Proben 19.1 (links) und 26.1 (rechts) mit Markierung der Extensometerposition

### 3.3 Risswachstum in den Proben mit vermessenen Anrissen

Eine Übersicht über die verfügbaren Proben mit Anriss ist in Tab. 3.2 gegeben. In dieser Tabelle ist die Rissform (L: Linse, S: Sehne) und die Position des Extensometers (R: Rissseitig, S: Seitlich, L: Ligamentseitig) angegeben, sowie die Zyklenzahl bis zum Erreichen des Lastabbruchkriteriums.

**Tab. 3.2** Übersicht über alle Anrisse in den Proben

Proben-Nr.	LD [mm]	$\epsilon_a$ [%]	LD [%]	Zyklenzahl	Form	$a$ [mm]	Pos	Pos [°]
A19	5,3	0,25	15	133 578	L	2,0	S	90
A6	5,3	0,4	15	17 543	L	1,7	R	15
C3	5,3	0,5	25	6 880	S	3,0	L	180
19.1	10	0,4	50	30 580	S	5,1	S	92
24.3	10	0,6	50	1 728	S	5,9	S	75
4.1	10	0,8	50	659	S	5,9	S	60
26.1	10	0,8	50	647	L	6,9	R-S	44
29.2	10	0,8	35	779	L	7,9	S	105

LD – Lastabfall

Pos – Position des Extensometers, gemessen zur Mitte des Risses

Für die weitere Auswertung ist auch die Zyklenzahl während des Versuchs bei kleineren Lastabfällen von Interesse. Hier wird der Lastabfall mit der Oberspannung ausgewertet, was analog zu dem in MibaLeb I untersuchten Vorgehen steht, da der Riss in der Kompressionsphase weniger Einfluss hat.

**Tab. 3.3** Zyklen bis zum angegebenen Lastabfall

Proben-Nr.	5 %	10 %	20 %	25 %	50 %
19.1	30079	30174	30302	30357	30580
24.3	1606	1643	1678	1688	1728
4.1	642	648	651	653	659
26.1	549	575	585	592	647
29.2	749	762	772	775	779

Ergänzend wird diese Auswertung auch für die in MibaLeb I untersuchten Proben durchgeführt. Dagegen werden aufgrund der anderen Geometrie nicht die aus der Rohrkomponente gewonnen Proben verwendet.

**Tab. 3.4** Zyklen bis zum angegebenen Lastabfall (MibaLeb I Proben)

Proben-Nr.	5 %	10 %	20 %	25 %
6.16.	22510	22510	22779	23128
6.20.	35484	35540	35606	35630
7.03.	40614	40811	40988	41061
7.10.	34502	34545	34590	34602
7.14.	30854	31324	31707	31863
8.10.	43176	46352	46541	46615
8.17.	32047	32194	32334	32386

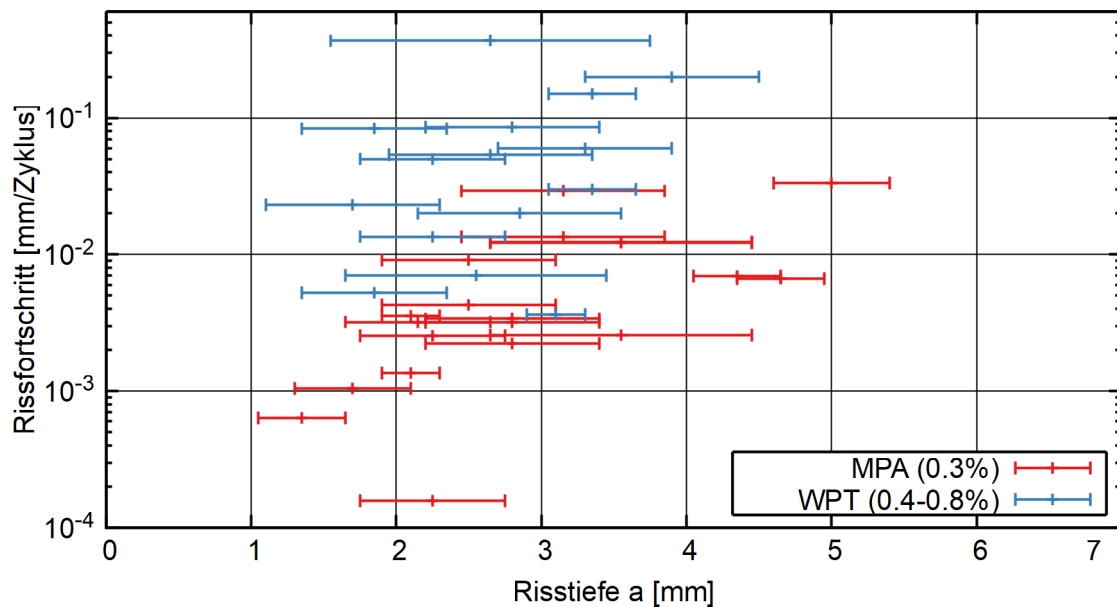
Anhand der Klassifikation der Sensorposition und der Rissform kann vom Lastabfall auf bestimmte Rissgrößen geschlossen werden. Dazu werden die Ergebnisse aus /HEC 21/ verwendet. Die aus diesen Kurven abgeleiteten Rissgrößen sind in Tab. 3.5 zusammengefasst.



**Tab. 3.5** Risstiefenschätzung für die Proben

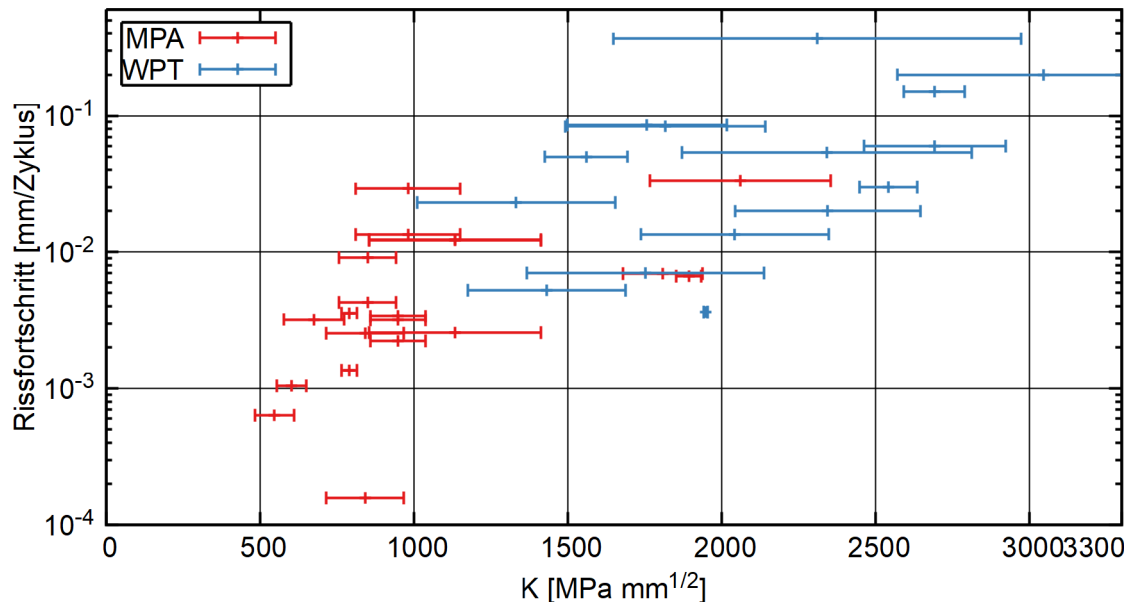
Proben-Nr.	Amplitude	Rissform/Pos	Risstiefe [mm] bei Lastabfall			
			5%	10%	20%	25%
6.16.	0,3	Lens-S	2	2,5	3,1	4
6.20.	0,3	Chord-S	2	2,2	2,8	3,5
7.03.	0,3	Lens-S	2	2,5	3,1	4
7.10.	0,3	Chord-S/L	4,2	4,5	4,8	5,2
7.14.	0,3	Chord-C	1,2	1,5	1,9	2,4
8.10.	0,3	Lens-S	2	2,5	3,1	4
8.17.	0,3	Chord-S	2	2,2	2,8	3,5
19.1	0,4	Chord-S	1,6	2,1	3	3,2
24.3	0,6	Chord-S	2	2,5	3,2	3,5
4.1	0,8	Chord-S	1,6	2,1	3,2	3,5
26.1	0,8	Chord-C	1,4	2	2,5	3,1
29.2	0,8	Lens-S	2,3	3	3,6	4,2

Mit dieser Auswertung kann der Rissfortschritt pro Zyklus ermittelt werden. Der Rissfortschritt als Funktion der Risstiefe ist in Abb. 3.6 dargestellt.



**Abb. 3.6** Rissfortschrittsrate als Funktion der Risstiefe

Aus dieser Auftragung kann die höhere Lastamplitude der WPT-Versuche deutlich entnommen werden: Die Risswachstumsrate ist deutlich höher als bei den MPA-Versuchen bei niedrigerer Amplitude. Von Interesse ist auch die Rissfortschrittsrate als Funktion des Spannungsintensitätsfaktors  $K$ . Dieser kann mit analytischen Formeln berechnet werden. Das Ergebnis ist in Abb. 3.7 dargestellt.

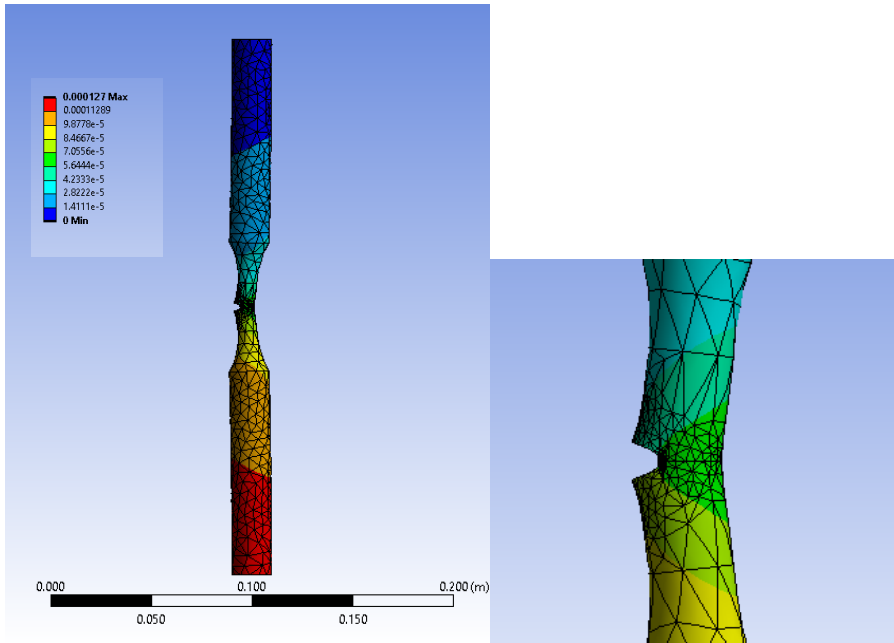


**Abb. 3.7** Risswachstumsrate als Funktion des Spannungsintensitätsfaktors

Dieses Ergebnis zeigt eindrucksvoll, dass aus der Aufzeichnung des Lastabfalls und der Vermessung der Anrisse sowie der relativen Extensometerposition das bruchmechanische Ermüdungsrisswachstum charakterisiert werden kann.

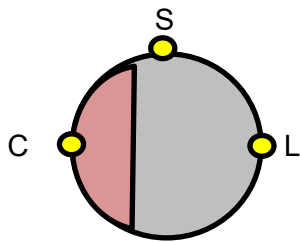
### 3.4 Simulationsmodell einer Ermüdungsprobe mit Anriss

Das 3D-Simulationsmodell einer Ermüdungsprobe (Länge mit Schaft 254 mm, Durchmesser 10 mm) mit Anriss wurde im Finite Elemente Programm ANSYS Mechanical erstellt. Dabei wird das Rissligament eines postulierten Sekantenrisses mit 7 mm Tiefe über Kontakte zwischen definierten Flächen der oberen und unteren Hälfte der Probe modelliert. Eine linear ansteigende Verschiebung wird auf die Stirnfläche des Schafts aufgeprägt. Innerhalb von 100 Lastschritten wird quasistatisch eine Verschiebung von 0,5 mm des Schaftendes aufgebracht. Abb. 3.8 zeigt die Verformung der Probe mit Verformungsüberhöhungsfaktor 100 im Lastschritt 25.



**Abb. 3.8** Berechnete Verformung der Probe mit Farbdarstellung der axialen Verschiebung im Lastschritt 25 (Verformungsüberhöhungsfaktor 100)

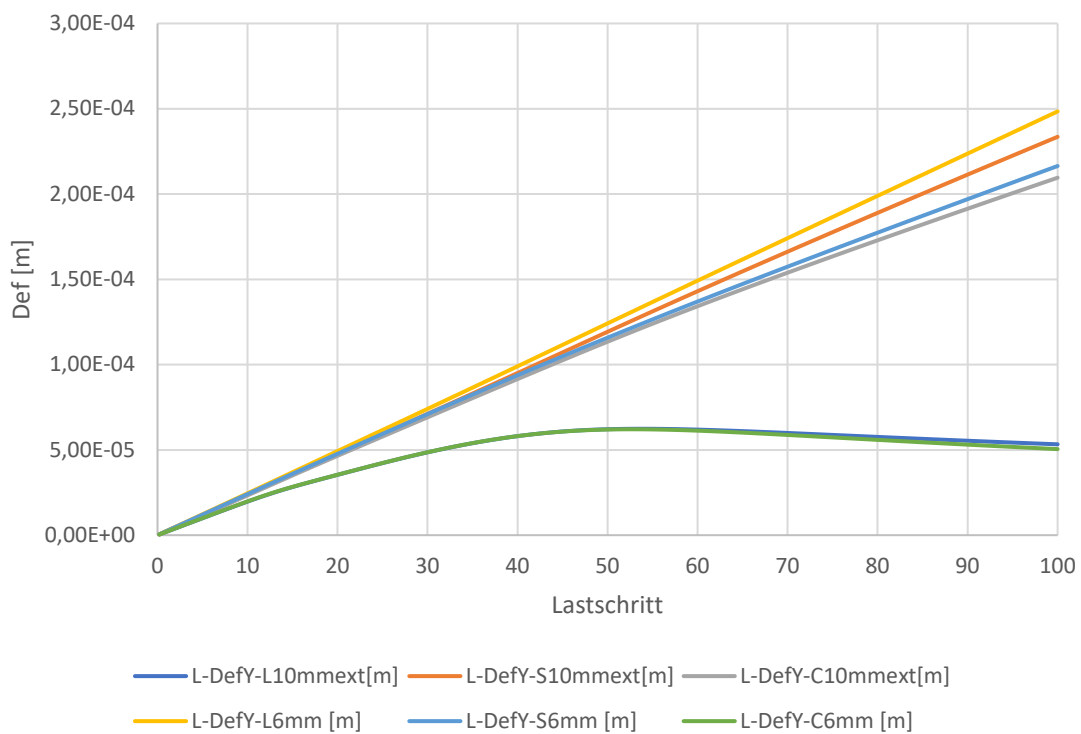
Zur Bestimmung der Extensometerverschiebung wird die Verschiebung in Lastrichtung an bestimmten Punkten ausgewertet. Die Extensometerverschiebung ist abhängig von der Position des Extensometers relativ zur Rissposition. Daher werden die im Querschnitt der Probe markierten Auswertepositionen (siehe Abb. 3.9) eingeführt.



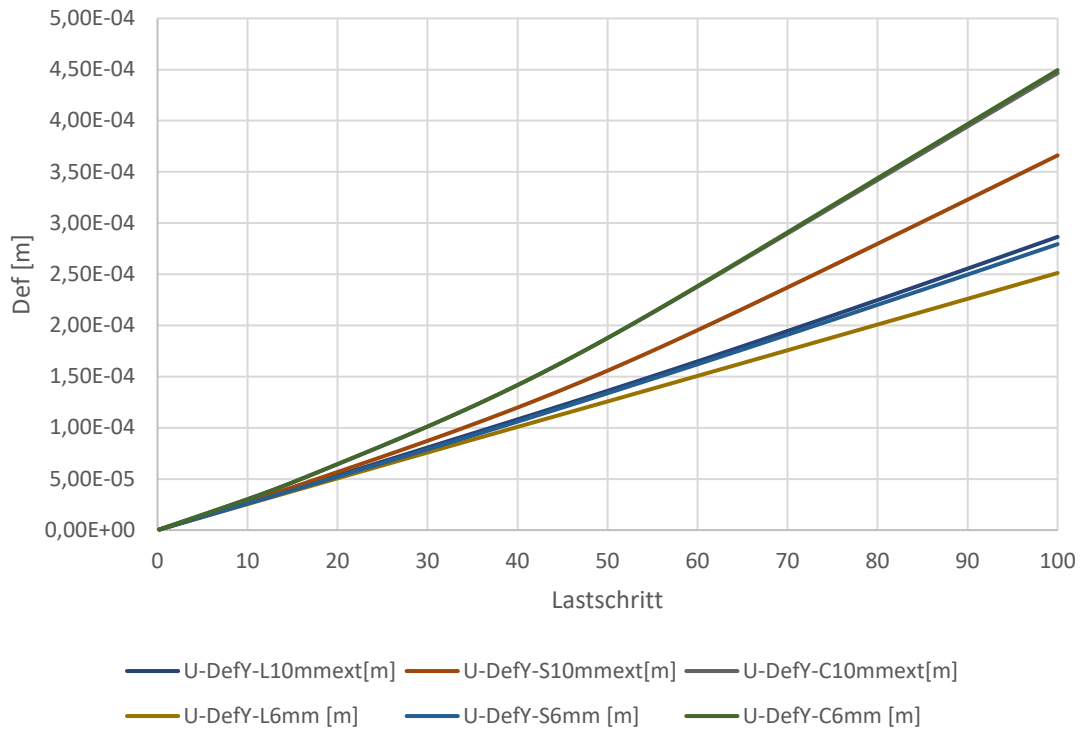
**Abb. 3.9** Schema des Querschnitts der Probe mit möglichen Extensometerpositionen relativ zum Riss

### 3.5 Auswertung der Extensometerverschiebung

Zur Auswertung der Lösung werden die Verschiebungen der Extensometer als Funktion der Zeit dargestellt. Durch die zugbedingte Dehnung der Probe sind alle Verschiebepositionen positiv. In Abb. 3.10 bzw. Abb. 3.11 sind die axialen Verschiebungen (Y) an den Positionen L, S und C (siehe Abb. 3.9) für die Extensometerlängen 10 mm und 6 mm an der unteren bzw. oberen Extensometerposition (L bzw. U) dargestellt. Die Unterschiede zwischen den beiden Extensometerlängen sind sehr gering. In Abb. 3.10 ist der Verlauf über dem Riss (Position C) gegenüber den anderen Positionen flacher infolge der Plastifizierung im Bereich der Rissfront.

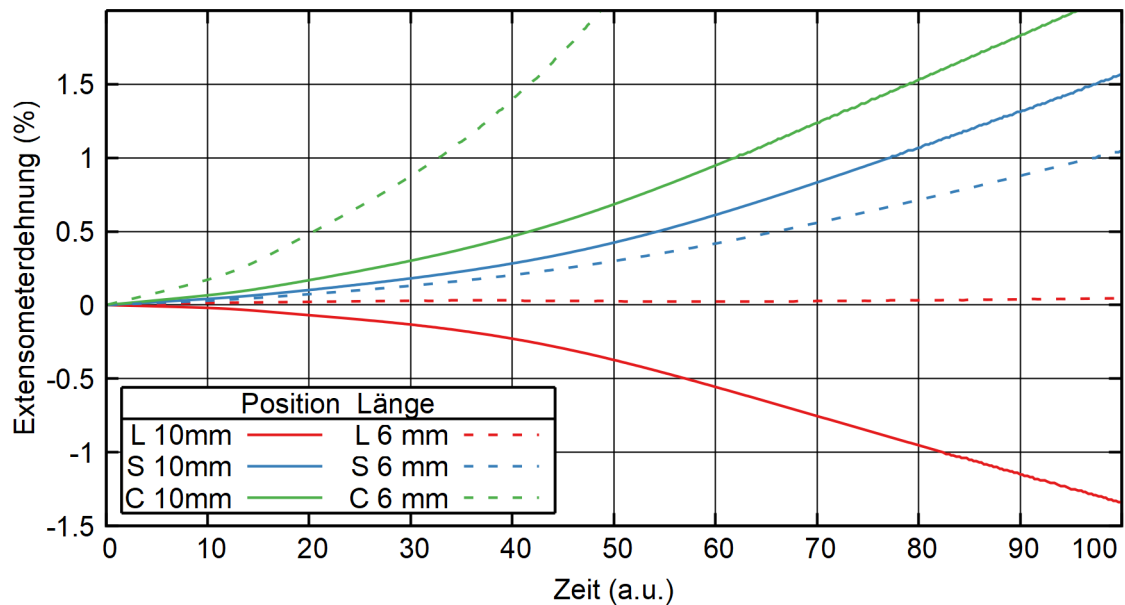


**Abb. 3.10** Auswertung der Verschiebungen an der Extensometerposition L



**Abb. 3.11** Auswertung der Verschiebungen an der Extensometerposition U

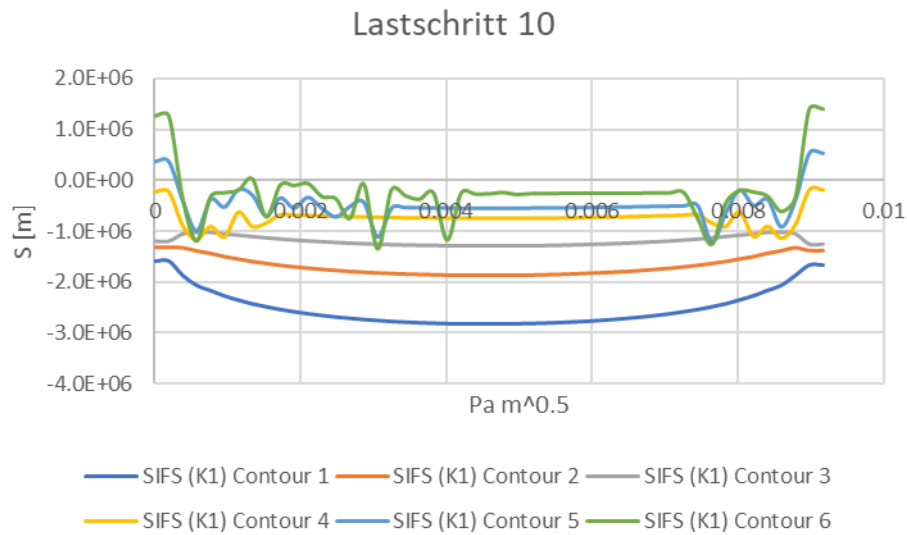
Die Bestimmung der Extensometerdehnungen erfolgt durch die Bildung der Differenz zwischen den oberen und unteren Extensometerpunkten und der Bildung des Quotienten mit der Nominallänge. Diese Auswertung ist in Abb. 3.12 dargestellt. Wie zu erwarten sind die Extensometerdehnungen an der Position der Rissmitte (C) größer als an den Positionen S und L (siehe Abb. 3.9). Der Unterschied zwischen den beiden Extensometerlängen ist teilweise erheblich, wobei die Extensometerdehnungen mit zunehmender Extensometerlänge kleiner werden.



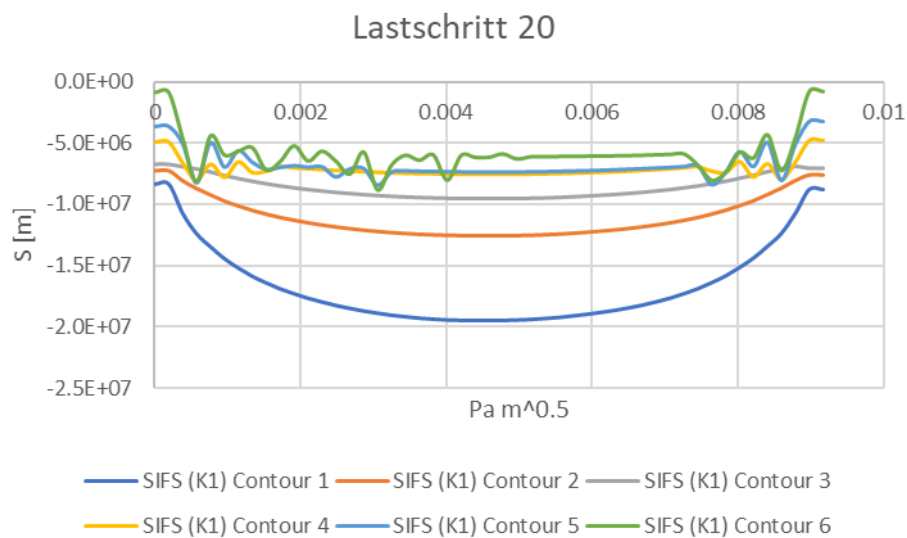
**Abb. 3.12** Extensometerdehnung, berechnet aus den Punktverschiebungen (Zeit entspricht Lastschritt)

### 3.6 Bestimmung der Spannungsintensitätsfaktoren

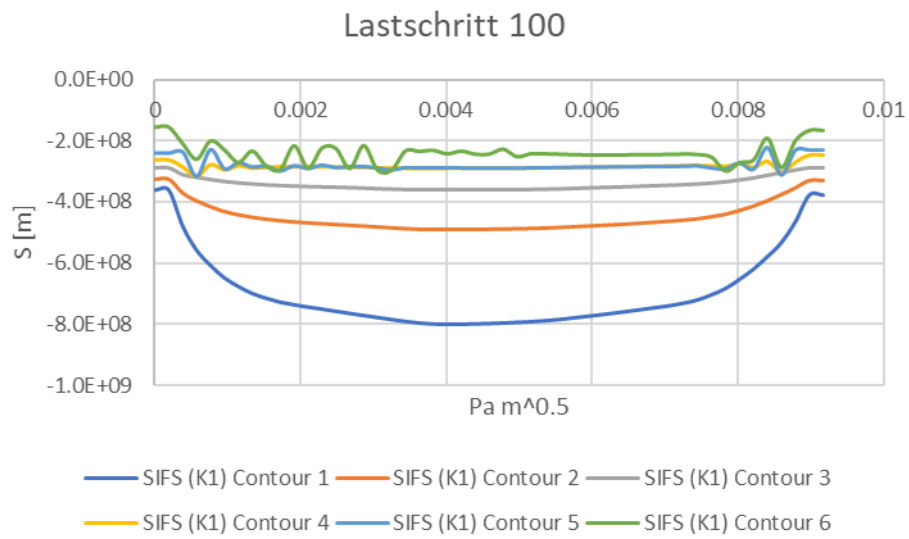
Die Spannungsintensitätsfaktoren ( $K_I$ ) wurden mit ANSYS Mechanical für ausgewählte Lastschritte entlang der Rissfront berechnet. Dabei wurden verschiedene Auswertebereiche (1 – kleinster Bereich, 6 – größter Bereich) für die numerische Integration berücksichtigt. Erfahrungsgemäß sind die Werte mit den größten Auswertebereichen zufriedenstellend. Die Auswertung erfolgt für die Lastschritte 10, 20 und 100. Die  $K_I$ -Verläufe an der Rissfront für die verschiedenen Auswertebereiche sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die berechneten Werte für den  $K_I$ -Faktor sind negativ, obwohl eine Zugbelastung vorliegt. Dies liegt an der Orientierung des Koordinatensystems in der Simulation, d.h. die Verschiebung wird in (-y) – Richtung aufgebracht. Im Lastschritt 10, 20 bzw. 100 wird für den größten Auswertebereich ein  $K_I$ -Niveau von ca.  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$ ,  $7 \text{ MPa m}^{1/2}$  bzw.  $270 \text{ MPa m}^{1/2}$  erreicht. Dabei wird die zähbruchmechanische Rissinitiation erreicht.



**Abb. 3.13**  $K_I$ – Faktor [ $\text{Pa m}^{1/2}$ ] für Lastschritt 10



**Abb. 3.14**  $K_I$ – Faktor [ $\text{Pa m}^{1/2}$ ] für Lastschritt 20



**Abb. 3.15**  $K_i$  – Faktor [ $\text{Pa m}^{1/2}$ ] für Lastschritt 100





## **4 Data Mining Analyse von instrumentierten Ermüdungsversuchen mit Maschinellem Lernen**

Die Sensorik zur Erfassung der Werkstoffzustände in den verschiedenen Experimenten ist vielfältig und demzufolge auch mit großen Datenmengen verbunden. Dies erfolgte bei der GRS mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN). Einher mit den KNN geht auch die Frage der Sensorfusion bzw. der Informationsfusion, was auch hier untersucht wurde. Es wurden mit dem TensorFlow-Paket die Sensordaten ausgewählter Versuche untersucht. Die mit diesen Werkzeugen aus dem Datenstrom extrahierten Informationen wurden dann Werkstoffinformationen aus den vielfältigen in MibaLeb I und II durchgeführten Werkstoff-Experimenten gegenübergestellt, aus denen wiederum signifikante Parameter abgeleitet wurden.

Die durchgeführten Arbeiten zum Data Mining besitzen zwei Ausgangspunkte: Einerseits die Versuchsdaten, und andererseits die Techniken und Werkzeuge. Beides wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### **4.1 Versuchsdaten MibaLeb I**

Die Daten aus der ersten Phase des MibaLeb-Projekts /ACO 20/ dienen als Grundlage für die Untersuchungen. Sie beinhalten Versuche an ungekerbten und an gekerbten Proben, die jeweils als Einstufen- oder Dehnungssteigerungs- bzw. Laststeigerungsversuche bei Raumtemperatur, bei erhöhter Temperatur sowie unter SWR-Bedingungen durchgeführt wurden. Außerdem wurden manche Proben im Ausgangszustand (AZ) getestet, während andere bei eingestellten Alterungsstufen (AS) geprüft wurden.

#### 4.1.1 Versuche an ungekerbten Proben

##### 4.1.1.1 Versuche bei Raumtemperatur

Bei Raumtemperatur sind Dehnungssteigerungsversuche (Tab. 4.1) und Einstufenversuche (Tab. 4.2) dokumentiert.

**Tab. 4.1** Ergebnisse der Dehnungssteigerungsversuche

Proben-Nr.	$\Delta\varepsilon_{a,t}$ (%)	Zustand	Medium	$\varepsilon_{a,t}$ beim Versagen (%)	$N_B$
2.16	0,05	AZ	L	0,7	11.602

**Tab. 4.2** Ergebnisse der Einstufenversuche

Proben-Nr.	$\varepsilon_{a,t}$ (%)	Zustand	Medium	$N_B$	$N_{data}$
2.8	0,25	AZ	L	49.170	
2.4	0,5	AZ	L	4.680	4217
2.1	0,7	AZ	L	800	?

Beim Raumtemperatur-Versuch 2.8 wurden keine Hysteresen aufgenommen, sondern nur vereinzelte Messungen während des Versuchs im Abstand von einigen Sekunden. Es wurden die Temperatur sowie das Magnetfeld gemessen. Beim Versuch 2.4 ergibt sich zumindest eine Zeitreihe für die Messung dreier Temperaturen.

#### 4.1.1.2 Versuche bei erhöhter Temperatur

Bei erhöhter Temperatur wurden Dehnungssteigerungsversuche (Tab. 4.3) und Einstufenversuche (Tab. 4.4) durchgeführt. Die Einstufenversuche sind alle resistometrisch instrumentiert.

**Tab. 4.3** Ergebnisse der Dehnungssteigerungsversuche

Proben-Nr.	$\Delta\varepsilon_{a,t}$ (%)	Zustand	Temperatur (°C)	Medium	$\varepsilon_{a,t}$ beim Versagen (%)	$N_B$
10.5	0,05	AZ	240	L	1,0	12.812
6.6	0,05	AZ	300	L	1,05	12.951
10.9	0,05	AS	240	L	1,0	12.767
10.20	0,05	AS	300	L	0,85	12.330

$\varepsilon_{a,t}$  Totaldehnungsamplitude

$N_B$  Bruchlastspielzahl

**Tab. 4.4** Ergebnisse der Einstufenversuche

Proben-Nr.	$\varepsilon_{a,t}$ (%)	Zustand	Temperatur (°C)	Medium	$N_B$	$N_{data}$
4.11	0,55	AZ	240	L	8.883	8 875
9.8	0,8	AZ	240	L	1.314	1 314
8.8	0,55	AZ	300	L	15.182	15 180
8.1	0,8	AZ	300	L	1.902	1 903
8.14	0,3	AS	240	L	67.041	67 122
10.14	0,55	AS	240	L	5.561	5 554
10.7	0,3	AS	300	L	39.387	21 513
8.19	0,55	AS	300	L	8.180	8 324

Bei mehreren Proben (z. B. 8.14, 8.19) liegt lediglich eine Zeitreihe vor. Da in Mibaleb-I eine Dehnrate von  $\dot{\varepsilon} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  festgelegt wurde, kann bei einer Dehnamplitude von  $3 \cdot 10^{-3}$  davon ausgegangen werden, dass eine Periode  $4 \varepsilon / \dot{\varepsilon}$  d.h. 3 s umfasst. Es fällt auf, dass die so ermittelten Zyklenzahlen sich von den oben tabellierten leicht unterscheiden, jener Wert aus der Datenreihe ist in der Spalte  $N_{data}$  aufgeführt.

#### 4.1.1.3 Versuche unter Siedewasserreaktorbedingungen (70 bar, 240°C)

Bei SWR-Bedingungen wurden Dehnungssteigerungsversuche (DSV), siehe Tab. 4.5 und Einstufenversuche (ESV), siehe Tab. 4.6 durchgeführt.

**Tab. 4.5** Ergebnisse der Dehnungssteigerungsversuche

Proben-Nr.	$\Delta\varepsilon_{a,t}$ (%)	Zustand	Medium	Test	Temperatur (°C)	$\varepsilon_{a,t}$ beim Versagen (%)	$N_B$
8.9	0,05	AZ	SWR	DSV	240	0,85	12.184

**Tab. 4.6** Ergebnisse der Einstufenversuche

Proben-Nr.	$\varepsilon_{a,t}$ (%)	Zustand	Medium	Test	Temperatur (°C)	$N_B$
9.2	0,3	AZ	SWR	ESV	240	17.545
9.13	0,55	AZ	SWR	ESV	240	2.325

#### 4.1.1.4 Versuche bei Raumtemperatur

Bei Raumtemperatur sind sieben Laststeigerungsversuche (Tab. 4.7) und 20 Einstufenversuche (Tab. 4.8) verfügbar.

**Tab. 4.7** Ergebnisse der Laststeigerungsversuche an gekerbten Proben

Proben-Nr.	$\Delta S_a$ (MPa)	Zu-stand	Me- dium	Kerbra- dius (mm)	$S_a$ beim Versagen (MPa)	$N_B$
13.15	20	AZ	L	0,35	320	22.266
11.2	20	AZ	L	0,5	320	23.306
11.4	20	AS	L	0,35	300	21.596
3.6	20	AS	L	0,5	280	19.827
14.15	20	AZ	MB	0,35	320	22.255
1.14	20	AZ	MB	0,5	340	24.022
11.8	20	AS	MB	0,35	300	21.941

$S_a$  Nennspannungsamplitude

**Tab. 4.8** Ergebnisse der Einstufenversuche an gekerbten Proben

Proben-Nr.	$S_a$ (MPa)	Zustand	Kerbradius (mm)	Medium	$N_B$
13.20	180	AZ	0,35	L	>200.000
14.12	220	AZ	0,35	L	40.487
13.4	260	AZ	0,35	L	11.614
12.19	300	AZ	0,35	L	1.661
13.10	300	AZ	0,35	L	2.362
14.4	300	AZ	0,35	L	1.986
1.1	220	AZ	0,5	L	144.532
1.3	300	AZ	0,5	L	2.468
1.8	300	AZ	0,5	L	4.287
1.16	300	AZ	0,5	L	3.879
12.1	220	AS	0,35	L	7.303
11.16	300	AS	0,35	L	3.062
3.7	220	AS	0,5	L	12.711
3.4	300	AS	0,5	L	1.523
12.16	220	AZ	0,35	MB	54.243
14.9	220	AZ	0,35	MB	50.243
12.18	300	AZ	0,35	MB	1.954
14.17	300	AZ	0,35	MB	1.958
11.3	220	AS	0,35	MB	9.146
12.2	300	AS	0,35	MB	1.033

#### 4.1.1.5 Versuche bei erhöhter Temperatur

Bei erhöhter Temperatur wurden drei LSV (Tab. 4.9) und zwei ESV (Tab. 4.10) durchgeführt.

**Tab. 4.9** Ergebnisse der Laststeigerungsversuche

Proben-Nr.	$\Delta S_a$ (MPa)	Zu-stand	Me-dium	Tempera-tur (°C)	Kerbra-dius (mm)	$S_a$ beim Versagen (MPa)	$N_B$
11.9	20	AZ	L	240	0,35	280	20.402
3.17	20	AZ	L	240	0,5	280	20.592
3.8	20	AZ	L	300	0,5	260	19.557

**Tab. 4.10** Ergebnisse der Einstufenversuche

Proben-Nr.	$S_a$ (MPa)	Zustand	Kerbradius (mm)	Medium	Temperatur (°C)	$N_B$
14.11	220	AZ	0,35	L	240	7.820
12.15	220	AZ	0,35	L	300	6.440

#### 4.1.1.6 Versuche unter Siedewasserreaktorbedingungen (70 bar, 240°C)

Bei SWR-Bedingungen wurden zwei LSV (Tab. 4.11) und vier ESV (Tab. 4.12) dokumentiert.

**Tab. 4.11** Ergebnisse der Laststeigerungsversuche

Proben-Nr.	$\Delta S_a$ (MPa)	Zustand	Me-dium	Tempera-tur (°C)	Kerbra-dius (mm)	$S_a$ beim Versagen (MPa)	$N_B$
12.9	20	AZ	SWR	240	0,35	240	17.119
11.5	20	AS	SWR	240	0,35	240	17.123

**Tab. 4.12** Ergebnisse der Einstufenversuche an gekerbten Proben

Proben-Nr.	$S_a$ (MPa)	Zustand	Kerbradius (mm)	Medium	Temperatur (°C)	$N_B$
11.7	220	AZ	0,35	SWR	240	7.110
14.14	300	AZ	0,35	SWR	240	273
1.17	220	AS	0,35	SWR	240	3.005
12.3	300	AS	0,35	SWR	240	80

## 4.2 Datenaufbereitung

Im Bereich der Data Science und des Maschinellen Lernens gibt es eine 80-20-Regel, die besagt, dass 80 % des Aufwands die Akquise und die Vorbereitung der Daten betrifft, und 20 % die eigentliche Anwendung des Maschinellen Lernens. Die Verarbeitung von Daten in neuronalen Netzwerken erfordert eine vektorisierte und standardisierte Repräsentation der Daten.

### 4.2.1 Zyklenerlegung

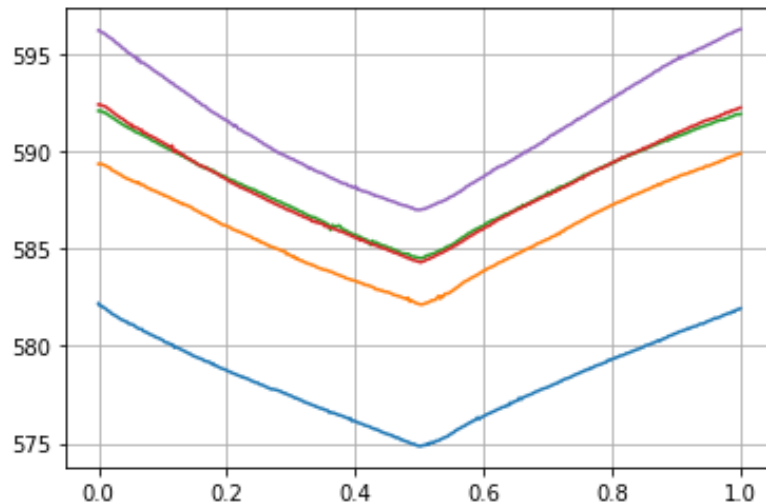
Komplikationen treten außerdem auf, wenn die Datei keine Information zu den Zyklen beinhaltet, sondern lediglich eine absolute Zeitangabe. Sind die Dehnrates  $\dot{\epsilon}$  und die Dehnungsamplitude  $\epsilon$  bekannt, so kann die Periodenlänge berechnet werden, da innerhalb einer Periode viermal eine Dehnungsänderung in Höhe der Amplitude stattfindet.

$$T = 4 \epsilon / \dot{\epsilon} \quad (4.1)$$

In MibaLeb I betrug die Dehnrates 0.4% pro Sekunde bei totaldehnungskontrollierten Einstufenversuchen.

Diese Genauigkeit ist zwar recht gut, über einige tausend Zyklen jedoch verschiebt sich unweigerlich die Phase. Eine Alternative ist daher die Kalibrierung auf lokale Extrema. Die Zyklen werden so beispielsweise als Abschnitte zwischen zwei Maxima definiert. Dies vermeidet die Phasenverschiebung über die Versuchsdauer. Als Beispiel sind einzelne auf diese Weise extrahierte Zyklen in Abb. 4.1 dargestellt.





**Abb. 4.1** Zyklen 10, 500, 1000, 1500 und 1800 des Versuchs 8.1, extrahiert mit der Maximum-Methode

Diese Methode weist naturgemäß am Rand Ungenauigkeiten auf (der Datenpunkt mit dem Maximum wird tatsächlich in diesem Ansatz beiden Zyklen zugeschlagen), doch ist die Auswertemethode unabhängig von den Bedingungen des Versuchs.

#### 4.2.2 Datenbehandlung

Während die Ermüdungsschädigung bei Einstufenversuchen recht klar durch die aktuelle Zyklenzahl dividiert durch die Bruchlastspielzahl definiert ist, ist die Spezifizierung geeigneter Resistometriedaten zunächst offen. Die Messdaten umfassen reine Zeitreihen des elektrischen Widerstands, diese Momentaufnahmen scheinen nicht geeignet für eine weitere Analyse. Sinnvoll erscheint dagegen die Reduktion der Daten auf jeweils einen Zyklus. Diese Einteilung führt das Problem auf eine Zeitreihenanalyse zurück, für die es mehrere Standardansätze im Data Mining gibt /LAS 04/ /FU 11/.

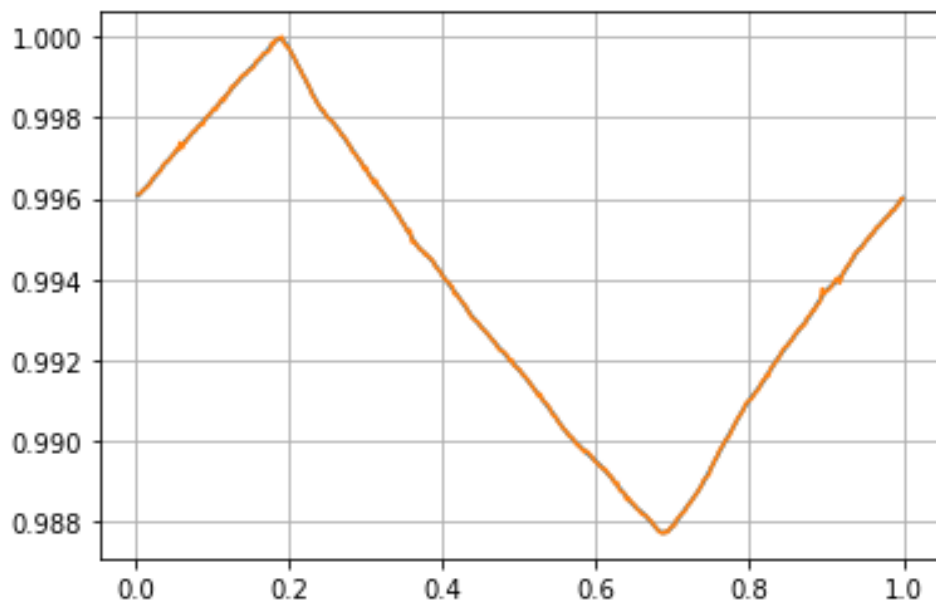
Innerhalb eines Zyklus können die resistometrischen Daten durch folgende Größen charakterisiert werden:

- Stückweise Lineare Darstellung
- Fourierreihen-Koeffizienten des elektrischen Widerstands
- Varianzen
- Zeitliche Autokorrelationen

Für die weitere Verarbeitung werden die Daten normalisiert, damit sie in der Nähe von 0 bzw. 1 liegen. Bei der Auswahl wurde daher darauf geachtet, dass die Charakteristiken nicht durch eine Normalisierung verloren gehen und keine Referenzdaten (z. B. der erste Zyklus der weitgehend ungeschädigten Probe) erforderlich sind. Die Eignung von bestimmten Charakteristiken muss sich durch die Lernphase bewähren. In den folgenden Unterabschnitten werden verschiedene Charakteristiken erprobt.

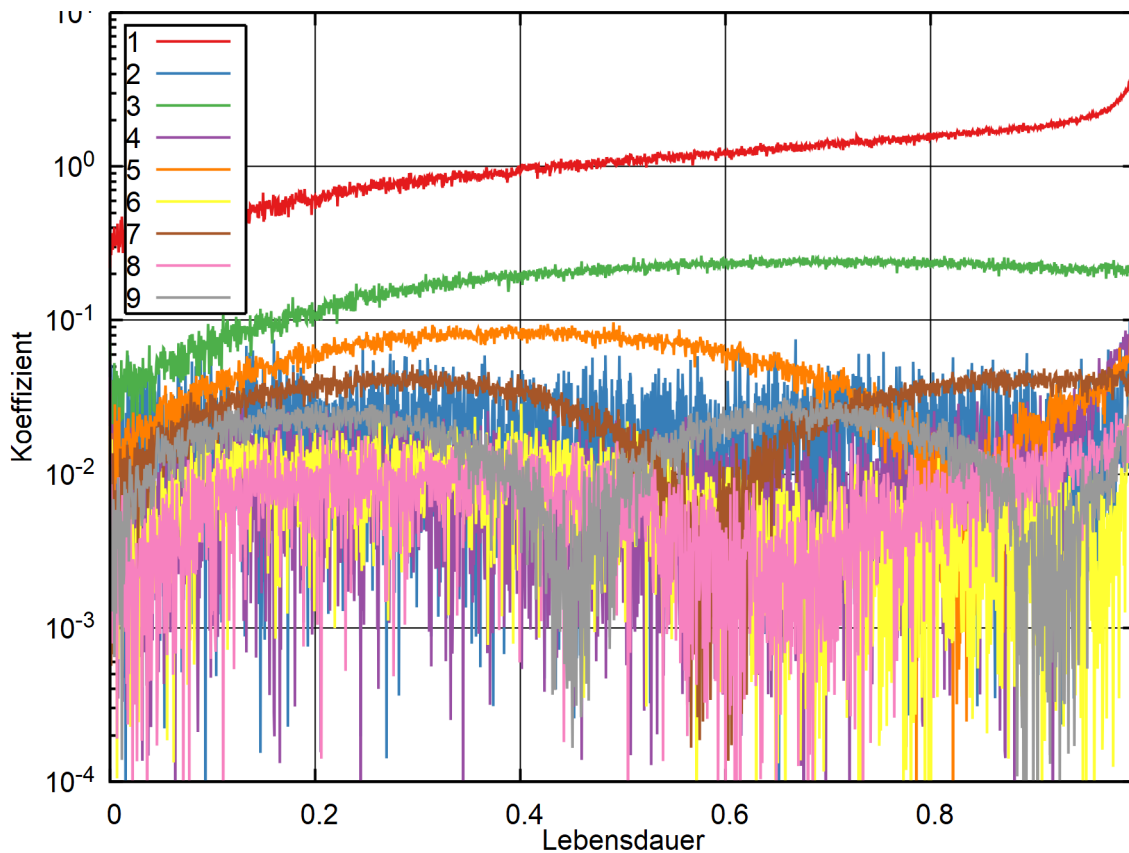
#### 4.2.2.1 Zyklenweise Fourierentwicklung der Zeitreihe

Aufgrund der Periodizität des Signals liegt eine Analyse eines einzigen Zyklus mit einer diskreten Fourierreihe nahe. In dieser Variante wird die tatsächliche Zeitreihe als Ausgangspunkt verwendet. Mit dem Skript `datapreprocessor.py` werden die Daten einer Probe eingelesen, ein Zyklus ausgewählt und die Fourierreihe bis zum gewünschten Grad erzeugt; anschließend wird eine grafische Auftragung ausgegeben. In Abb. 4.2 ist ein Zyklus (950, Probe 8.1) gezeigt, der normalisiert wurde und bei dem eine Fourierreihe mit 32 Summanden angepasst wurde.



**Abb. 4.2** Normalisierte Widerstandsmessung innerhalb eines Zyklus

Mit dieser Begrenzung wird aus der Zeitreihe eines Zyklus ein Tensor von 66 realen Eingabewerten (aus 33 komplexen Fourierkoeffizienten) und ein Lebensdauerwert auf dem Einheitsintervall  $[0,1]$ . Die Entwicklung der Absolutwerte der Realteile der ersten neun Koeffizienten ist in Abb. 4.3 dargestellt.



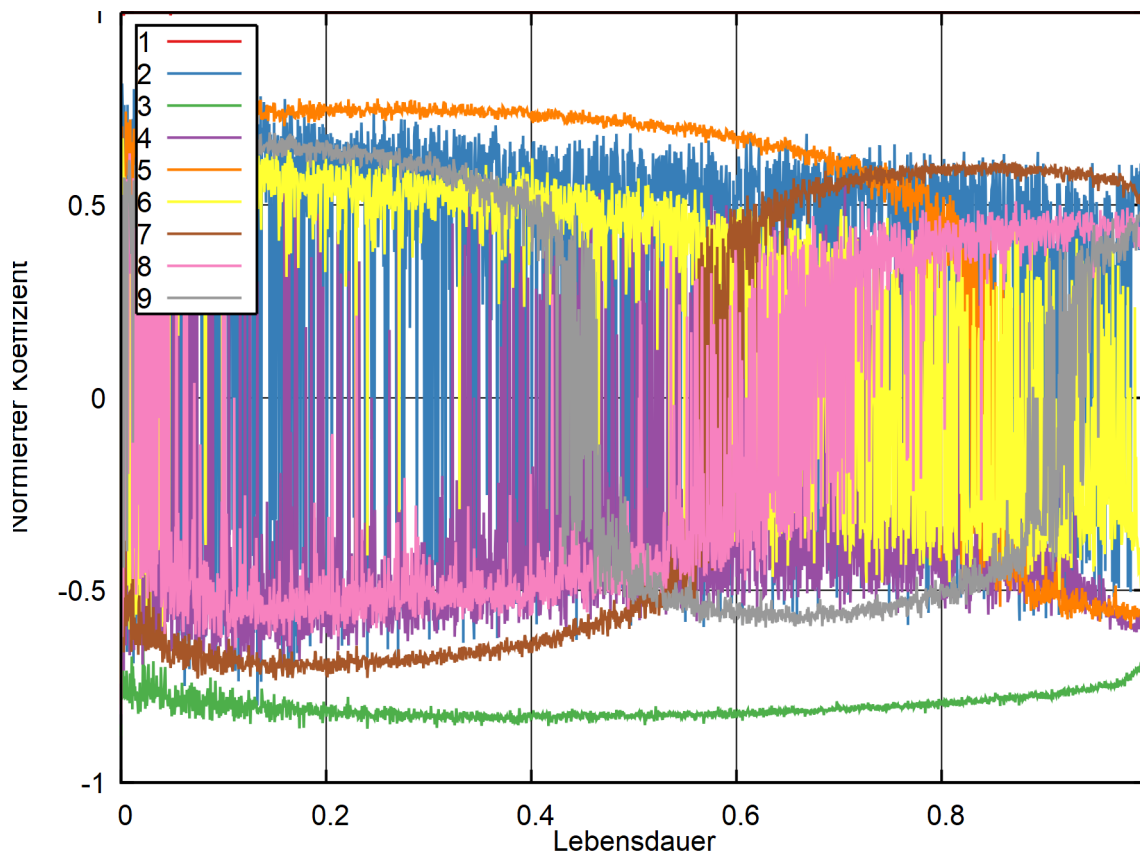
**Abb. 4.3** Entwicklung der Fourierkoeffizienten bei Probe 8.1

In dieser Aufstellung ist bereits ein deutlicher Trend zu erkennen, und es ist daher zu erwarten, dass auch das neuronale Netz diese Klassifizierung vornehmen kann. Jedoch ist diese Aufstellung aus Sicht der Normalisierung der Daten noch nicht befriedigend, da sich die verschiedenen Koeffizienten um Größenordnungen unterscheiden. Da die Messmethodik des Widerstands nahelegt, dass sehr kleine Koeffizienten aufgrund Messungenauigkeiten keine verwertbaren Informationen enthalten, können die Koeffizienten absolut größer als  $1e-4$  auf das Intervall  $[-1,1]$  gestreckt werden.

$$y_i = \text{sgn}(x_i) \frac{1}{4} \left( \log_{10} \frac{|c_i|}{\max(c)} + 4 \right) \quad (4.2)$$

Dabei ist das Maximum jeweils innerhalb eines Zyklus zu bestimmen, nicht über alle Zyklen – das ist wichtig für die spätere Analyse, da jeweils ein Zyklus zur Bestimmung

des Ausnutzungsgrades ausreichen soll. Die so ermittelten Koeffizienten sind in Abb. 4.4 dargestellt.



**Abb. 4.4** Normierte Fourierkoeffizienten bei Probe 8.1

In dieser Abbildung lässt sich erahnen, dass bereits mit den ersten neun Koeffizienten eine Aussage getroffen werden kann. Insbesondere die Koeffizienten 5 (orange) und 7 (braun) zeigen eine fast monotone Korrelation des Signals mit der Lebensdauer.

#### 4.2.2.2 Einbeziehung des Ausgangszustands

Zusätzliche Informationen können eingehen, indem der ungeschädigte Ausgangszustand anhand der ersten Testzyklen in die Analyse aufgenommen wird. In diesem Fall stellt die Änderung des ZfP-Signals gegenüber den ersten Zyklen eine wertvolle Informationsquelle dar. Dieses Vorgehen ist im Allgemeinen bei Mehrstufenversuchen sowie bei Komponentenversuchen nicht anwendbar, aber für den Einsatz der Lebensdauerbestimmung eignet sich dieser Ansatz.

Außerdem ist die Verwendung von mehreren Zyklen anstatt einem einzigen bei der Koeffizientenzerlegung zu erwägen, da möglicherweise die Fourier-Koeffizienten dadurch weniger rauschbehaftet sind. Auch die zur Charakterisierung von Daten häufig verwendeten Maße wie Skewness (Schiefe), Kurtosis und Total Harmonic Distortion können in die Auswertung mit einbezogen werden.

#### **4.2.3 Datenladen und Präprocessing**

Gemäß /CHO 20/ erfordert die Verarbeitung von Daten in neuronalen Netzwerken eine standardisierte und vektorisierte Repräsentation von Daten. Bei csv-Dateien erfordert dies das Einlesen und die Konvertierung zu Fließkomma-Tensoren bzw. die Indizierung von Kategorien mit Ganzzahlen. Die Normalisierung bedeutet die Transformation auf einen Mittelwert von Null und eine Einheitsvarianz, oder auf das Intervall  $[0,1]$ . Letzteres ist für die Ermüdungsschädigung bereits gegeben.

Für die Verwendung von TensorFlow eignet sich das Dataset-Format besonders /ABA 15/. Das Laden von csv-Dateien kann auch mit dem Pandas-Framework in Python erfolgen, jedoch ist das TensorFlow-Dataset-Format besonders geeignet für große Datenmengen, da sie erst bei Bedarf von der Festplatte eingelesen werden und nicht alle in den Arbeitsspeicher geladen werden.

#### **4.3 Techniken und Werkzeuge des maschinellen Lernens**

Bezüglich Techniken und Werkzeuge des maschinellen Lernens wird auf bestehende Software-Pakete zurückgegriffen. Das TensorFlow-Paket von Google, das sich über das Python-Rahmenwerk Keras steuern lässt, ist sehr verbreitet.

### 4.3.1 Keras Workflow

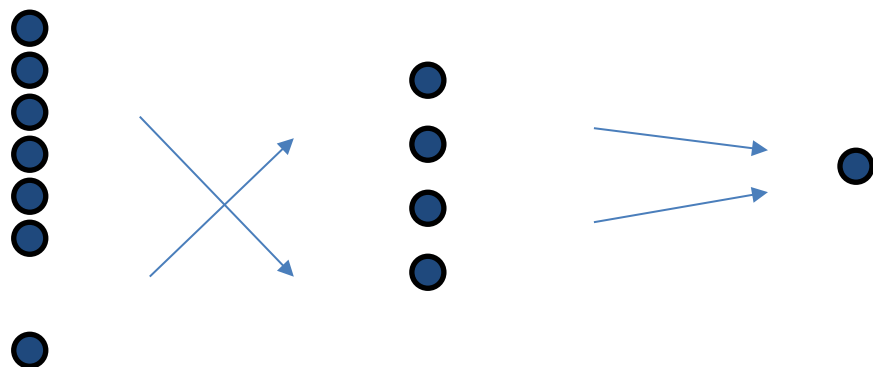
Die folgenden Arbeitsschritte beim Maschinellen Lernen orientieren sich an /CHO 20/ und /BRO 20/:

- Präprozessing
- Datenladen
- Erstellen eines Modells (d.h. das künstliche neuronale Netzwerk)
- Trainieren des Modells/Netzwerks
- Auswertung von Testdaten und neuen Daten mit dem trainierten Modell

Anhand dieser Schritte wird die Analyse der resistometrischen Daten der Ermüdungsproben durchgeführt.

### 4.3.2 Aufbau des künstlichen Neuronales Netzwerks

Das künstliche Neuronale Netz besteht aus mehreren Schichten, von denen die erste die Eingabeschicht und die letzte die Ausgabeschicht ist. Entsprechend der Fourier-Koeffizienten hat die Eingabeschicht die Einheit 64. Die letzte Ausgabe ist ein Wert im Einheitsintervall (siehe Abb. 4.5).



**Abb. 4.5** Veranschaulichung des Aufbaus eines künstlichen neuronalen Netzkes

Für die Behandlung des Datensatzes bieten sich Schichten des Dense-Typs an. In der Literatur (z. B. /HEA 08/) werden ein bis zwei verdeckte Schichten als ausreichend bezeichnet, um eine beliebige Klassifizierung vornehmen zu können. Dagegen ist eine einzige Schicht nur ausreichend für eine lineare Separierung von Klassen. Umgekehrt

bewähren sich tiefe Netze oft mit besserer Genauigkeit. In der Literatur wird ausgeführt, dass weniger Knoten pro Schicht bei vielen Schichten zu guten Ergebnissen führen – der entscheidende Vorteil des Deep Learning.

Das Ziel der Bestimmung einer kontinuierlichen Variablen im Einheitsintervall  $[0,1]$  entspricht einem sogenannten Regressionsproblem im Maschinellen Lernen, im Gegensatz zu einem Kategorisierungsproblem mit diskreten Variablenwerten. Es wird ein KNN mit zwei verborgenen Schichten und jeweils 64 Knoten mit ReLU-Aktivierungsfunktionen<sup>1</sup> verwendet.

#### **4.4 Anwendung von überwachtem Lernen**

##### **4.4.1 Analyse von Probe 8.1**

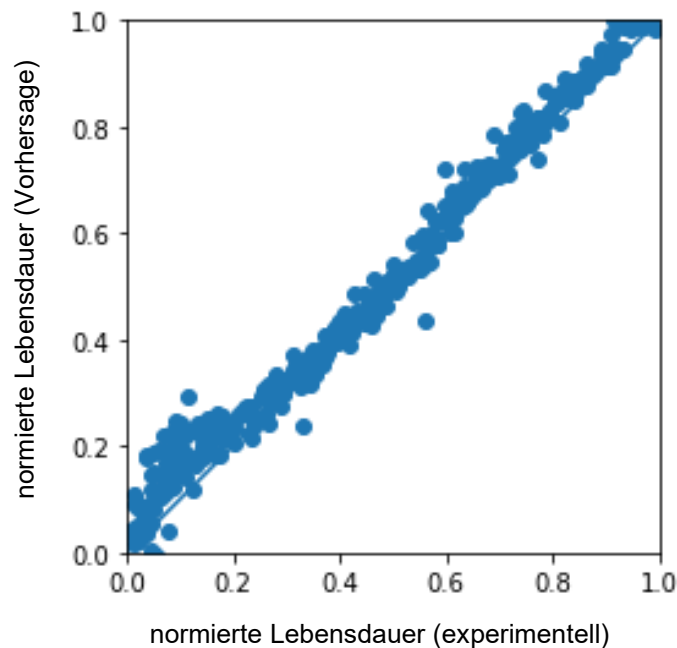
Als erste Anwendung werden ungekerbte Einstufenversuche betrachtet, die nicht zu viele Datenzeilen umfassen. Die Ausgabedatei von Probe 8.1 enthält die folgenden Spalten

1. Time: Mit 0 startende Zeit [s]
2. Cycles
3. Time [s]
4. Voltage Drop [mV]
5. Current [A]
6. Electrical Resistance [ $\mu\Omega$ ]
7. Change in ER
8. Change in ER

---

<sup>1</sup> ReLU Rectified Linear Unit, die ReLU-Aktivierungsfunktion ist eine lineare Funktion, die positive Werte erhält und negative Werte auf Null setzt.

Die Datei enthält 1903 Zyklen in rund 761.500 Zeilen. Es ist sinnvoll, jeweils einen ganzen Zyklus zu betrachten. Die Zielgröße ist die Ausnutzung der Lebensdauer, d.h. die Zyklenzahl geteilt durch 1903. Diese CSV-Datei kann nun zum Einlesen von Daten genutzt werden. Als Datensätze werden die Realteile der ersten zehn Fourier-Koeffizienten verwendet. Das neuronale Netz enthält zwei verdeckte Schichten mit jeweils 64 Knoten; es werden Rectifier als Aktivierungsfunktionen verwendet. Das Ergebnis der Vorhersage ist in Abb. 4.6 dargestellt.



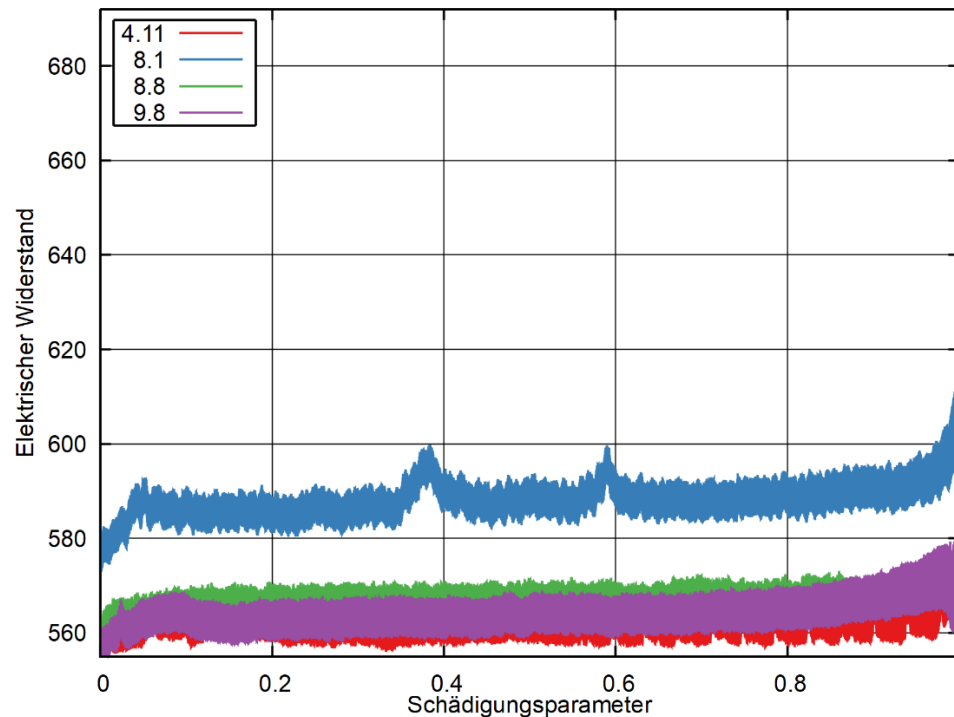
**Abb. 4.6** Vergleich vorhergesagter und wahrer Lebensdauerwerte für Probe 8.1

#### 4.4.2 Analyse mehrerer Einstufenversuche

Als nächsten Schritt werden mehrere Einstufenversuche gemeinsam analysiert, und es werden Vorhersagen für andere Einstufenversuche gemacht. Dabei muss auch die Tensorstruktur der Trainingsparameter erweitert werden, um die geänderten Versuchsbedingungen berücksichtigen zu können. Diese umfassen die Temperatur, die Dehnungsamplitude, das Medium und den Alterungszustand. Die Temperatur kann durch Division der Temperatur in °C durch 300 auf das Einheitsintervall transformiert werden. Die Dehnungsamplitude hat in prozentualer Angabe natürlicherweise einen Wertebereich im Einheitsintervall.



Für das Medium und den Alterungszustand wird als erster Ansatz eine Indizierung verwendet. Alternativ könnte der Alterungszustand auch in die Schädigung eingehen, da der gealterte Zustand (AS) 50 % der Lebensdauer an Luft bei 0,3 % Dehnamplitude entspricht. Allerdings ist es auch naheliegend, sich zunächst auf einen einzelnen Alterungszustand und ein Medium zu beschränken. Der elektrische Widerstand der drei Versuche bei erhöhter Temperatur und Ausgangszustand (siehe Tab. 4.4) ist in Abb. 4.7 dargestellt.

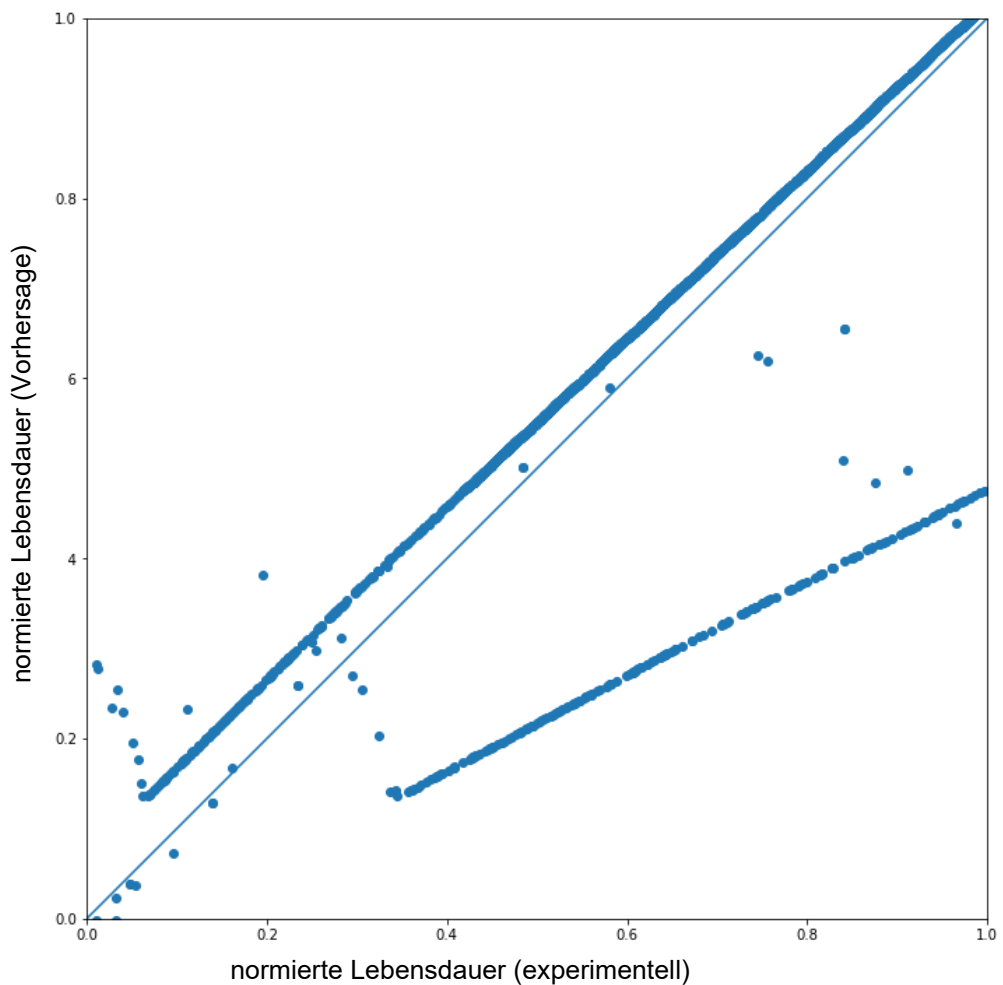


**Abb. 4.7** Elektrische Widerstandsmessung vier gleichartiger Versuche

Bereits in dieser sehr groben Übersicht wird deutlich, dass sich das resistometrische Signal mit wachsender Ermüdungsschädigung ändert. Im nächsten Schritt ist es sinnvoll, sensitive Parameter zu identifizieren, die es erlauben, den Schädigungsparameter zu quantifizieren. Der Verlauf der skalierten Fourierkoeffizienten bietet sich zunächst an.

### 4.4.3 Zeitbasierte Zyklenerlegung

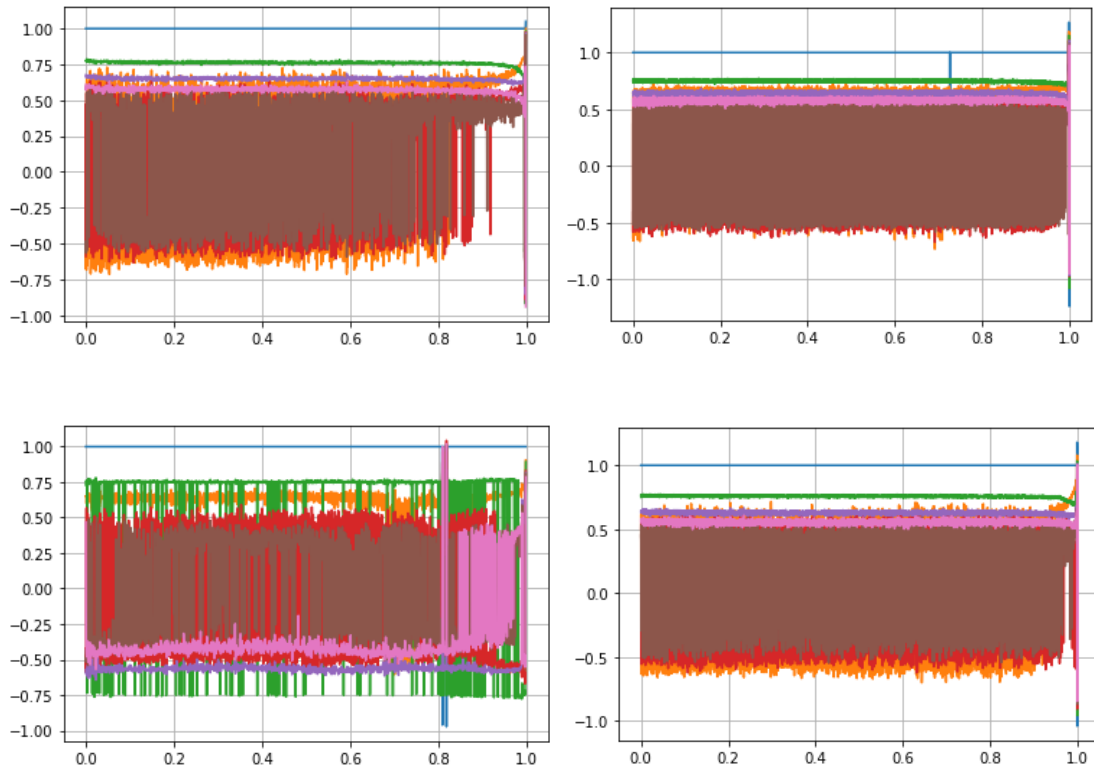
Zunächst wird die zeitbasierte Zyklenerlegung erprobt. Wird anhand dieser Parameter und der vier geschädigten Proben im Ausgangszustand bei erhöhter Temperatur (Versuche 4.11, 9.8, 8.8, 8.1) ein neuronales Netz trainiert, so ergibt sich ein Ergebnis wie in Abb. 4.8 gezeigt. Es gibt neben dem Hauptstrang auch eine Nebenlinie – die Vermutung einer andersartigen Probe bei den vieren liegt nahe.



**Abb. 4.8** Vorhersage bei Training mit den vier Proben 4.11, 9.8, 8.8 und 8.1

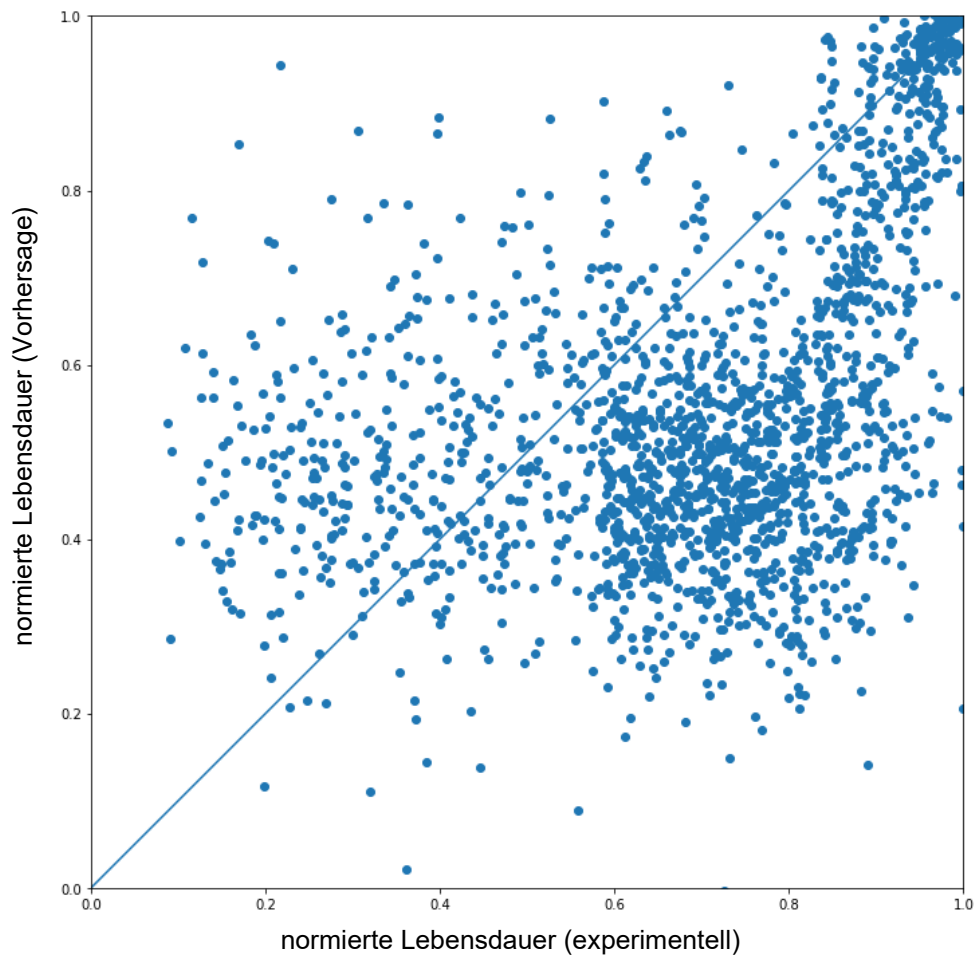
#### 4.4.4 Maximumbasierte Zyklenerlegung

Als Alternative zu der zeitbasierten Zyklenerlegung wird auch die Berechnung der Koeffizienten nach der Maximummethode erprobt. Die normierten Koeffizienten mit dieser Methode sind in Abb. 4.9 dargestellt.



**Abb. 4.9** Normierte Koeffizienten mit maximumbasierter Zyklenerlegung für die Proben (von links nach rechts und oben nach unten) 8.1, 8.8., 9.8 und 4.11

In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Proben hoher Amplitude (8.1, oben links und 9.8, unten links) eine deutlichere Abhängigkeit von der Schädigung zeigen. Allerdings ist die Zuordnung der Schädigung anhand der Fourier-Koeffizienten nicht trivial. Das gute Abschneiden der Proben 8.1 und 9.8 lässt hoffen, dass das künstliche neuronale Netz den Schädigungsgrad ermitteln kann. Die Vorhersage anhand eines Beispieldatensatzes ist in Abb. 4.10 dargestellt.

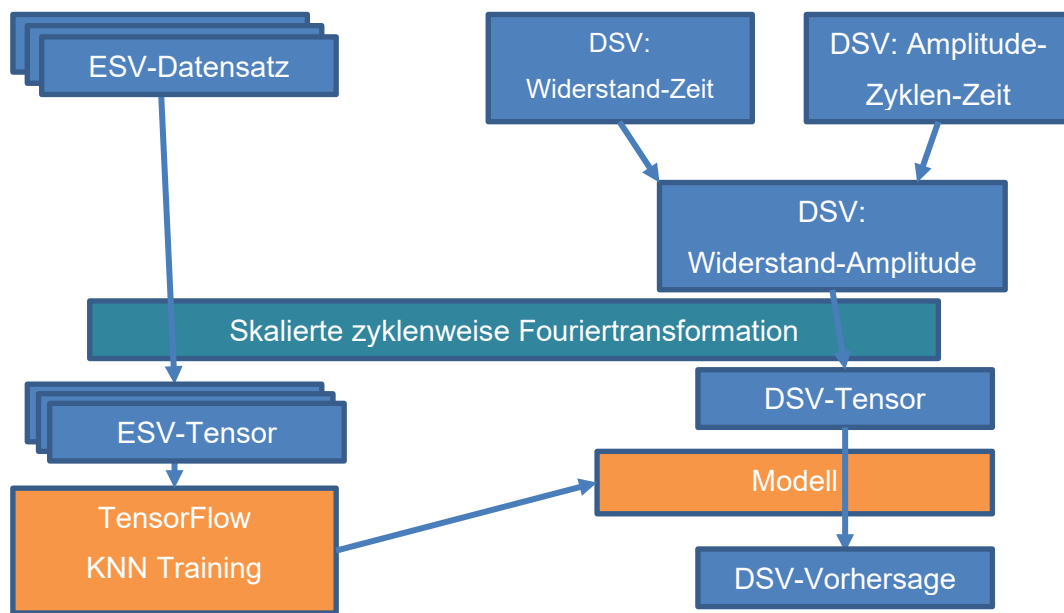


**Abb. 4.10** Vorhersagetest bei maximumbasierter Zyklenzerlegung

Es kann der Darstellung entnommen werden, dass die Vorhersage schwierig ist und es eine große Streuung bei kleineren Schädigungen gibt. Bei sehr großen Schädigungen (ab 90%) gelingt stattdessen die Vorhersage wieder besser.

#### 4.5 Anwendung des Dehnungssteigerungsversuchs

Bei der Anwendung des trainierten Modells auf den Dehnungssteigerungsversuch wird ein Zwischenschritt etabliert, bei dem das trainierte Modell gespeichert wird. Das lässt die Anwendung des Modells im Sinne der Vorhersage von der Trainingsphase (die aufgrund der großen Datenmenge sehr zeitaufwändig ist) entkoppeln. Das Vorgehen zur Datenaufbereitung und zum Training ist damit für den Dehnungssteigerungsversuch wesentlich komplexer (siehe Abb. 4.11).

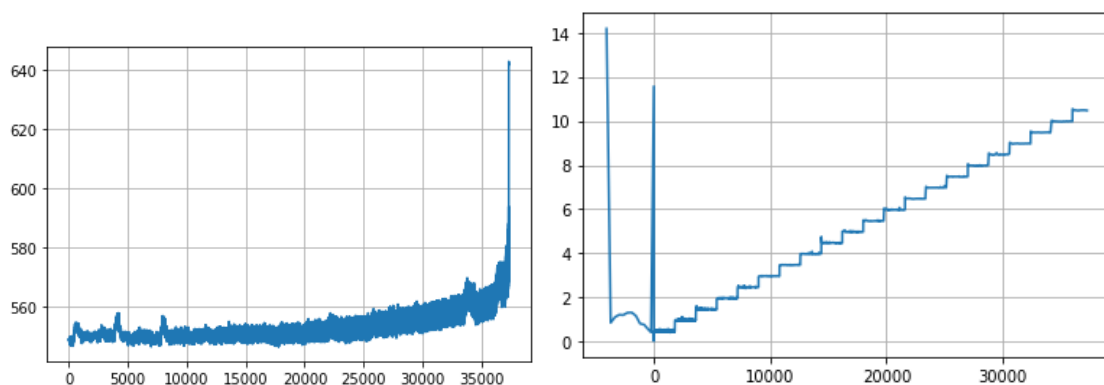


**Abb. 4.11** Datenverarbeitung zur Ermüdungsschädigungsvorhersage beim DSV

In den folgenden Abschnitten werden entsprechende Dehnungssteigerungsversuche untersucht.

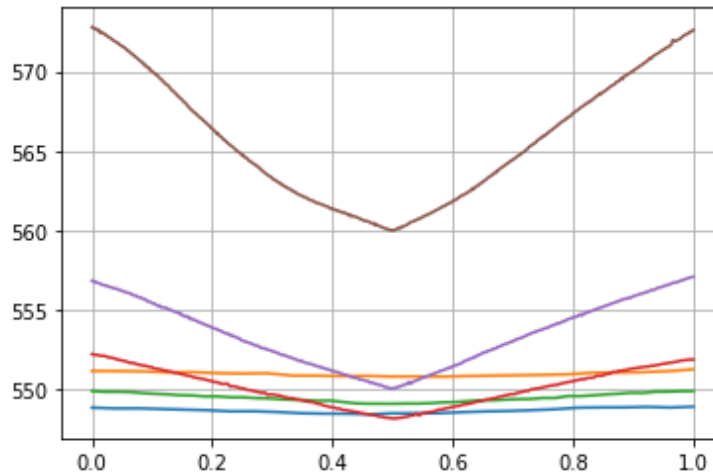
#### 4.5.1 Dehnungssteigerungsversuch 6.6

Die Zeitabhängigkeit des elektrischen Widerstands im Dehnungssteigerungsversuch 6.6 ist in Abb. 4.12 dargestellt, ebenso die Dehnungsamplitude als Funktion der Zeit.



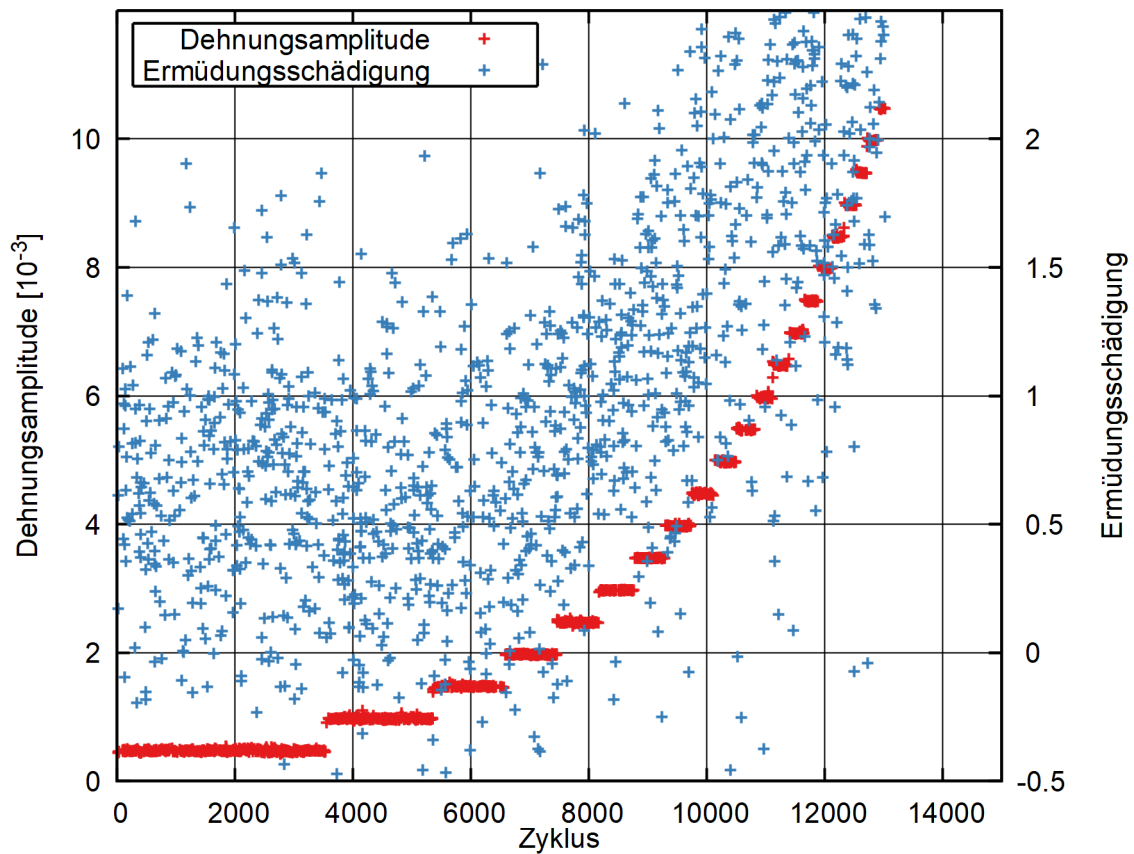
**Abb. 4.12** Dehnungssteigerungsversuch 6.6 als Widerstandssignal [ $\mu\Omega$ ] (links) und Dehnungsamplitude [%] (rechts), jeweils als Funktion der Zeit [s]

Zu Definition und Extraktion von Zyklen wird wieder auf die Identifizierung von Maximalwerten zurückgegriffen. Als Beispiel sind die elektrischen Widerstandswerte für die Zyklen 30, 2000, 5000, 10000, 12000 und 13000 in Abb. 4.13 dargestellt. Die Amplituden der Totaldehnung in Promille beträgt jeweils 0,45, 0,48, 0,98, 4,47, 7,98 und 10,48.



**Abb. 4.13** Elektrischer Widerstand [ $\mu\Omega$ ] in den Zyklen 30, 2000, 5000, 10000, 12000 und 13000 des DSV 6.6

Wenn das trainierte Netz auf die Zyklen des Versuchs 6.6 angewendet wird, ergibt sich eine Vorhersage für die Ermüdungsschädigung in jedem Zyklus. Diese Vorhersage ist zusammen mit den Amplituden der einzelnen Stufen in Abb. 4.14 dargestellt.

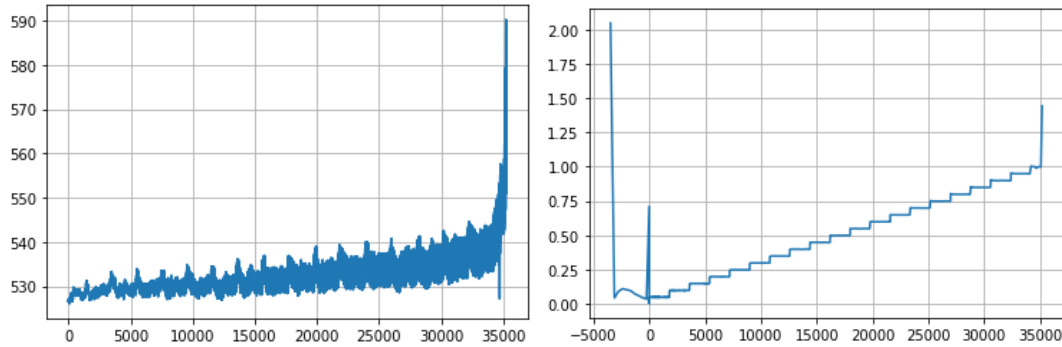


**Abb. 4.14** Vorhersage der Ermüdungsschädigung für den Dehnungssteigerungsversuch 6.6

Dieser Auftragung kann entnommen werden, dass die Streuung der vorhergesagten Ermüdungsschädigung erheblich ist und durchaus außerhalb des Einheitsintervalls liegt. Es ist jedoch deutlich erkennbar, dass die vorhergesagte Schädigung mit fortschreitender Zyklenzahl ansteigt.

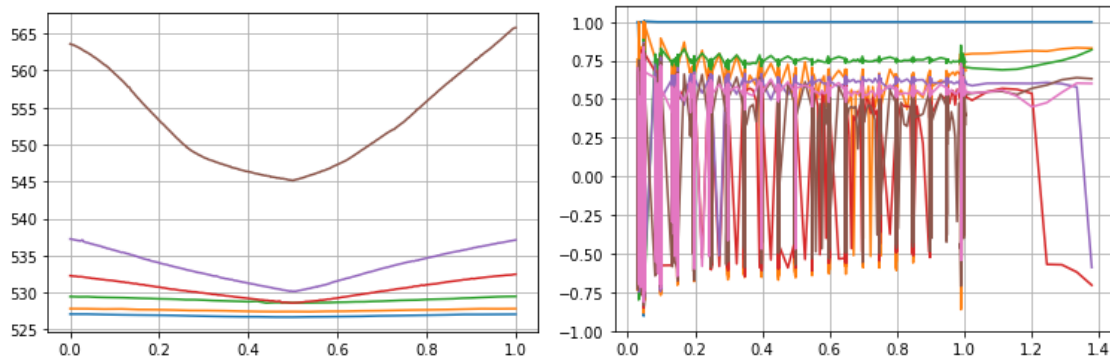
#### 4.5.2 Dehnungssteigerungsversuch 10.5

Der Dehnungssteigerungsversuch 10.5 ist ebenfalls bei erhöhter Temperatur an Luft durchgeführt worden. Der Versuchsverlauf ist in Abb. 4.15 dargestellt.



**Abb. 4.15** Dehnungssteigerungsversuch 10.5, links der elektrische Widerstand [ $\mu\Omega$ ] und rechts die Totaldehnung [%], jeweils als Funktion der Zeit [s]

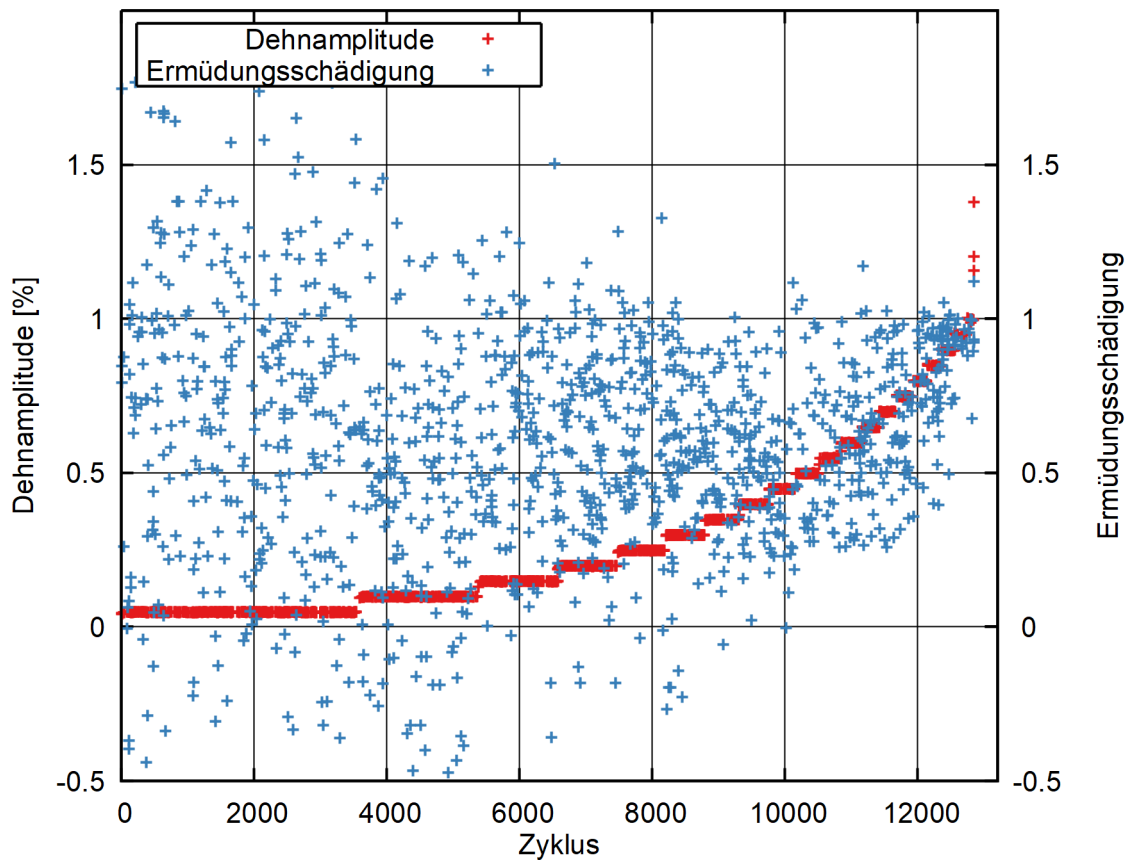
Die Dehnungsamplituden sind etwas kleiner, verglichen mit dem Versuch 6.6. Mit der Methode der maximumbasierten Zyklenseparation werden die einzelnen Zyklen aufgelöst. Beispiele sind in Abb. 4.16 dargestellt.



**Abb. 4.16** Elektrischer Widerstand [ $\mu\Omega$ ] in den Zyklen 30, 2000, 5000, 10000, 12000, 12840 (links) sowie ausgewählte Koeffizienten als Funktion der Ermüdungsschädigung (rechts) von Versuch 10.5

Auf diese Daten wird das trainierte Modell angewendet, genauso wie zuvor auf den DSV 6.6 Das Ergebnis ist in Abb. 4.17 dargestellt.





**Abb. 4.17** Schädigungsvorhersage für DSV 10.5

Auch bei dieser Auswertung ist eine große Streuung bei kleiner Schädigung sowie ein deutlicher Trend bei hoher Schädigung erkennbar.

#### 4.6 Methodischer Ansatz zur Berechnung von Wöhlerlinien mit maschinellem Lernen

Die in Abschnitt 4.5 gezeigte Methode zur Berechnung von Ermüdungsschädigungen kann auch zur Berechnung von Wöhlerlinien verwendet werden. In diesem Kapitel wird dieser Ansatz erläutert und angewendet.

Das Ergebnis der Bewertung eines Dehnungssteigerungsversuchs mit KNN ist eine Schätzung des Ermüdungsschädigungsgrades  $D(c)$  für jeden einzelnen Zyklus  $c$ . Wird von einer linearen Schadensakkumulation ausgegangen, so erfolgt innerhalb einer Laststufe  $L$ , die die Zyklen  $c_L$  bis  $c_{L+1} - 1$  umfasst, eine Zunahme der Ermüdungsschädigung von  $1/N(\varepsilon_L)$ , wobei  $N(\varepsilon_L)$  die Dehnungswöhlerlinie beschreibt (oder genauer gesagt deren Umkehrfunktion) und  $\varepsilon_L$  das Dehnungsniveau der Laststufe  $L$ . Das heißt wiederum, dass sich unter Annahme dieses Schädigungsparameters das Dehnungsniveau wie folgt entwickeln müsste.

$$D(c) = D(c_L) + \frac{1}{N(\varepsilon_L)} (c - c_L) \quad (4.3)$$

Dies ist eine Geradengleichung auf dem Abschnitt der einzelnen Stufen. Dies erlaubt es also, durch lineare Regression auf den einzelnen Stufen eine Abschätzung der Wöhlerlinie zu erhalten, die ja gerade die Abhängigkeit von  $N$  und  $\varepsilon$  beschreibt.

$$y_L(c) = a_L c + b_L \quad (4.4)$$

Aus dieser numerisch bestimmten Regressionsformel, in die die durch das KNN berechnete Schädigungsniveau der einzelnen Zyklen eingehen, kann die Wöhlerlinie auf dem entsprechenden Dehnungsniveau bestimmt werden.

$$N(\varepsilon_L) = 1/a_L \quad (4.5)$$

Zusätzlich ergibt sich aus dieser Regression auch eine Abschätzung der Unsicherheiten durch die empirische Standardabweichung beim Fit.

Diese Analyse erfordert jedoch einen klaren Trend der Datenpunkte innerhalb einer jeden Stufe, was bei oberflächlicher Betrachtung der Daten nicht gesichert scheint. Es solle jedoch auch möglich sein, die akkumulierte Schädigung der Stufen als Maß heranzuziehen. Aus den Regressionsgeraden der einzelnen Stufen ergibt sich eine Schätzung der Schädigungen zu Beginn einer jeden Stufe.

$$D(c_L) = y(c_L) = b_L + c_L a_L \quad (4.6)$$

Aus dieser Reihe von Werten für  $D(c_L)$  lässt sich ebenfalls eine Abschätzung für die Wöhlerlinie generieren.

$$N(\varepsilon_L) = \frac{c_{L+1} - c_L}{D(c_{L+1}) - D(c_L)} = \frac{c_{L+1} - c_L}{b_{L+1} - b_L - c_{L+1}a_{L+1} + c_L a_L} \quad (4.7)$$

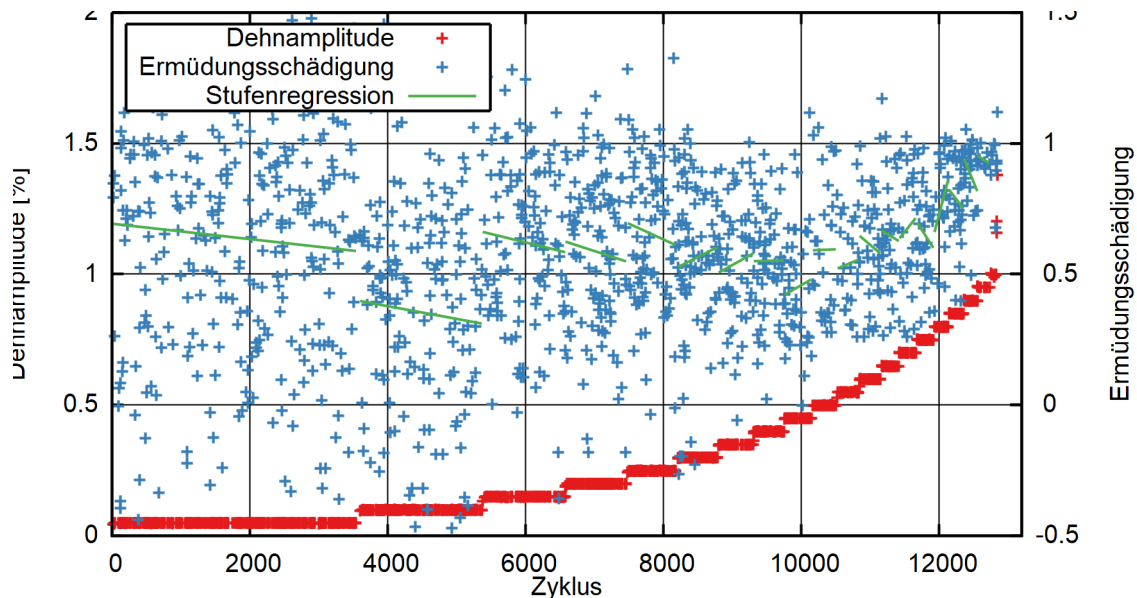
Eine komplexere Version dieser Analyse würde neben der unabhängigen Bestimmung der Steigungen und Achsenabschnitte auf den einzelnen Stufen auch eine Konsistenzprüfung der Gesamtschädigung durchführen. Dann wäre anstatt unabhängiger Analysen ein System gekoppelter Geradengleichungen über eine Optimierung der kleinsten-Quadrate-Schätzung zu lösen.

$$\begin{aligned} D(0) &= 0 \\ D(c \in [c_L, c_{L+1}]) &= D(c_L) + \frac{1}{N(\varepsilon_L)} (c - c_L) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Dabei ist die Randbedingung  $D(0) = 0$  bei ungeschädigten Proben; die freien Parameter der Gleichung sind gerade die einzelnen Stützstellen der Wöhlerlinien auf den individuellen Dehnungsniveaus. Auch dieser Ansatz ist somit numerisch durchführbar, allerdings kann es sinnvoll sein, die Gewichtung der berechneten Punkte  $(c_i, D_i)$  so zu wählen, dass z. B. jede Stufe gleich viele Punkte berücksichtigt, oder die Niveaus größerer Schädigung ein höheres Gewicht erhalten.

#### 4.7 Anwendungsfall: Stückweiser Regressionsansatz bei Dehnungssteigerungsversuch 10.5

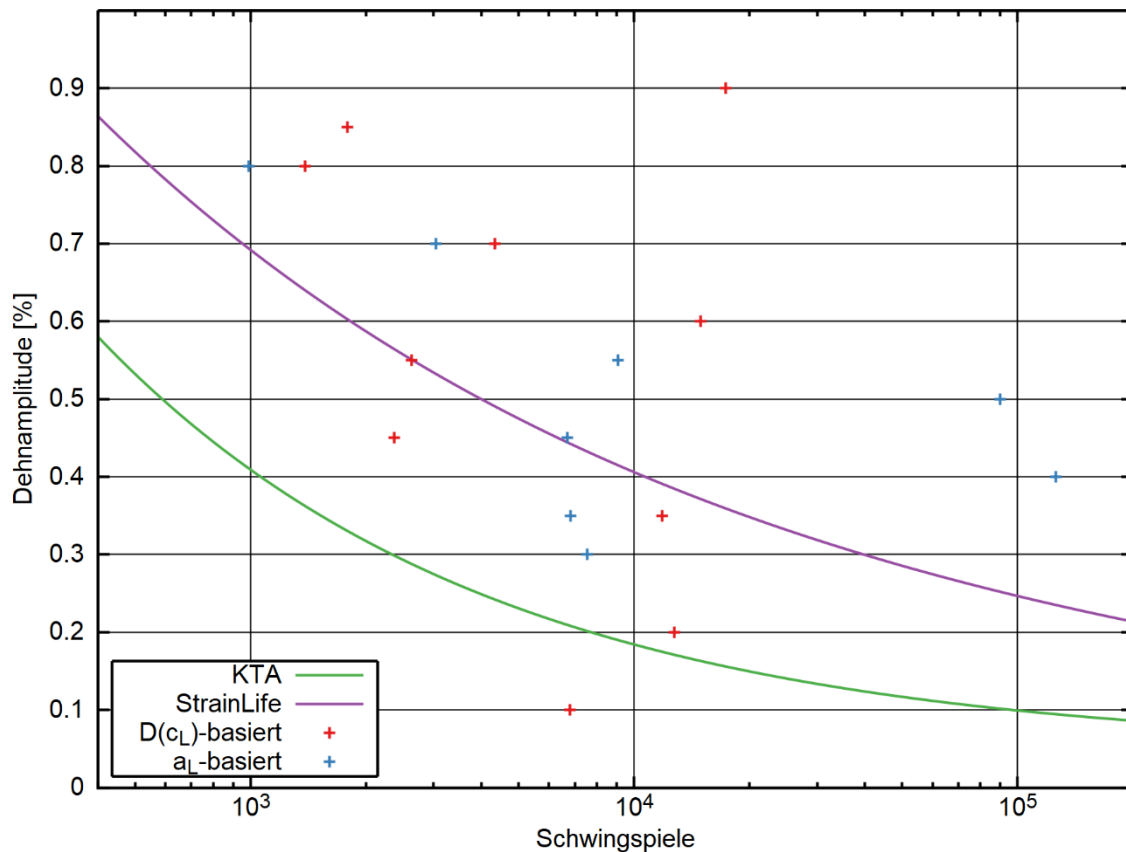
Dieser Anwendungsfall der vorgestellten Methode ist der Dehnungssteigerungsversuch 10.5 (siehe Tab. 4.3 und Abschnitt 4.5.2). Zunächst werden auf den einzelnen Stufen lineare Regressionen zum Anwachsen des Schädigungsparameters durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 4.18 dargestellt.



**Abb. 4.18** Regressionsgeraden auf den einzelnen Dehnamplituden

An dieser Auswertung ist deutlich zu sehen, dass die Zunahme der Schädigung auf den einzelnen Stufen weder durch bei höheren Lastamplituden zunehmende Steigungen noch durch im Laufe der Zeit zunehmende Gesamtschädigungen der Regressionsgeraden bemerkbar ist. Demzufolge kann auch für Stufen, bei denen der Trend negativ ist oder ein negativer Versatz zur Vorstufe festzustellen ist, kein sinnvoller Wert der Wöhlerlinie angegeben werden.

Die Lebensdauerpunkte mit positiven Steigungen können jedoch mit den Ergebnissen von MibaLeb I, die mit StrainLife berechnet wurden, verglichen werden. Dieser Vergleich ist grafisch in Abb. 4.19 gegeben.



**Abb. 4.19** Vergleich der mit neuronalem Netz berechneten Wöhlerlinien für Versuch 10.5 mit den Wöhlerlinien aus MibaLeb I und KTA.

In diesem Vergleich zeigt sich, dass es durchaus möglich ist, mit Data Mining-Ansätzen instrumentierte Versuche auszuwerten und Wöhlerdaten zu generieren. Es ergibt sich aus zwei Gründen jedoch keine quantitative Übereinstimmung: Die resistometrischen Daten zeigen keine gute Sensitivität hinsichtlich der Ermüdungsschädigung, und der gewählte Ansatz für die Wöhlerlinien ist nicht konsistent, d.h. die für verschiedene Stufen ermittelten Wöhlerdaten werden von der Vorgehensweise nicht ins Verhältnis gesetzt. Beide Schwachstellen werden in der folgenden Analyse von Wirbelstromdaten verbessert.

## 4.8 Analyse von Wirbelstromdaten

Im Rahmen von MibaLeb II wurden Wirbelstrommessungen an Ermüdungsversuchen durchgeführt. Je nach eingestellter Frequenz (50 kHz, 100 kHz, 250 kHz, 500 kHz) können unterschiedliche Tiefen untersucht werden.

### 4.8.1 Versuchsübersicht

Im ersten Schritt wurden Raumtemperaturversuche an Luft untersucht. In Tab. 4.13 werden die einzelnen Versuche aufgelistet. Die Dehnrate beträgt jeweils 0,4 %/s.

**Tab. 4.13** Versuchsübersicht

Probe	Versuch	Amplitude [%]	Zyklen
D0.3	ESV	5,5	3881
D3.2	ESV	7,0	773
D8.1	ESV	5,0	4344
D19.3	ESV	6,0	1584
D24.3	ESV	6,5	824

Die Dehnungsstufen im Dehnungssteigerungsversuch folgen dem in Tab. 4.14 beschriebenen Schema. Dabei wird auch im Dehnungssteigerungsversuch die Dehnrate konstant bei 0,4 %/s gehalten. Der letzte Zyklus vor dem Versuchsabbruch ist nach 33297 s, bei der Stufe mit 0,75 % Dehnungsamplitude und 120 Zyklen erreicht worden. Die Messungen an den Proben werden in den folgenden Unterabschnitten weiterverarbeitet.

Außer diesen Versuchen gab es noch einen weiteren Einstufenversuch bei 0,4 % Dehnungsamplitude, der nach 9799 Zyklen endete. Die Instrumentierung ließ sich jedoch nicht verwenden.

**Tab. 4.14** Stufen im Dehnungssteigerungsversuch

<b>Stufe</b>	<b>Dehnungs-Amplitude [%]</b>	<b>Zyklen</b>
1	0,025	7200
2	0,05	3600
3	0,075	2400
4	0,1	1800
5	0,125	1440
6	0,15	1200
7	0,175	1029
8	0,2	900
9	0,25	720
10	0,3	600
11	0,35	514
12	0,4	450
13	0,45	400
14	0,5	360
15	0,55	327
16	0,6	300
17	0,65	277
18	0,7	257
19	0,75	240
20	0,8	225
21	0,85	212
22	0,9	200
23	0,95	189
24	1	180

## 4.8.2 Datenaufbereitung

In diesem Abschnitt wird die Aufbereitung der Daten von der Messung bis zu der Aufstellung der Tensoren beschrieben, wie sie für das maschinelle Lernen verwendet werden können.

## 4.8.3 Wirbelstrommessung

### 4.8.3.1 Datengewinnung und Datenauswahl

Da die Amplitude der gemessenen Impedanzverschiebung anfällig für Störungen der Versuchsanordnung durch die Lastaufbringung ist, empfiehlt es sich, die Phasenverschiebung der Impedanz als Messgröße zu verwenden. Diese Phasenverschiebungsanalyse wird am LZfPQ durchgeführt und die Zeitreihen in hoher Abtastrate im csv-Format zur Verfügung gestellt. Dieses verwendet den Punkt als Dezimaltrennzeichen und das Komma als Spaltentrennzeichen (im Gegensatz zu den Widerstandsmessdaten).

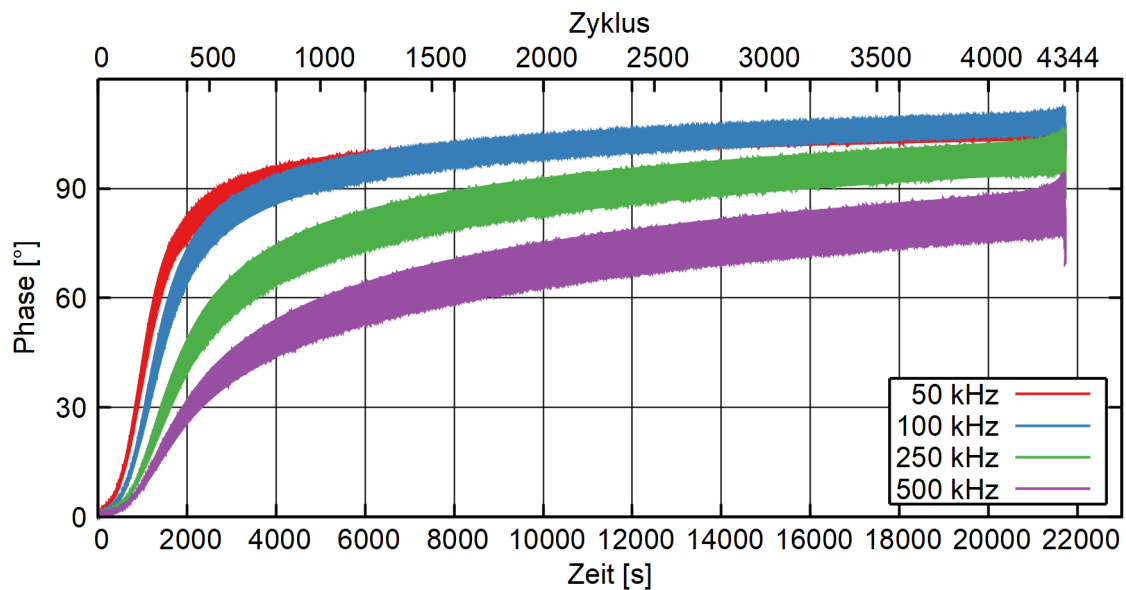
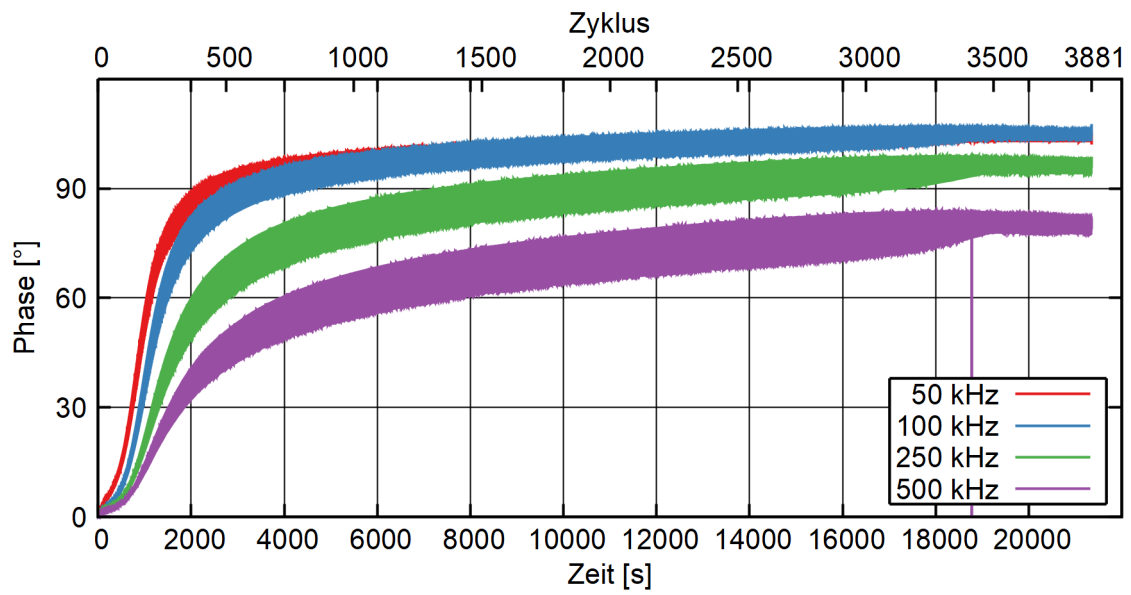
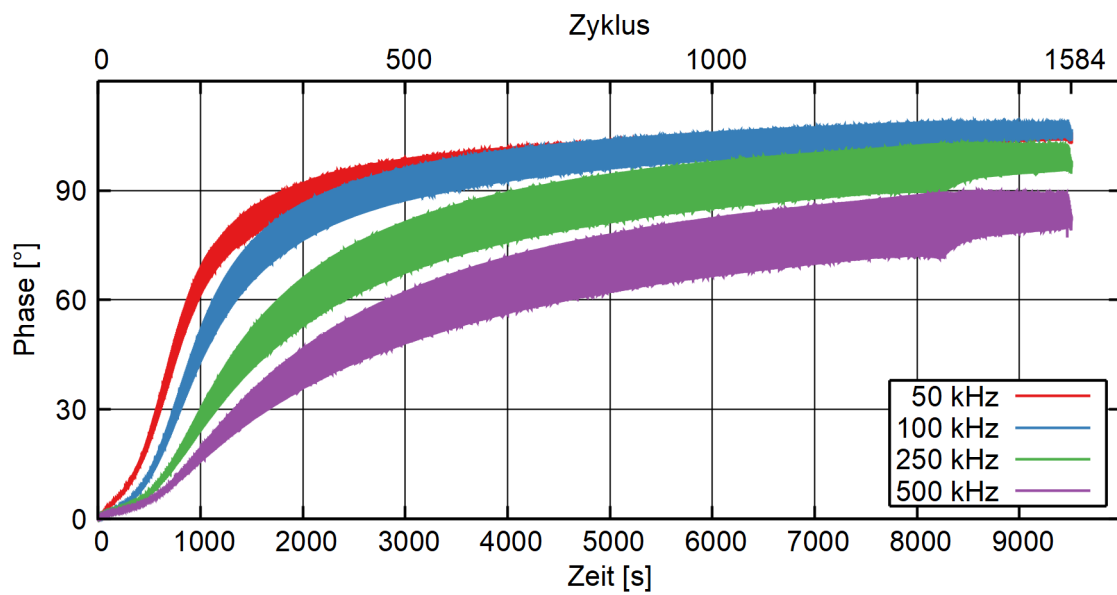


Abb. 4.20 Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D8.1 (0,5 %)

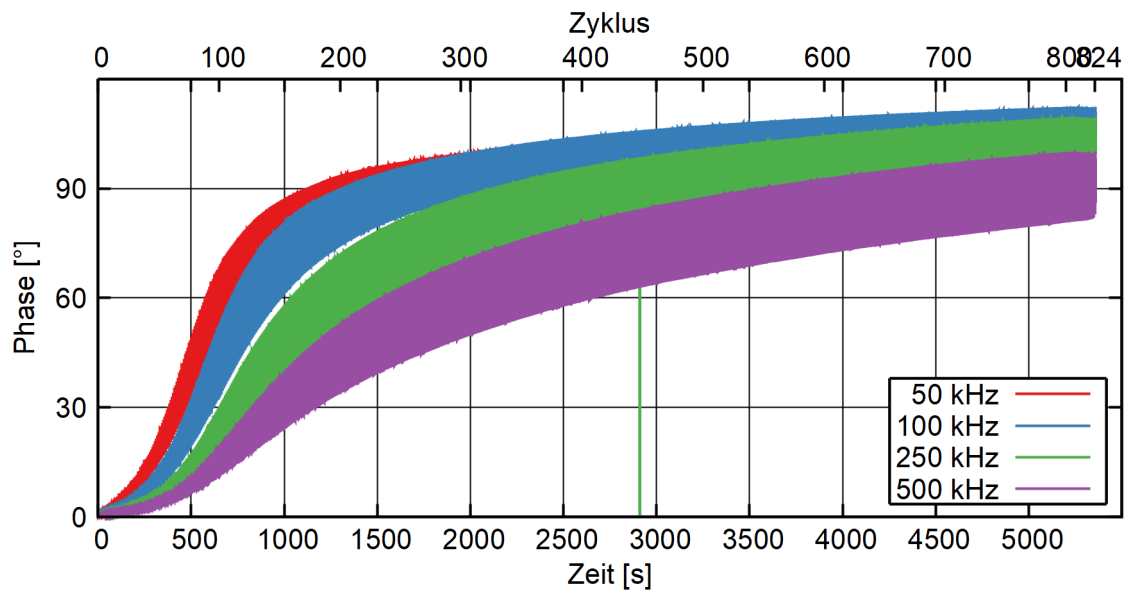




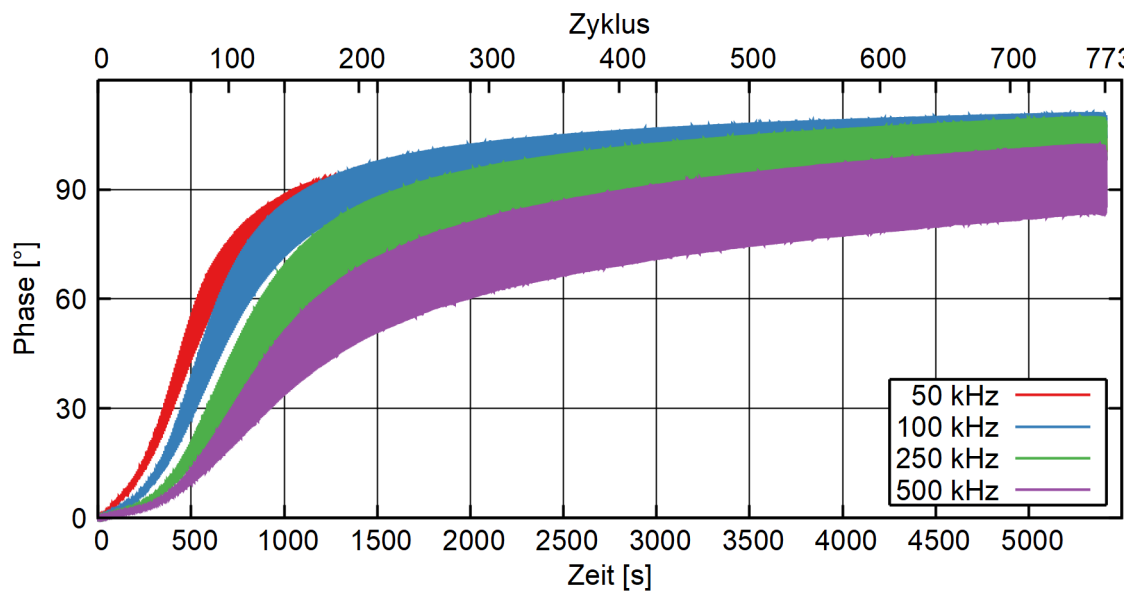
**Abb. 4.21** Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D0.3 (0,55 %)



**Abb. 4.22** Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D19.3 (0,6 %)

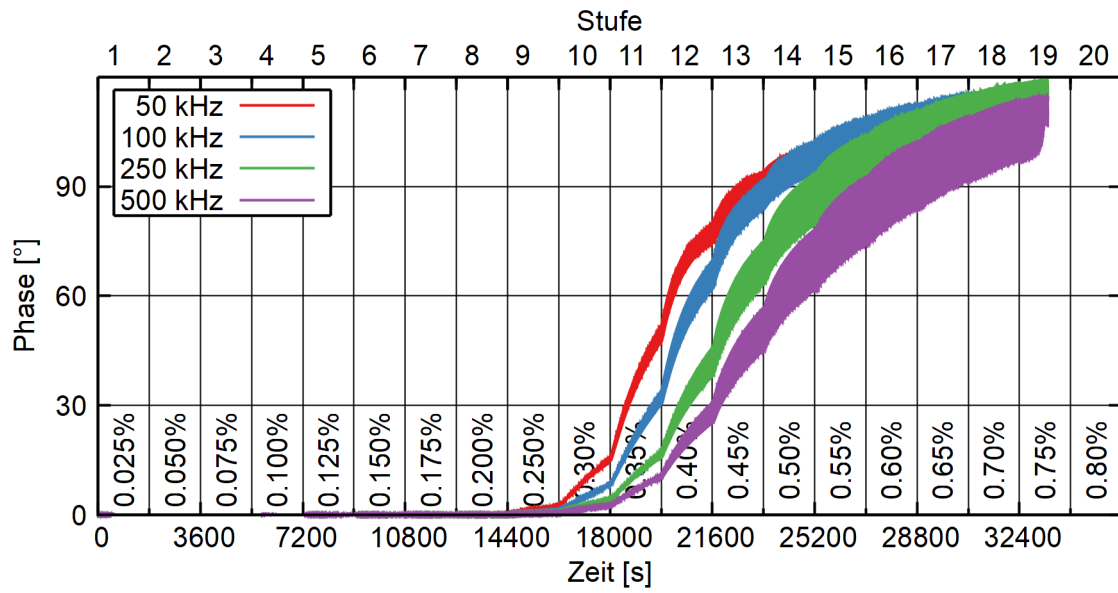


**Abb. 4.23** Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D24.3 (0,65 %)



**Abb. 4.24** Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D3.2 (0,7 %)

Wie aus diesen Messungen zu erkennen ist, ist die Wirbelstrommessung sehr sensitiv auf den Bereich der ersten 20 % des Versuchs. Auf gleiche Weise kann auch der Dehnungssteigerungsversuch untersucht werden. Die Rohdaten sind in Abb. 4.26 dargestellt.

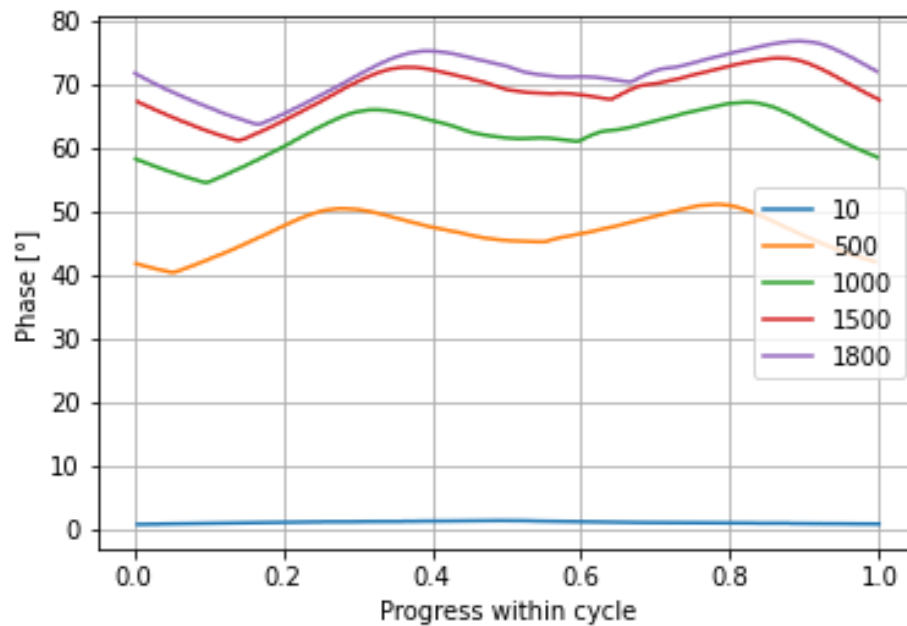


**Abb. 4.25** Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) beim Dehnungssteigerungsversuch D6

Es ist zu beachten, dass beim Dehnungssteigerungsversuch die Stufen nicht gleichverteilt sind, sondern die Dehnungsstufen unterschiedlich sind.

#### 4.8.3.2 Zyklenerlegung

Die Zerlegung der Zyklen geschieht auf andere Weise als bei den Widerstandsmessungen. Die Dreiecksfunktion ist stark von den Veränderungen der Sensorlage des Versuchs beeinflusst. Daher wird alternativ die Zeit zur Zerlegung der Zyklen verwendet. Eine Auswahl für die Entwicklung der Phase über einzelne ausgewählte Zyklen ist in Abb. 4.26 dargestellt.



**Abb. 4.26** Beispiel für ausgewählte Zyklen des Einstufenversuchs D0.3 (0,55%), Wirbelstrom-Phasen bei 500 kHz

Untersuchungen vom LZfPQ haben ergeben, dass es besser ist, mehrere Zyklen einer FFT zu berücksichtigen. 10 Zyklen zusammengefasst haben sich als geeignet erwiesen.

### 4.8.3.3 Fouriertransformation

Der erste Schritt der Signalverarbeitung ist die Entwicklung in einer Fourierreihe, numerisch durchgeführt als schnelle Fourier-Transformation (FFT). Diese Zerlegung erfolgt jeweils mit 16 Zyklen. Das Frequenzspektrum unterscheidet sich je nach Zyklus und je nach untersuchter Wirbelstromfrequenz. Als Beispiel werden vier Zyklen aus dem Versuch D0.3 (0,55 %) in den folgenden Abbildungen dargestellt. Dabei ist die Amplitude jeweils der Betrag des komplexen Fourier-Koeffizienten.

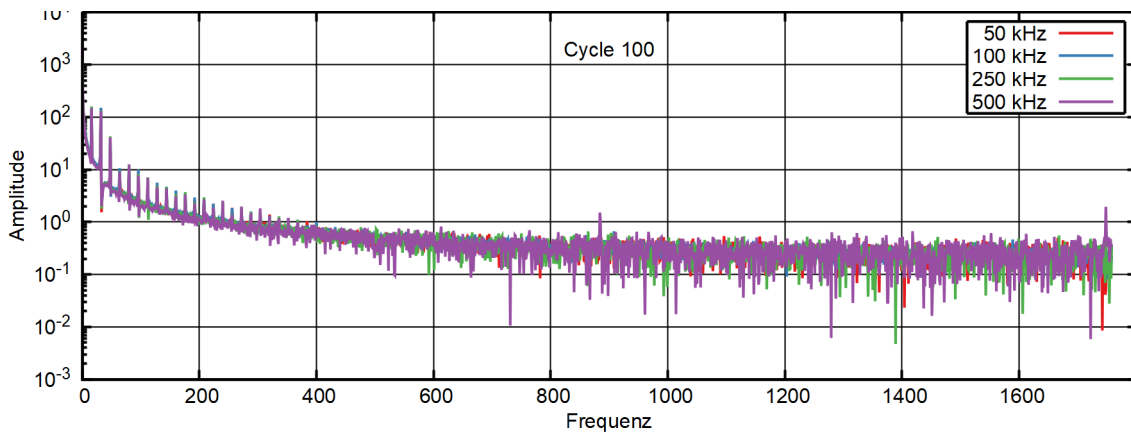


Abb. 4.27 Frequenzanalyse von Versuch D0.3 (0,55 %) Zyklus 100

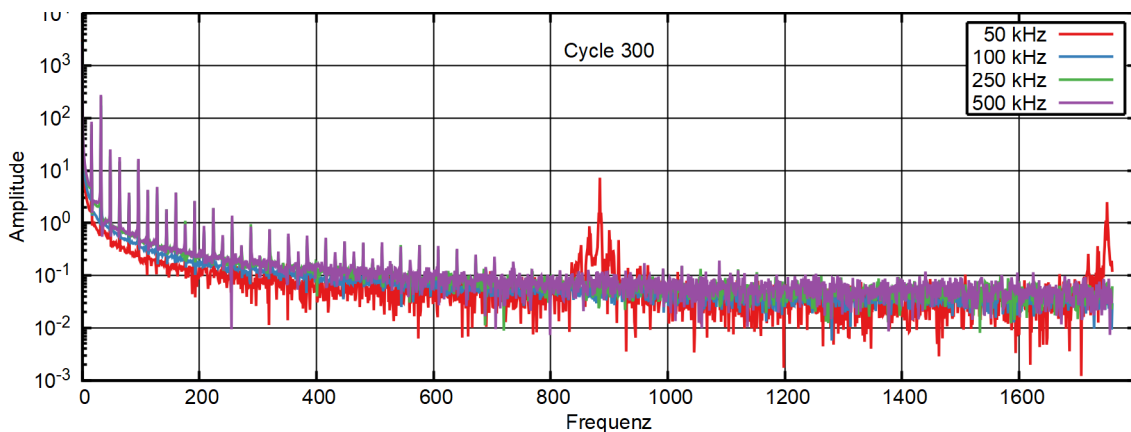
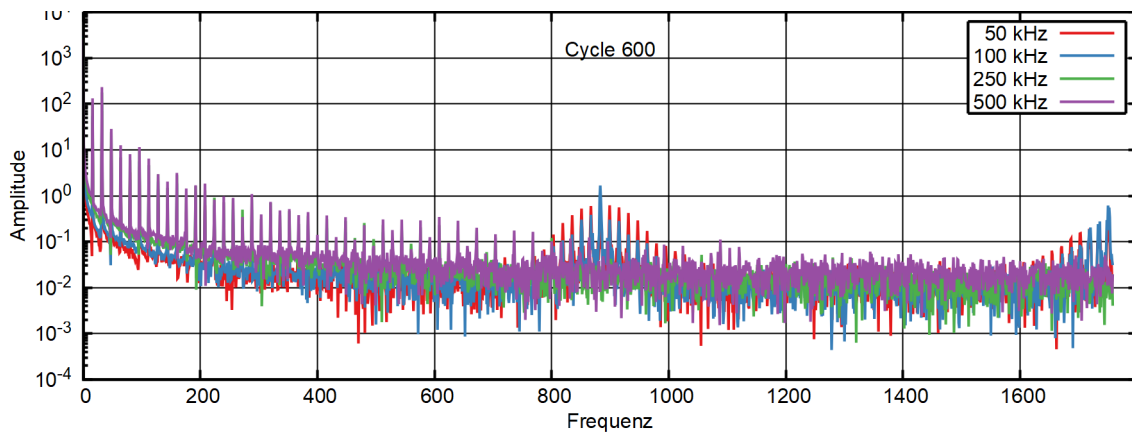
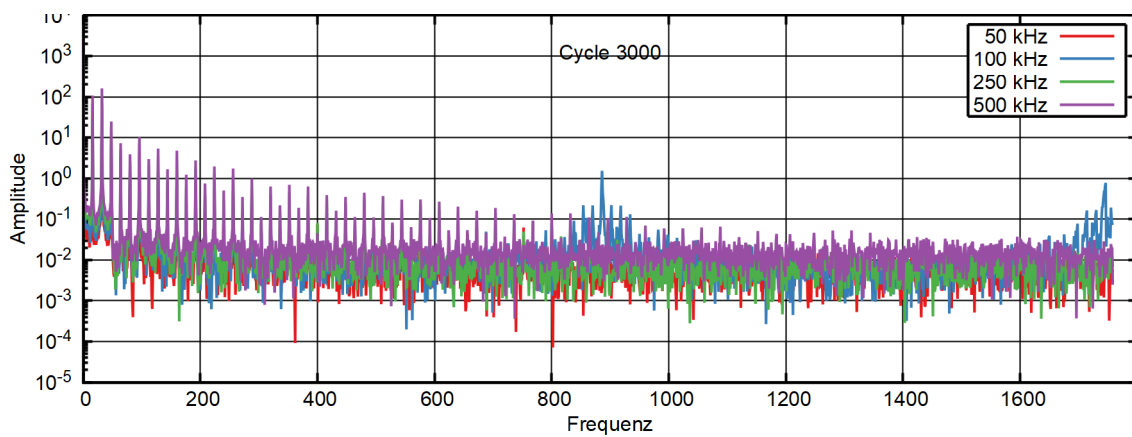


Abb. 4.28 Frequenzanalyse von Versuch D0.3 (0,55 %) Zyklus 300



**Abb. 4.29** Frequenzanalyse von Versuch D0.3 (0,55 %) Zyklus 600

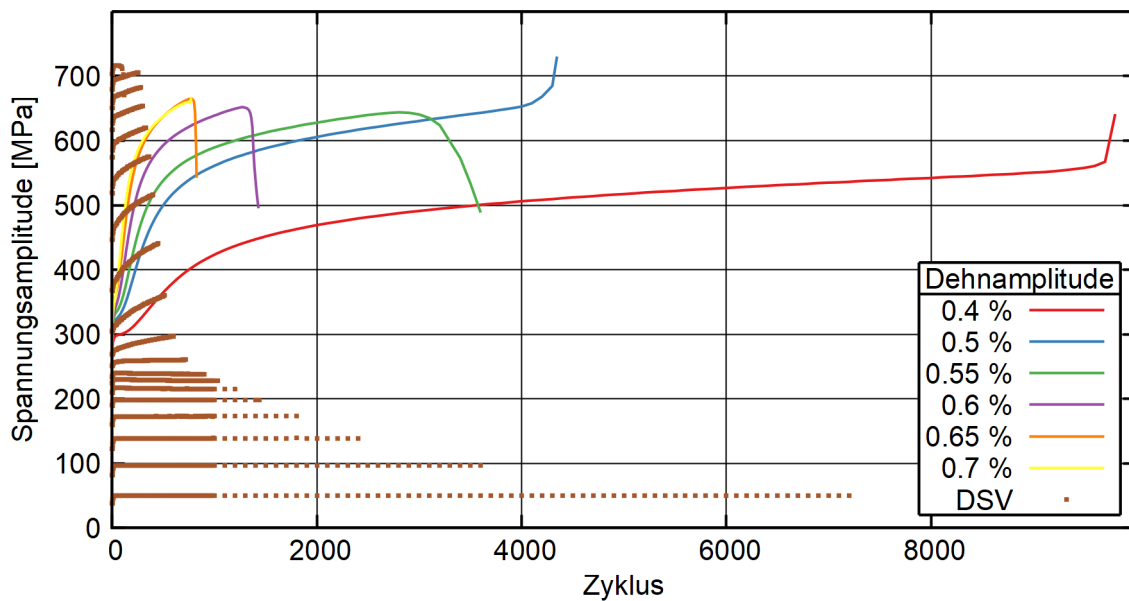


**Abb. 4.30** Frequenzanalyse von Versuch D0.3 (0,55 %) Zyklus 3000

Interessant ist die Ausbildung eines Maximums zwischen dem 800. und 1000. Koeffizienten, die bei den Zyklen jeweils etwas unterschiedlich ausfällt.

#### 4.8.4 Spannungsamplitude

Die Spannungsamplitude liegt als ausgelesener Spitzenwert für ausgewählte Zyklen vor. Der Verlauf der Spannung über der Zyklenzahl ist in Abb. 4.31 für alle Einstufenversuche dargestellt. Auch der Dehnungssteigerungsversuch ist eingetragen; hier wird jeweils der Zyklus seit Beginn der Laststufe berücksichtigt. Deutlich erkennbar ist die Verfestigung während des Versuchsverlaufs. Beachtenswert ist weiterhin, dass bei den ESV bei 0,4 % und 0,5 % Dehnungsamplitude zum Versuchsende die Spannungsamplitude ansteigt, anstatt abzufallen.

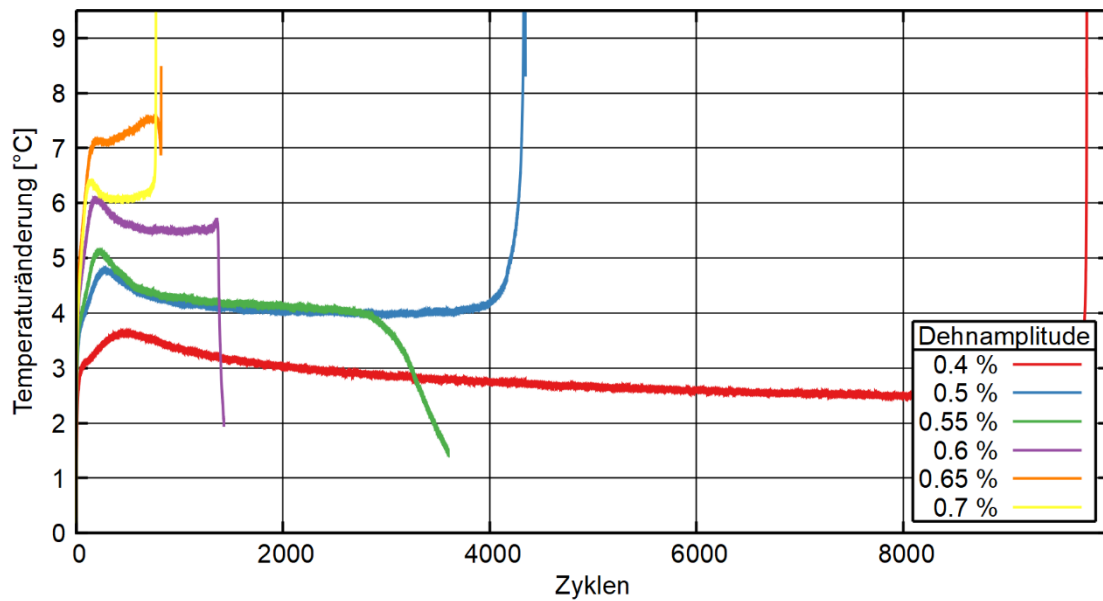


**Abb. 4.31** Spannungsamplitude während der Einstufenversuche und des Dehnungssteigerungsversuchs

Beim Dehnungssteigerungsversuch ist auch deutlich zu erkennen, dass die Verfestigung bereits zu Beginn einer neuen Laststufe eingesetzt hat, wenn es eine entsprechende Vorschädigung gibt.

#### 4.8.5 Temperatur

Die Temperatur ist in höherer Abtastung als die Spannungsamplitude als Funktion der Versuchszeit gegeben. Das Ergebnis ist in Abb. 4.32 dargestellt. Wie auch bei der Spannungsamplitude fällt auf, dass das Ergebnis für den Einstufenversuch mit der höchsten Dehnungsamplitude anders als der allgemeine Trend ausfällt.

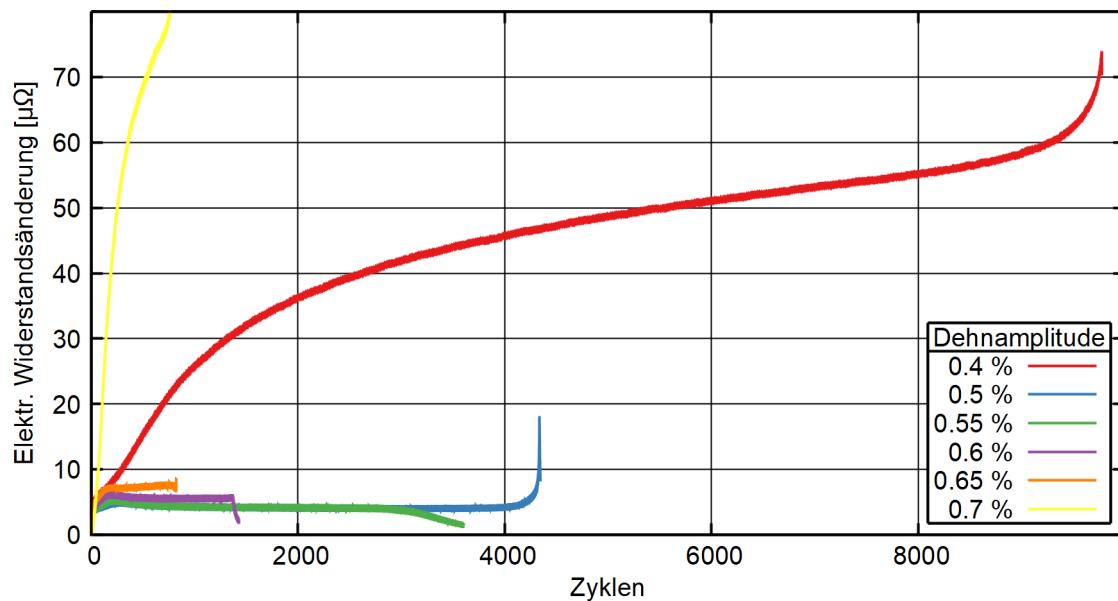


**Abb. 4.32** Temperaturänderung als Funktion der Versuchsdauer

Es fällt auf, dass der Dehnungssteigerungsversuch hier einen ganz anderen Verlauf zeigt als die Einstufenversuche. Daher scheint die Verwendung der Temperaturmessung für die Schädigungsvorhersage nicht geeignet zu sein.

#### 4.8.6 Elektrischer Widerstand

Die Messung des elektrischen Widerstands ist in der gleichen Abtastrate wie die Temperaturänderung gegeben. Das Ergebnis ist in Abb. 4.33 dargestellt.



**Abb. 4.33** Elektrische Widerstandsänderung während der Versuchsdauer



Wie auch bei der Temperaturmessung ist der Verlauf der elektrischen Widerstandsänderung im Dehnungssteigerungversuch deutlich anders als in den Einstufenversuchen, zudem ist der Trend nicht überzeugend. Daher scheinen sich auch die Widerstandsmessungen nicht für das Training eines neuronalen Netzes zur Schädigungsprognose zu eignen.

#### **4.8.7 Tensorgewinnung aus statistischen Werten der Wirbelstrommessung**

Da in den Phasendaten bereits offenkundige Trends vorhanden sind, liegt es nahe, genau diese Phasendaten zu untersuchen. Gerade im Bereich des ersten Lebensdauer- viertels charakterisieren die Messungen gut den Fortschritt der Ermüdungsschädigung.

##### **4.8.7.1 Vorgehen zur Bestimmung der Tensoren**

Die folgenden Schritte beschreiben die Bildung der Tensoren aus den Sensordaten.

- Wähle 16 aufeinanderfolgende Zyklen aus
- Für jede Wirbelstromfrequenz bilde folgende zwei Tensorkomponenten:
  - Bestimme den normierten (durch 90° geteilten) Mittelwert der Phase
  - Bestimme das Verhältnis von Spannweite zu Mittelwert
- Füge den kodierten Alterungszustand, das Medium und die Versuchstemperatur hinzu
- Füge den linearen Schädigungsparameter und die auf das Einheitsintervall transformierte Schädigung pro Zyklus hinzu

Diese Größen sind leicht interpretierbar. Außerdem bieten sie ein leicht zugängliches Charakteristikum für die Abhängigkeit vom Schädigungsgrad. Die Transformationsvorschrift für die inkrementelle Schädigung pro Zyklus ist im Folgenden gegeben.

$$L_{incr} = 1 + \frac{1}{5} \log_{10} \frac{1}{N} \quad (4.9)$$

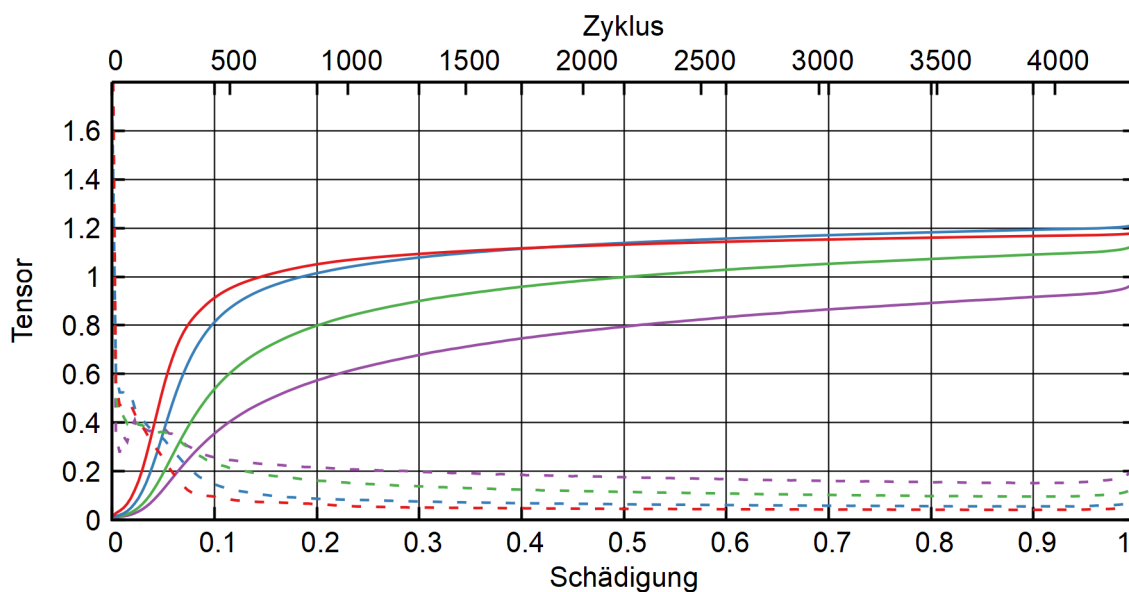
Wenn die Lebensdauer nicht bekannt ist (Durchläufer oder erste Zyklen des Laststeigerungsversuchs), so kann ein fiktiver großer Wert (z. B.  $10^6$ ) eingesetzt werden. Die Rücktransformation kann wie folgt angegeben werden.

$$N = 10^{5-5L_{incr}} \quad (4.10)$$

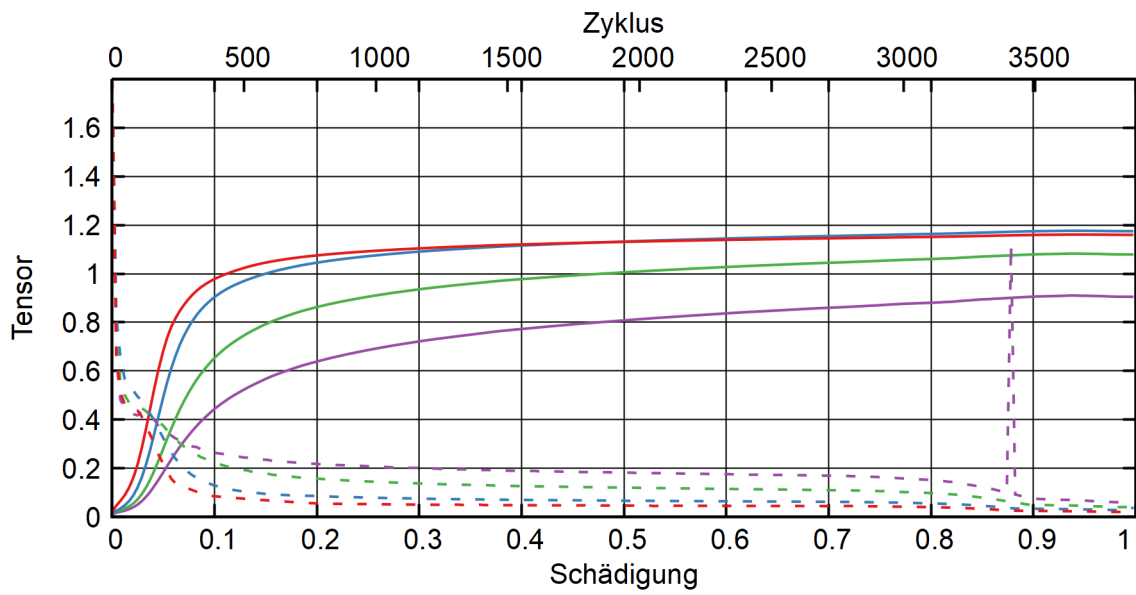
Mit dieser Rücktransformation kann die inkrementelle Schädigung aus den vorhergesagten Tensor-Komponenten berechnet werden.

#### 4.8.7.2 Einstufenversuche

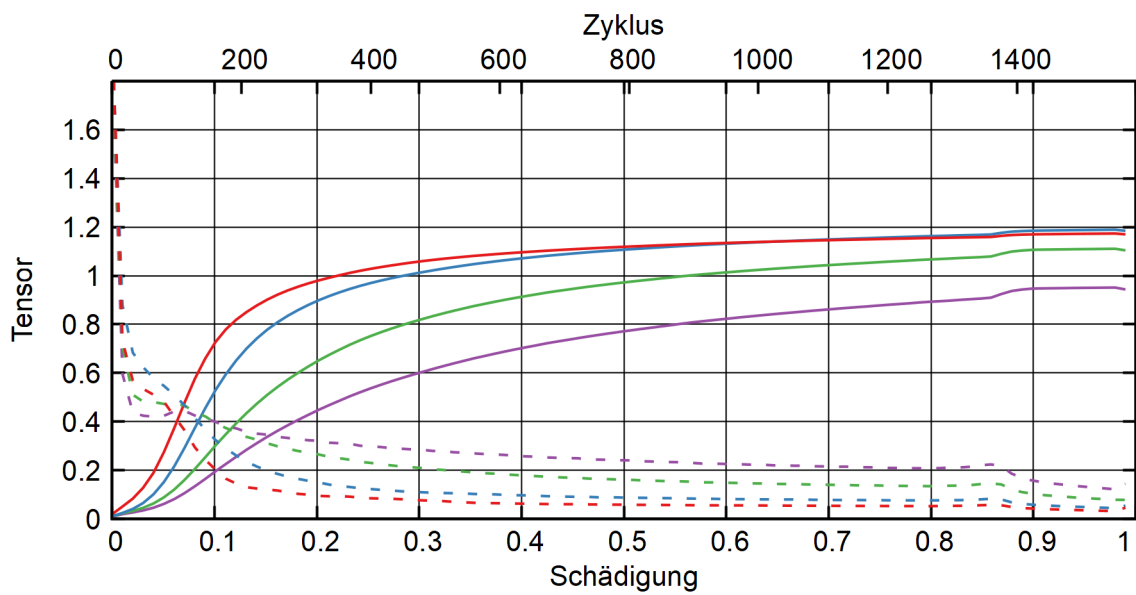
Die Tensoren der Einstufenversuche sind in Abb. 4.34 bis Abb. 4.38 gezeigt, jeweils als Funktion der Schädigung bzw. der Zahl der Zyklen. Die durchgezogenen Linien zeigen dabei die aus dem Mittelwert gewonnene Tensorkomponente, die gestrichelten Linien die aus der Spannweite extrahierten Parameter.



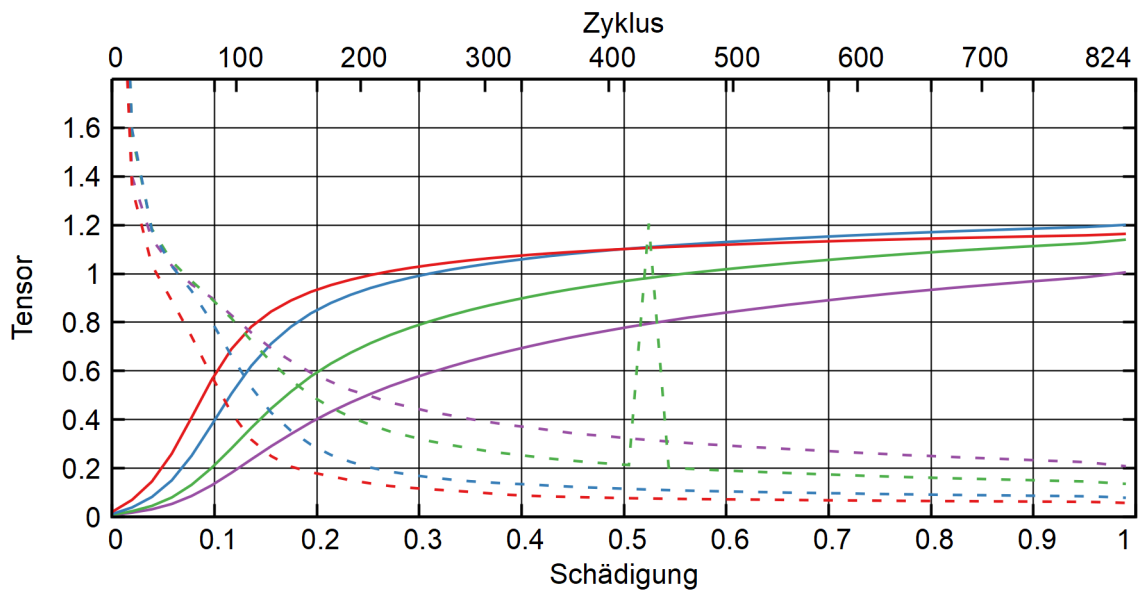
**Abb. 4.34** Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D8.1 (0,5 %)



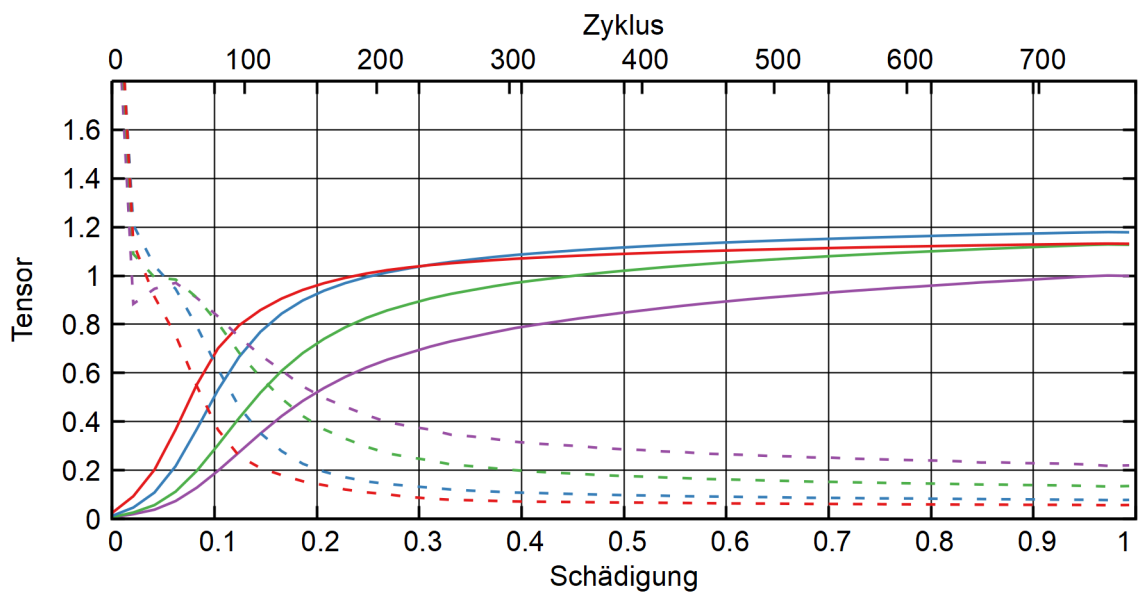
**Abb. 4.35** Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D0.3 (0.55 %)



**Abb. 4.36** Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D19.3 (0.6 %)



**Abb. 4.37** Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D24.3 (0.65 %)

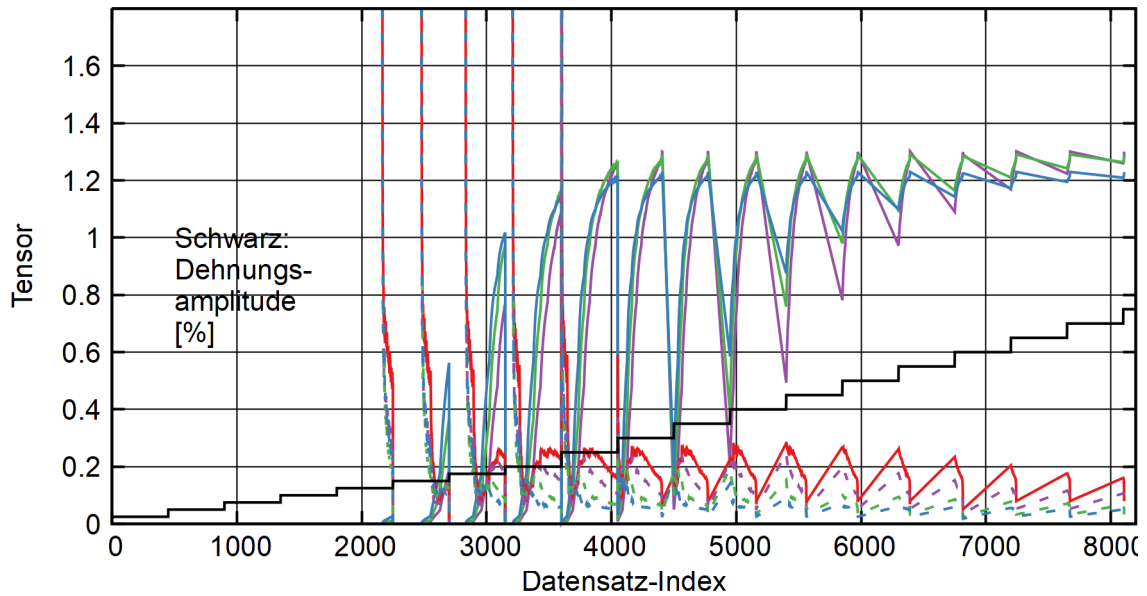


**Abb. 4.38** Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D3.2 (0.7 %)

In dieser Auftragung lässt sich eine klare Tendenz des Signals mit der Schädigung erkennen. Es ist zu hoffen, dass auch ein neuronales Netz diesen Zusammenhang erkennen könnte. Bemerkenswert ist, dass in der ersten Hälfte die Abhängigkeit klarer zu sein scheint als in der zweiten Hälfte.

### 4.8.7.3 Tensorbildung aus dem Dehnungssteigerungsversuch

Analog zu den Einstufenversuchen können auch aus dem Dehnungssteigerungsversuch Tensoren gewonnen werden. Das Ergebnis dieses Ansatzes ist in Abb. 4.39 dargestellt. Die Bedeutung der Linien ist analog zu den Einstufenversuchen.



**Abb. 4.39** Tensoren des Dehnungssteigerungsversuchs als Funktion des Datensatz-Index

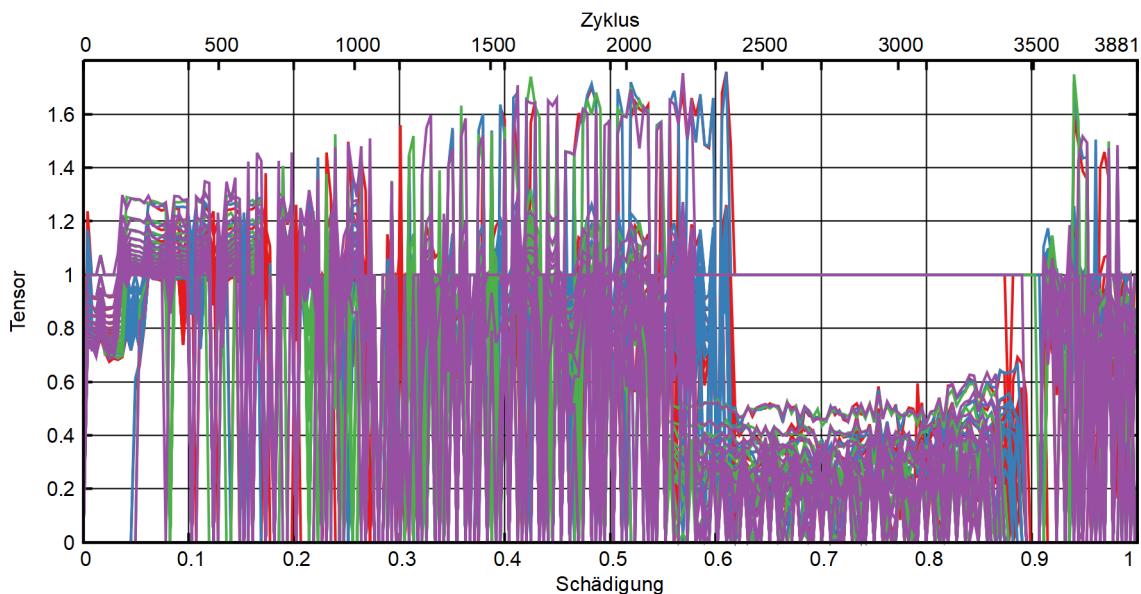
In diesem Verlauf des Tensors ist zu sehen, dass auf den einzelnen Stufen die Phasenverschiebung einen individuellen Verlauf nimmt. Außerdem wird deutlich, dass die Tensorbildung auf den niedrigsten Dehnungsstufen problematisch ist. Hier würde sich eine Alternative anbieten, die besser im Einheitsintervall angesiedelt ist.

#### 4.8.8 Tensor aus Fourierzerlegung der Wirbelstrommessung

Für die Tensorgewinnung aus den Sensordaten wird nach dem folgenden Verfahren vorgegangen:

- Wähle 16 aufeinanderfolgende Zyklen aus
- Bestimme die Koeffizienten einer Fast Fourier-Transformation
- Skaliere den Realteil der ersten 16 Koeffizienten auf das Intervall [0,1]
- Füge den kodierten Alterungszustand, das Medium und die Versuchstemperatur hinzu
- Füge den linearen Schädigungsparameter und die auf das Einheitsintervall transformierte Schädigung pro Zyklus hinzu

Die so gewonnen Tensoren haben 2 Elemente als „Labels“ und 67 ( $4 \cdot 16 + 3$ ) als „Features“.



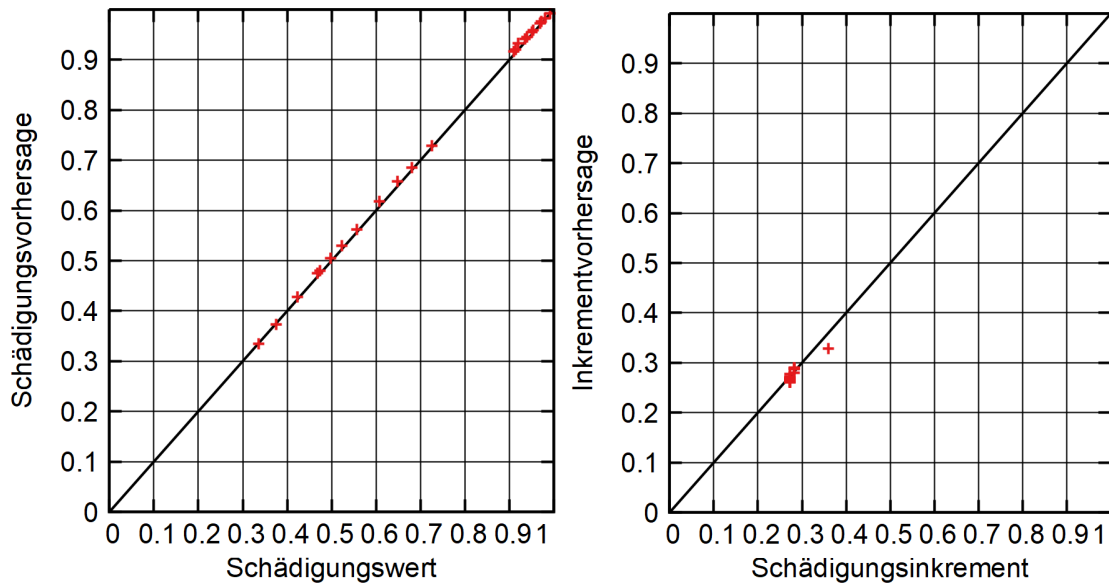
**Abb. 4.40** Tensorinformation von Probe D0.3 als Funktion der Schädigung

Das Ergebnis sieht nicht aus, als würde eine Entwicklung durch die fortschreitende Schädigung aus den Daten offenbar. Daher konzentrieren sich die weiteren Auswertungen auf die statistischen Werte.

## 4.9 Training und Vorhersage

### 4.9.1 Relu-Variante

Zum Training wird ein neuronales Netz mit zwei versteckten Schichten, einer Ausgabe-, und einer Eingabeschicht verwendet. Zum Test werden einige Daten ausgewählt und das trainierte Netz auf die Daten angewendet. Diese Tests sind in Abb. 4.41 dargestellt.

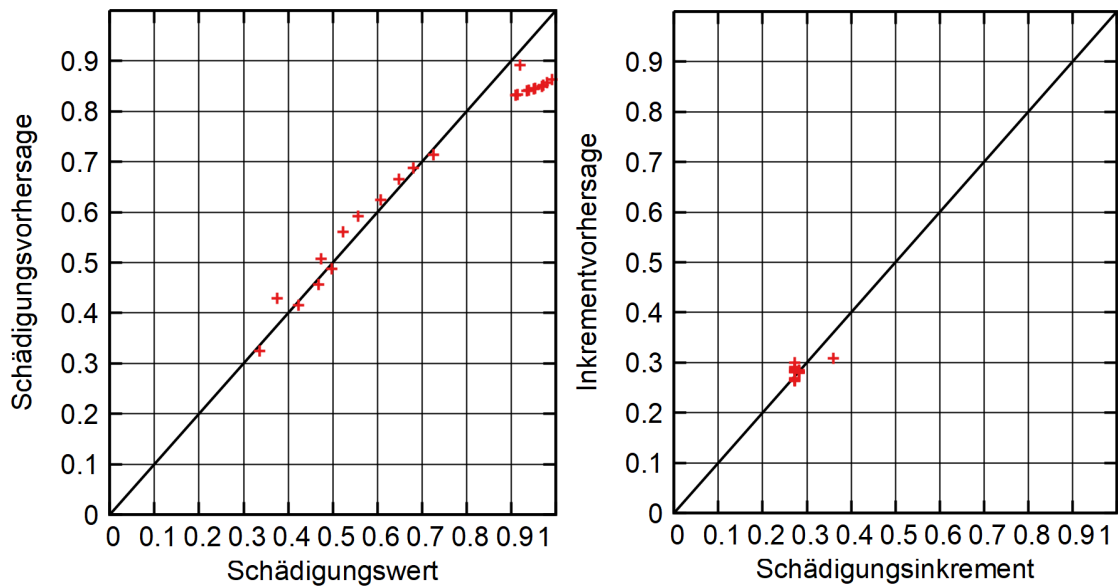


**Abb. 4.41** Vorhersagen des neuronalen Netzes mit Relu-Aktivierungsfunktion

Die Vorhersage wirkt überzeugend – der Eindruck der Rohdaten hat bereits eine gute Vorhersagbarkeit nahegelegt. Das trainierte Modell wird im HDF-5-Format gespeichert.

### 4.9.2 Sigmoid-Ausgabeschicht

Als Alternative wird die Ausgabeschicht mit einer Sigmoid-Aktivierungsfunktion versehen. Mit dieser Schicht ist sichergestellt, dass die Ausgabewerte im Einheitsintervall liegen. In Abb. 4.42 sind Vorhersagen bei einem Testdatensatz dargestellt.

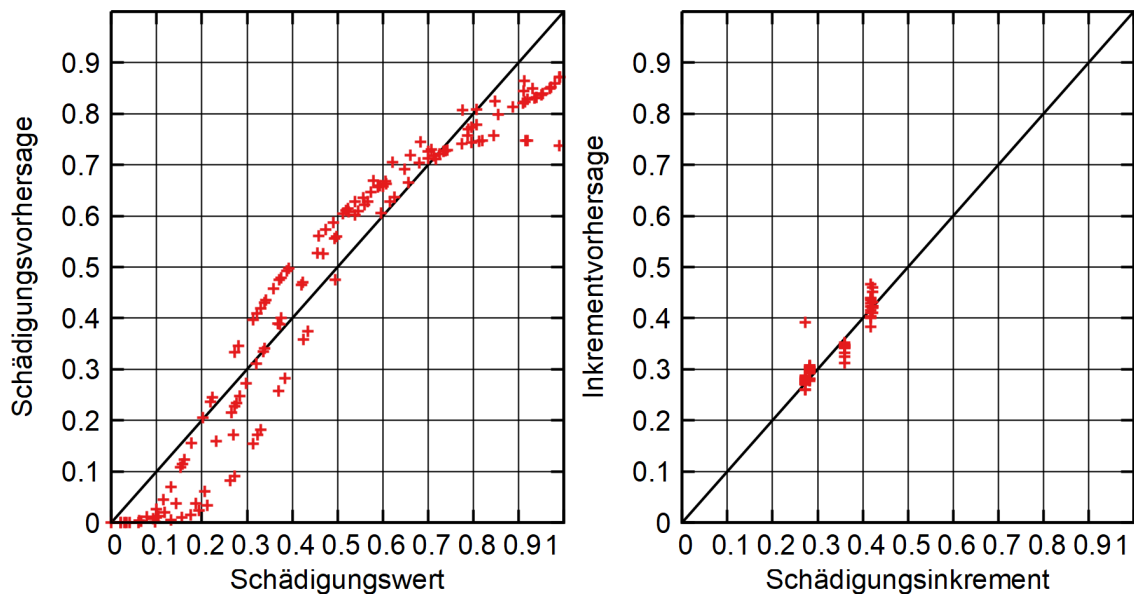


**Abb. 4.42** Vorhersagen des neuronalen Netzes mit Sigmoid-Aktivierungsfunktion

Auch diese Testdaten haben ein überzeugendes Ergebnis – die Vorhersage des Schädigungszustandes ist also auch mit diesem Modell möglich.

#### 4.9.3 Sensorfusion und Sigmoid-Ausgabeschicht

In der Version mit der Sensorfusion (Wirbelstrom und Spannung) wird ebenfalls die Sigmoid-Funktion in der Ausgabeschicht verwendet. In der folgenden Abbildung sind die Vorhersagen für beide Label gezeigt.



**Abb. 4.43** Vorhersage für das trainierte Netz mit Sensorfusion



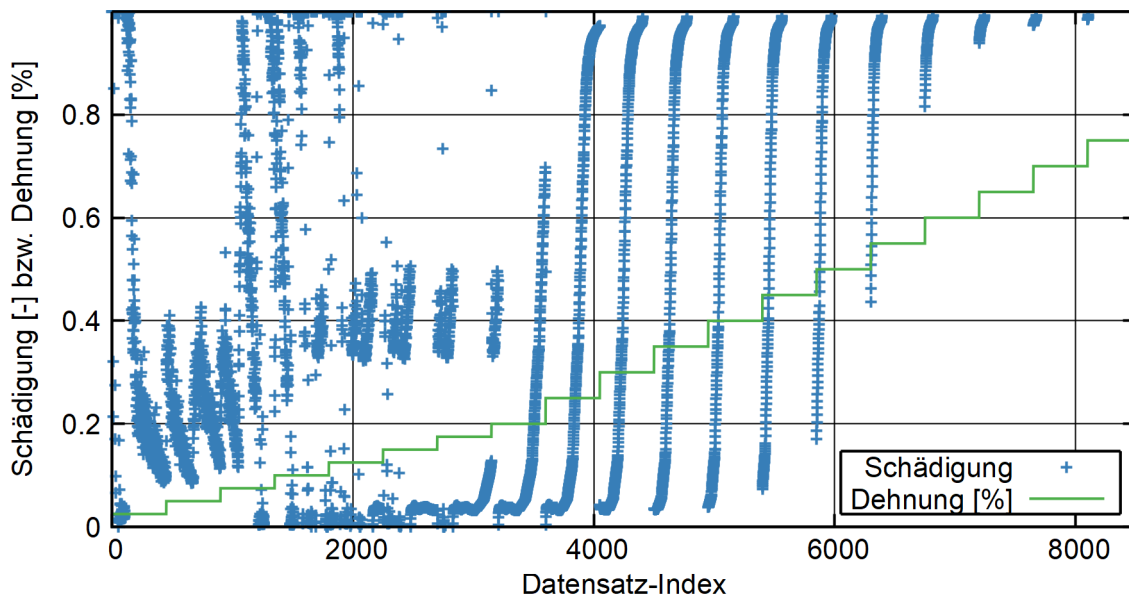
Die Vorhersage ist also zufriedenstellend, auch wenn ein deutlicher Trend bei der Schädigungsvorhersage zu erkennen ist.

#### 4.9.4 Anwendung auf den Dehnungssteigerungsversuch

Das Modell wird nach dem Training abgespeichert und kann auf den Dehnungssteigerungsversuch angewendet werden. Da zwei Labels verwendet werden, absolute und inkrementelle Schädigung, können auch zwei Vorhersagen verwendet werden.

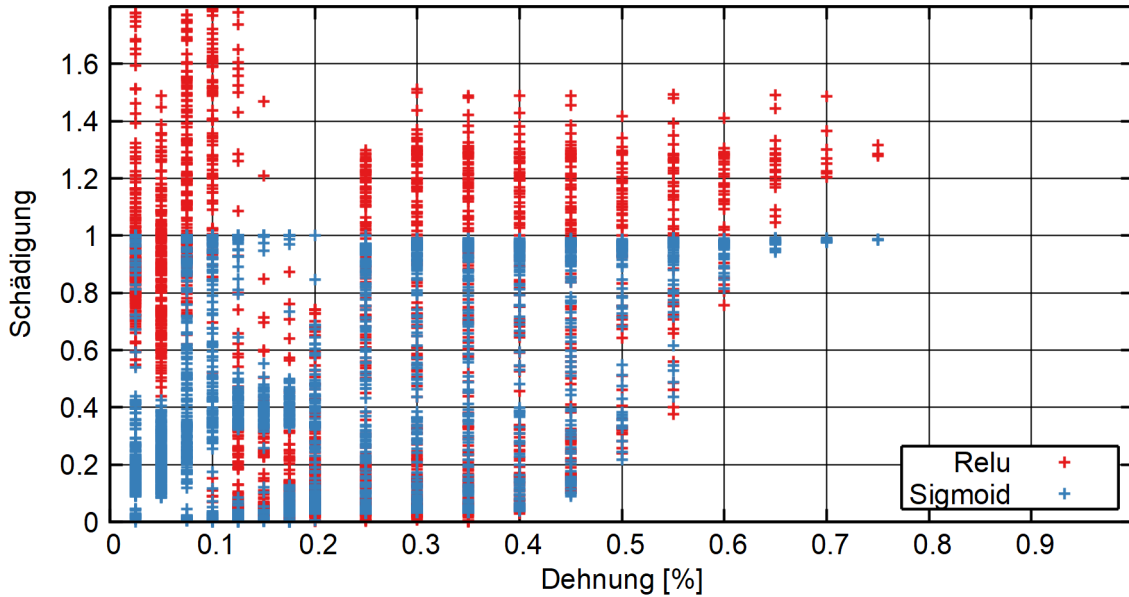
##### 4.9.4.1 Modellvorhersagen beim statistischen Wirbelstromtensor

Die Entwicklung der Ermüdungsschädigung im Dehnungssteigerungsversuch ist eine unmittelbare Vorhersage. In Abb. 4.44 ist diese pro fortlaufend nummeriertem Datensatz aufgetragen und auch der Dehnungsamplitude gegenübergestellt. Nur das Ergebnis mit Sigmoid-Funktion ist dargestellt. Bei niedrigen Dehnungsniveaus ist die Streuung sehr groß und die vorhergesagte Schädigung unrealistisch hoch. Ein Grund hierfür kann das mangelnde Training sein, da dieses nur auf den ersten Zyklen des DSV beruht. In diesem Diagramm ist zu sehen, dass typischerweise die Schädigung zu Beginn einer Laststufe fast stagniert, aber dann ansteigt und fast den Wert 1 erreicht – jedenfalls für Laststufen ab etwa 0,2 %. Ein solches Verhalten lässt sich bereits aus Abb. 4.39 erahnen.



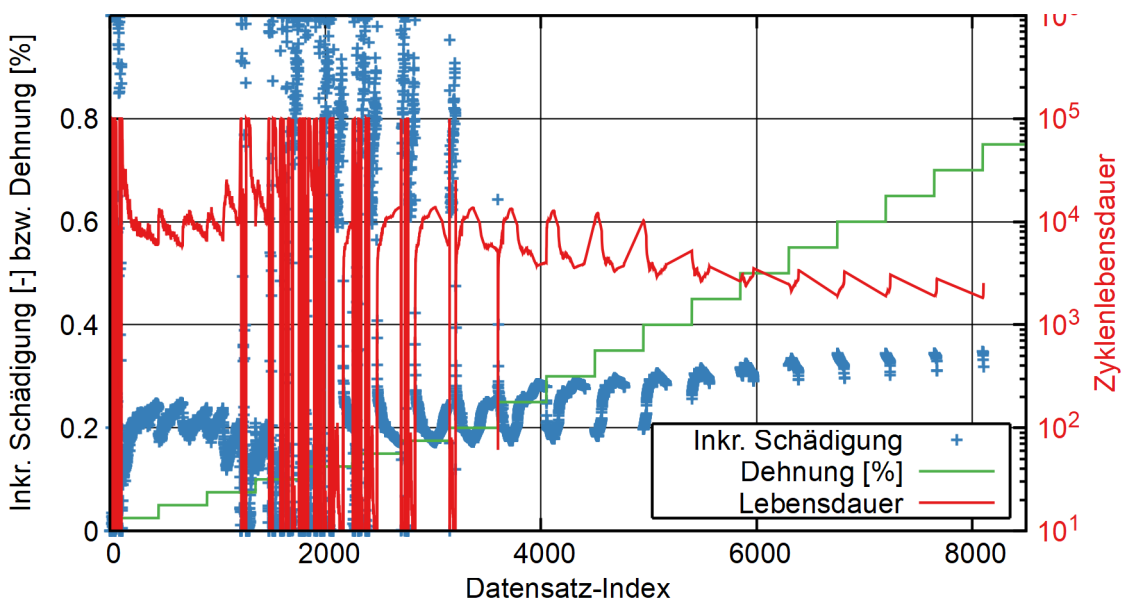
**Abb. 4.44** Vorhergesagte Entwicklung der Schädigung im Dehnungssteigerungsversuch und Dehnungsamplitude

Das Ergebnis aufgetragen nach Dehnungsniveaus ist in Abb. 4.45 dargestellt. In dieser Abbildung ist eine deutliche Entwicklung der Schädigung in den oberen Dehnungsstufen erkennbar.



**Abb. 4.45** Vorhergesagte Schädigung in Zyklen einer bestimmten Dehnungsamplitude im Dehnungssteigerungsversuch.

Die Vorhersage der inkrementellen Schädigung über den Versuchszeitraum zeigt ebenfalls Drifteffekte auf jeder Stufe. In Abb. 4.46 ist der Verlauf über den Versuch dargestellt.

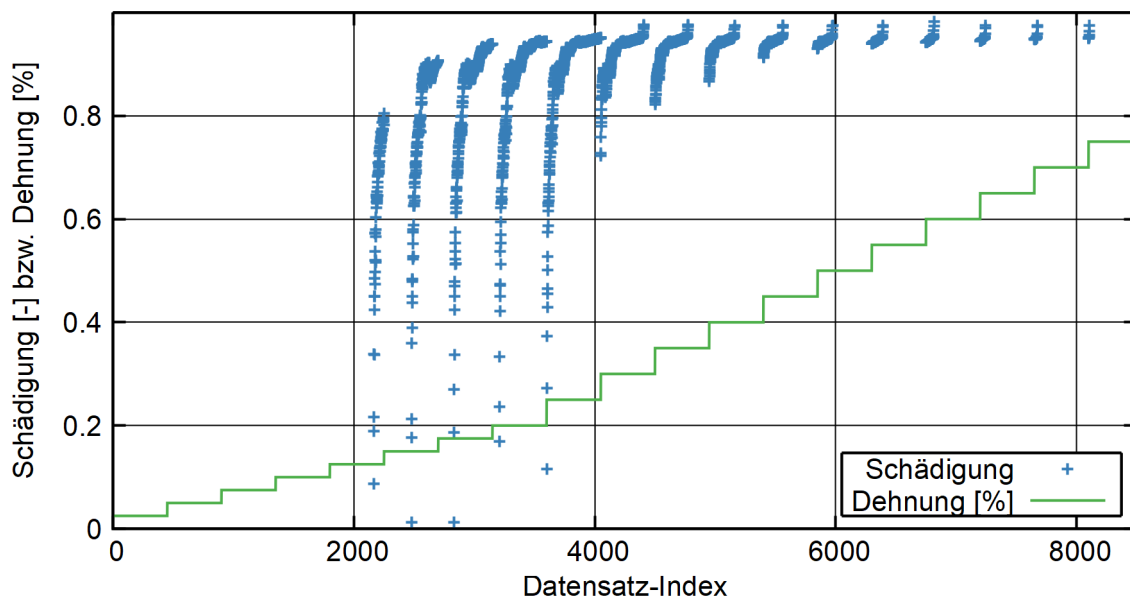


**Abb. 4.46** Inkrementelle Schädigung beim Dehnungssteigerungsversuch

Es ist zu erkennen, dass für die Stufen von ca. 0,1 bis 0,2 % Dehnungsamplituden große Streuungen auftreten. Danach und auch davor ist die detektierte inkrementelle Schädigung in einem viel engeren Bereich.

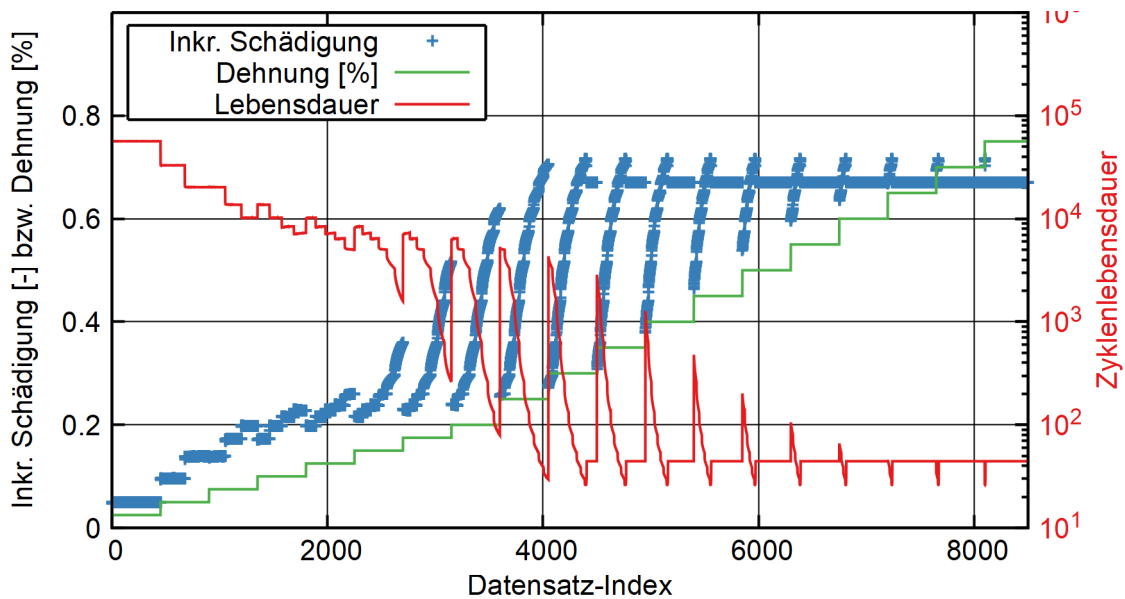
#### 4.9.4.2 Modellvorhersagen bei Sensorfusion

Die bewährte Darstellung der Schädigungsvorhersage als Funktion des Dehnungssteigerungsversuch-Datensatzindex kann herangezogen werden.



**Abb. 4.47** Vorhergesagte Schädigung im Dehnungssteigerungsversuch mit Sensorfusion

Die Vorhersage für die inkrementelle Schädigung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abb. 4.48** Vorhergesagte inkrementelle Schädigung im Dehnungssteigerungsversuch mit Sensorfusion

Mit Sensorfusion ist die Vorhersage deutlich weniger gestreut als bei den reinen Wirbelstromdaten. Allerdings ist hier zu beobachten, dass die zur Zykluslebensdauer gehörige inkrementelle Schädigung für die hohen Laststufen unrealistisch wird.

#### 4.10 Bestimmung von Wöhlerlinien aus dem Dehnungssteigerungsversuch

##### 4.10.1 Bestimmung von Wöhlerlinien durch Fit der Schädigungsentwicklungsvorhersage

Als ein Ansatz bietet es sich an, die Schädigungsentwicklung mit einer Funktion zu fitten. Auf die einzelnen Dehnungsstufen  $i$  bezogen sollte dieser Ansatz so formuliert sein.

$$D_i = D_{i-1} + \frac{n_i}{N_i} \quad (4.11)$$

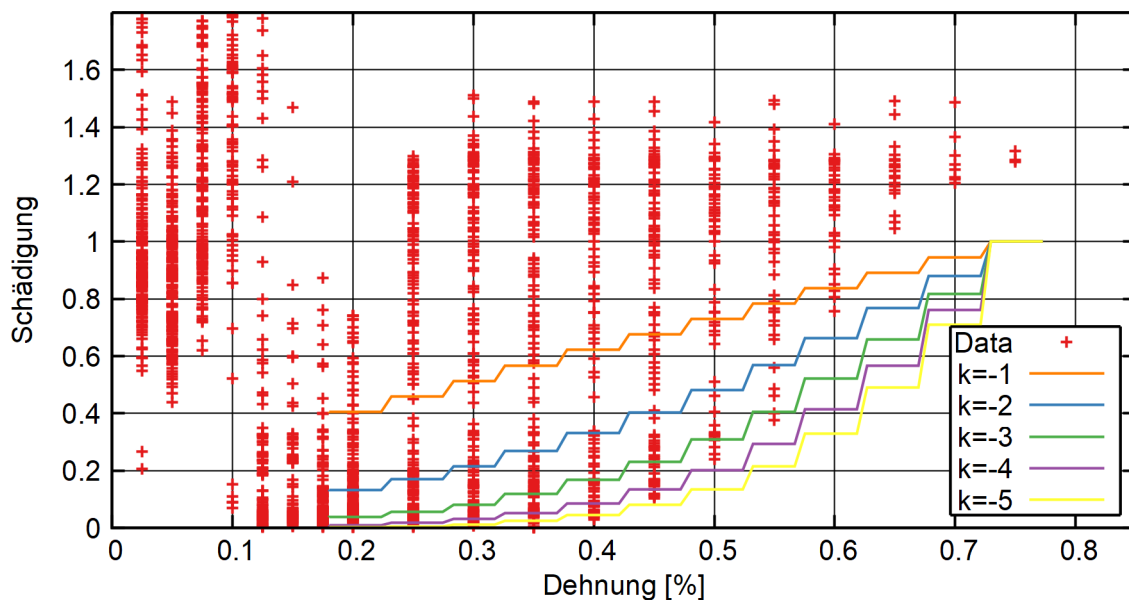
Wird nun ein Potenzgesetz-Ansatz für die Wöhlerlinie angesetzt, so kann diese Gleichung weiter vereinfacht werden. Die Wöhlerlinie wird nach folgender Vorschrift parametrisiert.

$$N(\epsilon_a) = N_0 \left( \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0} \right)^{-k} \quad (4.12)$$

Alternativen sind jedoch denkbar, z. B. die Kombination aus zwei Potenzrelationen. Daraus lässt sich dann eine Vorschrift für den Ermüdungsfortschritt bestimmen. Die integrale Formulierung des Ermüdungsfortschritts kann dann auch angegeben werden.

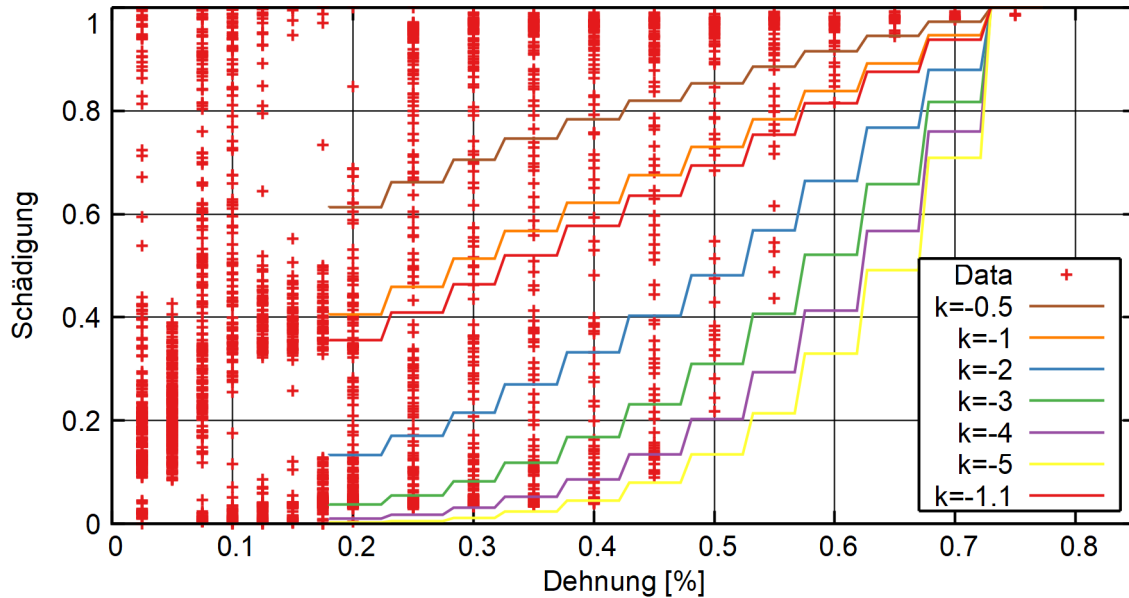
$$D_i = \sum_{j=0}^i \frac{n_j}{N(\epsilon_j)} \quad (4.13)$$

Die Randbedingung dabei ist, dass die Schädigung auf der letzten Stufe den Wert Eins erreicht. Das kann z. B. erreicht werden, indem die freien Parameter  $N_0$  und  $\epsilon_0$  zur Normierung genutzt werden. Diese Analyse wird für Dehnungsamplituden oberhalb von 0,2 % durchgeführt. Ein Vergleich von verschiedenen K-Werten und den Daten aus dem Relu-Modell ist in Abb. 4.49 dargestellt.



**Abb. 4.49** Schädigungsentwicklung im Dehnungssteigerungsversuch mit Relu-Aktivierungsfunktion und Vergleich mit verschiedenen Parametrisierungen der Wöhlerlinie

Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass die Modellvorhersage der Schädigung nicht mit einer Parametrisierung zusammenpasst – auch streuen die Daten zu weit, und der Schädigungsparameter liegt über Eins. Dieses Bild wird jedoch besser, wenn das Sigmoid-Modell verwendet wird.

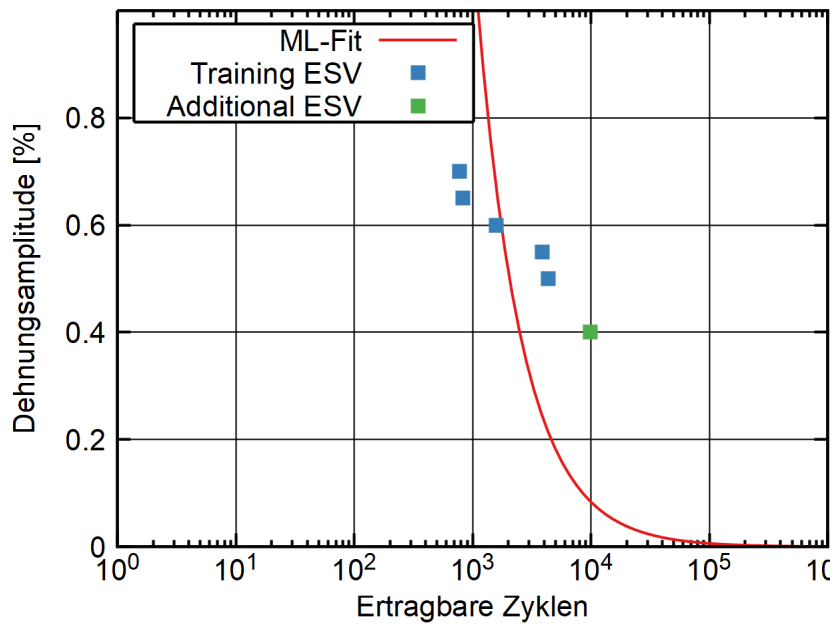


**Abb. 4.50** Schädigungsentwicklung im Dehnungssteigerungsversuch mit Sigmoid-Aktivierungsfunktion, Vergleich mit verschiedenen Parametrisierungen der Wöhlerlinie und Fitergebnis  $k=-1.1$

Die so gefittete Wöhlerlinie ist beschrieben durch  $k = -1.13$ . Hierbei wurden alle Stufen ab 0,2 % Dehnung berücksichtigt. Mit der Normalisierung aus dem Ende des Laststeigerungsversuchs ergibt sich folgende Form der Wöhlerlinie.

$$N(\epsilon_a) = 2764 \left( \frac{k}{0.01} \right)^{-1.13} \quad (4.14)$$

Dieses Fitergebnis und der Vergleich mit der Lebensdauer der Einstufenversuche ist in Abb. 4.51 dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Lebensdauer der Einstufenversuche nicht unmittelbar in diesen Verlauf eingegangen ist; lediglich die Zyklen bis zum Versagen des Laststeigerungsversuchs wurden zur Normalisierung verwendet.



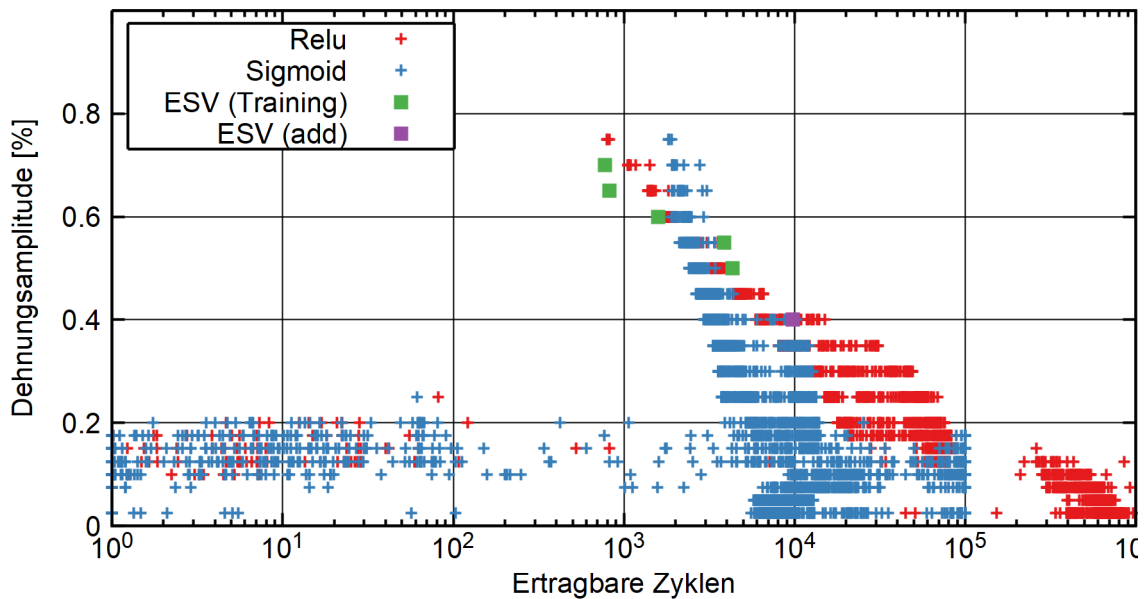
**Abb. 4.51** Wöhlerlinie aus dem Fit der Schädigungsentwicklung mit Sigmoid-Funktion und Vergleich mit den Einstufenversuchen

Dieses Ergebnis ist zwar einigermaßen plausibel, aber auch nicht völlig überzeugend. Das verwundert nicht, ist doch bereits die Schädigungsentwicklung nicht so, wie es zu erwarten wäre.

Bei der Sensorfusion ist das vom Fit identifizierte Minimum nicht überzeugend, obwohl die einzelnen Schädigungsbereiche auf den Dehnungsniveaus besser aussehen.

#### 4.10.2 Bestimmung einer Wöhlerlinie aus der inkrementellen Schädigung

Aus der inkrementellen Schädigung lässt sich unmittelbar eine Wöhlerlinie bestimmen. Dazu muss die auf eine Lebensdauer umgerechnete inkrementelle Schädigung gegen die Dehnungsamplitude aufgetragen werden. Diese Umrechnung ist in Abb. 4.52 gezeigt. Die Sigmoid-Funktion und die Relu-Funktion sind beide gezeigt.



**Abb. 4.52** Vorhergesagte inkrementelle Schädigung, umgerechnet auf eine Lebensdauer, für den Dehnungssteigerungsversuch

Diese Auftragung zeigt unmittelbar eine plausible Vorhersage für die Lebensdauer bei den oberen Dehnungsamplituden ( $>0,2\%$ ), wie auch der Vergleich mit den Einstufenversuchen zeigt. Es fällt auf, dass die Sigmoid-Ergebnisse eine steilere Wöhlerlinie liefern als die Relu-Ergebnisse, die etwas näher an den experimentellen Versuchsergebnissen liegen.

Für die Daten mit Sensorfusion dagegen ist, wie bereits vorher angemerkt, die inkrementelle Schädigung unrealistisch hoch vorhergesagt. Hier müsste das Training oder das Netz noch verbessert werden, um eine bessere Vorhersage zu erzielen.

#### 4.11 Fazit

In Kapitel 3 sind Auswertetechniken des Data Mining-Gebiets im Anwendungsfall für instrumentierte Ermüdungsproben beschrieben. Der Ansatz des Maschinellen Lernens wird verwendet, um die Ermüdungsschädigung (in Form eines Palmgren-Miner-Parameters) anhand der Charakteristiken von zyklischen Widerstandsmessungen vorherzusagen. Als Konsequenz ergibt sich ein Kurzzeitverfahren, das mittels (im Beispiel) vier Einstufenversuchen und einem Laststeigerungsversuch in der Lage ist, eine Wöhlerlinie vorherzusagen. Die Genauigkeit der Vorhersage, festgemacht am Vergleich mit Auslegungskurve und StrainLife-Ansatz, ist beim ersten Demonstrationsfall eher gering, aber dennoch gelingt es, die Schritte des Verfahrens umzusetzen.



Im Zuge der Diskussion des Ansatzes und der Ergebnisse konnten zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert werden:

- Die gewählten Anwendungsbeispiele bei erhöhter Temperatur sind durch störende Einflüsse des Ofens möglicherweise verfälscht; Versuchsergebnisse bei Raumtemperatur könnten bessere Ergebnisse liefern.
- Der gewählte Ansatz für die Struktur des neuronalen Netzes wurde nicht auf Verbesserungen und gute Praxis hin untersucht; ein verbesserter Ansatz birgt daher das Potenzial erheblicher Genauigkeitssteigerungen.
- Die elektrische Widerstandsmessung zeigt sich nicht sensitiv auf die ersten ca. 60 % der Ermüdungsschädigung. Alternative Instrumentierungen sind hier besser geeignet.
- Gemäß dem werkstoffmechanischen Verständnis läuft die Schädigung durch die Wechselbelastung in verschiedenen Phasen ab, die jeweils eine Signatur in den ZfP-Signalen hinterlassen könnten. Die Suche nach diesen Signaturen ist noch offen.

Insgesamt ist der Data Mining Ansatz vielversprechend, die vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen sollen im Rahmen von Aktivitäten fortgesetzt werden, die sich auf das Kurzzeit-Verfahren mit KI konzentrieren.

## 5 Ermüdungsbelastung im FSI<sup>2</sup>-Komponentenversuch

Im Rahmen der zweiten Phase des MibaLeb-Vorhabens sollte ein Rohrstück unter realistischen Bedingungen thermisch beaufschlagt werden, wobei eine nennenswerte Ermüdungsschädigung durch Wechsellasten entstehen sollte. Die in dieser Dokumentation beschriebenen Arbeiten haben das Ziel, das Lastkollektiv rechnerisch zu ermitteln und mit den Ergebnissen der Versuche abzugleichen.

Eines der beiden Rohrsegmente, die aus dem von RWE zur Verfügung gestellten Rohrstück hergestellt wurden, wurde mittels Thermoelementen, Dehnungsmessstreifen und mit der für das zfP-System vorgesehenen Sensorik von MPA und LZfPQ instrumentiert, in den FSI-Kreislauf der MPA eingebaut und praxisrelevanten Beanspruchungsparametern hinsichtlich Druck und Temperatur ausgesetzt. Die definierten thermischen Transienten stellen betriebsnahe Beanspruchungen in der Komponente dar, die zur Ermüdung bzw. Schädigung des Werkstoffs führen. Die Beanspruchungshistorie wurde aufgezeichnet und dient zur späteren Bewertung der mikrostrukturellen Veränderung der Rohrleitungskomponente. Mittels PROST/FEM<sup>3</sup> wurde die auftretende Beanspruchungssituation durch die GRS simuliert. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts waren die Versuche am FSI-Kreislauf der MPA infolge von technischen Problemen noch nicht abgeschlossen.

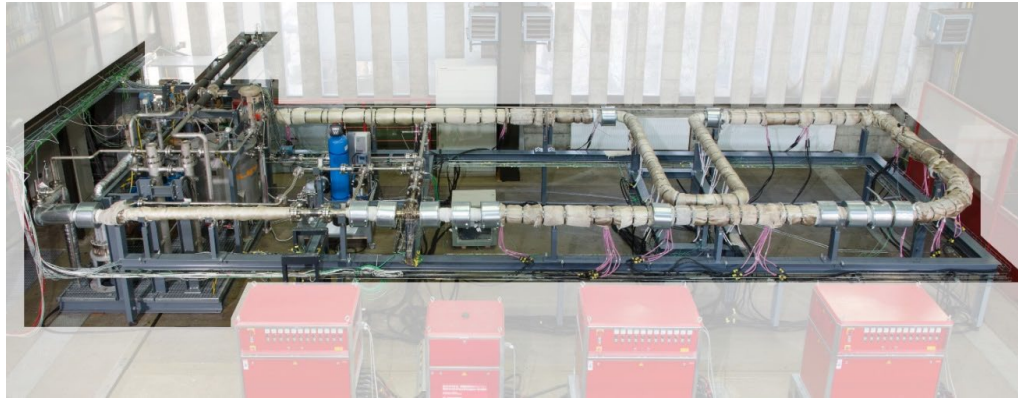
### 5.1 Versuchsbeschreibung

Der Versuch zur Ermüdungsbelastung sieht ein instrumentiertes Rohrsegment vor, das im FSI-Kreislauf der MPA Stuttgart eingebaut wurde und mit thermischen Wechselbelastungen beaufschlagt wurde. Der FSI-Kreislauf ist in Abb. 5.1 dargestellt.

---

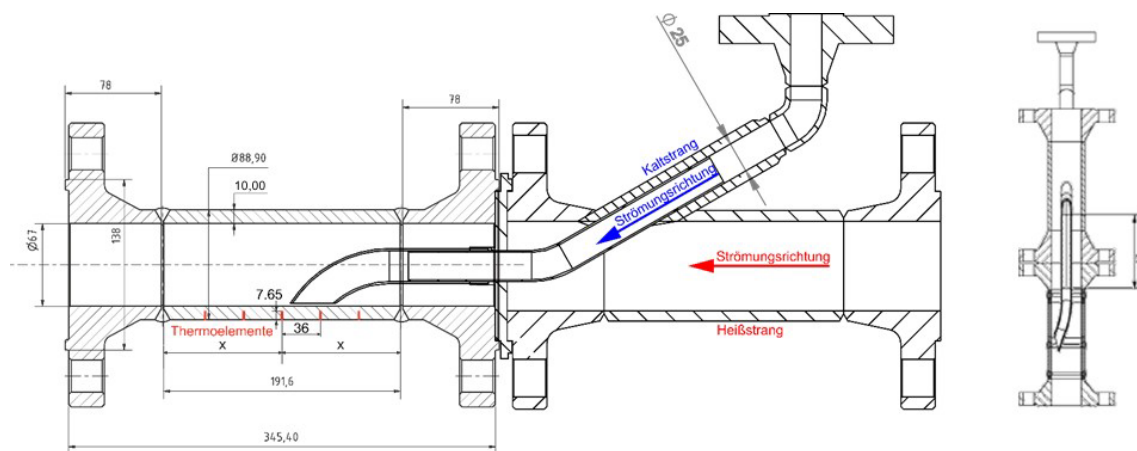
<sup>2</sup> FSI – Fluid-Struktur-Interaktion

<sup>3</sup> FEM – Finite-Elemente-Methode



**Abb. 5.1** FSI-Kreislauf der MPA Universität Stuttgart, Bild von der MPA

Das eingebaute Rohrstück (Außendurchmesser 88,9 mm, Wandstärke 10 mm) ist ein Geradrohr aus dem austenitischen Stahl X6CrNiNb18-10. Die thermische Belastung wurde dadurch realisiert, dass mithilfe eines Innenrohrs (Hutze) über definierte Zeiträume kaltes Wasser in den Kreislauf eingespeist und insbesondere direkt an die Innenseite der Rohrwand (6 Uhr Position) geleitet wurde. Eine Skizze dieser Vorrichtung ist in Abb. 5.2 dargestellt. Der Durchmesser der Hutze beträgt ca. 25 mm.



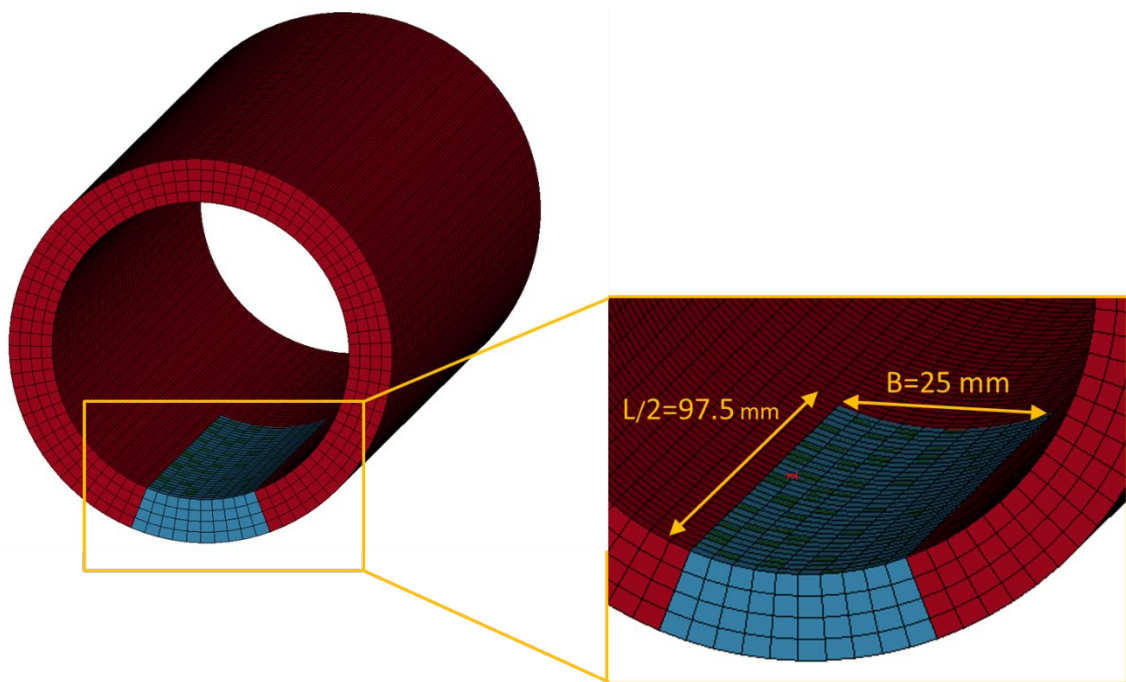
**Abb. 5.2** Führung des Kaltwassers zur Rohrwand

Der Wechsel der Fluidtemperatur erfolgte zwischen zwei konstanten Temperaturniveaus (25 °C und 265 °C) in einem definierten Zeitintervall (Zyklusdauer 60 s, davon 30 s heiß, 30 s kalt).

## 5.2 Beschreibung des Analysemodells (idealisierter Ansatz)

Das Ziel der Simulation war, den lokalen Spannungs-Zeitverlauf an bestimmten Stellen im Rohrsegment zu bestimmen.

Ein idealisierter Ansatz besteht darin, die Rohrstückgeometrie und die Kühlungsverhältnisse stark zu vereinfachen. Das vereinfachte FE<sup>4</sup>-Modell des Rohrsegments mit Kühlstreifen ist als Halbmodell in Abb. 5.3 dargestellt, wobei eine entsprechende Achsensymmetrie angenommen wird.



**Abb. 5.3** FE-Modell des Rohrsegments mit Kühlstreifen (Halbmodell)

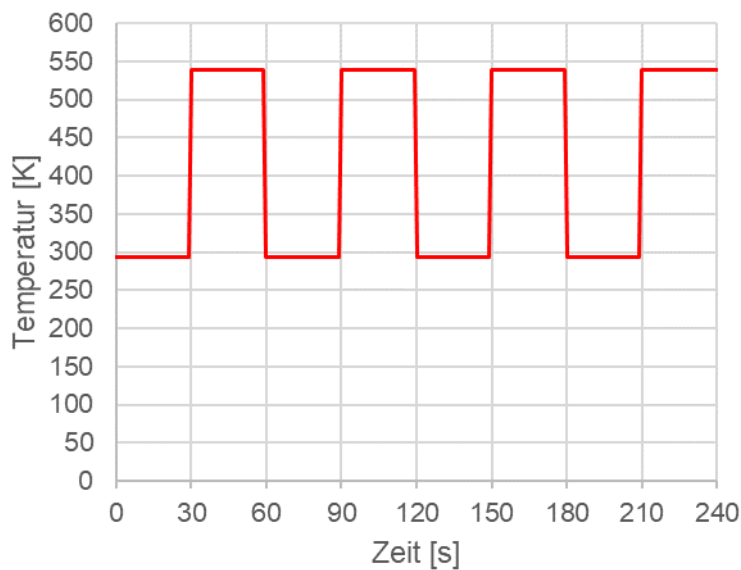
Das Modell besteht aus 22176 Solid-Elementen und 330 Schalenelementen, welche im Bereich des Kühlstreifens über eine Kontaktdefinition die zyklische thermische Belastung auf die Struktur des Rohrsegments übertragen. Die Gesamtzahl der Knoten beträgt 28514.

---

<sup>4</sup> FE- Finite Elemente

Im ersten Ansatz wurden die im Folgenden beschriebenen Zwangsbedingungen dem Modell zugeordnet. Das Modell ist auf der Unterseite (x,y-Ebene) auf einer „Sliding Plane“ in z-Richtung abgestützt. Hierdurch wird eine mögliche Biegung des Rohrsegments beschränkt. Ebenfalls ist die vom Kühlstreifen abgewandte Querschnittsfläche in axialer (x)-Richtung fixiert, wodurch die große Steifigkeit der Flansche approximiert werden soll. Die Knoten auf der Symmetrieffläche sind in axialer Richtung gekoppelt, d.h. alle Knoten haben die gleiche x-Verschiebung.

Als thermische Randbedingung auf der Außenoberfläche des Rohrsegments wird vereinfacht angenommen, dass kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet (thermisch isoliert). Auf der Innenseite ergibt sich eine Wechsellast in Form einer Stufenfunktion als Temperatur-Randbedingung (Abb. 5.4). Eine endliche Abfolge von thermischen Zyklen, folgend auf eine Anfangs gleichförmige Temperatur ( $265\text{ °C} = 538\text{ K}$ ), wird simuliert.



**Abb. 5.4** Aufgebrachte thermische Wechsellast

Die Simulation wurde mit dem FE-Programm LS-DYNA thermisch-mechanisch gekoppelt durchgeführt. Dazu benötigen sowohl der mechanische als auch der thermische FE-Solver geeignete Materialmodelle.

Das Materialmodell \*MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL ermöglicht die Berücksichtigung temperaturabhängiger, mechanischer Kennwerte für E-Modul, Querkontraktionszahl, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Fließspannung und Tangentenmodul. Das thermische Materialmodell \*MAT\_THERMAL\_ISOTROPIC beinhaltet die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit des angenommenen Werkstoffs.

Die vorhandenen, temperaturabhängigen Ausdehnungskoeffizienten, welche sich auf eine Referenztemperatur von 288 °C beziehen /SIE 99/, wurden auf eine niedrigere Referenztemperatur von 265 °C umgerechnet. In der folgenden Tabelle sind die in diesem Zusammenhang berechneten Werte der Temperaturstützstellen tabellarisch (Tab. 5.1) aufgelistet.

**Tab. 5.1** Angepasste Wärmeausdehnungskoeffizienten /SIE 99/

T [°C]	$\alpha_T$ T <sub>reff</sub> = 288 °C	$\alpha_T$ T <sub>reff</sub> = 265 °C
0	1,50E-05	1,470E-05
20	1,50E-05	1,470E-05
100	1,60E-05	1,569E-05
200	1,70E-05	1,655E-05
300	1,90E-05	1,855E-05
400	2,10E-05	2,055E-05

In Tab. 5.2 werden die relevanten Materialkennwerte, welche im Materialmodell \*MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL für die mechanische Berechnung verwendet werden, aufgelistet. Tab. 5.3 enthält die Materialkennwerte, welche für die thermische Berechnung im Materialmodell \*MAT\_THERMAL\_ISOTROPIC verwendet werden.

**Tab. 5.2** Verwendete Materialkennwerte der mechanischen Berechnung /SIE 99/

<b>Kenngröße / T [K]</b>	<b>273,2</b>	<b>293,2</b>	<b>373,2</b>	<b>473,2</b>	<b>573,2</b>	<b>673,2</b>
E-Modul [Pa]	1,95e11	1,95e11	1,72e11	1,55e11	1,49e11	1,42e11
Poissonzahl	0,276	0,277	0,282	0,288	0,294	0,3
Wärmeausdehnungsk. $\alpha_T$ [1/K]	1,47e-05	1,47e-05	1,569e-05	1,655e-05	1,855e-05	2,055e-05
Fließspannung [Pa]	3,2e+08	3,2e+08	3,2e+08	3,2e+08	3,2e+08	3,2e+08
Tangentenmod. [Pa]	2,0e+09	2,0e+09	2,0e+09	2,0e+09	2,0e+09	2,0e+09

**Tab. 5.3** Materialkennwerte der thermischen Berechnung /SIE 99/

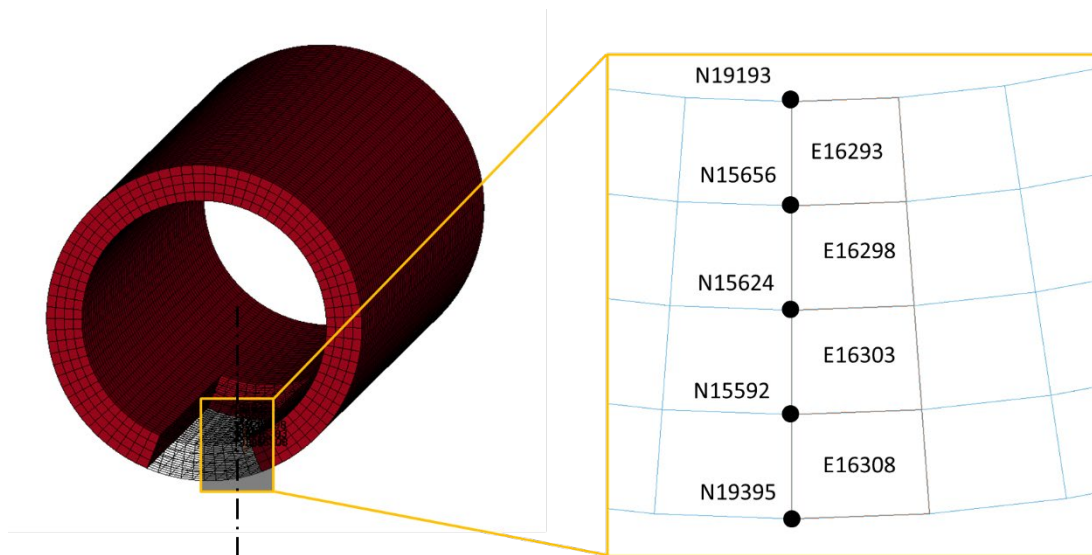
<b>Spezifische Wärmekapazität</b>	500 J/kgK
<b>Thermische Leitfähigkeit</b>	16 W/mK

Die in der LS-DYNA-Rechnung für die thermische zyklische Belastung verwendete Kontaktdefinition \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_THERMAL\_ID beinhaltet einerseits die Wärmeleitfähigkeit des Fluids und andererseits eine Wärmeleitfähigkeit bei geschlossenem Kontaktpalt. Als Wärmeleitfähigkeit des Fluids wurde vereinfacht ein Wert von ca. 0,6 W/mK verwendet, d.h. die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Wassers wurde zunächst nicht berücksichtigt.

Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, innerhalb der Kontaktdefinition eine Temperaturabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten bei geschlossenem Kontaktpalt entweder direkt über eine Temperaturabhängigkeit oder indirekt über eine zeitabhängige Kurve zu definieren, wurde hilfsweise eine Konstruktion mit zeitgesteuerten Kontakten definiert. Für das niedrige Temperaturniveau wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von 3800 W/m<sup>2</sup>K und für das hohe Temperaturniveau ein Wärmeübergangskoeffizient von 300 W/m<sup>2</sup>K eingeführt. Über eine Zeitsteuerung wurden die jeweiligen Kontakte in 30 s dauernden Zyklen analog zu den thermischen Wechsellasten (s. Abb. 5.4) aktiviert bzw. deaktiviert. Zur Vermeidung eines mechanischen Einflusses, wurde für diese Modellgruppe ein Materialgesetz (MAT\_Null) verwendet, welches keine mechanisch relevanten Eigenschaften besitzt.

Der radial wirkende Innendruck wurde als Drucklast auf die Innenfläche des Rohrsegmentmodells aufgebracht. Die axiale Wirkung des Innendrucks wurde als axiale Spannung auf die Ringfläche des Rohrsegmentmodells aufgebracht. Der Wert ergibt sich aus dem Innendruck und dem Verhältnis der Flächen von fiktiver Querschnittsinnenfläche und der Ringfläche der Rohrleitung. Die Temperaturlasten werden als Randbedingungen auf die Strukturknoten aufgebracht.

In Abb. 5.5 sind Auswertepunkte innerhalb des Einflussbereichs der Kaltwassereinspeisung dargestellt. Diese liegen näherungsweise in der Mitte des Kühlstreifens im Halbmodell des Rohrsegments (6 Uhr Position, axial:  $x=48,75$  mm) und ermöglichen eine Auswertung von innen nach außen.



**Abb. 5.5** Elemente- und Knotennummern auf der Auswertelinie von innen nach außen (vergrößerter Schnitt)

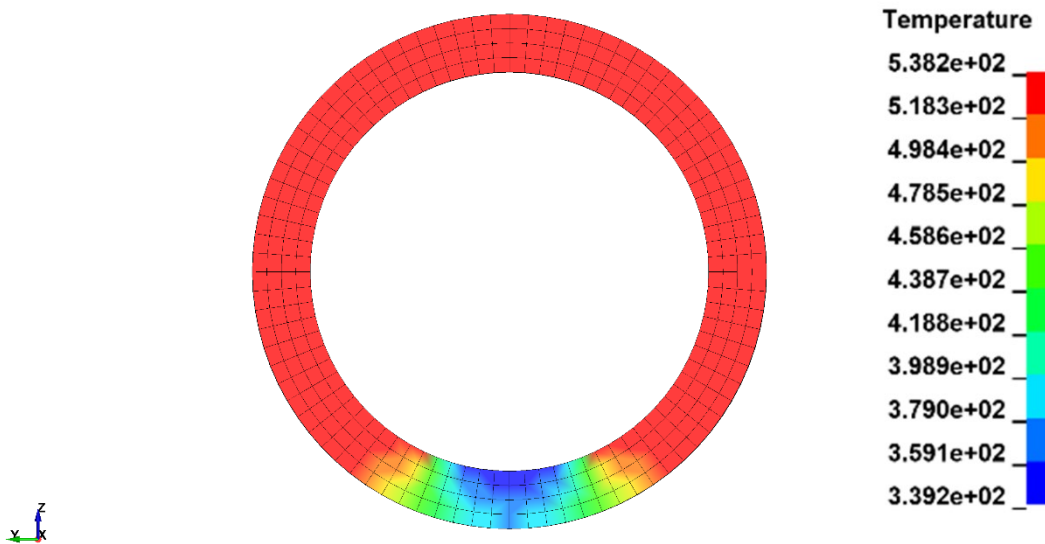
### 5.3 Simulation zum Komponentenversuch mit Ermittlung des Spannungsverlaufs

Im Folgenden werden Ergebnisse einer Berechnung mit dem vorgestellten Analysemodell dargestellt. Die beschriebene thermische Wechsellast (s. Abb. 5.4) wird auf die Struktur aufgebracht. Folgende Annahmen werden getroffen:

- 4 Zyklen mit Abkühlung- und Aufheizungsphase von jeweils 30 s
- 5 Auswertepunkte von innen nach außen

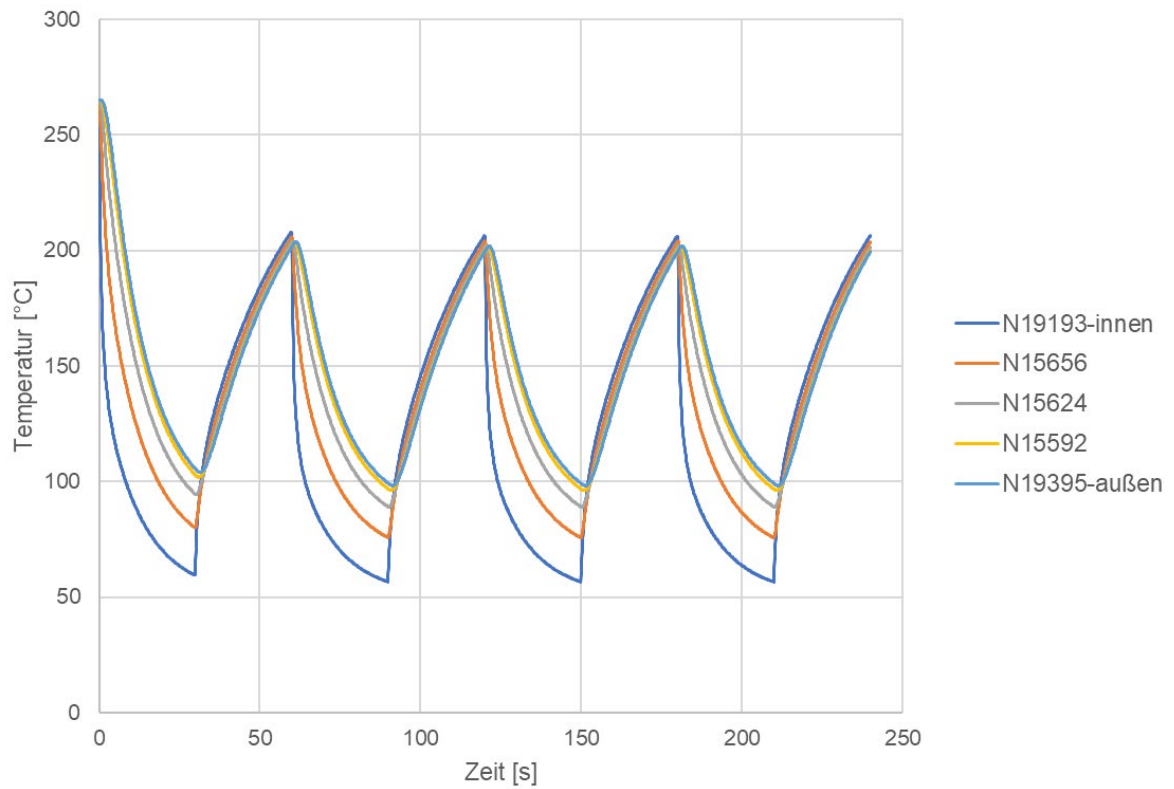


In Abb. 5.6 wird die Temperaturverteilung in dem geschnittenen Rohrsegment nach 30 s dargestellt. Der Temperaturgradient infolge der Kaltwassereinspeisung ist deutlich zu erkennen.

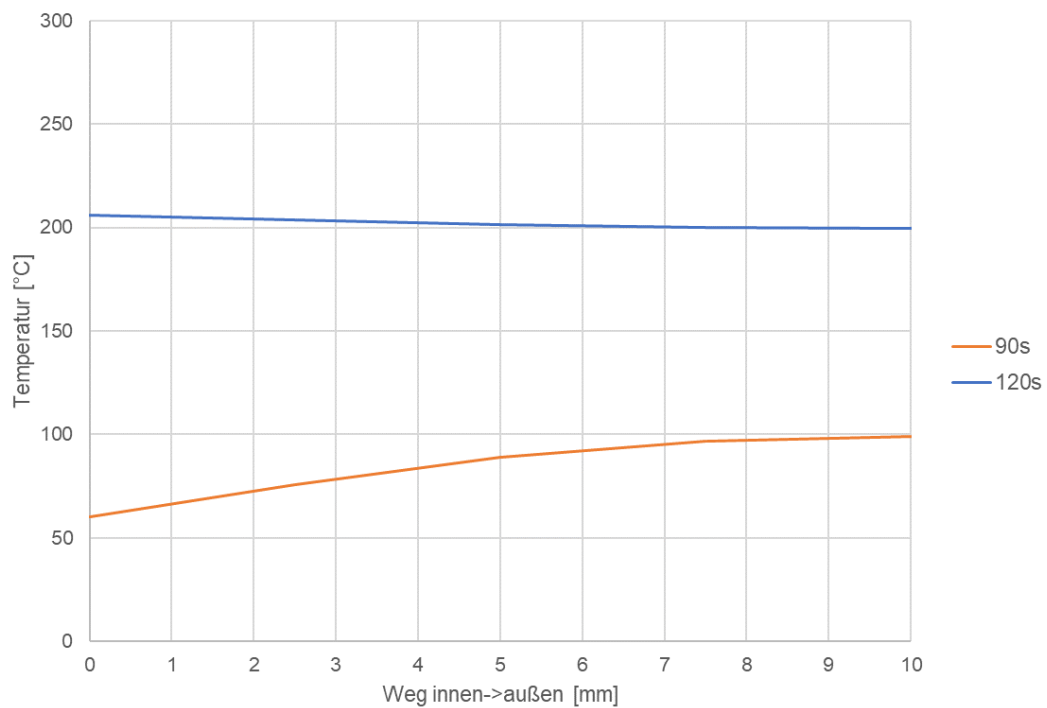


**Abb. 5.6** Temperaturverteilung in Kelvin nach 30 s

In Abb. 5.7 sind die zeitlichen Verläufe von 5 Knoten auf der Auswertelinie dargestellt. Der Temperaturverlauf folgt dem zeitlichen Zyklus von Abkühlung und Aufheizung. Es ist offensichtlich, dass die inneren Knoten während der Abkühlphase ein niedrigeres Temperaturniveau erreichen. In der Abb. 5.8 ist der Temperaturverlauf von innen nach außen für die Zeitpunkte 90 s und 120 s dargestellt.

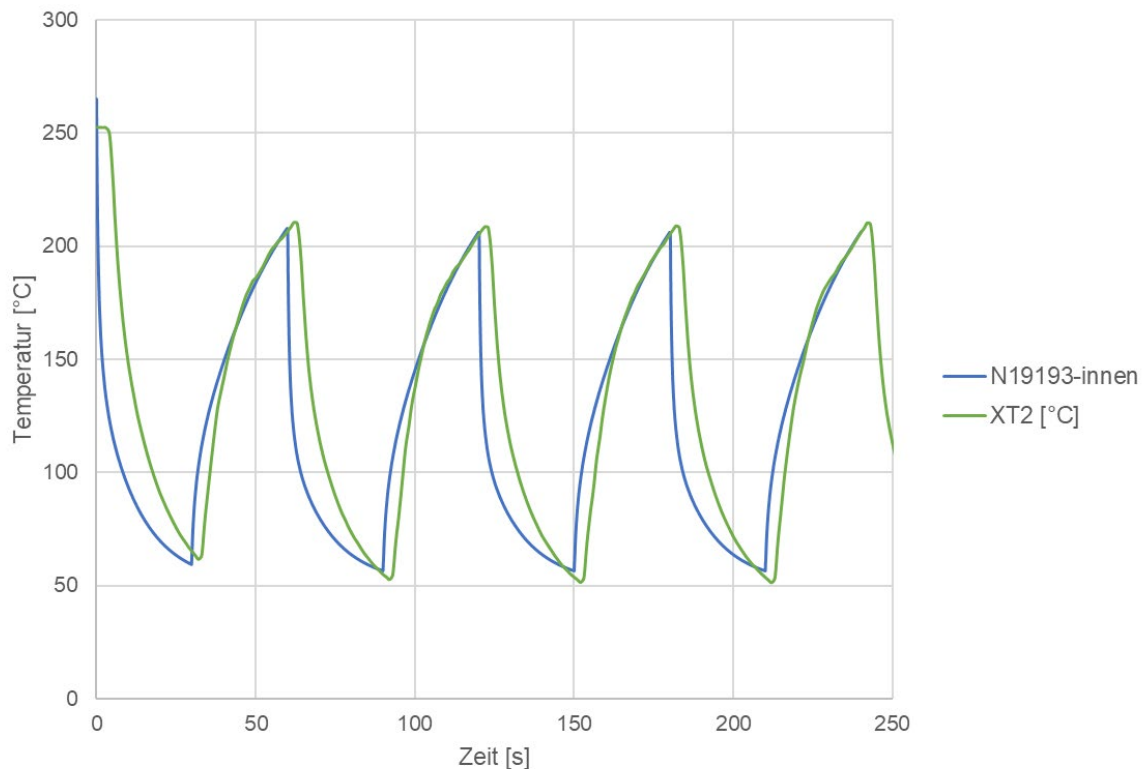


**Abb. 5.7** Zeitliche Temperaturverläufe an den Auswertepunkten



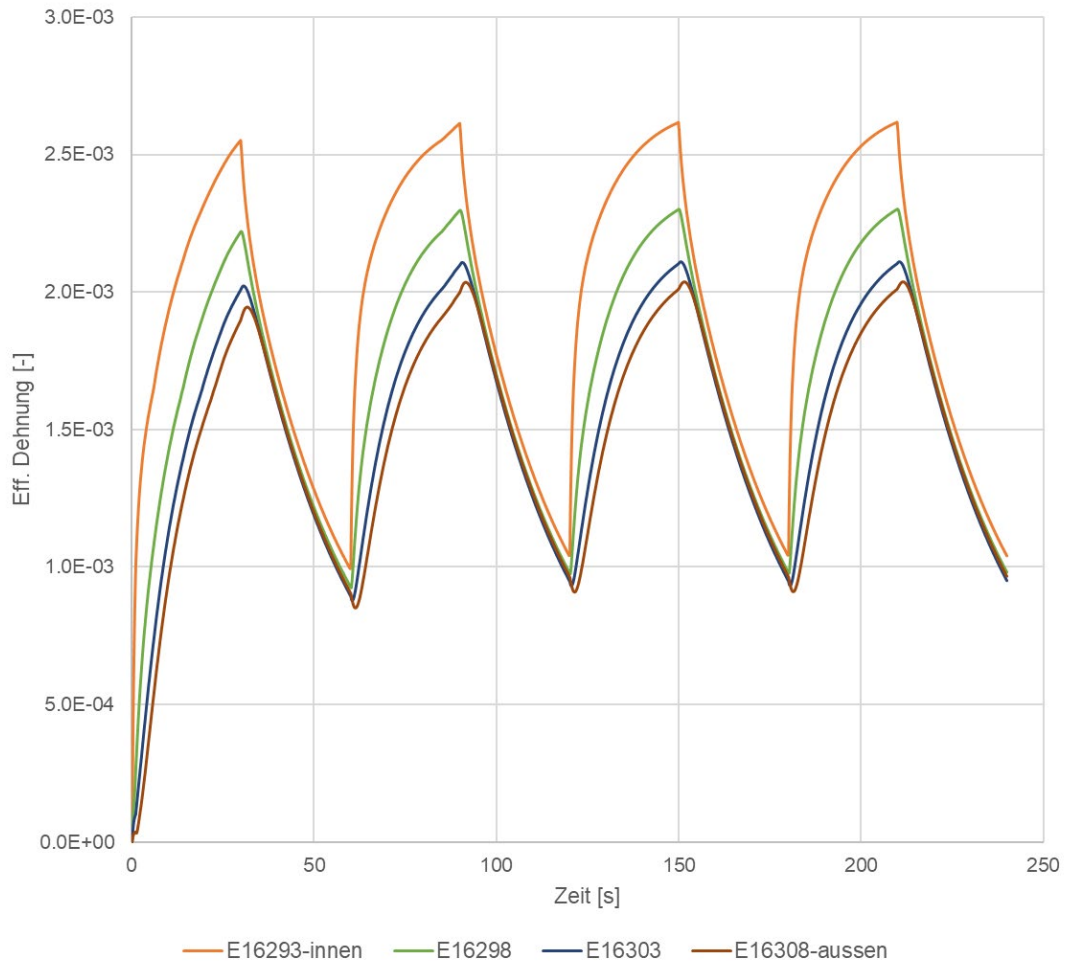
**Abb. 5.8** Temperaturverläufe von innen nach außen bei 90 s und 120 s

Infolge versuchstechnischer Probleme am FSI-Kreislauf lagen zum Zeitpunkt der Berichtslegung keine direkt vergleichbaren Versuchsergebnisse vor. Daher wurde im Vorfeld der Berechnungen im Sinne der Methodendvalidierung die zeitabhängige Temperaturverteilung für einen ähnlichen bereits dokumentierten Versuch (siehe /MPA 22/) berechnet. Exemplarisch ist in der Abb. 5.9 ein Vergleich zwischen Temperatursensordaten des Versuchs (XT2) und der entsprechenden, berechneten Knotentemperatur N19193-innen, dargestellt. Der Vergleich zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung, insbesondere in Hinblick auf die Schwingbreite der Temperatur.



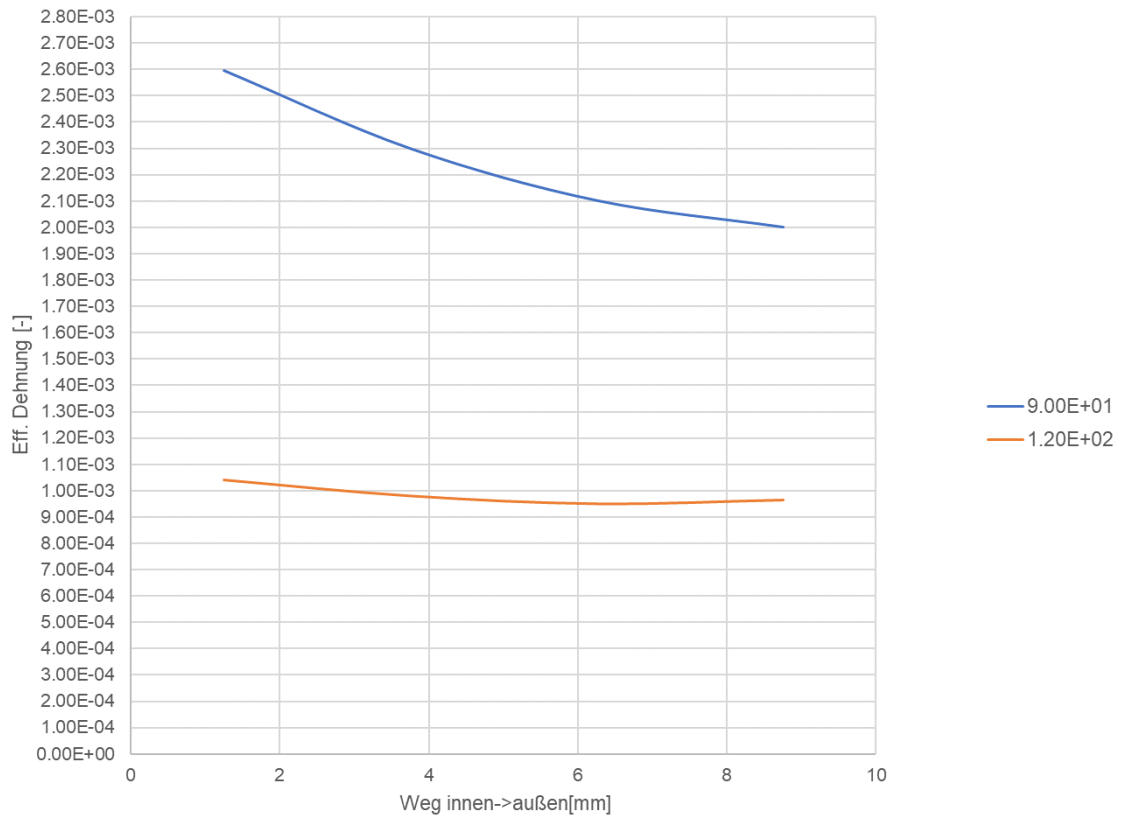
**Abb. 5.9** Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen an der Innenoberfläche im Versuch XT2 (siehe /MPA 22/)

In der Abb. 5.10 ist der zeitliche Verlauf der Dehnungen, welche mit Hilfe von vier Auswertelementen ermittelt wurden, dargestellt. Der Dehnungsverlauf folgt dem zeitlichen Zyklus von Abkühlung und Aufheizung. Eine max. Dehnung von ca. 0,26 % kann am inneren Element (orange Kurve) während der Kühlungsphase bestimmt werden.



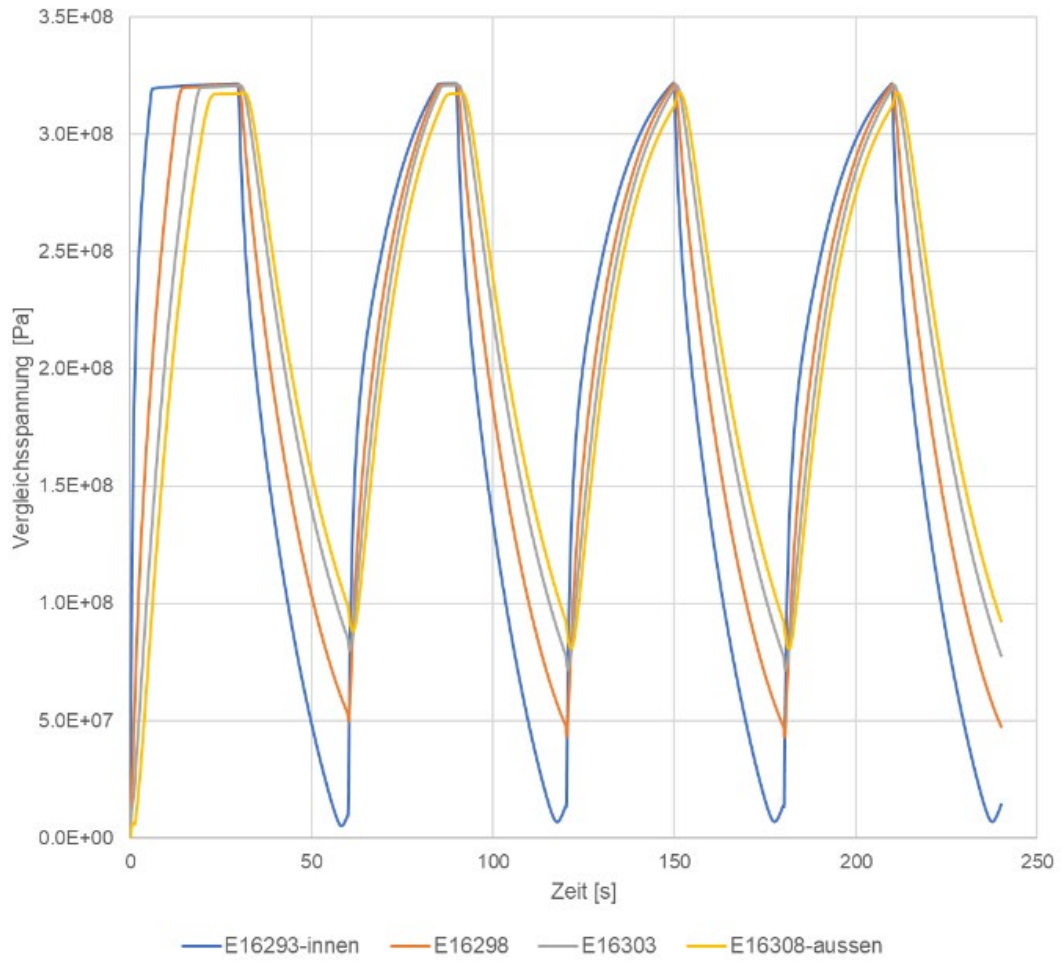
**Abb. 5.10** Zeitliche Verläufe der Dehnungen

In der Abb. 5.11 ist der Dehnungsverlauf von innen nach außen für 90 s und 120 s dargestellt. Durch die Lage der Auswertepunkte in der Mitte der entsprechenden Elemente müssten die Kurvenverläufe an die Oberflächen extrapoliert werden.

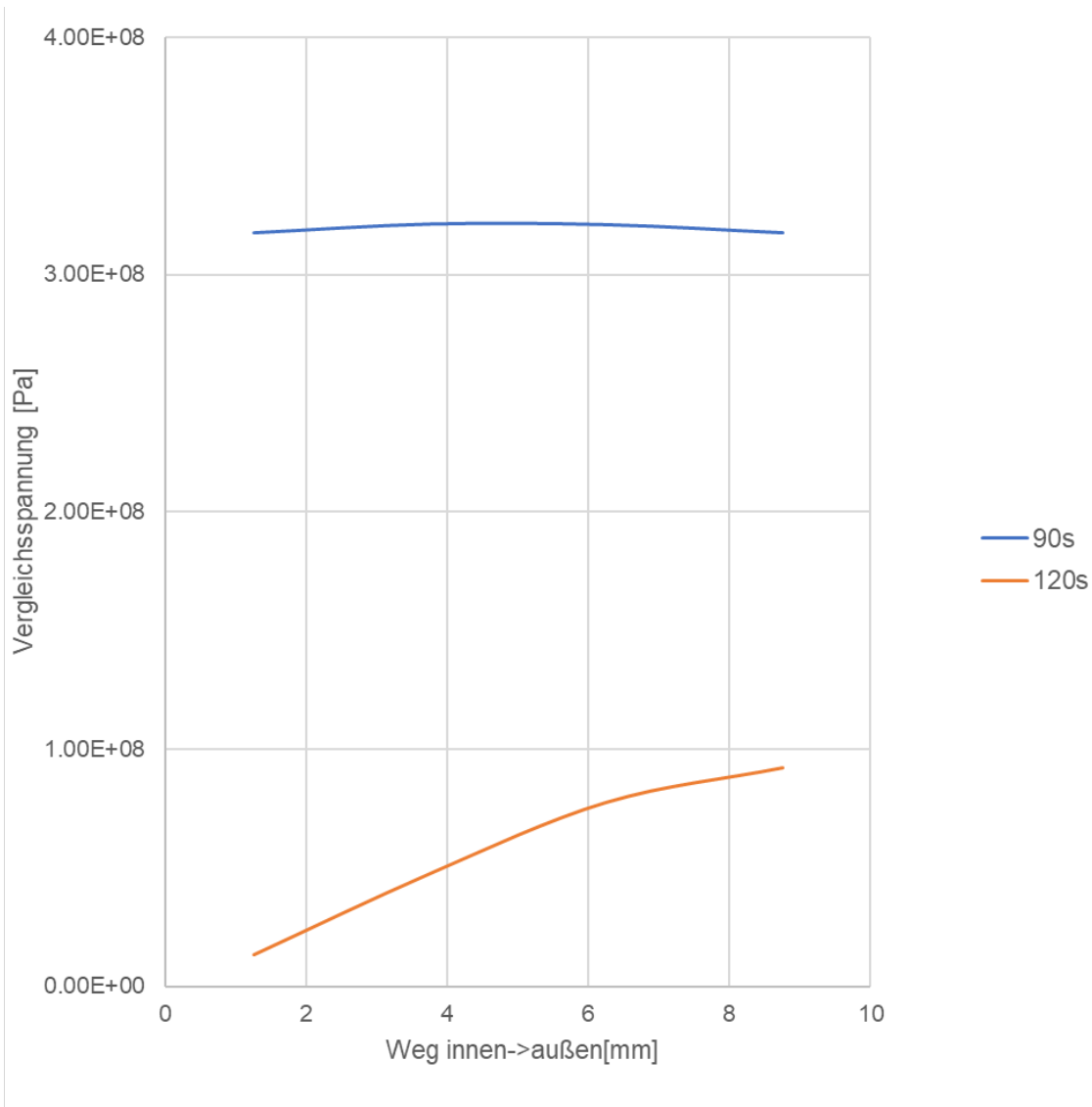


**Abb. 5.11** Verlauf der effektiven Dehnungen von innen nach außen bei 90 s und 120 s

In der Abb. 5.12 ist der zeitliche Verlauf der Vergleichsspannungen an den Positionen der 4 Elemente auf der Auswertelinie dargestellt. Der Spannungsverlauf folgt dem zeitlichen Zyklus von Abkühlung und Aufheizung. Die max. Vergleichsspannung beträgt ca. 318 MPa. Eine deutliche Plateaubildung der berechneten Spannung beim ersten Zyklus auf Höhe der Fließgrenze von 320 MPa kann hierbei beobachtet werden. In der Abb. 5.13 ist der Vergleichsspannungsverlauf von innen nach außen für 90 s und 120 s dargestellt. Demnach ist bei 90 s die Rohrsegmentwand von innen nach außen plastifiziert.



**Abb. 5.12** Zeitliche Verläufe der Vergleichsspannungen



**Abb. 5.13** Verlauf der Vergleichsspannungen von innen nach außen bei 90 s und 120 s

Aus dem Rohrsegment werden nach der Versuchsdurchführung im FSI-Kreislauf, die zum Zeitpunkt der Berichtslegung noch nicht abgeschlossen war, Proben für Ermüdungsversuche entnommen. Bei einer Wandstärke der Rohrwand von 10,0 mm ergibt sich bei mittig angesetzten Proben mit Durchmesser 5,3 mm der Abstand 2,35 mm von der Innenoberfläche. Der 2,35 mm von der Innenoberfläche entfernte Punkt ist für die Auswertung der Schwingbreite relevant. Da aufgrund der Netzfeinheit Auswertepunkte nur 1,25 mm und 3,75 mm unter der Innenoberfläche vorliegen, wurden die relevanten Spannungen und Dehnungen 2,35 mm unter der Innenoberfläche anhand einer linearen Interpolation berechnet.

Die Simulationsauswertung an der Position 2,35 mm von der Innenoberfläche entfernt ergab eine Dehnungsschwingbreite von ca.  $1,5 \cdot 10^{-3}$  (halbe Schwingbreite ca.  $0,75 \cdot 10^{-3}$ ) (siehe Abb. 5.10). Die volle Spannungsschwingbreite liegt an dieser Position bei ca. 300 MPa (siehe Abb. 5.12). Zum Vergleich liegen die Dehnungs- und Spannungsschwingbreiten für den Punkt 1,25 mm unter der Innenoberfläche bei  $1,6 \cdot 10^{-3}$  bzw. 320 MPa. Zur Bestimmung der Lebensdauer wird die ASME-Methodik verwendet /ASM 10/. Diese wird im Folgenden kurz erläutert. Es werden sowohl elastische als auch plastische Anteile berücksichtigt, wobei die jeweiligen Anteile separat betrachtet werden. Da das verwendete Materialmodell \*MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL von LS-DYNA /LST 21/ keine getrennte Auswertung in Hinblick auf elastische und plastische Anteile der Dehnung gestattet, wurde zusätzlich eine rein elastische Rechnung durchgeführt. Anhand dieser elastischen Berechnungsergebnisse wurde nach dem Superpositionsprinzip aus der elastisch-plastischen Rechnung der plastische Anteil der Dehnungen bestimmt.

Die effektive Vergleichsdehnung  $\varepsilon_{eff}$  ergibt sich als Summe aus der plastischen Vergleichsdehnung  $\Delta\varepsilon_{peq}$  und der aus elastischer Vergleichsspannung  $\Delta\sigma_v$  und E-Modul  $E_{ya}$  berechneten elastischen Vergleichsdehnung

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\Delta\sigma_v}{E_{ya}} + \Delta\varepsilon_{peq} \quad (5.1)$$

Die elastische Vergleichsspannung  $\Delta\sigma_v$  wird hierbei mit Hilfe der Komponenten des Spannungstensors berechnet. Die Komponenten zur Berechnung stehen als Ausgabe der elastischen LS-DYNA-Rechnung zur Verfügung.

$$\Delta\sigma_v = \left[ (\Delta\sigma_{11} - \Delta\sigma_{22})^2 + (\Delta\sigma_{11} - \Delta\sigma_{33})^2 + (\Delta\sigma_{22} - \Delta\sigma_{33})^2 + 6(\Delta\sigma_{12}^2 + \Delta\sigma_{13}^2 + \Delta\sigma_{23}^2) \right]^{0,5} \quad (5.2)$$

Die plastische Vergleichsdehnung  $\Delta\varepsilon_{peq}$  wird analog anhand der Ausgaben der Dehnungstensorkomponenten berechnet, wobei das Ergebnis der elastischen Rechnung von dem der elastisch-plastischen Rechnung abgezogen wird.



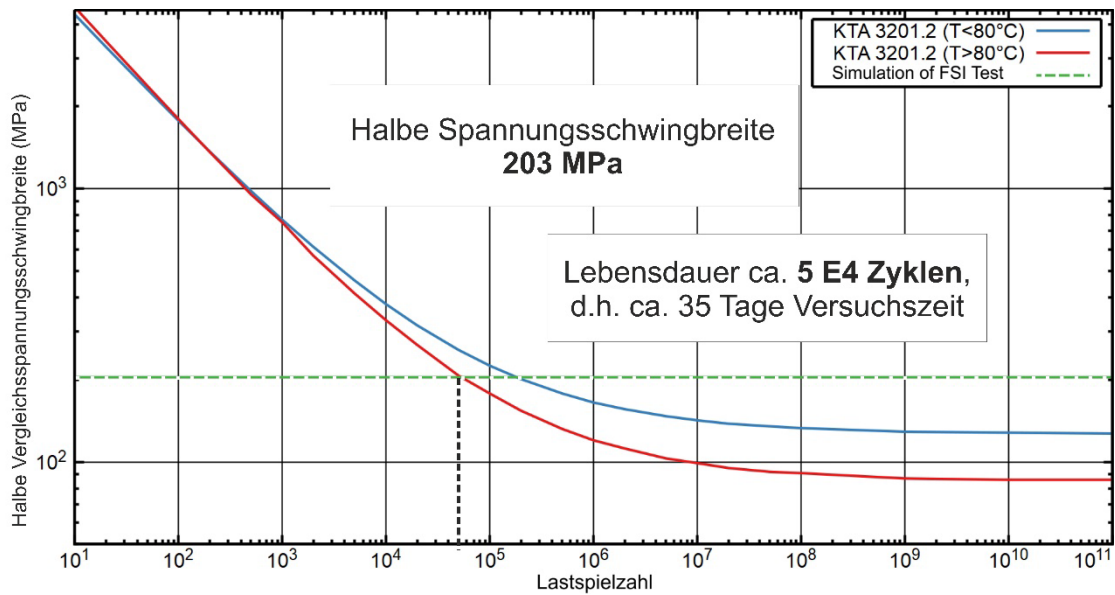
$$\Delta\varepsilon_{peq} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\Delta\varepsilon_{11} - \Delta\varepsilon_{22})^2 + (\Delta\varepsilon_{22} - \Delta\varepsilon_{33})^2 + (\Delta\varepsilon_{11} - \Delta\varepsilon_{33})^2 + 1.5(\Delta\varepsilon_{12}^2 + \Delta\varepsilon_{23}^2 + \Delta\varepsilon_{31}^2)]^{0.5} \quad (5.3)$$

Die relevante, halbe Spannungsbreite  $\sigma_{alt}$  wird als Produkt aus E-Modul  $E_{yf}$  und effektiver Vergleichsdehnung  $\varepsilon_{eff}$  berechnet. Hierbei wird die Temperaturabhängigkeit des E-Moduls berücksichtigt.

$$\sigma_{alt} = \frac{E_{yf} \cdot \varepsilon_{eff}}{2} \quad (5.4)$$

Anhand einer Auswertung mit Excel, welche zusätzlich Spannungen und Dehnungen interpoliert, kann eine halbe Spannungsschwingbreite von ca. 203 MPa bestimmt werden, wobei der elastische Anteil etwa 82 % beträgt. Diese Spannungsschwingbreite ist ca. 35 % größer als die zuvor im Rahmen der elastisch-plastischen Rechnung bestimmte Vergleichsspannungsschwingbreite (siehe Abb. 5.12).

Die Anzahl der Zyklen und folglich die abgeschätzte Lebensdauer kann anhand der Wöhlerlinie in der KTA 3201.2 /KTA 13/ (siehe Abb. 5.14) bestimmt werden. Es ergibt sich eine Lebensdauer von ca.  $5 \cdot 10^4$  Zyklen, d.h. bei der Zyklusdauer von 1 min etwa 35 Tage Versuchszeit. Die Vernachlässigung der Biegemöglichkeit des Rohrstücks und die Verwendung der KTA-Kurve als Bewertungsmaßstab könnte zu einer Überschätzung der Spannungen nahe der Innenoberfläche und entsprechend zu einer Unterschätzung der Lebensdauer in Form der Lastzyklenzahl führen.



**Abb. 5.14** Einordnung der Ergebnisse in die Wöhlerlinie der KTA 3201.2 /KTA 13/

Abschließend sei nochmals betont, dass im Rahmen der hier dokumentierten Arbeiten die Belastung vereinfacht approximiert wurde. Nach Abschluss der stark verzögerten Versuche könnten im Vergleich zu experimentellen Daten im Rahmen von Parameterstudien die relevanten Einflussparameter identifiziert und deren Einfluss quantifiziert werden. Im nächsten Schritt könnte auch eine gekoppelte Fluidsimulation durchgeführt werden, um den von der Hutze gekühlten Bereich genauer zu ermitteln und außerdem die Erwärmung des Fluids zu berücksichtigen.



## **6 Untersuchungen zu realen Schadensfällen mit der um StrainLife erweiterten Simulationsplattform PROST**

Mit Hilfe der Simulationsplattform PROST wurden die Beanspruchungssituationen von ausgewählten (aus der Literatur bekannten) Schadensfällen in deutschen und internationalen Anlagen simuliert. Die Fälle wurden aus der deutschen und internationalen Betriebserfahrung, wie sie z. B. in entsprechenden Datenbanken oder Übersichtsberichten dokumentiert ist, ausgewählt. Die hierfür notwendigen Daten wurden primär über die nach StrainLife in MibaLeb generierten Daten bezogen. Für noch nicht vorliegende Daten, wurden alternativ Daten aus der Literatur, der MPA-Datenbank sowie Betriebserfahrungs-Datenbanken genutzt und entsprechend den Projektrandbedingungen aufgearbeitet. Dies wurde auch vergleichend für den Werkstoff X6CrNiNb18-10 getan, um zu zeigen, inwieweit Literaturdaten genutzt oder diese ggf. mit dem nun deutlich geringeren Aufwand nach StrainLife generiert werden können.

### **6.1 Übersichtsstudie zu ermüdungsbedingten Schadensfällen in Kernkraftwerken**

In diesem Abschnitt wird über die systematische Suche in der deutschen und internationalen Betriebserfahrung nach Schadensfällen, die auf Ermüdungsereignissen beruhen, berichtet. Dabei stehen Ereignisse im Vordergrund, die bei einem austenitischen Werkstoff möglichst ähnlich dem in MibaLeb verwendeten X6CrNiNb18-10 (1.4550, ASI 347) aufgetreten sind. Als Quellen wurden die in der GRS verfügbaren Datenbanken (u.a. KomPass und Weiterleitungsnachrichten zu Ereignissen in TECDO) ausgewertet. Einen Überblick zu der Wissensbasis für druckführende Komponenten ist in /MIC 10/ gegeben.

#### **6.1.1 KomPass-Datenbank**

In der KomPass-Datenbank wurde von der GRS die deutsche Betriebserfahrung dokumentiert. In dieser Datenbank gibt es 91 Ereignisse mit austenitischen Werkstoffen und Ermüdung in den Jahren 1976 bis 2012. Die einzelnen Werkstoffnummern sind mit ihrer Häufigkeit in Tab. 6.1 dargestellt.

**Tab. 6.1** Ereignisse mit Ermüdungsschädigung austenitischer Werkstoffe in der KomPass-Datenbank

Werkstoff	Ereignisse
1.4541	40
1.4541/1.4571	1
1.4550	39
1.4550 1.4571	2
1.4550, 1.4571	1
1.4550/1.4541	2
1.4571	4
Austenit	1
nicht genannt	1

Bei den Daten zum Werkstoff 1.4550 befinden sich verschiedene Erläuterungen zur Schadensursache Ermüdung: Schwingbeanspruchung, Schwingbeanspruchung durch aktive Komponente, thermische Wechselbeanspruchung, Schwingbeanspruchung durch fehlerhafte Halterung, Schwingbeanspruchung durch Strömung und thermische Wechselbeanspruchung, mechanische Schwingungen. Die Schadensbilder reichen von ZfP-Anzeichen über Risse und Leckagen bis zu Abrissen. Bei einigen Ereignissen gab es Aktivitätsfreisetzungen in der Anlage.

Gut dokumentiert ist bei allen Ereignissen die Betriebszeit, bei vielen findet sich Betriebsdruck und Betriebstemperatur.

### 6.1.2 CODAP-Datenbank

In der CODAP-Datenbank /NEA 23/ wird internationale Betriebserfahrung im Rahmen eines OECD/NEA-Vorhabens gesammelt. Die Datenbank kann auch hinsichtlich der relevanten Schädigungsmechanismen und Werkstoffe ausgewertet werden. In der Datenbank gibt es 35 Ereignisse mit Ermüdung und austenitischen Werkstoffen, bei denen der Werkstoff näher spezifiziert ist. Die Auswertung der Häufigkeit ergibt die folgende Tabelle.

**Tab. 6.2** Anzahl der Ereignisse mit Ermüdung von austenitischem Stahl in der CODAP-Datenbank: Aufschlüsselung nach Werkstoff

<b>Werkstoff</b>	<b>Anzahl</b>
1.4450	1
1.4541	3
1.4550	5
1.4571	1
AISI TYPE 304	4
AISI TYPE 304L	2
AISI TYPE 316	5
AISI TYPE 316L	4
ASTM A-312 TP 304	1
ASTM A-351 GR CF8	1
SS 2333	3
SUS 304	1
SUS 316	1
SUS 316 L	1
SUS 316 LTP	1
SUS 316 TP	1

Diese Auswertung zeigt, dass 16 verschiedene Werkstoffe in entsprechenden Betriebsereignissen mit Ereigniszahlen kleiner oder gleich 5 vorkamen.

### **6.1.3 TECDO**

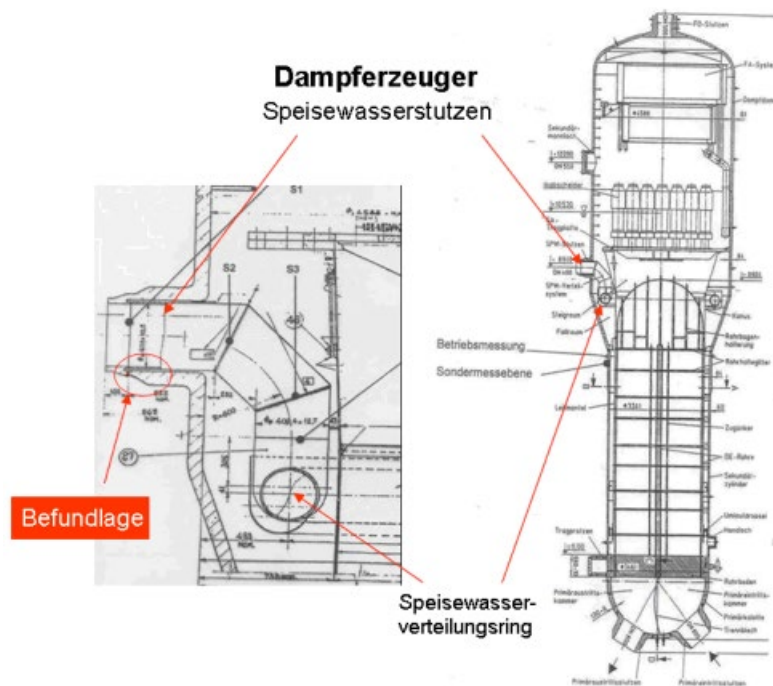
Auch in der TECDO-Datenbank sind bestimmte Ereignisse in Anlagen dokumentiert, insbesondere in Form von Weiterleitungsnachrichten. Naturgemäß gibt es hier Überschneidungen mit der KomPass-Datenbank. Aufgrund der Vertraulichkeit der Informationen kann eine nähere Schadensanalyse nicht dargestellt werden.

### **6.1.4 Analysen zu Schadensfällen in früheren GRS-Forschungsarbeiten**

In früheren Vorhaben der Reaktorsicherheitsforschung wurden in der GRS bereits einige Ermüdungsschadensfälle rechnerisch analysiert. Im Folgenden sind einige relevante Beispiele aufgeführt.

#### 6.1.4.1 Rissbehafteter Speisewasserstutzen

Anzeigen am Speisewasserstutzen eines Dampferzeugers (KKU 2002) wurden bereits ausführlich in /GRE 10/ /WAN 10/ behandelt. Eine Skizze aus letzterer Arbeit ist in Abb. 6.1 gegeben.

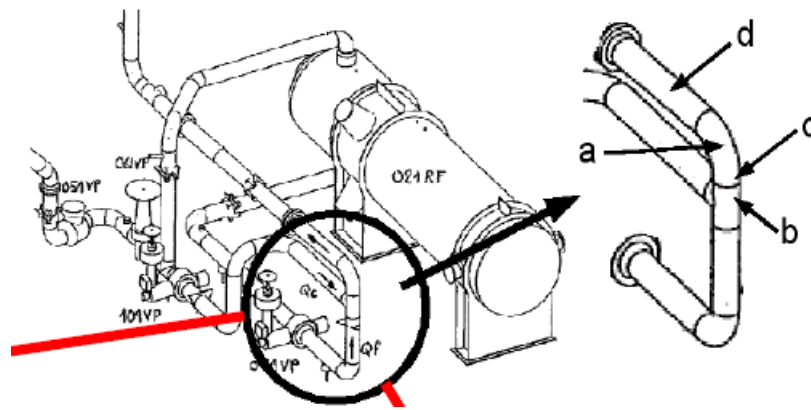


**Abb. 6.1** Speisewasserstutzen mit Befunden (aus /WAN 10/)

Im Rahmen der genannten Arbeiten wurde eine Spannungsanalyse durch die betrieblich bedingten thermischen Vorgänge beim An- bzw. Abfahren durchgeführt, inklusive der Beanspruchung von Rissen und Berechnung von Leckwahrscheinlichkeiten. Die Zyklenzahl wurde in Anlehnung an betriebliche Messungen mit 160 Zyklen pro Betriebsjahr (Innendruck 6 MPa und Temperaturschichtung  $\Delta T=250^{\circ}\text{C}$ ) angesetzt.

#### 6.1.4.2 Civaux-Ereignis

Im Jahr 1998 kam es in der französischen Anlage Civaux zu einer Leckage an einem Krümmer. Ausgelöst wurde die Schädigung durch Mischung von kaltem und warmem Fluid aus einem T-Stück kurz vor dem Krümmer. Der Ort ist in Abb. 6.2 gezeigt.



**Abb. 6.2** Leckage (Position a) beim Civeaux-Ereignis, nach /CHA 09/

Eine genauere Beschreibung der Ereignisse kann z. B /GOU 03/ entnommen werden. Die Leckagestelle entstand im Nachkühlsystem der Anlage Civaux 1 an einem Krümmer mit 10 Zoll Durchmesser (bei 9,8 mm Wanddicke) aus dem Werkstoff 304L. Der Riss verlief entlang der longitudinalen Schweißnaht und hatte eine Gesamtlänge von 180 mm (außen) bzw. 250 mm (innen). Neben diesem Leck gab es auch weitere kleinere Risse in der Schweißnaht; außerhalb der Schweißnaht wurden im Grundwerkstoff mehrere flache Risse gefunden („Elefantenhaut“). Eine Ausströmrage von 30 m<sup>3</sup>/h führte zur Abschaltung der Anlage.

Dieses Civaux-Ereignis führte zu umfangreichen Aktivitäten hinsichtlich der Untersuchung von thermischer Ermüdung durch Vermischungsphänomene, u. a. an der MPA Universität Stuttgart am FSI-Kreislauf /SCH 12/ /SEL 17/. Analysen dieses Ereignisses sind z. B. in /GOU 03/ /STE 05/ /JHU 13/ /CHA 09/ dokumentiert.

Eine Herausforderung bei der Analyse dieses Ereignisses ist es, das Lastkollektiv zu bestimmen, da hier turbulente Vermischungsvorgänge der beiden Fluide mit  $\Delta T=160\text{ }^{\circ}\text{C}$  ursächlich sind. /GOU 03/ untersucht die Situation mit CFD und kommt zu Spannungsunterschieden von 300 MPa, während die zeitlichen Variationen mit Wirbelgrößen und Strömungsgeschwindigkeiten abgeschätzt werden. Dagegen wird in Untersuchungen wie /SEL 17/ lediglich eine Fourier-Analyse durchgeführt, allerdings kein Rainflow Counting. Dagegen wird in /STE 05/ eine Untersuchung hinsichtlich Zyklenzahl durchgeführt, wenn auch an einem Versuchsaufbau. In /RAD 07/ werden unterschiedliche Frequenzen auch hinsichtlich der resultierenden Spannung diskutiert, hier werden Frequenzen zwischen 1 Hz und 0,01 Hz angesetzt. Dagegen wird in /CHA 05/ nach aufwändiger Vorarbeit auch die Ermüdungsschädigung hinsichtlich Amplituden und Frequenzen diskutiert, wobei ein Ergebnis ist, dass keine gute quantitative Übereinstimmung mit der



Ermüdungslebensdauer erreicht wird. In /ANC 08/ wird immerhin eine Wöhlerlinie mit den Versuchsergebnissen verglichen und der Einfluss einer Schweißnaht herausgestellt.

Eine Analyse von Versuchen mit Ermüdungsschädigung und der entsprechenden Bewertung wird dagegen in /AMI 06a/ und /AMI 06b/ durchgeführt. Während der Vergleich von Lasten und Ermüdungsschädigung sehr genau analysiert wird, handelt es sich um ein Laborexperiment mit deutlichen Unterschieden zur Civaux-Leckage. In /AMI 06c/ werden rechnerische Ansätze zur Bestimmung der Ermüdungsschädigung in einem Experiment verglichen.

## 6.2 Rechnerische Ansätze zur Schadensbewertung

In diesem Abschnitt sollen die Grundlagen zu den Bewertungen von Schadensereignissen aufgezeigt werden.

### 6.2.1 KTA-Auslegungskurve

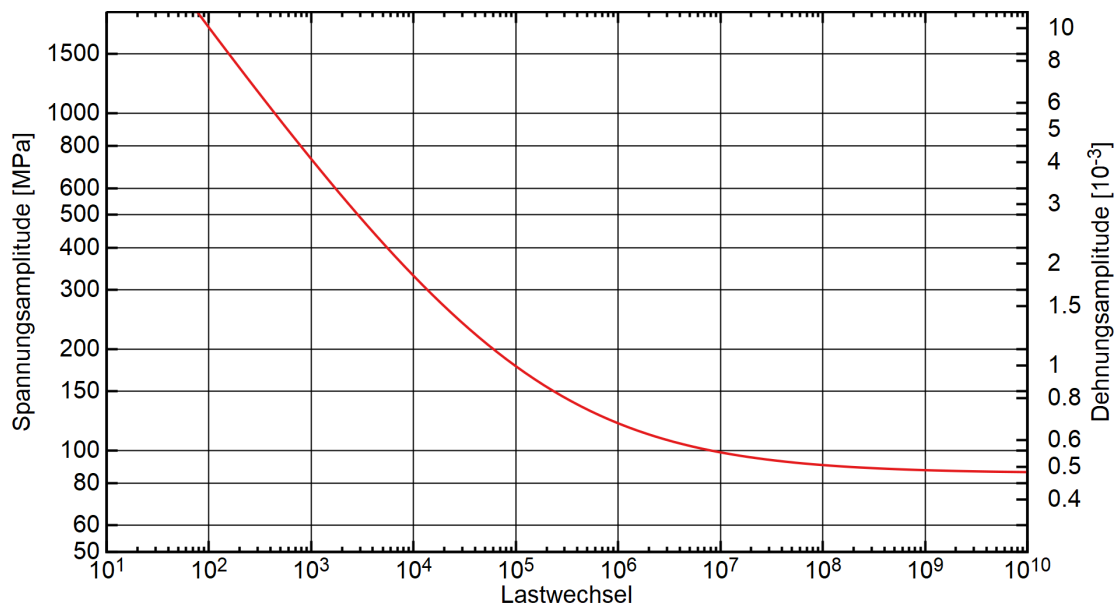
Eine mögliche Grundlage zur Bewertung der Ermüdungsschäden ist die Auslegungskurve für austenitische Stähle aus der Regel KTA 3201.2 /KTA 17b/. Diese Kurve enthält den funktionalen Zusammenhang zwischen zulässiger halber Vergleichsspannungsschwingbreite  $S$  und der zulässigen Lastspielzahl  $N$ :

$$S = 10^{-2} E \left[ \left( \frac{e^a}{N} \right)^{\frac{1}{b}} + c \right] \Leftrightarrow N = \frac{e^a}{\left( \frac{S}{10^{-2}E} - c \right)^b} \quad (6.1)$$

Das Elastizitätsmodul  $E$  ist dabei 179 GPa. Die Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind in Tab. 6.3 zusammengefasst (sie gelten für Temperaturen über 80 °C), grafisch ist die Auslegungskurve in Abb. 6.3 aufgetragen.

**Tab. 6.3** Parameter der KTA-Kurve für austenitische Stähle

<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
4,5	2,365	0,0478



**Abb. 6.3** KTA-Kurve für austenitische Stähle

In diese Auftragung können in einzelnen Schadensfällen Lastkollektive eingetragen werden; die Wöhlerlinie stellt somit den natürlichen Ausgangspunkt für die grafische Veranschaulichung einer Schadensanalyse dar.

### 6.2.2 Rechnerische Ermüdungsbewertung in der Kerntechnik: relevante Literaturstellen

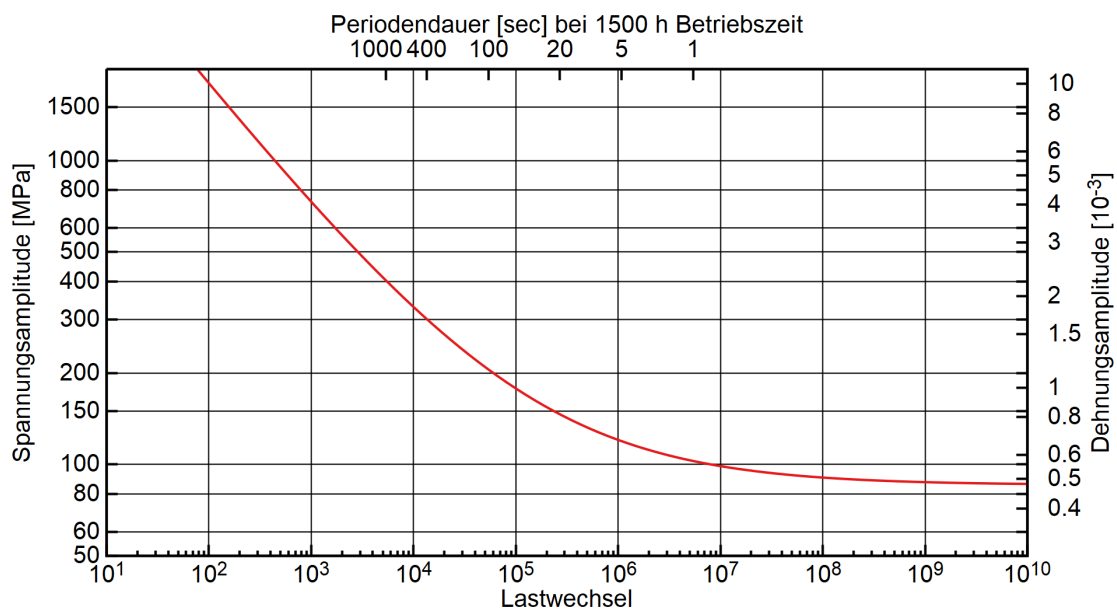
Detaillierte Ermüdungsanalysen werden von Betreiberseite mittels einer Instrumentierung wie FAMOS /RUD 12/ durchgeführt, weil damit gegenüber vereinfachten konservativen Verfahren eine realistische Einschätzung der wahren Ermüdungslasten erfolgen kann. Ein Beispiel ist die Bewertung eines Rekuperationswärmetauschers, die zu einer Reduktion des Ermüdungsausnutzungsfaktors von 0,68 auf einen sehr viel kleineren Wert führt /MUT 19/. In /ENS 12/ werden auch Ermüdungsausnutzungsfaktoren der gleichen Anlage von vielerlei Komponenten genannt; leider fehlt die zu Grunde liegende Lastannahme.

Für die Auslegung ist ein Lastfallkatalog vorgesehen, der die Beanspruchungen und die Häufigkeit des Eintretens enthält. Leider steht kein (generischer, frei verfügbarer) Lastfallkatalog zur Verfügung, der eine vergleichende Rechnung erlaubt. Referenziert wird ein solcher Lastfallkatalog beispielsweise in /TÜV 06/ und auch in /SOU 18/ wird auf entsprechende Annahmen Bezug genommen.

### 6.3 Nachrechnung Civaux-Leckage

Die Herausforderung bei der Civaux-Leckage ist es, einen Leckagefall innerhalb von 1500 Betriebsstunden zu erklären, während die Anstrengungen zur Berechnung des Lastkollektivs durch die thermische Mischung uneindeutig und unsicherheitsbehaftet verbleibt. Eine Möglichkeit der Analyse besteht nun darin, die Anzahl der Lastzyklen zu ermitteln, die zur Leckage führen könnten, bei gegebener Amplitude. Dieses Ergebnis kann dann in Relation zu CFD-Analysen gesetzt werden und Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen sein.

Wenn eine Spannungsamplitude von 200-300 MPa (300 MPa wird von /GOU 03/ genannt und wird als maximaler Wert interpretiert) angesetzt wird, erhält man eine Schwingungsperiodendauer von 90-400 s. Interessanterweise kommt die Analyse von /JHU 13/ auf eine Zeit im Bereich von ca. 100 s für das Einstellen von stabilen Temperaturverhältnissen, allerdings scheinen die Analysen nicht direkt übertragbar. Auch /GOU 03/ diskutiert typische Zeitskalen (anhand von Wirbelgrößen und Strömungsgeschwindigkeiten) und kommt dabei eher auf höhere Frequenzen im Bereich 1 Hz. Für eine Periodendauer von 1 s ist eine viel größere Zyklenzahl möglich und die Spannungsamplitude sinkt auf ca. 100 MPa. Im Wöhler-Diagramm sind diese Überlegungen in Abb. 6.4 gezeigt.



**Abb. 6.4** Analyse der Civaux-Leckage bei hypothetischer einstufiger Belastung

Die gefundenen Frequenzen scheinen (oberflächlich betrachtet) konsistent mit den Untersuchungen in /RAD 07/ zu sein.

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens RS1594E (Teilprojekt des Verbundvorhabens MibaLeb II) wurden Beiträge zur Entwicklung einer Verfahrensweise zur Restlebensdauerbewertung von im Betrieb gealterten metallischen Kernkraftwerkskomponenten erarbeitet. Die Partner im Verbundvorhaben waren der Lehrstuhl für Werkstoffprüftechnik (WPT) der Technischen Universität Dortmund, das Fachgebiet Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung (WWHK) der Hochschule Kaiserslautern, der Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung (LZfPQ) der Universität des Saarlandes und die Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart.

Im Arbeitsschwerpunkt Simulationen zum Anriss in Ermüdungsproben hat die GRS Untersuchungen zum Lastabfall und der Anrissgröße bei dehnungsgeregelten Ermüdungsproben durchgeführt. Bei der generischen Studie zeigte sich, dass die Extensometerdehnungen stark von der Position des Extensometers relativ zum Riss und der Länge des Extensometers abhängen.

Weiterhin wurden mit Techniken des Maschinellen Lernens, insbesondere neuronalen Netzwerken, Untersuchungen von instrumentierten Ermüdungsversuchen durchgeführt, um in vorhandenen Datenbeständen Muster, Trends oder Zusammenhänge zu erkennen. Das Erkennen der Ermüdungsschädigung wurde trainiert und auf andere Versuche angewendet. Der Ansatz des Maschinellen Lernens wurde verwendet, um die Ermüdungsschädigung (in Form eines Palmgren-Miner-Parameters) anhand der Charakteristiken von zyklischen Widerstandsmessungen vorherzusagen. Als Konsequenz ergibt sich ein Kurzzeitverfahren, mit dem im untersuchten Beispiel basierend auf vier Einstufenversuchen und einem Laststeigerungsversuch eine Wöhlerlinie bestimmt werden kann. Die Genauigkeit des erzielten Ergebnisses im Vergleich mit der Auslegungskurve und dem StrainLife-Ansatz, ist beim ersten Demonstrationsfall eher gering, aber dennoch gelingt es, die Schritte des Verfahrens umzusetzen.

Im Rahmen der zweiten Phase des MibaLeb-Vorhabens sollte ein Rohrstück unter realistischen Bedingungen thermisch beaufschlagt werden, wobei eine nennenswerte Ermüdungsschädigung durch Wechsellasten entstehen sollte. Ein Rohrsegment aus einem von RWE zur Verfügung gestellten Rohrstück wurde im FSI-Kreislauf der MPA Universität Stuttgart mit Thermozyklen beaufschlagt. Mit einem vereinfachten Analysemodell hat die GRS die Belastungen des Rohrsegments untersucht und die Lebensdauer abgeschätzt. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts waren die Versuche am FSI-Kreislauf der MPA infolge von technischen Problemen noch nicht abgeschlossen.

## Literaturverzeichnis

- /ABA 15/ Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G. S., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Goodfellow, I., Harp, A., Irving, G., Isard, M., Jozefowicz, R., Jia, Y., Kaiser, L., Kudlur, M., Levenberg, J., Mané, D., Schuster, M., Monga, R., Moore, S., Murray, D., Olah, C., Shlens, J., Steiner, B., Sutskever, I., Talwar, K., Tucker, P., Vanhoucke, V., Vasudevan, V., Viégas, F., Vinyals, O., Warden, P., Wattenberg, M., Wicke, M., Yu, Y., Zheng, X.: TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems, 2015.
- /ACO 18/ Acosta, R., Starke, P., Boller, C., Jamrozy, M., Klein, M., Knyazeva, M., Walther, F., Heckmann, K., Sievers, J., Schopf, T., Schuler, X.: Nutzung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur mikrostrukturbasierten Restlebensdauerbewertung alternder metallischer Werkstoffe und Komponenten in der Energietechnik, *ndt.net* (2018) 1-12
- /ACO 19/ Acosta, R., Boller, C., Starke, P., Jamrozy, M., Knyazeva, M., Walther, F., Heckmann, K., Sievers, J., Schopf, T., Weihe, S.: Non-destructive testing derived parameters for microstructure based residual service life assessment of aging metallic materials in nuclear engineering. *MP Materials Testing* 61, 11 (2019) 1029-1038
- /ACO 20/ Acosta, R., Starke, P., Boller, C., Lücker, L., Schmiedt-Kalenborn, A., Walther, F., Schopf, T., Stumpfrock, L., Heckmann, K., Sievers, J.: Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Mikrostrukturbasierte Ermittlung der maximalen Einsatzdauer für korrosionsermüdungsbeanspruchte Werkstoffe und Komponenten der Kerntechnik, Teilvorhaben: 1501528A, 1501528B, 1501528C, RS1545, Februar 2020
- /AMI 06a/ Amiable, S., Chapuliot, S., Constantinescu, A., Fissolo, A.: A computational lifetime prediction of a thermal shock experiment. Part I: thermomechanical modelling and lifetime prediction. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 29(3):175–182, ISSN 8756-758X, eISSN 1460-2695, März 2006.

- /AMI 06b/ Amiable, S., Chapuliot, S., Constantinescu, A., Fissolo, A.: A computational lifetime prediction of a thermal shock experiment. Part II: discussion on difference fatigue criteria. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 29(3):219–227, ISSN 8756-758X, eISSN 1460-2695, März 2006.
- /AMI 06c/ Amiable, S., Chapuliot, S., Constantinescu, A., Fissolo, A.: A comparison of lifetime prediction methods for a thermal fatigue experiment. *International Journal of Fatigue*, 28(7):692–706, ISSN 0142-1123, Juli 2006.
- /ANC 08/ Ancelet, O., Chapuliot, S., Henaff, G.: Experimental and numerical study of crack initiation and propagation under a 3D thermal fatigue loading in a welded structure. *International Journal of Fatigue*, 30(6):953–966, ISSN 0142-1123, Juni 2008.
- /ASM 10/ ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Volume VIII, Division 2, Alternative Rules, Rules for Construction of Pressure Vessels, 2010
- /BIE 80/ Bieńkowski, A., Kulikowski, J.: The magneto-elastic Villari effect in ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 19, 1980, 120-122.
- /BOL 87/ Boller, C., Seeger, T.: *Materials data for cyclic loading*, 5 Bände, Elsevier Science Publ. (1987)
- /BRO 20/ Brownlee, J.: *Your First Deep Learning Project in Python with Keras Step-By-Step*, September 2020.
- /CHA 05/ Chapuliot, S., Gourdin, C., Payen, T., Magnaud, J. P., Monavon, A.: Hydro-thermal-mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee. *Nuclear Engineering and Design*, 235(5):575–596, ISSN 0029-5493, Februar 2005.
- /CHA 09/ Chapuliot, S.: Thermal Fatigue in Mixing Areas: Overview of the Industrial Problem. In: *Computational Fluid Dynamics (CFD) in Nuclear Reactor Safety (NRS) Kick-off meeting*, Paris, France. OECD/NEA, Mai 2009.

- /CHO 20/ Chollet, F.: Introduction to Keras for Engineers, April 2020.
- /CHR 97/ Christ, H.-J., Materialermüdung - Einführung und Überblick: Fortbildungspraktikum an der Universität-Gesamthochschule Siegen, Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe (1997).
- /DOB 13/ Dobmann, G., Boller, C., Herrmann, H.-G., Altpeter, I.: Electromagnetic NDT for lifetime management by monitoring of ageing phenomena, 12th Int. Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing 2013: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, ICNDT 2013, September 4-6, 2013
- /DON 22/ Donnerbauer, D., Acosta, R., Boller, C., Bill, T., Starke, P., Heckmann, K., Sievers, J., Schopf, T., Walther, F.: Fatigue damage evaluation of stainless AISI 347 steel by advanced microstructure-sensitive NDT analysis, Procedia Structural Integrity 42 (2022) 738–744
- /ENS 12/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Sicherheitstechnische Stellungnahme zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung 2008 des Kernkraftwerks Gösgen. Technischer Bericht, Brugg, Switzerland, ENSI 17/1350, August 2012.
- /ERV 97/ Erve, M.: Die Bedeutung der Werkstofftechnik beim Lebensdauermanagement (Plant Life Management) für nukleare Anlagen, 23. MPA Seminar, 01./02. Oktober 1997
- /FIT 06/ FITNET Thematic Network: FITNET FFS Procedure Vol. III: Annex. Technischer Bericht, Geesthacht, Germany, 2006.
- /FU 11/ Fu, T.-c.: A review on time series data mining. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 24(1):164–181, ISSN 0952-1976, Februar 2011.
- /GOU 03/ Gourdin, C., Chapuliot, S., Magnaud, J. P., Payen, T.: A hydro-thermo-mechanics analyze of the thermal fatigue in the mixing tee junction. In: International conference on supercomputing in nuclear applications SNA'2003, 2003.



- /GRE 10/ Grebner, H., Wang, Y., Schimpfke, T., Sievers, J.: Weiterentwicklung der strukturmechanischen Analysemethodik zur Bestimmung der Strukturzuverlässigkeit passiver Komponenten, Phase II. Technischer Bericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Köln, GRS-A-3544, Juni 2010.
- /HEA 08/ Heaton, J.: Introduction to Neural Networks with Java -. Heaton Research, Inc., Chesterfield, ISBN 978-1-604-39008-7, 2008.
- /HEC 16/ Heckmann, K., J. Sievers, J. Arndt, C. Bläsius: Weiterentwicklung und Erprobung des Rechenprogramms PROST zur probabilistischen und deterministischen Bewertung von Rohrleitungen und Behältern im Rahmen von Leck-vor-Bruch Nachweisen, GRS - 422, 2016
- /HEC 18/ Heckmann, K., Sievers, J., de Acosta, R., Starke, P., Boller, C., Schopf, T., Schuler, X., Jamrozy, M., Knyazeva, M., Walther, F.: StrainLife: Efficient fatigue life data generation for an enhanced ageing assessment of metallic components. Proc. ASME 2018 PVP Conference, July 15-20, Prag, Tschechien, PVP2018-84538
- /HEC 21/ Heckmann, K., Sievers, J., Schopf, T., Lücker, L., Schmiedt-Kalenborn, A., Walther, F., Starke, P., Acosta, R., Boller, C.: Correlation of load drop and crack initiation criteria in fatigue life experiments of metallic materials. Engineering Fracture Mechanics, 251:107785, ISSN 0013-7944, Juni 2021.
- /JHU 13/ Jhung, M. J.: Assessment of Thermal Fatigue in Mixing Tee by FSI Analysis. Nuclear Engineering and Technology, 45(1):99–106, ISSN 1738-5733, Februar 2013.
- /KAM 17/ Kammerer, M.C., Schuler, X., Weihe, S., Seidenfuß, M., Zhou, M., Laurien, E., Kulenovic, R.: Thermo-mechanical loading of full-scale welded piping components in high temperature water environment, American Society of Mechanical Engineers 4 (2017) 1-9

- /KLE 16/ Klein, M., Starke, P., Nowak, D., Boller, C., Walther, F.: Separation of surface, subsurface and volume fatigue damage effects in AISI 348 steel for power plant applications, *Materials Testing* 58,7-8 (2016) 601-607
- /KLE 19/ Klein, M.: Mikrostrukturbasierte Bewertung des Korrosionsermüdungsverhaltens der Magnesiumlegierungen DieMag422 und AE42. Dissertation, Technische Universität Dortmund. 1. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden (2019).
- /KOM 13/ Kompetenzverbund Kerntechnik: Nukleare Sicherheitsforschung, Neuorientierung an den aktuellen energiepolitischen Rahmenbedingungen, März 2013
- /KTA 13/ KTA 3201.2: Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses, Fassung 2013-11
- /KTA 17a/ Nuclear Safety Standards Commission (KTA): Components of the Reactor Coolant Pressure Boundary of Light Water Reactors Part 1: Materials and Product Forms. Technischer Bericht, Safety Standards of the Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Salzgitter, Germany, KTA 3201.1, November 2017.
- /KTA 17b/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung. Technischer Bericht, Sicherheitstechnische Regel des KTA, Salzgitter, Germany, KTA 3201.2, November 2017.
- /LAS 04/ Last, M., Kandel, A., Bunke, H.: *Data Mining in Time Series Databases*. World Scientific, Singapur, ISBN 978-9-812-38290-0, 2004.
- /LÜD 11/ Lüdenbach, G., Körner, P.: Dampfseitiges Oxidationsverhalten austenitischer Kesselrohre, VGB Konferenz Kraftwerke im Wettbewerb (2011) 1-13

- /LST 21/ LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL, VOLUME II Material Models, 09/27/21 (r:14196) LS-DYNA R13, <https://www.dynasupport.com/manuals/lis-dyna-manuals>
- /MAC 19/ Maci, F., Jamrozny, M., Acosta, R., Starke, P., Boller, C., Heckmann, K., Sievers, J., Schopf, T., Walther, F.: Characterization of the fatigue behavior of mechanical and thermal aged austenitic power plant steel AISI 347, In: Correia J., De Jesus A., Fernandes A., Calçada R. (eds) Mechanical Fatigue of Metals. Structural Integrity, Vol 7. Springer, Cham (2019) 65-71
- /MAG 95/ Magnin, T., Recent advances for corrosion fatigue mechanisms, ISIJ International, 35 (1995) 223-233
- /MIC 10/ Michel, F., Sayar, D.: Weiterentwicklung der Wissensbasis für druckführende Komponenten in Kernkraftwerken, GRS-A-3539, 2010
- /MPA 22/ Swacek, C., Stumpfrock, L., Rudolph, J., Herbst, M.: Verbundvorhaben Untersuchungen zum Einfluss bauteilrelevanter Beanspruchungen auf die Ermüdungsfestigkeit austenitischer und ferritischer Stähle einschließlich Schweißverbindungen, Teilprojekt Belastungsparameter und Mediumseinfluss, Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, MPA Berichts-Nr. 8480 000 000, 2022
- /MUT 19/ Mutz, A., Bergholz, S.: Simulation strategy of the recuperator KKG considering fatigue based on realistic load approach. In: 45th MPA-Seminar, Stuttgart. MPA Stuttgart, Oktober 2019.
- /NEA 23/ NEA Nuclear Energy Agency, Joint project on Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme (CODAP), [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_24823/component-operational-experience-degradation-and-ageing-programme-codap](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_24823/component-operational-experience-degradation-and-ageing-programme-codap), 2023
- /PIO 95/ Piotrowski, A.; Eifler, D.: Bewertung zyklischer Verformungsvorgänge metallischer Werkstoffe mit Hilfe mechanischer, thermometrischer und elektrischer Meßverfahren. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 26, 3 (1995) 121-127

- /RAD 07/ Radu, V., Paffumi, E., Taylor, N., Nilsson, K.-F.: Assessment of thermal fatigue crack growth in the high cycle domain under sinusoidal thermal loading. Technischer Bericht, European Commission Joint Research Centre, Luxembourg, JR 41641, EUR 23223EN - 2007, ISBN 978-92-79-08218-4, 2007.
- /RUD 12/ Rudolph, J., Bergholz, S., Heinz, B., Jouan, B.: AREVA Fatigue Concept – A Three Stage Approach to the Fatigue Assessment of Power Plant Components. In: Chang, S. H., Hrsg.: Nuclear Power Plants, Seiten 293–316. IntechOpen, ISBN 978-953-51-0408-7, März 2012.
- /RUD 12a/ Rudolph, J., Götz, A., Hilpert, R.: Regelwerkskonforme Bestimmung von Erschöpfungsgraden bei allgemeinen elasto-plastischen Finite-Elemente-Analysen. Teil 1 und 2. Technische Sicherheit Bd. 2 Nr. 7/8 und 9 (2012)
- /RUD 12b/ Rudolph, J., Bergholz, S., Heinz, B., Jouan, B.: AREVA Fatigue Concept - A Three Stage Approach to the Fatigue Assessment of Power Plant Components. In: Nuclear Power Plants, InTechOpen, ISBN 978-953-51-0408-7 (2012)
- /RWE 14/ Not, A.: Inspektionsprogramm und festgestellte Befunde an Komponenten des Dekontaminationskreislaufes. In: Informationsgespräch GRS, HMUELV, KW Biblis zum Status VA01/13 Befunde an der Hauptkühlmitteltelpumpe 14YD10 D001 während der Primärkreisdekontamination, GeSi Issue G45, Köln. RWE Power AG - Kraftwerk Biblis, GRS, 2014.
- /SCH 12/ Schuler, X., Herter, K.-H., Moogk, S., Laurien, E., Klören, D., Kulenovic, R., Kuschewski, M.: Thermal fatigue: Fluid-structure interaction at thermal mixing events. In: 38th MPA-Seminar, Oktober 2012.
- /SEL 17/ Selvam, P. K., Kulenovic, R., Laurien, E., Kickhofel, J., Prasser, H.-M.: Thermal mixing of flows in horizontal T-junctions with low branch velocities. Nuclear Engineering and Design, 322:32–54, ISSN 0029-5493, Oktober 2017.

- /SIE 99/ Sievers, J., H. Schulz, B. R. Bass, C. E. Pugh  
Final report on the International Comparative Assessment Study of Pressurized Thermal-Shock in Reactor Pressure Vessels (RPV PTS ICAS), NEA/CSNI/R(99) 3, GRS-152, 1999
- /SOU 18/ Southern Company: Vogtle Electric Generating Plant, Units 3 & 4, Updated Final Safety Analysis Report, Revision 7. Technischer Bericht, Washington, DC., USA, Juni 2018.
- /STA 10/ Starke, P., Walther, F., Eifler, D.: "PHYBAL" a short-time procedure for a reliable fatigue life calculation, Advanced Engineering Materials 12, 4 (2010) 276-282
- /STE 05/ Stephan, J. M., Curtit, F.: Mechanical Aspects Concerning Thermal Fatigue Initiation in the Mixing Zones of Piping. In: 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), August 2005.
- /TAD 04/ Tada, E., Noda, K., Kumai, S., Tsuru, T.: Monitoring of corrosion fatigue cracking using harmonic analysis of current responses induced by cyclic stressing, Corrosion Science, 46 (2004) 1549-1563
- /TÜV 06/ TÜV NORD EnSys Hannover: Gutachten zur Kernkraftwerk Mühleberg: Sicherheitsbewertung der Klammervorrichtung (Zugankerkonstruktion) im Hinblick auf Kernmantel-Durchrisse. Technischer Bericht, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Dezember 2006.
- /UTZ 15/ Utz, S. T.: Thermische Ermüdung in Kraftwerkskomponenten: Experimentelle und numerische Untersuchungen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.
- /VÖL 17/ Völker, C.: Datenfusion zur verbesserten Fehlstellendetektion bei der zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauwerken; Dissertation Univ. des Saarlandes (2017)

- /WAN 10/ Wang, Y.: Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden zur Bestimmung der Strukturzuverlässigkeit passiver Komponenten. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, April 2010.
- /WEI 09/ Weißenberg T.: Ermüdungsverhalten ferritischer Druckbehälter- und Rohrleitungsstähle in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser. Reaktorsicherheitsforschung - Vorhaben-Nr.: 1501309, MPA Universität Stuttgart (2009)
- /WEI 11/ Weißenberg T.: Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken. Arbeitspaket 3. BMU-Vorhaben SR 08 01312, MPA Universität Stuttgart (2011)
- /WIT 17/ Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., Pal, C. J.: Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, Morgan Kaufmann, Amsterdam, ISBN 978-0-12-804291-5, 2017.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Bruchflächen der Proben (von links nach rechts) 24.3, 4.1 und 29.2 mit markierter Risskontur und der Extensometerposition. ....	7
Abb. 3.2	Bruchflächen der Proben (von links) A6, A19 und C3 mit Markierung der Extensometerposition .....	8
Abb. 3.3	Fotos der am WPT untersuchten Proben 26.1 (links) und 19.1 (rechts; von zwei Seiten).....	8
Abb. 3.4	Skizze zur Bestimmung der Risstiefe anhand der Außenlänge .....	9
Abb. 3.5	Bruchflächen der Proben 19.1 (links) und 26.1 (rechts) mit Markierung der Extensometerposition.....	10
Abb. 3.6	Rissfortschrittsrate als Funktion der Risstiefe .....	12
Abb. 3.7	Risswachstumsrate als Funktion des Spannungsintensitätsfaktors.....	13
Abb. 3.8	Berechnete Verformung der Probe mit Farbdarstellung der axialen Verschiebung im Lastschritt 25 (Verformungsüberhöhungsfaktor 100) ....	14
Abb. 3.9	Schema des Querschnitts der Probe mit möglichen Extensometerpositionen relativ zum Riss .....	14
Abb. 3.10	Auswertung der Verschiebungen an der Extensometerposition L .....	15
Abb. 3.11	Auswertung der Verschiebungen an der Extensometerposition U.....	16
Abb. 3.12	Extensometerdehnung, berechnet aus den Punktverschiebungen (Zeit entspricht Lastschritt).....	17
Abb. 3.13	$K_I$ – Faktor [ $\text{Pa m}^{1/2}$ ] für Lastschritt 10 .....	18
Abb. 3.14	$K_I$ – Faktor [ $\text{Pa m}^{1/2}$ ] für Lastschritt 20 .....	18
Abb. 3.15	$K_I$ – Faktor [ $\text{Pa m}^{1/2}$ ] für Lastschritt 100 .....	19
Abb. 4.1	Zyklen 10, 500, 1000, 1500 und 1800 des Versuchs 8.1, extrahiert mit der Maximum-Methode .....	28
Abb. 4.2	Normalisierte Widerstandsmessung innerhalb eines Zyklus .....	29
Abb. 4.3	Entwicklung der Fourierkoeffizienten bei Probe 8.1 .....	30
Abb. 4.4	Normierte Fourierkoeffizienten bei Probe 8.1 .....	31
Abb. 4.5	Veranschaulichung des Aufbaus eines künstlichen neuronalen Netzes .....	33



Abb. 4.6	Vergleich vorhergesagter und wahrer Lebensdauerwerte für Probe 8.1 .....	35
Abb. 4.7	Elektrische Widerstandsmessung vier gleichartiger Versuche .....	36
Abb. 4.8	Vorhersage bei Training mit den vier Proben 4.11, 9.8, 8.8 und 8.1 .....	37
Abb. 4.9	Normierte Koeffizienten mit maximumbasierter Zyklenerlegung für die Proben (von links nach rechts und oben nach unten) 8.1, 8.8., 9.8 und 4.11 .....	38
Abb. 4.10	Vorhersagetest bei maximumbasierter Zyklenerlegung .....	39
Abb. 4.11	Datenverarbeitung zur Ermüdungsschädigungsvorhersage beim DSV .....	40
Abb. 4.12	Dehnungssteigerungsversuch 6.6 als Widerstandssignal [ $\mu\Omega$ ] (links) und Dehnungsamplitude [%] (rechts), jeweils als Funktion der Zeit [s] ....	40
Abb. 4.13	Elektrischer Widerstand [ $\mu\Omega$ ] in den Zyklen 30, 2000, 5000, 10000, 12000 und 13000 des DSV 6.6 .....	41
Abb. 4.14	Vorhersage der Ermüdungsschädigung für den Dehnungssteigerungsversuch 6.6 .....	42
Abb. 4.15	Dehnungssteigerungsversuch 10.5, links der elektrische Widerstand [ $\mu\Omega$ ] und rechts die Totaldehnung [%], jeweils als Funktion der Zeit [s] .....	43
Abb. 4.16	Elektrischer Widerstand [ $\mu\Omega$ ] in den Zyklen 30, 2000, 5000, 10000, 12000, 12840 (links) sowie ausgewählte Koeffizienten als Funktion der Ermüdungsschädigung (rechts) von Versuch 10.5 .....	43
Abb. 4.17	Schädigungsvorhersage für DSV 10.5 .....	44
Abb. 4.18	Regressionsgeraden auf den einzelnen Dehnamplituden .....	47
Abb. 4.19	Vergleich der mit neuronalem Netz berechneten Wöhlerlinien für Versuch 10.5 mit den Wöhlerlinien aus MibaLeb I und KTA .....	48
<b>Abb. 4.20</b>	Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D8.1 (0,5 %) .....	51
Abb. 4.21	Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D0.3 (0,55 %) .....	52
Abb. 4.22	Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D19.3 (0,6 %) .....	52
<b>Abb. 4.23</b>	Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D24.3 (0,65 %) .....	53
Abb. 4.24	Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) bei Probe D3.2 (0,7 %) .....	53

Abb. 4.25	Wirbelstromdaten (Phasenverschiebung) beim Dehnungssteigerungsversuch D6 .....	54
Abb. 4.26	Beispiel für ausgewählte Zyklen des Einstufenversuchs D0.3 (0,55%), Wirbelstrom-Phasen bei 500 kHz .....	55
Abb. 4.27	Frequenzanalyse von Versuch D0.3 (0,55 %) Zyklus 100.....	56
Abb. 4.28	Frequenzanalyse von Versuch D0.3 (0,55 %) Zyklus 300.....	56
Abb. 4.29	Frequenzanalyse von Versuch D0.3 (0,55 %) Zyklus 600.....	57
Abb. 4.30	Frequenzanalyse von Versuch D0.3 (0,55 %) Zyklus 3000.....	57
Abb. 4.31	Spannungsamplitude während der Einstufenversuche und des Dehnungssteigerungsversuchs.....	58
Abb. 4.32	Temperaturänderung als Funktion der Versuchsdauer .....	59
Abb. 4.33	Elektrische Widerstandsänderung während der Versuchsdauer .....	59
Abb. 4.34	Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D8.1 (0,5 %).....	61
Abb. 4.35	Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D0.3 (0.55 %).....	62
Abb. 4.36	Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D19.3 (0.6 %).....	62
Abb. 4.37	Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D24.3 (0.65 %).....	63
Abb. 4.38	Tensor aus statistischen Charakteristiken bei Probe D3.2 (0.7 %).....	63
Abb. 4.39	Tensoren des Dehnungssteigerungsversuchs als Funktion des Datensatz-Index .....	64
Abb. 4.40	Tensorinformation von Probe D0.3 als Funktion der Schädigung.....	65
Abb. 4.41	Vorhersagen des neuronalen Netzes mit Relu-Aktivierungsfunktion.....	66
Abb. 4.42	Vorhersagen des neuronalen Netzes mit Sigmoid- Aktivierungsfunktion.....	67
Abb. 4.43	Vorhersage für das trainierte Netz mit Sensorfusion .....	67
Abb. 4.44	Vorhergesagte Entwicklung der Schädigung im Dehnungssteigerungsversuch und Dehnamplitude .....	68
Abb. 4.45	Vorhergesagte Schädigung in Zyklen einer bestimmten Dehnungsamplitude im Dehnungssteigerungsversuch.....	69
Abb. 4.46	Inkrementelle Schädigung beim Dehnungssteigerungsversuch .....	69

Abb. 4.47	Vorhergesagte Schädigung im Dehnungssteigerungsversuch mit Sensorfusion.....	70
Abb. 4.48	Vorhergesagte inkrementelle Schädigung im Dehnungssteigerungsversuch mit Sensorfusion .....	71
Abb. 4.49	Schädigungsentwicklung im Dehnungssteigerungsversuch mit Relu-Aktivierungsfunktion und Vergleich mit verschiedenen Parametrisierungen der Wöhlerlinie .....	72
Abb. 4.50	Schädigungsentwicklung im Dehnungssteigerungsversuch mit Sigmoid-Aktivierungsfunktion, Vergleich mit verschiedenen Parametrisierungen der Wöhlerlinie und Fitergebnis $k=-1.1$ .....	73
Abb. 4.51	Wöhlerlinie aus dem Fit der Schädigungsentwicklung mit Sigmoid-Funktion und Vergleich mit den Einstufenversuchen.....	74
Abb. 4.52	Vorhergesagte inkrementelle Schädigung, umgerechnet auf eine Lebensdauer, für den Dehnungssteigerungsversuch .....	75
Abb. 5.1	FSI-Kreislauf der MPA Universität Stuttgart, Bild von der MPA.....	78
Abb. 5.2	Führung des Kaltwassers zur Rohrwand .....	78
Abb. 5.3	FE-Modell des Rohrsegments mit Kühlstreifen (Halbmodell) .....	79
Abb. 5.4	Aufgebrachte thermische Wechsellast.....	80
Abb. 5.5	Elemente- und Knotennummern auf der Auswertelinie von innen nach außen (vergrößerter Schnitt) .....	83
Abb. 5.6	Temperaturverteilung in Kelvin nach 30 s .....	84
Abb. 5.7	Zeitliche Temperaturverläufe an den Auswertepunkten .....	85
Abb. 5.8	Temperaturverläufe von innen nach außen bei 90 s und 120 s.....	85
Abb. 5.9	Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen an der Innenoberfläche im Versuch XT2 (siehe /MPA 22/) .....	86
Abb. 5.10	Zeitliche Verläufe der Dehnungen.....	87
Abb. 5.11	Verlauf der effektiven Dehnungen von innen nach außen bei 90 s und 120 s.....	88
Abb. 5.12	Zeitliche Verläufe der Vergleichsspannungen .....	89
Abb. 5.13	Verlauf der Vergleichsspannungen von innen nach außen bei 90 s und 120 s.....	90

Abb. 5.14	Einordnung der Ergebnisse in die Wöhlerlinie der KTA 3201.2 /KTA 13/ .....	93
Abb. 6.1	Speisewasserstutzen mit Befunden (aus /WAN 10/)	98
Abb. 6.2	Leckage (Position a) beim Civeaux-Ereignis, nach /CHA 09/	99
Abb. 6.3	KTA-Kurve für austenitische Stähle .....	101
Abb. 6.4	Analyse der Civeaux-Leckage bei hypothetischer einstufiger Belastung .....	102



## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Auswertung von Ermüdungsproben zur Rissbildung.....	9
Tab. 3.2	Übersicht über alle Anrisse in den Proben .....	10
Tab. 3.3	Zyklen bis zum angegebenen Lastabfall.....	11
Tab. 3.4	Zyklen bis zum angegebenen Lastabfall (MibaLeb I Proben).....	11
Tab. 3.5	Risstiefenschätzung für die Proben.....	12
Tab. 4.1	Ergebnisse der Dehnungssteigerungsversuche .....	22
Tab. 4.2	Ergebnisse der Einstufenversuche .....	22
Tab. 4.3	Ergebnisse der Dehnungssteigerungsversuche .....	23
Tab. 4.4	Ergebnisse der Einstufenversuche .....	23
Tab. 4.5	Ergebnisse der Dehnungssteigerungsversuche.....	24
Tab. 4.6	Ergebnisse der Einstufenversuche .....	24
Tab. 4.7	Ergebnisse der Laststeigerungsversuche an gekerbten Proben .....	24
Tab. 4.8	Ergebnisse der Einstufenversuche an gekerbten Proben.....	25
Tab. 4.9	Ergebnisse der Laststeigerungsversuche .....	26
Tab. 4.10	Ergebnisse der Einstufenversuche .....	26
Tab. 4.11	Ergebnisse der Laststeigerungsversuche .....	26
Tab. 4.12	Ergebnisse der Einstufenversuche an gekerbten Proben.....	27
Tab. 4.13	Versuchsübersicht .....	49
Tab. 4.14	Stufen im Dehnungssteigerungsversuch.....	50
Tab. 5.1	Angepasste Wärmeausdehnungskoeffizienten /SIE 99/.....	81
Tab. 5.2	Verwendete Materialkennwerte der mechanischen Berechnung /SIE 99/.....	82
Tab. 5.3	Materialkennwerte der thermischen Berechnung /SIE 99/.....	82
Tab. 6.1	Ereignisse mit Ermüdungsschädigung austenitischer Werkstoffe in der KomPass-Datenbank.....	96

Tab. 6.2	Anzahl der Ereignisse mit Ermüdung von austenitischem Stahl in der CODAP-Datenbank: Aufschlüsselung nach Werkstoff .....	97
Tab. 6.3	Parameter der KTA-Kurve für austenitische Stähle .....	100

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)