



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Light-eBody – Leichte und ressourcensparende Elektrofahrzeugkarosserie in Multimaterialbauweise

Forschungsvorhaben: 03X3034C

Abschlussbericht

ThyssenKrupp Steel Europe AG

Status: 3.0 Finaler Stand, Einreichung TIB

Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die Tätigkeiten und Ergebnisse der ThyssenKrupp Steel Europe AG innerhalb des Projektes Light-eBody:

- Fahrzeugspezifikation
- Entwicklung der Vorderwagenstruktur
- Entwicklung der T³ B-Säule
- Aufbau eines CAE-Felgenmodells zur Simulation des Small Overlap Crash
- Probenerstellung
- Untersuchung Hoch-Mn-haltiger (FE-Mn-) Stähle
- Montage mechanischer Fügelemente an warmumgeformten MBW[®]1500
- Erstellung eines Demonstratorbauteils
- Querschnittsthema Akustik
- Querschnittsthema Life Cycle Assessment

Dateiname

20150204_TKSE_Light-eBody-Abschlussbericht-Final

Versionsliste

Version	Datum.	Kommentar
1.0	18.12.2014	Freigabeversion (TKSE, Light eBody Konsortium)
2.0	04.02.2015	Finaler Stand, Einreichung PTJ
3.0	18.11.2015	Finaler Stand, Einreichung TIB

Autor/ Autoren

Name	Partner	Kapitel
Breidenbach, Andreas	ThyssenKrupp Steel Europe AG	2.1-2-5, 2.8
Brüggenbrock, Michael	ThyssenKrupp Steel Europe AG	2.3, 2.8
Dr. Hofmann, Harald	ThyssenKrupp Steel Europe AG	2.6
Drewes, Stephan	ThyssenKrupp Steel Europe AG	2.9
Chan, Jia-Uei	ThyssenKrupp Steel Europe AG	2.10

Projektleiter

Andreas Breidenbach
ThyssenKrupp Steel Europe AG
Kaiser-Wilhelm-Str. 100
47166 Duisburg
Deutschland

Telefon: +49 203 52 24256
Fax: +49 203 52 44979
E-Mail: andreas.breidenbach@thyssenkrupp.com

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Technologisch-wissenschaftliche Projektergebnisse	5
2.1	Fahrzeugspezifikation.....	5
2.2	Entwicklung der Vorderwagenstruktur.....	5
2.3	Entwicklung der T ³ B-Säule	9
2.3.1	Crashberechnung der T ³ -B-Säule	9
2.3.2	Fertigungstechnische Absicherung der T ³ -B-Säule	11
2.4	Aufbau eines CAE-Felgenmodels zur Simulation des Small Overlap Crash.....	12
2.5	Probenerstellung	14
2.6	Hoch-Mn-haltige Stähle	15
2.7	Montage von Verbindungselementen an warmumgeformten MBW®1500	18
2.8	Erstellung des Demonstrationsbauteils	20
2.9	Querschnittsthema Akustik	24
2.10	Life Cycle Assessment	28
3	Zusammenfassung	31
4	Formelzeichen und Indizes	32
5	Literatur	33
6	Anhang.....	35
6.1	Schliffbilder Fügeelemente	35

1 Einleitung

Ziel des Verbundprojektes Light-eBody ist die Entwicklung einer gewichtsreduzierten, kosteneffizienten und ressourcensparenden Multimaterial-Karosserie für Elektrofahrzeuge. Dieses Ziel soll durch die anforderungsgerechte Anwendung verschiedener Werkstoffe und der Entwicklung eines Karosseriekonzepts, das konsequent auf die Anforderungen eines E-Fahrzeuges ausgelegt ist, erreicht werden. Ein geringes Karosseriegewicht reduziert den Energiebedarf eines Elektrofahrzeuges und es werden höhere Reichweiten erlangt. Das Verbundprojekt Light-eBody leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Akzeptanz der Elektromobilität und unterstützt das Ziel des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität, Deutschland zum Leitanbieter und zum Leitmarkt für Elektromobilität bis 2020 zu entwickeln. [NPE10]

Der vorliegende Bericht beschreibt die Projektergebnisse, die ThyssenKrupp Steel Europe im Rahmen des Verbundprojekts erzielte.

Innerhalb des Arbeitspaketes „Strukturkonzepte und Bauteilgestaltung“ wurde in Kooperation mit den Projektpartnern der Vorderwagen des Light-eBody und eine B-Säule in Profilbauweise entwickelt. Für diese hoch belasteten crash-relevanten Bauteile der Fahrzeugkarosserie werden höchstfeste und warmumgeformte Stahlwerkstoffe eingesetzt. Das obere Segment der B-Säule wird mit einer innovativen Fertigungstechnologie als Demonstrationsbauteil hergestellt.

Zur Realisierung eines Multimaterialkonzeptes wurde im Rahmen des Projektes die Anwendung verschiedener höchstfester und warmumgeformter Stähle untersucht. Neben eigenen Untersuchungen wurden den Projektpartnern Werkstoffe und Probekörper für Werkstoffcharakterisierungen und die Durchführung fügetechnischer Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Die Entwicklung der Karosserie wird durch die Querschnittsthemen Akustik und Life Cycle Assessment, zur Bewertung der akustischen Eigenschaften und der CO₂-Emissionen einer Karosserie in Multimaterialbauweise abgeschlossen.

2 Technologisch-wissenschaftliche Projektergebnisse

2.1 Fahrzeugspezifikation

Die Anforderungen an die Karosserie und technische Eigenschaften des Fahrzeuges, wie Leistung, Batteriekapazität und Fahrzeuggewicht, sind Bestandteil der Fahrzeugspezifikation. Grundlage für die Spezifikation sind die Daten bestehender Elektrofahrzeuge und Fahrzeugdaten der beteiligten Fahrzeughersteller.

Die Ausarbeitung der Fahrzeugspezifikation erfolgte gemeinsam mit den Projektpartnern.

Produktionsstückzahl	250.000 Fahrzeuge pro Jahr
Reichweite	> 150 km, NEFZ
Nominalleistung	40 kW
Spitzenleistung	70 kW
Batteriekapazität	25 kWh, SOC 85%
Energiedichte	130 Wh/kg
Fahrzeugabmessungen	Entsprechend des Referenzfahrzeuges (modifizierter und elektrifizierter Golf V)
Gesamtgewicht	1328 kg, Betriebsbereit, incl. Fahrer
Zuladung	500 kg
Karosseriegewicht	25% Gewichtsreduktion, im Vergleich zur Referenz
Statische Torsionssteifigkeit	25500 Nm/°
Eigenfrequenz Torsion	>45 Hz + Spreizung 3 Hz
Eigenfrequenz Biegung	>45 Hz + Spreizung 3 Hz
Lastfälle zur Auslegung der Karosserie	Euro NCAP Front IIHS Seitenaufprall Euro NCAP Pfahlaufprall 70 % Überdeckung 80 km/h Heckaufprall Euro NCAP Seitenaufprall Dacheindrückttest FMVSS 216

Tabelle 2.1-1: Fahrzeugspezifikation des Light-eBody

2.2 Entwicklung der Vorderwagenstruktur

Die Vorderwagenstruktur ist ein sicherheitsrelevantes System der Fahrzeugkarosserie und muss bei einem Frontcrash die Crashenergie absorbieren und definiert in die Lastpfade der Fahrzeugstruktur einleiten. Neben den Craschanforderungen stellen die Aufnahme des Fahrwerkes und Antriebes hohe Anforderungen an die strukturellen Eigenschaften des Vorderwagens. Der Vorderwagen besteht aus den Baugruppen Längsträger (li/re), Querträger und den darin integrierten Anbindungen. An die Längsträger und den Querträger des Vorderwagens wird der Hilfsrahmen des Fahrzeuges montiert. Der Hilfsrahmen trägt den Elektromotor, die Leistungselektronik und das Fahrwerk. Die Anbindungspunkte des

Hilfsrahmens müssen eine hohe lokale Steifigkeit und Festigkeit aufweisen, um die Momente und Kräfte des Fahrzeugantriebs und des Fahrwerks aufzunehmen. Die Anbindungspunkte befinden sich auf der Unterseite der Längsträger und des vorderen Querträgers.

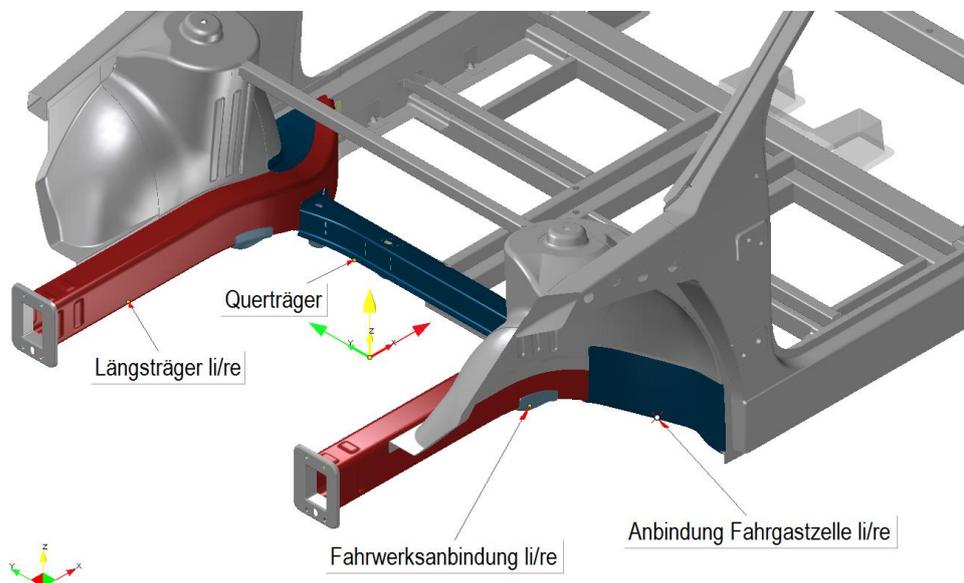


Abbildung 2.2-1: Entwicklungsumfang des Vorderwagens

In konventionellen Fahrzeugkarosserien wird ein großer Teil der Crashenergie von den Längsträgern in die Schweller und in den Fahrzeugtunnel eingeleitet. Aufgrund des Purpose Design Ansatzes, der im Projekt Light-eBody verfolgt wird, besitzt die Karosserie keinen Fahrzeugtunnel. Die Crashenergie muss deshalb von den Längsträgern in die Schweller des Fahrzeuges eingeleitet werden.

Die Längsträger sind in zwei funktionelle Abschnitte unterteilt. Der vordere Abschnitt des Längsträgers soll bei einem Crash kontrolliert deformieren und dadurch Crashenergie abbauen, der hintere Abschnitt leitet die Crashenergie über Lastpfade in die Fahrzeugstruktur. Zur Weiterleitung der Crashenergie benötigt der hintere Abschnitt eine höhere Festigkeit als der vordere Abschnitt. Um diese Eigenschaften in einem einteiligen Bauteil darzustellen, wird das Profil aus einer Tailored Blank-Platine hergestellt. Tailored Blank-Platinen bestehen aus mindestens zwei Stahlblechen unterschiedlicher Festigkeit und Materialstärke, die Bleche werden durch Laserschweißen gefügt. Tailored Blank-Platinen können für Kalt- und Warmumformprozesse genutzt werden, um Bauteile mit maßgeschneiderten Eigenschaften herzustellen.

Die Tailored Blank-Platinen der Längsträger bestehen aus den Mangan-Bor-Stählen MBW[®] 500 und MBW[®] 1500.

Werkstoffergüte	Stahlsorte	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	
		$R_{p,0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%] min	A_{80} [%] min
<ul style="list-style-type: none"> ■ MBW-W® 1500 ■ MBW-K® 1500 ■ MBW® 1500 ■ MBW® 500 		1000	1500	6	5
		400	550		17

Abbildung 2.2-2: Mechanische Eigenschaften der warmumgeformten Mangan-Bor-Stähle [THY14a]

Durch die hohe Bruchdehnung des MBW® 500 können die Längsträger im vorderen Abschnitt deformieren und Crashenergie abbauen. Für den hinteren Abschnitt wird der Werkstoff MBW® 1500 verwendet.

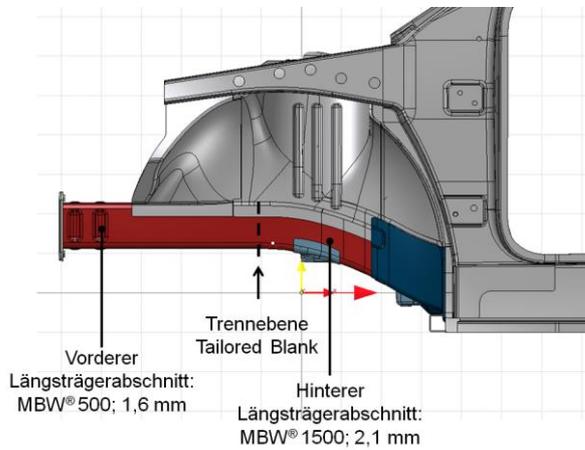


Abbildung 2.2-3: Materialstärkenverteilung des Tailored Blank-Längsträgers

Der Querträger besteht aus dem Dualphasenstahl DP-K® 45/78. Aufgrund der guten umformtechnischen Eigenschaften des Werkstoffes kann die komplexe Geometrie des Querträgers prozesssicher hergestellt werden, die hohen Festigkeitswerte sichern das strukturelle Verhalten des Querträgers.

DIN EN	Stahlsorte	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung		Verfestigungs-exponent		Bake-Hardening
		$R_{p,0.2}$ [MPa]	R_m [MPa] min	A [%] min	A_{80} [%] min	n_{4-6} min	n_{10-UE} min	BH ₂ [MPa] min
	■ DP-W® 550 ²⁾	310–430	530	24	21	–	0,13	30
	■ DP-W® 600	330–460	580	23	19	–		
	■ DP-W® 700 ²⁾	450–580	680	19	16	–	0,11	
	■ DP-K® 30/50	300–370	500	–	23	–	0,15	
	■ DP-K® 34/60	340–420	600 ¹⁾	–	20	0,18	0,14	
	■ DP-K® 34/60 HF ²⁾	340–420	600 ¹⁾	–	23	0,20	0,16	
	■ DP-K® 45/78	450–560	780	–	14	–	–	
■ DP-K® 60/98	600–750	980	–	10	–	–		

Abbildung 2.2-4: Mechanische Eigenschaften der Dualphasenstähle [THY14b]

Die Montage des Batteriemodulträgers und des Hilfsrahmens erfolgt mittels Schraubverbindungen, die Aufnahmepunkte sind durch Schottbleche und Stahlhülsen verstärkt, um die geforderten Festigkeiten und Steifigkeiten zu erfüllen.

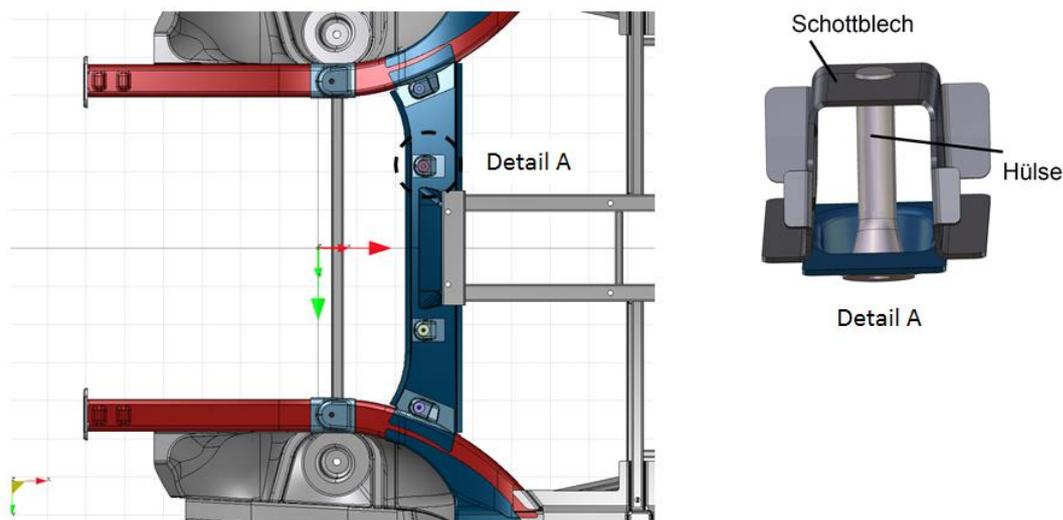


Abbildung 2.2-5: Ansicht von unten, Querträger und Längsträger mit Aufnahmepunkten für den Hilfsrahmen und die Tragstruktur der Batterie

Die Crashberechnungen wurden von dem Projektpartner ika durchgeführt und zeigen das gewünschte Verhalten der Vorderwagenstruktur. Neben dem Schutz der Fahrzeuginsassen muss die Karosseriestruktur eines Elektrofahrzeuges auch die Batterien des Fahrzeuges schützen. Eine Beschädigung der Batteriezellen kann durch Leckagen und Kurzschlüsse zu einem Brand oder einer Explosion der Batteriezellen führen.

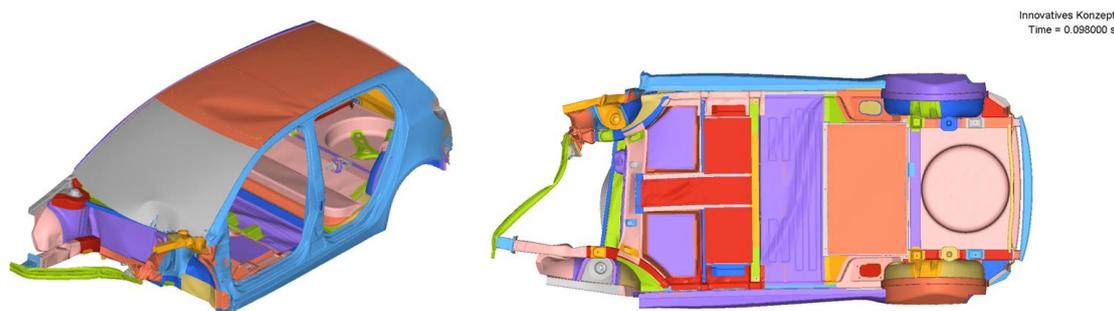


Abbildung 2.2-6: Euro NCAP-Frontcrash, isometrische Ansicht und Ansicht von unten

Abbildung 2.2-7 zeigt das Deformationsverhalten im Euro NCAP-Frontcrash. Die Deformationen der Fahrgastzelle sind gering und erfüllen die Anforderungen zum Schutz der Fahrzeuginsassen. Auch die Batteriezellen des Fahrzeuges werden durch die Karosserie geschützt und sind nicht beschädigt

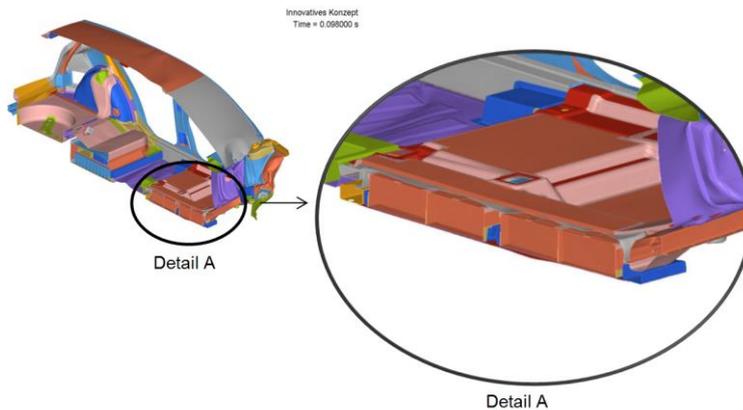


Abbildung 2.2-7: Unbeschädigte Batterie nach dem Euro NCAP-Frontcrash

2.3 Entwicklung der T³ B-Säule

Die B-Säule eines Fahrzeuges muss bei einer Vielzahl von Crashlastfällen den Schutz der Fahrzeuginsassen gewährleisten. Insbesondere bei den Seitencrashlastfällen wird die B-Säule in einem hohen Maße belastet. Zusätzlich zu den strukturellen Anforderungen muss die B-Säule Aufnahmen und Montagepunkte für angrenzende Systeme, wie Gurthöhenversteller, Gurtaufnahme, Schloss, Scharniere und Dichtungen, bereitstellen.

Im Rahmen des Projektes entwickelte das Konsortium die profilintensive Karosseriestruktur des Light-eBody. Parallel zur vorhandenen B-Säule entwickelte ThyssenKrupp Steel Europe eine Profil-B-Säule, die als zusätzliche Variante in die Karosseriestruktur integriert wird. Die B-Säule besteht aus einem einteiligen geschlossenen Profil und wird mit der ThyssenKrupp T³-Technologie hergestellt. Der obere Abschnitt der B-Säule wird als Demonstrationsbauteil gefertigt.

2.3.1 Crashberechnung der T³-B-Säule

Die B-Säule der Light-eBody Karosseriestruktur dient als Referenz zur Auslegung der T³ B-Säule. Um die Vergleichbarkeit der B-Säulen zu gewährleisten, sind die Anbindungen, Funktionsflächen und Montagepunkte beider B-Säulen identisch gestaltet.

Durch die Verwendung des ultrahochfesten Werkstoffs MBW[®]1500 [THY14A] können die hohen Anforderungen an die Festigkeit einer B-Säule erfüllt werden. Die T³-B-Säule besteht aus einer Tailored Blank-Platine mit drei verschiedenen Materialstärken. Die Materialstärke ist im Kopfbereich der B-Säule mit 1,3 mm am geringsten, um während eines Crashes ein geringfügiges Einschwenken der B-Säule um den Dachrahmen zu ermöglichen. Im mittleren Bereich beträgt die Materialstärke 1,7 mm: Hier werden höhere Materialstärken benötigt, um hohe Intrusionen der B-Säule während eines Seitencrashes zu vermeiden. Im unteren Bereich beträgt die Materialstärke 1,5. Hier ist die Materialstärke wieder geringer, um eine gezielte Deformation und Energieaufnahme, ohne Versagen des Werkstoffs, zu erreichen.

Die Crashberechnungen der T³-B-Säule erfolgte in dem bestehenden FE-Fahrzeugmodell des Light-eBody, unter der Berücksichtigung folgender Lastfälle:

- Euro NCAP-Pfahlaufprall
- Euro NCAP-Seitencrash
- IIHS-Seitencrash
- IIHS-Dacheindrückttest

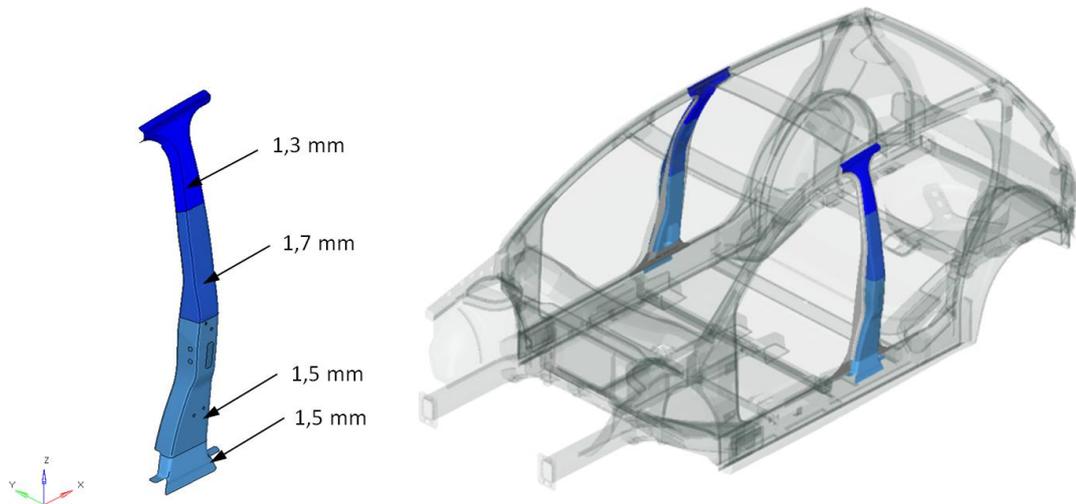


Abbildung 2.3-1: Wandstärken und Einbaulage der T³-B-Säule

Die T³-B-Säule erfüllt die Anforderungen der relevanten Lastfälle, die Tailored Blank-Lösung mit variablen Materialstärken führt zu einem geringen Gewicht der B-Säule und unterstützt somit das Projektziel einer leichten und ressourcensparenden Elektrofahrzeugkarosserie. Das Gewicht der T³-B-Säule beträgt 4,9 kg und ist somit ca. 25 % leichter als vergleichbare B-Säulen in Großserienfahrzeugen.

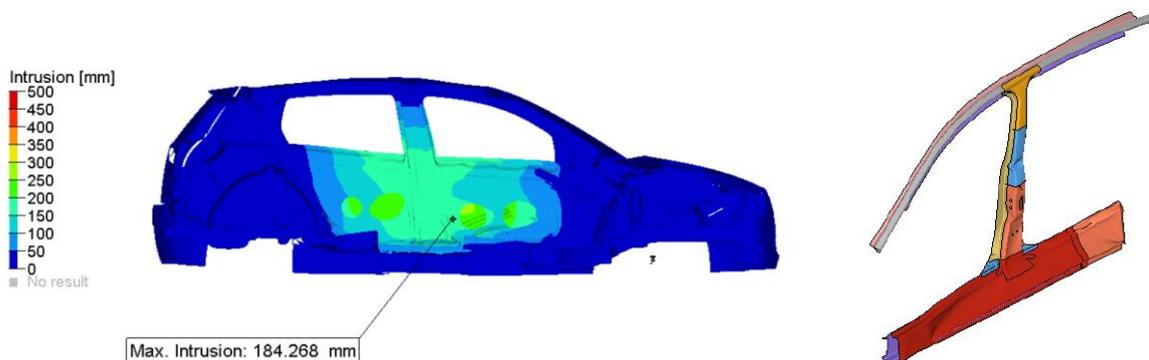


Abbildung 2.3-2: Simulationsergebnis der T³-B-Säule, Euro NCAP-Seitencrash

2.3.2 Fertigungstechnische Absicherung der T³-B-Säule

Die B-Säule wird mit der T³-Technologie von ThyssenKrupp Steel Europe gefertigt. Diese Technologie ermöglicht die Fertigung gekrümmter Profile mit variablen Querschnitten und Nebenformelementen. Die Fertigung erfolgt durch folgende Prozessschritte:

- Erstellung eines endkonturnahen Platinezuschnittes
- Umformschritt 1: Erstellen eines U-Profils
- Umformschritt 2: Schließen des U-Profils, gestützt durch einen innenliegenden Werkzeugkern
- Fügen: Das Profil wird in einer Fügevorrichtung mittels Laser zum geschlossenen Profil verschweißt.
- Härten (optional): indirekter Härteprozess

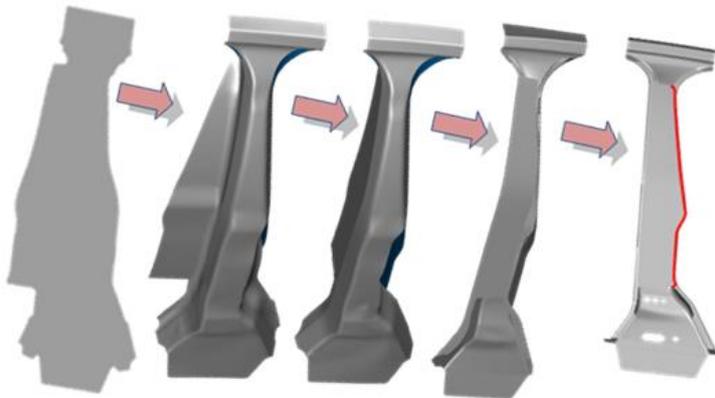


Abbildung 2.3-3: Prozessschritte zur Erstellung einer T³-B-Säule

Eine Absicherung der technischen Machbarkeit der T³-B-Säule erfolgt durch Umformsimulationen. Die Anbindung an den Dachrahmen stellt aufgrund der Querschnittsänderung eine große Herausforderung dar. Durch Optimierungen der Ausgangsplatine und einer konstruktiven Anpassung ist die Herstellbarkeit sichergestellt. Im Besonderen die in Abbildung 2.3-4 dargestellten roten Bereiche weisen eine starke Ausdünnung des Materials und eine damit zusammenhängende große Rissneigung auf. Die dunkelblauen Bereiche beschreiben eine Materialaufdickung, welche auf starke Neigung zur Faltenbildung hinweist. Die Machbarkeit dieser Säule muss umformtechnisch als kritisch bewertet werden. Die geometrischen Änderungen im Kopf- und Fußbereich wurden durchgeführt. Auch die Abflachung des taillierten Mittenbereichs – welcher zur Fixierung des Türschlosses dient – wurde mit weicheren Übergängen sowie hinterschnittsfrei gestaltet. Der entstandene Entwurf der T³-B-Säule kann somit aus Sicht der Fertigungstechnik als machbar angesehen werden.

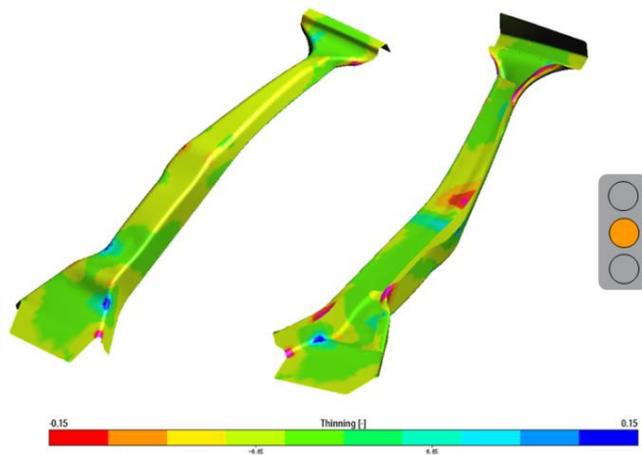


Abbildung 2.3-4: Umformsimulation der T³-B-Säule

2.4 Aufbau eines CAE-Felgenmodells zur Simulation des Small Overlap Crash

Der Small Overlap Crash ist ein Frontcrash mit einer Überdeckung der Fahrzeuge von 25 %. Die Überdeckung im standardisierten Euro NCAP Crashtest beträgt hingegen 40 %. Obwohl der Small Overlap Crash noch nicht zu den Standardcrashes gehört, wird er bereits von einem Großteil der Fahrzeughersteller während der Entwicklung eines Fahrzeuges berücksichtigt.

Durch die geringe Überdeckung der Fahrzeuge treffen strukturelle Bauteile wie Stoßfänger und Längsträger nicht aufeinander und können keine Crashenergie aufnehmen. Der Small Overlap Crash wirkt direkt auf die Fahrgastzelle und führt potentiell zu hohen Intrusionen.

Für die Simulation des Small Overlap Crashes ist die Felge eine wichtige Komponente, ohne die keine aussagekräftige Simulation durchgeführt werden kann. Um das Verhalten der Felge virtuell abbilden zu können, wurde basierend auf der Geometrie einer Golf V-Felge ein CAE-Modell aufgebaut und mittels Fallturmversuchen validiert.

Das Berechnungsmodell beinhaltet die Bauteile Schwenklager, Bremsscheibe, Felgenscheibe, Felgenkranz, Schweißnähte und Reifen. Die Vernetzung besteht aus Elementen mit 3mm und 5mm Kantenlänge. Beide Netzgrößen führen zu übereinstimmenden Ergebnissen. Die Netzgröße von 5 mm wird für die Berechnung des SORB innerhalb des Light-eBody Gesamtmodells benötigt.

Der SORB- Test ist kein Auslegungslastfall des Light-eBody, es wurden aber vom ika Maßnahmen untersucht um die Sicherheit des Fahrzeuges in diesem Lastfall zu verbessern.

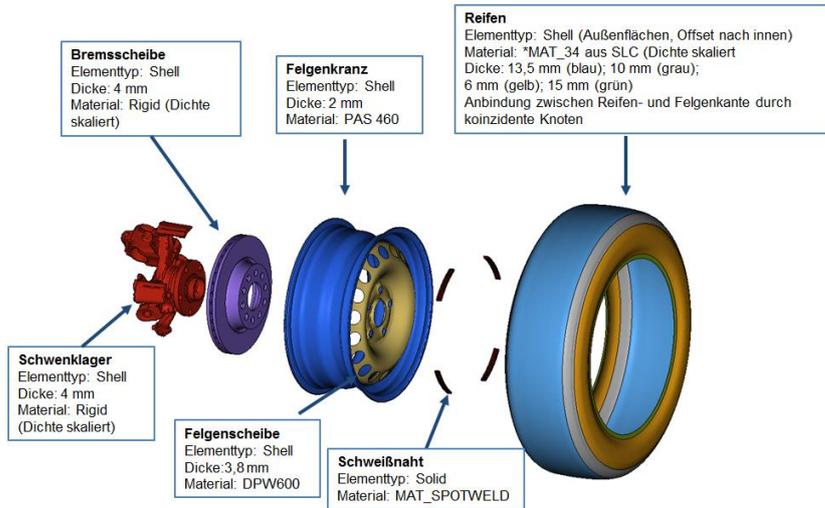


Abbildung 2.4-1: Modellkomponenten des Basismodells

Zur Durchführung der Fallturmversuche wurde die Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen beauftragt, der Versuch ist in Abbildung 2.4-2 dargestellt.

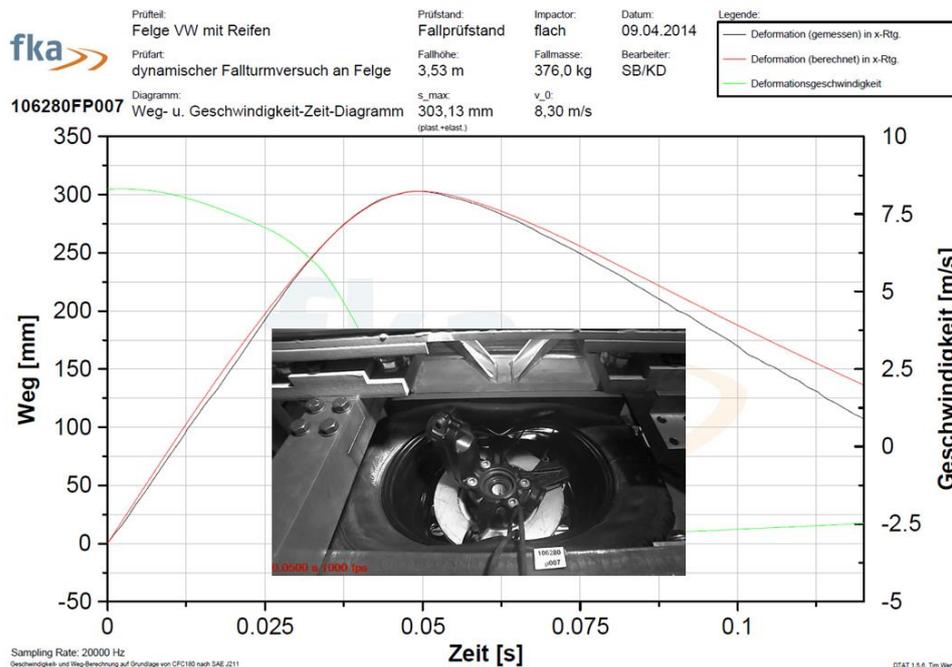


Abbildung 2.4-2: Fallturmversuch, max. Deformation nach 0,05 Sekunden

Die Ergebnisse der Simulation und der Fallturmversuche sind in Abbildung 2.4-3 dargestellt. Der Deformationsbereich wird bis ca. 230 mm mit guter Genauigkeit abgebildet. Bei höheren Deformationen zeigt sich in den einzelnen Versuchen eine hohe Streuung und eine vergleichsweise geringe Steifigkeit des Modells, die Energie wird jedoch vollständig abgebaut. Eine Überprüfung des Verhaltens des Reifens erfolgt innerhalb des Gesamtfahrzeugmodells, bei Bedarf werden Optimierungen vorgenommen.

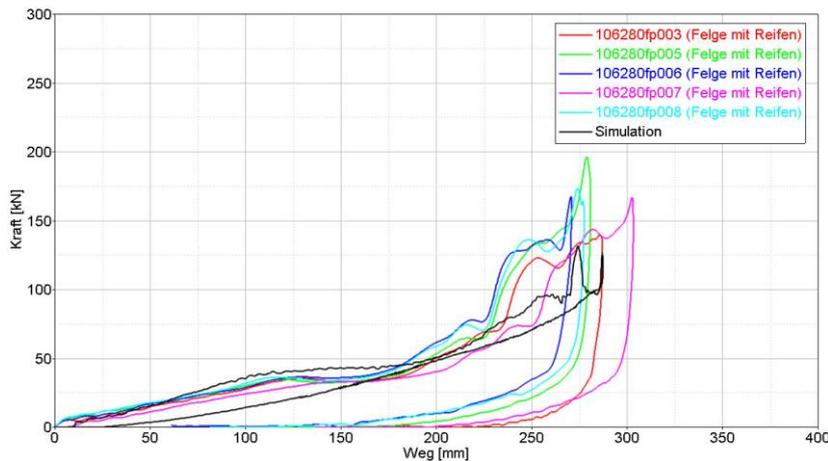


Abbildung 2.4-3: Ergebnisse der Simulation und der Fallturmversuche

2.5 Probenerstellung

ThyssenKrupp Steel Europe lieferte Probematerial und warmumgeformte Probekörper zur Durchführung fügetechnischer Untersuchungen und Materialcharakterisierungen an die Projektpartner.

Bei der Herstellung warmumgeformter Bauteile mit geringen Blechstärken besteht die Herausforderung darin, den temperierten Umformprozess vor einer Gefügeumwandlung durchzuführen. Erst nach der Umformung sollte der Werkstoff abkühlen und vom Austenit in den Martensit umwandeln. Im Rahmen des Projektes wurden für ein bestehendes Umformwerkzeug neue Werkzeugeinsätze konstruiert, um ein zu schnelles Abkühlen vor der Umformung zu vermeiden. Die auf 925°C erwärmten Platinen werden in den Werkzeugeinsätzen auf Stiften positioniert, der Kontakt zu den Werkzeugflächen und die dadurch hervorgerufene Abkühlung der Platine entsteht somit erst während der Umformung.

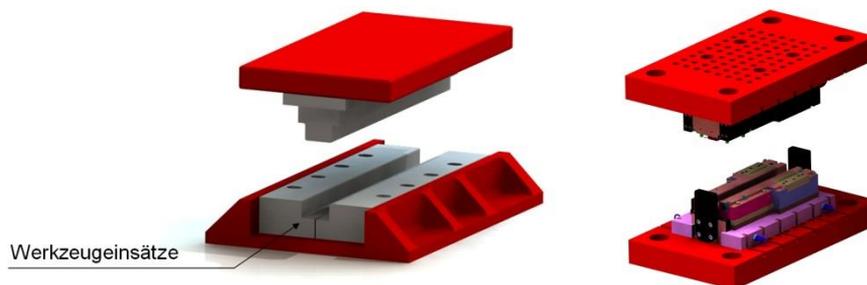


Abbildung 2.5-1: Werkzeuge zur Untersuchung von warmumgeformten Stählen

Die mit den Werkzeugeinsätzen erstellten Proben besitzen die geforderten Eigenschaften und wurden den Projektpartnern für Materialprüfungen und fügetechnische Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Weitere warmumgeformte Proben wurden mit dem Tailored Tempering-Verfahren hergestellt. Durch den Einsatz eines temperierten Werkzeugs wird bei diesem Verfahren die Abkühlrate der Proben gesteuert. Dadurch können die Ausbildung des Materialgefüges und die Werkstoffeigenschaften gezielt eingestellt werden. Auch hier wird die zuvor vollständige austenitisierte Platine nach der Erwärmung im Ofen in das Umformwerkzeug eingelegt. Im Anschluss daran wird der Umformprozess durchgeführt. Bedingt durch die beheizten Werkzeugsegmente wird die Martensitumwandlung in Teilbereichen unterdrückt und somit ein Bauteil mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften hergestellt.

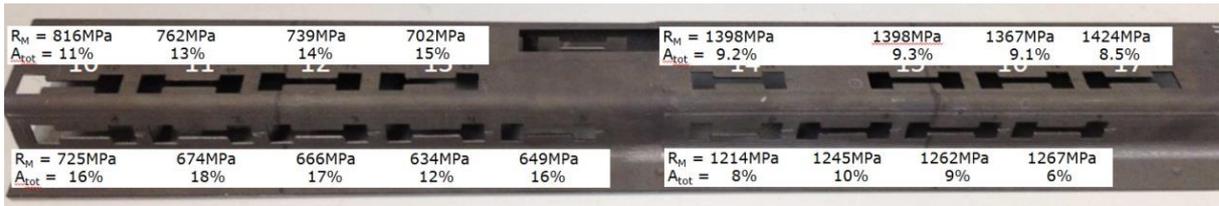


Abbildung 2.5-2: Tailored Tempering-Probe mit unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften

Für die fügetechnischen Untersuchungen der Projektpartner wurden des Weiteren warmgeformte Flachproben aus MBW[®]1500+AS zur Verfügung gestellt. Es wurden Flachproben mit 1,0 und 2,0 mm Materialstärke gefertigt. Die Erstellung der Proben erfolgte durch direktes Warmumformen in einem zweistufigen Prozess:

1. Wärmebehandlung der Platinen im Ofen, ca. 920 °C, 6-7 Minuten
2. Warmumformen und Abkühlen im Werkzeug



Abbildung 2.5-3: Erstellung von warmumgeformten Flachproben

2.6 Hoch-Mn-haltige Stähle

Hoch-Mn-haltige (FeMn-) Stähle weisen aufgrund ihrer Kombination von hoher statischer und dynamischer Festigkeit mit hohem Umformvermögen Attraktivität für Automobilanwendungen auf. Das ältere X-IP-Stahlkonzept (Extremstahl mit induzierter Plastizität) [HOF05],[HOF06],[HOF08] konnte aufgrund verschiedener Einschränkungen bzgl. Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften bisher keine Kundenfreigabe erlangen. Das weiterentwickelte FeMn-Stahlkonzept von ThyssenKrupp Steel Europe mit verbessertem Widerstand gegen H-induzierte Rissbildung (zeitverzögerte Rissbildung nach der Bauteilformgebung) sowie erhöhter Kerbunempfindlichkeit sollte gemäß Detailplan (siehe

Berichterstattung Ford) hergestellt und untersucht werden. Kaltbandversuchsmaterial der Blechdicke 1,35 mm und 1,5 mm wurde halbindustriell hergestellt und das Untersuchungsprogramm durchgeführt. Für Untersuchungsaktivitäten von Ford wurde weiteres Versuchsmaterial in 1,5 mm Dicke zur Verfügung gestellt.

Das Kaltband der Dicke 1,35 mm weist eine gezielt eingestellte extrem feine Mikrostruktur mit einer mittleren Korngröße von 1,3 μm auf. Notwendige Voraussetzungen für die feine Mikrostruktur sind eine geeignete Mikrolegierung und ausgewählte Herstellparameter. Diese führen zu einer feinen Partikeldispersion von Karbiden, Nitriden und Karbonitriden, die wiederum eine Gefügevergröberung im Herstellprozess inhibiert.

Die Zieleigenschaften (Prüfrichtung in Querrichtung) des FeMn-Stahls mit Mindeststreckgrenzen von 500 MPa, Mindestzugfestigkeiten von 900 MPa und Mindestbruchdehnungen von 40 % werden erreicht (Tabelle 2.6-1).

Probenlage	Mechanische Eigenschaften (Mittelwert aus 3 Proben)									
	$R_{p0,2}$	R_m	A_g	A_{80}	E-Modul	n	r	n_m	r_m	Δr
	MPa	MPa	%	%	GPa					
L	498	933	39,1	42,3	191	0,370	0,79	0,360	1,04	-0,06
D	518	928	41,5	45,0	196	0,359	1,07			
Q	542	941	43,3	46,0	205	0,351	1,23			

Tabelle 2.6-1: Prüfrichtungsabhängige mechanische Eigenschaften des FeMn-Stahls

Der n-Wert liegt auf einem für Hoch-Mn-Stähle typischen extrem hohen Niveau von ca. 0,36, bei einem mittleren r-Wert von ca. 1. Die leichte mechanische Anisotropie äußert sich nicht in unterschiedlichen Fließverhalten in variierenden Zugrichtungen (Abbildung 2.6-1). Die wahren Spannungs-Dehnungskurven geben das enorme Verfestigungsvermögen des Stahls sowie die hohe maximale Spannung (ca. 1400 MPa in Querrichtung) wieder.

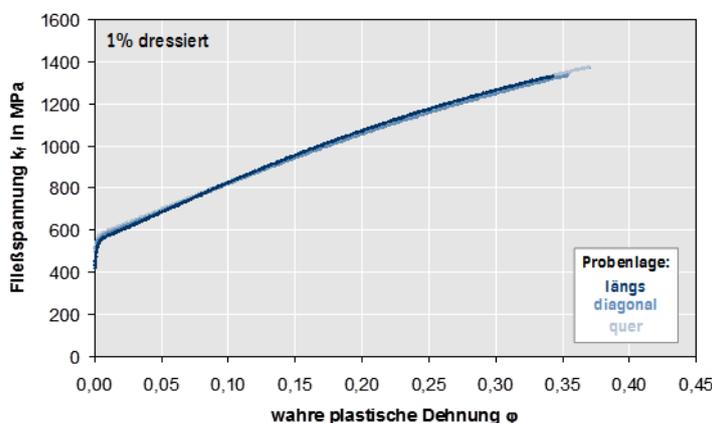


Abbildung 2.6-1: Wahre Spannungs-Dehnungskurven des FeMn-Stahls für drei Prüfrichtungen

Der E-Modul des FeMn-Stahls wurde im Zugversuch in Abhängigkeit von Vorverformung und BH-Behandlung ermittelt. Es zeigte sich, dass das Konzept von ThyssenKrupp Steel Europe – unabhängig vom Behandlungszustand - E-Moduli von ca. 200 GPa (Querproben, Vorverformung durch Recken) aufweist. Gegenüber hoch Al- und Si-legierten Konzepten werden signifikant höhere E-Moduli eingestellt [HOF04].

Entsprechend der Vorgaben des VDA/VDEH-Freigabeprozesses wurden Fließkurven in Abhängigkeit von Verformungsgeschwindigkeit und Versuchstemperatur aufgenommen und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Sowohl im Lieferzustand als auch nach Vorverformung und BH-Behandlung liegt nur eine vergleichsweise schwache „strain rate-sensitivity“ vor. Auch die Temperaturabhängigkeit der Spannungsniveaus und der Verfestigungscharakteristik ist gering. Das enorme Umformvermögen des Stahls äußert sich neben einem hohen n-Wert von ca. 0,36 (Tabelle 2.6-1), in einer attraktiven FLC (Abbildung 2.6-2) und der Darstellbarkeit von Näpfchen bis zu einem maximalen Ziehverhältnis bis 2,2.

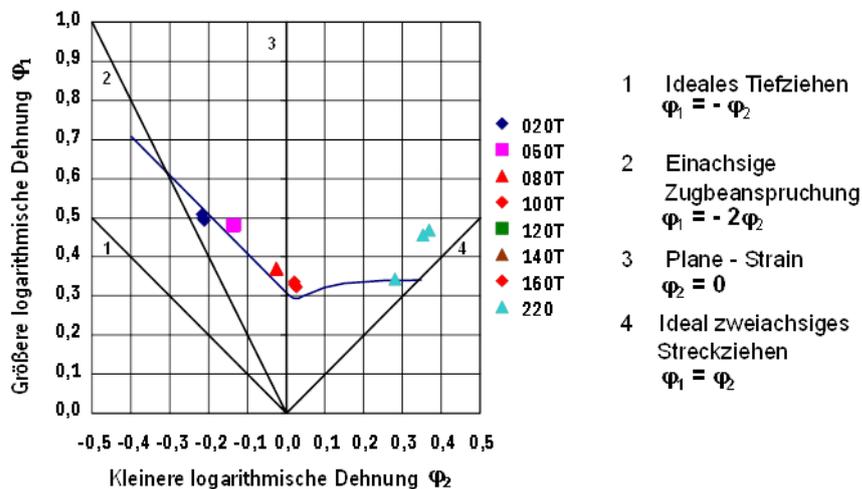


Abbildung 2.6-2: FLC für eine Blechdicke von 1,5 m

Entsprechend eines OEM-Diskussionspapiers zur Bewertung des Eigenschaftsprofils von Hoch-Mn-Stählen wurden Näpfe mit einem Ziehverhältnis von 2,0 sowie dem maximalen Ziehverhältnis von 2,2 für 4 Wochen in 5% NaCl-Lösung ausgelagert und keine visuell erkennbaren Risse festgestellt. Somit konnte mit dem FeMn-Neukonzept der Widerstand gegen H-induzierte Rissbildung durch Spannungs-Riss-Korrosion gegenüber X-IP-Stahl signifikant verbessert werden. Eine Übersicht über Ergebnisse wesentlicher weiterer Untersuchungen zum Umformverhalten von FeMn-Stahl im Vergleich zu Stählen der 1000 MPa-Festigkeitsklasse ist in Abbildung 2.6-3 dargestellt.

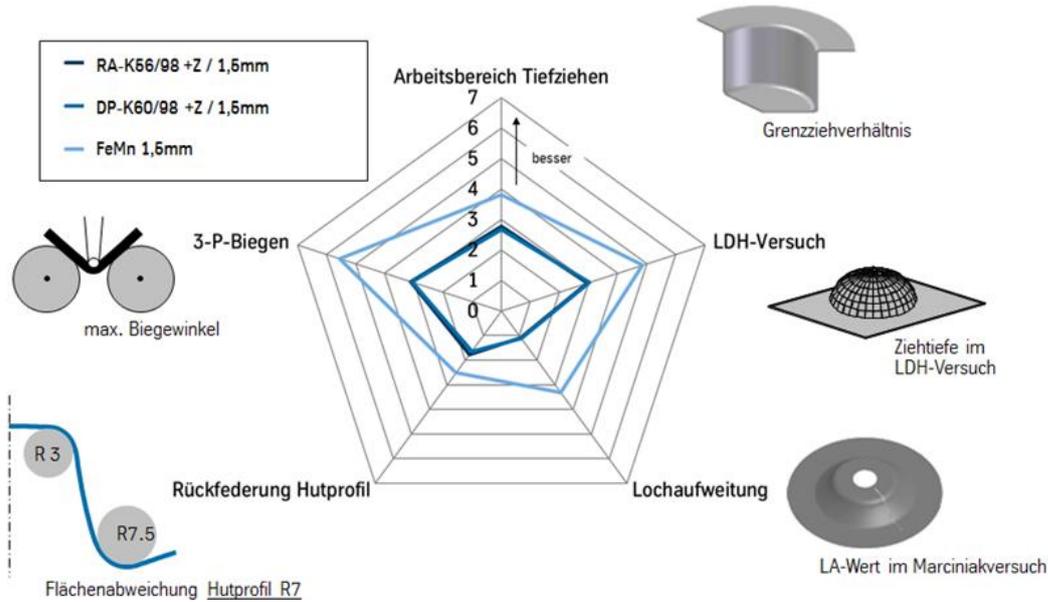


Abbildung 2.6-3: Übersicht über das Umformverhalten von FeMn-Stahl (1,5 mm)

2.7 Montage von Verbindungselementen an warmumgeformten MBW®1500

Die Karosseriestruktur des Light-eBody besteht zu einem großen Teil aus warmumgeformten, geschlossenen Profilen mit hoher Festigkeit und geringerer Duktilität. Zur Montage von Verbindungselementen wie Schweißmuttern und Schweißbolzen ist eine beidseitige Zugänglichkeit notwendig, geschlossene Profile weisen jedoch nur eine einseitige Zugänglichkeit auf. Für eine einseitige Zugänglichkeit können Verbindungselemente wie Blindnietmuttern- und Schrauben eingesetzt werden, sie benötigen nur eine einseitige Zugänglichkeit und können in geschlossenen Profilen angewendet werden.

Um Anwendungen dieser Verbindungselemente an warmumgeformten Werkstoffen zu bewerten, wurden die Verdrehfestigkeit und die Auszugskräfte von Blindnietmuttern, Schrauben und Bolzen an warmumgeformten MBW® 1500 untersucht und mit dem Stahl HX340LAD verglichen.

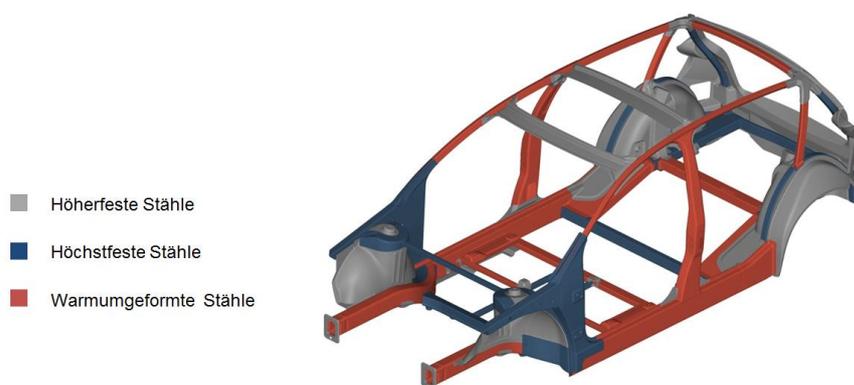


Abbildung 2.7-1: Gütenverteilung der Light-eBody Karosseriestruktur

Die Versuche zeigen eine gute Verbindung von Werkstoff und Verbindungselement, dies bestätigt sich auch in den Ergebnissen der Verdrehfestigkeitsprüfung und der Auszugswiderstände. Die Schliffbilder der montierten Verbindungselemente sind im Anhang 6.1 dargestellt.

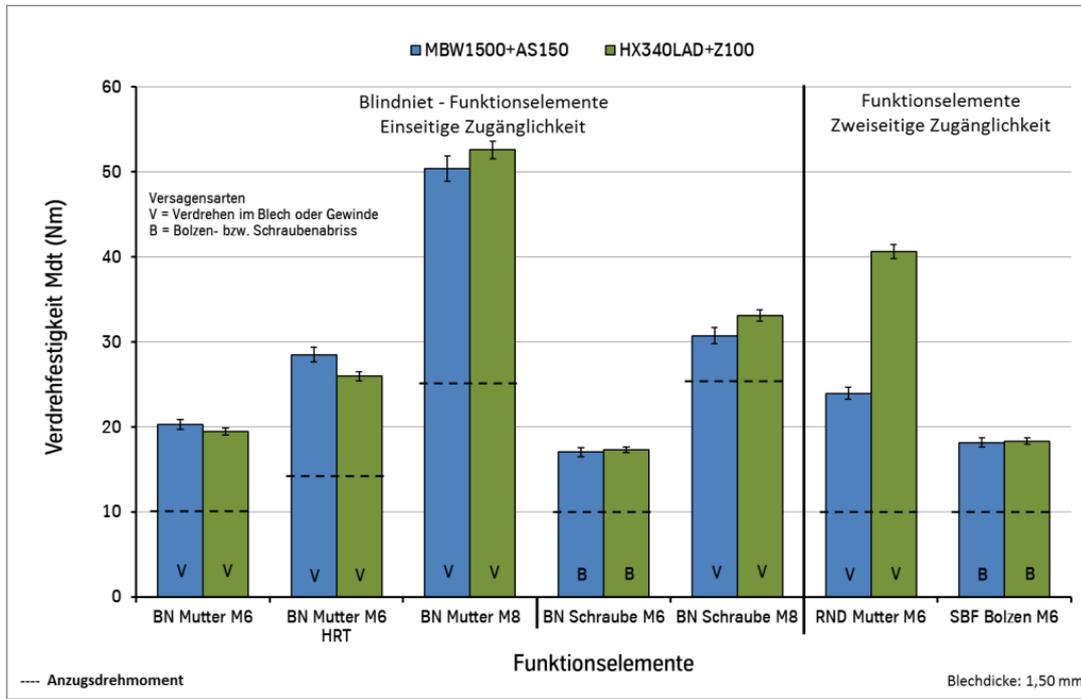


Abbildung 2.7-2: Ergebnisse der Verdrehfestigkeitsprüfung nach DVS-EFB 3480-1

In allen untersuchten Verbindungen ist die Verdrehfestigkeit höher als das Anzugsdrehmoment der Verbindungen. Bei den Blindnietmuttern und -schrauben kam ein Sechskantvorloch zum Einsatz, da diese Blindnietelemente als Sechskantvariante eine höhere Drehmomentbelastung ermöglichen als Blindnietelemente mit Rundbolzen und Verzahnung. Das Versagen der Blindnietmuttern ist als Verdrehen im Blech aufgetreten. Bei der Blindnietmutter M6 ist die Mutter abgedreht. Die Blindnietmutter M8 versagte durch Verdrehen im Blech. Die Versagensarten sind bei beiden geprüften Werkstoffen gleich.

Die Einpresselemente RND-Mutter und SBF-Bolzen müssen ebenfalls bei MBW[®]1500 vorgelocht und vorgesickt eingepresst werden. Nur der SBF-Bolzen konnte ohne Vorlochen, selbststanzend in den HX340LAD eingepresst werden. Das Versagen der RND-Mutter ist als Verdrehen im Blech aufgetreten. Bei dem SBF-Bolzen ist der Gewindebolzen abgedreht.

Die Auszugswiderstände sind in Abbildung 2.7-3 dargestellt.

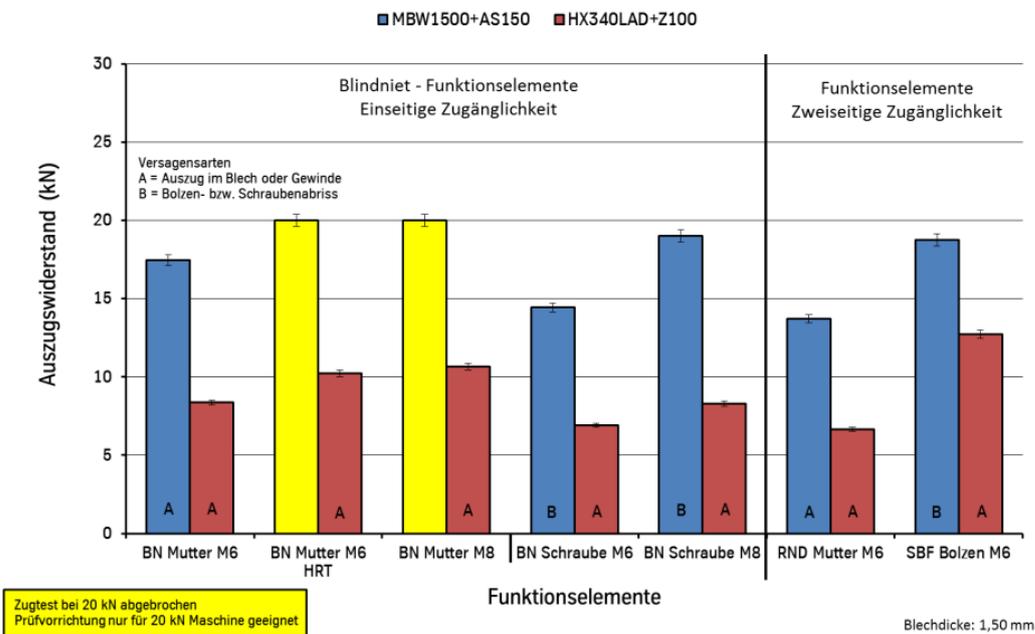


Abbildung 2.7-3: Ergebnisse der Auszugswiderstandskraftprüfung nach DVS-EFB 3480-1

Die Prüfung der Auszugswiderstände konnte bis auf zwei Fälle (gelb markiert) durchgeführt werden. Die Blindnietsschrauben und der Einpressbolzen (SBF) versagten als Abriss des Gewindebolzens, die Blindnietmutter sowie die Einpressmutter versagten durch Ausreißen im Blech.

Die Verdrehfestigkeit der untersuchten Fügeelemente ist in allen Fällen höher als das zu empfehlende Anzugsdrehmoment der Verbindung. Somit können diese Verbindungselemente in warmumgeformten Profilen aus MBW[®]1500 eingesetzt werden.

2.8 Erstellung des Demonstrationsbauteils

Der T³-B-Säulen-Demonstrator bildet ca. 500 mm des oberen Bereichs der virtuell entwickelten T³-B-Säule ab und dient dem Nachweis der Herstellbarkeit. Der obere Abschnitt der B-Säule stellt die wesentlichen Designfreiheiten der T³-Profiliertechnik dar:

- Geschlossenes Profil aus höchstfestem Werkstoff für die Warmumformung
- Profil mit veränderlichen Querschnitten über der Profillänge
- Entlang der Profalachse gekrümmtes Profil

Auf Basis der bestehenden Umformsimulation wurde die Methode und das Werkzeug für die Fertigung des B-Säulendemonstrators entwickelt. Aufgrund der allgemeinen Anforderungen an Strukturbauteile sowie im Besonderen an B-Säulen, auch hinterschnittige Konturen und Sicken darstellen zu können, wurde das Design des Demonstrators entsprechend

angepasst. Die Formgebungsmethode wurde aufgrund dessen um eine Zwischenformstufe erweitert.

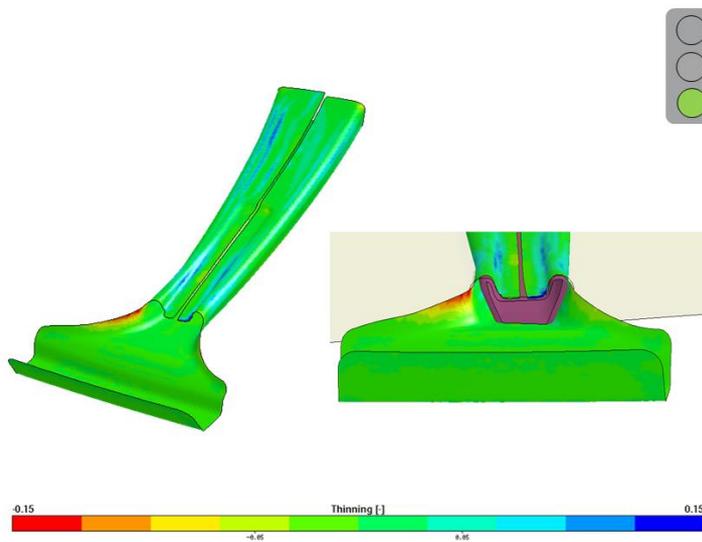


Abbildung 2.8-1: Umformsimulation des B-Säulendemonstrators

Die Umformsimulation zeigt Zugspannungen im Übergang zur Dachanbindung, die direkt abhängig vom Platinenzuschnitt bzw. von der Kragenhöhe des Bauteils sind. Ziel des Prototypings war es, diese umformtechnische Voraussage der Kragenslänge zu verifizieren. Im Besonderen der Übergang vom geschlossenem Spaltprofil zur offenen Flanschgeometrie weist kritische Bereiche auf. Diese wurden auch im Prototyping detektiert.

Das leichte Aufgehen des Kantenstoßes am unteren Bauteilende wurde auch im Prototyping beobachtet, konnte aber durch Optimierung der Zuschnittsgeometrie beseitigt werden. Der obere Bereich der Säule beinhaltet im Sickenbereich eine verlängerte Auflagefläche. Das Umfangskalibrieren dieses verlängerten Bereichs ist aufgrund des fehlenden seitlichen Materials nicht möglich. Das Verprägen auf dem Kern wird somit notwendig, um die Ebenheit dieses Bereichs zu gewährleisten.

Die erste Operationsstufe zur Fertigung des Demonstrators ist die U-Formung, welche die Platinenkontur unter Zuhilfenahme eines Niederhalters durch den Stempel in die Gesenkgravur einzieht und im unteren Totpunkt verprägt. Das hieraus geformte dreidimensionale U-Profil dient als Halbzeug für die zweite Formgebungsstufe, bei welcher das Bauteil um einen Kern geschlossen wird. Dieser Arbeitsschritt wurde aufgrund der Profilhinterschnittigkeit durch die eingebrachte Sicke notwendig und dient der Vorformung des Bauteils. Herausfordernd bei der zweiten Stufe ist die dreidimensionale Rückfederung des U-Profils, wodurch dieses nicht passgenau im Untergesenk der O-Formstufe platziert werden kann. Das U-Profil wird auf das Untergesenk aufgelegt und der federnd angehobene einteilige Kern wird über eine Kreisbahn in die Schale eingebracht. Beim Schließen des Obergesenks der O-Stufe wird nun zunächst der Kern in die U-Schale, dann die Schale mit dem Kern in das Untergesenk gedrückt. Hierbei wird die Rückfederung des Profils kompensiert und die Passgenauigkeit sichergestellt. Die Obergesenkgravur wurde mit Fasen

versehen, sodass die Bandkanten der U-Schale sicher eingefangen und entlang der Gravur bis zum Stoß beider Kanten geführt werden.

Die dritte Operationsstufe beinhaltet die finale Formgebung des Bauteils. Aufgrund der prototypischen Herstellung ist diese durch das manuelle Wechseln eines Einsatzes im Obergesenk, der O-Formstufe, möglich. Die Endkontur wird in diesem Arbeitsschritt in das zwischengeformte Profil eingepresst. Der Kantenstoß, welcher eine Materialzugabe beinhaltet, gewährleistet hierbei eine Druckspannungsüberlagerung im Profilumfang. Hierdurch wird die Rückfederung kompensiert und die notwendige Formtreue gehalten. Des Weiteren werden die Bandkanten zueinander verprägt, wodurch ein laserefähiger, technischer Nullspalt erzeugt wird.

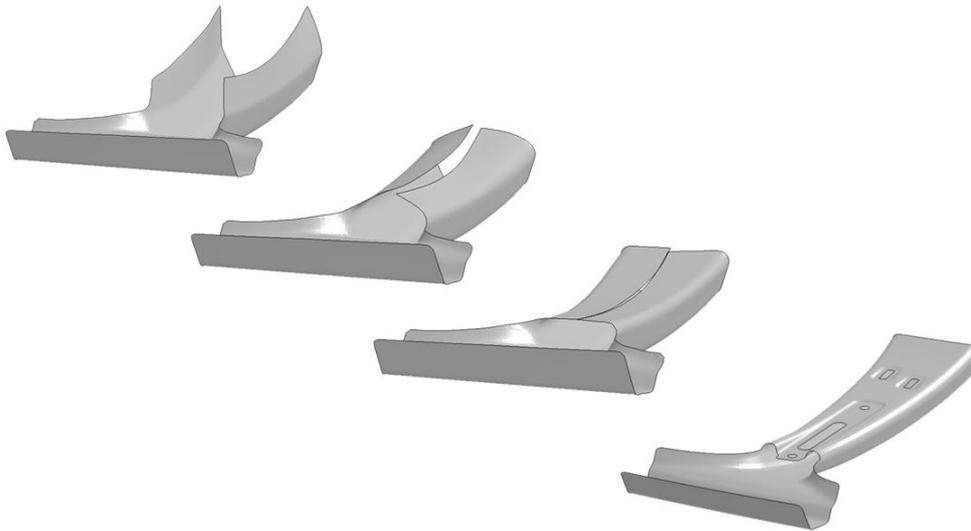


Abbildung 2.8-2: Fertigungsschritte der Demonstrator-Herstellung

Das Fügen erfolgt auf einer separaten Fügevorrichtung, welche den Kantenstoß positioniert und fixiert sowie während des Fügens die thermischen Effekte auffängt. Das Fügen erfolgt im Serienprozess in einer Roboterlaserzelle mit einer automatisierten Spannvorrichtung.

Zur Fertigung des Demonstrators wurde im Rahmen des Projektes ein Werkzeug konstruiert und gefertigt. Das Werkzeug besteht aus den Werkzeugsegmenten U-Form, O-Form, der Kreisbahn zur Kernführung und der Fügevorrichtung.

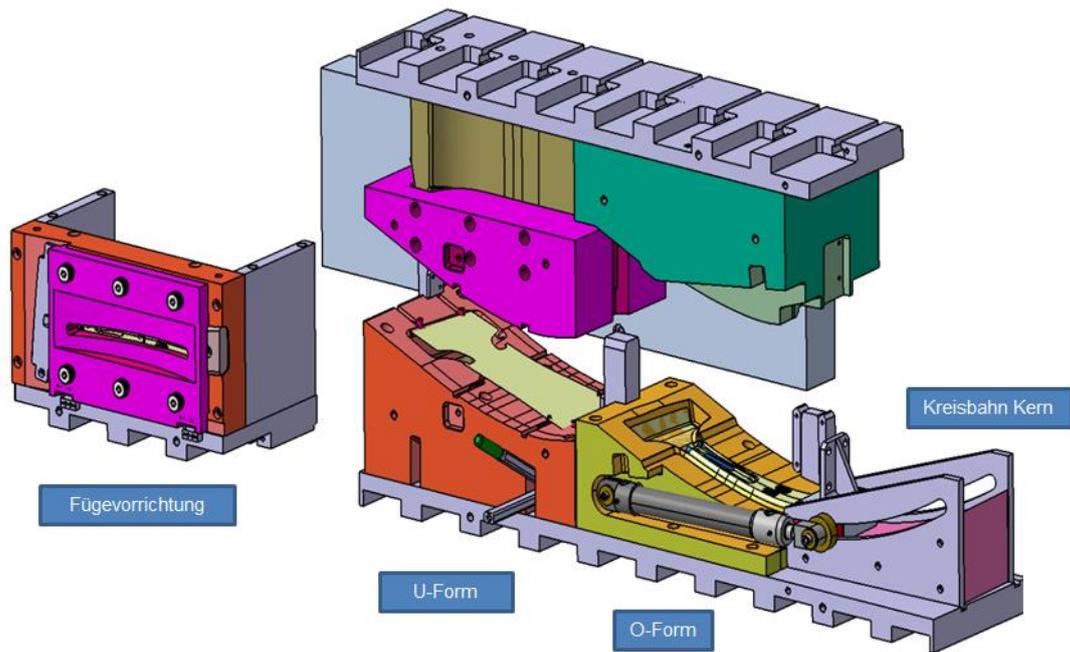


Abbildung 2.8-3: Layout des T³-Formgebungswerkzeugs

Alle Werkzeugsegmente wurden in der T³-Profilieranlage von ThyssenKrupp Steel Europe montiert. Das Einlegen und die Entnahme der Bauteile aus den einzelnen Werkzeugsegmenten erfolgt bei der Prototypenherstellung manuell. Eine Seriumsetzung ist auf einer Transferpresse mit automatisierten Bauteiltransfer vorgesehen.

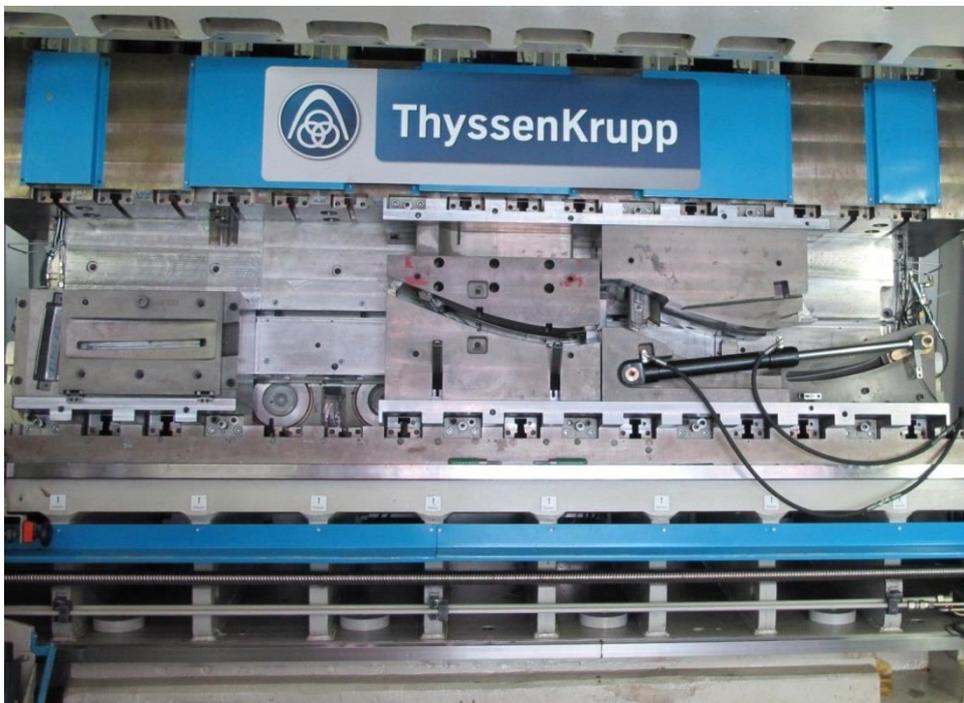


Abbildung 2.8-4: Montierte Werkzeugsegmente in der T³-Profilieranlage

Der Demonstrator wurde erfolgreich gefertigt, die Ergebnisse der einzelnen Fertigungsschritte sind in Abbildung 2.8-5 dargestellt.



Abbildung 2.8-5: Fertigungsschritte der T³ B-Säule

Nach dem Laserschweißen wird die T³-B-Säule indirekt gehärtet, wodurch der Werkstoff seine hohe Festigkeit von 1500 MPa erhält. Anschließend erfolgt der finale Beschnitt zum Einbringen der Montagelöcher.



Abbildung 2.8-6: T³-B-Säulen Demonstrator mit Montagelöchern

2.9 Querschnittsthema Akustik

Automobilhersteller entwickeln mit erheblichem personellen und finanziellen Aufwand die Verbesserung der Fahrdynamik sowie des Akustik- und Schwingungskomforts von

Karosserien. Fahrdynamik, Akustik und Schwingungskomfort werden unter dem Überbegriff NVH (NVH = Noise, Vibration und Harshness) zusammengefasst.

Der Einsatz vieler unterschiedlicher Materialien in leichten Karosserien stellt für eine gute NVH-Performance eine besondere Herausforderung dar. Eine gute NVH-Performance fordert hohe statische und dynamische Steifigkeiten. Im Gegensatz dazu stehen eine leichte Karosserie, die im Ansatz eher weich ist, und die Multimaterial-Bauweise, die den Einsatz verschiedener Fügetechnologien einschränken.

Im Rahmen des Projekts Light-eBody hat sich das Konsortium darauf verständigt, die Zielwerte für die statische und dynamische Steifigkeit aus dem „Konservativen Konzept“ abzuleiten. Grundlage für die Bestimmung der Steifigkeitswerte ist der Body-in-White mit geklebten Glasscheiben, den Stoßfängern vorne und hinten, mit Hilfsrahmen und Fahrwerk hinten für den statischen Kennwert, ohne Hilfsrahmen und ohne Fahrwerk hinten für die dynamischen Kennwerte.

	Einheit	Zielwert	Konservatives Konzept	Light-eBody Loop3 V2
Statische Torsionssteifigkeit	Nm/°	25 500	28 300	25 400
Globale Torsion	Hz	44,9	48,9	47,2
Laterale Vorderwagenbiegung	Hz	47,8	51,8	51,7
Vertikale Biegung	Hz	56,3	60,3	54,5
Spreizung	Hz	3,0	2,9	2,8

Tabelle 2.9-1: Statische Torsionssteifigkeit und globale Moden

Die Kennwerte des Designstands LeB Loop3 V2 erreichen die Zielwerte in dem Sinne, dass die Werte der statischen Steifigkeit, der globalen Moden und der Spreizung ausreichend sind. [Tabelle 2.9-1: Statische Torsionssteifigkeit und globale Moden]

Insbesondere der wichtige erste globale Mode, der Torsionsmode, übertrifft mit 47,2 Hz deutlich den geforderten Zielwert von 44,9 Hz. Die Einhaltung der geforderten Spreizung von 3,0 Hz zwischen dem lateralen Vorderwagen-Biegemode und dem vertikalen Biegemode kann leicht durch geringfügiges Absenken des lateralen Vorderwagen-Biegemodes erreicht werden. Lediglich der vertikale Biegemode unterschreitet den Zielwert deutlich, liegt aber mit rund 7,3 Hz über den hohen Torsionsmode und ist im Rahmen dieses Konzeptes als ausreichend hoch anzunehmen.

Die gute NVH-Performance wird zum einen dadurch erzielt, dass ein vollständiger B- und C-Säulen-Ring durch Einbeziehung der Batterietragstruktur geschaffen wird. [Abbildung 2.9-1] Zum anderen führt der Portalrahmen aus C-Säulen-Ring, Heckprotal und Längsträger hinten zu einer biege- und torsionssteifen Struktur. [Abbildung 2.9-2]

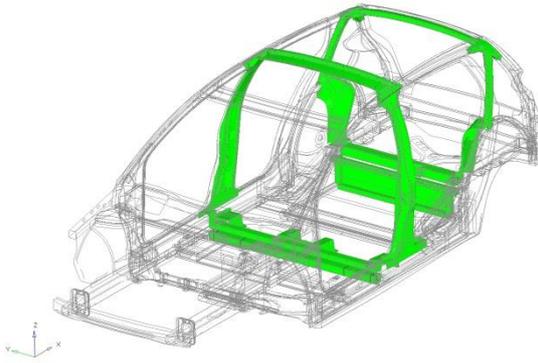


Abbildung 2.9-1: Vollständig ausgeführter B- und C-Säulen-Ring

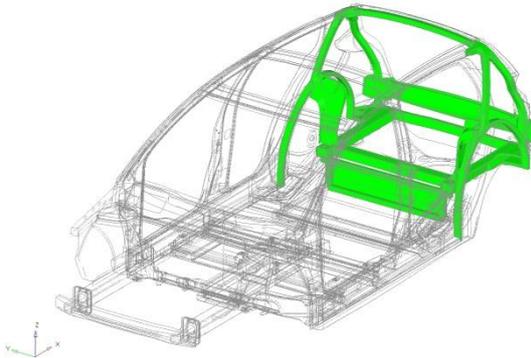


Abbildung 2.9-2: Portalrahmen, gebildet aus C-Säulen-Ring, Heckportal und Längsträger

Eine besondere Bedeutung für die Steifigkeit der profilintensiven Karosserie ist eine biegesteife Anbindung der Profile untereinander. Exemplarisch werden hier zwei Lösungen aus dem C-Säulen-Ring und dem Heckportal aufgeführt. [Abbildung 2.9-3] Die Anbindungen werden ein- oder zweiseitig, je nach Zugänglichkeit, mit Knotenblechen ausgeführt. Die Knotenbleche können integriert werden, wie am Beispiel der Radhausverstärkung hinten [Abbildung 2.9-3, links] oder über zusätzliche Bleche, wie am Beispiel des oberen Knoten des Heckportals, ausgeführt werden. [Abbildung 2.9-3, rechts].

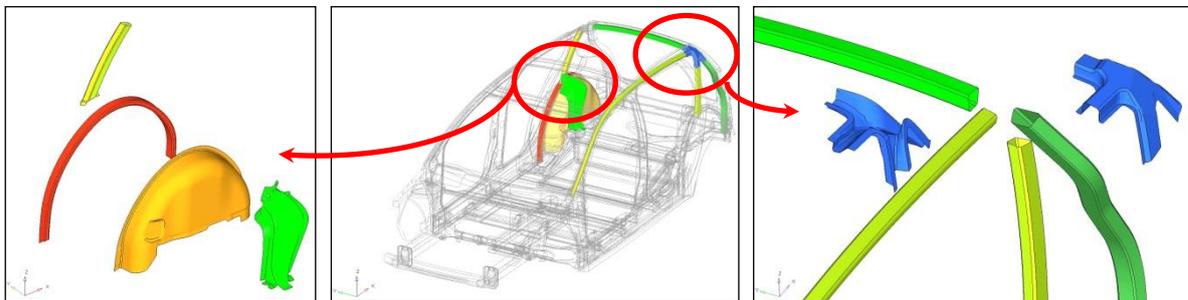


Abbildung 2.9-3: Anschluss C-Säule – Radhaus und Heckportal oben

Der Geräuschkomfort im Bereich bis etwa 400 Hz wird maßgeblich von der Körperschallakustik der Karosserie, der Aggregate sowie der Aggregatelagerung geprägt. [ATZ13]. Im Zuge des Konzeptes Light-eBody werden die Aggregatenlagerungen im Frequenzbereich bis 200 Hz betrachtet.

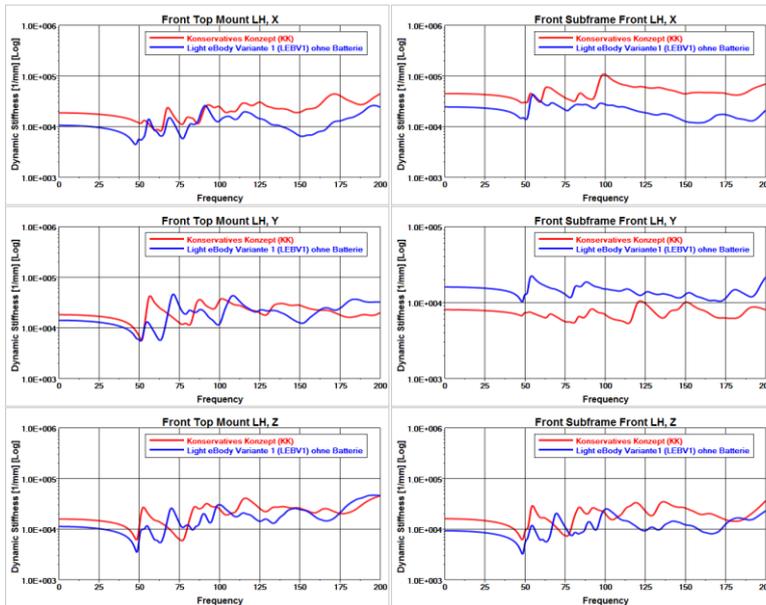


Abbildung 2.9-4: Exemplarische Darstellung der dynamischen Einleitungssteifigkeit in den drei Hauptrichtungen am Federdom Vorne und Hilfsrahmen Vorne. Vergleich des konservativen Konzepts (rot) mit LEB V1 (blau)

Die vom Konsortium angestrebten Zielwerte für die dynamische Einleitungssteifigkeiten [Abbildung 2.9-4] mit $1 \cdot 10^4$ 1/mm werden vom konservativen Konzept (KK) weitgehend bestätigt. Die Struktur des Light-eBody Version 1 (LEBV1) und KK zeigen im Frequenzbereich der ersten globalen Moden typische Einbrüche der dynamischen Steifigkeit. Am vorderen Federdom in X-Richtung ist bei ca. 150 Hz der Zielwert für die dynamische Steifigkeit des LEBV1 noch nicht erreicht. Für den Designstand LEB Loop3 V2 ist die Abstützung des Federdoms an die Stirnwand deutlich verbessert, so dass die geforderte Steifigkeit erreicht wird.

Die vordere Anbindungskonsole des Subframes ist im Designstand LEB V1 in Z-Richtung zu weich ausgebildet. Im Designstand LEB Loop3 V2 ist die Blechstärke der Konsole von 2,0 mm auf 3,0 mm erhöht worden, so dass auch hier die geforderte dynamische Steifigkeit erreicht wird. Weitere Aggregatlagerungen werden konzeptionell ähnlich den beiden dokumentierten Lagerungen ausgeführt.

Nach Projektende wurden weitere Modifikationen an der Karosserie durch das ika vorgenommen. Die finalen Steifigkeitskenngrößen sind vom ika bestimmt und im Abschlussbericht des ika dokumentiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es bei einer Integration der Batterietragstruktur in eine leichte, profilintensive Multimaterial-Karosserie möglich ist, hohe statische und dynamische Steifigkeiten zu verwirklichen. So ist gewährleistet, dass die Ansprüche an Fahrdynamik, Akustik- und Schwingungskomfort moderner Karosserien erfüllt werden.

2.10 Life Cycle Assessment

Gewichtseinsparung ist ein wichtiges Thema im Karosseriebau. Durch ein geringes Gewicht wird der Energie- bzw. der Kraftstoffverbrauch während der Fahrt reduziert, dies wiederum reduziert die Umweltbelastung. Besonders bei Elektrofahrzeugen, deren eingeschränkte Reichweite und hohe Batteriekosten eine Hemmschwelle für potenzielle Käufer darstellen, wird Leichtbau oft als Lösung für diese Problematik dargestellt.

Eine Möglichkeit, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren ist der Einsatz der Multimaterialbauweise. Die Multimaterialbauweise benötigt während der Herstellung der verschiedenen Werkstoffe deutlich mehr Energie als die stahlintensive Schalenbauweise von Fahrzeugkarosserien. Wenn die Energieeinsparungen während der Nutzungsphase die Mehrbelastung in der Materialherstellungsphase nicht kompensiert, verursacht eine Fahrzeugkarosserie, die mit alternativen Werkstoffen gebaut ist, höhere Umweltbelastung, obwohl sie leichter ist.

Vor diesem Hintergrund ist die Lebenszyklusanalyse ein integraler Bestandteil des Fahrzeugentwicklungsprozesses geworden. Sie unterstützt die Entscheidung, welche Werkstoffe und Technologien verwendet werden sollen, um die Umweltauswirkung des neuen Fahrzeugs zu reduzieren.

In dem Projekt Light-eBody wird die Karosserie aus Stahl, Aluminium und Kunststoff gefertigt. Um die Umweltauswirkung dieser Bauweise bewerten zu können, wird ein umfangreiches Life Cycle Assessment durchgeführt. Als Projektpartner und Werkstofflieferant hat sich ThyssenKrupp Steel Europe während der kompletten Projektlaufzeit an dem Arbeitspaket LCA beteiligt.

Neben der Bereitstellung von Werkstoff- und Produktionsdaten zur Stahlherstellung standen die folgenden Aktivitäten im Vordergrund:

- a. Definition des Ziels und des Betrachtungsumfangs des Life Cycle Assessments
- b. Ermittlung von Sekundärgewichtseinsparungen
- c. Modellierung der Recyclingphase

a. Definition des Ziels und des Betrachtungsumfangs des Life Cycle Assessments

Ziel des Life Cycle Assessments ist die Bewertung der Umweltvorteile, die sich durch den Karosserieleichtbau ergeben. Es werden nicht die Umweltvorteile bewertet, die sich durch die Änderung des Antriebsstrangs vom Verbrennungsmotor zum Elektromotor ergeben.

Aus diesem Grunde wird die Karosserie des Light-eBody mit der Referenzkarosserie, dem konservativen Konzept (modifizierte und elektrifizierte Golf V Karosserie), verglichen.

b. Ermittlung von Sekundärgewichtseinsparungen

Ein weiterer Arbeitspunkt ist die Festlegung der Sekundärgewichtseinsparung. Ein Elektrofahrzeug mit leichterer Karosserie benötigt für eine vorgegebene Reichweite eine

Batterie mit geringerer Kapazität. Durch die Verringerung der Kapazität werden auch die Emissionen bei der Batterieproduktion reduziert. Die durch den Karosserieleichtbau induzierte Batterieverkünderung hat somit einen Einfluss auf die Ökobilanz eines neuen Materialkonzeptes für Elektrofahrzeuge.

Mit Hilfe eines Verbrauchssimulationstools, dem eine Vielzahl von Eingabewerten wie Reichweite, Wirkungsgrade, Rekuperation, Rollwiderstandsbeiwert, Energiedichte der Batterie und der nutzbare Bereich (SOC) der Batterie zugrunde liegt, wurden die Minderverbrauchswerte exemplarisch berechnet.

Für die Wirkungsgrade des Antriebs und der Batterie wurden Annahmen getroffen, die dem prognostizierten Stand der Technik (2015-2020) entsprechen. Mit den gewählten Parametern ergibt sich eine Minderkapazität von 0,72 kWh bei 100 kg Gewichtsreduktion. Dies entspricht einer Gewichtsreduktion der Batterie von 5,52 kg, die als Sekundärgewichtseinsparung in der Ökobilanz berücksichtigt wird.

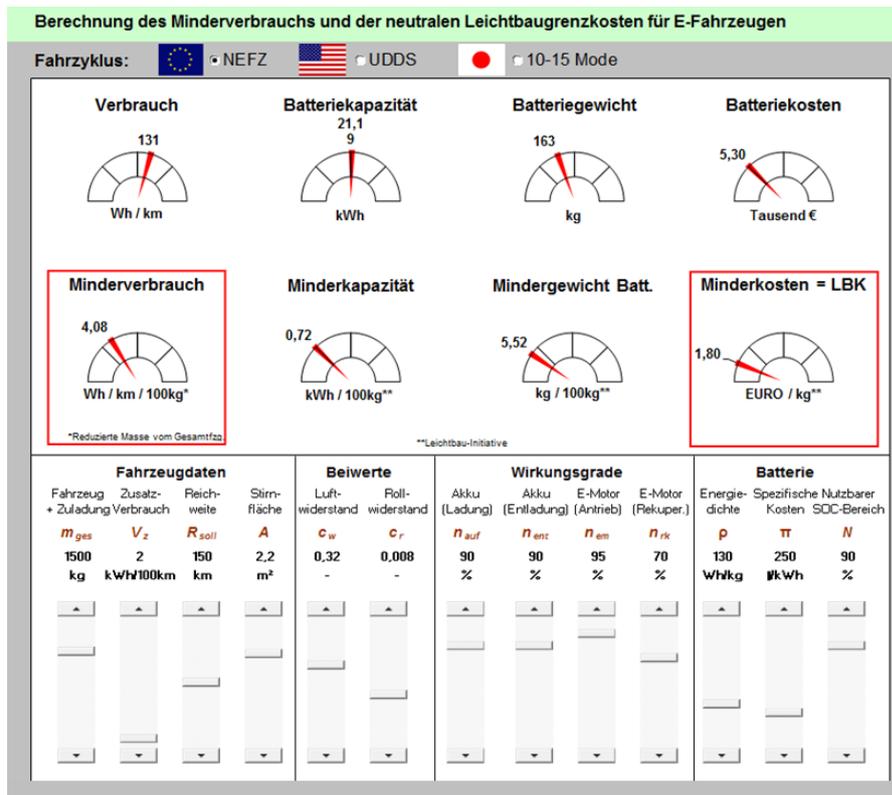


Abbildung 2.10-1: Berechnung der Minderverbrauchswerte

c. Modellierung der Recyclingphase

Die Auswahl der End-of-Life-Allokationsmethode besitzt einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse eines Life Cycle Assessment [NIC09].

Die Recyclingquote des heute anfallenden Produktionsschrotts, wie z.B. der Blechverschnitt im Presswerk, ist sehr hoch. Deshalb sollte für den Produktionsschrott eine Gutschrift in

voller Höhe vergeben werden. Dabei wird von einer Vermeidung der Primärproduktion durch das Recycling des Produktionsschrotts ausgegangen, abzüglich des Recyclingaufwands für beispielsweise das Einschmelzen von Stahlschrott im Elektroofen.

Für den zukünftig anfallenden Altfahrzeugschrott sollte im Basisszenario zum Zeitpunkt 0 km keine pauschale Gutschrift vergeben werden. Es sollte jedoch ein Recyclingpotenzial ausgewiesen werden, das aufzeigt, welche Verbesserungen am Lebensende bei 150.000 km im Falle einer werkstofflichen Verwertung erzielt werden könnten.

Aufgrund des geringen Rücklaufs von Altfahrzeugen ist auch der Rücklauf an Werkstoffen gering. Im Jahre 2012 wurden in Deutschland von 3,2 Millionen Altfahrzeugen nur 480.000 von Demontagebetrieben angenommen und verwertet.

Verbleib der endgültig stillgelegten PKW in Deutschland
Angaben in Mio. PKW

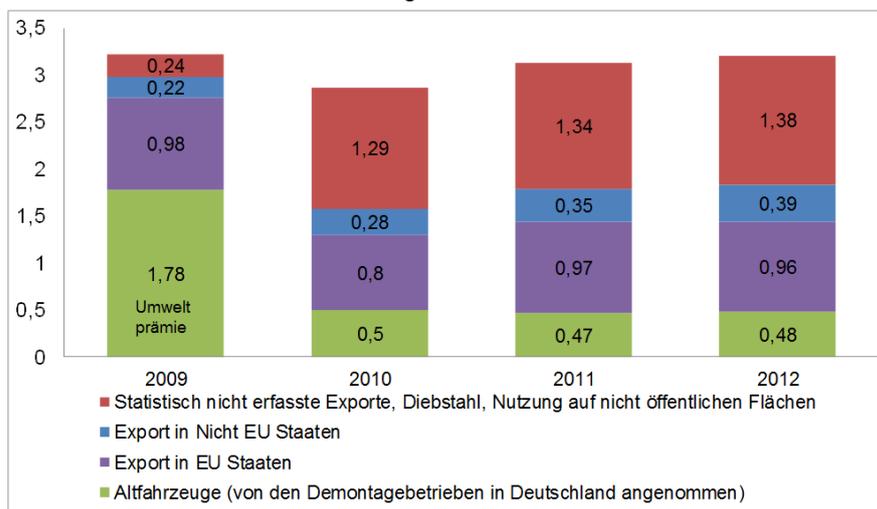


Abbildung 2.10-2: Verbleib der endgültig stillgelegten PKW in Deutschland [BUN12]

Für die End-of-Life-Phase des Light-eBody werden deshalb mehrere Szenarien definiert, die diesen Sachverhalt berücksichtigen.

Trotz der Multimaterialbauweise weist die Karosserie des Light-eBody aufgrund des geringen Gewichtes eine positive Ökobilanz gegenüber der des Referenzfahrzeuges auf.

Das Life Cycle Assessment wurde durch das WZL der RWTH Aachen ausgeführt, die Ergebnisse sind in dem Abschlussbericht der RWTH Aachen zu finden.

3 Zusammenfassung

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung der großserienfähigen Leichtbaukarosserie eines Elektrofahrzeuges in Multimaterialbauweise.

Die erste Herausforderung entstand durch den gewählten Purpose Design-Ansatz. Aufgrund der Systemarchitektur des elektrischen Antriebs bieten sich neue Gestaltungsmöglichkeiten im Bereich des Vorderwagens und der Bodenstruktur. Insbesondere die integrierte Tragstruktur der Batterie und der Wegfall des Fahrzeugtunnels sind Merkmale für die Karosserie eines Elektrofahrzeuges.

Die Multimaterialbauweise des Light-eBody erfordert eine neue Bauweise der Karosserie. Die für Großserienfahrzeuge etablierte Schalenbauweise eignet sich aufgrund der damit verbundenen thermischen Fügeverfahren nicht für eine Karosserie in Multimaterialbauweise. Die Karosserie des Light-eBody besteht aus einer profilintensiven Tragstruktur, die mit Aluminium und Kunststoffbauteilen beplankt wird.

Die Anwendung höchstfester Stähle als geschlossenes Profil bietet ein hohes Leichtbaupotential. Im Gegensatz zu Schalenbauteilen weisen geschlossene Profile eine höhere Steifigkeit auf und bieten durch eine gute Bauraumausnutzung ein hohes Leichtbaupotential. Aufgrund der hohen Festigkeit der verwendeten Stähle können geringe Materialstärken realisiert werden, wodurch sich das Gewicht der Karosserie reduziert.

Die T³-Technologie von ThyssenKrupp Steel Europe ermöglicht die Fertigung von geschlossenen Profilen mit variablen Querschnitten und wurde erfolgreich angewendet. Die innerhalb des Projektes entwickelte B-Säule zeigt das Potential dieser Technologie. Weitere mögliche Anwendungen sind Bauteile wie A-Säulen, Längsträger und Dachrahmen.

Die Multimaterialbauweise erfordert die Anwendung alternativer Fügeverfahren im Karosseriebau. Artfremde Werkstoffkombinationen wie Stahl-Aluminium und Stahl-Kunststoff können nicht durch thermische Verfahren gefügt werden. Mechanische Fügeverfahren und strukturelle Klebstoffe ermöglichen das Fügen dieser Werkstoffkombinationen, bei einseitiger und zweiseitiger Zugänglichkeit.

Das Life Cycle Assessment des Light-eBody zeigt eine positive Bilanz. Die Herstellungsphase der Light eBody Karosserie in Multimaterialbauweise erzeugt mehr CO₂-Äquivalent als eine Karosserie, die aus Stahl gefertigt wird. Aufgrund des geringen Gewichtes, wird in diesem Fall der Nachteil in der Nutzungsphase des Fahrzeuges kompensiert. Die Ergebnisse sind in einem hohen Maße von dem verwendeten Energiemix und dem Fahrprofil abhängig.

4 Formelzeichen und Indizes

L	[mm]	Länge
M	[kg]	Masse
V	[km/h]	Geschwindigkeit
P	[kW]	elektrische Leistung
W	[kWh]	Energie
SOC	[%]	State of Charge
R _{P0,2}	[MPa]	Streckgrenze
R _m	[MPa]	Zugfestigkeit
A _g	[%]	Gleichmaßdehnung
A ₈₀	[%]	Dehnung
C _T	[Nm/°]	Statische Torsionssteifigkeit des Body in White (BIW)
f _i	[Hz]	Eigenmoden des BIW

5 Literatur

[ATZ13] ATZ extra

Die neue S-Klasse von Mercedes Benz

Springer Verlag, Wiesbaden, Juli 2013

[BUN12] Bundesumweltamt: Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG

Online im Internet:

http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/jahresbericht_alfahrzeug_2012_bf.pdf (Stand: 16.09.2014)

[HOF05]H. Hofmann, M. Menne, S. Göklü, H. Richter:

Properties of austenitic high manganese steels with induced plasticity (X-IP steels)

Proceedings der Tagung „Steels in Cars and Trucks 2005“ SCT 2005, 05.-10. Juni 2005,

Wiesbaden, Deutschland, ISBN 3-514-00718-7

[HOF06]H. Hofmann, G. Frommeyer, U. Bruex, J. Wesemann, T. Hallfeld, K. Zuckschwerdt, C. Ostwald, M. Meurer:

Herstellung, Eigenschaften und Oberflächenveredelung neuer hochfester supraduktiler

TWIP/TRIP-Leichtbaustähle für verstärkende und crashstabile Fahrzeugkomponenten

Abschlußbericht des BMBF-Projektes 03 N 3110, 2006

[HOF07]H. Hofmann, J.-U. Becker, S. Göklü, H. Richter, I. Thomas:

X-IP 1000: Properties of an austenitic super high strength high manganese steel – status and outlook

Proceedings der Tagung „Steels in Cars and Trucks 2008“ SCT 2008, 01.-05. Juni 2008,

Wiesbaden, Deutschland

[HOF04] H. Hofmann, S. Göklü, J. Gerlach, U. Bruex:

Properties of light steels with induced plasticity (L-IP steels)

Proceedings der Tagung IDDRG 2004 „Forming the Future“, 24.-26. Mai 2004, Sindelfingen, Deutschland

[HOF08] H. Hofmann, J.-U. Becker, S. Göklü, H. Richter, I. Thomas:

X-IP 1000: Properties of an austenitic super high strength high manganese steel – status and outlook

Proceedings der Tagung „Steels in Cars and Trucks 2008“ SCT 2008, 01.-05. Juni 2008,

Wiesbaden, Deutschland

[NIC09] Nicholson, A.L. et al.:

End-of-life LCA allocation methods: Open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions. Sustainable Systems and Technology

2009, ISSST ,09. IEEE International Symposium. 2009. S. 1-6

[NPE10] Nationale Plattform Elektromobilität

Zwischenbericht 30. November 2010

Online im Internet: http://www.bmbf.de/pubRD/bericht_nationale_plattform_elektromobilitaet.pdf (Stand 16.09.2014)

[THY14a] ThyssenKrupp Steel Europe AG

Mangan-Bor-Stähle MBW[®] für die Warmumformung

Online im Internet: http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/upload/binarydata_tksteel05d4cms/24/17/79/02/00/00/2791724/Produktinformationen_MBW-Staehle_05_2013.pdf (Stand 16.09.2014)

[THY14b] ThyssenKrupp Steel Europe AG

Dualphasen-Stähle DP-W[®] und DP-K[®]

Online im Internet: http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/upload/binarydata_tksteel05d4cms/31/29/79/02/00/00/2792931/Produktinformationen_DP-W_DP-K_08_2013.pdf (Stand 16.09.2014)

6 Anhang

6.1 Schliffbilder Fügelemente

M6 Standard, MBW1500



M6 Standard, HX340LAD



Abbildung 6.1-1: RIVKLE® Blindnietmutter M6 (Standard), Schraubengüte 8.8

M6 HRT, MBW1500

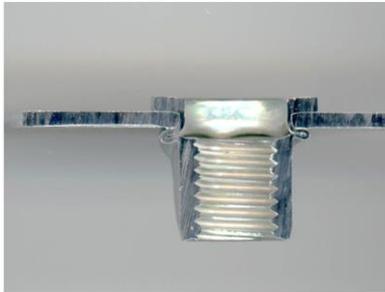


M6 HRT, HX340LAD



Abbildung 6.1-2: RIVKLE® Blindnietmutter M6 (HRT), Schraubengüte 12.9

M8 Standard, MBW1500



M8 Standard, HX340LAD

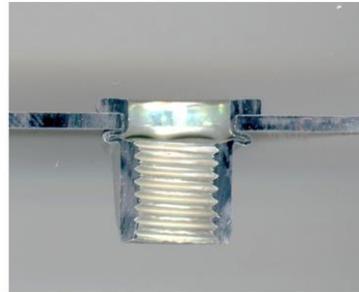
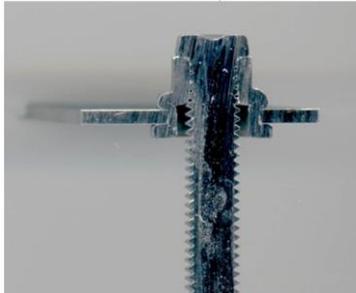


Abbildung 6.1-3: RIVKLE® Blindnietmutter M8 (Standard), Schraubengüte 8.8

Blindnietschraube M6, MBW1500



Blindnietschraube M6, HX340LAD

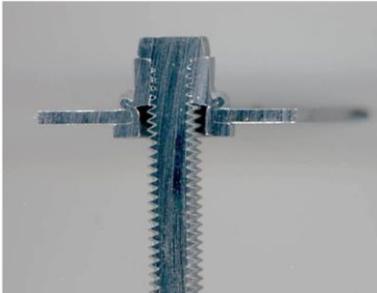
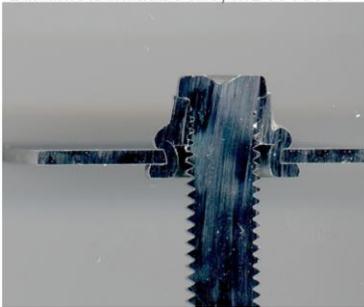


Abbildung 6.1-4: RIVKLE® Blindnietschraube M6

Blindnietschraube M8, MBW1500



Blindnietschraube M8, HX340LAD

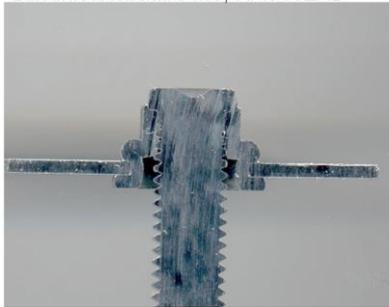
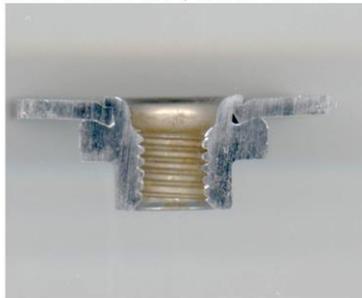


Abbildung 6.1-5: RIVKLE® Blindnietschraube M8

RND Mutter M6, MBW 1500



RND Mutter M6, HX340LAD



Abbildung 6.1-6: RND Mutter M6

SFB Bolzen M6, MBW1500



SFB Bolzen M6, HX340LAD



Abbildung 6.1-7: SBF Bolzen M6