

Technische Universität München
Lehrstuhl für Statik

**Absicherung der virtuellen Prozesskette
für Folgeoperationen in der Umformtechnik**

Michael Fleischer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. E. Rank

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-U. Bletzinger
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Schweizerhof,
Universität Karlsruhe (TH)
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. M. R. Bischoff,
Universität Stuttgart

Die Dissertation wurde am 26.11.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 20.07.2009 angenommen.

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Statik TU München

Band 12

Michael Fleischer

**Absicherung der virtuellen Prozesskette
für Folgeoperationen in der Umformtechnik**

Shaker Verlag
Aachen 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8398-8

ISSN 1860-1022

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Fa. BMW AG im Bereich Werkzeug- und Anlagenbau / Prozessgestaltung, Simulation, Entwicklung CAE am Standort München in den Jahren 2005 bis 2009.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger, Inhaber des Lehrstuhls für Statik der Technischen Universität München, gilt mein besonderer Dank für die Unterstützung und Betreuung der Arbeit, die fachlichen Anregungen und die Übernahme des Hauptberichtes.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Schweizerhof und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Bischoff gilt mein Dank für das Interesse an meiner Arbeit, die zahlreichen Anregungen und konstruktiven Kritiken und die Übernahme des Koreferates.

Den Kollegen des Bereichs Simulation Blechumformung an allen Standorten der BMW AG, aber besonders im Forschungs- und Innovationszentrum der BMW AG in München, danke ich für das Interesse und die konstruktive Zusammenarbeit. Ihre Anregungen und wertvollen Erfahrungen waren für mich bei der Anfertigung der Arbeit eine große Hilfe. Mein besonderer Dank für die Betreuung seitens der BMW AG gilt Herrn Dr.-Ing. Marcus Wagner und Herrn Dr.-Ing. Martin Hahn.

Den Kollegen des Umformtechnikums der BMW AG, und besonders Herrn Boris Bevc, danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung und Bewertung der Verifikationsversuche. Für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche an den Serienbauteilen danke ich den Kollegen des Werkzeugbaus der BMW AG in München.

Ich danke allen Freunden und Bekannten die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben.

Besonders danke ich meiner Familie für ihre Unterstützung und das Ermöglichen meiner akademischen Ausbildung.

München, im August 2009

Michael Fleischer

Kurzfassung

Das Umformverhalten einer Blechplatte bei der Herstellung der Einzelbauteile einer Automobilkarosserie wird in der Engineeringphase, also vor der Werkzeugfertigung, mit Hilfe von Finite-Element-Simulationssystemen beurteilt. Die Berechnung der ersten Umformung - Karosseriebauteilziehen -, die anschließende Abbildung des Vollbeschnittes durch das Löschen der entsprechenden Elemente und die Berechnung des danach auftretenden Bauteilaufsprungverhaltens mit linearen Schalenelementen sowie die Beurteilung des Versagens und der Faltenbildung sind Stand der Technik.

Die Abbildung des inneren Spannungszustands im Material während und am Ende der Umformung ist dabei der Ausgangszustand für die Aufsprungberechnung.

Die in dieser Arbeit behandelte realitätsnahe simulative Vorhersage des Aufsprungverhaltens der Blecheinzelbauteile nach der Umformsimulation ermöglicht eine geometrische Kompensation des Aufsprungverhaltens auf Basis der Simulation durch die Veränderung der CAD-Wirkflächen der Umformwerkzeuge in der Simulation, die in den realen Umformwerkzeugen umgesetzt wird.

Dadurch werden die Werkzeugwirkflächen so geformt, dass die Bauteile während der Umformung überbogen werden und beim Aufsprung in die Soll-Geometrie zurückfedern. Dabei gilt, je realitätsnäher die Aufsprungsimulation der Bauteile ist und somit auch deren Kompensation, desto geringer fällt der Aufwand bei der Werkzeugeinarbeit aus, um die Bauteile in die Soll-Geometrie zu bringen.

Da Blechbauteile nach dem Karosseriebauteilziehen in der Regel in weiteren Operationen - Folgeoperationen - bearbeitet werden, bis sie die Endgeometrie besitzen, wird somit auch der innere Spannungszustand bei jeder Folgeoperation verändert, und deshalb auch das Aufsprungverhalten des Fertigteils. Hinzu kommt, dass durch die immer komplexer werdenden Geometrien mehr und mehr Umforminhalte in die Folgeoperationen verlagert werden.

Entscheidend für die Karosseriefertigung ist die reale Bauteilgeometrie des Fertigteils. Um das Aufsprungverhalten der Fertigteile nach der Herstellung korrekt vorherzusagen, müssen also auch alle Folgeoperationen im Simulationssystem abgebildet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Spannungszustand im Material korrekt bis zur letzten Folgeoperation abgebildet und übertragen wird, da dieser die Grundlage für die Aufsprungberechnung des Fertigteils ist.

Abstract

The formability behaviour of a blank during the production of single automotive steel-body-part is evaluated in the engineering phase - before the forming tools are manufactured - by means of finite-element-simulation systems. The computation of the first forming step - drawing -, the subsequent reproduction of the trimming by deleting the corresponding elements and the following springback-behaviour of the part, as well as the evaluation of cracks and wrinkles is state of the art.

The reproduction of the inner stress-state in the material, during and at the end of the forming-process, is the initial state for the springback computation.

The realistic simulative prediction of the springback-behaviour of the steel-body-parts after a forming-simulation, enables a geometric springback-compensation, based on simulation, by modifying the effective CAD-surfaces of the forming tools in the simulation; this modification is transferred to the real forming-tools. So, the effective tool-surfaces are formed in a way, that the parts are over-bent during the forming with the goal the parts spring back into the target-geometry.

Normally, automotive steel-body-parts are tooled in subsequent operations - follow-on operations -, until they have got their final geometry, the inner stress-state is modified in every follow-on operation, and consequently the springback-behaviour, too. Additionally, the forming-contents are more and more transferred into the follow-on operations, due to geometries with increasing complexity.

Decisive for the production of an automotive steel-body is the real geometry of a finished part. For a correct computation of the springback-behaviour of the finished parts after production, all follow-on operations have to be represented in the simulation-system. In this process, it is important that the stress-state in the material is transferred and represented correctly also into the last follow-on operation, because this is the basis for the spring-back computation of the finished steel-body-part.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	3
1.2	Literaturübersicht	7
1.2.1	Oberflächenbegutachtung	7
1.2.2	Einzelblechbauteile, Bördeln und Baugruppen	8
1.2.3	Aufsprungkompensation der Umformwerkzeuge	11
1.2.4	Versuchsbauteile zur Untersuchung des Aufsprungs	11
1.2.5	Materialmodelle und Werkstoffparameter	14
1.2.6	Finite Elemente	15
1.3	Aufgabenstellung	17
2	Umformtechnische Grundlagen	21
2.1	Verfahren der Blechumformung	21
2.2	Karosseriewerkstoffe	22
2.3	Blechteilefertigung in der Automobilindustrie	23
2.3.1	Flächenbeschreibung der Bauteile und Werkzeugfertigung	24
2.3.2	Folgeoperationen in der Herstellung von Einzelbauteilen	25
2.3.3	Operationen in der Herstellung von Baugruppen	26
2.3.4	Praxisrelevante Geometrien in Umformwerkzeugen	27
3	FEM-Berechnungsgrundlagen	29
3.1	Kontinuumsmechanische Beschreibung	30
3.1.1	Nichtlinearitäten	30
3.1.2	Grundgleichungen der Kontinuumsmechanik	31
3.1.2.1	Bewegung und Deformation	31
3.1.2.2	Dehnung und Spannung	33
3.1.2.3	Bilanzgleichungen	34
3.1.2.4	Prinzip der virtuellen Verschiebungen und virtuellen Leistungen	35
3.1.2.5	Kontaktmodellierung	37
3.1.2.6	Linearisierung und räumliche Diskretisierung	39

3.2	Finite Elemente und Element-Tangentensteifigkeitsmatrizen	40
3.2.1	Isoparametrisches Konzept	40
3.2.2	Schwache Form der Impulsbilanz	41
3.2.3	Elementkoordinaten	42
3.2.4	Materialbeschreibung	44
3.2.5	Formulierung der Element-Tangentensteifigkeitsmatrix	44
3.2.6	Tangentensteifigkeitsmatrizen für implizite und explizite Lösungsverfahren	45
3.3	Gleichungslösung	47
3.4	Angewandte Finite Elemente	48
3.4.1	Kontinuumsselemente	49
3.4.2	Schalenelemente	49
3.4.2.1	Künstliche Versteifung bei Finiten Schalenelementen	50
3.4.2.2	Numerische Berechnung der Spannungen	51
3.4.2.3	Konvergenzverhalten von Berechnungsergebnissen	51
3.4.2.4	Schalenelemente in kommerziellen FE-Programmen	53
3.5	Materialmodellierung	55
3.5.1	Elasto-Plastizität	55
3.5.2	Fließkurven und Extrapolation	56
3.5.3	Materialmodelle in kommerziellen FE-Programmen	57
3.6	Zeit-Integrationsverfahren	60
3.6.1	Lösung von Bewegungsgleichungen zeitabhängiger Probleme	61
3.6.2	Dynamisch explizite Zeit-Integration	61
3.6.2.1	Zeitschrittweite im expliziten Differenzenverfahren	64
3.6.2.2	Betrachtung statischer Systeme mit der dynamisch expliziten Zeit-Integration	65
3.6.3	Implizite Zeit-Integration	65
3.6.3.1	Zeitschrittweite bei der impliziten Zeit-Integration	67
3.6.4	Anwendung der Zeit-Integrationsverfahren im Bereich der Blechumformung	68
3.7	Stabilität	69
3.7.1	Physikalische Stabilität des Modells	69
3.7.2	Stabilität des Materialmodells	70
3.7.3	Numerische Stabilität des Zeit-Integrationsverfahrens	71
3.8	Werkzeugmodellierung	73
3.8.1	Werkzeugidealisation	73
3.8.2	Vernetzung	73
3.8.3	Abbildung der Ziehsicken	74

4	Grundlegende Untersuchung und Simulation einfacher Folgeoperationen	77
4.1	Grenzen der Abbildungsfähigkeit von Finiten Elementen	79
4.1.1	Aufbau des Simulationsmodells	79
4.1.2	Praxisrelevante Geometrien	80
4.1.3	Simulationsparameter und geometrische Diskretisierung	81
4.1.4	Auswertegrößen	82
4.1.5	Simulationsergebnisse und Interpretation	83
4.1.5.1	Geometrischer Bereich des Abkantens	85
4.1.5.2	Geometrischer Bereich des Bördelns	91
4.1.5.3	Spannungsverlauf über Blechdicke	92
4.1.5.4	Aufsprungverhalten der verformten Ringe	96
4.1.6	Schlussfolgerungen	97
4.2	Verifikation der FEM-Berechnung mit rotatorischem Abkanten	100
4.2.1	Versuchsaufbau und Funktionsprinzip	100
4.2.2	Versuchsproben und Versuchswerkstoffe	101
4.2.3	Simulationsergebnisse und Parameteruntersuchung	102
4.2.3.1	Werkzeugdiskretisierung und geometrische Ausrichtung der Schalenelemente	102
4.2.3.2	Einfluss der Werkstoffdaten in der Simulation	106
4.2.3.3	Einfluss der Werkzeuggeometrie	106
4.2.4	Verifikationsversuche und simulative Überprüfung	107
4.2.5	Schlussfolgerungen	109
4.3	Verifikation der FEM-Berechnung mit translatorischem Abkanten	111
4.3.1	Versuchsaufbau und Funktionsprinzip	111
4.3.2	Simulationsergebnisse und Parameteruntersuchung	112
4.3.2.1	Einfluss der Stempelgeschwindigkeit bei expliziter Simulation	115
4.3.2.2	Werkzeugdiskretisierung und geometrische Ausrichtung der Schalenelemente	116
4.3.2.3	Matrizenradius und Integrationspunkte	118
4.3.2.4	Verhalten der Schalenelemente im expliziten Simulationsmodell im zu untersuchenden Parameterraum	119
4.3.2.5	Prozessparameter - Niederhaltekraft und Reibung	124
4.3.2.6	Einfluss der Extrapolationsmethode der Fließkurve	126
4.3.2.7	Einfluss der Vordehnungen auf den Aufsprungwinkel	127

4.3.2.8	Abhängigkeit des Aufsprungverhaltens vom Berechnungsverfahren und des gewählten Zeitschritts im Simulationsmodell	128
4.3.2.9	Schlussfolgerungen aus Simulationsuntersuchung	130
4.3.3	Verifikationsversuche und simulative Überprüfung	132
4.3.3.1	Versuchswerkstoffe und Vordehnungszustände	132
4.3.3.2	Werkzeugelastizität im Versuchswerkzeug	133
4.3.3.3	Untersuchung des Reibungseinflusses auf den Aufsprungwinkel	134
4.3.3.4	Aufsprungergebnisse des Werkstoffs DX54D	135
4.3.3.5	Aufsprungergebnisse des Werkstoffs TWIP	136
4.3.3.6	Schlussfolgerungen aus Abgleich Realversuch zu Simulation	138
4.4	Zusammenfassung der Verifikationsversuche	139
5	Prozessmodellierung und Anwendung der Methodik in der Praxis	143
5.1	Prozessmodellierung für Folgeoperationen	144
5.1.1	Aufbau mehrstufiger Umformprozesse in einer Pressenlinie	145
5.1.2	Modellaufbau im Simulationssystem	146
5.1.3	Transfer der realen Umformvorgänge in das Simulationssystem	146
5.1.3.1	Direkte Übertragung des Methodenplans in das Simulationssystem	146
5.1.3.2	Reduzierung des Methodenplans zur effizienten Abbildung im Simulationssystem	147
5.1.4	Simulationsmodellierung mit LS-DYNA	149
5.1.4.1	CAD- und Modellebene	150
5.1.4.2	Parameterebene	151
5.1.5	Modellierung der Ziehsicken	152
5.1.6	Modellierung der Niederhalter	153
5.2	Messkonzept und Bauteilvermessung	154
5.3	Prozessanwendung am Bauteil 1	155
5.3.1	Analyse der Umformprozesse im Methodenplan	155
5.3.2	Transfer auf idealisiertes Simulationsmodell	155
5.3.3	Verbesserung der Methode zur Optimierung der Herstellbarkeit	157
5.3.3.1	Oberflächendefekte und Versagensstellen	157
5.3.3.2	Optimierung der Ziehanlage für das Serienwerkzeug	160
5.3.4	Aufsprungverhalten der Realteile und Simulationsergebnisse	161
5.3.4.1	Aufsprungverhalten der Stationsteile	161

5.3.4.2	Aufsprungverhalten in der letzten Arbeitsfolge	163
5.3.4.3	Einfluss der Simulationsmethode auf das Aufsprung- verhalten	165
5.4	Prozessanwendung am Bauteil 2	168
5.4.1	Analyse der Umformprozesse im Methodenplan	168
5.4.2	Transfer auf idealisiertes Simulationsmodell	169
5.4.3	Aufsprungverhalten der Realteile und Simulationsergebnisse .	170
5.5	Zusammenfassung	173
6	Simulation von Fügeprozessen und Baugruppen	175
6.1	Herstellungsprozess der einzelnen Bauteile der Baugruppe	175
6.2	Fügesimulation der Einzelteile zu einer Baugruppe	177
6.2.1	Modellierung des Bördel-Prozesses im Simulationssystem . . .	177
6.2.2	Aussagemöglichkeiten der Bördel-Simulation	178
6.3	Aufsprungsimulation der Baugruppe	182
6.3.1	Aufsprungsimulation nach dem Fügeprozess	182
6.3.2	Potentialabschätzung und Grenzen der Simulation für den prak- tischen Einsatz im Werkzeug- und Anlagenbau	183
7	Zusammenfassung und Ausblick	187
8	Anhang	195
8.1	Versuchswerkstoffe und deren mechanische Kennwerte	195
8.2	Ergebnisse zu DX54D	197
8.2.1	Einfluss des Ziehspaltes auf den Aufsprungwinkel	197
8.2.2	Aufsprungwinkel - Simulation und Versuch	197
8.3	Ergebnisse zu TWIP	203
	Literaturverzeichnis	207
	Abbildungsverzeichnis	219
	Tabellenverzeichnis	227

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

Benutztes Einheitensystem für die FEM-Berechnungen:

Größe	Allgemeines Symbol	Einheit
Masse	m	ton
Länge	l	mm
Zeit	t	s
Dichte	ρ	ton/mm ³
Kraft	F	N
Energie	E	N·mm
Spannung	σ, τ	N/mm ²
Elastizitätsmodul	E_0	N/mm ²

Symbol Einheit Bedeutung

Allgemeine geometrische Größen:

l, b, d	mm	Länge, Breite, Dicke
x, y, z	mm	Ortskoordinaten
u, s	mm	Verschiebung, Weg
\dot{u}, \dot{s}, v	mm/s	Geschwindigkeit
\ddot{u}, \ddot{s}, a	mm/s ²	Beschleunigung

Mechanische Werkstoffgrößen:

$R_{P0.2}$	N/mm ²	Streckgrenze
$R_{P0.2M}$	N/mm ²	Mittlere Streckgrenze
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
A_g	%	Gleichmaßdehnung
A_{80}	%	Bruchdehnung einer Zugprobe mit 80 mm Messlänge
k_f	N/mm ²	Fließspannung
φ		Umformgrad, wahre Dehnung
φ_1		Hauptumformgrad
φ_2		Nebenumformgrad
φ_v		Vergleichsumformgrad

Symbol	Einheit	Bedeutung
--------	---------	-----------

Mechanische Werkstoffgrößen:

ϵ		Technische Dehnung
$\dot{\epsilon}$	1/s	Dehnrage
ν		Querkontraktionszahl
c_d	mm/s	Schallgeschwindigkeit
μ		Reibungsbeiwert
R_0, R_{45}, R_{90}		planare Anisotropiewerte in 0°, 45° und 90° Walzrichtung
R_S		senkrechte Anisotropie

Allgemeine Größen:

α	°	Aufsprungwinkel
l_e	mm	Elementkantenlänge
$l_{e,char}$	mm	Charakteristische Elementkantenlänge
d_{Btech}	mm	Blechdicke
d_0	mm	Anfangsblechdicke
d_{min}	mm	Minimale Blechdicke
m_K	t	Gesamtgewicht Rohkarosserie
Δt	s	Zeitintervall
Δt_{stabil}	s	Stabiler Zeitschritt
α_i, δ_i		Implizite Lösungsparameter
v_S	mm/s	Stempelgeschwindigkeit
F_N	N	Niederhaltekraft
$F_{N,P}$	N/mm ²	Niederhaltegedruck
$F_{R,LS}$	N/mm	Rückhaltekraft Liniensicke
$\sigma_{xx,local}$	N/mm ²	Spannung in x-Richtung im lokalen Elementkoordinatensystem
$\sigma_{yy,local}$	N/mm ²	Spannung in y-Richtung im lokalen Elementkoordinatensystem
$\sigma_{M-\alpha}$	%	Standardabweichung der Messwerte des Aufsprungwinkels α
$\Delta\alpha_M$	%	Abweichung der Simulationsergebnisse zu den Messwerten
N_{G-IP}		Anzahl Gauss-Integrationspunkte
N_{El,R_M}		Anzahl Elemente im Matrizenradius
$s_{Null-Faser}$	%	Verschiebung der Spannungs-Null-Faser

Symbol	Einheit	Bedeutung
--------	---------	-----------

Parameter für Werkstoffmodelle:

M		Parameter zur Fließortbeschreibung bei Barlat'89
n		Verfestigungsexponent
$n_l, n_s, n_v, n_h, n_{h1}$		Werkstoffparameter für Fließkurvenextrapolation
A, B		Werkstoffparameter für Fließkurvenextrapolation

Geometrische Größen bei Versuchsaufbau und Werkzeugen:

R_{NB}	mm	Niederhaltebackenradius
S_{NB}	mm	Verschiebung Niederhaltebacke
S_{RP}	mm	Position Rotationsachse
S_{BW}	mm	Verschiebung Biegewange
R_M	mm	Matrizenradius
R_S	mm	Stempelradius
S	mm	Stempelhubweite
$S_{R_M-R_S}$	mm	Abstand der umformenden Radienkanten
ZS_{ges}	mm	Gesamtziehsplatt
ZS	mm	Ziehsplattzugabe
ΔZS	mm	Ziehsplattaufweitung
ΔS	mm	Elementkantenverschiebung
$R_{I,RZ}$	mm	Innenradius bei Ringzugversuch
$R_{M,RZ}$	mm	Mittenradius bei Ringzugversuch
$R_{A,RZ}$	mm	Außenradius bei Ringzugversuch
$R_{S,E}$	mm	Einlaufradius der Sicke
$R_{S,S}$	mm	Stabradius der Sicke
$R_{S,A}$	mm	Auslaufradius der Sicke

Matrizen und Vektoren:

Matrizen und Vektoren werden generell fett geschrieben, oder in der Einsteinschen Summenkonvention dargestellt.

M	Massenmatrix
C_D	Dämpfungsmatrix
K_E	Elementsteifigkeitsmatrix
K	Gesamtsteifigkeitsmatrix
X	Ortsvektor im System in Initialkonfiguration
x	Ortsvektor im System in Momentankonfiguration
e	Einheitsvektor
I, δ_{ij}	Einheitsmatrix und Kronecker Delta
u_I	Vektor der Knoten-Verschiebungen am Knoten I
u	Vektor der Verschiebungen
\dot{u}, v	Vektor der Geschwindigkeit
\ddot{u}, a	Vektor der Beschleunigung
f^{ext}	Vektor der äußeren Lasten
f^{int}	Vektor der inneren Element-Kräfte
f^{kon}	Vektor der Kontakt-Kräfte
F	Deformationsgradient (Jacobi-Matrix)
J	Determinante des Deformationsgradienten
P^{int}, P^{ext}	Innere und äußere virtuelle Leistung
W^{int}, W^{ext}	Innere und äußere virtuelle Arbeit
E, ϵ	Green-Lagrangescher Verzerrungstensor, Dehnungstensor
$C(\epsilon)$	Allg. nichtlineare Materialmatrix als Funktion des Dehnungstensors
σ	Tensor der Cauchyspannungen
S	2. Piola-Kirchhoffscher Spannungstensor
P	Tensor der Nominalspannungen
B	Verschiebungs-Verzerrungs-Transformationsmatrix
N	Matrix der Ansatzfunktionen eines Elements
Ω	Gebiet mit der Berandung Γ
Γ	Berandung des Gebietes Ω

Abkürzungen der Finiten Elemente:

ABAQUS [1]:

S4R reduziert integriertes lineares vierseitiges Schalenelement

CPE4R reduziert integriertes 2D-Kontinuumselement mit ebener Dehnung

LS-DYNA [83] - Schalenelemente:

E1 Hughes-Liu

E2 Belytschko-Tsay

E6 S/R (selektiv reduziert integriert) Hughes-Liu

E7 S/R co-rotational (lokales Elementkoordinatensystem) Hughes-Liu

E8 Belytschko-Leviathan

E10 Belytschko-Wong-Chiang

E11 Fast (co-rotational) Hughes-Liu

E16 Bathe-Dvorkin (voll integriert)

E25 Belytschko-Tsay mit Dehnung in Blechdickenrichtung

E26 Belytschko-Tsay (voll integriert) mit Dehnung in Blechdickenrichtung

Abkürzung **Bedeutung**

AHU	Außenhochdruckumformen
AFO	Arbeitsfolge
AWP-F	Auswertepunkt - Kraft
AWP-RS	Auswertepunkt - Radien und Spannung
BMW-GS	BMW Group Standard
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente Methode
FEA	Finite Elemente Analyse
GFD	Grenzformänderungsdiagramm
GFK	Grenzformänderungskurve
G-IP	Gauss-Integrationspunkt
IHU	Innenhochdruckumformen
IP	Integrationspunkt
ISO	International Organisation for Standardisation
MAT36	LS-DYNA Materialmodell Nr.36 - Fließortbeschreibung Barlat'89 [83]
MPP	Massively Parallel Processing
SMP	Symmetrical Multi Processing
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.