



Neuartiges M²C-Modell zur Beschreibung des geschwindigkeitsabhängigen Werkstoff- und Versagensverhaltens (endlos)faserverstärkter Kunststoffe

Dr. M. Mayer, Prof. Dr. L.W. Meyer, Dr. N. Herzig

Nordmetall GmbH, Hauptstraße 16, D-09221 Adorf/Erzgebirge www.nordmetall.net, info@nordmetall.net

4a Technologietag 2012 – Kunststoffe auf dem Prüfstand, 15./16.02.2012, Pichl

- 1. Einleitung, Motivation und Ziel der Arbeit
- 2. Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung
- 3. Festigkeits- und Versagensmodellierung
- 4. Dehnratenabhängige Materialprüfung und Ergebnisse
- 5. Vergleich FE-Simulation \Leftrightarrow Experiment
- 6. Spezielle Aspekte der Versagensmodellierung des M²C Modells
- 7. Zusammenfassung



<u>Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) werden verstärkt in immer</u> breiteren technischen Anwendungsbereichen eingesetzt



Einleitung, Motivation und Ziel



Motivation

- Experimentelle Untersuchung des geschwindigkeitsabhängigen Werkstoffverhaltens eines [0°|90°] glasfaserverstärkten Kunststoffs
- Konstitutive Modellierung des anisotropen und geschwindigkeitsabhängigen Festigkeits- und Versagensverhalten
- Entwicklung des M²C Modells
- Implementierung als neues geschwindigkeitsabhängigen Materialund Versagensmodell in den FE Code LS-DYNA3D

Einleitung, Motivation und Ziel

- 1. Einleitung, Motivation und Ziel der Arbeit
- 2. Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung
- 3. Festigkeits- und Versagensmodellierung
- 4. Dehnratenabhängige Materialprüfung und Ergebnisse
- 5. Vergleich FE-Simulation \Leftrightarrow Experiment
- 6. Spezielle Aspekte der Versagensmodellierung des M²C Modells
- 7. Zusammenfassung

Verschiedene Basen konstitutiver Materialmodelle



Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung

thickness direction (3)

rection 0° (1)

Entwicklung eines <u>neuen orthotropen (VE) Materialmodells</u> Materialverhalten ist abhängig von

- Zeit
- Verformungsgeschichte
- Anwendung Boltzmann Superpositionsprinzip

$$\sigma_{ij}(t) = \int_{\tau=0}^{\tau=t} \frac{d\varepsilon_{kl}(\tau)}{d\tau} \cdot \mathbf{G}_{ijkl}(t-\tau) \cdot d\tau$$

- σ_{ij} Spannungstensor
- \mathcal{E}_{kl} Dehnungstensor
- $G_{ijkl}(t)$ Relaxationsfunktion
- $G_{ijkl}(t)$: mechanische Eigenschaften, bezeichnet als "Relaxationsfunktion"

• Prony-Reihe
$$G_{ijkl}(t) = G_{ijkl}^{\infty} + \sum_{n=1}^{N} G_{ijkl}^{n} \exp\left(-\frac{t}{\lambda^{n}}\right)$$
 mit Relaxationszeiten $\lambda^{n} = \frac{\eta_{n}}{G^{n}}$

RDMETALL

$$\sigma_{ij}(t) = G_{ijkl}^{\infty} \varepsilon_{kl}(t) + \sum_{n=1}^{N} \left[G_{ijkl}^{n} \varepsilon_{kl}(t) + \frac{-G_{ijkl}^{n}}{\lambda^{n}} \int_{0}^{t} \varepsilon_{kl}(\tau) \exp \left(-\frac{(t-\tau)}{\lambda^{n}}\right) d\tau \right]$$

vollständige Verformungsgeschichte in Gleichung → direkte Implementierung in FE-Code nicht möglich

Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung



Ziel: Spannungsinkrement $\Delta \sigma_{ij}(t_m)$ infolge Dehnungsinkrement $\Delta \varepsilon_{ij}(t_m)$

> Zeitschrittgröße $h = t_m - t_{m-1}$

➔ Finale Gleichung

$$\Delta \sigma_{ij}(t_m) = G_{ijkl}^{\infty} \Delta \varepsilon_{kl}(t_m) + \sum_{n=1}^{N} \left\{ G_{ijkl}^n \Delta \varepsilon_{kl}(t_m) \frac{\lambda^n}{h} \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{\lambda^n}\right) \right] \right\} - \sum_{n=1}^{N} \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{\lambda^n}\right) \right] \sigma_{ij}^n(t_{m-1}) \right\}$$

Spannungsinkrement enthält:

- elastisches
 Spannungsinkrement
- viskoelastische Spannungen des aktuellen Zeitschritts
- Relaxation der viskoelastischen Spannungen des vorherigen Zeitschritts (Geschichte)

implementiert in den FE-Code LS-DYNA3D

- ein elastischer Zweig
- 6 parallel angeordnete Maxwell-Zweige
- 6 festgelegte Relaxationszeiten
- $\lambda_1 = 0,7 \cdot 10^{-1} s_{...} \qquad \lambda_6 = 0,7 \cdot 10^{-6} s_{...}$



generalisiertes Maxwell-Modell

Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung

- 1. Einleitung, Motivation und Ziel der Arbeit
- 2. Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung
- 3. Festigkeits- und Versagensmodellierung
- 4. Dehnratenabhängige Materialprüfung und Ergebnisse
- 5. Vergleich FE-Simulation \Leftrightarrow Experiment
- 6. Spezielle Aspekte der Versagensmodellierung des M²C Modells
- 7. Zusammenfassung



Versagenskriterien / Versagensmodelle für FKV

- ca. 1000 verschiedene Versagensmodelle f
 ür FKV bekannt
- Versagen von FKV deutlich komplexer im Vergleich zu isotropen Werkstoffen
 - heterogene und anisotrope Materialstruktur führt zu vielen unterschiedlichen Versagensarten
- Versagenskriterien / -modelle unterteilbar in
 - mathematisch basierte Modelle
 - physikalisch basierte Modelle

Physikalisch basierte Versagensmodelle

- separate Betrachtung unterschiedlicher Einzel-Versagensbedingungen
- z.B. Hashin [Hashin (1980)]
- Versagen von wirkenden Spannungen abhängig

World Wide Failure Exercise (WWFE)

Versagensmodelle für UD-Laminate, quasistatisch

- Wirkebene-Kriterium [Puck (1996)]
 - Berechnung des Bruchwinkels aufwendig
- Failure Mode Concept (FMC) [Cuntze (2004, 2007)]
 - basiert auf Tensor-Invarianten
 - 5 Bruchmoden
 - 2 Faserversagen (FF)
 - 3 Zwischenfaser-Versagen (IFF)
 - 1 Bruchmode
 - \equiv 1 Versagensmechanismus
 - **≡ 1 Basisfestigkeit**



Failure Mode Concept (FMC) für UD-Laminate

> Beispiel: Versagenskörper/fläche im $\sigma_2 - \tau_{21}$ Spannungsraum für GFK [Cuntze (2007)]



Failure Mode Concept (FMC) für UD-Laminate

> Beispiel: Versagenskörper/fläche im $\sigma_2 - \tau_{21}$ Spannungsraum für GFK [Cuntze (2007)]



Interaktion von Bruchmoden: Serienschaltung verschiedener Moden -Kombination der Einzelanstrengungen (Stress Efforts) zur Gesamtanstrengung

Failure Mode Concept (FMC) für UD-Laminate

> Beispiel: Versagenskörper/fläche im $\sigma_2 - \tau_{21}$ Spannungsraum für GFK [Cuntze (2007)]



Interaktion von Bruchmoden: Serienschaltung verschiedener Moden -Kombination der Einzelanstrengungen (Stress Efforts) zur Gesamtanstrengung

> Allgemein: $Eff^{m} = \left(Eff_{\perp}^{\sigma}\right)^{m} + \left(Eff_{\perp\parallel}\right)^{m} + \left(Eff_{\perp}^{\tau}\right)^{m} = 1$

mit: Stress Effort *Eff*^{mode} : Anteil der Tragfähigkeitskapazität des Materials m : Interaktionskoeffizient (2.0 < m < 3.0 z.B. für CFK /GFK)

Failure Mode Concept (FMC) für Gewebe / Mehrschicht-Verbunde



m Interaktionskoeffizient ; $\mu_{31} = \mu_{32}$ werkstoffabhängige Reibungskoeffizienten

FMC für Gewebe / Mehrschicht-Verbunde (MSV)

Erweiterung des Failure Mode Concept (FMC) für Mehrschicht-Verbunde unter dynamischer Belastung



Experimentelle Versuche: Mit Kenntnis der dynamischen Festigkeiten $\overline{R}_{\star,dyn} = f(\dot{\varepsilon})$ > Vergrößerung der Versagensfläche unter dynamischer Belastung abbildbar

Erweiterung FMC: MSV unter dynamischer Belastung

- 1. Einleitung, Motivation und Ziel der Arbeit
- 2. Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung
- 3. Festigkeits- und Versagensmodellierung
- 4. Dehnratenabhängige Materialprüfung und Ergebnisse
- 5. Vergleich FE-Simulation \Leftrightarrow Experiment
- 6. Spezielle Aspekte der Versagensmodellierung des M²C Modells
- 7. Zusammenfassung

Werkstoffprüfung

Werkstoffverhalten eines [0°|90°] GF/EP wurde untersucht

- 7 Dekaden Dehnungsgeschwindigkeit von quasistatisch bis Impakt-Belastung
- verschiedene Belastungsarten
- unterschiedliche Belastungsrichtungen

Prüfeinrichtungen

- Universalprüfmaschinen *ċ* ~ 10⁻³ s⁻¹

Fallwerk

```
\dot{\mathcal{E}} ~ 50 ... 100 s<sup>-1</sup>
```

> Hopkinson Bar (SHPB) $\dot{\mathcal{E}} \sim 10^3 \, \text{s}^{-1}$



Fallwerk und Schema des Fallwerks, Nordmetall GmbH



e.o. Extensometer

Hopkinson Bars, NM

Materialprüfung und experimentelle Ergebnisse

Experimentelle Ergebnisse: Werkstoffverhalten in Faserrichtung

DMETALL



- 1. E-Modul
- 2. Spannungs-Verläufe degressiv
- 3. Druckfestigkeit

Materialprüfung und experimentelle Ergebnisse

quasi-statischer Belastung

Experimentelle Ergebnisse: Werkstoffverhalten in Faserrichtung

DMETALL



3 Geschwindigkeitseffekte

- 1. E-Modul
- 2. Spannungs-Verläufe degressiv
- 3. Druckfestigkeit



Erhöhung E-Modul + 55 % gegenüber quasi-statischer Belastung

Festigkeitssteigerung + 90 % gegenüber quasi-statischer Belastung

Materialprüfung und experimentelle Ergebnisse

Werkstoffversagen in Faserrichtung



120 viskoelastische Druckspannung [MPa] *ἑ* ≈1000 s⁻¹ Ė≈ 50 s⁻¹ 100 1 s⁻¹ *ἑ* ≈ quasistat. 80 60 40 20 0,0100 0,0000 0,0075 0,0125 0,0025 0,0050 wahre Stauchung [-]

Versagen /Versagensmechanismen

- erstes Versagen zwischen Faser/Matrix
- Iokales Faserknicken (Fasern, -bündel)
 - ➔ Mikro-Delamination
- 45° interlaminares Scherband
- Keilwirkung → Delamination

Viskoelastische Spannungen (overstress)

→Berechnung konstitutiver Parameter

Materialprüfung und experimentelle Ergebnisse

- 1. Einleitung, Motivation und Ziel der Arbeit
- 2. Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung
- 3. Festigkeits- und Versagensmodellierung
- 4. Dehnratenabhängige Materialprüfung und Ergebnisse
- 5. Vergleich FE-Simulation \Leftrightarrow Experiment
- 6. Spezielle Aspekte der Versagensmodellierung des M²C Modells
- 7. Zusammenfassung

Vergleich experimenteller Versuchsergebnisse mit der FEM 1. Faserrichtung (1 und 2-Richtung)



wahre Stauchung [-]

- ➤ Meyer & Mayer Model mit Erweiterung dynamisches FMC (→ M²C-Modell)
- Materialmodell exzellent geeignet zur Beschreibung des statischen und dynamischen Werkstoffverhaltens
- Versagensmodell geeignet zur Berechnung des geschwindigkeitsabhängigen Versagensbeginns

Faserrichtung	Druckversuch bei 50 s ⁻¹		Druckversuch bei 1250 s ⁻¹	
	E ₁ [GPa]	Festigkeit [MPa]	E ₁ [GPa]	Festigkeit [MPa]
Experiment	46.2	415	55	527
FEM (M ² C)	46.8	403	50.5	534
DELTA [%]	+1.3	-2.9	-8.2	+1.3

5. Vergleich FE-Simulation \Leftrightarrow Experiment

Überprüfung bei "unbekannten" dynamischen Belastungsbedingungen



- M²C und M²H führen zu annähernd identischen Festigkeiten im Vergleich zum realen Versuch
- > gute Übereinstimmung beider Modelle



- M²C-Modell optimale Übereinstimmung
 Schubfestigkeit steigt mit wirkenden
 Druckspannungen in Dickenrichtung
- M²H-Modell 76 % geringe Festigkeit als realer Versuch

M²C-Modell optimal zur Abbildung des Material- und Versagensverhaltens

5. Vergleich FE-Simulation \Leftrightarrow Experiment

- 1. Einleitung, Motivation und Ziel der Arbeit
- 2. Anisotropes Werkstoffverhalten und Modellierung
- 3. Festigkeits- und Versagensmodellierung
- 4. Dehnratenabhängige Materialprüfung und Ergebnisse
- 5. Vergleich FE-Simulation \Leftrightarrow Experiment
- 6. Spezielle Aspekte der Versagensmodellierung des M²C Modells
- 7. Zusammenfassung

Besonderheiten des M²C-Modells

Rechteckige interlaminare Scher-Hut-Probe unter dynamischer Belastung > M²C-Model unterscheidet 9 verschiedene Bruchmoden



Total Stress Effort [0 ... 1] (-)

- a. Gesamt-Anstrengung Eff^m
- Summe der Einzel-Anstrengungen
- Bestimmung des Versagensorts



Mode 9: interiam. Zugversagen in Dickenrichtung Mode 9: interiam. Scherversagen in 31 Ebene dominant Failure Mode [0 ... 9] (-)

- b. Dominierende Bruchmoden
- Maximale Einzel-Anstrengung Eff ^{mode}
- Bestimmung der Versagensursache

Spezielle Aspekte der Versagensmodellierung

Besonderheiten des M²C-Modells

Rechteckige interlaminare Scher-Hut-Probe unter dynamischer Belastung > M²C-Model unterscheidet 9 verschiedene Bruchmoden





dominant Failure Mode [0 ... 9] (-)

Wesentlich für Design/Dimensionierungsprozesse:

Berechnung von Versagensort und Bruchmode

Spezielle Aspekte der Versagensmodellierung

Zusammenfassung

Modellierung des anisotrop-dehnratenabhängigen Werkstoffverhaltens

- viskoelastische Modelle insgesamt am besten zur Modellierung des geschwindigkeitsabhängigen Werkstoffverhaltens von FKV geeignet
- Entwicklung des neues 3D geschwindigkeitsabhängigen M²C-Modells
- > exzellente Übereinstimmung zwischen Experiment und FEM
- Überprüfung M²C-Modells bei "unbekannten" Belastungsbedingungen erfolgreich

Fortschritte und Neuheiten des M²C-Modells

- M²C-Model gestattet realitätsnahe Berechnung des dehnratenabhängigen Werkstoffverhaltens und des Versagensbeginns
- M²C-Modell zur Abbildung des dynamischen Dilatationsverhaltens geeignet
- M²C-Modell gewährleistet die Berechnung des Versagensorts und des eintretenden Bruchmodus



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Für zusätzliche Informationen kontaktieren Sie bitte:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. L. W. Meyer; e-mail: lothar.meyer@nordmetall.net Dr.-Ing. M. Mayer; e-mail: michael.mayer@nordmetall.net Dr.-Ing. N. Herzig; e-mail: norman.herzig@nordmetall.net



DrIng. Norman Herzig		
Geschäftsführer		

Tel: +49 371 503490 22 @: norman.herzig@nordmetall.net



Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Lothar W. Meyer Geschäftsführer

Tel.: +49 371 503490 21 @: lothar.meyer@nordmetall.net



Dr.-Ing. Michael Mayer Projektleiter

Tel.: +49 371 503490 26 @: michael.mayer@nordmetall.net

Nordmetall GmbH

Hauptstraße 16 D-09221 Adorf / Erzgebirge Germany

Tel.:	+49 371 503490 0		
Fax:	+49 371 503490 11		
WWW:	http://www.nordmetall.net		
@:	info@nordmetall.net		

