

## ALE- und FSI-Konzepte in LS-DYNA zur Berechnung von Explosionslasten auf deformierbare Strukturen

André Haufe, Karl Schweizerhof  
*DYNAmore GmbH*

Gert Hönicke  
*Gebr. Schneider GmbH & Co. KG*

Dynamore GmbH  
Industriestraße 2  
70565 Stuttgart  
<http://www.dynamore.de>

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 1





## Übersicht

- Normative Regelung bei Explosionslasten
  - *Stossrohrversuch*
  - *Feldversuche*
- Aspekte der Simulation
  - *Diskretisierung*
  - *Material- & Versagensmodelle für ESG & VSG*
- Lastaufbringung
  - *Ersatzlast über Friedlander-Gleichung*
  - *ConWep*
  - *Fluid-Struktur-Interaktion*
- Beispiele
  - *Freilandversuch (Studie)*
  - *Stossrohrversuch*
  - *Fassadenelement unter Explosionslast*
- Zusammenfassung

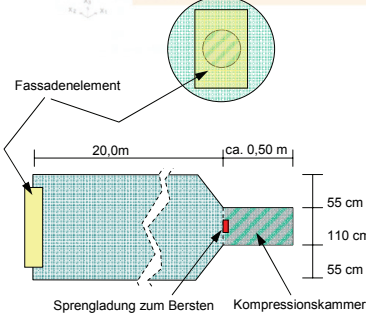
LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 2

## Normative Regelung - Stoßversuch

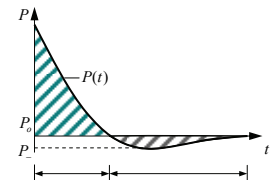



### Explosionshemmung DIN 13123-1

- Klassifizierung der Explosionsdruckhemmung nach Spitzendruck und positivem spezifischem Impuls:
  - **EPR1:** 0,5 bar und  $i_+ = 3,7$  bar ms
  - **EPR2:** 1,0 bar und  $i_+ = 9,7$  bar ms
  - **EPR3:** 1,5 bar und  $i_+ = 15,0$  bar ms
  - **EPR4:** 2,0 bar und  $i_+ = 22,0$  bar ms
- Öffnungsgrößen sind begrenzt
- etwaige Flügel müssen geschlossen bleiben
- Splitterbildung ist festzustellen
- ...



$$P(t) = P_{\max} \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) e^{-\left(\frac{t}{t_+}\right)}$$





$$i_+ = \int_{t_+} P(t) dt$$

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005

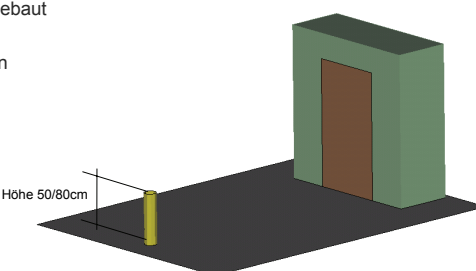
3

## Normative Regelung - Feldversuch

### Explosionshemmung DIN 13123-2



- Klassifizierung der Explosionsdruckhemmung nach Spitzendruck und positivem spezifischem Impuls:
  - **EXPR1:** 3 kg TNT in 5 m Abstand,  $P_{so} \geq 0,75$  bar,  $i_{so} \geq 1,05$  bar ms
  - **EXPR2:** 3 kg TNT in 3 m Abstand,  $P_{so} \geq 2,3$  bar,  $i_{so} \geq 1,65$  bar ms
  - **EXPR3:** 12 kg TNT in 5,5 m Abstand,  $P_{so} \geq 1,7$  bar,  $i_{so} \geq 2,25$  bar ms
  - **EXPR4:** 12 kg TNT in 4 m Abstand,  $P_{so} \geq 3,6$  bar,  $i_{so} \geq 3,00$  bar ms
  - **EXPR5:** 20 kg TNT in 4 m Abstand,  $P_{so} \geq 6,3$  bar,  $i_{so} \geq 4,00$  bar ms
- Ladung wird frei positioniert
- Zu prüfendes Element in Betonstruktur eingebaut
- Öffnungsgrößen sind begrenzt
- etwaige Flügel müssen geschlossen bleiben
- Splitterbildung ist festzustellen
- ...



LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005

4

## Aspekte der Simulation - Übersicht

**Simulationswerkzeug**



- Expliziter Finite-Elemente-Code LS-DYNA
- Ursprünge im Verteidigungsbereich (70er & 80er Jahre)
- Zwischenzeitlich Einsatz bei allen hochgradig dynamischen Problemstellungen (Crash, Impact, Blast in Kombination mit Fluid-Struktur-Interaktion)
- Große Elementbibliothek, aber hier: Lineare Elemente (bilineare Ansatzfunktionen, unterintegriert & *Assumed-Strain-Hourglass*-Stabilisierung)
- Vielfältige Kontaktformulierungen und für FSI *constraint*-Methoden
- Blast-spezifische Belastungsmodelle
- ...





**Herausforderungen für Blast-Berechnungen von Fassaden-Elementen**

- Materialmodelle (Glas, Gummimaterialien, Polymere...)
- Versagensmodelle (Glas, Ablösen von Klebungen etc.)
- Scheibenzwischenraum
- Belastungsmodelle für FSI
- ...

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 5

## Modellierung von Glas - Überblick

Floatglas	ESG	VSG aus FG	VSG aus ESG
			
grobe, scharfkantige Splitter	kleine, stumpfkantige Krümel <b>Therm. Vorspannung</b>	grobe, scharfkantige Splitter, durch PVB-Folie zusammengehalten <b>Resttragfähigkeit</b>	kleine, stumpfkantige Krümel, durch PVB-Folie zusammengehalten <b>Resttragfähigkeit</b>
↓	↓	↓	↓
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ideal linear-elastisch</li> <li>• Versagen durch Haupt-Dehnungskriterium</li> <li>• für Strukturberechnungen mit Schalenformulierungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorspannung über Spannungsinitialisierung der Schalenschicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koinzidente Schalendefinition</li> <li>• Einzelschalen für PVB &amp; Float-Glas (versch. Modelle)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koinzidente Schalendefinition</li> <li>• Einzelschalen für PVB &amp; ESG (versch. Modelle)</li> </ul>

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 6

### Vorspannung in ESG

#### Vorspannungsverlauf (Eigenspannungszustand)

**Float:**  $\sigma_{BZ} \approx 45 \text{ N/mm}^2$

- I. offene Mikro-/Makrorisse
- II. Rissverschluss auf Druckseite  
Risswachstum auf Zugseite
- III. Zerstörung der Glasscheibe  
(Bruchsprung auf Zugseite)

**ESG:**  $\sigma_{BZ} \approx 120-150 \text{ N/mm}^2$

- I. überdrückte Mikro-/Makrorisse
- II. Rissverschluss auf Druckseite  
kein Risswachstum auf Zugseite
- III. Risswachstum auf Zugseite  
(Bruchsprung auf Zugseite)

$\frac{\sigma_z}{\sigma_D} \approx \frac{1}{2}$  mit  $\sigma_D \approx 100 \text{ N/mm}^2$

**Annahme:**  
Parabelförmiger Verlauf

$$f(\zeta) = \frac{|\sigma_D|}{2} (1 - 3\zeta^2)$$

➔ Biegezugfestigkeit von ESG  $\approx$  Biegezugfestigkeit von Floatglas  
+ zusätzlicher Anteil aus Oberflächendruckspannung

[Nguyen/Haufe/Kolling 2004]

### Modellierung von ESG -1-

#### Schalenelement und Materialmodell

- 4knotiges unterintegriertes bilineares Schalenelement
- Assumed-Strain-Hourglass-Stabilisierung
- Bilineares elasto-plastisches Materialgesetz
- Versagensdefinition über Hauptversagensdehnung  $\epsilon_{1,max} = \epsilon_f$

#### Thermische Vorspannung



- Spannungsinitalisierung in jeder Schalenschicht (Integrationspunkt)
- Keine Festigkeitssteigerung gegenüber dem Modell für Floatglas, ohne Modifikation der Versagensdehnung!

➔ Erhöhung von  $\epsilon_f$  :

$$\sigma_f^{ESG} = \sigma_f^{float} + \sigma_p$$

$$\epsilon_f^{ESG} = \epsilon_f^{float} + \epsilon_p = 0.001 + \frac{\sigma_p}{E} \approx 0,002\bar{3}$$

### Modellierung von ESG -2-

**Berücksichtigung von Kurzzeitfestigkeit bei Stoßbelastungen**

- Festigkeit wie bei fast allen ingenieurmäßig relevanten Materialien abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit
- Nach *Kerckhof [1981]*:

$$\sigma_f = \left( \frac{2(n_v + 1)}{(n_v - 2)S_v f^{n_v} a_0^{\frac{n_v-2}{2}} \dot{\sigma}} \right)^{\frac{1}{n_v+1}}$$

mit  $\dot{\sigma} = 5000 \text{ MPa/s}$  konstante Spannungsrate

$S_v = 0,87$   
 $n_v = 27$

$a_0 = 0,1 \text{ mm}$

$f^{n_v}$

Konstanten aus der Bruchmechanik für unterkritisches Risswachstum

Anfangsrisstiefe



Korrekturfunktion

➔ Damit Festigkeitssteigerung um Faktor 1,5 bei float-Glas:  $\epsilon_f^{\text{float, dyn}} = 1,5 \epsilon_f^{\text{float}}$

➔ Festigkeitssteigerung bei ESG nur für nicht vorgespannten Anteil:  $\epsilon_f^{\text{ESG, dyn}} = 1,5 \epsilon_f^{\text{float}} + \frac{\sigma_p}{E} \approx 0,003$

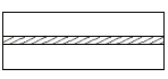
LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005
9

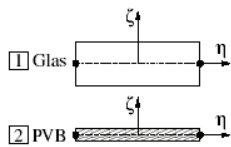
### Modellierung von VSG: Modell A





**Zwei koinzidente Schalen**  
[Timmel & Kolling 2003]

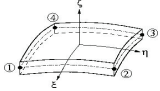
Glas  
PVB  
Glas



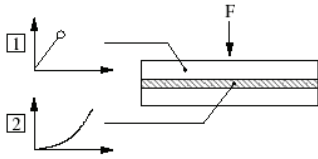


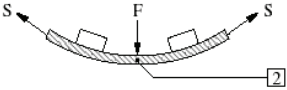


- Elementformulierung und Materialgesetz  
*Belytschko-Lin-Tsay* Schalenformulierung  
 i linear-elastisch mit Versagen für das Glas  
 © hyperelastisch ohne Versagen für PVB



- Tragwirkung







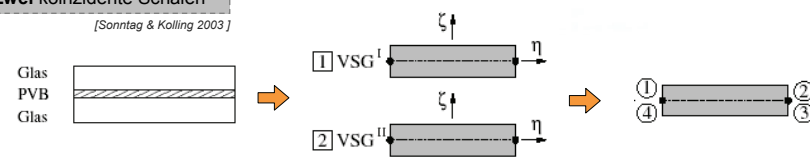
LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005
10



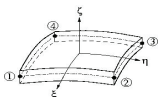
### Modellierung von VSG: Modell B

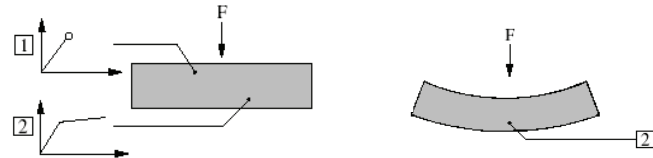
**Zwei koinzidente Schalen**  
[Sonntag & Kolling 2003]



- Elementformulierung und Materialgesetz  
*Belytschko-Lin-Tsay* Schalenformulierung  
 i linear-elastisch mit Versagen für das Glas  
 © hyperelastisch ohne Versagen für PVB





- Tragwirkung

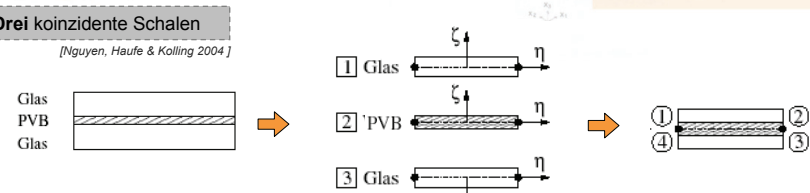


LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 11

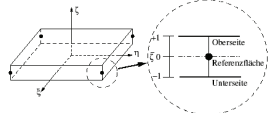
### Modellierung von VSG: Modell C

**Drei koinzidente Schalen**  
[Nguyen, Haufe & Kolling 2004]

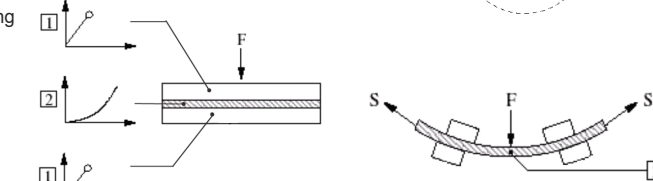


- Elementformulierung und Materialgesetz  
*Hughes-Liu* Schalenformulierung  
 i linear-elastisch mit Versagen für das Glas  
 © hyperelastisch ohne Versagen für PVB  
 φ linear-elastisch mit/ohne Versagen für das Glas





Referenzfläche der Schale kann nach außen gelegt werden!

- Tragwirkung



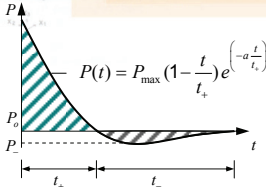
LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 12

## Lastmodelle - Übersicht

### Vorgabe der Friedlander-Kurve

- Parameter aus vorliegendem Stossrohrversuch bzw. Eingabe der Messreihe

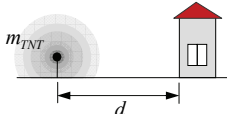


$$P(t) = P_{\max} \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) e^{-a \frac{t}{t_+}}$$

### Vorgabe von Explosionslast/Entfernung über ConWep

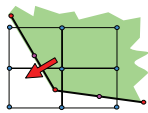
[Randers-Pehrson & Bannister 1997]

- Explosionsdruckgleichungen zur Beschreibung des Feldversuchs
- $P(t) = f(m_{TNT}[kg], d[m])$
- Einfache skalare Gleichung





### Fluid-Struktur-Interaktions-Berechnung

- Druckbelastung auf Struktur über Euler-Diskretisierung des Explosionsraums (Umgebungsluft)
- Equation-of-State, Burn-Material für Luft bzw. Explosiva
- Algorithmen zur Interaktion Luft/Explosiva vs. Struktur



LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005
13

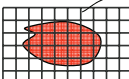
## FSI: Anforderungen

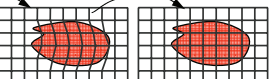
### Fluid-Struktur-Interaktions-Berechnung


- Euler-Löser
  - Geeignete Advektions-Algorithmen
  - Multi-Material-Formulierung
  - Netzglättungsverfahren (ALE)
- Interaktion
  - Penalty- und/oder Constraint-Verfahren
  - Leakage/Porosität
  - Stabilität

Lagrange Schritt

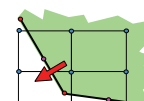


Advektion

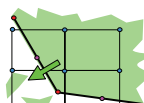





Penalty-Methode



Kein Leakage!



Aber: Porosität!



Blockage

### Vorteile

- Berücksichtigung von Düsen- und Diffusor-Effekten etc. bei Realgebäuden (z. B. vorgelagerte Stützen)

### Nachteile

- Sehr umfangreiche Modelle
- Sehr lange Rechenzeiten

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005
14

### FSI: Anwendung i. d. Kurzezeitdynamik

**Beispiel aus der täglichen Anwendung**

- Tankversuch eines Airbag-Generators

**KANNENVERSUCH**  
 Time = 0  
 Vector of Total-velocity  
 min=0, at node# 113928  
 max=0, at node# 113928

Fringe Levels  
 0.000e+00  
 0.000e+00  
 0.000e+00  
 0.000e+00  
 0.000e+00  
 0.000e+00  
 0.000e+00  
 0.000e+00  
 0.000e+00  
 0.000e+00

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 15

### Beispiel 1: Feldversuch DIN EN 13124-2

**Prinzipielle Modelluntersuchung – nicht validiert!**

- 60 kg TNT (äquivalente Ladung)

Sprengstoff	Mat High Explosive Burn	EDS-JWJ-Parameter
TNT	$\rho_0$	1,63 g/cm <sup>3</sup>
	$v_0$	6.930 m/s
	$p_{cu}$	21.000 MPa
	A	373.800 MPa
	B	3.747 MPa
	$R_1$	4,15
$R_2$	0,9	
$\omega$	0,35	
$\sigma_0$	8.000 MPa·m <sup>3/2</sup>	

- Prüfkörper aus Stahl  
 $t=5\text{mm}$ , elastisch modelliert
- Abstand 4m
- Nichtreflektierende Randbedingungen für Euler-Gebiet


Verschiebung [cm]  
Zeit [microsec]

Druck [Mbar]  
Zeit [microsec]

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 16



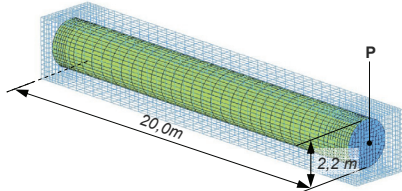
### Beispiel 2: Stoßrohr DIN EN 13124-1



Berechnung eines Stoßrohrversuchs

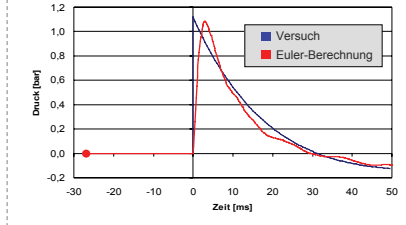
- Modellbelastung durch spezifische Menge TNT (äquivalent zum Vorkammerdruck)  
(Hier: TNT-Ladung als JWL-EOS und MAT\_EXPLOSIVE\_BURN modelliert)
- Stoßrohrlänge 20,0 m, Durchmesser 2,2 m
- Kein vorgeschaltetes Fassadenelement, da lediglich die Druckkurve ermittelt werden soll.

➔ Mit ca. 13000 Knoten und 11000 Elementen ist die Diskretisierung derzeit noch zu grob!



20,0m  
2,2 m

Druckverlauf am Punkt P



LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005
17

### Beispiel 2: Stoßrohr DIN EN 13124-1



Berechnung eines Stoßrohrversuchs – Animation der Druck-Isosfläche

Blast with ALE (Schneider)  
Time = 0





Fringe Levels

- 3.000e-06
- 2.500e-06
- 2.000e-06
- 1.500e-06
- 1.000e-06
- 5.000e-07
- 0.000e+00

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005
18

### Beispiel 3: Fassadenelement

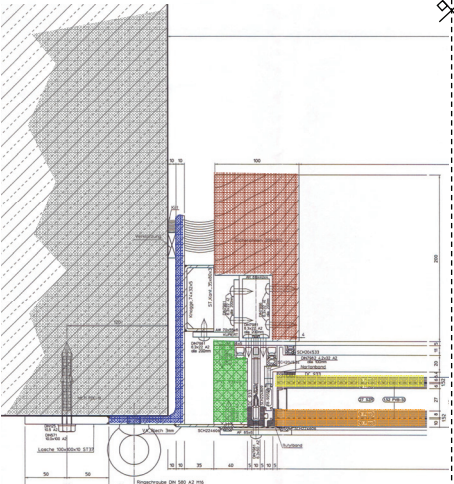
#### Fassadenelement des Schottischen Parlaments - Machbarkeitsstudie

- Isolierverglasung aus Verbundsicherheitsglas
  - 10 + 8 mm Float-Glas
  - 6 + 6 mm Float-Glas
- Detaillierte Modellierung des Rahmenquerschnitts
- Annahmen: Linear-elastische Materialdaten für alle Gummimaterialien, Stähle Hölzer etc.
- Zwei Glasmodelle wurden untersucht
  - Keine quantitative Validierung anhand des Versuchs
  - Materialdaten aus Literatur bzw. validierten Impakt-Berechnungen
- Scheibenzwischenraum mit Uniform-Pressure Modell modelliert [Brendler, Haufe & Umnenhofer 2004]
- Friedlander-Kurve für die Belastung:

$$P(t) = P_{\max} \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) e^{-\left(\frac{t}{t_+}\right)^a} \quad \text{mit } A = 1,03$$

$$P_{\max} = 1,12 \text{ bar}$$

$$t_+ = 31 \text{ bar} \cdot \text{ms}$$



LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 19

### Beispiel 3: Fassadenelement




#### Fassadenelement des Schottischen Parlaments - Versuchsergebnisse

- Extreme Deformationen der PVB-Folie
- Beide VSG-Gläser verbleiben im Rahmen
- Geringes Eindringen von Splintern i. d. Innenraum
- Erreichte Sprengwirkungshemmung: EPR2 (S)






LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 20

### Beispiel 3: Fassadenelement

Fassadenelement des Schottischen Parlaments - Versuchsdokumentation

- Versuchsvideo 1 – Versagen des thermoplastischen Randverbundes bei Prüfung auf EPR2



LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 21

### Beispiel 3: Fassadenelement

Fassadenelement des Schottischen Parlaments - Versuchsdokumentation

- Versuchsvideo 2 – erfolgreiche Prüfung auf EPR2 mit Randverbund aus Aluminium



LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 22

### Beispiel 3: Fassadenelement

Fassadenelement des Schottischen Parlaments - Diskretisierung

- Sehr feine Elementierung im Rahmenbereich und für die Gläser; Elementkantenlänge ca. 10 mm
- Kontaktdefinition zwischen allen Bauteilen
- Steife Anbindung der Gläser an die Dichtungen
- Gesamt ca. 110.000 Elemente, 85.000 Knoten

$t = 0\text{ ms}$        $t = 30\text{ ms}$

Rissentwicklung bei 30 ms

Glas-Modell A      Glas-Modell C

$u_{\text{max}} \approx 22\text{ cm}$        $u_{\text{max}} \approx 24\text{ cm}$

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 23

### Zusammenfassung

- Die numerische Simulation ist in der Lage die maßgeblichen Effekte von Detonationsbelastungen auf Strukturen abzubilden:
  - Last aus Freiland- bzw. Stoßrohrversuchen
  - Versagen von Glas und Kontakt/Anbindung
- Validierung der Versagensmodelle für Glas und Kontakt/Anbindung für Vorhersage unbedingt notwendig – jedoch möglich: Entsprechende Strukturmodelle sind in der Automobilindustrie im Einsatz
- Direkte Vorteile sind zu sehen in:
  - Berechnung von Design- oder Geometrievarianten am validierten Modell, um Kosten aus Versuchen zu mindern
  - Durch die Berücksichtigung von FSI können Düsen- und Diffusor-Effekte entsprechend dem realen Bauwerk erfasst und physikalisch sinnvoll abgeschätzt werden
  - Feldversuche können ggf. entfallen
- Aber:
  - Fundiertes Wissen um Grenzen und Einsatzmöglichkeiten der FSI sowie Erfahrung mit Versagensmodellen in der Simulation erforderlich.
  - Rechenzeit bei FSI Berechnungen liegen eine Zehnerpotenz über reinen Strukturberechnungen

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 24





**DYNA**  
MORE  
**GS**  
FENSTER

**Herzlichen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit!**

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 25



**DYNA**  
MORE  
**GS**  
FENSTER

**Kontakt Daten**

**Dynamore GmbH**  
Gesellschaft für FEM-Dienstleistungen  
Dr.-Ing. André Haufe  
Industriestraße 2  
70565 Stuttgart

Tel.: 07 11 / 45 96 00-17  
Fax: 07 11 / 45 96 00-29

Web: <http://www.dynamore.de>  
Email: [andre.haufe@dynamore.de](mailto:andre.haufe@dynamore.de)

**Gebr. Schneider GmbH & Co. KG**  
Dipl.-Ing. Gert Hönicke  
Rechenberger Str. 7-9  
74597 Stimpfbach

Tel.: 0 79 67 / 1 51-0  
Fax: 0 79 67 / 5 21

Web: <http://www.schneider-fassaden.de>  
Email: [gert.hoenicke@schneider-fassaden.de](mailto:gert.hoenicke@schneider-fassaden.de)

LS-DYNA Forum Bamberg / 20-21. Oktober 2005 26



