

Prüfung von Gefahrgutumschließungen mit optischen 3D-Messverfahren

Klaus-Peter GRÜNDER, Thomas GOEDECKE, Daniel KADOKE, Karsten MÜLLER,
Sven MÜNZENBERGER, Christian PROTZ
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, Berlin

Kurzfassung. Der Beitrag konzentriert sich auf bildgebende Messverfahren, die der dreidimensionalen Bestimmung mechanischer, geometrischer und kinematischer Parameter von Materialien und Bauteilen dienen. Das sind hier insbesondere die Mehrbildfotogrammetrie sowie die Stereomessverfahren, die auf folgenden physikalisch-optischen Grundlagen beruhen: die zeit- und raumveränderliche Projektion von Lichtstreifensystemen, die Bildkorrelation mittels Grauwertmustern und die Verfolgung kontrastreich applizierter Punkttargets. Letztendlich werden aus den gemessenen Punktkoordinaten unterschiedlicher Dichte und Belastungszustände die gewünschten 3D-Parameter abgeleitet. Hierzu gehören z. B. die Oberflächengestalt und deren Verformung, approximierte 3D-Geometrielemente, veränderliche 6DoF-Starrkörperorientierungen, Vektorverschiebungsfelder, Oberflächendehnung, Koordinaten-Zeit-Funktionen, Geschwindigkeit und Beschleunigung. Diese Kenngrößen sind beispielsweise für die Ermittlung mechanischer Werkstoffeigenschaften und -kennwerte bis hin zur Form- und Verformungsmessung von Bauteilen in gezielt quasi-statisch oder dynamisch beanspruchenden Prüfeinrichtungen wichtig. Vorteilhaft für die praktische Anwendung dieser Verfahren ist insbesondere, dass sie berührungslos arbeiten, kombiniert werden können und skalierbar sind z. B. hinsichtlich Messvolumen, Auflösung, Genauigkeit und Koordinatensystemen der zu bestimmenden 3D-Punktkoordinaten an Materialoberflächen bzw. Komponenten.

Ausgehend von der Beschreibung der messtechnischen Prinzipien dieser Verfahren sollen zwei Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Gefahrgutbehälterprüfung im Rahmen von Bauartzulassungen und der normungsbegleitenden Materialforschung den Stand in der Anwendungspraxis aufzeigen und einen Eindruck hinsichtlich der flexiblen Einsatzmöglichkeiten dieser optischen 3D-Verfahren verdeutlichen.

Einführung

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) trägt Verantwortung für die öffentlich-technische Sicherheit von Umschließungen gefährlicher Güter, die für den Transport oder die Lagerung bestimmt sind. Der Erfüllung dieser Aufgabe wird sowohl durch Prüfung, Analyse und Zulassung als auch durch Forschung und Entwicklung entsprochen. Dabei stützt man sich in der praktischen Arbeit zum einen auf bereits bestehende internationale Normen und Regelwerke und trägt zum anderen durch deren Weiterentwicklung dazu bei, dass Leben, Sachgüter und Umwelt vor Schaden und vermeidbaren Risiken durch die Nutzung dieser Gefahrgutumschließungen inklusive dazugehöriger Anlagen oder Prozesse bewahrt bleiben. Die von der BAM angewendeten Bewertungsverfahren basieren



in der Regel auf eine Kombination von experimentellen Methoden und numerischen Berechnungen im Zusammenhang mit der Material- und Bauteilprüfung. Anhand ausgewählter Beispiele aus zwei Anwendungsbereichen soll über die zielführende Integration optischer zerstörungsfreier Messverfahren in ein doch eher zerstörend ausgerichtetes Prüfumfeld von Stoßbeanspruchungen und Innendruckprüfung berichtet werden.

1. Optische ZfP-Verfahren für die 3D-Beanspruchungsanalyse

In Ergänzung zu den vorgenannten Mess- und Prüfverfahren hat die Digitalisierung der Oberflächengestalt mit dem Streifenprojektionsverfahren eine besondere praktische Bedeutung gewonnen hinsichtlich objektiverer Dokumentation und Auswertung von Behälterverformungen infolge von Fallbeanspruchungen. Darüber hinaus ergeben sich erweiterte experimentelle Optionen für eine statische oder dynamische 3D-Beanspruchungsprüfung durch Nutzung der punktgestützten Stereo-Fotogrammetrie und des flächenbezogenen Stereo-Bildkorrelationsverfahrens. Diese Gruppe von Messverfahren ist miteinander kombinierbar und gestattet die Bestimmung geometrischer, mechanischer und kinematischer Kennwerte von Gefahrgutumschließungen, ihren Komponenten oder Materialien. Es besteht eine weitreichende Flexibilität bei der Versuchsdurchführung hinsichtlich des verwendeten Werkstoffs, der Skalierung des Messvolumens, der erreichbaren Koordinatenauflösung oder im Hinblick auf statische und dynamische Aufgabenstellungen.

Beim hier verwendeten Streifenprojektionsverfahren wird in zeitlicher Abfolge ein räumlich strukturiertes Streifensystem auf die Objektoberfläche projiziert und mit einer Stereokameraanordnung beobachtet. Abb. 1 zeigt den Sensor vor einem Behälterstoßdämpfer sowie als Detail ein einzelnes Streifenmuster und als Detail ein einzelnes Streifenmuster aus dieser Sequenz.



Abb. 1. Streifenprojektionssensor vor dem Messobjekt, Details des Projektionsmusters und vernetzter Oberflächenpunkte (von links)

Der kalibrierte Stereosensor ordnet jedem Kamerabildpunkt eine 3D-Koordinate entsprechend seiner Position im Streifensystem zu und gestattet auf diese Weise die Ermittlung einer dicht besetzten Punktwolke pro Bildansicht des Sensors. Gleichzeitig werden im Bildfeld zusätzlich befindliche Kreismarken erkannt, deren 3D-Koordinaten zuvor mittels Nahbereichsfotogrammetrie eingemessen wurden. Über diese Hilfspunkte erfolgt anschließend die Transformation der Punktwolke jeder Sensoransicht in das Koordinatensystem des Prüfobjektes. Nach der Rundum-Digitalisierung werden die Oberflächenpunkte mit unterschiedlichen Kriterien ausgedünnt und abschließend entsprechend ihrer Nachbarschaftsrelation vernetzt (siehe Abb. 1 rechts), d. h. die gesamte Objektoberfläche ist nunmehr mathematisch durch Regelgeometrien (z. B. Dreiecke) beschrieben. Dies schafft erweiterte Möglichkeiten für die realitätsnahe Visualisierung sowie die eingangs diskutierte

Bestimmung geometrischer Kenngrößen der untersuchten Objekte bzw. deren Veränderung infolge einer Beanspruchung.

Einen besseren Zugang zu Kenngrößen der flächenhaften Verformung und Bewegung ist mit dem *Stereo-Bildkorrelationsverfahren* aufgrund eines mit dem Objekt fest verbundenen Oberflächenmusters möglich. Die Muster werden durch Sprayfarbe erzeugt (siehe Abb. 8), können aber auch natürlichen Ursprungs sein. Das Messverfahren basiert auf der Zuordnung kleiner identischer Bildbereiche (Fassetten) in beiden Kameras, so dass diese Flächenelemente im Sinne eines Vektorfeldes messtechnisch zugänglich werden. Die 3D-Koordinaten der Fassetten werden über Triangulation als Funktion aufeinanderfolgender Belastungszustände bestimmt. Grundlage hierfür ist wiederum eine fotogrammetrisch kalibrierte Kameraanordnung, d. h. deren mathematisch bekannte Positionen, Orientierungen und Abbildungseigenschaften. Aus diesen flächenbezogenen Fassettenkoordinaten lassen sich Kennwerte bezüglich Gestaltänderung, Verschiebung, Dehnung oder 6DoF-Bewegung (DoF - Degrees of Freedom) bestimmen, in Kombination mit lichtempfindlichen Hochgeschwindigkeitskameras auch in dynamischen Szenarien. Erst bei großen Messflächen von mehr als 1 m² oder Belichtungszeiten im μ s-Bereich können Ausleuchtungsprobleme entstehen. Dieser Herausforderung kann man durch Verwendung retroreflektierender Punktmarkierungen als Oberflächenmerkmale mit dem Einsatz der *Stereo-Fotogrammetrie* begegnen. Im Unterschied zum Bildkorrelationsverfahren verzichtet man auf dicht gepackte Messfeldkoordinaten und stützt sich auf mehr oder weniger dicht fixierbare Einzelpunkte, kann aber eine Vielzahl ähnlicher Kenngrößen bestimmen. Abb. 5 zeigt als Anwendungsbeispiel das Verfahren in der Fallversuchsanlage.

2. Prüfung von RAM-Behältern und deren Komponenten

2.1 Fallversuche

Bei allen Fortschritten, die in den vielen letzten Jahren auf dem Gebiet der rechnergestützten Simulation von Beanspruchungsszenarien erreicht wurden, gehört die experimentelle Durchführung von Fallversuchen nach wie vor zu den grundlegenden Anforderungen an die sicherheitstechnische Nachweisführung. Je nach Behälterbauart, die für unterschiedliche, d. h. schwach-, mittel- bis hochradioaktive Materialien ausgelegt sein können, werden unterschiedliche Akzeptanzkriterien in Bezug z. B. auf Außenabmessungen, Bruttogewicht, Behältermaterial, Stapelhöhe, Leckrate, Korrosionsschutz, Anschlagmittel, thermische Anforderungen oder Brandtests gefordert. Im Rahmen von Zulassungsverfahren müssen die Behälterkomponenten des Weiteren extreme Beanspruchungen in Falltests auf ein unnachgiebiges Fundament oder einen Stahldorn entsprechend den Regeln der Internationalen Atomenergie-Organisation IAEO aus verschiedenen Höhen und Orientierungen über sich ergehen lassen. Die BAM verfügt über eine derartige Fallversuchsanlage und hat die technischen Möglichkeiten, Falltests mit Behältern bis zu 200 t Masse und einer maximalen Hakenhöhe von 30 m durchführen zu können. Abb. 2 zeigt einen hängenden Stahlblechcontainer in der Versuchsanlage der BAM vor einem Kantenfall aus 5 m Höhe auf das nach [1] gebaute unnachgiebige Fallfundament.

Des Weiteren existiert eine Versuchseinrichtung für geführte Fallversuche mit einer maximalen Fallhöhe von 12 m und für Massen bis zu 1 t. Zur Durchführung von Fallversuchen gehört die Beherrschung einer umfangreichen Gerätetechnik und Verfahrensmethodik. Beispiele hierfür sind das mechanische Handling sehr unterschiedlicher Massen, Einrichtungen

für die Temperierung, Dehnungs- und Beschleunigungsmesstechnik mit hohen Abstraten, Gerätschaften für die Dichtheitsprüfung und der Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras.



Abb. 2. Stahlblechcontainer vor dem Kantenfall aus 5 m Fallhöhe

2.2 Numerische Simulationen für Fallprüfungen

Im Rahmen eines BAM-internen Forschungsprojekts wurden Falltests mit Stahlblechcontainern, die für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im deutschen Endlager KONRAD vorgesehen sind, durchgeführt. Ziel der Fallversuche war u. a. die Ermittlung experimenteller Daten zur Verifizierung und Weiterentwicklung der numerischen Modellbildung dieses Behältertyps. Ein vollständiges Finite-Elemente(FE)-Modell zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens eines quaderförmigen, dünnwandigen Stahlblechcontainers wurde entwickelt, um Abstürze - aus unterschiedlichen Fallhöhen und Behälterorientierungen simulieren und dynamische Beanspruchungsanalysen durchführen zu können. Die numerischen Simulationen der Fallversuche wurden mit den kommerziell verfügbaren, expliziten FE-Code LS-DYNATM durchgeführt [2]. Das FE-Modell bestehend aus Stahlblechcontainer und Fallfundament ist in Abb. 3 dargestellt.

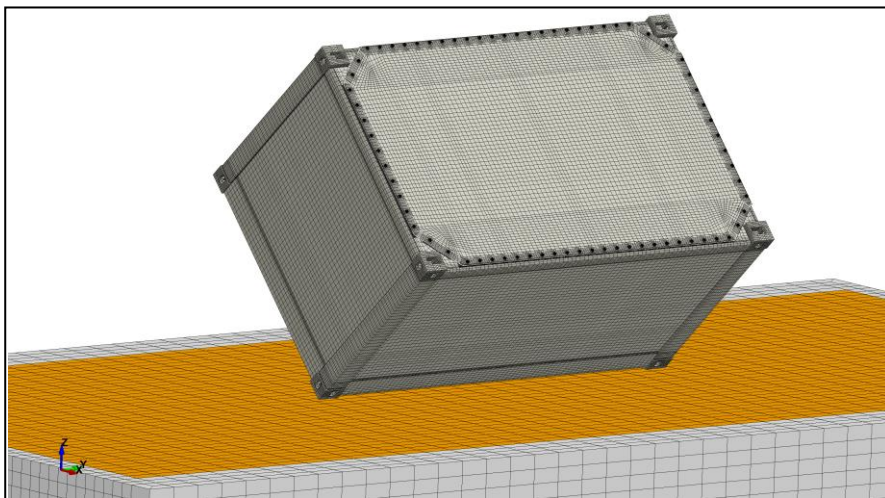


Abb. 3. FE-Modell des Stahlblechcontainers positioniert über dem Aufprallfundament zur Simulation des Kantenfalls aus 5 m Fallhöhe

Darin ist das FE-Modell des Containers entsprechend der Behälterorientierung für einen Kantenfall unmittelbar über dem Aufprallfundament platziert und wurde mit einer der Fallhöhe entsprechenden Anfangsgeschwindigkeit beaufschlagt, die sich aus der Energiebetrachtung, also der Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie ergibt. Die Endlagerbedingungen [3] sehen verschiedene Containertypen vor, die in ihren Außenabmessungen fest definiert sind. Für die Untersuchungen im Forschungsprojekt wurde der Behältertyp V ausgewählt, der mit den Container-Abmessungen von 3,2 m x 2,0 m x 1,7 m den größten Behältertyp darstellt. Die Deckel- und Bodenbleche besitzen eine Dicke von 5 mm, während die Seitenwände 3 mm stark sind. Die Behältermasse beträgt etwa 1840 kg. Der Stahlblechcontainer wurde als vollständiges FE-Modell modelliert. Die Begründung hierfür liegt zum einen in der unsymmetrischen Konstruktion des Stahlblechcontainers selbst und zum anderen wird dadurch die Analyse komplexer Fallszenarien ohne Symmetrierandbedingungen ermöglicht. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf einige Aspekte der Analyse der Testbehälter durch den Vergleich mit Ergebnissen aus den optischen Messverfahren für die Objektdigitalisierung und der Bewegungsanalyse mittels Hochgeschwindigkeitskameras.

2.3 Verformung eines Stahlblechcontainers

Das Streifenprojektionsverfahren wird bereits standardmäßig als Verfahren zur Dokumentation und Analyse der 3D-Gestalt technischer Objekte bzw. deren Verformung infolge von Fallprüfungen eingesetzt. Im vorliegenden Fall wurde die Behälterform sowohl vor als auch nach dem Fall in einer Rundum-Vermessung bestimmt. Die in Abb. 4 links dargestellte Behälterstirnseite wurde aus der Differenz dieser beiden Formzustände ermittelt und zeigt deren plastische Restverformung.

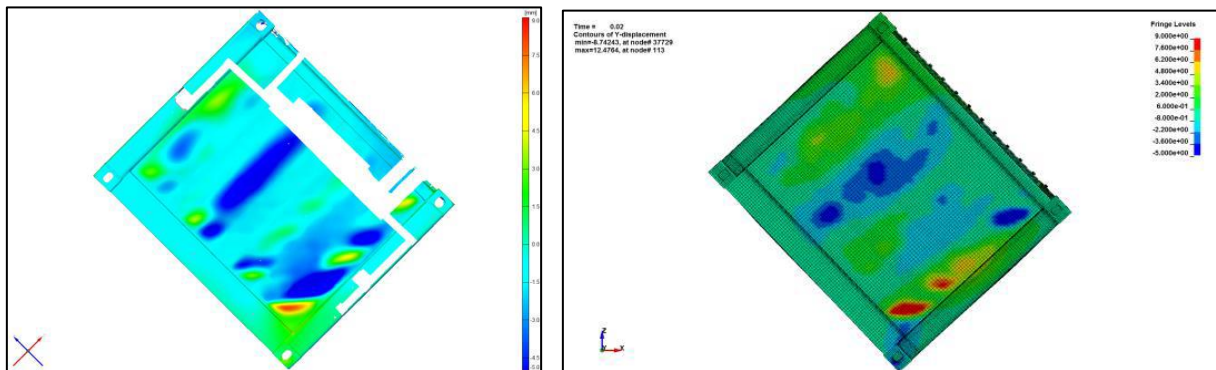


Abb. 4. Gemessene deformierte Oberflächengestalt (links) und simuliertes FE-Modell des Containers infolge des 5m-Kantenfalls

Die Darstellung des Simulationsergebnisses in Abb. 4 rechts zeigt die Knotenverschiebungen in Normalrichtung zum Zeitpunkt 20 ms nach dem ersten Kontakt des Behälters mit dem Fundament. Innerhalb dieses Zeitintervalls ist die unelastische Verformung des Seitenbleches bereits vollständig ausgebildet. Die Verformungsergebnisse beider Methoden sind in der Größenordnung und auch bezüglich der Topografie ähnlich. Ursachen für Ergebnisunterschiede sind z. B. damit zu erklären, dass die real gefertigte Oberflächengestalt der Containerseite vor dem Fall von der ideal planen (CAD-)Geometrie abweicht und in dieser Form im FE-Modell für die numerische Simulation nicht berücksichtigt ist. Dennoch zeigt der Vergleich zwischen gemessener und simulierter Verformung in Abb. 4, dass die Vernetzung des FE-Modells ausreichend fein ist, um die lokalen Verformungen hinreichend genau abzubilden. Das Streifenprojektionsverfahren stellt somit eine Möglichkeit zur

Verifizierung der numerischen Simulationen zur Verfügung, die mit Messungen lokaler Dehnungen oder Beschleunigungen unzureichend bzw. nur mit großem Aufwand erzielt werden können.

2.4 Analyse der Starrkörperbewegung und dynamischen Verformung

Für die sicherheitstechnische Begutachtung von Behältern sind aus Fallversuchen ermittelte experimentelle Daten zu den in den Behälter eingebrachten Energien und Kräften und zum Verformungsverhalten der Werkstoffe selbst bedeutsam. Das erfordert die Ermittlung z. B. der Auftreffgeschwindigkeit auf das Fundament, der zeitabhängigen Bremsbeschleunigung der Behälterbaugruppen sowie von Werkstoffdehnungen. Diese Kennwerte werden sowohl mit hochfrequent abgetasteten elektrischen Sensoren als auch mit schnellen Kameraverfahren gewonnen. In Abb. 5 ist der Aufbau einer stereo-fotogrammetrischen Anordnung zu sehen.



Abb. 5. Stereokameraanordnung im Kantenfalltest

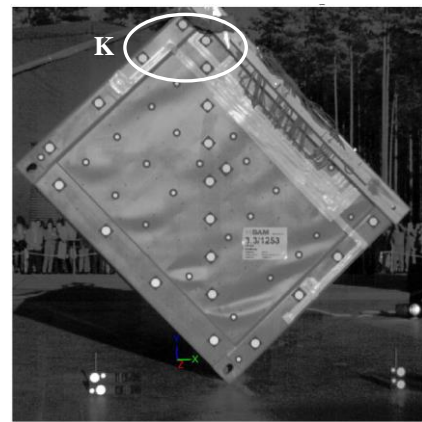


Abb. 6. Container beim Aufprall

Die beiden äußeren, synchron getriggerten Hochgeschwindigkeitskameras wurden im vorstehend diskutierten 5m-Fallversuch eines Stahlblechcontainers in einem Arbeitsabstand von ca. 8 m auf eine der beiden Stirnseiten des Behälters mit einer diagonalen Bildhöhe von ca. 2,7 m ausgerichtet. Die beiden FASTCAM-Kameras der Fa. PHOTRON wurden mit einer Bildwiederholfrequenz von 10 kHz bei einer nutzbaren Bildgröße von 512 x 512 Pixeln betrieben. In Abb. 6 sind die für die Objektverfolgung verwendeten retroreflektierenden Punktmarken am Behälter deutlich erkennbar.

Die Aufprallgeschwindigkeit des Behälters wurde aus den gemessenen Weg-Zeit-Koordinaten bis ca. 57,6 ms vor dem Aufprall zu $9,77 \pm 0,02$ m/s mittels Geradenfit bestimmt. Die Abweichung um -1,4% dieses Messwertes vom Erwartungswert, der sich aus rein theoretischem Ansatz der Äquivalenz zwischen potenzieller und kinetischer Energien ergeben würde, lässt sich durch die zu berücksichtigende Auftriebskraft F_L nach Gleichung (1) erklären und verdeutlicht somit andererseits das hohe Genauigkeitspotenzial des optischen Messverfahrens.

$$v = \sqrt{\frac{2(mg - F_L)h}{m}} = 9,78 \text{ m/s} \quad (1)$$

Der Zahlenwert für F_L ergibt sich aus der Masse, der umströmten Körperform, der effektiven Querschnittsfläche und der realen Fallgeschwindigkeit des Behälters sowie der temperaturabhängigen Dichte der Luft.

Für die experimentelle Bestimmung der Bremsbeschleunigung ist es erforderlich, die Weg-Zeit-Koordinaten einer kontrollierten Fitprozedur zu unterziehen. Mit nichtparametrischen kubischen Splines ließ sich die Zeitfunktion besser als mit 0,15 mm Abweichung intervallweise approximieren. Die Beschleunigungsergebnisse für eine im oberen Behälterbereich als Komponente K zusammengefasste Punktegruppe sind beispielhaft in Abb. 7 gezeigt.

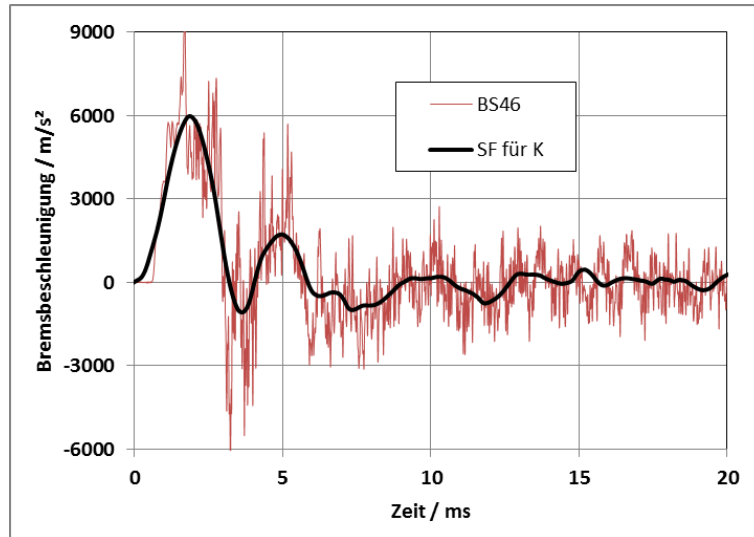


Abb. 7. Vergleich der Starrkörperbremsbeschleunigung aus optischem und elektrischem Messverfahren

Die vergleichende Darstellung zeigt die mit einer Grenzfrequenz von 50 kHz gefilterten Daten eines piezoelektrischen, mit 200 kHz abgetasteten uniaxialen Beschleunigungssensors BS46, der sich am oberen Eckbeschlag, also räumlich nahe der Komponente K montiert befand. Für eine bodennahe Punktegruppe ergaben sich im Vergleich hierzu um 1550 m/s² höhere Bremsbeschleunigungswerte. Die Signalverläufe in Abb. 7 zeigen anschaulich, dass die Stereo-Fotogrammetrie aufgrund ihrer geringen Koordinatenauflösung besonders für die Ermittlung von 6DoF-Starrkörperbewegungen geeignet ist. In den Sensordaten hingegen zeigen sich hochfrequente Schwingungsanteile, die vom Sensor selbst oder dem lokalen Behälterbauteil herrühren können.

3. Verformungsverhalten von Kunststoffbehältern für gefährliche Flüssigkeiten

3.1 Innendruckprüfung

Verpackungen für den Transport von gefährlichen Gütern werden unter anderem aus dem Kunststoff Polyethylen mit hoher Dichte (HDPE) hergestellt. Für die Zulassung als Gefahrgutverpackung sind verschiedene Bauartprüfungen notwendig. Unter anderem ist hier eine hydraulische Innendruckprüfung erforderlich, die sehr empfindlich auf die Schädigung der Verpackung durch unterschiedliche Füllgüter reagiert [4 - 6]. Untersuchungen an extrusionsblasgeformten Kanistern hatten das Ziel, einen Eignungsnachweis bezüglich Behälterkonstruktion, Werkstoffeigenschaften und Einsatzbedingungen im Sinne einer sicherheitstechnischen Bauartzulassung zu führen. In den Zulassungsvorschriften ist für den Nachweis der chemischen Verträglichkeit eine sechsmonatige Vorlagerung der Verpackung mit dem zu befördernden Füllgut vorgeschrieben. Diese Vorlagerung kann aber unter bestimmten Voraussetzungen und dem Einsatz von Standardflüssigkeiten, die exemplarisch für zahlreiche Stoffe bestimmte Schädigungen hervorrufen, von 6 Monaten bei 23 °C auf 3 Wochen unter 40 °C verkürzt werden. Die mit den Standardflüssigkeiten vorgeschädigten Kunststoffbehälter wurden zwecks Innendruckprüfung mit Wasser der Temperatur von

23°C und $2,17 \pm 0,02$ bar konstant gehaltenen Innendruck belastet. Die auf einer Vierpunkt-Lagerung stehenden Kanister konnten sich frei verformen und bewegen (siehe Abb. 8).

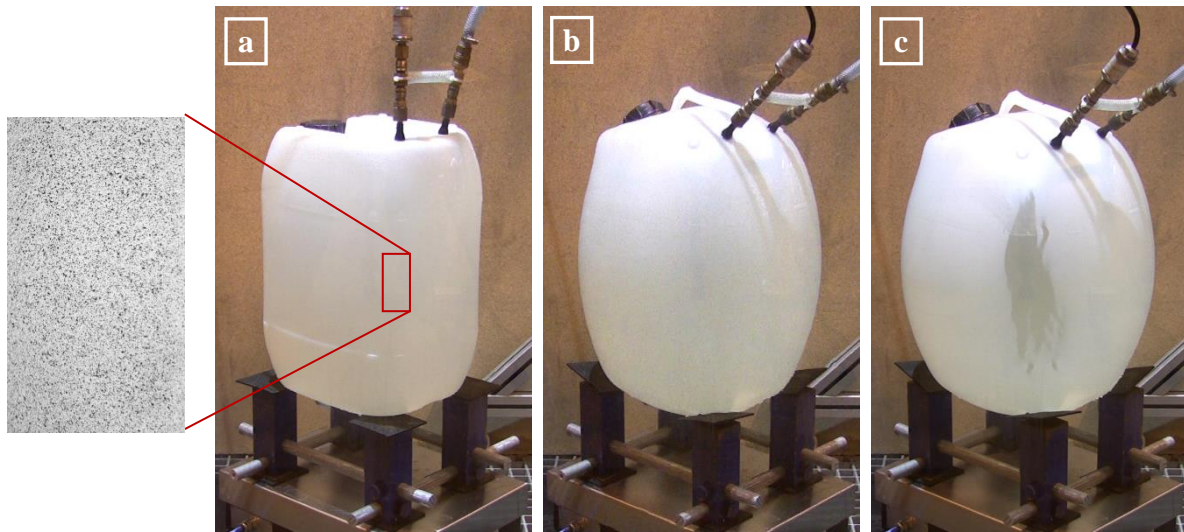


Abb. 8. Verformungszustände eines Kanisters mit gekennzeichnetem Messfeld

Unterhalb dieser Positioniereinrichtung befand sich eine Waage, mit welcher die Masse und somit das Volumen des nachströmenden Wassers kontinuierlich gemessen werden konnte. In Abb. 8 wird die allgemeine Gestaltänderung des Kanisters, aber auch das Abbruchkriterium für den Versagenszeitpunkt des Kanisters illustriert. Dieser war erreicht, als die Materialdehnung begann, nur noch in einem lokal eng begrenzten Bereich weiter zuzunehmen („Lokalisierung“). Der Kunststoff begann bereits zu fließen, und es entstanden im Material visuell beobachtbare Dehnungsstreifen (in Teilbild c der Abb. 8 bereits deutlich erkennbar).

3.2 Optische Dehnungsfeldmessung

In Abb. 8 ist die Lage des Messfeldmusters eingezeichnet, auf welches die Stereokamera gerichtet war. Diese Position wurde aus zuvor mit dem Streifenprojektionsverfahren durchgeführten Wandstärkemessungen ermittelt und entspricht der durch die Kanisterfertigung bedingten geringsten Wanddicke und damit dem größten Solldehnungsbereich dieses speziellen Designs.

Die Teildarstellung in Abb. 9 links oben zeigt den Verlauf der Umfangsdehnung für verschiedene Messpunkte (siehe rechte Teildarstellung) als Funktion der Zeit bzw. der Laststufe (ca. 70 Stufen in 10 Minuten). Bereits nach etwa 7 Minuten startet die Lokalisierung der weiteren Dehnungszunahme. Zu diesem Zeitpunkt sind bereits ca. 50% Umfangsdehnung erreicht. Im Vergleich hierzu erreicht ein nicht durch die Standardflüssigkeit Kohlenwasserstoff vorgeschädigter Kanister nach 7 Minuten lediglich ca. 25% Dehnung bzw. den 50%-Dehnungswert erst nach 20 Minuten. Die Dehnungszunahme entwickelt sich ab dem Zeitpunkt der Lokalisierung mit stark erhöhtem Gradienten weiter. In den Teilbildern links unten (laterale Schnittdarstellung) und rechts daneben (flächenhaft farbkodierte laterale Dehnungsverteilung) zeigen sich für Stufe 65 (Position der rotgestrichelten Cursorlinie) bereits stark ausgeprägte, lokal begrenzte Dehnungsüberhöhungen.

Eine weitere, alternative Kenngröße zur Beschreibung des Verformungszustandes ist die mit dem BKV bestimmte Verschiebungskomponente in Richtung Normalvektor der Kanisteroberfläche. Es zeigt sich, dass dieser Parameter etwas besser mit den Daten der mitgemessenen Kanisterwassermasse (Maß für den Dehnungszustand), ergo dem Füllstand

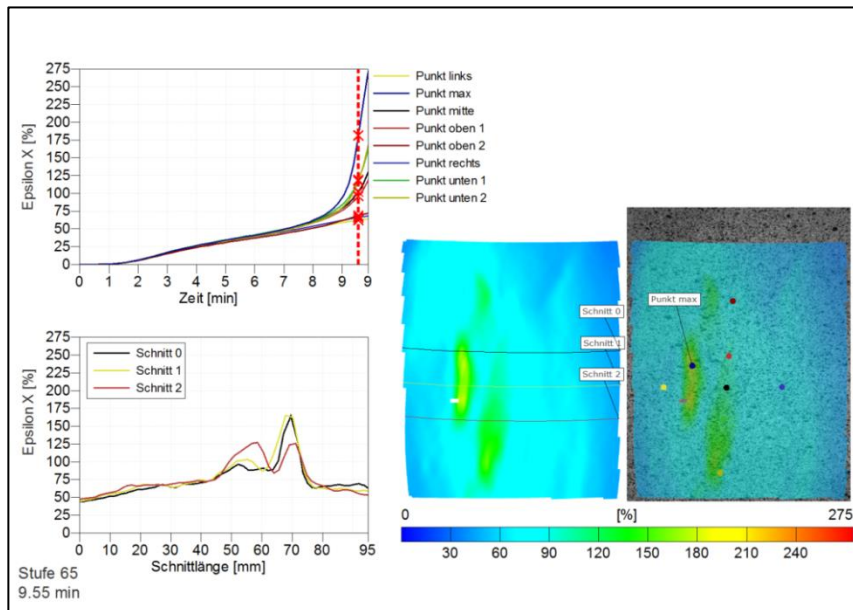


Abb. 9. Umfangsdehnung „Epsilon X“ eines mit Standardflüssigkeit vorgelagerten Kanisters

korreliert [6], und somit z. B. als Anregung zur vereinfachenden Optimierung des experimentellen Aufwandes dient. Eine Verschiebung in Normalenrichtung des innendruckbelasteten Kanisters entsteht sowohl durch Materialdehnung als auch durch Gestaltänderung. Mit zunehmender Dauer nähert sich die äußere Kanistergeometrie immer mehr der einer Kugel (siehe Abb. 8). Die Normalverschiebung mittelt als Untersuchungsparameter ebenso wie die Massezunahme über lokale (Materialdehnung) und globale (Verrundung bis hin zum sprunghaften Ändern der Kanistergestalt zu Beginn der Lasteinleitung) Verformungseffekte hinweg.

3.3 Simulation der Innendruckprüfung

Auf der Grundlage experimentell gewonnener Werkstoffdaten (einschließlich z. B. Kriechmodule aus separaten Zeitstand-Zugversuchen) wurden FE-Simulationen mit dem Ziel durchgeführt, die Kanisterverformung mittels eines Materialmodelles vorherzusagen. Dieses Modell bildet das werkstoffschwächende Quellen durch die Standardflüssigkeit Kohlenwasserstoff auf den Kunststoff ab. Es zeigt sich insbesondere, dass die aus Messungen mit dem Streifenprojektionsverfahren stammende reale Wanddickenverteilung einer experimentell untersuchten Behälterbauart im Modell zu berücksichtigen ist, um mit dem Experiment gut korrelierende Dehnungsverteilungen zu erreichen, die nicht lediglich durch die ideale Symmetrie einer Kanisterregelgeometrie determiniert sind.

4. Zusammenfassung

Die hier vorgestellten optischen 3D-Verfahren erweisen sich als robust, flexibel und leistungsfähig im Rahmen experimenteller Untersuchungen an Gefahrgutumschließungen für den Transport und die Lagerung sowohl radioaktiver Materialien als auch gefährlicher Flüssigkeiten. Im Rahmen von Fallversuchen ergibt sich die große praktische Bedeutung des Streifenprojektionsverfahrens sowohl durch die Fähigkeit zur vollständigen und metrisch genauen digitalen Dokumentation der Oberflächengestalt von Behälterbaugruppen als auch hinsichtlich der daran anknüpfenden messtechnischen Möglichkeiten für eine flexible und umfangreiche Verformungsanalyse. Bei der Innendruckprüfung an Kunststoffbehältern diene dieses Messverfahren zur Erzeugung eines Geometriemodells für die FE-Simulation

mit realistischer Wandstärkeverteilung und als Auswahlgrundlage für die Position des Messfeldes zur anschließenden Dehnungsfeldbestimmung mittels Bildkorrelationsverfahren. In Ergänzung zu diesem Messverfahren ist die punktbasierte Stereo-Fotogrammetrie zur Verfolgung schneller 6DoF-Starrkörperbewegungen mittels Hochgeschwindigkeitskameras geeignet.

Referenzen

- [1] International Atomic Energy Agency: Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. Safety Guide No. TS-G-1.1 (Rev. 1), 2008
- [2] LS-DYNA Explicit Finite Element Code Version ls971d, Release 4.2.1, Revision 53450, Livermore Software Technology Corporation
- [3] Brennecke, Peter (Hrsg.): Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Oktober 2010) – Endlager Konrad. Bericht SE-IB-29/08-REV-1, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 2010
- [4] DIN EN ISO 16104:2003-09: Verpackung - Verpackungen zur Beförderung gefährlicher Güter - Prüfverfahren
- [5] European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) applicable as from 1 January 2015: <http://www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr2015/15contentse.html>
- [6] Menrad, A., Goedecke, Th., Gründer, K.-P., Wagner, M.H.: The internal pressure test in experiment and simulation - Influence of the wall thickness variation and the change of the packaging behavior after the impact of standard liquids. Packaging technology & science 26 (2013) 6, 311-326; Wiley ISSN 0894-3214