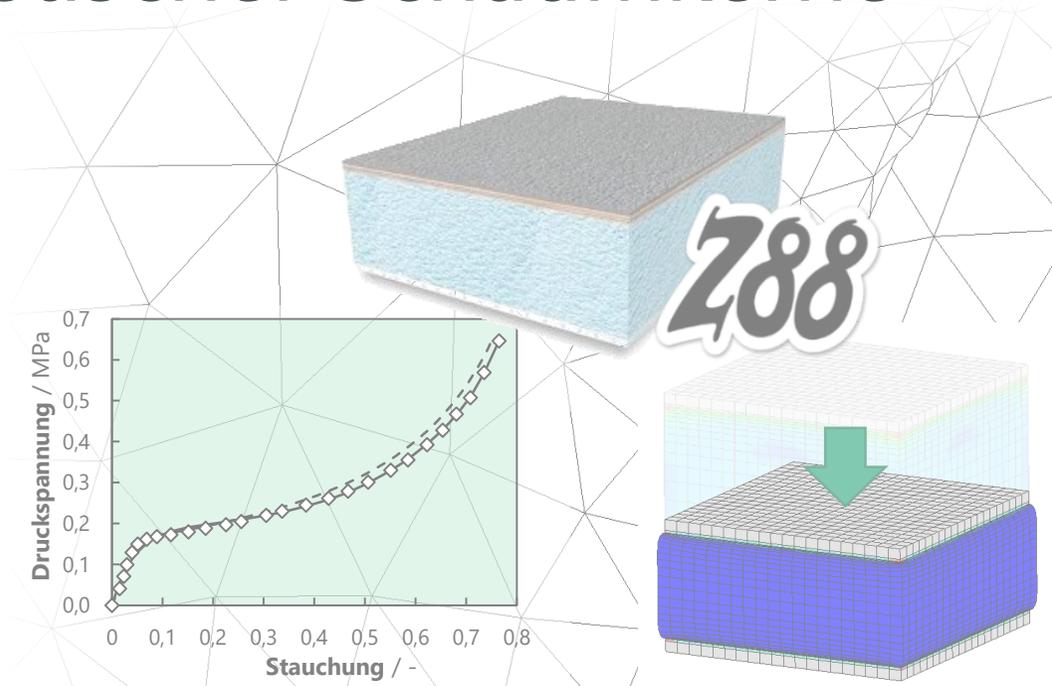


FE-Simulation von Sandwichbauteilen – Modellierung elastisch-plastischer Schaumkerne

Florian Hüter, M.Sc.

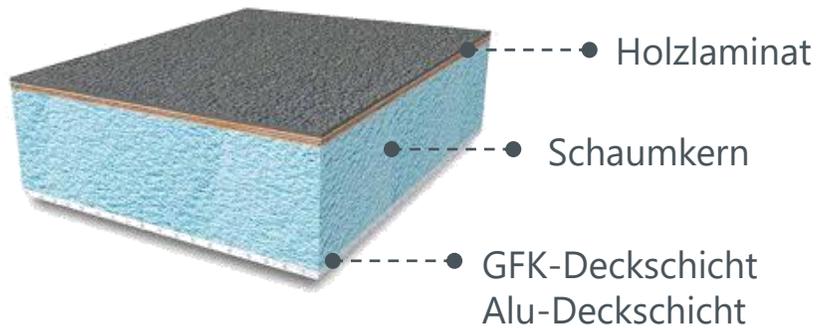
23. Bayreuther Konstrukteurstag

14. September 2022



Motivation

- Komplexer Auslegungsprozess & experimenteller Aufwand
- Einsatz von Simulationsmethoden
- Beschleunigung des Produktentwicklungsprozesses & Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit



www.lamilux.de, www.hydedewa.de



FE-Simulation von Sandwichbauteilen

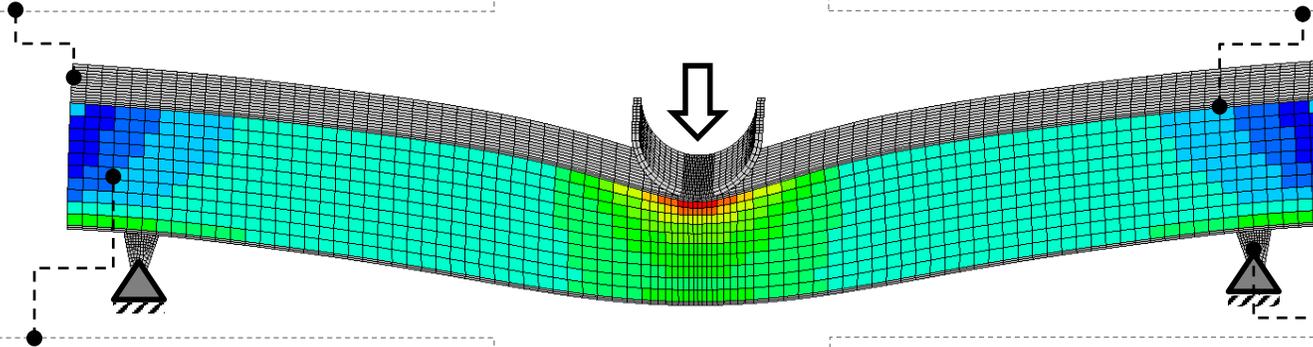
Mechanische Auslegungsaspekte

Deckschicht

Material Metall, Faserverbund
Eigenschaften elastisch-plastisch, anisotrop
Versagensbewertung

Kleerverbindung

Material Mehrkomponentenkleber
Eigenschaften Benetzung, Harzeindringen
Versagensbewertung



Kernschicht

Material Schaumkern (PU, PVC...)
Eigenschaften nichtlinear, elastisch-plastisch
Versagensbewertung

Weitere Auslegungsaspekte

Krafteinleitung, Lagerung, Versteifungselemente,
thermische Eigenschaften ...

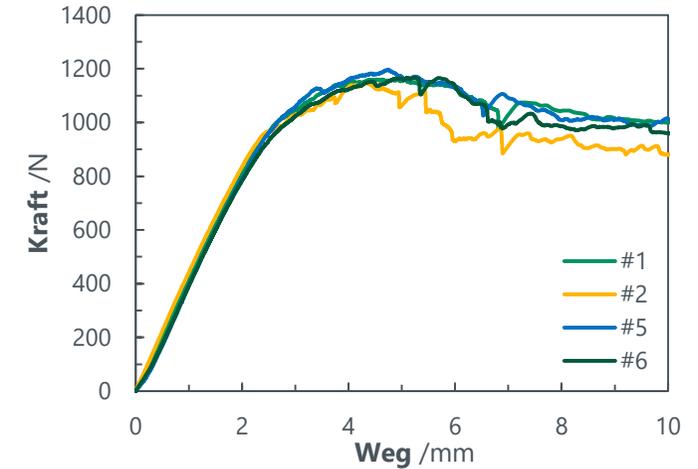


Sandwichbauteile

Typische Prüfversuche & Versagensarten

Typische Prüfversuche

- Dreipunktbiegeversuch
- Vierpunktbiegeversuch
- Druckstempelversuch



Typische Versagensarten im Dreipunktbiegeversuch

Deckschichtversagen



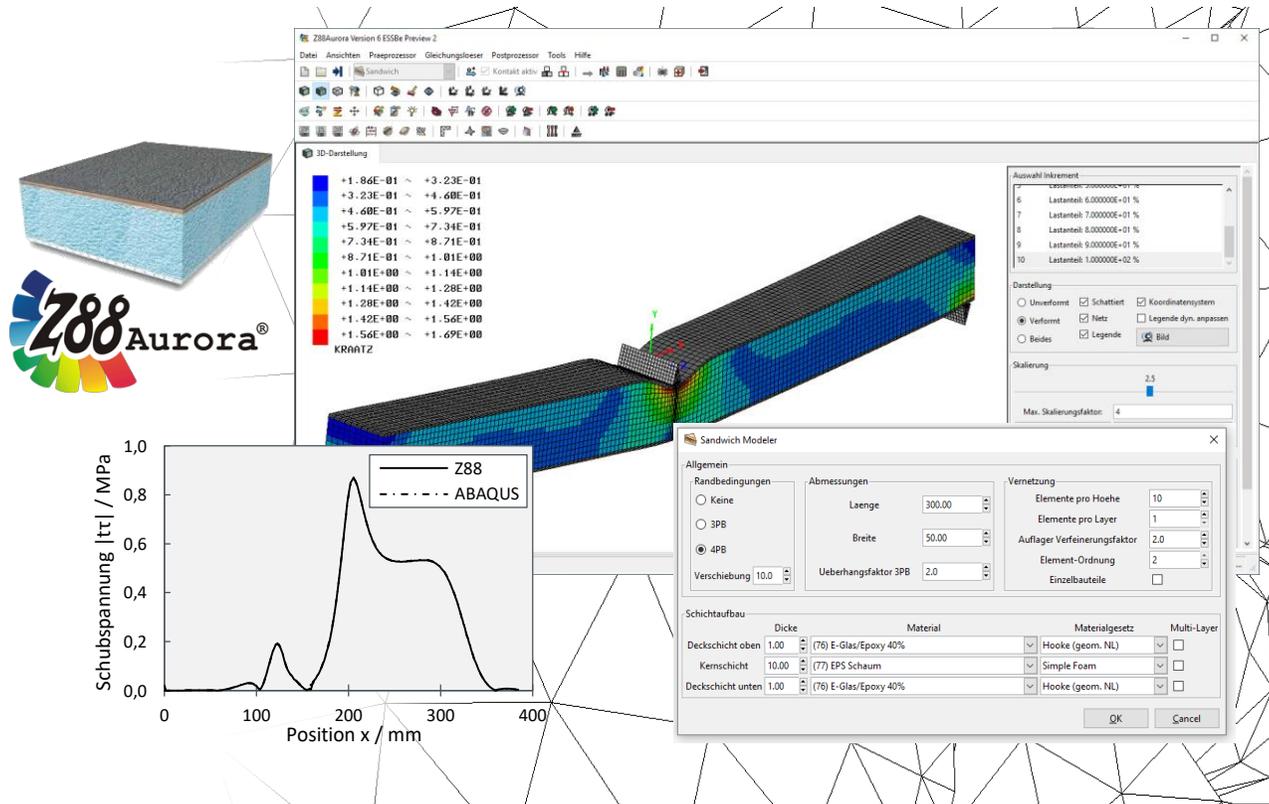
Klebversagen & Kernschubversagen



Plastisches Kernquetschen



Easy Sandwich Struktur Berechner



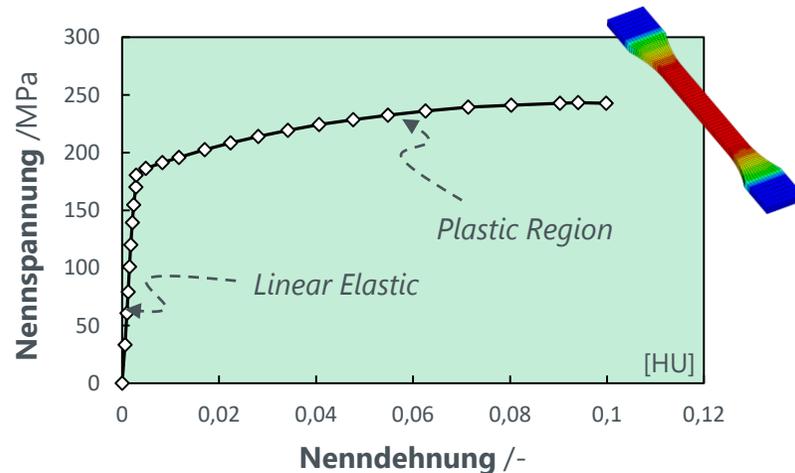
Projekthinhalte

- Entwicklung einer Finite-Elemente basierten Berechnungssoftware zur mechanischen **Auslegung von Leichtbau-Sandwichbauteilen**
- Auf Basis von **Z88Aurora**
- Bereitstellung eines nichtlinearen **Berechnungskerns** mit verschiedenen Materialmodellen, Versagenskriterien & Verklebung
- **Benutzeroberfläche** mit automatisierter Modellgenerierung, Skripting-Schnittstelle & Ergebnisbericht



Deckschicht

- **Metall:** Stahl, Alu ...



- **Querkontraktionszahl:**

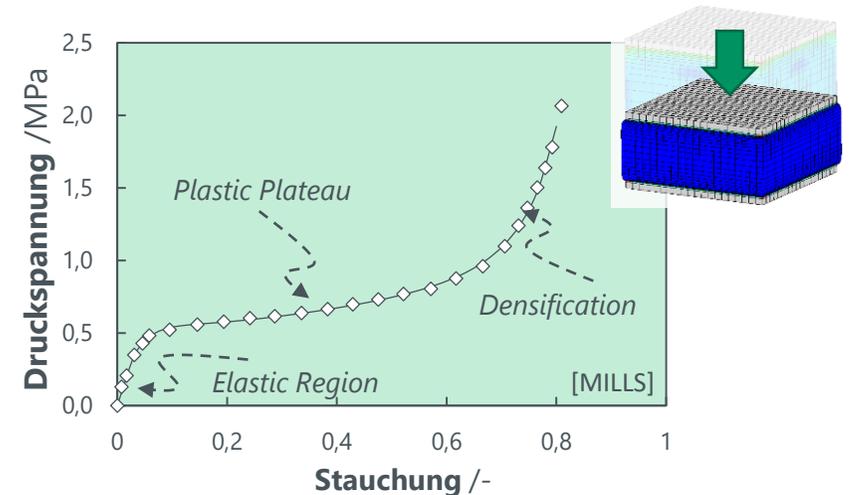
$$\nu_{el} \approx 0,3 \quad (\text{elastischer Bereich})$$

$$\nu_{pl} \rightarrow 0,5 \quad (\text{plastischer Bereich})$$

[RÖSLER, WEHMANN]

Kernschicht

- **Hartschäume:** PU, PVC, EPS ...

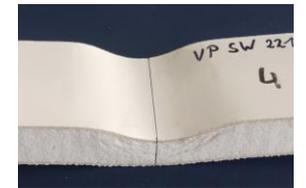


- **Querkontraktionszahl:** [WIDDLE]

$$\nu \approx 0,3 \quad (\text{kleine Verformung})$$

$$\nu \rightarrow 0 \quad (\text{große Stauchung})$$

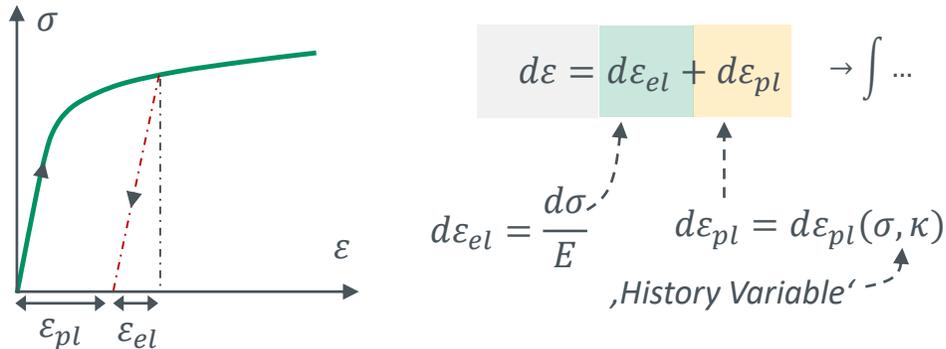
$$\nu \rightarrow 0,5 \quad (\text{große Dehnung})$$



[MILLS, WIDDLE]

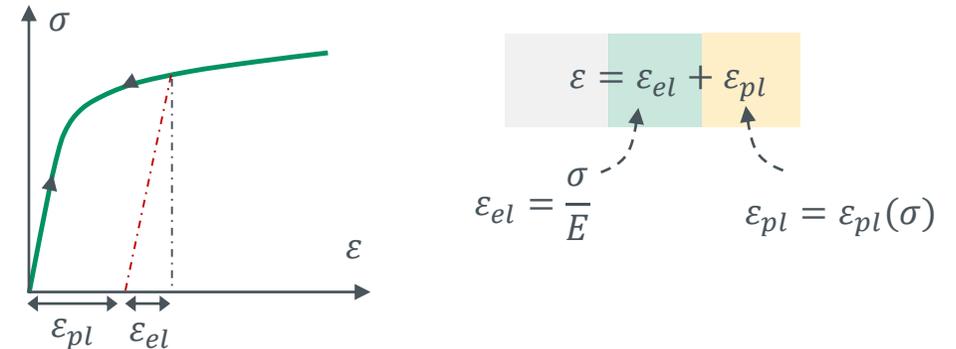


Inkrementeller Ansatz



- Plastische Verformung ist von aktuellem Spannungszustand und der Belastungsgeschichte abhängig
→ Integration über Belastungsgeschichte
- Verschiedene Ansätze zur Bestimmung von $d\epsilon_{pl}$:
Mises, Crushable Foam ...
- Vielfach in numerischen Simulationen verwendet
- Aufwändige Berechnung, Fließkurve

Hencky-Plastizität



- Verzerrungszustand ergibt sich allein aus Spannungszustand (keine History Variable)
- Ohne Modifikation keine Entlastungsvorgänge beschreibbar
- Anwendung: FKM nichtlinear, Bruchmechanik (Rissinitiierung) ...
- Einfacher Ansatz, Verfestigungsexponent

[WEHMANN,KIM]

[HENCKY, BROCKS,HOLZAPFEL]



Ramberg-Osgood-Gesetz (Mises)

$$\varepsilon_{ij} = \underbrace{\frac{1 + \nu_{el}}{E} s_{ij} + \frac{1 - 2\nu_{el}}{E} p \delta_{ij}}_{\text{elastischer Anteil } \varepsilon_{el}} + \underbrace{\alpha \left(\frac{\sigma_V}{\sigma_Y} \right)^{n-1} \frac{3}{2E} s_{ij}}_{\text{plastischer Anteil } \varepsilon_{pl}}$$

mit

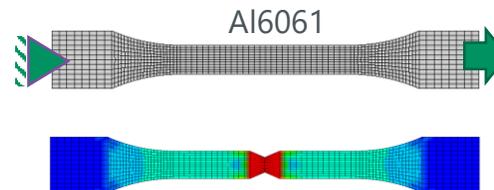
$$\sigma_{ij} = p \delta_{ij} + s_{ij}$$

Druck \nearrow Deviatorischer Anteil \nearrow

$$\sigma_V = \sqrt{1,5 \cdot \mathbf{s} : \mathbf{s}}$$

\nearrow Vergleichsspannung GEH

$$\alpha = \frac{E \varepsilon_Y}{\sigma_Y}$$

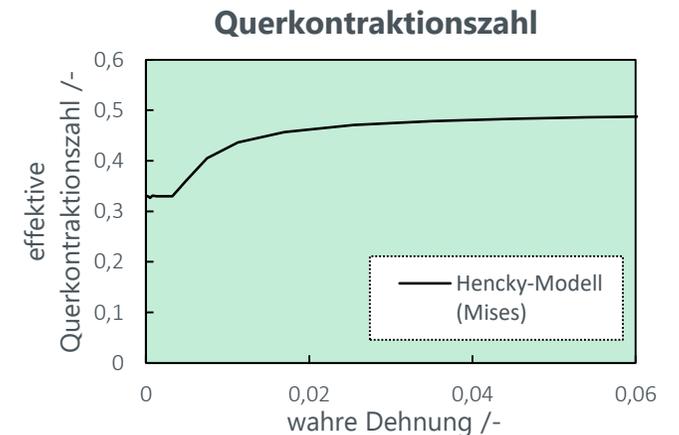
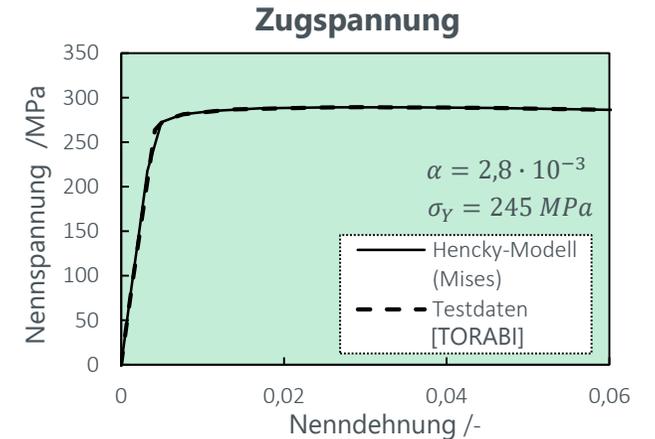


Elastischer Anteil

- Isotropes Hooke-Gesetz
- E, ν_{el}

Plastischer Anteil

- Mises-Plastizitätsansatz
- GEH-Vergleichsspannung
- Isotrope Verfestigung
- Plastisch inkompressibel $\nu_{pl} = 0,5$



[RAMBERG, RÖSLER, SUN, BROCKS, ABAQUS]



Simplefoam (Crushable Foam)

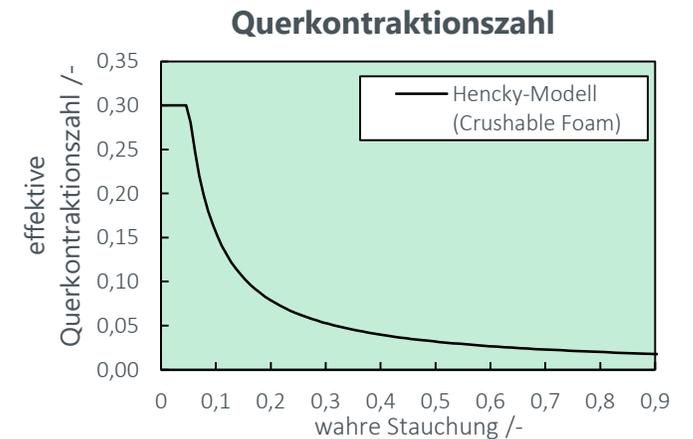
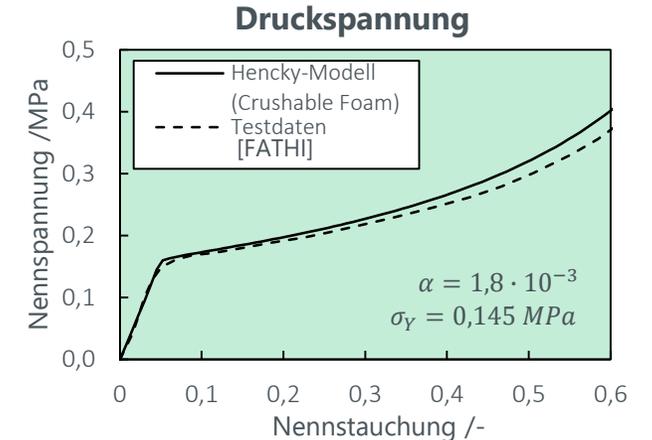
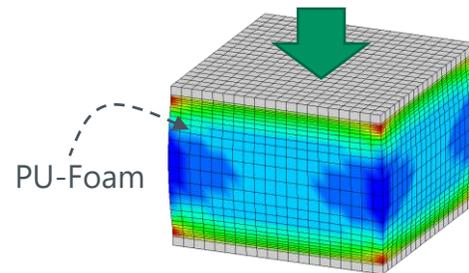
$$\varepsilon_{ij} = \underbrace{\frac{1 + \nu_{el}}{E} s_{ij} + \frac{1 - 2\nu_{el}}{E} p \delta_{ij}}_{\text{elastischer Anteil } \varepsilon_{el}} + \underbrace{\alpha \left(\frac{\sigma_V}{\sigma_Y} \right)^{n-1} \left(\frac{1 + \nu_{pl}}{E} s_{ij} + \frac{1 - 2\nu_{pl}}{E} p \delta_{ij} \right)}_{\text{plastischer Anteil } \varepsilon_{pl}}$$

mit $\sigma_V = \sqrt{\frac{1,5 \mathbf{s} : \mathbf{s} + \beta p^2}{1 + \beta/9}}$ $\beta = \frac{9(1 - 2\nu_{pl})}{2(1 + \nu_{pl})}$

σ_{ij} : Kirchhoff-Spannung
 ε_{ij} : Log-Verzerrungstensor

Erweiterung des Ramberg-Osgood-Ansatzes

- Einführung einer variablen plastischen Querkontraktionszahl $0 \leq \nu_{pl} < 0,5$
- Plastische Verzerrung von Druck abhängig
- Crushable Foam Vergleichsspannung



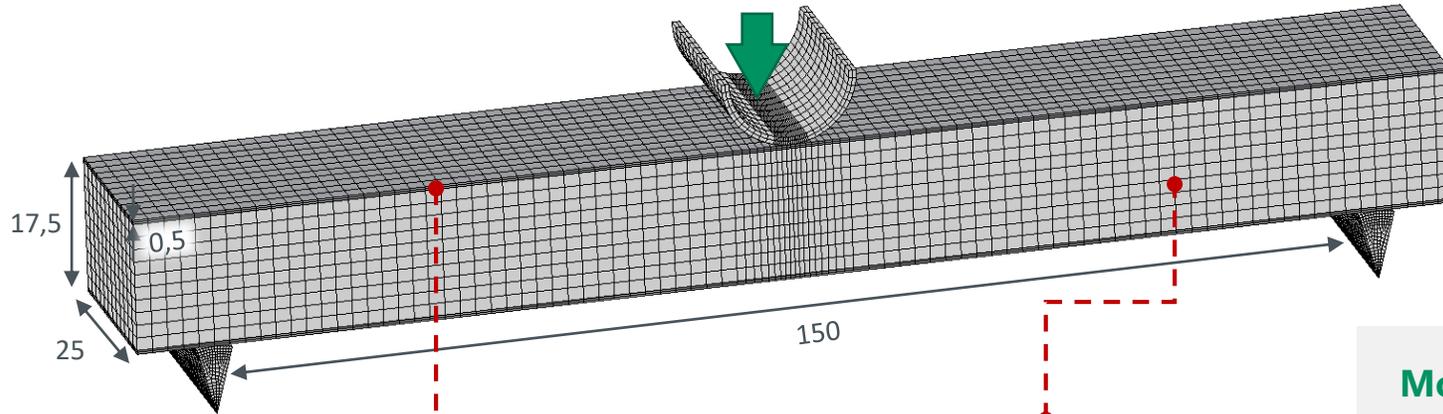
[RAMBERG, RÖSLER, SUN, BROCKS, ABAQUS]



FE-Simulation von Sandwichbauteilen

Dreipunktbiegeversuch ASTM C 393 – Modellierung

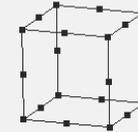
Verschiebung $w = 13 \text{ mm}$



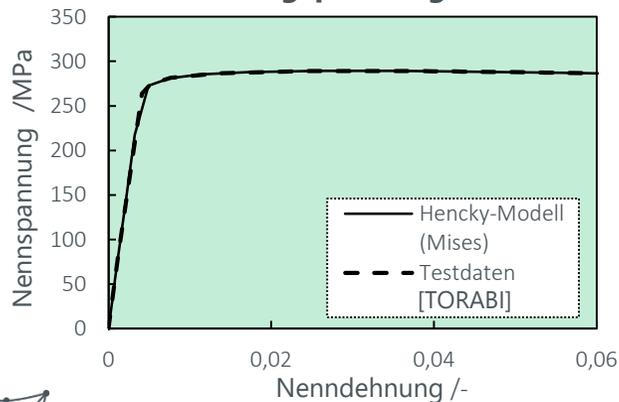
Netzeinstellung

- quadratische Hexaeder

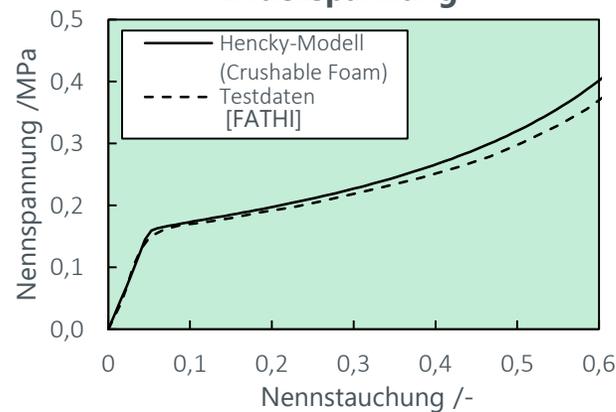
20.832
Elemente



Zugspannung



Druckspannung



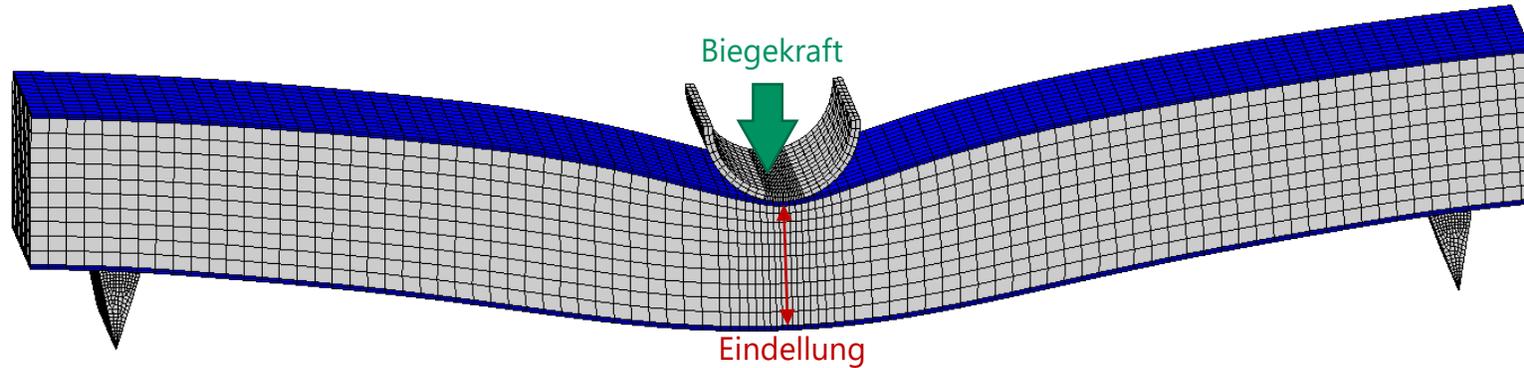
Modellierungsansätze

- Hencky-Plastizität**
 - Ramberg-Osgood
 - Simplefoam
- Inkrementelle Plastizität**
 - Mises
 - Crushable Foam

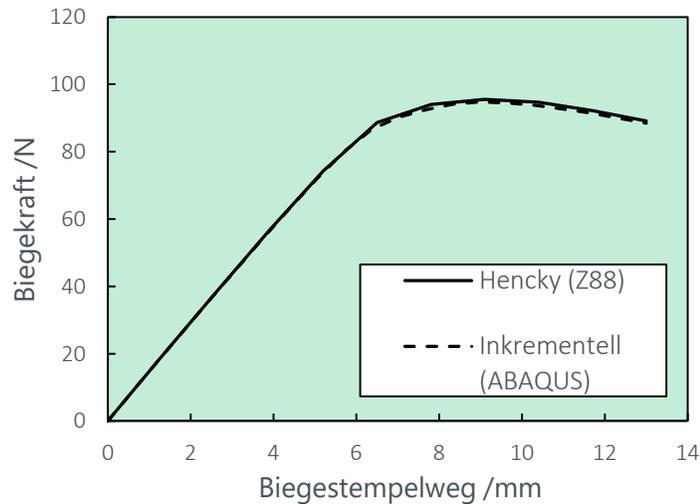


FE-Simulation von Sandwichbauteilen

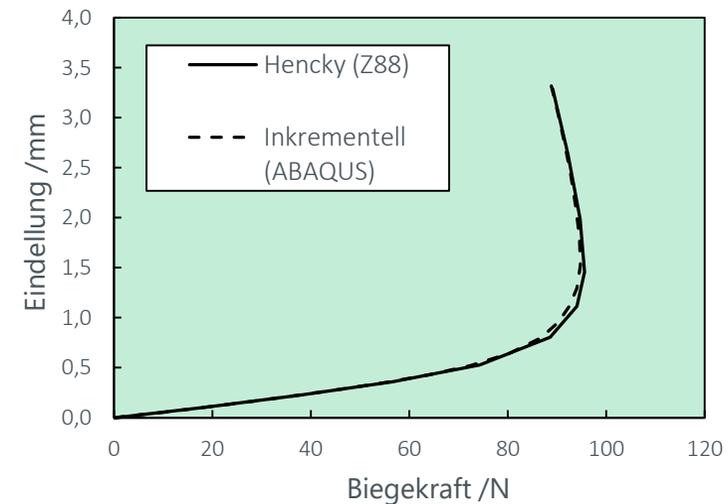
Dreipunktbiegeversuch ASTM C 393 – Simulationsergebnisse



Kraft-Weg-Diagramm

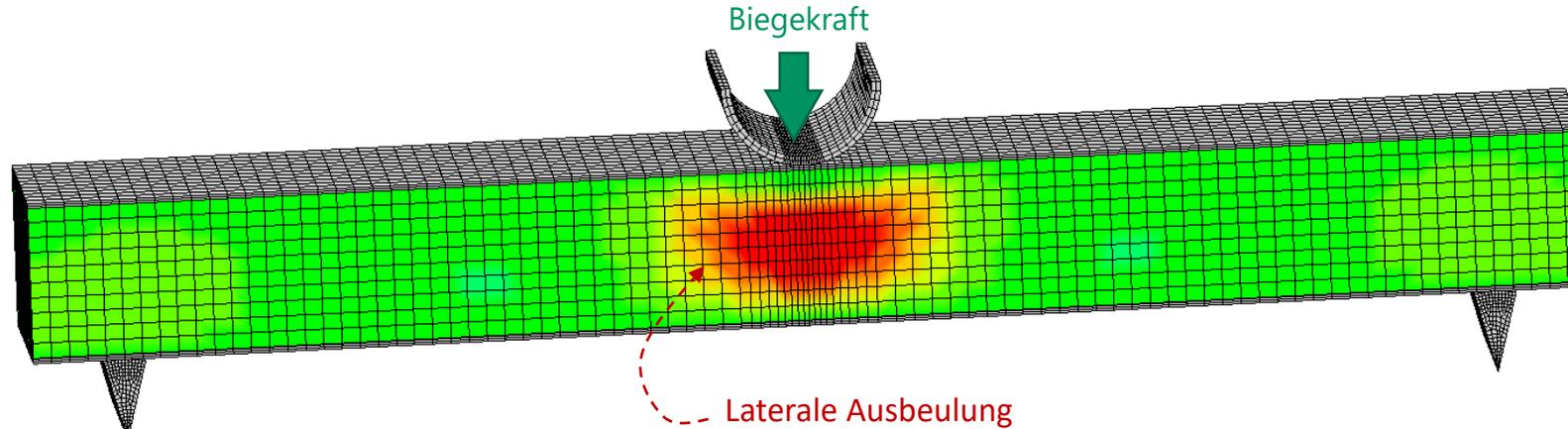


Eindellung der Deckschicht

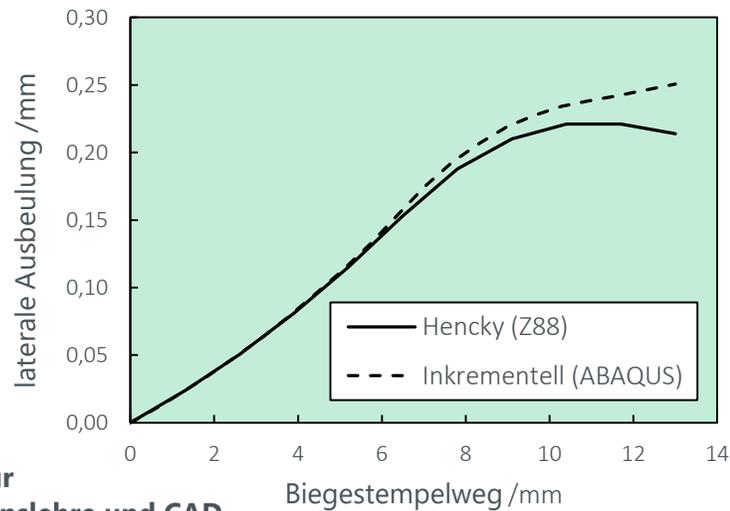


FE-Simulation von Sandwichbauteilen

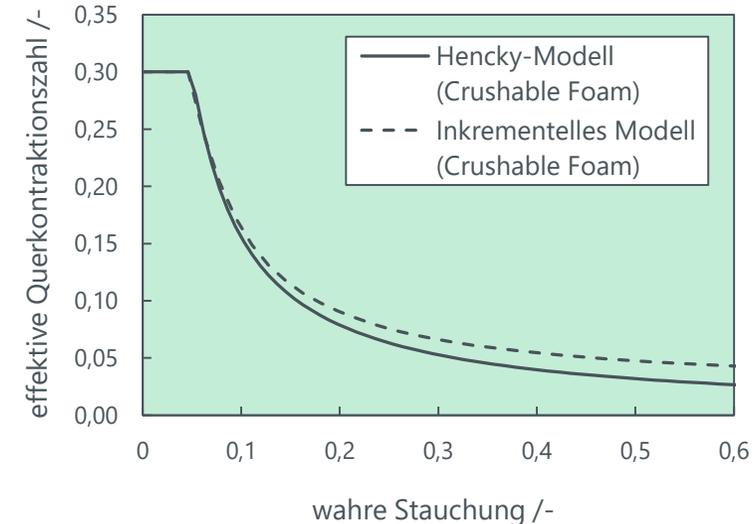
Dreipunktbiegeversuch ASTM C 393 – Simulationsergebnisse



Max. Laterale Ausbeulung

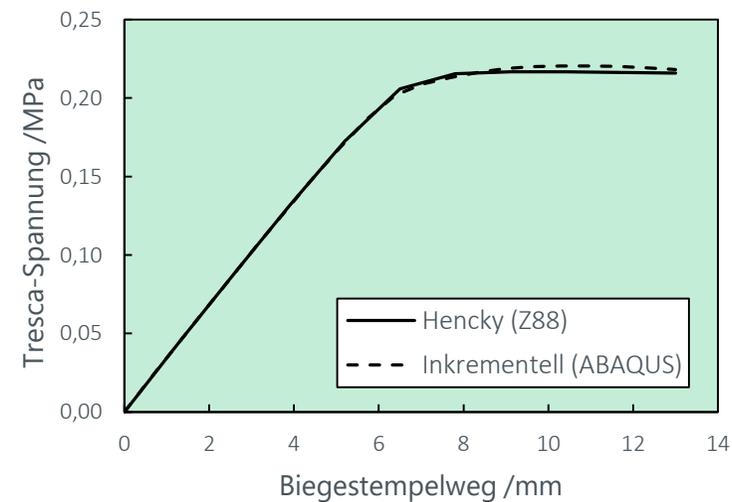
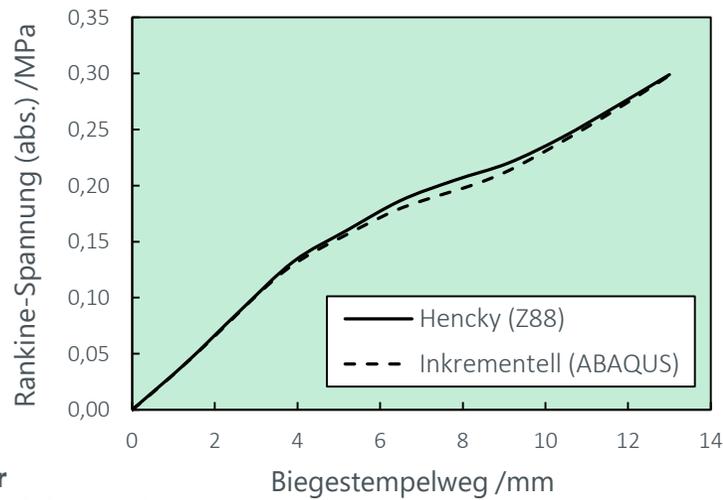
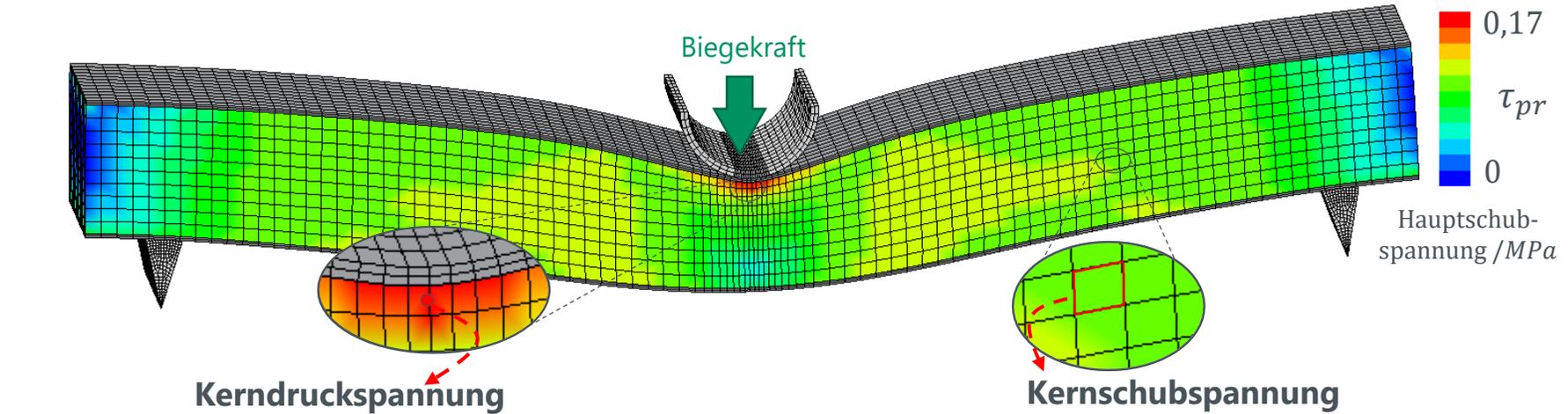


Effektive Querkontraktionszahl



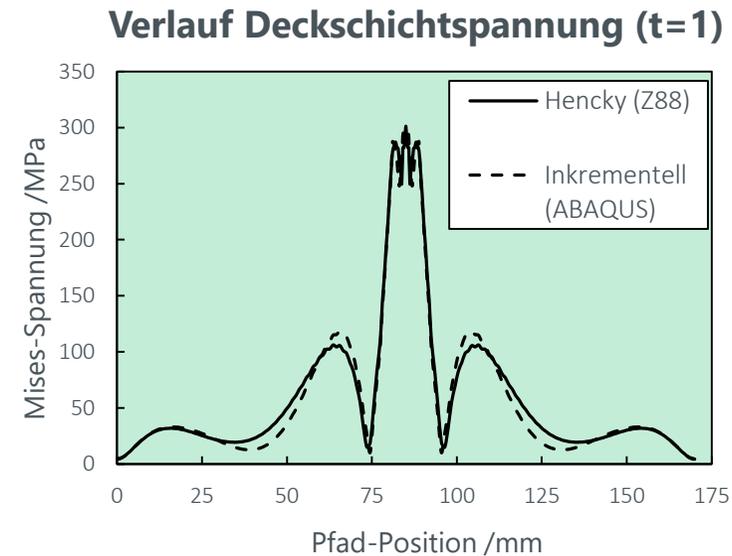
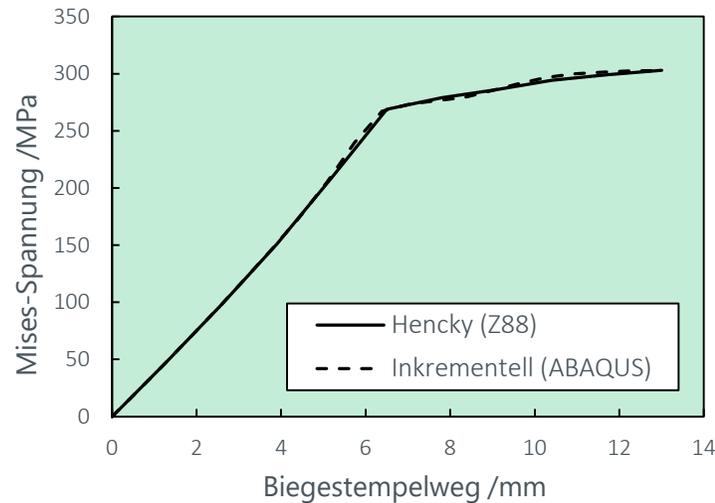
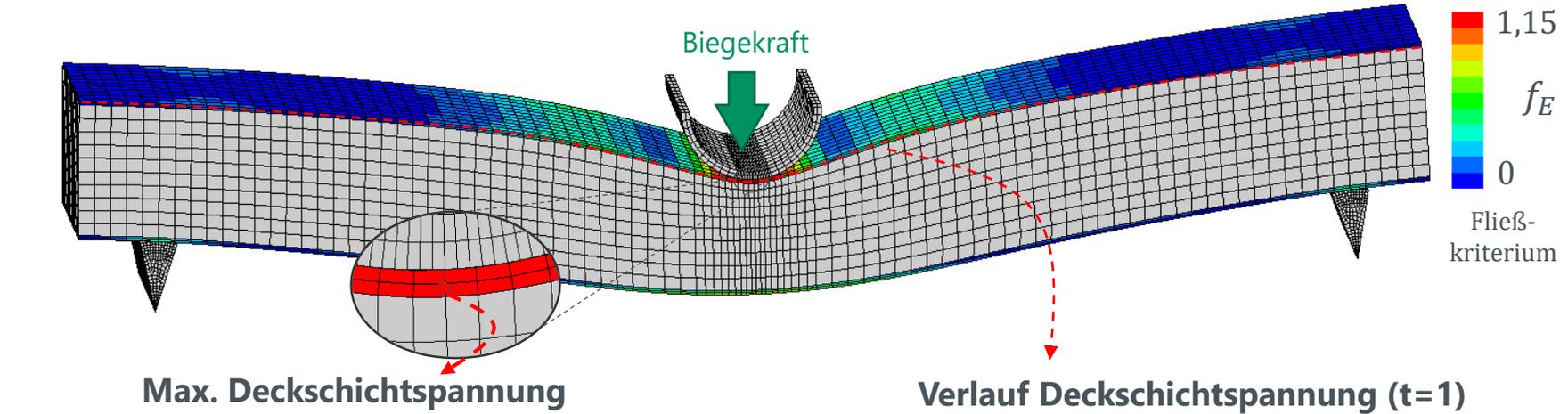
FE-Simulation von Sandwichbauteilen

Dreipunktbiegeversuch ASTM C 393 – Simulationsergebnisse



FE-Simulation von Sandwichbauteilen

Dreipunktbiegeversuch ASTM C 393 – Simulationsergebnisse

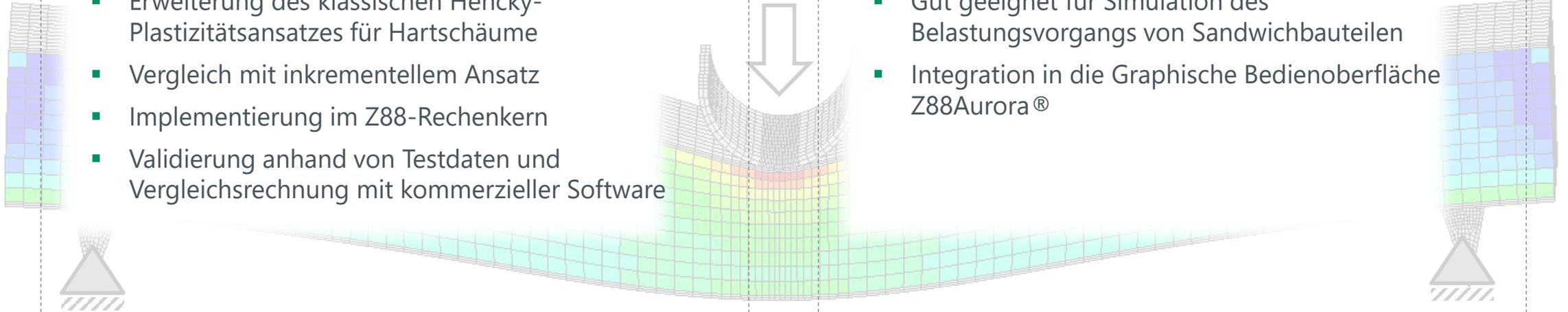


Zusammenfassung

- Betrachtung verschiedener numerischer Ansätze zur Abbildung des plastischen Verhaltens von Metallen und Hartschäumen
- Erweiterung des klassischen Hencky-Plastizitätsansatzes für Hartschäume
- Vergleich mit inkrementellem Ansatz
- Implementierung im Z88-Rechenkern
- Validierung anhand von Testdaten und Vergleichsrechnung mit kommerzieller Software

Fazit & Ausblick

- Hohe Übereinstimmung zwischen Hencky-Plastizitätsansatz und inkrementellen Plastizitätsmodellen
- Gut geeignet für Simulation des Belastungsvorgangs von Sandwichbauteilen
- Integration in die Graphische Bedienoberfläche Z88Aurora®



- ABAQUS** DASSAULT SYSTÈMES, D. S. *Abaqus analysis user's guide*. Technical Report Abaqus 6.14 Documentation, Simulia Corp, 2016.
- BONET** <https://doi.org/10.1017/CBO9781316336144>
- RIEG** *Rieg, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.: Finite Elemente - Analyse für Ingenieure – Grundlagen und praktische Anwendungen mit Z88Aurora*. Hanser, München, 2019.
- BROCKS** <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62752-6>
- DESHPANDE** [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(99\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(99)00082-4)
- FATHI** https://doi.org/10.15495/EPub_UBT_00004286
- HENCKY** HENCKY, H.: *Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen*. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1924, 4. Jg., Nr. 4, S. 323-334.
- HOLZAPFEL** HOLZAPFEL, G. A.: *Nonlinear solid mechanics: a continuum approach for engineering science*. Wiley, 2000.
- KIM** <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1746-1>
- MILLS** <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8069-1.X5000-4>
- RAMBERG** RAMBERG, W.; OSGOOD, W.R.: *Description of stress strain curves by three parameters*. NACA Technical Note, 1945, No. 902.
- RÖSLER** <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2241-3>
- SUN** SUN, C.-T.; JIN, Z. H.: *Fracture Mechanics*, Academic Press, 2012.
- TORABI** <https://doi.org/10.1111/ffe.12376>
- WEHMANN** WEHMANN, C.: *Nichtlineare Finite-Elemente-Analyse für Berechnungen im Maschinenbau*. Dissertation Universität Bayreuth: 2014.
- WIDDLE** <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2007.09.002>



