



# **Möglichkeiten zur Modellierung von Kohäsivverbindungen in LS-DYNA**

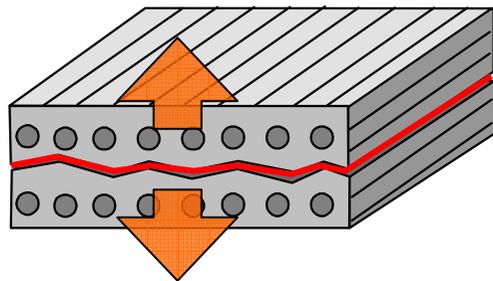
Tobias Erhart, André Haufe  
Dynamore GmbH

**LS-DYNA Update Forum, 12. November 2009**

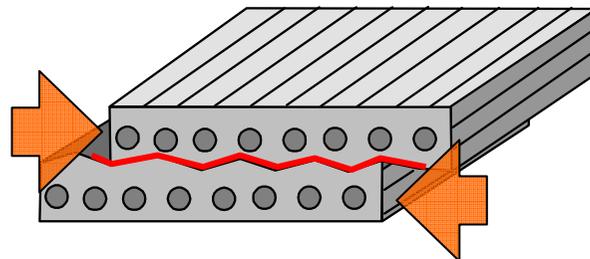
- **Kohäsivverbindungen:** Partner werden durch atomare oder molekulare Kräfte zusammengehalten.
  - Typische **Anwendungen:** z.B. Klebschichten, Schweißverbindungen, Lamine oder Verbundwerkstoffe (CFK, GFK, Stahlbeton, Sperrholz, usw.), mit Stoff- oder Formschiuß zwischen den Werkstoffen.
  - Das **mechanische Verhalten** solcher Verbundschichten innerhalb einer Struktur kann einen großen **Einfluß auf des Gesamttragverhalten** haben, insbesondere wenn es zur Werkstofftrennung und somit zum **Versagen, Delamination** oder **Debonding** dieser Kohäsivverbindungen kommt.
- 
- ➔ **Modellierung in LS-DYNA: Kohäsivelemente oder Tiebreakkontakte**
  - ➔ **Theorie, Materialmodelle, Vor- und Nachteile**
  - ➔ **Numerische Tests**
  - ➔ **Strategie für grobe Vernetzungen**

## Makro

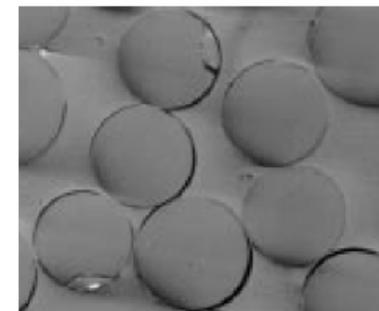
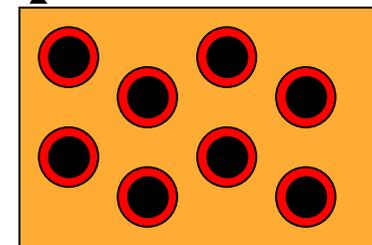
Klebschichten im Automobilbau



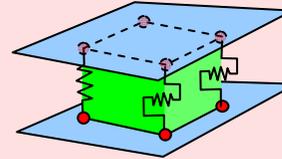
## Meso/Makro



## Mikro

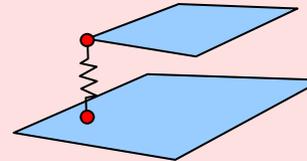


- **Kohäsivelemente** und dazugehörige Materialmodelle (\*MAT\_COHESIVE\_...)



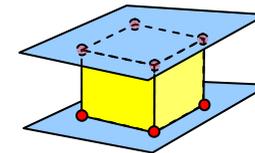
- **Tiebreakkontakt**

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_ONE\_WAY\_SURF.\_TO\_SURF.\_TIEBREAK  
mit integrierten Materialmodellen



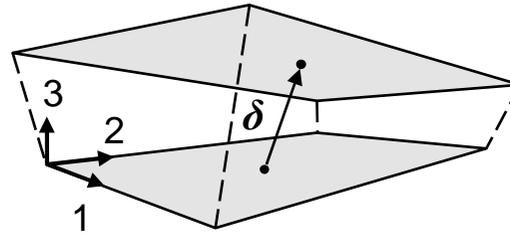
- **Volumenelemente** und 3D-Materialmodelle für Gummi, Schaum, Kunststoff, ... (z.B. \*MAT\_SIMPLIFIED\_RUBBER, \*MAT\_FU\_CHANG\_FOAM, \*MAT\_SAMP)

Spezialfall: \*MAT\_ARUP\_ADHESIVE



- **Balkenelemente** und \*MAT\_SPOTWELD

- "Spezielles" Volumenelement:  
Orientierung, Dicke



- Relative Knotenverschiebungen  $\rightarrow$  lokale Relativverschiebungen an IPs

$$\Delta \mathbf{x} = \sum_{i=1}^4 N_i(s, t) \Delta \mathbf{x}_{i+4, i}$$

$$\Delta \mathbf{X} = \sum_{i=1}^4 N_i(s, t) \Delta \mathbf{X}_{i+4, i}$$

$\rightarrow$

$$\boldsymbol{\delta} = \mathbf{R}^T(t) \Delta \mathbf{x} - \mathbf{R}^T(0) \Delta \mathbf{X}$$

- Lokale Relativverschiebungen an Integrationspunkten  $\rightarrow$  lokale Spannungen

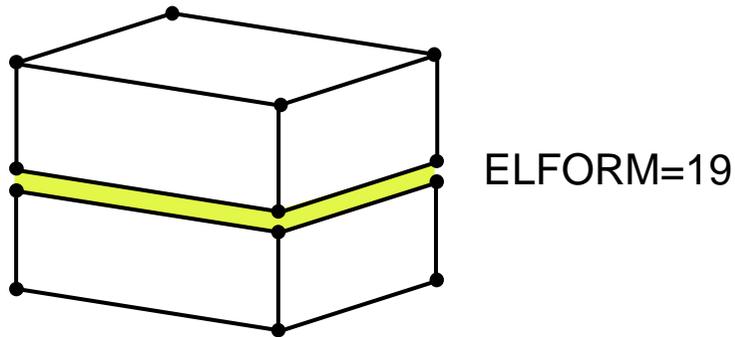
z.B. elastisch:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_T & 0 & 0 \\ 0 & E_T & 0 \\ 0 & 0 & E_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix}$$

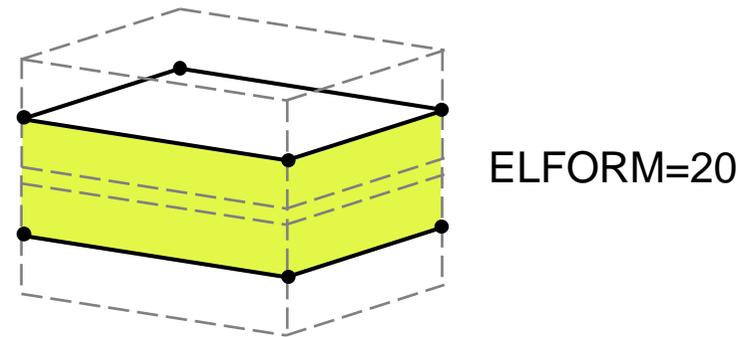
$$[N/mm^2] = [N/mm^3] \cdot [mm]$$

- Lokale Spannungen  $\rightarrow$  Interne Knotenkräfte  $\mathbf{F}_i = \mathbf{R}(t) \sum_{g=1}^4 \mathbf{t}_g N_i(s_g, t_g) \det(J_g)$

- Verbindung zwischen Volumen- oder Schalenelementen



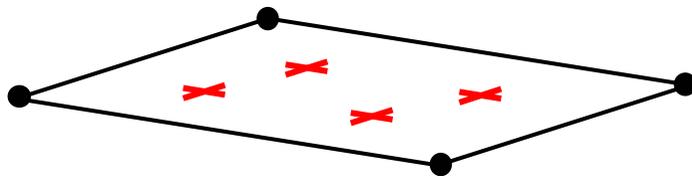
- Dicke "Null": Dichteoption ROFLG
- Zeitschrittberechnung ohne Dicke



- Kohäsivelement mit "Offset"
- Momente = Kräfte · Offset

- Nummerierung!

- Integration in Mittelebene: 2x2 Gauss

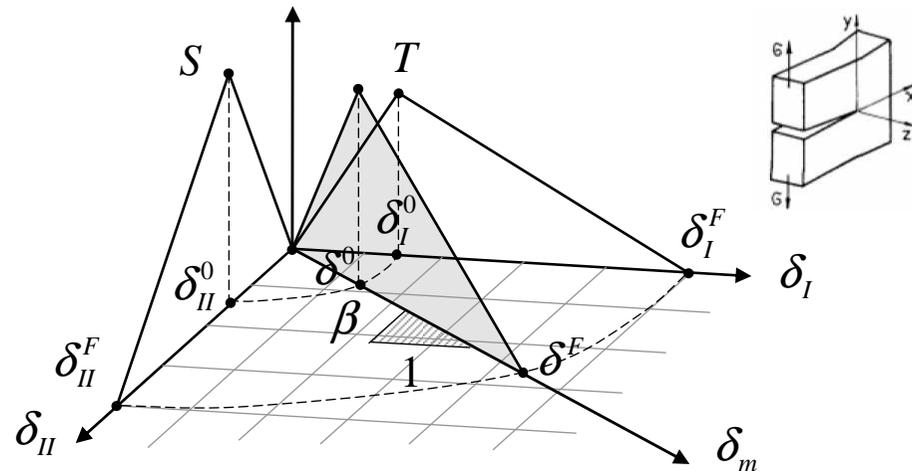
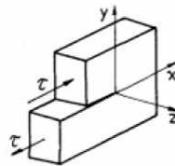


→ Steuerung des Versagens über Materialparameter INTFAIL

# Kohäsivelemente: Materialmodelle

- **\*MAT\_COHESIVE\_....**
- **ELASTIC** (184): rein elastisch, entkoppelt, 2 Parameter, kein Versagen
- **TH** (185): "Tvergaard-Hutchinson", nichtlinear elastisch (pseudo-plastisch-schädigend), 6 Parameter, Entlastung unphysikalisch

- **MIXED\_MODE** (138):  
Elasto-Schädigung,  
Kopplung zw. Mode I (Zug)  
und Mode II (Schub)  
7 Parameter

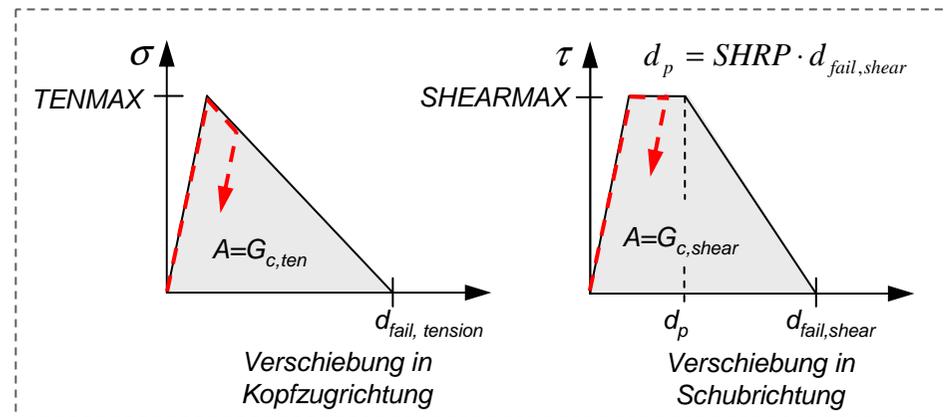


- **GENERAL** (186): wie \*MAT\_138, aber beliebige Kurve anstelle "Dreiecksverlauf"
- **MIXED\_MODE\_ELASTOPLASTIC\_RATE** (240): neu ab 971 R5
- **\*MAT\_USER\_DEFINED\_MATERIAL\_MODELS**: Benutzerschnittstelle

## ■ \*MAT\_ARUP\_ADHESIVE (169)

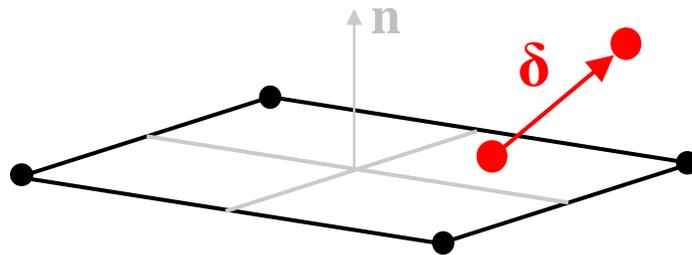
- Normales Volumenelement, das material-intern wie Kohäsivelement formuliert ist.
- Dicke geht in Zeitschrittberechnung ein → nur praktikabel zwischen Schalenelementen
- Versagen ist definiert zu:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}}\right)^{PWRT} + \left(\frac{\tau}{\tau_{\max}}\right)^{PWRS} - 1.0 = 0$$



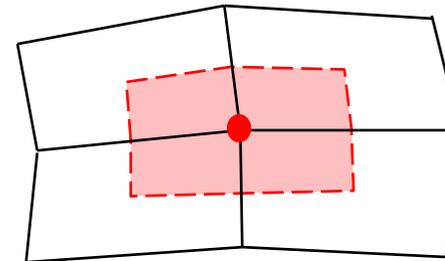
- Der plastische Fluss ist nicht volumenkonstant (nicht isochor,  $\nu_{ue} \neq 0.5$ )
- Dehnratenabhängigkeit kann ebenso berücksichtigt werden wie spezielles Verhalten von Randschichten.

- **Kinematik:** 3 Relativverschiebungen zwischen Slaveknoten und Mastersegment



$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \} \text{ tangential} \\ \leftarrow \text{ normal} \end{array} \right\}$$

- **Material:** Spannungsberechnung wie bei Kohäsivelementen
- Kontaktknotenkräfte ergeben sich dann aus:  
Spannung mal "Slaveknoten-Fläche"



- "Two pass"-Kontaktalgorithmus nicht sinnvoll: Immer **ONE\_WAY** verwenden!
- Elastische Steifigkeit ↔ Penaltysteifigkeit!
- SOFT=1 verwenden

# Tiebreakkontakte: Materialmodelle

- \*CONTACT\_AUTOMATIC\_ONE\_WAY\_SURF.\_TO\_SURF.\_TIEBREAK: Card 4

Variable	OPTION	NFLS	SFLS	PARAM	ERATEN	ERATES	CT2CN	CN
----------	--------	------	------	-------	--------	--------	-------	----

Zeitschritt!

- 14 Optionen mit bis zu 7 Parametern (+3 für Dämpfung bei Option 9)

- Option  $\pm 1$ : ohne Versagen

- Optionen  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ , 4: Abruptes Versagen ohne Entfestigung (spröde)

- Optionen 5, 6/8, 7/10, 9/11: Versagen mit Entfestigung/Schädigung

entsprechen Kohäsivmaterial \*MAT\_138

(9: zwischen Volumenelementen, 11: zwischen Schalenelementen),  
hier einziges Modell mit vollem Mixed-Mode-Verhalten

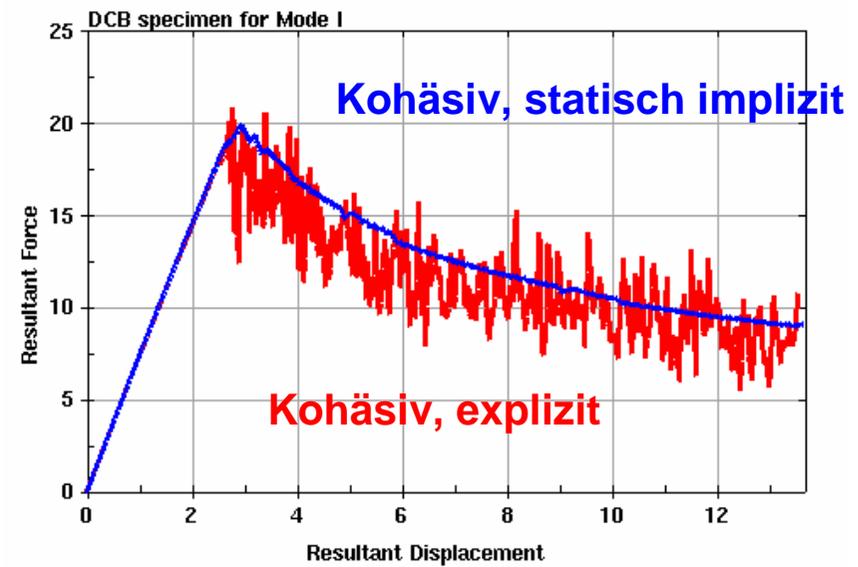
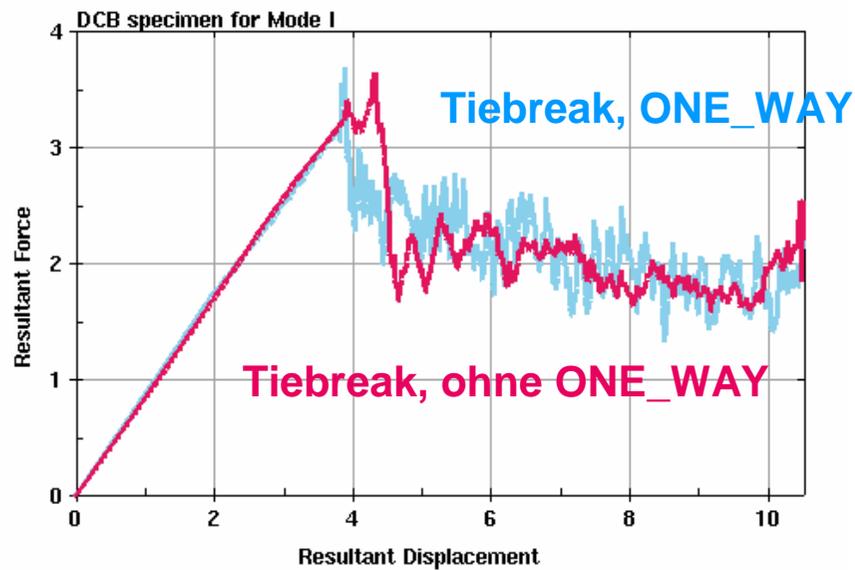
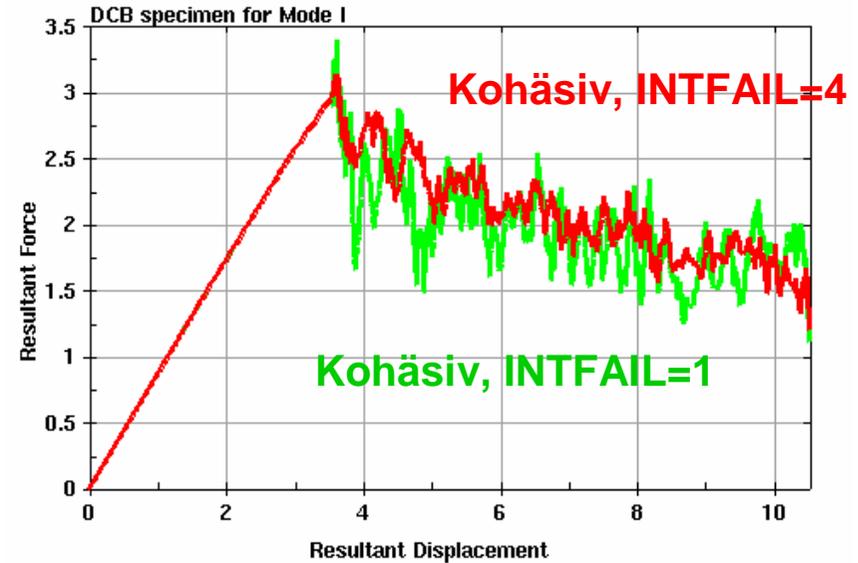
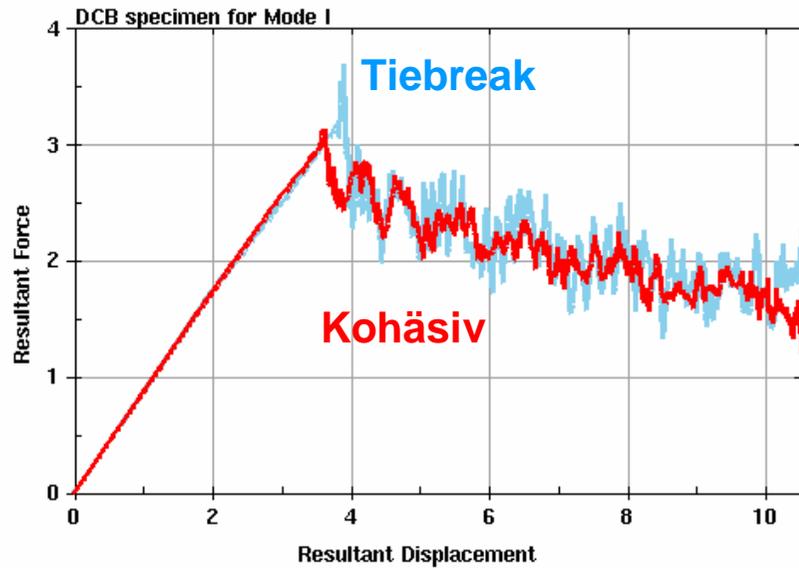
- Parametervergleich \*MAT\_138 und Tiebreakkontakt OPTION=9/11:

EN=CN, ET=CT2CN·CN, GIC=ERATEN, GIIC=ERATES, XMU=PARAM, T=NFLS, S=SFLS

# Vergleich der Methoden

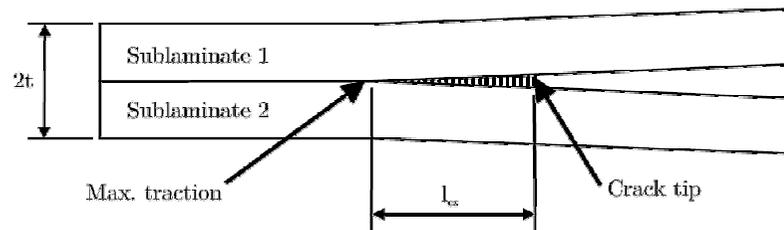
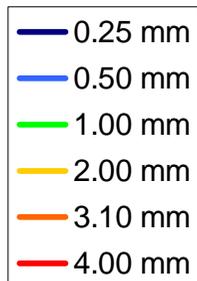
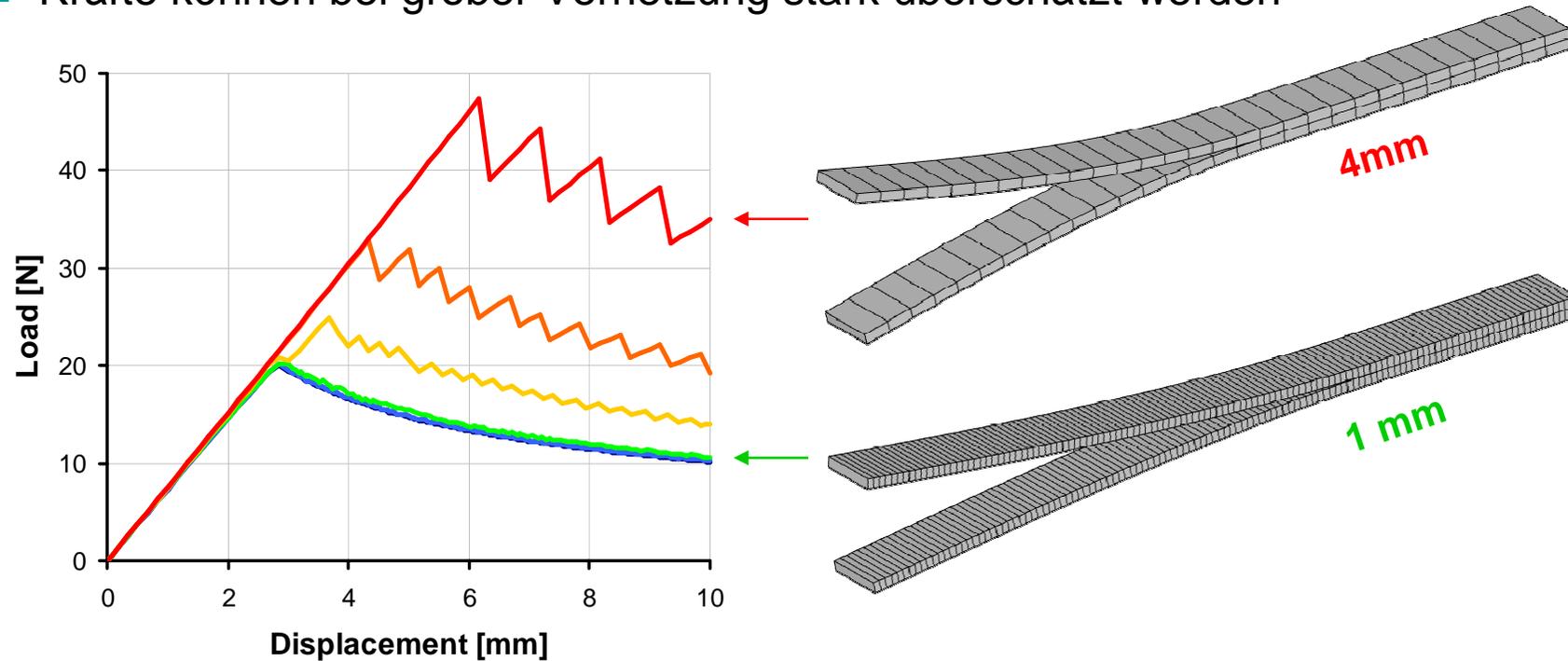
<b>Kohäsivelemente</b>		<b>Tiebreakkontakte</b>
Kongruente Netze oder Tied-Kontakt, Nummerierung	<b>Vernetzung</b>	Beliebige "Partner", keine Elemente
Elasto-Schädigung, Mixed Mode, UserIF, Viskoplastizität	<b>Materialauswahl</b>	Elasto-Schädigung, Mixed Mode
Höhere "Auflösung": glattere Ergebnisse	<b>Ergebnisse</b>	Geringere "Auflösung": rauhere Ergebnisse
Zusatzkontakt oder "Elemente behalten"	<b>Rißschliessen</b>	Automatisch
Elementspannungen, Versagen	<b>Postprocessing</b>	Nur Knotenwerte, Intfor: Contact gap

# Numerische Tests: DCB



# Grobe Vernetzung: Problem

- Kräfte können bei grober Vernetzung stark überschätzt werden

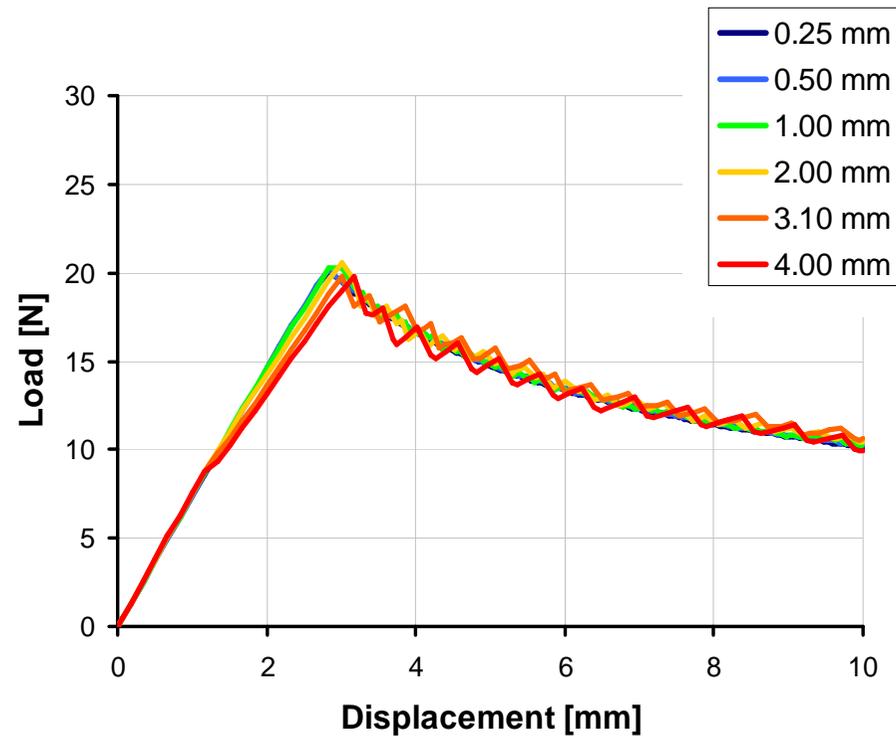
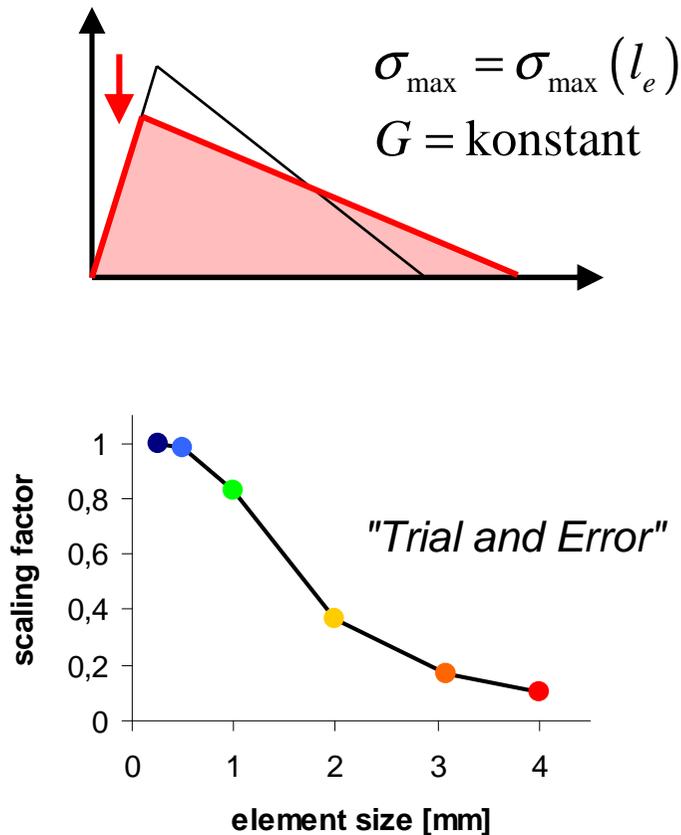


Kohäsivzone kann mit grober Diskretisierung nicht abgebildet werden.

Fig. 5. Length of the cohesive zone.

# Grobe Vernetzung

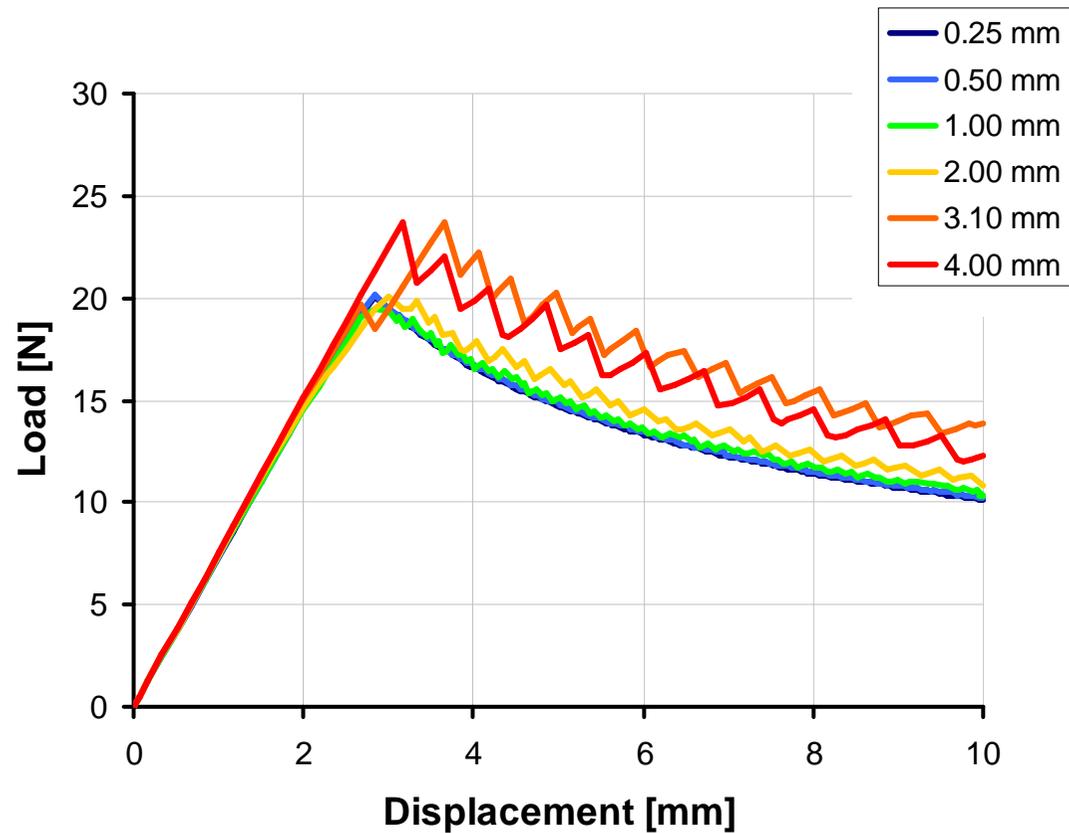
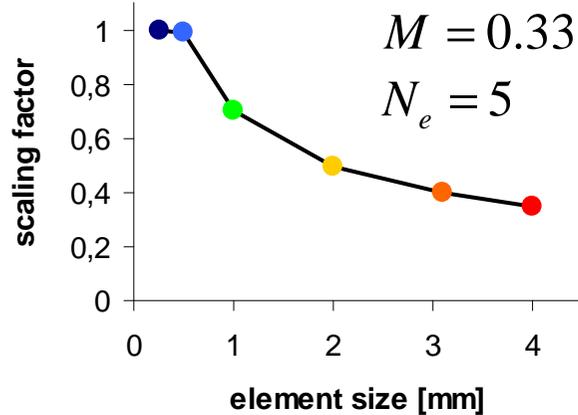
- "Ingenieurslösung": Maximalspannung als Funktion der Elementgröße
- \*MAT\_138: Negative T- und S-Werte verweisen auf entsprechende Kurven
- \*CONTACT\_AUTOMATIC\_...\_TIEBREAK: Negative Werte für NFLS und SFLS



# Grobe Vernetzung

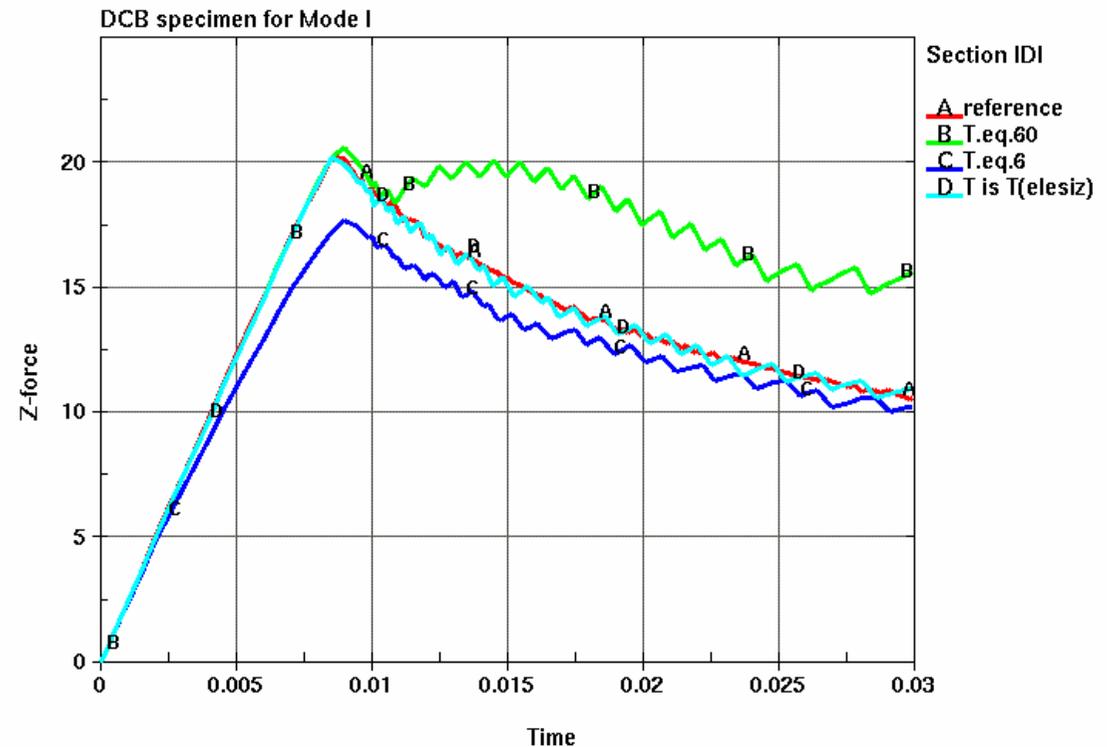
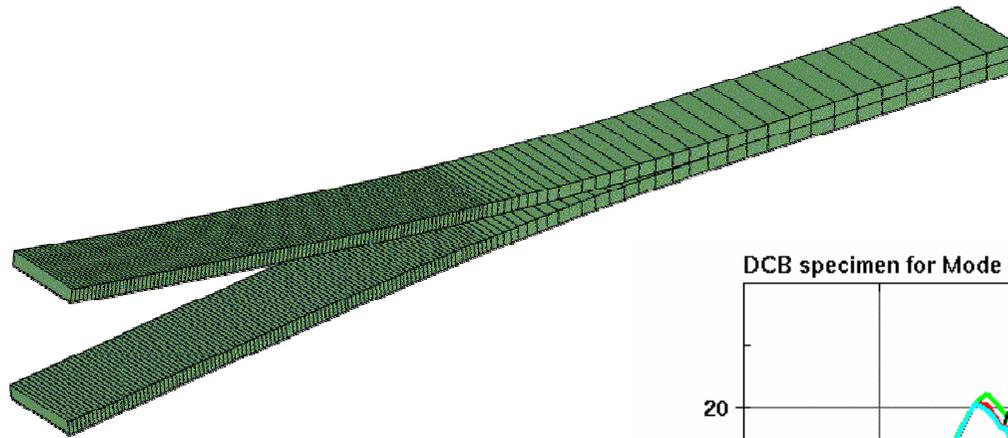
- Alternativ: Formel von Camanho et al. (2005):

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max}(l_e) = \sqrt{M \frac{E_I G_I^c}{N_e l_e}}$$



# Grobe Vernetzung

- Neue Option "elementgrößenabhängige Maximalspannungen" erlaubt korrekte Berechnung mit abgestufter Diskretisierung (versch. Elementgrößen)



- Wenn "geometrisch" möglich, **Kohäsivelemente** benutzen
- **Tiebreakkontakte** für komplexe Geometrien
- Sinnvolle Alternative: **\*MAT\_ARUP\_ADHESIVE**
- **Elementgrößenabhängige Maximalspannungen** für grobe Vernetzungen
  
- Weiterentwicklungen
  - Postprocessing Tiebreakkontakte
  - Materialmodelle
  - Stabilisierung der Rißausbreitung
  - ...