

3D-Deformationsanalyse und Rissdetektion in multitemporalen Voxeldaten von Röntgentomographen

FRANK LIEBOLD¹ & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: Der Beitrag stellt ein neues Verfahren zur 3D-Deformationsanalyse vor, das sich für spröde Materialien auf Basis mehrerer Voxeldatensätze aufeinanderfolgender Lastzustände anwenden lässt. Zunächst wird zwischen den Volumendaten des Nulllastzustands ohne Verformungen und dem verformten Zustand ein subvoxel-genaues dreidimensionales Verschiebungsvektorfeld mit Hilfe der dreidimensionalen Kleinsten-Quadrate-Zuordnung berechnet. Durch Tetrahedrisierung der Punkte des Verschiebungsfeldes entsteht ein Tetraeder-netz, in dem im Folgenden die Änderungen der inneren Geometrie der Tetraeder analysiert werden. Dabei wird für jeden Tetraeder ein Deformationsvektor berechnet, dessen Betrag als skalares Deformationsmaß verwendet wird. Durch Anwendung des Schwellwertverfahrens auf das Skalarfeld werden Risse detektiert. Weiterhin lassen sich Rissbreiten und Scherungsbewegungen von den Deformationsvektoren ableiten.

1 Einleitung

Zur photogrammetrischen Deformationsanalyse in der Materialprüfung im Bauwesen sind in den vergangenen Jahren zahlreiche Publikationen erschienen. Viele dieser Beiträge basieren auf Bildsequenzauswertungen: Z.B. untersuchten FRASER & RIEDEL (2000) mit Hilfe eines trinokularen Kamerasystems thermische Verformungen an Stahlbalken. BENNING et al. (2004) und LANGE et al. (2006) verwendeten auch eine trinokulare Kameraanordnung bei Untersuchungen im bautechnischen Versuchswesen. Dabei wurden die Koordinaten der Punkte eines regelmäßigen Rasters signalisierter Kreismarken auf Oberflächen der Probekörper verfolgt. Streckenänderungen zu benachbarten Rasterpunkten wurden zur Deformationsmessung genutzt. Auch Rissbreiten wurden abgeleitet. HAMPEL & MAAS (2009) nutzten Bildkorrelationsverfahren zur Berechnung dichter subpixelgenauer Verschiebungsvektorfelder für künstliche sowie natürliche Punkte. Rissbreiten und -positionen wurden durch Analyse von Profilen in den Koordinatenrichtungen ermittelt. BARAZZETTI & SCAIONI (2010) verwendeten ein monokulares Kamerasystem zur Beobachtung eines Betonbalkens bei einem Belastungstest und verfolgten signalisierte Punkte mit Hilfe von Kreuzkorrelation und der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung. In weiteren Versuchen wurde natürliche Textur genutzt. Dabei wurde eine Bildvorverarbeitung mit dem Wallis-Filter durchgeführt und dann ein Interestoperator zur Ermittlung der zu verfolgenden Punkte angewandt. KOSCHITZKI et al. (2012) nutzten auch ein monokulares Kamerasystem und ebenfalls einen Interestoperator. Durch Triangulation der Punkte wurde ein Dreiecksnetz generiert. Flächenverhältnisse zwischen der verformten Epoche und der Referenzeпоche unter Nulllast dienten der Lokalisierung deformierter Bereiche und Risse. LIEBOLD & MAAS (2016) ging zur Berechnung von Hauptdehnungen

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstr. 10, D-01069 Dresden, E-Mail: [frank.liebold, hans-gerd.maas]@tu-dresden.de

über und stellte Verfahren zur Filterung des Dehnungsfeldes vor. Auch GEERS et al. (1996) beschrieb ein Verfahren zur Berechnung von Dehnungen aus 2D-Verschiebungsfeldern. Später wurde der relative Translationsvektor als alternatives Deformationsmaß für die monokulare Bildsequenzanalyse vorgestellt, was eine Ableitung von Rissbreiten ermöglicht (LIEBOLD & MAAS 2018, 2020). Der Algorithmus kann auch für unebene (zylindrische) Oberflächen angewandt werden und Deformationen tangential zur Oberfläche auf Basis von Stereobildsequenzen bestimmt werden (LIEBOLD et al. 2019). LIEBOLD et al. (2020) zeigte zudem ein Verfahren, das auch vertikale Versätze berücksichtigt und berechnete 3D-Rissöffnungsvektoren.

Die eben genannten Methoden bezogen sich auf die Vermessung von Oberflächendeformationen. Die digitalen Bildkorrelationsverfahren lassen sich zur digitalen Volumenkorrelation erweitern, sodass auch Beiträge zur Analyse von sequentiellen Volumendaten existieren: BAY et al. (1999) untersuchten Proben, die mit Röntgentomographie erzeugt wurden. Sie nutzten die 3D-Kreuzkorrelation zur Berechnung von 3D-Vektorverschiebungsfeldern und berechneten auf dieser Basis Dehnungsfelder zur Deformationsanalyse. MAAS et al. (1994) nutzten zur Berechnung der 3D-Verschiebungsfelder die subvoxel-genaue Kleinste-Quadrate-Zuordnung, bei der eine 12-Parameter-Affintransformation als Modell diente. LIEBOLD et al. (2021) griff darauf zurück und wandte es auf In-situ-Röntgentomographiedaten an. Die Punkte des 3D-Verschiebungsfeldes wurden zu einem Tetraedernetz trianguliert und zur Deformationsanalyse Dehnungen für diese Tetraeder berechnet. Der vorliegende Beitrag baut auf den Arbeiten von LIEBOLD & MAAS (2018, 2020) sowie LIEBOLD et al. (2020, 2021) auf, erweitert diese Methoden und wendet sie auf Volumendaten an.

2 Deformationsanalyse und Rissdetektion bei Voxeldaten

Für die Analysen dieses Beitrags wurde ein Datensatz eines in-situ-Experiments mit einem SHCC-Probekörper (SHCC: strain-hardening cement-based composites; faserbewährter Zementkomposit) unter Zugbelastung aus LORENZONI et al. (2020) genutzt. Bei acht verschiedenen Laststufen wurden Volumendaten mit Hilfe von Röntgentomographie (Mikro-CT) erstellt und die ersten sieben Datensätze wurden zur Auswertung verwendet. Die Datenaufnahme erfolgte mit dem GE-VTomeX-CT-Scanner bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Bei der Rekonstruktion entstanden 2024 Schichten à 750×1250 Pixeln mit einer Voxelgröße von $(13 \mu\text{m})^3$. In Abb. 1 sind drei Querschnitte des Volumens im Nulllastzustand dargestellt.

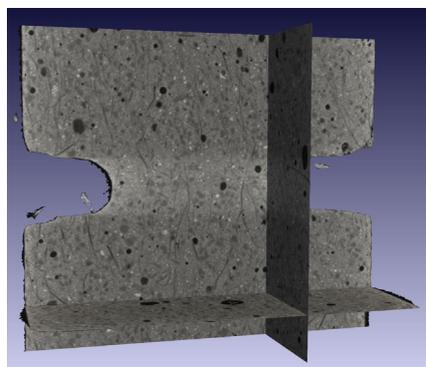


Abb. 1: 3D-Ansicht des Referenzzustandes unter Nulllast mit drei Querschnitten durch den Volumendatensatz.

2.1 Berechnung eines Verschiebungsvektorfelds

Für den Referenzvolumendatensatz erfolgt die Festlegung einer Punktmenge, die verfolgt werden soll. Dazu wird ein Raster im 10-Voxelabstand festgelegt, wobei Punkte ausgeschlossen werden, deren Standardabweichung der Grauwerte in der Punktumgebung einen Grenzwert (hier 5,5) unterschreiten. Abb. 2 zeigt beispielhaft ein ausgedünntes Punktraster mit einem Punktabstand von 40 Voxeln (vx). Einschlüsse, Fasern sowie Luftlöcher bieten einen ausreichenden Kontrast für Bildkorrelationsverfahren.

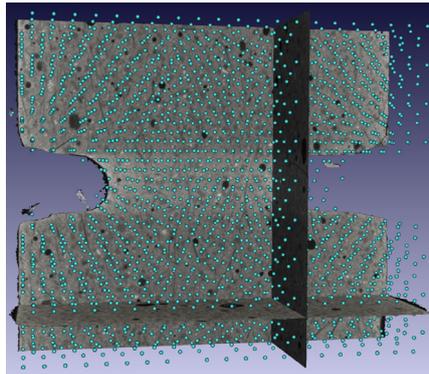


Abb. 2: Punktmenge, die zur Erstellung eines Verschiebungsvektorfeldes verfolgt werden soll. Der Punktabstand beträgt in der Abbildung 40 Voxel.

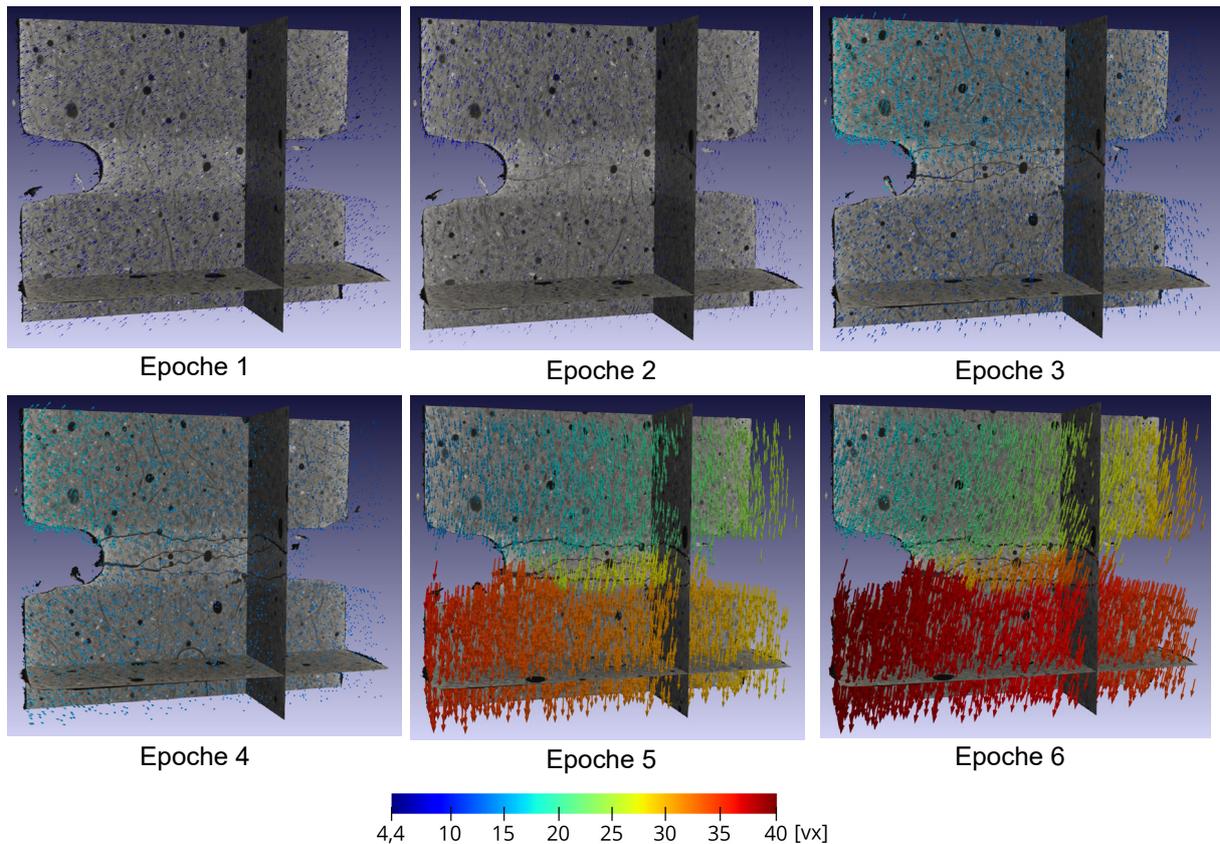


Abb. 3: Verschiebungsvektorfelder (ausgedünnt) für sechs deformierte Epochen. Die Längen der Pfeile entsprechen den Verschiebungen mit einem Vergrößerungsfaktor von 1,5.

Es folgt eine subvoxel-genaue Verschiebungsvektorfeldberechnung mit Hilfe der 3D-Kleinsten-Quadrate-Zuordnung (Maas et al 1994; Liebold et al. 2021). Um jeden Punkt im Referenzvolumens wird ein Subvolumen von $15 \times 15 \times 15$ vx ausgewählt, die für den Algorithmus genutzt werden. Um Näherungswerte zu beschaffen, wird das 3D-Kreuzkorrelationsverfahren verwendet (Bay et al. 1999). In Abb. 3 sind die Verschiebungsvektorfelder für sechs deformierte Epochen zu sehen. Bei Rissen sind Diskontinuitäten zwischen den Farben der Pfeile zu erkennen. Die Standardabweichungen der Verschiebungen liegen bei wenigen hundertstel Voxeln.

2.2 Tetraederanalyse

2.2.1 Tetrahedrisierung

Die Punkte des Verschiebungsfelds, bei denen erfolgreich ein Versatz mit der 3D-Kleinsten-Quadrate-Zuordnung berechnet werden konnte, werden zu einem Tetraedernetz vermascht. Dabei werden zur Netzerstellung die Koordinaten im Referenzzustand genutzt. Letztlich liegen für die Tetraedereckpunkte zwei Koordinatensätze (Referenzzustand und deformierter Zustand) zur weiteren Auswertung vor. Abb. 4 zeigt das Tetraedernetz mit den Koordinaten des Referenzzustands, wobei hier das Netz zur besseren Sichtbarkeit für eine Punktemenge mit einem Abstand von 40 vx dargestellt ist.

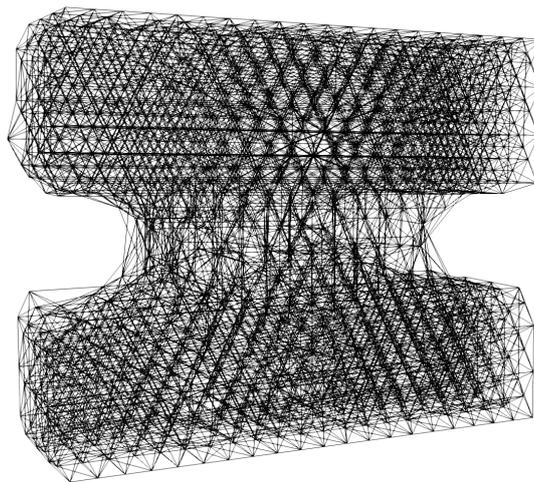


Abb. 4: Tetraedernetz mit Punktabstand von 40 vx und den Koordinaten des Referenzzustands.

Da es bei jeder Epoche eine unterschiedliche Anzahl erfolgreicher Zuordnungen (Verschiebungsvektoren) für das Verschiebungsvektorfeld gibt, erfolgt die Tetrahedrisierung für jede Epoche neu.

2.2.2 Mathematisches Modell

Ein Riss durch einen Tetraeder kann mit einer vereinfachten Aufteilung des Tetraeders in zwei Teile modelliert werden, wobei sich der eine Teil mit einer Relativtranslation verschiebt. Dabei können zwei mögliche Fälle auftreten: Fall 1 kennzeichnet sich dadurch, dass sich die drei Kantenlängen einer Seitenfläche des Tetraeders nicht ändern. Diese sind in Abb. 5a grün gekennzeichnet. Die Aufteilung ist durch die zwei Trennebenen (rot) dargestellt. Hingegen sind bei Fall 2 zwei gegenüberliegende Seitenlängen des Tetraeders unverändert, siehe Abb. 5b (grüne Kanten).

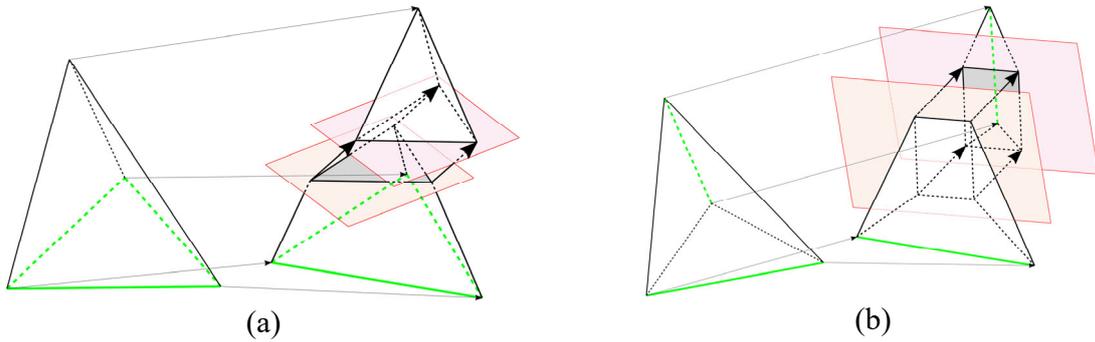


Abb. 5: Mögliche Fälle bei Tetraederteilung: a) drei Eckpunkte (ein undeformiertes Dreieck) auf einer Seite des Risses, einer auf der anderen; b) jeweils zwei Eckpunkte (eine undeformierte Kante) auf beiden Seiten des Risses.

Als mathematisches Modell für die Tetraederauswertung kann das Modell für die Analyse von 3D-Oberflächendaten von LIEBOLD et al. (2020) übernommen werden:

$$\vec{p}_i = \begin{cases} \vec{t} + \mathbf{R} \cdot \vec{p}_{ref,i}, & \text{für } i \in M_1 \\ \vec{t} + \mathbf{R} \cdot \vec{p}_{ref,i} + \vec{t}_{rel}, & \text{für } i \in M_2 \end{cases} \quad (1)$$

mit \vec{t} .. Translationsvektor

\mathbf{R} .. Rotationsmatrix

\vec{t}_{rel} .. Relativtranslationsvektor

$\vec{p}_{ref,i}$.. Referenzkoordinaten des i . Eckpunkts des Tetraeders

\vec{p}_i .. Koordinaten des i . Eckpunkts des Tetraeders im deformierten Zustand

Die Mengen M_1 und M_2 ergeben sich bei Fall 1 wie folgt: $M_1 = \{b_1, b_2, b_3\}$ und $M_2 = \{h\}$. Für Fall 2 gilt: $M_1 = \{b_1, b_2\}$ und $M_2 = \{h_1, h_2\}$. Abb. 6a (Fall 1) und Abb. 6b (Fall 2) enthalten die die Punktbezeichnungen und den Relativtranslationsvektor \vec{t}_{rel} .

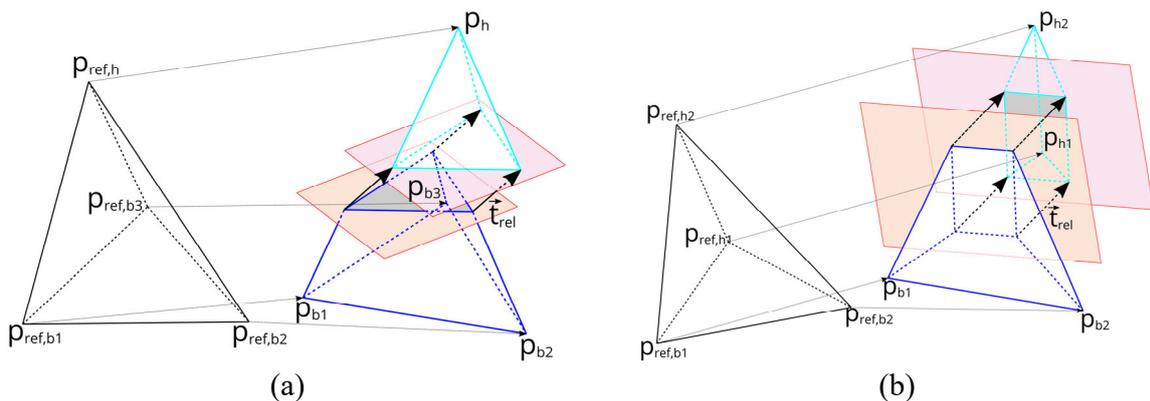


Abb. 6: Tetraederteilung für Fall 1 (a) und Fall 2 (b) mit Punktbezeichnungen und dem relativen Translationsvektor.

In folgendem Schema ist eine mögliche Fallunterscheidung dargestellt:

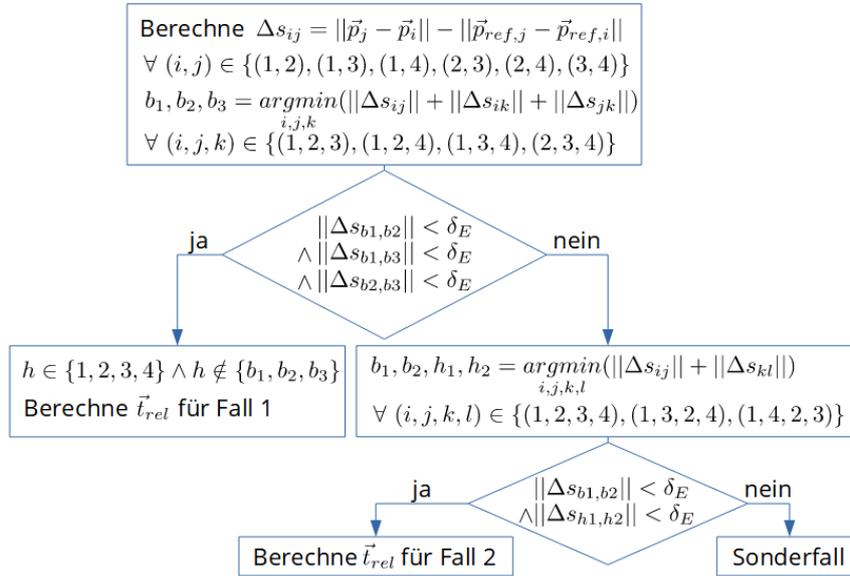


Abb. 7: Schema zur Fallunterscheidung für die Tetraederdeformation.

Darin muss der folgender Schwellwert δ_E für die Kantenlängenänderung festgelegt werden, ab dem eine Kante als deformiert angesehen wird. Der Fall eines undeformierten Tetraeders wird bei diesem Schema Fall 1 zugeordnet. Da die Verschiebungsvektoren mit Subvoxelgenauigkeit bestimmt werden können, liegt auch der Schwellwert δ_E im Subvoxelbereich. Für das gezeigte Beispiel wird $\delta_E = 0,2 \text{ vx}$ verwendet. Der Sonderfall tritt z.B. dann ein, wenn alle Kanten des Tetraeders als deformiert erkannt werden.

2.2.3 Berechnung des Deformationsvektors

Die Berechnung der Parameter \vec{t} , \mathbf{R} und \vec{t}_{rel} kann in einer Ausgleichung erfolgen und wird für jeden Tetraeder einzeln durchgeführt. Als Beobachtungen dienen die vier Koordinatenvektoren der Eckpunkte im deformierten Zustand. Die Referenzkoordinaten sind auf der rechten Seite der Gleichung enthalten und als Näherungswerte für die Rotationsparameter genügen meist die einer Nullrotation. Eine detaillierte Beschreibung zur Ausgleichung ist bei Liebold et al. (2020) zu finden.

Für Fall 1 ist es alternativ möglich, die Referenz- sowie deformierten Koordinaten der drei Punkte der Menge $M_1 = \{b_1, b_2, b_3\}$ zu verwenden, um die Parameter einer Starrkörpertransformation (\vec{t} und \mathbf{R}) zu berechnen. Der Relativtranslationsvektor ergibt sich dann mit Hilfe des vierten Punktes der zweiten Menge zu:

$$\vec{t}_{rel} = \vec{p}_h - \vec{t} - \mathbf{R} \cdot \vec{p}_{ref,h} \quad (2)$$

\vec{t}_{rel} wird als Deformationsvektor und dessen Betrag $\|\vec{t}_{rel}\|$ als skalares Deformationsmaß verwendet, welches die Einheit Voxel besitzt. Der Wert $\|\vec{t}_{rel}\|$ ist unabhängig von der Größe des Tetraeders. Abb. 8a zeigt eine farbkodierte Darstellung, wobei die Tetraeder nach ihrem Wert $\|\vec{t}_{rel}\|$ eingefärbt sind.

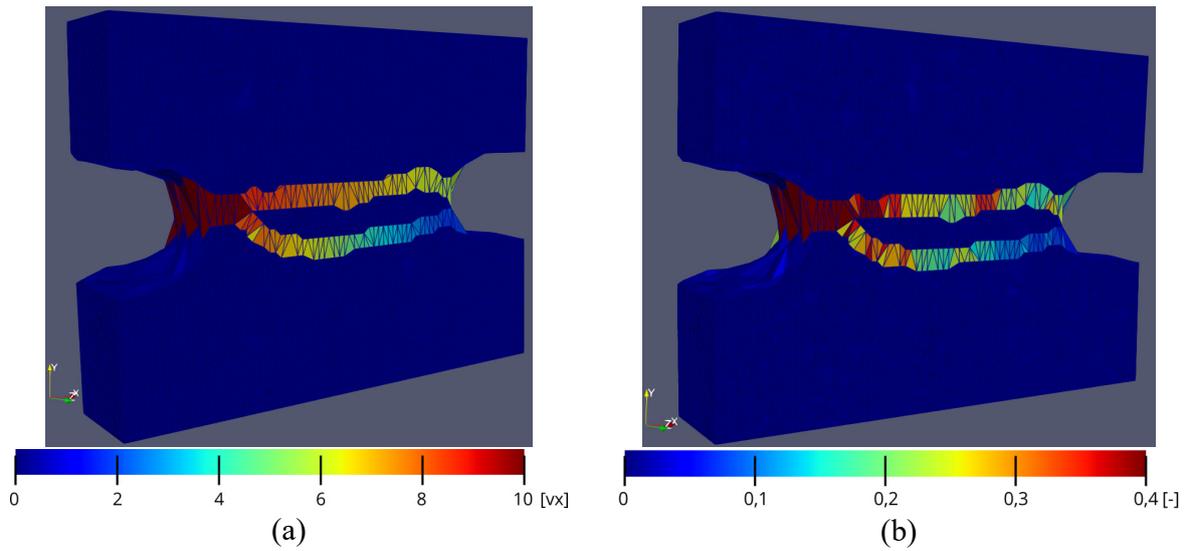


Abb. 8: a) farbkodierte Visualisierung für $\|\vec{t}_{rel}\|$; b) Visualisierung der Hauptdehnungen.

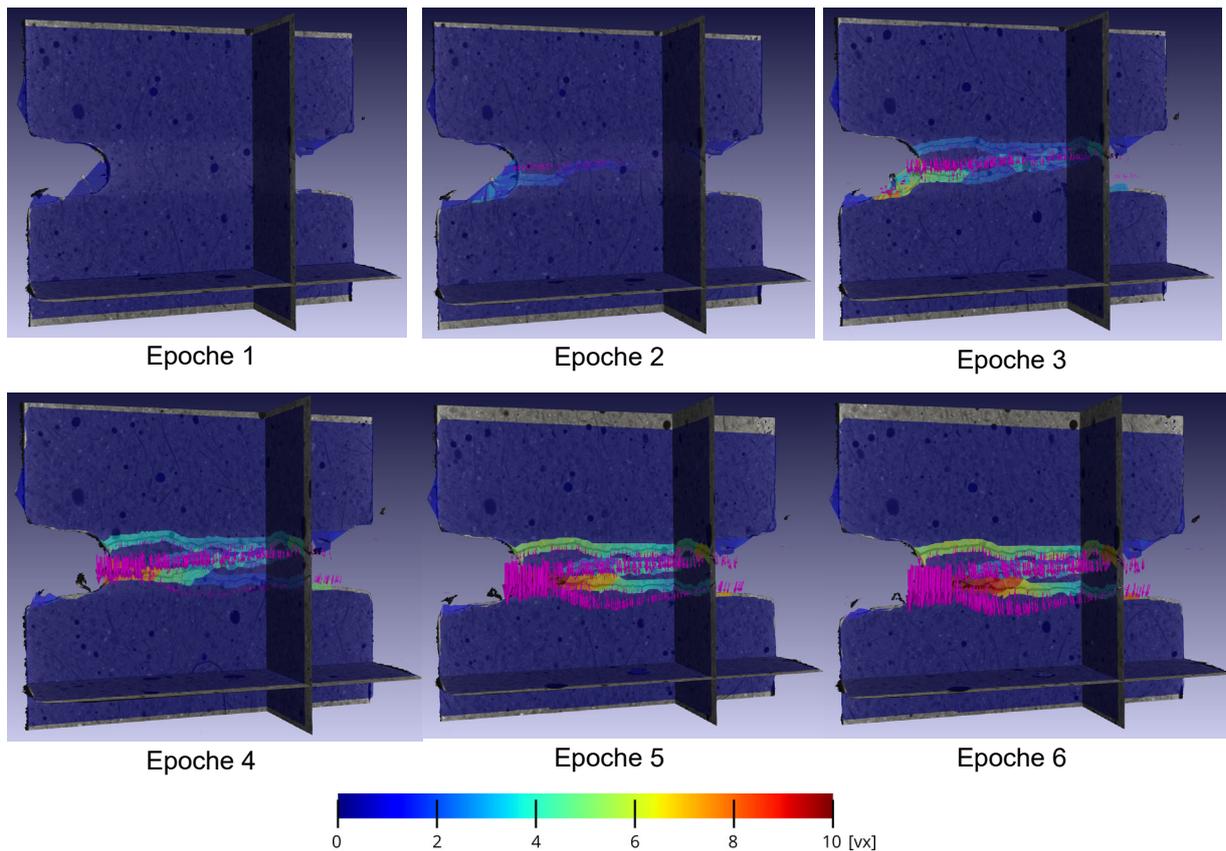


Abb. 9: Vektorfelder der Deformationsvektoren für die sechs deformierten Epochen. Die Längen der Pfeile sind mit dem Faktor 4 skaliert dargestellt.

In Abb. 8b ist eine farbkodierte Visualisierung mit Hauptdehnungen für die Tetraeder zu sehen. Die Berechnungsvorschrift für Dehnungen sind in LIEBOLD et al. (2021) zu finden. Im Unterschied

zu Abb. 8a ist hier zu erkennen, dass diese Dehnungswerte von der Tetraedergröße abhängen, während das für $\|\vec{t}_{rel}\|$ nicht gilt und ein homogenerer Farbverlauf entlang der Risse zu sehen ist. Die Deformationen lassen sich auch als Vektorfelder der Deformationsvektoren darstellen, siehe Abb. 9. Es sind auch jeweils drei Querschnitte durch die Volumendaten und die dazugehörigen transparenten Querschnitte durch die skalaren Deformationsfeld $\|\vec{t}_{rel}\|$ gezeigt.

2.2.4 Detektion von Rissen

Durch Anwendung des Schwellwertverfahren für die Werte $\|\vec{t}_{rel}\|$ können Risstetraeder detektiert werden: Gilt $\|\vec{t}_{rel}\| > \delta_T$, handelt es sich um einen Risskandidaten. Da die Verschiebungen mit Subvoxelgenauigkeit bestimmt werden können, liegt auch der Schwellwert im Subvoxelbereich. Beim vorgestellten Experiment wurde δ_T auf 0,3 vx gesetzt (Abb. 10). Durch eine Konnektivitätsanalyse ist es weiterhin möglich, Zusammenhangskomponenten der Risskandidaten zu bestimmen.

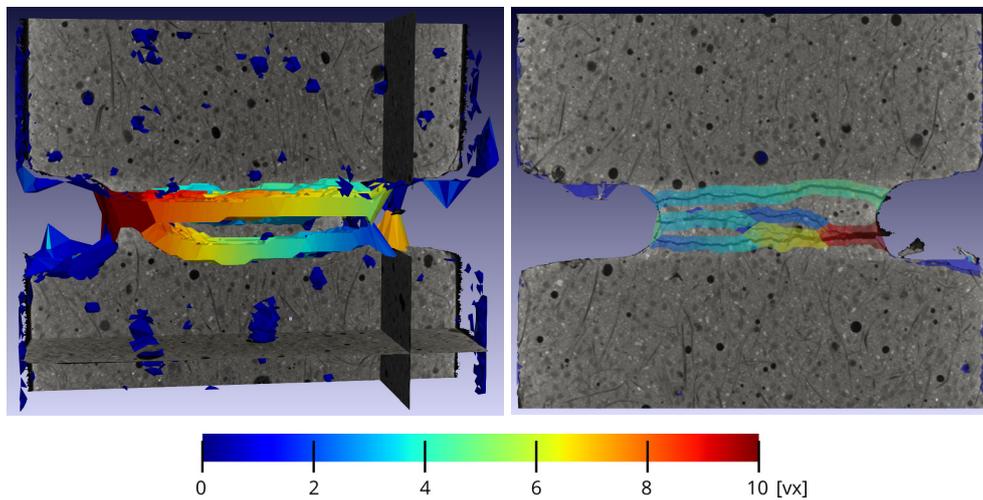


Abb. 10: Links: Farbkodierte Visualisierung für $\|\vec{t}_{rel}\|$ nach dem Schwellwertverfahren für Epoche 5; rechts: Querschnitt von der Rückseitenansicht.

2.2.5 Schätzung der Rissnormalen

Für jeden Risskandidaten ($\|\vec{t}_{rel}\| > \delta_T$) kann eine Normale geschätzt werden. Dazu werden zunächst für alle Risstetraeder deren Mittelpunkte $\vec{m}_{def,j}$ (j : Tetraederindex) berechnet:

$$\vec{m}_{def,j} = \begin{cases} (\vec{p}_{b1} + \vec{p}_{b2} + \vec{p}_{b3} + 3 \cdot \vec{p}_h)/6 & \text{für Fall 1} \\ (\vec{p}_{b1} + \vec{p}_{b2} + \vec{p}_{h1} + \vec{p}_{h2})/4 & \text{für Fall 2} \end{cases} \quad (3)$$

Dann werden die deformierten Nachbartetraeder des Risskandidaten (deformierter Kandidat) bestimmt. Als Nachbarn 1. Ordnung zählen Tetraeder mit mindestens einem gemeinsamen Eckpunkt. Nutzt man zusätzlich die Nachbarn 2. Ordnung wird die Liste um die deformierten Nachbarn der Nachbarn selbst erweitert. Anschließend wird eine Ausgleichsebene mit den Mittelpunkten der Nachbartetraeder und dem Kandidaten selbst berechnet. Der zugehörige Normalenvektor \vec{n} mit dem Betrag $\|\vec{n}\| = 1$ entspricht dann der Rissnormale. Abb. 11 veranschaulicht das Prinzip der Normalenschätzung: Der Risskandidat ist rot dargestellt, die deformierten Nachbartetraeder

orange und undeformierte Nachbarn blau, die Ausgleichsebene türkis, der Normalenvektor als roter Vektor und die Mittelpunkte als magenta Kugeln.

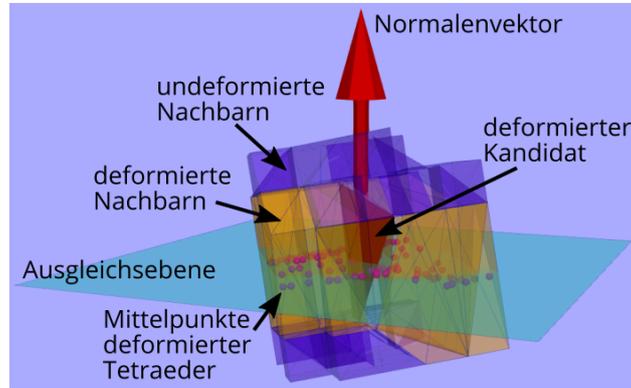


Abb. 11: Prinzip der Normalenschätzung.

Es folgt schließlich noch ein Test, ob die zunächst bestimmte Normale \vec{n}' und der Deformationsvektor \vec{t}_{rel} gegenläufig sind. Im Falle dessen wird die Normale umgekehrt:

$$\text{Falls } \vec{t}_{rel}^T \cdot \vec{n}' < 0, \text{ dann } \vec{n} = -\vec{n}', \text{ sonst } \vec{n} = \vec{n}' \quad (4)$$

Am Rand von Zusammenhangskomponenten deformierter Tetraeder bzw. bei Kreuzungen von Rissen führt die Schätzung möglicherweise zu systematischen Abweichungen.

2.2.6 Ableitung von Rissbreiten und Scherungsbewegungen

Der Deformationsvektor \vec{t}_{rel} kann mit Kenntnis der Rissnormalenrichtung in einen Teil in diese Richtung $\vec{t}_{rel,n}$ und einen Teil senkrecht dazu $\vec{t}_{rel,s}$ zerlegt werden, siehe Abb. 12.

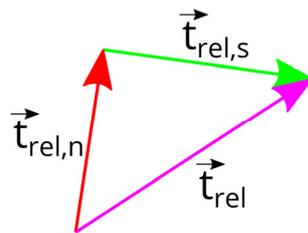


Abb. 12: Zerlegung des Deformationsvektors.

Die Normalenkomponente (in Rissnormalenrichtung) berechnet sich durch Projektion des Vektors \vec{t}_{rel} auf die Rissnormale \vec{n} :

$$\vec{t}_{rel,n} = \frac{\vec{t}_{rel}^T \cdot \vec{n}}{\|\vec{n}\| \cdot \|\vec{t}_{rel}\|} \cdot \|\vec{t}_{rel}\| \cdot \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|} = \vec{t}_{rel}^T \cdot \vec{n} \cdot \vec{n} \quad (5)$$

Der Vektor der Scherungsbewegung tangential zum Riss (Scherungskomponente) ergibt sich durch Subtraktion:

$$\vec{t}_{rel,s} = \vec{t}_{rel} - \vec{t}_{rel,n} \quad (6)$$

Die Rissbreite entspricht der Länge der Komponente $\vec{t}_{rel,n}$:

$$r = \|\vec{t}_{rel,n}\| = \vec{t}_{rel}^T \cdot \vec{n} \quad (7)$$

Die Rissbreite hängt maßgeblich von der Rissnormalen ab. Dabei können systematische Abweichungen wie oben erwähnt durch eine fehlerhafte Normalenschätzung bei Risskreuzungen bzw. bei Randtetraedern auftreten.

In Abb. 13a sind die Scherungs- als grüne Pfeile bzw. Normalenkomponenten als rote Pfeile dargestellt (Vergrößerungsfaktor: 10). Wo die Zugkraftrichtung senkrecht zum Riss steht, ist eine Übereinstimmung der Normalenkomponenten und der Deformationsvektoren zu erkennen. An der linken Seite der Verjüngung, an der die Risse zusammenlaufen, werden größere Scherungsanteile berechnet, weil der Riss an diesen Stellen auch nicht senkrecht zur Zugrichtung verläuft.

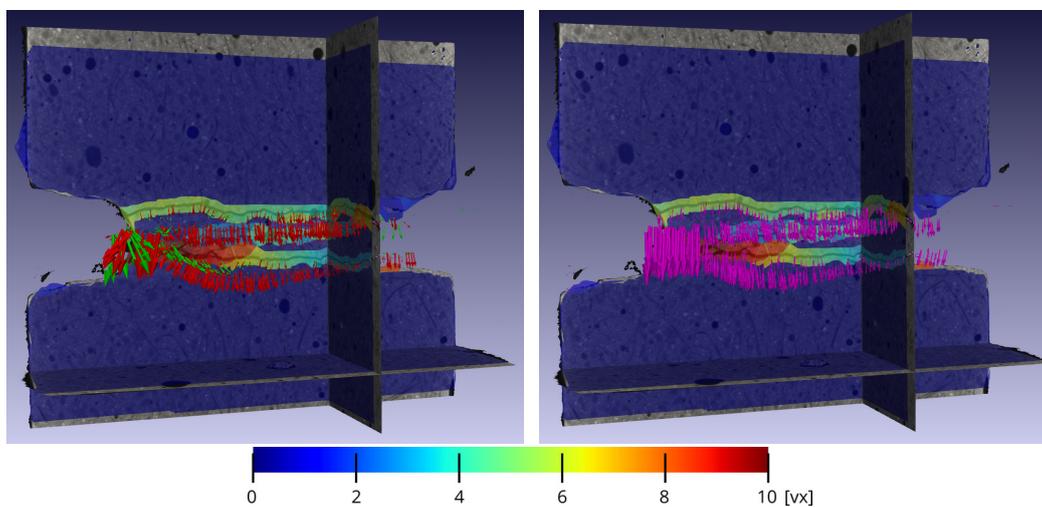


Abb. 13: Links: Normalen- in rot und Scherungskomponenten in grün (Vergrößerungsfaktor 4), dazu drei Volumenquerschnitte mit den dazugehörigen transparenten Querschnitten durch das farbko-
dierte Deformationsfeld; rechts: Deformationsvektoren für Epoche 6.

3 Fazit & Ausblick

Der Beitrag zeigte am Beispiel eines in-situ-Zugversuchs an einer spröden SHCC-Probe, wie eine Deformations- bzw. Rissanalyse bei 3D-Volumendaten mehrerer Laststufen durchgeführt werden kann. Nach Berechnung eines subvoxel-genauen Verschiebungsvektorfeldes erfolgte eine Vernetzung zu einem Tetraedernetz. Es wurde eine Berechnungsvorschrift für einen subvoxel-genauen Deformationsvektor zur Rissdetektion vorgestellt, von dem sich Rissbreiten und Scherungsbewegungen ableiten lassen. In zukünftige Arbeiten könnte eine Modellerweiterung um eine Relativrotation bzw. eine intensivere Genauigkeitsbetrachtung eine Rolle spielen.

Danksagung

Die gezeigte Forschungsarbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG – SFB/TRR280, Projektnummer: 417002380). Weiterhin danken wir dem Institut für Baustoffe der Technischen Universität Dresden, dem Department of Chemical and Materials Engineering der Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung für die bereitgestellten Datensätze.

4 Literaturverzeichnis

- BARAZZETTI, L. & SCAIONI, M., 2010: Development and Implementation of Image-based Algorithms for Measurements of Deformations in Material Testing. *Sensors*, **10**(8), 7469-7495, <https://doi.org/10.3390/s100807469>.
- BAY, B. K., SMITH, T. S., FYHRIE, D. P. & SAAD, M., 1999: Digital Volume Correlation: Three-dimensional Strain Mapping Using X-ray Tomography. *Experimental Mechanics*, **39**, 217-226, <https://doi.org/10.1007/BF02323555>.
- BENNING, W., LANGE, J., SCHWERMANN, R., EFFKEMANN, C. & GÖRTZ, S., 2004: Monitoring crack origin and evolution at concrete elements using photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XXXV**-B5, 678-683.
- FRASER, C. S. & RIEDEL, B., 2000: Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **55**(4), 268-276, [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(00\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(00)00024-1).
- GEERS, M. G. D., DE BORST, R. & BREKELMANS, W. A. M., 1996: Computing strain fields from discrete displacement fields in 2D-solids. *International Journal of Solids and Structures*, **33**(29), 4293-4307. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(95\)00240-5](https://doi.org/10.1016/0020-7683(95)00240-5).
- HAMPEL, U. & MAAS, H.-G., 2009: Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **64**(4), 345-350. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.12.006>.
- KOSCHITZKI, R. & MAAS, H.-G., 2012: Vergleich photogrammetrischer und akustischer Messverfahren zur Rissdetektion bei Belastungsversuchen im Stahlbetonbau. *AVN*, **119**(1), 3-10.
- LANGE, J., BENNING, W. & SIERING, K., 2006: Crack detection at concrete construction units from photogrammetric data using image processing procedures. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **36**(7), 493-496.
- LIEBOLD, F., LORENZONI, R., CUROSU, I., LÉONARD, F., MECHTCHERINE, V., PACIORNIK, S. & MAAS, H.-G., 2021: 3D least squares matching applied to micro-tomography data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLIII**-B2-2021, 533-539. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-533-2021>.
- LIEBOLD, F. & MAAS, H.-G., 2016: Advanced spatio-temporal filtering techniques for photogrammetric image sequence analysis in civil engineering material testing. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **111**, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.013>.
- LIEBOLD, F. & MAAS, H.-G., 2018: Sub-pixel accuracy crack width determination on concrete beams in load tests by triangle mesh geometry analysis. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **IV**-2, 193-200. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-193-2018>.

- LIEBOLD, F. & MAAS, H.-G., 2020: Strategy for Crack Width Measurement of Multiple Crack Patterns in Civil Engineering Material Testing Using a Monocular Image Sequence Analysis. PFG - J. Photogramm. Remote Sens. Geoinf. Sci., **88**(3), 219-238. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00103-2>.
- LIEBOLD, F., MAAS, H.-G. & DEUTSCH, J., 2020: Photogrammetric determination of 3D crack opening vectors from 3D displacement fields. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., **164**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.03.019>.
- LIEBOLD, F., MAAS, H.-G. & HERAVI, A. A., 2019: Crack width measurement for non-planar surfaces by triangle mesh analysis in civil engineering material testing. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., **XLII-2/W18**, 107-113. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-107-2019>.
- LORENZONI, R., CUROSU, I., LÉONARD, F., PACIORNIK, S., MECHTCHERINE, V., SILVA, F. A. & BRUNO, G., 2020: Combined mechanical and 3D-microstructural analysis of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by in-situ X-ray microtomography. Cement and Concrete Research, **136**, 106139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106139>.
- MAAS, H.-G., STEFANIDIS, A. & GRÜN, A., 1994: From pixels to voxels: tracking volume elements in sequences of 3D digital images. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., **XXX-3/2**, 539-546. <https://doi.org/10.1117/12.182861>.