

Schadensfrüherkennung an thermozyklisch beanspruchten austenitischen Werkstoffen

Ralf TSCHUNCKY^{*1}, Iris ALTPETER^{*}, Karl HÄLLEN^{*}, Gerd DOBMANN^{*},
Christian BOLLER^{*}, Andreas SORICH^{**}, Marek SMAGA^{**}, Dietmar EIFLER^{**},

^{*} Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP
(Campus E3 1, 66123 Saarbrücken)

^{**} Lehrstuhl für Werkstoffkunde WKK, TU Kaiserslautern
(Gottlieb-Daimler-Straße, 67669 Kaiserslautern)

Kurzfassung. In Kernkraftwerken unterliegen austenitische Rohrleitungssysteme betriebsbedingt thermo-mechanischen Beanspruchungen. Temperaturgradienten aufgrund des Wechsels von kalten und warmen Medien in den Leitungen führen zu Dehnungsgradienten. Davon sind insbesondere Surgeline (Volumenausgleichsleitungen), Leitungen des Volumenregel- und Nachkühlsystems sowie Sprühleitungen betroffen. Als Folge der thermo-mechanischen Beanspruchungen finden Mikrostrukturveränderungen und Ermüdung des Rohrleitungsmaterials statt. Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung neuer, zerstörungsfreier Sensorsysteme und -konzepte, mit deren Hilfe eine Detektion und Interpretation ermüdungsbedingter Mikrostrukturveränderungen im Vorfeld der Rissbildung ermöglicht werden kann.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt des Fraunhofer Instituts für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) und dem Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK), TU Kaiserslautern werden thermo-elastische/-plastische Beanspruchungszustände eines austenitischen Rohrleitungswerkstoffes in Ermüdungsversuchen systematisch untersucht. Durch eine konventionelle sowie zerstörungsfreie in-situ Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens wird ein Konzept zur Schadensfrüherkennung für eine zielgerichtete Bauteilüberwachung im Rahmen eines proaktiven Alterungsmanagements entwickelt.

1. Einführung

1.1 Ausgangssituation

Alterung und Verschleiß begrenzen die Lebensdauer eines Bauteiles und einer Komponente. Beide werden ausgelöst durch beanspruchungsbedingte Einflüsse während des Betriebes wie beispielsweise Temperatur oder mechanische Beanspruchungen. Als Folge dessen kommt es zu mikrostrukturellen Veränderungen im Werkstoff. Die thermisch relevanten Beanspruchungen von Rohrleitungssystemen in Leichtwasserreaktoren liegen zwischen 200°C bis 330°C und werden überwiegend durch An- und Abfahrtransienten hervorgerufen. Eine derart belastete Komponente eines Druckwasserreaktors ist die austenitische Surgeline [1-2]. Sie verbindet den Druckhalter mit dem Primärkreislauf (siehe Abbildung 1).

¹ ralf.tschuncky@izfp.fraunhofer.de

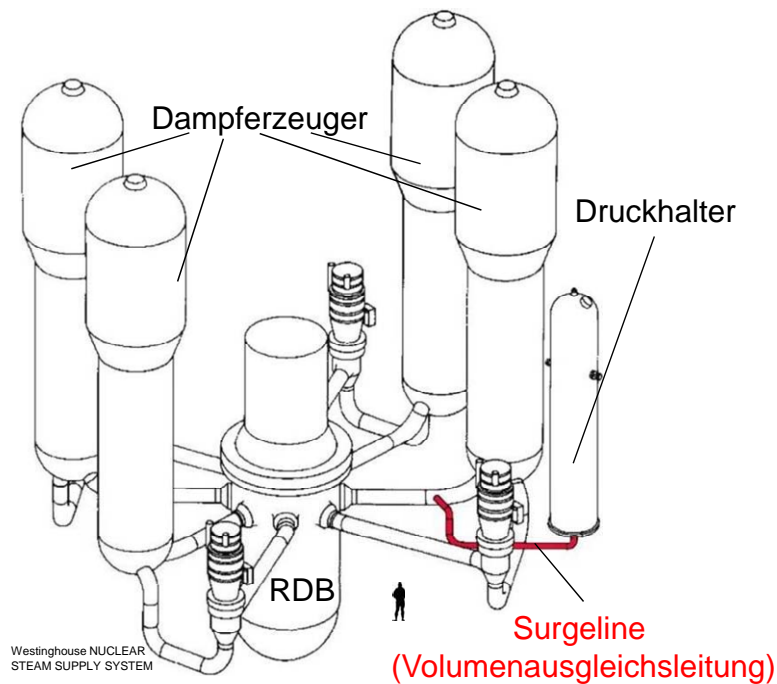


Abbildung 1. Schematischer Aufbau des Primärkreislaufes eines Druckwasserreaktors

Da die Hauptaufgabe des Druckhalters darin besteht, dem Reaktorkühlkreislauf den auslegungsgemäßen Druck aufzuprägen und temperaturbedingte und durch Pumpenbetrieb hervorgerufene Volumenschwankungen auszugleichen, sind speziell die Surgeline aber auch die Leitungen von Notkühlsystemen wie die Deckelsprühleitung den oben genannten Beanspruchungen ausgesetzt. Diese austenitischen Komponenten sind aufgrund ihrer vergleichsweise niedrigen thermischen Leitfähigkeit besonders betroffen. Der Nachweis einer hinreichenden Ermüdungsfestigkeit von druckführenden Komponenten in Kernkraftwerken erfolgt gemäß den Festlegungen des kerntechnischen Regelwerkes (KTA 3201.2). Der Nachweis wird mittels der darin enthaltenen Ermüdungskurven für ferritische und austenitische Werkstoffe geführt. Viele austenitische Stähle sind bis zur M_d -Temperatur (ca. Raumtemperatur) im metastabilen Zustand und können infolge plastischer Verformung vom paramagnetischen Austenit zum ferromagnetischen α' -Martensit umwandeln [3-5]. Bei erhöhten Temperaturen, bei denen die vorherrschende stabile austenitische Phase existiert, entstehen Veränderungen in der Versetzungsdichte und/oder -anordnung, Subkornzellstrukturen sowie dynamische Reckalterungsprozesse [6-9]. Diese Effekte verursachen signifikante Veränderungen im zyklischen Verformungsverhalten und haben somit Einfluss auf die Ermüdungseigenschaften von austenitischen Stählen. Es ist wohl bekannt, dass die Mikrostruktur und die Versetzungsdichte Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit und die -amplitude haben [10-15]. Allerdings schließen die Versuchstemperaturen von bis zu 300°C die Verwendung herkömmlicher piezoelektrischer Ultraschallwandler aus, da diese ein Koppelmedium zwischen Sender/Empfänger-Prüfkopf und der Oberfläche des Testkörpers erfordern. Aus diesem Grund müssen elektromagnetische Ultraschall-Wandler (EMUS-Wandler) verwendet werden, die Ultraschallwellen direkt in elektrisch leitfähigen Materialien erzeugen ohne ein Koppelmedium zu verwenden [16-18].

Die vorliegende Veröffentlichung legt den Fokus auf die Entwicklung eines neuen Sensorsystems dessen Signale in der Lage sind, ermüdungsinduzierte mikrostrukturelle Veränderungen durch thermo-elastische/-plastische mechanische Beanspruchungen in austenitischen Stählen zu erkennen und zu bewerten. Das zugrundeliegende Forschungsvorhaben wird in Zusammenarbeit des Fraunhofer Institutes für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) und des Lehrstuhls für Werkstoffkunde (WKK), TU Kaiserslautern

durchgeführt. Die Arbeiten am WKK zielen in erster Linie auf die Charakterisierung des Ermüdungsprozesses sowie der mikrostrukturellen Analyse ab, wohingegen das IZFP bestrebt ist ein Online-Monitoring-Konzept für ein zerstörungsfreies, in-situ Prüfverfahren zur Ermüdungsbewertung zu entwickeln, welches das Potential besitzt, auf die realen Rohrleitungskomponenten (Volumenausgleichsleitung, Kühlungssysteme, usw.) eines Reaktors angewendet werden zu können, so dass eine zielgerichtete Bauteilüberwachung im Rahmen des Alterungsmanagements ermöglicht werden kann.

2. Versuchswerkstoff und Versuchsaufbau

2.1 Versuchswerkstoff

Der hier untersuchte Werkstoff ist der Nb-stabilisierte austenitische nichtrostende Stahl X6CrNiNb1810 (1.4550, AISI 347). Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 1 dargestellt. Die ermittelten Werte entsprechen den Vorgaben der DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) und der KTA (Kerntechnische Ausschuss der Bundesrepublik Deutschland). Die Berechnung der Austenitstabilitätskenngrößen (z.B.: $M_{d30} = 26^{\circ}\text{C}$ nach Angel) weist auf einen metastabilen Zustand des untersuchten Werkstoffes bei Raumtemperatur hin. Die Mikrostruktur des zu untersuchenden Stahls hat eine mittlere Korngröße von $120\ \mu\text{m}$ und eine Vickershärte von 140 HV10. Die Ergebnisse der Zugversuche stimmen mit den Angaben der DIN und KTA überein. Die Zugfestigkeit R_m und die Bruchdehnung A_5 nehmen charakteristisch für metastabile austenitische Stähle mit steigender Temperatur ab. Weitere mechanische Kenngrößen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Bei Raumtemperatur bildet sich infolge einer 66%-igen plastischen Verformung 7,2 Vol.-% α' -Martensit. Bei RT setzt die α' -Martensitbildung bei einer Gesamtdehnung von 22 % ein. Magnetinduktive Messungen und Schlifffbilder nach Zugversuchen bei 300°C zeigten keinen α' -Martensitanteil.

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung in Masse-%

C	Cr	Ni	Nb	Ti	Mn	Mo	N	Cu	Si	P	S	V
0,04	17,60	10,64	0,62	0,02	1,83	0,29	0,007	0,06	0,41	0,02	0,007	0,07

Tabelle 2. Mechanische Eigenschaften bei RT und 300°C

Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_{p1,0}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	α' [Vol.-%]
RT	242	282	569	66	7,2
300	180	211	357	36	0

2.2 Versuchsaufbau

Proben aus austenitischem rostfreiem Stahl X6CrNiNb1810 wurden mit verschiedenen konstanten Totaldehnungsamplituden (0,8; 1,0; 1,2 und 1,6%) bei RT und 300°C auf einer servohydraulischen Prüfmaschine mit einem Dehnungsverhältnis von $R_{\epsilon} = -1$ und einer Frequenz von 0,01 Hz beansprucht. Neben den zerstörungsfreien elektromagnetischen Signalen von den EMUS-Wandlern und dem Ferritscope, wurden die vollständigen Spannung-Dehnung-Hysteresen aufgezeichnet, um das zyklische Verformungsverhalten zu charakterisieren. Elektromagnetische akustische Wandler regen Ultraschallwellen in leitfähigen Materialien direkt über die Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern an, sie haben somit einen großen Vorteil gegenüber piezoelektrischen Ultraschallwandlern, da sie ohne Koppelmittel zwischen Wandler und Testkörper arbeiten. Der Aufbau mithilfe von EMUS-Wandlern erlaubt Messungen auf empfindlichen Oberflächen und Objekten

ebenso wie bei erhöhten Temperaturen. Andere Vorteile von EMUS-Wandlern sind die Möglichkeit der effizienten Anregung von Scherwellen mit vertikaler und horizontaler Polarisation mit unterschiedlichen Einfallswinkeln aber auch die Erzeugung von linearen, radialen und elliptischen Wellen [19]. EMUS-Wandler erzeugen Ultraschallwellen mittels der Lorentz-Kraft, der Magnetostriktion oder durch magnetische Kräfte. Ultraschallerzeugung mit Hilfe der Magnetostriktion und der magnetischen Kräfte erfordert allerdings ferromagnetisches Materialverhalten. Im vorliegenden Fall wird die Ultraschallwelle deshalb rein durch die Lorentz-Kraft erzeugt, da das zu untersuchende Material aus paramagnetischem austenitischem Stahl besteht. Die Erzeugung von Ultraschallwellen mittels EMUS-Wandlern wird durch die Überlagerung von hochfrequenten Wirbelströmen hervorgerufen, die durch die Wechselwirkung eines statischen oder niederfrequenten magnetischen Feldes mit dem hochfrequenten Magnetfeld einer stromdurchflossenen angepassten Spule induziert werden. Die Wellen werden von einer Empfängerspule, die geometrisch äquivalent zu der Senderspule aufgebaut ist, aufgenommen. In diesem Projekt wurden radial polarisierte Scherwellen durch den Sender an einem Ende der Ermüdungsproben erzeugt und an dem anderen Ende empfangen (siehe Abbildung 2).

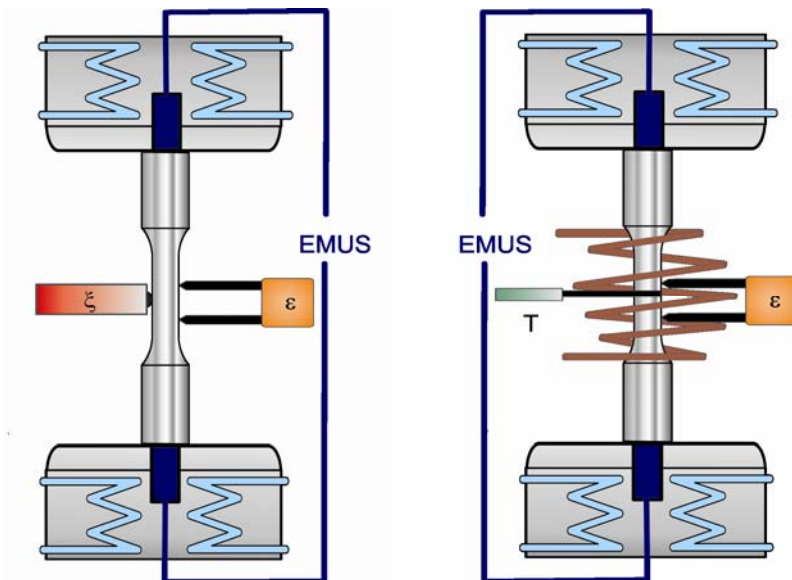


Abbildung 2. Messaufbau mit in die Einspannungen des servohydraulischen Prüfsystems integrierten EMUS-Wandlern bei Raumtemperatur (links) inkl. Ferritscope (ξ) und Extensometer (ϵ) und bei erhöhter Temperatur (rechts) inkl. induktiver Heizung, Thermoelement (T) und Extensometer (ϵ)

Analysen der elektromagnetisch angeregten Ultraschallsignale zeigten, dass Veränderungen in der Laufzeit und Amplitude des elektromagnetisch angeregten Ultraschallsignals das größte Potential zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens besitzen. In dieser Veröffentlichung werden jedoch nur die Ergebnisse der Ultraschalllaufzeitmessungen dargestellt. Durch eine Synchronisation des servohydraulischen Prüf- und Messsystems mit dem elektromagnetischen Ultraschallprüfsystem über ein Triggerkonzept wird sichergestellt, dass Daten während der Ermüdungsversuche synchronisiert aufgenommen werden. Das Triggerkonzept basiert auf der synchronisierten Aufnahme des Dehnungssignals für alle beteiligten Messsysteme, so kann gewährleistet werden, dass stets alle Messdaten dem exakten Belastungszyklus und der aktuellen Dehnungsbelastung zugeordnet werden können.

3. Ergebnisse

3.1 Zyklisches Verformungsverhalten bei Raumtemperatur

In Abbildung 3 ist exemplarisch das gemessene Laufzeitsignal (tof) während eines Ermüdungsversuches mit einer Totaldehnungsamplitude $\varepsilon_{a,t} = 1,0\%$ bei Raumtemperatur dargestellt. In der Detailaufnahme ist das Verhalten der Ultraschalllaufzeit während eines Ermüdungszykluses dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die Verformung der Probe während des Ermüdungszykluses in dem Laufzeitsignal abbildet. Der als tof_{mean} bezeichnete Mittelwert über einen Ermüdungszyklus zeigt äquivalent zu dem tof -Signal lastspielzahlabhängige Veränderungen während der Ermüdung.

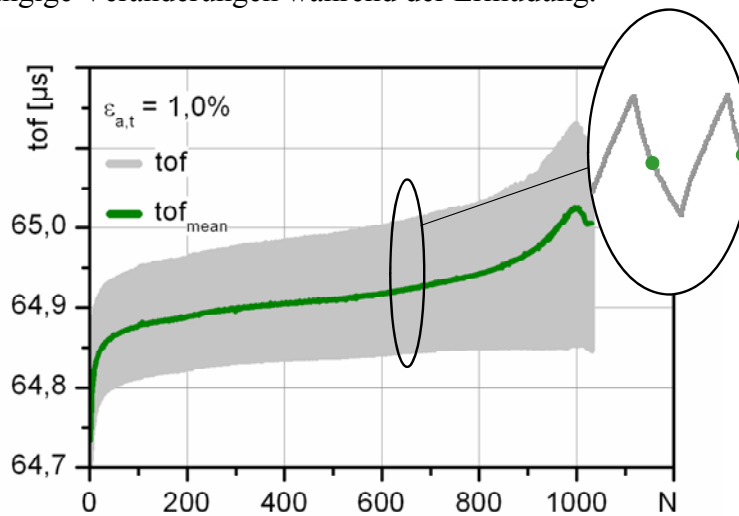


Abbildung 3. Ultraschalllaufzeit (tof) als Funktion der Lastspielzahl (N) für einen totaldehnungskontrollierten Einstufenversuch bei RT: $\varepsilon_{a,t} = 1,0\%$, $f = 0,01$ Hz und $R_\varepsilon = -1$ sowie Verlauf des Mittelwertes der Ultraschalllaufzeit (tof_{mean})

In Abbildung 4 ist links die Entwicklung der Spannungsamplitude (σ_a) über der Lastspielzahl (N) und rechts der Verlauf der Veränderung im Mittelwert der Ultraschalllaufzeit ($\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$) während der Ermüdungsversuche mit unterschiedlichen Totaldehnungsamplituden $\varepsilon_{a,t}$ dargestellt. Das zyklische Verformungsverhalten bei RT ist durch zyklische Verfestigung des Versuchswerkstoffes gekennzeichnet und ist grundlegend durch die verformungsinduzierte α' -Martensitbildung beeinflusst. Ein Vergleich der σ_a , N - und $\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$, N -Kurven zeigt eine eindeutige Korrelation zwischen den beiden Messgrößen.

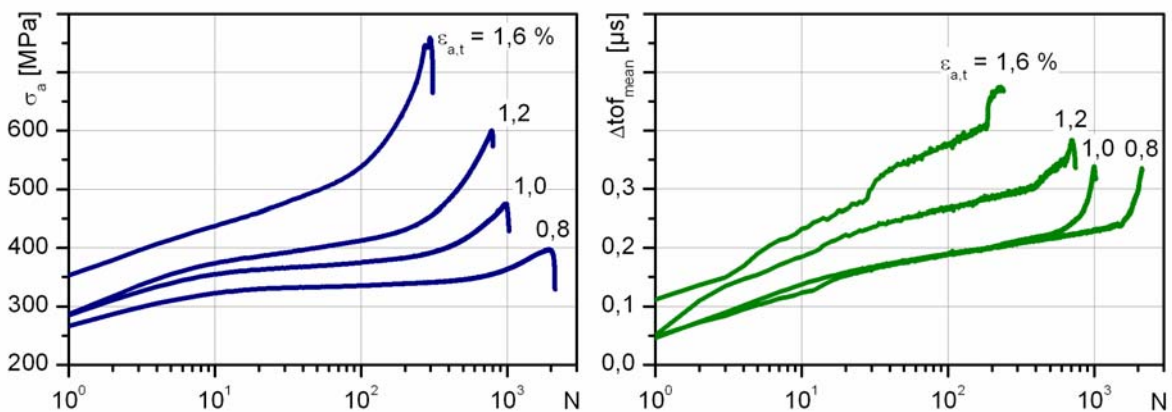


Abbildung 4. Links: Spannungsamplitude (σ_a) als Funktion der Lastspielzahl (N), rechts: Veränderung des Mittelwertes der Ultraschalllaufzeit ($\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$) als Funktion der Lastspielzahl (N) für totaldehnungskontrollierte Einstufenversuche bei RT

3.2 Zyklisches Verformungsverhalten bei 300°C

Das zyklische Verformungsverhalten des untersuchten Stahls bei $T = 300^\circ\text{C}$ (Abbildung 5 links) ist durch eine anfängliche zyklische Verfestigung, gefolgt von einer zyklischen Entfestigung bis zum Probenversagen gekennzeichnet. Bei dieser Temperatur bildet sich kein α' -Martensit und im Vergleich zu RT liegt ein deutlich niedrigeres Spannungsniveau vor. In den $\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$, N-Kurven (Abbildung 5 rechts) sind generell drei unterschiedliche Bereiche erkennbar, deren Auftreten auf verschiedene Ermüdungsphänomene zurückzuführen ist. $\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$ zeigt äquivalent zu σ_a einen anfänglichen Anstieg, der mit der zyklischen Anfangsverfestigung korreliert, gefolgt von einem Abfall aufgrund einer zyklischen Entfestigung und einem zweiten Anstieg des $\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$ -Signals. Der zweite Anstieg kann auf die Entstehung von Extrusionen/Intrusionen an der Probenoberfläche und das spätere Auftreten von Mikrorissen zurückgeführt werden. Aber auch Veränderungen in der Versetzungsdichte und -anordnung haben wie bei RT auch bei 300°C einen Einfluss auf die Ultraschalllaufzeit.

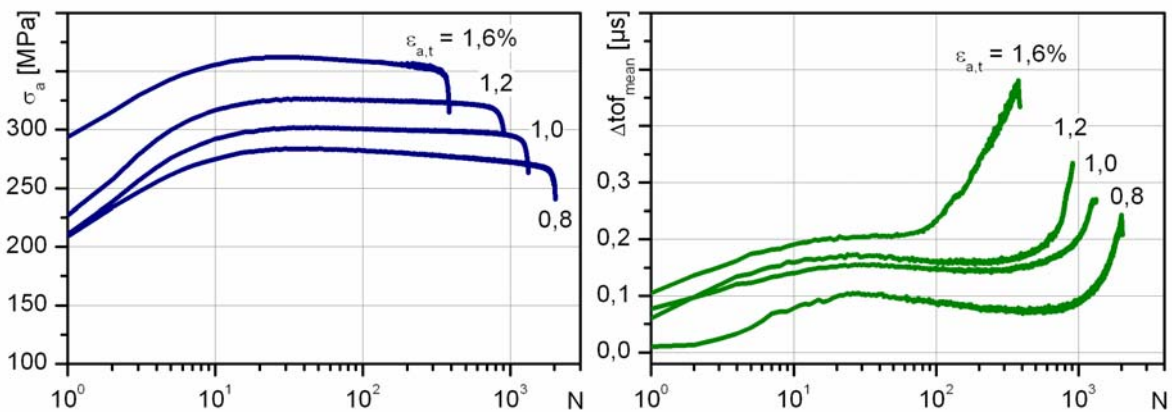


Abbildung 5. Links: Spannung amplitude (σ_a) als Funktion der Lastspielzahl (N), rechts: Veränderung des Mittelwertes der Ultraschalllaufzeit ($\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$) als Funktion der Lastspielzahl (N) für totaldehnungskontrollierte Einstufenversuche bei 300°C

3.3 Vergleich des zyklischen Verformungsverhaltens und des EMUS-Signals bei Raumtemperatur und 300°C

Abbildung 6 zeigt einen Vergleich des zyklischen Verformungsverhaltens des Stahls X6CrNiNb1810 bei RT und $T = 300^\circ\text{C}$ sowie die Veränderung des Mittelwertes der Ultraschalllaufzeit ($\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$) als Funktion der Lastspielzahl. Der Vergleich belegt das große Anwendungspotential des elektromagnetisch angeregten Ultraschalls zur Charakterisierung des aktuellen Ermüdungszustandes. Vergleicht man σ_a und $\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$ bei 300°C in dem Lastspielzahlbereich von $N = 1-300$ wird deutlich, dass beide Prozesse, sowohl die zyklische Ver- als auch die Entfestigung des austenitischen Stahls während der Ermüdungsbeanspruchung mit der Ultraschalllaufzeit detektiert werden kann. Darüber hinaus korreliert ein zweiter Anstieg von $\Delta\text{tof}_{\text{mean}}$ für $N > 300$ mit der Bildung von In- und Extrusionen an der Probenoberfläche und der Entstehung von Mikrorissen, die den Einfluss der zyklischen Entfestigung auf das EMUS-Signal überlagern. Die Spannung amplitude fällt kontinuierlich bis zum Probenversagen ab, während die Ultraschalllaufzeit als Reaktion der Entstehung erster Mikrorisse wieder ansteigt. Veränderungen des Ultraschalllaufzeitensignals können dazu verwendet werden zuverlässige Daten für den Nachweis von Ermüdungsprozessen aufzunehmen.

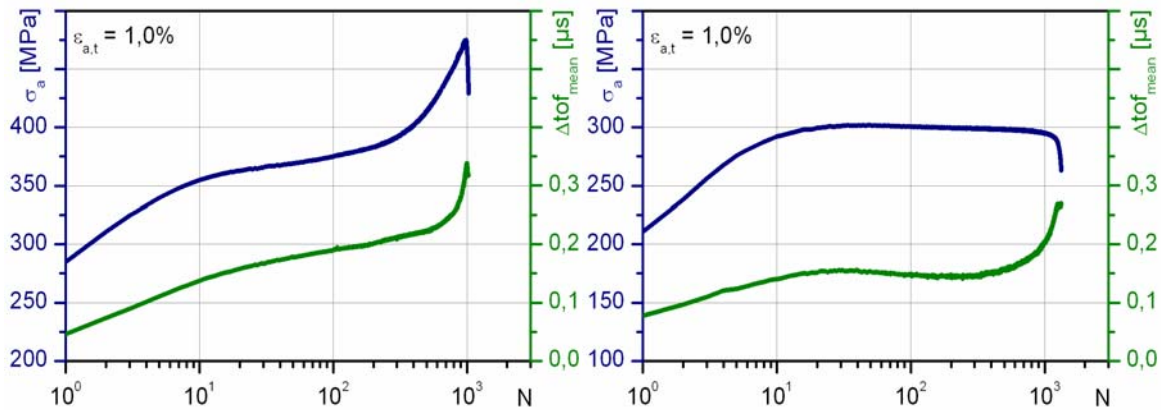


Abbildung 6. Exemplarischer Verlauf der Spannungsamplitude (σ_a) und der Veränderung des Mittelwertes der Ultraschalllaufzeit ($\Delta t_{of,mean}$) als Funktion der Lastspielzahl (N) bei RT (links) und $T = 300^\circ\text{C}$ (rechts)

Das zyklische Verformungsverhalten des zu untersuchenden austenitischen Stahles bei RT wird grundlegend durch die verformungsinduzierte Austenit-Martensit Umwandlung bestimmt. Nach einer von der Anzahl der Zyklen N und der Beanspruchung amplitudenabhängigen Beanspruchung, setzt die Bildung von α' -Martensit ein. Der α' -Martensitanteil steigt bis zum Probenversagen kontinuierlich mit steigender Zyklenzahl (siehe Abbildung 7). Der α' -Martensitanteil wird hier durch Umrechnen des mittels eines Ferritscopes in-situ gemessenen prozentualen Ferritanteils ermittelt. In der Literatur wird eine lineare Korrelation zwischen %-Ferrit und Vol.-% α' -Martensit angegeben [5]. Das Ferritscope ermittelt dabei die Veränderung der magnetischen Induktion, die unmittelbar mit dem ferromagnetischen α' -Martensitanteil korreliert.

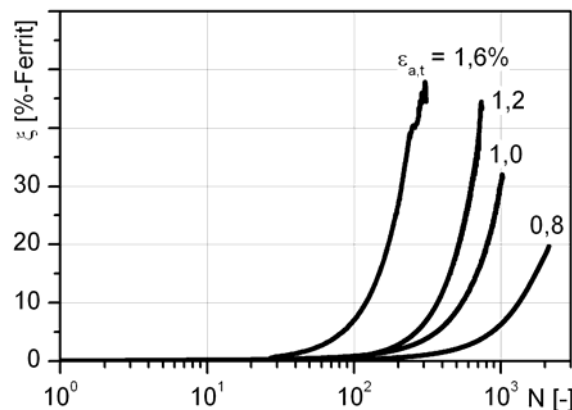


Abbildung 7. Verformungsinduzierter α' -Martensitanteil (ξ) als Funktion der Lastspielzahl (N) bei RT (ohne Umrechnung von %-Ferrit in Vol.-% α' -Martensit)

Nicht nur der verformungsinduzierte α' -Martensitanteil hat einen Einfluss auf die Ultraschalllaufzeit, sondern auch Veränderungen in der Versetzungsdichte und -anordnung sowie die Bildung von Verformungsmerkmalen an der Probenoberfläche haben einen Einfluss auf das Ultraschalllaufzeitverhalten. Der Einfluss von Änderungen der Versetzungsdichte und -anordnung wurde mit transmissionselektronenmikroskopischen (TEM) Aufnahmen gezeigt (siehe Abbildung 8). Äquivalent dazu wurde der Einfluss von Extrusionen/Intrusionen und schließlich den daraus resultierenden Mikrorissen mit rasterelektronenmikroskopischen (REM) Aufnahmen nachgewiesen (siehe Abbildung 9). Aufgrund der Bildung des verformungsinduzierten α' -Martensits bei RT (Abbildung 7), einer ansteigenden Versetzungsdichte (Abbildung 8) sowie der Entstehung von In- und Extrusionen auf der Probenoberfläche und letztendlich das Auftreten von Mikrorissen

(Abbildung 9) wurde eine kontinuierliche Erhöhung von $\Delta\sigma_{\text{mean}}$ von Beginn des Ermüdungsversuchs bis zum Probenversagen nachgewiesen.

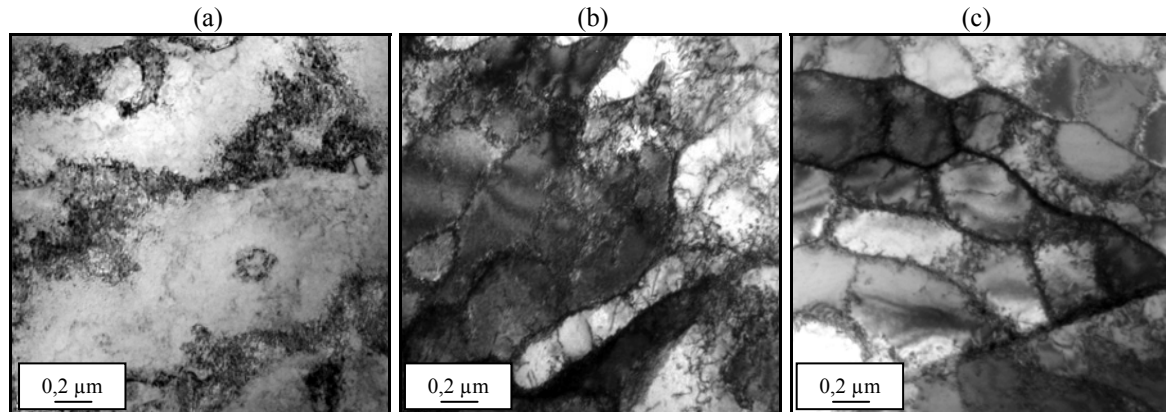


Abbildung 8. TEM-Aufnahmen im (a) Ausgangszustand $N = 0$, (b) $N = 900$ bei RT und (c) $N = 900$ bei 300°C . Totaldehnungskontrollierte Einstufenversuche: $\varepsilon_{a,t} = 1\%$, $f = 0,01$ Hz und $R_\varepsilon = -1$

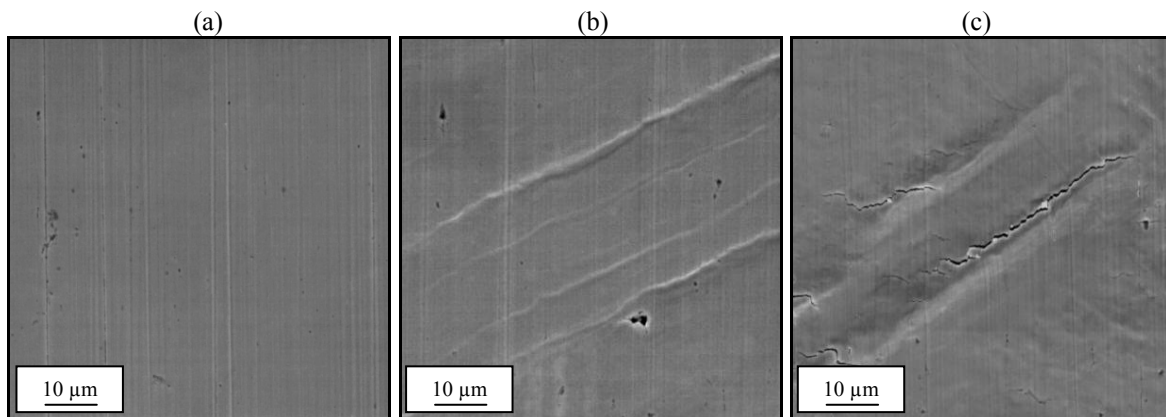


Abbildung 9. REM-Aufnahmen im (a) Ausgangszustand $N = 0$, (b) $N = 100$ und (c) $N = 400$. Totaldehnungskontrollierte Einstufenversuche bei RT: $\varepsilon_{a,t} = 1\%$, $f = 0,01$ Hz und $R_\varepsilon = -1$

4. Zusammenfassung

In totaldehnungskontrollierten Einstufenversuchen bei RT und 300°C wurde das zyklische Verformungsverhalten des austenitischen Stahles X6CrNiNb1810 durch konventionelle Spannung-Dehnung-Hysteresemessungen und durch neuartige Ultraschallmessungen mit EMUS-Wandlern untersucht. Das zyklische Verformungsverhalten bei RT wird grundlegend durch die α' -Martensitumwandlung bestimmt, die zu einer zyklischen Verfestigung führt. Bei 300°C entsteht kein α' -Martensit und die Spannungsamplitude liegt deutlich niedriger als bei RT. Für ausgewählte Ermüdungsstadien konnte durch Ferritscopemessungen, TEM- und REM-Aufnahmen gezeigt werden, dass die Ultraschalllaufzeitmessungen die ermüdungsbedingten mikrostrukturellen Veränderungen sehr zuverlässig und mit hoher Empfindlichkeit nachweisen können.

5. Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem GRS-Förderkennzeichen 1501379 gefördert. Die Autoren danken dem BMWi für die finanzielle Unterstützung des Projektes. VGB Powertech e.V. danken die Autoren für die Bereitstellung des Probenmaterials und dem Institut für Oberflächen- und Schichtanalytik GmbH (IFOS) für die TEM-Untersuchungen.

Referenzen

- [1] O.K. Chopra, W.J. Shack, Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials, NUREG/CR-6909 (2007).
- [2] V.S. Srinivasan, M. Valsan, R. Sandhya et al., High Temperature Time-Dependent Low Cycle Fatigue Behaviour of a Type 316L(N) Stainless Steel, International Journal of Fatigue 21 (1999), 11-21.
- [3] M. Smaga, E. Walther, D. Eifler, Deformation-Induced Martensitic Transformation in Metastable Austenitic Steels, Materials Science and Engineering: A 483 (2008), 394-397.
- [4] M. Bayerlein, H.J. Christ, H. Mughrabi, Plasticity-Induced Martensitic-Transformation during Cyclic Deformation of AISI-304L Stainless-Steel, Materials Science and Engineering: A 114 (1989), 11-16.
- [5] J. Talonen, P. Aspegren, H. Hänninen, Comparison of Different Methods for Measuring Strain Induced α' -Martensite Content in Austenitic Steels, Materials Science and Technology 20 (2004), 1506-1512.
- [6] V.S. Srinivasan, R. Sandhya, M. Valsan, et al., The Influence of Dynamic Strain Ageing on Stress Response and Strain-Life Relationship in Low Cycle Fatigue of 316L(N) Stainless Steel, Scripta Materialia 37 (1997), 1593-1598.
- [7] M. Smaga, F. Hahnenberger, A. Sorich, D. Eifler, Cyclic Deformation Behavior of Austenitic Steels in the Temperature Range $-60^{\circ}\text{C} \leq T \leq 550^{\circ}\text{C}$, Key Engineering Materials 465 (2011), 439-442.
- [8] H. Mughrabi, H.J. Christ, Cyclic Deformation and Fatigue of Selected Ferritic and Austenitic Steels: Specific Aspects, ISIJ International 37 (1997), 1154-1169.
- [9] H.J. Christ, V. Bauer, Fatigue of Austenitic Stainless Steel under Isothermal and Thermomechanical Conditions, TMS 2008 Annual Meeting and Exhibition, New Orleans, Louisiana (2008).
- [10] T. Ohtani, K. Nishiyama, S. Yoshikawa, et al., Ultrasonic Attenuation and Microstructural Evolution throughout Tension-Compression Fatigue of a Low-Carbon Steel, Materials Science and Engineering: A 442 (2006), 466-470.
- [11] L.B. Zuev, B.S. Semukhin, K.I. Bushmelyova, Ultrasound-Velocity Measurement of Strain in Metallic Polycrystals, Materials Research Innovations 5 (2002), 140-143.
- [12] P. Shankar, P. Palanichamy, T. Jayakumar et al., Nitrogen Redistribution, Microstructure, and Elastic Constant Evaluation Using Ultrasonics in Aged 316LN Stainless Steels, Metallurgical and Materials Transactions A 32 (2001), 2959-2968.
- [13] M. Vasudevan, P. Palanichamy, Characterization of Microstructural Changes during Annealing of Cold Worked Austenitic Stainless Steel Using Ultrasonic Velocity Measurements and Correlation with Mechanical Properties, Journal of Materials Engineering and Performance 11 (2002), 169-179.
- [14] C.K. Mukhopadhyay, T. Jayakumar, B. Raj et al., Acoustic Emission during Tensile Deformation of Pre-Strained Nuclear Grade AISI Type 304 Stainless Steel in the Unnotched and Notched Conditions, Journal of Materials Science 42 (2007), 5647-5656.
- [15] M. Hirao, H. Ogi, N. Suzuki et al., Ultrasonic Attenuation Peak during Fatigue of Polycrystalline Copper, Acta Materialia 48 (2000), 517-524.
- [16] T. Ohtani, H. Ogi, M. Hirao, Creep-Induced Microstructural Change in 304-Type Austenitic Stainless Steel, Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME 128 (2006), 234-242.
- [17] R. Murayama, K. Yamaguchi, Nonlinear Ultrasonic Wave Detection by Electromagnetic Acoustic Transducer [EMAT] for Guided wave, Japanese Journal of Applied Physics Part 1 44 (2005), 4385-4388.
- [18] H.J. Salzburger, EMAT's and its Potential for Modern NDE - State of the Art and Latest Applications, IEEE International Ultrasonics Symposium 1 (2009), 621-628.