

Lebensdaueranalysen zyklisch beanspruchter Stahltragwerke

Müde Metalle

Günther Meschke
Hendrik Hommel

Wenn man eine Büroklammer an immer derselben Stelle hin- und zurückbiegt, dauert es nicht lange, bis sie an dieser Stelle zerbricht. Ähnliche Ermüdungserscheinungen durch wiederkehrende Belastungen zeigen auch größere Metallbauteile, teils mit katastrophalen Folgen: Ermüdung war zum Beispiel der Grund für das ICE-Unglück in Enschede. Besonders tückisch ist, dass das Versagen scheinbar aus heiterem Himmel kommt: Eine Schädigung ist nicht erkennbar. Ingenieure entwickeln daher Simulationsprogramme, die die Lebensdauer von Metallbauteilen errechnen können.



Viele der im Ingenieurbau eingesetzten metallischen Bauteile oder Strukturen unterliegen einem ständigen Wechsel der Belastung. Diese zyklischen Lastgeschichten verursachen Veränderungen der Mikrostruktur des Materials, die sich auf die Festigkeit metallischer Werkstoffe und somit auf die Lebensdauer des Bauteiles auswirken. Das

Phänomen des Schädigungszuwachses aufgrund von zyklischer Belastung wird als Ermüdung (engl.: fatigue) bezeichnet. Auslöser sind meistens irreversible Verformungen, so genannte mikroplastische Deformationen. Diese Verformungen entstehen durch Versetzungen der Atome innerhalb des Kristallgitters, welche sich zu Gleitbändern zusammenschließen. Die

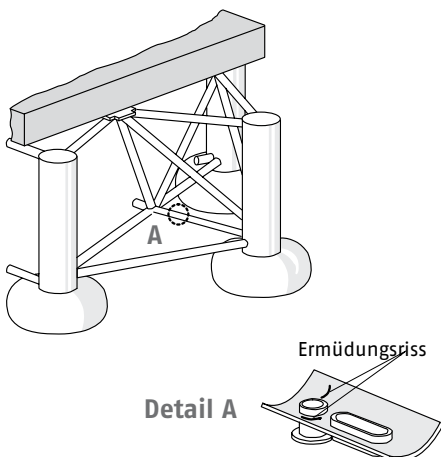
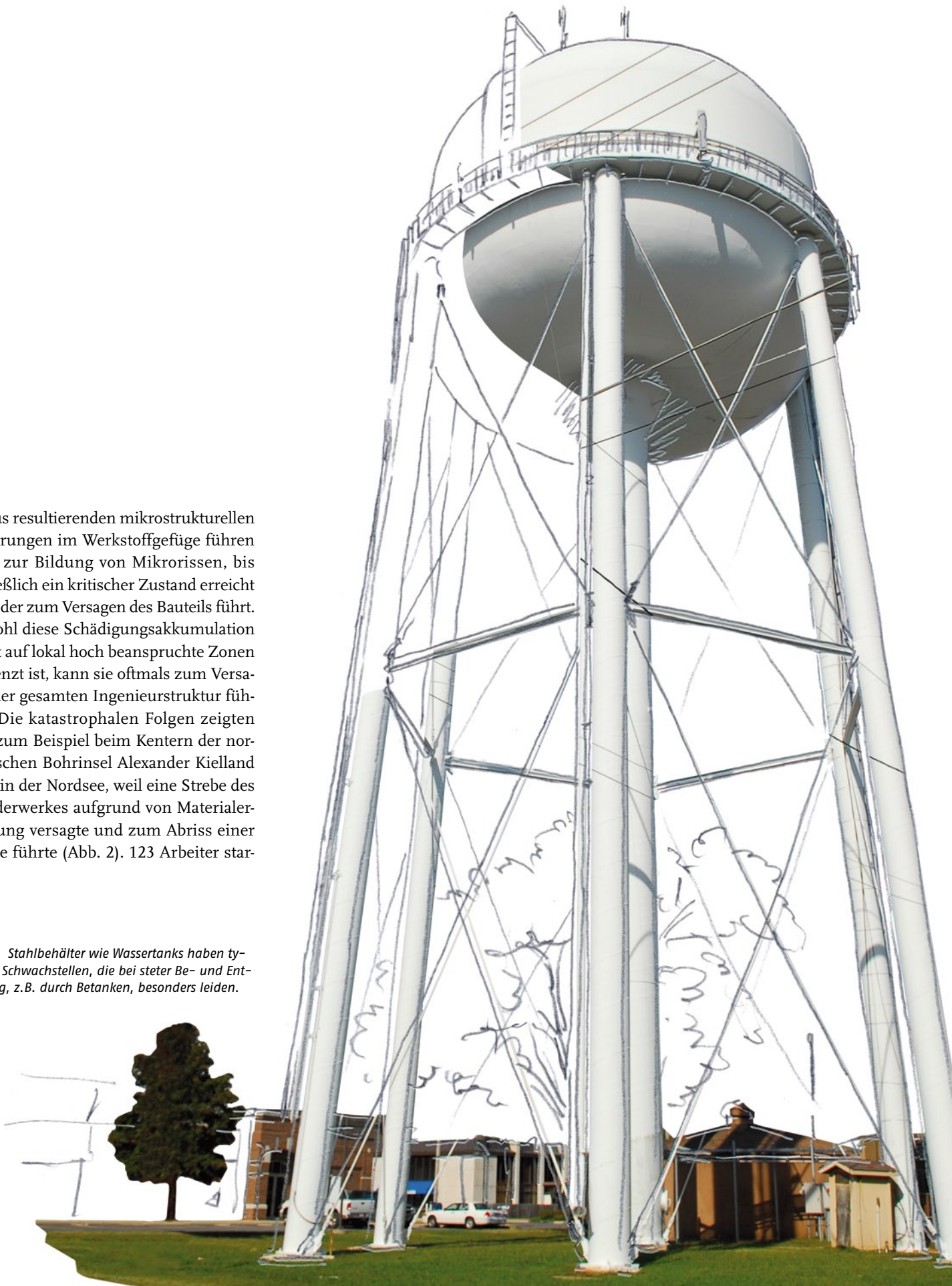


Abb. 2: Details der aufgrund von Ermüdung gekenterten Bohrplattform (Nordsee, 1980)

daraus resultierenden mikrostrukturellen Änderungen im Werkstoffgefüge führen lokal zur Bildung von Mikrorissen, bis schließlich ein kritischer Zustand erreicht wird, der zum Versagen des Bauteils führt. Obwohl diese Schädigungsakkumulation meist auf lokal hoch beanspruchte Zonen begrenzt ist, kann sie oftmals zum Versagen der gesamten Ingenieurstruktur führen. Die katastrophalen Folgen zeigten sich zum Beispiel beim Kentern der norwegischen Bohrinsel Alexander Kielland 1980 in der Nordsee, weil eine Strebe des Ständerwerkes aufgrund von Materialermüdung versagte und zum Abriss einer Stütze führte (Abb. 2). 123 Arbeiter star-

Abb. 1: Stahlbehälter wie Wassertanks haben typische Schwachstellen, die bei steter Be- und Entlastung, z.B. durch Betanken, besonders leiden.



Arten der Materialermüdung

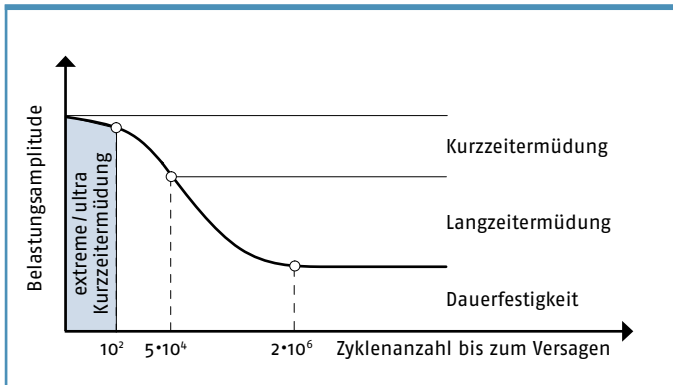


Abb. 3: Arten der Materialermüdung: Die Ultrakurzzeitermüdung ist erst seit kurzem bekannt.

Berechnungsmodell

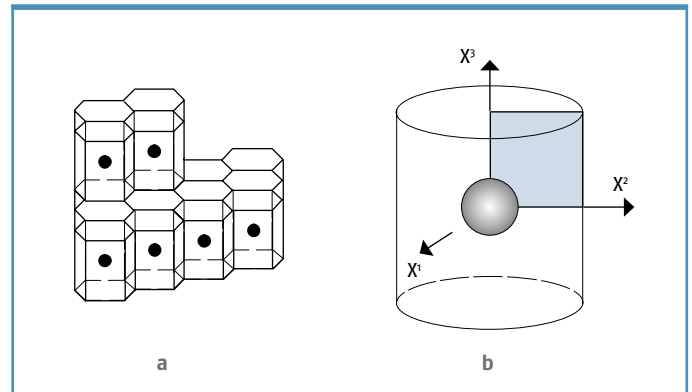


Abb. 5: (a) Idealisierung des porösen Materials, (b) Berechnungsmodell der zylinderförmigen Einheitszelle mit Mikropore.

ben. Auch als Ursache für das Entgleisen des ICE Wilhelm Conrad Röntgen in Enschede 1998 mit 101 Toten wird das Ermüdungsversagen von Metall angesehen; in diesem Fall brach ein Radreifen.

Die Wahl des Begriffs „Ermüdung“ – geprägt 1839 durch Jean Victor Poncelet – ist eigentlich nicht besonders glücklich.

Das Versagen kommt plötzlich und ohne Vorwarnung – der Begriff Ermüdung ist daher unglücklich

Viele Aspekte des Phänomens unterscheiden sich grundsätzlich vom biologischen Vorbild des erschöpfenden Menschen. So ist es beispielsweise nahezu unmöglich, während des Ermüdungsprozesses irgendwelche Veränderungen im Materialverhalten zu erkennen. Das Versagen kommt plötzlich und ohne Vorwarnung.

Ruhepausen bringen keine Regeneration des Werkstoffs. Die Materialermüdung ist ein kumulativer Prozess. Ingenieure bedienen sich deswegen auch des alternativen Begriffs „Betriebsfestigkeit“, der das komplexe Phänomen besser beschreibt.

Will man Stahltragwerke unter Berücksichtigung der ermüdungsbedingten

Werkstoffs gut kennen. Im Fall der Ermüdung durch zyklische Belastung ist das gar nicht so einfach. Da viele unterschiedliche Faktoren wie Belastung, Material, Design, Produktionsprozess etc., die Restfestigkeit beeinflussen, existieren verschiedene Arten der Werkstoffermüdung.

Mit Prognosemodellen für die so genannte Ultrakurzzeitermüdung (engl.: low cycle fatigue) von Stahltragwerken haben wir uns am Lehrstuhl für Statik und Dynamik im Rahmen des Sonderforschungsbereichs „Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte“ auseinandergesetzt. Sie ist eine spezielle Art der Materialermüdung: Im Gegensatz zur Kurzzeitermüdung, die nach weniger als ca. 50.000 Lastzyklen eintritt, versagen Metallbauteile bei der von uns betrachteten Ultrakurzzeitermüdung schon nach weniger als 100 Lastzy-

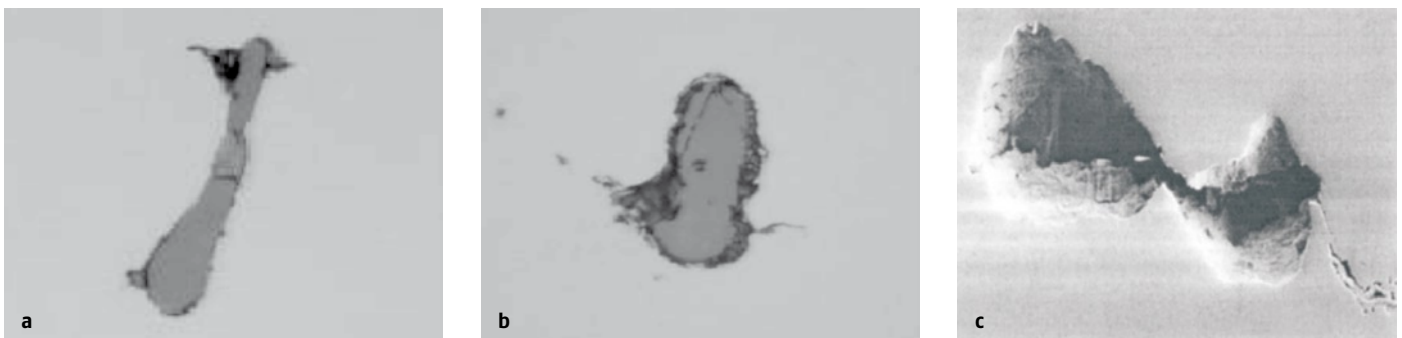


Abb. 4: Schädigung metallischer Werkstoffe: (a) Porenentstehung induziert durch Partikelbruch oder (b) Trennung an der Partikel-Matrix-Fläche, (c) Zusammenschluss zweier Mikroporen.

klen (Abb. 3). Aufmerksam geworden ist die Wissenschaft auf diese Art der Schädigung durch zwei Ereignisse in der jüngeren Vergangenheit: Die Erdbeben von Northridge im Jahre 1994 in Kalifornien und von Kobe in Japan ein Jahr später verursachten unerwartet schwere Schäden an Stahlkonstruktionen, die ein Beleg für den signifikanten Einfluss extremer Belastungswechsel auf das mechanische Materialverhalten von verformbaren (duktilen) metallischen Werkstoffen sind. Aufgrund der mangelnden Kenntnisse über diesen Schädigungstypus begannen in den darauf folgenden Jahren experimentelle Untersu-

Unsicherheit der Materialkennwerte und der Einwirkungsgrößen sowie die weit verbreitete Anwendung von empirischen Schadensakkumulationsregeln, die häufig nur annäherungsweise gelten und eher eine ingenieurmäßige Abschätzung der Betriebsfestigkeit darstellen. Fortschritte in der Entwicklung numerischer Lösungsverfahren – wie der Finite Elemente Methode – und wirklichkeitsnaher Werkstoffmodelle ermöglichen es, den zuvor beschriebenen semi-empirischen Ansatz durch mikrostrukturell motivierte Simulationskonzepte zu ersetzen. Derartige neue Modelle erlauben es, die Schädigungsent-

klischer Beanspruchung, z.B. infolge häufig wechselnder Be- und Entladevorgänge oder durch Erdbeben hervorgerufene Stützenbewegungen, zum Kurzzeitermüdungsversagen führen. Ein Alltagsbeispiel für den Effekt der Ultrakurzzeitermüdung unter extremen Belastungsbedingungen ist eine Büroklammer, welche sich zunächst beliebig verbiegen lässt. Biegt man sie jedoch einige Male an derselben Stelle hin und her, bricht sie bereits nach wenigen Zyklen, da das Material an der Bewegungsstelle ermüdet.

In unserem „elasto-plastischen Schädigungsmodell für zyklische Lastpfade“



Abb. 6: Standardisierter gekerbter Probekörper.

chungen, um Schädigungsmechanismen der Kurzzeitermüdung eingehend zu analysieren und Verfahren zur Prognose der Tragwerksermüdung zu entwickeln. Eine wesentliche Forschungslinie bildet dabei die Entwicklung von computerbasierten Berechnungsmethoden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode.

Obwohl eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung der Schädigungsakkumulation bzw. zur Lebensdauervorhersage existiert, ist häufig eine starke Diskrepanz zwischen der Vorhersage und der tatsächlichen Beobachtung festzustellen. Ursachen dafür sind

wicklung in jedem Punkt der Ingenieurstruktur durch physikalisch motivierte Schädigungsgesetze zu beschreiben.

Wir haben ein solches mikromechanisch orientiertes numerisches Lebensdauermodell für numerische Simulationen der Kurzzeitermüdung entwickelt. Es ermöglicht Prognosen der Lebensdauer von Stahltragwerken, z.B. von schalenförmigen Strukturen wie Stahlbehältern (s. Abb. 1), unter großen zyklischen Beanspruchungen. Bei solchen Konstruktionen können z.B. an Verbindungsstellen lokal stark plastizierte, d.h. dauerhaft verformte Zonen auftreten, die bei anhaltender zy-

sind solche Plastizierungen und die damit einhergehenden lokalen großen Deformationen des Materials wirklichkeitsnah berücksichtigt. Dieses Materialmodell kann alle wesentlichen Charakteristika der zyklischen Plastizität metallischer Werkstoffe beschreiben: die Porenentstehung, das Wachstum und der Zusammenschluss von Mikroporen (s. Abb. 4), die schleichende Akkumulation von bleibenden Verformungen (zyklisches Kriechen oder zyklische Relaxation genannt) sowie den so genannten Bauschinger-Effekt. Dieser nach dem Mathematiker und Bautechniker Johann Bauschinger benannte Effekt

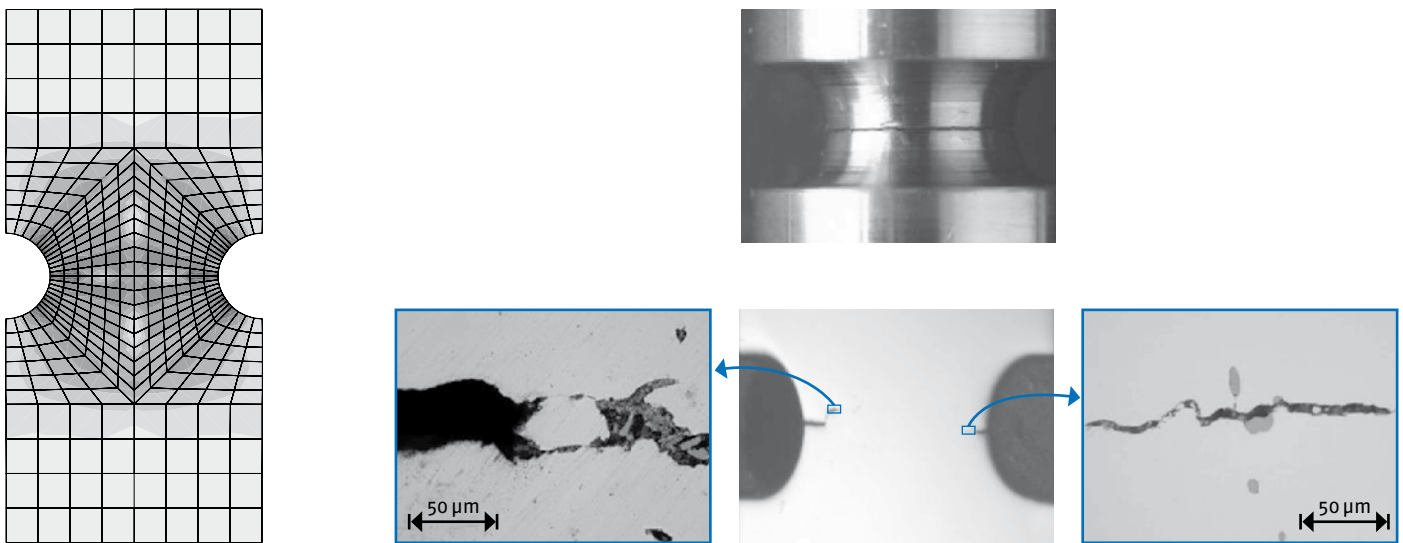


Abb. 7: Numerische und experimentelle Ergebnisse der Probe 1: (a) Finite-Elemente-Simulation, (b) Foto und mikroskopische Schnittbilder der Probe 1.

führt dazu, dass wenn man ein Metall zuerst in eine Richtung und anschließend in die entgegengesetzte verformt, die Elastizitätsgrenze in der entgegengesetzten Richtung niedriger ist. Grund dafür sind die Aufsummierung und gegenseitige Blockierungen von Versetzungen, Fehlern und Störstellen im Werkstoff.

Das am Lehrstuhl für Statik und Dynamik der RUB entwickelten Konzept zur Lebensdauerbestimmung lässt sich in drei Phasen unterteilen: Zuerst bestimmten wir die werkstoffspezifischen

sen erhaltenen Ergebnisse ziehen wir als Eingangsparameter des makroskopischen Schädigungsmodells heran.

Zur Überprüfung der Modellparameter des Porenschädigungsmodells stellen wir den numerischen Simulationen experimentelle Ergebnisse gegenüber. Dazu haben Kollegen des Helmholtz-Zentrums in Geesthacht gekerbte Probekörper – standardisierte Metallzylinder mit einer umlaufenden Kerbe in der Mitte (Abb. 6) – zyklisch beansprucht. Probekörper des Werkstoffs $_{20}\text{MnMoNi}_{55}$, eine Mangan-Mo-

stand („Spannungstriaxialität“), der einen entscheidenden Einfluss auf die Schädigungsentwicklung und somit auf die Lebensdauer der Probe hat. In unseren Proben verwendeten wir Kerbradien von zwei Millimetern (große Triaxialität, „Probe 1“) und von zehn Millimetern (niedrige Triaxialität, „Probe 2“).

Die Probe 1 weist nach der zyklischen Belastung einen makroskopischen Riss entlang der Kerbwurzel, d.h. der tiefsten Stelle der Kerbe, auf (Abb. 7 b). Dieser Riss ist umgeben von an Einschlüssen im Metall entstandenen Mikroporen. Vor der Risswurzel ist die Entstehung von Mikrorissen zu beobachten. In der Probenmitte tritt keine Schädigung auf.

Diese Schädigungsentwicklung wird in den numerischen Simulationen sehr gut wiedergegeben: Im Querschnitt der Probe 1 ist zunächst eine Konzentration der Mikroporenschädigung an der Kerbspitze festzustellen, während im Innern der Probekörpergeometrie die anfängliche Schädigung nahezu konstant bleibt (Abb. 7 a). Der im Kerbenbereich einsetzende Porenzusammenschluss führt zu einem Abfall des Last-Zyklus-Diagramms (Abb. 9 a und b). Die numerisch ermittelten Versagenszeitpunkte liegen bei 42 Zyklen (bei 0,15 mm Dehnung) bzw. 25 Zyklen (0,2 mm Dehnung). Diese Ergebnisse stimmen re-

Versagen nach wenigen Zyklen: Die Ergebnisse von Experiment und Simulation stimmen gut überein

Eigenschaften des elasto-plastischen Mikroporenschädigungsmodells. Diese Eigenschaften prüften wir anhand von experimentellen Daten von Probekörpern. Zum Schluss ermittelten wir mit einer Finite Elemente Analyse die Lebensdauer des untersuchten Stahltragwerks.

Bei der Bestimmung der Parameter des makroskopischen Werkstoffmodells werden mikrostrukturelle Vorgänge berücksichtigt. Dabei wird die Mikrostruktur des durch initiale Defekte gekennzeichneten Materials durch so genannte Einheitszellen idealisiert (Abb. 5). Die aus derartigen mikrostrukturellen Einheitszellenanaly-

lybdän-Nickel-Legierung, mit zwei unterschiedlichen Kerbradien wurden dazu in einen Versuchsstand eingespannt und im schnellen Wechsel auseinandergezogen und wieder entspannt.

Die Strecke, um die der Körper jeweils in die Länge gezogen wurde, wurde während des Versuchs genau kontrolliert. Auch die zum Strecken notwendige Kraft wurde gemessen. Wir experimentierten mit zwei verschiedenen Dehnungsamplituden: In einem Versuch beträgt diese 0,15 Millimeter, in einem 0,2 Millimeter. Der Kerbenradius bestimmt den in der Struktur vorherrschenden Spannungszu-

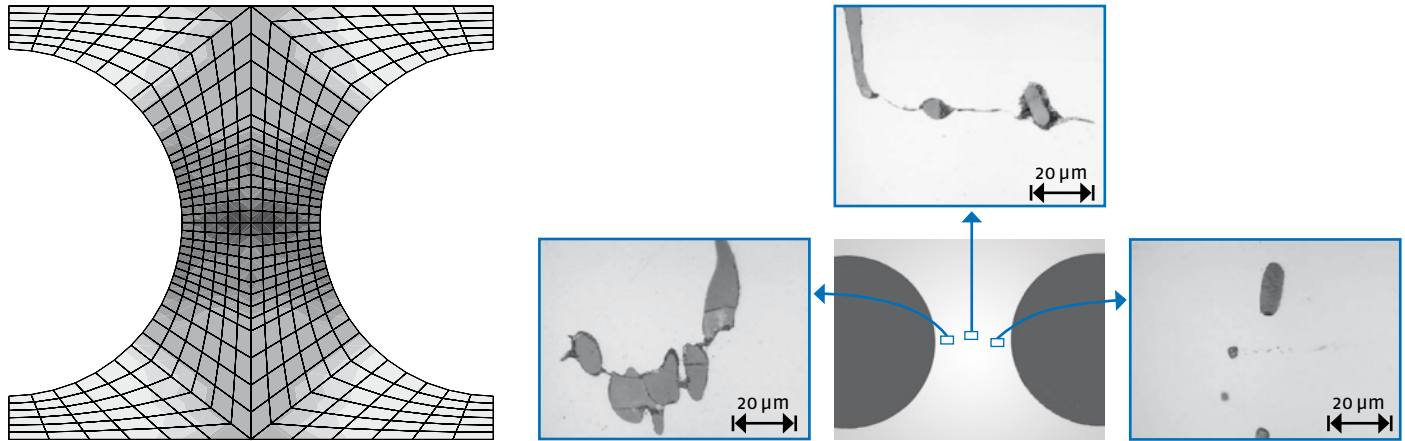


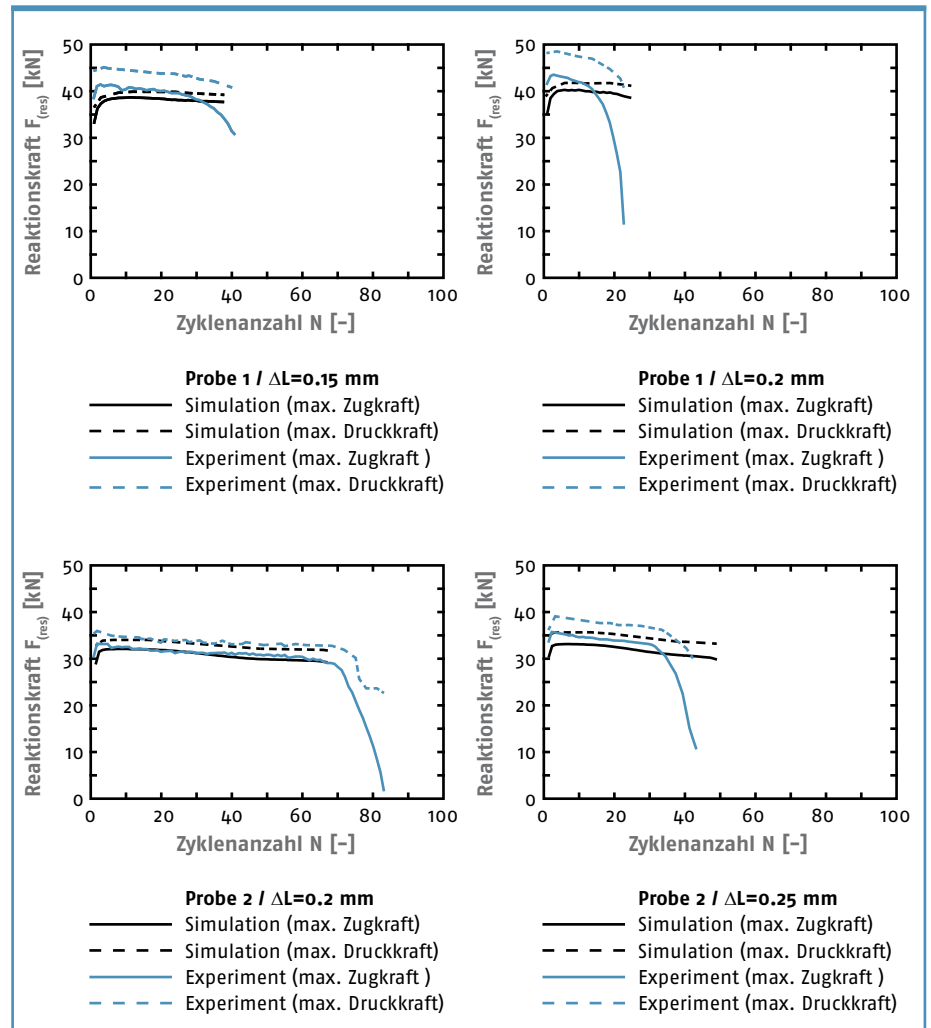
Abb. 8: Numerische und experimentelle Ergebnisse der Probe 2: (a) Finite-Elemente-Simulation, (b) Foto und mikroskopische Schnittbilder der Probe 2.

lativ gut mit den experimentellen Ergebnissen überein, in denen der Beginn des Versagens bei 37 bzw. 21 Zyklen einsetzt.

Bei der Probe 2 ist ein makroskopischer Riss nicht zu erkennen. Im Gegensatz zur Probe 1 tritt die Porenschädigung im Inneren der Probe und an der Kerbwurzel auf, der maßgebende Schädigungseffekt dabei ist der Porenzusammenschluss aufgrund von Partikelbruch (s. Abb. 8). Auch diese charakteristische Schädigungsentwicklung kann mit dem neuen Simulationsmodell wirklichkeitsnah erfasst werden: Es prognostiziert tatsächlich den Beginn einer Vereinigung von Mikroporen in der Probenmitte und einige Lastzyklen später auch in der Nähe der Kerbe. Der Versagensbeginn in der numerischen Simulation liegt bei 56 Zyklen (0,2 mm Dehnung) bzw. 38 Zyklen (0,15 mm Dehnung). Dies liegt geringfügig unter den entsprechenden experimentellen Ergebnissen bei 70 Zyklen bzw. 32 Zyklen (s. Abb. 9).

Abb. 9: Last-Zyklendiagramme der Kerbproben 1 und 2: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen.

Last-Zyklen-Diagramme der Kerbproben



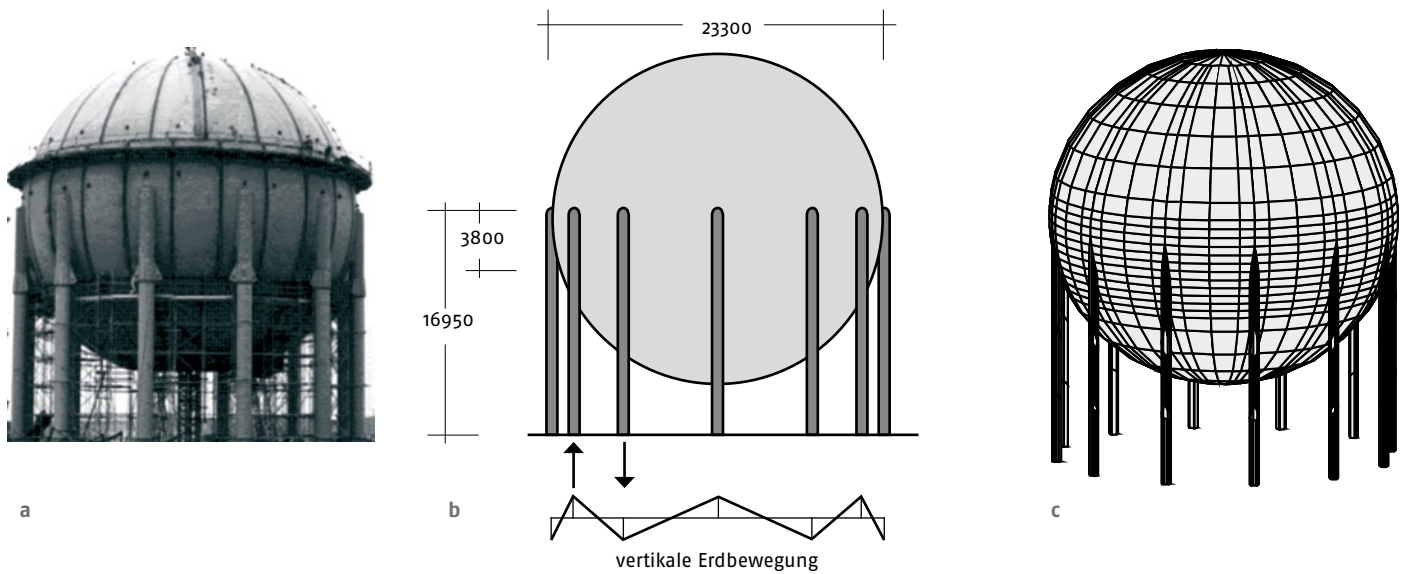


Abb. 10: (a) Kugelbehälter der ICI – Wilhelmshaven, (b) Geometriedaten des Behälters und (c) Finite Elemente Diskretisierung der Struktur.

Abschließend haben wir das zu untersuchende Tragwerk unter realen Belastungsbedingungen (z.B. Erdbeben) simuliert. Das Tragwerk war in unserem Fall der Ethylentank B 101 der ICI-Wilhelmshaven GmbH & Co (Abb. 10). Dieser auf zwölf zylinderförmigen Stützen gelagerte kugelförmige Gasdruckbehälter wird im Simulationsmodell einer (fiktiven) Erdbebenbelastung ausgesetzt, die aufgrund von zyklischen Hebungen und Senkungen des Stützenlagers zur Kurzzeitermüdung des Behälters führen könnte. Als Belastung haben wir das El Centro Erdbeben vom 18. Mai 1940 in Kalifornien mit der Stärke 6,9 auf der Richterskala angenommen. Abb. 12 a zeigt die vertikale Erdbewegung der ersten 32 Sekunden des Bebens, welche als maßgebende Belastung angesetzt wird.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation (Abb. 11) zeigen nach einer Be-

lastung von 32 Sekunden eine deutliche Schädigungsakkumulation im Bereich des

obersten Punkt dieses Verschneidungsbereichs auf. Im schlimmsten Falle würde

Was wäre gewesen wenn ... ein Wilhelmshavener Tank das El Centro Erdbeben von 1940 erlebt hätte?

Übergangs zwischen Stütze und Behälter. Die maximale Schädigung, gekennzeichnet durch die dunklen Bereiche, tritt am

die Stütze abreißen. Ein Blick auf den gesamten Schädigungsverlauf dieses maßgeblichen Punktes während des ganzen

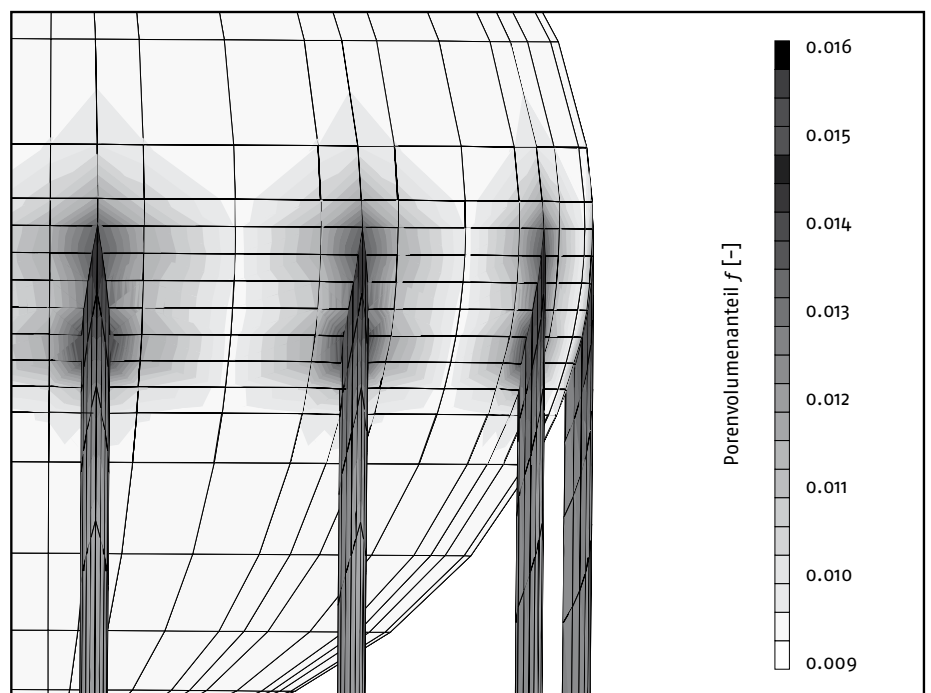


Abb. 11: Schädigung des Stahlbehälters aufgrund der Erdbebenbelastung nach 32 Sekunden.

Erdbebenbewegung und Schädigungsentwicklung

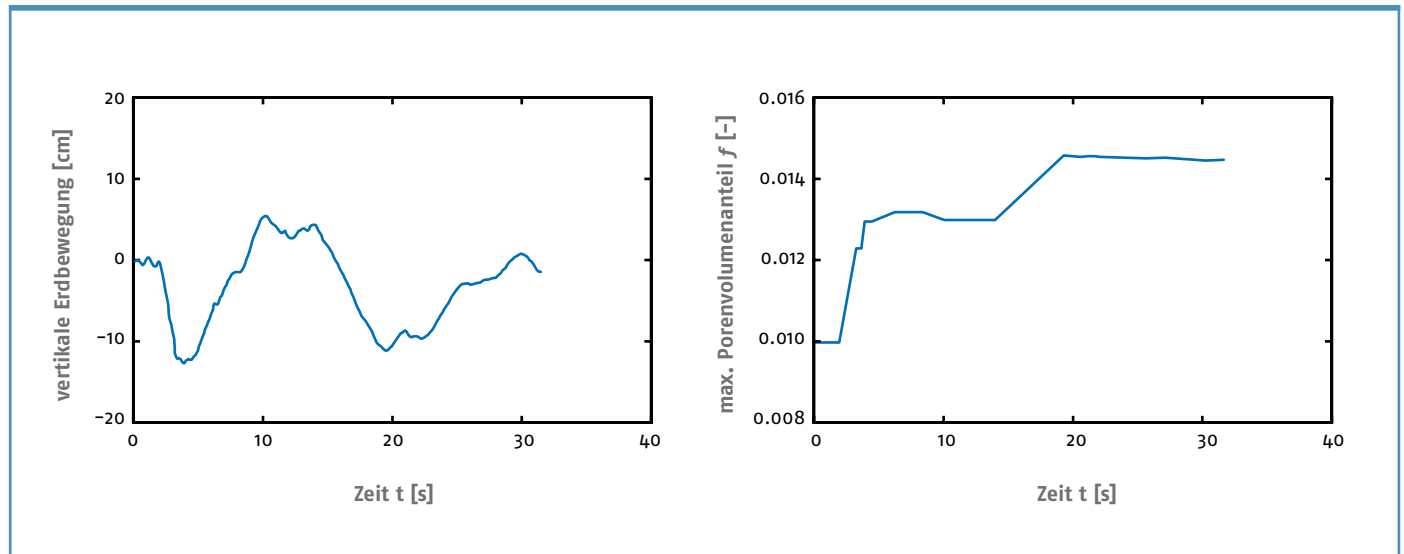


Abb. 12: (a) Vertikale Erdbewegung verursacht durch El Centro Erdbeben, (b) Schädigungsentwicklung.

Erdbebens (Abb. 12 b) zeigt jedoch: Der Grad der Schädigung erreicht keine kritischen Werte. Ein Strukturversagen des Gashochdruckbehälters bei dem angenommenen schweren Erdbeben ist daher nicht zu befürchten.

Mit dem entwickelten Mikrostrukturorientierten Simulationsmodell ist es also möglich, die voraussichtliche Lebensdauer

er von neu zu errichtenden, zyklisch beanspruchten bzw. die Restlebensdauer existierender Stahltragwerke zu berechnen und gegebenenfalls Vorsorge zu treffen, um die notwendigen Sicherheiten gegen das Versagen des Tragwerks zu gewährleisten. Sollte die theoretische Berechnung im Vorfeld ergeben, dass ein Versagen wahrscheinlich ist, könnte man das Tragwerk

entsprechend anders planen, indem man höherwertige Materialien verwendet oder die konstruktive Gestaltung der kritischen Tragwerksteile verändert.

Prof. Dr.-Ing. Günther Meschke, Dr.-Ing. Jan Hendrik Hommel, Lehrstuhl für Statik und Dynamik