

**„Technologieplattform zum Einsatz von Mg-Knetlegierungen
für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus“**

Teilprojekt

Entwicklung, Konstruktion und Simulation

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht

Projektträger: Projektträger Jülich (PTJ)
Außenstelle Berlin
Zimmerstraße 26-27
10969 Berlin

Förderkennzeichen: 03 WKBF 52

Zuwendungsempfänger: Voith Engineering Services GmbH
Road & Rail
Aue 23-27
09112 Chemnitz

Projektlaufzeit: 01.04.2007 bis 31.03.2010

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03 WKBF 52 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Chemnitz, 24.09.2010

.....
Voith Engineering Services GmbH
Road & Rail
Dr. Ing. Volkmar Vogel
Geschäftsführer

Voith Engineering Services GmbH
Road & Rail
Aue 23-27
09112 Chemnitz, Germany
Telefonzentrale +49 371 50348 0
Telefaxzentrale +49 371 50348 280

.....
Firmenstempel

Bildsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungs- und Akronymverzeichnis	10

INHALT

I.	Kurze Darstellung.....	11
1	Aufgabenstellung.....	11
2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	14
2.1	Verfahren die bei der Bearbeitung und Umformung von Magnesiumknetlegierungen Anwendung finden	14
2.2	Stand der Forschung vor Projektbeginn	19
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	21
3.1	Ablauf.....	21
3.1.1	Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien unter Berücksichtigung der besonderen Werkstoffeigenschaften von Magnesium.....	21
3.1.2	Erarbeitung von Berechnungsgrundlagen unter Berücksichtigung der besonderen Werkstoffeigenschaften von Magnesium.....	22
3.1.3	Erstellung und Abstimmung von Konzepten für potentielle Anwender	23
3.1.4	Technologische Bewertung des Magnesiumeinsatzes	24
3.2	Zeit- und Kostenplan	25
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	26
4.1	FE – Ergebnisse im nationalen und internationalen Wettbewerb.....	26
4.2	Patentsituation	26
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	27
5.1	Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern.....	27
5.2	Am Vorhaben beteiligte Partner und deren Kernkompetenzen	27
5.3	Beratungen und Präsentationen	31
II.	Eingehende Darstellung	32
1	Erzielte Ergebnisse	32
1.1	Erarbeiten von Konstruktionsrichtlinien	32
1.1.1	Analyse des relevanten Teilespektrums	32

1.1.2	Festlegung der an die Bauteile gestellten Anforderungen	37
1.1.3	Mitarbeit bei der Durchführung von Grundlagenuntersuchungen.....	52
1.1.4	Konstruktion der Referenzbauteile	66
1.1.5	Untersuchungen zur Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität	84
1.1.6	Vorgaben für die Konstruktion der Demonstratorwerkzeuge	85
1.1.7	Beurteilung der Bauteilqualität	86
1.1.8	Untersuchungen zu Fügeverfahren	87
1.1.9	Erarbeitung der Konstruktionsrichtlinien	104
1.2	Erarbeiten von Berechnungsgrundlagen	121
1.2.1	Aufgabenstellung	121
1.2.2	Herstellung von Magnesiumbauteilen und deren Verbindung.....	121
1.2.3	Zusammenstellung der Bauteilanforderungen und Belastungen.....	132
1.2.4	Korrosionsschutz und mechanische Oberflächenbehandlung	141
1.2.5	Berechnungsmodell	146
1.2.6	Auswertung der Ergebnisse der FE-Berechnung	162
1.2.7	Auswertung.....	191
1.3	Erstellung und Abstimmung von Konzepten für potentielle Anwender.....	191
1.4	Technologische Bewertung des Magnesiumeinsatzes	192
2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	194
3	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene FuE- Ergebnisse Dritter	196
4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	197
4.1	Erfolgte Präsentationen und Veröffentlichungen	197
4.2	Geplante Präsentationen und Veröffentlichungen	197
III.	Anlagen	198
A.	Projektbezogene Grundlagen der Umformtechnologie und Fügetechnik..	198
1	Grundlagen der Blechumformung	200
1.1	Mikrostrukturelle Vorgänge beim Umformen von Magnesium	201
1.2	Feinbleche aus Magnesiumknetlegierungen	204
1.3	Strangpressen.....	205
1.4	Gesenkschmieden	207
2	Schweißen	208
2.1	Metall – Inertgasschweißen (MIG).....	209
2.2	Wolfram – Inertgasschweißen (WIG)	209
2.3	Plasmaschweißen (WPL).....	209

2.4	Werkstoffuntersuchungen im Schweißnahtbereich	210
2.5	Korrosionsuntersuchungen	211
3	Laserstrahltechnik	212
4	Zerspanung mit wassergemischten Kühlschmierstoffen	214
B.	Erfolgskontrollbericht.....	216
1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	216
2	Wissenschaftlich- technisches Ergebnis, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen.....	217
3	Fortschreibung des Verwertungsplans	218
3.1	Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen.....	218
3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	219
3.3	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende .	220
3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	221
4	Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben.....	222
5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	223
6	Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	224
C.	Zwischenberichte und Workshops	225
1	Zwischenbericht 2007	225
2	Zwischenbericht 2008-1	229
3	Zwischenbericht 2008-2.....	233
4	Zwischenbericht 2009-1	238
5	Zwischenbericht 2009-2.....	244
6	1. TeMaK-WORKSHOP (21.05.2008).....	249
7	2. TeMak Erfahrungsaustausch (24.09.2008)	266
8	2. Strategie-Workshop (21.01.2009)	282
IV.	Berichtsblatt/ Document Control Sheet	287
V.	Quellenverzeichnis.....	290

Bildverzeichnis

Bild 1.	Überblick Verbundpartner TeMaK	27
Bild 2.	Aufbau der eingesetzten beheizbaren Tiefziehwerkzeuge [DRÖD99].....	53
Bild 3.	temperaturabhängige Grenzziehverhältnisse; v=5mm/s, [DRÖD99].....	55
Bild 4.	Versagensarten; Werkstoff AZ31B, [DRÖD99]	56
Bild 5.	geschwindigkeitsabhängige Grenzziehverhältnisse; T=200 °C, [DRÖD99].....	57
Bild 6.	Verfahren [SCHU98]	59
Bild 7.	Einteilung der Verfahrensvarianten für Hohlprofile [VDI3146], [DIN8580]	60
Bild 8.	Typische Versagensfälle des IHU, [MUDR06] li: Bersten; mi: Stülpen; re: Falten	61
Bild 9.	Fließpressverfahren [SCHIK].....	63
Bild 10.	Verfahrenskombinationen, [SCHIK].....	64
Bild 11.	Explosionsdarstellung 1. Modellversuch.....	67
Bild 12.	Explosionsdarstellung PKW-Tür	68
Bild 13.	Explosionsdarstellung Abgabestand an die Fertigung	68
Bild 14.	prinzipieller Aufbau (allgemein)	69
Bild 15.	prinzipieller Aufbau (aktuelles Konzept).....	69
Bild 16.	Aktueller Entwicklungsstand.....	70
Bild 17.	Innenschale mit Ankonstruktion.....	71
Bild 18.	Ergebnis der Tiefziehsimulation.....	72
Bild 19.	Außenblechgeometrie	73
Bild 20.	Außenhaut mit Ankonstruktion für den Tiefziehprozess	74
Bild 21.	Gefalzte Verbindung.....	75
Bild 22.	Bauteile des Rahmens	76
Bild 23.	Ausgangsdaten von IWU zur Verfügung gestellt.....	77
Bild 24.	1.Konstruktionsschritt mit Rundprofil	77
Bild 25.	2.Konstruktionsschritt mit Rechteckprofil und IHU-Teil	78
Bild 26.	Abgabestand des Rahmens inkl. Schlossteil und Fließpressteilen	78
Bild 27.	Prinzip des IHU [MUDR06].....	79
Bild 28.	Entstandene Konstruktionsmodelle	80
Bild 29.	IHU - Werkzeug.....	80
Bild 30.	Aktuelle Käfiggeometrie (oben und unten).....	81
Bild 31.	Verbindung (Formschluss) Halter und Fließpressteil	82
Bild 32.	Biegeteil	82
Bild 33.	Schloßteil-Befestigung.....	83
Bild 34.	Vorgehensweise bei der Konstruktion der Demonstratorwerkzeuge.....	85
Bild 35.	Rundpunkt [KOAT09]	88
Bild 36.	Flachpunkt [KOAT09].....	88
Bild 37.	Tox Vario-Punkt [KOAT09].....	88
Bild 38.	Rollclinchen [ROCL10]	89
Bild 39.	Rührreibschweißen [RRSW08].....	90
Bild 40.	Widerstandspunktschweißen [DESP08]	91
Bild 41.	WIG Prinzip [WIKI01]	92
Bild 42.	MSG Prinzip [WIKI01].....	93
Bild 43.	Plasma MIG [PLMA09].....	94

Bild 44.	Fügestellen in der Innenschale und Falz mit dem Außenblech	100
Bild 45.	Fügestellen der Rahmen	100
Bild 46.	Abhängigkeit des Falzfaktors von der Umformtemperatur	107
Bild 47.	Querschnitt der Abkantbacke	109
Bild 48.	Querschnitt der Vorfalzbacke	109
Bild 49.	Querschnitt der Fertigfalzbacke (jeweils zweiteilig).....	110
Bild 50.	Grundlagenwerkzeug – Halteplatte mit beheizbarer Vorfalzbacke.....	111
Bild 51.	Beheizbare Aktivteile für das Vorfalzen (Ausschnitt).....	111
Bild 52.	Vergleich mechanischer Kennwerte von Magnesiumknet- und Gusslegierungen	122
Bild 53.	Reibfaktoren in Abhängigkeit der Umformtemperatur [SFB390]	124
Bild 54.	Fließkurven bei T = 300 °C und 350 °C und verschiedenen Umformgeschwindigkeiten für AZ31 [Doege01].....	126
Bild 55.	Grenzziehverhältnis β [Kawalla03].....	126
Bild 56.	Grenzformänderungsdiagramm [Kawalla03].....	127
Bild 57.	Einschraubtiefe von Stahlschraube 8.8 und Aluminium im Vergleich [Westphal03]	128
Bild 58.	Beispiel eines Vorspannkraftverlaufes einer Magnesiumverschraubung über die Betriebszeit bei 120 °C bzw. 150 °C (Vergleich von Stahl- und Aluminiumschraube gleicher Abmessung) [Westphal02]	130
Bild 59.	Unterschiedliche Türkonzepte [Hilfrich07].....	134
Bild 60.	Lastfälle bei Türen [Hilfrich07]	138
Bild 61.	Lastpfade in die Karosserie beim Seitenaufprall [Kreuzinger05].....	139
Bild 62.	Messaufbau zur Schwingungsuntersuchung einer Fahrzeugtür [Rümmler].....	140
Bild 63.	Schwingformen der Tür bei Shakeranregung [Rümmler]	140
Bild 64.	Einfluss von Eisen und Mangan auf die Korrosionsbeständigkeit von Magnesiumlegierungen [Reinhold00]	142
Bild 65.	Gesamtes FE-Modell.....	147
Bild 66.	Explosionsdarstellung der Tür nach Gruppen.....	148
Bild 67.	Außenhaut.....	149
Bild 68.	Geometrie des Rahmens.....	150
Bild 69.	Umsetzung der Geometrie in das FEM-Modell	151
Bild 70.	Darstellung der 3 Regionen des Türinnenbleches	152
Bild 71.	Geometrie des oberen Scharniers	153
Bild 72.	FEM-Netz des oberen Scharniers	153
Bild 73.	Geometrie des unteren Scharniers	154
Bild 74.	FEM-Netz des unteren Scharniers	154
Bild 75.	schematische Darstellung der Schrauben- / Bolzenumsetzung	155
Bild 76.	Schrauben- / Bolzenumsetzung in 3D:FullSpan Ansicht.....	155
Bild 77.	Verbindung von Innenblech und Rahmen am Schloss mittels RBE	156
Bild 78.	Verbindung von Rahmen, Innenblech und Scharnier mittels RBE	156
Bild 79.	Festlager am oberen Scharnier	158
Bild 80.	vereinfachte Übersicht der Krafteinleitungen	159
Bild 81.	Krafteinleitung für den Lastfall Türabsenkung am Rahmen	163
Bild 82.	Verschiebung der gesamten Tür beim Lastfall Türabsenkung am Rahmen	164
Bild 83.	Verschiebung Außenblech	164

Bild 84.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Außenblech.....	165
Bild 85.	Verschiebung Innenblech-Mitte	166
Bild 86.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Mitte	166
Bild 87.	Verschiebung Innenblech-Schloss	167
Bild 88.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Schloss.....	167
Bild 89.	Verschiebung Innenblech-Scharnier.....	168
Bild 90.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Scharnier	168
Bild 91.	Verschiebung Seitenaufprallschutz.....	169
Bild 92.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Seitenaufprallschutz.....	170
Bild 93.	Verschiebung des Rahmens	171
Bild 94.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Rahmen	171
Bild 95.	Krafteinleitung für den Lastfall Türabsenkung am Außenblech	173
Bild 96.	Verschiebung der Tür beim Lastfall Türabsenkung am Außenblech	174
Bild 97.	Verschiebung Außenblech	174
Bild 98.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Außenblech.....	175
Bild 99.	Verschiebung Innenblech-Schloss	176
Bild 100.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Schloss.....	176
Bild 101.	Verschiebung Innenblech-Mitte	177
Bild 102.	Von-Mises-Vergleichsspannung Innenblech-Mitte	177
Bild 103.	Verschiebung Innenblech-Scharnier.....	178
Bild 104.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Scharnier	178
Bild 105.	Verschiebung Seitenaufprallschutz.....	179
Bild 106.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Seitenaufprallschutz.....	179
Bild 107.	Verschiebung des Rahmens	180
Bild 108.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Rahmen	180
Bild 109.	Krafteinleitung für den Lastfall Überöffnen.....	182
Bild 110.	Verschiebung der Tür beim Lastfall Überöffnen.....	183
Bild 111.	Verschiebung Außenblech	183
Bild 112.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Außenblech.....	184
Bild 113.	Verschiebung Innenblech-Mitte	185
Bild 114.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Mitte	185
Bild 115.	Verschiebung Innenblech-Schloss	186
Bild 116.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Schloss.....	186
Bild 117.	Verschiebung Innenblech-Scharnier.....	187
Bild 118.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Scharnier	187
Bild 119.	Verschiebung Seitenaufprallschutz.....	188
Bild 120.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Seitenaufprallschutz.....	188
Bild 121.	Verschiebung des Rahmens	189
Bild 122.	Von-Mises-Vergleichsspannung im Rahmen	189
Bild A1:	Anforderungen an Karosseriebleche /Behrens04/	198
Bild A2:	Einsatz von Werkstoffkennwerten zur Bewertung des Umformverhaltens /Behrens04/	199
Bild A3:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm und Fließkurve /Behrens04/	199
Bild A4:	Prinzipieller Werkzeugaufbau und Bezeichnung beim Tiefziehen /Dröder99/	200
Bild A5:	Spannungszustände in den einzelnen Ziehteilbereichen während der Umformung /Dröder99/.....	201

Bild A6:	Basisebene im hexagonalen Gitter /Dröder99/	202
Bild A7:	Richtungen in der Basisebene /Dröder99/	202
Bild A8:	Prinzip der Zwillingsbildung /Dröder99/	203
Bild A9:	Pyramidalebenen 2. Ordnung, Typ 1 (Ebenengruppe { }) /Dröder99/.....	203
Bild A10:	Pyramidalebenen 1. Ordnung, Typ 1 (Ebenengruppe { }) /Dröder99/, /Merklein06/.....	203
Bild A11:	Maximal mögliche Durchmesserreduzierung beim Tiefziehen der Legierung AZ31B /Dröder99/.....	204
Bild A12:	Zugfestigkeit R_m und Bruchdehnung A in Abhängigkeit vom Pressverhältnis an einsträngig gepressten Rundstangen des Werkstoffes MgAl10 /Sauer01/	206
Bild A13:	Magnesium – Hohlprofile /Mertz00/	206
Bild A14:	Innere Struktur eines Bauteils bei verschiedenen Herstellungsverfahren /DIN9005/	207
Bild A15:	Zugfestigkeiten der geschweißten Proben im Vergleich zum ungeschweißten Grundwerkstoff /Thate03/	211
Bild A16:	Korrosionsabträge nach Freibewitterung ohne Zusatzbelastung nach DIN EN ISO 8565 /Thate03/	212
Bild A17:	Ergebnisse der Zugversuche bei AZ31B (Blechdicke 1,3 mm) /Draugelates98/	214

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.	Untersuchte Magnesiumlegierungen [DIN1729-1]	54
Tabelle 2.	Untersuchte Aluminiumlegierung [DIN1725-1].....	54
Tabelle 3.	Minimale Biegeradien für Magnesiumbleche [BAUC93], [TAYL69].....	116
Tabelle 4.	Schichtsysteme für Magnesium [Reinhold00]	143
Tabelle 5.	Auswahl von Vorbehandlungs-/Beschichtungssystemen [Reinhold00]	143
Tabelle 6.	Einheitensystem von MSC.Patran	146
Tabelle 7.	Materialeigenschaften der Fahrzeugtür	160
Tabelle 8.	Materialkennwerte	161
Tabelle 9.	Auswertung bezüglich Kräfteinleitung in Rahmen (F = 500 N).....	172
Tabelle 10.	Auswertung bezüglich Kräfteinleitung am Außenblech (F = 400 N)	181
Tabelle 11.	Auswertung bezüglich Kräfteinleitung am Schlossbereich (F = 200N)	190

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
Al	Aluminium
ASTM	internationale Standardisierungsorganisation (American Society for Testing and Materials)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CO ₂ -Laser	Kohlendioxid-Laser
Cu	Kupfer
FEM	Finite-Elemente-Methode
HSS	Schnellarbeitsstahl
IHU	Innen-Hochdruck-Umformung
IWU	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
KTL	Kathodische Tauch-Lackierung
ND:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
MAG-Schweißen	Metallaktivgasschweißen
Mg	Magnesium
Mg-K	Magnesium-Knet-Legierung
MPC	Multi – Point Constraint
MSG-Verfahren	Metallschutzgasschweißen
PKD	Polykristalliner Diamant
RBE	Rigid Body Element
RT	Raumtemperatur
TeMaK	Technologieplattform zum Einsatz von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus
T-IHU	Temperiertes Innen-Hochdruck-Umformen
ULSAB	Automobil-Leichtbaukonzept (UltraLight Steel Auto)
WIG-Verfahren	Wolfram-Inertgas-Schweißen

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

In der PKW-Entwicklung wie auch in zahlreichen anderen Branchen stellt der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, insbesondere von Mg-Legierungen einen beachtlichen Wachstumsmarkt dar. Neben der Kraftstoffersparnis durch die Gewichtsreduzierung tragen auch die verbesserten Korrosionseigenschaften und der höhere Wiederverkaufswert zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit bei.

Dies ist die Basis für ein Bündnis aus 16 Partnern (13 Unternehmen, davon 9 KMU, und 3 Forschungseinrichtungen), folgende Vision zu verwirklichen:

„Aufbau einer Plattform zur Erzeugung, Verarbeitung und Wiederverwertung von Mg-Flachmaterial in der Automobil- und Maschinenbau-Region Zwickau-Chemnitz-Dresden auf wissenschaftlich-technisch höchstem Niveau mit großer wirtschaftlicher Schlagkraft und Ausstrahlung auf die Märkte Deutschlands, Europas und der ganzen Welt.“ [TE09]

Zielstellung:

Die bündnisübergreifenden Wachstumsziele (Kompetenzerhöhung, Geschäftsfelderweiterung, Markterschließung und -erweiterung, Umsatz- sowie Gewinnsteigerung) sind sowohl durch anspruchsvolle technologische, als auch durch marktstrategische Zielstellungen unteretzt.

Bereits kurz- und mittelfristig (2012) werden Umsatzzuwächse um ca. 25 Mio. € abgeschätzt, langfristig (2015) kann davon ausgegangen werden, dass mehr als 120 Mio. € p.a. zu erwarten sind.

Am Potenzial des europäischen Wachstumsmarktes für Mg-Produkte kann das Bündnis ab dem Jahr 2015 mit mindestens 120 Mio. € partizipieren. Das Eindringen in den globalen Markt wird ab 2016 konzipiert. Es wird innerhalb des Bündnisses ein Zuwachs an Arbeits- und Ausbildungsplätzen auf 100/10 (2012) und ca. 300/30 (2015) prognostiziert.

Sowohl Geschäftsfelderweiterungen als auch Investitionen bei den Bündnispartnern zeigen Wirkung in der Region. Durch Einbindung von Zulieferern, die außerhalb der Mg-K-Wertschöpfungskette angesiedelt sind, aber für Endprodukte unerlässliche Komponenten bereitstellen, ist mit weiteren Arbeits-/Ausbildungsplätzen sowie Investitionen zu rechnen.

[TE09]

Die Etablierung der Plattform im Raum Zwickau-Chemnitz-Dresden leistet des Weiteren für die Region einen Beitrag:

- zur Standortsicherung
- zum Imagegewinn
- zur Investitionsattraktivität

Für Voith Engineering Services GmbH Road & Rail ergeben sich folgende Aufgaben:

Innerhalb des Gesamtprojektes Temak ist der Bereich Entwicklung ein grundlegendes Teilprojekt. Für den Werkstoff Magnesium und speziell Magnesiumknetlegierungen sind neue Richtlinien für die Konstruktion von Karosseriebauteilen erforderlich. Diese neuen Richtlinien ergeben sich aus den Materialeigenschaften und den Fügemöglichkeiten für Magnesium.

Im Zuge des Projektes erfolgt die Konstruktion eines Demonstrators, daraus sind die o.g. allgemeingültigen Richtlinien abzuleiten. Die Entwicklung des Demonstrators ist mit den weiteren Partnern des TeMak-Verbundes abzustimmen. Die Einflüsse aus Umformung, Fügeprozessen als auch dem Recycling sind zu berücksichtigen.

Sehr wichtig ist auch eine intensive Abstimmung der Anforderungen des Kunden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten von Voith Engineering Services besteht in der Schaffung und Anwendung geänderter Berechnungsgrundlagen. Die Materialeigenschaften lassen nicht nur neue Anforderungen im Bezug auf die statischen und dynamischen Festigkeiten, sondern auch insbesondere ein geändertes Crashverhalten vermuten.

Für die Berechnung werden neue Materialmodelle erforderlich.

Ziel des Verbundprojektes ist es, die für die Umsetzung von Leichtbaukonzepten im Automobilbau sowie anderen Industriezweigen, wie z.B. Flugzeug- oder Schienenfahrzeugbau, notwendigen Umform-, Zerteil- und Fügetechnologien für die Herstellung komplexer Bauteile und komplexer Baugruppen aus Magnesium-Knetlegierungen zu entwickeln.

Obwohl dieser Werkstoff das Potenzial für den Leichtbau aufgrund seines geringen spezifischen Gewichts bei gleichzeitig hoher Festigkeit bietet, kann er bisher wegen seiner eingeschränkten Umformeigenschaften bei Raumtemperatur noch nicht wie gewünscht industriell eingesetzt werden. Erst bei höheren Temperaturen verbessert sich das Umformverhalten von Magnesium, wobei noch keine grundlegenden Kenntnisse bezüglich einer optimalen und stabilen Herstellmethode für praxisrelevante Bauteil- und

Baugruppenvarianten vorliegen.

Im Rahmen dieses Verbundprojektes sollen erstmals durchgängig die kompletten Herstellungsprozesse unter Wärmeeintrag betrachtet werden. Hierdurch sollen die für den Leichtbau besonders interessanten, nämlich masseintensiven Bauteile, wie z.B. die Karosserie- bzw. Strukturteile eines Autos, in den Fokus der Nutzung des Magnesiums gerückt werden.

2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

2.1 Verfahren die bei der Bearbeitung und Umformung von Magnesiumknetlegierungen Anwendung finden

Die Massivumformung von Magnesiumknetlegierungen führt bis jetzt eher ein Randdasein. Um die strukturellen Hindernisse der Legierungen zu überwinden, muss die Umformung im Bereich von 200 °C bis 225 °C erfolgen. Dazu sind folgende Verfahren aus der 2. Hauptgruppe der DIN 8580 besonders prädestiniert.

Zum **Schmieden** geeignet ist nicht jede Magnesiumlegierung. In den letzten Jahren wurden, um die Vorteile der Schmiedeverfahren effektiv nutzen zu können, neue Legierungen entwickelt. Dies sind als Hauptvertreter zum einen die Standardlegierungen AZ31 und AZ61. Zum Anderen für höher beanspruchte Schmiedeteile die Legierungen AZ80, ZK60 und HM21.

Als Verfahren werden vorrangig das Freiformschmieden eingesetzt um Gefügefehler (Lunker, Poren) nach dem Gießen auszuschiessen.

Das Gesenkschmieden wird angewendet wenn Bauteile mit einem Höchstmaß an Sicherheit gegen Versagen in Verbindung Widerstand gegen Schwingungen und Stoßbeanspruchung benötigt werden. Bei diesem Verfahren entsteht anders als beim Gießen ein sehr gleichmäßiger Faserverlauf. Daraus resultieren eine hohe Oberflächenqualität und eine gute Spanbarkeit. Haupteinsatzgebiete sind Räder, Quer-, Längslenker, Lenkungs- und Bremsenteile.

Als jüngstes Verfahren existiert das Präzisionsschmieden von zum Beispiel Zahnrädern, Kettenrädern und Wellen. Hauptziel des Verfahrens ist der ökonomische Material- und Ressourceneinsatz. Dies beinhaltet die Herstellung nahezu einbaufertiger Bauteile wobei die spanende Nachbearbeitung durch die Vermeidung von Grat auf ein Minimum reduziert wird. [MgEAP00], [MGLG01]

Beim **Fließpressen** werden durch große Druckspannungen metallische Werkstoffe meist bei Raumtemperatur zum Fließen in axialer und radialer Richtung gebracht. Zur Verformung von Magnesiumlegierungen müssen die Rohlinge und das Werkzeug vorgeheizt werden. Das formgebende Werkzeug besteht aus einer Matrize und einem Stempel. Ausgangswerkstücke sind meist Scheiben, Stangenabschnitte oder einfache Formteile. Vorteil des Fließpressens ist, dass eine relativ hohe Maßgenauigkeit der pressblanken Teile erreichbar ist. [MAG00]

Die einzelnen Verfahren werden nach ihrer Hauptfließrichtung unterschieden.

Beim Rückwärtsfließpressen ist der Werkstofffluss der Stempelbewegung entgegengerichtet. Der Werkstoff fließt durch einen von Matrize und Stempel gebildeten Ringspalt nach oben, das entstehende Werkstück ist nach Prozessende ein einseitig offener Hohlkörper.

Mittels Vorwärtsfließpressen sind Werkstücke herstellbar welche die Form der Matrize annehmen. Die Stempelbewegung und der Werkstofffluss sind identisch. Es können sowohl achsensymmetrische Voll- als auch Hohlkörper hergestellt werden.

Das kombinierte Fließpressen vereint beide Verfahren. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass in einem Arbeitsgang komplizierte Formen mit unterschiedlichen Wanddicken gefertigt werden können [MGLG01]

Obwohl mit dem **Tiefziehverfahren** (Zug-Druck-Umformung) geringe Umformungen von Magnesiumblechen bei Raumtemperatur möglich sind, ist der Einsatz in der Industriellen-beziehungsweise Serienfertigung nur mit beheizten Werkzeugen und Blechen relevant. Entscheidend für die Tiefziehfähigkeit ist das Grenzziehverhältnis, welches stark an die bei der Umformung herrschende Temperatur gebunden ist. Ab einer Temperatur von 100 °C steigt das Grenzziehverhältnis von Magnesiumlegierungen sprunghaft an, um im Temperaturbereich von 200 °C bis 250 °C sein Maximum zu erreichen. [MgEAP00], [MGLG01]

Das **Streckziehen** (Zug-Zug-Umformung) von Magnesiumlegierungen kann je nach erforderlichem Umformgrad im Temperaturbereich von 130 °C bis 290 °C erfolgen. Der große Vorteil der Magnesiumlegierungen bei der Verfahrensanwendung, liegt in der gering auftretenden Rückfederung beim temperierten Streckziehen. Aus diesem Grund werden die gewünschten Sollgeometrien bereits bei einer Überstreckung von ca. 1%. [MAG00]

Trotz der höheren Grenzziehverhältnisse und der verbesserten Streckziehfähigkeit bei der Warmumformung sollten geringe Umformgeschwindigkeiten gewählt werden, um eine sichere Prozessführung zu gewährleisten. Das gesteigerte Umformvermögen bei höheren Temperaturen ermöglicht ein großes Potential für die Herstellung von komplexen Geometrien

aus Magnesiumlegierungen. [DRÖD99], [MgEAP00], [MGLG01]

Beim Prozess des **Innenhochdruckumformens** wird ein Rohr / Hohlprofil in ein Formwerkzeug, welches die Außenkontur des späteren Werkstückes abbildet, eingelegt. Das Werkzeug wird geschlossen und die Rohr- / Profildenden mittels Verschlussstempeln abgedichtet. Im Anschluss erfolgt die Einleitung des Wirkmediums durch die Axialstempel, der Druck wird dabei so lange erhöht, bis die Kontur des Werkzeuges vollständig abgebildet ist. Je nach Werkstoff und der Komplexität des Bauteils können Drücke von bis über 3000 bar notwendig sein.

Die Vorteile gegenüber konventionellen Umformverfahren liegen bei der Herstellbarkeit von komplexen Bauteilen mit einer hohen Maß- und Formgenauigkeit. Zusätzlich weisen die Bauteile eine höhere Biege- und Torsionssteifigkeit auf. Auch die Gewichtseinsparung und die Möglichkeit Teile während des Umformprozesses miteinander zu Verbinden sind beachtlich. Nachteilig sind längere Taktzeiten durch technologiebedingt eng begrenzte Umformgeschwindigkeiten und die hohen Anschaffungs- und Wartungskosten der komplexen Anlagentechnik. Wie auch bei anderen Umformprozessen bei denen Magnesium eingesetzt wird, muss beim Innenhochdruckumformen sowohl das Werkzeug als auch das Bauteil erwärmt werden.

Das Aufweitstauchen kann sowohl im geschlossenen Gesenk zur Herstellung von rotationssymmetrischen Bauteilen, als auch im offenen Gesenk zur Fertigung von Rohrabzweigelementen, durchgeführt werden. Beim Aufweiten werden die Querschnitte Senkrecht zur Achsrichtung vergrößert. Das Kalibrieren ist kein eigenständiges Verfahren, sondern wird im Anschluss an einen Umformvorgang eingesetzt um eine hohe Maß- und Formgenauigkeit zu erzielen. Das Biegen und Durchsetzen wird verwendet um beim Umformen den Innenquerschnitt zu erhalten.

Im Automobilbau werden immer weniger konstante Biegeradien benötigt. Vielmehr besteht der Bedarf in komplex gebogenen Biegeverläufen (z.B. A-Säule PKW), welche sich auf bisherigen Biegemaschinen nicht realisieren lassen. Durch das Freiformbiegen ist es möglich, Funktionsverläufe sowie sehr große Biegeradien, entsprechende Radieneinläufe und – ausläufe zu erstellen, da nicht, wie bei einer herkömmlichen Dornbiegemaschine, über eine feste Schablone gebogen wird. Vielmehr wird über die Zustellung einer Biegeschablone ein individueller Kurvenverlauf realisiert. Man spricht hier von einer kinematischen Formgebung.

Beim Freiformbiegen lassen sich durch die Zustellung von einer oder mehreren Rollen an die sich drehende Biegeschablone - bei gleichzeitigem Vorschieben des Rohres mittels eines Transportwagens - individuelle Kurvenverläufe realisieren. Theoretisch könnte beim Freibiegen an jedem Punkt des zu biegenden Rohres ein anderer Radius eingestellt werden (Bogen in Bogen). Um der Torsion des Profils entgegenzuwirken, muss eine weitere Achsbewegung zu dem eigentlichen Biegevorgang hinzukommen. Die Torsion, welche sich beim Biegen des eingespannten Profils ergibt, wird mittels einer entsprechenden Drehbewegung entgegengesteuert. Um dies zu realisieren, muss eine weitere Achsbewegung bei dem eigentlichen Biegevorgang hinzukommen. Durch Einflussfaktoren, wie das Werkstoffverhalten, insbesondere die Rückfederung des Werkstücks, die sich einstellende Krümmung im Biegeverlauf und die Ovalisierung bzw. Abflachung des Rohres beim Biegeprozess, gestaltet sich die Ermittlung entsprechender Korrekturwerte entsprechend langwierig.

Das Freiformbiegen weist sowohl ökonomische als auch technologische Vorteile gegenüber der konventionellen Vorgehensweise bei Biegebauteilen auf. Kurze Generierungszeiten bei der Erstellung der Daten und den geringen Kosten zur Initialisierung des Prozesses, sowie die flexible Reaktion bei Prozessänderungen machen die analytische Vorgehensweise zu einem effektiven Hilfsmittel zur Vorhersage der Werkzeugzustellung und der Maschinenparameter. [DRÖD99], [MgEAP00], [MGLG01]

Unter **Falzen** versteht man ein unlösbares, formschlüssiges Fügen von Blechen. Zur Herstellung einer Falzbindung werden die Blechränder wie beim Bördeln, oft mehrlagig, ungekantet. Der entscheidende Unterschied liegt in darin, dass der Rand über 90° umgeschlagen wird. Danach werden die Bleche ineinander verhakt und zusammengedrückt.

Falze müssen durchgesetzt werden, damit die Falze nicht wieder aufspringen.

Bleche bis 1 mm Blechdicke, wie z. B. Stahl-, Kupfer-, Aluminium-, Zink- und Bleibleche lassen sich gut falzen. Besonders gut können Bleche mit Schutzbeschichtung gefalzt werden, wie z. B. Weißbleche, verzinkte, verbleite und kunststoffüberzogene Bleche, weil dabei die Schutzschicht nicht beschädigt wird. [DRÖD99], [MGLG01]

Spanende Bearbeitung

Der Konstruktionswerkstoff Magnesium ist im Allgemeinen leicht zerspanbar da die Bearbeitung nur eine geringe Schnittkraft erfordert. Diese liegt im Vergleich zu Aluminium bei ca. 50% und im Vergleich zu Stahl bei <10%. Daraus resultiert ein geringer

Werkzeugverschleiß bei gleichzeitig hohem Vorschub, wobei bei der Bearbeitung dennoch eine lange gleichbleibend hohe Oberflächengüte gewährleistet werden kann. Als Schneidstoffe kommen vorwiegend Schnellarbeitsstahl (HSS) und polykristalliner Diamant (PKD) zum Einsatz. Bei der Kühlung während der Bearbeitung von Magnesiumlegierungen, werden vorrangig auf Öl basierende Kühl- / Schmiermittel verwendet um im Fall einer Entzündung der Späne, die exotherme Reaktion mit Wasser zu vermeiden. Besonders beim Schleifen muss auf eine sehr gute Absaugung und auf die Vermeidung von Zündquellen geachtet werden um die Bildung bzw. Verpuffung explosiver Gemische zu verhindern.
[MAG00], [MgEAP00], [MGLG01]

2.2 Stand der Forschung vor Projektbeginn

In der modernen Automobiltechnik gewinnt der Leichtbau zunehmend an Bedeutung. Zahlreiche Einflussfaktoren, wie z.B. die wachsende Nachfrage der Kunden nach mehr Sicherheit führen dazu, dass die Fahrzeuge zunehmend schwerer werden. Um diesem Trend entgegenzuwirken, die Gebrauchseigenschaften zu erhöhen und den Kraftstoffverbrauch zu senken, werden Leichtbaustrategien verfolgt.

Zurzeit ist Aluminium ($\rho \approx 2,7\text{g/cm}^3$) und seine Legierungen, nach Stahl ($\rho \approx 7,87\text{g/cm}^3$), der am häufigsten verwendete Konstruktionswerkstoff in der Automotive Industrie [ALU03]. Die bisherigen Bemühungen, konventionelle Stahlwerkstoffe durch Aluminiumlegierungen zu ersetzen, haben dazu geführt, dass durchschnittlich in jedem Kraftfahrzeug je nach Fahrzeugklasse, ca. 20-150 kg Aluminium [WWW01] eingesetzt werden. Aktuelle Entwicklungen gehen sogar soweit, dass die gesamte Karosserie sowie auch sicherheitsrelevante Strukturteile aus Aluminium gefertigt werden.

Diese Entwicklung zeigt, dass der Anteil von Leichtbauwerkstoffen im Automobilbau immer mehr an Bedeutung gewinnt. Magnesiumlegierungen ($\rho \approx 1,74\text{g/cm}^3$) haben im Vergleich zu Aluminiumlegierungen ein noch höheres Leichtbaupotential, wodurch im Automobilbau eine weitere, deutliche Gewichtseinsparung erreicht werden kann.

Je nach Einsatzgebiet können Bauteile aus Magnesiumlegierungen bei gleicher Bauteilfestigkeit im Vergleich zu Aluminium bis zu 30% und im Vergleich zu Stahl bis zu 70% Gewicht einsparen.

Aktuell beträgt der durchschnittliche Anteil von Magnesium am Fahrzeuggewicht im Markenquerschnitt ca.6kg. In der gehobenen Mittel- und Luxusklasse ist Hersteller bedingt schon ein Magnesiumanteil von bis zu 26 Kilogramm pro PKW üblich [WWW03]

Verwendung findet Magnesium zum Großteil in Getriebegehäusen bzw. Motorblöcken, Karosseriestrukturen und im Fahrzeuginnenraum, das heißt in sogenannten Class-B-Komponenten. Die Oberflächen dieser Bauteile sind im Normalfall für den Benutzer nicht sichtbar, wodurch eine Nachbearbeitung entfällt, sie werden im sogenannten "body-in-white" [WIKI02], dem Fahrzeugrohbau verbaut. So bestehen zum Beispiel viele Armaturenräger, Konsolen aber auch Lenkradskelette und Sitzschalen aus Magnesiumlegierungen. In Zukunft soll das Material aber auch für Class-A-Komponenten also Bauteilen mit sichtbaren

(Freiform)-Flächen im Exterieur- und Interieurbereich vermehrt eingesetzt werden ,da dort weitere große Einsparpotentiale an Gewicht und somit an Emissionen liegen [MAG00]. Dies erfordert eine hohe Oberflächengüte in Verbindung mit guter Korrosionsbeständigkeit.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Ablauf

3.1.1 Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien unter Berücksichtigung der besonderen Werkstoffeigenschaften von Magnesium

3.1.1.1 Analyse des relevanten Teilespektrums

- Auswahl von Bauteilen (z.B. Tür VW Passat inklusive Varianten)
- Definition der Anforderungen an spezielle Bauteile (Befestigung, Scheibeneinbau)
- Erarbeitung von Lastenheften für spezielle Bauteile
- Definition der Anforderungen aus technologischen Abläufen

3.1.1.2 Festlegung der an die Bauteile gestellten Anforderungen

- Aufnahme von Anbauteilen
- Befestigung der Verkleidungen
- Zusammenstellung der Anforderungen in einem Lastenheft

3.1.1.3 Mitarbeit bei der Durchführung von Grundlagenuntersuchungen

- Beschreibung der Bauteilanforderungen , die sich an Tiefziehen, IHU-Umformung, Oberflächenbehandlung, Fügetechnologien ergeben

3.1.1.4 Konstruktion der Referenzbauteile (Demonstrator)

- Türinnenblech
- Türaußenblech
- Rahmen
- Untersuchung von Befestigungsmöglichkeiten

3.1.1.5 Mitarbeit bei den Untersuchungen zur Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität

- Definition der Anforderungen aus technologischen Abläufen

- Erarbeitung von Richtlinien, die die aus Konstruktionssicht erforderlichen Toleranzanforderungen definieren
- Beurteilung der Bauteile auf außenhauttaugliche Oberflächenqualität

3.1.1.6 Mitarbeit bei der Konstruktion der Demonstratorwerkzeuge

- Bereitstellung der Flächendaten für die Werkzeugkonstruktion
- Vorgabe von grundlegenden Anforderungen z.B. Ziehrichtung
- Definition der Anforderungen aus Funktionssicht

3.1.1.7 Mitarbeit bei der Beurteilung Bauteilqualität

- Festlegung von Funktionskatalogen
- Beurteilung von Abweichungen vom Idealzustand

3.1.1.8 Untersuchungen zu Fügeverfahren

- Auswahl und Gegenüberstellung verschiedener möglicher Fügeverfahren
- Bewertung der Verfahren
- Untersuchungen zu Zugänglichkeiten
- Technologische Bewertungen

3.1.1.9 Erarbeitung Richtlinien

- Zusammenfassung der aus der Konstruktion und Herstellung der Bauteile gewonnenen Erkenntnisse in allgemeingültigen Richtlinien

3.1.2 Erarbeitung von Berechnungsgrundlagen unter Berücksichtigung der besonderen Werkstoffeigenschaften von Magnesium

3.1.2.1 Zusammenstellung der Bauteilanforderungen und Belastungen

- Auswahl von Bauteilen
- Definition der Anforderungen an spezielle Bauteile

- Untersetzung der Anforderungen mit Lastannahmen
- Definition der Anforderungen aus technologischen Abläufen

3.1.2.2 Mitarbeit bei der Durchführung von Grundlagenuntersuchungen

- Validierung und Verifizierung der bestehenden Berechnungsmodelle
- Erarbeitung neuer Berechnungsmodelle

3.1.2.3 Bewertung von Fügeverfahren

- Berechnung von Bauteilverbindungen und Bewertung der Ergebnisse

3.1.2.4 Erarbeitung Richtlinien

- Zusammenfassung der aus der Konstruktion und Herstellung der Bauteile gewonnenen Erkenntnisse in allgemeingültigen Berechnungsrichtlinien

3.1.3 Erstellung und Abstimmung von Konzepten für potentielle Anwender

3.1.3.1 Analyse von potentiellen Anwendern

- Marktuntersuchung
- Kontaktaufnahme mit bestehenden Kunden und Analyse von Bedarfen
- Sammlung von Problemfeldern, in denen z.B. Gewichtseinsparungen erforderlich sind

3.1.3.2 Definition von Anwendungsfällen

- Kundenkontakte mit potentiellen Anwendern
- Diskutieren von Lösungsansätzen

3.1.3.3 Konzepterarbeitung

- Lösungskonzepte
- Diskussion mit Kunden

3.1.4 Technologische Bewertung des Magnesiumeinsatzes

3.1.4.1 Logistik

- Einfluß auf logistische Prozesse bei Herstellern und potentiellen Kunden
- Behälterkonzepte
- Analyse der Transportkette

3.1.4.2 Verarbeitungstechnologie

- Einfluß des Magnesiums auf bestehende Prozesse
- Presswerk
- Rohbau
- Montage

3.2 Zeit- und Kostenplan

Planung:

Geplante Laufzeit: 01.04.2007 – 31.03.2010

Bearbeitungszeit: 36 Monate

Kostenrahmen: 550.378 €

Realisierung:

Die Bewilligung der Mittelzuwendung erfolgte am 25.04.2007. Der offizielle Projektstart war dennoch der 01.04.2007.

Die Projektlaufzeit betrug 36 Monate und wurde am 30.03.2010 planmäßig beendet.

Der Kostenrahmen des Projektes betrug 550.378,00€

Kostenplan:

Die Kostenaufteilung der Gesamtvorkalkulation auf die einzelnen Arbeitspakete entspricht nicht vollständig den im Projektantrag benannten Arbeitspunkten.

Mit Änderungsbescheid KZ 810301936486 vom 08.06.2009 wurde die Position 0823 FE-Fremdleistungen in Anteile der Position 0837 Personalkosten umgewidmet.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 FE – Ergebnisse im nationalen und internationalen Wettbewerb

Zu Beginn der Bearbeitung wurde eine umfassende Literatur-, Internet- und Patentrecherche durchgeführt. Die gefundenen Publikationen bestätigen die steigende Bedeutung der Leichtbaukonstruktion mit Magnesium. Im Projektverbund wurden uns jedoch keine eventuellen Problemstellen offengelegt, welche mit Patenten am Markt tangieren oder verletzen würden.

4.2 Patentsituation

Im Verlaufe der Projektbearbeitung wurden begleitend Patent- und Literaturrecherchen betrieben. Hinsichtlich der konstruktiven Aspekte des Vorhabens ergaben sich keine schutzrechtlichen Ansatzpunkte vergleichbarer Aufgabenstellungen und Lösungswege.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

5.1 Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern

Die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Kooperationspartnern verlief sehr konstruktiv. Zur planmäßigen Themenbearbeitung im Team der Kooperationspartner fanden Workshops sowie dazwischen regelmäßige Arbeitstreffen statt, an denen alle betroffenen Projektpartner teilnahmen. Dabei wurden die jeweiligen Bearbeitungsstände vorgestellt, diskutiert und abgestimmt. Weiterhin fanden individuell Projektbesprechungen statt, in denen spezielle Schwerpunkte aus den Arbeitspaketen und Schnittstellen zwischen den jeweils betroffenen Partner erörtert werden.

Durch diese Zusammenarbeit konnten effektive Strukturen für die weitere erfolgreiche Umsetzung des Gesamtvorhabens geschaffen und ein Zuwachs an Know-how verzeichnet werden.

5.2 Am Vorhaben beteiligte Partner und deren Kernkompetenzen

Zum Firmenbündnis im Rahmen dieser Initiative gehören 16 Partner. Beteiligt sind 13 Unternehmen, davon 9 kleine und mittlere Unternehmen, sowie 3 Forschungseinrichtungen.



Bild 1. Überblick Verbundpartner TeMaK

Kompetenzbereich Material

Entwicklung und Herstellung von Halbzeugen mittels Gießwalztechnologie

Beteiligte Firmen:

- [MgF Magnesium Flachprodukte GmbH Freiberg](#)
- [EMA-TEC GmbH Sondershausen](#)

Kompetenzbereich Entwicklung und Konstruktion

Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien, Kennwertdatenbanken und Simulationswerkzeugen für Bauteile aus Magnesiumknetlegierungen sowie deren Validierung und Verifizierung

Beteiligte Firmen:

- [Voith Engineering Services GmbH Road & Rail](#)
- [Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik \(FhG IWU\) Chemnitz](#)

Kompetenzbereich Umformen und Zerteilen

Grundlagenentwicklungen zum Umformen, Zerteilen von Strukturen aus Magnesium-Knetlegierungen.

Grundlagenuntersuchungen zu neuen Lösungen gefalzter Erzeugnisse aus Magnesiumflachprodukten.

Entwicklung von innovativen Umformtechnologien für Magnesiumknetlegierungen (Mg-K)

Entwicklung und Umsetzung von Werkzeugkonzepten zum Umformen und Zerteilen komplexer Karosserieteile aus Mg-Blechen und -profilen.

Entwicklung innovativer Fließpress- und Schneidetechnologien für Mg-K.

Neue induktive Erwärmungstechnologien für das Umformen von Magnesium-Knetlegierungen

Neue magneto-elektrische Erwärmungstechnologien für das Umformen von Magnesium-Knetlegierungen.

Beteiligte Firmen:

- [Coexal GmbH Schönau v. d. Walde](#)
- [EMA-TEC GmbH Sondershausen](#)
- [E.S.C.H. GmbH](#)

- [Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik \(FhG IWU\) Chemnitz](#)
- [Karosseriewerke Dresden GmbH Radeberg](#)
- [SMZ Sächsische Metall Zentrum GmbH Zwickau](#)
- [STZ Sächsisches Technologie Zentrum gGmbH Zwickau](#)
- [SWZ Siebenwurst Werkzeugbau GmbH Zwickau](#)
- [Westfälische Hochschule Zwickau \(FH\)](#)

Kompetenzbereich Fügen

Entwicklung und Erprobung von innovativen Technologien zum Fügen von IHU-Teilen und Rohr-Blech-Kombinationen aus Mg-K.

Grundlagenentwicklungen zum Fügen von Strukturen aus Magnesium-Knetlegierungen
Adaptation innovativer Metallschutzgas- und Widerstandspunktschweißtechnologien für das Fügen von Magnesium-Knetlegierungen.

Anwendung und Umsetzung thermischer Fügeverfahren von Bauteilen aus Magnesiumblechen, Fließpressprofilen und Gussknoten aus Magnesiumlegierungen sowie deren Verbindungen untereinander in eine Serienfertigung .

Qualitätsprüfung thermisch gefügter Bauteile aus Magnesiumknetlegierungen.

Beteiligte Firmen

- [EMA-TEC GmbH Sondershausen](#)
- [E.S.C.H. GmbH](#)
- [Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik \(FhG IWU\) Chemnitz](#)
- [img- Ingenieurbetrieb für Materialprüfung, Qualitätssicherung und Schweißtechnik GmbH Crimmitschau/Sachsen](#)
- [Karosseriewerke Dresden GmbH Radeberg](#)
- [pro-beam Anlagen GmbH Neukirchen/Chemnitz](#)
- [SMZ Sächsische Metall Zentrum GmbH Zwickau](#)

Kompetenzbereich Oberfläche

Oberflächenbehandlung von Bauteilen aus Magnesiumknetlegierungen für den Einsatz im Automobilbau

Entwicklung und Prüfung hochwirksamer Passivierungsverfahren für Magnesiumknetlegierungen für den Einsatz im Automobilbau

Beteiligte Firmen:

- [Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik \(FhG IWU\) Chemnitz](#)
- [Innovent Technologieentwicklung e.V. Jena-Göschwitz](#)
- [BENSELER Beschichtungen Sachsen GmbH & Co. KG](#)

Kompetenzbereich Recycling

Entwicklung von Strategien zur recyclinggerechten Konstruktion (RecMaK-reko)

Verfahren zur recyclinggerechten Aufbereitung (RecMaK-ver)

Beteiligte Firmen:

- [ERZ Entsorgung und Recycling Zwickau GmbH](#)
- [E.S.C.H. GmbH](#)

5.3 Beratungen und Präsentationen

Beratungen innerhalb des Teams der Teilprojektleiter	
Zeitraum	Schwerpunkte
Monatlich bzw. nach Erfordernis des Projektfortschritts	Regelmäßige Diskussionen zum Projektmanagement, gemeinsamen Aktivitäten, Aufbereitung der Zwischenergebnisse Austausch der wechselseitig benötigten Teilergebnisse mit jeweiligen Partnern (z.B. IWU, WHZ, SWZ)
Beratungen im Rahmen der Projektleitung (Keine Mitgliedschaft durch Voith Engineering)	
Zeitraum	Schwerpunkte
-	-
Präsentationen	
01.04.-31.12.2007	1. Zwischenbericht
21.05.2008	Vortrag zum 1. öffentlichen TeMaK-Workshop (Zwickau)
24.09.2008	Vortrag zum 2. TeMaK-Workshop (Frankenberg)
21.01.2009	Vortrag zum 2. Strategieworkshop (Chemnitz)
13.05.2009	2. öffentlicher Workshop (Dresden)
30.04.2010	Vortrag zum 3. öffentlichen TeMaK-Workshop (Dresden)
01.01.-30.06.2008	2. Zwischenbericht
01.07.-31.12.2008	3. Zwischenbericht
01.01.-30.06.2009	4. Zwischenbericht
01.07.-31.12.2009	5. Zwischenbericht

II. Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse

1.1 Erarbeiten von Konstruktionsrichtlinien

1.1.1 Analyse des relevanten Teilespektrums

1.1.1.1 Auswahl von Bauteilen

Als Ausgangsdaten für den Pkw-Seitentür-Demonstrator wurde neben den Türmodelldaten des Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformung – Chemnitz (IWU), an welches die Rahmenkonstruktion angelehnt wurde auch ein Datenmodell einer aktuell verbauten PKW-Tür verwendet, um eine praktische Einbaubarkeit zu erzielen. Das Datenmodell wurde an die Anforderungen, die das Material Magnesium erfordert, angepasst.

Um das Türaußenblech aus Magnesiumknetlegierungsblechen herzustellen, musste im Außenblech eine Schweißnaht vorgesehen werden, da die benötigten Blechplatten nur in nicht ausreichender Breite zur Verfügung standen. Die beiden Bleche werden vor der Umformung miteinander verschweißt. Damit die dabei entstandene Schweißnaht nicht in der Designfläche verläuft, wurde eine Zierleistensicke vorgesehen in welcher die Naht durch das Anbringen einer Zierleiste verdeckt werden kann.

Auch das Innenblech der Tür wird als *Tailored Blank* ausgeführt und wurde geometrisch an die Anforderungen des neuen Materials angepasst. Dies umfasst zum Beispiel die Entschärfung sämtlicher Radien und die Anpassung der Aushubschrägen.

In das Türkonzept wurde ein Rahmen integriert, der zur Versteifung und Kraftableitung benötigt wird. An diesem Rahmen sollen die Kompetenzen zu den Verfahren Fließpressen, Freiformbiegen und Innenhochdruckumformen demonstriert werden.

1.1.1.2 Definition der Anforderungen an spezielle Bauteile (Befestigung, Scheibeneinbau)

Legende:

Festforderungen (F)/(FF)

Mindestforderungen (M)

Wünsche (W)

Anforderung Türbefestigung	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	Geometrie angepasst an die A-Säule als Befestigungspunkt der Scharniere an der Karosserie
	W	Verwendung von Original-Scharnieren
	M	Einstellbarkeit der Maße (Spaltmaße) beachten
	F	Raumbedarf (Bauraum) der einzubauenden Teile beachten
Merkmal Kinematik	F	Sicherheit der Scharniere gegen plötzliches Zuschlagen ohne Fremdeinwirkung
Merkmal Kräfte	F	Wirkende Kräfte beim Schließen der Tür mittels Zuziehgriff beachten
	F	Festigkeit im Crashfall
	F	Festigkeit bei Windlast
	F	Festigkeit Überöffnen und Türabsenkung
	F	Brüstungssteifigkeit
Merkmal Montage	F	Anziehmomente von Schrauben nach Sicherheitsvorgaben
Merkmal Stoff	M	Verwendung von Materialien mit entsprechender Festigkeit
	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Schmiermittel
	W	Verwendung umweltgerechter Hilfsstoffe
	F	Verwendung von Stoffen mit Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	M	Festigkeit (Abrieb, Bruchsicherheit,...) der Stoffe

	M	Korrosionsschutz beachten
Merkmal Sicherheit	F	Insassensicherheit im Crashfall - Versagenskriterien
	M	Öffenbarkeit der Tür nach Crash
	M	Widerstand gegen plötzliches Zuschlagen
	M	Verhinderung von Einklemmstellen (Kleidung, Finger, etc.)
Merkmal Ergonomie	M	Erreichbarkeit der Verstellelemente (Montag und Wartung)
Merkmal Gebrauch	M	leichte Bedienung (Kraftaufwand zur Betätigung)
	M	Geräuscharm
	M	Verschleiß (Schmierung)
	F	Einsatzkriterien / Funktionsgewährleistung Temperaturunabhängigkeit (Sommer und Winter)
Merkmal Kosten	W	Herstellkosten minimieren (Substituierbarkeit)
	W	Wartungsaufwand minimieren (Wartungsfreiheit)
Merkmal Komfort	W	Weicher Anschlag
	W	Gr. Öffnungswinkel – für einfachen Einstieg
	W	Leichtgängigkeit der Mechanismen
Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffen
	W	Gute Weiter-, Wiederverwertung der Materialien
Merkmal Fertigung	F	Einfache, kostengünstige Fertigung

Anforderung Scheibeneinbau	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	Befestigungspunkte für Fensterhebergetriebe vorsehen
	F	elektrischen oder mechanischen Antrieb vorsehen
	F	Anschlüsse für elektrische Fensterheber vorsehen

	F	Raumbedarf (Bauraum) der einzubauenden Teile beachten (Freiraum für Scheibenbewegung, Leitungsverlegung)
Merkmal Kinematik	F	Gewährleistung sicherer Scheibeführung
Merkmal Kräfte	F	Wirkende Kräfte beim Schließen und Öffnen der Scheibe (Maximalkraft)
	F	Festigkeit im Crashfall
	F	Festigkeit bei Windangriff
	F	Widerstand gegen „Auflehnen“ auf halb geöffnete Scheibe
Merkmal Montage	M	Anziehmomente von Schrauben (Bruchgefahr der Scheibe)
	M	Einfache Zugänglichkeit für Motor/Getriebe oder Scheibenaustausch (Wartungsfall)
Merkmal Stoff	W	Verwendung von Materialien mit entsprechender Festigkeit
	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Schmiermittel
	W	Verwendung Umweltgerechter Hilfsstoffe
	F	Verwendung von Stoffen mit Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	F	Festigkeit (Abrieb, Bruchsicherheit, Splitterbildung...) der Stoffe
	M	Korrosionsschutz beachten
Merkmal Sicherheit	F	Insassensicherheit im Crashfall - Versagenskriterien
	F	Öffenbarkeit der Tür nach Crash (Verletzungen durch Scherben)
	F	Bruchsicherheit bei plötzlichem Tür-Zuschlagen
	F	Verhinderung von Einklemmstellen (Kleidung, Finger, etc.) – Notabschaltung der Stellmotoren bei zu großem Widerstand (Kindersicherheit)
Merkmal Ergonomie	F	Erreichbarkeit der Verstellelemente (Montag und Wartung)

Merkmal Gebrauch	M	leichte Bedienung (Kraftaufwand zur Betätigung)
	W	Geräuscharm
	M	Verschleiß (Schmierung)
	F	Einsatzkriterien / Funktionsgewährleistung Temperaturunabhängigkeit (Sommer und Winter)
	F	Isolation bei elektrischen Komponenten
Merkmal Kosten	W	Herstellkosten minimieren (Substituierbarkeit)
	W	Wartungsaufwand minimieren (Wartungsfreiheit)
Merkmal Komfort	W	Weiche Bewegung – Stufenlose Verstellbarkeit
	W	Schnelle Reaktion auf Verstellbefehle
	W	Leichtgängigkeit
Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffen
	W	Gute Weiter-, Wiederverwertung der Materialien
Merkmal Fertigung	W	Einfache, kostengünstige Fertigung

1.1.2 Festlegung der an die Bauteile gestellten Anforderungen

1.1.2.1 Aufnahme von Anbauteilen

Betrachtete Anbauteile:

- Türgriff
- Außenspiegel
- Türschloss/Schlossträger
- Dichtgummi
- Zierleiste
- Türverkleidungen

Anforderung Türgriff	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	Griff muss Zugbelastungen standhalten
	F	Integration von Schloss und/oder Schließmechanismus bzw. anderer Öffnungs- und Schließensoren
	F	Anschlüsse für elektrische Sensorik
	F	Raumbedarf (Bauraum) der einzubauenden Teile beachten (Griffmulde in Außenhaut)
	F	Befestigungspunkte zum Anschrauben der Türgriffe leicht zugänglich
Merkmal Kinematik	F	Gewährleistung des Öffnungsmechanismus
Merkmal Kräfte	F	Wirkende Kräfte beim Schließen und Öffnen der Tür (Maximalkraft)
	F	Festigkeit im Crashfall
Merkmal Montage	F	Anziehmomente von Schrauben vorgeben
	F	Einfache Zugänglichkeit Montage und Wartung des Schlosses etc. von innen gewährleisten
Merkmal Stoff	W	Verwendung von Materialien mit entsprechender Festigkeit

	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Werkstoffe und Schmiermittel
	W	Verwendung Umweltgerechter Hilfsstoffe
	F	Verwendung von Stoffen mit Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	F	Festigkeit (Abrieb, Bruchsicherheit, Oberflächenempfindlichkeit...) der Stoffe
	F	Korrosionsschutz beachten
Merkmal Sicherheit	F	Insassensicherheit im Crashfall - Versagenskriterien
	F	Öffenbarkeit der Tür nach Crash
	F	Sicherheit bei plötzlichem Tür-Zuschlagen
	F	Verhinderung von Einklemmstellen (Kleidung, Finger, etc.)
Merkmal Ergonomie	F	Gute Haptik, Vermeidung scharfer Kanten,
Merkmal Gebrauch	F	leichte Bedienung (Kraftaufwand zur Betätigung)
	F	Geräuscharmheit
	F	Verschleiß (Schmierung)
	F	Einsatzkriterien / Funktionsgewährleistung Temperaturunabhängigkeit (Sommer und Winter)
	F	Isolation bei elektrischen Komponenten
Merkmal Kosten	F	Herstellkosten minimieren (Substituierbarkeit)
	F	Wartungsaufwand minimieren (Wartungsfreiheit)
Merkmal Komfort	W	Angenehme Haptik
	W	Schnelle Reaktion auf Befehle
	W	Leichtgängigkeit
Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffe
	F	Weiter-, Wiederverwertung der Materialien
Merkmal Fertigung	F	Einfache, kostengünstige Fertigung

Anforderung Aufnahme Außenspiegel	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	Anforderung des Designs erfüllen
	F	Anschlüsse für Motoren (automatisches Anklappen)
	F	Anschlüsse für elektrische Sensorik (Tote Winkel Überprüfung)
	F	Anschlüsse zur Verstellung und elektrische Beheizung
	F	Befestigungspunkte zum Anschrauben des Spiegelgehäuses leicht zugänglich
Merkmal Kinematik	F	Gewährleistung des Verstellmechanismus
Merkmal Kräfte	F	Festigkeit bei Fahrtwindbelastung (Maximalkraft)
	F	Festigkeit im Crashfall
Merkmal Montage	F	Anziehmomente von Schrauben
	F	Einfache Zugänglichkeit Montage und Wartung des Spiegels etc. (Glasauswechslung)
Merkmal Stoff	W	Verwendung von Materialien mit entsprechender Festigkeit
	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Werkstoffe und Schmiermittel
	W	Verwendung Umweltgerechter Hilfsstoffe
	F	Verwendung von Stoffen mit Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	F	Festigkeit (Abrieb, Bruchsicherheit, Oberflächenempfindlichkeit...) der Stoffe
	F	Korrosionsschutz beachten
Merkmal Sicherheit	F	Insassensicherheit im Crashfall – Versagenskriterien (Splitter im Innenraum)
	F	Sicherheit bei plötzlichem Tür-Zuschlagen
	F	Verhinderung von Einklemmstellen (Kleidung, Finger, etc.)

Merkmal Ergonomie	F	Vermeidung scharfer Kanten, einfache Einstellung
	W	Gute Erreichbarkeit der Befestigungsstellen
Merkmal Gebrauch	F	Leichte und logische Bedienung (Kraftaufwand bei mechanischer Betätigung)
	F	Geräuscharmheit (Windgeräusche)
	F	Funktion des Mechanismus
	F	Einsatzkriterien / Funktionsgewährleistung Temperaturunabhängigkeit (Sommer und Winter)
	F	Isolation von elektrischen Komponenten
Merkmal Kosten	W	Herstellkosten minimieren (Substituierbarkeit)
	W	Wartungsaufwand minimieren (Wartungsfreiheit)
Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffe
	W	Weiter-, Wiederverwertung der Materialien
Merkmal Fertigung	W	Einfache, kostengünstige Fertigung

Anforderung Aufnahme Türschloss/Schlossträger	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	Zugänglichkeit für Einbau und Wartung
	F	Anschlüsse für Stellmotoren
	F	Anschlüsse für elektrische Sensorik
	F	Anschlüsse der Mechanik (Zentralverriegelung)
Merkmal Kinematik	F	Gewährleistung des Verstell-/Schließmechanismus
Merkmal Kräfte	F	Anziehungskräfte für Befestigung vorgeben
Merkmal Montage	F	Montagereihenfolgen
	F	Einfache Zugänglichkeit Montage und Wartung

Merkmal Stoff	W	Verwendung von Materialien mit entsprechender Festigkeit
	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Werkstoffe und Schmiermittel
	W	Verwendung Umweltgerechter Hilfsstoffe
	F	Verwendung von Stoffen mit Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	F	Festigkeit (Abrieb, Bruchsicherheit, Oberflächenempfindlichkeit...) der Stoffe
	F	Korrosionsschutz beachten
Merkmal Sicherheit	F	Insassensicherheit im Crashfall – Versagenskriterien (Splitter im Innenraum)
	F	Gewährleistung des Öffnens nach Crash
	F	Verhinderung von Einklemmstellen (Kleidung, Finger, etc.)
Merkmal Ergonomie	F	Vermeidung scharfer Kanten, einfache Einstellung/Justierbarkeit
	F	Gute Erreichbarkeit der Befestigungsstellen
Merkmal Gebrauch	F	Leichte und logische Bedienung (Kraftaufwand bei mechanischer Betätigung)
	F	Geräuscharm beim Schließen (Klappern, etc.)
	F	Verschleiß des Mechanismus (Schmierung)
	F	Einsatzkriterien / Funktionsgewährleistung Temperaturunabhängigkeit (Sommer und Winter)
	F	Isolation bei elektrischen Komponenten
Merkmal Kosten	F	Herstellkosten minimieren (Substituierbarkeit)
	F	Wartungsaufwand minimieren (Wartungsfreiheit)
Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffe
	F	Weiter-, Wiederverwertung der Materialien
Merkmal Fertigung	F	Einfache, kostengünstige Fertigung

Anforderung Aufnahme Dichtungsgummi	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	Mögl. Ebener Falzrand zum Aufstecken des Dichtgummis bzw. als Anlagefläche des Dichtgummis
Merkmal Kräfte	F	Anpresskraft der Tür an Karosserie muss zur Dichtwirkung des Gummis führen
Merkmal Montage	F	Montage möglichst ohne Kleber (einfacher Austausch bei Havarie)
Merkmal Stoff	W	Verwendung von Materialien mit entsprechender Festigkeit
	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Werkstoffe
	W	Verwendung umweltgerechter Stoffe
	F	Verwendung von Stoffen mit Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	F	Festigkeit (Abrieb, Anschmiegsamkeit Oberflächenempfindlichkeit...) der Stoffe
	F	Allgemeine Erhaltung der zugesicherten Eigenschaften in allen Temperaturbereichen
Merkmal Sicherheit	F	Korrosionsschutz
	F	Verhinderung von Einklemmstellen (Kleidung, Finger, etc.)
Merkmal Ergonomie	F	Vermeidung scharfer Kanten
Merkmal Gebrauch	F	Einsatzkriterien / Funktionsgewährleistung Temperaturunabhängigkeit (Sommer und Winter)
Merkmal Kosten	F	Herstellkosten minimieren (Substituierbarkeit)
	F	Wartungsaufwand minimieren (Wartungsfreiheit)
Merkmal Komfort	W	Leichte Montage

Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffen
	F	Weiter-, Wiederverwertung der Materialien
Merkmal Fertigung	F	Einfache, kostengünstige Fertigung

Anforderung Aufnahme Zierleiste	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	Entsprechende Geometrie der Zierleistensicke
	F	Bohrungen für Montage
	F	Passend ins Design, Spaltmaße
Merkmal Montage	F	gesteckt oder geklebt
Merkmal Stoff	W	Verwendung von Materialien mit entsprechender Festigkeit
	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Werkstoffe und Schmiermittel
	W	Verwendung Umweltgerechter Hilfsstoffe
	F	Verwendung von Stoffen mit Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	F	Festigkeit (Abrieb, Flexibilität, Anschmiegsamkeit Oberflächenempfindlichkeit...) der Stoffe
Merkmal Sicherheit	F	Verhinderung von Einklemmstellen (Kleidung, Finger, etc.)
Merkmal Ergonomie	F	Vermeidung scharfer Kanten,
Merkmal Gebrauch	F	Einsatzkriterien / Funktionsgewährleistung
	F	Temperaturunabhängigkeit (Sommer und Winter)
Merkmal Kosten	F	Herstellkosten minimieren (Substituierbarkeit)
	F	Wartungsaufwand minimieren (Wartungsfreiheit)
Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffe

	F	Weiter-, Wiederverwertung der Materialien
Merkmal Fertigung	F	Einfache, kostengünstige Fertigung

Anforderung Türinnenverkleidung	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	angepasst an des Cockpitdesign
	F	Ergonomie der Bedienelemente beachten
	F	Sicherheitswirkung bei der Positionierung der Airbags beachten
	F	Raumbedarf (Bauraum inkl. Anschlüsse) der einzubauenden Teile beachten
Merkmal Kräfte	F	Wirkende Kräfte beim Schließen der Tür mittels Zuziehgriff beachten
Merkmal Energie	W	Dämmende/Isolierende Wirkung der Verkleidung zum Konstanthaltung der Innenraumtemperatur
	F	Isolation gegen Feuchtigkeit von Außen
Merkmal Stoff	W	Verwendung von Materialien mit angenehmer Haptik
	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Stoffe
	W	Verwendung Allergieneutraler Stoffe
	F	Verwendung feuerfester Stoffe – Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	F	Festigkeit (Abrieb, Bruchsicherheit,...) der Stoffe
Merkmal Sicherheit	F	Insassensicherheit
	F	Umweltschutz
Merkmal Ergonomie	F	Erreichbarkeit der Bedienelemente
	F	Formgebung der Griffe und Bedienelemente
	F	Übersichtlichkeit
Merkmal Gebrauch	F	leichte Bedienung (Kraftaufwand zur Betätigung)
	F	Geräuscharm

	F	Verschleiß
	F	Einsatzkriterien (Funktion Sommer und Winter)
Merkmal Kosten	F	Herstellkosten minimieren
	F	Wartungsaufwand minimieren
Merkmal Komfort	W	Bequeme Armlehne
	W	mögl. große Seitentasche (Flaschen, Karten, etc.)
	W	Umsetzung von Kundensonderwünschen
Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffe
	F	Weiter-, Wiederverwertung der Materialien

1.1.2.2 Befestigung der Verkleidungen

Anforderung an Befestigung Türinnenverkleidung	Wichtung	Beschreibung
Merkmal Geometrie	F	Erreichbarkeit der Anschraubpunkte
	F	Erreichbarkeit möglicher Verstellpunkte
Merkmal Kinematik	F	Mögl. Beweglichkeit von Bauteile beachten
Merkmal Kräfte	F	Wirkende Kräfte beim Öffnen/Schließen der Tür mittels Zuziehgriff beachten
Merkmal Energie	W	Dämmende/Isolierende Wirkung der Befestigungsmaterialien der Verkleidung einhalten
	F	Isolation gegen Feuchtigkeit, Temperaturübergänge von außen
Merkmal Stoff	W	Verwendung von Schwingungsdämpfenden Befestigungsmaterialien
	W	Verwendung wasserabweisender und schmutzresistenter Stoffe
	W	Verwendung Allergieneutraler Stoffe
	F	Verwendung feuerfester Stoffe – Prüffreigabe für Automobile bzw. bestimmte Materialvorgaben
	F	Festigkeit (Abrieb, Bruchsicherheit,...) der Stoffe
Merkmal Sicherheit	F	Insassensicherheit (Verletzungsgefahr)
	F	Umweltschutz
Merkmal Ergonomie	F	Gute Erreichbarkeit der Befestigungs- und Verstellelemente
	F	Übersichtlichkeit
Merkmal Gebrauch	F	leichte Bedienung (Kraftaufwand zur Betätigung)
	F	Geräuscharm (Vermeidung von Quietschen, Knarren, etc unter allen Umweltbedingungen)

	F	Verschleiß (mehrfache Montage und Demontage möglich)
	F	Einsatzkriterien (Funktion Sommer und Winter)
Merkmal Kosten	F	Montagekosten minimieren (Schnellmontage)
	F	Wartungsaufwand minimieren
Merkmal Komfort	W	Einfache Zugänglichkeit
	W	mögl. große Wartungsöffnungen
	W	Umsetzbarkeit von Kundenwünschen
Merkmal Recycling	F	Vermeidung von Giftstoffe
	F	Gute Weiter-, Wiederverwertung der Materialien

1.1.2.3 Anforderungsliste der an die Bauteile gestellten Forderungen

Merkmal	Wichtung	Anforderungen
(1) Anforderung Autotür allg.		
Merkmal Geometrie	F	Definierte Größe, Passform, Fixierungspunkte als Einbaukriterien
	F	Gewicht soweit wie möglich minimieren
	F	Standard-, Normteile für Funktionsteile (Fensterheber etc.) verwenden
	F	scharfe Kanten vermeiden
	F	Außengeometrie muss zum Fahrzeugdesign passen
Merkmal Sicherheit	F	Airbags
	F	Einbruchsicherheit
	F	Seitenaufprallschutz – Materialwahl
		Seitenaufprallschutz - Funktion maximieren um die Insassen im Innenraum zu schützen
Merkmal Stoff	F	verwendete Materialien müssen kälte-/wärmeresistent sein
	F	verwendete Materialien müssen chemikalienbeständig sowie korrosionsbeständig sein
	F	maximale Lebensdauer
	F	hohe Biegefestigkeit
	F	hohe Steifigkeit
	W	abgedunkelte Scheiben
	W	kratzfester Lack
	W	Türinnenseite fühlt sich weich an
Merkmal Kosten	F	Preis minimieren
Merkmal Komfort	F	elektronische Fensterheber, Bedienelemente
	W	Musikanlage, Soundsysteme, etc.

	F	Armlehne, Rückspiegel
	W	Rückspiegel sind elektrisch verstellbar, beheizbar, abdunkelbar
	W	Tür bleibt zum Beladen und Einsteigen offen auch wenn Fahrzeug geneigt ist (z.B. durch Gefälle längs und quer zur Fahrzeugachse)
	F	Vorsehen von Ablagefächern für Eiskratzer, Brille, Getränke,...)
Merkmal Umwelt	F	stromlinienförmiger Bau
	W	Tür soll sich leise und leicht schließen lassen
Merkmal Sensorik	F	Crashsensoren Seitenaufprall
	W	Erkennung des Türöffnungs-/schlieBzustandes
Merkmal Energie	F	durch Strömungs- und Luftwiderstandsoptimierung Energieverlust minimieren
Merkmal Fertigung	F	Einfache, preisgünstige aber gleichzeitig effektive Fertigungsverfahren mit hohem Umformpotential in wenigen Verfahrensschritten anwenden (IHU, Biegung, Tiefziehen, ...)
	W	bevorzugte Fügeverfahren: Schweißen, Kleben, Nieten
	W	bevorzugte Umformungsverfahren: IHU, Fließpressen
	F	keine Sonderformen konstruieren um Maschinenkosten zu vermeiden
	F	Ausschussquote minimieren
	F	Gesamtgewicht minimieren
Merkmal Recycling	F	Zweifelsfreie Identifizierung der Bauteile aus Magnesiumlegierungen
	F	Bestimmung der Legierungsbestandteile und sortenreine Sortierung vor Einschmelzung notwendig
	F	Restlose Entfernbarkeit von Beschichtungen
Merkmal Montage	F	Verbindungsmaterialien dürfen so wenig wie möglich das Gesamtgewicht erhöhen

	F	Teile werden in einem Werk hergestellt und sind mittels LKW/ Bahn zutransportieren
Merkmal Kraft	F	Selbsttragende Struktur
Merkmal Kinematik	F	Stabilität gegenüber gebrauchsgewöhnlichen Einwirkungen beim Öffnen und Schließen
Merkmal Ergonomie	F	optimale Erreichbarkeit der Bedienelemente (Türöffner, Fensterheber, etc)
Merkmal Einsatz	F	Einfache Bedienung der Fensterheber, Spiegeleinsteller,...
	F	austauschbare Teile ermöglichen
	F	Lebensdauer maximieren
(2) Anforderung IHU Teil		
Merkmal Sicherheit	F	stabile Befestigung der Scharniere und Fließpressteile
Merkmal Stoff	F	hohe Steifigkeit, Festigkeit und Zähigkeit
Merkmal Kosten	F	Preis sollte minimiert werden
Merkmal Fertigung	F	auf komplizierte Formen verzichten, möglichst einfache Herstellung sollte ermöglicht werden
Merkmal Geometrie	F	Gewicht minimieren
(3) Anforderung Biegeteil		
Merkmal Sicherheit	F	Stabilisierung des Rahmens
Merkmal Stoff	F	hohe Steifigkeit, Festigkeit und Zähigkeit

Merkmal Kosten	F	Preis sollte minimiert werden
Merkmal Fertigung	F	auf komplizierte Formen verzichten, möglichst einfache Herstellung sollte ermöglicht werden
Merkmal Geometrie	F	Gewicht minimieren
(4) Anforderung Türaußenseite		
Merkmal Sicherheit	F	Sicherheit im Crash-Fall
Merkmal Stoff	F	korrosionsbeständig, wärmebeständig, kältebeständig, chemikalienbeständig (Streusalz)
Merkmal Kosten	F	Preis sollte minimiert werden
Merkmal Komfort	W	Design
Merkmal Umwelt	M	stromlinienförmige Außenwandgestaltung (C_w -Wert senken)
Merkmal Geometrie	F	Gewicht minimieren
	F	scharfe Kanten vermeiden

1.1.3 Mitarbeit bei der Durchführung von Grundlagenuntersuchungen

1.1.3.1 Umformen von Magnesiumblechen

Magnesium und seine Legierungen sind bei Raumtemperatur kaum umformbar, Wirkmedium und Werkzeug müssen also erwärmt werden. Zum Umformen von Magnesium sollte ein Wirkmedium verwendet werden, das möglichst wenig ausgast, zum Beispiel ein spezielles Öl. Ebenso untersucht wurde die Verwendung eines heizbaren, hydromechanischen Tiefziehwerkzeugs sowie ein Werkzeug für die Hochdruckblechumformung. Elektrische Heizpatronen beheizen dabei Ziehring, Stempel und Niederhalter, wobei die Erwärmung aller Komponenten separat steuerbar ist. Somit können tiefe Formen und enge Radien erzeugt werden. [WWW04]

1.1.3.2 Untersuchung der Tiefzieheigenschaften von Mg-Knetlegierungen

Zur Beurteilung der Einsetzbarkeit des Tiefziehens der TeMaK-Demonstratorteile wurden verschiedene bereits bekannte Untersuchungen betrachtet.

Dies betrifft hauptsächlich die Dissertation „Untersuchungen zum Umformen von Feinblechen aus Magnesiumknetlegierungen“ [DRÖD99] in welcher die Tief- und Streckzieheigenschaften von Magnesiumlegierungen mit verschiedenen Werkzeuggeometrien untersucht wurden. Neben der Ermittlung des temperaturabhängigen Umformverhaltens wurde dabei den auftretenden Versagenserscheinungen besondere Beachtung geschenkt. Aufgrund der großen Bedeutung der Reibverhältnisse bei Tiefziehprozessen wurde zudem betrachtet, inwieweit sich die bei der Magnesiumumformung erforderlichen erhöhten Prozesstemperaturen sowie die Art des eingesetzten Schmierstoffes auf die Reibbedingungen auswirken.

Auch im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundforschungsvorhabens „MIA – Magnesium im Automobilbau“ wurde die Tiefzieheignung der Bleche anhand von konventionellen Napfzugversuchen untersucht. [INNO07]

Für die Untersuchungen wurde hier handelsübliches AZ31-Blechmaterial der Salzgitter Magnesium Technologie GmbH verwendet, hergestellt aus stranggegossenem Ausgangsmaterial. Bei diesem Material ist für das konventionelle Tiefziehen bei Warmumformung (225 °C)

ein Grenzziehverhältnis von 2,2 charakteristisch.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Herstellung eines Bauteils in einem auf 225 °C temperierten konventionellen Tiefziehwerkzeug grundsätzlich möglich ist.

Einerseits wurden die Untersuchungen zur Ermittlung der Tiefzieheigenschaften auf einer hydraulischen Ziehpresse des Herstellers HYDRAP PRESSEN, Typ HPDZb 63 [DRÖD99] durchgeführt - Hierbei kamen Tiefziehwerkzeuge mit rotationssymmetrischer und rechteckiger Geometrie zum Einsatz, die jeweils im Stempel-, Niederhalter- und Ziehringbereich mittels elektrischer Heizelemente bis zu einer Temperatur von $T = 300\text{ °C}$ temperiert wurden. In Aufbau der eingesetzten beheizbaren Tiefziehwerkzeuge ist der Aufbau der eingesetzten beheizbaren Tiefziehwerkzeuge dargestellt.

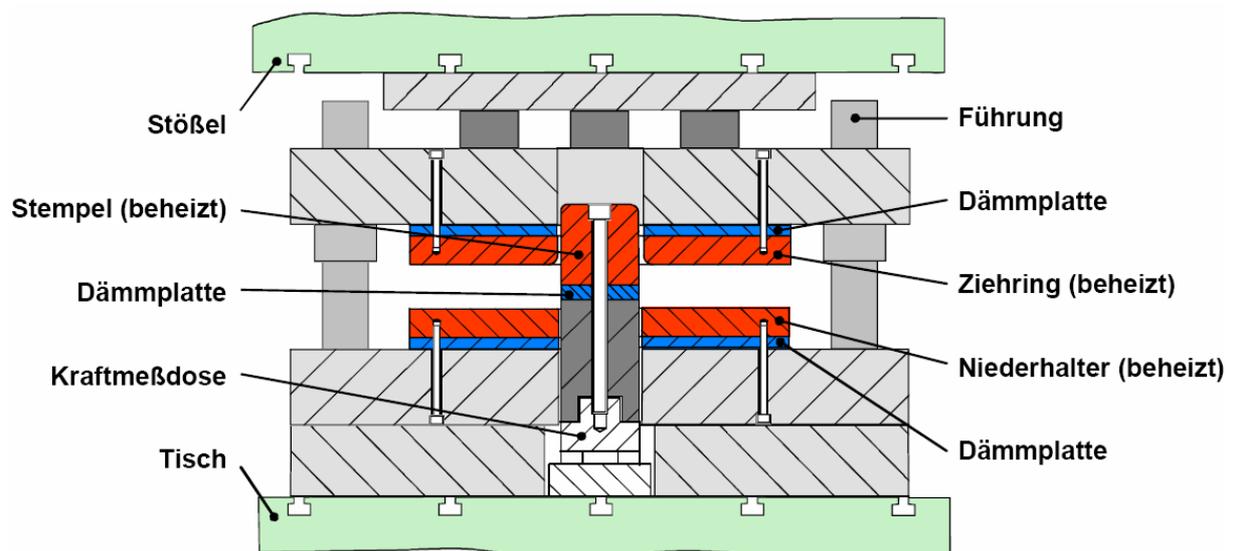


Bild 2. Aufbau der eingesetzten beheizbaren Tiefziehwerkzeuge [DRÖD99]

Andererseits wurden die Versuche an einem Versuchswerkzeug realisiert, welches mit einem segmentelastischen Niederhalter ausgestattet ist [HENG02].

Untersucht wurden verschiedene Magnesiumlegierungen und eine Aluminiumlegierung. Materialeigenschaften und Blechdicken sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführt.

Bei allen Versuchen wurde der vollsynthetische Schmierstoff (Produkt B 393 G) in einer Menge von ca. 5 g/m² verwendet, der in vergleichenden Untersuchungen sehr gute Eigenschaften gezeigt hat.

Tabelle 1. Untersuchte Magnesiumlegierungen [DIN1729-1]

	Legierungsbezeichnung (ASTM)	Werkstoffkurzzeichen (DIN 1729)	Werkstoffnummer (DIN 1729)	Blechdicke [mm]
1.	AZ31	MgAl3Zn	3.5312	1,3
2.	AZ31	MgAl3Zn	3.5312	1,0
3.	AZ61	MgAl6Zn	3.5612	1,0
4.	MN150	MgMn2	3.5200	1,0

Tabelle 2. Untersuchte Aluminiumlegierung [DIN1725-1]

	Werkstoffkurzzeichen (DIN 1725)	Werkstoffnummer (DIN 1725)	Blechdick[mm]
1.	AlMg4,5Mn0,4	3.3547	1,0

Entscheidend für die Beurteilung der Tiefziehfähigkeit ist das Grenzziehverhältnis. Einen erheblichen Einfluss auf das Grenzziehverhältnis und damit auch auf die Tiefziehfähigkeit hat die Temperatur. Bei 50°C herrscht noch eine stark eingeschränkte Tiefziehbarkeit, ab einer Temperatur von 100°C steigt das Grenzziehverhältnis von Magnesiumlegierungen sprunghaft an. Im Vergleich dazu wurde auch eine Aluminiumlegierung dargestellt, erwartungsgemäß weist dieser Werkstoff bereits bei leicht erhöhter Raumtemperatur ein gutes Umformverhalten auf. Ähnlich wie bei den Magnesiumwerkstoffen steigt das Grenzziehverhältnis bis zu einer Temperatur von etwa 200°C an. Alle dargestellten Werkstoffe zeigen im Temperaturbereich von 200°C bis 250°C ihre maximale Tiefziehbarkeit.

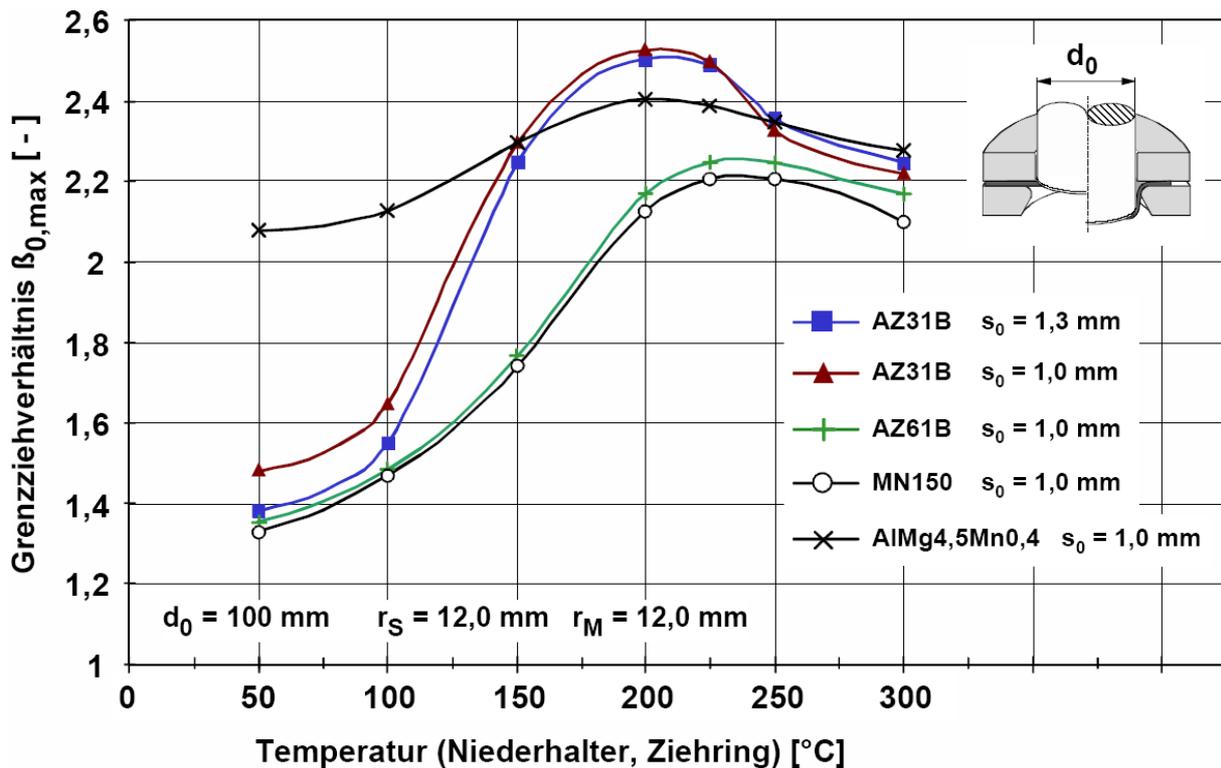


Bild 3. temperaturabhängige Grenzziehverhältnisse; $v=5\text{mm/s}$, [DRÖD99]

Der starke Anstieg des Grenzziehverhältnisses bei Magnesium ist auf zwei Effekte zurückzuführen, zum einen steigt das Formänderungsvermögen mit der Temperatur und zum anderen nimmt die Festigkeit von Magnesiumlegierungen mit der steigender Temperatur deutlich ab. Dies erklärt auch, dass sich bei höheren Temperaturen die Ziehkraft von Magnesium stärker verringert als bei Aluminium.

Auch wenn sich Magnesium und Aluminium bei hoher Temperatur im Grenzziehverhältnis sehr ähneln, so ergibt sich beim Versagensverhalten ein völlig unterschiedliches Bild. Wenn der für Umformung geeignete Temperaturbereich verlassen wird, kommt es zu Rissen. Bei Temperaturen unterhalb von 225°C tritt ein sprödebruchartiges Versagen auf, so reißen die Legierungen bei 50°C bereits nach wenigen Millimetern Ziehtiefe ohne sichtbare Einschnürung. Oberhalb von 225°C ändert sich das Versagensverhalten aufgrund des erheblich angestiegenen Formänderungsvermögens. In diesem Bereich reißen die Teile nicht im Flansch- /Zargenbereich, sondern im Bereich der Ziehteilzarge treten die Risse auf.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass beim Tiefziehen unterhalb 225°C ein Versagen in umgeformten Bereichen auftritt, während bei Temperaturen über 225°C der kraftübertragende Bereich kritischer ist.

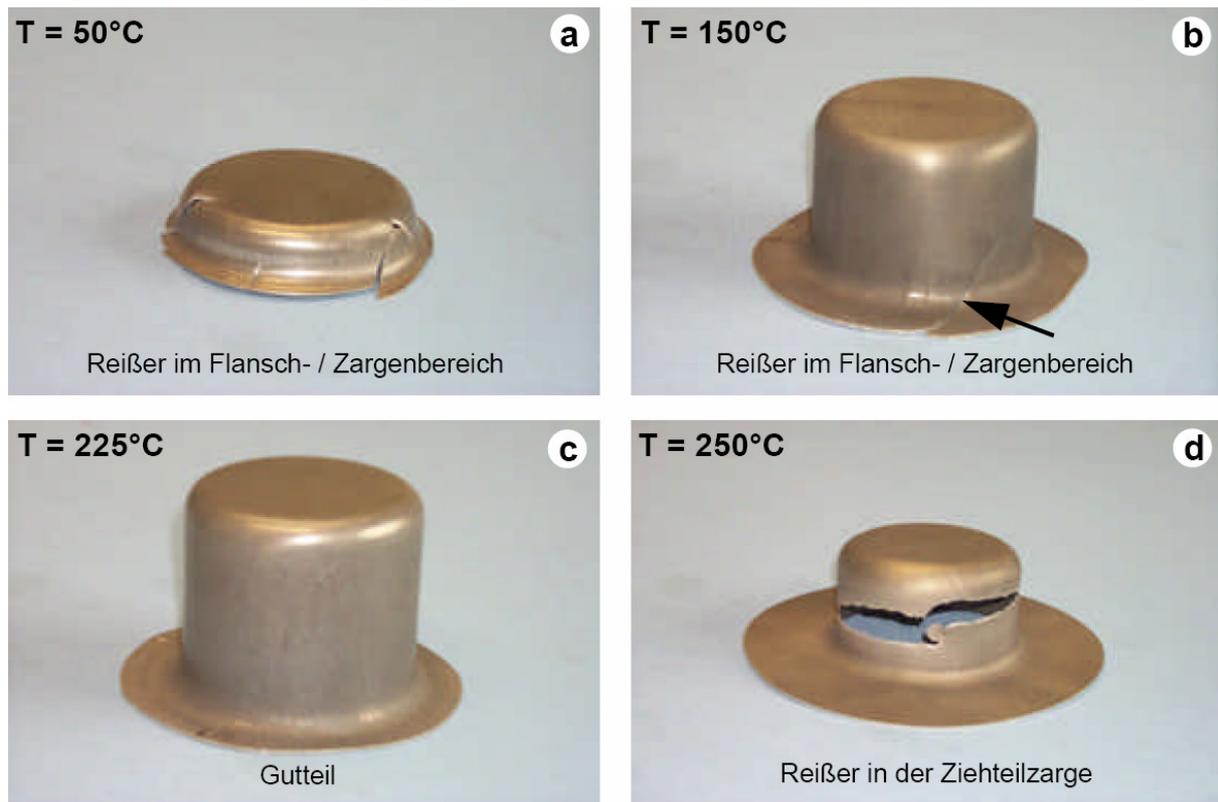


Bild 4. Versagensarten; Werkstoff AZ31B, [DRÖD99]

Nicht nur die Temperatur sondern auch die Formänderungsgeschwindigkeit hat einen großen Einfluss auf die Fließspannung, dieser Effekt spiegelt sich auch beim Tiefziehen wider. Sie zeigt, dass das Grenzziehverhältnis von Magnesium im Vergleich zu Aluminium mit steigender Tiefziehgeschwindigkeit stärker abnimmt. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Entfestigungsprozesse von Magnesium bei höheren Temperaturen wesentlich zeitabhängiger ablaufen als bei Aluminium, bei einer Auslegung von Tiefziehprozessen muss das berücksichtigt werden.

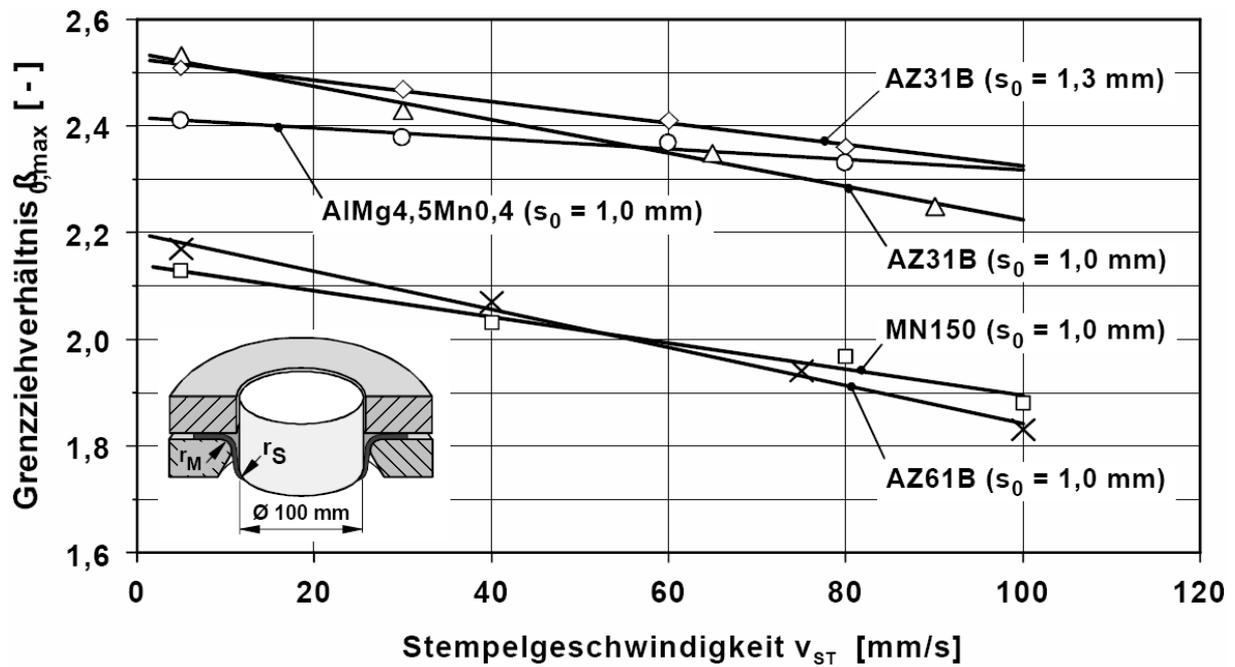


Bild 5. geschwindigkeitsabhängige Grenzziehverhältnisse; $T=200^\circ\text{C}$, [DRÖD99]

1.1.3.3 Anforderungen beim IHU-Prozess

Das Verfahren des Innenhochdruckumformens ist schon relativ lange Zeit bekannt und findet seine hauptsächliche Anwendung in der Blech- und Hohlkörperumformung, in der Automobilindustrie wird es allerdings erst seit wenigen Jahren vermehrt eingesetzt.

Erste wichtige Kennwerte dazu wurden im Forschungsprojekt ULSAB ermittelt. Es entstand ein seitlicher Dachrahmen, welcher mittels des IHU-Verfahrens von der vorderen Scharnierseite bis zum hinteren Radius ohne Unterbrechungen gefertigt werden konnte. Der Rahmen wurde aus verschweißten dünnwandigen Stahlrohren umgeformt.

Die Innenhochdruckumformung von Bauteilen aus Magnesiumlegierungen hat, obwohl mit dem Verfahren sehr stabile und komplexe Geometrien einfach herstellbar sind, bis heute eher noch ein Randdasein. Dies liegt hauptsächlich am geringen Umformvermögen des Werkstoffes Magnesium bei Raumtemperatur, was durch die notwendige Erwärmung auf >220 °C, energie- und damit kostenaufwendige Umformwerkzeuge zur Folge hat [WIHU06].

Prinzipiell kann die Umformung mit flüssigen oder gasförmigen Wirkmedien erfolgen. Unterscheidungen können auch zwischen den für Mg-Rohre zur Umformung notwendigen Erwärmungsprinzipien erfolgen. Dies kann einerseits über das Wirkmedium selbst oder über eine Beheizung der Werkzeuge und/oder Vorwärmung der Bauteile erfolgen. [WIHU06],[MUDR06].

1.1.3.3.1 Verfahrensprinzip

Ein Rohr (Hohlprofil) wird in ein Formwerkzeug, welches die Außenkontur des späteren Werkstückes abbildet, eingelegt. Durch eine Hydraulikpresse wird das Werkzeug an beiden Enden verschlossen. Darauf hin fahren Axialstempel an die Rohrenden und dichten diese ab. Anschließend wird das Wirkmedium eingeleitet, der Druck wird dabei so lange erhöht bis die Kontur des Werkzeuges vollständig abgebildet wird.

Je nach Art des Werkstoffes, Materialstärken und der Größe bzw. Komplexität des Bauteils, können Drücke von bis zu 4000 bar notwendig sein. Bei der Umformung von Magnesiumbauteilen werden je nach Einflussfaktoren ca. 500 bar benötigt [WIHU06].

Im folgenden Bild ist der Verfahrensablauf am Beispiel des T-Fittings schematisch dargestellt.

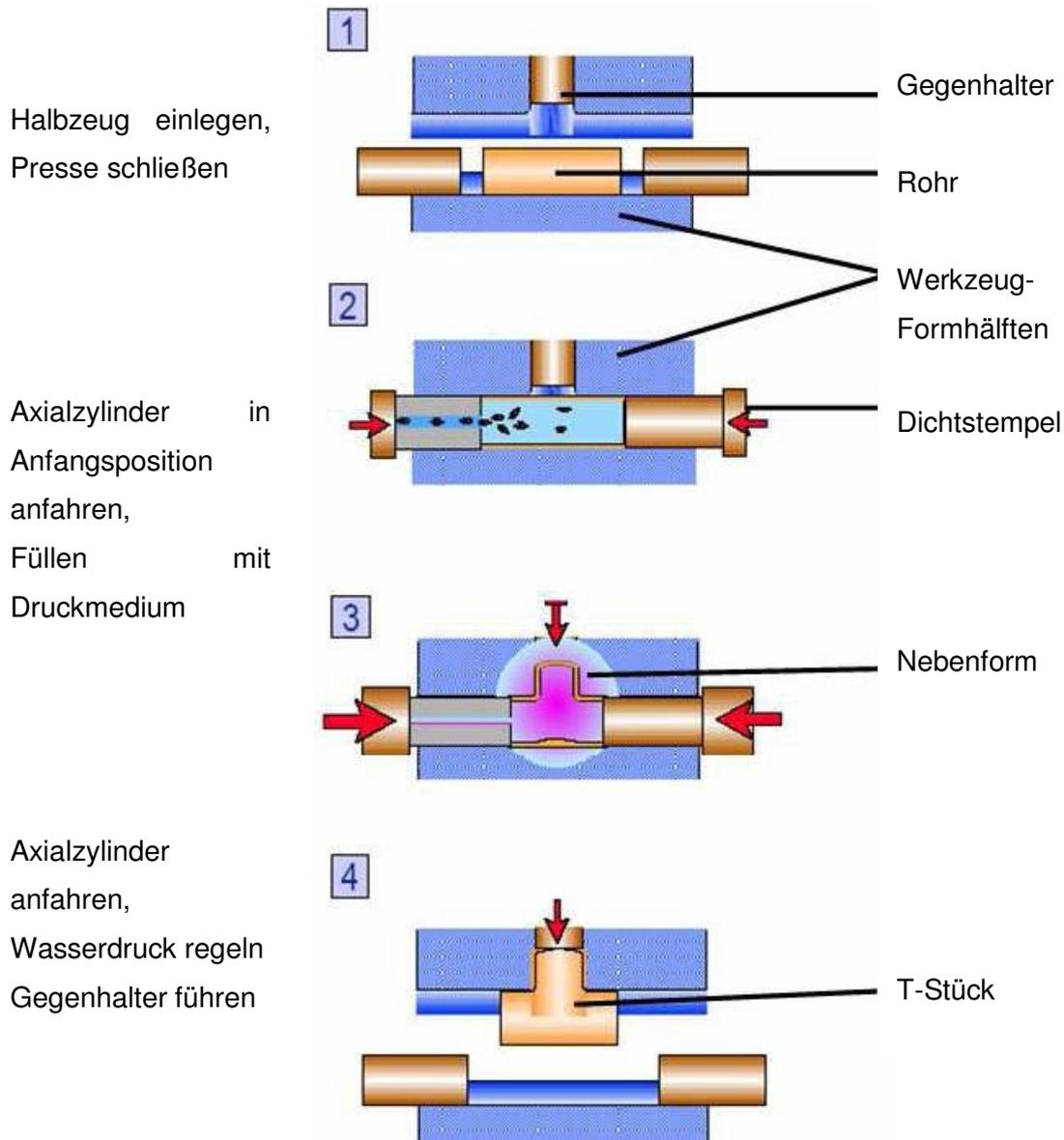


Bild 6. Verfahren [SCHU98]

Die Vorteile gegenüber konventionellen Umformverfahren liegen bei der hohen Maß- und Formgenauigkeit durch eine geringe Rückfederung, zusätzlich weisen die Bauteile, bei vergleichsweise geringem Gewicht, durch den geschlossenen Faserverlauf eine hohe Biege- und Torsionssteifigkeit auf. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die Herstellbarkeit von komplexen Bauteilen in einem Umformschritt. Dies ermöglicht die Substitution von mehreren Bauteilen bzw. die Integration zusätzlicher Fertigungsoperationen [WIHU06], [SEIF08].

Ein breiter Einsatz von IHU-Bauteilen fand bisher aufgrund von längeren Taktzeiten bei der

Herstellung und höheren Anschaffungskosten für die Anlagentechnik in der Automobilindustrie nicht statt. Zudem unterliegen die Werkzeuge durch die hohen Drücke einer erhöhten Verschleißbeanspruchung.

1.1.3.3.2 Verfahrensvarianten

Das Innenhochdruckumformen wird in drei Verfahren untergliedert (siehe Bild unten). Beim Aufweiten werden die Querschnitte in Achsrichtung vergrößert. Die Bewegung eines Formwerkzeuges zur Rohrlängsachse bewirkt eine Verlagerung des Rohres parallel zu dieser Achse, deshalb wird dieses Verfahren auch als Verlagern/Durchsetzen bezeichnet. [DOH90] Das Kalibrieren ist kein eigenständiges Verfahren, sondern wird im Anschluss an einen Umformvorgang eingesetzt um eine hohe Maß- und Formgenauigkeit zu erzielen [EICH96]. Bei der gezielten Werkstoffnachführung wird die zum Teil unerwünschte Wanddickenreduzierung vermieden, zusätzlich wird das Umformvermögen erhöht. Das Aufweitstauchen kann sowohl im geschlossenen Gesenk zur Herstellung von rotationssymmetrischen Bauteilen, als auch im offenen Gesenk zur Fertigung von Rohrabzweigelementen, durchgeführt werden.

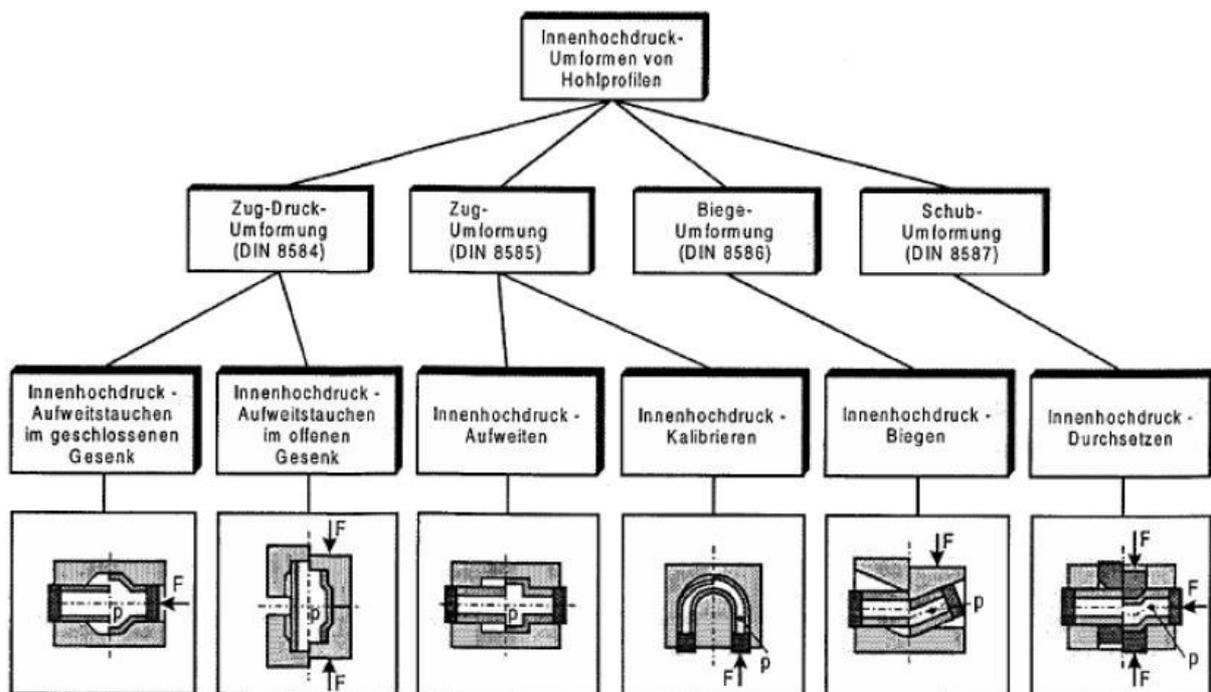


Bild 7. Einteilung der Verfahrensvarianten für Hohlprofile [VDI3146], [DIN8580]

1.1.3.3.3 Verfahrens- und Prozessgrenzen

Die hohen Anforderungen die beim Herstellungsprozess an ein IHU-Bauteil gestellt werden (stofflich und geometrisch) führen zu typischen Versagensfällen, wie Stülpung, Risse und Knickung/Faltung. In der Bild sind drei Versagensfälle dargestellt.

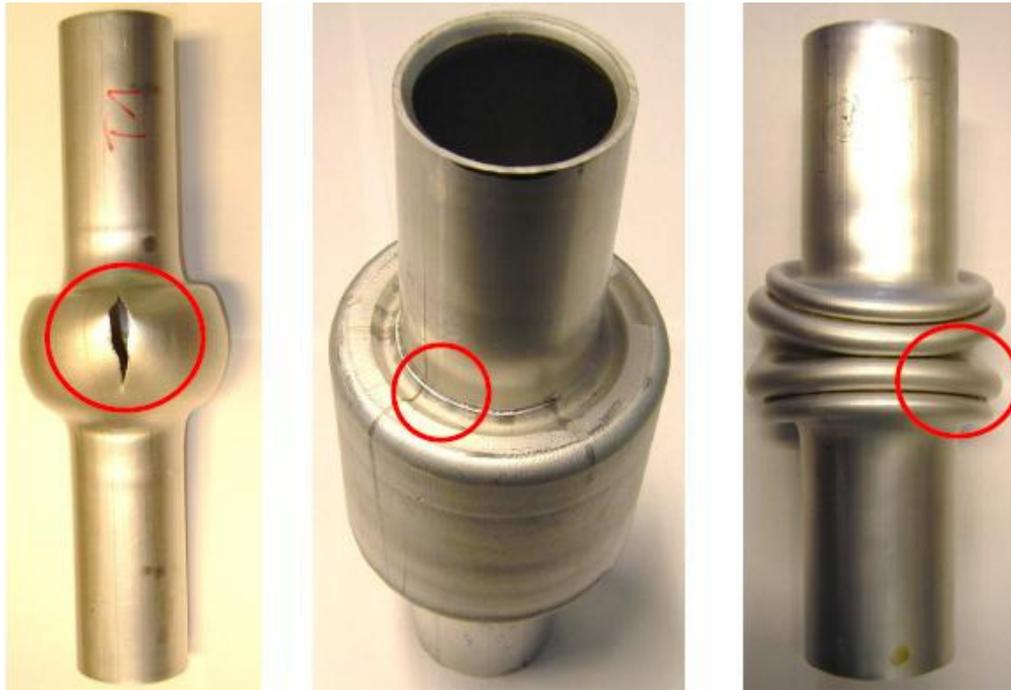


Bild 8. Typische Versagensfälle des IHU, [MUDR06] li: Bersten; mi: Stülpung; re: Falten

Bei einer Überhöhung des Innendruckes treten Risse oder auch Berstungen auf, da die Umformvermögensgrenze des Werkstoffes überschritten wurde. Bersten erfolgt meist beim Kalibrieren, weil hier die größten Drücke eingestellt werden. Wenn der axial nachgeführte Werkstoff nicht bis in das auszubildende Formelement transportiert werden kann, spricht man von Stülpungen. Bei Falten oder Knickungen ist die axiale Druckspannung zu groß geworden, Falten können unterschieden werden in reversibel und irreversibel [EICH03].

1.1.3.3.4 Innenhochdruckumformen von Magnesiumlegierungen

Für das Forschungsprojekt TeMaK soll ein temperiertes Innenhochdruckverfahren mit Gas als Wirkmedium angewendet werden. Dabei wird die Magnesiumlegierung außerhalb des Werkzeuges vortemperiert, aktuelle Forschungen empfehlen eine Temperatur von 350 °C. Das Wirkmedium wird mit einem Druck von 300 bis 450 bar eingeleitet, als Wirkmedien könnten Luft, Stickstoff oder Argon zum Einsatz kommen. Auch die Werkzeuge müssen temperiert werden, der optimale Temperaturbereich liegt zwischen 500 °C und 600 °C. Offen bleibt jedoch welche Auswirkungen die hohen Temperaturen auf das Gefügebild und die Festigkeiten der Magnesiumlegierung haben und ob eine anschließende Wärmebehandlung durchgeführt werden muss. [IHU08] Eine Betrachtung der Umformgrade wird in Kapitel 0 näher erläutert.

1.1.3.4 Fließpressverfahren

Beim Fließpressen, welches überwiegend in der Automobilindustrie seinen Einsatz findet, werden metallische Werkstoffe meist bei Raumtemperatur durch große Druckspannungen zum Fließen in axialer und radialer Richtung gebracht. Formgebend bei diesem Umformverfahren sind Bohrungen in der Matrize oder ein Spalt zwischen Matrize und Stempel. Ausgangswerkstücke sind Scheiben, Stangenabschnitte oder vorgepresste Teile. Die Fließpressteile sind pressblank und weisen eine hohe Maßgenauigkeit auf [SCHIK]. Die einzelnen Verfahren werden nach ihrer Hauptfließrichtung unterschieden (siehe Bild unten).

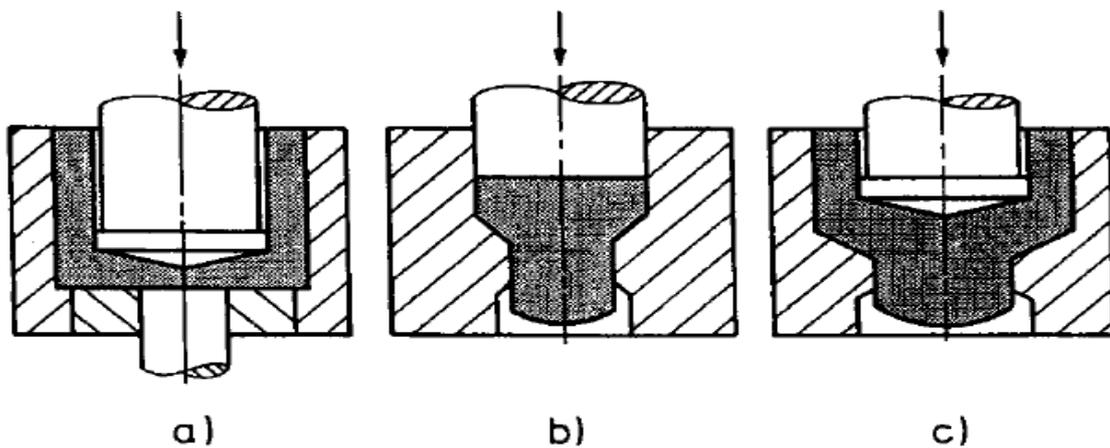


Bild 9. Fließpressverfahren [SCHIK]

a) Rückwärtsfließpressen; b) Vorwärtsfließpressen; c) kombiniertes Fließpressen

Beim Rückwärtsfließpressen (Gegenfließpressen) ist der Werkstofffluss der Stempelbewegung entgegengerichtet. Der Werkstoff fließt durch einen von Matrize und Stempel gebildeten Ringspalt nach oben, als Werkstück entsteht ein einseitig offener Hohlkörper. Beim Vorwärtsfließpressen (Gleichfließpressen) haben die Stempelbewegung und der Werkstofffluss die gleiche Richtung. Das Werkstück nimmt bei diesem Verfahren die Form der Matrize an. Es können achsensymmetrische Voll- und Hohlkörper hergestellt werden. Das kombinierte Fließpressen vereint beide Verfahren, hierbei kann der Werkstofffluss sowohl vorwärts als auch rückwärts gerichtet sein. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass in einem Arbeitsgang komplizierte Formen mit unterschiedlichen Wanddicken gefertigt werden können. Die Bezeichnung Napf steht dabei für einen hergestellten Hohlkörper, während Voll für ein massives Werkstück steht [SCHIK].

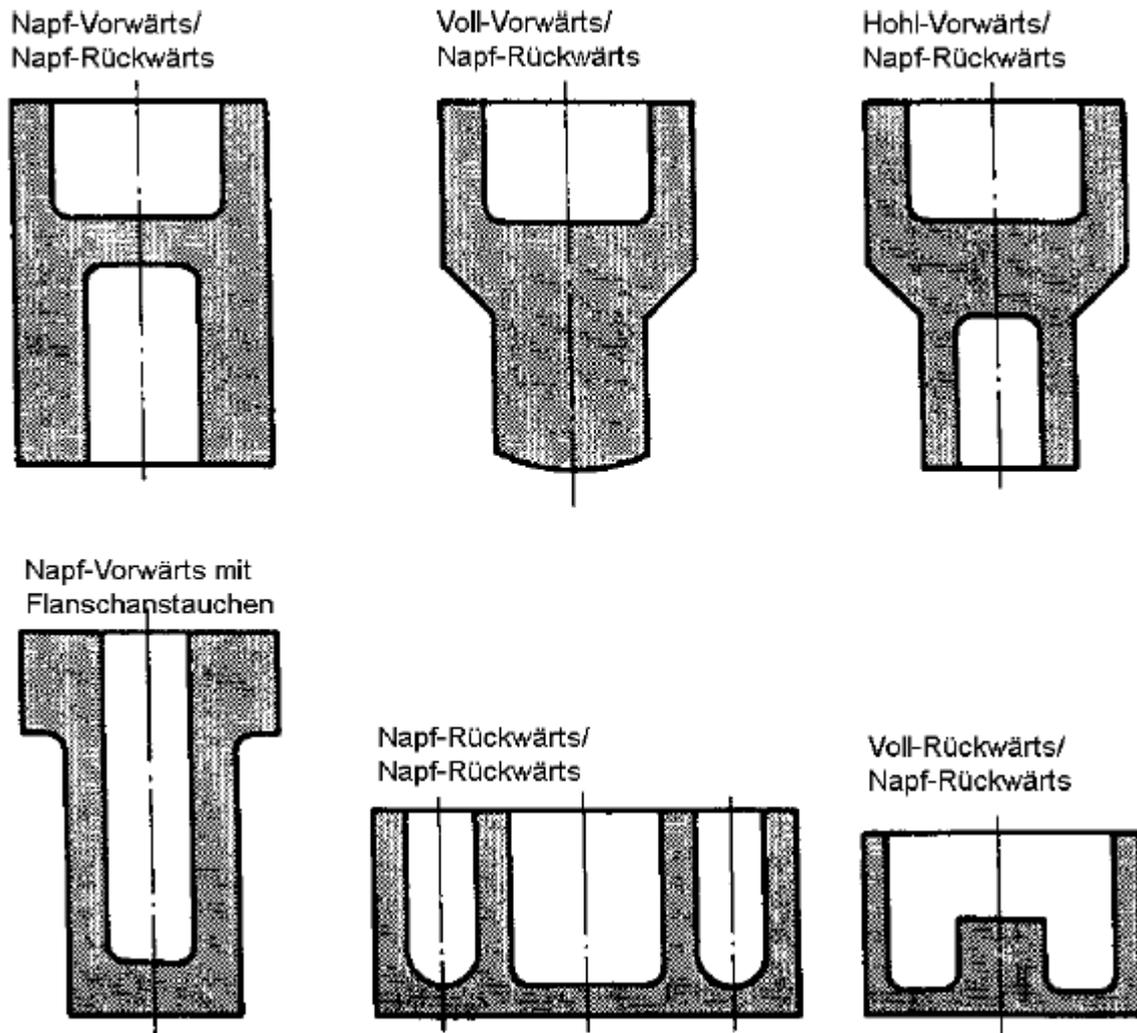


Bild 10. Verfahrenskombinationen, [SCHIK]

Durch Fließpressen hergestellte Bauteile weisen eine hohe Festigkeit und Dauerfestigkeit auf. Wanddicken ab 0,5 mm sind ohne Probleme realisierbar. Um für das Fließpressen geeignet zu sein müssen die verwendeten Werkstoffe eine geringe Fließspannung und eine geringe Kaltverfestigung aufweisen, ebenfalls Voraussetzung ist ein homogenes Gefüge sowie ein hohes Umformvermögen [SCHIK].

Um Magnesiumlegierungen mittels Fließpressen umformen zu können, muss bei diesen vorher ein weichgeglühter Gefügestand eingestellt werden oder die Ausgangsmaterialien durch thermomechanische Verfahren wie Strangpressen oder Walzen modifiziert werden. Trotz dieser Vorbearbeitung ist ein temperiertes Fließpressen, aufgrund des geringen Umformvermögens bei Raumtemperatur, unumgänglich. Jedoch sinkt dadurch die erforderliche Temperatur deutlich. Erfolgreiche Umformvorgänge sind derzeit ab ca. 150 °C

möglich [MM07]. Wie hoch der eingestellte Temperaturbereich letztlich liegen muss, ist aber abhängig von der Geometrie und Komplexität des herzustellenden Fließpressteils. Nachteil der Umformung mit erwärmten Bauteilen ist aber die geringere Maßgenauigkeit und die schlechtere Oberflächenqualität.

Um eine hohe Effizienz beim Umformen zu erzielen, muss die Reibung minimiert werden, dies senkt zum einen die Umformarbeit erheblich und verlängert zum anderen auch die Lebensdauer der eingesetzten Werkzeuge. Beim normalen Fließpressprozess macht die Reibarbeit fast die Hälfte der gesamten Umformarbeit aus.

Bei der Auswahl der Schmiermittel müssen Anforderungen, wie ein niedriger Reibwert, eine hohe Druckbeständigkeit, eine gute Oberflächenhaftung, ein guter Zusammenhalt bei Oberflächenvergrößerung und Adhäsionsvermeidung erfüllt werden [MAG00], [MM07].

1.1.3.5 Anforderungen bei der Oberflächenbehandlung

Siehe: II.1.2.4 Korrosionsschutz und mechanische Oberflächenbehandlung

1.1.3.6 Untersuchung zu Fügemöglichkeiten für Magnesium

Siehe unter: 1.1.8 Untersuchungen zu Fügeverfahren

1.1.4 Konstruktion der Referenzbauteile

Die Konstruktion der Referenzbauteile ist die Grundlage zur Simulation und zum Bau der benötigten Werkzeuge. Als Demonstrator wurde eine PKW-Tür gewählt, da diese durch Ihre Struktur und durch die an sie gestellten Anforderungen zu den komplexesten Karosserieteilen am modernen PKW zählt. Der Demonstrator basiert auf den vorhandenen 3D-CAD-Daten einer Autotür inklusive der Anbauteile. Das Modell wurde an die besonderen Anforderungen des TeMaK - Projektes angepasst. In den folgenden Punkten werden die Konstruktionsphasen der Referenzbauteile näher erläutert.

Die gesamten Bauteile sollen aus der Magnesiumlegierung AZ 31 nach ASTM hergestellt werden. Aus gießgewalztem Vorband wird durch Weiterwalzen ein Blech oder Band erzeugt. Die Legierung besitzt folgende Grundlegende mechanische Eigenschaften: Streckgrenze mind. 170 MPa, Zugfestigkeit mind. 240 MPa, Bruchdehnung mind. 17 % [MGF08].

1.1.4.1 Gesamte Türbaugruppe

Im Projektverbund TeMaK wurde, um die Einsatzfähigkeit von Magnesium bei der Herstellung von Karosseriebauteilen zu untersuchen, eine PKW-Tür als Demonstrator gewählt. Die ersten Modellierungsschritte erfolgten auf Basis von CAD-Daten welche vom Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Chemnitz zur Verfügung gestellt wurden.

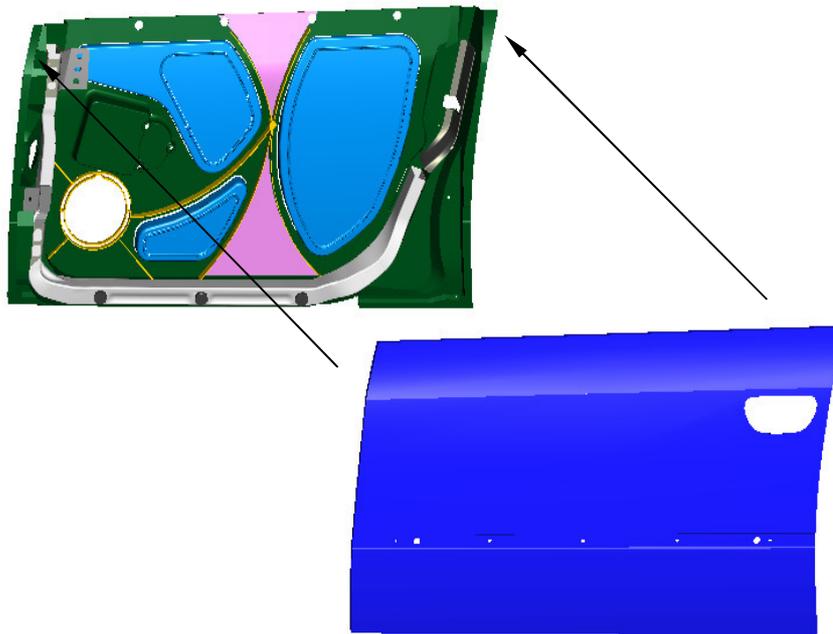


Bild 11. Explosionsdarstellung 1. Modellversuch

Für den Einsatz von Teilen aus der Magnesiumlegierung AZ 31 wurde ein neues Konzept für den Aufbau der Demonstratortür entwickelt. Nach entsprechenden Untersuchungen und Ermittlung der durch die Tür aufzunehmenden Belastungen wurde sich für ein Konzept entschieden, welches durch einen die Belastungen aufnehmenden Rahmen besteht, der mit einer Türinnen- und Türaußenschale als Designteile verblendet wird.

Der Rahmen soll dabei die Kräfte zwischen den Türscharnieren und dem Türschloß übertragen.

Für die in einem Crashfall zu kompensierenden Belastungen ist eine zusätzliche Abstützung durch ein separates Crashteil gegenüber dem Rahmen notwendig. Ein derartiges Zusatzteil kann aus derzeit vergleichbaren Türmodellen übernommen werden und wurde deshalb nicht in die weiteren Betrachtungen einbezogen.

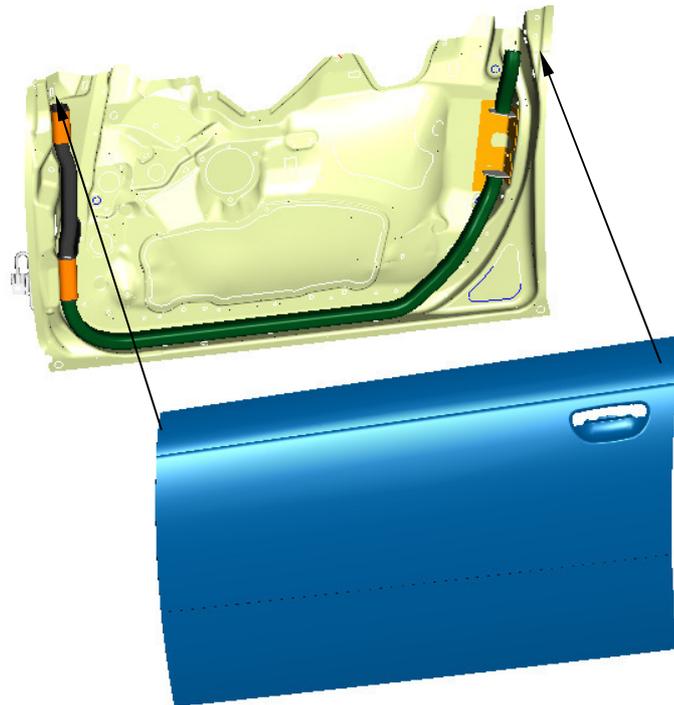


Bild 12. Explosionsdarstellung PKW-Tür

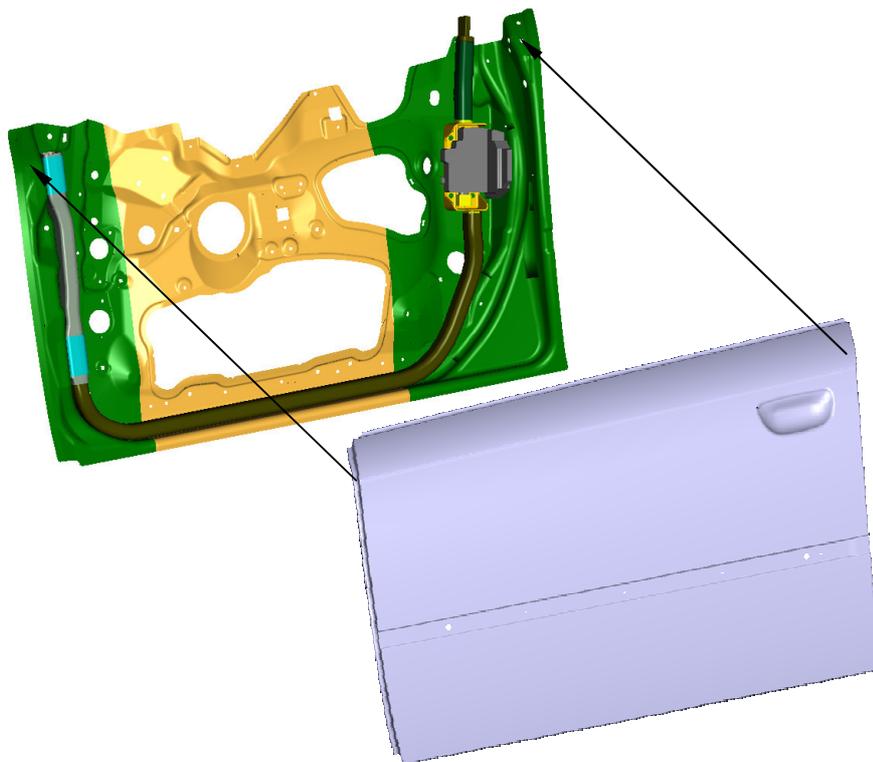


Bild 13. Explosionsdarstellung Abgabestand an die Fertigung

1.1.4.2 Türinnenblech

Das Türinnenblech soll die Kompetenzen im Bereich Tiefziehen und Schweißen unter Beweis stellen. Alle wichtigen Funktionsflächen und -punkte des Referenzbauteiles wurden beibehalten. Damit sind der Einbau und eine Prüfung unter realen Bedingungen möglich. Die Bild 14 und Bild 15 zeigen prinzipielle Aufbauvarianten einer PKW-Tür-Innenschale.

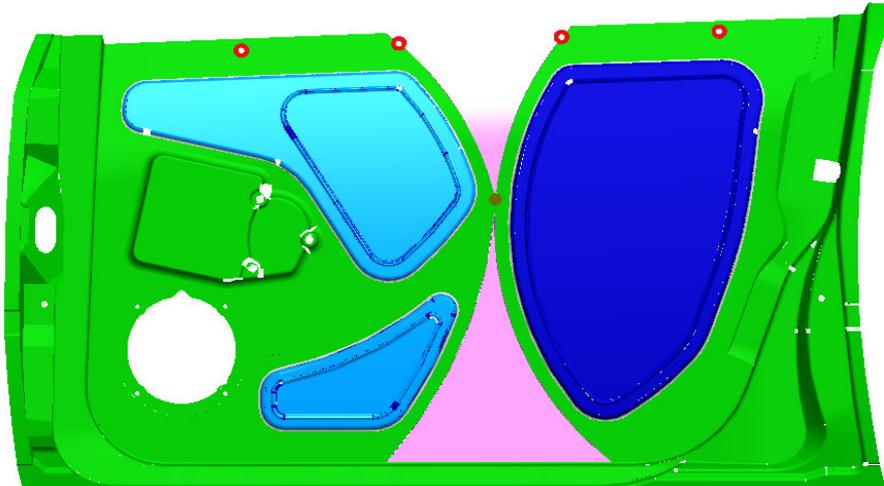


Bild 14. prinzipieller Aufbau (allgemein)

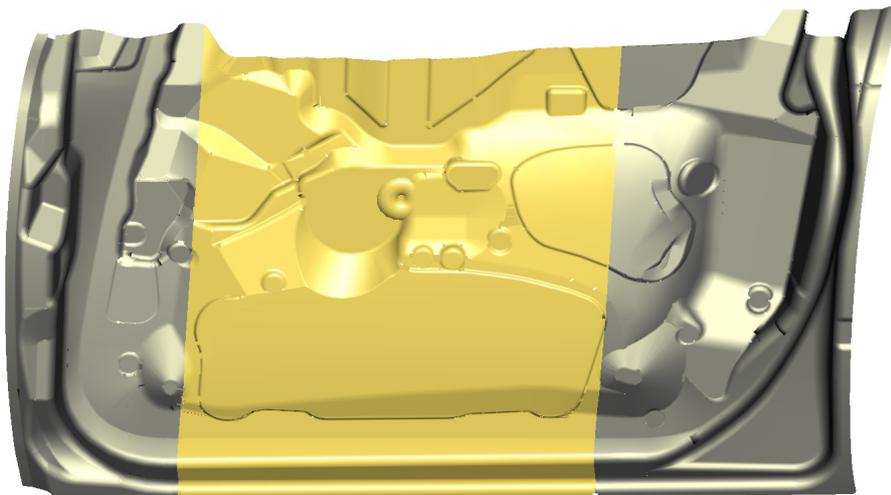


Bild 15. prinzipieller Aufbau (aktuelles Konzept)

Im Bild 16 ist das aktuelle Türkonzept dargestellt. Ursprung ist die original Geometrie einer

Fahrzeuggestür der oberen Mittelklasse.

Das CAD-Modell wurde im Verlauf des TeMaK-Projektes immer weiter an die, durch die Verwendung von Magnesiumknetlegierung, notwendigen Konstruktionsrichtlinien angepasst. Siehe 1.1.9 „Erarbeitung der Konstruktionsrichtlinien“.

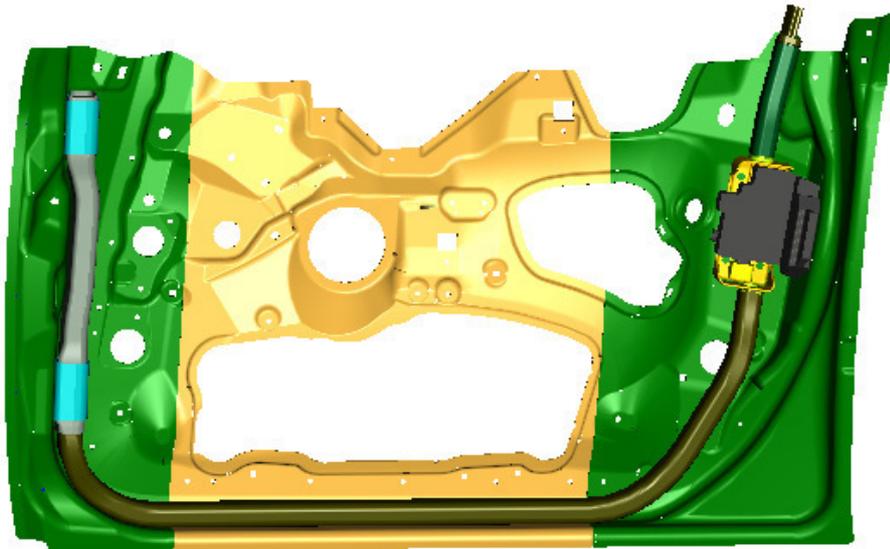


Bild 16. Aktueller Entwicklungsstand

Das Innenteil wird aus einem Tailored Blank tiefgezogen. Dieses Halbzeug ist eine Blechplatte, welche aus verschiedenen Werkstoffgüten und/oder Blechdicken zusammengesetzt ist. Die Platine welche im Demonstrator des TeMaK-Projektes verwendet wird, besteht wie im Bild 16, durch die unterschiedliche Farbgebung sichtbar, aus zwei unterschiedlichen Magnesiumblechen. Für Scharnier- und Schlosseitig werden 2 mm starke Bleche und im Mittelteil 1,2 mm starkes Material der Magnesiumknetlegierung AZ31 verwendet.

Die drei einzelnen Blechstreifen werden bereits vor dem Tiefziehprozess miteinander verschweißt. Dies ist durch die komplizierte Bauteilgeometrie und durch unterschiedliches Rückverformen nach dem temperierten Tiefziehprozess, bedingt durch die verschiedenen Materialstärken, nicht mehr möglich.

Dafür sind mehrere verschiedene Schweißverfahren denkbar. Zum einen besteht die Möglichkeit die Bleche mittels Laserschweißen, WIG-Verfahren oder MSG-Verfahren zu

verbinden, andererseits aber auch die Technologie des Rührreißschweißens zu nutzen. (siehe 1.1.8 Untersuchung zu Fügeverfahren)

Im Innenteil waren vor allem tiefziehbedingte Anpassungen der Geometrien notwendig. Diese Änderungsbereiche betreffen vor allem Rundungen, Ausformschrägen und die Berücksichtigung der Ankonstruktion zur Befestigung im Tiefziehwerkzeug.

Um die Kosten für den Werkzeugbau im geplanten Rahmen zu halten wurde das Innenblech so gestaltet, dass nur eine Ziehstufe zur Herstellung benötigt wird.

Um diese zu realisieren war die ständige Optimierung der Bauteil- und Werkzeuggeometrie im Partnerverbund notwendig.

Die fertige und zur Simulation freigegebene Konstruktion der Innenschale mit Ankonstruktion ist in Bild 17 dargestellt.

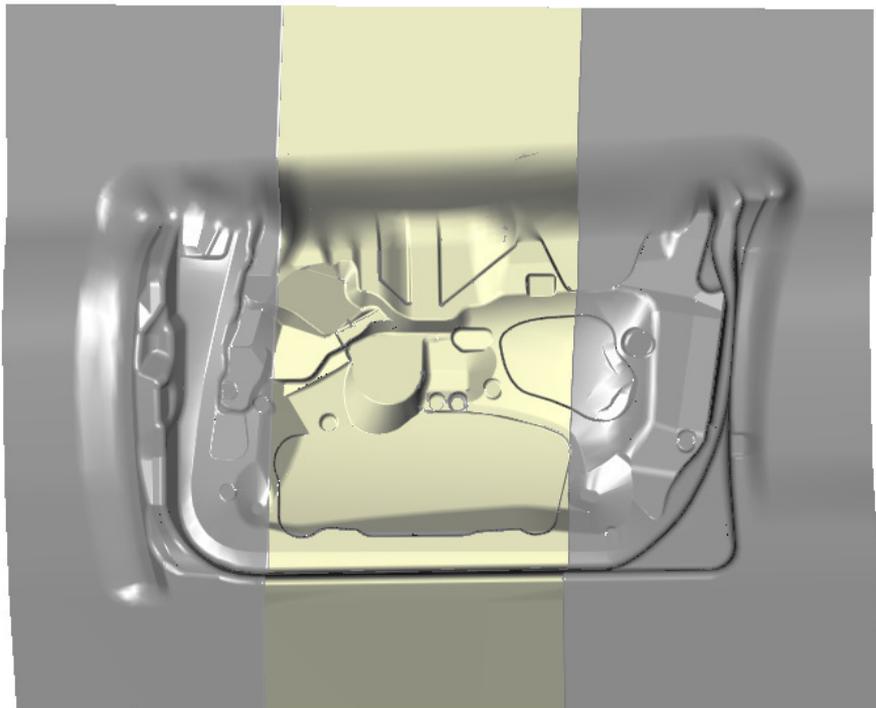


Bild 17. Innenschale mit Ankonstruktion

In Bild 18 sind die Ergebnisse der Simulationsdaten vom Fraunhoferinstitut zu sehen.

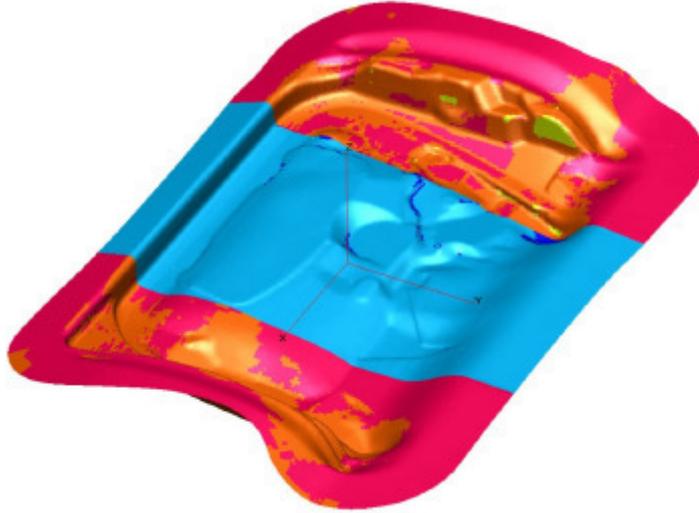


Bild 18. Ergebnis der Tiefziehsimulation

1.1.4.3 Türaußenblech

Am Türaußenblech sollten im TeMaK-Projekt die Kompetenzen im Bereich Falzen unter Beweis gestellt werden. Die Komponente wird aus 1,2 mm starken Magnesiumblech AZ31 hergestellt.

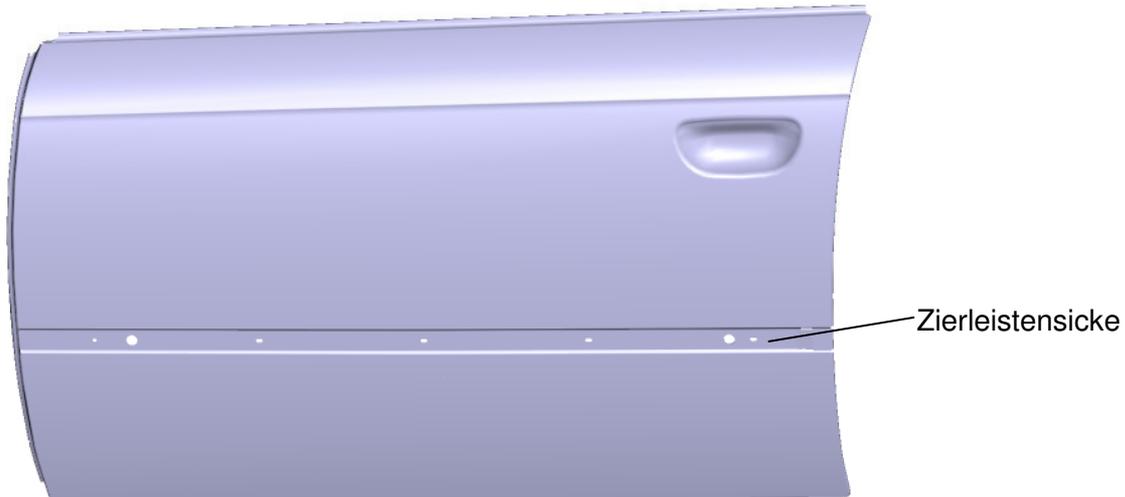


Bild 19. Außenblechgeometrie

Da die Blechtafeln die von MgF hergestellt werden, zum Zeitpunkt der Konstruktionsfestlegung fertigungsbedingt nur in maximaler Breite von 600 mm lieferbar waren [MGF08], das Außenblech ohne Ankonstruktion jedoch bereits ca. 750mm breit ist, musste ein Schweißverbindung realisiert werden. Die Schweißnaht wurde in den Bereich der Zierleistensicke eingebracht (siehe Bild 19), um sie aus optischen Gründen durch das Anbringen der Zierleiste zu verdecken. Die dazu zur Auswahl stehenden Schweißverfahren sind analog zum Türinnenblech (siehe 1.1.8).

Das Bauteil wird im nächsten Arbeitsschritt mittels Tiefzieh- / Streckziehverfahren hergestellt.

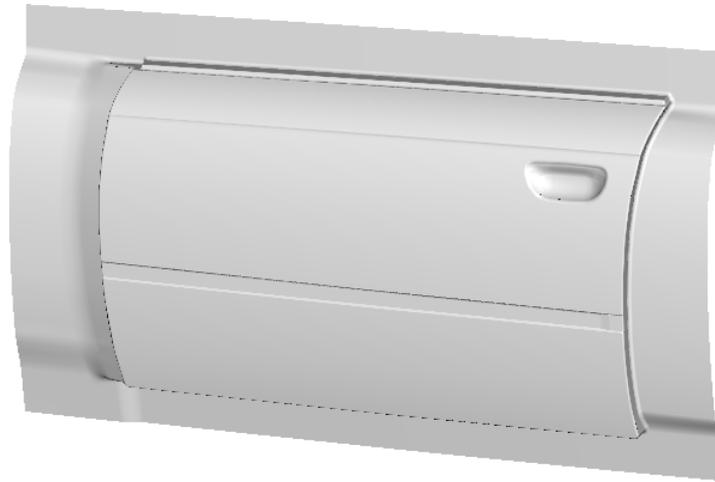


Bild 20. Außenhaut mit Ankonstruktion für den Tiefziehprozess

Dabei sind minimale Rundungen R8 im Bereich der Zierleiste und der Türgriffmulde einzuhalten. Der Übergang der Blechfläche in die Zierleistensicke soll mit sanften Radien und im Winkel von 20°–30° verlaufen. Der Einlaufradius am Blechhalter muss mindestens 12 mm betragen um ein gleichmäßiges Nachlaufen des Magnesiummaterials zu gewährleisten.

Die Seitenränder (Scharnier- / Schlosseitig) und die untere Kante (Schweller) des Außenbleches werden gefalzt, um eine geometrische Verbindung zum Innenblech herstellen zu können (Bild 21). Zu beachten ist dabei vor allem die Rückfederung von ca. 2 - 4% um den gewünschten „Klemmeffekt“ zu erreichen.

Zum Einsatz kommt hierbei der Tropfenfalz bzw. Hohlfalz mit einem minimalen Falzaußenradius von 2.7 mm an den geraden Kanten, in den Eckbereichen 4 mm. Die Falze an der Zierleistensicke (rote Markierung), sowie in den Eckbereichen, an der Designkante und an Geometrieübergängen mussten freigeschnitten werden (grüne Markierung) um Faltenbildung, durch technologiebedingt entstehendes überschüssiges Material, zu vermeiden. An der oberen Seite der Tür wird ein Falz mit Einlegeblechen zur Versteifung der Tür realisiert.

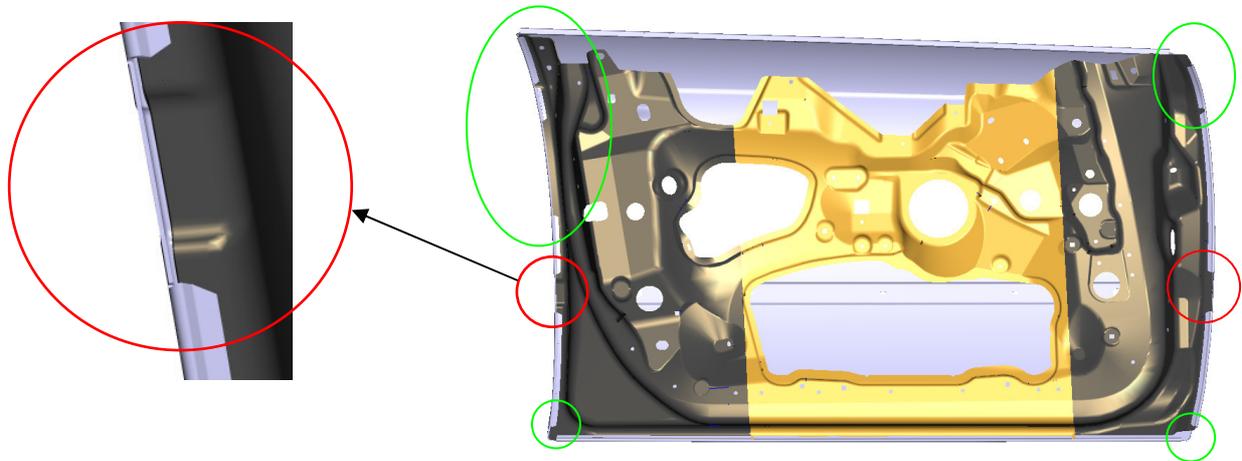


Bild 21. Gefalzte Verbindung

1.1.4.4 Rahmen

Am Rahmen sollen die Technologien und Kompetenzen im Bereich des Freiformbiegens, des Fließpressens und der Umformung mittels Innenhochdruckumformen demonstriert werden. Er dient der Stabilisierung des Innen- und Außenteiles sowie der Befestigung der Türscharniere und des Türschlosses für den späteren Einbau des Demonstrators in ein Versuchsfahrzeug bzw. eine Versuchsanordnung.

Die Rahmenbaugruppe hat folgenden Aufbau:

1. IHU Teil
2. Fließpressteile (Halter und Fensterrahmenaufnahmen)
3. Biegeteile
4. Schlossteil (Dummy)

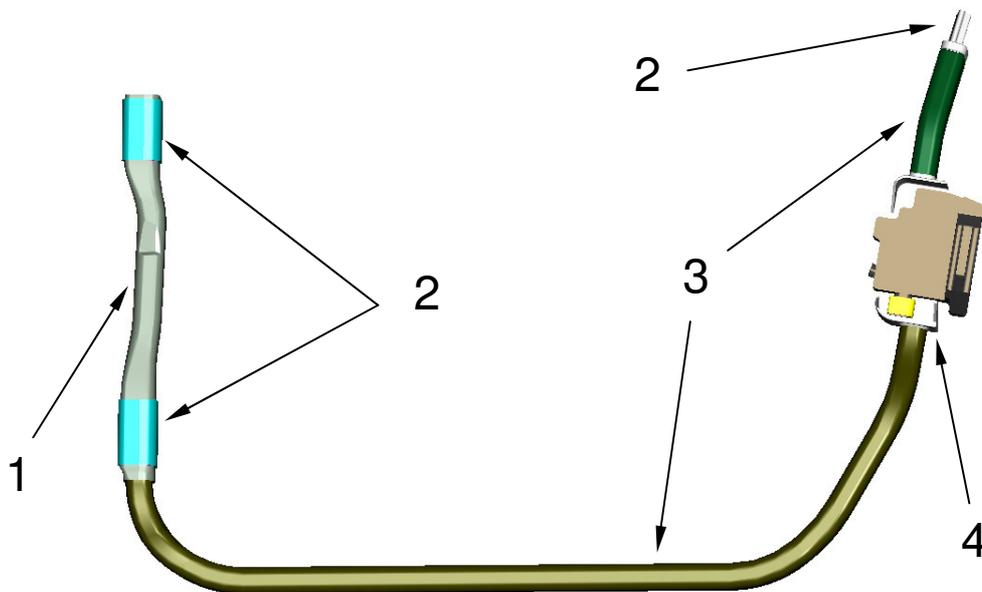


Bild 22. Bauteile des Rahmens

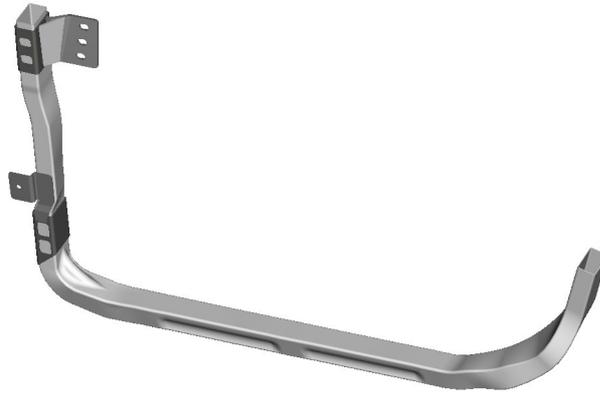


Bild 23. Ausgangsdaten von IWU zur Verfügung gestellt

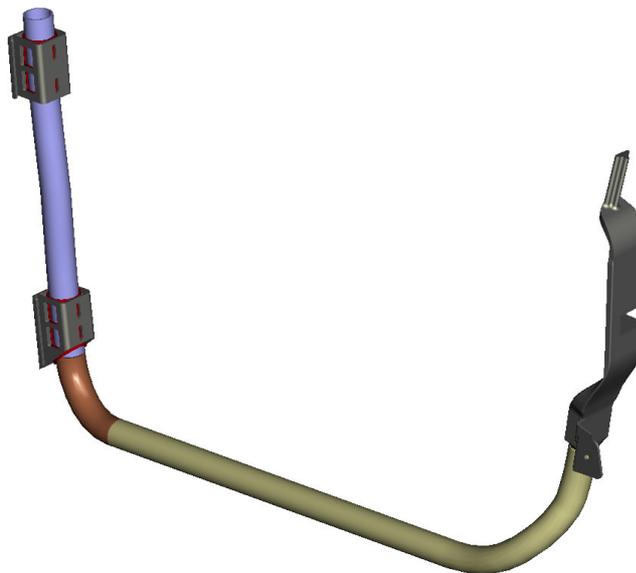


Bild 24. 1.Konstruktionsschritt mit Rundprofil

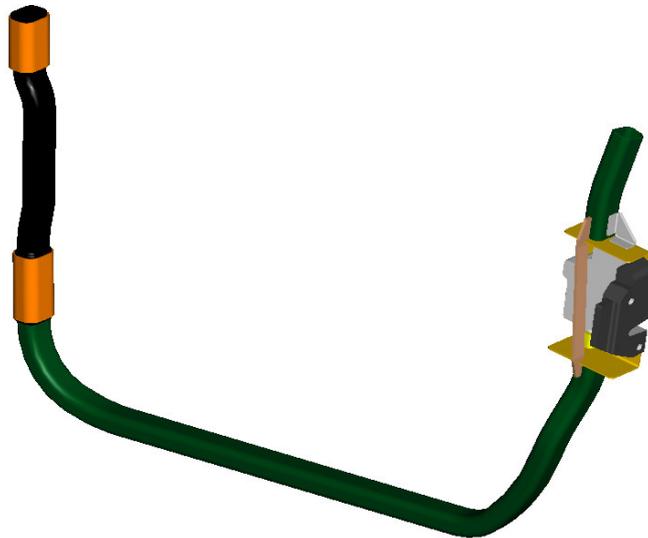


Bild 25. 2.Konstruktionsschritt mit Rechteckprofil und IHU-Teil

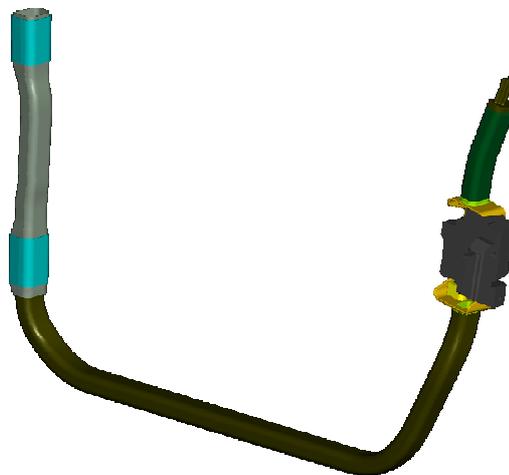


Bild 26. Abgabestand des Rahmens inkl. Schlossteil und Fließpressteilen

1.1.4.4.1 IHU Teil

Das mittels temperiertem Innenhochdruckumformen (T-IHU) herzustellende Teil wird wie die anderen Bauteile des Rahmens aus dem Magnesiumprofil (Bezeichnung: AZ 31 B) mit Rechteckquerschnitt (30mm x 40mm), Wandstärke 2,5mm gefertigt. Beim IHU-Verfahren wird mittels Wirkmedium, welches mit hohem Druck in das Bauteil eingebracht wird, eine Aufdehnung des Hohlprofils erreicht. Die Form wird durch das IHU-Werkzeug vorgegeben. Eine genaue Verfahrensbeschreibung ist unter 1.3 „Mitarbeit bei der Untersuchung von Grundlagenuntersuchungen“ zu finden.

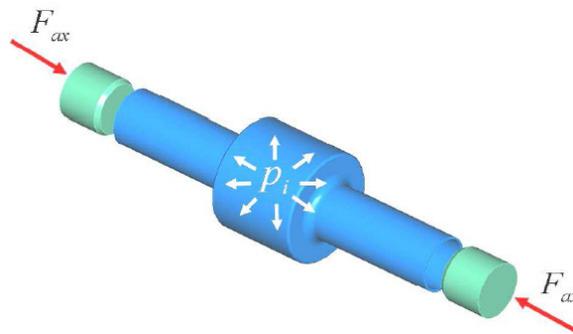


Bild 27. Prinzip des IHU [MUDR06]

Bei der Konstruktion der Referenzbauteile sind folgende Punkte zu beachten. Eine Umfangsdehnung des Ausgangsmaterials von 3-6% ist nicht zu überschreiten. Der äußere Eckradius muss mindestens 3-mal der Wandstärke des Ausgangsprofils entsprechen, das entspricht in vorliegendem Fall mind. 7,5 mm. Die Biegeradien in Bauteillängsrichtung dürfen nicht kleiner als das 1,5 fache des äquivalenten Querschnittes des Profilmaterials sein.

Das IHU-Teil wurde als Fertigteil zur Werkzeugkonstruktion und als Rohteil konstruktiv umgesetzt. Das Ausgangsmaterial (Hohlprofil) muss, aufgrund der Geometrie der Innenschale, vorgebogen werden um die maximal mögliche Bauteilausdehnung nicht zu überschreiten. Weiterhin war die Realisierung einer Ankonstruktion für den Materialnachschieb während des Aufdehnprozesses und den Verschluss des IHU-Werkzeuges notwendig (Bild 28).

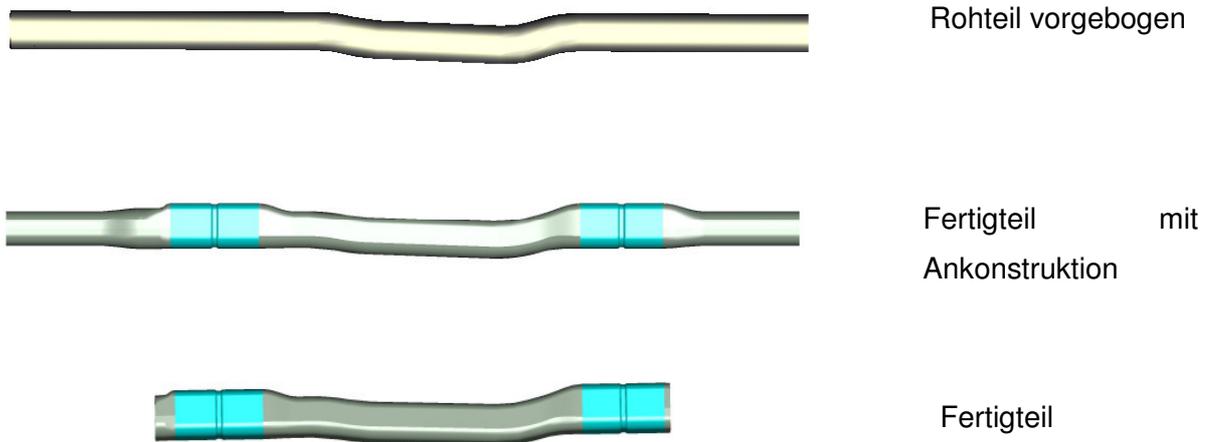


Bild 28. Entstandene Konstruktionsmodelle

Das IHU Werkzeug besteht aus 2 Werkzeughälften. Die Ausformschrägen betragen min 1°!

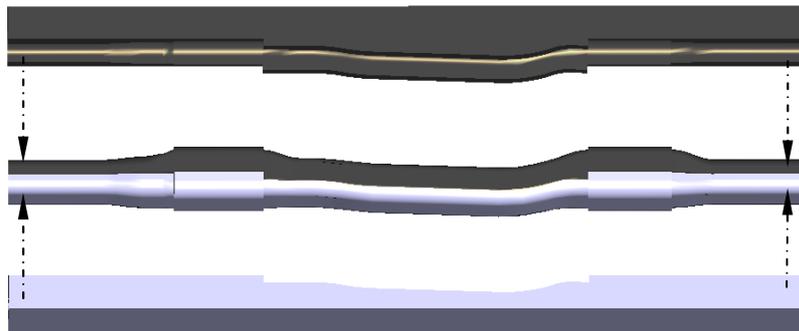


Bild 29. IHU - Werkzeug

Weitere Details zur Konstruktion sind unter 1.1.9 Konstruktionsrichtlinien dargestellt.

1.1.4.4.2 Fließpressteile

Die Technologie des Fließpressens wird bei der Herstellung der Halter (oben und unten) eingesetzt.

Die Halter (Käfige), welche der partiellen Verstärkung des IHU - Bauteiles dienen, sind in der Rahmenbaugruppe die Schnittstelle zum Innenblech. Mit diesen können die Türscharniere verschraubt werden.

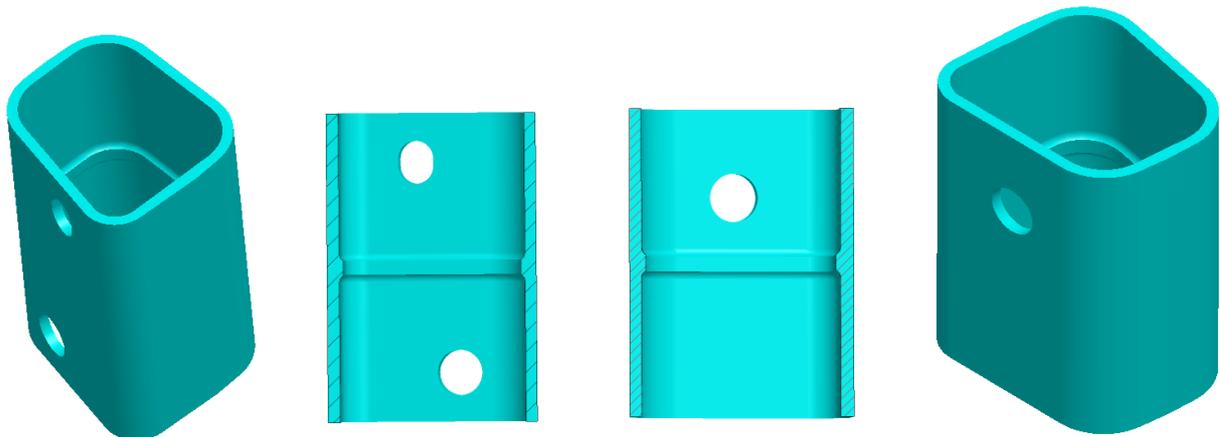


Bild 30. Aktuelle Käfiggeometrie (oben und unten)

Prinzip: Der fließgepresste Käfig (3,5 mm Wandung) wird auf das IHU-Rohteil aufgesteckt und mit ihm gemeinsam ins Werkzeug gelegt. Das Rohteil wird durch das im IHU-Prozess eingesetzte Wirkmedium umgeformt (in den Käfig hinein „geblasen“) wodurch zwischen dem innenhochdruckumgeformten Rahmensegment und den Fließpressteilen ein Formschluss entsteht (Bild 29).

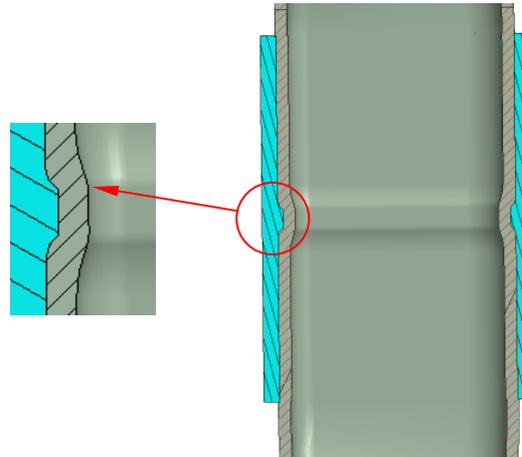


Bild 31. Verbindung (Formschluss) Halter und Fließpressteil

1.1.4.4.3 Biegeteil

Das Biegeteil entsteht durch Freiformbiegen. Mit diesem Verfahren ist es möglich komplex gebogenen Biegeverläufen zu realisieren. Das Freiformbiegen ermöglicht sehr große und kleine Biegeradien in einem Schritt zu fertigen und entsprechende Radieneinläufe und –ausläufe zu erstellen da es nicht wie bei einer herkömmlichen Dornbiegemaschine über eine feste Schablone gebogen wird. Die Zustellung wird hier über einen individuellen 3D Kurvenverlauf realisiert.

Theoretisch könnte beim Freibiegen an jedem Punkt des zu biegenden Rohres (Profils) ein anderer Radius eingestellt werden. [KER09]



Bild 32. Biegeteil

Details zur Konstruktion siehe 1.1.9 Konstruktionsrichtlinien.

1.1.4.4.4 Schlossteil

Für die vollständige Darstellung der Funktionalitäten der Demonstratortür wurde die Darstellung der Schloßgeometrie als notwendig erachtet. Das Schloß wurde als Dummy umgesetzt und in ein Frästeil eingesetzt, welches mit den Rahmenbauteilen verschweißt wird.

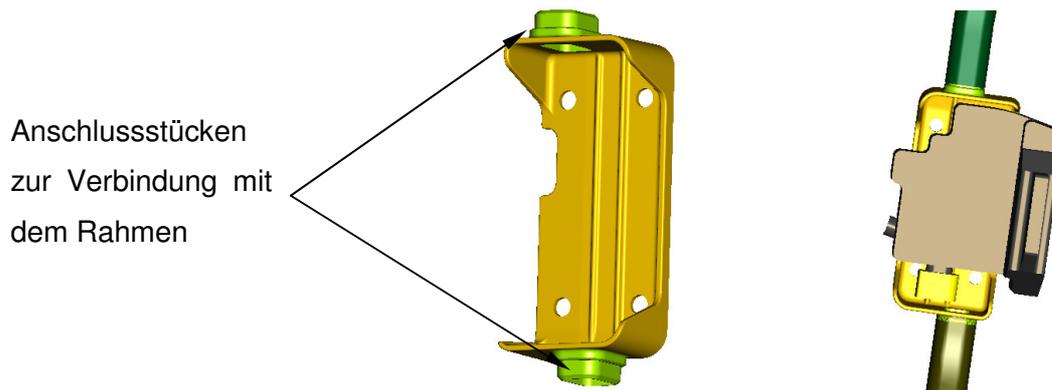


Bild 33. Schloßteil-Befestigung

1.1.5 Untersuchungen zur Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität

In der Fertigungsphase des Demonstrators wurden ständig Untersuchungen zur Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität durchgeführt. Aus diesen Ergebnissen wurden Optimierungen der technologischen Kennwerte abgeleitet. Gegenwärtig entspricht die Maßhaltigkeit im Wesentlichen den an die Bauteile des Demonstrators gestellten Anforderungen. Für ein Serienprodukt sind die Ergebnisse jedoch noch nicht ausreichend. Weitere Untersuchungen und Optimierungen waren im Förderprojekt nicht realisierbar. Die bisherigen Untersuchungen und Optimierungen haben jedoch gezeigt, dass die gestellten Qualitätsanforderungen für ein Serienprodukt zukünftig realisierbar sind.

Die Oberflächenqualität am Demonstrator entspricht z.Z. einem Teststadium. Durch Farbauftrag und entsprechende Vorbehandlung konnte eine weitere Verbesserung erreicht werden. Auch hier ist das Ergebnis für ein Serienprodukt noch nicht ausreichend. Eine weitere Optimierung der technologischen Kennwerte und Parameter ist notwendig.

1.1.6 Vorgaben für die Konstruktion der Demonstratorwerkzeuge

Für die Erstellung der Komponenten der Demonstratorwerkzeuge wurden die von Voith Engineering aus den Referenzteilen abgeleiteten Flächen mit Ankonstruktion an die Hersteller der Demonstratorwerkzeuge übergeben. Diese leiteten aus den übergebenen Flächen Solids für die Werkzeugkonstruktion ab. In einem kontinuierlichen Prozess und in enger Zusammenarbeit mit allen an der Fertigung beteiligten Firmen wurden mehrere Änderungsschleifen realisiert, bis das gewünschte Ergebnis erreicht wurde.

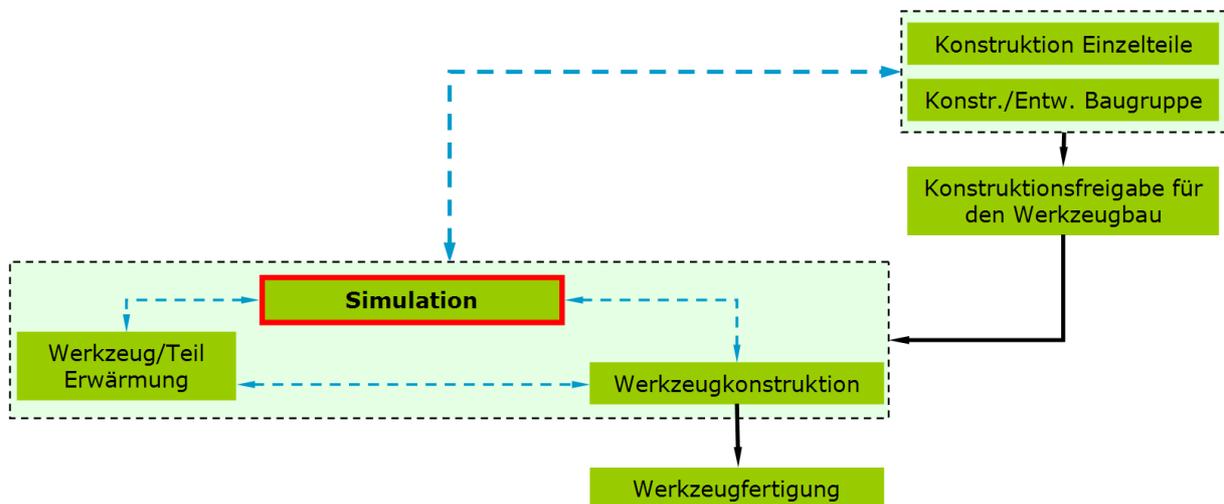


Bild 34. Vorgehensweise bei der Konstruktion der Demonstratorwerkzeuge

1.1.7 Beurteilung der Bauteilqualität

Im Hinblick auf die erwartete Oberflächenqualität der Außenhautbauteile wurden hauptsächlich die auftretenden plastischen Dehnungen bzw. lokalen Dehnungsverteilungen betrachtet.

Die erzielte Oberflächenstruktur erfüllte noch nicht in allen Bereichen die hohen im Automobilbau an Designteile gestellten Anforderungen. Sie weist eine leichte Welligkeit auf. Der Tiefziehprozess muss demzufolge noch optimiert werden, um eine gleichmäßigere Oberfläche zu erzielen. Dazu werden weitere Untersuchungen notwendig, die den Einfluss verschiedener Zustandsgrößen und deren Gradienten sowie Materialeigenschaften und Prozeßrandbedingungen auf das optische Erscheinungsbild bestimmen. Dabei gestaltet sich die Bestimmung dieser Zustandsgrößen, wie Spannungen und Dehnungen, bei realen Ziehteilen problematisch, da diese Größen bauteil- und prozeßabhängig sind. Somit müssen zunächst Kriterien entwickelt werden, die eine zuverlässige Beurteilung der Oberflächenqualität der Ziehteile bereits am virtuellen Modell erlauben.

Arbeiten und Erfahrungen, auf die diesbezüglich zukünftig aufgebaut werden kann:

[Hartung01]

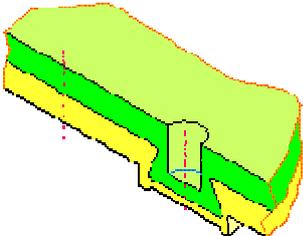
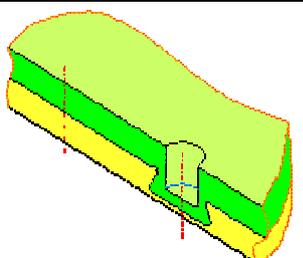
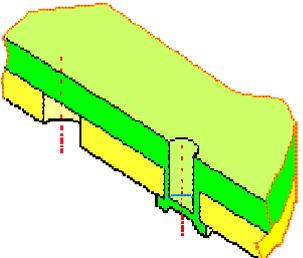
Die Bauteilqualität aller anderen gefertigten Teile kann als erfolversprechender Ausgangszustand für eine Serienfertigung eingeschätzt werden. Damit kann der Demonstrator als Referenz für den möglichen Einsatz von Magnesiumknetlegierungen in der Fahrzeugentwicklung bewertet werden.

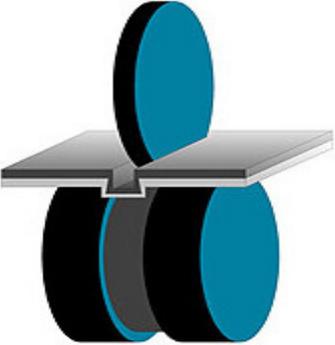
1.1.8 Untersuchungen zu Fügeverfahren

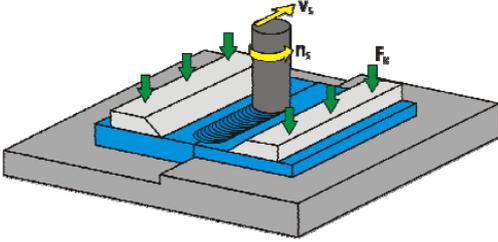
Nach entsprechenden Recherchen wurden geeignete Fügeverfahren ausgewählt.

1.1.8.1 Auswahl und Gegenüberstellung verschiedener möglicher Fügeverfahren

Zusammensetzen	Ist der Sammelbegriff für das Fügen von Werkstücken durch Auflegen, Einlegen, Einhängen. Das Verbleiben im gefügten Zustand wird im allgemeinen durch Schwerkraft, Reibung oder Formschluss bewirkt
Füllen	Das Fügeverfahren Füllen nach DIN 8593 (auch Befüllen, Abfüllen), ist das Einbringen von Flüssigkeiten, Gasen, Pulvern oder Pasten in Zwischenräume. Das Ergebnis ist eine Füllung, die durch eine Phasenänderung oder chemische Reaktion erstarrt und dann Bauteile fixiert.
An- und Einpressen	Umfasst die Verfahren bei denen beim Fügen die Fügeteile sowie etwaige Hilfsfügeteile nur elastisch verformt werden, das heißt, sie können in der Regel ohne Materialschädigung wieder gelöst werden. . z.B.: Schrauben, Klemmen, Schrumpfen, Pressen
Fügen durch Urformen	Urformen ist ein Oberbegriff und vereint nach DIN 8580 alle Fertigungsverfahren, bei denen aus einem formlosen Stoff ein fester Körper hergestellt wird. Durch das Fügen wird der Zusammenhalt zwischen den zuvor getrennten Werkstücken lokal - d.h. an den Fügstellen - geschaffen und eine Formänderung des neu entstandenen Teils herbeigeführt. Die Verbindung kann dabei von fester oder beweglicher Gestalt sein. Über die Wirkflächen der Verbindung werden die auftretenden Betriebskräfte übertragen. Die zu fügenden Werkstücke können dabei sowohl von geometrisch bestimmter Form sein, als auch aus formlosem Stoff bestehen.
Fügen durch Umformen	Umformen ist der Oberbegriff aller Fertigungsverfahren in dem Werkstoffe, gezielt plastisch in eine andere Form gebracht werden. Beim Fügen durch Umformen wird mindestens ein Fügepartner so umgeformt damit er mit den anderen Bauteilen eine Form- und oder Kraftschlüssige Verbindung eingeht.
Falzen	Falzen ist eine formschlüssige, nichtlösbare Verbindung. Durch unterschiedliche Falztechniken kann man verschiedene Verbindungen

	erzielen, wobei zu die Wasserunverträglichkeit bei einfach gefalzten Blechen zu beachten ist. Diese kann man durch Nachbearbeitung (Löten) beheben.
Clinchen	Clinchen ist ein Umformverfahren, mit dem sich Bleche aus gleichen und/oder verschiedenen Werkstoffen unlösbar verbinden lassen. Es werden dabei keine Verbindungselemente bzw. Zusatzstoffe benötigt. In den übereinander angeordneten Blechen / Profilen wird durch eine lineare oder taumelnde Bewegung eines Stempels gegen eine Matrize oder einen Amboss, als Gegenhalter, eine lokale Hinterschneidungen erzeugt. Die Bauteile werden somit kraft- und formschlüssig verbunden. Ein Vorbohren der zu verbindenden Teile, sowie eine Vor- oder Nachbearbeitung der Blechoberfläche ist nicht erforderlich.
– nicht schneidend	<p>Die Bleche werden mit Hilfe von Stempel und Matrize durch Verformung miteinander verbunden. Keine Vorbereitung der Bauteile erforderlich. Gesamtblechdicke: bis 11 mm (je nach Werkstoff)</p>  <p>Bild 35. Rundpunkt [KOAT09]</p>
– nicht schneidend (Flachpunkt)	<p>Die Bleche werden mit Hilfe von Stempel und Matrize durch Verformung miteinander verbunden. Beim Flachpunkt bleibt eine Seite der Verbindung flach. Keine Vorbereitung der Bauteile erforderlich.</p>  <p>Bild 36. Flachpunkt [KOAT09]</p>
– ein Blech vorgebohrt	<p>Die Bleche werden mit Hilfe von Stempel und Matrize durch Verformung miteinander verbunden. Ein Blech wird vor dem Nieten vorgebohrt. Gesamtblechdicke: bis 11 mm (je nach Werkstoff)</p>  <p>Bild 37. Tox Vario-Punkt [KOAT09]</p>

<p>– Rollclinchen</p>	<p>Ist ein umformtechnisches Fügeverfahren, welches im Gegensatz zu den bekannten Clinchverfahren, die Erzeugung einer kontinuierlichen Clinchnaht erlaubt. Es entsteht eine tragfähige linienförmige Verbindung, die sowohl Zug- wie auch Schubkräfte aufnehmen kann.</p>  <p>Bild 38. Rollclinchen [ROCL10]</p>
<p>Fügen durch Schweißen</p>	<p>Unter Schweißen versteht man (gemäß DIN-Norm DIN EN 14610 und DIN 1910-100) das unlösbare Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme oder Druck – mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffen. Das Schweißen von Magnesiumverbindungen ist mit allen gängigen Verfahren möglich. Die Schweißbeignung von Gusslegierungen ist Gießprozess abhängig, wobei mit dem jeweils passenden Schweißverfahren bis auf wenige Ausnahmen (AZ63, ZK51) jede Legierung gut verarbeitbar ist. Bei Knetlegierungen ist der Herstellungsprozess nicht ausschlaggebend auf dessen schweißtechnische Eignung. Bei geeigneter Wahl des Fügeprozesses und des Zusatzwerkstoffes können 60-100% der Grundwerkstoffeigenschaften erreicht werden. Als Schweißzusätze werden häufig artgleiche oder höher legierte Magnesium-Aluminium-Verbindungen verwendet. Besonderen Wert muss beim Schweißen von Magnesiumlegierungen auf die Auswahl und die Qualität des Schutzgases gelegt werden. Dies hat zum Einen sicherheitstechnische Hintergründe da der Sauerstoff beziehungsweise eine hohe Feuchtigkeit der Umgebungsluft zum Entzünden der Magnesiumlegierung führen kann. Zum Anderen beeinflusst eine Kontamination des Gases die Nahtbeschaffenheit und -güte negativ. Eingesetzt wird hauptsächlich Argon, Helium oder ein Gemisch aus beiden.</p>
<p>Rührreib- und Reibschweißen</p>	<p>Das Rührreibschweißen ist eine Variante des Reibschweißens (Reibung und hoher Druck führen zur Erwärmung und damit zur partiellen Aufschmelzung der Fügepartner). Es verbindet den Vorteil des Schweißens in der festen Phase, also unterhalb des Schmelzpunktes der beiden Fügepartner, mit der Möglichkeit, lange Stumpfstöße auch bei</p>

	<p>dickwandigem Material und Überlappstöße herzustellen.</p>  <p>Bild 39. Rührreibschweißen [RRSW08]</p> <p>Wie beim konventionellen Reibschweißen wird der Werkstoff durch entstehende Reibwärme, hier erzeugt durch einen rotierenden Rührfinger - lediglich plastifiziert, zusammengepresst und bildet nach dem Abkühlen eine feste Verbindung zwischen den Fügepartnern.</p>
<p>Laser- schweißen ND:YAG</p>	<p>Ist ein Festkörperlaser, der als aktives Medium einen Neodymdotierten YAG-Kristall verwendet und infrarote Strahlung mit der Wellenlänge 1064 nm emittiert. Großer Vorteil des Lasers ist, dass er aufgrund seiner geringeren Wellenlänge durch ein Glasfaserkabel leitbar ist.</p>
<p>Laser- schweißen CO₂-Laser</p>	<p>Ist ein elektrisch angeregter Gaslaser Die Wellenlänge des CO₂-Lasers liegt bei 10,6 µm deshalb kann die Strahlung des CO₂-Lasers nicht in Glasfasern geführt werden sondern muss mittels Spiegeln gelenkt werden</p>
<p>Laser- schweißen, Dioden-Laser</p>	<p>In einfachster Form besteht ein Diodenlaser aus nur einer Laserdiode, ggf. mit Kollimations- und Fokussieroptik mit Hilfe derer die Lichtstrahlen gerichtet werden.</p>
<p>Widerstands- punktschweißen</p>	<p>Es gehört zu den stoffschlüssigen Verbindungsverfahren, bei denen der Stoffschluß an den Verbindungsstellen durch einen örtlichen Schmelz- und Erstarrungsvorgang unter der Einwirkung von Presskraft und Wechselstromzufuhr erzeugt wird.</p>
<p>Widerstands- punktschweißen (DeltaSpot)</p>	<p>Das Verfahrensprinzip ist ähnlich dem üblichen Widerstandspunktschweißen mit einem großen Unterschied. Bei DeltaSpot läuft zwischen Elektrode und Werkstück ein Prozessband mit, welches sich nach jedem geschweißten Punkt je nach Durchmesser weiter bewegt. Die Kontaktfläche bleibt dadurch immer sauber weshalb Punkt für Punkt die gleiche Ausgangsqualität erhalten werden kann und der Verschleiß der sehr teuren Elektroden stark minimiert wird. [DESP08]</p>

	 <p>Bild 40. Widerstandspunktschweißen [DESP08]</p>
<p>Schmelzschweißverfahren</p>	<p>Die am häufigsten verwendeten Verfahren sind die Schutzgasschweißverfahren. Im Allgemeinen werden die Verfahren in 2 Prozessarten unterteilt. Zum einen in Prozesse mit nichtabschmelzender Elektrode zu welchem das Wolframinertgasschweißen (WIG), siehe Bild 41, zählt. Zum anderen in Prozesse mit abschmelzender Elektrode, zum Beispiel Metallschutzgasschweißen (MSG) (Bild 42).</p> <p>Beim Wolframinertgasschweißen (WIG) mit Wechselstrom entsteht der Lichtbogen zwischen Wolframelektrode und Werkstück. Die positive Phase der Elektrode wird zum Aufbrechen der Oxidschicht benötigt während der Minuspol zur Reduzierung der Temperatur an der nichtabschmelzenden Elektrode dient. Der Einsatz eines Schweißzusatzes ist nicht zwingend notwendig. Vorteilhaft an diesem Verfahren sind die geringen Investitionskosten und der ebenso manuelle wie automatisierte Einsatz. Nachteilig dabei sind die im Vergleich geringe Schweißgeschwindigkeit und die große Wärmeeinflusszone. Als Schutzgas kommen vorrangig Argon und Argon-Helium-Gemische zum Einsatz.</p> <p>Als Vertreter der Familie des Metallschutzgasschweißens (MSG) kommt das Metallinertgasschweißen (MIG) zum Einsatz. Bei diesem Verfahren wird der Lichtbogen in einer Schutzgashülle zwischen der abschmelzenden Drahtelektrode, welche gleichzeitig als Schweißzusatz dient, und dem Werkstück erzeugt. Der Lichtbogen wird mittel Gleichstrom erzeugt. Verfahrens bzw. werkstoffspezifische Nachteile sind die mögliche Spritzerbildung und ein mindest Durchmesser der Elektrode von 1,6 mm [MAG01].</p>
<p>WIG-Schweißen</p>	<p>Das Wolfram-Inertgas-Schweißen gehört zu den Schutzgasschweißprozessen. Der Lichtbogen brennt zwischen einer nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück. Ein inertes Gas</p>

schützt die Elektrode, den Lichtbogen und das Schmelzbad vor der Atmosphäre geschützt. Ein Schweißzusatz kann durch einen Kaltdraht zugeführt werden, welcher vor dem Schmelzbad im Lichtbogen abgeschmolzen wird.

Vorteil dieses Schweißprozesses ist die Herstellung einer sehr saubere und hochwertige Schweißverbindungen.

Es entstehen keine Spritzer und kleine Fehler wie Bindefehler, Einbrandkerben und Poren sind leicht zu vermeiden.

Der Prozeß kann sowohl manuell als auch teil- oder vollmechanisch ausgeführt werden. WIG-Schweißen wird meistens an Aluminium und hochlegierten Stählen eingesetzt, da hier die Nahtqualität gefordert wird, die mit anderen Schweißprozessen kaum erreichbar ist.

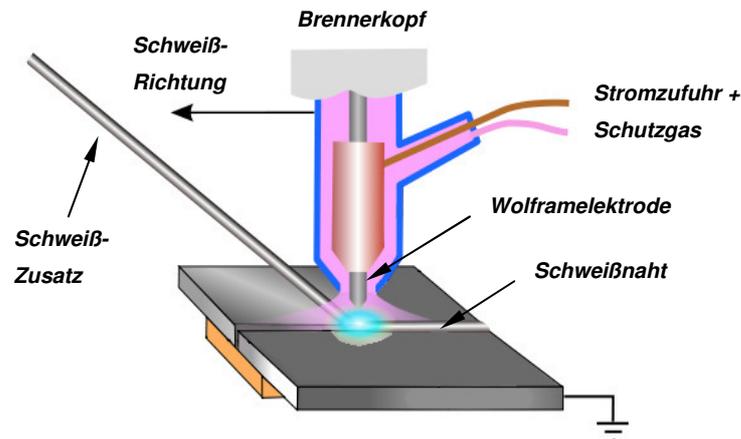
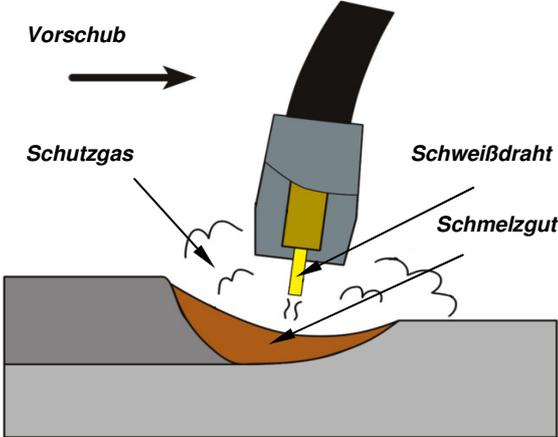
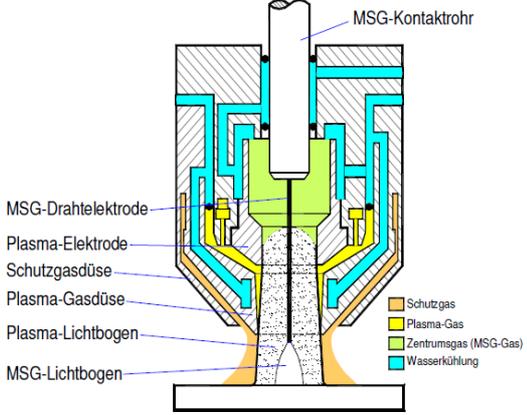


Bild 41. WIG Prinzip [WIKI01]

MSG (MIG)-
 Schweißen

Bei dem MSG Schweißen (Metallschutzgasschweißen) ist die eingesetzte Drahtelektrode zeitgleich stromführende Elektrode und Schweißzusatzstoff, der unter dem Lichtbogen schmilzt. Das MSG schweißen teilt sich dabei, je nach verwendeten Schutzgasen, in MAG- und MIG-Schweißen. Zwischen dem Werkstück und der Drahtelektrode brennt ein Lichtbogen, während des Schweißens schmilzt die aufgespulte Elektrode und wird automatisch von einem Drahtvorschubgerät nachgeführt. Die Elektrode ist von einer Düse umgeben, aus der das Schutzgas austritt und den Lichtbogen und das Schmelzbad vor atmosphärischen Einflüssen schützt. Beim MAG-Schweißen werden aktive Schutzgase verwendet, die aus einem Gemisch aus Argon oder Helium und Kohlendioxid oder Sauerstoff bestehen.

	 <p>Bild 42. MSG Prinzip [WIKI01]</p>
<p>Plasma- schweißen</p>	<p>Beim Plasmaschweißen (Plasma-Metall-Inertgasschweißen, EN ISO 4063: Prozess 151) dient ein Plasmastrahl als Wärmequelle. Das Plasma ist ein durch einen Lichtbogen erhitztes elektrisch leitendes Gas. Im Plasmabrenner wird das durchströmende Plasmagas (Argon) durch Hochfrequenzimpulse ionisiert und ein Hilfslichtbogen (Pilotlichtbogen) gezündet. Dieser brennt zwischen der negativ gepolten Wolframelektrode und der als Düse ausgebildeten Anode, wodurch ein berührungsloses Zünden des Lichtbogens möglich ist. Der für das Schweißen verwendete, sogenannte übertragene Lichtbogen (Plasmastrahl) wird von einem Schutzgas umgeben, welches die Schmelze vor Oxidation schützt und den Lichtbogen stabilisiert. [PLMA08]</p>
<p>Plasma-MIG</p>	<p>Das Plasma-MIG-Schweißen ist ein Lichtbogenschweißverfahren und zählt aufgrund seiner beiden fast unabhängig voneinander steuerbaren Prozessgrößen zu den Hochleistungsverfahren. Beim diesem Hybridschweißverfahren [SLV01] ist die von Abschmelzleistung vom MIG-Strom entkoppelt. Weitere Vorteile sind beispielsweise der Schutz des Abschmelzbereiches vor Umgebungsmedien und zusätzlichem Wärmeeintrag in den Nahtflanken sowie, dass durch den plusgepolten Plasmalichtbogen eine hervorragende kathodische Reinigungswirkung erzielt wird, welche eine sichere Oxidschichtbeseitigung auf der Werkstückoberfläche gewährleistet. Im Dünoblechbereich können sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten</p>

	<p>realisiert werden. Herstellbar sind Stumpf-, Überlapp und Kehlnähte.</p>  <p>Bild 43. Plasma MIG [PLMA09]</p>
<p>ColdArc-MIG</p>	<p>Schweißverfahren analog MSG-Verfahren jedoch mit energiereduziertem Kurzlichtbogen welcher zur verbesserten Tropfenablösung gezielt mittels der Schweißstromquelle gesteuert werden kann. Vorteile sind extrem geringer Wärmeeintrag in den Werkstoff und zugleich sichere Verbindungen. Es erlaubt das Schweißen dünner Bleche, von Blechen mit beschichteter Oberfläche und Mischverbindungen sowie das Schweißen von Magnesiumblechen. [COAR09]</p>
<p>Fügen durch Löten</p>	<p>Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen ein es Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Liquidustemperatur der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht. Im Gegensatz dazu wird diese Temperatur beim Schweißen überschritten. [LOET09]</p>
<p>Fügen durch Kleben</p>	<p>Durch Kleben werden Fügepartner mittels Klebstoff stoffschlüssig verbunden Die Klebetechnik als industrielles Fügeverfahren, hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Im Bereich der Verbindung von Magnesiumlegierungen eignen sich besonders anaerob aushärtende Klebstoffe und zweikomponentige Epoxyklebstoffe. Bei den anaerob aushärtenden Klebern handelt es sich um Stoffe welche erst unter Sauerstoffabschluss in Verbindung mit Aktivatoren beginnen auszuhärten. Der Sauerstoffentzug entsteht durch das Zusammenbringen der Fügepartner. Bei den 2-Komponentenklebern setzt der Aushärtvorgang sofort bei der Mischung der Stoffe ein [MAG00].</p>

1.1.8.2 Bewertung der Verfahren (allgemein)

<p>Zusammensetzen</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - wieder Zerlegbar - ohne Materialschädigung - wenig Hilfsteile/-stoffe notwendig <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nur unter Bestimmten Lastfällen haltbar (statisch) - keine dynamischen Belastungen
<p>Füllen</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dauerhafte Fixierung der Bauteile - dämpfende bzw. isolierende Wirkung erreichbar - relativ Günstig <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bedingt wieder lösbar - oft chemische Reaktionen (Bauteilbeeinflussung)
<p>An- und Einpressen</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - meist nur elastische Verformung - i.d.R. ohne Materialschädigung wieder lösbar - relativ. kostengünstig <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - erhöhter Aufwand durch evtl. Vorbohren - dadurch Bauteilschwächung - Hilfsfügeteile (Schrauben, Bolzen, ...) notwendig
<p>Fügen durch Urformen</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - verschiedene Ausgangsstoffe kommen zum Einsatz, diese können einen flüssigen, plastischen, körnigen, gasförmigen oder pulverförmigen Ausgangszustand aufweisen <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - keine komplizierte Geometrie kann erzeugt werden, es entsteht nur ein Körper aus einem formlosen Stoff erschaffen
<p>Fügen durch Umformen</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formschlüssige Verbindung - Gegen ungewolltes Lösen gesichert

	<p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zerstörung bzw. Schädigung der Bauteile beim Lösen meist nicht vermeidbar - Hohe Werkzeugkosten/Energieaufwand
IHU	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formschlüssige Verbindung - Komplexe Formen herstellbar - für Serienfertigung geeignet - relativ kurze Prozesszeiten <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - hoher Energieaufwand für Druckerzeugung - je nach Form hohe Werkzeuggrundkosten
Falzen	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - einfaches Verfahren - preiswertes Verfahren - geeignet für Bleche mit Schutzbeschichtung gefalzt, wie z. B. Weißbleche, verzinkte, verbleite und kunststoffüberzogene Stahlbleche (Grund: Schutzschicht bleibt unbeschädigt) <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - bei einfachen Falzverbindungen liegt eine Undichtheit vor - nichtlösbare Verbindung - nicht alle Blechdicken falzbar (geeignet nur bis 1mm)
Clinchen	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formschlüssige und Kraftschlüssige Verbindung - Hohe statische Festigkeit - Verschieden Materealien und Blechstärken ffügbar - Keine Wärmebeeinflussung (vgl. Punktschweißen) - Keine Fügehilfsstoffe benötigt <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - bedingte Festigkeit (Materialabhängiges reißen)
Fügen durch Schweißen	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formschlüssige und Kraftschlüssige Verbindung - Hohe Festigkeit

	<ul style="list-style-type: none"> - Prinzipiell Kostengünstig einsetzbar <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wärmebeeinflussung der Fügstellen (Gefügeveränderungen) - Oft Nachbearbeitung der Oberfläche notwendig - Gefährdungen durch benötigte Zusatzstoffe (Schutzgase,..) - Teilweise hoher Energieeinsatz
Rührreib- und Reibschweißen	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formschlüssige und Kraftschlüssige Verbindung - Keine Zusatzstoffe notwendig - Geringe Werkzeug/Energiekosten - hohe erzielbare Nahtfestigkeiten - Mischverbindungen möglich <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - relativ hohe Prozesskräfte (Druck) je nach Legierung und Bauteildicke - eingeschränkte 3D-Fähigkeit
Laserschweißen ND:YAG	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Präzisionsschweißen sehr dünner Nähte möglich - Mittel Glasfasern sehr flexibel lenkbar <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - gefährlich für das Auge und die Haut - hohen Anlagenkosten
Laserschweißen CO2-Laser	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - geringer, konzentrierter Energieeintrag in das Werkstück - geringerer thermisch bedingter Verzug <p>Nachteil:</p> <ul style="list-style-type: none"> - im Vergleich kostengünstig
Laserschweißen Dioden-Laser	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - sehr kompakte Bauweise - vergleichsweise hoher elektrisch/optischer Wirkungsgrad von 25 bis über 50 % - lange Wartungsintervalle - Sehr hohe Lebensdauer (teilweise > 30.000 Stunden) <p>Nachteile:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> - schlechtere Strahlqualität (insbesondere bei hohen Leistungen) - bedingt geeignet zum Tiefschweißen von Metallen - hohe Kosten der Laserdioden
Widerstandspunkt-schweißen	<p>Vorteil:</p> <ul style="list-style-type: none"> - hervorragende Automatisierbarkeit - wichtigsten Fügeverfahren im Karosseriebau - Hohe Standards in der Qualitätssicherung - gute Automatisierbarkeit - Kombination mit dem Kleben <p>Nachteil:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einschränkungen bei Magnesiumlegierungen durch Leitfähigkeitseinschränkung.
WIG-Schweißen	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - kaum Spritzerbildung - es werden wenig Schadstoffe erzeugt - besonders geeignet zum Schweißen von Wurzellagen - verhältnismäßig geringen, kleinräumigen Wärmeeintrag <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - geringe Schweißleistung - Dickenbereich bis 4 mm
MSG-Schweißen	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mit Verwendung von Wechselstrom können sehr dünne Bleche geschweißt werden ohne das diese Durchbrennen - breites Anwendungsgebiet (sowohl niedriglegierter, als auch hochlegierter Stahl) - Automatisierbar <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zusatzmaterial ist notwendig - Verwendung von aktiven bzw inerten Schutzgasen
Löten	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - geringere Wärmeinbringung -> geringerer Verzug - es können unterschiedliche Werkstoffe verbunden werden - gute Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit der Verbindung

	<ul style="list-style-type: none"> - keine Veränderung der Festigkeit durch Alterung - automatisierbar - keine Veränderung der Grundwerkstoffe durch niedrigere Arbeitstemperatur <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - reduzierte Festigkeit der Lötstelle - zusätzlicher Arbeitsgang der Oberflächenvorbereitung - galvanische Korrosion durch unterschiedliche elektrochemische Potentiale der Verbindungspartner (besonders bei Aluminium) - Lote meist teure Werkstoffe - grundsätzlich ist eine Überlappung erforderlich
<p>Kleben</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fügeteile werden keinen hohen Temperaturen ausgesetzt - es können unterschiedliche Werkstoffe verbunden werden - Klebungen können gleichzeitig als Dichtung wirken - großflächige Verbindung dünner Teile - gleichmäßige Spannungsverteilung - keine Schwächung der Fügeteile - isolierend gegen Wärme und Elektrizität - oft kostengünstig - keine oder nur geringe Nacharbeiten - Klebeverbindungen können elastisch sein - Klebeverbindungen können Schwingungen dämpfen <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Klebung nicht so hitzebeständig - zusätzlicher Arbeitsgang der Oberflächenvorbereitung - Aushärtezeiten sind zu beachten - geringe Schlag- und Schälfestigkeit - Veränderung der Festigkeit durch Alterung - kaum zerstörungsfreie Prüfverfahren verfügbar - Neigung zum Kriechen - grundsätzlich ist eine Überlappung erforderlich

1.1.8.3 Untersuchung zu Zugänglichkeiten im Demonstrator

Fügestellen im Demonstrator:

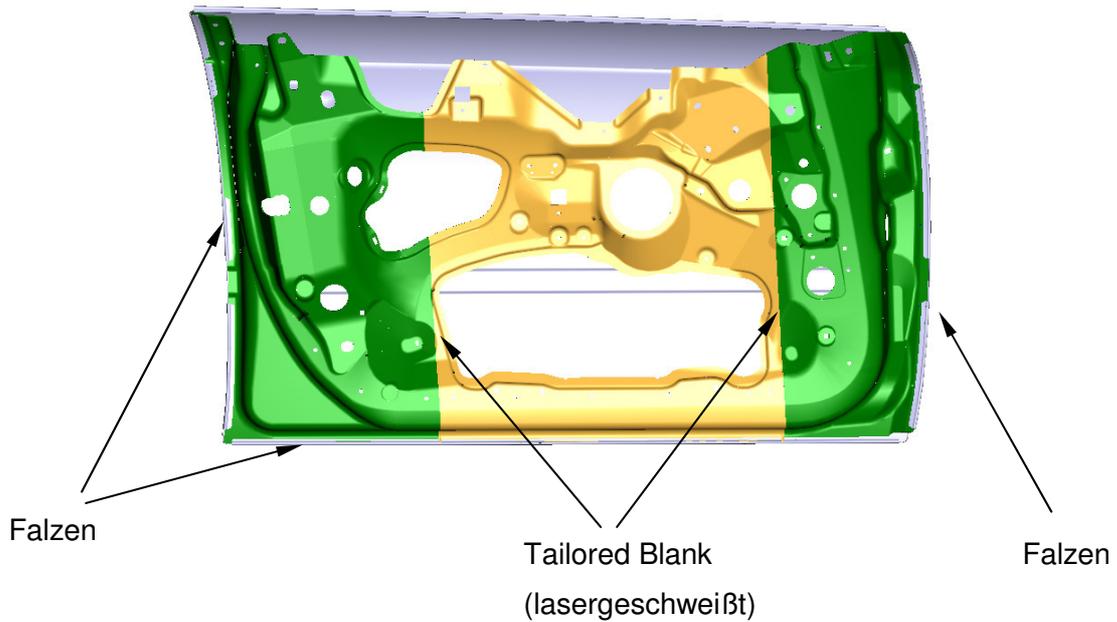


Bild 44. Fügestellen in der Innenschale und Falz mit dem Außenblech

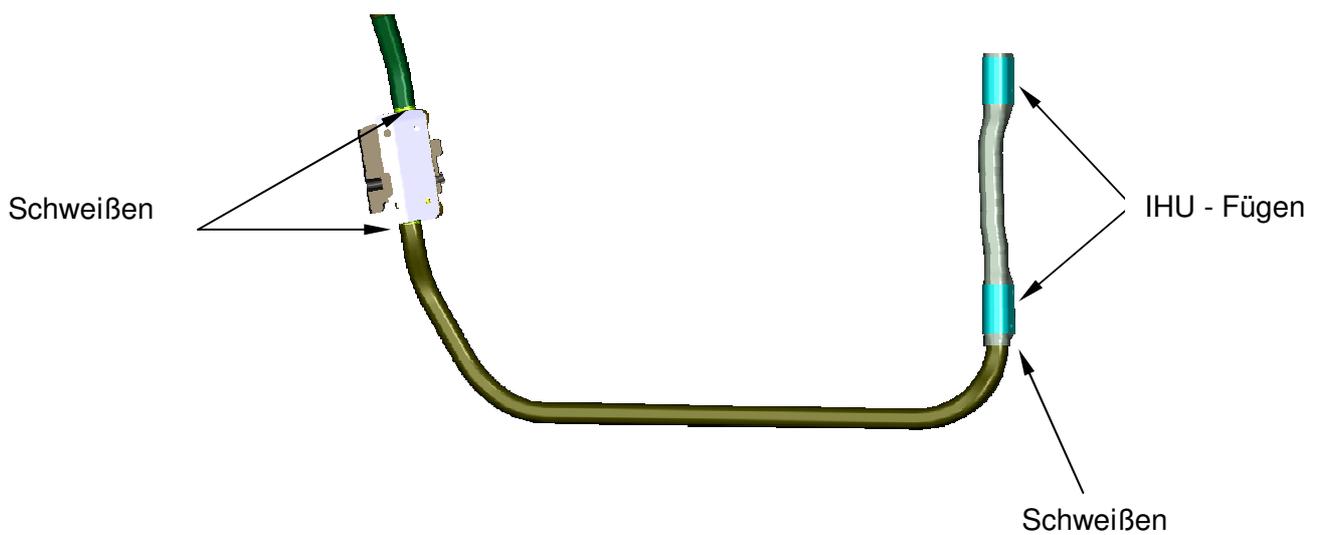


Bild 45. Fügestellen der Rahmen

Die Zugänglichkeit der Schweißnähte im Innenblech ist unproblematisch, da zur Herstellung ein Tailored (Welded) Blank verwendet wird. Dies bedeutet, dass ein vorgefertigtes Halbzeug, bestehend aus Magnesiumblechen mit 1,2 und 2,0 mm Blechstärke verschweißt und erst anschließend durch Tiefziehen zum gewünschten Bauteil umgeformt wird.

Der Rahmen wird als Einheit vormontiert. Die Einzeileile werden dazu miteinander verschweißt. Dieser Montageprozeß erfolgt separat und ist deshalb hinsichtlich der Montagezugänglichkeit unproblematisch.

Für die Befestigung des Rahmens am Türinnenblech wurde sich ebenfalls für das Schweißen entschieden. Die Zugänglichkeit stellt auch in diesen Bereichen keine hohen Anforderungen und konnte ohne zusätzlichen konstruktiven Aufwand realisiert werden.

Die Vervollständigung der Türbaugruppe wird durch die Montage des Türaußenbleches abgeschlossen. Die notwendigen geometrischen Materialzugaben für das dazu eingesetzte Falzen wurden in das Türaußenblech eingebracht. Die Umsetzung dieser Falzverbindung entsteht an den Außenseiten der Tür und bedarf keiner weiteren Zugänglichkeitsuntersuchung.

Durch die Übernahme der Befestigungsgeometrien für notwendige Einbauteile wie Fensterkurbel, Montage von Schalterblenden u.a. aus der vorhandenen Originaltür (siehe 1.1.1) ist deren Montage gewährleistet.

1.1.8.4 Technologische Bewertung im TeMaK-Demonstrator

Zusammensetzen	Ungeeignet da ohne Probleme wieder zerlegbar, d.h. eine Kraftaufnahme wie sie eine PKW-Tür erfordert ist nicht gegeben
Füllen	Eine für manche Bauteile (Rahmenanlageflächen am Innenteil) der Tür geeignetes Verfahren da eine Dämmende bzw. Isolierende und Dämpfende Wirkung erzielt werden kann.
An- und Einpressen	Ist für „Verschleißteile“ relevant d.h. Teile deren Austausch auch nach Einbau der Tür problemlos gewährleistet bleiben muss aber auch eine gewisse Festigkeit erfordern (Scharniere, Schloss, Einbauteile im Innenblech)
Fügen durch Urformen	Ungeeignet
Fügen durch Umformen	
IHU	Wird im IHU-Teil des Rahmens verwendet. Es werden die Käfige/Halter durch Umformen d.h. „aufblasen“ des IHU Ausgangsprofils auf dem IHU-Fertigteil gehalten
Falzen	In Verbindung mit eventuellem Kleben zur Verbindung des Innenteils mit der Außenhaut benutzt
Clinchen	Befestigung des Seitenaufprallschutzes
Rollclinchen	Einsatz im TeMaK Demonstrator zur Zeit nicht vorgesehen
Fügen durch Schweißen	
Rührreibschweißen Reibschweißen	Zur Herstellung der Tailored Blank Halbzeuge für das Innen- / Außenteil einsetzbar
Laserschweißen ND:YAG	Zur Verbindung der Teile des Tailored Blank Halbzeuges für das Innen- / Außenteil einsetzbar bzw. zur Verbindung der Rahmenteile untereinander
Laserschweißen CO2-Laser	Zur Verbindung der Teile des Tailored Blank Halbzeuges für das Innen- / Außenteil einsetzbar bzw. zur Verbindung der Rahmenteile untereinander
Laserschweißen Dioden-Laser	Zur Verbindung der Teile des Tailored Blank Halbzeuges für das Innen- / Außenteil einsetzbar bzw. zur Verbindung der Rahmenteile untereinander

Widerstandspunkt-schweißen	Einsatz im TeMaK Demonstrator zur Zeit nicht vorgesehen
WIG-Schweißen	Zur Verbindung der Teile des Tailored Blank Halbzeuges für das Innen- / Außenteil einsetzbar bzw. zur Verbindung der Rahmenteile untereinander
MSG-Schweißen	Zur Verbindung der Teile des Tailored Blank Halbzeuges für das Innen- / Außenteil einsetzbar bzw. zur Verbindung der Rahmenteile untereinander
Löten	Zur Verbindung der Rahmenteile untereinander denkbar aber z.Z. nicht vorgesehen
Kleben	z.Z. nicht vorgesehen

1.1.9 Erarbeitung der Konstruktionsrichtlinien

1.1.9.1 Einführung

Ziel des vom BMBF geförderten Verbundprojektes war es, die Nutzung von Magnesiumknetlegierungen als Leichtbauwerkstoffe im Automobilbau zu fördern. Dabei wurde die vollständige Prozesskette für die Herstellungstechnologien erarbeitet. Die Voith Engineering Services GmbH hat in diesem Projekt die Aufgabe der „Konstruktion“ sowie die Erarbeitung von allgemeingültigen Konstruktionsrichtlinien übernommen.

Die aus der Konstruktion und Herstellung der Bauteile gewonnenen Erkenntnisse wurden in allgemeingültigen Richtlinien für den Einsatz von Magnesium- Knetlegierungen zusammengefasst und als Konstruktionsrichtlinien manifestiert.

Es wurde eine Vorgehensweise entwickelt, angewendet und dokumentiert, die insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) der Blechumformung dabei unterstützen soll, die für die Fertigungsprozesse relevanten Kennzahlen zu identifizieren und einzusetzen. Anhand verschiedener Beispiele aus der Umformung von Magnesiumknetlegierungen wurde das praxisbezogene Arbeiten mit der Vorgehensweise und den zur Verfügung gestellten Kennzahlen umgesetzt und verifiziert.

1.1.9.2 Materialherstellungsbedingte Grundlagen für Konstruktionsrichtlinien

Bei der Herstellung aus gießgewalztem Vorband entsteht durch Weiterwalzen ein Blech oder Band mit erreichbarer Oberflächengüte A (O3) für Strukturteile. Ziel für 2010 ist, dass Verfahren so zu optimieren, dass Außenhauttaugliche Oberflächengüten (O5) erreicht werden.

Realisierbare Toleranzen liegen in der Länge und Breite bei +/- 1mm und bei der Dicke derzeit im Bereich von +/- 0,1mm [MGF01]

Die mechanischen Eigenschaften welche zur konstruktiven Bauteilauslegung notwendig sind [MGF08]:

- Streckgrenze mind. 170 MPa
- Zugfestigkeit mind. 240 MPa
- Bruchdehnung mind. 17 %

Derzeitige Lieferformen (in mm):

Band 0,5 – 3,0 bis 650 als Coil

Band 1,2 – 3,0 bis 600 als Coil

Tafel 0,5 – 1,1 bis 180 bis 900

Tafel 1,2 – 5,0 bis 600 beliebig

Die Legierung AZ31 nach ASTM-Norm (MgF DDQ 150) ist nach Angaben von „MgF-Magnesium Flachprodukte“ nach allen gängigen Verfahren schweißbar. Einfache Geometrien lassen sich bei Raumtemperatur umformen. Die Umformung komplexer Bauteile muss bei erhöhten Temperaturen im Bereich von 225 °C – 400°C erfolgen. Die Legierung ist schneidbar und mechanisch verarbeitbar [MGF01], [MGF08].

1.1.9.3 Konstruktionsrichtlinien für die Schweißverfahren

Die Magnesiumlegierung AZ31 nach ASTM hergestellt, ist unter Beachtung von Sicherheitsvorkehrungen mit allen gängigen Verfahren schweißbar [MGF01], [WSDB].

a) konstruktiv wichtige Punkte beim Laserschweißen:

Spaltmaße bei I-Naht im Dünnblechbereich entsprechen bei Laser mit Zusatzdraht = $0,2 \times$ Blechstärke. Wird ohne Zusatz geschweißt muss der Schweißspalt = $0,05 \times$ Blechstärke betragen.

I-Naht ca. 10% Festigkeitsverlust der Dehngrenze im Vergleich zu Grundmaterial.

Als Angabe für die Nahtvorbereitung muss das Kantenschleifen vermerkt werden

b) konstruktiv wichtige Punkte beim WIG

Überlappnaht ca. 10% Festigkeitsverlust der Dehngrenze im Vergleich zu Grundmaterial

I-Naht ca. 10-20% Festigkeitsverlust der Dehngrenze im Vergleich zu Grundmaterial

Angabe für die Nahtvorbereitung: Nahtkante an der Wurzelseite brechen

c) konstruktiv wichtige Punkte beim MIG

Überlappnaht ca. 15% Festigkeitsverlust der Dehngrenze im Vergleich zu Grundmaterial

I-Naht ca. 10-20% Festigkeitsverlust der Dehngrenze im Vergleich zu Grundmaterial

Möglichkeit der starren Einspannung vorsehen da starker Verzug

Schweißnahtzugang so gestalten das bei dünnen Blechen ($\leq 1,5\text{mm}$) zuerst eine Schweißbadsicherung realisiert werden kann.

Quelle: [STZ09]

1.1.9.4 Konstruktionsrichtlinien für das Fügeverfahren Falzen

Quelle zum Kapitel: [FALZ09]

$r_i \text{ min}$ - minimaler innerer Biegeradius

s_0 - Ausgangsblechdicke

Falzfaktor $f = r_i \text{ min} / s_0$

Blech: MgAl_3Zn_1 , $s_0 = 1,25 \text{ mm}$

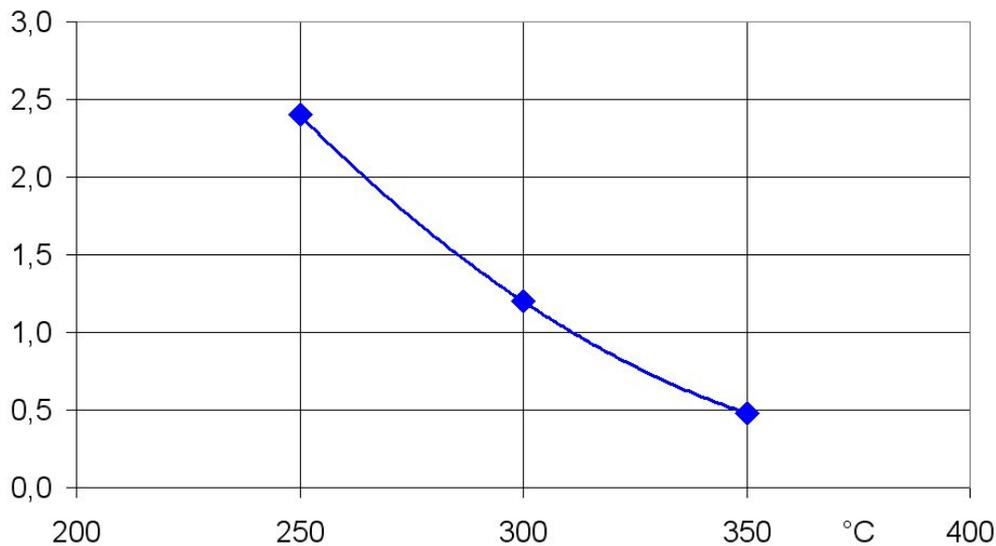


Bild 46. Abhängigkeit des Falzfaktors von der Umformtemperatur

Je höher die Umformtemperatur, desto kleiner der Falzfaktor. Das bedeutet, dass mit steigender Temperatur kleinere Biegeradien realisierbar sind.

Bei der Konstruktion von Falzverbindungen bei Bauteilen aus Magnesiumknetlegierung ist die Hohlfalzgeometrie zu bevorzugen, da sie gegenüber dem Einfachfalz einen größeren Biegeradius und somit auch bei kritischen Blechmaterialien und dünnen Blechen eine hochwertige Falzverbindung hergestellt werden kann.

Bei der konstruktiven Auslegung eines Hohlfalzes ist zu beachten, dass der Abkantradius entsprechend größer zu wählen ist als der innere Biegeradius, da beim Vor- und Fertigfalzen ein Einrolleffekt stattfindet.

Eckbereiche mit einem Radius kleiner 15mm sind freizuschneiden, d.h. der Falzflansch wird in

Eckbereichen komplett weggeschnitten so dass nur die meist schon in den Tiefziehvorgang integrierte Abkantung bestehen bleibt.

Im Bereich von Zierleisten, Schweißnähten, Blechdickenübergängen (z. B. an Tailored Blanks) ist der Falzflansch auszusparen. Weiterhin ist der Falzflansch in Bereichen mit starker Krümmung der Falzkante zur Verringerung der tangentialen Druckspannungen und damit der Faltenbildung im Flansch in bestimmten Abständen (nach Erprobung am Demonstrator-Falzwerkzeug) V-förmig freizuschneiden.

Bei der Konstruktion der Falzwerkzeuge ist zu beachten, dass der Falzprozess die drei Prozessschritte Abkanten, Vorfalzen und Fertigfalzen umfasst und die Umformtemperatur für das Falzen der eingesetzten Magnesiumknetlegierungen der MgF GmbH Freiberg (Charge 1 und 2) eine Prozesstemperatur von **350 °C** benötigt.

Zum Falzen der Bleche muss die Werkzeugkonstruktion von folgenden notwendigen Umformkräften ausgehen.

Die zum **Abkanten** benötigten Kräfte sind wie folgt anzusetzen:

Abkantkraft: $F_{\text{Abkanten}} \approx K \cdot R_m \cdot s_0 \cdot b$

K = temperaturabhängiger Korrekturwert

($K_{250\text{ °C}} = 0,21$; $K_{300\text{ °C}} = 0,28$; $K_{350\text{ °C}} = 0,35$);

R_m = Zugfestigkeit bei der entsprechenden Umformtemperatur;

s_0 = Ausgangsblechdicke

b = Länge der Biegekante

Vorfalzen: $F_{\text{Vorfalzen}} \approx 0,33 \cdot F_{\text{Abkanten}}$

Fertigfalzen: $F_{\text{Fertigfalzen}} \approx 3,0 \cdot F_{\text{Abkanten}}$

1.1.9.4.1 Werkzeuggestaltung

Gestaltung der Aktivteile für den Hohlfalz (bezogen auf die Hohlfalzgeometrien aus Punkt 1)

Abkanten:

Das Abkanten ist meist in die Ziehoperation mit integriert. Der Abkantradius ist größer

auszulegen als der innere Biegeradius an der Endgeometrie des Hohlfalzes, da durch die einzelnen Falzstufen ein Einrolleffekt entsteht (siehe Punkt 1).

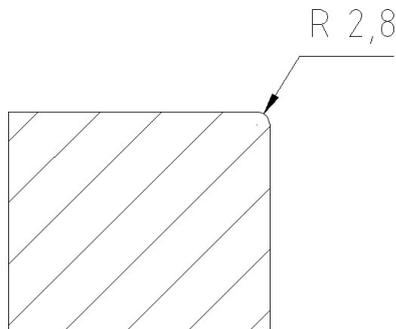


Bild 47. Querschnitt der Abkantbacke

Vorfalzen:

Die Vorfalzbacke Bild 48 besitzt einen Kantenradius R5 und eine Schräge von 6°, die die Rückfederung des abgekanteten Falzflansches kompensieren und den Falzflansch in die entsprechende Position drücken. Weiterhin enthält die Vorfalzbacke einen Einlaufradius R7, der den Falzflansch entsprechend umformt.

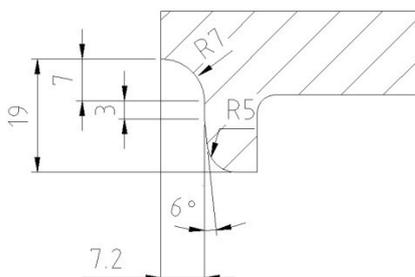


Bild 48. Querschnitt der Vorfalzbacke

Fertigfalzen:

Die Geometrien der Fertigfalzbacken unterscheiden sich bezüglich des eingesetzten Innenbleches (Bild 49). Die Fertigfalzbacken für die Grundlagenuntersuchungen wurden aus fertigungstechnischen Gründen zweiteilig ausgeführt. Sie enthalten neben einem

Kantenradius R3 eine Schräge von 2°, die den Biegeradius nach außen abstützt.

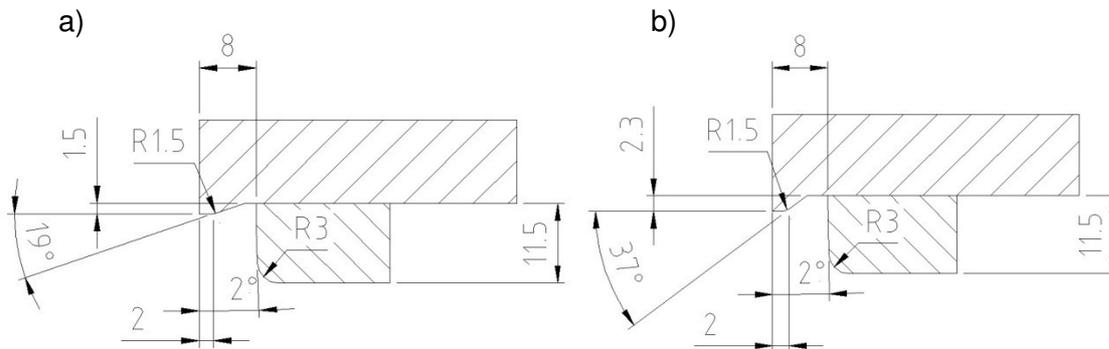


Bild 49. Querschnitt der Fertigfalzbacke (jeweils zweiteilig)

a) für Innenblechdicke $s_0 = 2,0$ mm / b) für Innenblechdicke $s_0 = 1,2$ mm

Beheizungstechniken:

- Widerstandsbeheizung mit Rohrheizkörpern (Bild 50)
 - indirekte Erwärmung der Umformzone am Blechteil über die Beheizung der Aktivteile mit flexiblen Rohrheizkörpern der Fa. Hotset GmbH (Lüdenscheid)
 - hoher Energiebedarf
 - lange Erwärmungszeiten
 - keine Serientaktung
 - Erprobung am Grundlagenwerkzeug

- Induktive Beheizung
 - direkte Erwärmung der Umformzone am Blechteil
 - geringerer Energiebedarf
 - kurze Erwärmungszeiten
 - Annäherung an Serientaktung
 - Erprobung am Demonstrator-Falzwerkzeug
 - Fertigung der Anlage durch die EMA-TEC GmbH (Sondershausen)

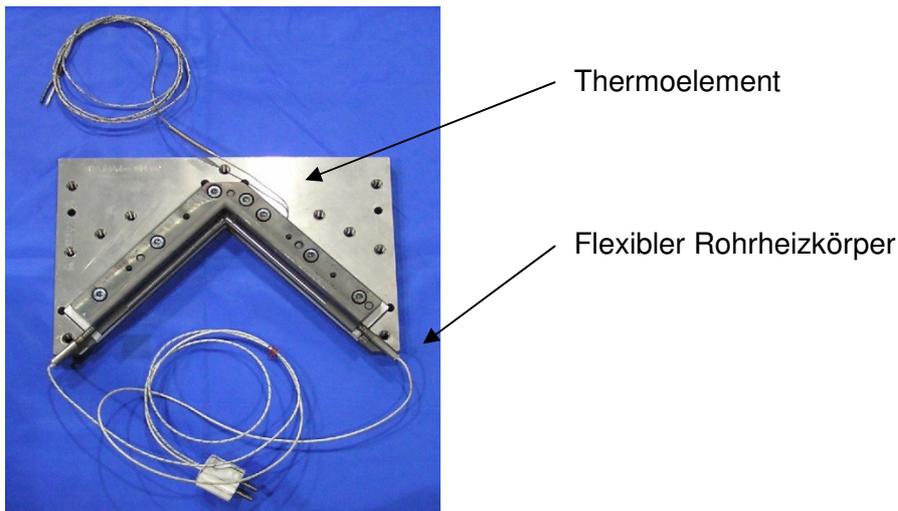


Bild 50. Grundlagenwerkzeug – Halteplatte mit beheizbarer Vorfalzbacke

Wärmeisolierung im Werkzeug:

- Grundlagenwerkzeug:

Im Grundlagenwerkzeug werden die Falzproben indirekt über die beheizten Aktivteile erwärmt. Um den Wärmeübergang in das Werkzeug zu minimieren, wurden die Aktivteile durch Dämmplatten thermisch isoliert (Bild 51). Dafür wurde das Dämmmaterial NOVALUX-AL4 der Novamat GmbH (Mettmann) genutzt, das eine Druckfestigkeit von 15 N/ mm² aufweist. Das Material steht in verschiedenen Standarddicken (z. B. 12,7 mm) zur Verfügung.

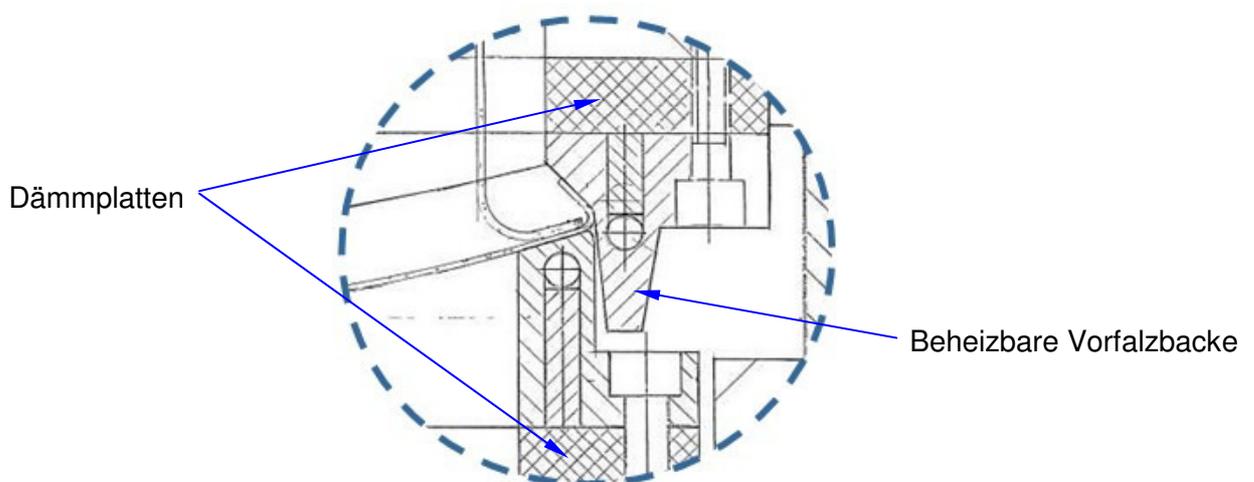


Bild 51. Beheizbare Aktivteile für das Vorfalzen (Ausschnitt)

- Demonstrator-Falzwerkzeug:

Im Demonstrator-Falzwerkzeug wird durch die induktive Beheizung die Umformzone am Blechteil direkt erwärmt. Da die Erwärmungszeiten gegenüber der Widerstandserwärmung relativ kurz sind und zur Vereinfachung des Werkzeugaufbaus wird am Demonstrator-Falzwerkzeug auf eine Wärmedämmung verzichtet.

1.1.9.4.2 Qualitätskennzeichen der Falzkante/ Oberflächengüte

Qualitätskennzeichen der Falzkante:

- keine Versagenskriterien (Bruch, Riss, Einschnürung)
- Faltenfreiheit
- keine Abdrücke durch Werkzeugaktivteile auf der Blechoberfläche
- keine Orangenhautbildung auf der Blechoberfläche
- Rauheitswerte der Blechoberfläche $R_a \leq 1,6 \mu\text{m}$

Oberflächengüte:

- geforderte Rauheitswerte
- Außenhautteile (lackiert) $R_a = 1,1 \dots 1,6 \mu\text{m}$
- Innenteile (lackiert) $R_a = 1,1 \dots 1,7 \mu\text{m}$

(Quelle: Hr. Schmidt (Innovent e. V.), Dr. Ullrich (KWD GmbH))

erreichte Rauheitswerte:

(Bedingungen: Hohlfalzgeometrie aus Punkt 1; Blech MgAl3Zn1 von der MgF GmbH mit einer Ausgangsrauheit von $R_a = 1,2 \mu\text{m}$, Umformtemperatur = 350°C)

- $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ (bei Einsatz von Blechmaterial ohne Vorreckung)
- $R_a = 2,1 \mu\text{m}$ (bei Einsatz von Blechmaterial mit 4 % Vorreckung)

1.1.9.4.3 Probleme beim Falzen von Magnesiumknetlegierungen

Falzklebstoff:

Aufgrund der Umformtemperaturen (350°C) und der zweimaligen Erwärmung der Umformzone (Vor- und Fertigfalzen) werden an den Falzklebstoff besondere thermische Anforderungen gestellt. Es muss eingeschätzt werden, dass zurzeit kein Klebstoff zur Verfügung steht, der industriell eingesetzt werden kann und den Ansprüchen genügt. Derzeitig werden mit der Fa. Kleb- und Gießharztechnik Dr. Ludeck (Vogelsdorf) Versuche durchgeführt, die die Entwicklung eines geeigneten Klebstoffsystems zum Ziel haben.

Rauheit der Ausgangsbleche:

Eine Verbesserung der Rauheit der Ausgangsbleche (auch bezüglich Außenhautqualität) ist anzustreben.

1.1.9.5 Konstruktionsrichtlinien für das Innenhochdruckumformen (IHU)

Die Prozessauslegung erfolgte auf Basis isothermer Simulationen, wobei bei der Umsetzung im Werkzeug, die zu erwärmenden Bereiche größer als die umzuformenden gewählt werden müssen. Die kritischen Umformbereiche lassen sich mit ausreichender Genauigkeit vorhersagen.

Auf die Integration von Außeninduktoren wurde vorerst verzichtet. Die einsetzbaren Vergussmassen weisen, sofern sie eine ausreichende Temperaturbeständigkeit besitzen, einen zu niedrigen Elastizitätsmodul auf. Bei entsprechender Druckbelastung geben sie zu viel nach. Des Weiteren nachteilig ist die Tatsache, dass bei der Erwärmung von außen der Käfig deutlich stärker erwärmt wird und die umzuformende Zone nur bedingt die erforderliche Wärme erhält.

Der Einsatz des Inneninduktors war erfolgreich. Bei der Auslegung ist zu beachten, dass die Erwärmungszone größer gestaltet wird, als der gewünschte Umformbereich und das durch das Dichten und Nachschieben des Halbzeuges die Erwärmungszone ebenfalls verschoben wird. Weiterhin sollte auf ausreichend Spiel zwischen Innenkontur des Bauteils und Außenkontur des Induktors geachtet werden. Eine Führung der Induktorspitze sowie eine Isolation zwischen Induktor und Bauteil sind zu empfehlen. Als Vorteil des Inneninduktors erwies sich die direkte Erwärmung des umzuformenden Bauteils ohne dass der zu fügende Käfig überhitzt wird.

Bei der Integration der magnetischen Erwärmung ist auf eine ausreichende Isolation zwischen Bauteil und Werkzeug bzw. magnetsicher Einheit zu achten.

Des Weiteren ist bei der Gestaltung der Gravur im Bereich der Erwärmung die thermische Ausdehnung der Bauteile durch ein entsprechendes Offset zu berücksichtigen.

Für einen Serieneinsatz sollten nicht verschiedene Erwärmungsstrategien in einem Werkzeug integriert werden. Das unterschiedliche Erwärmungsvermögen und -verhalten führt zu komplexen Abhängigkeiten in der Prozessführung.

Als konstruktive Vorgaben für die geometrische Gestaltung der IHU-Teile können bei Anwendung der oben beschriebenen Technologie die folgenden Richtwerte herangezogen werden:

- Eckradius min. 3* Wanddicke Ausgangsmaterial
- Umfangsdehnung max. 10 %
- Hinterschneidungen bei Verwendung einer zweiteiligen IHU-Form möglich
- keine Hinterschneidungen im Bauteilprofil je Werkzeughälfte (Entformung)
- Rohr-Biegeradien für „Rohteil“ min. 1,5* Rohrausgangsdurchmesser bzw. Durchmesser des Profilmaterials
- Konstruktionsansatz sind konstante Wandstärken
- Winkel der Längsrichtung an Bauteilenden nicht $< 90^\circ$

Für weiterführende Arbeiten sind die folgenden allgemeingültigen Aussagen zu beachten:

- Gegenüber der gewählten Ankonstruktion könnte durch Verdrehen und Verschieben der Nachschiebebereiche die maximal Dehnung um ca. 5% reduziert werden. Dies wurde simulativ ermittelt und nicht im Projekt umgesetzt.
- Gegenüber isotherm geführten Prozessen erreicht man bei lokal temperierten Umformprozessen kleiner erreichbare Umformgrade. Je nach geometrischen Verhältnissen sind Verringerungen um 25 - 40 % zu berücksichtigen. Wesentlicher Grund hierfür ist die Ableitung der Wärme in umliegende Bereiche und von da an Abkühlung durch das Werkzeug. Eine Überhöhung der Temperatur um mehr Wärme in den Bereich einzuleiten ist nicht zielführend, da das Material in diesem Bereich zu weich, teigig, wird und damit keine Beanspruchung aushält und lokal extrem ausdünn, was zum versagen durch Riss führt. Zielführender wäre (Konjunktiv, da nicht im Projekt umgesetzt) eine thermische Isolation im Umformbereich und angrenzenden Zonen.
- Hinsichtlich der geometrischen Gestaltung ist zu erwähnen, das sich prinzipiell ähnliche geometrische Aspekte und Radienverhältnisse realisieren lassen, wie bei isotherm geführten Prozessen. Je größer der Umformweg (Abstand Endkontur zur Halbzeugkontur) ist, desto größer müssen die Radien gewählt werden und desto geringer ist die Dehngrenze, aufgrund der erwähnten Abkühlung.

1.1.9.6 Konstruktionsrichtlinien Tiefziehen

- Mindestbiegeradien nach „Minimale Biegeradien für Magnesiumbleche (Tabelle 1)
- Restspannung und Rückfederung berücksichtigen
- symmetrische Teile anstreben
- ebene Bodenprofile anstreben
- konvexe Mantelpartien anstreben
- H/d möglichst klein halten, d.h. Umformstufen reduzieren
- ausgerundete Ecken gestalten
- Rissbildung beim Falzen durch Hohlfalz vermeiden
- Falz: Biegelinie quer zur Walzrichtung

Tabelle 3. Minimale Biegeradien für Magnesiumbleche [BAUC93], [TAYL69]

Temperatur [°C]	Minimaler Biegeradius als Vielfaches der Ausgangsblechdicke [mm]						
	AZ31B-O	Az31B-H24	ZE10A-O	ZE10A-H24	HK31A-O	HK31A-H24	HM21A-T8
21	5,5	8,0	5,5	8,0	6,0	13,0	9,0
149	4,0	6,0	4,0	6,0	6,0	13,0	9,0
204	3,0	3,0	3,0	-	5,0	9,0	9,0
260	2,0	2,0	2,0	-	4,0	8,0	9,0
316	-	-	-	-	3,0	5,0	8,0
371	-	-	-	-	2,0	3,0	6,0

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass beim Tiefziehen unterhalb der für Magnesiumlegierungen charakteristischen Temperatur von $T = 225 \text{ °C}$ mit dem Versagen in den umgeformten Bereichen (Flansch, Radien) zu rechnen ist, während bei hohen Umformtemperaturen der kraftübertragende Bereich (Zarge) kritisch ist.

1.1.9.7 Konstruktionsrichtlinien Fließpressen

Grundvoraussetzung für das Fließpressen von Magnesiumknetlegierungen ist eine gleichmäßige Erwärmung von Matrize und Stempel. Die Mindesttemperatur des Werkzeugs sollte 250°C, die der Butze 225°C betragen. Grundlegend gilt: je wärmer Werkzeug und Butze, desto besser ist das Fließverhalten. Die obere Temperaturgrenze wird durch die Hitzebeständigkeit des Schmiermittels bestimmt.

Die Ausformschrägen sollten als Koniken von mindestens 0,5° ausgeführt werden. Für die sonstigen Matrizegeometrien haben sich die beim Fließpressen von Aluminium-Knetlegierungen verwendeten Konturen bewährt.

Bei den durchgeführten Fließpressversuchen wurden Wandstärken mit ~ 0,4 mm erzielt. Die Mindestradien sind in Abhängigkeit zur Wandstärke zu wählen. Durch die Verwendung kleinerer Radien lassen sich Wandschwankungen minimieren. Als Alternative zu Radien können auch Fließschrägen verwendet werden.

Die Maßhaltigkeit der Bauteile steht in Abhängigkeit zu vielen Faktoren, die auf den Fließprozess einwirken. Dazu zählen vorwiegend der Temperaturverlauf in den Werkzeugaktivteilen, die Temperatur der Butzen und die Isotropieeigenschaften des Werkstoffs. Das Schwindmaß der Magnesiumknetlegierung bei Abkühlung auf Raumtemperatur beträgt rund 5%.

Die Oberflächenqualität beim Fließpressen von Magnesiumknetlegierungen ist ähnlich oder schlechter als bei vergleichbaren Aluminiumlegierungen. Besonderen Einfluss hat das eingesetzte Schmiermittel. In den Versuchen wurden folgende Schmiermittel verwendet und auf deren Eignung geprüft:

- Zylinderöl Addinol Z1000
- Lubritech Kolligen W115
- Lubritech Kolligen CF Paste A
- Lubritech CTP PM-5
- Raziol Drylub Wa 03T

1.1.9.8 Konstruktionsrichtlinien Freiformbiegen

Beim Profilbiegen auf der HexaBend-Biegemaschine wurde die Bauteilerwärmung über einen Außeninduktor im Durchlauf realisiert. Bei der Gestaltung der Spule ist besonders auf die Abstände zum Bauteil zu achten, da diese sich beim Biegen ändern aber das Erwärmungsverhalten entscheidend beeinflussen. Beim Vergleich der Biegungen von kalten und erwärmten Profilen konnte ein deutlicher Unterschied festgestellt werden. Die geringeren Biegewinkel und größeren Biegeradien der kalt gebogenen Profile sind auf das elastische Rücksprungverhalten zurückzuführen. Technologisch bedingt lassen sich beim Freiformbiegen keine engen Biegeradien realisieren, was bei der Bauteilgestaltung zu berücksichtigen ist.

Beim Freiformbiegen wurde der Vergleich zwischen kalt und warm geführten Prozess durchgeführt. Durch die erhöhten Umformtemperaturen reduziert sich der Rücksprung deutlich, insbesondere bei Biegeverhältnissen größer $10 \times D$ (10-facher Umfangsdurchmesser).

Beim angewandten Freiform-Druckbiegen treten Übergangsbereiche zwischen den Segmenten mit konstanten Biegeradien auf. Dies ist aber verfahrenstypisch und tritt unabhängig von der Prozessführung (kalt oder warm) und vom Material auf. Die Länge der Übergangszone ist jedoch von Material, Temperatur, Biegeradius und Biegewinkel abhängig. Hierfür gibt es noch keine allgemeinen Richtlinien (weder für die kalte Prozessführung, noch für andere Materialien). Wesentliche Einflussmöglichkeit, die Größe der Übergangszonen zu beeinflussen, ist die Gestaltung der An- und Abfahrzyklen, die Gegenstand kommender Untersuchungen sein wird.

Ergebnis:

Durch temperierte Umformung können die Bauteile so gestaltet werden, wie Bauteile aus weichen Aluminiumlegierungen.

1.1.9.9 Konstruktionsrichtlinien zum Korrosionsschutz

Quelle für den Absatz: [BENS09], [KORR01]

Bei der Konstruktion von Bauteilen und Baugruppen aus Magnesiumlegierungen besonders jene welche Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, ist folgendes zu beachten.

Bei der Herstellung der Legierung (in unserem Anwendungsfall AZ31/ MgF DDQ 150 von MgF) ist besonders darauf zu achten, dass bei der Herstellung der Bleche mittels Gießwalzverfahren der Eintrag von korrosionsfördernden Fremdmetallen (Cu, Fe, Ni,..) auf der Oberfläche vermieden wird.

Es sollte Spaltwirkung (Spaltkorrosion) vermieden werden, d.h. bei Verbindungen sollten Materialüberlappungen vermieden werden. Mgl. Lösung ist das verwenden von Stumpfstößen an Schweißnahtstellen.

Wenn Spalte technologisch wie beim Schrauben, Nieten, Clinchen, Falzen und anderen Überlapstößen nicht vermieden werden können, müssen diese zusätzlich versiegelt werden. Die direkte Paarung ohne Schutz durch Beschichtungen etc. von Magnesiumbauteilen mit anderen Werkstoffen muss vermieden werden, da Magnesium als das unedelste Gebrauchsmetall bei Kontakt mit einem elektrochemisch edleren Werkstoff und zusätzlicher Elektrolytbenetzung (alle Flüssigkeiten, die Ionen enthalten) den anfälligsten Werkstoff überhaupt für Kontaktkorrosion darstellt (wird zur „Opferanode“).

Aus diesem Grund dürfen Magnesiumbauteile im Automobilbau ohne Schutz (Beschichtung) der Kathode oder anderen konstruktiven Maßnahmen zum wirkungsvollen Korrosionsschutz nicht verwendet werden!

Konstruktiv sollte die Schädigung von Magnesiumbauteilen durch gezielten Einsatz geeigneter Maßnahmen verhindert werden. Grundlegend sollte versucht werden, den Zugang und/oder die Ansammlung von Elektrolyten jeglicher Art zu verhindern oder die Werkstoffpaarung durch nichtmetallische Werkstoffe elektrisch zu isolieren. Bei der Verwendung nicht materialgleicher Verbindungselemente sollten als Schutzmaßnahme Trennteile verwendet werden welche zu Magnesium galvanisch verträglich sind.

Beispiele für Schraub und Nietverbindungen:

- Hartanodierte Aluminium-Unterlegscheiben verwenden
- Kunststoffunterlegscheiben verwenden
- Verwendung von stückverzinkten (feuerverzinkten) Zwischen- bzw. Trennblechen
- Einsatz von z.B. mit Polyamid beschichteten Schrauben und Nieten

Sollen Magnesiumbauteile im Sichtbereich verbaut werden, ist eine vollständige Beschichtung der Oberfläche zum wirksamen Korrosionsschutz notwendig.

Je nach zu verwendetem Beschichtungsverfahren müssen konstruktive Maßnahmen getroffen werden.

Bei Tauchbeschichtungen muss die Tauchfähigkeit berücksichtigt werden, was bedeutet, dass die Bauteile nicht schöpfend geformt sein dürfen bzw. geeignete Auslaufmöglichkeiten und Belüftungslöcher vorgesehen werden müssen.

Bei Lackbearbeitung müssen entsprechende Halte- und Aufnahmepunkte für Lackiergestelle usw. vorgesehen werden.

Gut geeignet als Basisschicht zum Korrosionsschutz mit organischen Schutzsystemen für dekorlackierte Bauteile ist zum Beispiel eine Chromatisierung mit anschließender kathodischer Tauchlackierung und einbrennen einer Pulverbeschichtung

Anorganische Schutzmöglichkeiten sind z.Bsp. HAE-Verfahren, Magoxid-Coat-Verfahren und Anomag-Verfahren, Galvanisierung.

1.2 Erarbeiten von Berechnungsgrundlagen

1.2.1 Aufgabenstellung

Der im Rahmen des Projektes entwickelte Fahrzeugtürdemonstrator soll auf seine zulässige statische Belastung untersucht werden. Dazu wurde dieser mit drei unterschiedlichen Lastfällen definiert und auf seine Durchbiegung bzw. seine zulässige Spannung nach von Mises ausgewertet. Ziel dabei war es, den Werkstoff Magnesium aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht sinnvoll einzusetzen.

Um dies realitätsnah umzusetzen, wurde ein Seitenaufprallschutz als versteifendes Sicherheitsbauteil und Scharniere zur Karosseriebefestigung aus Aluminium verwendet, welche jedoch in der Auswertung nicht näher betrachtet werden sollen.

1.2.2 Herstellung von Magnesiumbauteilen und deren Verbindung

Mit einer Nachfrage von einem Prozent des gesamten Primärmagnesiums ist der Markt der Magnesiumknetlegierung für die Umformtechnik ein sehr kleiner und wird von Nordamerika beherrscht. [Doege01]

Zur Herstellung von Bauteilen aus Magnesiumlegierungen sind als Fertigungsverfahren neben den gießtechnischen Verfahren die spanende Fertigung, die Umformung sowie die Pulvermetallurgie zu nennen.

Ein mögliches Verfahren für eine kostengünstige Fertigung von Blechformteilen geringer Gesamtstückzahlen ist das hydraulische/pneumatische Tiefen bei erhöhten Umformtemperaturen.

Anwendung finden diese Bauteile aus Magnesiumblechen insbesondere dort, wo sie eine hohe Anforderung bezüglich Biege- und Beulsteifigkeit erfüllen müssen, wie dies in Türen, Motor- und Kofferraumhauben der Fall ist.

1.2.2.1 Umformen von Magnesium

Umformtechnisch hergestellte Magnesiumbauteile zeichnen sich gegenüber gegossenen Werkstücken durch eine geringe innere und äußere Kerbwirkung aus, da durch den

Knetvorgang während der Werkstoffverformung ein Verschweißen von Fehlstellen und eine Beseitigung der Gussstruktur im Werkstück erfolgt. Außerdem lässt sich dadurch ein belastungsoptimierter Faserverlauf durch die Umformung einstellen. Neben den besseren mechanischen Eigenschaften, wie in Bild 52 zu sehen, wirken sich diese Vorteile bei dynamischer Beanspruchung positiv auf die Dauerschwingfestigkeit des Werkstücks aus /Janssen02/.

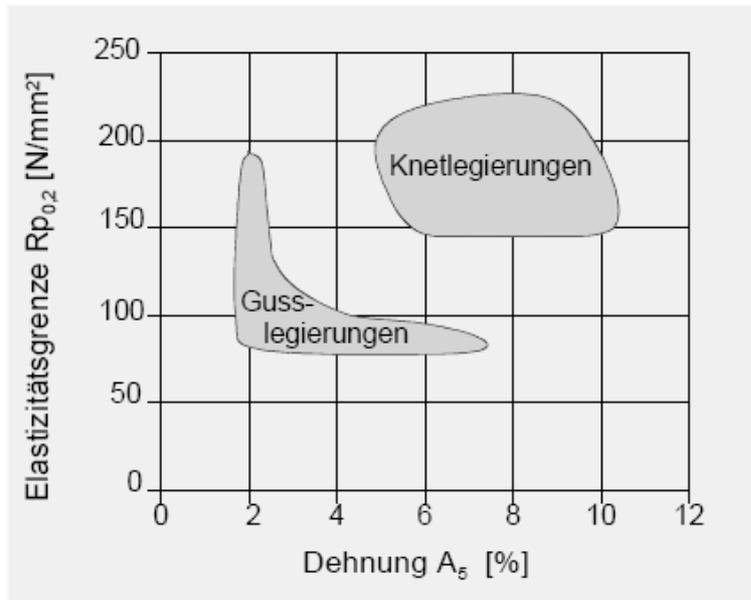


Bild 52. Vergleich mechanischer Kennwerte von Magnesiumknet- und Gusslegierungen

Durch unzureichende Kenntnis über geeignete Prozessparameter und fehlendes bzw. verloren gegangenes verfahrenstechnisches und werkstoffkundliches Grundwissen über den Werkstoff Magnesium wird heute jedoch ein breiter Einsatz von Magnesiumlegierungen in der Massivumformung beschränkt. In den westlichen Industrienationen wird z.B. nur durch die Firma Otto Fuchs Magnesium industriell geschmiedet. Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen und der geforderten Gewichtsreduzierungen ergibt sich im Bereich des Fahrzeugbaus ein großes Anwendungspotential für umformtechnisch hergestellte Bauteile aus Magnesium.

Eine wesentliche Einflussgröße bei der Umformung von Magnesiumlegierungen ist die Umformtemperatur. Da dieser Werkstoff eine hexagonale Gitterstruktur besitzt weist er bei Raumtemperatur nur ein geringes Verformungsvermögen auf. Dagegen besitzt Magnesium im Temperaturbereich über $T = 225 \text{ °C}$ eine sehr hohe Formänderungsfähigkeit.

Da Magnesiumlegierungen einen großen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufweisen, ist, um Maßungenauigkeiten bei der Abkühlung der umgeformten Teile zu vermeiden, die thermische Dehnung bei der Auslegung der Werkzeuggeometrie zu berücksichtigen.

Magnesiumbleche zeigen gegenüber den konkurrierenden Magnesiumdruckgussteilen die folgenden Vorteile:

- Ausgeglichenere mechanische Eigenschaften bei höheren Festigkeitswerten,
- Höhere Zähigkeit und damit bessere Energieabsorption im Crashfall,
- Konstante Materialeigenschaften über dem gesamten Bauteil, was zu einer verbesserten Bauteilsimulation und –konstruktion führt,
- Großflächige Teile mit Dicken kleiner 1,5 mm,
- Bessere Oberflächenqualitäten

Die Blechherstellung kann, unabhängig vom Gusszustand, im Temperaturbereich der Warm- bzw. der Halbwarmumformung erfolgen. Ein Kaltwalzen von Magnesium ist nur bedingt möglich und darüber hinaus unwirtschaftlich. [Kawalla03]

Untersuchungen nach [Siegert04] haben gezeigt, dass sich für Umformtemperaturen von 400 °C bzw. 425 °C Magnesiumbauteile aus AZ31 pneumatisch tiefen lassen.

Beim Streckziehen von Magnesiumblechen sollten die Temperaturen im Bereich zwischen $T = 165 \text{ °C}$ und $T = 290 \text{ °C}$ liegen und mit geringer Geschwindigkeit gearbeitet werden. Zur Kennzeichnung der Streckzieheigenschaften wird der Streckziehgrad

$$P = \frac{L - S}{S} \cdot 100\%$$

mit: L = Länge der Blechabwicklung nach dem Strecken

S = Länge der Blechabwicklung vor dem Strecken

herangezogen.

Für Magnesiumblech wird ein maximaler Streckziehgrad von $P_{\max} \approx 15 \%$ angegeben. Beim temperierten Streckziehen reicht aufgrund der geringen Rückfederung ein „Überstrecken“ um ca. 1 % aus, um die Sollgeometrie zu erreichen.

Aus den Verläufen der Dehnung sowie der Zugfestigkeit über der Temperatur wird die optimale Temperatur zum Streckziehen von Magnesiumblechen abgeleitet. Im Temperaturbereich zwischen $T = 150 \text{ °C}$ und $T = 225 \text{ °C}$ weist die Legierung AZ31B-O nur eine sehr geringe Zunahme der Dehnung auf, während die Zugfestigkeit in diesem Bereich deutlich abnimmt. Daraus ist abzuleiten, dass eine Streckziehoperation eher am unteren Ende dieses Temperaturintervalls durchgeführt werden sollte, da hier eine deutlich höhere Festigkeit (und somit eine größere übertragbare Spannung) bei nur unwesentlich geringeren

Dehnungswerten vorliegt. Für die Magnesiumknetlegierung AZ31 wird ein Temperaturbereich von $T = 130\text{ °C}$ bis $T = 180\text{ °C}$ für das Streckziehen empfohlen. [DRÖD99]

Des Weiteren steigt der Reibfaktor dieser Legierung bei Erhöhung der Umformtemperatur von 300 auf 350 °C ohne Schmierstoff sprunghaft von 0,6 auf 0,95 an (Bild 53). Der Grenzfall $m = 1$ wird aber bei AZ31 nicht erreicht. Die Adhäsionsneigung von AZ31 nimmt demnach in einem schmalen Umformtemperaturbereich stark zu. Bei Verwendung eines Schmiermittels, Molykote, ist dieser signifikante Einfluss der Umformtemperatur nicht zu beobachten. [SFB390]

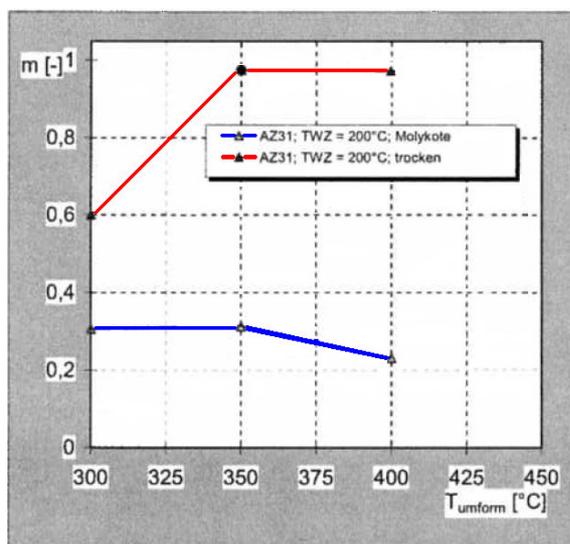


Bild 53. Reibfaktoren in Abhängigkeit der Umformtemperatur [SFB390]

Von besonderer Bedeutung ist der mittlere Korndurchmesser, denn er bestimmt die Gleichmaßdehnung von Magnesiumwerkstoffen. Dabei sind Korndurchmesser im Bereich kleiner 10 μm anzustreben, da die Dehnung mit kleiner werdendem Korndurchmesser exponentiell zunimmt. [Kawalla03]

1.2.2.2 Fließkurven

Fließkurven für AZ31 weisen bei sämtlichen Temperaturen und Umformgeschwindigkeiten oberhalb eines Umformgrads von 0,2 eine fallende Charakteristik auf. Aus den beiden Diagrammen in Bild 54 wird deutlich, dass mit steigenden Temperaturen geringere Fließspannungen notwendig sind, um plastisches Fließen einzuleiten bzw. aufrechtzuerhalten. Außerdem ist erkennbar, dass mit zunehmender Umformgeschwindigkeit der Widerstand

gegen plastisches Fließen ansteigt. Bereits ab einem Umformgrad von 0,15 fallen die Kurven bei den Umformgeschwindigkeiten von 1 und 10 s⁻¹. Die Kurvenneigung ist ein Maß für den Grad der Entfestigung. Bei Umformgraden zwischen 0,05 und 0,15 bzw. 0,2 steigen die Kurven an. Der Kurvenanstieg lässt auf eine Verfestigung des Werkstoffs schließen, welche bei allen Temperaturen und Umformgeschwindigkeiten zu beobachten ist. Bei den hohen Umformgeschwindigkeiten 20 und 30 s⁻¹ erstreckt sich der Bereich der Verfestigung bis zu Umformgraden von 0,2 und reicht damit etwas weiter als bei den geringen Umformgeschwindigkeiten 1 und 10 s⁻¹. Generell steigt der Widerstand von Magnesiumlegierungen mit steigender Umformgeschwindigkeit stark an, was die Umformung von Magnesiumwerkstoffen für verschiedene Umformverfahren erschwert. [Doege01], [Merklein06]

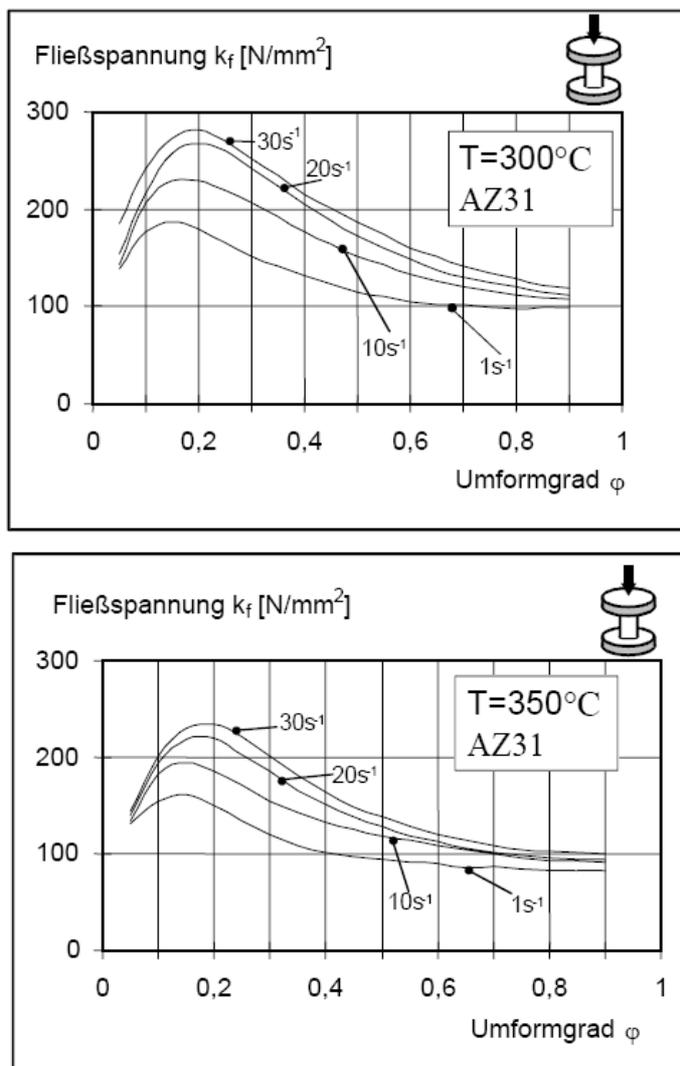


Bild 54. Fließkurven bei $T = 300^\circ\text{C}$ und 350°C und verschiedenen Umformgeschwindigkeiten für AZ31 [Doege01]

Untersuchungen nach [Kawalla03] haben gezeigt, dass das Umformverhalten von Magnesiumblechen bei Raumtemperatur mit denen des Aluminiumwerkstoffes AA6016 vergleichbar ist. Dabei nimmt das Umformvermögen mit steigenden Umformtemperaturen zu, so dass bei 250 °C Mindestumformungen erreicht werden, die oberhalb der für Stahl zulässigen Werte liegen. Des Weiteren wurde ein Grenzziehverhältnis (Erläuterung im **Anhang A**) von $\beta = 1,6$ bei Raumtemperatur ermittelt, welches mit steigender Temperatur bis auf $\beta = 2,5$ bei 250 °C ansteigt und somit deutlich höher liegt als das von Stahl bei Raumtemperatur (siehe Bild 55).

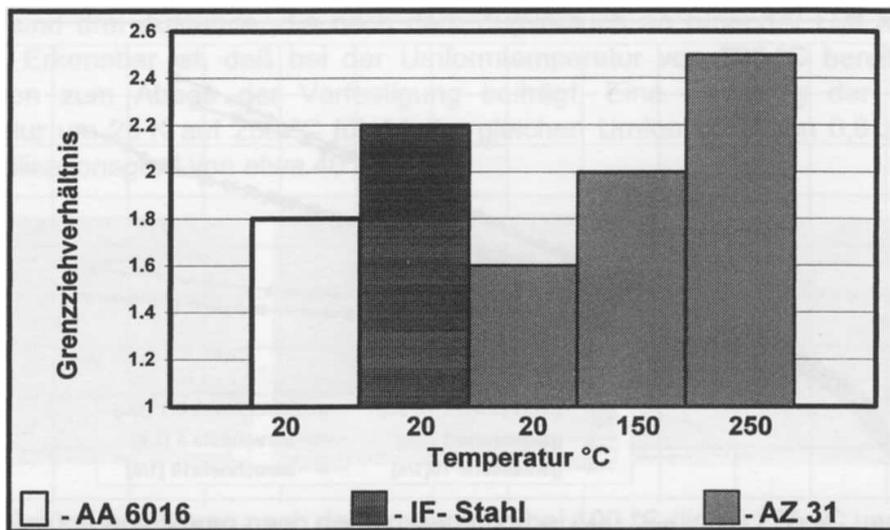


Bild 55. Grenzziehverhältnis β [Kawalla03]

Im folgenden Bild 56 sind die Messergebnisse eingetragen und mit Literaturwerten für Stahl- und Aluminiumbleche verglichen worden. Dabei zeigt sich, dass bei RT das Umformverhalten von Magnesiumblechen mit denen des Aluminiumwerkstoffes AA6016 vergleichbar ist. Mit steigender Umformtemperatur nimmt das Umformvermögen zu, so dass bei 250 °C Mindestumformungen erreicht werden, die oberhalb der für Stahl zulässigen Werte liegen. [Kawalla03]

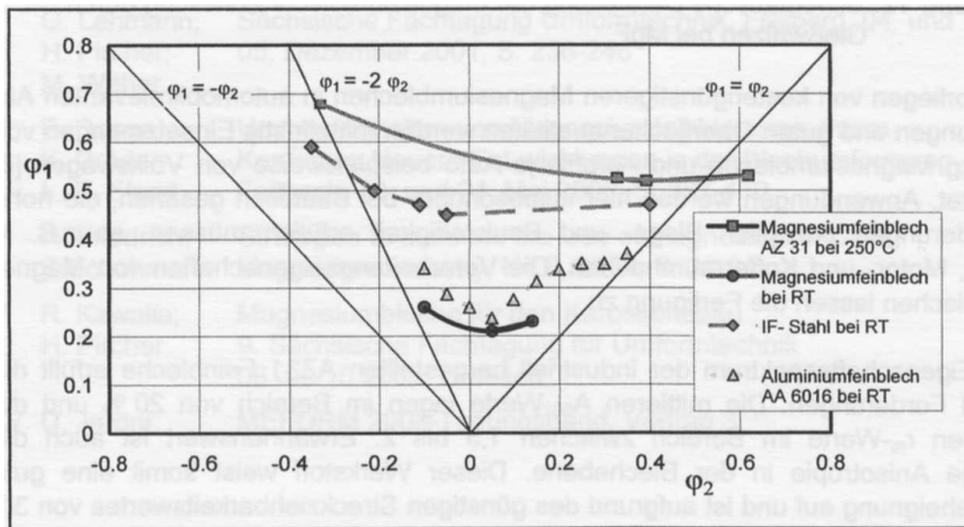


Bild 56. Grenzformänderungsdiagramm [Kawalla03]

1.2.2.3 Verschraubung

Der Einsatz von Leichtbauwerkstoffen erfordert auch bei der Entwicklung von Verbindungselementen und der Auslegung von Schraubenverbindungen neue Wege. Im Zusammenhang mit der verstärkten Anwendung von Magnesium stellt der Einsatz von Aluminiumschrauben eine Herausforderung für Hersteller und Konstrukteure dar. Das grundsätzliche Konstruktionsprinzip einer Schraubenverbindung besagt: „im Falle einer Überbelastung der Verbindung versagt die Schraube, nicht das Bauteil“. Soll diesem Grundsatz auch bei Magnesiumverschraubungen weiter Rechnung getragen werden, so führt dies beim Einsatz von Stahlschrauben, aufgrund der geringen Festigkeit von Gegenlage und Muttergewinde, zu sehr großen notwendigen Einschraubtiefen bzw. großen Kopfauflageflächen. Dies wiederum führt zu großen Schraubenlängen und bei Magnesiumkomponenten zu höherem Gewicht und Bearbeitungsaufwand als eigentlich notwendig. Zur Vermeidung von Kontaktkorrosion eignen sich in Verbindung mit Magnesiumkomponenten die für Stahlschrauben genutzten Oberflächenbeschichtungen nicht. Stark unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten der kombinierten Materialien führen zudem zu erheblichen Relaxationserscheinungen mit funktionsgefährdenden Vorspannkraftverlusten.

Durch eine einzige Maßnahme, den Einsatz geeigneter Verbindungselemente als hochfeste Aluminiumschrauben, können die genannten Probleme und Nachteile gelöst bzw. reduziert werden. Für die Verschraubung von Magnesiumkomponenten unter korrosiver und

thermischer Belastung eignet sich die Aluminiumlegierung Al 6056 (AlSi1MgCuMn) hervorragend. Mit dieser Legierung und der angepassten Wärmebehandlung wird prozesssicher eine Zugfestigkeit der Schraube von 400 N/mm² bei gleichzeitig guten Kontaktkorrosionseigenschaften gegen Magnesium erreicht. Bei Langzeitbelastung bis zu einer Temperatur von ca. 150 °C sind die mechanischen Eigenschaften der Schrauben nahezu stabil. Kurzzeitig höhere Temperaturen bis ca. 180 °C sind ebenfalls unkritisch. [Westphal02], [Westphal03]

Somit lassen sich die folgenden Vorteile von Aluminiumschrauben festhalten:

- geringes Gewicht (ca. 1/3 vergleichbarer Stahlschrauben)
- thermischer Ausdehnungskoeffizient ähnlich dem der verschraubten Magnesiumkomponenten (Al $\approx 23 \cdot 10^{-6}$ 1/K, Mg $\approx 26 \cdot 10^{-6}$ 1/K, Stahl $\approx 12 \cdot 10^{-6}$ 1/K)
- niedriger Elastizitätsmodul (weiche Verbindung)
- geringere Belastung unter Betriebsbeanspruchung
- gute Kontaktkorrosionseigenschaften gegen Magnesium ohne zusätzliche Oberflächenbeschichtung (Cu – Gehalt ≤ 1 %)
- geringe notwendige Einschraubtiefe (1,2 bis 1,5 x d) (Bild 57)
- konstruktive Vorteile / Gewichtseinsparung
- reduzierter Bearbeitungsaufwand
- Recycling von reinen Leichtmetallkomponenten

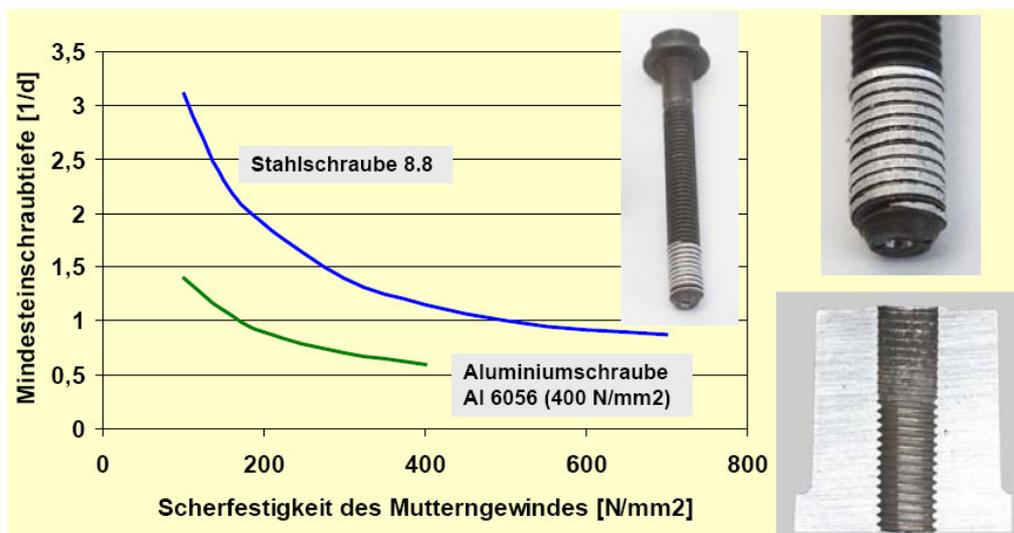


Bild 57. Einschraubtiefe von Stahlschraube 8.8 und Aluminium im Vergleich [Westphal03]

1.2.2.3.1 Kontaktkorrosion

Beim Fügen von Magnesiumkomponenten mittels Stahlschrauben bedroht Kontaktkorrosion aufgrund des stark unterschiedlichen elektrochemischen Normalpotentials der Werkstoffe massiv die korrosiv belasteten Verbindungsstellen. Zur Vermeidung der Kontaktkorrosion sind die für Stahlschrauben eingesetzten, kathodisch schützenden Beschichtungssysteme nicht geeignet. Höhere Beständigkeiten bieten isolierende Versiegelungen auf galvanischen Zink- bzw. Zinklegierungsschichten. Die Wirksamkeit dieses Schutzes ist jedoch durch eine in der Regel unvermeidbare Porosität begrenzt und nur solange wirksam, wie die Beschichtung nicht durch Umwelteinflüsse geschädigt ist.

In Verbindung mit üblichen Magnesiumdruckgusslegierungen können Schrauben aus geeigneten Aluminiumlegierungen der Reihe 6000 mit begrenztem Kupfergehalt von $\leq 1\%$ blank eingesetzt werden. Zur Vermeidung dieser Korrosionsart benötigen sie keine zusätzliche Oberflächenbeschichtung.

1.2.2.3.2 Relaxation

An temperaturbelasteten Verbindungsstellen können Relaxationsvorgänge zu funktionsgefährdenden Vorspannkraftverlusten führen, wie in Bild 58 dargestellt. Begründet sind diese Verluste grundsätzlich im Setzverhalten der Verbindung sowie im Kriechverhalten des Magnesiumwerkstoffes. Durch stark unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe werden diese Vorgänge begünstigt. Der thermische Ausdehnungskoeffizient des Magnesiums liegt um einen Faktor zwei über dem des Vergütungsstahls. Setz- und Relaxationsvorgänge beginnen bereits während der Erwärmung der Bauteile. [Westphal02]

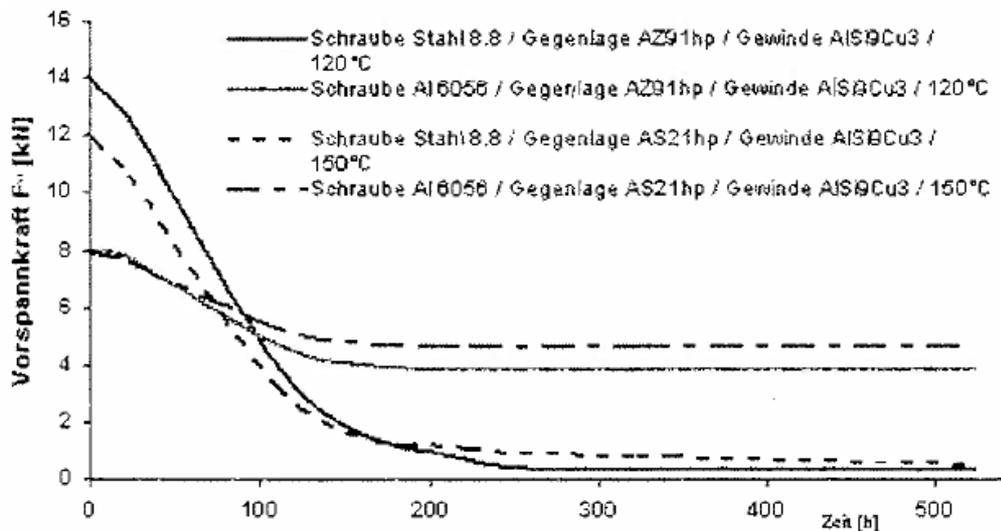


Bild 58. Beispiel eines Vorspannkraftverlaufes einer Magnesiumverschraubung über die Betriebszeit bei 120 °C bzw. 150 °C (Vergleich von Stahl- und Aluminiumschraube gleicher Abmessung) [Westphal02]

1.2.2.3.3 Verschraubung mit Aluminiumschrauben

Vorspannkraftverluste können zusätzlich reduziert werden, wenn der Konstrukteur eine auf die Grenzflächenpressung der Magnesiumkomponente abgestimmte Geometrie der Aluminiumschraube mit ausreichend großer Kopfauflagefläche wählt. Der Bunddurchmesser einer solchen Schraube sollte mindestens 2 x Gewindenenddurchmesser betragen. Vor allem bei dynamisch beanspruchten Komponenten ist die größere Nachgiebigkeit einer überelastisch angezogenen Schraubenverbindung mit Aluminiumschraube gegenüber der Stahlschraube von Vorteil. Der Kopf der biegeelastischeren Aluminiumschraube kann zudem Querschiebungen mit größerer Amplitude ertragen als eine vergleichbare Stahlschraube. Durch den Einsatz von Aluminiumschrauben können aufgrund der Angleichung von Bauteil- und Schraubenfestigkeit die notwendigen Einschraubtiefen auf ca. 1,5 x Gewinde – Nenndurchmesser gegenüber 2,5 bis 3 x Gewinde – Nenndurchmesser bei Verwendung von Stahlschrauben der Festigkeitsklasse 8.8 reduziert werden. Zur Einstellung geeigneter Verschraubungseigenschaften ist eine Schmiermittelbehandlung notwendig.

Die Montage der Aluminiumschrauben sollte überelastisch durch drehwinkelgesteuertes Anziehen erfolgen (Fügemoment + Winkel). In die Schraube eingebrachte plastische Verformung durch das überelastische Anziehen wird von dieser mit ausreichender Verformungsreserve ertragen.

In Verbindung mit Magnesiumkomponenten können mit dem Einsatz von geeigneten Aluminiumschrauben deutliche technische Verbesserungen erzielt werden, insbesondere bei

temperaturbelasteten Verbindungsstellen und solchen in korrosiver Umgebung. Des Weiteren kann der Materialeinsatz und der Bearbeitungsaufwand reduziert werden.

1.2.3 Zusammenstellung der Bauteilanforderungen und Belastungen

1.2.3.1 Die Fahrzeugtür und ihre Anbauteile

Die Fahrzeugtür ist eins der komplexesten Bauteile der Fahrzeugkarosserie. Eine große Anzahl von Funktionen und Anforderungen sind von ihr zu erfüllen. Nur mit Hilfe der rechnergestützten Simulation ist eine effiziente Entwicklung und Konstruktion eines solchen Bauteils möglich.

Aus Sicht der Struktur gliedern sich die Anforderungen in verschiedene Kategorien, wie zum

Beispiel:

- Funktion (z.B. eine ausreichende Türgerippesteifigkeit an den Anbindungspunkten des Fensterhebers und eine ausreichende Fensterrahmensteifigkeit)
- Qualität (z.B. eine ausreichende Beulsteifigkeit der Türaußenhaut, bei Lasteinwirkung von außen)
- Missbrauch (z.B. bei Belastungen die über den üblichen Betriebslasten liegen)
- Fertigung
- Fahrzeugsicherheit (z.B. der passive Schutz des Insassen)
- Dauerfestigkeit (z.B. bei Belastungen, die in hohen Zyklen während der Lebensdauer des Fahrzeugs auftreten, wie das wiederholte exzessive Öffnen der Tür)

Da diese Punkte immer unter dem Blickwinkel einer kostengünstigen und herstellbaren Konstruktion zu sehen sind, stellen die Fertigungsanforderungen die Randbedingungen an den Entwickler und den Konstrukteur.

Die Fahrzeugtür ist in ihrer Komplexität als schwingendes Bauteil zu betrachten.

Wie in so vielen Bereichen des Automobilbaus gibt es auch bei der Konstruktion und Produktion von Türen einen Trend zu modularen Lösungen. Heute bestehen dabei auf dem Markt unterschiedliche Konzepte nebeneinander. Durch die konstruktive Trennung von Nass- und Trockenraum wird die Qualität der gesamten Fahrzeugtür auf dem Gebiet der Fahrzeugelektrik / Fahrzeugelektronik signifikant erhöht. Steigende Standards hinsichtlich Qualität und Komfort und strenge Bestimmungen in Bezug auf das Crashverhalten von Fahrzeugen erhöhen ständig die Anforderungen an die Entwicklung von Fahrzeugkarosserien und –türen. Des Weiteren sind die hohen Standards hinsichtlich Anmutungsqualität, passiver Sicherheit und komfortabler Bedienung zu erfüllen.

Eine weitere Herausforderung aber auch Notwendigkeit besteht in der Integration von elektrischen und elektronischen Komponenten, die sowohl für die Grundfunktion der

Fahrzeigtür als auch für die Komfort- und Sicherheitssteigerung der Fahrzeigtür verantwortlich sind.

Auf dem heutigen Markt dominieren drei Gruppen von Türen. Den größten Anteil nehmen dabei Dreh- bzw. Scharnirtüren ein. Die Öffnung der Tür erfolgt hierbei durch Rotation um eine ungefähr senkrecht zur Fahrbahn stehende Drehachse an der Vorderseite. Bedingt durch den einfachen mechanischen Aufbau bieten Drehtüren den Fahrzeugherstellern große Vorteile im Bereich der Fertigungs- und Montagekosten.

Ebenfalls weit verbreitet sind Schiebetüren. Während der Öffnungs- und Schließbewegung gleiten diese in meist außen am Fahrzeug angebrachten Schienen. Die Bewegung erfolgt entgegen der Fahrtrichtung in geringer Entfernung von der Karosserie. Diese Türen werden aufgrund der an der Fahrzeugaußenseite benötigten Schiene, sowie den dadurch notwendigen Eingriff in das Design des Fahrzeugs in vielen Marktsegmenten nicht verwendet. Die dritte Gruppe bilden die vereinzelt eingesetzten Flügeltüren. Hier erfolgt die Öffnung durch Drehung um eine nahezu parallel zur Fahrbahnoberfläche und parallel oder senkrecht zur Fahrtrichtung angeordnete Achse. Ein vermehrter Einsatz dieser Türen wird wegen deutlicher Defizite bei der Bedingung vermieden.

In sehr geringer Stückzahl werden darüber hinaus bei einigen Fahrzeugen sowie bei Konzeptstudien Viergelenkkinematiken verwendet.

1.2.3.1.1 Türkonzepte

Das wesentliche und bestimmende Bauteil eines jeden Türkonzeptes ist der Türrohbau. Dieser wird schon in der Konzeptphase als Integrationsträger für An- und Einbaumodule definiert. [Egner]

In Bild 59 sind unterschiedliche Türkonzepte aufgelistet.

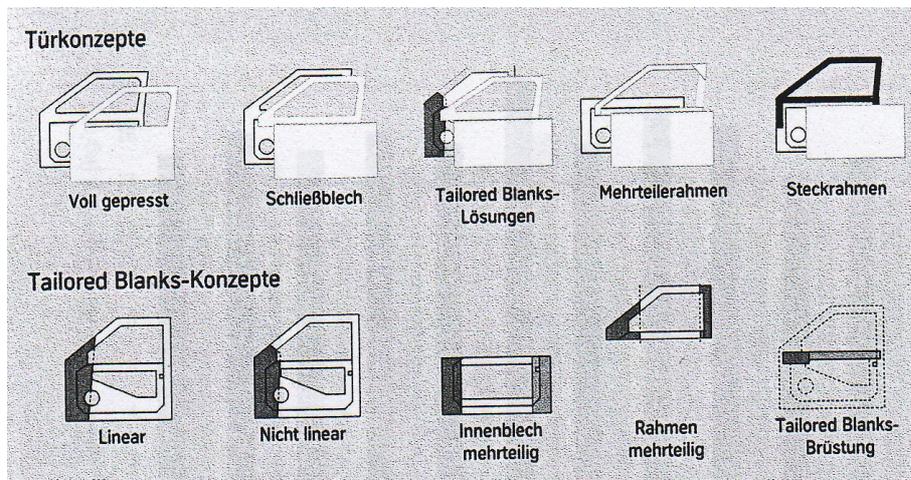


Bild 59. Unterschiedliche Türkonzepte [Hilfrich07]

Der Türinnenrahmen ist für die Stabilität verantwortlich und ist gleichzeitig Montageträger für zahlreiche Komponenten wie Zierstäbe oder den Schließmechanismus des Türschlosses. Des Weiteren muss er genügend Platz für Fensterheber, Lautsprecher oder Rollo freilassen. Deshalb sollte die Kontur des Rahmens tief genug sein.

Aus diesen Vorgaben resultieren die Anforderungen an die Geometrie und Werkstoffeigenschaften des Türrahmens. In diesem Zusammenhang sind minimaler Verzug, kleine Toleranzen, gute Montageeigenschaften, hohe Dehnung und Festigkeit, maximale Energieaufnahme, kleine Wanddicken und niedriges Gewicht wichtig.

Der Einbau zusätzlicher Strukturen für die Crash – Sicherheit sowie die Verwendung von weichen Gummielementen erhöht die Belastung der Komponenten vor allem beim Zuschlagen der Türen.

Durch den Einsatz des vollgepressten Türinnenbleches konnten alle Montageeinflüsse der bisher eingesetzten Vormontageeinheit Aggregateträger eliminiert und die Vorteile des hochgenauen Karosseriebaus genutzt werden. Dies begünstigt unter anderem die Verlagerung und Reduzierung von Montageumfängen mit insgesamt geringeren

Fertigungszeiten sowie eine gewichtsoptimierte Bauweise einer Tür, da keine Übergangsbereiche und Verbindungsknoten zu berücksichtigen sind. Der in die Tür angepasste Seitenaufprallträger, durch einen hochfesten Stahlträger direkt in den Türrohbau integriert, leistet einen erheblichen Beitrag zum Insassenschutz. Dadurch konnte eine direkte Anbindung an den Scharnierbereich erfolgen, wodurch die von außen eingeleiteten Kräfte unmittelbar über das Scharnier in die Karosseriestruktur weitergeleitet werden. Durch den rohbauseitigen Verbau des Aufprallträgers wurde auch die Überdeckung auf der jeweiligen Schloss – Seite maximiert. Die konsequente Umsetzung dieser Bauweise ergab eine weitere Verbesserung des Insassenschutzes; gleichzeitig stellt die Bauweise die günstigste Variante im Verhältnis Funktion/Gewicht dar. Zur Optimierung von Bauräumen und Fertigungszeiten werden im Türrahmenbereich die Bleche, Türinnenteil und Rahmenteil, mittels Remote – Laserstrahl – Schweißen miteinander verbunden. [Kreis07]

Im Demonstrator kommt zur Optimierung des Gewichts die Tailored – Blank – Technik in drei unterschiedlichen Wandstärken mit lokalen Verstärkungen zum Einsatz. Die Komponenten (Rahmen, Rohbau und Scharniere) werden im Zusammenbau durch Passverschraubungen miteinander verbunden. Somit entfallen zusätzliche, aufwendige Einstell- und Richtarbeiten im Zusammenbau und beim Einbau der Türen in die Karosse.

1.2.3.1.2 Scharniere

Scharniere und Türfeststeller gewährleisten die Kraftübertragung zwischen Tür und Karosserie. Sie lassen sich in 3 Hauptbauformen unterteilen. Werden Karosserie- und Türteil eines Scharniers aus Blechmaterial durch Kaltumformung hergestellt, spricht man von einem „Blechscharnier“. Auf der anderen Seite gibt es Scharniere, die aus Profilmaterial oder Schmiedeteilen hergestellt werden. Diese „Profil- oder Schmiedescharniere“ zeichnen sich durch sehr gute mechanische Eigenschaften und eine hochwertige Lagerstelle aus. Je nach Einsatzfall bzw. Kundenanforderungen können auch Mischformen, z.B. Türteil aus Blech und Karosserieteil in Profil- oder Schmiedeausführung, hergestellt werden. Die maximal zulässigen Türöffnungswinkel werden mit Festanschlägen begrenzt. [Duning00]

Des Weiteren wird durch das Scharnier und Feststellerkonzept ein großer Einfluss auf das Komfortverhalten einer Tür beim Öffnen und Schließen definiert. Ein separater Türfeststeller ermöglicht eine komfortbetonte Auslegung des Öffnungs- und Schließvorgangs. Das Kriterium dabei sind die am Türgriff auftretenden Kräfte, die komfortbetont gering auszulegen sind, dabei aber gleichzeitig die Tür in definierten Positionen sicher halten sollen. [Kreis07]

Türscharniere werden im Allgemeinen als Drehgelenke in Form von Gleitlagern ausgeführt,

die aufgrund der spezifischen Bedingungen eine Reihe weiterer Kriterien und Aufgaben erfüllen müssen. Eine der hier wichtigsten Aufgaben ist die Kraftübertragung und die Realisierung der Türkinematik. Des Weiteren sind technische Forderungen wie Wartungsfreiheit, Spielfreiheit und Lackierfähigkeit einzuhalten. Diese Anforderungen werden in Spezifikationen festgelegt.

Die Forderung nach einer gewissen Schwergängigkeit (Drehmoment, Schwenkmoment) des Türscharniers beschreibt eine spezielle Spezifikation. In dieser muss ein bestimmter Toleranzbereich, gewöhnlich zwischen 0,5 Nm und 5,0 Nm, garantiert sein. Die Untergrenze begründet sich durch manuelle Arbeitsgänge mit dem Türscharnier oder durch eine notwendige „Leichtgängigkeit“ der Türen bei der Fahrzeugendkontrolle. Die Obergrenze wird durch die Notwendigkeit einer „Schwergängigkeit“ bei einer automatisierten Automobilmontage bestimmt, oder durch das geforderte Einhalten einer bestimmten Öffnungsposition des Türscharniers bei der Anlieferung.

1.2.3.1.3 Dichtungen

Grundlegende Bedingung zum Erreichen guter Aeroakustikeigenschaften ist die akustische Dichtheit der gesamten Fahrgastzellenumrandung. Jede Durchbrechung bedarf einer sorgfältigen Abdichtung, damit kein Luftschall auf direktem Wege von außen nach innen eindringen kann. Aus diesem Zusammenhang resultieren hohe akustische Anforderungen an das Türdichtungssystem. Dieses System muss neben der absoluten Dichtheit auch, wegen der erheblichen Dichtungslänge, über ein hohes Einfügedämmmaß verfügen. Um dies zu gewährleisten, werden heutzutage im Allgemeinen Mehrfachdichtungssysteme eingesetzt, wobei die Abdichtung zwischen Karosserie und den Türen in zwei oder gar drei hintereinander angeordneten Ebenen erfolgt. Der technische Aufwand ist enorm, da unter Berücksichtigung aller möglichen Toleranzen, jede Dichtungsebene immer absolut dicht abschließen muss. Mittels unterschiedlicher Dichtungsüberdeckungen kann die Türschließkraft nochmals reduziert werden. Das umlaufende, weiche Profil wird direkt auf die Tür appliziert. Eine gezielte Platzierung der Türdichtung in den äußeren Randbereich macht es möglich auf eine zusätzliche Fugendichtung zu verzichten.

1.2.3.1.4 Kräfte und Belastungen

Aufkommende Kräfte können von statischer, dynamischer und schockartiger Natur sein und müssen so verteilt werden, dass die Energie bestmöglich durch die Tür bzw. die Karosserie geleitet wird. Dies geschieht über so genannte Lastpfade. Diese sollen eine möglichst gerade

Kraftführung erlauben und wenige Unstetigkeitsstellen aufweisen. Das ist aber nicht immer realisierbar, da zum Beispiel auch Fügestellen und Knotenpunkte Spannungskonzentrationsstellen sein können. Daher sind Konstruktionen mit fließenden Übergängen, ohne Kerben oder größere Absätze, die einen homogenen Kraftfluss einschränken, von Vorteil. Das Abbauen von Kräften in den Lastpfaden ist unter normalen Betriebsbedingungen als eine rein elastische Deformation der eingesetzten Werkstoffe zu verstehen.

Sehr häufiges Öffnen oder Schließen kann zu Blockierungen der Türen führen. Bei einer detaillierten Untersuchung eines Türschließvorgangs können drei Phasen unterschieden werden. Zunächst berührt die Tür die Gummidichtung an der Karosserie, die deutlich deformiert wird. Die durch den Gummi absorbierte kinetische Energie wird in Wärmeenergie und in elastische Energie umgewandelt. Anschließend trifft die Tür auf den Schließmechanismus und wird endgültig gestoppt. In der Schlussphase versucht die zu vor gespeicherte elastische Energie, die Tür zurückzuschwingen, dies wird jedoch durch den Schließmechanismus verhindert. Die präzise Erfassung der zeitabhängigen Kontaktbedingungen zwischen den unterschiedlichen Komponenten im Schließmechanismus ist von zentraler Bedeutung für die Simulation des Lasttransfers zwischen Tür und dem Rahmen. Die Kontaktsequenz zwischen Tür und Karosserie ergibt eine variable Verformung der Gummidichtung, verursacht durch die kurvenförmige Bewegung der Tür sowie durch die daraus resultierenden modalen Schwingungen der Tür selbst. Bei der Leichtbaustruktur wird die Dauerfestigkeit als einer der kritischen Lastfälle für die Verbindungstechnik gesehen.

Ein Minimum an Gewicht, aufgrund von weitgehend homogener Energiedichteverteilung über alle Lastfälle, kann durch Blechdicken- und Topologieoptimierung erzielt werden. Topographieoptimierung wird zur Optimierung der Steifigkeit großer Flächen eingesetzt. Nichtlineare Simulation dient dabei der Berechnung der Rahmenvorspannung und der Scharnierauslegung.

Die Struktureigenschaften einer Fahrzeugtür stehen in Wechselwirkung mit der sie umgebenden Karosserie. Mit Hilfe bestimmter Lastfälle lassen sich Türen isoliert prüfen um somit Aussagen über deren strukturmechanische Eigenschaften zu treffen. Dabei kommen, die in dargestellten Lastfälle, Türabsenkung und Überöffnen sowie die Brüstungssteifigkeit, in betracht. Der in Bild 60 dargestellte Lastfall Fensterrahmen wurde in dieser Abhandlung nicht weiter betrachtet, da der Demonstrator ohne Rahmen konstruiert wurde.

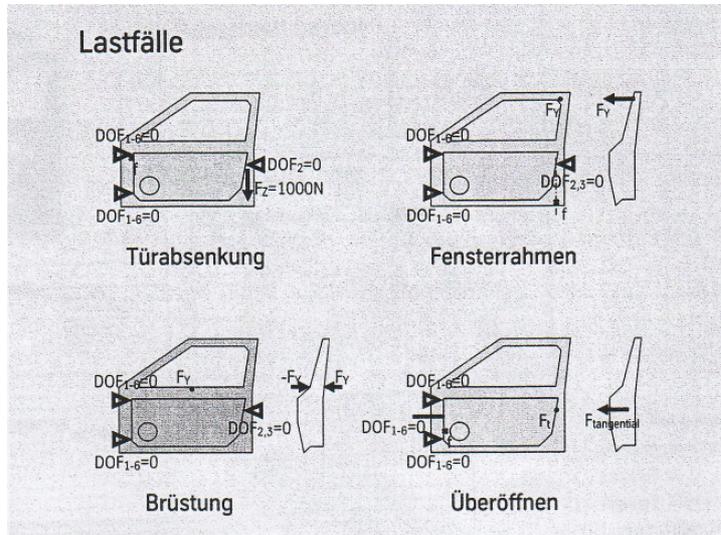


Bild 60. Lastfälle bei Türen [Hilfrich07]

Die Ergebnisse der Lastfälle Überöffnen und Türabsenkung geben vor allem Aufschluss über die Steifigkeit des Scharnierbereichs. Die Ausführung des Scharniers – stabiles Schmiedeteil oder einfaches Blechscharnier – hat erheblichen Einfluss auf die Performance.

Der Lastfall Brüstungssteifigkeit wird für den Diebstahlschutz bewertet. Die Gestaltung der Türbrüstung wird vor allem vom Crashkonzept bestimmt. Dieser Lastfall spielt aber eine eher untergeordnete Rolle.

Neben den Steifigkeitslastfällen stellt auch der Crashfall Anforderungen an die Fahrzeugtür. Diese muss aber von der Gesamtfahrzeugstruktur erfüllt werden. [Hilfrich07] In Bild 61 sind die Lastpfade in die Karosserie beim Seitenaufprall dargestellt.

1.2.3.1.5 Vergleich und Optimierung

Bereits ein erster Blick auf aktuelle Serienfahrzeuge zeigt eine Vielzahl unterschiedlicher Türdesign- und Werkstoffkonzepte. Alle Rohbautüren sind im Wesentlichen aus Stahlwerkstoffen hergestellt, teilweise auch unter Verwendung von Tailored Blanks. Als zentrale Bewertungsparameter des Türen – Benchmark sind Türgewicht, Strukturperformance und Kosten zu nennen.

Die durchschnittliche Blechdicke bei Stahltüren liegt für das Innenblech bei 0,73 mm, für das Außenblech bei 0,75 mm und bei Tailored – Blank – Innenblechen im Scharnierverstärkungsbereich bei 1,44 mm. Dabei werden für das Außenblech überwiegend Bake – Hardening – Güten und für das Innenblech finden weiche Tiefziehstähle Anwendung. Für den Seitenaufprallträger werden hochfeste Stahlgüten verbaut. Die meisten Türen haben

dabei ein durchschnittliches Flächengewicht von ca. 14 kg/m².



Bild 61. Lastpfade in die Karosserie beim Seitenaufprall [Kreuzinger05]

1.2.3.2 Experimentelle Schwingungs- und Verformungsberechnung

Schwingungsanalysen basieren auf der Messung von Schwingweg-, Schwinggeschwindigkeits- oder Schwingbeschleunigungssignalen einer angeregten Struktur. Berührungslos durch Einsatz von Lasern oder berührend mittels Beschleunigungsaufnehmern können diese Signale erfasst werden.

Mit dem Einsatz des Laser – Scanning – Vibrometers wurde bei AMITRONICS eine Schwingungs- und Verformungsanalyse einer Fahrzeugtür durchgeführt. Solch ein Vibrometer arbeitet nach dem Grundprinzip der Laserinterferometrie (Lichtquelle HeNe – Laser).

Im Versuch wurde die Fahrzeugtür „frei – frei“ (Bild 62) aufgehängt und an unterschiedlichen Punkten mittels Shaker (Vibration, Schock) angeregt. In dieser Bild ist auch der Laserkopf sichtbar. Schwingformen der Tür sind in Bild 63 dargestellt.



Bild 62. Messaufbau zur Schwingungsuntersuchung einer Fahrzeugtür [Rümmler]

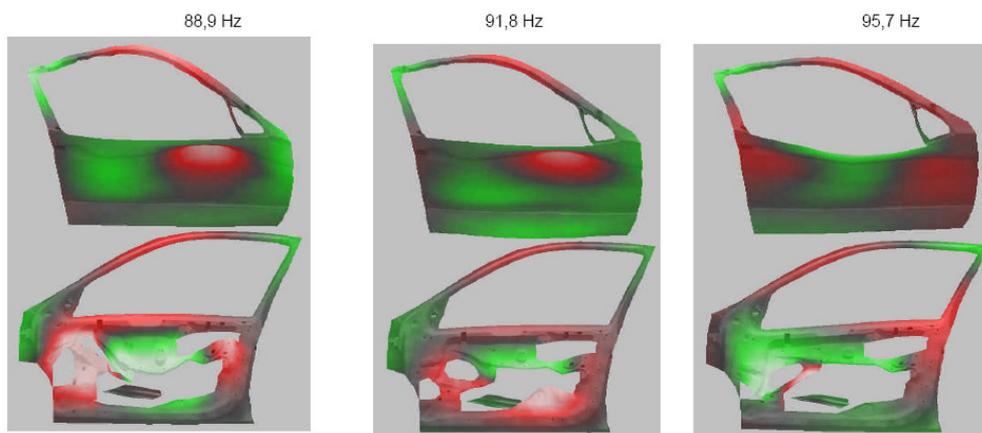


Bild 63. Schwingformen der Tür bei Shakeranregung [Rümmler]

Wenn die erste Eigenfrequenz einer zu untersuchenden Struktur weit oberhalb der notwendigen systembedingten Mindest – Messfrequenz von 0,5 Hz liegt, sind mit dem Scanning – Vibrometer auch Messung quasistatischer out – of – plane – Verformungen (Verformungsmessungen aus der Ebene heraus) möglich. Eine mit 0,5 Hz angeregte Struktur antwortet mit einer quasistatischen Verformung und nicht mit einer Schwingform. [Rümmler]

1.2.4 Korrosionsschutz und mechanische Oberflächenbehandlung

In einem technischen System wie dem Automobil unterliegen die meist versteiften Bauteile aus Magnesium nicht nur der Eigenkorrosion, sondern auch der Kontaktkorrosion, die durch anliegende Fremdmetalle verursacht wird. Ursache hierfür ist das stark negative Potenzial (-2,37 V) des Magnesiums nach der praktischen Spannungsreihe der Metalle. Je nach Potenzialdifferenz zum Magnesium verursachen die als Kathode wirkenden Fremdmetalle, mehr oder weniger starke Kontaktkorrosion. Dieser Ursache wirkungsvoll zu begegnen, liegt in der geeigneten Beschichtung des Kontaktpartners und des Magnesiums.

Für die heutige Qualitätsanforderungen im Automobilbau eignen sich nur HP – Versionen. [Reinhold00]

Zur Vermeidung von Kontaktkorrosion darf die Differenz der Korrosionspotentiale der Werkstoffe bei Einsatz in Innenräumen max. 0,5 V und im Außenbereich unter rauen Bedingungen (hohe Luftfeuchtigkeit, salzhaltig) max. 0,15 V betragen. Diese Forderung kann bei der Kombination von Magnesiumlegierungen mit den meisten anderen Werkstoffen nicht erfüllt werden. [Stelzer06]

Durch die Einführung der HP – Legierungen wurde die Korrosivität der konventionellen Legierungen deutlich verringert, dennoch fehlt für Magnesiumlegierungen nach wie vor ein selbstheilender Passivierungsfilm. [Kainer98]

Beim Erstarren der Legierungen werden die Verunreinigungen durch Eisen, Nickel und Kupfer als kathodische (edlere) Verbindungen ausgeschieden und führen zu einer Erhöhung der Korrosionsrate (Bild 64). Der Mangan – Gehalt ist in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung, da Mangan in der Lage ist Eisenverunreinigungen durch Phasenbildung abzubinden. [Reinhold00]

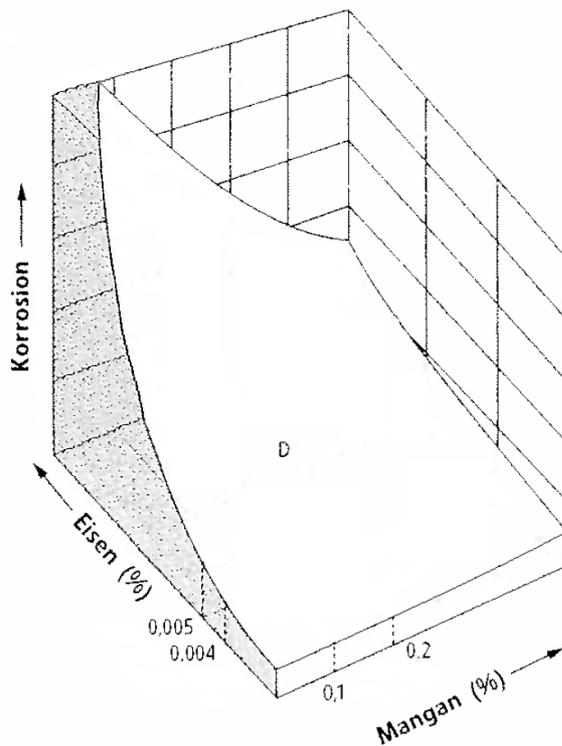


Bild 64. Einfluss von Eisen und Mangan auf die Korrosionsbeständigkeit von Magnesiumlegierungen [Reinhold00]

Der elektrochemische Korrosionsvorgang muss als Redoxprozess betrachtet werden. Dies bedeutet, dass der anodischen Metallauflösung ein kathodischer Reduktionsprozess (Wasserstoff – Abscheidung, Sauerstoffreduktion) zugeordnet ist, wobei das Redoxsystem nach außen elektronenneutral bleibt. Unter Berücksichtigung kinetischer Faktoren, zum Beispiel Widerstände durch Passivschichten und Elektrolytwiderstände, kann in einer Elektrolytlösung eine Summenstrom – Spannungs – Kurve bestimmt werden. Beträgt der Summenstrom null, entspricht das Potenzial an dieser Stelle dem freien Korrosionspotenzial. Die kathodische Teilreaktion wird durch Chromatierung bzw. silikatische Versiegelung gehemmt.

Um Kontaktkorrosion zu vermeiden, werden in korrosionskritischen Einbaulagen hartanodierte Aluminiumunterlegscheiben als elektrische Isolation, vorzugsweise aus AlMgSi1F32, eingesetzt. Als Beschichtung für Verschraubungselemente hat sich die silikatische Versiegelung bewährt. Die Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Beschichtungssysteme und ihren Anwendungen. [Reinhold00]

Tabelle 4. Schichtsysteme für Magnesium [Reinhold00]

Beschichtungssystem	Anwendung
galvanische Verzinkung + silikatische Versiegelung	für Verschraubungselemente Fest. – Klasse 8.8 < M12 Sofern die Schrauben nicht im direkten Salzwasserbereich liegen, sind keine zusätzlichen Aluminiumunterlegscheiben erforderlich
Aluminiumunterlegscheiben	als Beilagscheibe für Verschraubungselemente; Anwendung bei korrosionskritischen Einbaulagen
Duplexsystem Zink + (D)KTL	für am Magnesium anliegende Blechteile, die nicht im unmittelbaren Salzwasserbereich liegen

Für die Anwendung von Magnesium im Karosseriebereich ist eine auf den Werkstoff abgestimmte Vorbehandlung zwingend erforderlich. Diese gewährleistet die Korrosionsbeständigkeit einerseits und die optische Anforderung andererseits. In Tabelle 5 ist eine Auswahl von Vorbehandlungs- und darauf folgenden Beschichtungssystemen dargestellt. [Reinhold00]

Tabelle 5. Auswahl von Vorbehandlungs-/Beschichtungssystemen [Reinhold00]

Vorbehandlung	Beschichtung
chromfrei, Basis Titan/Zirkon	KTL (~ 25 µm)
gelbchromatiert	KTL (~ 25 µm)
chromfrei, Basis Titan/Zirkon	Pulverlack (~ 80 µm)
gelbchromatiert	Pulverlack (~ 80 µm)
chromfrei, Basis Titan/Zirkon	KTL (~ 25 µm) + Pulverlack (~ 80 µm)
gelbchromatiert	KTL (~ 25 µm) + Pulverlack (~ 80 µm)
chromfrei, Basis Titan/Zirkon	KTL (~ 25 µm) + Pulverlack (~ 80 µm) + Füller, Decklack und Klarlack
gelbchromatiert	KTL (~ 25 µm) + Pulverlack (~ 80 µm) + Füller, Decklack und Klarlack

Die Georg Fischer GmbH lässt zum Beispiel ihre gefertigten Türinnenrahmen aus Magnesiumdruckguss in Deutschland pulverbeschichten. [Postlmayr06]

Aus Gründen der Umweltverträglichkeit und des Gesundheitsschutzes sind insbesondere mit

Blick auf Außenhutanwendungen leistungsfähige chromatfreie Konversionsbehandlungen zu entwickeln. Diese sollten bei Lackbeschädigung eine der Chromatierung ähnliche oder noch verbesserte Ausheilungsfunktion aufweisen. [Enß01]

Organische Überzüge wie Farben und Lacke schützen also gegen Korrosion. Dabei haben diese meist Dicken von 50 bis 150 µm. Sie sind allerdings nicht dicht gegen die Diffusion von Wasserdampf. Der Wasserdampf löst an der Kontaktfläche zwischen dem Metall und der organischen Schicht kleinste Mengen an Oxidationsprodukten. Durch die Sättigung entsteht ein Wassertropfen. Unter der Lack- bzw. Farbschicht bildet er eine sicht- und fühlbare Blase. Diese dehnt die darüberliegende Lack- bzw. Farbschicht und weitet damit die Poren. So können zusätzlich Wasserdampf und korrosionsfördernde Stoffe aus der Umgebung eindringen. Um die Korrosion zu vermeiden, ist eine mehrstufige Behandlung der Oberfläche erforderlich. Zunächst muss das Metall sorgfältig gereinigt werden. Anschließend müssen Zwischenschichten aufgebracht werden, die eine besonders gute Haftung zwischen organischem Überzug und metallischer Oberfläche bewirken. Erst dann kann man Farben und Lacke auftragen. Fremdstoffe, wie Fette, Öle und Oxide muss man vor dem Beschichten metallischer Oberflächen sorgfältig entfernen. Dazu eignen sich mechanische oder chemische Verfahren. Häufig strahlt man die Oberflächen mit Sand, Metall- oder Glasperlen. Dieses mechanische Verfahren raut die Oberfläche auf und die entstehenden Unebenheiten vergrößern die Oberfläche. Das dabei aber nicht alle Fettpartikel entfernt werden steht dem nachteilig gegenüber. Diese lassen sich später auch nicht mehr entfernen und diffundieren dann somit durch die Farb- bzw. Lackschicht. Bei längerem Einsatz des Strahlmittels nimmt die Qualität der Oberflächenbehandlung ab. Um optisch anspruchsvolle, glänzende Oberflächen zu erhalten muss man vor dem Beschichten mit organischen Überzügen die raue Oberfläche glätten. Auf mechanisch durch Strahlen gereinigten Metalloberflächen haften organische Schichten sehr gut. Allerdings ist der Korrosionsschutz gering.

Um Oxidschichten zu entfernen nutzt man das chemische Vorbehandeln. Üblich ist das Beizen nach dem mechanischen Entfetten. Dieses Verfahren trägt eine dünne Schicht Metall(oxid) ab. Dabei werden die mechanisch erzeugten Unebenheiten geglättet. Aber auch hier steht die rasch oxidierende Oberfläche nachteilig gegenüber. Zudem muss man die Bauteile sorgfältig reinigen, denn Salzreste auf der Metalloberfläche fördern die Korrosion und sind unbedingt zu vermeiden.

Mit Konversionsschichten erreicht man wesentliche Verbesserungen des Korrosionsschutzes. Dabei entfernt man in einem mehrstufigen Verfahren organische Substanzen, beizt die Oberfläche, bringt anschließend Phosphat bzw. Chrom auf die äußere Kristallstruktur der Metalle und spült danach sorgfältig. Die dann gebildete Konversionsschicht verhindert die

Diffusion von Wasserdampf auf die darunterliegende Metalloberfläche. Da Farben und Lacke auf der Konversionsschicht sehr gut haften, ist der Korrosionsschutz erheblich besser.

Eine weitere Möglichkeit ist das Pulverbeschichten. Die Pulver, bestehend aus Duroplasten, werden auf dem metallischen Bauteil durch Wärme zu einer homogenen Schicht verschmolzen und anschließend gehärtet. Geeignet sind unterschiedliche Pulver auf Basis von Kunstharzen, Polyurethanen oder Acryl. Pulver aus Polyesterharzen eignen sich für Fassaden, Landmaschinen und Kraftfahrzeuge. Besonders vorteilhaft sind die gute Beständigkeit gegen Ausbleichen und der hohe Glanz über lange Zeiträume auch bei starker Bewitterung. Jüngst entwickelte Pulverlacke basieren auf einer Kombination von Acrylen. Besonders vorteilhaft sind hier die hohe Kratzfestigkeit, die große Härte, die gute Beständigkeit gegen Chemikalien und gegen Vergilben. Acryl – Pulverlacke lassen sich gut mattieren. Allerdings kann man diese Pulverlacke nur unter großem Aufwand auf einer Lackieranlage im Wechsel mit anderen Pulverlacken verarbeiten. [Unterweger03], [Stelzer06]

Für die Oberflächenbehandlung von Magnesiumlegierungen wird in der Literatur eine Vielzahl von Verfahren vorgeschlagen. Die meisten Verfahren sind technisch und ökonomisch aufwendig und werden somit nicht oder nur in geringem Umfang für technische Anwendungen eingesetzt. Für eine kontinuierliche Oberflächenbehandlung von Blechen und Bändern aus Magnesiumlegierungen gibt es bis heute keine befriedigenden Lösungen. [Stelzer06]

1.2.5 Berechnungsmodell

1.2.5.1 Modellbeschreibung

Die von Voith Engineering Services GmbH Road & Rail modellierte Fahrzeugtür wurde als *.igs – File aus dem Konstruktionsprogramm herausgeschrieben und in das vorliegende FEM – Programm, MSC.Patran 2005, eingelesen. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die zu importierenden Daten auch mit den gewünschten Einheiten übermittelt werden mit denen das Programm im laufenden arbeiten soll. Demzufolge sind auch die Einheiten der Ausgabedaten festgelegt. Wie in Tabelle 6 zu sehen gibt es fünf Einheitensysteme mit denen MSC.Patran arbeitet. Für die Bearbeitung der Fahrzeugtür wurden die in Zeile 2 stehenden Einheiten genutzt.

Tabelle 6. Einheitensystem von MSC.Patran

System of Units	Input							Output		
	Length	Force	Elastic Modulus	Mass	Mass Density	WTMASS Parameter	1 G	Disp	Force	Stress
1	m	N	Pa	kg	kg/m ³	1.0	9.807 m/sec ²	m	N	Pa
2	mm	N	MPa	t or Mg	t/mm ³ or Mg/mm ³	1.0	9807 mm/sec ²	mm	N	MPa
3	ft	lb _f	psf	slug	slug/ft ³	1.0	32.17 ft/sec ²	ft	lb _f	psf
4	in	lb _f	psi	lb _f * sec ² /in	lb _f * sec ² /in ⁴	1.0	386.1 in/sec ²	in	lb _f	psi
5	in	lb _f	psi	lb _f	lb _f /in ³	2.59 * 10 ⁻³	386.1 in/sec ²	in	lb _f	psi

Der Fahrzeugtürdemonstrator wurde als kombiniertes Solid-/Schalenmodell abgebildet. Hierbei wurden für dünnwandige Blechteile Shell- Elemente und für dickwandige Komponenten wie die Scharniere Solid- Elemente verwendet.

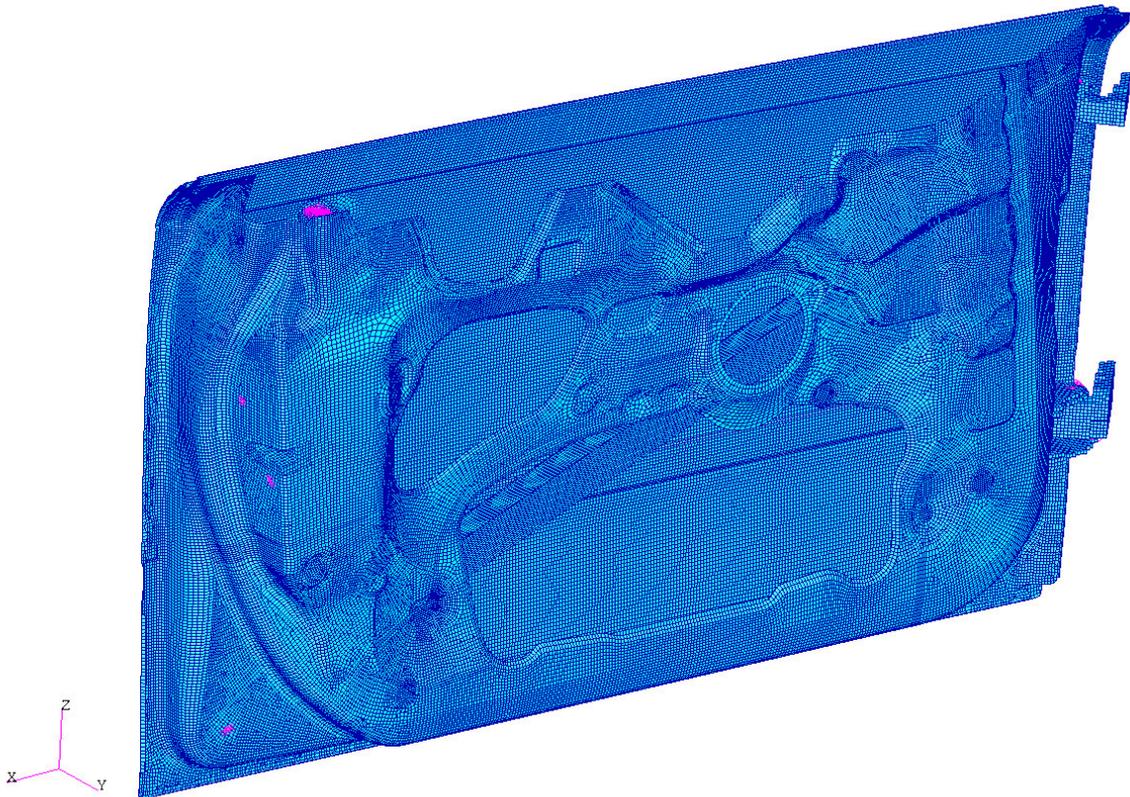


Bild 65. Gesamtes FE-Modell

Die gesamte Tür wurde dabei nach der Funktion in 3 Gruppen unterteilt, welche in Bild 66 dargestellt sind. Dies hat den Vorteil, dass nicht zu bearbeitende Geometrieteile ausgeblendet werden können. Ausschlaggebend für die Gruppeneinteilung waren vor allem die spezifischen Eigenschaften der Türbauteile. Die erste Gruppe ist ganz unten in rot zu sehen und besteht aus dem Außenblech der Tür. In der Mitte ist der Rahmen zu sehen, dabei in orange ein Innenhochdruckumgeformtes Rohr an welches die blau gefärbten Scharniere angeschraubt werden beziehungsweise das Schloss angeschweißt wird. Die dritte und letzte Gruppe ist ganz oben dargestellt und zeigt das Türinnenblech in Tailored Blank-Bauweise.

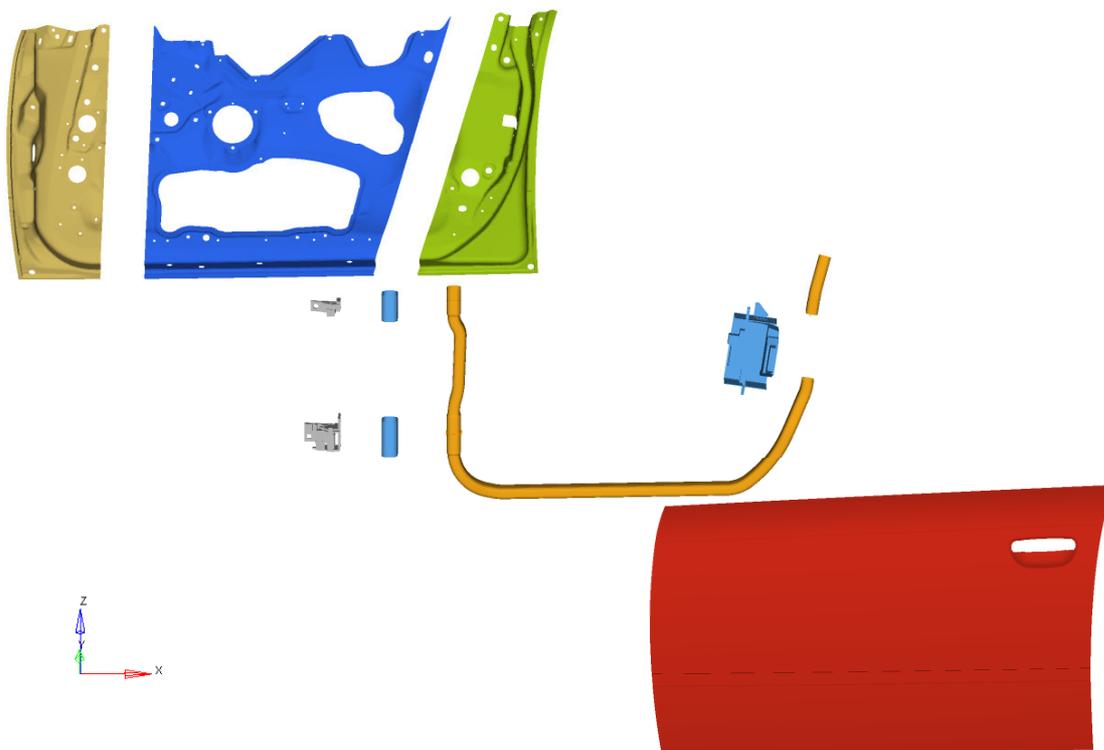


Bild 66. Explosionsdarstellung der Tür nach Gruppen

Die erste und für das Projekt interessanteste Gruppe ist die Außenhaut, welche aus Magnesium gefertigt werden soll. Für diese Geometrie wurde aufgrund der geringen Dicke eine Shell – Vernetzung mit Quad (Viereck) und Tri (Dreieck) Elementen gewählt. Die Dicke von 1,2 mm wurde später über die Zuweisung der Eigenschaften vorgenommen. Bei der Vernetzung mit diesen Elementen war zu beachten, dass bei der Element – Güte – Überprüfung, welche „Aspect Ratio“, „Warp Angle“, „Skew Angle“ und „Taper“ beinhaltet, nur zulässige Fehler auftreten dürfen. Dazu wurden die Standardeinstellung von MSC.Patran genutzt.

Da die Breite 1,11 m beträgt und der Coil aber eine Maximalbreite von 0,6 m, muss eine Schweißnaht berücksichtigt werden, welche im Endzustand durch eine Zierleiste verdeckt wird.

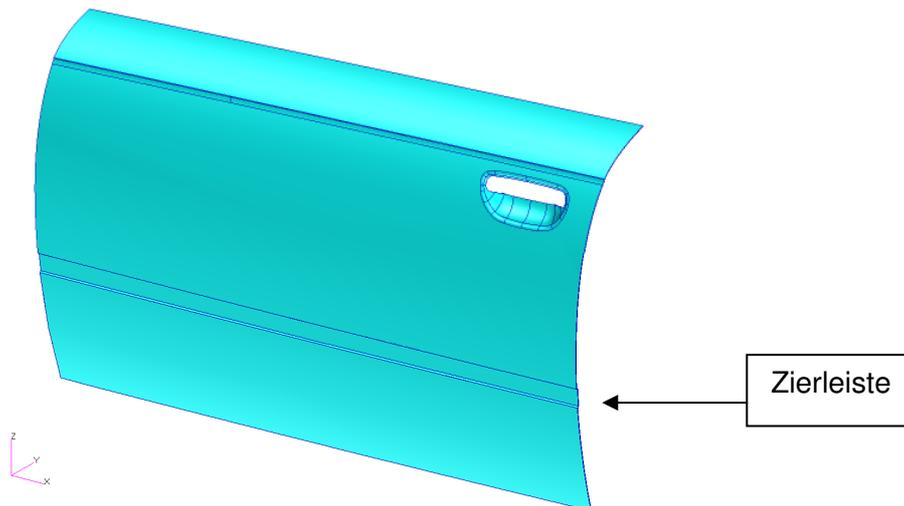


Bild 67. Außenhaut

Die zweite Gruppe bildet der in Bild 68 dargestellte Rahmen. Dieser wurde aufgrund seiner Komplexität in weitere Gruppen unterteilt. Betrachtet wurden dabei die IHU – Teile, das Schloss und der restliche Rahmen als Rohr. An die IHU – Teile werden später die Scharniere angeschraubt. Diese werden, aufgrund ihrer dickwandigen Struktur und sich dadurch einstellenden dreiachsigen Spannungszustand, mit Volumenelementen vernetzt, wodurch eine Dickenangabe entfällt. Die hier entstandenen Hex und Wedge Elemente durften bei der Element – Güte – Überprüfung, welche bei diesen Elementen „Aspect Ratio“, „Edge Angle“, „Face Skew“, „Face Warp“, „Twist“ und „Face Taper“ beinhaltet, ebenfalls die eingestellten Grenzen nicht überschreiten. Zur besseren Geometrienachbildung wurde auch das Schloss

mit diesen Volumenelementen schematisch vernetzt.

Der restliche Rahmen wurde zur Vereinfachung mit drei- und viereckige Schalenelementen vernetzt, welche ihre Dicke von 2,5 mm später über die Eigenschaftszuweisung erhielten.

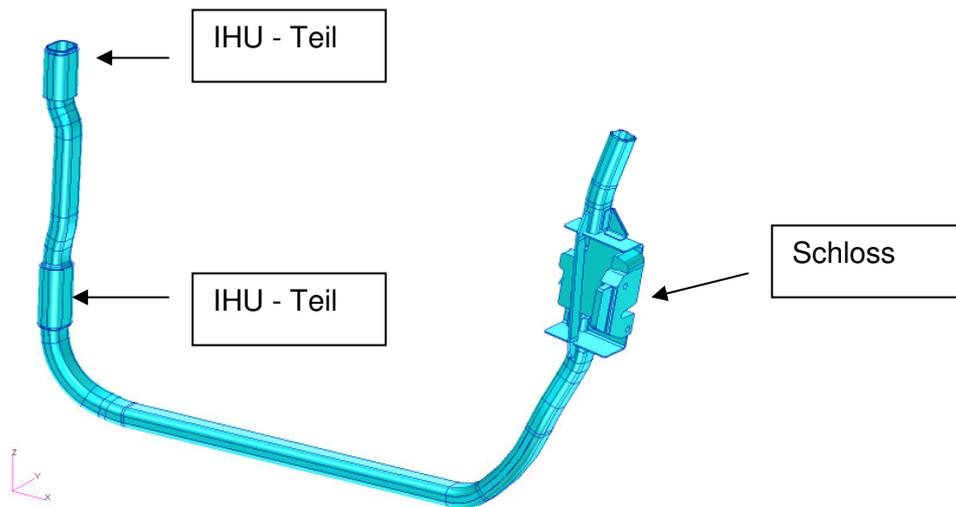


Bild 68. Geometrie des Rahmens

Der nun fertig vernetzte Rahmen, wie in Bild 69 dargestellt, wird zusammengesetzt. Um ein geschlossenes Modell entstehen zu lassen, werden die jeweiligen Knoten der Elemente an den Verbindungsstellen miteinander verbunden.

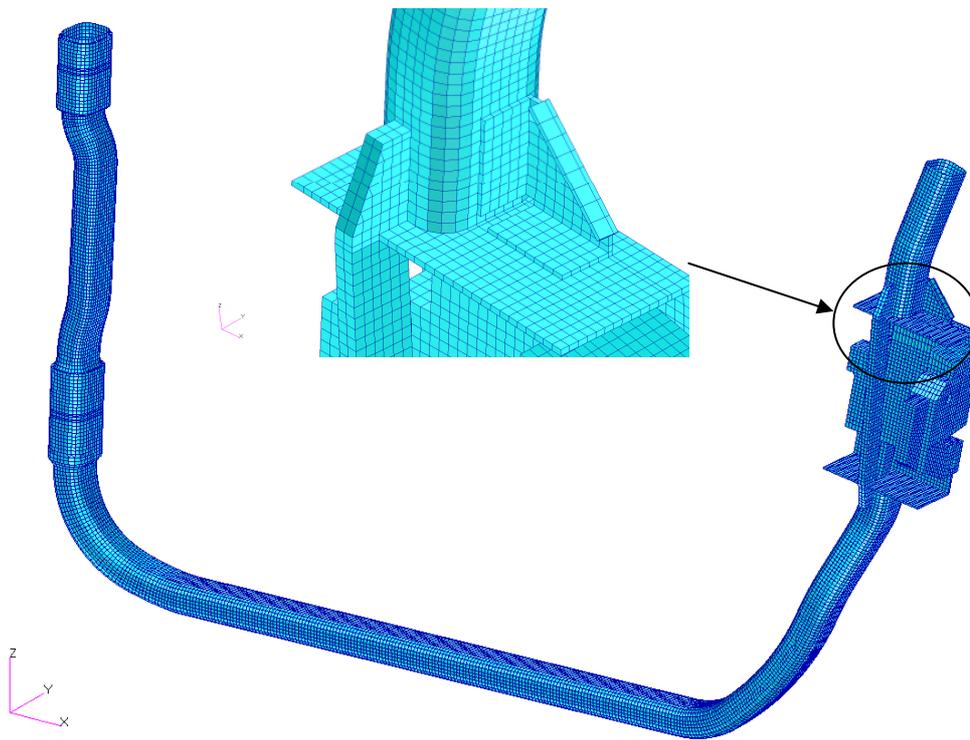


Bild 69. Umsetzung der Geometrie in das FEM-Modell

Die dritte Gruppe bildet das in Bild 70 dargestellte Innenblech der Tür. Dieses wird aufgrund der gewünschten TeMaK – Forderung nach Tailored Blank Bauweise in drei weitere Gruppen (Scharnierseite, Mittelteil und Schlosseite) unterteilt. Die Materialstärken von Scharnierseite 2,0 mm, Mittelteil 1,2 mm und Schlosseite 2,0 mm werden später über die Eigenschaftszuweisung angegeben. Aufgrund der geringen Dicke des Innenblechs, stellt sich ein zweiachsiger Spannungszustand ein, so dass hier eine Vernetzung mit drei- und viereckigen Schalenelementen erfolgte.

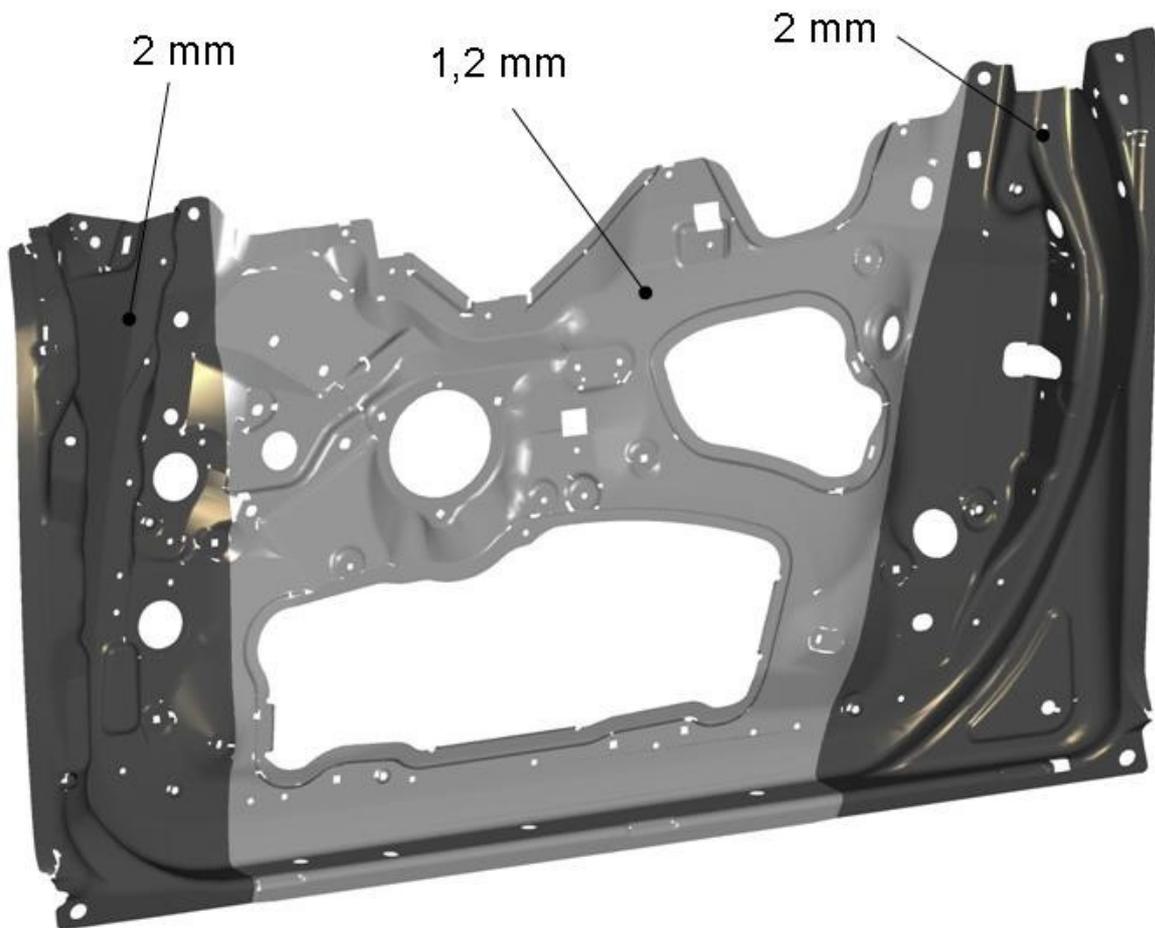


Bild 70. Darstellung der 3 Regionen des Türinnenbleches

Die vierte Gruppe bilden die in Bild 71 und Bild 73 dargestellten Scharniere. Da im Rahmen von TeMaK nur die Fahrzeugtür mit ihren Anbauteilen Außenblech, Innenblech und Rahmen von Bedeutung sind, aber über die Scharniere die Kräfte in die Karosserie geleitet werden, wurden diese stark vereinfacht vernetzt. Hierbei kamen hauptsächlich Hex Elemente zum Einsatz und nur vereinzelt Wedge Elemente. Das primäre Ziel bei der Scharnierversetzung mit Volumenelementen lag nicht bei der genauen Nachbildung der Geometriestruktur sondern bei der Einhaltung der Tragfähigkeit. Somit ergab sich ein Netz wie es in Bild 72 zu sehen ist.

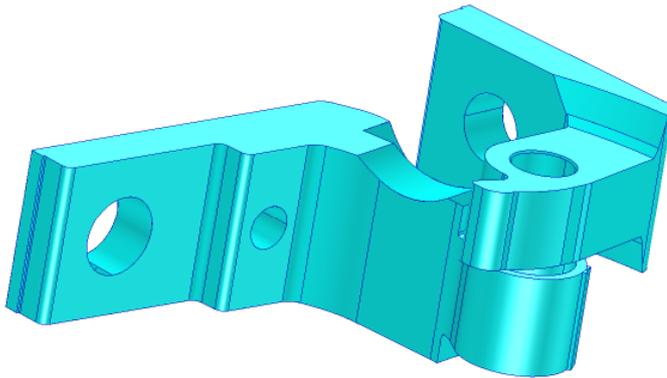


Bild 71. Geometrie des oberen Scharniers

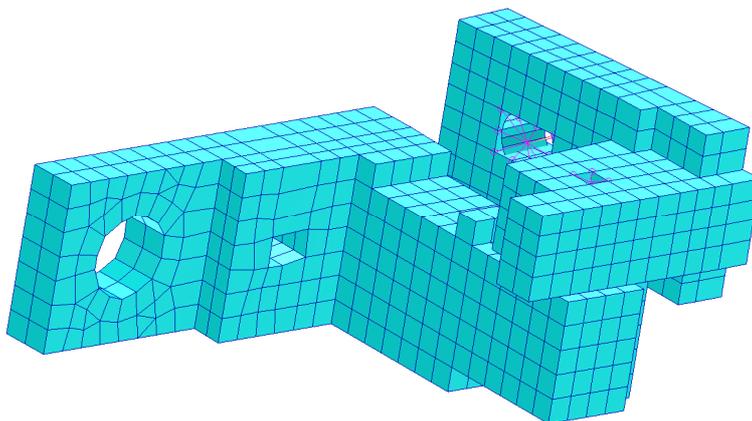


Bild 72. FEM-Netz des oberen Scharniers

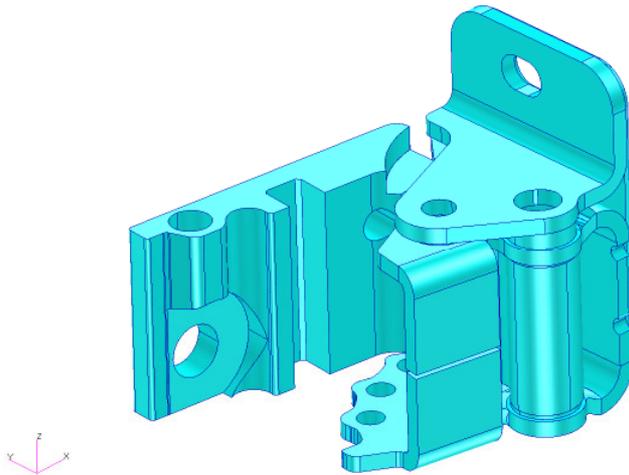


Bild 73. Geometrie des unteren Scharniers

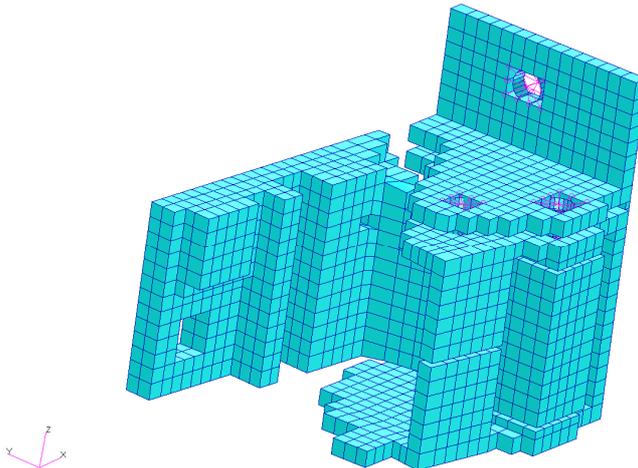


Bild 74. FEM-Netz des unteren Scharniers

Um die Verbindungen von Schrauben und Bolzen am Scharnier bzw. an der Tür zu realisieren wurden MPC's verwendet. MPC steht für „Multi – Point Constraint“ und definiert die Freiheitsgrade eines oder mehrerer Knoten. Als Unterpunkte lassen sich unter anderem verschiedene RBE's (RBE = Rigid Body Element) auswählen, wobei hier RBE2 – Elemente gewählt wurden. Ein RBE2 – Element ist ein unendlich steifes Element, das aus einem zentralen Knoten besteht, an dem alle weiteren Knoten angebunden werden. Beim RBE2 – Element schreibt dieser zentrale Knoten vor, wie sich die angebundenen Knoten verschieben. Daher wird der zentrale Knoten als unabhängiger Knoten und die angebundenen Knoten als abhängige Knoten bezeichnet. Die Verschiebung der abhängigen Knoten setzt sich aus der Verschiebung des unabhängigen Knotens und dem Produkt des Hebelarms zwischen dem Knoten und der Rotation des unabhängigen Knotens zusammen. Dadurch folgt auch, dass die

abhängigen Knoten sich relativ zueinander nicht verschieben und eine steife Verbindung bilden. Dies kann ein Bauteil künstlich versteifen. Auf die abhängigen Knoten, welche auf dem jeweiligen Bauteil liegen, können dabei die gewünschten Freiheitsgrade, maximal sechs, definiert werden. Zwischen den unabhängigen Knoten der RBE's wurde ein Balkenelement erzeugt. Dieses erhält über die Eigenschaftszuweisung die jeweilige Schraubendicke bzw. Bolzendicke.

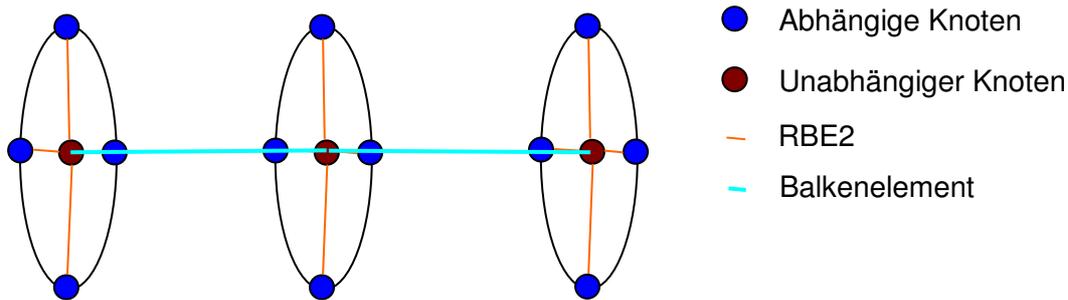


Bild 75. Schematische Darstellung der Schrauben- / Bolzenumsetzung

So ergab sich ein Element wie in Bild 75 schematisch und Bild 76 in der FE-Ansicht dargestellt.

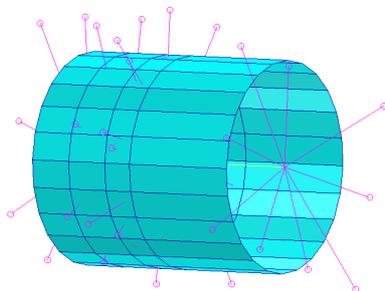


Bild 76. Schrauben- / Bolzenumsetzung in 3D:FullSpan Ansicht

Der nächste Schritt besteht in der Generierung einer festen Verbindung zwischen den einzelnen Modellen.

An den Kontaktstellen sind momentan doppelte Knoten zu finden, welche nicht miteinander verbunden sind. Durch Äquivalenz der Knoten wird ein Knoten jedes Knotenpaares gelöscht, wodurch die Elemente beider Modelle gemeinsam auf einen Knoten zurückgreifen und dadurch strukturell verbunden werden.

Die Verschraubung des Rahmens mit dem Türinnenblech und den Scharnieren erfolgt mit der oben beschriebenen Weise der RBE's (siehe Bild 77 und Bild 78).

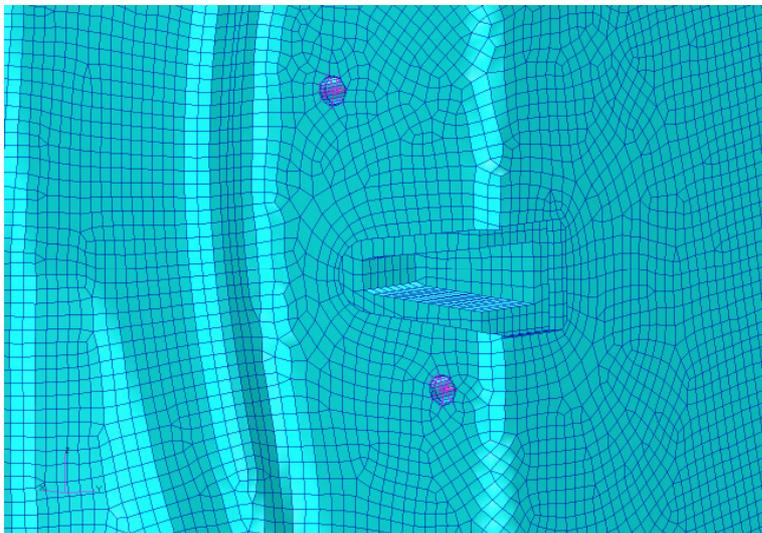


Bild 77. Verbindung von Innenblech und Rahmen am Schloss mittels RBE

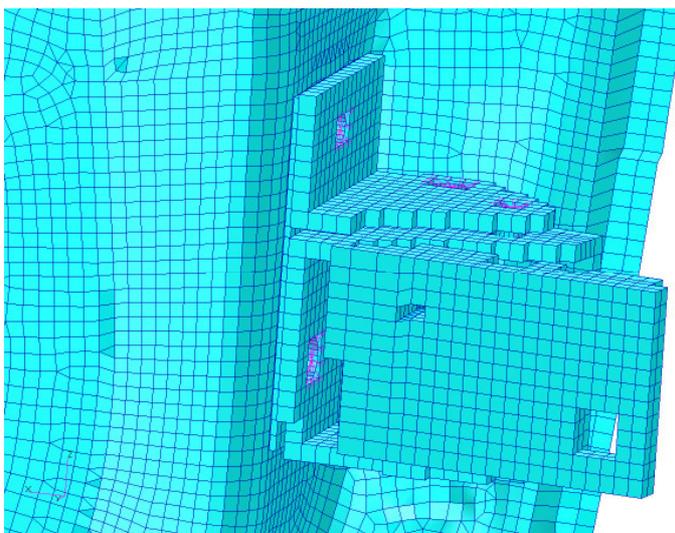


Bild 78. Verbindung von Rahmen, Innenblech und Scharnier mittels RBE

Die Verbindung von Innen- und Außenblech soll technisch durch einen Falz realisiert werden. Dem gerecht zu werden, wurden die Knoten der am Rand liegenden Elemente miteinander verbunden, so dass die Elemente der Außenhaut und die Elemente des Innenbleches auf gemeinsame Knoten zurückgreifen.

Somit ergibt sich die fertig vernetzte Tür mit ihren Anbauteilen wie sie in Bild 65 dargestellt ist.

1.2.5.2 Lagerung

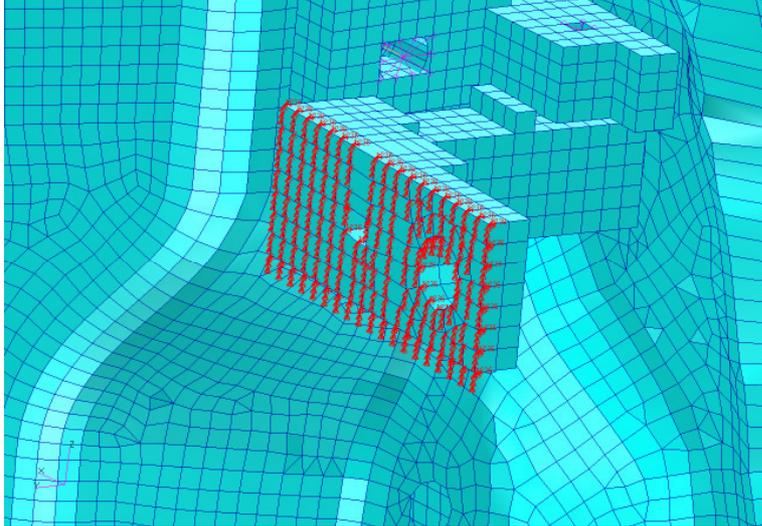


Bild 79. Festlager am oberen Scharnier

Die Lagerung des Modells erfolgte an den, für die Berechnung zu Hilfe genommenen, Scharnieren. In der Realität werden diese angeschraubt und somit wurde die jeweiligen Auflageflächen als Festlager definiert, wie in Bild 79 zu sehen.

1.2.5.3 Lastannahmen

Prinzipiell gibt es 3 Lastfälle, welche durch eine ständig wirkende Gravitationskraft auf das Bauteil ergänzt werden. Diese wird durch eine Vertikalbeschleunigung aller Knoten in z-Richtung mit $9,81 \text{ m/s}^2$ berücksichtigt. Da die Dichte in der Materialbeschreibung definiert wurde, erfolgt die Berücksichtigung der Kraft automatisch.

Zusätzlich kommen die Kräfte der 3 Betriebslastfälle hinzu. Dabei erfolgt die Lasteinleitung für jeden Lastfall spezifisch über ausgewählte Knoten. Die Darstellung erfolgt dabei nur der besseren Visualisierung wegen mit auf einen Knoten wirkenden Kräften.

In Bild 80 sind die drei unterschiedlichen Lastfälle mit ihren spezifischen Kraftgrößen dargestellt. Es handelt sich dabei um die Lastfälle Türabsenkung am Rahmen mit $F = 500 \text{ N}$ in negative z-Richtung, Türabsenkung am Außenblech mit $F = 400 \text{ N}$ in negative z-Richtung und Überöffnen mit $F = 200 \text{ N}$ in negative y-Richtung.

Ein vierter üblicher Lastfall, nämlich die Fensterrahmensteifigkeit entfällt, da der Rahmen nicht Bestandteil der Betrachtung ist.

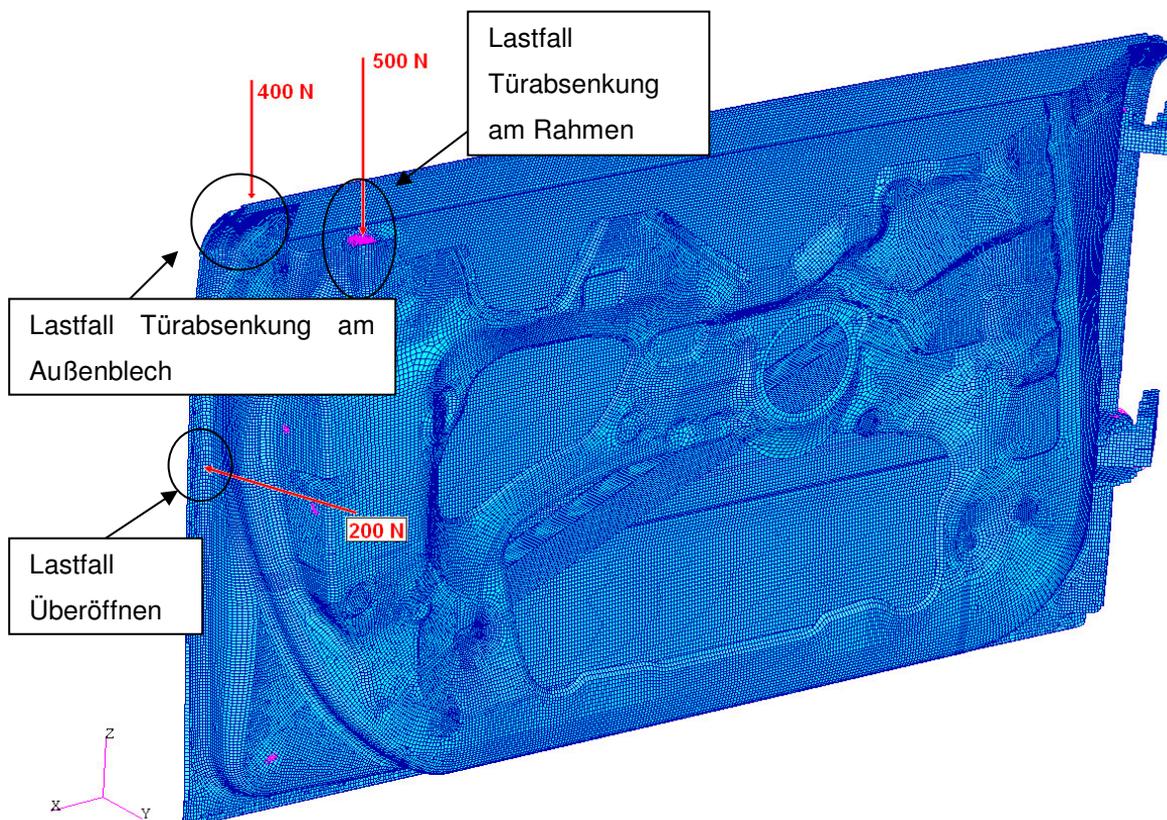


Bild 80. Vereinfachte Übersicht der Krafteinleitungen

1.2.5.4 Materialwerte

Bei der nun folgenden Eingabe der Daten für das Material sind die unter Tabelle 6 in Zeile 2 stehenden Einheiten zu beachten. Die Dichte wird also nicht wie üblich in Gramm je Kubikzentimeter sondern in Tonnen je Kubikmillimeter angegeben. Des Weiteren wird für die vollständige Materialdefinition neben der Dichte, der E – Modul und die Querkontraktion benötigt.

Eigenschaften	Einheit	Stahl	Aluminium	Magnesium AZ31
Dichte ρ	g/cm ³	7,86	2,7	1,74
E – Modul	GPa	210	72	45
Querkontraktion		0,3	0,33	0,35

Tabelle 7. Materialeigenschaften der Fahrzeugtür

Bei der Einstellung der Elementeigenschaften erfolgt nun die Angabe des zuvor definierten Materials, bei Schalenelementen zusätzlich die Dickenangabe und bei Balkenelementen wird der zugehörige Querschnitt ausgewählt. Zur Nachbildung der Schrauben bzw. Bolzen wurde für das jeweilige Balkenelement ein Kreisquerschnitt mit definiertem Radius angenommen.

Wie bereits in Tabelle 7 zu erkennen, wurde eine reine Stahltür, eine reine Aluminiumtür sowie eine Magnesiumtür, kombiniert mit Aluminium, definiert. Wenn im Weiteren von der Magnesiumtür die Rede ist, ist darauf zu achten, dass nur das Außenblech, das Innenblech und der Rahmen aus Magnesium sind. Schrauben und Bolzen sowie die Scharniere sind aus Aluminium, um so eine – unter werkstofflicher Sicht – realitätsnahe Tür zu verwirklichen. Für die Auswertung und den besseren Vergleich wurde außerdem eine reine Magnesiumtür definiert.

Im nächsten Schritt wurden die Randbedingungen festgelegt. Diese bestehen im vorliegendem Fall aus den drei Gruppen „Eigengewicht“, „Lager“ und „Lastfall“.

Da in der Realität die Scharniere an die Karosserie angeschraubt sind, wurden diese als Festlager definiert. In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ist die Lagerung am oberen Scharnier dargestellt.

Für den Fahrzeugtürdemonstrator soll der Werkstoff AZ31 aus der Reihe der Magnesiumknetlegierungen eingesetzt werden. Der für die Berechnung verwendete Seitenaufprallschutz besteht, ebenfalls wie die Scharniere und Schrauben, aus Aluminium.

Diese haben die in Tabelle 8 dargestellten Materialkennwerte.

Material	E-Modul	Dichte	Streckgrenze	Zugfestigkeit
	[GPa]	[g/cm³]	[MPa]	[MPa]
AZ31	45	1,74	150 ... 220	240 ... 290
Aluminium (AlMg5Mn)	72	2,7	159 – 280	310 – 370

Tabelle 8. Materialkennwerte

Dabei soll geprüft werden ob die auftretenden Spannungen über der jeweiligen Streckgrenze liegen und ob dies mit vertretbarem Aufwand behoben werden kann.

1.2.6 Auswertung der Ergebnisse der FE-Berechnung

1.2.6.1 Auswertemethodik

Im Folgenden werden die definierten Lastfälle, auf Grundlage des linear – elastischen Berechnungsverfahrens, speziell für die Magnesiumtür, welche mit Aluminiumschrauben und –scharnieren berechnet wurde, näher betrachtet, bewertet und diskutiert. Die Scharniere und Schrauben wurden jedoch bei der Auswertung nicht betrachtet, da diese kein Bestandteil des TeMaK – Projektes sind. Diese Teile dienten lediglich zum Zusammenbau und berechnen der Tür, damit diese so realitätsnah wie möglich dargestellt wird.

Um einen ersten Überblick über die Verschiebungen und Spannungen des jeweiligen Lastfalles zu bekommen, wird kurz auf die komplette Tür eingegangen. Im Weiteren werden die Einzelteile näher untersucht, bewertet und an kritischen Stellen Verbesserungsvorschläge diskutiert.

Bei dem hier vorliegenden Fahrzeugtürdemonstrator aus Magnesium ist besonders die geringe Streckgrenze kritisch zu betrachten. Hohen Kräften und Momenten ist mit Geometrieänderungen, gegenüber einer Stahl- bzw. Aluminiumtür, entgegenzuwirken. Diese wurden speziell im Scharnierbereich des Innenbleches vollzogen, indem dieser Bereich von 2 mm auf 2,5 mm aufgedickt wurde. Um eine sichere Kraftübertragung über die angeschraubten Scharniere in die Karosserie zu gewährleisten, wurde bei allen Lastfällen eine Verschraubung durch den kompletten Rahmen als sinnvolle Alternative für die Berechnung gewählt, um so, durch die höhere Versteifung in diesem Bereich, das Innenblech zu entlasten.

Die Spannungsauswertung erfolgt auf Basis von an den Bauteilgrenzen (Property) gemittelten Vergleichspannungen nach von Mises.

1.2.6.2 Lastfall Türabsenkung am Rahmen

Dieser Lastfall wird in der Automobilindustrie als Wichtigster angesehen. Die Kraft, hier 500 N, wird am Rahmen eingeleitet (siehe Bild 81) und stellt zugleich die höchst ertragbare Last, im Vergleich zu den beiden anderen Lastfällen, dar.

Bei dem hier vorliegenden Lastfall ist besonders der Scharnierbereich des Innenbleches hoch beansprucht und wurde für die Kraftanforderungserfüllung, wie bereits erwähnt, von 2 mm auf 2,5 mm aufgedickt.

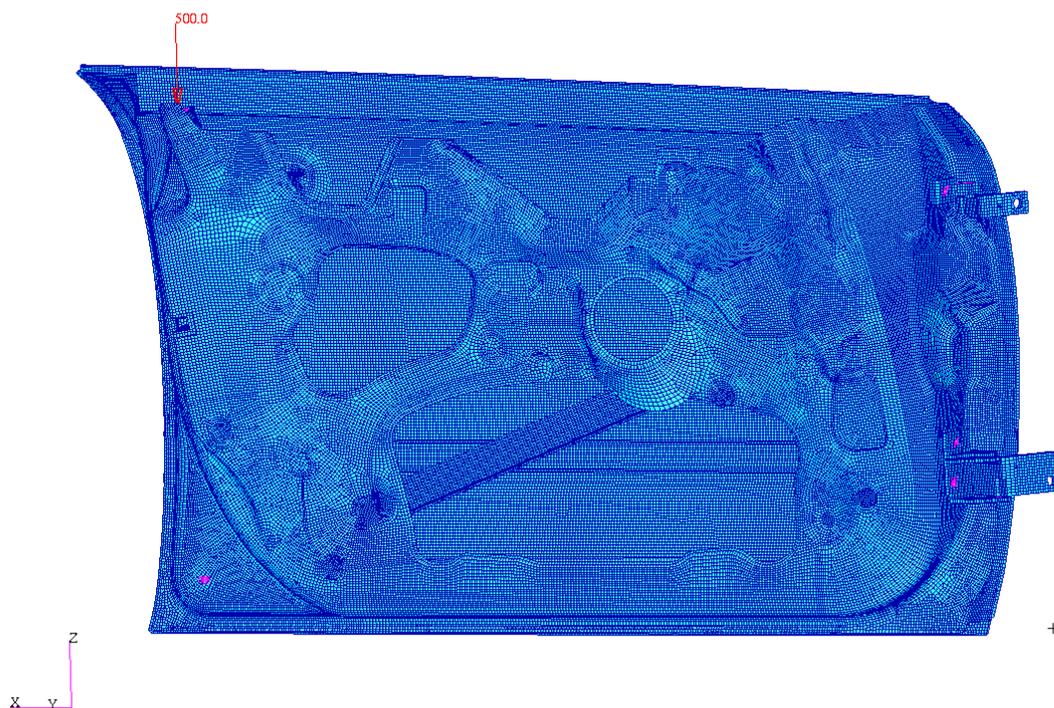


Bild 81. Krafteinleitung für den Lastfall Türabsenkung am Rahmen

Das Außenblech weist eine maximale Spannung von 88,38 MPa bei einer Verschiebung von 17,77 mm auf. Die Verschiebung ist besonders in der Nähe der Krafteinleitung, wie in Bild 82 zu sehen, am größten. In Bild 84 ist die Von-Mises-Vergleichsspannung über das Außenblech zu sehen.

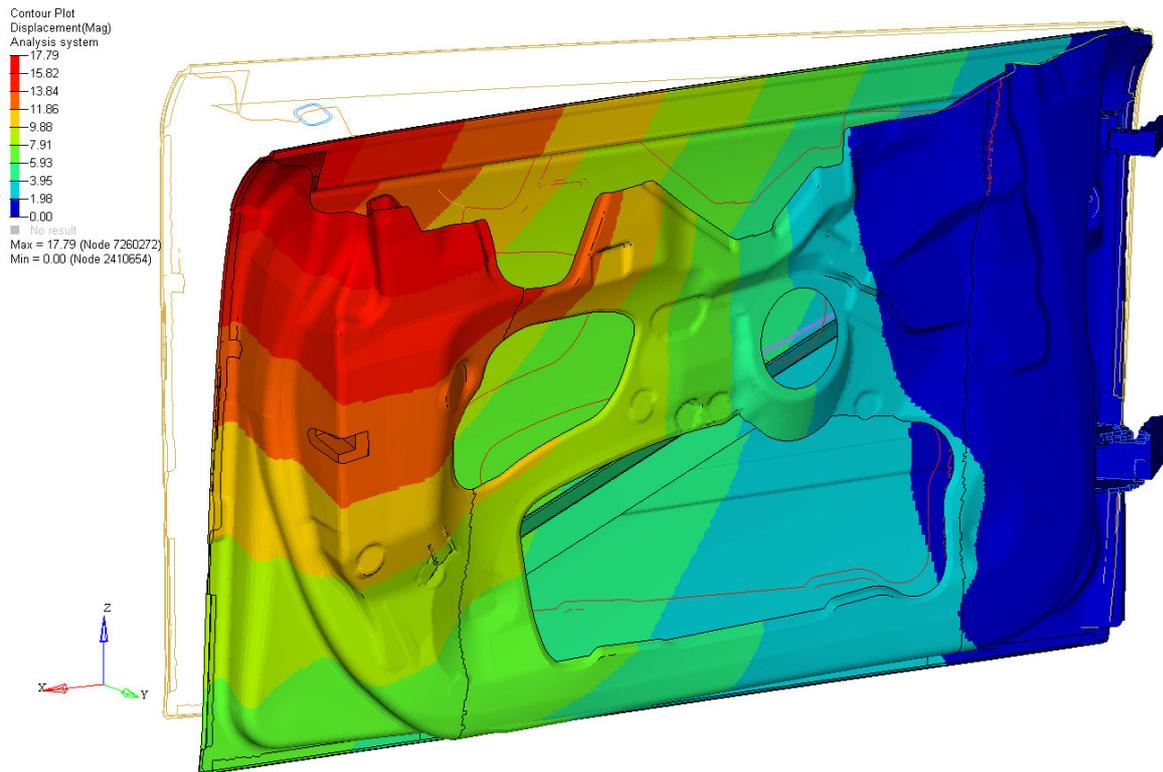


Bild 82. Verschiebung der gesamten Tür beim Lastfall Türabsenkung am Rahmen

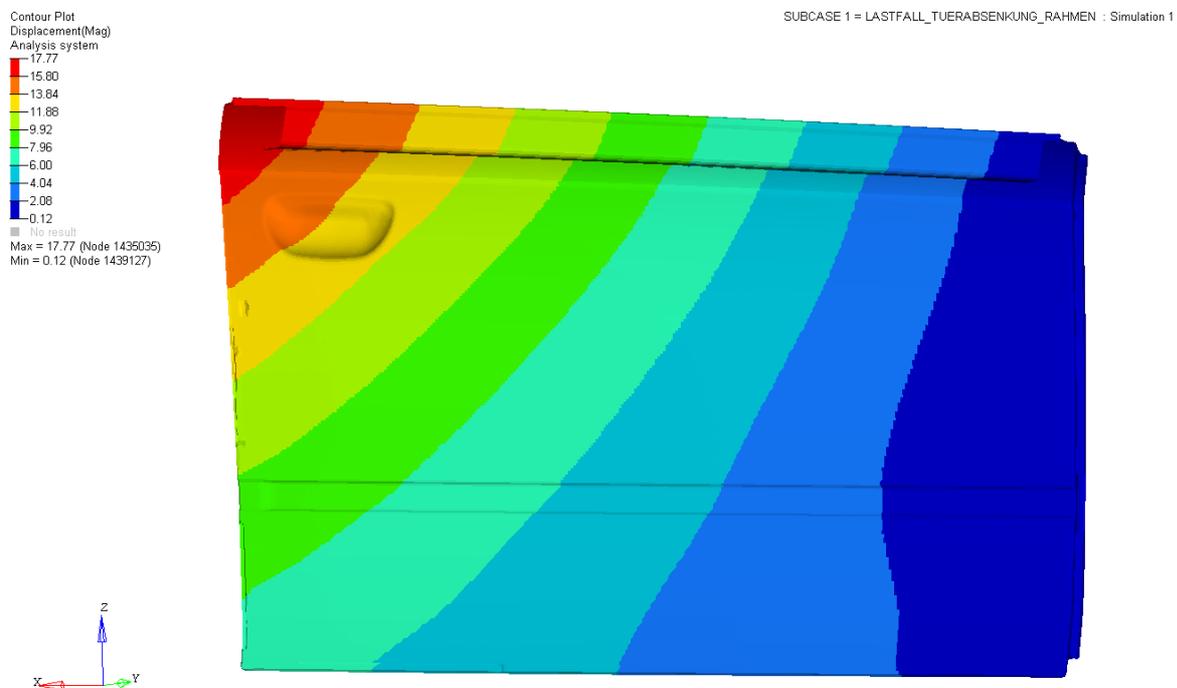


Bild 83. Verschiebung Außenblech

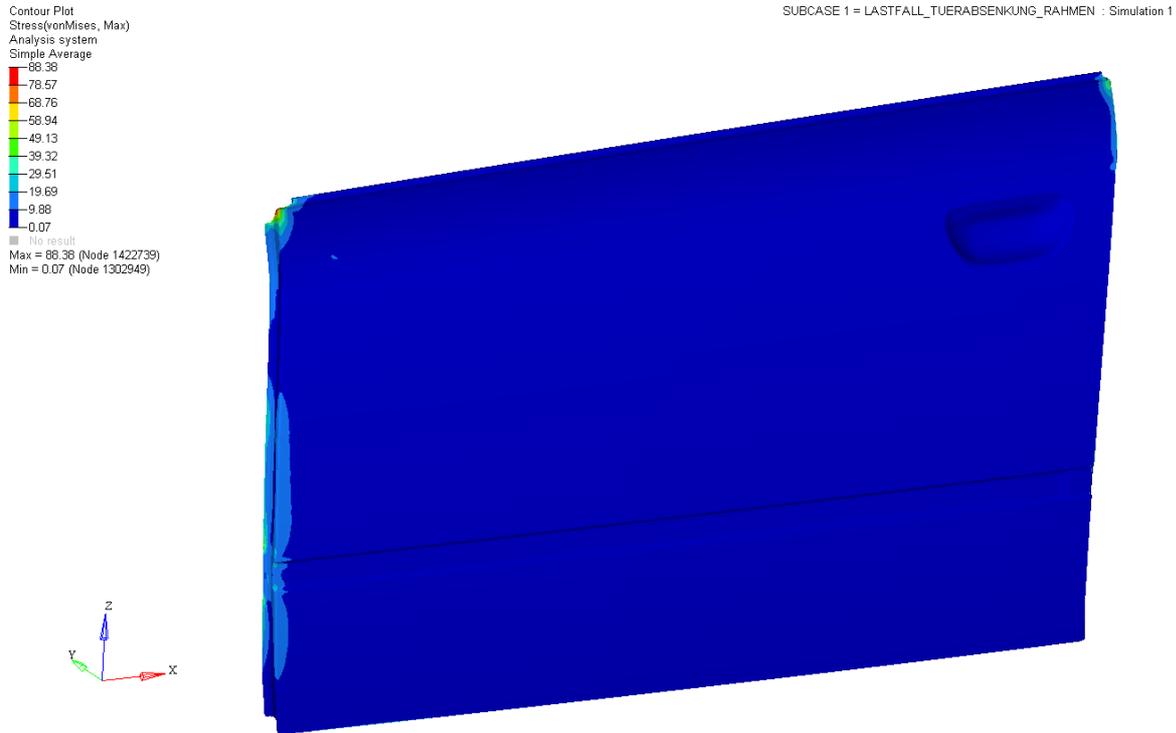


Bild 84. Von-Mises-Vergleichsspannung im Außenblech

Der Schlossbereich des Innenbleches sowie das Mittelteil sind einer geringen Spannung ausgesetzt. Das Mittelteil weist bei einer maximalen Verschiebung von 14,48 mm (siehe Bild 85) eine Spannung von 65,03 MPa auf (siehe Bild 86) und der Schlossbereich bei einer 17,79 mm großen Verschiebung (siehe Bild 87) eine Spannung von 52,64 MPa (siehe Bild 88).

Contour Plot
 Displacement(Mag)
 Analysis system
 = 14.48
 12.92
 11.36
 9.80
 8.24
 6.68
 5.12
 3.55
 1.99
 0.43
 No result
 Max = 14.48 (Node 7320192)
 Min = 0.43 (Node 7271375)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_RAHMEN : Simulation 1

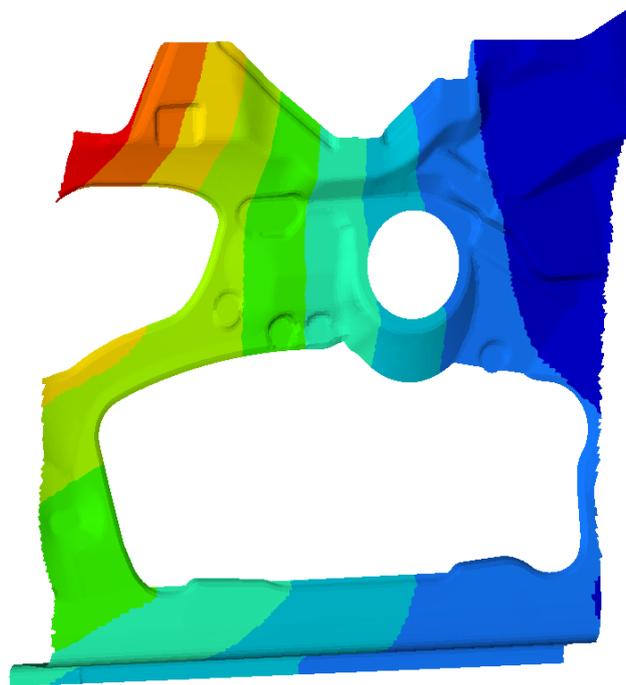
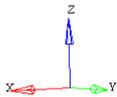


Bild 85. Verschiebung Innenblech-Mitte

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max)
 Analysis system
 Simple Average
 = 65.03
 57.84
 50.64
 43.45
 36.26
 29.06
 21.87
 14.68
 7.49
 0.29
 No result
 Max = 65.03 (Node 7232507)
 Min = 0.29 (Node 7270185)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_RAHMEN : Simulation 1

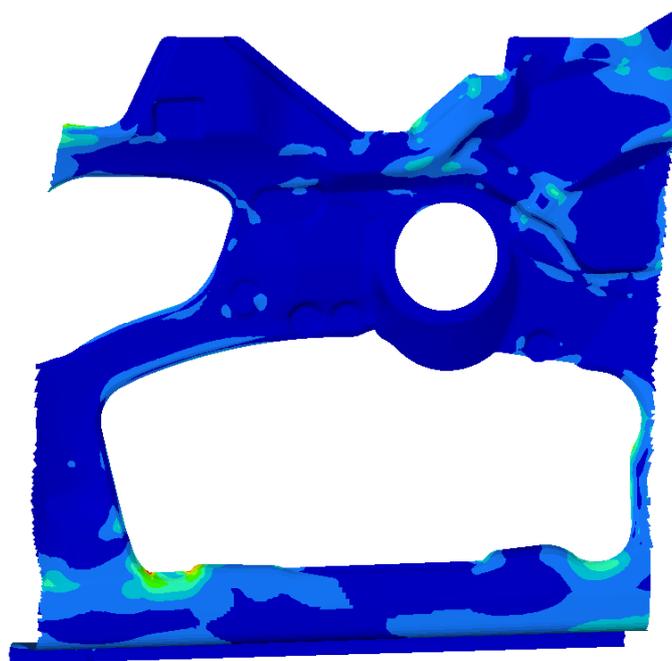
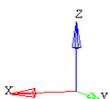


Bild 86. Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Mitte

Contour Plot
 Displacement(Mag)
 Analysis system
 -17.79
 16.41
 15.04
 13.66
 12.28
 10.90
 9.52
 8.15
 6.77
 5.39
 No result
 Max = 17.79 (Node 7260272)
 Min = 5.39 (Node 1306201)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_RAHMEN : Simulation 1

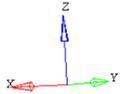


Bild 87. Verschiebung Innenblech-Schloss

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max)
 Analysis system
 Simple Average
 -52.64
 46.79
 40.94
 35.10
 29.25
 23.40
 17.55
 11.70
 5.85
 0.00
 No result
 Max = 52.64 (Node 7295998)
 Min = 0.00 (Node 7257508)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_RAHMEN : Simulation 1

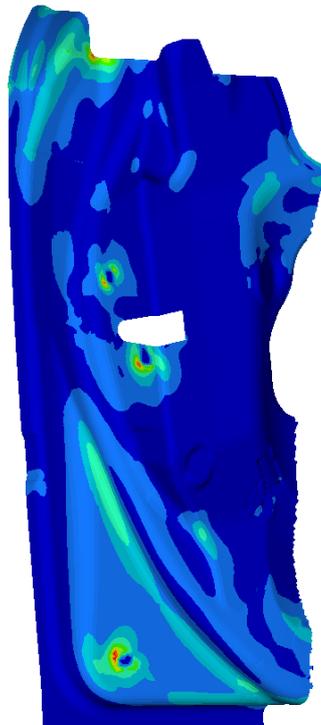
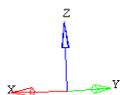


Bild 88. Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Schloss

Kritisch dagegen ist der Scharnierbereich. Obwohl es hier nur zu einer minimalen Verschiebung von 2,27 mm (siehe Bild 89) kommt, sind maximale Spannungen von bis zu 215,43 MPa (siehe Bild 90) vorzufinden.

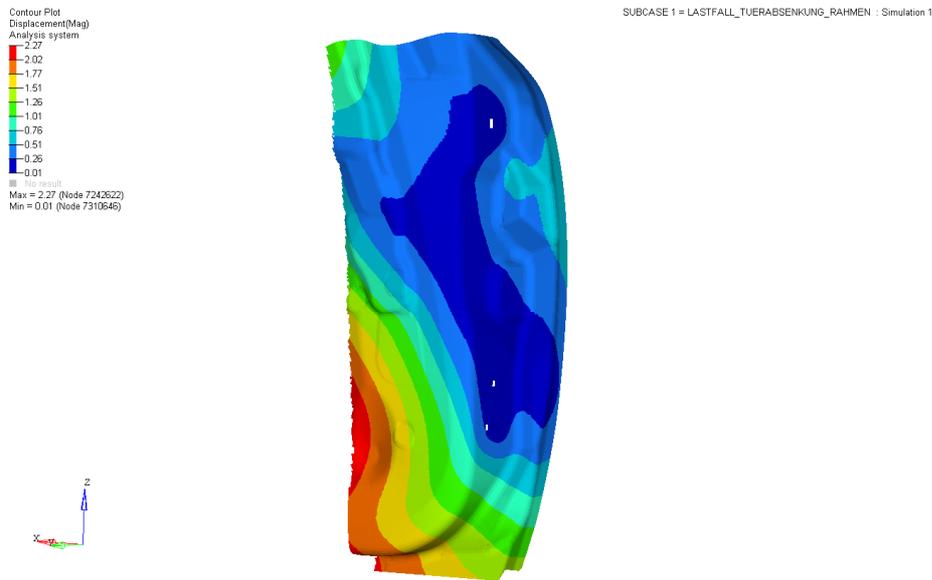


Bild 89. Verschiebung Innenblech-Scharnier

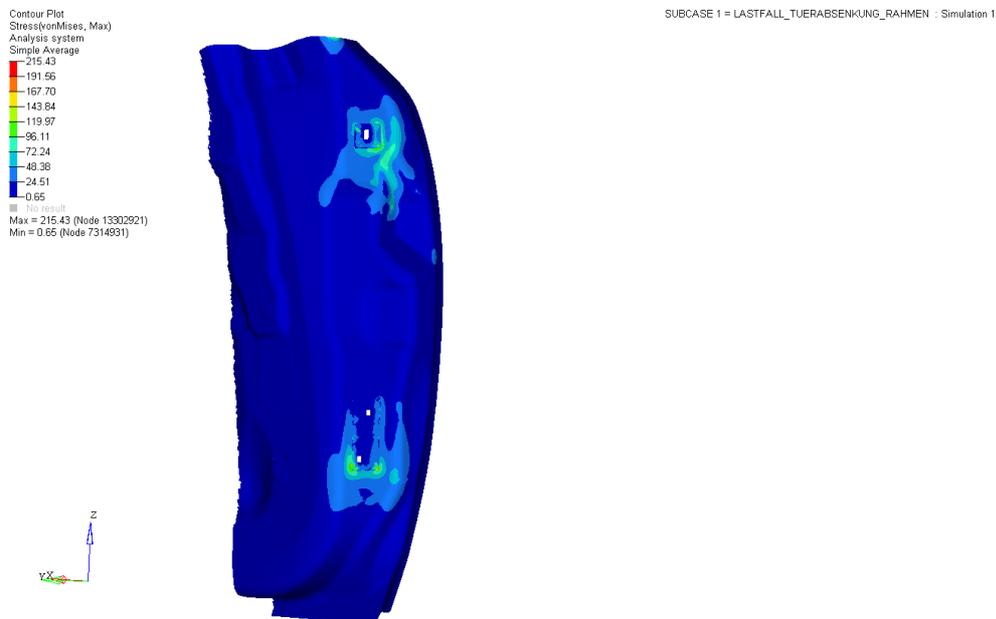


Bild 90. Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Scharnier

Der Seitenaufprallschutz verschiebt sich um 7,73 mm (siehe Bild 91) bei einer Spannung von 113,98 MPa (siehe Bild 92).

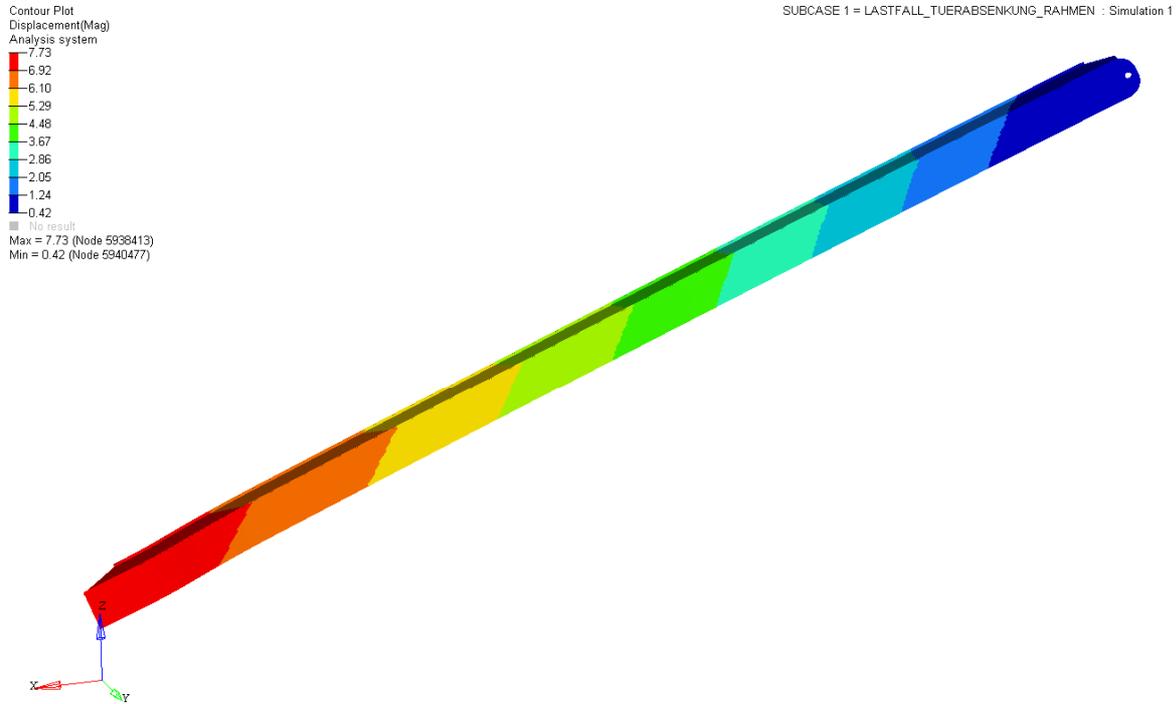


Bild 91. Verschiebung Seitenaufprallschutz

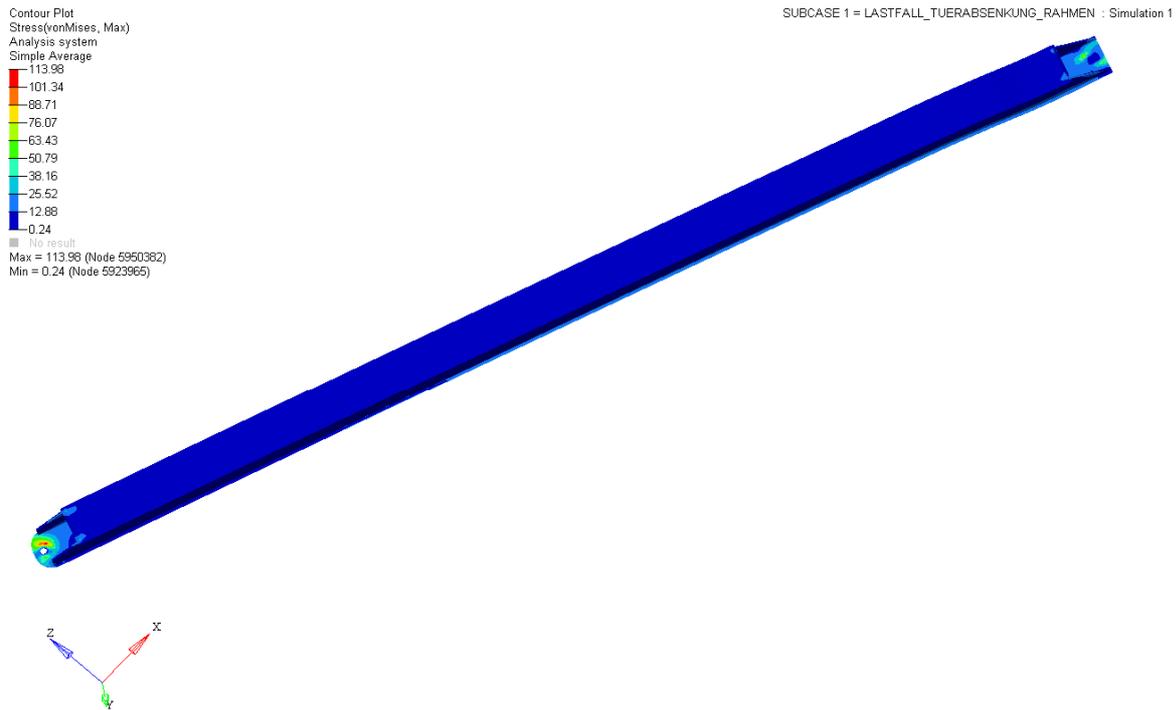


Bild 92. Von-Mises-Vergleichsspannung im Seitenaufprallschutz

Der Rahmen, als tragendes Element der Tür, verschiebt sich maximal um 17,07 mm (siehe Bild 93) und ist einer maximalen Spannung von 90,56 MPa (siehe Bild 94) ausgesetzt.

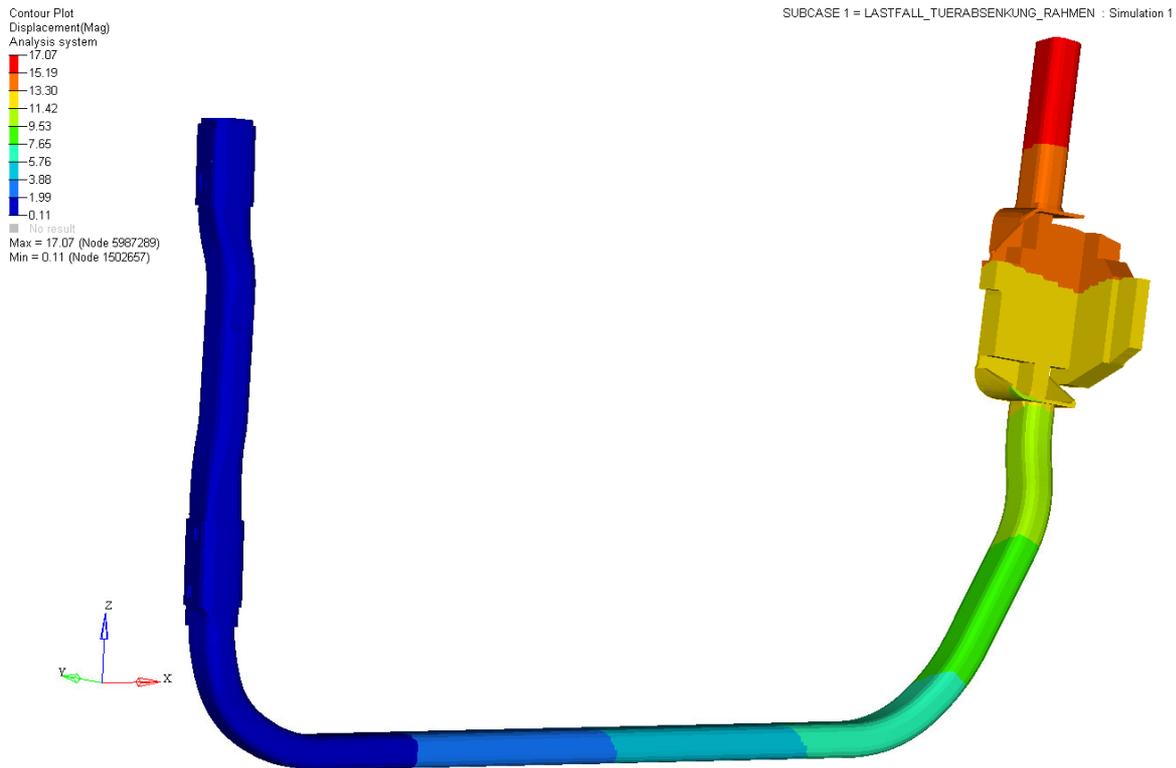


Bild 93. Verschiebung des Rahmens

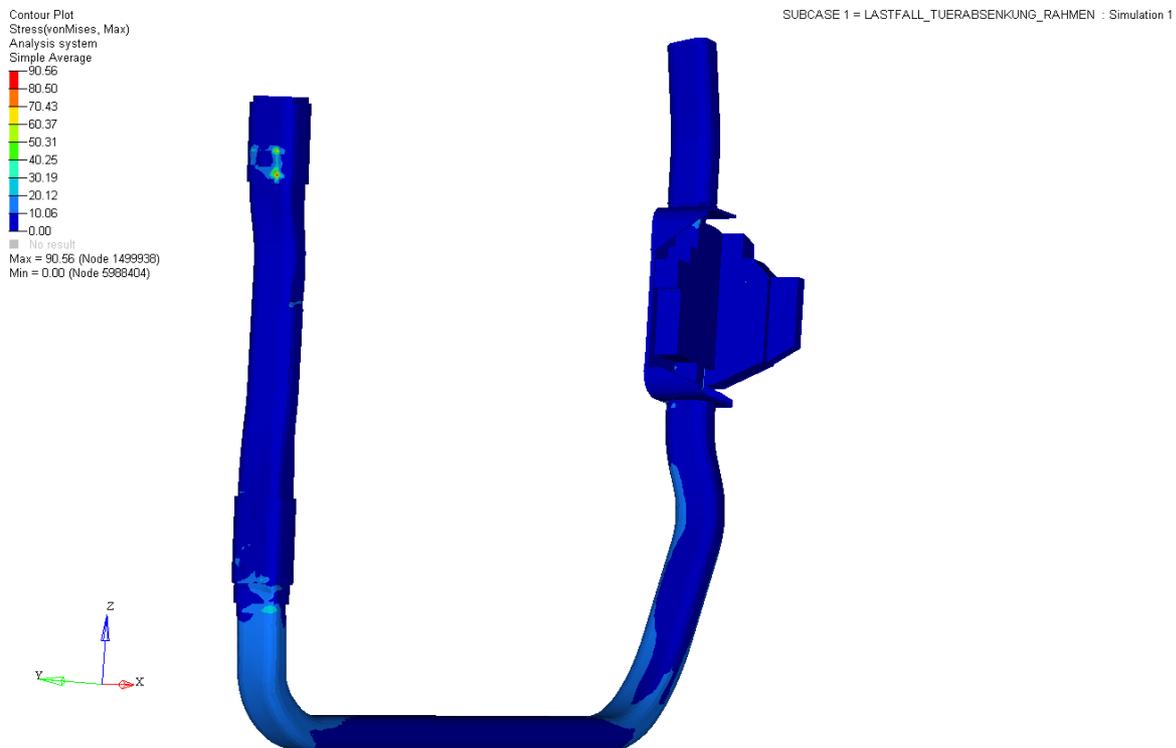


Bild 94. Von-Mises-Vergleichsspannung im Rahmen

In Tabelle 9 sind die eben diskutierten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst dargestellt mit Angabe der jeweiligen Bauteildicke.

		Lastfall-Türabsenkung Rahmen
Außenhaut (d = 1,2 mm)	Verschiebung [mm]	17,77
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	88,38
Innenblech Mitte (d = 1,2 mm)	Verschiebung [mm]	14,48
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	65,03
Innenblech Scharnier (d = 2,5 mm)	Verschiebung [mm]	2,27
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	215,43
Innenblech Schloss (d = 2 mm)	Verschiebung [mm]	17,79
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	52,64
Rahmen (d = 2,5 mm)	Verschiebung [mm]	17,07
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	90,56
Seitenaufprall	Verschiebung [mm]	7,73
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	113,98

Tabelle 9. Auswertung bezüglich Krafterleitung in Rahmen (F = 500 N)

1.2.6.3 Lastfall Türabsenkung am Außenblech

Bei dem hier vorliegenden Lastfall sind besonders das Außenblech und der Schlossbereich des Innenbleches gefährdet. Um ein Materialversagen zu verhindern, ist die maximal zulässige Kraft von 400 N nicht zu überschreiten. Diese wird, wie in Bild 95 zu sehen, am oberen Rand über das Außenblech in den Demonstrator eingeleitet.

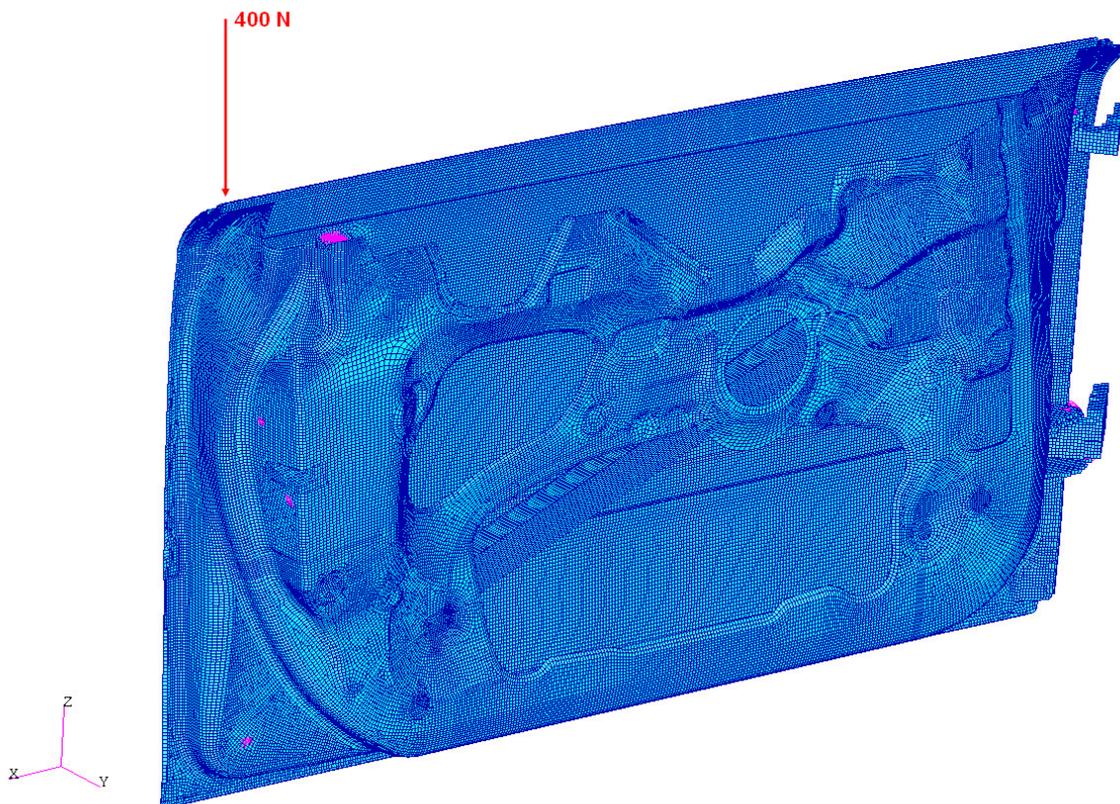


Bild 95. Kräfteinleitung für den Lastfall Türabsenkung am Außenblech

Das Außenblech muss eine maximale Spannung von 215,34 MPa (siehe Bild 98) bei einer Verschiebung von 13,92 mm (siehe Bild 97) ertragen.

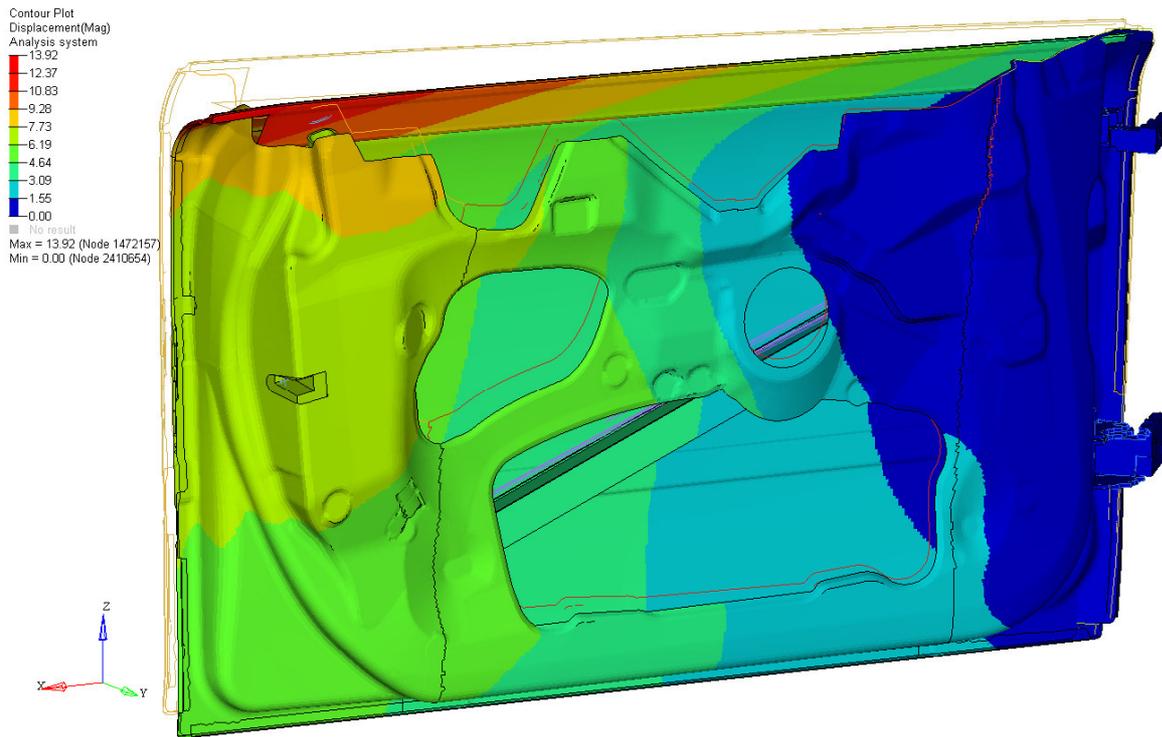


Bild 96. Verschiebung der Tür beim Lastfall Türabsenkung am Außenblech

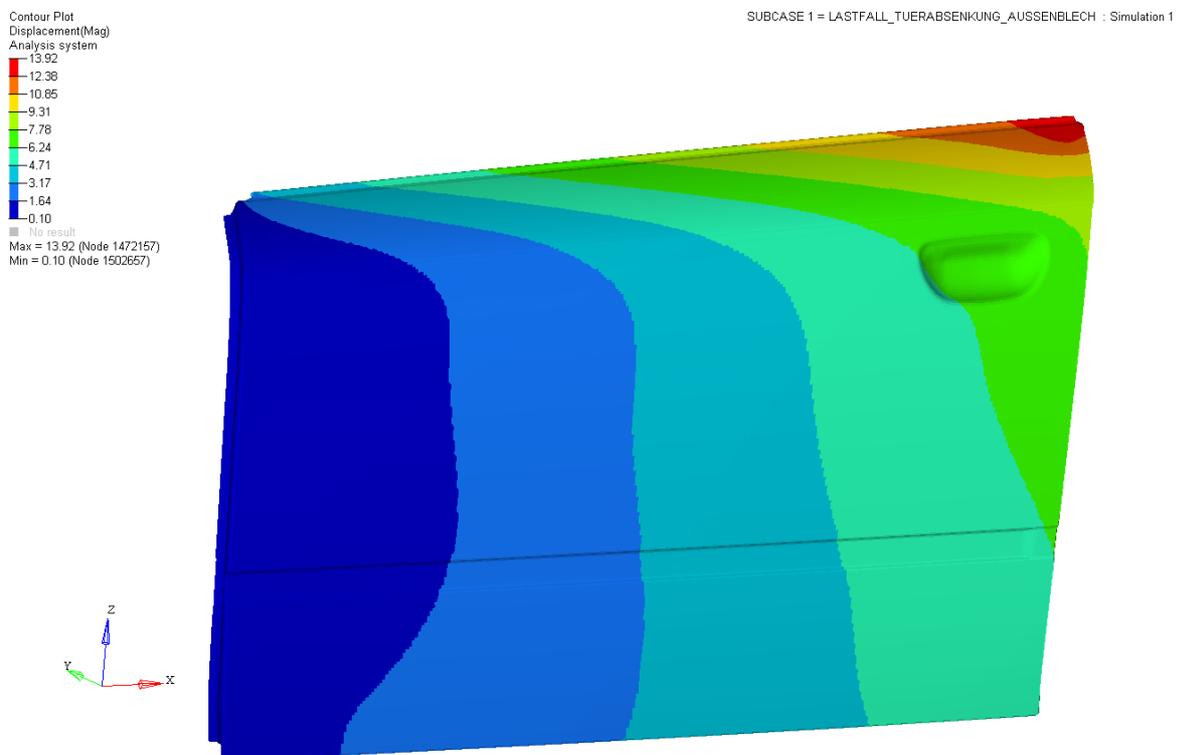


Bild 97. Verschiebung Außenblech

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max)
 Analysis system
 Simple Average
 -215.34
 -191.42
 -167.51
 -143.59
 -119.67
 -95.75
 -71.84
 -47.92
 -24.00
 -0.08
 ■ No result
 Max = 215.34 (Node 1421615)
 Min = 0.08 (Node 1302948)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_AUSSENBLECH : Simulation 1

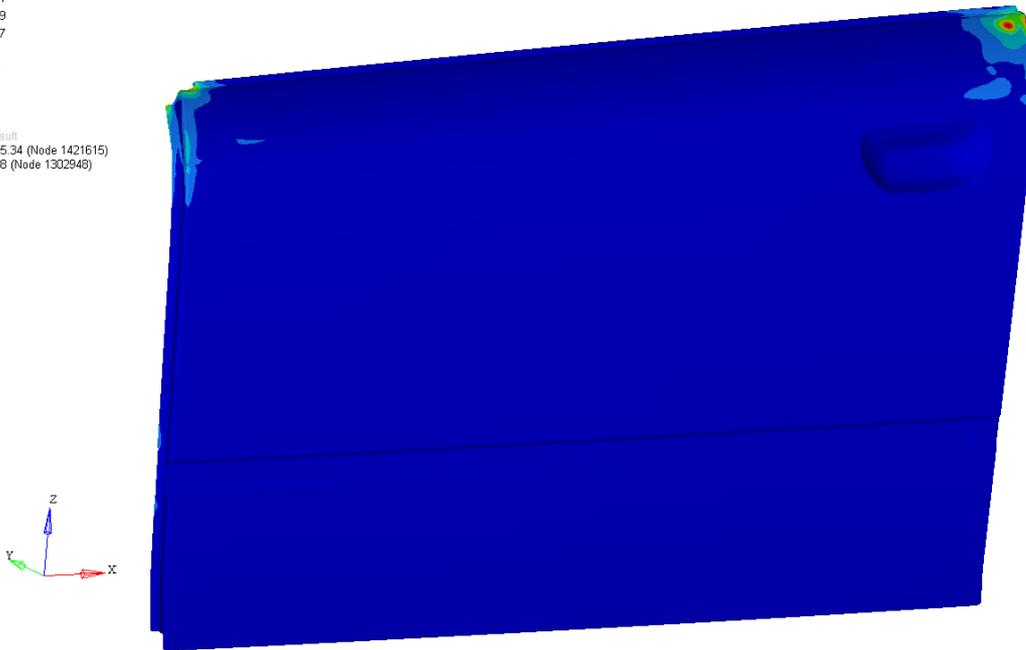


Bild 98. Von-Mises-Vergleichsspannung im Außenblech

Der Schlossbereich des Innenbleches mit seiner ebenfalls hohen Spannung von 211,62 MPa (siehe Bild 100) hat eine große Verschiebung von 13,15 mm (siehe Bild 99) zur Folge.

Contour Plot
 Displacement(Mag)
 Analysis system
 Simple Average
 13.15
 12.19
 11.24
 10.28
 9.32
 8.37
 7.41
 6.45
 5.50
 4.54
 No result
 Max = 13.15 (Node 7300140)
 Min = 4.54 (Node 1306201)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_AUSSENBLECH : Simulation 1

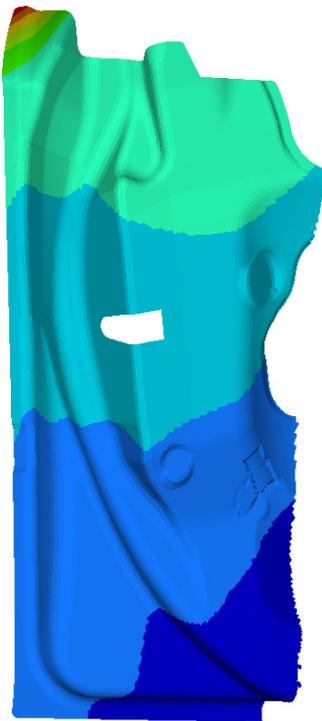
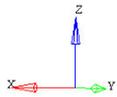


Bild 99. Verschiebung Innenblech-Schloss

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max)
 Analysis system
 Simple Average
 211.62
 188.11
 164.60
 141.08
 117.57
 94.06
 70.54
 47.03
 23.51
 0.00
 No result
 Max = 211.62 (Node 7292508)
 Min = 0.00 (Node 7257508)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_AUSSENBLECH : Simulation 1

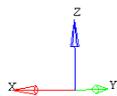


Bild 100. Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Schloss

Das Mittelteil zeigt bei einer maximalen Verschiebung von 7,28 mm (siehe Bild 101) eine Spannung von 38,21 MPa (siehe Bild 102).

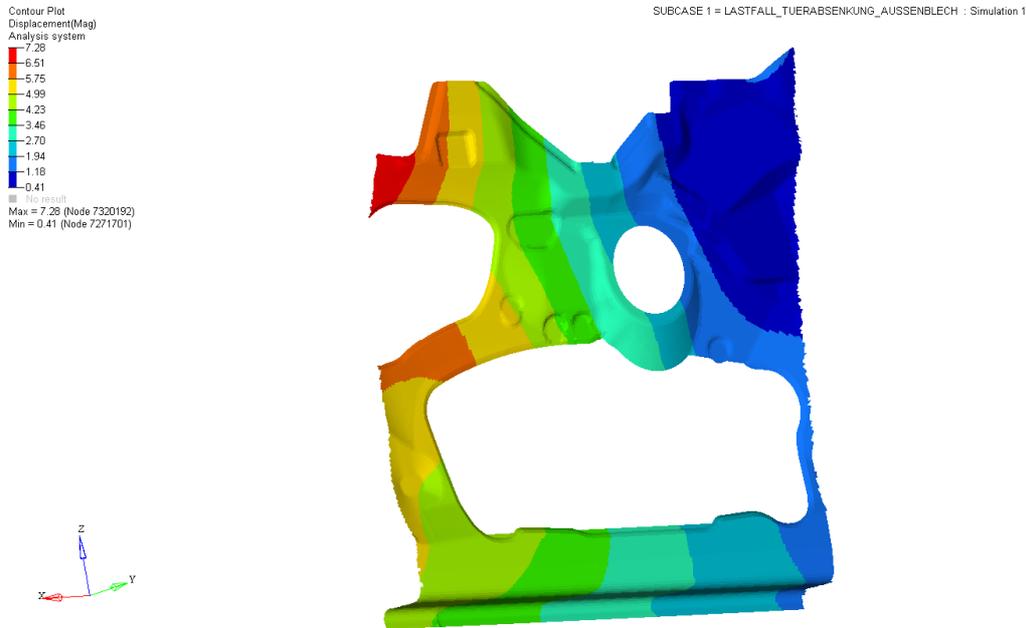


Bild 101. Verschiebung Innenblech-Mitte



Bild 102. Von-Mises-Vergleichsspannung Innenblech-Mitte

Der Scharnierbereich dagegen weist bei einer Verschiebung von 1,84 mm (siehe Bild 103) nur 161,57 MPa (siehe Bild 104) auf.

Contour Plot
 Displacement(Mag)
 Analysis system
 = 1.84
 = 1.43
 = 1.23
 = 1.03
 = 0.83
 = 0.63
 = 0.43
 = 0.23
 = 0.03
 ■ No result
 Max = 1.84 (Node 1309961)
 Min = 0.03 (Node 7310644)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_AUSSENBLECH : Simulation 1

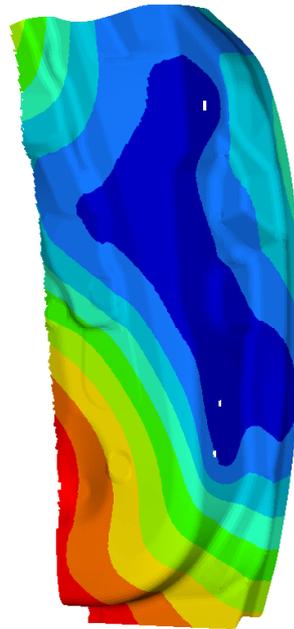


Bild 103. Verschiebung Innenblech-Scharnier

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max)
 Analysis system
 Simple Average
 = 161.57
 = 143.66
 = 125.74
 = 107.63
 = 89.91
 = 72.00
 = 54.00
 = 36.17
 = 18.25
 = 0.34
 ■ No result
 Max = 161.57 (Node 7218285)
 Min = 0.34 (Node 7309749)

SUBCASE 1 = LASTFALL_TUERABSENKUNG_AUSSENBLECH : Simulation 1



Bild 104. Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Scharnier

Der Seitenaufprallschutz verschiebt sich um 5,78 mm (siehe Bild 105) bei einer Spannung von 52,01 MPa (siehe Bild 106).

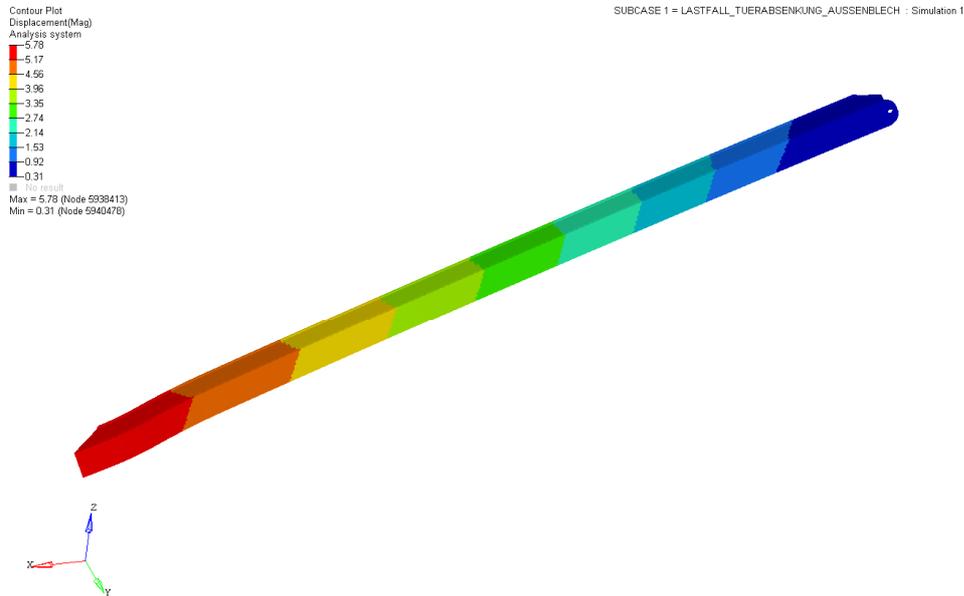


Bild 105. Verschiebung Seitenaufprallschutz

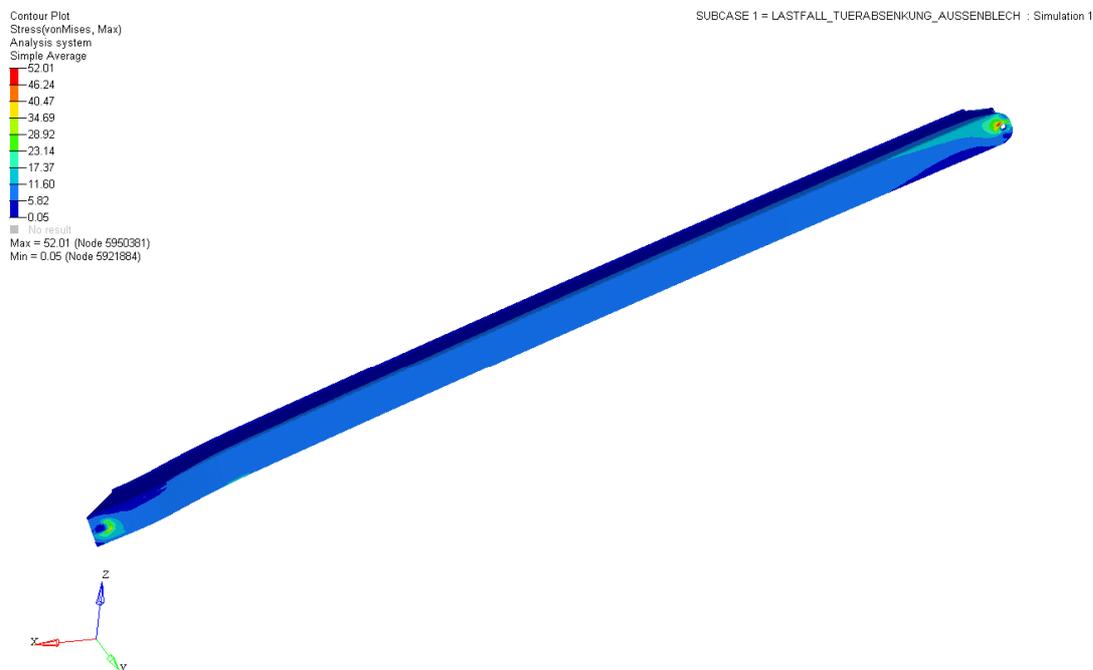


Bild 106. Von-Mises-Vergleichsspannung im Seitenaufprallschutz

Der Rahmen verschiebt sich maximal um 7,72 mm (siehe Bild 107) und ist einer maximalen Spannung von 83,08 MPa (siehe Bild 108) ausgesetzt.

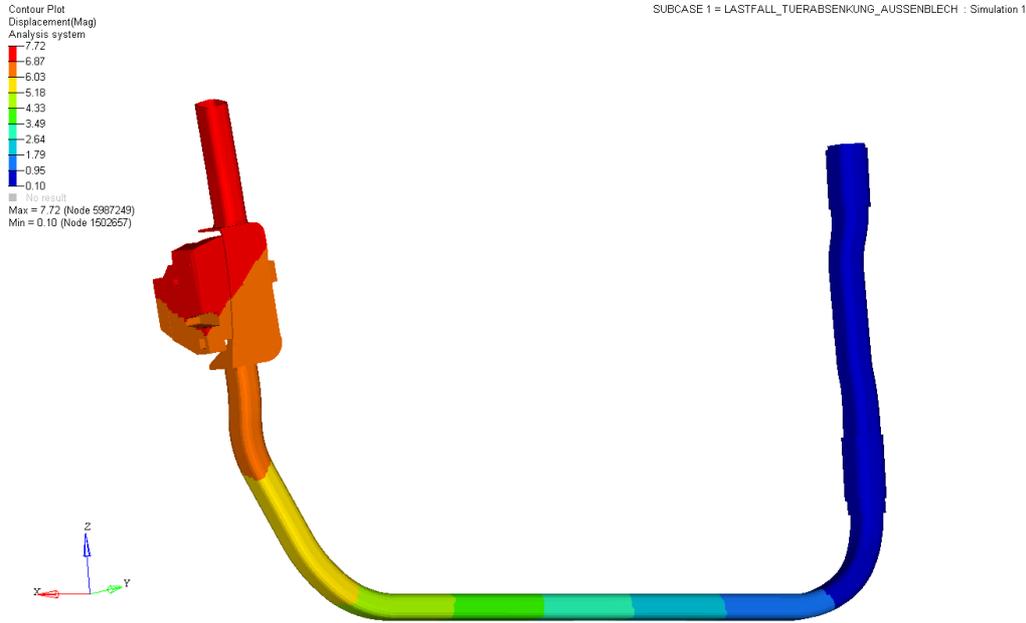


Bild 107. Verschiebung des Rahmens

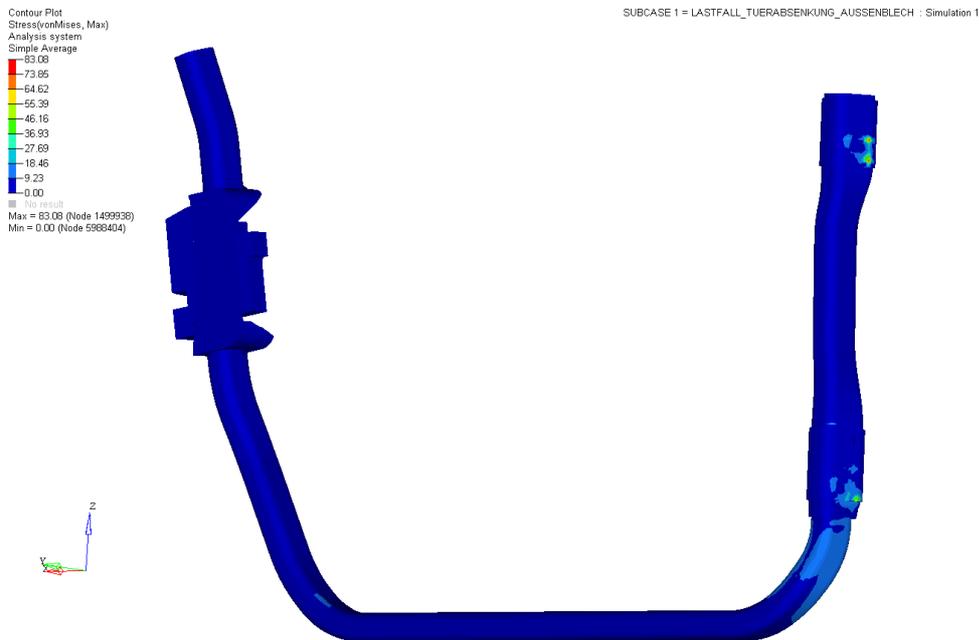


Bild 108. Von-Mises-Vergleichsspannung im Rahmen

In Tabelle 10 sind die eben diskutierten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst dargestellt

mit Angabe der jeweiligen Bauteildicke.

		Lastfall-Türabsenkung Außenblech
Außenhaut (d = 1,2 mm)	Verschiebung [mm]	13,92
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	215,34
Innenblech Mitte (d = 1,2 mm)	Verschiebung [mm]	7,28
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	38,21
Innenblech Scharnier (d = 2,5 mm)	Verschiebung [mm]	1,84
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	161,57
Innenblech Schloss (d = 2 mm)	Verschiebung [mm]	13,15
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	211,62
Rahmen (d = 2,5 mm)	Verschiebung [mm]	7,72
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	83,08
Seitenaufprall	Verschiebung [mm]	5,78
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	52,01

Tabelle 10. Auswertung bezüglich Krafteinleitung am Außenblech (F = 400 N)

1.2.6.4 Lastfall Überöffnen

Bei dem hier vorliegenden Lastfall ist besonders der Scharnierbereich des Innenbleches gefährdet und kritisch zu betrachten. Die Krafteinleitung erfolgt auf das Innenblech im Schlossbereich, wie in Bild 109 zu sehen.

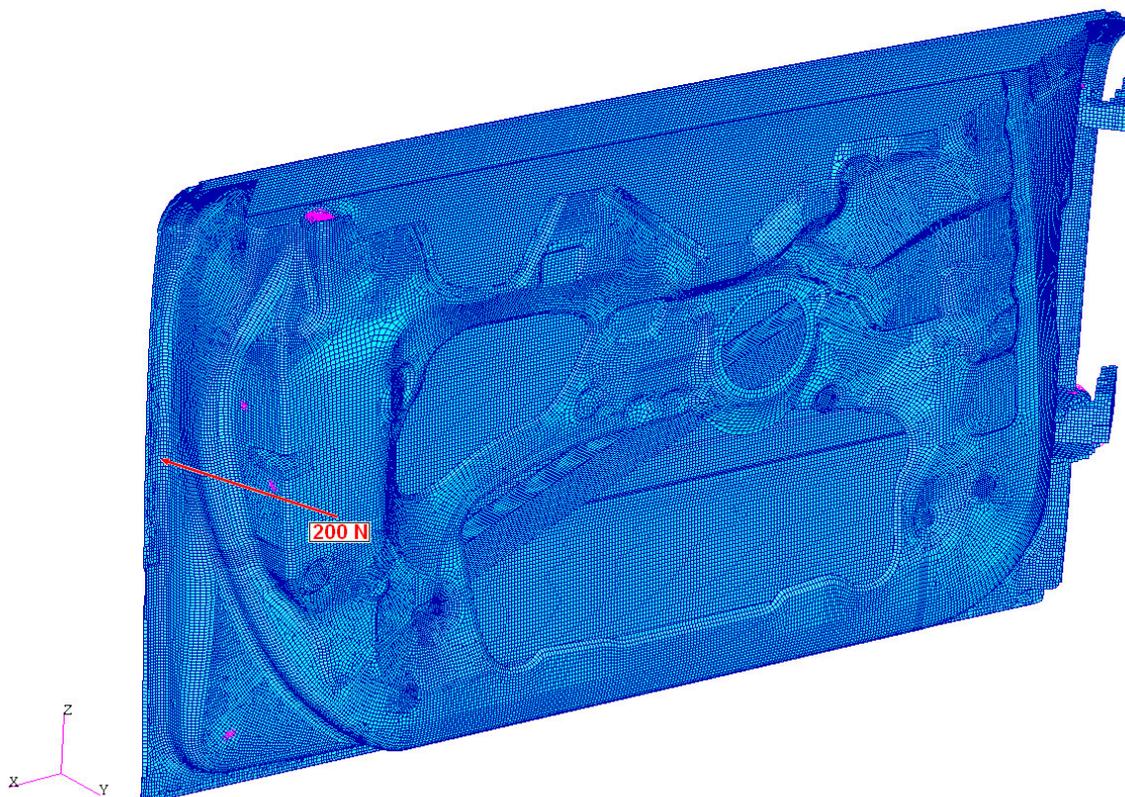


Bild 109. Krafteinleitung für den Lastfall Überöffnen

Das Außenblech muss eine maximale Spannung von 193,33 MPa (siehe Bild 112) bei einer Verschiebung von 56,10 mm (siehe Bild 110) ertragen.

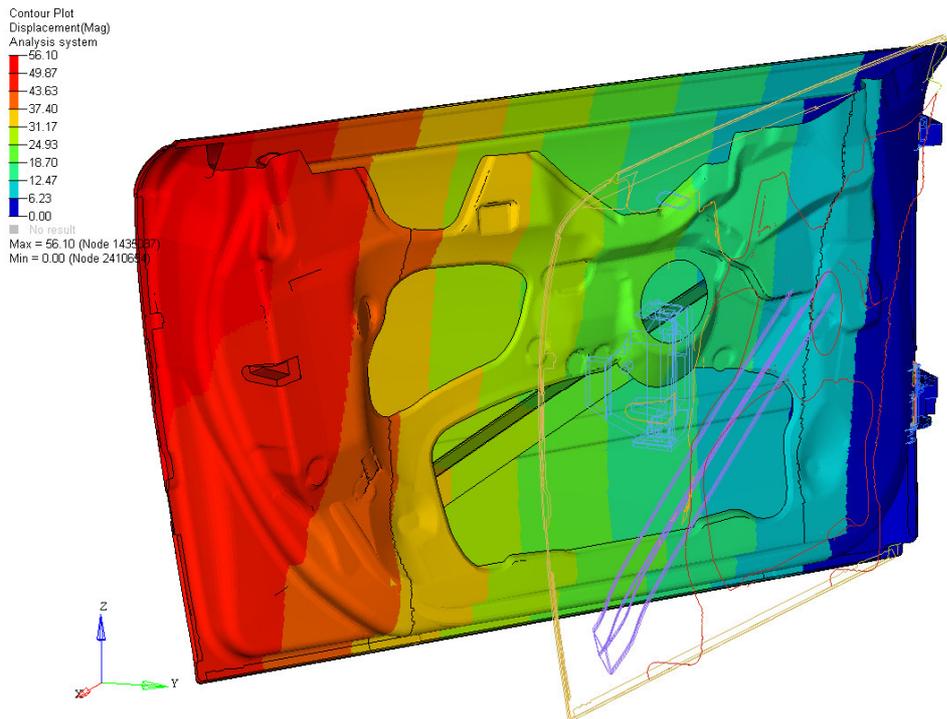


Bild 110. Verschiebung der Tür beim Lastfall Überöffnen

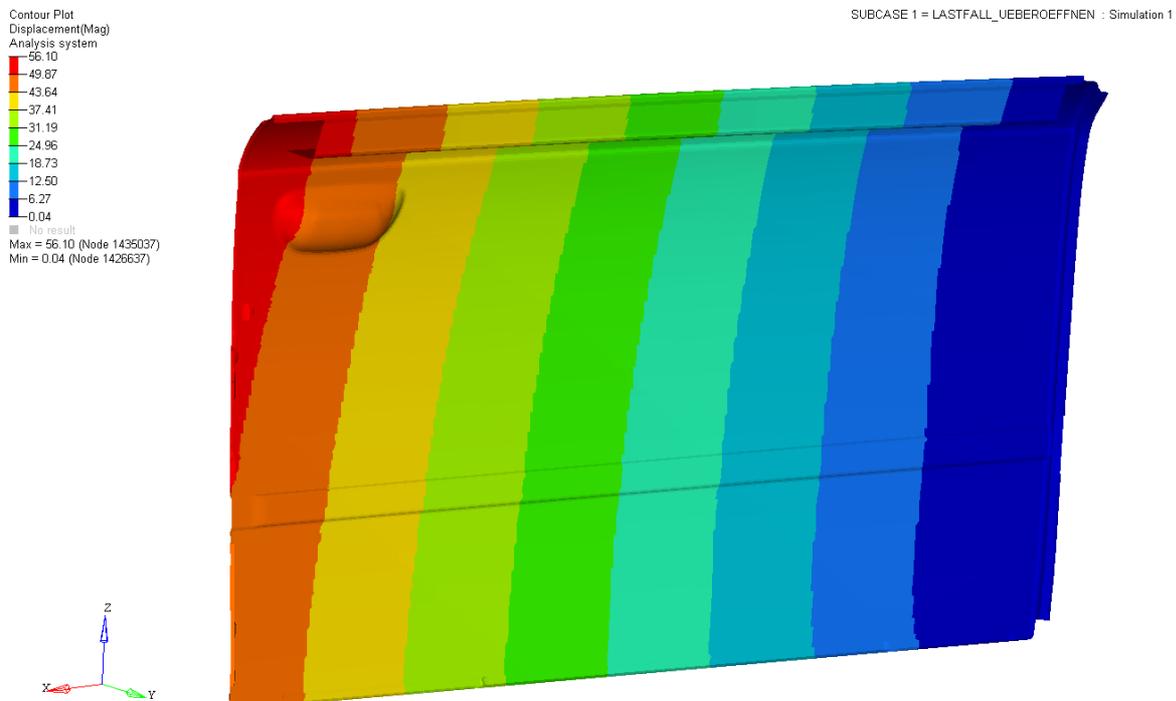


Bild 111. Verschiebung Außenblech

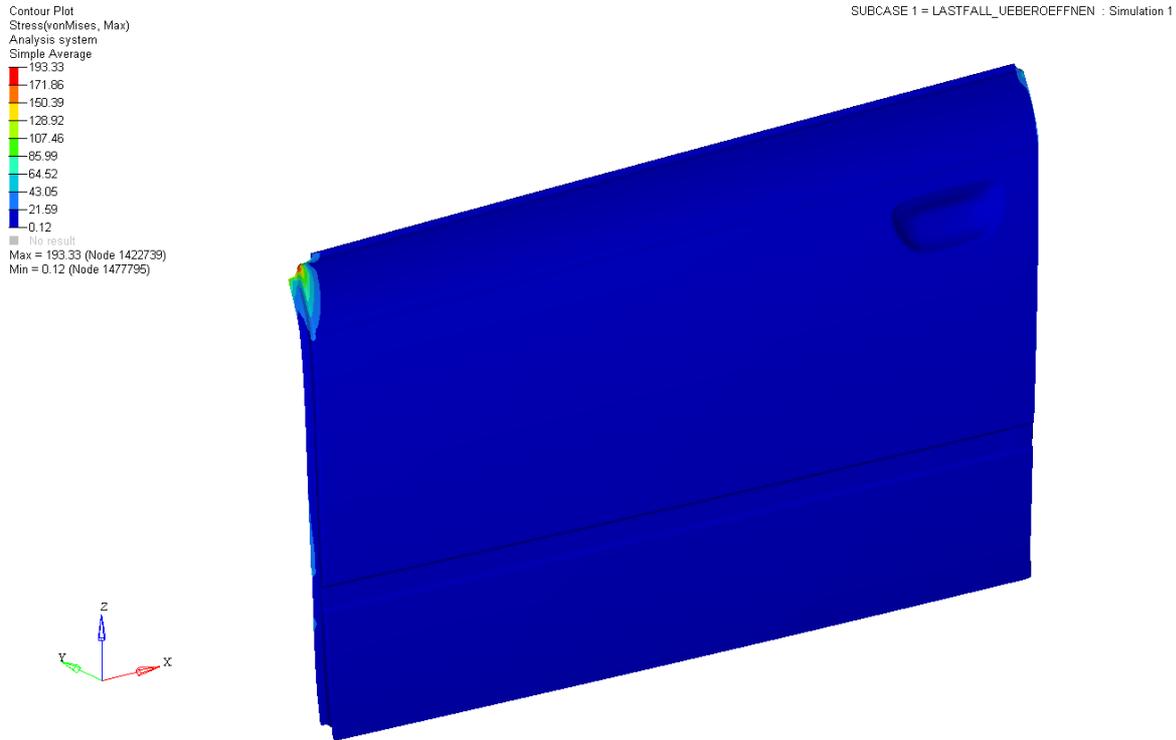


Bild 112. Von-Mises-Vergleichsspannung im Außenblech

Der Schlossbereich des Innenbleches sowie das Mittelteil sind einer geringen Spannung ausgesetzt. Der Mittelteil hat bei einer maximalen Verschiebung von 39,88 mm (siehe Bild 113) eine Spannung von 32,65 MPa (siehe Bild 114) und der Schlossbereich hat bei einer 55,87 mm großen Verschiebung (siehe Bild 115) eine Spannung von 59,61 MPa (siehe Bild 116).

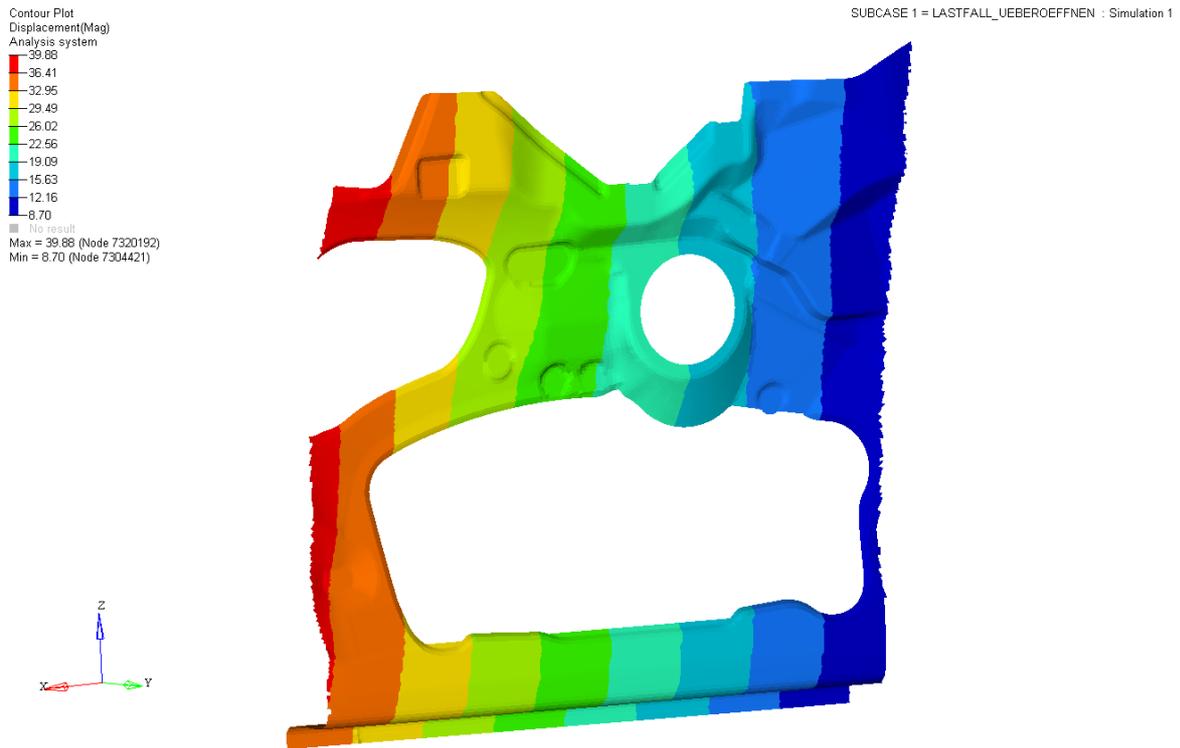


Bild 113. Verschiebung Innenblech-Mitte

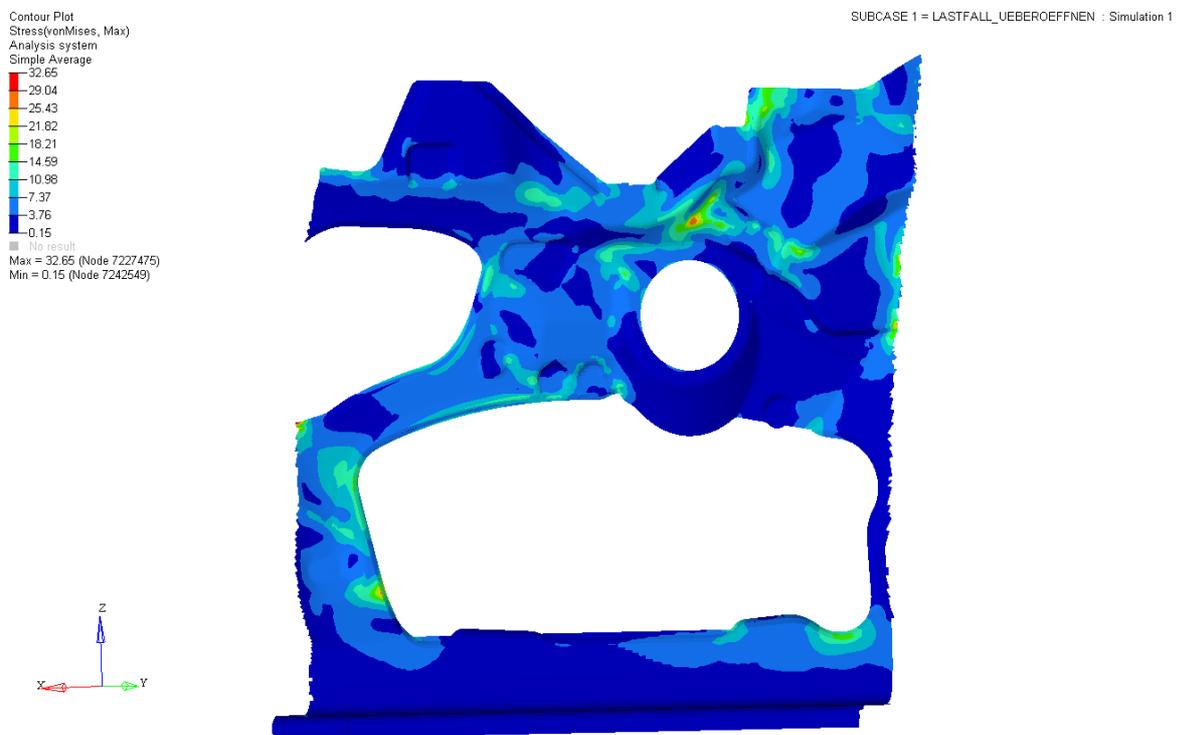


Bild 114. Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Mitte

Contour Plot
 Displacement(Mag)
 Analysis system
 -55.87
 -53.66
 -51.45
 -49.24
 -47.03
 -44.83
 -42.62
 -40.41
 -38.20
 -35.99
 No result
 Max = 55.87 (Node 1305141)
 Min = 35.99 (Node 7293898)

SUBCASE 1 = LASTFALL_UEBEROEFFNEN : Simulation 1

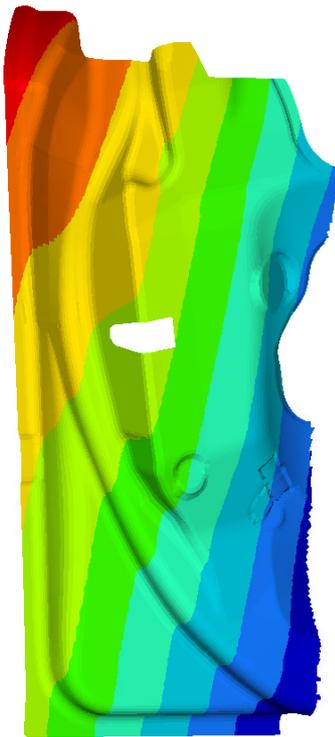
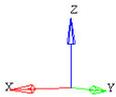


Bild 115. Verschiebung Innenblech-Schloss

Contour Plot
 Stress(vonMises, Max)
 Analysis system
 Simple Average
 -59.61
 -52.99
 -46.36
 -39.74
 -33.12
 -26.49
 -19.87
 -13.25
 -6.62
 -0.00
 No result
 Max = 59.61 (Node 1262253)
 Min = 0.00 (Node 7257508)

SUBCASE 1 = LASTFALL_UEBEROEFFNEN : Simulation 1

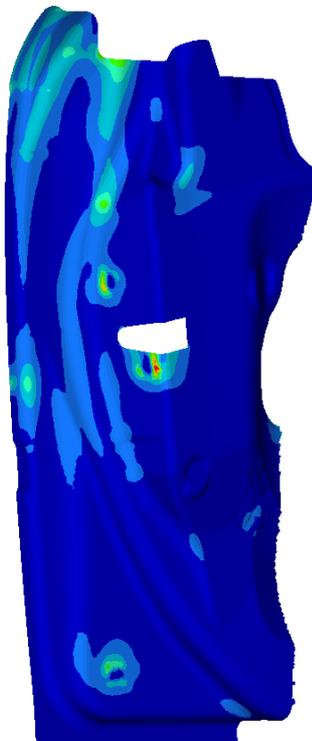
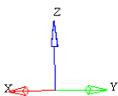


Bild 116. Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Schloss

Kritisch dagegen ist der Scharnierbereich. Obwohl es hier nur zu einer Verschiebung von maximal 9,96 mm (siehe Bild 117) kommt sind maximale Spannungen von bis zu 211,14 MPa (siehe Bild 118) vorzufinden.

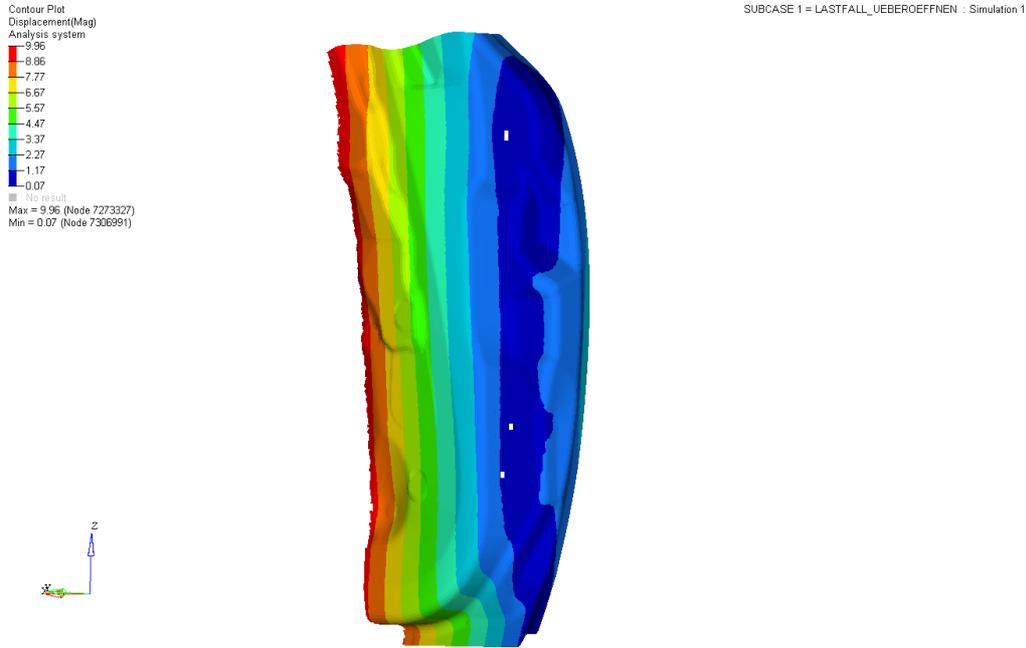


Bild 117. Verschiebung Innenblech-Scharnier

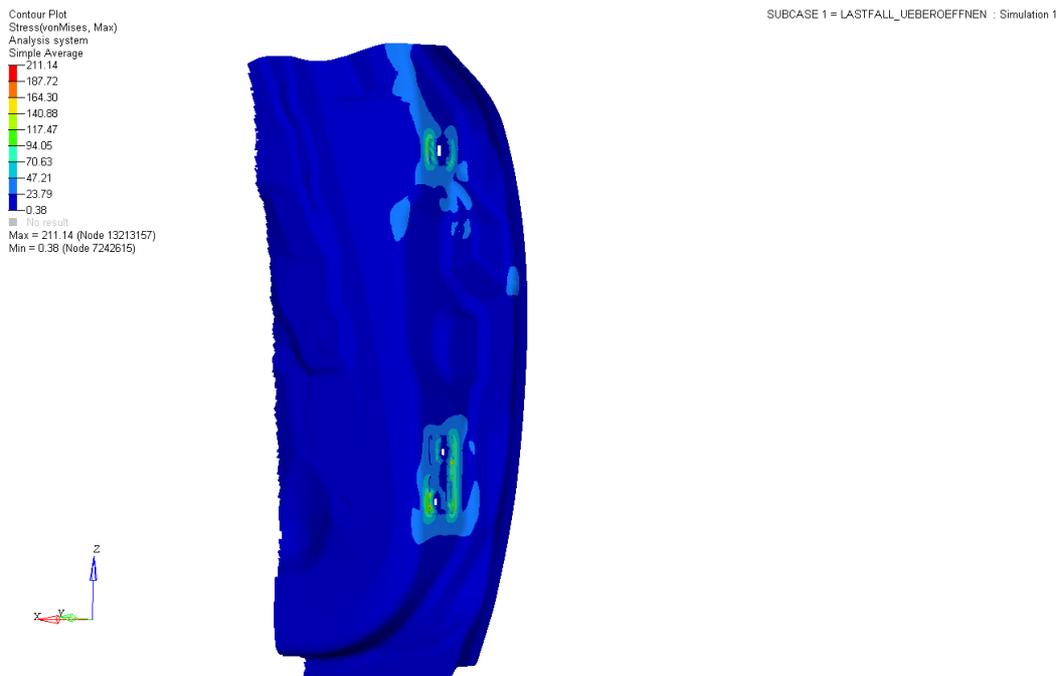


Bild 118. Von-Mises-Vergleichsspannung im Innenblech-Scharnier

Der Seitenaufprallschutz verschiebt sich um 45,79 mm (siehe Bild 119) bei einer Spannung von 121,50 MPa (siehe Bild 120).

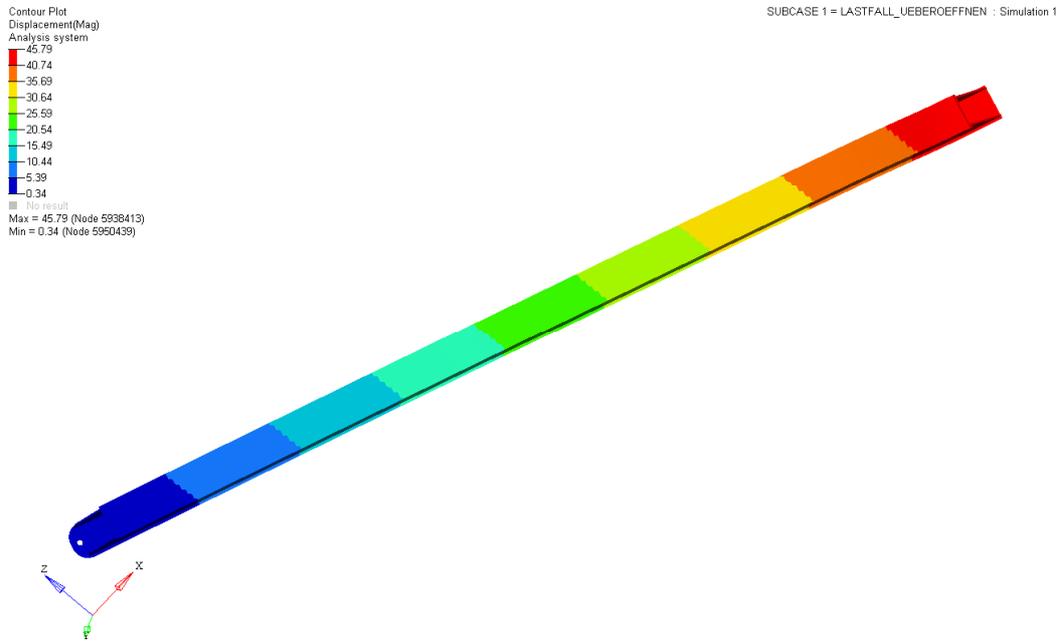


Bild 119. Verschiebung Seitenaufprallschutz

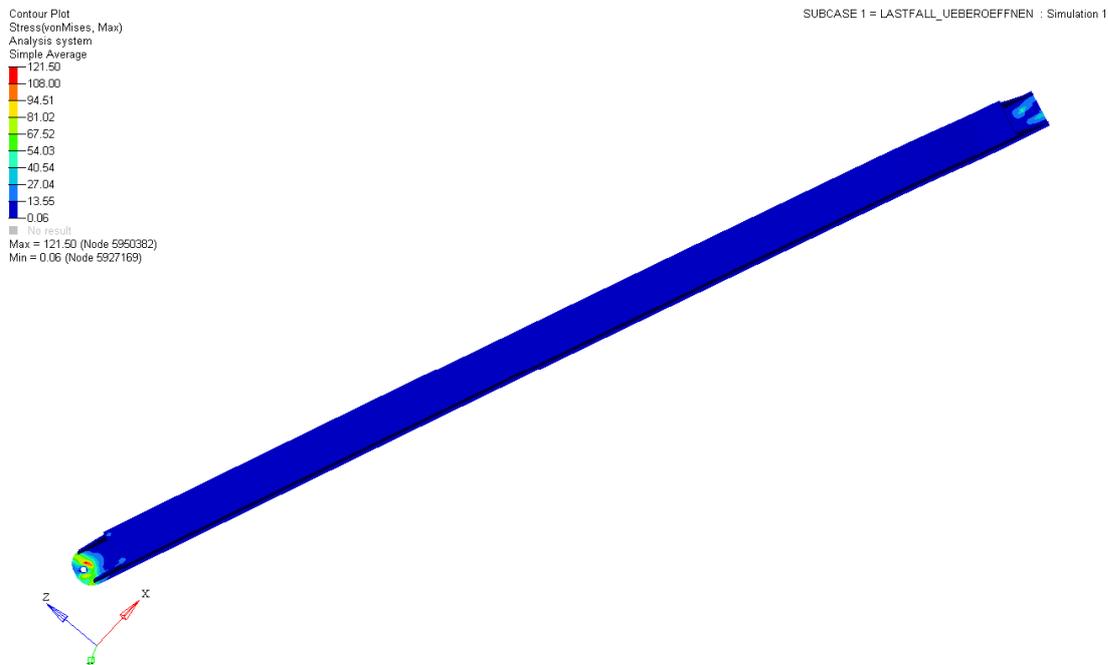


Bild 120. Von-Mises-Vergleichsspannung im Seitenaufprallschutz

Der Rahmen verschiebt sich maximal um 50,78 mm (siehe Bild 121) und ist einer maximalen Spannung von 103,07 MPa (siehe Bild 122) ausgesetzt.

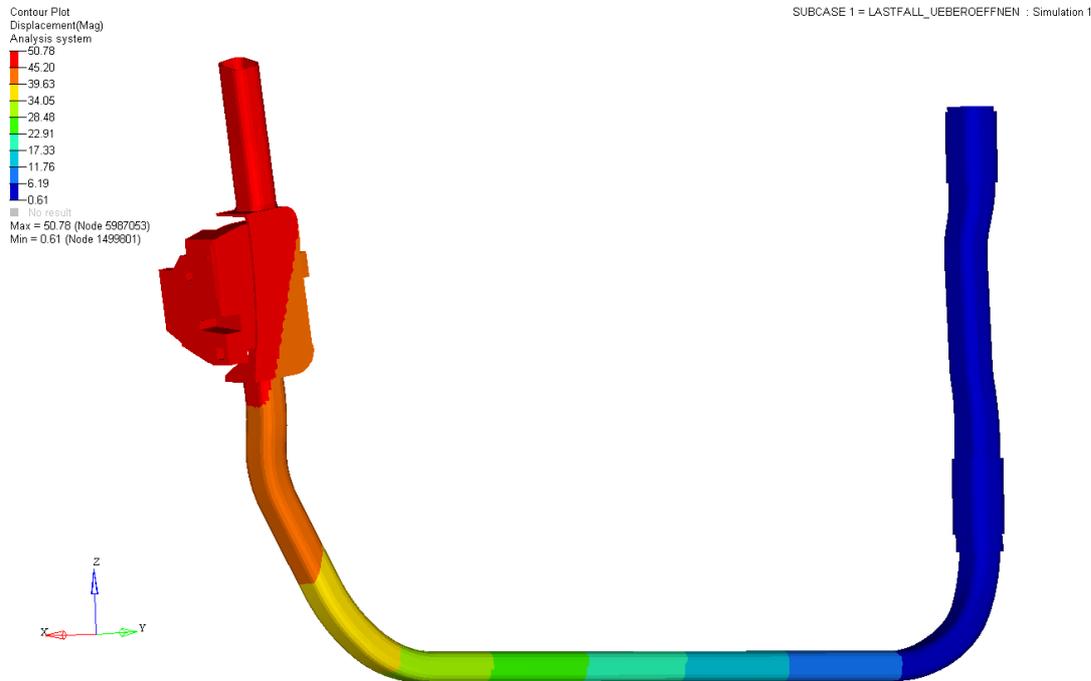


Bild 121. Verschiebung des Rahmens

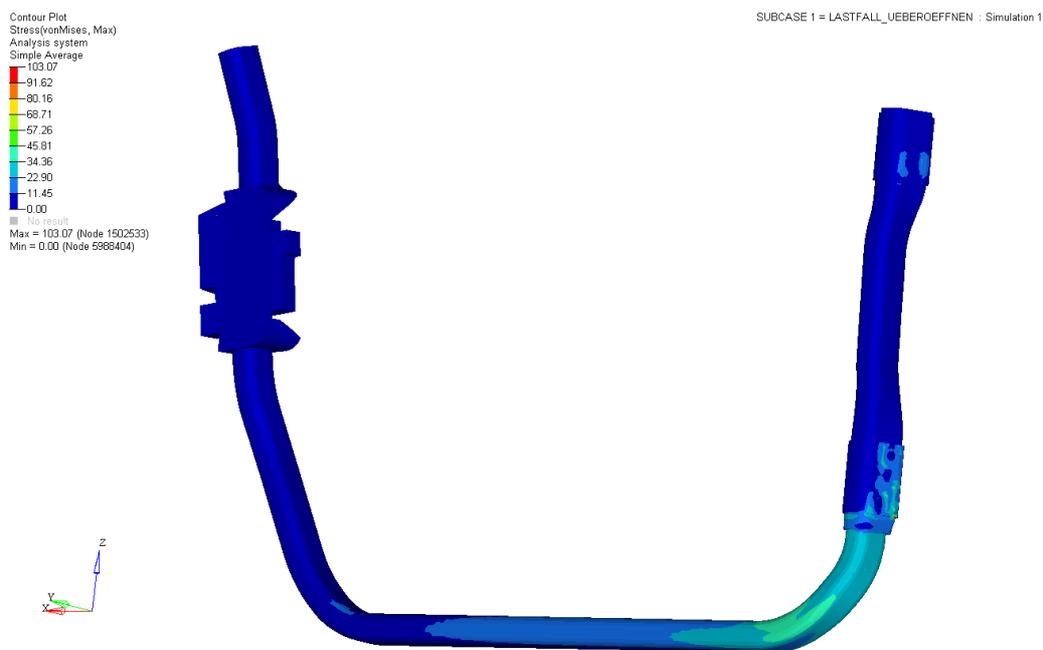


Bild 122. Von-Mises-Vergleichsspannung im Rahmen

In Tabelle 11 sind die eben diskutierten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst dargestellt mit Angabe der jeweiligen Bauteildicke.

		Lastfall-Überöffnen
Außenhaut (d = 1,2 mm)	Verschiebung [mm]	56,10
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	193,33
Innenblech Mitte (d = 1,2 mm)	Verschiebung [mm]	39,88
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	32,65
Innenblech Scharnier (d = 2,5 mm)	Verschiebung [mm]	9,96
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	211,14
Innenblech Schloss (d = 2 mm)	Verschiebung [mm]	55,87
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	59,61
Rahmen (d = 2,5 mm)	Verschiebung [mm]	50,78
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	103,07
Seitenaufprall	Verschiebung [mm]	45,79
	Von-Mises-Vergleichsspannung [MPa]	121,50

Tabelle 11. Auswertung bezüglich Krafterleitung am Schlossbereich (F = 200N)

1.2.7 Auswertung

Mithilfe der FEM-Rechnung wurde deutlich, dass eine Fertigung der Tür aus Magnesium möglich ist, da die Spannungen bis auf kleine Bereiche unterhalb der Streckgrenze liegen. Dabei wurde die mögliche Gewichtseinsparung klar deutlich, da der Demonstrator rund 80% leichter ist, als die vergleichbare Stahltür bei gleichen Spannungen im Bauteil. Dieses Ergebnis stimmt auch mit den spezifischen Werkstoffkennwerten überein. So hat Magnesium eine spezifische Streckgrenze, welche fast das 5-fache gegenüber normalen Stahllegierungen beträgt. Die Deformationen sind allerdings laut Hookschem Gesetz direkt proportional dem E-Modul, welcher spezifisch in etwa dem von Stahl entspricht. Wenn man nun also 80% Gewicht einspart, so müssen also die Verformungen entsprechend steigen, was in der Auswertung deutlich ersichtlich wird. Die Verformungen sind in etwa um das Vierfache größer. Dies bedeutet, dass die Tür entweder an markanten Stellen verstärkt werden müsste oder aber die restliche Konstruktion angepasst werden muss, damit die Dichtigkeit und Sicherheit gewährleistet bleibt. In der Serienfertigung für hochwertige Sportwagen kommen zum geringen Teil schon Magnesiumteile zum Einsatz, wobei die Gewichtseinsparung immer noch 33% beträgt.

Die Anpassung der Konstruktion erfolgt heute schon größtenteils bei den Fahrzeugrahmen, bei welchem je nach den spezifischen Anforderungen genau dafür ausgelegte Materialien zum Einsatz kommen. Das wohl bekannteste Beispiel dafür war der Audi A2.

Wichtigster Vorteil von Magnesium bei dieser Hybridbauweise ist die Möglichkeit Magnesiumbleche auch in größeren Maßen dünnwandig herzustellen und dabei die erhöhte Biege- und Beulsteifigkeit des Materials auszunutzen.

1.3 Erstellung und Abstimmung von Konzepten für potentielle Anwender

Die ganzheitliche Herangehensweise bei der Lösung der Aufgaben, die im Zusammenhang mit dem Einsatz von Magnesiumlegierungen für die Realisierung von Karosserie- und Strukturteilen stehen, und die erstmalige Betrachtung der gesamten Prozessketten, beginnend von der Kennwertermittlung bis hin zum Fügen von Baugruppen, repräsentieren wichtige Voraussetzungen für eine Nutzung der erzielten Ergebnisse unmittelbar im Anschluss an das Projekt. Da am Beispiel einer Demonstrator-Baugruppe diese Erkenntnisse und die erarbeiteten Richtlinien umgesetzt, hinsichtlich ihrer Eignung überprüft und z.T. bereits

optimiert wurden, stehen nach Projektabschluss die Voraussetzungen für die Schaffung industriell nutzbarer Technologien, Verfahren und Ausrüstungen für die Herstellung von Baugruppen aus Magnesium zur Verfügung. Dies stellt eine wichtige Grundvoraussetzung für eine Erweiterung des bisherigen Einsatzgebietes von Magnesiumlegierungen und somit für zukünftige Serienanwendungen dar.

Es ist somit davon auszugehen, dass im Rahmen eines Verdrängungswettbewerbes in Marktsegmenten, wo Leichtbauwerkstoffe bereits zur Anwendung kommen, aber auch in anderen Industriezweigen, in denen diese Werkstoffe bisher eine untergeordnete Rolle spielen, eigene Marktanteile erarbeitet werden können. Im Zielmarkt „Automobilindustrie“ wird dabei ein jährlich ansteigender Umsatz angestrebt. In weiteren Bereichen, was sowohl den Luft- als auch den Schienenfahrzeugbau einschließt, werden entsprechende Marktanteile erarbeitet werden. Aber auch in anderen Industriezweigen, wie zum Beispiel im Heimelektronikbereich oder in der Freizeit- und Sportgeräteindustrie, werden Anwendungsmöglichkeiten von Magnesiumknetlegierungen gesehen, so dass auch hier Marktsegmente eröffnet werden können. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf diese Bereiche stand während der gesamten Bearbeitungszeit ebenfalls im Fokus.

Aufgrund des „Wettbewerbs“ der Werkstoffsysteme sind auch die Hersteller von Magnesiumlegierungen und -halbzeugen gefordert, diese ständig weiterzuentwickeln, um entsprechende Anwendungsfälle und somit Marktanteile zu sichern bzw. auszubauen. Basierend auf der bereits mehrfach dargestellten ganzheitlichen Herangehensweise und der Betrachtung der gesamten Prozessketten zur Herstellung von Magnesiumbauteilen kann nun auf diese zukünftigen Werkstoff- und Halbzeugentwicklungen reagiert werden. Durch die erprobte Vorgehensweise, beginnend von der Werkstoffcharakterisierung bis hin zur Entwicklung geeigneter Umform-, Zerteil- und Fügetechnologien, konnten die entsprechenden prozess-, anlagen- und werkzeugtechnischen Voraussetzungen für die produktionspraktische Verarbeitung dieser neuen Werkstoffe und Halbzeuge mit einem vertretbaren Zeit- und Kostenaufwand vorbereitet werden.

1.4 Technologische Bewertung des Magnesiumeinsatzes

Die Forderungen nach Leichtbau, niedrigem Energieverbrauch und Wirtschaftlichkeit führen zur ständigen Auseinandersetzung mit den technischen Eigenschaften, Verarbeitungsmöglichkeiten und Kosten alternativer Werkstoffe und Werkstoffkombinationen.

Diese Forderungen erweitern die Verarbeitungstechnologien und das Einsatzspektrum der Leichtbaulegierungen.

Die Bereiche, in denen Magnesiumlegierungen bereits in den Markt integriert sind werden weiter wachsen, denn leichte Strukturwerkstoffe rücken umso mehr in den Mittelpunkt des Interesses, je höher die Kraftstoffpreise steigen und je größer der Druck auf die Automobilindustrie durch Umweltauflagen wird.

Bei den Magnesiumknetlegierungen liegt der Schwerpunkt auf Entwicklungen von neuartigen Legierungen mit verbesserten Umformeigenschaften und einer Optimierung der Verfahren, denn das Magnesiumblech bietet gegenüber dem Magnesiumdruckguss sowie anderen Leichtbaukonkurrenten einige interessante technologische Eigenschaftsvorzüge.

Weitere Materialforschungen, nicht nur auf Seiten des Magnesiums, werden in Zukunft den Einsatz von FEM steigern, wodurch bereits in der Entwicklung dieser die Kosten weiter gesenkt werden können.

An ein modernes Türsystem wird heutzutage eine große Anzahl von Anforderungen gestellt, wobei Zielkonflikte teilweise die Auslegung erschweren. Dank der genauen Kenntnis dieser Anforderungen, der Möglichkeiten diese quantitativ zu beschreiben und leistungsfähiger Simulationsverfahren ist es möglich eine optimale Türstruktur mit Hilfe der Simulation zu entwickeln. Da an dem komplexen Bauteil Fahrzeugtür heute viele Systemlieferanten beteiligt sind, ist eine integrative und abgestimmte Arbeitsweise zwischen Fahrzeughersteller und Systemlieferant erforderlich. Die Nutzung der, durch die Simulation generierten Informationen, ermöglicht gerade bei diesem komplexen Bauteil eine effiziente Entwicklung.

2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung von seriennahen Umformtechnologien für die Verarbeitung von Magnesium-Knetlegierungen in der Fahrzeugindustrie, wodurch positiv auf die Gewichtsentwicklung von Karosserie- und Strukturbauteilen eingewirkt und somit ein entscheidender Beitrag zur Durchsetzung des Leichtbaus geleistet werden kann.

Es wurden Voraussetzungen dafür geschaffen, dass zukünftige Bauteile aus Magnesiumlegierungen, die durch eine zunehmende Komplexität und durch einen hohen Integrationsgrad charakterisiert sind, realisiert werden können.

Eine wichtige Bedingung bei der Verarbeitung von Magnesium-Knetlegierungen ist der Einsatz der Temperatur als Prozessparameter. Dadurch wird ein deutlich verbessertes Werkstoff-, d. h. insbesondere Umformverhalten erreicht. Eine einfache Temperaturunterstützung reicht jedoch nicht aus, Bauteile herzustellen, die den Anforderungen hinsichtlich Design und Qualität genügen, bzw. die Serienfähigkeit gewährleisten. Zusätzliche Faktoren sind einzuhalten, beginnend am Anfang der Prozesskette, um das Halbzeug in einer gleichbleibenden Qualität zu gewährleisten und insbesondere Schwankungen der Werkstoffeigenschaften sowie des damit im Zusammenhang stehenden Umformverhaltens zu minimieren und so die Prozesssicherheit zu steigern.

Diese beiden beispielhaft dargestellten Herausforderungen unterstreichen die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Herangehensweise bei der Entwicklung serienreifer Umform-, Zerteil- und Füge-technologien, was aufgrund der organisierten Projektstruktur gewährleistet war.

So wurde realisiert, dass sich die Kennwertermittlung, die in die Projektstruktur eingebunden war, neben der Charakterisierung des Werkstoffverhaltens unter Temperatureinfluss und der Ermittlung geeigneter Temperaturen für die Umformung auch der Herausforderung einer verbesserten Qualitätsbewertung bzw. Qualitätssicherung der Ausgangshalbzeuge, basierend auf der Identifizierung und Ermittlung relevanter Werkstoffkenngrößen, stellen musste. Mit Hilfe genauerer Kennwerte und durch Nutzung verbesserter Modelle war es aber auch möglich, Simulationen durchzuführen, die eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität aufwiesen, so dass diese für die Vorauslegung des Prozesses, was die Ermittlung optimaler Temperaturverteilungen im Halbzeug einschließt, als effektives Werkzeug genutzt werden konnte. Um die dabei ermittelten Aussagen hinsichtlich der erforderlichen Umformtemperaturen umsetzen zu können, war weiterhin vorgesehen, geeignete Strategien

für eine prozessangepasste Erwärmung des jeweiligen Halbzeuges zu identifizieren und die dafür erforderlichen werkzeug- und anlagentechnischen Voraussetzungen zu schaffen. Andererseits wurden Steuerungs- und Regelungskonzepte erarbeitet, damit hinsichtlich der Temperaturen bzw. Temperaturverteilungen enge Toleranzen gewährleistet werden konnten. Aber auch Aspekte wie zum Beispiel die positive Beeinflussung des Werkstoffflusses mittels innovativer Ziehtechnologien (z. B. Mehrpunkt-Ziehtechnik) wurden während der Projektbearbeitung berücksichtigt, was wiederum eine Möglichkeit darstellte, die Prozesssicherheit deutlich zu verbessern und die Umformgrenzen zusätzlich zu erweitern.

Basierend auf dieser dargestellten ganzheitlichen Herangehensweise, was die Kennwertermittlung, die FE-Simulation, das Urformen (Walzen), das Umformen/Zerteilen (Tief-/Streckziehen, Hydroforming, Rohrbiegen, Falzen, Schneiden/Lochen) und das Fügen (thermisch, mechanisch) einschließt, ist davon auszugehen, dass die wissenschaftlichen aber auch die technischen Voraussetzungen für die Serienfertigung von Magnesiumbauteilen geschaffen und die damit im Zusammenhang stehende Komplexität der zu lösenden Aufgaben beherrscht werden können.

Von den OEM's liegen Absichtserklärungen vor, nach Schaffung der erforderlichen Grundlagen einhergehend mit der ökonomischen Preisgestaltung für das Ausgangsmaterial Entwicklungen verschiedener Fahrzeugkomponenten in MgK anzustreben, auch in der Weise, dieses Vorhaben in der sich anschließenden Umsetzungsphase zu begleiten und aktiv zu unterstützen.

Die Voith Engineering Services GmbH Road & Rail konnte durch die Projektarbeit einen erheblichen Know-how-Zuwachs im Bereich der Leichtbaukonstruktion mit Magnesiumknetlegierungen erreichen.

Zukünftig wird dieser Wissenszuwachs in Akquisestrategien der Firma mit einbezogen werden.

Ziel ist dabei, das gesamte Leistungsspektrum begonnen bei der Konstruktion über die Fertigungsplanung bis zur Inbetriebnahme und dem Instandhaltungsmanagement von Schienen und Straßenfahrzeugen an die neuen Technologien angepasst zu vermarkten.

3 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene FuE- Ergebnisse Dritter

Über den gesamten Projektzeitraum wurden andere Aktivitäten- und Entwicklungen auf den betrachteten Gebieten verfolgt und mögliche andere Ansätze beurteilt.

Bis zum Ende der Projektlaufzeit liegen keine Informationen darüber vor, dass von Dritten analoge Lösungen zur technologischen Qualifikation des Einsatzes von Magnesiumknetlegierungen angewendet oder weiterentwickelt wurden.

4 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

4.1 Erfolge Präsentationen und Veröffentlichungen

Allgemeine Internetpräsentation auf der TEMAK-Website www.temak-sachsen.de

Präsentation des Projektstatus im 1. TeMaK-Workshop auf www.temak-sachsen.de

Messeteilnahmen durch RKW Sachsen im Auftrag aller Projektpartner

Artikel vom 20. November 2007 in den IfP-News

Artikel in der Freien Presse vom 04.07.2007

News auf www.markenpost.de am 12. Juni 2007

Pressemitteilung vom 11.06.2007

AMZ Infoletter 04-06 2007

Erfolgreicher Workshop des Wachstumskerns TeMaK in Zwickau: AUDI AG meldet Interesse an Forschungsergebnissen an

Pressemitteilung vom 14.05.2009

4.2 Geplante Präsentationen und Veröffentlichungen

Weitere Präsentationen werden im Rahmen der Verfolgung eines TeMaK-Nachfolgeprojektes sinnvoll in die Entwicklungs- und Akquisestrategien von Voith Engineering eingebunden werden. Dabei wird von besonderer Bedeutung sein, in welchem Maße sich die Anpassung der hier herausgearbeiteten technologischen Spezifik an die robusten Erfordernisse ergebnisorientierter Serienproduktion entwickelt.

III. Anlagen

A. Projektbezogene Grundlagen der Umformtechnologie und Fügetechnik

Zur hinreichenden Charakterisierung des Umformverhaltens eines Werkstoffs ist die genaue Kenntnis des Verfestigungsverhaltens, der zugehörigen Fließspannung sowie des Umformvermögens, das sich in Abhängigkeit des Umformgrades einstellt, wesentliche Voraussetzung. Grundlage hierfür ist der Verlauf der werkstoffabhängigen Fließspannung k_f über dem Umformgrad ϕ bei definierten Umformtemperaturen und Umformgeschwindigkeiten.
 /Doege01/



Bild A1: Anforderungen an Karosseriebleche /Behrens04/

Die in **Bild A1** dargestellten Anforderungen an Karosseriebleche sollen einen Überblick geben, welche Schwierigkeiten bei der Auslegung eines Bleches bestehen und welche Ansprüche an diese gestellt werden.

Der Einsatz von Werkstoffkennwerten zur Bewertung des Umformverhaltens wird in **Bild A2** gezeigt. An Hand der aufgeführten Testverfahren lassen sich typische Eigenschaften zur Charakterisierung des Werkstoffes zusammenstellen.

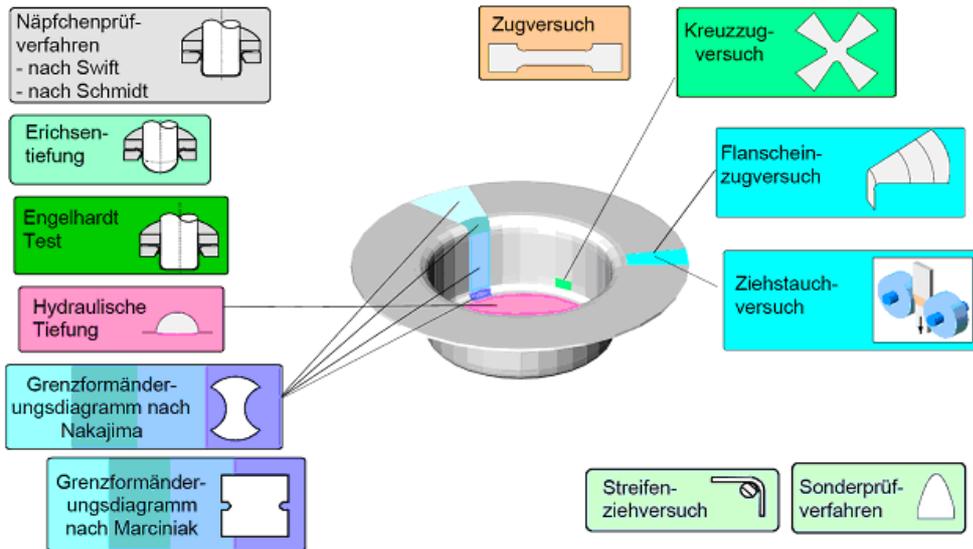


Bild A2: Einsatz von Werkstoffkennwerten zur Bewertung des Umformverhaltens /Behrens04/

Die aus dem Zugversuch erhaltene Spannungs-Dehnungs-Kurve enthält die wichtigsten Kennwerte zur Charakterisierung eines Werkstoffes. Das in **Bild A3** dargestellte Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist typisch für ein duktiles Werkstoffverhalten.

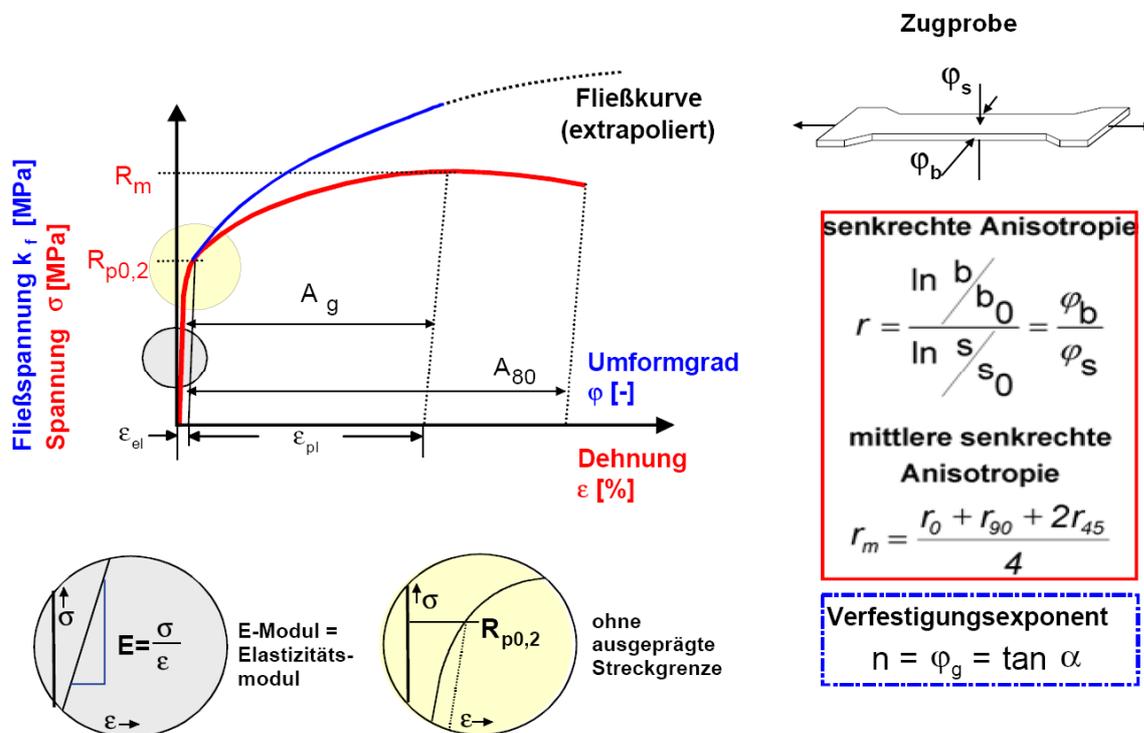


Bild A3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm und Fließkurve /Behrens04/

Zur Beurteilung der Umformeigenschaften von Blechwerkstoffen anhand der Kennwerte des einachsigen Zugversuchs werden im Allgemeinen der Verfestigungsexponent n sowie die senkrechte Anisotropie r herangezogen (siehe **Bild A3**). Der Verfestigungsexponent n ist definiert als Steigung der Fließkurve im doppelt logarithmischen Maßstab.

Die senkrechte Anisotropie r eines Blechwerkstoffes gibt das Verhältnis der logarithmischen Breitenformänderung zur Dickenformänderung an und beschreibt somit die Richtungsabhängigkeit der Formänderung eines Werkstoffes. Eine hohe Anisotropie ist allgemein beim Tiefziehen erwünscht, da damit das Fließen des Werkstoffes vorzugsweise aus der Blechebene unter geringer Abnahme der Blechdicke erfolgt.

Für Verfahren der Massivumformung ist außerdem die Kenntnis des Reibwertes, welcher aus dem Ringstauchversuch experimentell ermittelt wird, von Bedeutung. Der Reibfaktor m ($0 < m < 1$) lässt Aussagen über die Reibverhältnisse zwischen Werkzeug und Rohteil in Abhängigkeit der Umformparameter zu. Er wird aus der Änderung der geometrischen Abmessung des gestauchten Ringes bestimmt. Dabei haben bestimmte Faktoren wie Werkstoff und Umformtemperatur Einfluss auf den Reibfaktor. /Doege01/

1 Grundlagen der Blechumformung

Tiefziehen ist nach DIN8584 ein Fertigungsverfahren des Zugdruckumformens, bei dem ein ebener Blechzuschnitt zu einem Hohlkörper umgeformt wird. Dabei wird ein Werkzeug, bestehend aus Stempel, Matrize und Niederhalter, eingesetzt. **Bild A4** zeigt den prinzipielle Werkzeugaufbau sowie die Bezeichnungen beim rotationssymmetrischen Tiefziehen.

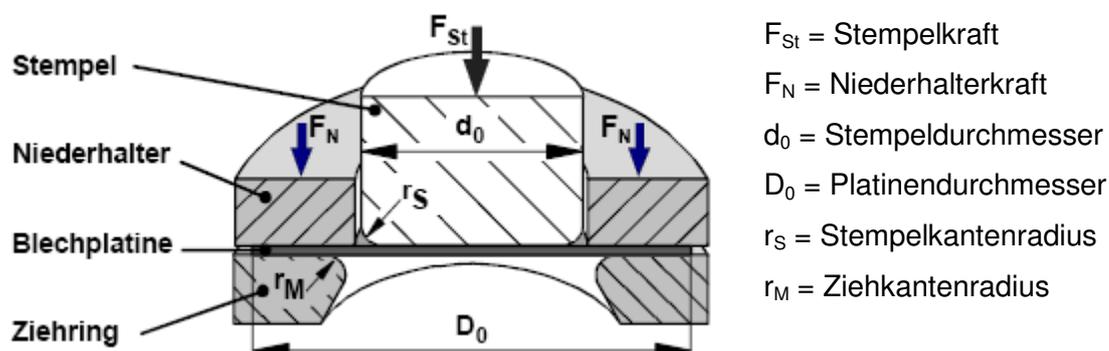


Bild A4: Prinzipieller Werkzeugaufbau und Bezeichnung beim Tiefziehen /Dröder99/

Der Werkstoff wird bis zur vollständigen Ausbildung weitestgehend durch eine zweiachsige Zugspannung (Streckziehbeanspruchung) ausgeformt. Die Umformung erfolgt dabei aus der

Blechdicke. Erreicht der Betrag der über den Stempel eingeleiteten Kraft die zum Flanscheinzug erforderliche Kraft, beginnt die Tiefziehphase, bei der sich im Flansch radiale Zug- sowie tangentiale Druckspannungen ausbilden (**Bild A5**). Durch die Verwendung eines Niederhalters wird der Faltenbildung im Flanscbereich aufgrund der tangentialen Druckspannungen entgegengewirkt. /Dröder99/

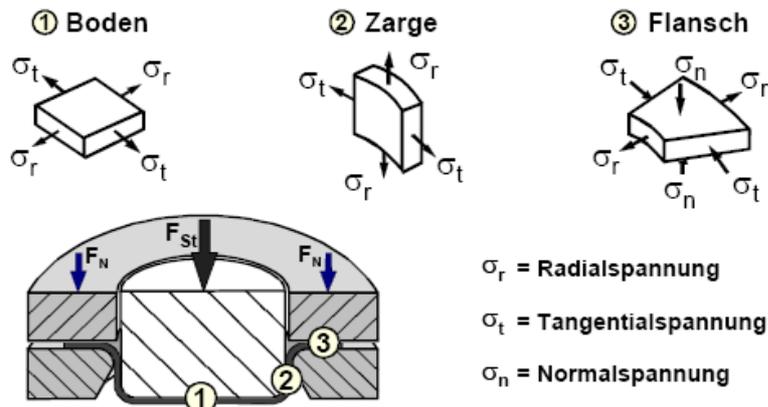


Bild A5: Spannungszustände in den einzelnen Ziehteilbereichen während der Umformung /Dröder99/

Die mittlere Krafteinleitung ist kennzeichnend für die Tiefziehphase. Die notwendige Kraft zur Umformung wird nicht unmittelbar vom Werkzeug in die Umformzone eingeleitet, sondern mittelbar vom Stempel über dem Boden und die Zarge des Werkstücks.

Für die Voraussage des Versagensfalles ist die Kenntnis der Umformgrenzen von entscheidender Bedeutung. Neben den Eigenschaften des umzuformenden Blechwerkstoffes wirken die Werkzeuggeometrie, die Reibungsbedingungen sowie das System Werkzeug/Maschine als wesentliche Einflussgrößen auf den Umformprozess ein. /Dröder99/

1.1 Mikrostrukturelle Vorgänge beim Umformen von Magnesium

Untersuchungen haben gezeigt, dass bis zu einer Temperatur von $T = 225 \text{ °C}$ im wesentlichen ein Gleiten in der Basisebene ((0001) – Ebene) des hexagonalen Kristallgitters erfolgt (siehe **Bild A6**). Die Gleitrichtung in der Basisebene ist dabei definiert durch die Richtung der dichtest gepackten Atomreihe (z.B. Richtung $[1\bar{1}20]$), siehe **Bild A7**. /Dröder99/

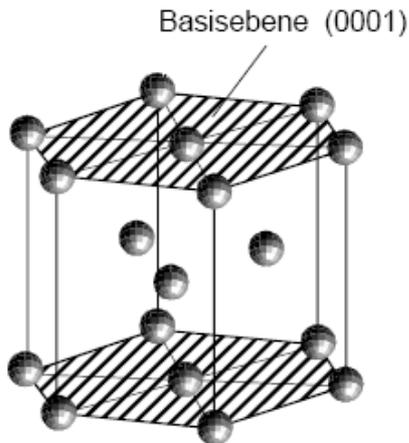


Bild A6: Basisebene im hexagonalen Gitter /Dröder99/

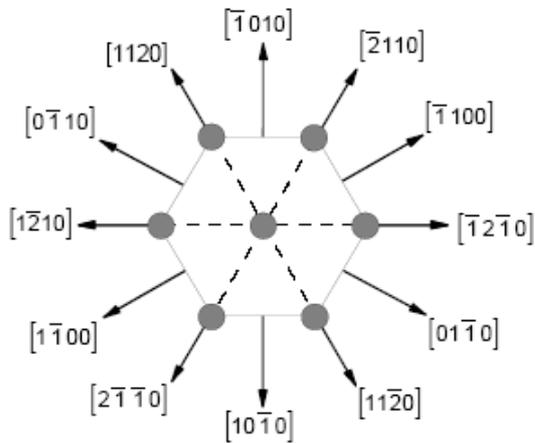


Bild A7: Richtungen in der Basisebene /Dröder99/

Die Zwillingsbildung wurde neben dem Gleiten in der Basisebene als weiterer Verformungsmechanismus bei Raumtemperatur erkannt. Als Zwillingsbildung wird eine Scherverformung bezeichnet, bei der ein Kristallbereich in eine zur Ausgangslage (Matrix) spiegelsymmetrische Lage überführt wird. Die Spiegelebene wird dabei als Zwillingslebene bezeichnet. In **Bild A8** ist das Prinzip der Zwillingsbildung schematisch dargestellt. /Dröder99/, /Merklein06/

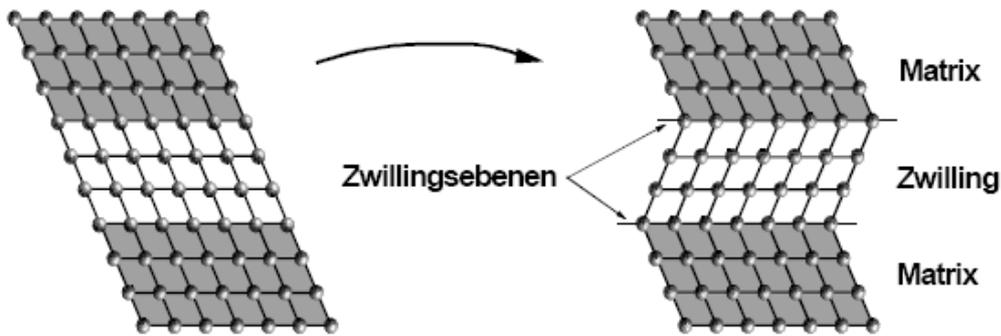


Bild A8: Prinzip der Zwillingsbildung /Dröder99/

Die Zwillingsbildung erfolgt hauptsächlich in den Pyramidalebene 2. Ordnung vom Typ 1 ($\{10\bar{1}2\}$ – Ebenen), siehe **Bild A9**.

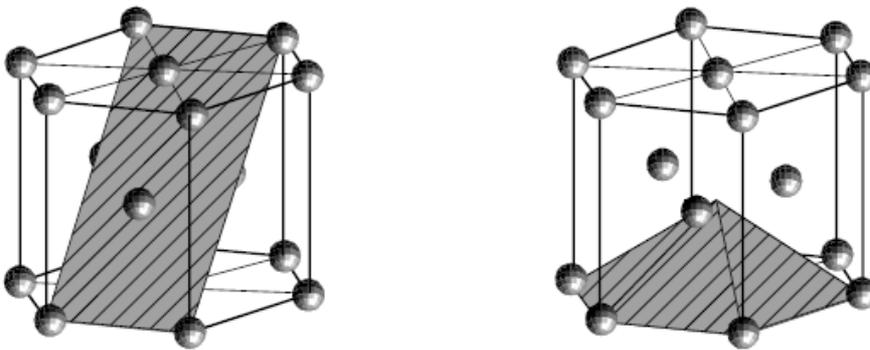


Bild A9: Pyramidalebene 2. Ordnung, Typ 1 (Ebenengruppe $\{ \}$) /Dröder99/

Weitere pyramidale Gleitebenen ($\{10\bar{1}1\}$ – Ebenen) werden bei einer Temperatur von $T > 225$ °C aktiviert (**Bild A10**). Dieser Effekt ist auf die gestiegene Beweglichkeit der Atome in der Matrix zurückzuführen. Die zusätzlichen Gleitebenen bewirken den sprunghaften Anstieg der plastischen Verformbarkeit. /Merklein06/

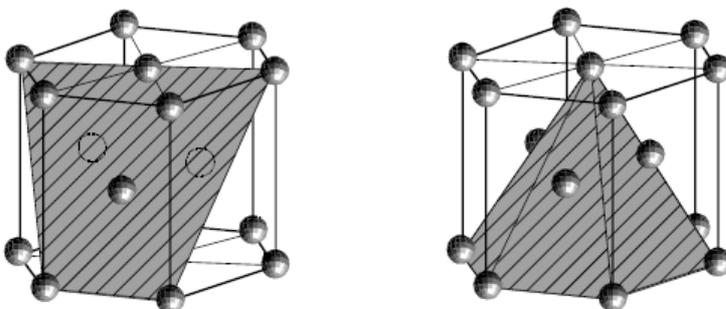


Bild A10: Pyramidalebene 1. Ordnung, Typ 1 (Ebenengruppe $\{ \}$) /Dröder99/, /Merklein06/

1.2 Feibleche aus Magnesiumknetlegierungen

Wenn große Werkzeugradien gewählt werden sind bereits bei Raumtemperatur geringe Umformungen möglich. Kalt umgeformte Teile aus AZ – Legierungen sowie HM/HK – Legierungen sollten nach dem Umformen spannungsarm gegläht werden, um Spannungsrisskorrosion zu vermeiden.

Die Prozessgrenzen beim Tiefziehen von Magnesiumblechen aus der Legierung AZ31B werden in Form einer maximalen prozentualen Durchmesserreduzierung R_{\max} angegeben.

Diese ist definiert zu:
$$R_{\max} = \frac{D_{0,\max} - d_0}{D_{0,\max}} * 100\%$$

mit $D_{0,\max}$ = maximal umformbarer Rondendurchmesser, d_0 = Stempeldurchmesser

Aus der maximalen Durchmesserreduzierung R_{\max} lässt sich das Grenzziehverhältnis $\beta_{0,\max}$

zu
$$\beta_{0,\max} = \frac{D_{0,\max}}{d_0} = \frac{1}{\frac{R_{\max}}{100\%} - 1}$$
 berechnen.

Für weichgeglühte Magnesiumlegierungen kann bei der Kaltumformung eine maximale prozentuale Durchmesserreduzierung R_{\max} von ca. 15 – 25 % erreicht werden (AZ31B-O: $R_{\max} = 20\%$). In **Bild A11** sind die für das temperierte Tiefziehen im Temperaturbereich zwischen 130 °C und 260 °C maximale prozentuale Durchmesserreduzierung der Legierungen AZ31B-O und AZ31B-H24 (Blechdicke $s_0 = 1,63$ mm) dargestellt. Die Versuche wurden mit einem Stempeldurchmesser von $d_0 = 38$ mm bei sehr geringen Ziehgeschwindigkeiten von 38 mm/min und 508 mm/min durchgeführt. /Dröder99/

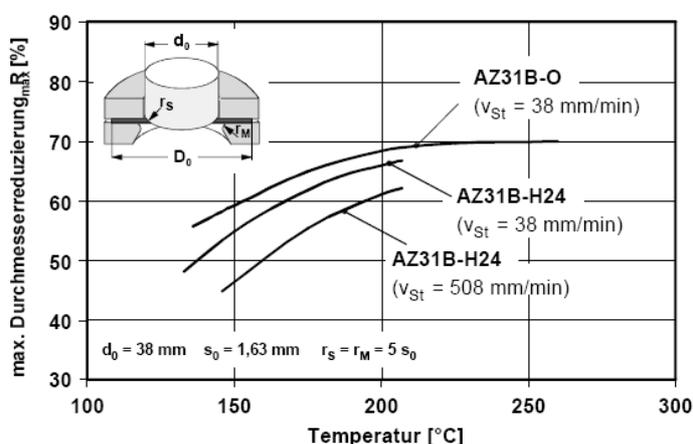


Bild A11: Maximal mögliche Durchmesserreduzierung beim Tiefziehen der Legierung

AZ31B /Dröder99/

Für große Umformgrade wird die Verwendung von Magnesiumblechen im weichgeglühten Zustand empfohlen, da größere maximale Durchmesserreduzierungen im Vergleich zu kaltverfestigten Legierungen erreicht werden. Die Dauer der Temperatureinwirkung sowie die Höhe der Temperatur haben bei kaltverfestigten Legierungen während der Umformung einen wesentlichen Einfluss auf die finale Festigkeitseigenschaften der Bauteile. /Dröder99/

1.3 Strangpressen

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren für die Massivumformung von Magnesium ist das Strangpressen. Das direkte, das indirekte sowie das hydrostatische Strangpressen kommen dabei zur Anwendung. Zur Verarbeitung von Magnesiumknetlegierungen ist das direkte Strangpressen ohne Schale oder Schmierung das industriell verbreitetste Strangpressverfahren. Aufgrund der geringen Wärmekapazität von Magnesiumlegierungen wird der Vorgang quasi – isotherm betrieben, d.h. der Pressstempel, der Rezipient und die Matrize werden etwa auf dieselbe Temperatur wie der Pressbolzen beheizt. Verarbeitet werden zylindrische Blöcke im Gusszustand bei 300 °C bis 400 °C, wobei Stränge von bis zu 50 m Länge mit den vielfältigsten Querschnitten hergestellt werden. /Janssen02/

Mit Hilfe des Strangpressens wird durch die Warmumformung das grobe Gussgefüge in ein feinkörniges, längsgestrecktes Werkstoffgefüge umgewandelt. Diese Gefügeumwandlung ist mit einer deutlichen Verbesserung der Werkstoffkennwerte des jeweiligen Magnesiumwerkstoffes verbunden. Die erreichbaren Werkstoffkennwerte verbessern sich mit zunehmendem Pressverhältnis, d.h. mit zunehmender Durchknetung während des Pressens. In **Bild A12** wird dieser Vorgang beschrieben, der von erheblicher Bedeutung für Halbzeuglieferungen in gepresstem Zustand ist. Ein Pressverhältnis $V = A_0 / A_S$ von 5 sollte nicht unterschritten werden, besser ist es, das Minimum des Pressverhältnisses auf 7 zu legen. Feinkörnige Pressgefüge mit guten mechanischen Werkstoffkennwerten lassen sich mit Pressverhältnissen um 25 erzielen. /Sauer01/

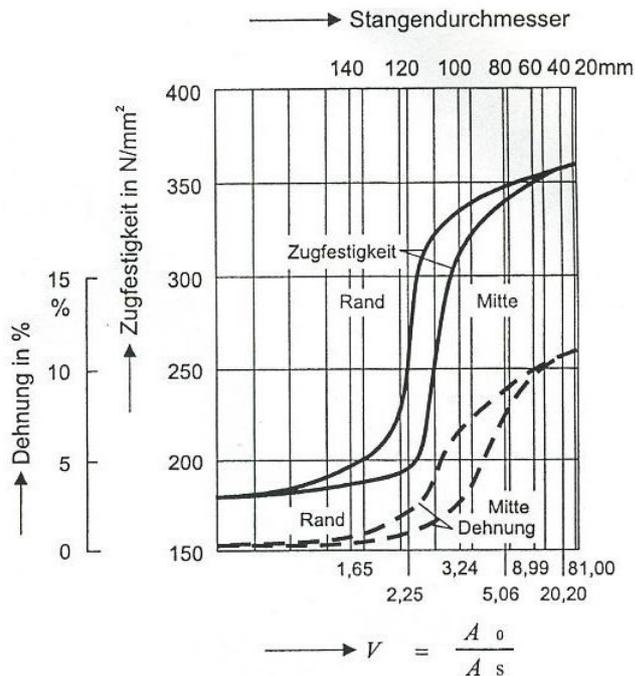


Bild A12: Zugfestigkeit R_m und Bruchdehnung A in Abhängigkeit vom Pressverhältnis an einsträngig gepressten Rundstangen des Werkstoffes MgAl10 /Sauer01/

Die Gestaltung der Querschnitte von Magnesium – Strangpressprofilen sind ähnlich derer von höher festen Aluminiumlegierungen. Wie in **Bild A13** dargestellt, ist die Herstellung von Hohlprofilen als auch von Wanddicken von weniger als 1,5 mm problemlos möglich. /Mertz00/

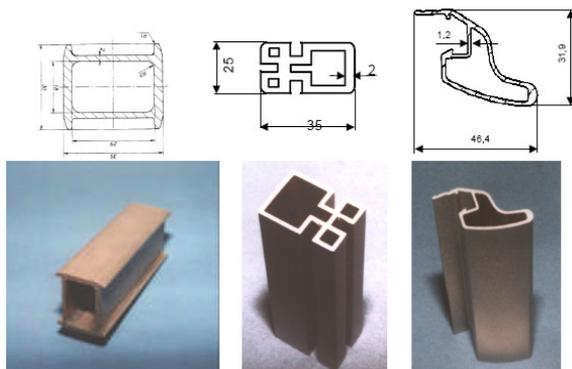


Bild A13: Magnesium – Hohlprofile /Mertz00/

Die Profile müssen nach dem Strangpressen oft noch gerichtet werden. Dies geschieht durch Recken bei Temperaturen zwischen 200 und 300 °C. Ebenfalls wird häufig eine anschließende Wärmebehandlung auf T5 – Zustand oder T6 – Zustand zur Verbesserung der technischen Eigenschaften vorgenommen. /Janssen02/

1.4 Gesenkschmieden

Durch den thermomechanischen Prozess kann beim Schmieden im Gegensatz zum Gießen eine homogene, fehlerfreie und feinkörnige Gefügestruktur erreicht werden. Dadurch können hochfeste, sicherheitsrelevante Bauteile ohne innere Fehler hergestellt werden. Des Weiteren haben gesenkgeschmiedete Bauteile den Vorteil eines der Bauteilkontur folgenden Faserverlaufs. **Bild A14** zeigt den günstigen, den Konturen des Werkstücks folgenden Faserverlauf im Vergleich mit der inneren Struktur des Gussteils und des spanend hergestellten Bauteils. Gesenkschmiedestücke besitzen damit bessere mechanische Eigenschaften sowie saubere, glatte Oberflächen. Gesenkschmiedestücke finden vor allem in solchen Fällen Anwendung, bei denen ein Höchstmaß an Sicherheit gegen Versagen durch Missbrauch, durch Stoßbelastung und durch schwingende Beanspruchung gewährleistet sein muss. /Janssen02/

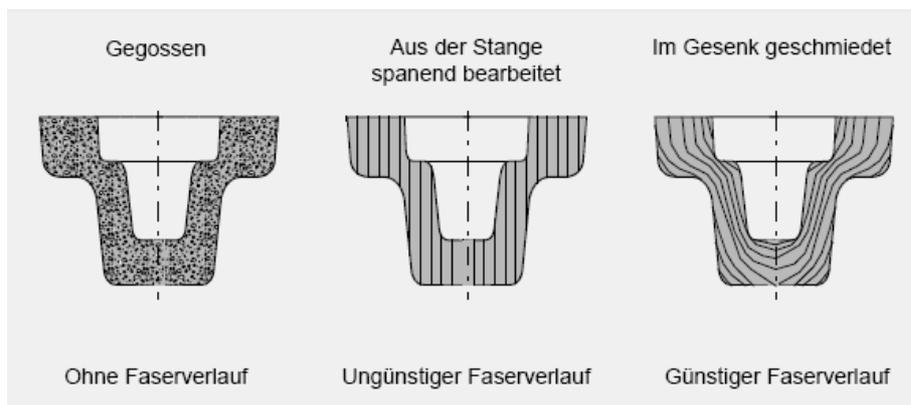


Bild A14: Innere Struktur eines Bauteils bei verschiedenen Herstellungsverfahren /DIN9005/

Zum Schmieden eignet sich aufgrund des feinkörnigen Gefüges insbesondere stranggepresstes Magnesiumhalbzeug. Bei Ausgangsmaterialien mit grobkörnigem Gefüge bilden sich dagegen leicht Risse. Es werden entweder hydraulische Pressen oder langsam arbeitende mechanische Pressen zum Schmieden von Magnesium eingesetzt, da Magnesiumlegierungen auch bei höheren Temperaturen nur ein begrenztes Verformungsvermögen aufweisen. Zum Schmieden von Magnesium werden deshalb oft mehrere Schmiedestadien benötigt, als dies bei Schmiedeteilen aus anderen Werkstoffen der Fall wäre.

Beim Gesenkschmieden werden mehrstufige Verfahren nach dem „Prinzip der fallenden Temperaturen“ angewendet, da so unerwünschte Rekristallisationen vermieden werden, die

vorzugsweise in Bereichen geringer Umformgrade stattfinden und dort zu Kornwachstum und Festigkeitsabnahmen führen. Nach dem Schmieden werden diese Bauteile oft im Wasserbad abgeschreckt, um Rekristallisation und Kornwachstum zu vermeiden.

Wesentliche Vorteile des Gesenkschmiedens sind:

- die Herstellung nahezu einbaufertiger Bauteile,
- die verbesserte Werkstoffausnutzung durch gratloses Schmieden
- die Verringerung der spanenden Nachbearbeitung.

Damit aber die hergestellten Karosserieteile beim Crash nicht brechen sondern sich unter Energieaufnahme plastisch verformen, müssen diese durch Wärmebehandlung zu einer hohen Dehnfähigkeit überführt werden. /Janssen02/

Die Möglichkeit der Verbesserung der Dauerfestigkeitseigenschaften von Schmiedebauteilen ist durch Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung, wie beispielsweise Kugelstrahlen und Festwalzen, gegeben.

Beanspruchungsgerechte Bauteile höherer Festigkeiten sind durch das isotherme Schmieden bereitstellbar. /Becker05/

Beim Schmieden ohne Schmierstoff stellen sich aufgrund der hohen Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug hohe Reibfaktoren ein. Bei einer Umformtemperatur von 350 und 400 °C ergibt sich für die AZ31 – Legierung bei einer Werkzeugtemperatur von 200 °C ein Reibfaktor von annähernd $m = 1$. Bei diesen Reibungsbedingungen findet zwischen Werkzeug und Werkstück keine Relativbewegung statt. /Doege01/

2 Schweißen

Für das Fügen von Magnesiumknetlegierungen mittels Schweißen kommen die Schweißverfahren MIG (Metall – Inertgas)-, WIG (Wolfram – Inertgas)- und WPL (Plasmalichtbogen)-Schweißen zum Einsatz. Es soll in diesem Abschnitt der Einfluss verschiedener Schweißverfahren auf das Korrosionsverhalten von Magnesiumwerkstoffen kurz beschrieben werden, welche in /Thate03/ näher untersucht wurden. Dabei wurden vor allem optimierten Schweißparametern für die jeweiligen Schweißverfahren ermittelt, auf welche aber im Weiteren nicht eingegangen wird.

2.1 Metall – Inertgasschweißen (MIG)

Beim MIG – Schweißen wird ein spritzfreier Schweißprozess im Allgemeinen durch einen kurzschlussfreien Werkstoffübergang erreicht. Mit seiner niedrigen Verdampfungstemperatur verursacht das Magnesium Rückstoßkräfte, die den Tropfenübergang ins Schmelzbad behindern. Ein kurzschlussbehafteter Impulslichtbogen wird als Lichtbogenform eingestellt. Der Werkstoffübergang erfolgt mit Kontakt zum Schmelzbad, die Tropfenablösung während der Impulsphase. Die inerten Gase Argon und Helium sowie deren Gemische stehen als Schutzgas zur Auswahl, wobei reines Argon verwendet wird, da sich die Heliumanteile negativ auf die Prozessstabilität auswirken. Außerdem verschlechtern sie die Tropfenablösung und die Anzahl der Spritzer nimmt zu.

Die Schmelzbadbeherrschung erweist sich beim Schweißen von 1,6 mm dicken Blechen aus AZ31 vor allem bei geringer Schweißgeschwindigkeit als schwierig. Dagegen gestaltet sich das Schweißen von 3 mm dicken Blechen aus AZ61 einfacher. /Thate03/

2.2 Wolfram – Inertgasschweißen (WIG)

Auch bei diesem Schweißverfahren kommt reines Argon als Schutzgas zum Einsatz. Heliumanteile erhöhen die Temperatur des Schmelzbades und fördern die Verdampfung von Magnesium, was sich besonders bei dünnen Blechen ungünstig auf die Ausbildung der Schweißnaht auswirkt. Mit diesem Verfahren lässt sich das Schmelzbad gut beherrschen, weil die Zusatzwerkstoffzufuhr und das Energieeinbringen unabhängig voneinander eingestellt werden können. Des Weiteren ist die Ausgasung des Schmelzbades aufgrund der geringeren Schweißgeschwindigkeit besser möglich. /Thate03/

2.3 Plasmaschweißen (WPL)

Hierbei handelt es sich um eine Verfahrensvariante mit nicht abschmelzender Elektrode. Aufgrund der hohen thermischen Belastung beim Schweißen mit Wechselstrom kann auch bei geringen Stromstärken nur ein relativ großer Brenner mit entsprechenden Plasmadüsendurchmessern benutzt werden. Da Heliumanteile die Temperatur erhöhen und die Verdampfung von Magnesium fördern, wird als Schutzgas und Plasmagas reines Argon eingesetzt. Die Zusatzwerkstoffzufuhr kann auch bei diesem Verfahren unabhängig vom

Lichtbogen eingestellt werden. Im Vergleich zum WIG – Schweißen ist die Energiedichte beim WPL höher. Aufgrund der hohen Energiedichte des Plasmalichtbogens ist bei vielen Werkstoffen die Ausbildung eines „Stichloches“ bekannt. Dieser Effekt ist aber bei Magnesiumlegierungen nicht zu beobachten, da die Legierung einen großen Schmelzbereich und die Schmelze eine niedrige Viskosität aufweist. Deshalb wird mit Badsicherung gearbeitet. Die Verdampfung des Magnesiums beim Schweißen führt zu schnellem Verschleiß der Plasmadüsen. Somit kann ein stabiler Prozess nicht lange aufrecht gehalten werden. Der Einsatz einer kleineren Plasmadüse verbessert jedoch die Prozessstabilität. /Thate03/

Die Temperaturfeldmessungen, die in /Thate03/ durchgeführt wurden, ergaben, dass beim MIG – Schweißen der Wärmeeintrag deutlich größer ist als beim WIG- und WPL – Schweißen. Der Wärmeeintrag beim WIG- und WPL – Schweißen ist etwa gleich groß, wobei beim WIG – Schweißen der Einfluss von Blechdicke und Schweißgeschwindigkeit gering ist. Beim WPL – Schweißen steigt mit größerer Schweißgeschwindigkeit der Wärmeeintrag deutlich.

2.4 Werkstoffuntersuchungen im Schweißnahtbereich

Insbesondere beim MIG – Schweißen der Magnesiumlegierung AZ31 zeigten metallographische Untersuchungen Schweißfehler in Form von Schweißrisen im Übergang Schweißgut / Wärmeeinflusszone sowie Wurzeldurchhängungen und Schweißporen im Schweißgut auftreten. Insgesamt war bei allen durchgeführten Schweißungen keine ausgeprägte Wärmeeinflusszone mit signifikanten Gefügeveränderungen im Vergleich zum Grundwerkstoff vorhanden.

AZ31 weist im Gegensatz zu AZ61 ein inhomogenes Gefüge mit mehr Ausscheidungen auf. Das Schweißen des Grundwerkstoffes AZ31 mit dem höher Aluminiumlegierten Zusatzwerkstoff AZ61 bildet eine unhomogene Elementverteilung im Schweißgutbereich aus. Durch Ermitteln der Zugfestigkeit im Vergleich zu dem ungeschweißten Grundwerkstoff wird der Einfluss der unterschiedlichen Schweißverfahren auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. In **Bild A15** sind die Zugfestigkeitswerte im Vergleich mit den ungeschweißten Grundwerkstoffen als Säulendiagramm dargestellt. /Thate03/

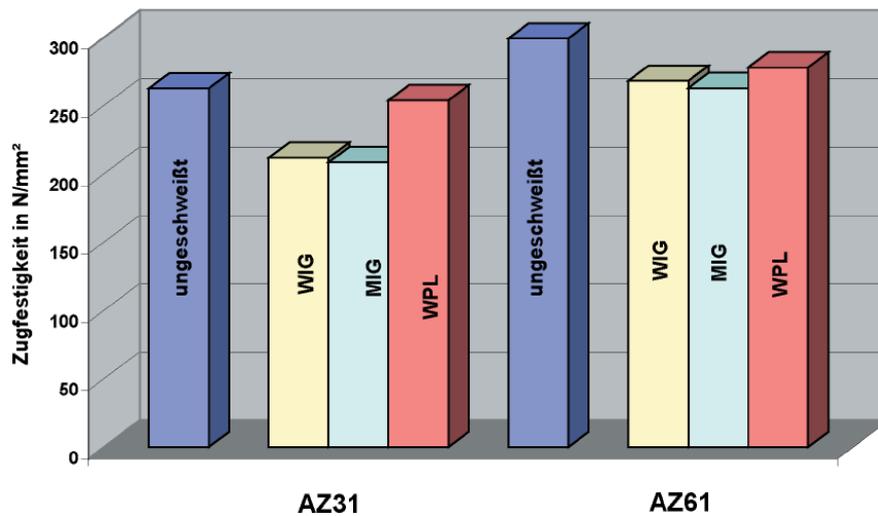


Bild A15: Zugfestigkeiten der geschweißten Proben im Vergleich zum ungeschweißten Grundwerkstoff /Thate03/

Die Zugfestigkeit fällt bei AZ31 – insbesondere nach dem WIG- und MIG-Schweißen – im Vergleich zu der Zugfestigkeit am ungeschweißten Grundwerkstoff auffallend ab. Nach dem Plasmaschweißen ist dieses Abfallen nicht signifikant.

Bei AZ61 ist der Zugfestigkeitsabfall nach dem Schweißen geringer. Der Einfluss der unterschiedlichen Schweißverfahren mit artgleichem Zusatzwerkstoff auf die Werkstofffestigkeit ist hier nicht so markant. Die Bruchflächen lagen bei beiden Grundwerkstoffen und allen Schweißverfahren ohne nachweisbare Tendenz im Schweißgut und im Schweißnahtübergang.

2.5 Korrosionsuntersuchungen

Freibewitterungsversuche ohne und mit zusätzlicher Chloridbelastung wurde auf dem Versuchsstand des Instituts für Korrosionsschutz in Dresden – Mockritz durchgeführt. Die Ergebnisse der Korrosionsversuche ohne Zusatzbelastung zeigt **Bild A16**. Beim Werkstoff AZ31 sinken nach anfänglich stärkerer Korrosion mit der Zeit die Abtragswerte auf etwa gleich bleibende Beträge. Dabei weisen die Korrosionsabträge der Metall – Inertgasgeschweißten Proben nach Versuchsbeginn die höchsten Werte auf. Nach neun Monaten Versuchsdauer gleichen sich die Korrosionsverluste aller Schweißproben an. Erst nach einem dreiviertel Jahr tritt auch bei AZ61 geringe Korrosion auf, ein tendenzieller Einfluss der verschiedenen Schweißverfahren auf das Korrosionsverhalten ist nicht vorhanden. /Thate03/

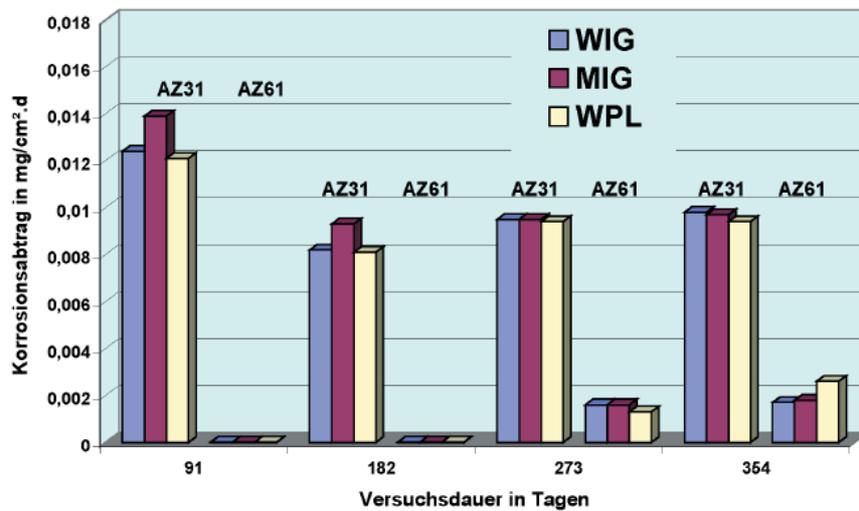


Bild A16: Korrosionsabträge nach Freibewitterung ohne Zusatzbelastung nach DIN EN ISO 8565 /Thate03/

Abschließend lässt sich, anhand der Untersuchungen von /Thate03/ festhalten, dass die Magnesiumknetlegierungen AZ31 und AZ61 nach durchgeführter Optimierung der Schweißparameter gut mechanisiert schweißbar waren. Bei der Anwendung des MIG – Schweißens an dünnen AZ31 – Blechen bestanden aber Probleme. Hier war bei kleinen Schweißgeschwindigkeiten der Dampfdruck zu groß. Eine geringere Energieeinbringung durch Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit führte im Schweißnahtbereich zur Bildung von Rissen und Poren.

Die durchgeführten Korrosionsuntersuchungen zeigten, dass bei den untersuchten Magnesiumwerkstoffverbindungen die geringe Eigenkorrosionsbeständigkeit der Grundwerkstoffe AZ31 und AZ61 und des Schweißzusatzwerkstoffes AZ61 das Korrosionsverhalten dieser Schweißverbindung bestimmt. Dabei weisen die AZ61 – Grundwerkstoffproben grundsätzlich eine bessere Korrosionsbeständigkeit auf. /Thate03/

3 Laserstrahltechnik

Für die Verwendung von Schweißkonstruktionen aus Magnesiumknetlegierungen, insbesondere in sicherheitsrelevanten Anlagen, ist eine sichere Fügeprozesstechnik Voraussetzung. Hervorragende Bedingungen für eine breite Nutzung bietet, aufgrund der vergleichsweise geringen thermischen Belastung und seiner guten Automatisierbarkeit, das Verfahren des Laserstrahlschweißens. Dabei ergeben sich bei den Laserstrahlschweißen von Magnesiumwerkstoffen Vorteile gegenüber herkömmlichen Schweißverfahren. Durch die

hohen Schweißgeschwindigkeiten können Entfestigungen im Fügezonbereich weitgehend vermieden werden. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffe erfordert zur Vermeidung von Bindefehlern trotz der niedrigen Schmelzpunkte der Legierungen eine hohe und konzentrierte Wärmezufuhr beim Schweißen, die durch die Lasertechnik gewährleistet wird.

Die technische Besonderheit dieser Energiequelle besteht in der hohen Laserstrahlleistung. Mit dem Nd:YAG – Laser stehen 4 kW mit einer hohen Strahlqualität am Werkstück zur Verfügung. Im Fokus lassen sich dadurch sehr hohe Leistungsdichten erzeugen, die zu schmalen Schweißnähten und Schneidfugen führen. Diese Strahlqualität ermöglicht hohe Arbeitsgeschwindigkeiten und minimiert durch einen großen Abstand zwischen Bearbeitungsoptik und Werkstück das Verschmutzen der Optik. Für die meisten Werkstoffe ergibt die Wellenlänge des Nd:YAG – Lasers von 1,06 µm vorteilhafte Reflexions- bzw. Absorptionsverhältnisse. Die gute Pulsbarkeit der Nd:YAG – Festkörperlaser ist vorteilhaft für die Bearbeitung. Durch Schweißen im Pulsbetrieb wird die Oxidschicht bei Magnesiumlegierungen leichter zerstört, so dass auf Flussmittel verzichtet werden kann. Beim Nd:YAG – Laser wird eine flexible Strahlführung über Lichtwellenleiter realisiert, wodurch sie leicht in bereits bestehende Fertigungslinien integriert werden können.

Gute Nahtausbildung wird bei Verwendung von Schweißzusatz und Blechstärken von 1,3 mm bei Schweißgeschwindigkeiten bis 4,5 m/min mit einer Leistung von 1,6 kW erreicht. Eine leichte Nahtüberhöhung und ein geringer Wurzelüberhang stellen sich ein, die einen weichen Übergang zum Grundwerkstoff aufweisen. Die erhaltene Nahtgeometrie lässt zudem verbesserte mechanische – technologische Eigenschaften und ein günstigeres Schwingfestigkeitsverhalten erwarten. Zur Charakterisierung der Verbindungsgüte wurden an der TU Clausthal Zugversuche durchgeführt. Die Ergebnisse hierfür sind in **Bild A17** dargestellt. Bei den Schweißproben ohne Zusatzwerkstoff ist die gegenüber dem Grundwerkstoff reduzierte Verformungsfähigkeit zu erkennen. Dies lässt auf die Kerbwirkung durch die Kraftumleitung im Nahteinfallsbereich schließen. Die Auswertung der mit Zusatz geschweißten Nähte zeigt, dass diese Proben ein duktileres Verhalten aufweisen.

/Draugelates98/

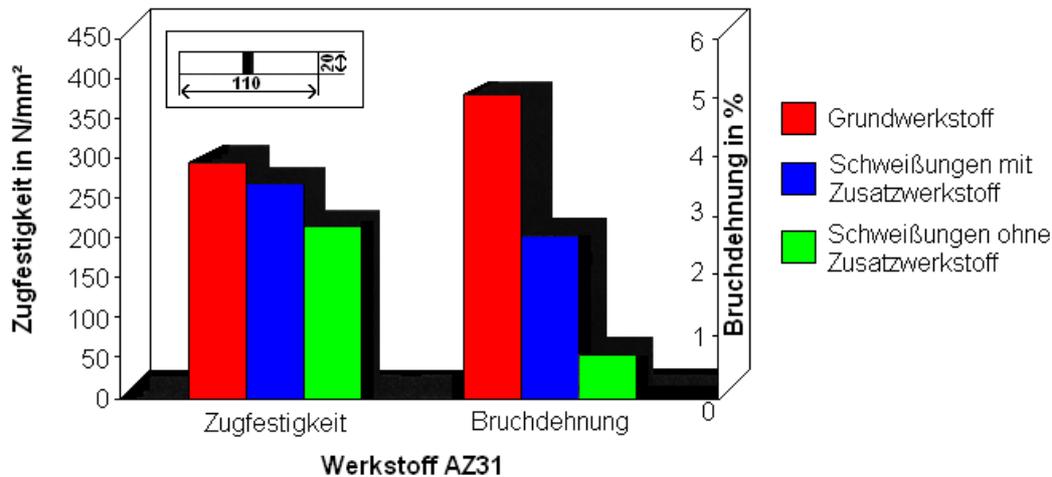


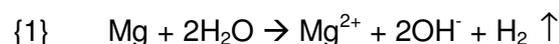
Bild A17: Ergebnisse der Zugversuche bei AZ31B (Blechdicke 1,3 mm) /Draugelates98/

Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit des Verfahrens lässt sich über die gesamte Nahtlänge eine gleich bleibende Qualität gewährleisten. Die Verbindungen weisen eine einwandfreie Durchschweißung und Einformung der Naht auf. Der Einsatz von Schweißzusatzmaterial ermöglicht es, gezielt geeignete Nahtgeometrien einzustellen, wobei insbesondere die Nahtüberwölbung, Wurzel Ausbildung und Flankenbindung wichtige Merkmale bilden. /Draugelates98/

4 Zerspanung mit wassergemischten Kühlschmierstoffen

Die eigentliche mechanische Bearbeitung von Magnesium stellt keine besondere Herausforderung für Maschine und Werkzeug dar. Mit geometrisch definierter oder undefinierter Schneide lassen sich Magnesiumlegierungen leicht in ihrer Form verändern. Schwieriger ist der Umgang mit der bei der Bearbeitung entstehenden Wärme und den feinen Spänen, die bei entsprechenden Prozessen entstehen können.

Hochentzündliche Stäube, die brandschutztechnisch kaum zu beherrschen bzw. zu entschärfen sind entstehen bei der mechanischen Bearbeitung ohne Schmierstoff. Weiterhin ist bei der Bearbeitung von Magnesium im wassergemischtem System die Reaktivität mit Wasser zu beachten:



Diese muss durch eine spezielle Formulierung des Kühlschmierstoffs so weit wie möglich reduziert werden. Die Emulsion benötigt zudem eine gute Stabilität auch bei hoher Härte (Bildung von Mg^{2+}) und eine erhöhte Pufferwirkung, um den Anstieg des pH-Wertes zu

verringern (Bildung von OH^- – Ionen).

Eine zentrale Herausforderung für den wassergemischten Kühlschmierstoff bei der Bearbeitung von Magnesium stellt die chemische Reaktion {1} dar. Um weitere Reaktionen auszuschließen muss die Wasserstoffbildung so gering wie möglich ausfallen.

Durch die Bildung von OH^- – Ionen steigt der pH – Wert, welcher durch gute Pufferung abgefangen werden sollte, denn mit zunehmendem pH – Wert verringert sich die Löslichkeit von Magnesium.

Die Oberflächenbeschaffenheit im Hinblick auf die optische Erscheinung wird umso besser, je weniger stark ausgeprägt die Reaktion {1} ist, da die Reaktion von Magnesium mit Wasser die Veränderung der Oberfläche des Bauteils zur Folge hat.

Für die Formulierung des Kühlschmierstoffs bedeuten diese genannten Probleme eine Vielzahl von Anforderungen. Zur Verringerung der Reaktivität der Magnesiumoberfläche, werden spezielle Korrosionsinhibitoren genutzt, die eine Wechselwirkung mit der obersten Schicht des Leichtmetalls eingehen. Für die Pufferung des pH – Werts sorgen in Kühlschmierstoffen zumeist Substanzen aus der Klasse der Alkanolamine.

Die Anforderungen an die Bearbeitungsflüssigkeit bei Magnesium sind sehr hoch, weil sehr verschiedene Aspekte beachtet werden müssen. Diese sind:

- Pufferung des pH – Werts
- Stabilität der Emulsion auch bei hoher Härte
- Verringerung der Reaktivität von Magnesium mit Wasser
- Einhaltung der Grenzwerte für Wasserstoff
- Kompatibilität mit Magnesium
- Hohe Benetzungs- und Spülfähigkeit der Emulsion
- Gute Eigenschaften bei der Aufbereitung des Kühlschmierstoffs

Es kann somit festgehalten werden, dass die Reaktivität von Magnesium im wässrigen Medium kontrolliert werden muss, die Bestandteile des Kühlschmierstoffs Magnesiumkompatibel sein müssen, die Stabilität der Emulsion auch bei hoher Härte gewährleistet sein muss und eine hohe Spülfähigkeit von zentraler Bedeutung bei der Magnesium – Zerspanung ist. Des Weiteren sind die Pflege und Kontrolle während des Einsatzes sehr wichtig. Außerdem kann durch Brikettierung der Magnesiumspäne ein Recycling erfolgen. /Schwerin06/

B. Erfolgskontrollbericht

1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Im Rahmen dieses Projektes ist es den beteiligten Projektpartnern gelungen, eine bündnisübergreifende Kompetenzerhöhung, Geschäftsfelderweiterung, sowie Markterschließung aber auch eine zukünftige Standortsicherung zu erreichen. Dies gelang nicht zuletzt durch die Einbindung von Zulieferern, die außerhalb der Magnesium-Knetlegierungs-Wertschöpfungskette angesiedelt sind, aber für Endprodukte unerlässliche Komponenten bereitstellen.

Die Ziele wurden sowohl durch anspruchsvolle technologische bzw. konstruktive, als auch marktstrategische Zielstellungen umgesetzt.

Im Rahmen dieses Projektes konnte ein erheblicher Beitrag zum Aufbau regionaler Kompetenzen im Zusammenspiel von Wirtschaft und Wissenschaft geleistet werden, mit dem Ziel die Plattform im Raum Zwickau-Chemnitz-Dresden zu etablieren und den europäischen Wachstumsmarkt für Mg-Produkte erfolgreich zu nutzen.

Die anfängliche Vision des Wachstumskerns TeMaK, der Aufbau einer Plattform zur Erzeugung, Verarbeitung und Wiederverwertung von Mg-Flachmaterial auf wissenschaftlich/technisch höchstem Niveau und mit großer wirtschaftlicher Schlagkraft für die deutschen und internationalen Märkte, ist somit realisiert.

Damit wurde ein entscheidender Meilenstein auf dem Weg zur unausweichlichen Verschiebung der Ressourcenschwerpunkte auch unter energieökonomischer Sicht erreicht.

2 Wissenschaftlich- technisches Ergebnis, erreichte Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen

Das verfolgte Ziel, serienfähige Bauteile aus Magnesium-Knetlegierungen zu entwickeln, konnte aus Konstruktionssicht in vollem Umfang erfüllt werden, fertigungstechnisch sind Abstriche insbesondere bezüglich der Oberflächenqualität zu machen.

Die erforderlichen übergreifenden Innovationen umfassten die Fertigung von Halbzeugen (Bänder, Bleche) mittels Gießwalzverfahren (durch MgF Magnesium Flachprodukte), die Entwicklung produktiver, effizienter Umform- und Fügetechnologien mit technisch und wirtschaftlich optimierten Parametern, die Herstellung von Oberflächen, die korrosionsschutztechnisch höchsten Ansprüchen genügen. Eine für den Einsatz im Fahrzeugbau notwendige „Class-A-Qualität“ der Oberflächen konnte im Bearbeitungszeitraum des Förderprojektes nicht realisiert werden. Es wird jedoch von den im Projektverbund beteiligten Firmen eingeschätzt, dass durch weitere Optimierung der technologischen Parameter diese Vorgaben erreicht werden können.

Im Umfang der Betrachtung stand natürlich nicht zuletzt das gesamte Recyclingkonzept nach Vorgaben der EU-Richtlinie für 2015 (Europäische Richtlinie über Altfahrzeuge Richtlinie 2000/53/EG).

Als Nebenergebnisse konnten weitere Erkenntnisse bezüglich möglicher aber bis zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht ausgereifter Technologien, sowie konstruktiver Umsetzungsvarianten gewonnen werden.

Die gesammelten Erfahrungen wurden in Zusammenarbeit mit den beteiligten Projektpartnern in allgemeingültige Richtlinien für die Konstruktion von Bauteilen aus Magnesium-knetlegierung zusammengefasst. Diese Richtlinien entsprechen einem ersten Erkenntnisstand und müssen nach der für bessere Oberflächen notwendigen weiteren Optimierung der technologischen Parameter aktualisiert werden

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

3.1 Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen

Bis zum Projektende wurden durch die Voith Engineering Services GmbH keine schutzrechtlichen Maßnahmen ergriffen.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch die Konstruktion des Demonstrators in ständiger Zusammenarbeit mit der Fertigung und durch die Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien bezüglich der Arbeit mit Magnesiumknetlegierungen, konnten die Konstruktionskompetenzen erfolgreich erweitert werden. Damit ist ein entscheidender Schritt für weitere mögliche und in Zukunft immer relevanter werdende Leichtbaukonstruktionen insbesondere auch mit Magnesiumlegierungen gelungen.

Mit dem erlangten Know-how wird die gesamte technologische Basis des Unternehmens weiter ausgebaut. Die erworbenen Erkenntnisse ermöglichen eine allgemeine Erweiterung der Kernkompetenzbereiche „Straßenfahrzeuge“ und „Schienenfahrzeuge“ der Voith Engineering Services GmbH.

3.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die erreichten Projektergebnisse stellen erste Konzepte für die Konstruktion und den Umgang mit Magnesiumknetlegierungen dar. Mit Hilfe des Demonstrators konnte erfolgreich aufgezeigt werden, dass Bauteile grundsätzlich aus Magnesiumlegierungen hergestellt werden können, welche qualitativ für den Fahrzeugbau geeignet sind. Diese Grundlagen und das gewonnene Know-how müssen nun genutzt werden, um weitere Strukturbauteile zu entwickeln, zu konstruieren und zur Serienreife zu bringen.

In möglichen Folgeprojekten wird die Zusammenarbeit der Projektpartner nach Projektende fortgeführt, da die wissenschaftlichen und technologischen Ergebnisse und die daraus folgenden Erkenntnisse den wirtschaftlichen Erfolgsaussichten zugrunde liegen.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Aus den vorgenannten Punkten ergibt sich eine nächste Phase. Es sind weitere innovatorische Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse notwendig um die entstandene Plattform zur Erzeugung, Verarbeitung und Wiederverwertung von Mg-Flachmaterial in der Automobil- und Maschinenbau-Region Zwickau-Chemnitz-Dresden erfolgreich wachsen zu lassen

Voith Engineering Services wird die Marktentwicklung langfristig weiter verfolgen und in Verbindung mit den Projektpartnern versuchen, eine Strategie zur erfolgreichen Etablierung des Konzeptes auf diesem Wachstumsmarkt zu entwerfen.

Zurzeit erarbeiten die Projektpartner eine Strategie zum Aufbau eines neuen Wachstumskerns. Folgende Aspekten müssen dabei Berücksichtigt werden.

Um Förderfähig zu sein, muss der geplante Wachstumskern eine neue und andere Orientierung als TeMaK besitzen. Kernziel dabei kann die Erarbeitung neuer Prozesse und Verfahren aufbauend auf die bisherigen Erkenntnisse sein und daraus resultieren die Erschließung neuer Produkte und Märkte.

4 Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Im Rahmen der Erarbeitung eines Konzeptes zur Gestaltung der einzelnen Teilelemente der Demonstratortür wurden verschiedene Varianten betrachtet. Bei einigen Lösungskonzepten zeigte sich in der Simulation, dass sie für die betrachteten Fertigungsverfahren nicht umsetzbar waren. Im Laufe des Projektes wurden daher mehrere Änderungsrounds im Partnerverbund durchlaufen und die Konstruktion entsprechend angeglichen.

Dies gilt besonders für das sehr fertigungsproblematische Innenteil und IHU-Bauteil, welche aufgrund ihrer sehr komplexen Formen und der hohen Ziehtiefe bzw. engen Radien und Dehnungskapazitäten viele Herausforderungen für Konstruktion und Fertigung beinhalten.

5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Zur Darstellung und Präsentation der erzielten Ergebnisse wurden Präsentationen erstellt und auf der TeMaK-Homepage veröffentlicht.

Weitere Präsentationsmöglichkeiten für die gewonnenen Ergebnisse über den Einsatz von Magnesiumknetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktlebenszyklus werden zurzeit von Voith Engineering Services geprüft und in die Akquisestrategien aufgenommen. Während der Laufzeit des Projektes TeMaK wurde der in Entstehung begriffene technologische Wissenszuwachs im Auftrag der Projektpartner durch das RKW Sachsen in Vorträgen sowie durch Präsentationen auf Fachmessen an eine spezifische Kundenzielgruppe herangetragen.

6 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Erklärung:

Bei der Bearbeitung des Projektes wurde der geplante Zeit- und Kostenrahmen eingehalten.

ppa.


Jan Wabst

Kaufmännischer Leiter

C. Zwischenberichte und Workshops

1 Zwischenbericht 2007

Zwischenbericht zu Nr. 8.1

ZE: Hörmann Engineering GmbH
Aue 23-27
09112 Chemnitz

Förderkennzeichen:
03WKBF52

Vorhabensbezeichnung:
„Technologieplattform zum Einsatz von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus“

Laufzeit des Vorhabens:
01.04.2007 - 31.03.2010

Berichtszeitraum:
01.04.2007 - 31.12.2007

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Berichtszeitraum:

- Es wurden geeignete Bauteile für den beabsichtigten Nachweis der technologischen Durchführbarkeit unter Verwendung des Werkstoffs Magnesium-Knetlegierung ausgewählt. (Demonstrator: PKW-Vordertür, siehe Bild1)

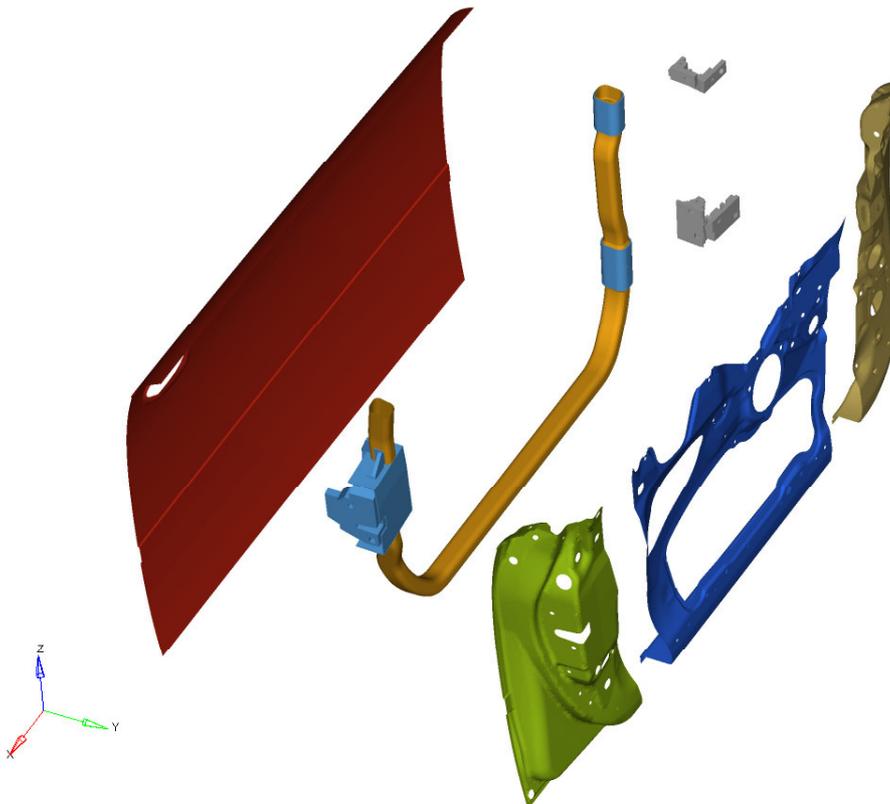


Bild 1: Explosionsdarstellung der wesentlichen Bestandteile des Demonstrators

- Die Anforderungen an die Bauteile wurden unter technologischem Blickwinkel spezifiziert. Insbesondere wurden zur Demonstration verschiedener branchentypischer Technologien Bauteilkomponenten berücksichtigt, die geeignet erschienen den jeweiligen Nachweis

zum möglichen und effektiven Einsatz von Magnesiumknetlegierungen exemplarisch zu erbringen. (Tiefziehen, Rohrbiegen, Innen-Hochdruck-Umformen, Fließpressen)

- Die technischen Anforderungen wurden hinsichtlich des zu demonstrierenden Einsatzzwecks abgestimmt. Dabei wurde in speziellen Arbeitskreisen des Förderverbundes beraten und festgelegt, welche Konstruktionsmerkmale des Demonstrators abweichend von einer üblicherweise für Seriellösungen gültigen Ansätzen technologiebeschreibend abgeändert wurden, wie zum Beispiel Schweißnaht in der Außenhaut wegen unzureichender Breite des Ausgangsmaterials, mehrfach unterteilter Rahmen aus technologisch unterschiedlich erzeugten Komponenten (Fließpressen, IHU, Rohrbiegen)
- Es erfolgte interaktive Mitarbeit bei der Beschreibung der Bauteilanforderungen
- Die Konstruktion der Referenzbauteile (Demonstrator) wurde bis zur Übergabe an IWU für erste Ziehsimulationen zur Ermittlung ggf. weiterer erforderlicher konstruktiver Änderungen fertig gestellt und übergeben.
- Die Ermittlung grundlegender Berechnungsanforderungen unter Beachtung der Werkstoffbesonderheiten wurde durchgeführt. Insbesondere wurden branchentypische Simulationsverfahren und Belastungssituationen recherchiert und für den vorliegenden Nachweiszweck angepasst. z.B. Auswahl von Lastfällen wie Brüstungsdruck, Türabsenkung und Überöffnen.
- Erste Berechnungsmodelle zur strukturmechanischen Bewertung mittels FEM wurden erzeugt und befinden sich in Vervollständigung.

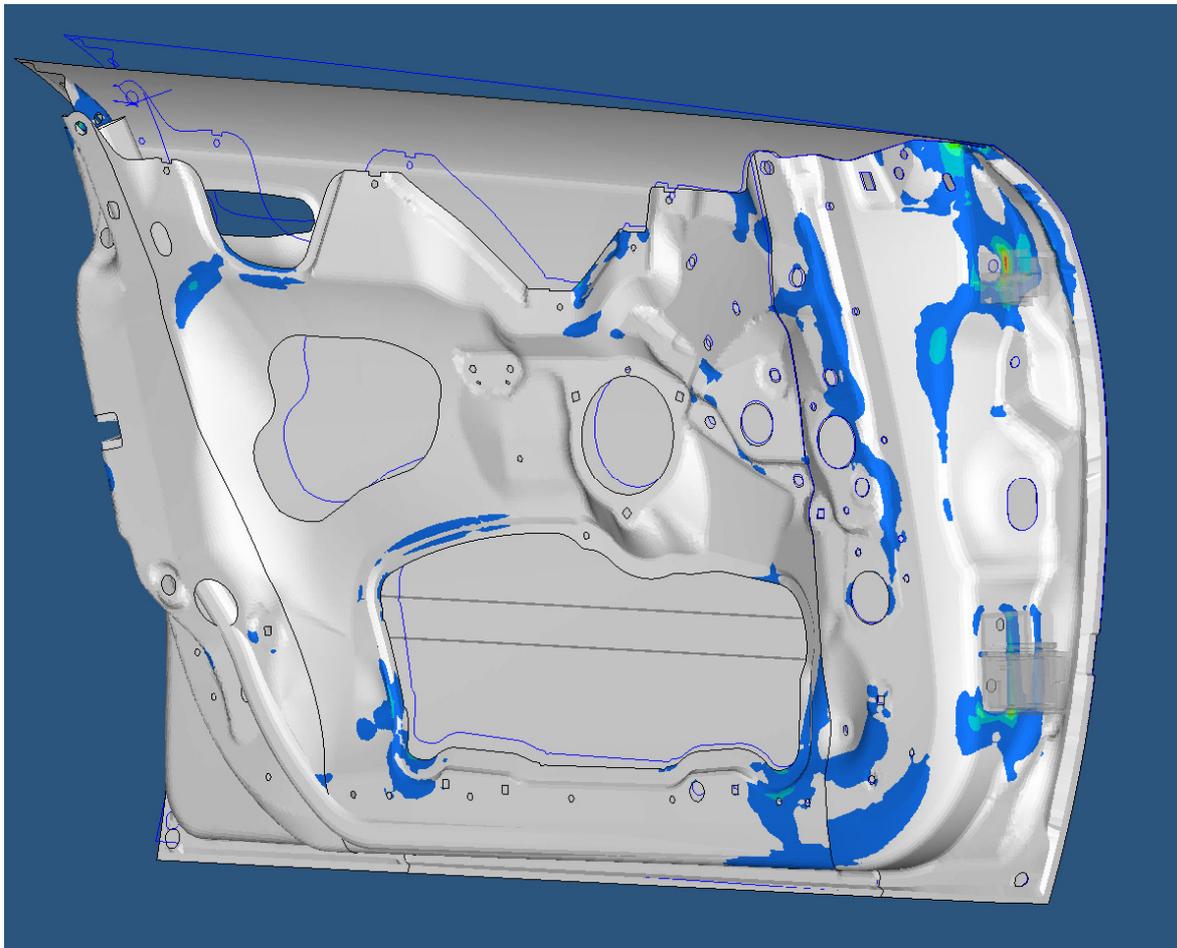


Bild 2: FEM-Berechnungsmodell des Demonstrators für lineare Strukturmechanik

2. Vergleich Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung:

Arbeitsstand, Zeitrahmen und Mittelverbrauch liegen planmäßig

3. Erfolgsaussichten des Vorhabens:

Im Berichtszeitraum liegen keine Gründe für eine Änderung der Erfolgsaussichten gegenüber der Vorhabensbeschreibung vor.

4. Frage nach Parallelentwicklung:

Gegenwärtig ist keine Entwicklungstätigkeit Dritter mit gleichen Zielen bekannt.

5. Änderungen der Zielsetzung

Aus dem bisherigen Verlauf des Förderthemas ergeben sich keine Erfordernisse zur Änderung der Zielsetzung des Vorhabens.

6. Fortschreibung des Verwertungsplans:

Im Berichtszeitraum ergaben sich keine Inhalte zur Fortschreibung des Verwertungsplans hinsichtlich:

- Erfindungen und Schutzrechten
- Wirtschaftlichen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftlich/technischen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlußfähigkeit

2 Zwischenbericht 2008-1

Zwischenbericht zu Nr. 8.1

ZE: Hörmann Engineering GmbH
Aue 23-27
09112 Chemnitz

Förderkennzeichen:
03WKBF52

Vorhabensbezeichnung:
„Technologieplattform zum Einsatz von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus“

Laufzeit des Vorhabens:
01.04.2007 - 31.03.2010

Berichtszeitraum:
01.01.2008 - 30.06.2008

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Berichtszeitraum:

- Die Anforderungen an die Bauteile, die sich aus den beabsichtigten Technologien ergeben, wurden weiter untersetzt und iterativ in konstruktive Änderungen überführt. Dabei wurde schrittweise ein Stand erreicht, auf dessen Basis weitere Tiefziehsimulationen mittels FEM durch andere Projektpartner erfolgten. Anhand dieser Ergebnisse erfolgte eine nun intensive konstruktive Anpassung in erster Linie von Türaußen- und Türinnenschale. Im Einzelnen waren insbesondere die Erzielung tiefziehfähiger Radien sowie die Lage der Schweißnähte des Tailored Blanks sowie die jeweils erforderliche Ziehtiefe Kriterien für entsprechende Änderungen (siehe dazu Bild 1). Der Endstand ist hier jedoch noch nicht erreicht.

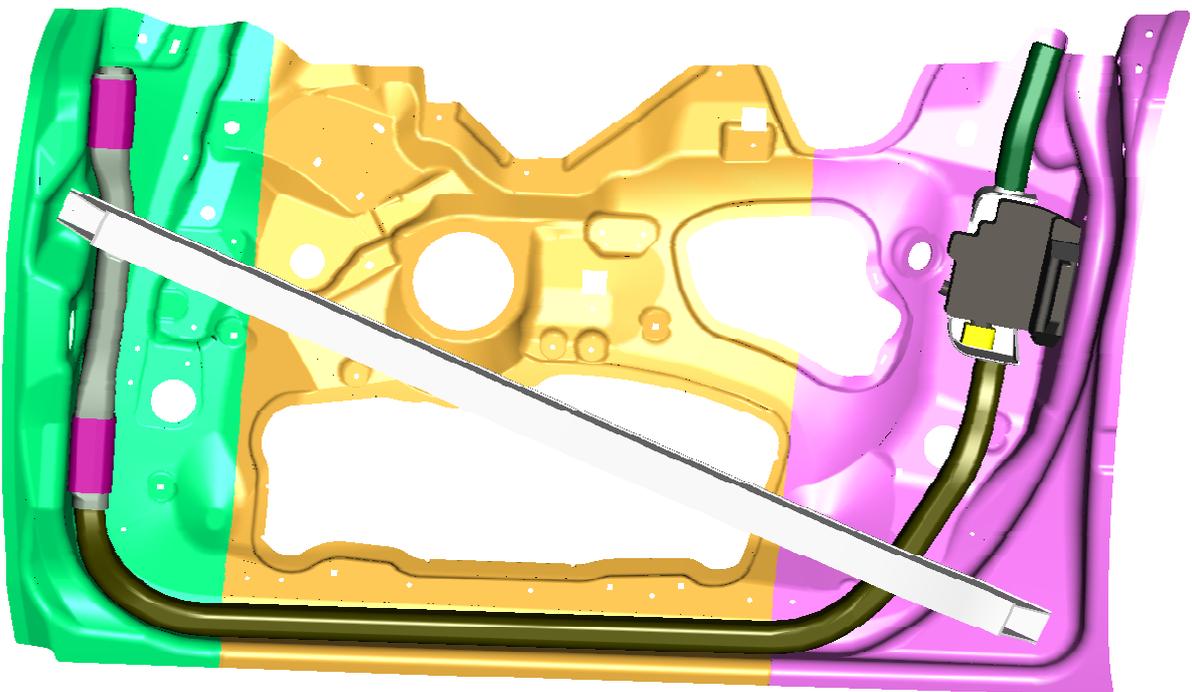


Bild 1: Arbeitsstand Türinnenschale

Auf Basis des Konstruktionsstandes der Flächenbauteile wurde ebenfalls die entsprechende Bearbeitung der Rahmenbauteile fortgeführt. (siehe dazu die Bilder 2 und 3)

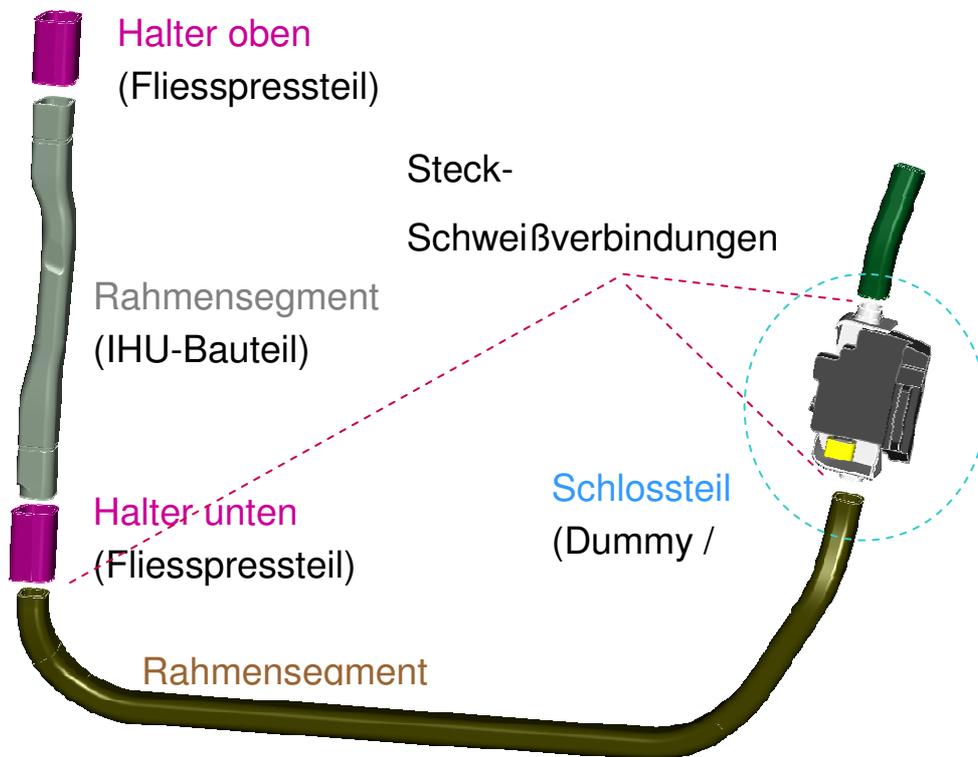


Bild 2: Arbeitsstand Rahmenaufbau

A 1:1

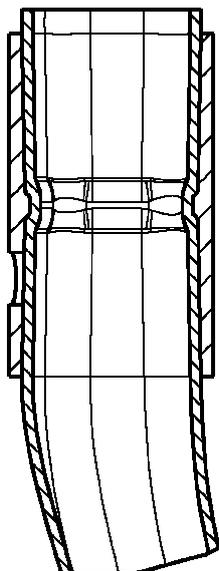


Bild 3: Arbeitsstand Verbindungstechnologie

- Die Anpassung der Berechnungsmodelle zur strukturmechanischen Bewertung wurde begonnen und läuft den konstruktiven Festlegungen direkt nach

2. Vergleich Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung:

Arbeitsstand, Zeitrahmen und Mittelverbrauch liegen planmäßig

3. Erfolgsaussichten des Vorhabens:

Im Berichtszeitraum liegen keine Gründe für eine Änderung der Erfolgsaussichten gegenüber der Vorhabensbeschreibung vor.

4. Frage nach Parallelentwicklung:

Gegenwärtig ist keine Entwicklungstätigkeit Dritter mit gleichen Zielen bekannt.

5. Änderungen der Zielsetzung

Aus dem bisherigen Verlauf des Förderthemas ergeben sich keine Erfordernisse zur Änderung der Zielsetzung des Vorhabens.

6. Fortschreibung des Verwertungsplans:

Im Berichtszeitraum ergaben sich keine Inhalte zur Fortschreibung des Verwertungsplans hinsichtlich:

- Erfindungen und Schutzrechten
- Wirtschaftlichen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftlich/technischen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlußfähigkeit

Anlage: Darstellung zum zwischenzeitlich erreichten Konstruktionsstand

3 Zwischenbericht 2008-2

Zwischenbericht zu Nr. 8.1

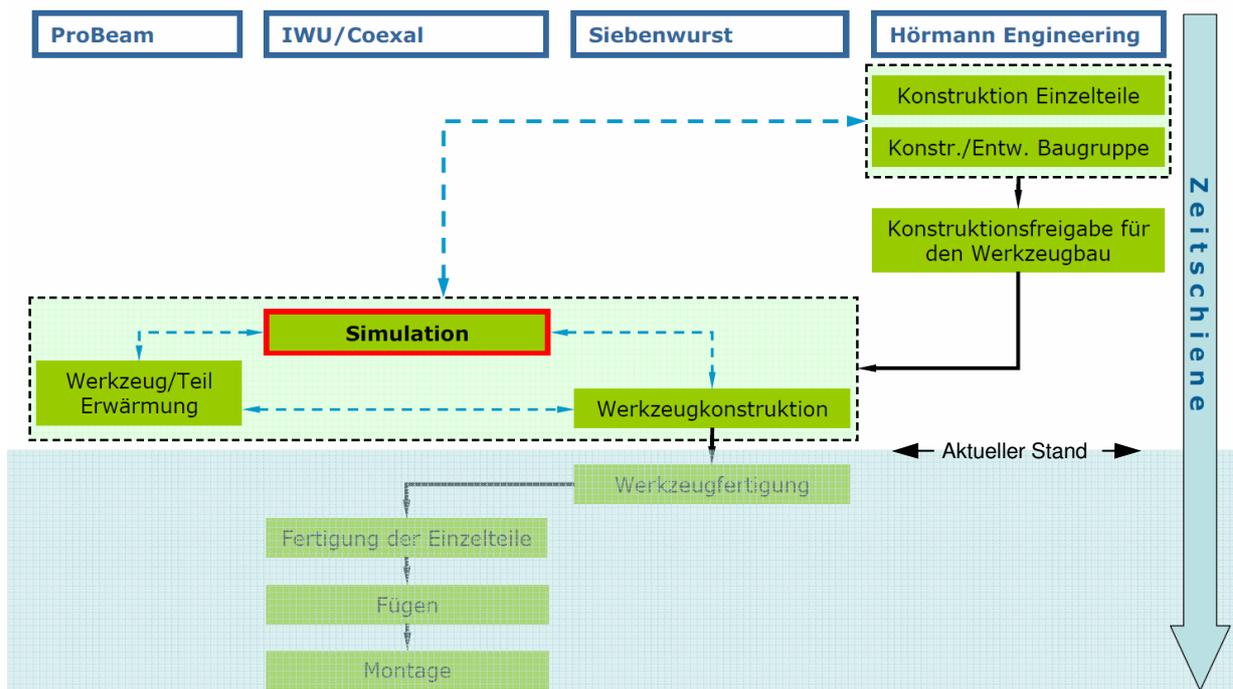
ZE: Hörmann Engineering GmbH Aue 23-27 09112 Chemnitz	Förderkennzeichen: 03WKBF52
Vorhabensbezeichnung: „Technologieplattform zum Einsatz von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus“, E2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2007 - 31.03.2010	
Berichtszeitraum: 01.07.2008 - 31.12.2008	

1. Kurzfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse im Berichtszeitraum

4.1. Ablauf und Stand der Projektarbeiten

Nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten aller Einzelteile und Baugruppen für den Demonstrator erfolgte eine erste Freigabe für die Konstruktion der fertigungs-/technologieabhängigen Werkzeuge (Tiefziehen, Falzen, Fließpressen, Rohrbiegen und IHU).

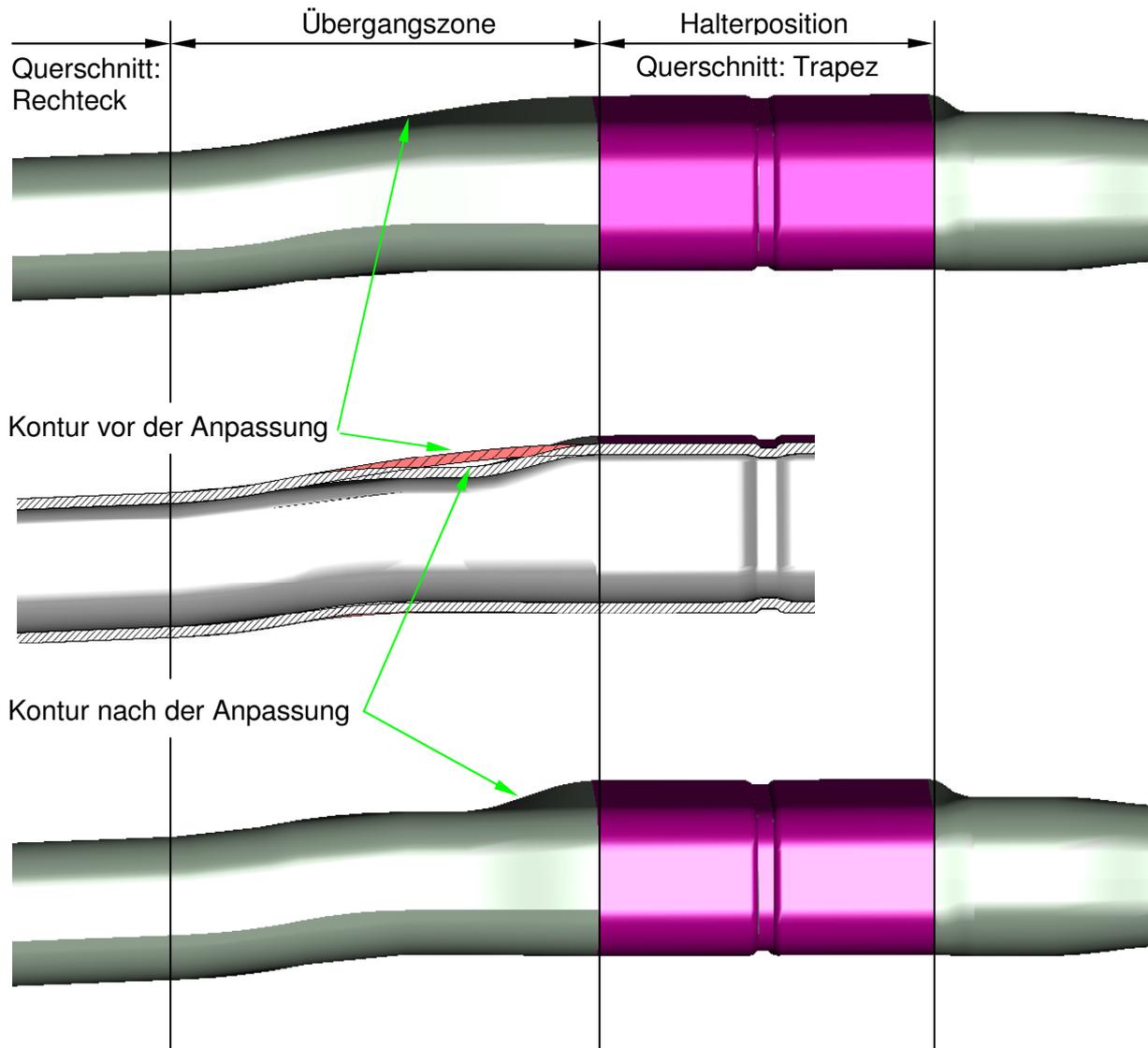
Nach Konkretisierung des prinzipiellen Aufbaus dieser Werkzeuge und Festlegen von Erwärmungskonzepten wurden erneute detaillierte Technologiesimulationen notwendig, in deren Folge wiederum die Umsetzung von Vorschlägen für geometrieabhängige Änderungen (iterative konstruktive Anpassungen) erforderlich wurden. Im folgenden Schema ist dieser Prozess anschaulich dargestellt.



Beispiel: IHU-Teil:

Ziel ist es, das Potential sowohl einer lokalen als auch einer globalen Erwärmung des Werkstücks bzw. des Werkzeugs während des Innenhochdruck-Umformens (IHU) zu ermitteln und durch numerische Simulationen zu beschreiben. Derzeit wird eine Erwärmung nur im Bereich der Halter untersucht.

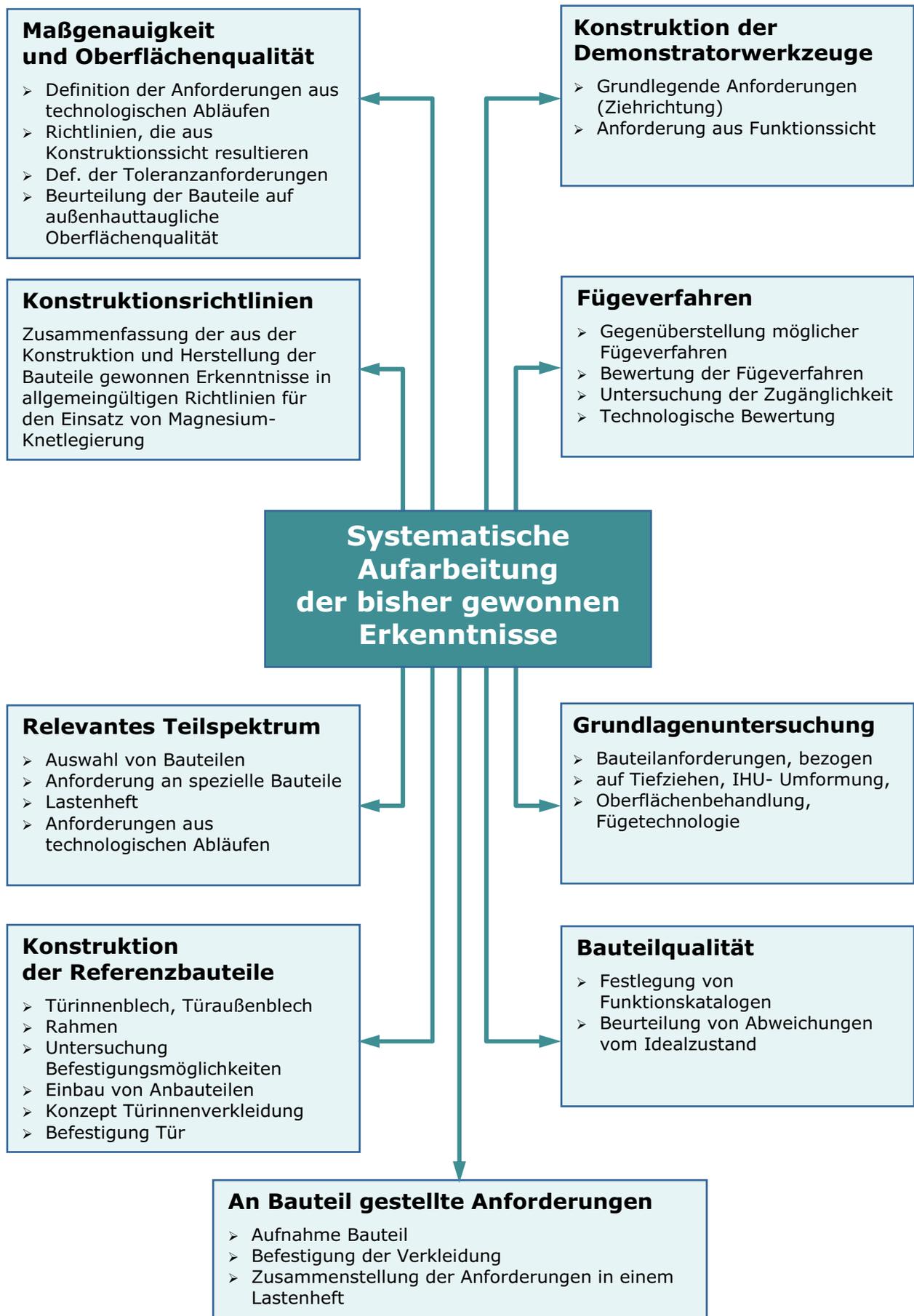
Die gewonnenen Erkenntnisse führten für das IHU-Werkzeug dazu, dass die Induktions-Heizungen nur im Bereich der Halter (Käfige) zur lokalen Erwärmung des IHU-Rohrteiles eingesetzt werden. Die im ersten Entwurf eingearbeiteten Übergangszonen mussten infolgedessen in ihrer Ausdehnung reduziert werden.



Die Berechnungsmodelle zur strukturmechanischen Bewertung wurden entsprechend den wesentlichen konstruktiven Festlegungen angepasst.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Erarbeitung von Konstruktionsrichtlinien ein, welche begonnen wurde.

4.2. Systematische Aufarbeitung der bisher gewonnenen Ergebnisse



2. Vergleich Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Die einzelnen Arbeitspakete wurden im Berichtszeitraum im Wesentlichen entsprechend der Arbeitszeit-, Termin- und Ausgabenplanung laut Antrag realisiert. Die für 7/2008 bis 1/2009 vorgesehenen Mittel wurden entsprechend dem Ausgabenplan abgerufen.

3. Erfolgsaussichten des Vorhabens

Die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Gesamtvorhabens sowie in den einzelnen Teilvorhaben haben sich gegenüber dem ursprünglichen Antrag nicht geändert und werden weiterhin als gut eingeschätzt.

4. FE – Ergebnisse im nationalen und internationalen Wettbewerb

4.3. FE – Ergebnisse Dritter

Über den gesamten Projektzeitraum wurden wiederholt umfassende Literatur-, Internet- und Patentrecherche durchgeführt sowie andere Aktivitäten- und Entwicklungen auf den betrachteten Gebieten verfolgt und mögliche Ansätze beurteilt. Die gefundenen Publikationen bestätigen die hohe Bedeutung des Einsatzes von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau und zeigen somit, dass der gewählte Ansatz weiter innovativ ist. Es zeigten sich keine Hinweise auf Ergebnisse von dritter Seite, die für die Kernthematik des Projektes relevant sind.

4.4. Patentrecherche

Im Verlauf der Projektbearbeitung wurden zyklisch Recherchen mit definierten und ständig angepassten Suchbegriffen durchgeführt.

Die Auswertung der erfassten Druckschriften brachte das Ergebnis, dass bisher keine Patente angemeldet wurden, die im Zusammenhang mit dem geförderten Projekt stehen.

5. Änderungen der Zielsetzung

Es wird eingeschätzt, dass die gesteckten Projektziele erreicht werden können und kein Grund für Änderungen in der Zielsetzung besteht.

6. Fortschreibung des Verwertungsplans:

Im Berichtszeitraum ergaben sich keine Inhalte zur Fortschreibung des Verwertungsplans hinsichtlich:

- Erfindungen und Schutzrechten
- Wirtschaftlichen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftlich/technischen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

4 Zwischenbericht 2009-1

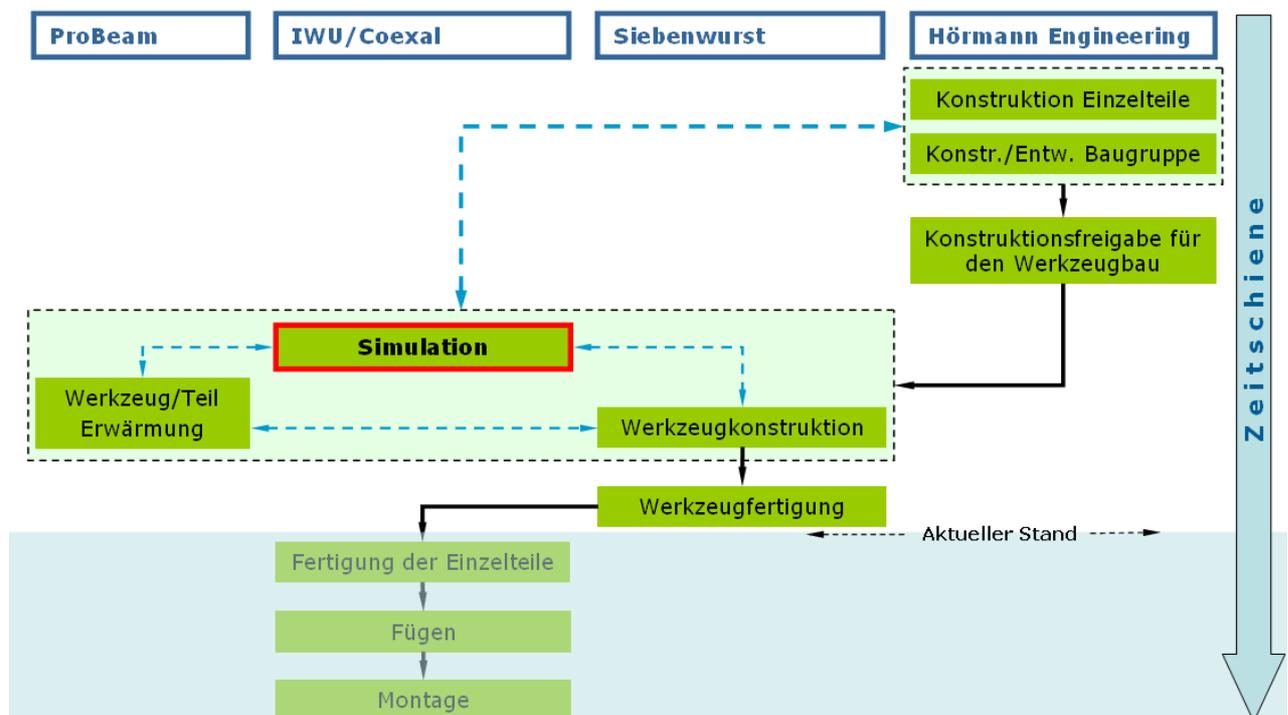
Zwischenbericht zu Nr. 8.1

ZE: Hörmann Engineering GmbH Aue 23-27 09112 Chemnitz	Förderkennzeichen: 03WKBF52
Vorhabensbezeichnung: „Technologieplattform zum Einsatz von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus“, E2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2007 - 31.03.2010	
Berichtszeitraum: 01.01.2009 - 30.6.2009	

1. Kurzfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse im Berichtszeitraum

4.1. Ablauf und Stand der Projektarbeiten

Nach der ersten Konstruktionsfreigabe der Demonstratorbaugruppe für die Konzipierung der fertigungs- und technologieabhängigen Werkzeuge (Tiefziehen, Falzen, Fließpressen, Rohrbiegen und IHU) wurden von den Projektpartnern detaillierte Technologiesimulationen durchgeführt.

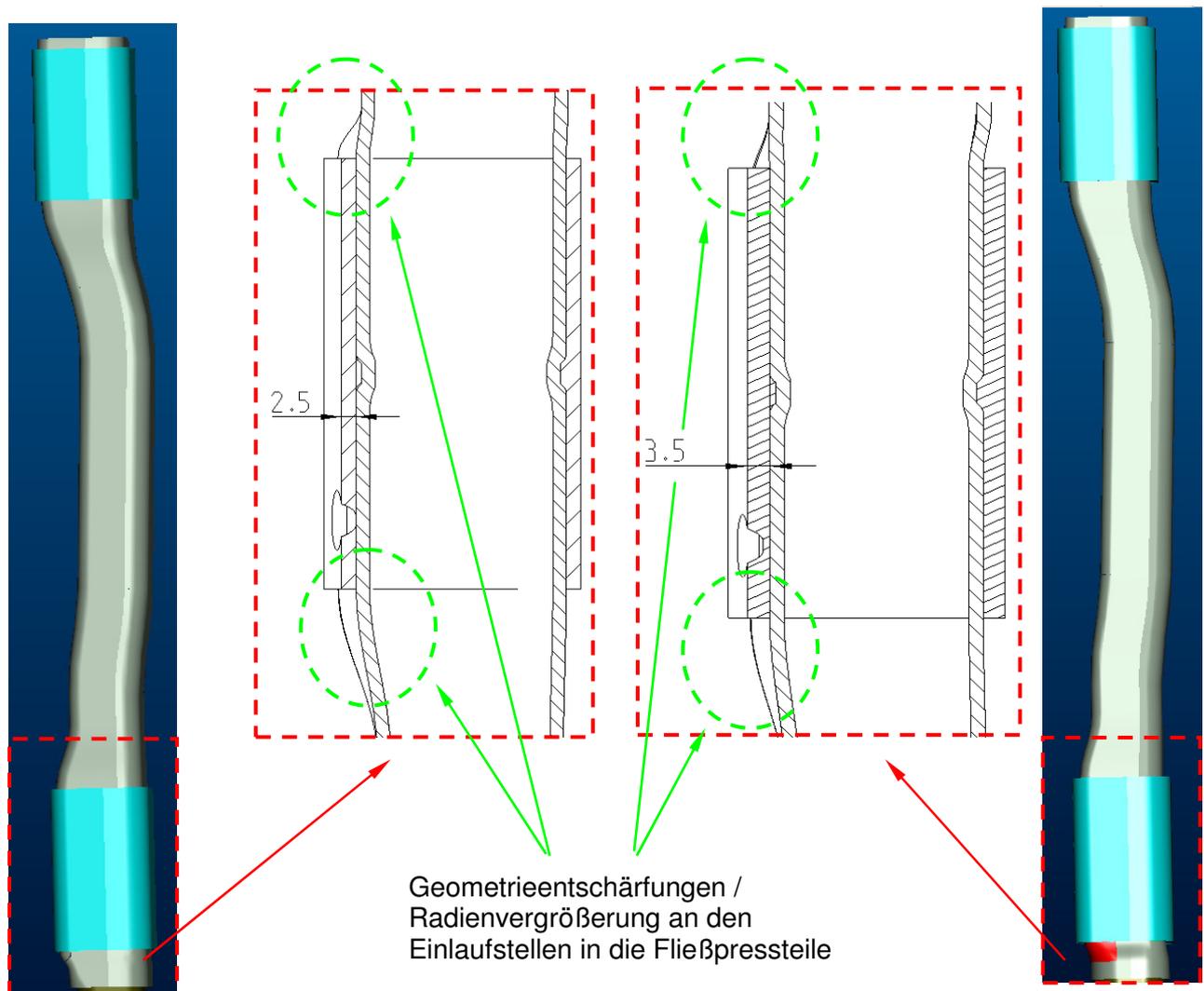


Um möglichst umfangreiche Kenntnisse für die Ausarbeitung der im Projekt zu erstellenden Konstruktionsrichtlinien zu erhalten, wurde durch die Projektpartner der Einsatz von zwei unterschiedlichen Werkzeugerwärmungskonzepten, induktive und elektromagnetische Erwärmung, (Pro Beam Anlagen GmbH und EMA-TEC GmbH) beschlossen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Simulationsrechnung (IWU) führten dazu, dass die im letzten Entwurf eingearbeiteten geometrischen Übergangs-/Aufdehnungszonen weiter in ihrer Ausdehnung reduziert werden mussten. Bedingt durch die nur partielle Erwärmung der Werkzeuge im Bereich der Fließpressteile kam es in den Übergangsbereichen bei der Umformsimulation zu Rissbildungen. In enger Zusammenarbeit mit den beteiligten Projektpartnern wurden durch HE die notwendigen konstruktiven Änderungen in der Demonstratorbaugruppe umgesetzt. Die Umfangsdehnung des IHU-Rohrteiles konnte an diesen Problemstellen durch die Anhebung der Wandstärke der Fließpressteile von 2,5mm auf 3,5mm (nach innen) um ca. 5% verringert werden.

Beispiel: Fließpressteile und resultierend das IHU-Teil:

Alter Stand

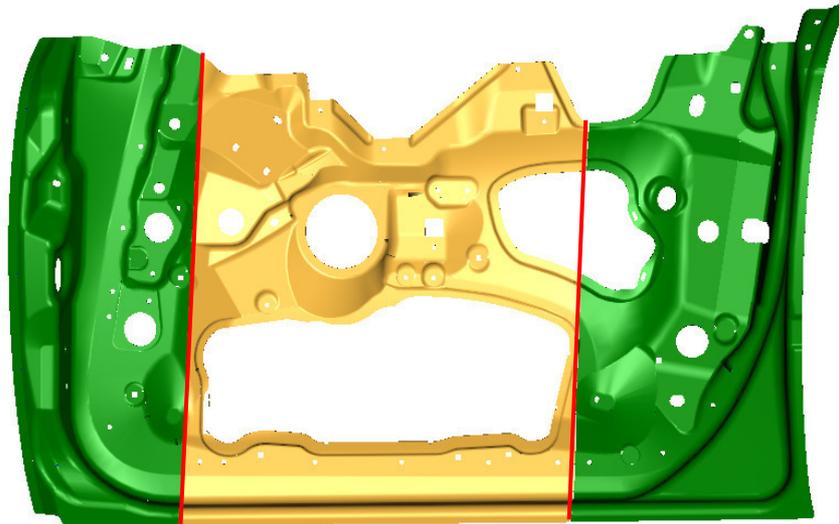
Aktueller Stand



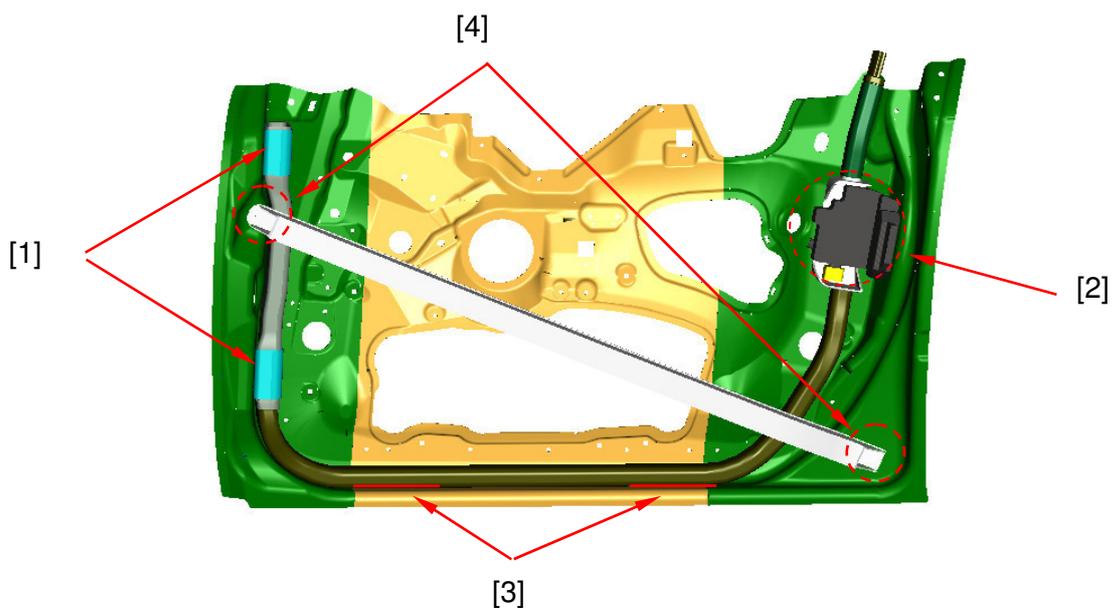
Gemeinsam mit den im Projekt verantwortlichen Partnern für das Fügen der Demonstratorbaugruppe (STZ, IWU, KWD) erfolgten Festlegungen zur Verwendung der verschiedenen Technologien und der Beurteilung der möglichen Fügeverfahren.

Übersicht zu den angewendeten Fügeverfahren:

Die Tailored-Blanks des Türinnenteiles werden mittels Laserschweißen hergestellt. Mögliche Laserschweißverfahren (ND:YAG-, CO₂- und Diodenlaser) wurden recherchiert. (Natstellen im Bild rot markiert)



Die Fließpressteile werden im IHU-Prozess mit dem IHU-Teil gefügt. Scharnierseitig werden diese vorzugsweise mit dem Innenblech verschraubt oder laserverschweißt [1]. Schlossseitig ist eine WPS-Schweißung [2] vorgesehen, für welche im Schlossteil (Dummy) entsprechende konstruktive Anpassungen vorgenommen wurden. Die Biegeteile der Rahmenkonstruktion werden partiell mit dem Blechinnenteil mittels Laserschweißen verbunden [3].



Das Crashprofil soll durch matrizenloses Clinchen [4] mit der Rahmenkonstruktion verbunden werden.

Die Berechnungsmodelle zur strukturmechanischen Bewertung wurden entsprechend den wesentlichen konstruktiven Festlegungen angepasst.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die derzeit vorhandenen Konstruktionsrichtlinien ein.

In erster Linie wurden die Modelle dahingehend ergänzt, daß die konstruktiv am Demonstrator nicht beachteten Teile wie Scharniere, Dichtungen, Türfangbügel oder adäquate Einrichtung modelltechnisch ergänzt wurden, um plausible praxisnähere Ergebnisse zu erzielen, die einen besseren Vergleich zu industriellen Serienprodukten ermöglichen sollen. Die Berechnung des rein technologieindizierten Demonstrators war nur aus der relativen Betrachtung der eigenen Gestaltungsstufen aussagefähig. Damit war jedoch der prinzipielle Nachweis der Erreichbarkeit erforderlicher Festigkeitswerte möglich.

2. Vergleich Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Die einzelnen Arbeitspakete wurden im Berichtszeitraum im Wesentlichen entsprechend der Arbeitszeit-, Termin- und Ausgabenplanung laut Antrag realisiert. Die für 1/2009 bis 6/2009 vorgesehenen Mittel wurden entsprechend dem Ausgabenplan abgerufen.

3. Erfolgsaussichten des Vorhabens

Die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Gesamtvorhabens sowie in den einzelnen Teilvorhaben haben sich gegenüber dem ursprünglichen Antrag nicht geändert und werden weiterhin als gut eingeschätzt.

4. FE – Ergebnisse im nationalen und internationalen Wettbewerb

4.2. FE – Ergebnisse Dritter

Über den gesamten Projektzeitraum wurden wiederholt umfassende Literatur-, Internet- und Patentrecherche durchgeführt sowie andere Aktivitäten- und Entwicklungen auf den betrachteten Gebieten verfolgt und mögliche Ansätze beurteilt. Die gefundenen Publikationen bestätigen die hohe Bedeutung des Einsatzes von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau und zeigen somit, dass der gewählte Ansatz weiter innovativ ist. Es zeigten sich keine Hinweise auf Ergebnisse von dritter Seite, die für die Kernthematik des Projektes relevant sind.

4.3. Patentrecherche

Während der Projektbearbeitung wurden Recherchen zu den aktuellen Arbeitspunkten durchgeführt.

Bisher sind uns keine gemeldeten Patente bekannt, welche im Zusammenhang mit dem geförderten Projekt stehen.

5. Änderungen der Zielsetzung

Es wird eingeschätzt, dass die gesteckten Projektziele erreicht werden können und kein Grund für Änderungen in der Zielsetzung besteht.

6. Fortschreibung des Verwertungsplans:

Im Berichtszeitraum ergaben sich keine Inhalte zur Fortschreibung des Verwertungsplans hinsichtlich:

- Erfindungen und Schutzrechten
- Wirtschaftlichen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftlich/technischen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

5 Zwischenbericht 2009-2

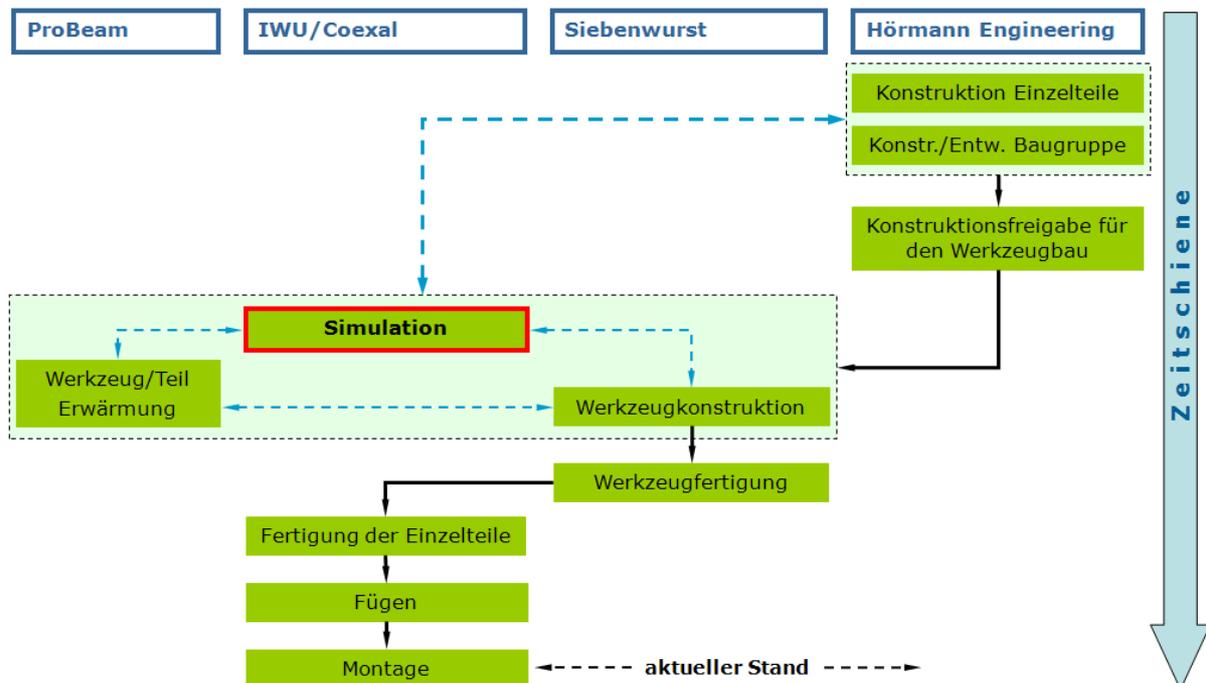
Zwischenbericht zu Nr. 8.1

ZE: Voith Engineering Services GmbH Aue 23-27 09112 Chemnitz	Förderkennzeichen: 03WKBF52
Vorhabensbezeichnung: „Technologieplattform zum Einsatz von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus“, E2	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2007 - 31.03.2010	
Berichtszeitraum: 01.07.2009 - 31.12.2009	

1. Kurzfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse im Berichtszeitraum

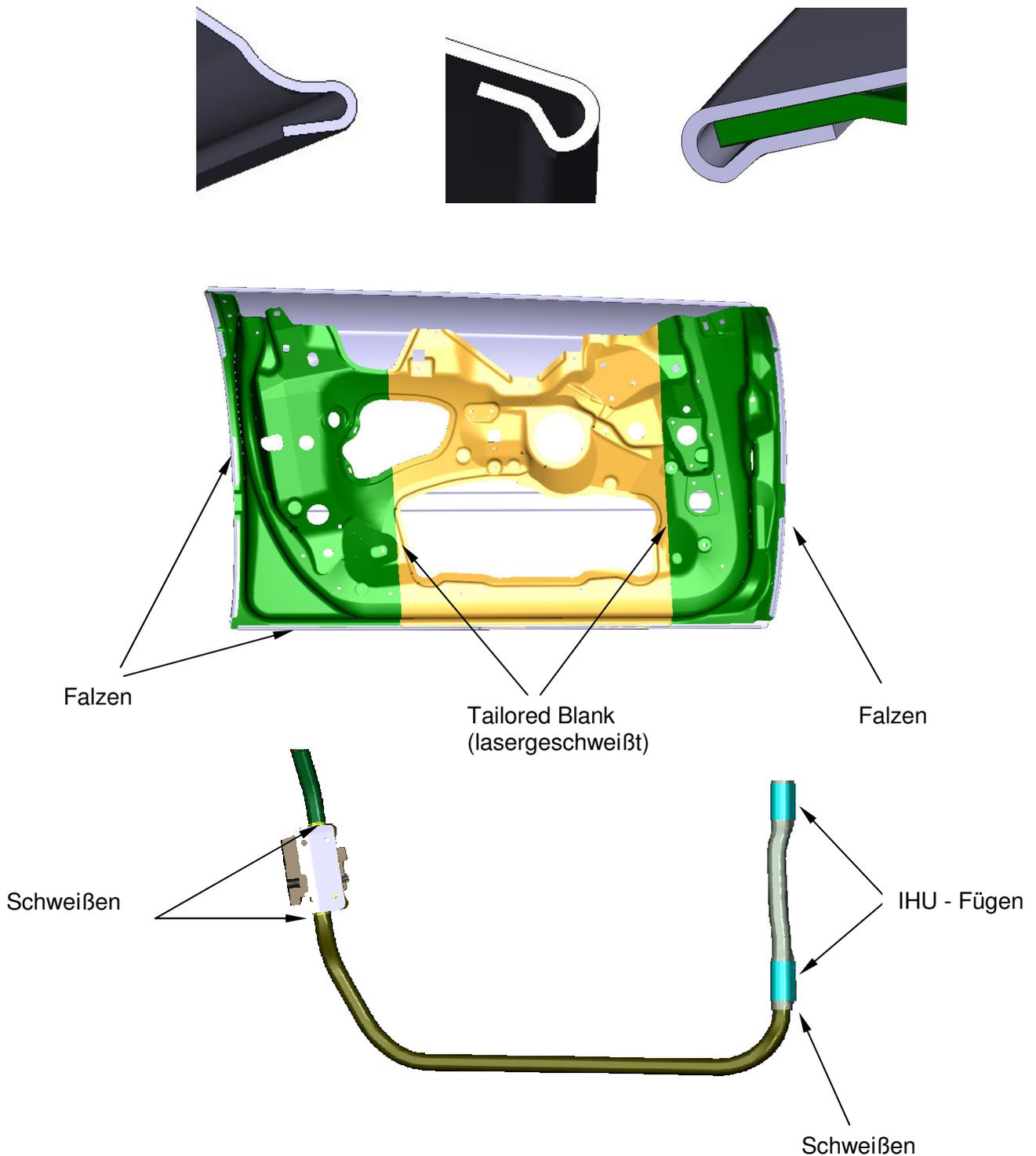
4.1. Ablauf und Stand der Projektarbeiten

Nach der Fertigung der Einzelteile für die Demonstratorbaugruppe wurden die ausgewählten Fügeverfahren in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern auf ihre Tauglichkeit hin untersucht. Die sich daraus ergebenden konstruktiven Erfordernisse wurden ins CAD-Modell eingepflegt und in die Datensammlung für die Konstruktionsrichtlinien aufgenommen.



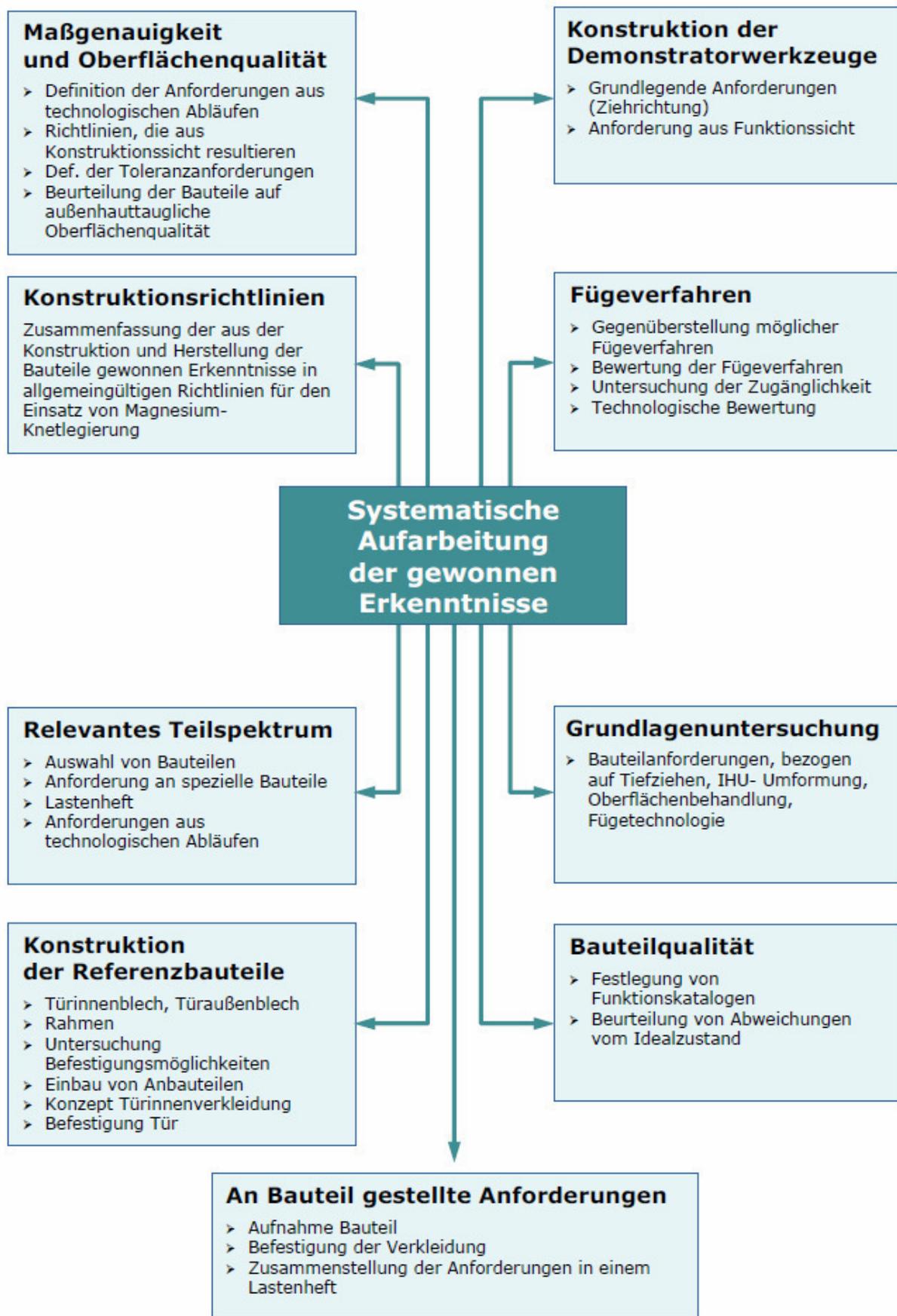
Hauptpunkt dieser Arbeiten waren dabei die verwendeten Fügeverfahren welche zur Demonstratorherstellung verwendet werden. An den Fugestellen wurden technologiebedingte Nahtvorbereitungen angepasst. Besonders in den Falzbereichen waren weitere Anpassungen notwendig.

Beispiele:



In Zusammenarbeit mit den Partnern wurde begonnen, eine Datensammlung als Grundlage für die Konstruktionsrichtlinien zu erstellen, in welche alle bisherigen gewonnenen Erkenntnisse eingeflossen sind und die einer ständigen Aktualisierung unterliegt.

4.2. Systematische Aufarbeitung der gewonnenen Ergebnisse



Die Berechnungsmodelle zur strukturmechanischen Betrachtung wurden abschließend bewertet und die Ergebnisse zur Einarbeitung in den Gesamtbericht dokumentiert.

2. Vergleich Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Die einzelnen Arbeitspakete wurden im Berichtszeitraum im Wesentlichen entsprechend der Arbeitszeit-, Termin- und Ausgabenplanung laut Antrag realisiert. Die für 7/2009 bis 12/2009 vorgesehenen Mittel wurden entsprechend dem Ausgabenplan abgerufen.

3. Erfolgsaussichten des Vorhabens

Die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Gesamtvorhabens sowie in den einzelnen Teilvorhaben haben sich gegenüber dem ursprünglichen Antrag nicht geändert und werden weiterhin als gut eingeschätzt.

4. FE – Ergebnisse im nationalen und internationalen Wettbewerb

4.3. FE – Ergebnisse Dritter

In den durchgeführten Literatur-, Internet- und Patentrecherche fanden sich weiterhin keine Hinweise auf Ergebnisse von dritter Seite, die für die Kernthematik des Projektes relevant wären.

4.4. Patentrecherche

Während der Projektbearbeitung wurden Recherchen zu den aktuellen Arbeitspunkten durchgeführt.

Bisher sind uns keine gemeldeten Patente bekannt, welche im Zusammenhang mit dem geförderten Projekt stehen.

5. Änderungen der Zielsetzung

Es wird eingeschätzt, dass die gesteckten Projektziele erreicht werden können und kein Grund für Änderungen in der Zielsetzung besteht.

6. Fortschreibung des Verwertungsplans:

Im Berichtszeitraum ergaben sich keine Inhalte zur Fortschreibung des Verwertungsplans hinsichtlich:

- Erfindungen und Schutzrechten
- Wirtschaftlichen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftlich/technischen Erfolgsaussichten
- Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

6 1. TeMaK-WORKSHOP (21.05.2008)



Technologieplattform zum Einsatz von Magnesium-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktlebenszyklus



1. TeMaK-WORKSHOP

21.05.2008

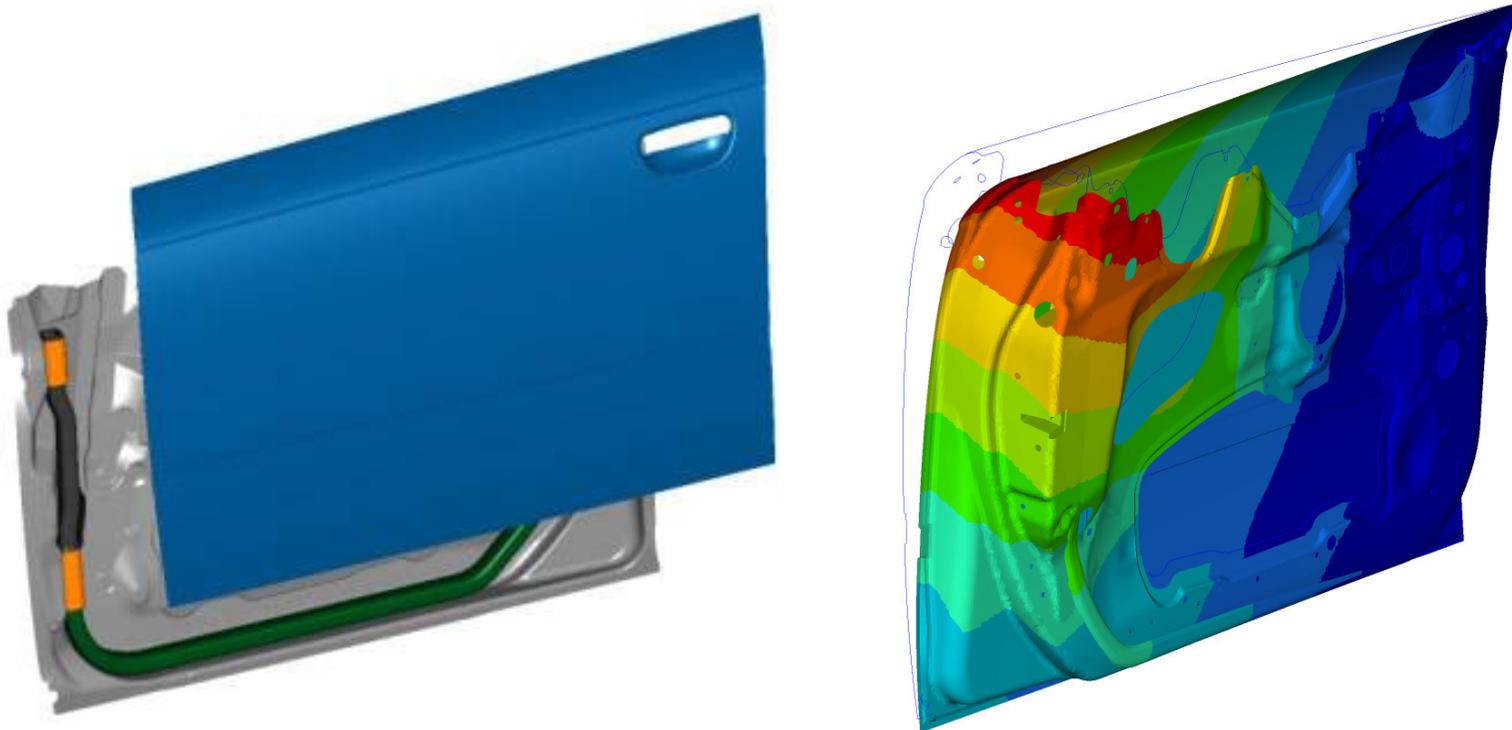
Zwickau

**Konstruktion und struktur-
mechanische Berechnung**
Michael Wildenhain, Ralf Uhlig



2 Einführung

FERTIGUNGSGERECHTE GESTALTUNG UND BERECHNUNG VON KAROSSERIETEILEN AUS MAGNESIUMKNETLEGIERUNGEN AM BEISPIEL EINER FAHRZEUGTÜR





3 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

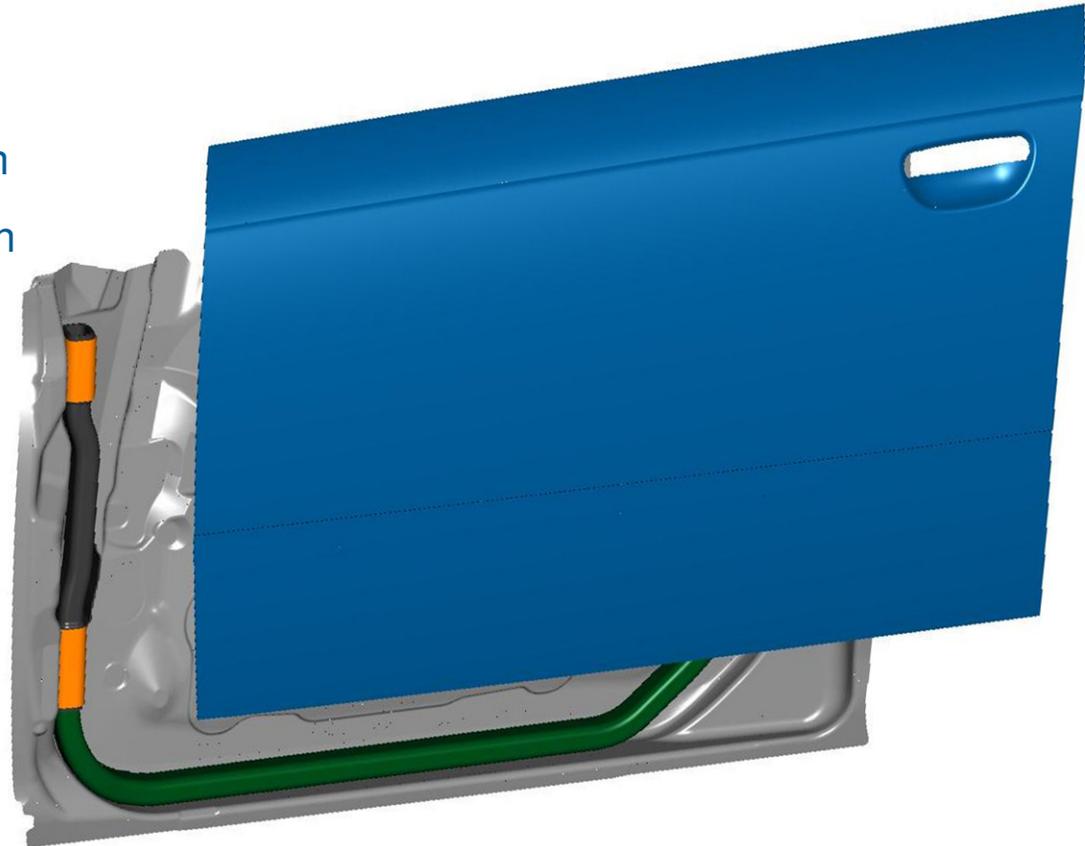
Ziele:

- Nachweis der technologischen Herstellbarkeit von Großserienteilen
- Ableiten von Konstruktionsrichtlinien

Demonstrator: PKW-Tür

Prinzipieller Aufbau

- Außenschale (Design)
- Rahmen (Aufnahme der Belastungen)
- Innenschale (Design / Funktionalität)

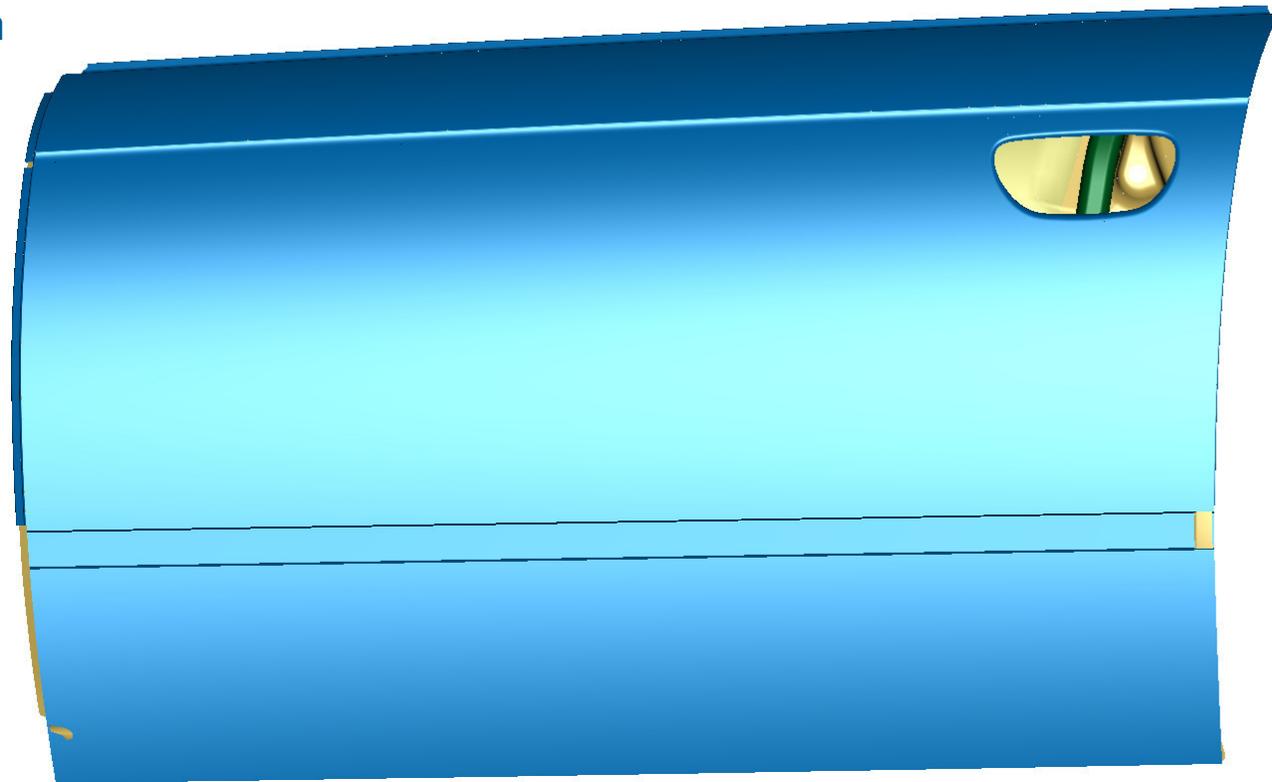




4 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

Aussenschale

- Tiefziehen / Falzen
- angepasst an die Geometrie der Innenschale
- Materialstärke: 1,2 mm
- Schweißnaht in der Zierleiste
(Ausgangsmaterial max. 550mm breit)

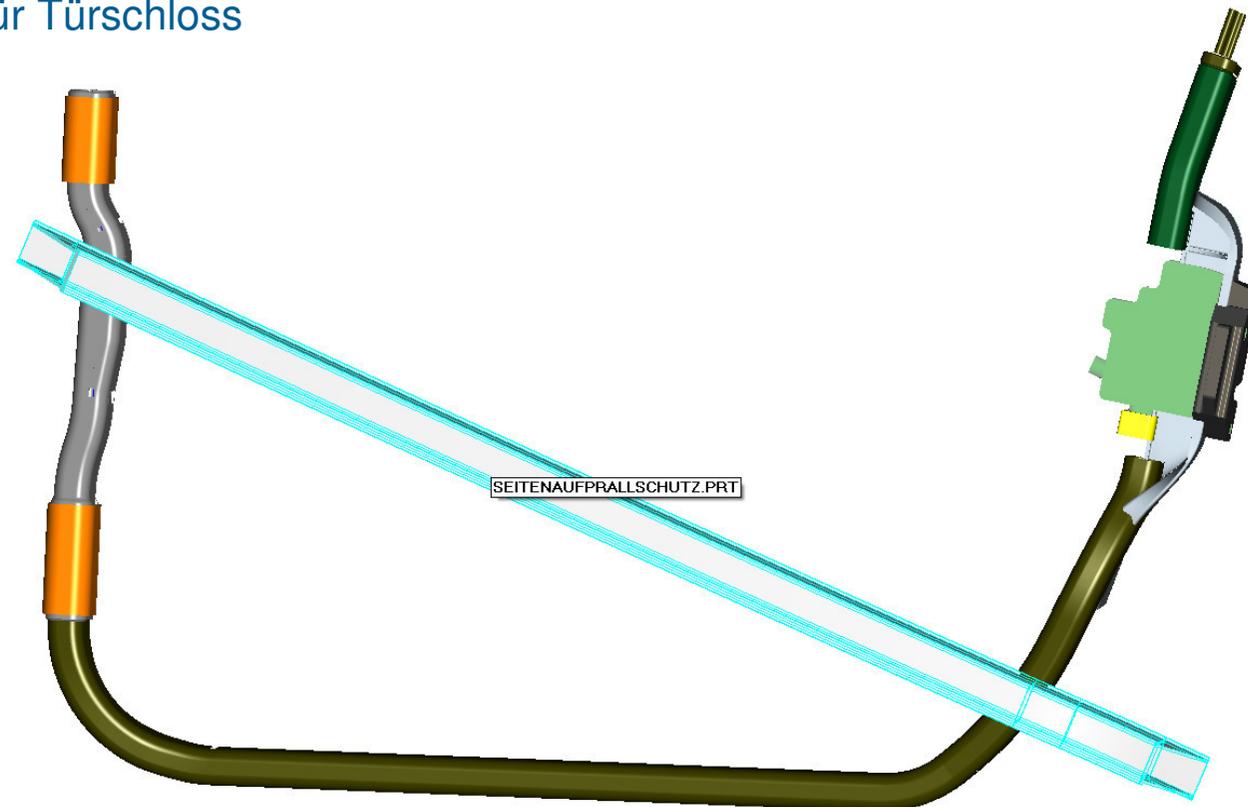




5 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

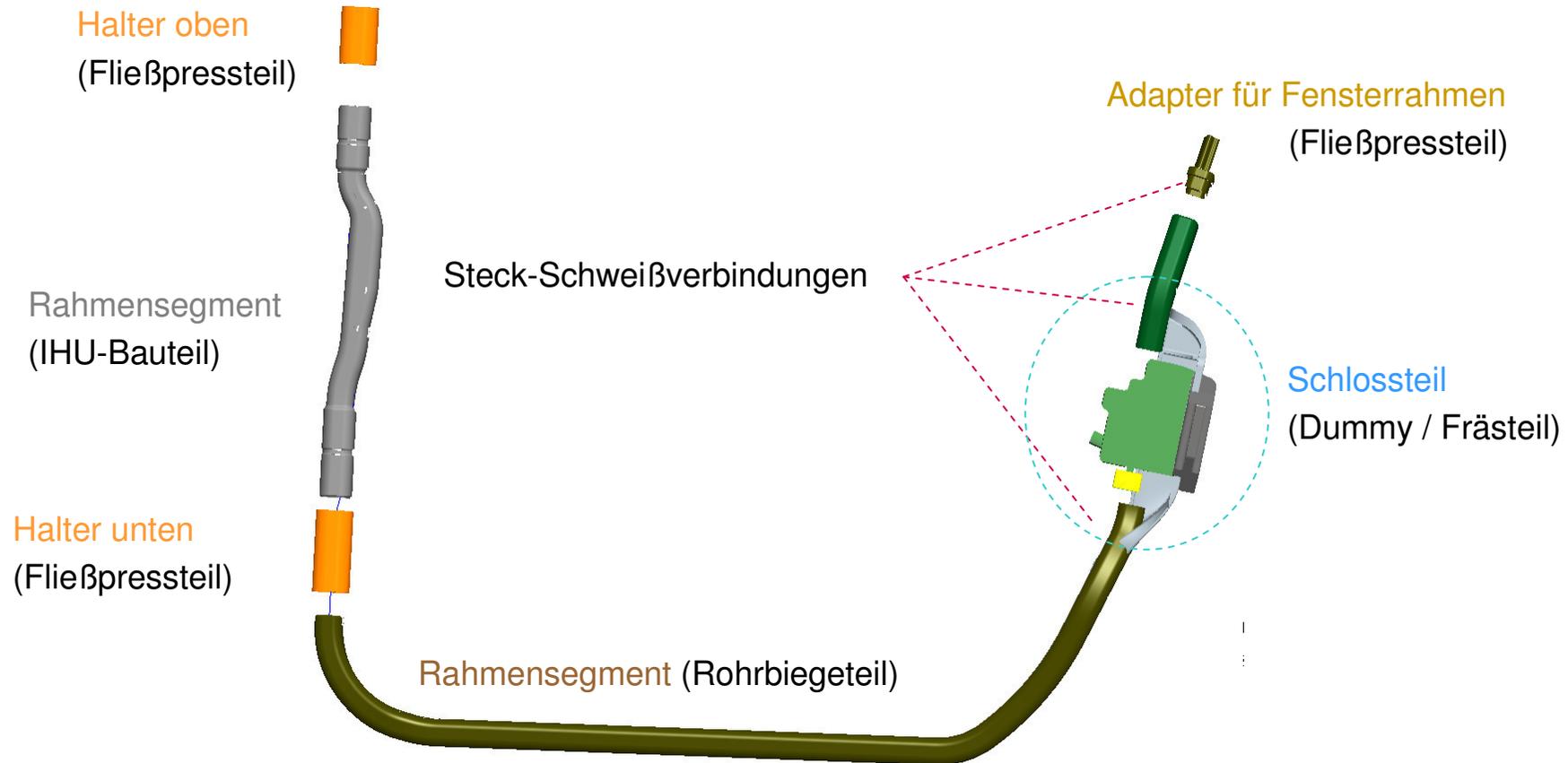
Rahmen

- Befestigungspunkte für Scharniere
 - Befestigungspunkte für Türschloss
- ⇒ Kraftübertragung,
Stabilität und
Schutzfunktion



6 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

Rahmenaufbau entsprechend verwendeter Technologie



Ausgangsquerschnitte für Biege-, Fließpress-Adapter für Fensterrahmen und IHU-Teil entsprechen Profil 30x40

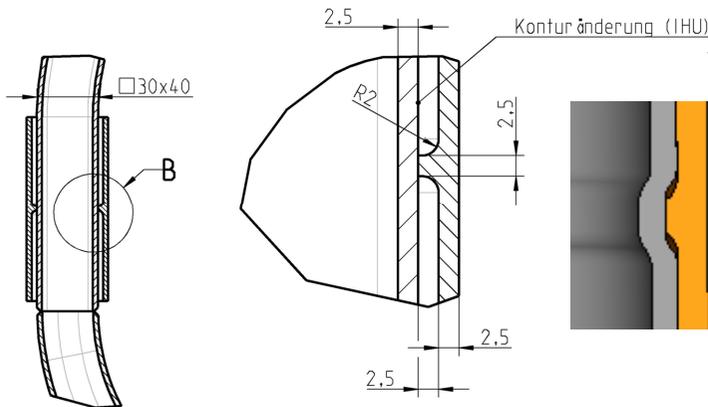
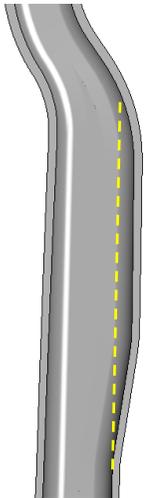


7 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

Rahmen

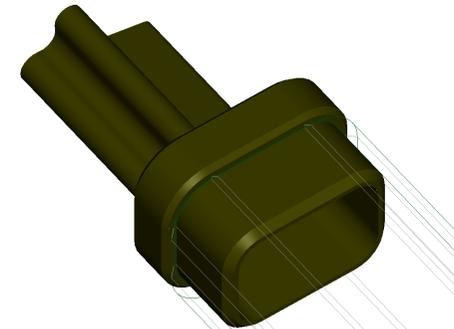
IHU-Teil Rahmensegment

- Querschnittserweiterung für Aufnahme Seitenaufprallschutz
- Befestigung der Halter für Türscharniere

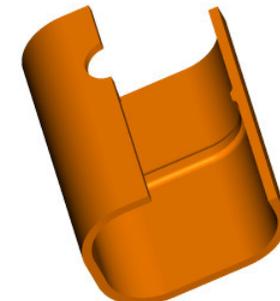


Fließpressteile Adapter für Fensterrahmen

Profilerzeugung für Aufnahmegeometrie



Halter für Türscharniere Geometrieerzeugung Montage IHU-Teil



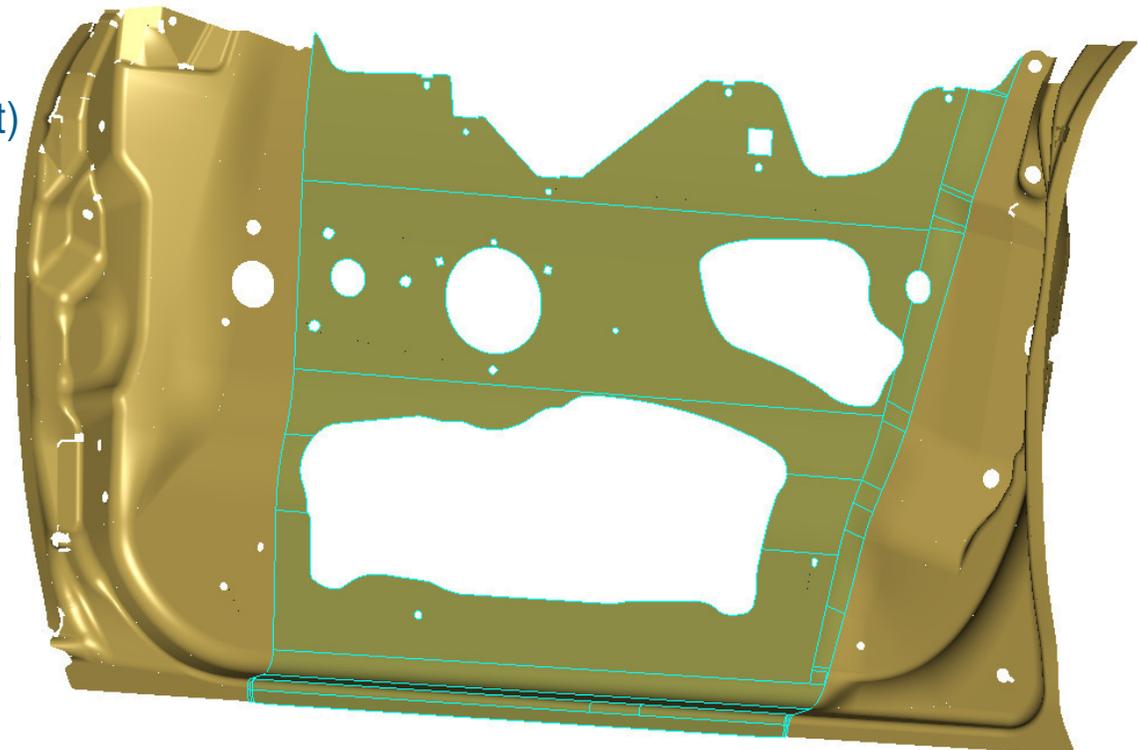


8 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

Innenschale:

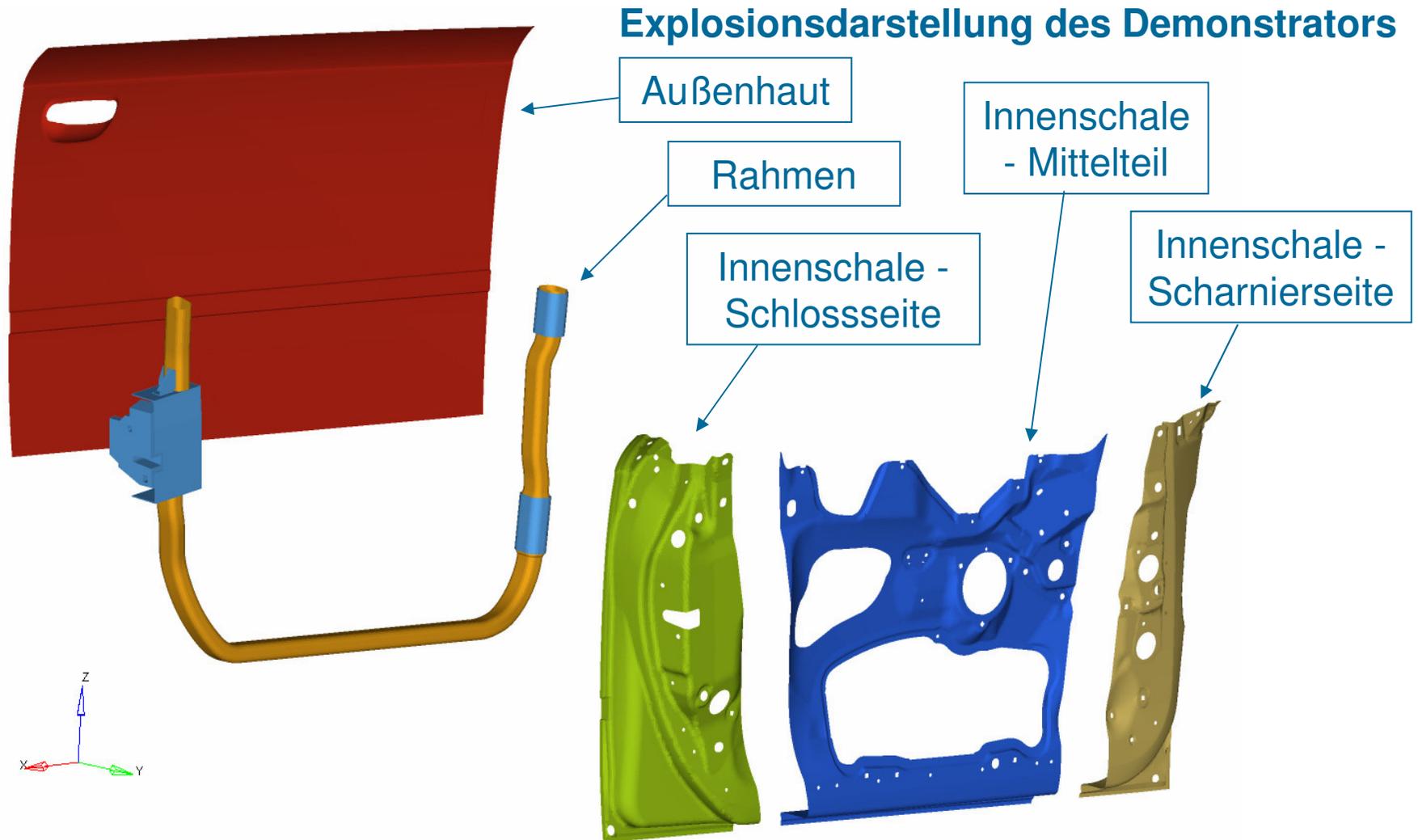
- Tiefziehteil
- als Tailored Blank 3-teilig
(Ausgangsmaterial max. 550mm breit)
- Materialstärken:

Scharnierseite	2.0 mm,
Mittelteil	1.2 mm,
Schlossseite	2.0 mm





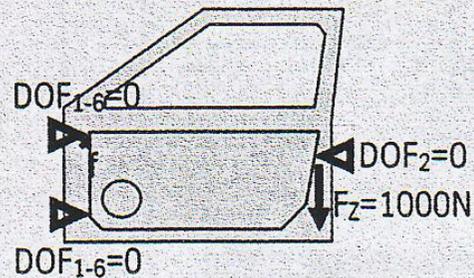
9 Strukturmechanische Berechnung, bewertete Modellbestandteile



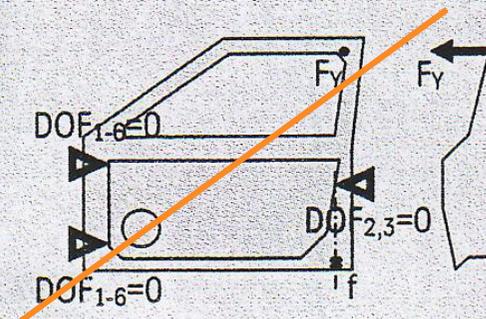
10 Strukturmechanische Berechnung, betrachtete Lastfälle

Lastfälle

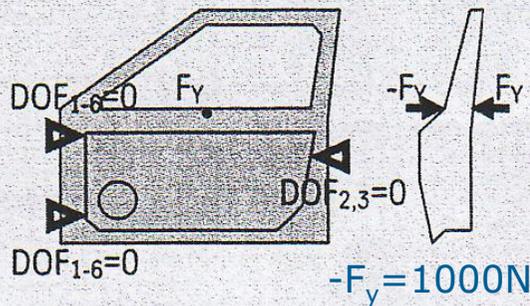
(ATZ Bd.109,H.6,2007,S.522)



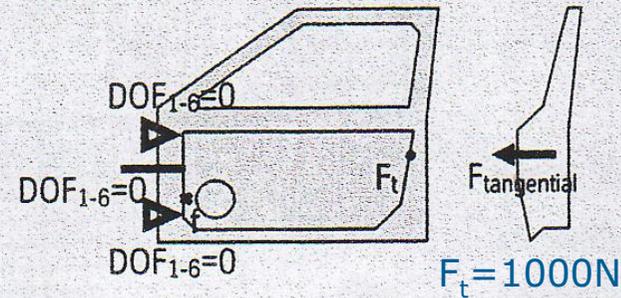
Türabsenkung



Fensterrahmen



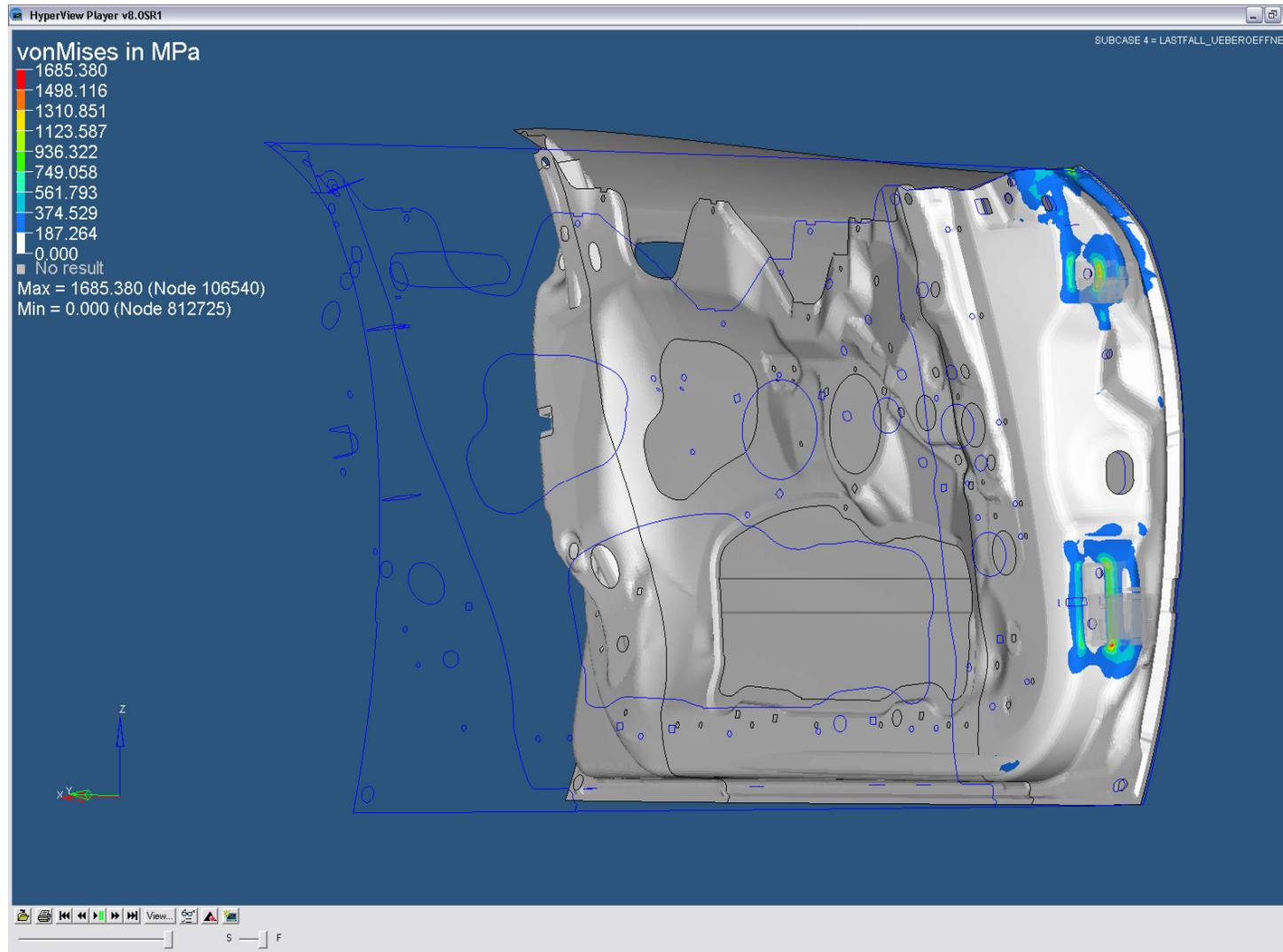
Brüstung



Überöffnen

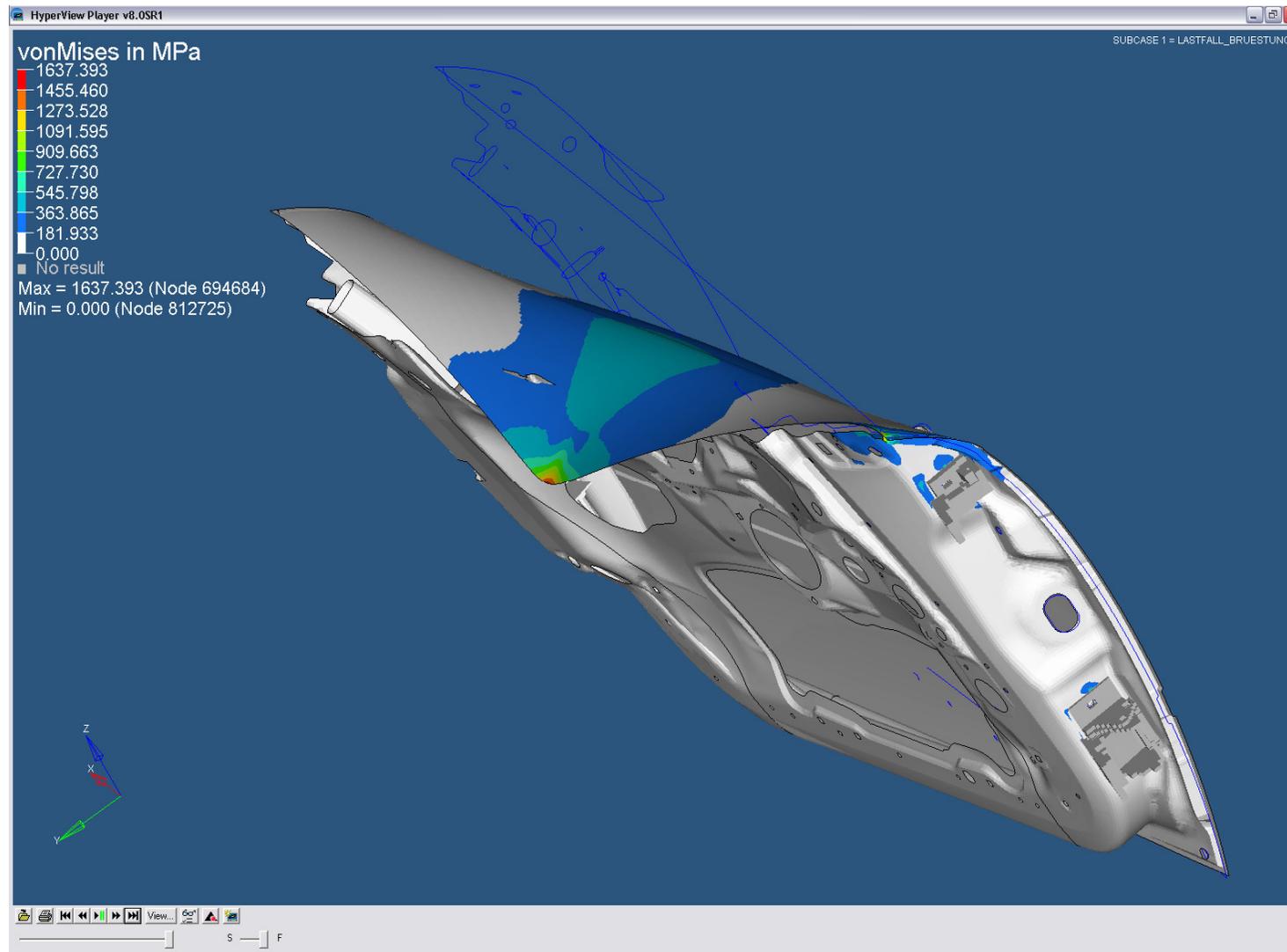


11 Strukturmechanische Berechnung, Lastfall Überöffnen



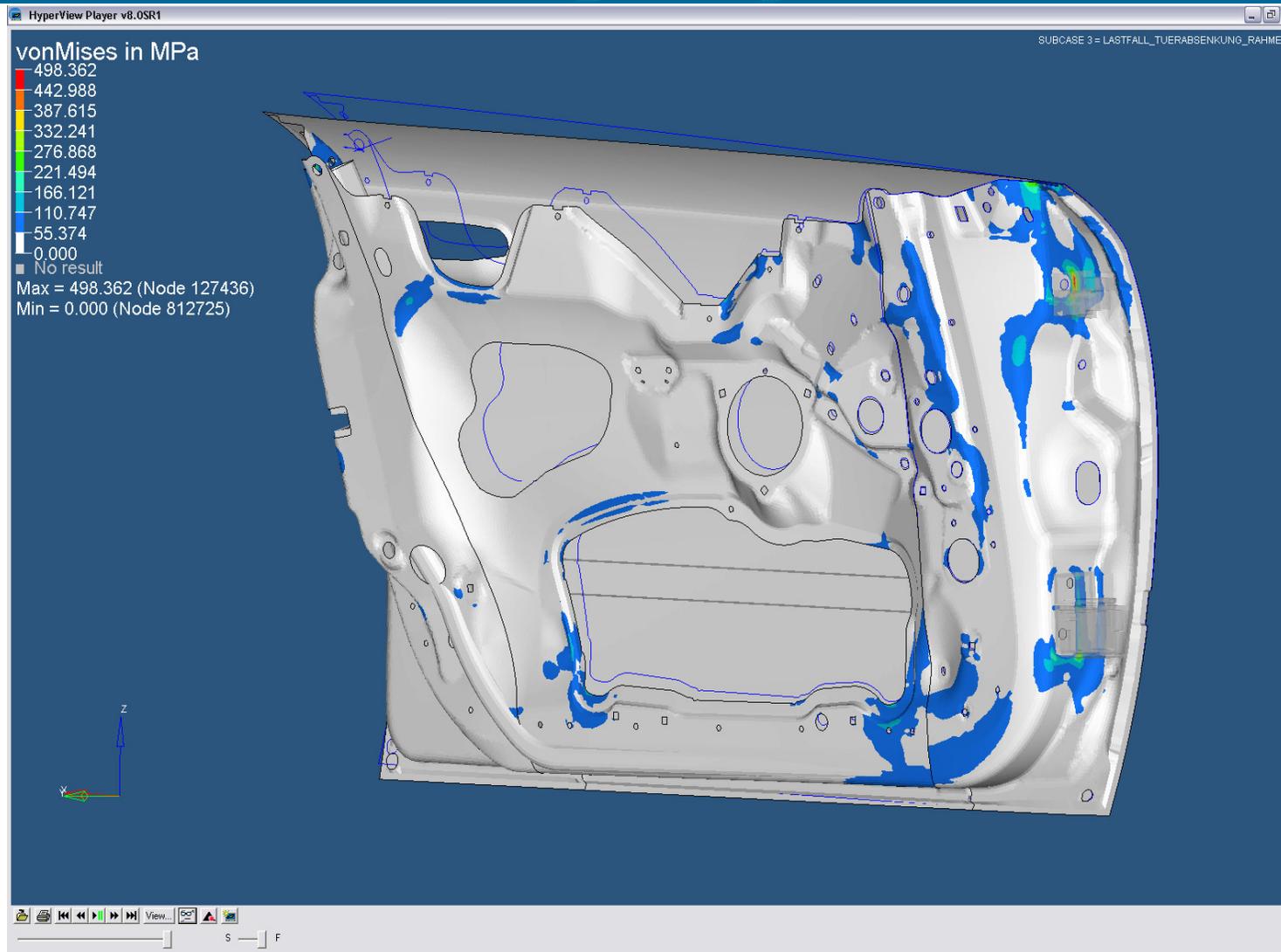


12 Strukturmechanische Berechnung, Lastfall Brüstungskraft

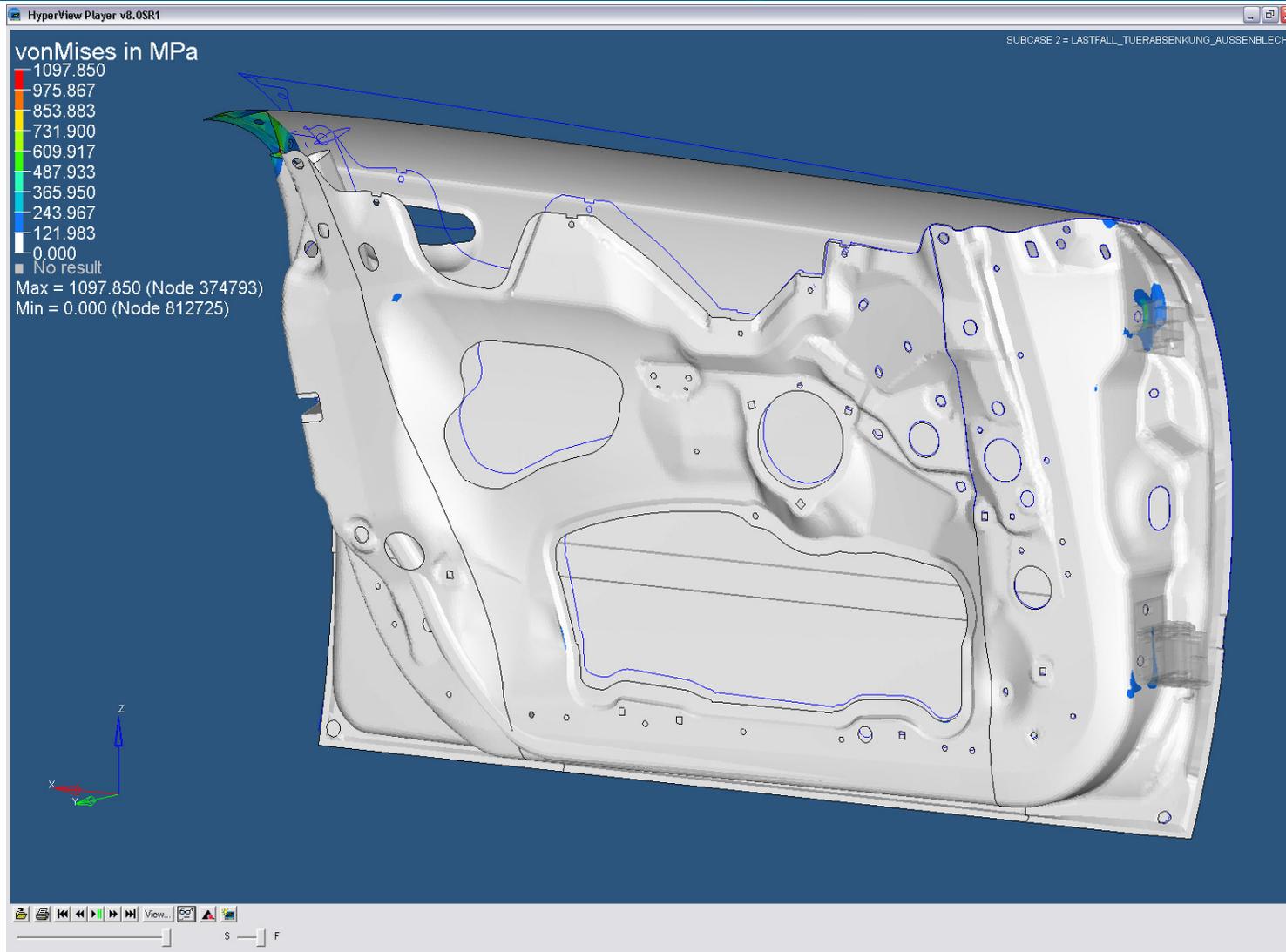




13 Strukturmechanische Berechnung, Türabsenkung am Rahmen



14 Strukturmech. Berechnung, Lastfall Türabsenkung Außenschale





15 Strukturmechanische Berechnung, Bewertung

Nach ersten strukturmechanischen Berechnungen scheint der Werkstoff geeignet, die Belastungen aus Standardlastfällen unter branchenähnlicher Konstruktionsweise weitgehend aufzunehmen

Detaillierte Untersuchungen gelten exemplarisch weiterhin den spezifischen Anforderungen zur erforderlichen Dimensionierung an Krafteinleitungsstellen (Scharnieranbindung, Fangbügel, Verriegelung) hinsichtlich ertragbarer Spannungen im linear elastischen Bereich sowie ggf. Lebensdauervergleichen

Zur Erlangung realistischer Berechnungsergebnisse werden prozeßbezogene Werkstoffparameter benötigt

16 Strukturmechanische Berechnung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

HÖRMANN

Engineering
Ein Unternehmen von
Voith Industrial Services.

Aue 23-27, 09112 Chemnitz, Tel: 0371 50348-221

7 2. TeMak Erfahrungsaustausch (24.09.2008)



Technologieplattform zum Einsatz von Magnesium-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktlebenszyklus



2. TeMaK Erfahrungsaustausch

**24.09.2008
Frankenberg**

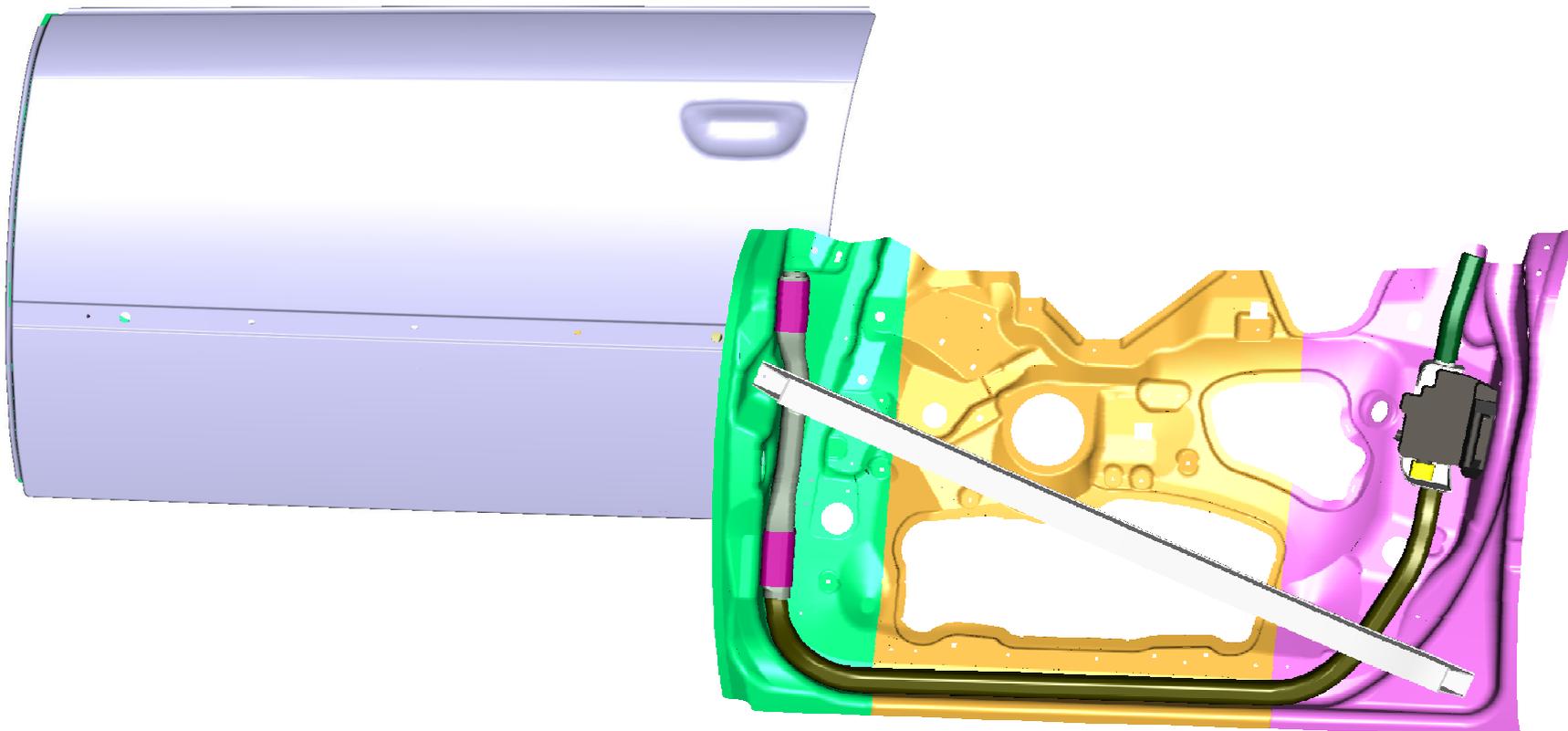
**„ Konstruktion und
strukturmechanische
Berechnung“**

Michael Wildenhain, Ralf Uhlig



2 Einführung

FERTIGUNGSGERECHTE GESTALTUNG UND BERECHNUNG VON KAROSSERIETEILEN AUS MAGNESIUMKNETLEGIERUNGEN AM BEISPIEL EINER FAHRZEUGTÜR





3 Funktionaler und technologischer Überblick

Aussenschale:

- Tiefziehen / Falzen
- Materialstärke: 1,2 mm
- angepasst an die Geometrie der Innenschale
- Schweißnaht in der Zierleiste (Ausgangsmaterial max. 550mm breit)

Innenschale:

- Tiefziehteil als Tailored Blank 3-teilig (Ausgangsmaterial max. 550mm breit)
- Materialstärken:

Scharnierseite	2.0 mm,
Mittelteil	1.2 mm,
Schlossseite	2.0 mm
- verschweißen der 3 Einzelteile vor dem Tiefziehen

Rahmen

- verschweißte und Fließpressteile
- Befestigungspunkte für Scharniere und Türschloss
- Rohmaterial für Biege- und IHU-Teil: Profil 30x40

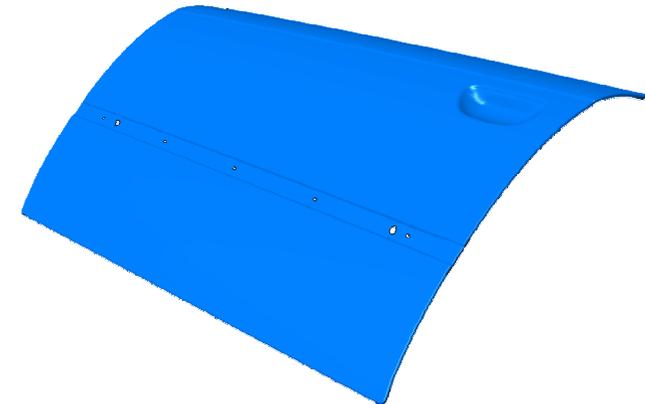
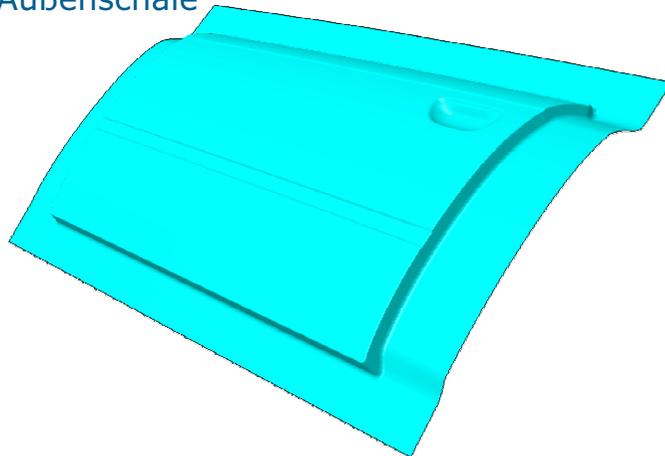
⇒ Funktion:
Kraftübertragung, Stabilität und Schutzfunktion



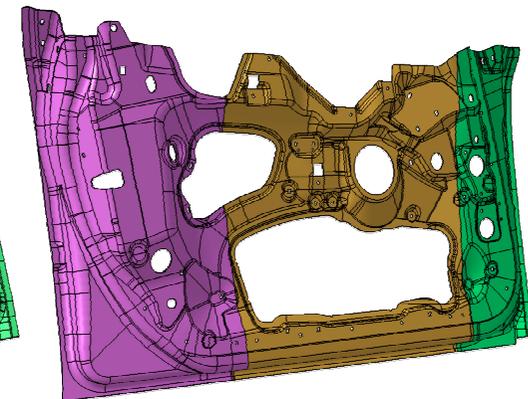
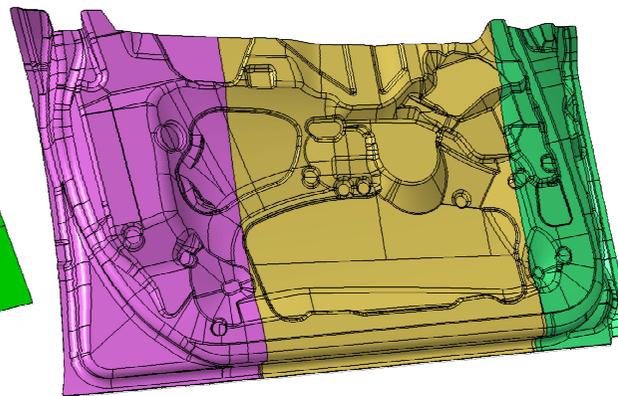
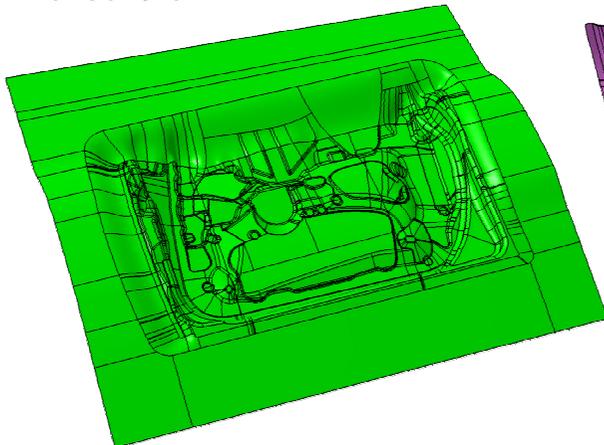
4 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion – Technologie: **Tiefziehen**

werkzeugtechnisch-technologisch notwendige Ankonstruktion

Außenschale



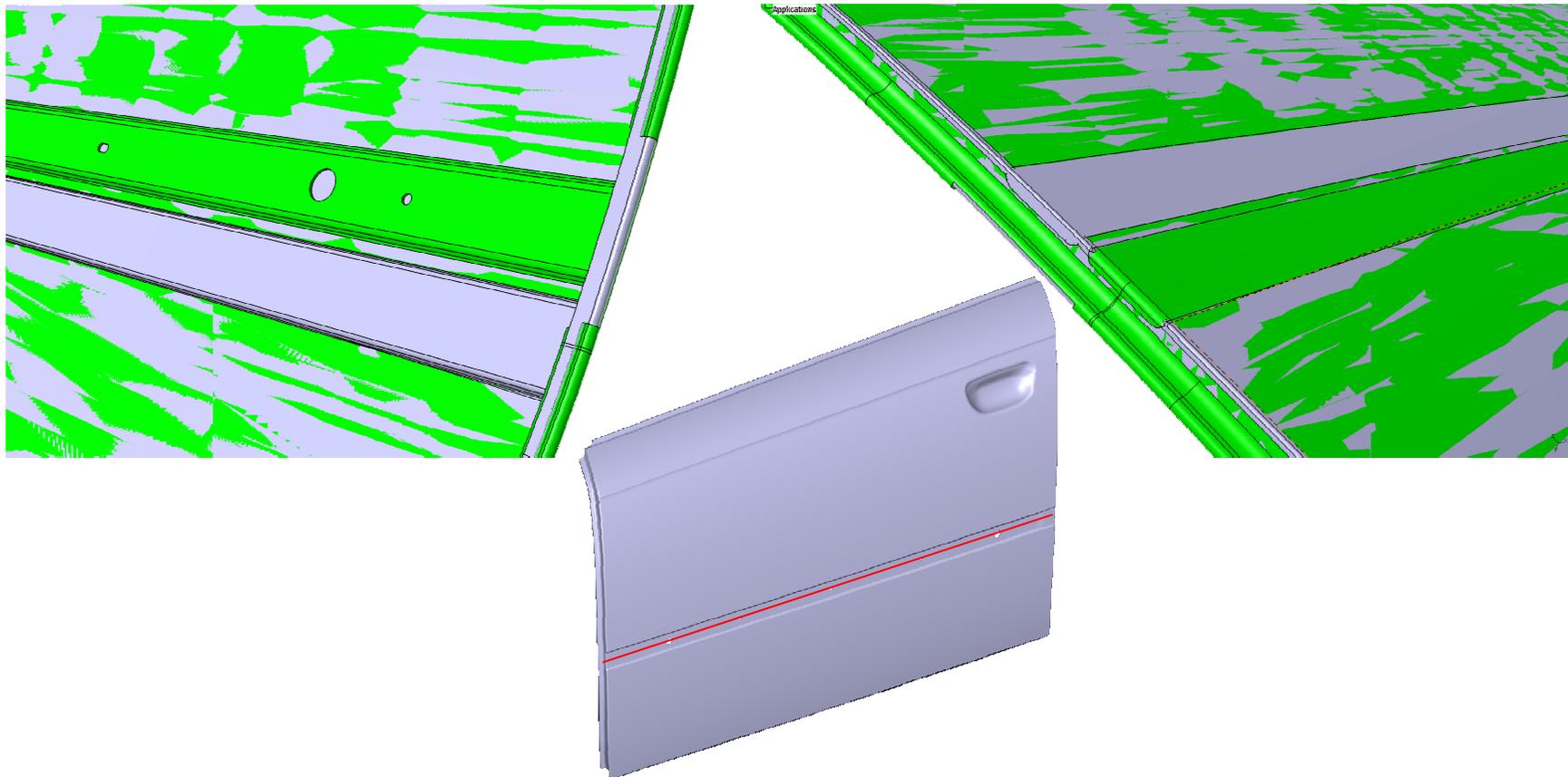
Innenschale





5 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion – Technologie: **Tiefziehen**

Verlegen der Zierleistengeometrie in der Außenschale nach oben
Grund: Platinengröße und notwendige Ankonstruktion



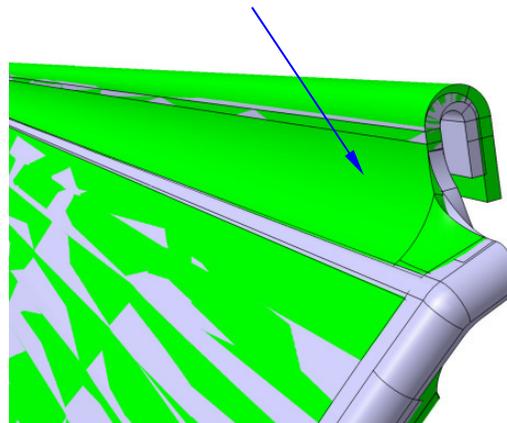
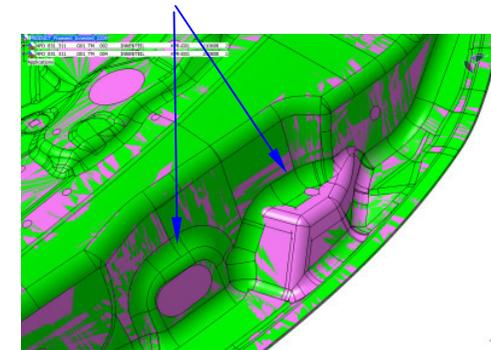
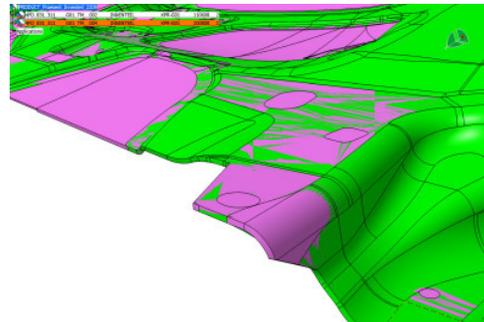
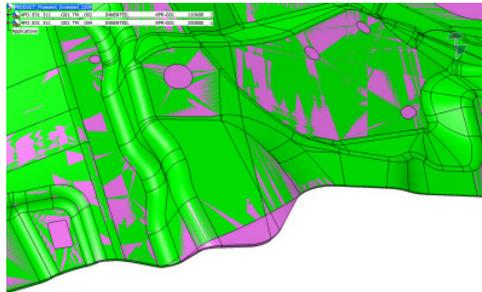


6 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion - Technologie: **Tiefziehen**

Geometrieänderungen als Ergebnis der Tiefzieh-Simulation:

Mindestradien (Innenteil): 8mm

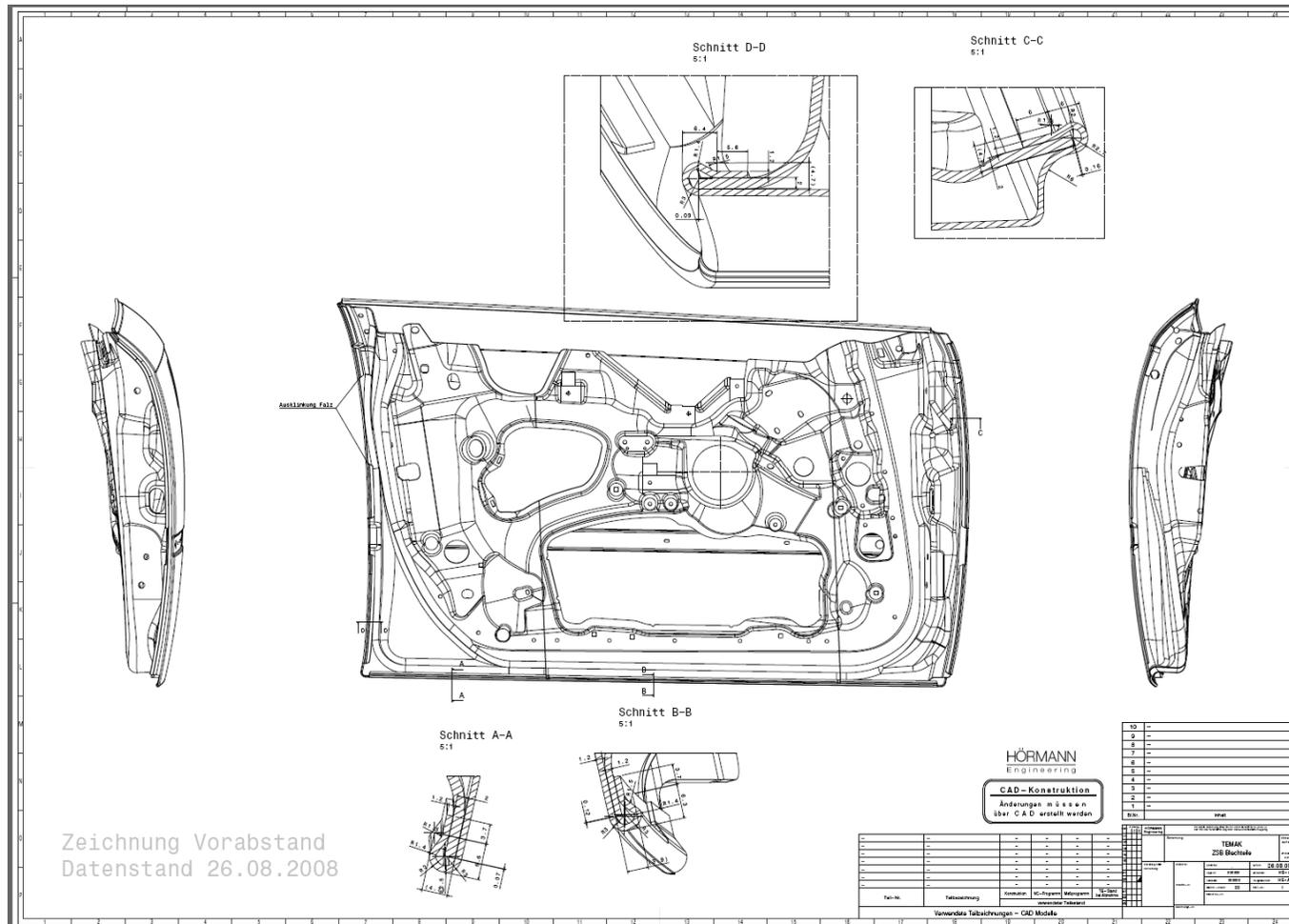
Entformungsschräge: 10 ... 15°





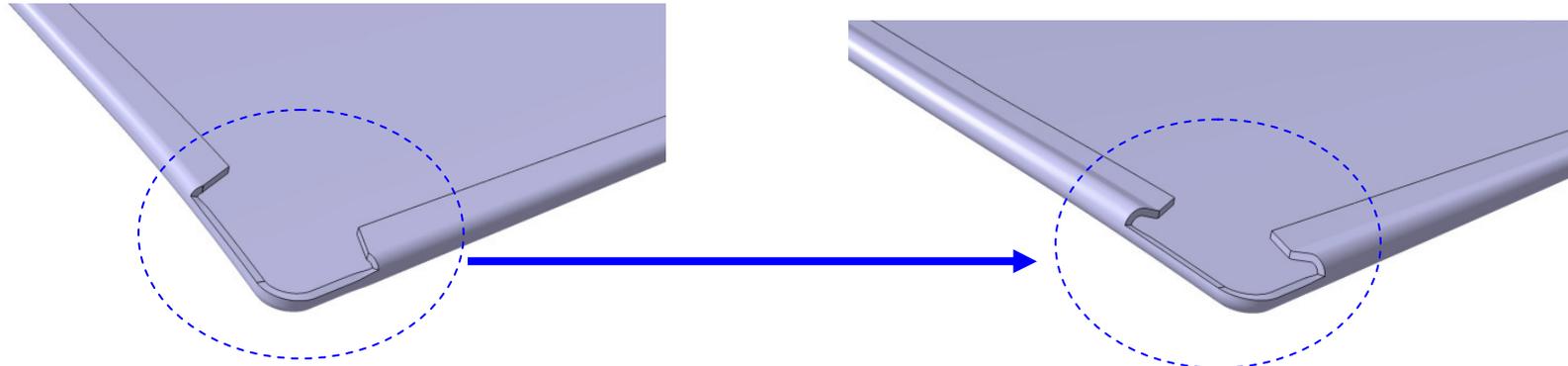
7 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion - Technologie: Falzen

Verbindung der Innen mit der Außenschale durch Falzen an allen 4 Seiten

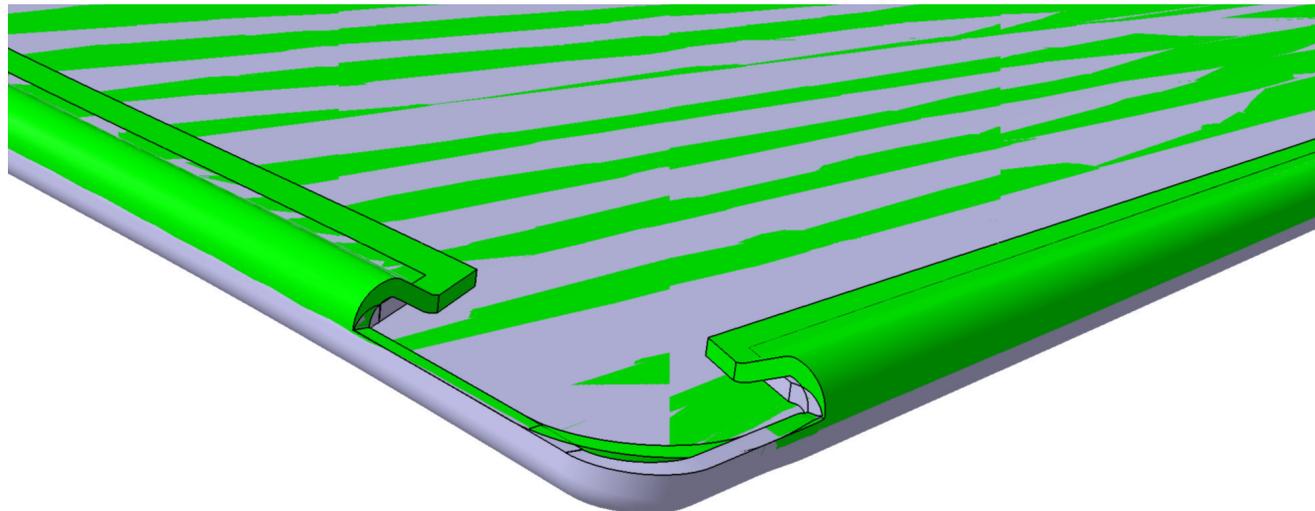




8 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion - Technologie: **Falzen**

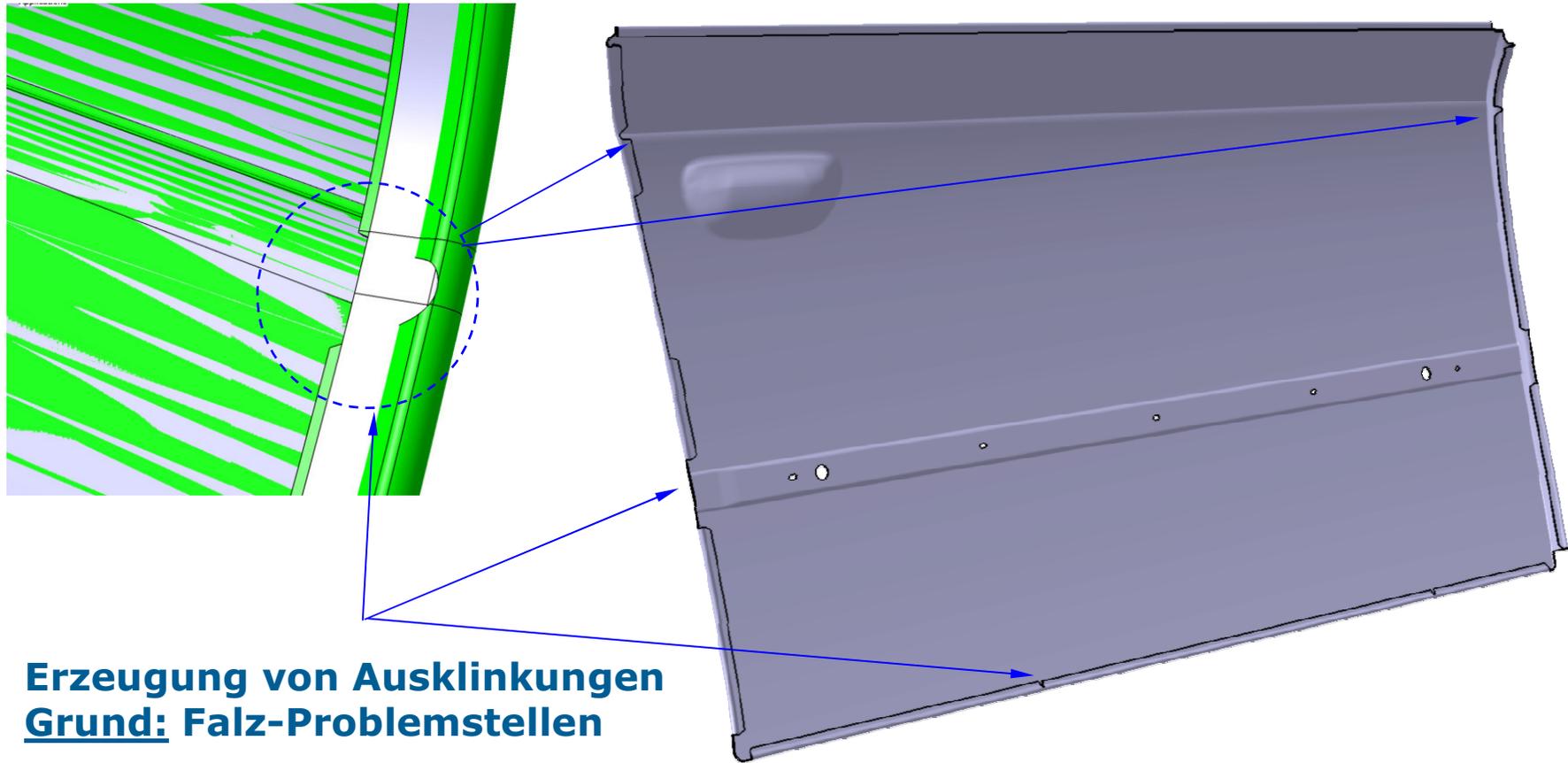


Falz-Geometrieänderung an der Außenschale zur „Tropfen“-Form
Grund: min. Biegeradius





9 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion - Technologie: Falzen

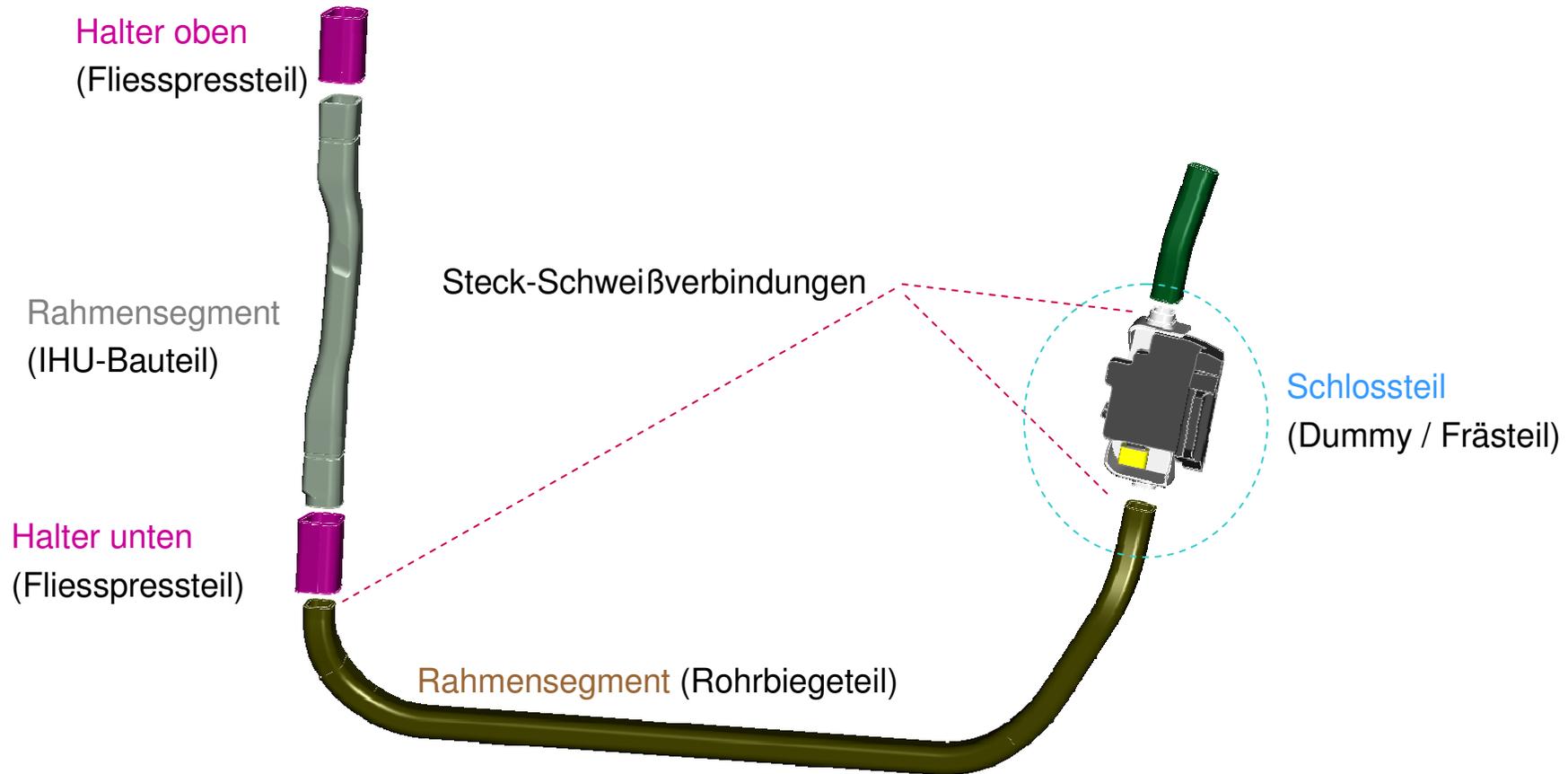


Erzeugung von Ausklinkungen
Grund: Falz-Problemstellen



10 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion – Rahmen: Überblick

Rahmenaufbau entsprechend verwendeter Technologie

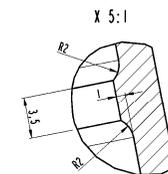
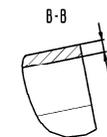
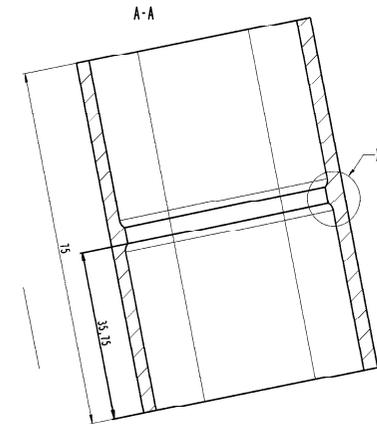
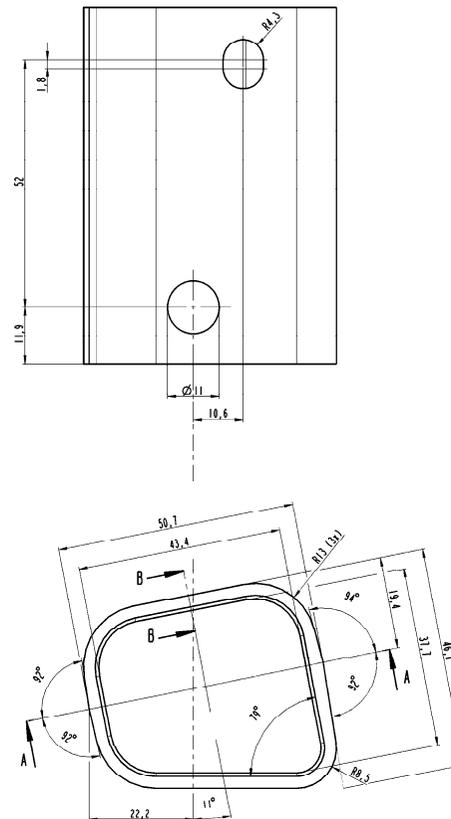
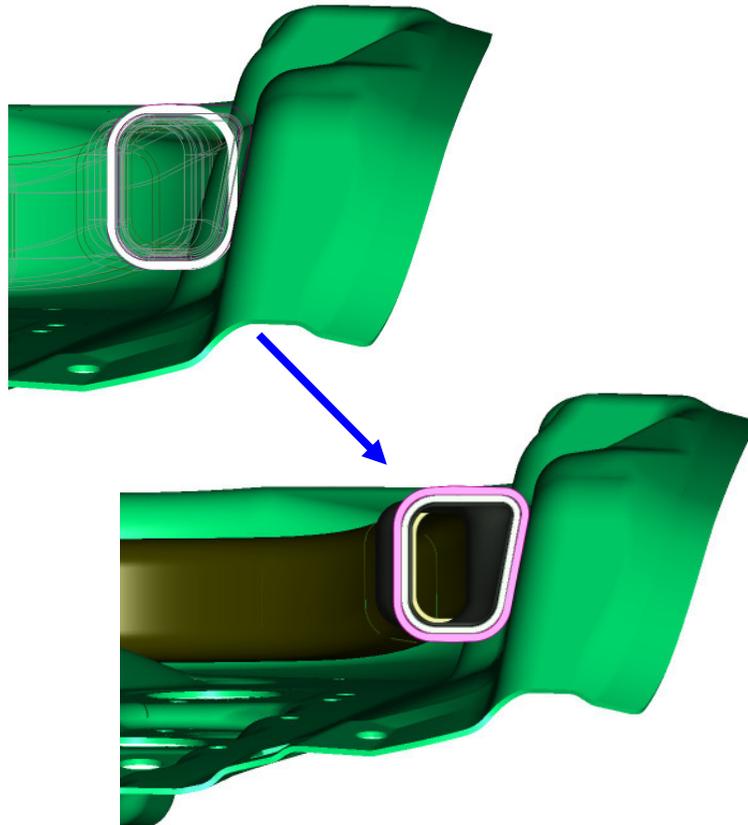


Ausgangsquerschnitte für Biege-, Fließpress-Adapter für Fensterrahmen und IHU-Teil entsprechen Profil 30x40

11 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

Fließpressteil

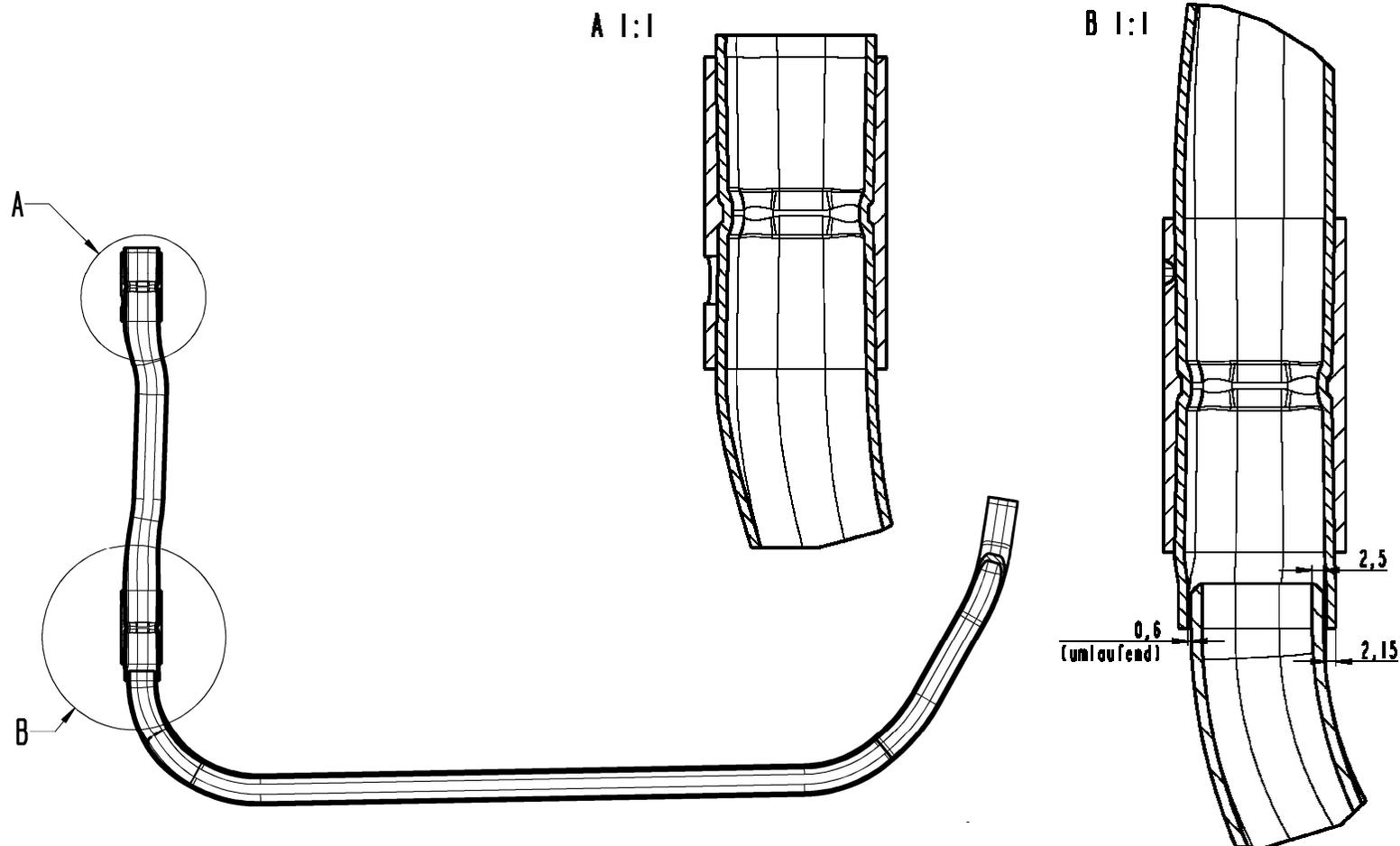
Querschnittsänderung durch notwendige Anpassung an geänderte Entformungsschräge der Innenschale (nach Tiefzieh-Simulation)





12 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

Verbindungen IHU-, Biege- und Fließpressteil

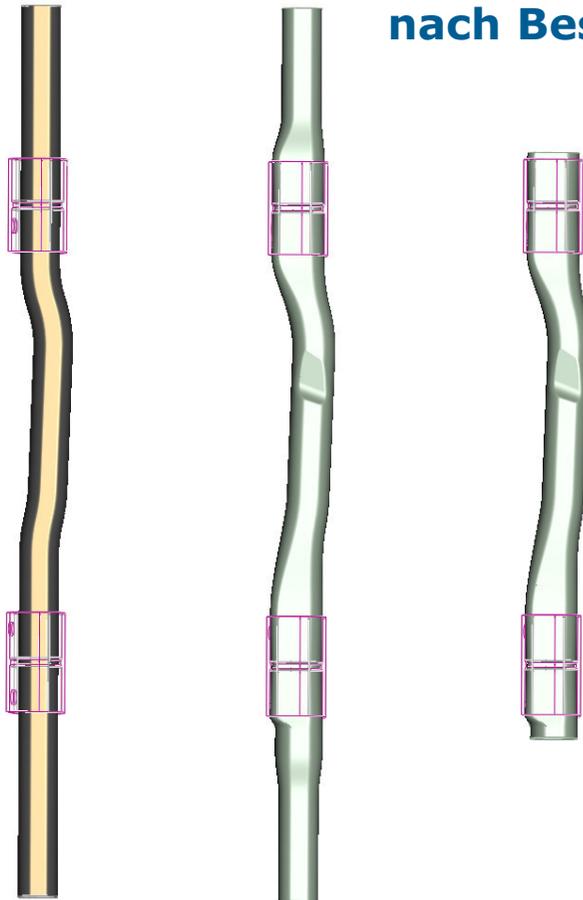




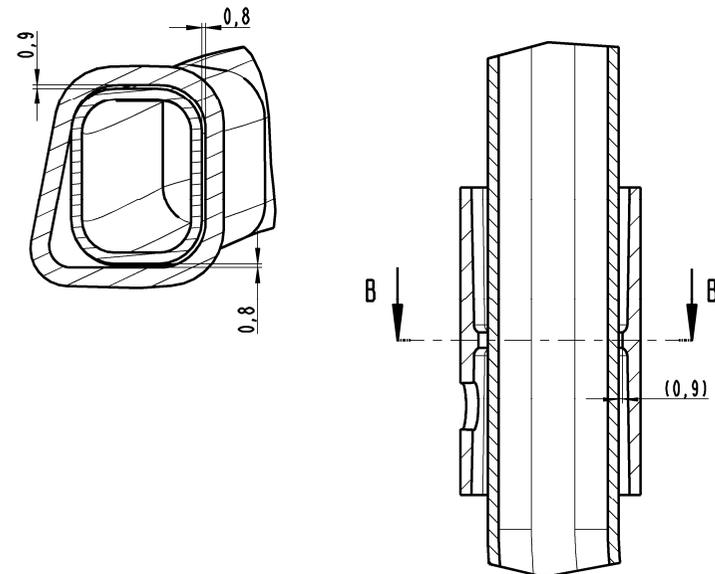
13 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

IHU-Teil

IHU-Rohteil, Fertigteil (vor und nach Beschnitt)



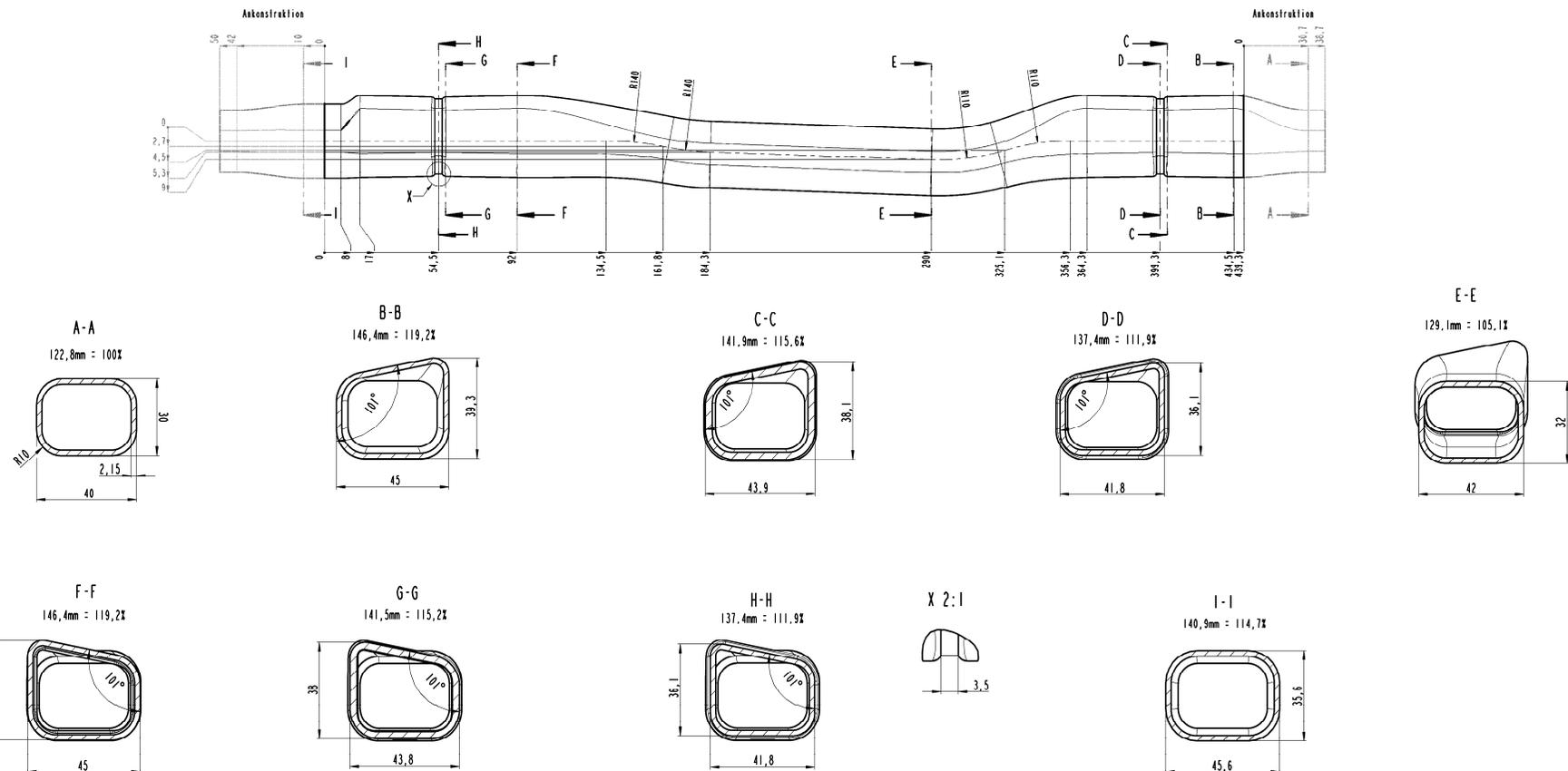
Untersuchungen zum Zustand nach dem Einlegen des IHU-Rohteiles und der Halter in das IHU-Werkzeug



14 Bauteil- und Baugruppenkonstruktion

IHU-Teil

Querschnittsuntersuchungen für die Ermittlung der prozentualen Aufdehnung während des IHU-Prozesses





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

HÖRMANN

Engineering
Ein Unternehmen von
Voith Industrial Services.

Aue 23-27, 09112 Chemnitz, Tel: 0371 50348-221

8 2. Strategie-Workshop (21.01.2009)



Technologieplattform zum Einsatz von Magnesium-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktlebenszyklus



2. Strategie-Workshop

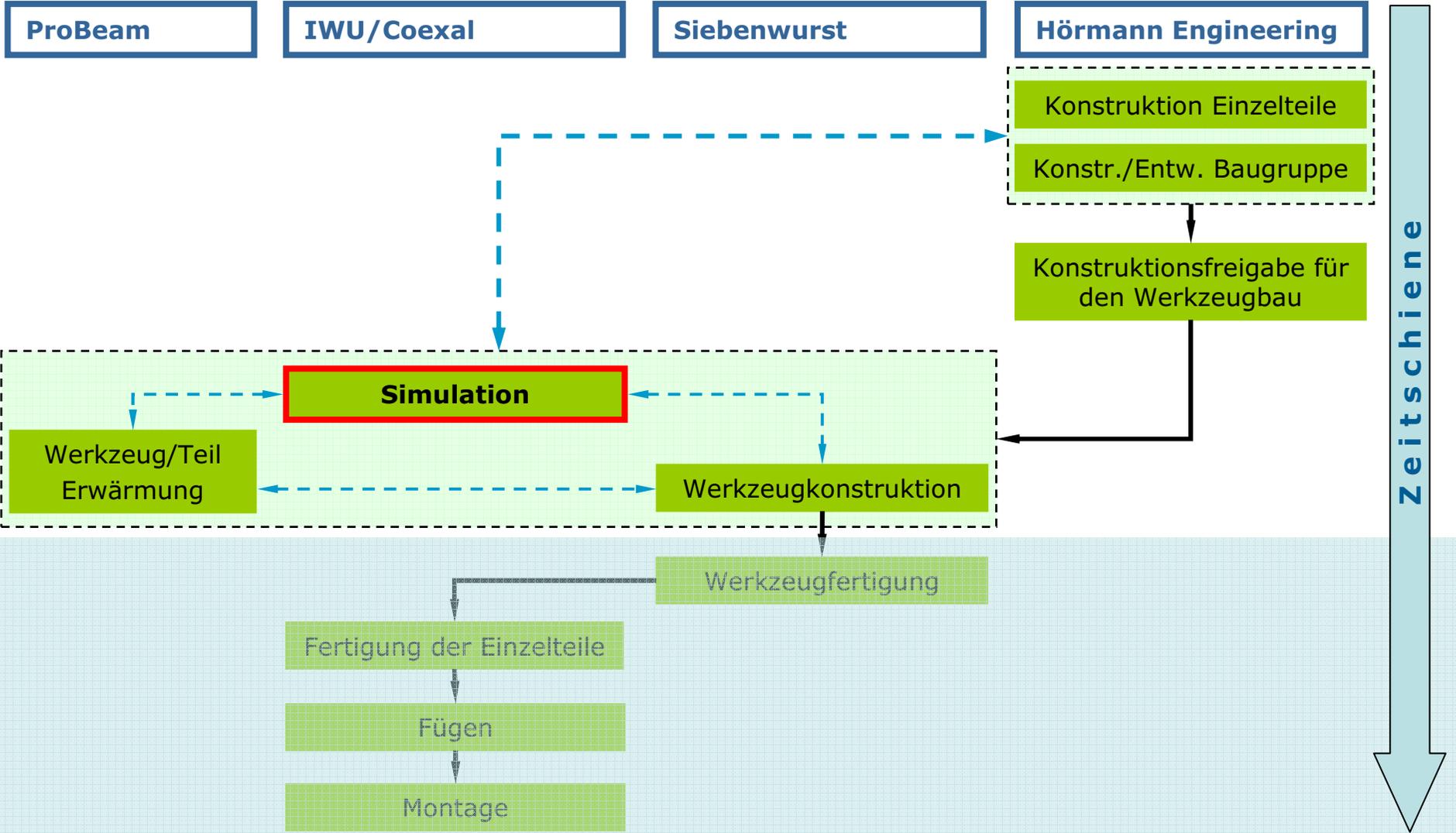
21.01.2009

TCC Chemnitz

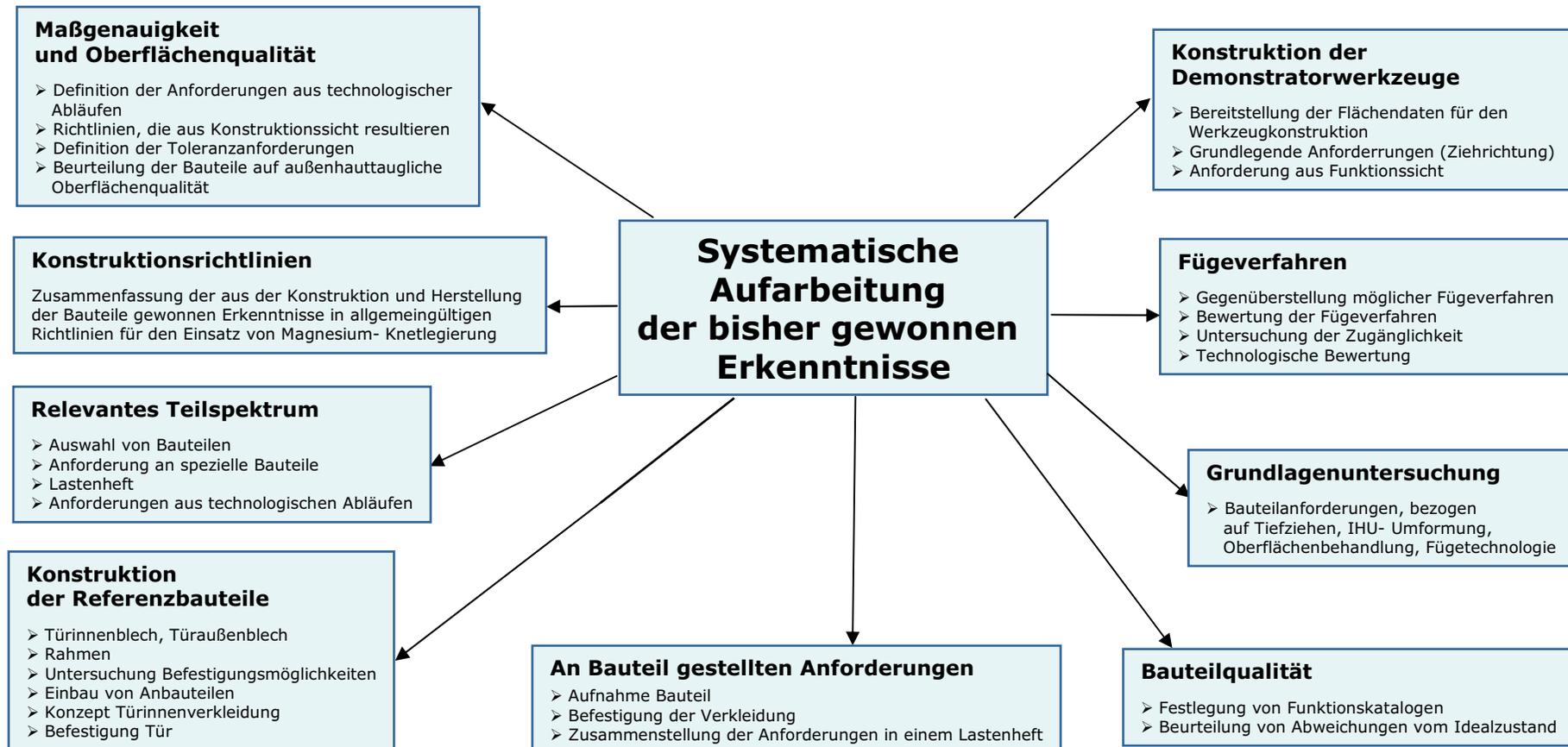
„Stand der Arbeiten“

Michael Wildenhain, Ralf Uhlig

2 Ablauf und Stand der Projektarbeit



3 Systematische Aufarbeitung der bisher gewonnen Erkenntnisse



GEFÖRDERT VOM

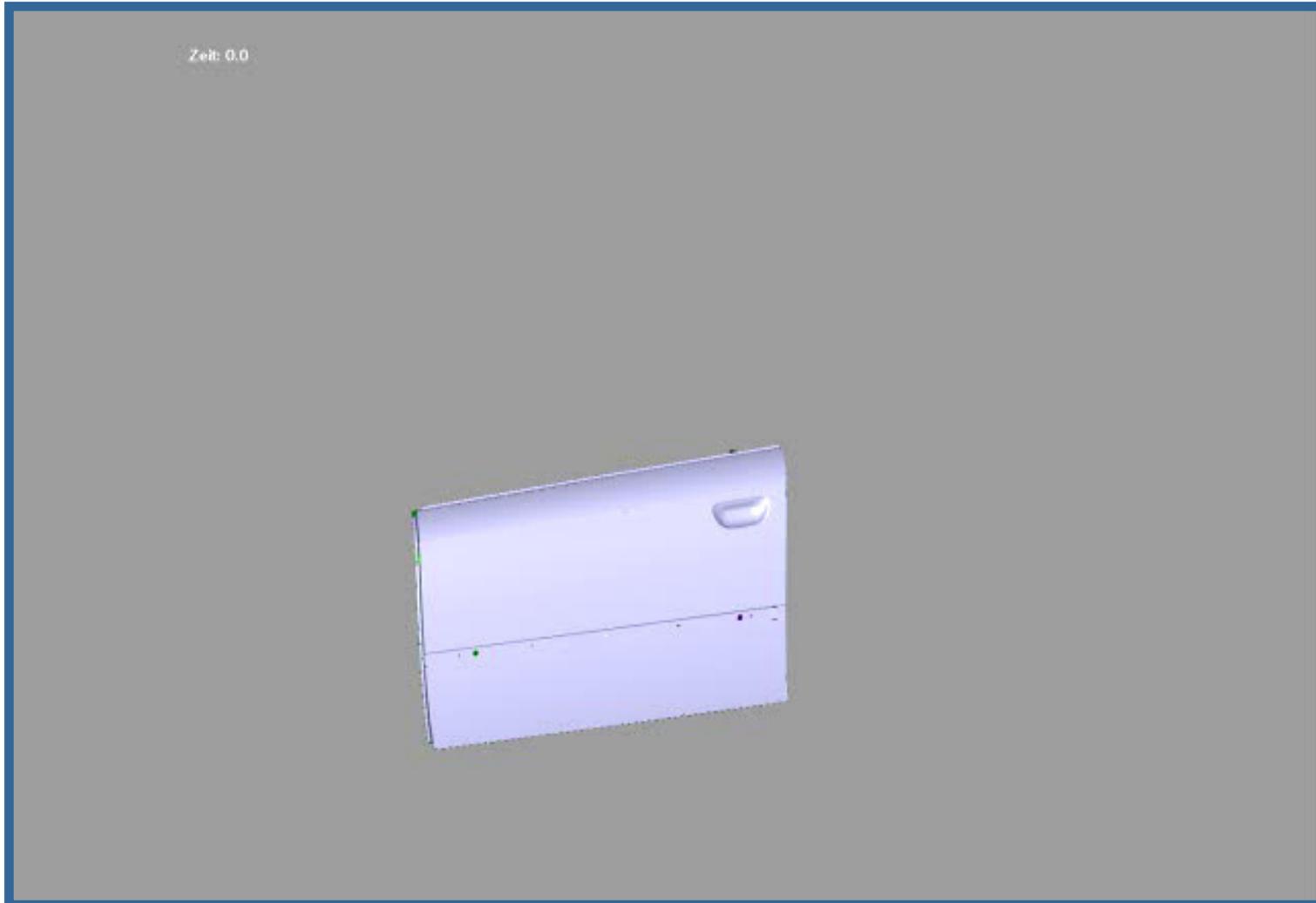


Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



WACHSTUMSKERNE
UNTERNEHMEN
REGION
Die BMBF-Innovationsinitiative
Neue Länder

4



Chemnitz, 21.01.2009

IV. Berichtsblatt/ Document Control Sheet

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <div style="text-align: right; font-weight: bold;">Schlussbericht</div>
3. Titel - Technologieplattform zum Einsatz von Mg-Knetlegierungen für den Fahrzeugbau im Produktionszyklus - Entwicklung, Konstruktion und Simulation	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Projektleiter: Uhlig, Ralf Bearbeiter: Wildenhain, Michael	5. Abschlussdatum des Vorhabens <div style="text-align: right; font-weight: bold;">31.03.2010</div>
	6. Veröffentlichungsdatum <div style="text-align: right; font-weight: bold;">24.09.2010</div>
	7. Form der Publikation abrufbarer pdf-File, Vorträge
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Voith Engineering Services GmbH Roed & Rail Aue 23-27 09112 Chemnitz	9. Ber. Nr. Durchführende Institution <div style="text-align: right; font-weight: bold;">8/021</div>
	10. Förderkennzeichen <div style="text-align: right; font-weight: bold;">03 WKBF 52</div>
	11. Seitenzahl <div style="text-align: right; font-weight: bold;">236</div>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben <div style="text-align: right; font-weight: bold;">106</div>
	14. Tabellen <div style="text-align: right; font-weight: bold;">11</div>
	15. Abbildungen <div style="text-align: right; font-weight: bold;">139</div>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung 1. Die Massivumformung von Magnesiumknetlegierungen hat aufgrund der spezifischen Werkstoffeigenschaften bis jetzt eher ein Randdasein. Materialeinsatz bisher selten. 2. Ziel des Vorhabens war die technologische Beherrschung des Werkstoffes zum Einsatz im modernen Karosseriebau sowie weiteren Gebieten. 3. Um die strukturellen Hindernisse der Legierungen zu überwinden, muss die Umformung im Bereich von 200°C bis 225°C erfolgen. 4. Durch Erzeugung eines Demonstrators wurde die technologische Machbarkeit nachgewiesen. Es erfolgte die Konstruktion eines Demonstrators aus Magnesiumknetlegierung. Es wurden Richtlinien für die Konstruktion von Karosserieteilen aus Magnesiumknetlegierungen (MgK) entwickelt. 5. Der Werkstoff MgK ist technologisch beherrschbar. Die Überführung der Technologie in die effektive Produktionspraxis erfordert weitere Entwicklungsarbeit.	
19. Schlagwörter TeMak, Magnesiumknetlegierung, Leichtbau, Karosseriebau, Automobilbau, Technologie, Energieeffizienz, Werkstoffeinsatz	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) <div style="text-align: right;">Final Report</div>
3. title <div style="text-align: center;">Tecnology platform for use of magnesium kneaded alloys for car construction in the production cycle - development, design and simulation</div>	
4. author(s) (family name, first name(s)) Uhlig, Ralf Wildenhain, Michael	5. end of project <div style="text-align: right;">31.03.2010</div>
	6. publication date <div style="text-align: right;">20100924</div>
	7. form of publication Retrievable pdf-file, lectures
8. performing organization(s) (name, address) Voith Engineering Services GmbH Roed & Rail Aue 23-27 09112 Chemnitz	9. originator's report no. <div style="text-align: right;">8/021</div>
	10. reference no. <div style="text-align: right;">03 WKBF 52</div>
	11. no. of pages <div style="text-align: right;">236</div>
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references <div style="text-align: right;">106</div>
	14. no. of tables <div style="text-align: right;">11</div>
	15. no. of figures <div style="text-align: right;">139</div>
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract 1. The solid deformation of magnesium kneaded alloys because of their specific material features till now have a secondary rule in the car body construction. Application happens rare. 2. The task of the project had been the tecnological control of the material for application in the modern car body construction as well as another areas. 3. To negotiate the structural impediments the deformation has to work inside a small temperature range of 200 °C to 225 °C. 4. By creation of a demonstrator the tecnological feasibility has been certificated. It was achived the design of a demonstrator from magnesium kneaded alloy. It has been developed guidelines for design of carbody parts from magnesium kneaded alloys. 5. The material magnesium kneaded alloy is tecnological controllable. The transference of the technology to the effective practice of production requires additional development work.	
19. keywords TeMak, magnesium kneaded alloy, lightweight construction, body construction, automotive manufacturing, tecnology, energy efficiency, materials application	
20. publisher	21. price

V. Quellenverzeichnis

- [ALU03] Leichtbaupotenzial eines aluminiumintensiven Fahrzeugs
Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 3/2003 Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Wallentowitz, Institut für Kraftfahrwesen Aachen, (ika) Dipl.-Ing. Karl-Heinz von Zengen, (EAA), Dr.-Ing. T. Parr, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika), Dipl.-Ing. D. Wynands, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika), Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. R. Wohlecker, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka)
- [BAUC93] Bauccio, M. et. al. (Ed.): ASM Metals Reference Book, 3rd Edition
American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1993
- [Becker05] Becker, J.: Magnesiumknetlegierungen für den Automobilbau; ATZ
Automobiltechnische Zeitschrift Band 107 Heft 10; Vieweg Verlag;
Wiesbaden 2005; S. 922 – 929
- [Beffort99] Beffort, O.; Hausmann, C.: Das Leichtmetall Magnesium und seine
Legierungen; EMPA- Eidgenössische Materialprüfungs- und
Forschungsanstalt; Thun 1999
- [Behrens04] Behrens, B.-A.: Prozesskette im Automobilbau- Vom Werkstoff zum
Produkt & Umformtechnologien und ihre Randbedingungen;
Vorlesungsscript der Leibniz Universität Hannover; Hannover 2004
- [BENS09] Wittig, R. (Benseler): E-Mail vom 23.09.2009 und 18.09.2009
- [Bonhoff03] Bonhoff, N.: Türmodule Autotüren schlüsselfertig; ATZ
Automobiltechnische Zeitschrift Band 105 Heft 9; Vieweg Verlag;
Wiesbaden 2003; S. 792 – 796
- [Bosch02] Bosch, R. (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch 24. Auflage; Vieweg
Verlag; Stuttgart 2002; S. 233

- [Bosch03] Bosch, R. (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch 25. Auflage; Vieweg Verlag; Wiesbaden 2003; S. 895, 1186
- [Braess03] Braess, H.-H. (Hrsg.): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik 3. Auflage; Vieweg Verlag; Wiesbaden 2003; S. 19, 84
- [COAR09] Lehrstuhl Fügetechnik der TU-Cottbus - Vorlesung ColdArc-Schweißen
- [DESP08] Artikel in technik+EINKAUF 4/2008, Bild aus Verfahrensvorstellung von Fronius und Reis Robotics Online im Internet: www.reisrobotics.de
- [DIN1725-1] DIN 1725 – 1 Aluminiumlegierungen; Knetlegierungen 1983-02, Beuth-Verlag, Berlin, 1983
- [DIN1729] DIN 1729 Teil 1; Magnesiumlegierungen, Knetlegierungen
- [DIN8580] DIN 8580:2003: Deutsche Norm: Fertigungsverfahren - Begriffe, Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [DIN9005] DIN 9005; Blatt 2; Gesenkschmiedestücke aus Magnesiumknetlegierungen, Grundlagen für die Konstruktion; Blatt 2; Januar 1974
- [Dindorf05] Dindorf, C.: Ermüdung und Korrosion nach mechanischer Oberflächenbehandlung von Leichtmetallen; Dr.-Ing. Dissertation; Darmstadt 2005
- [Doege01] Doege, E.: Kennwerte für die Magnesiumumformung an Beispiel von AZ31; Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Band 32; WILEY – VCH Verlag; Weinheim 2001; S. 48 – 51
- [DOH90] Dohmann, F.: Innenhochdruckumformen, in: Lange, K Umformtechnik Band 4, Springer-Verlag Heidleberg, 1990
- [Draugelates98] Draugelates, U.: Modernste Laserstrahltechnik für die TU Clausthal; Hochschulzeitschrift TUContact; Clausthal-Zellerfeld 1998; Nummer 2; S.

74 – 77

- [DRÖD99] Dröder, K.G.: Untersuchungen zum Umformen von Feinblechen aus Magnesiumknetlegierungen; Dr.-Ing. Dissertation; Hannover 1999
- [Duning00] Duning, R.: Einflüsse unterschiedlicher Türscharniersysteme auf das Strukturverhalten von Fahrzeugkarosserien im Säulen- und Türinnenblechbereich; VDI Berichte Nr. 1543; VDI Verlag; Düsseldorf 2000; S. 341 – 354
- [Düring04] Düring, M.: MIA – Magnesium im Automobilbau; <http://www.kuf.tu-cottbus.de/Forschung.aspx>, Cottbus 2004
- [Egner] Egner, M.: Die Türen des neuen Audi A6; Sonderausgabe von ATZ und MTZ; Vieweg Verlag; Wiesbaden; S. 192 – 197
- [EICH03] Eichhorn, A., Bietke, D., Meyer, F., Toth, W.: Innenhochdruckumformen von Rohren, 2003
- [EICH96] Eichhorn, A.: Innovative Fertigungstechnologien – Umformen und Lochen mit Innenhochdruck, Tagungsband: IHU eine Alternative in der Fertigungstechnik, Fellbach, 1996
- [EMPA] Online im Internet, URL:
http://idea-fp6.net/Downloads/-Beffort_Hausmann_Magnesium_and_its_Alloys.pdf
- [Enß01] Enß, J.: Neue Magnesium – Blechprodukte für den Automobilbau; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Band103 Heft 2; Vieweg Verlag; Wiesbaden 2001; S. 142 – 145
- [FALZ09] Wienold, L.: (FH Zwickau und Siebenwurst Werkzeugbau) „Zuarbeit für Konstruktionsrichtlinien zum Falzen von MgK-Legierungen“ Stand 30.10.2009
- [Fischer07] Fischer, M.: Reduktion des Tür – Diskomforts beim Ein- Ausstieg in engen

- Parksituationen; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Band 109 Heft 9; Vieweg Verlag; Wiesbaden 2007; S. 820 – 829
- [Garber93] Garber, F.: Magnesium – Schwierigkeiten überwunden, neue Chancen im Blick; Metall Band 47 Heft 6; Giesel – Verlag; McLean 1993; S. 574 – 577
- [Grabner05] Grabner, J.: Konstruieren von Pkw – Karosserien 3. Auflage; Springer - VDI – Verlag; München 2005; S. 178 – 182
- [Hack05] Hack, M.: Lebensdaueranalyse von Tür- und Karosseriekomponenten; VDI – Z integrierte Produktion Band 147 Heft 9; Springer - VDI- Verlag; Düsseldorf 2005; S.100 – 102
- [Hartung01] Hartung, Christoph: Beurteilung des optischen Erscheinungsbildes von Ziehteilen mit Hilfe numerischer Verfahren, Technische Universität München, 2001
- [Hass89] Hass, T.: Messung von Schließkräften an Omnibustüren; Nahverkehrspraxis Band 37 Heft 5; Arnold Verlag; München 1989; S. 189 – 190
- [HENG02] Hengelhaupt, J.; Häusermann, M.: Neues Werkzeugkonzept für das Tiefziehen. In: Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Fellbach 2002. MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 2002
- [Hilfrich07] Hilfrich, E.: Vergleich und Optimierung von Fahrzeugtüren; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Band 109 Heft 6; Vieweg Verlag; Wiesbaden 2007; S. 522 – 529
- [HYDRO07] Neugebauer, R.: Hydro-Umformung (ISBN: 3-540-21171-3), Springer Verlag Berlin Heidelberg 2007
- [IHU08] Seifert, M.: Untersuchungen zur Anwendung des temperierten Hydroforming bei Magnesium-Strukturbauteilen, 1.TeMaK Workshop, 2008

- [INNO07] Magnesium-Knetlegierungen: Innovative Leichtbauwerkstoffe für den Automobilbau, Forum der Forschung 19/2006: 41-46, BTU Cottbus, Eigenverlag, ISSN-Nr.: 0947 - 6989
- [Janssen02] Janssen, S.: Umformung von Magnesiumknetlegierungen auf Aluminium - Zink Basis im geschlossenen Gesenk; Dr.-Ing. Dissertation; Hannover 2002
- [Jaroni03] Jaroni, U.: Industrielle Entwicklungstrends auf dem Gebiet der Werkstoff- und Umformtechnologie für innovative Stahlwerkstoffe und -komponenten; MEFORM 2003: 75 Jahre Metallformung in Freiberg; TU Freiberg Verlag; Freiberg 2003; S. 56 – 74
- [Kainer98] Kainer, K. U.: Magnesium – Eigenschaften, Anwendungen und Potentiale; Hochschulzeitschrift TUContact; Clausthal-Zellerfeld 1998; Nummer 3; S. 28 – 38
- [Kainer00] Kainer, K. U.: Stand der Technik und Entwicklungspotentiale für Magnesiumanwendungen; Magnesium – Eigenschaften, Anwendungen, Potentiale; WILEY – VCH Verlag; Weinheim 2000, S. 1 – 23
- [Kammer00] Kammer, C.: Magnesium – Taschenbuch; Aluminium Verlag; Düsseldorf 2000; S. 78 – 79
- [Karakas07] Karakas, Ö.: Anwendung des Konzepts der Mikrostützwirkung zur Bewertung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen der Magnesiumknet-legierung AZ31; Schweißen und Schneiden Band 59 Heft 2; Verl. für Schweißen u. Verwandte Verfahren, DVS-Verlag; Düsseldorf 2007; S. 78 – 83
- [Kawalla03] Kawalla, R.: Magnesium ein wichtiger Werkstoff der Zukunft; MEFORM 2003; 75 Jahre Metallformung in Freiberg; TU Freiberg Verlag; Freiberg 2003; S. 129 – 141

- [Kawalla06] Kawalla, R.: Magnesiumblechherstellung – Stand und Perspektiven; MEFORM 2006: Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien für Magnesium- und Aluminiumknetwerkstoffe; TU Freiberg Verlag; Freiberg 2006; S. 81 – 95
- [Kerz06] Kerz, P.: Druckguss macht das Rennen; Giesserei Band 93 Heft 6; Giesserei – Verlag; Schaffhausen 2006; S. 68 – 70
- [Kerz06a] Kerz, P.: Leichtgewicht mit Zukunft; Giesserei Band 93 Heft 7; Giesserei-Verlag; Schaffhausen 2006; S. 56 – 58
- [Klein05] Klein, B.: Leichtbau – Konstruktion: Berechnungsgrundlage und Gestaltung 6. Auflage; Vieweg Verlag; Kassel 2005; S. 30 – 64
- [KOAT09] Online im Internet, URL:
http://www.konstruktionsatlas.de/verbindungstechnik/nieten/nieten_bauteil.shtml (Stand: 09.09)
- [KORR01] Schreckenberger, H.: Korrosion und Korrosionsschutz von Magnesium-Werkstoffen für den Automobilbau, VDI Verlag Düsseldorf 2001
- [Kree04] Kree, V.: Metallographische Gefügeuntersuchungen von Magnesiumlegierungen; Praktische Metallographie Band 41 Heft 5; Carl Hanser Verlag; München 2004; S. 233 – 246
- [Kreis07] Kreis, G.: Türen und Heckklappe; Sonderausgabe von ATZ und MTZ Band 109 September; Vieweg Verlag; Wiesbaden 2007; S. 172 – 176
- [Kreuzinger05] Kreuzinger, T.: Fahrzeug – Kompatibilität im Seitenaufprall; Dr.-Ing. Dissertation; Aachen 2005
- [Lehnert02] Lehnert, F.: Einsatz von Magnesium im Automobilbau; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Band 104 Heft 10; Vieweg Verlag; Wiesbaden 2002; S. 910 – 918

- [LEIB07] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 7. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007
- [LOET09] Online im Internet, URL:
<http://de.wikipedia.org/wiki/L%C3%B6ten> (Stand: 01.10)
- [MAG00] Magnesium Taschenbuch. Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000, 1. Auflage (ISBN 3-87017-264-9)
- [Maier04] Maier, K.: Leichtbau mit System; Giesserei Kompakt Heft 1; Giesserei - Verlag; München 2004; S. 26 – 27
- [Merklein06] Merklein, M.: Sonderverfahren zur Magnesiumverarbeitung; MEFORM 2006: Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien für Magnesium- und Aluminiumknetwerkstoffe; TU Freiberg Verlag; Freiberg 2006; S. 220 – 235
- [Mertz00] Mertz, A.: Neues Konstruktionspotential mit Magnesium – Strangpressprofilen ; www.druckgussberater.de; Meschede 2000; S. 1 – 8
- [MgEAP00] Kainer, K. U.: Magnesium Eigenschaften, Anwendungen Potentiale, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim 2000
- [MGF01] E-Mail von H. P.Vogt Firma MGF ThyssenKrupp vom 17.Sept. 2009
- [MGF08] Vogt, H. P.: Optimierte Fertigung und Weiterverarbeitung von Magnesium-flachprodukten (MgF), 1.TeMaK-Workshop, 2008
- [MGLG01] Beck, A.: Magnesium und seine Legierungen (ISBN 3-540-41675-7) Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2001
- [MM07] Kühlein, M., Bruck, F.: Fließpressen von Magnesiumlegierungen jetzt bei Raumtemperatur möglich, Artikel in Maschinenmarkt, 21.06.2007

- [Morgenstern06] Morgenstern, C.: Kerbgrundkonzepte für die schwingfeste Auslegung von Aluminium-schweißverbindungen am Beispiel der naturharten Legierung AlMg_{4,5}Mn (AW-5083) und der warmausgehärteten Legierung AlMgSi₁T₆ (AW-6082 T₆); Dr.-Ing. Dissertation; Darmstadt 2006; S. 95 – 103
- [MUDR06] C. Mudra: Experimentelle Bestimmung des Umformverhaltens von Magnesium- und Aluminiumlegierungen beim temperierten Innenhochdruckumformen mit gasförmigen Wirkmedien; in: Diplomarbeit, Hochschule Zittau/Görlitz, 2006
- [Noster01] Noster, U.: Schwingfestigkeit von AZ31 und AZ91 in Abhängigkeit der Einsatztemperatur; Metall Band 55 Heft 3; Giesel – Verlag; Isernhagen 2001; S. 112 – 116
- [Otte99] Otte, V.: Neue Möglichkeiten zur Simulation von Schwenkmomenten an Automobiltürscharnieren mit Neuronalen Netzen; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Band 101 Heft 4; Vieweg Verlag; Wiesbaden 1999; S. 238 – 246
- [PLMA08] Online im Internet, URL:
<http://www.mig-o-mat.com/de/Produkte/Schweisstechnik/Verfahren1.html>.
MIG-O-MAT® Plasmaschweißen - Verfahrensanweisung
- [Postlmayr06] Postlmayr, L.: Magnesium für die Nische; Automobil Industrie Band 51 Heft 5; Vogel Verlag; Altenmarkt/Österreich 2006; S. 58 – 59
- [Reinhold00] Reinhold, B.: Korrosionsschutz für Magnesium im Automobilbau; Metalloberfläche Band 54 Heft 4; Carl Hanser Verlag; München 2000; S. 26 – 31
- [ROCL10] Online im Internet: URL: <http://www.lappe-profiltechnik.de/clinchen.html>
(Stand: 01.10)

- [Rosenstein04] Rosenstein, B.: Stufenloser Türfeststeller; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Band 106 Heft 3; Vieweg Verlag; Wiesbaden 2004; S. 224 – 228
- [RRSW08] F.RIEDEL Temperiertes mechanisches Fügen von Magnesiumknetlegierungen, IWU 1. TeMaK-Workshop 2008
- [Rümmler] Rümmler, N.: Experimentelle Schwingungs- und Verformungsanalysen an Fahrzeug- und Maschinenstrukturen mittels innovativer Messtechniken; www.amitronics.de; Seefeld b. München; S. 2 – 8
- [Sauer01] Sauer, G.: Strangpressen von Halbzeugen aus Magnesiumwerkstoffen; Strangpressen; Aluminium – Verlag; Düsseldorf 2001; S. 303 – 310
- [Saul06] Saul, M.: Die Fahrzeugtür in der Simulation; Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau; VDI – Berichte 1967.1; VDI Verlag; Würzburg 2006; S. 1 – 12
- [SCHIK] Prof. Dr.-Ing. W. Schikorr: Fertigungstechnik I, FH Stralsund
- [SCHU98] Schuler, Handbuch der Umformtechnik, Springer Verlag Berlin Heidlerberg, 1998
- [Schwerin06] Schwerin, R.: Erfahrung bei Zerspannung von Magnesium; Kühlschmierstoff – Seminar des VSI; Mainz 2006
- [SEIF08] Dipl.-Ing. Michael Seifert, Dissertation, Temperiertes Innenhochdruck-Umformen von Rohren aus Magnesium- und Aluminiumlegierungen
- [SFB390] Sonderforschungsbericht 390; Magnesiumtechnologie; TU Clausthal & Universität Hannover; Abschlussbericht 2002
- [Siegert02] Siegert, K.: Pkw-Karosserie-Leichtbau ist angesagt; wt Werkstattstechnik online Band 92 Heft 10; Springer – VDI – Verlag; Düsseldorf 2002; S. 471
- [Siegert04] Siegert, K.: Hydraulisches und pneumatisches Tiefen von Aluminium- und Magnesiumblechen sowie von superplastisch unformbaren Blechen; 11.

Sächsische Fachtagung Umformtechnik: Werkstoffe und Komponenten im Fahrzeugbau; Freiberg 2004; S. 393 – 403

- [Sonsino04] Sonsino, C. M.: Grundlagen für praktische Anwendung des Korbspannungskonzepts zur Schwingfestigkeitsbewertung von geschweißten Bauteile aus Magnesiumlegierungen DVS – Nr. 9.036 AiF Nr. 13.457 N; Braunschweig 2004
- [Stelzer06] Stelzer, M.: Korrosionsschutz für Magnesiumlegierungen; MEFORM 2006: Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien für Magnesium- und Aluminiumknetwerkstoffe; TU Freiberg Verlag; Freiberg 2006; S. 335 – 342
- [STZ09] M. FLOCK (Firma STZg GmbH) Präsentation zu Thermisches Fügen von Magnesiumknetlegierungen vom 16.9.2009 per E-Mail
- [TAYL69] Taylor, L.; Boyer, H. E.; Durand, E. A. et. al. (Ed.): Metals Handbook 8th Edition, Volume 4, American Society for Metals, Metals Park, Ohio 44073, 1969
- [TE09] Online im Internet, URL:
<http://www.temak-sachsen.de/> (Stand 02.08.2008)
- [Thate03] Thate, W.: Schweißen von Magnesiumknetlegierungen; wt Werkstattstechnik online Band 93 Heft 10; Springer – VDI – Verlag; Düsseldorf 2003; S. 699 – 704
- [TUBAF] Technische Universität Bergakademie Freiberg; Vorlesungsmaterial Fahrzeugkomponenten WS 06/07
- [Unterweger03] Unterweger, U.: Magnesium vor Korrosion schützen; Metalloberfläche Band 57 Heft 5; IGT – Verlag; München 2003; S. 34 – 36
- [VDI3146] VDI-Richtlinie Nr.: 3146, Blatt 1: Innenhochdruck-Umformen, Grundlagen, (1999-2003)

- [Westphal02] Westphal, K.: Verschraubung von Magnesiumkomponenten; Metall Band 56 Heft 1 – 2; Giesel – Verlag; Isernhagen 2002; S. 32 – 34
- [Westphal03] Westphal, K.: Verschraubung von Magnesiumkomponenten; Beitrag zur IIR Fachkonferenz „Magnesium im Fahrzeugbau“; Sindelfingen 2003
- [WIHU06] Eichhorn, A., Bietke, D., Meyer, F.: Warm-Innenhochdruckumformen von Mg-Rohren. UTFscience, UT 02-2006
- [WIKI01] Online im Internet, URL:
http://de.wikipedia.org/wiki/Schwei%C3%9Ffen#Metallschutzgasschwei.C3.9Fen_.28MSG.29.2F.28MIG.-2FMAG.29
- [WSDB] Werkstoffdatenblatt Magnesiumlegierung MgF DDQ 150, MgF Magnesiumflachprodukte Freiberg
- [WWW01] Verfasser: Dipl.-Ing. Johannes Mandelartz, Dipl.-Ing Reimar Teschers, Dipl.-Ing Thomas Schumacher, Aluminium - Einsatz im Verkehrssektor.
<http://www.ibh.rwth-aachen.de/ibh/publikationen/fachartikel/reimarerz.pdf>,
Online in Internet, Datum des letzten Zugriffs 09.07.2008
- [WWW02] Online im Internet, URL:
http://www.hsu.de/laft/index_Gu9Zg91gjm93Sx.html (Stand 05.2009)
- [WWW03] Online im Internet, URL:
<http://tvt.produktion.de/article/cat/1359Metalle,+allgemein/detail/25390-Magnesium:+Viele+Vorbehalte+sind+nicht+berechtigt> (Stand 07.2009)
- [WWW04] Artikel „Umformen mit Fluiden und Luft“ in BBR 07/2007. Online im Internet, URL: <http://www.bbr.de/index.cfm?pid=1459&pk=63002>