

Resttragfähigkeit geschädigter Stahlbauteile

Dr.-Ing. Sven Reinstädler

Motivation

Mit der Wirkung von Erdbeben können Bauwerke erhöht beansprucht werden. Eine Entscheidung zugunsten der Instandsetzung und weiteren Nutzung eines geschädigten Bauwerks kann besser getroffen werden, wenn begleitend zur Aufnahme des Istzustandes numerische Analysen die Resttragfähigkeit geschädigter Tragelemente bewerten. Eine numerische Analyse ist möglich, wenn geeignete mathematische Modelle sowohl die zeitveränderliche Beanspruchung infolge Erdbeben als auch das inelastische Verformungsverhalten der Tragelemente beschreiben.

Materialmodell

Kowalsky et al. [1] und Zümmendorf [2] beschreiben das inelastische Verhalten von Stahl mit einem Modell für Schädigung bei viskoplastischem Materialverhalten.

Schädigungsmodell mit effektiven Spannungen

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{1 - \bar{D}} \sigma$$

in Abhängigkeit der nichtlokalen Schädigung $\bar{D}$.

Inelastische Verzerrungsgeschwindigkeiten

$$\dot{\epsilon}_{in} = \dot{\lambda} \frac{\partial \tilde{\sigma}_{ex}}{\partial \tilde{\sigma}}$$

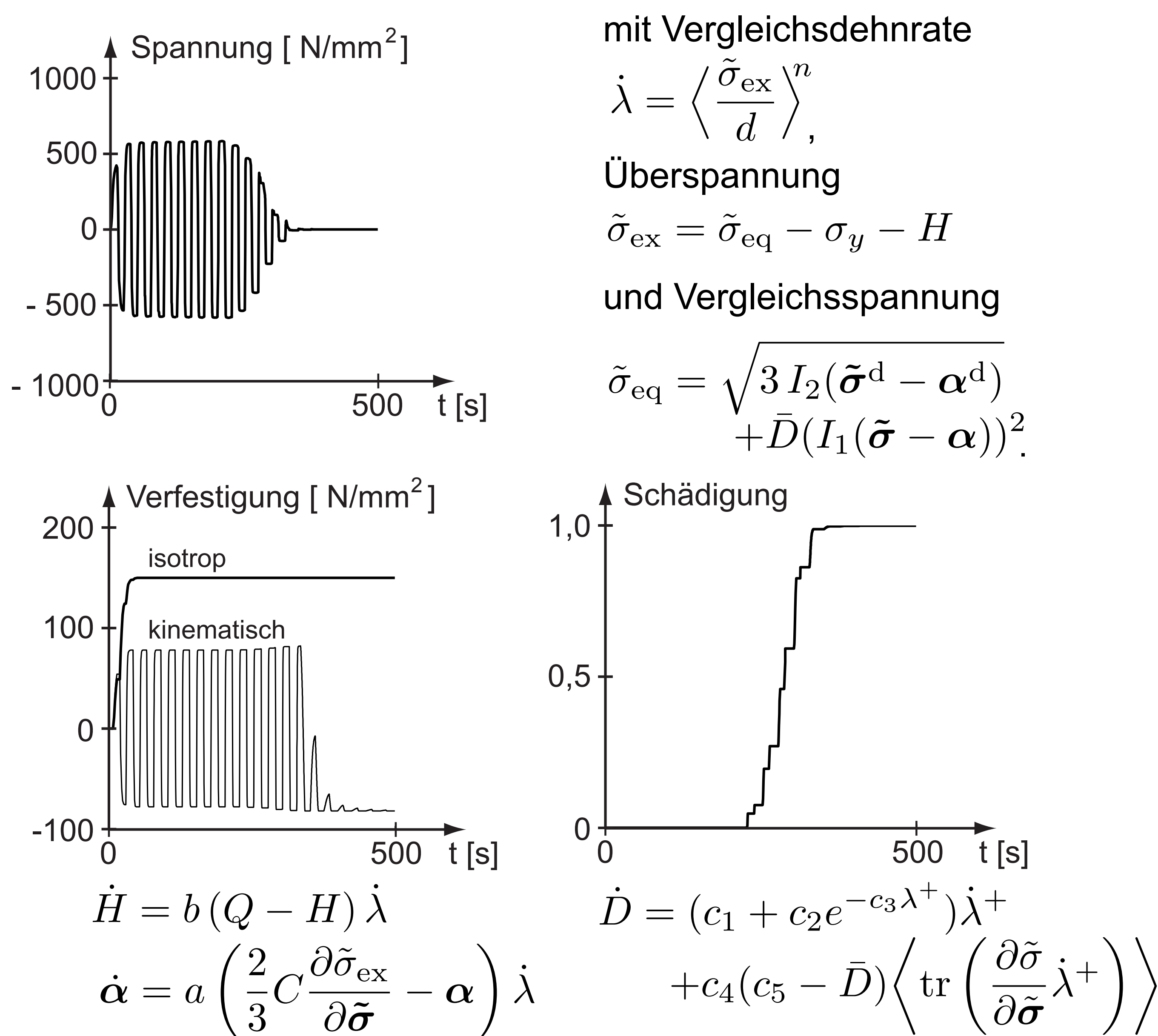


Bild 1: Zustandsgrößen bei uniaxialer Beanspruchung

In Abbildung 1 sind für eine lineare, mit zyklischem Verlauf ansteigende Verzerrung die Entwicklungen von ausgewählten Zustandsgrößen dargestellt. Die Verläufe der Verfestigungen zeigen, dass die Fließspannung des Stahls bereits im ersten Belastungszyklus überschritten ist und sich schon nach wenigen Zyklen ein nahezu stationärer Zustand mit alternierender kinematischer Verfestigung einstellt. Mit dem Materialmodell ist berücksichtigt, dass sich eine Schädigung nur bei Zugbeanspruchung und Überschreiten einer kritischen Grenzdehnung entwickelt, so dass die Schädigung infolge der geringen Viskosität des Stahls nahezu sprunghaft und in Stufen ansteigt bis bei vollständiger Schädigung der Stahl keine Spannung mehr überträgt.

Strukturmodell

Die Arbeitsgleichung

$$\int \delta v \cdot (\rho_0 \dot{v} - \nabla_0 \cdot (\mathbf{F} \cdot \mathbf{S}) - \rho_0 \mathbf{g}) dQ_0 + \int \delta \mathbf{S} : (\dot{\mathbf{E}}_{el} + \dot{\mathbf{E}}_{in} - \dot{\mathbf{E}}) dQ_0 + \text{Anfangsbedingungen} + \text{Randbedingungen} = 0$$

mit der schwachen Form der nichtlokalen Schädigung

$$\int \delta w (\bar{D} - D) dQ_0 + l_c^2 \int \nabla \delta w \cdot \nabla \bar{D} dQ_0 + \text{Randbedingungen} = 0$$

beschreibt das Verformungsverhalten nachgiebiger Strukturen unter Berücksichtigung von Schädigung im Raum und in der Zeit [3]. Mit den Modellgleichungen für viskoplastische Materiale ist sie in eine Raum-Zeit-Finite-Element-Formulierung überführt [4], bis hin zu Finite-Elemente-Modellen mit denen das Verformungsverhalten von Tragelementen unter der Wirkung von Beschleunigungen infolge Erdbeben numerisch analysiert werden kann. In Abbildung 2 ist die Verschiebungsfigur eines beidseitig eingespannten Einfeldträgers dargestellt, dessen Enden relativ zueinander verschoben sind. Die Schädigung der Zugstrebe eines fiktiven Fachwerks in Richtung der sich ausbildenden Beule ist deutlich zu erkennen.

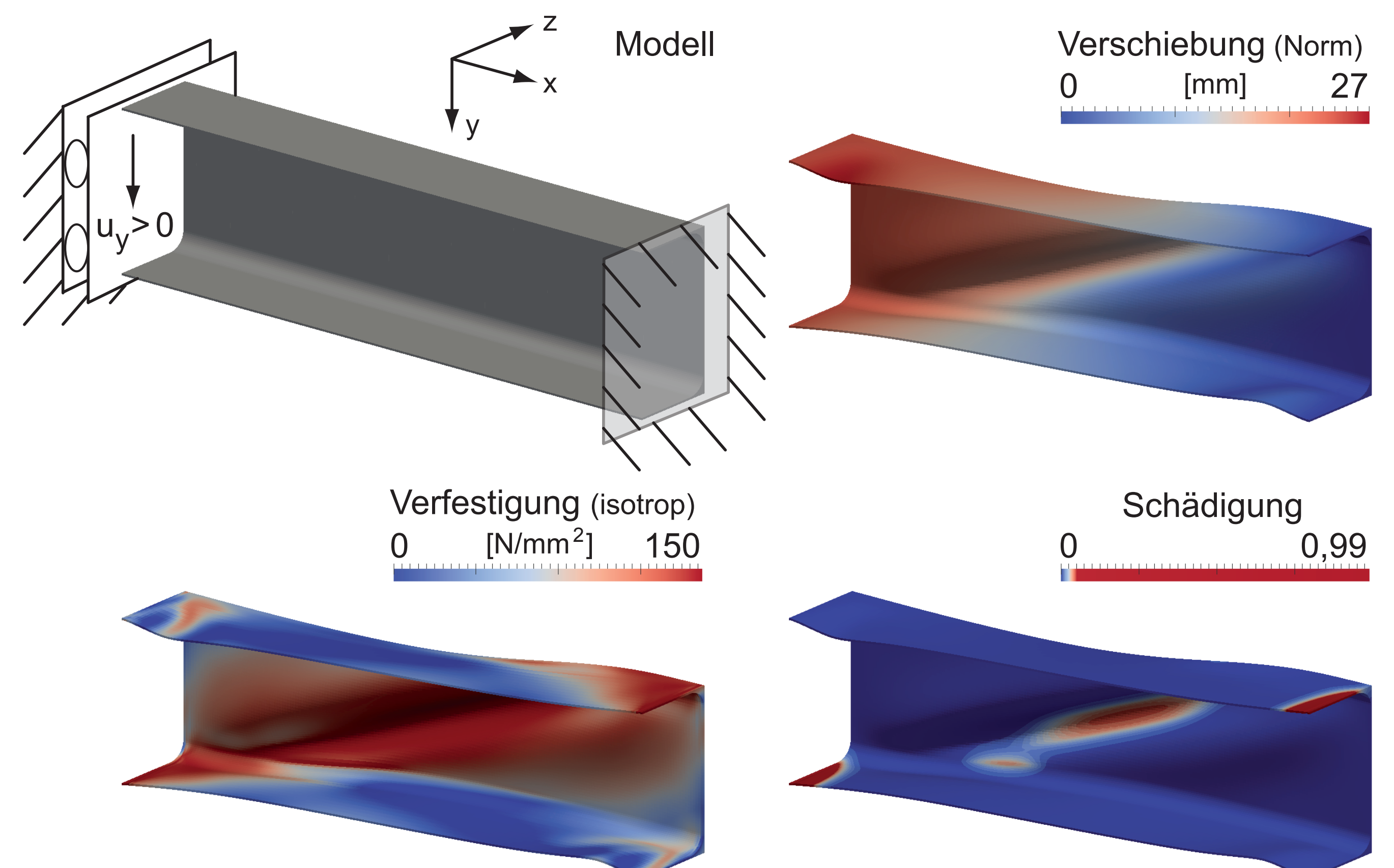


Bild 2: Zustandsgrößen in einem beanspruchten Stahlprofil

Kann mit der zuvor angegebenen Arbeitsgleichung auch schon die Stabilität von dünnwandigen Stahlprofilen untersucht werden, sind mit der Bilanz im zweiten Integranden kleine Verzerrungen unterstellt. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines kontinuumsmechanisch konsistenten Modells für die Abbildung großer Verzerrungen bei duktiler Schädigung. Die numerischen Analysen sollen die Resttragfähigkeit geschädigter Stahlbauteile und Anschlüsse untersuchen, bei denen unter der Wirkung von Erdbeben große Verzerrungen zu erwarten sind.

- [1] U. Kowalsky; J. Mayer; S. Heinrich; D. Dinkler: A nonlocal damage model for mild steel under inelastic cyclic straining, in: Comput Mater Sci, 2012; 63:28-34.
- [2] T. Zümmendorf: Ein gradientenabhängiges Modell für Schädigung bei viskoplastischem Materialverhalten, Dissertation, TU Braunschweig, 2006.
- [3] T. Hughes; G. Hulbert: Space-time finite element method for elastodynamics: Formulations and error estimates, in: Comput Methods Appl Mech Eng, 1988; 66:339-363.
- [4] S. Reinstädler: Modellbildung und numerische Analyse der Entleerung von dünnwandigen Silos, Dissertation, TU Braunschweig, 2016.