Karlsruher Institut für Technologie

BAUSTATIK

Institut für Baustatik
Leiter: Prof. Dr.-Ing. habil. W. Wagner

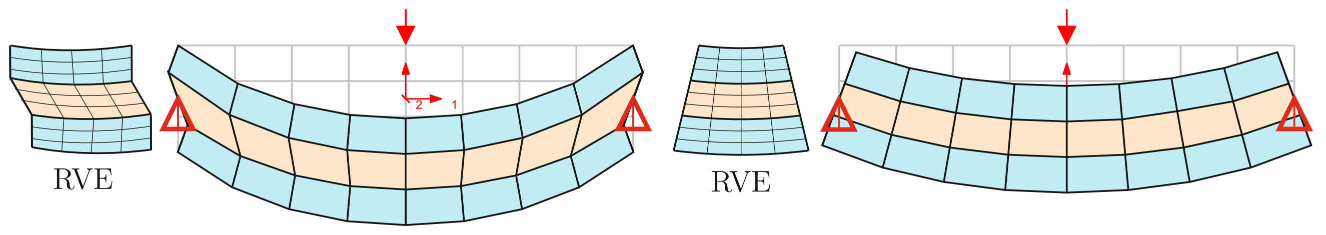
Entwicklung eines Mehrskalenmodells für nichtlineare Verbundglasstrukturen

Jan Zoller

1. Motivation

Für Verbundsicherheitsglas (VSG) werden zwei Glasscheiben durch eine selbstklebende Folie, häufig Polyvinylbutyral (PVB), miteinander verbunden. PVB gehört zur Gruppe der Thermoplaste und besitzt daher viskoelastische Eigenschaften, infolge derer Kriech- bzw. Relaxationserscheinungen zu beobachten sind. Aufgrund dieser Aufweichung tritt bei Belastung senkrecht zur Ebene ein Abscheren der Zwischenschicht auf (Abb. links). Dies bewirkt einen Teilverbund der Glasscheiben.

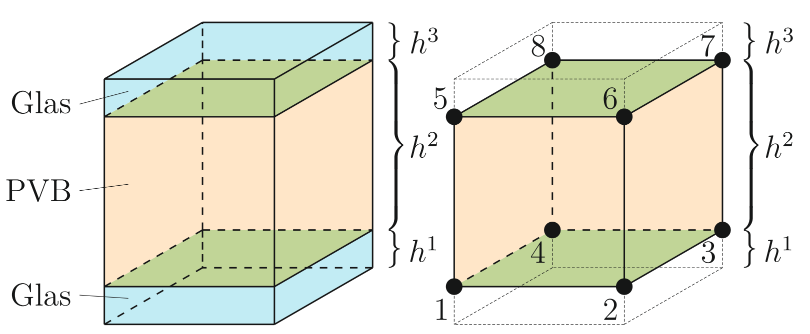
Zur Untersuchung von VSG mit der FEM ist, neben der standardmäßigen Verwendung von Volumen- und Schalenelementen, eine Betrachtung mittels der Mehrskalenmethode (FE^2) möglich. Bei dieser Methode existieren neben dem globalen Randwertproblem (RWP) weitere gekoppelte lokale RWPe, in denen auch heterogene Werkstoffe erfasst werden können.



Mit dem zu Beginn der Arbeit zur Verfügung stehenden FE^2-Modell nach Gruttmann und Wagner (2013) ist es nicht möglich den beschriebenen Abschervorgang auf lokaler Ebene zu erfassen, da infolge der globalen Schalenverzerrungen nur eine Querschnittsverdrehung des gesamten Laminats berechnen werden kann, und so die deutlich steiferen Glasscheiben die Deformation des Laminats bestimmen (Abb. rechts).

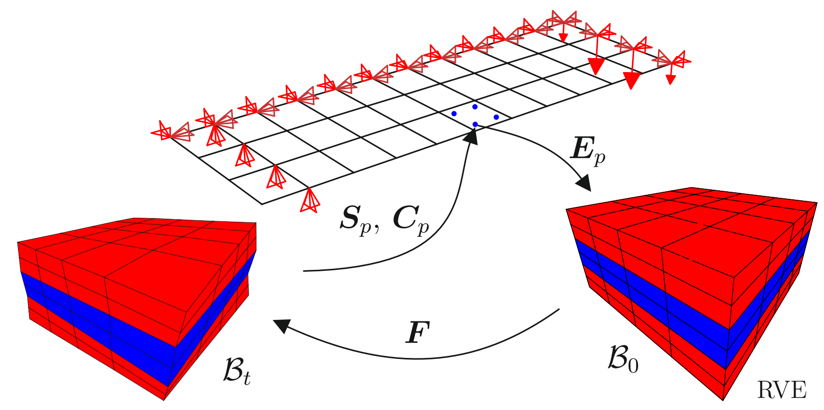
2. Makroelement

Um den Abschervorgang erfassen zu können, ist die Bestimmung dreier Verzerrungsgrößen über die Höhe erforderlich. Dazu werden zwei exzentrische 4-Knoten-Schalenelemente für die Diskretisierung des Glases, und ein 8-Knoten-Volumenelement für die PVB-Schicht zu einem gekoppelten Makroelement verbunden. Durch eine Unterintegration des Volumenelements in Dickenrichtung entsteht eine ebene Gauß-Integration. Die daraus resultierende Systemaufweichung steht dem Locking des Volumenelements entgegen. Zero-Enery-Modes lassen sich durch eine Eigenwertuntersuchung ausschließen. Weiter wird als Vorbereitung für das FE^2-Modell eine einheitliche Gauß-Integration eingeführt.



$$\mathbf{K}_{T,e} \approx \bigcup_{l=1}^{nlay} \sum_{p=1}^{ngp} \sum_{I=1}^{nel_l} \sum_{K=1}^{nel_l} \bar{\mathbf{K}}^l_{T,IK} = \sum_{p=1}^{ngp} \bigcup_{l=1}^{nlay} \sum_{I=1}^{nel_l} \sum_{K=1}^{nel_l} \bar{\mathbf{K}}^l_{T,IK}$$

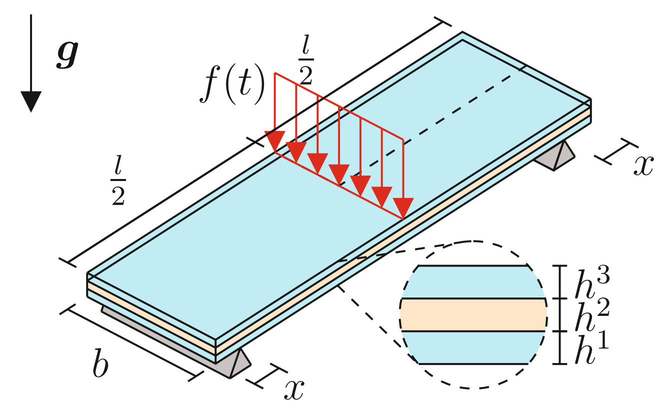
3. Mehrskalenmethode



In der Mehrskalenmethode werden die Spannungen $\mathbf{S}_p$ und die Materialmatrix $\mathbf{C}_p$ des globalen Gauß-Punkts lokal mithilfe eines Repräsentativen Volumenelements (RVE) bestimmt. In diesem wird die Materialzusammensetzung mittels Volumenelementen diskretisiert. Daher lässt sich das RVE ebenso in die Schichten Glas-PVB-Glas unterteilen. Zur Bestimmung der globalen Spannungen sowie der Materialmatrix werden auf das RVE die schichtweisen globalen Verzerrungen in Form einer Verschiebungssteuerung schichtweise aufgebracht. Die lokal errechneten Spannungen bzw. die Materialmatrix dienen anschließend der Berechnung des globalen Elementresiduums $\mathbf{g}_e^G$ bzw. der globalen tangentialen Steifigkeitsmatrix $\mathbf{k}_e^G$.

$$L[\delta\pi(\mathbf{v}_e,\delta\mathbf{v}_e),\Delta\mathbf{v}_e] = \sum_{e=1}^{numel} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{v}^G \\ \hline \delta\mathbf{E}_1 \\ \vdots \\ \delta\mathbf{E}_p \\ \vdots \\ \delta\mathbf{E}_{ngp} \end{bmatrix}_e^T \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{g}^G(\mathbf{S}) \\ \hline \mathbf{S}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{S}_p \\ \vdots \\ \mathbf{S}_{ngp} \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{c|ccccc} \mathbf{k}_T^G(\mathbf{C}) & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{C}_1 & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_p & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{C}_{ngp} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{v}^G \\ \hline \Delta\mathbf{E}_1 \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{E}_p \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{E}_{ngp} \end{bmatrix} \right\}_e$$

4. Dreipunkt-Biegeversuch



Zur Verifizierung wird das FE^2-Modell eines Dreipunkt-Biegeversuchs betrachtet. Die Belastung wird innerhalb von 136 s linear aufgebracht und im Anschluss konstant gehalten (schwarz). Als Referenz dient eine Berechnung mittels eines standardmäßigen FE-Modells (rot). Bei einer Diskretisierung des RVEs mittels 8-Knoten-Volumenelementen ist eine erhöhte Anzahl an Elementen in der Ebene erforderlich um den quadratischen Verlauf der Verformung abbilden zu können (blau). Bei Verwendung von quadratischen Volumenelementen ist dies hingegen nicht nötig. Das Verhalten lasst sich adäquat simulieren (grün).