

Bachelorarbeit

Lucas Claus

Konstruktion eines Cabriolet-A-Säulen-Knotens und dessen Bewertung mithilfe von FEM-Berechnungen bezüglich des Lastfalls der Dacheindrückung

Lucas Claus

**Konstruktion eines Cabriolet-A-Säulen-
Knotens und dessen Bewertung mithilfe
von FEM-Berechnungen bezüglich des
Lastfalls der Dacheindrückung**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau/Karosserieentwicklung
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
ALU-CAR GmbH
Nuhnstraße 2
59955 Winterberg

Erstprüfer/in: Prof. Stefan Bigalke
Zweitprüfer/in : Dipl. Ing. (FH) Holger Reitzig
Industrielle/r Betreuer/in: Dipl. Ing. (FH) Holger Reitzig

Abgabedatum: 22.12.2014

Zusammenfassung

Lucas Claus

Thema der Bachelorthesis

Konstruktion eines Cabriolet-A-Säulen-Knotens und dessen Bewertung mithilfe von FEM Berechnungen bezüglich des Lastfalls der Dacheindrückung

Stichworte

Sicherheit, Karosseriekonstruktion, Cabriolet, A-Säule, Leichtbau, Fügeverfahren, Finite-Element-Methode, Festigkeitsberechnung

Kurzzusammenfassung

Durch gesetzliche Forderungen und Verbrauchertests nimmt die passive Sicherheit einer Fahrgastzelle bzw. eines Gesamtfahrzeugs einen zentralen Stellenwert in der Fahrzeugentwicklung ein. Unter der Berücksichtigung von Herstellbarkeit, Fügetechniken und konstruktiven Rahmenbedingungen gilt es, verschiedene Konzeptvarianten einer Cabriolet-A-Säule mit dem CAD-System Catia V5 aufzubauen. Diese Varianten werden mit dem FEM-System Altair Hyperworks 12.0 einem standardisierten Lastfall unterzogen, der den Überschlag eines Fahrzeugs simuliert. Ziel soll sein, eine Aussage über das Verhalten der einzelnen Varianten während eines Fahrzeugüberschlags zu erhalten. Aufgrund der Ergebnisse soll eine Abschätzung ermöglicht werden, inwiefern ein Cabriolet die Anforderungen dieses Tests erfüllen kann.

Lucas Claus

Title of the paper

Design of a convertible A-pillar and the valuation by the finite element analysis relating to the roof crush load case

Keywords

Safety, car body design, convertible, A-pillar, lightweight construction, bonding technique, finite element method, stress analysis

Abstract

Based on legal requirements and consumer tests, the passive safety of a passenger cabin or an entire vehicle plays a central role in automotive engineering. Taking into account the manufacturability, bonding technique and set architectural parameters, different concept versions of a convertible a-pillar are to be designed by CAD-system CATIA V5. These different versions are examined by a standardized load case using FEM-system Altair Hyperworks 12.0 which simulates a vehicle rollover.

The aim is to gain information from the behavior of the different versions during a vehicle rollover for a definite statement. The results shall offer the opportunity to estimate to which extent a convertible can reach the requirements of this specific test procedure.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	1.1 ALU-CAR GmbH	1
	1.2 Motivation und Ziele	1
2	Straßenverkehrs- und Fahrzeugsicherheit	3
	2.1 Aktive Sicherheit.....	4
	2.2 Passive Sicherheit	5
3	Bewertung der passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen	7
	3.1 Komponententests.....	7
	3.2 Verbrauchertests	7
	3.3 Gesetzliche Anforderungen	8
	3.4 Dacheindrückttest.....	9
	3.4.1 FMVSS 216a	10
	3.4.2 IIHS Roof strength test	12
	3.4.3 ADAC-Test	13
4	Karosseriebauweisen	14
	4.1 Die nicht selbsttragende Karosserie	14
	4.2 Die selbsttragende Karosserie.....	15
	4.3 Die Space-Frame-Bauweise.....	16
	4.4 Monocoque-Bauweise	16
5	Das Cabriolet	18
	5.1 Allgemeines.....	18
	5.2 Sicherheit von Cabriolets.....	19
6	Leichtbaukonzepte und -fertigungsverfahren	21
	6.1 Warmumformen – Presshärten.....	21
	6.2 Tailored Blanks.....	23
	6.3 Innenhochdruckumformen	24
	6.4 Multimaterial Leichtbau.....	25
7	Fügeverfahren	26
	7.1 Widerstandspunktschweißen.....	26
	7.2 Schutzgasschweißen.....	27
	7.3 Stanznieten.....	28
	7.3.1 Halbhohlstanznieten	28
	7.3.2 Vollstanznieten	29
	7.4 Flow-Drill-Schrauben (FDS).....	30
	7.5 Kleben	31
8	Stand der Technik	32
9	Ausgangssituation	34
10	Fenite-Element-Methode	36
	10.1 Grundlagen.....	36
	10.2 Berechnungsmodell.....	37
11	Variante 1	42

11.1	Der Schweller	43
11.2	Der Stirnwandquerträger	44
11.3	Der Scheibenquerträger	45
11.4	Die Stirnwand	46
11.5	Der Dachrahmenquerträger	47
11.6	Der obere Bereich der A-Säule.....	48
11.7	Knotenbleche.....	49
11.8	Gussteile der inneren und äußeren A-Säule.....	50
11.9	Fügetechnik und Fügefolge	53
11.10	Berechnungsergebnisse	58
12	Variante 2	62
12.1	Die untere A-Säule	62
12.2	Die obere A-Säule	63
12.3	Der Scheibenquerträger	63
12.4	Der Schweller	64
12.5	Verstärkungen	64
12.6	Fügetechnik und Fügefolge	66
12.7	Berechnungsergebnisse	67
13	Variante 3	72
13.1	Die untere A-Säule	72
13.2	Der Schweller	73
13.3	Verstärkungen	74
13.4	Berechnungsergebnisse	75
14	Berechnung mit plastischer Materialmodellierung	77
14.1	Materialvariante 1	77
14.2	Materialvariante 2	80
15	Fazit	82
16	Quellenverzeichnis.....	X

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr	3
Abbildung 2: Ursachen von Straßenverkehrsunfällen mit Personenschäden	4
Abbildung 3: Knautschzonen	6
Abbildung 4: Kollisionsarten und die entstehenden Verletzungsfolgekosten.....	10
Abbildung 5: Seitenansicht Dacheindrückttest.....	11
Abbildung 6: Frontansicht Dacheindrückttest	11
Abbildung 7: Aufbau der Schwelleraufnahme.....	11
Abbildung 8: Rollover eines Cabriolets.....	13
Abbildung 9: Leiterraum eines Lkw.....	14
Abbildung 10: Karosserie in selbsttragender Schalenbauweise	15
Abbildung 11: Karosserie des Audi R8 e-tron in Space-Frame-Bauweise.....	16
Abbildung 12: Monocoque des McLaren P1	17
Abbildung 13: Lastpfade eines Pkw.....	19
Abbildung 14: Aktiver und passiver Überrollschutz.....	19
Abbildung 15: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von 22Mnb5.....	22
Abbildung 16: Verfahren zur Herstellung eines Tailored Rolled Blank	23
Abbildung 17: Verfahrensschritte des Innenhochdruckumformens.....	24
Abbildung 18: Ablauf des Halbholstanznietens.....	28
Abbildung 19: Variationen von HSN-Verbindungen.....	29
Abbildung 20: Schliffbild einer Vollstanznietverbindung	29
Abbildung 21: Verfahren des FDS-Schraubens.....	30
Abbildung 22: A-Säule des Mercedes E-Klasse Cabriolets	32
Abbildung 23: A-Säule des VW Eos mit verstärkendem Einsatzteil.....	33
Abbildung 24: A-Säule aus einem innenhochdruckumgeformten Rohr	33
Abbildung 25: CAD-Vorgaben	34
Abbildung 26: Kraft-Verschiebungsbeziehung.....	36

Abbildung 27: Stark verzogenes FEM-Netz.....	37
Abbildung 28: Ausbesserung beschädigter Elemente	38
Abbildung 29: Darstellung eines Connectors.....	39
Abbildung 30: Gesamte Verbindungstechnik einer Modellvariante.....	39
Abbildung 31: Stempelfläche mit RBE-Spinne.....	40
Abbildung 32: Kontaktfläche des Stempels und des Dachrahmens	41
Abbildung 33: Modell der Variante 1	42
Abbildung 34: Schweller	43
Abbildung 35: Schweller des Mercedes SL	44
Abbildung 36: Stirnwandquerträger	44
Abbildung 37: Obere und untere Schale des Scheibenquerträgers.....	45
Abbildung 38: Stirnwand.....	46
Abbildung 39: Dachrahmenquerträger.....	47
Abbildung 40: Schnitt durch den Dachrahmen auf Y0	47
Abbildung 41: Blechschalen der oberen A-Säule	48
Abbildung 42: Knotenbleche.....	49
Abbildung 43: A-Säule unten	50
Abbildung 44: Schweller und untere A-Säule	50
Abbildung 45: Stirnwandquerträger mit Verbindungsknoten.....	51
Abbildung 46: Verbindung Scheibenquerträger zu A-Säule	51
Abbildung 47: A-Säule mit Verstärkungsrohr.....	52
Abbildung 48: Verbindungstechnik der Variante 1	53
Abbildung 49: Dicht nebeneinander sitzende Nietverbindungen	54
Abbildung 50: Verbindungstechnik an der Stirnwand	54
Abbildung 51: Verbindung des Verstärkungsrohrs mit der A-Säule.....	55
Abbildung 52: Erster Schritt der Fügefolge	56
Abbildung 53: Zweiter Schritt der Fügefolge.....	56
Abbildung 54: Dritter Schritt der Fügefolge.....	57

Abbildung 55: Vierter Schritt der Fügefolge	57
Abbildung 56: Zuordnung der Wandstärken	58
Abbildung 57: Verschiebung aufgrund der Dacheindrückung.....	58
Abbildung 58: Spannungen nach von Mises.....	59
Abbildung 59: Verschiedene Varianten des Verstärkungsrohrs.....	60
Abbildung 60: Spannungen in den jeweiligen Verstärkungsrohren.....	61
Abbildung 61: Schalen der A-Säule.....	62
Abbildung 62: Verlauf von der oberen zur unteren A-Säule	63
Abbildung 63: Schweller in Schalenbauweise	64
Abbildung 64: Anbindungsvariante für das Verstärkungsrohr.....	65
Abbildung 65: Anbindung des Verstärkungsrohrs.....	65
Abbildung 66: Verstärkungsblech	66
Abbildung 67: Bruchdehnungs-Zugfestigkeits-Diagramm.....	67
Abbildung 68: Wandstärken- und Materialzuweisung	68
Abbildung 69: Spannungsbild der Variante 2.....	69
Abbildung 70: Spannungsspitze in der oberen A-Säule	69
Abbildung 71: Beulen der unteren A-Säule	70
Abbildung 72: Spannungen links mit und rechts ohne Verstärkungen.....	70
Abbildung 73: Spannungsverlauf im Verstärkungsrohr.....	71
Abbildung 74: Untere, innere A-Säule der Variante 3.....	72
Abbildung 75: Öffnung im Schweller und den A-Säulen	73
Abbildung 76: Schweller der Variante 3.....	73
Abbildung 77: X-Schnitt durch die untere A-Säule.....	74
Abbildung 78: Verstärkungsblech der unteren, äußeren A-Säule.....	74
Abbildung 79: Spannungen an der unteren, inneren A-Säule	75
Abbildung 80: Spannungen in der unteren, äußeren A-Säule	76
Abbildung 81: A-Säule aus vorwiegend hochfestem DP600-Stahl	77
Abbildung 82: Spannungsspitzen im Schweller	78

Abbildung 83: Plastische Dehnungen auf der Innenseite der A-Säule	79
Abbildung 84: A-Säule aus vorwiegend ultra-hochfestem MBW1500-Stahl	80
Abbildung 85: Plastische Dehnungen der Materialvariante 2	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strength-to-weight ratio.....	12
Tabelle 2: Vergleich des Leergewichts von Coupé zu Cabriolet.....	20
Tabelle 3: Materialparameter von Aluminium und Stahl	38
Tabelle 4: Farbcodierung der konstruierten Bauteile	43
Tabelle 5: Farbcodierung der verwendeten Fügetechnik.....	53
Tabelle 6: Auswahl an Aluminiumlegierungen für Teile der Rohkarosserie	59

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
ASF	Audi Space Frame
CAD	Computer aided design
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DP-Stahl	Dualphasen-Stahl
ECE	Economic Commission for Europe
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FDS	Flow-Drill-Schrauben
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
HSN	Halbhohlstanznieten
IHU	Innenhochdruckumformen
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
MAG	Metall-Aktivgasschweißen
MIG	Metall-Inertgasschweißen
NCAP	New Car Assessment Programme
Pkw	Personenkraftwagen
RBE	Ridgid Body Element
RTH	Retractable Hardtop
SWR	Strength-to-weight ratio
VSN	Vollstanzniet
WPS	Widerstandspunktschweißen

1 Einleitung

1.1 ALU-CAR GmbH

Die ALU-CAR GmbH, mit Sitz in Winterberg, wurde im Jahr 2000 als Ingenieurdienstleister für die Automobilindustrie gegründet. Die Unternehmensgröße beläuft sich derzeit auf ca. 25 Mitarbeiter (Stand November 2014). Seit dem 1. Juli 2008 gehört die ALU-CAR GmbH zur csi entwicklungstechnik GmbH, deren Betätigungsfelder sich auf die Bereiche Strak, Interieur-, Exterieur- und Karosserieentwicklung sowie auf Projektmanagement erstrecken. Die Kernkompetenz am Standort Winterberg liegt in der Entwicklung von Karosseriekonzepten, die bis hin zur Serienreife begleitet werden. Ein besonderer Fokus wird dabei auf verschiedene Leichtbaukonzepte gelegt.

1.2 Motivation und Ziele

Die Anforderungen, die an die Entwicklung eines Fahrzeugrohbaus gestellt werden, sind heutzutage so vielfältig und zahlreich wie nie zuvor. So müssen im Prozess der Fahrzeugentwicklung sowohl der aktuelle Stand der Technik, technische Innovationen, immer neuen Richtlinien seitens der Gesetzgeber und vor allem Kundenanforderungen stets berücksichtigt werden. Eine zentrale Rolle spielt dabei das Verlangen nach immer mehr Sicherheit im Straßenverkehr.

Durch die von Verbraucherschutzorganisationen durchgeführten Crashtests, deren Ergebnisse häufig die Kaufentscheidung von Kunden beeinflussen und gesetzlich vorgeschriebene, länderspezifische Tests werden Fahrzeughersteller dazu gezwungen, die Entwicklung von Sicherheitssystemen und Fahrzeugstrukturen voranzutreiben. Eine Verbesserung der Sicherheit wirkt sich in der Regel jedoch negativ auf das Fahrzeuggewicht aus, weswegen moderne Leichtbaukonzepte ebenso wenig vernachlässigt werden dürfen.

In dieser Bachelorarbeit mit dem Titel „Konstruktion eines Cabriolet-A-Säulen-Knotens und dessen Bewertung mithilfe von FEM-Berechnungen bezüglich des Lastfalls der Dacheindrückung“ sollen folgende Inhalte behandelt werden:

- Grundlagen der Straßenverkehrssicherheit
- Der Aufbau des Dacheindrückttests nach FMVSS 216a
- Grundlagen zu verschiedenen Leichtbaukonzepten
- Recherche zum Aufbau einer Cabriolet-A-Säule
- Erstellung einzelner A-Säulen-Varianten mit dem CAD-Programm Catia V5
- Berechnung und Vergleich der einzelnen Varianten mit der Finiten-Elemente-Methode mithilfe von Hyperworks 12.0 hinsichtlich der Dacheindrückung

Ziel soll es sein, eine Aussage über das Verhalten der einzelnen A-Säule-Varianten während eines Fahrzeugüberschlags zu erhalten. Mit den ermittelten Berechnungen soll eine Abschätzung ermöglicht werden, inwiefern Cabriolets im Allgemeinen den Anforderungen der Dacheindrückung genügen.

2 Straßenverkehrs- und Fahrzeugsicherheit

Allein in der Bundesrepublik Deutschland waren am 1. Januar 2014 43,9 Millionen Pkw zugelassen [KBA14]. Bei dieser Menge an Fahrzeugen liegt es auf der Hand, dass es eine absolute Sicherheit im Straßenverkehr nicht gibt. Wie groß die Gefahr ist, die vom Straßenverkehr ausgeht, sieht man aber erst, wenn man sich einmal statistische Unfalldaten ansieht. So wurden im Jahr 2013 insgesamt 2.414.011 Unfälle von der Polizei erfasst (siehe Abbildung 1).

Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr

Gegenstand der Nachweisung	Einheit	2010	2011	2012	2013
Polizeilich erfasste Unfälle insgesamt	Anzahl	2 411 271	2 361 457	2 401 843	2 414 011
davon					
Unfälle mit Personenschaden	Anzahl	288 297	306 266	299 637	291 105
Schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden					
im engeren Sinne	Anzahl	92 107	81 487	82 147	80 824
unter dem Einfluss berauschender Mittel ¹	Anzahl	16 034	16 261	16 143	15 564
Übrige Sachschadensunfälle	Anzahl	2 014 833	1 957 443	2 003 916	2 026 518
Verunglückte insgesamt	Anzahl	374 818	396 374	387 978	377 481
davon					
Getötete	Anzahl	3 648	4 009	3 600	3 339
Schwerverletzte	Anzahl	62 620	68 985	66 279	64 057
Leichtverletzte	Anzahl	308 550	323 380	318 099	310 085

¹ Alkohol und andere berauschende Mittel. Bis 2007 Sonstige Alkoholunfälle.

Abbildung 1: Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr [DES14]

Allerdings ist nicht die große Anzahl von Fahrzeugen allein daran schuld, dass es so häufig zu Unfällen kommt. Vielmehr hängt die Sicherheit des Straßenverkehrs in der Gesamtheit von den folgenden drei Faktoren ab: den Menschen, die am Straßenverkehr teilnehmen, den Fahrzeuge, die sie führen und der Umwelt, in der sie sich befinden, also der Straße selbst [Kramer 2013]. Über die Zeit wurden verschiedene Maßnahmen angewendet, um diese drei Faktoren so zu beeinflussen oder zu verändern, dass die Verkehrssicherheit in den letzten 50 Jahren deutlich verbessert werden konnte. In der Unfallforschung und der Fahrzeugtechnik spricht man über Maßnahmen, die sich in zwei Kategorien einteilen lassen: die aktive und die passive Sicherheit.

2.1 Aktive Sicherheit

Unter dem Begriff der aktiven Sicherheit versteht man alle Maßnahmen, die dafür Sorge tragen, Unfälle zu vermeiden. In der Fahrzeugtechnik bezieht sich dieser Bereich hauptsächlich auf die technischen Hilfsmittel, die es dem Fahrer erlauben, sein Fahrzeug sicher zu führen. Hierbei sind besonders die zahlreichen Fahrerassistenzsysteme, wie zum Beispiel das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), das Antiblockiersystem (ABS) und der Notbremsassistent zu nennen. Diese Systeme greifen in bestimmten Fahrsituationen unterstützend ein und helfen somit Unfälle im Vorfeld zu vermeiden. Zudem muss sichergestellt werden, dass Fahrzeuge, die auf den Markt kommen, zuverlässig sind. Denn technische Fehler, die im Fahrbetrieb auftreten, können gravierende Folgen nach sich ziehen. Wie die Abbildung 2 zeigt, sind mangelhafte Fahrzeuge jedoch in den seltensten Fällen die Ursache für Verkehrsunfälle.

Einen deutlich größeren Anteil bei der Entstehung von Unfällen trägt der Faktor Umwelt. Hierbei geht es vor allem darum, die Qualität der Straßen zu verbessern. Eine geeignete Straßenführung, die Beschaffenheit des Fahrbahnbelags, eindeutige Beschilderung und der sinnvolle Einsatz von Höchstgeschwindigkeiten zur Entschärfung von Unfallschwerpunkten helfen, die aktive Sicherheit zu verbessern.

Der größte Schwachpunkt im Straßenverkehr ist jedoch der Menschen, der durch sein Verhalten Hauptverursacher von Verkehrsunfälle ist (siehe Abb. 2). Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, Maßnahmen zu ergreifen, die den Menschen dazu bewegen, bewusst am Straßenverkehr teilzunehmen.

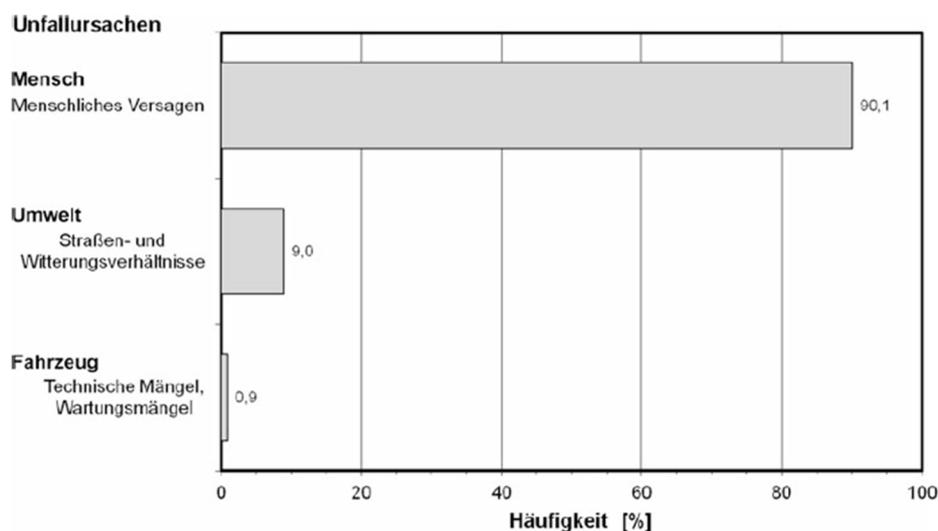


Abbildung 2: Ursachen von Straßenverkehrsunfällen mit Personenschäden [Kramer 2013]

Ein konkretes Beispiel für aktive Sicherheit am Faktor Mensch ist die Verkehrserziehung, in der auf Gefahren und wichtige Regelungen im Straßenverkehr hingewiesen wird. Zudem zählen Gesetze, wie die Einführung einer Promille-Höchstgrenze für Verkehrsteilnehmer oder die Vorschrift, dass jeder Fahrer eines Fahrzeugs im Straßenverkehr eine für dieses Fahrzeug gültige Fahrerlaubnis besitzen muss, ebenfalls zu dem Bereich der aktiven Sicherheit.

Geschieht trotz aller Maßnahmen, die durch die aktive Sicherheit getroffen werden, ein Unfall, so kommt ein zweiter wichtiger Bereich der Verkehrssicherheit zum Tragen, die passive Sicherheit.

2.2 Passive Sicherheit

Im Gegensatz zur aktiven Sicherheit zielt die passive Sicherheit darauf ab, die Folgen, die durch einen Unfall entstehen, so gering wie möglich zu halten. Auch bei diesem Teilgebiet der Verkehrssicherheit wird das Augenmerk wieder auf den Menschen, die Umwelt und das Fahrzeug als entscheidende Einflussgrößen gelegt. Der Mensch trägt zu einer verbesserten passiven Sicherheit hauptsächlich durch die medizinische Erstversorgung von verunglückten Personen bei. Durch entschärfte Straßenränder oder das Aufstellen von Leitplanken, um Fahrzeuge daran zu hindern, die Fahrbahn zu verlassen, greift die Umwelt unterstützend in die passive Sicherheit mit ein. Zudem ist ein gut funktionierendes Rettungswesen unerlässlich, um die Folgen von Unfällen zu mildern.

Am effektivsten lassen sich die Folgen eines Unfalls jedoch durch die Qualität des verunglückten Fahrzeugs selber minimieren. Hierbei liegt die Hauptverantwortung bei der Gesetzgebung und den Fahrzeugherstellern, die die entsprechenden Vorschriften umsetzen müssen.

Die Entwicklung von Einrichtungen, die die passive Sicherheit von Fahrzeugen erhöhen und Pkw-Insassen im Ernstfall das Leben retten können, beginnt bereits in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts. So wurde bereits 1951 eine „Einrichtung zum Schutz von in Fahrzeugen befindlichen Personen gegen Verletzungen bei Zusammenstößen“ [Linderer 1951], der Vorläufer des heutigen Airbags, zum Patent angemeldet. Auch die Erfindung des Dreipunktsicherheitsgurtes, wie er in heutigen Fahrzeugen immer noch zu finden ist, geht auf ein Patent aus dem Jahr 1958 zurück [Bohlin 1958]. Seine Entwicklung und das

Einführen der Gurtanlegepflicht im Jahr 1984 sorgten damals zu einer deutlichen Erhöhung der passiven Sicherheit.

Eine der wichtigsten Erfindungen im Bereich der passiven Sicherheit stammt von dem gebürtigen Österreicher Béla Barényi. Barényi, der mit Unterbrechung von 1939 bis 1972 bei der Daimler-Benz AG arbeitete, galt damals als Pionier im Bereich der Fahrzeugsicherheit. Seine Idee von einer steifen Fahrgastzelle, die von deformierbaren Knautschzonen umgeben ist, wurde 1951 patentiert und revolutionierte seither die Karosseriekonstruktion. [DAI14]

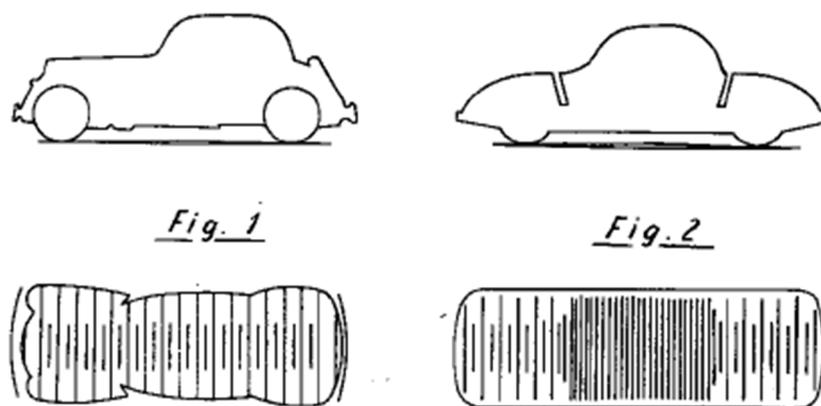


Abbildung 3: Knautschzonen [Barényi 1951]

Bis zu diesem Zeitpunkt war es üblich, Karosserien möglichst steif auszulegen, damit sie sich bei einer Kollision mit anderen Fahrzeugen oder Gegenständen nicht verformen. Die Beschleunigungen, die dadurch auf Fahrzeuginsassen wirken sind dabei jedoch extrem hoch und verursachen zum Teil schwere körperliche Schäden. Die Idee von Béla Barényi zielt darauf ab, diese Beschleunigungen, die auf den menschlichen Körper wirken, zu verringern. Hierbei wird, im Falle einer Kollision, durch gezielte Deformation von Crashelementen kinetische Energie in Verformungsenergie umgewandelt.

Lediglich die Fahrgastzelle wird bei diesem Konzept so steif ausgelegt, dass sie sich nicht verformt. Schließlich sichert sie den Fahrzeuginsassen den benötigten Überlebensraum während eines Unfalls.

Dieses System, verschiedene Elemente so auszulegen, dass sie sich bei entsprechenden Kraftniveaus gezielt verformen, wird bis heute in der Karosserieentwicklung angewendet und weiterentwickelt.

3 Bewertung der passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen

Wie in dem vorherigen Kapitel beschrieben, gibt es verschiedene Ansätze die Verkehrssicherheit zu steigern. In diesem Abschnitt soll darauf eingegangen werden, mit welchen Verfahren speziell die Sicherheitsmaßnahmen an Fahrzeugen überprüft und bewertet werden. In den meisten Fällen handelt es sich hierbei um Crashversuche, die sich an realen Unfallsituationen orientieren. Ziel ist es, diese Situationen so gut wie möglich zu reproduzieren, um die Schäden an den Fahrzeugen und die Verletzungen der Insassen möglichst genau bewerten zu können.

Hierzu muss vorab gesagt werden, dass solche Testverfahren, je nach Interesse, von verschiedenen Institutionen durchgeführt werden. Nicht nur die Fahrzeughersteller, die sicherstellen müssen, dass ihre Fahrzeuge den gesetzlichen Anforderungen entsprechen, unterziehen ihre Fahrzeuge verschiedenen Testprozeduren, sondern auch andere Organisationen führen Komponenten- oder Gesamtfahrzeugtests durch.

3.1 Komponententests

So entwickelte zum Beispiel das Allianz Zentrum für Technik Komponententests, um den Reparaturaufwand festzustellen, der bei leichten Auffahrunfällen, wie sie häufig im Stadtverkehr passieren, entsteht. Je nachdem, wie die Ergebnisse dieser Tests ausfallen, erfolgt die Versicherungseinstufung von Pkw. [ALL10]

Da ein Auffahrunfall bei geringen Geschwindigkeiten in der Regel nicht zu schweren Verletzungen bei den Insassen führt, gibt dieser Test wenig Auskunft darüber, wie sicher ein Fahrzeug tatsächlich ist.

3.2 Verbrauchertests

Um Verbrauchern genau diese Information bereit zu stellen, wie sicher ein Fahrzeug in Crashsituationen ist, gibt es zum Beispiel das Insurance Institute of Highway Safety (IIHS), den Allgemeinen Deutschen Automobil Club (ADAC) oder länderspezifische New Car Assessment Programme (NCAP). Diese unabhängigen Organisationen unterziehen neu auf den Markt gekommene Fahrzeuge einer Reihe von Tests in verschiedenen

Disziplinen. Anhand dieser Versuchsergebnisse wird eine für den Verbraucher nachvollzieh- und vergleichbare Sicherheitsbewertung vorgenommen.

Beim Euro NCAP erfolgt diese Sicherheitsbewertung anhand vier verschiedener Bewertungskriterien: dem Insassenschutz für Erwachsene, dem Insassenschutz für Kinder, Fußgängerschutz und Sicherheitsunterstützung. Bis auf den letzten Fall liegen all diesen Bewertungskriterien Crashversuche, mit so genannten Dummies, zugrunde. Hierbei werden Beschleunigungswerte der Insassen durch Messsensoren in den Dummies erfasst und mit kritischen Grenzwerten verglichen. [EUR14]

3.3 Gesetzliche Anforderungen

Bevor ein Fahrzeug für den Straßenverkehr zugelassen wird, müssen die einzelnen Bauteile sowie das Gesamtfahrzeug bereits eine ganze Reihe gesetzlich vorgeschriebener Tests bestanden haben, um ein Minimum an Sicherheit zu gewährleisten. In der Bundesrepublik Deutschland erfolgt die Zulassung seit 2009 durch die EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung. Diese Zulassung basiert auf einem 1958 geschlossenen und 1998 geänderten Übereinkommen im Rahmen der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (englisch United Nations Economic Commission for Europe). In diesem Übereinkommen werden einheitliche technische Vorschriften und Bedingungen (so genannte ECE-Vorschriften) für die Genehmigung von Ausrüstungsgegenständen und Teilen von Kraftfahrzeugen und deren Anerkennung festgehalten. Dadurch verpflichten sich die Unterzeichner, ein Bauteil oder ein Fahrzeug, welches in einem anderen Mitgliedsstaat zugelassen wurde, ebenfalls zuzulassen, beziehungsweise anzuerkennen. Durch das Übereinkommen, dem zurzeit 49 (größtenteils europäische) Staaten angehören, wurden seit 1958 mehr als 100 ECE-Regelungen erlassen. Viele dieser Regeln sind bei allen Mitgliedsstaaten anerkannt und in das nationale Recht integriert. In den ECE-Vorschriften ECE-R 94 und ECE-R 95 werden beispielsweise die gesetzlichen Crashtests für den Frontalaufprall und den Seitenaufprall definiert, wie sie in ähnlicher Form auch bei den NCAP-Tests durchgeführt werden. [BMV14]

Neben Europa und China sind die Vereinigten Staaten von Amerika einer der wichtigsten Märkte der deutschen Automobilindustrie. Allerdings werden in den USA die ECE-Regelungen nicht anerkannt. Hier gelten die von der National Highway Traffic Safety

Administration erlassenen Federal Motor Safety Standards (FMVSS), das amerikanische Pendant zu den ECE-Regelungen. Auch in den FMVSS sind Testverfahren und Anforderungen an Fahrzeuge und deren Bauteile festgehalten.

Da heutzutage die Sicherheit von Pkw eines der wichtigsten Kaufkriterien darstellt, sind die Ergebnisse, die ein Fahrzeug bei all den unterschiedlichen Tests erreicht, für die Verbraucher nicht unerheblich. Aufgrund dieser Tatsache, die auch den Fahrzeugherstellern bewusst ist, gehört das Bestehen dieser Crashtests bereits in der Konzeptionierung zu den Entwicklungszielen jedes einzelnen Fahrzeugs. Zudem gehen Fahrzeughersteller dazu über, eigene firmeninterne Prüfverfahren durchzuführen, die oftmals zahl- und umfangreicher als die der Gesetzgeber sind.

Allerdings muss man sagen, dass die gesetzlich vorgeschriebenen Crashtests und deren Überprüfung nicht unumstritten sind. Da die Fahrzeughersteller die genauen Anforderungen der Tests kennen, ist es ihnen möglich, ihre Fahrzeuge auf eben diese Lastfälle zielgenau auszulegen. Werden einige Parameter der angewendeten Tests jedoch geringfügig verändert, kann dies bereits dazu führen, dass die Ergebnisse negativ ausfallen. Ein Beispiel hierfür ist der so genannte Small-Overlap-Versuch, der vom IIHS eingeführt wurde und den zahlreiche Fahrzeuge zu Beginn nicht bestanden haben.

3.4 Dacheindrückttest

Im Verlauf dieser Arbeit wird speziell auf den Lastfall der Dacheindrückung eingegangen. Aus diesem Grund werden hier die verschiedenen Testverfahren, mit denen das Dach eines Pkw hinsichtlich seiner Steifigkeit überprüft wird, genauer dargestellt.

Wie in Abbildung 4 zu sehen, ist der Überschlag eines Pkw, welchen die Dacheindrückung simulieren soll, im Vergleich zu anderen Unfallvorgängen, ein sehr seltenes Ereignis. Vielleicht ist das auch der Grund, warum es in den europäischen Normen dazu keine spezifischen Regelungen gibt. Richtlinien hierfür kommen hauptsächlich aus den USA. Wenn ein solcher Unfall jedoch einmal passiert, so stellt er, besonders bei Cabriolets, die höchsten Anforderungen an die Belastbarkeit des Dachrahmens.

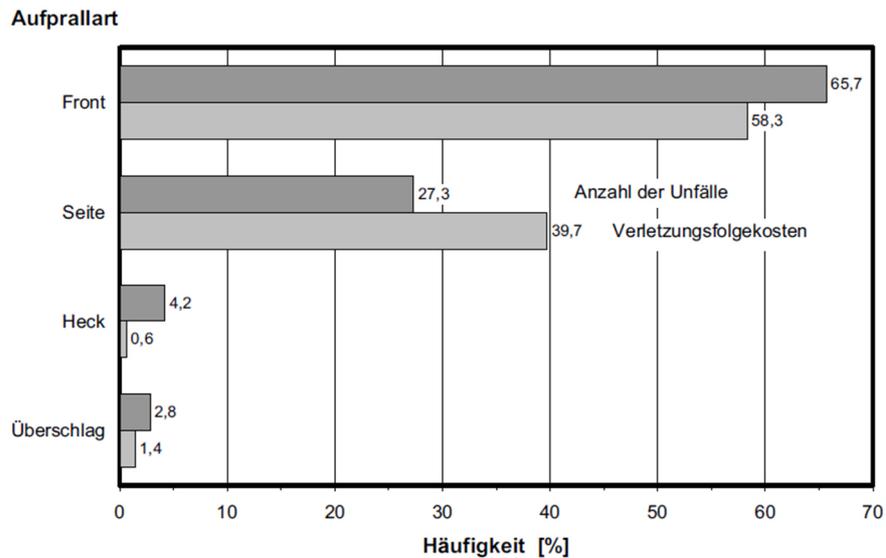


Abbildung 4: Kollisionsarten und die entstehenden Verletzungsfolgekosten [Kramer 2013]

3.4.1 FMVSS 216a

Die FMVSS 216a ist eine für die USA geltende Norm, in der die Vorgehensweise zur Überprüfung der Dachsteifigkeit von Pkw beschrieben wird. Das Testverfahren sieht vor, dass die Dachstruktur unter einer definierten Kraft F nicht mehr als 127mm nachgeben darf. Zudem darf ein Kontakt zwischen dem Interieur der Dachstruktur und dem Kopf eines 50%-Mann-Dummys eine Kraft von 222N nicht überschreiten. Unter einem 50%-Mann versteht man, dass 50% aller Männer kleiner und 50% aller Männer größer sind. Er entspricht somit genau dem durchschnittlichen männlichen Autofahrer. Sollte eine der beiden Anforderungen nicht erfüllt werden, so gilt der gesamte Test als nicht bestanden.

Die Kraft F ist für Fahrzeuge mit einer Gesamtmasse von weniger als 2722kg durch $F = 3 \cdot \text{Fahrzeuggesamtmasse [kg]} \cdot 9.8\text{m/s}^2$ und für Fahrzeuge mit einer Gesamtmasse von 2723kg bis 4536kg durch $F = 1,5 \cdot \text{Fahrzeuggesamtmasse [kg]} \cdot 9.8\text{m/s}^2$ definiert. Diese Kraft wird durch einen 762mm mal 1829mm großen Stempel, der um 5° zur Fahrzeuglängsachse und um 25° zur Querachse geneigt ist, auf den Dachrahmen aufgebracht. Angriffspunkt ist hierbei der vorderste Punkt der Dachstruktur. Diesen Punkt muss der Stempel zusätzlich um 254mm in Fahrzeuglängsrichtung nach vorne überdecken. Die Geschwindigkeit, mit der der Stempel auf das Dach drückt, darf 13mm/s nicht überschreiten. [NHT09]

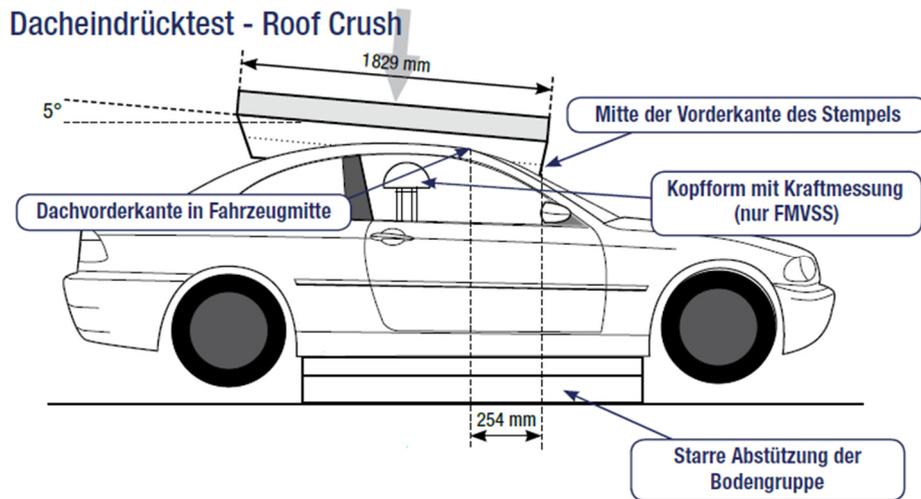


Abbildung 5: Seitenansicht Dacheindrücktest [CAH14]

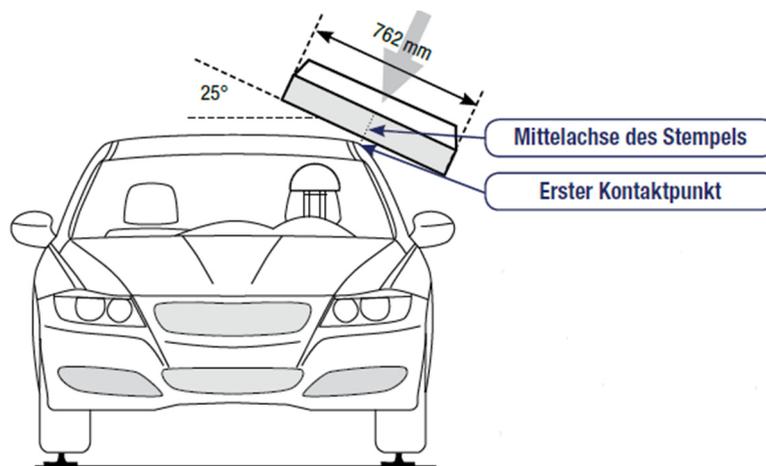


Abbildung 6: Frontansicht Dacheindrücktest [CAH14]

Um zu verhindern, dass das Fahrzeug während des Tests unter der Belastung einfedert, steht es während des Tests nicht auf seinen Rädern, sondern wird über den Schweller, wie in Abbildung 7 gezeigt, mit einer starren Struktur aus Stahlprofilen verbunden.

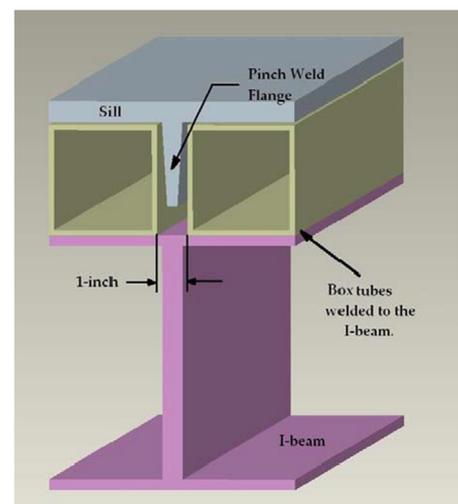


Abbildung 7: Aufbau der Schwelleraufnahme [NHT09]

3.4.2 IIHS Roof strength test

Als unabhängiges Unternehmen führt das Insurance Institute for Highway Safety seit 2009 ebenfalls einen Dacheindrücktest durch. Der Aufbau dieses Tests gleicht dabei dem der Norm FMVSS 216a. Er unterscheidet sich lediglich in der Durchführung und in der Bewertung der Ergebnisse. Während bei dem Versuch nach FMVSS 216a eine definierte Kraft über den Stempel in das Fahrzeug eingeleitet wird, legt der Stempel beim IIHS Roof strength test einen definierten Weg von 127mm zurück. Die Eindrückgeschwindigkeit beträgt dabei 5mm/s.

Der Test nach IIHS hat dabei im Sinne eines Verbrauchertests den Anspruch, Informationen darüber zu geben, in wie weit ein entsprechendes Fahrzeug bestimmten Sicherheitsanforderungen genügt. Zu diesem Zweck geschieht die Bewertung durch die so genannten Strength-to-weight ratio (SWR). Er setzt sich aus der maximal gemessenen Kraft während der Dacheindrückung und der Fahrzeuggesamtmasse zusammen: $SWR = F_{max} / m \times g$. Ähnlich wie bei den NCAP-Untersuchungen geschieht, je nach SWR, eine Einstufung des Fahrzeugs nach der unten stehenden Tabelle. [CAH14]

Tabelle 1: Strength-to-weight ratio

SWR	Rating
≥ 4,00	Good
≥ 3,25 bis <4,00	Acceptable
≥ 2,50 bis <3,25	Marginal
< 2,50	Poor

3.4.3 ADAC-Test

Als letztes Beispiel für die Simulation eines Überschlags soll an dieser Stelle ein vom ADAC durchgeführter, dynamischer Test vorgestellt werden. Bei diesem Test stehen die Versuchsfahrzeuge auf einer um 23° geneigten Ebene quer zur Fahrtrichtung. Der Schlitten wird auf 48,3km/h (30mph) beschleunigt und anschließend schlagartig abgebremst. Durch diese starke Verzögerung fällt das bereits schief gestellt Auto von dem Trägerschlitten und schlägt im Zuge einer Rotation um die Längsachse mit dem Dachbereich auf den Boden auf (siehe Abbildung 8). Durch diese standardisierte Prozedur lässt sich die Situation eines realen Überschlags an verschiedenen Fahrzeugen vergleichend wiederholen.



Abbildung 8: Rollover eines Cabriolets [ADA14]

Bei einem Test im Jahre 2014 mit vier verschiedenen Mittelklasse Fahrzeugen trat beim ADAC das erschreckende Ergebnis auf, dass bei allen Fahrzeugen die Köpfe der Insassen während des Überschlags Kontakt mit der Fahrbahn hatten und das trotz Überrollschutzsystemen und Gurtstraffern. [ADA14]

4 Karosseriebauweisen

Als Karosserie bezeichnet man im Allgemeinen den gesamten Aufbau eines Kraftfahrzeugs. Das Wort Karosserie leitet sich von dem französischen Wort *carosse* ab, was Kutsche bedeutet. Im Kutschenbau liegen auch die Ursprünge der Karosserieentwicklung. Zu den Aufgaben einer modernen Pkw-Karosserie gehören z.B. die grundlegende Formgebung des Gesamtfahrzeugs und die Aufnahme der meisten Aggregate sowie Türen und Klappen. Bei einem Unfall ist die Karosserie hauptverantwortlich für die passive Sicherheit. In diesem Fall muss sie große Bewegungsenergien absorbieren und in Verformungsenergie umwandeln. Gleichzeitig muss sie eine hohe Steifigkeit und Festigkeit besitzen, um den Insassen einen geeigneten Überlebensraum zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren ist die Karosserie maßgeblich am Komfort des Gesamtfahrzeugs beteiligt. [Braess 2013]

Über die Jahre wurden viele verschiedene Karosseriebauweisen entwickelt, auf die die Fahrzeughersteller heute zurückgreifen. Im Folgenden werden die wichtigsten Bauarten beschrieben.

4.1 Die nicht selbsttragende Karosserie

Die nicht selbsttragende Karosserie ist eine Bauweise, die ihren Ursprung noch in der Zeit des Kutschenbaus hat. Häufig wird sie auch als Leiterraahmenbauweise bezeichnet. Diesen Namen bekommt sie daher, da das Chassis aus zwei Längsträgern besteht, die durch Querträger miteinander verbunden werden und so der Form einer herkömmlichen Leiter ähneln (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Leiterraahmen eines Lkw [TOW14]

Auf diesen Rahmen, der sämtliche Lasten trägt, können je nach Anforderung, verschiedene ladungsspezifische Karosserieaufbauten aufgesetzt werden. Angewendet wird diese Bauart heute fast ausschließlich im Geländewagen- und im Lastkraftwagenbau. [Wallentowitz; Freialdenhoven; Olschewski 2009]

4.2 Die selbsttragende Karosserie

In Deutschland wurde 1935 mit dem Modell Olympia von Opel erstmal eine selbsttragende Karosserie in der Großserienfertigung eingeführt. Seither hat dieses Konzept Bestand und ist bei heutigen Pkw eine der dominierenden Bauweisen. Bei einer selbsttragenden Karosserie wird auf die Trennung zwischen Karosserieaufbau und Chassis verzichtet. Die Karosserie ist ein integraler Bestandteil des Gesamtfahrzeugs, deren Struktur alle Kräfte und Momente aufnimmt. Alle Komponenten wie Motor, Getriebe und Achsen, werden im Nachhinein direkt an der Karosserie befestigt. Häufig werden selbsttragende Karosserien in der Schalenbauweise hergestellt. Hierbei werden hauptsächlich Tiefziehbleche durch unterschiedliche Verbindungstechniken unlösbar miteinander verbunden. Durch diese Vorgehensweise lässt sich in der Fertigung ein hoher Automatisierungsgrad erreichen, was die selbsttragende Karosserie in Schalenbauweise hauptsächlich für den Großserienbereich mit hohen Stückzahlen interessant macht. [UAU14]



Abbildung 10: Karosserie in selbsttragender Schalenbauweise [MOT14]

4.3 Die Space-Frame-Bauweise

Die Space-Frame-Bauweise zeichnet sich dadurch aus, dass sie ähnlich wie ein Fachwerk aufgebaut ist. Die Karosserie bildet ein Skelett aus Strangpressprofilen, die über Gussknoten miteinander verbunden sind. Flächige Bauteile, wie das Dach oder die Frontscheibe, dienen als Schubfelder und steifen die Karosserie zusätzlich aus. Ein bekannter Vertreter dieser Bauweise ist der Audi Space Frame (ASF), eine selbsttragende Aluminiumkarosserie, die 1994 erstmalig in Form des damaligen Audi A8 eingeführt wurde. Durch den massiven Einsatz von Aluminium verspricht man sich von diesen Karosserien vor allem ein deutlich reduziertes Gewicht gegenüber Karosserien aus Stahl. [AUD14]

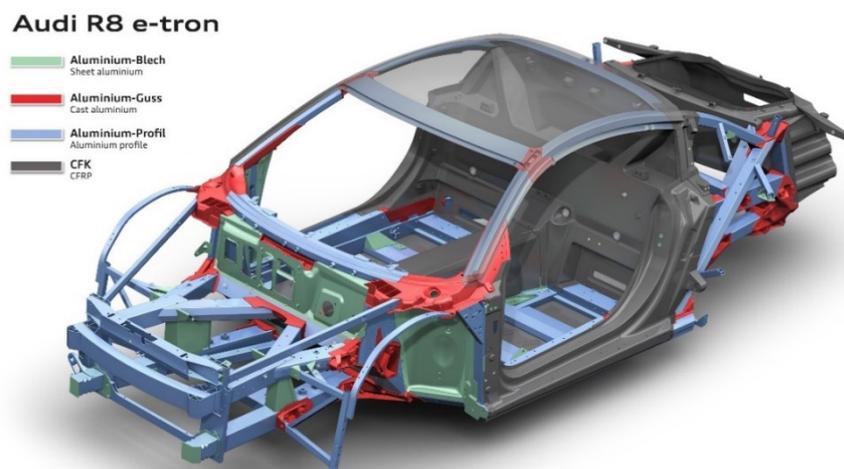


Abbildung 11: Karosserie des Audi R8 e-tron in Space-Frame-Bauweise [AUD14a]

4.4 Monocoque-Bauweise

Als Monocoque bezeichnet man eine aus einem Teil bestehende Fahrgastzelle, die die gesamten Lasten aufnimmt und gleichzeitig alle notwendigen Anbindungspunkte zu Nachbarbaugruppen bereitstellt. Gefertigt wird diese schalenartige Struktur in der Regel aus faserverstärkten Kunststoffen. Ursprünglich aus dem Flugzeugbau kommend, hat sich diese Art von Karosserie hauptsächlich in einigen Klassen des Motorsports und bei Supersportwagen mit geringer Stückzahl durchgesetzt. Eine solche Struktur lässt sich durch große Gestaltungsfreiheit und die gezielte Variation von Wandstärken und Faserrichtungen optimal an gegebene Belastungen anpassen und bietet somit ein großes

Potential, was Gewichteinsparung angeht. In der Abbildung 12 ist das Monocoque des McLaren P1 zu sehen.



Abbildung 12: Monocoque des McLaren P1 [MCL14]

Der hohe Fertigungsaufwand, aufwendige Reparaturen und der hohe Preis eines solchen Monocoques sorgend allerdings dafür, dass diese Bauweise im Bereich der Großserienfertigung bisher wenig angewendet wird. Nichtsdestotrotz sind besonders kohlefaserverstärkte Kunststoffe für die Zukunft des Fahrzeugbaus ein äußerst interessanter Werkstoff, deren Einsatz auch in der Großserie mehr und mehr Einzug halten wird. [Trzesniowski 2008]

5 Das Cabriolet

5.1 Allgemeines

Der Begriff Cabriolet stammt aus dem französischen (cabrioler = Luftsprünge machen) und wurde als erstes als Bezeichnung für leichte, offene Pferdewagen benutzt. Cabriolet, im heutigen Sinne, ist das Synonym für eine Fahrzeuggattung, bei der es möglich ist, das Dach wegzuklappen oder komplett abzunehmen. In der Anfangszeit waren solche Fahrzeuge klassischerweise mit Stoffdächern ausgerüstet. Mit der Zeit wurden aber auch Modelle entwickelt, die Stahl-Klappdächer, so genannte „Retractable Hardtops“ (RTHs) besitzen, welche in mehreren Segmenten verstaut werden können.

Innerhalb des Fahrzeugsegments der Cabriolets unterscheidet man je nach Bauform z.B. zwischen einer Cabrio-Limousine, bei der die B- und C-Säule bei geöffnetem Dach stehen bleiben, dem viersitzigen Cabriolet, das häufig auf bestehenden Coupé Varianten basiert oder dem Roadster, einem zweisitzigen Sportwagen. [Braess 2013]

Da bei Cabriolets hauptsächlich der Fahrspaß im Vordergrund steht und die Funktionalität durch den begrenzten Raum deutlich eingeschränkt wird, ist es eher ein Nischenfahrzeug. Am ersten Januar 2012 waren in Deutschland 1,8 Millionen Cabriolets zugelassen. Bei insgesamt 42,9 Millionen zugelassenen Pkw entspricht das ca. 4,2% des Gesamtbestandes [KBA14a]. Aufgrund der relativ geringen Stückzahl von Cabriolets, werden sie häufig als Varianten bestehender Großserienfahrzeuge angeboten. Aus Kostengründen umgehen die Hersteller dadurch eine aufwendige Neuentwicklung.

Durch das Wegfallen des Dachs als ein tragendes Element der Gesamtkarosserie, verliert ein Fahrzeug einen Großteil seiner Karosseriesteifigkeit, die maßgeblich an dem Komfort, der Fahrdynamik, der Sicherheit und der Haltbarkeit eines Fahrzeugs beteiligt ist. Durch aufwendige Verstärkungsmaßnahmen, besonders im Bereich der Bodengruppe, muss dieser Verlust kompensiert werden. Dies geschieht vor allen Dingen durch Vergrößerung von Schwellerquerschnitten und das Einbringen zusätzlicher Querverstrebungen und Querwänden.

5.2 Sicherheit von Cabriolets

Eine besondere Herausforderung für die Fahrzeughersteller ist die Sicherheit von Cabriolets in Crashsituationen, denn für sie gelten die gleichen Sicherheitsanforderungen wie für alle anderen Pkw auch. Dadurch, dass bei Cabriolets jedoch das Dach und in den meisten Fällen auch die B-Säule nicht vorhanden sind, geht ein wichtiger Lastpfad, der Weg, über den Lasten von der Struktur gezielt aufgenommen werden, verloren. Selbst die RHTs tragen zur Karosriesteifigkeit beinahe nichts bei. Die Lastpfade die bei einem Cabriolet entfallen sind in der nachfolgenden Abbildung markiert.

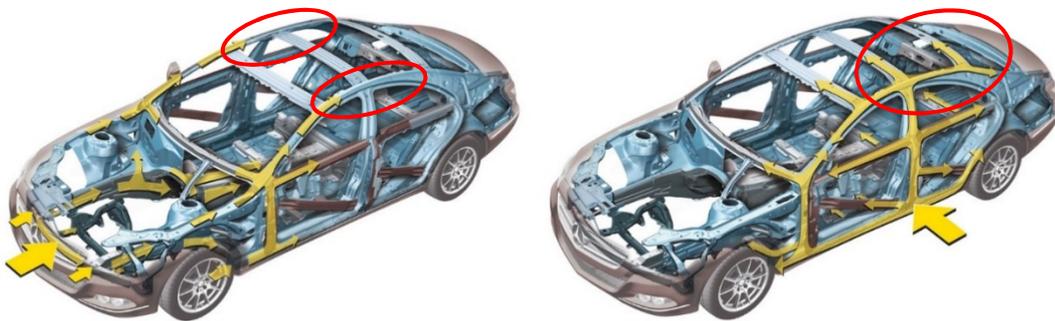


Abbildung 13: Lastpfade eines Pkw [BLO10]

Besonders im Falle eines Überschlags, bei dem zwischen der Straße und den Köpfen der Insassen kein schützendes Dach vorhanden ist, muss die restliche Struktur dafür Sorge tragen, dass ein ausreichender Überlebensraum zur Verfügung steht. Zu diesem Zweck werden zum einen der vordere Scheibenrahmen und die A-Säule massiv verstärkt, zum anderen befinden sich direkt hinter den Köpfen der Insassen zusätzliche Überrollbügel. Diese können entweder starr montiert und immer sichtbar sein oder aber es handelt sich um einen ausfahrbaren Überrollschutz, welcher nur im Falle eines Überschlags, sensorgesteuert herausschnellt und innerhalb eines Bruchteils einer Sekunde die Köpfe der Insassen schützt (Abbildung 14).



Abbildung 14: Aktiver und passiver Überrollschutz [BMW14]

Zusätzlich dazu werden in modernen Cabriolets spezielle Airbagsysteme sowie Gurtstraffer verbaut, um zu verhindern, dass Gliedmaßen oder eine komplette Person im Zuge eines Unfalls aus dem Fahrzeug geschleudert werden. Wie bei geschlossenen Pkw, sind auch bei Cabriolets, zusätzlich zu den passiven Sicherheitseinrichtungen, aktive Fahrerassistenzsysteme verbaut. So verhindern beispielsweise ABS und ESP, dass ein Fahrzeug in eine für die Insassen bedrohliche Fahrsituation gerät.

All diese Maßnahmen, die an einem Cabriolet vorgenommen werden müssen, führen jedoch dazu, dass das Gesamtgewicht, im Vergleich zu dem jeweiligen modellgleichen Coupé, deutlich ansteigt.

Tabelle 2: Vergleich des Leergewichts von Coupé zu Cabriolet

Fahrzeug	Leergewicht (in kg)
Audi A5 Coupé	1500
Audi A5 Cabriolet	1695
Mercedes E200 Coupé	1585
Mercedes E200 Cabriolet	1715
BMW 4er Coupé	1525
BMW 4er Cabriolet	1755

6 Leichtbaukonzepte und -fertigungsverfahren

Nicht nur bei Cabriolets, sondern im Fahrzeugbau allgemein, spielt das Gesamtgewicht eine entscheidende Rolle. Durch gestiegene Sicherheitsanforderungen, dem Wunsch nach immer mehr Komfort, umfangreiche Zusatzausstattungen und das Verlangen nach vielseitigen Fahrzeugen, stieg das Gesamtfahrzeuggewicht im Durchschnitt in den letzten Jahren immer weiter an. Da sich ein erhöhtes Fahrzeuggewicht jedoch negativ auf einen Teil der Fahrwiderstände (z.B. auf Roll- und Beschleunigungswiderstandskraft) auswirkt, steigen zusammen mit dem Gewicht eines Autos ebenso der Kraftstoffverbrauch und damit auch der CO₂-Ausstoß. Auf diesen Trend reagierte auch der Gesetzgeber, und so wurde in den Jahren 2007/2008 eine EU-Regelung verabschiedet, die den durchschnittlichen CO₂-Ausstoß einer Fahrzeugflotte auf 130g/km begrenzt. Dieser Wert wird stufenweise eingeführt und muss von den Original Equipment Manufacturers (OEMs) bis 2015 eingehalten werden. Bis zum Jahr 2020 wird der Grenzwert noch einmal auf 95g CO₂/km gesenkt. Sollte er nicht erreicht werden, drohen den Fahrzeugherstellern empfindliche Geldstrafen. [Friedrich 2013]

Um die EU-Regelungen zu erfüllen, rückt auch das Thema Leichtbau, als eine der Stellschrauben, um den CO₂-Ausstoß zu minimieren, immer weiter in den Vordergrund. Obwohl Leichtbau an allen Baugruppen eines Fahrzeugs betrieben werden kann und muss, spielt hierbei die Karosserie eine besondere Rolle. Sie macht mit ca. 35-40% Gewichtsanteil am Gesamtgewicht eines Pkw einen bedeutenden Teil aus und bietet somit gleichzeitig ein ebenso großes Einsparpotenzial.

Die Leichtbaukonzepte, die zurzeit in der Fahrzeugtechnik verfolgt werden, umfassen eine große Anzahl an verschiedenen Ansätzen. Im Folgenden sollen einige Aspekte dargestellt werden, die während der Bearbeitung dieser Arbeit Beachtung finden.

6.1 Warmumformen – Presshärten

Eine Möglichkeit, Gewicht im Herstellungsprozess einer Karosserie einzusparen, ist der Einsatz von warmumgeformten Stählen, der in der Automobilindustrie zurzeit verstärkt zum Einsatz kommt. Besonders geeignet für dieses Verfahren sind borlegierte Stähle, wie z.B. der Mangan-Bor-Stahl 22MnB5. Dieser Stahl ist dadurch gekennzeichnet, dass er sowohl warm als auch kalt sehr gut umformbar ist, sich mit allen üblichen

Schweißverfahren fügen lässt und eine sehr hohe Festigkeit besitzt. Dementsprechend lassen sich hiermit äußerst komplexe Bauteile herstellen, die besonders in crashrelevanten Bereichen zum Einsatz kommen.

Die sehr hohe Festigkeit erhalten Bauteile aus diesem Stahl während ihres Umformprozesses, dem so genannten Presshärten. Dabei werden die zugeschnittenen Platinen in Öfen auf eine Temperatur von ungefähr 950°C erhitzt, wobei sich ein austenitisches Gefüge einstellt. Die erwärmten, glühenden Platinen werden anschließend in eine Tiefziehpresse eingelegt. Während des Pressengangs wird das Bauteil umgeformt und gleichzeitig gezielt abgekühlt. Durch die Abkühlung wandelt sich das Austenit, das durch die Erwärmung entstanden ist, in ein martensitisches Gefüge um. Dieses Gefüge ist schließlich für die hohe Festigkeit des Werkstoffs verantwortlich. Wie in der folgenden Abbildung zu erkennen, erreicht der 22MnB5 nach dem Umformen eine Festigkeit $R_m > 1500\text{MPa}$, eine Streckgrenze $R_{P0,2} > 1100\text{MPa}$ und eine Bruchdehnung $A_{80} \sim 5\%$.

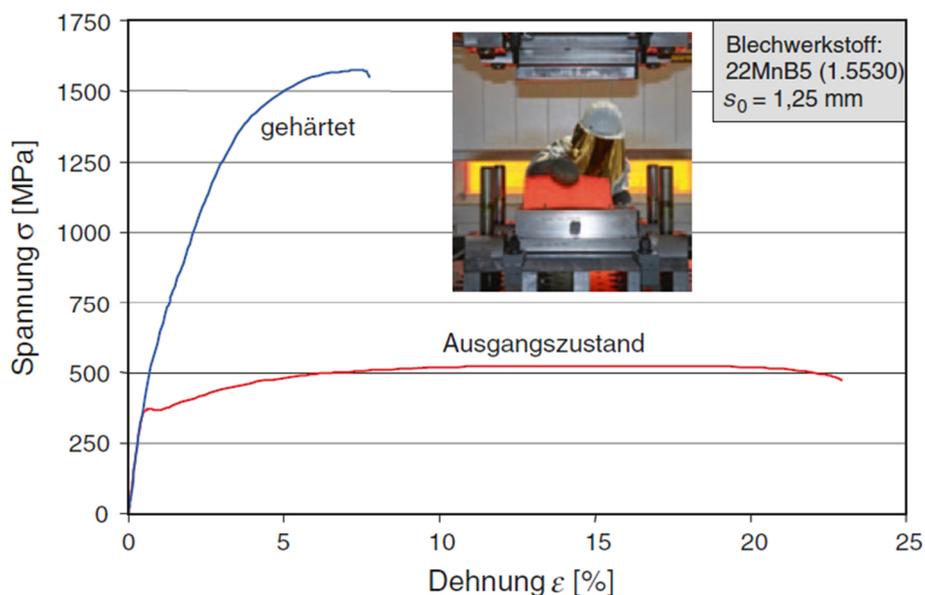


Abbildung 15: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von 22MnB5 [Friedrich 2013]

Eine schnelle und gezielte Abkühlung im Tiefziehwerkzeug wird durch einen Pressenstempel gewährleistet, der während des Prozesses gekühlt wird.

Das Leichtbaupotential dieses Verfahrens liegt darin, dass die Wandstärken von Bauteilen, im Vergleich zu konventionellen Stählen, deutlich reduziert werden können. [Friedrich 2013]

6.2 Tailored Blanks

Leichtbau bedeutet auch, Material ziel- und belastungsgerecht einzusetzen. Eine Möglichkeit, dieser Anforderung nachzukommen, besteht durch den Einsatz von Tailored Blanks. Ein Tailored Welded Blank ist eine Blechplatte, die je nach Anforderung des herzustellenden Bauteils, aus Blechen unterschiedlicher Materialstärke und -güte, mittels Laserschweißen zusammengefügt wird. Diese Platte kann z.B. durch Tiefziehen zu dem endgültigen Bauteil umgeformt werden. Eine weitere Möglichkeit, die Blechstärken beanspruchungsgerecht auszulegen, ist die Blechstärkenvariation während des Walzprozesses. Die Wandstärken der Platte werden hierbei dadurch eingestellt, dass die Walzen während des Walzprozesses entweder auseinander oder zusammenfahren.

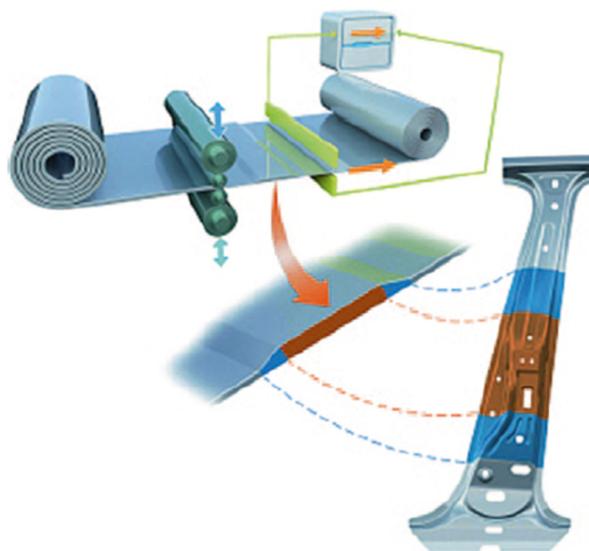


Abbildung 16: Verfahren zur Herstellung eines Tailored Rolled Blank [Friedrich 2013]

Ähnlich wie bei den Tailored Welded Blanks, funktioniert auch die Herstellung von so genannten Patchwork Blanks. Bei ihnen werden einzelne Bereiche einer Platte durch punkt- oder lasergeschweißte Blechstücke, so genannte Patches, verstärkt und im Nachhinein umgeformt. [Friedrich 2013]

6.3 Innenhochdruckumformen

Beim Innenhochdruckumformen (IHU) handelt es sich um ein Verfahren, mit dem aus einfachen Hohlkörpern, wie Rohren und Profilen, komplex geformte Bauteile hergestellt werden. Nachdem die umzuformenden Halbzeuge in das Werkzeug eingelegt und dieses geschlossen wurde, wird es mit einem flüssigen Wirkmedium gefüllt. Durch den hohen Druck, der im Inneren des Halbzeugs entsteht, wird dieses aufgeweitet und an die Kontur des Werkzeugs angeformt. Axialstempel sorgen während des Prozesses dafür, dass Material in das Werkzeug nachgeschoben wird und garantieren somit eine gleichmäßige Umformung. In einem letzten Schritt wird das Bauteil im Werkzeug noch kalibriert und erhält so seine endgültige Form (siehe Abbildung 17). [Friedrich 2013]

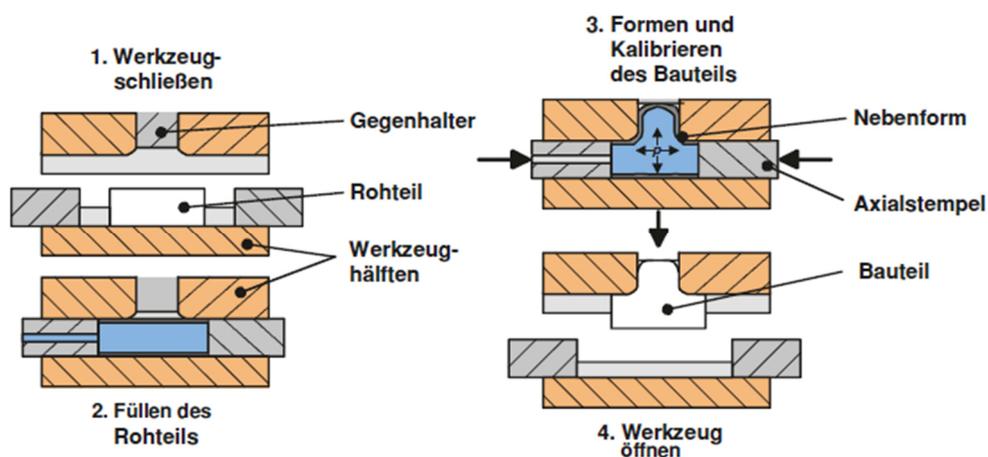


Abbildung 17: Verfahrensschritte des Innenhochdruckumformens [Friedrich 2013]

Die Vorteile, die dieses Verfahren mit sich bringt, sind die hohe und homogene Verfestigung durch die Umformung, hohe Steifigkeit aufgrund geschlossener Formen, die Möglichkeit komplexe Geometrien durch ein einziges Teil abzubilden sowie die hohe Genauigkeit, die durch das Kalibrieren entsteht. Außerdem kann beim IHU auf Verbindungsflansche verzichtet werden, die bei einer zweischaligen Blechvariante nötig sind. Durch das Wegfallen der Flansche ist es möglich, die Querschnitte der eigentlichen Struktur zu erhöhen und somit die Steifigkeit zu verbessern.

Durch den geschickten Einsatz des Innenhochdruckumformens lässt sich die Anzahl von Bauteilen und deren Wandstärken reduzieren, was insgesamt zu einer Gewichtsabnahme führt.

6.4 Multimaterial Leichtbau

Je nachdem, in welchem Segment sich ein Fahrzeug bewegt, sind die Möglichkeiten, Leichtbau zu betreiben, sehr unterschiedlich ausgeprägt. So wird im Bereich der Klein- und Kleinwagen, aufgrund der Kosten und der Wirtschaftlichkeit, die Stahlkarosserie auch in den nächsten Jahren weiterhin den Markt dominieren. Anders sieht es jedoch bei den Fahrzeugen der oberen Mittelklasse, der Oberklasse und den Sportwagen aus. Bei diesen höherpreisigen Fahrzeugsegmenten sind die Anforderungen, bezüglich eines geringen Fahrzeuggewichts, nicht alleine mit dem Material Stahl zu erfüllen. Hier geht der Trend dazu, durch den geschickten Einsatz von Leichtmetallen wie Aluminium und Magnesium, und bei Supersportwagen und Kleinsterienfahrzeugen, wie dem VW XL1, durch faserverstärkte Kunststoffe das Fahrzeuggewicht weiter reduzieren. Diese Art von Leichtbau wird bereits seit mehreren Jahren angewendet und als Material-Mischbauweise bzw. Material-Hybridbauweise bezeichnet.

Besonders für die Verbindungstechnik stellt diese Form des Leichtbaus eine große Herausforderung dar. So gilt es, Werkstoffe mit unterschiedlichsten Eigenschaften prozesssicher zu verbinden und gleichzeitig Kontaktflächen unterschiedlicher Materialien voneinander zu isolieren, um Korrosion zu vermeiden. Konventionelle, thermische Fügeverfahren, wie das Widerstandspunktschweißen, werden diesen Anforderungen jedoch nicht gerecht. Aufgrund unterschiedlicher Schmelztemperaturen, Wärmeausdehnungskoeffizienten und Wärmeleitfähigkeiten ist es z.B. nicht ohne weiteres möglich, Aluminium mit Stahl zu verbinden. Aus diesem Grund gewinnen mechanische Fügeverfahren bei den Material-Mischbauweisen immer mehr an Bedeutung. [Friedrich 2013]

Durch die Verbesserung von Fügeverfahren und deren Prozesssicherheit, sowie verringerten Kosten in der Materialherstellung von Leichtmetallen und faserverstärkten Kunststoffen, wird dem Multimaterialleichtbau in der Zukunft eine noch größere Bedeutung zukommen.

7 Fügeverfahren

Die Anforderung, die an Fügeverfahren gestellt wird, ist in erster Linie das Erfüllen der geforderten Festigkeit der Verbindung. In der Serienfertigung spielen zudem die Kosten, die Flexibilität, die Automatisierbarkeit und die Prozesssicherheit eine entscheidende Rolle. Welche Fügeverfahren zum Einsatz kommen, hängt zudem im Wesentlichen von den eingesetzten Werkstoffen ab. Der Einsatz und die Kombination verschiedenster Materialien im Fahrzeugbau sind nur durch die immer weiter voranschreitende Entwicklung der Fügeverfahren möglich. Typische Verbindungstechniken in der Fahrzeugindustrie sind das Widerstandspunktschweißen, MIG-Schweißen, Halbhohlstanznieten, Flow-Drill-Schrauben und das Kleben. Auf diese Verfahren, die auch im Rahmen der Arbeit eine Rolle spielen, soll hier eingegangen werden.

7.1 Widerstandspunktschweißen

Überall dort, wo Bauteile aus Stahl aufeinander treffen, ist das Widerstandspunktschweißen (WPS) immer noch das vorherrschende Fügeverfahren. WPS gehört zu der Gruppe der Pressschweißverfahren. Über verschiedenste Schweißzangen, an denen Kupferelektroden befestigt sind, werden der Schweißstrom und die Presskraft auf eine punktförmige Fläche aufgebracht. Nachdem die Elektrodenkraft das Bauteil fixiert hat, wird der Strom eingeschaltet. Durch die Widerstandserwärmung werden die Bauteile an der zu verbindenden Stelle aufgeschmolzen. Ist der Strom abgeschaltet, so werden die beiden Fügepartner, unter Einwirkung der Elektrodenkraft und durch die Erstarrung der Schmelze, miteinander verbunden. Auf die Verwendung von Schweißzusätzen wird bei diesem Verfahren vollkommen verzichtet. Um die Wärmeeinflusszone möglichst gering zu halten, in der sich das Gefüge des Materials durch die Erwärmung verändert, wird beim WPS mit Strömen bis zu 100kA und mit möglichst kurzen Schweißzeiten gearbeitet. Wegen seiner guten Automatisierbarkeit wird das WPS auch in der Automobilindustrie eingesetzt. Bevorzugter Anwendungsbereich ist das Fügen von Fahrzeugkarosserien, das durch Industrieroboter auf riesigen Schweißstraßen vollkommen automatisiert abläuft. [Westkämper; Warnecke 2010]

Unter gewissen Umständen lassen sich auch Aluminiumbauteile durch WPS fügen. Einige Materialeigenschaften von Aluminium sorgen jedoch dafür, dass andere

Fügeverfahren dem WPS vorgezogen werden. Grund hierfür sind die höhere Wärmeleitfähigkeit und der geringere elektrische Widerstand von Aluminium, wodurch deutlich höhere Ströme und Elektrodenkräfte als bei Stahl nötig sind. Des Weiteren kommt es sehr schnell zu Ablagerungen von Aluminium an den Kupferelektroden, wodurch diese deutlich schneller verschleifen. Ein weiterer Punkt ist die dünne Oxidschicht, mit der alle Aluminiumbauteile überzogen sind. Um das WPS für Aluminium in der Serienfertigung einzusetzen, muss diese Oxidschicht durch mechanische oder chemische Oberflächenbehandlungen aufgebrochen werden. Nur so lässt sich das geforderte Schweißergebnis sicherstellen. Diese Oxidschicht ist äußerst temperaturbeständig, wirkt elektrisch isolierend und erschwert somit den Schweißvorgang und die Reproduzierbarkeit des Schweißergebnisses. [Ostermann 2007]

7.2 Schutzgasschweißen

Zu der Gruppe der Metallschutzgasschweißungen gehören das Metall-Inertgasschweißen (MIG-Schweißen) und das Metall-Aktivgasschweißen (MAG-Schweißen). Vom Ablauf funktionieren beide Verfahren nach dem gleichen Prinzip, jedoch verwenden sie unterschiedliche Gase, die den Schweißprozess beeinflussen. Bei dem MIG-Schweißen sind das entweder die Edelgase Argon oder Helium, die den Luftsauerstoff verdrängen und das Schweißgut so vor der Oxidation durch die Atmosphäre schützen. Beim MAG-Schweißen wird als Schutzgas CO_2 oder ein CO_2 -Argon-Gemisch verwendet, das ebenfalls den Luftsauerstoff verdrängt. Zusätzlich kommt es jedoch, im Gegensatz zum MIG-Schweißen, zu einer Reaktion zwischen dem Gas und der Schmelze. Diese Reaktion hat einerseits zur Folge, dass beim MAG-Schweißen mit höheren Temperaturen gearbeitet wird. Es entsteht somit ein tieferer Einbrand in den Werkstücken. Zum anderen wird das Schmelzbad mit Kohlenstoff angereichert, wodurch der abkühlende Werkstoff gehärtet wird.

Bei beiden Verfahren entsteht der Lichtbogen durch einen Kontakt zwischen einer abschmelzenden Drahtelektrode, die durch einen Vorschub kontinuierlich nachgeführt wird und dem Werkstück selbst. Durch den Lichtbogen entsteht eine Schmelzzone, die mit dem abgeschmolzenen Material der Elektrode aufgefüllt wird. Nach dem Abkühlen ergibt sich eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Fügepartnern. Der große Vorteil des Metallschutzgasschweißens ist, dass mit dem MIG-Verfahren auch

Aluminiumwerkstoffe prozesssicher und schnell zu fügen sind, zudem ist, anders als beim WPS, nur ein einseitiger Zugang zu den Bauteilen notwendig. [Westkämper; Warnecke 2010]

7.3 Stanznieten

Beim Stanznieten handelt es sich um ein mechanisches Fügeverfahren. Durch den Einsatz eines Stempels und einer Matrize wird beim Stanznieten eine zweiseitige Zugänglichkeit der Fügestelle benötigt. Unterschieden werden Stanzniete nach ihrer Kopfform, in Halbhohlstanzniete (HSN) und Vollstanzniete (VSN).

7.3.1 Halbhohlstanznieten

Der Nietprozess beginnt damit, dass die Nietzange an der gewünschten Verbindungsstelle positioniert wird und über Niederhalter und Matrize die beiden Fügepartner fixiert. Danach drückt ein Stempel den HSN durch das stempelseitige Blech, wobei dieses durchtrennt wird. Im matrizenseitigen Blech wird der Niet aufgespreizt, so dass er im Material einen Hinterschnitt bildet. Es entsteht somit eine unlösbare kraft- und formschlüssige Verbindung. Das Nietverfahren wird in Abbildung 18 veranschaulicht.

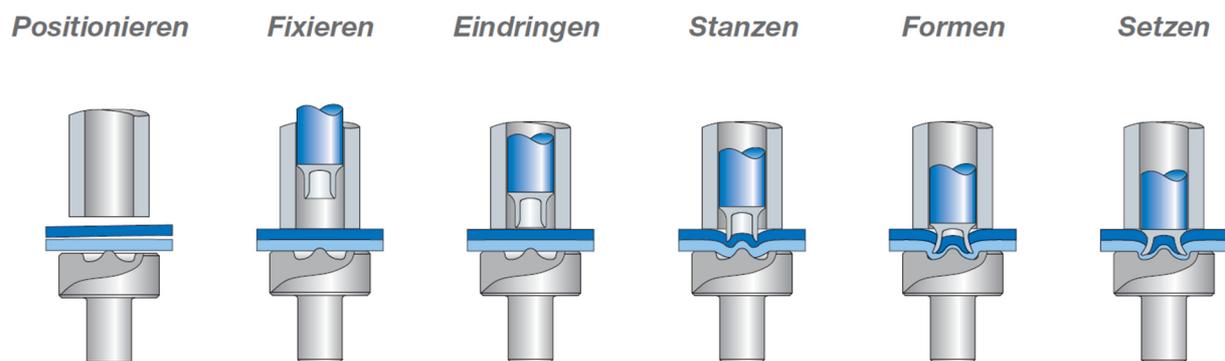


Abbildung 18: Ablauf des Halbhohlstanznietens [BOE14]

Durch das HSN-Verfahren lassen sich mehrlagige Verbindungen unterschiedlicher Materialien realisieren (siehe Abbildung 19). Beim Setzen des Niets ist darauf zu achten, dass das Material des matrizenseitigen Blechs eine ausreichende Verformbarkeit besitzt. Das stempelseitige Blech kann hingegen aus höchstfesten, wenig duktilen Materialien bestehen.

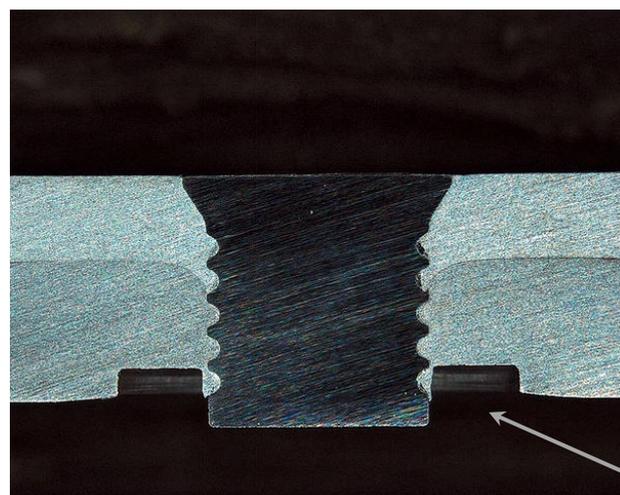


Abbildung 19: Variationen von HSN-Verbindungen [BOE14]

Aufgrund der zuvor beschriebenen Eigenschaften ist das HSN-Verfahren besonders bei der Fertigung von Karosserien in Material-Hybridbauweise eines der dominierenden Fügeverfahren. [Friedrich 2013]

7.3.2 Vollstanznieten

Genau wie beim HSN beginnt das Setzen eines VSN mit dem Positionieren der Nietzange und dem Fixieren der Fügepartner. Der Unterschied zum HSN liegt darin, dass sich der VSN selber plastisch nicht verformt. Er durchstanzt die beiden Fügepartner, die durch eine Erhöhung der Niederhalterkraft und die Form der Matrize plastisch an die Ringnut des Niets angeformt werden (siehe Abbildung 20). Auch hier entsteht eine kraft- und formschlüssige Verbindung.



Plastische Verformung
des matrizen-
seitigen
Blechs

Abbildung 20: Schliffbild einer Vollstanznietverbindung [IND14]

Da der Niet selber nicht verformt werden muss, wird er aus Materialien mit sehr hoher Festigkeit gefertigt. Dies stellt sicher, dass auch höchstfeste, pressgehärtete Stähle, wie

der 22MnB5, mit dem VSN-Verfahren zusammengefügt werden können. Es muss lediglich eine Mindestverformbarkeit des matrizenseitigen Werkstoffs gewährleistet sein.

7.4 Flow-Drill-Schrauben (FDS)

Ein insbesondere für die Space-Frame-Karosserie entwickeltes Fügeverfahren ist das Flow-Drill-Schrauben. Es eignet sich besonders für Stellen, an denen Bleche gegen Hohlprofile verbunden werden sollen, bei denen nur eine einseitige Zugänglichkeit möglich ist.

Zu Beginn des Setzvorgangs wird eine FDS-Schraube unter einem bestimmten Druck und einer materialabhängigen Drehzahl auf die Fügestelle aufgesetzt. Durch die entstehende Reibungswärme schmilzt die Spitze der Schraube die Werkstücke auf und furcht sich dann ihr eigenes Gewinde direkt in die Fügepartner, wie es in Abbildung 21 dargestellt ist.

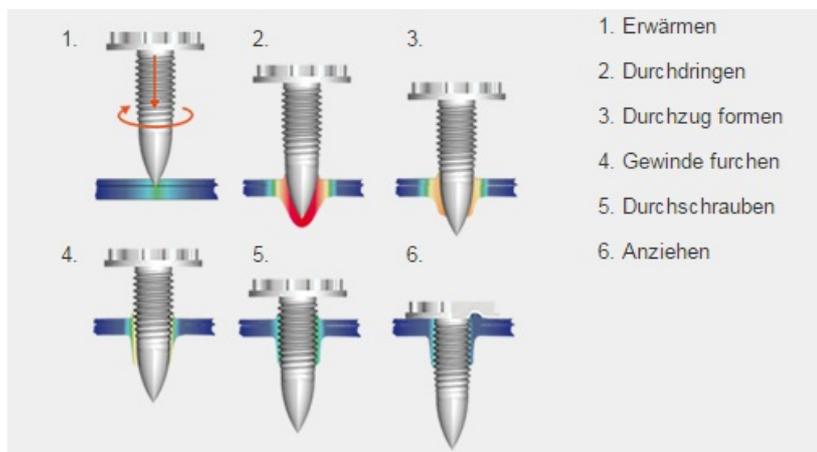


Abbildung 21: Verfahren des FDS-Schraubens [IEJ14]

Nach dem Abkühlen entsteht so eine wieder lösbare Verbindung. Die FDS-Schraube kann bei Bedarf, z.B. im Schadensfall, durch eine metrische Schraube ersetzt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass dieses Verfahren auch bei Material-Hybridbauweisen, verwendet werden kann. [IEJ14]

7.5 Kleben

Im Vergleich zu den zuvor genannten Verbindungstechniken hat das Kleben entscheidende Vorteile. Diese sorgen dafür, dass Kleber oft unterstützend, in Kombination mit anderen Fügeverfahren, wie dem Punktschweißen oder dem Nieten, eingesetzt wird oder diese sogar ersetzt. So bietet eine Klebung den Vorteil, dass durch sie nahezu jede Werkstoffpaarung miteinander kombiniert werden kann. Die beiden Fügepartner werden beim Kleben gleichzeitig miteinander verbunden und durch den Klebefilm voneinander isoliert. Hierdurch wird Kontaktkorrosion vermieden. Zudem dichtet eine Klebung die Fügestelle gegen das Eindringen korrosiver Medien ab.

Die Verbindungsfestigkeit einer Klebnaht kommt durch die Kohäsionskräfte innerhalb des Klebstoffes und die Adhäsionskräfte zwischen Kleber und den zu verbindenden Oberflächen zustande. In diesem Punkt liegt die größte Schwäche des Klebens. Um eine reproduzierbare und langzeitbeständige Verbindung zu gewährleisten, müssen die zu fügenden Oberflächen in der Regel vorbehandelt werden. So ist eine Reinigung der einzelnen Bauteile von Ölen und Fetten meist unerlässlich. Zudem werden mechanische oder chemische Behandlungen eingesetzt, um die Oberflächengüte für den Klebevorgang zu optimieren. Im Karosseriebau wird zu großen Teilen auf epoxidbasierende Klebstoffe zurückgegriffen. Sie härten während des Trocknungsprozesses der kathodischen Tauchlackierung bei ca. 180°C aus.

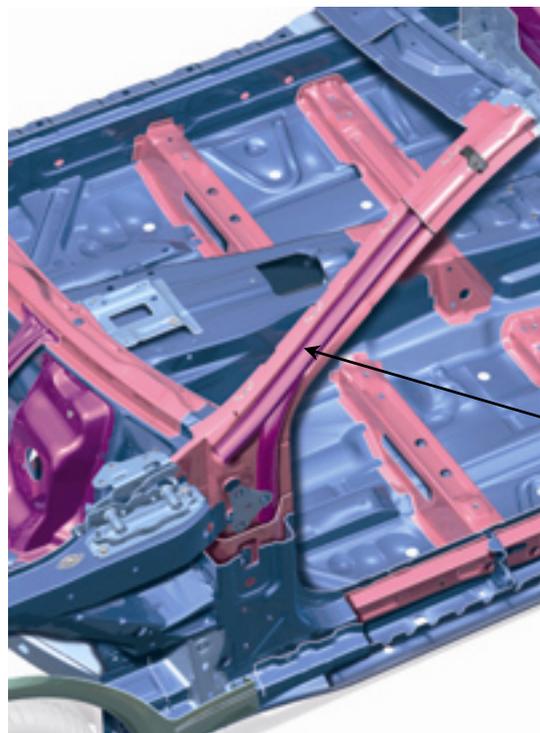
Obwohl viele Einflussfaktoren für die Güte einer Klebeverbindung verantwortlich sind und sie speziell auf die einzelnen Fügepartner angepasst werden muss, wird sie in vielen Bereichen der Rohkarosserie und besonders bei Material-Mischbauweisen eingesetzt. [Friedrich 2013]

8 Stand der Technik

Bei dem in dieser Arbeit zu untersuchenden Bereich, handelt es sich um den A-Säule-Bereich eines Cabriolets. Er wird hinsichtlich seiner Stabilität bei einer Dacheindrückung nach der Richtlinie FMVSS 216a untersucht. Zwar ist dieser Test bisher ausschließlich für geschlossene Pkw vorgeschrieben, Fahrzeughersteller gehen jedoch aus Eigeninitiative dazu über, ihre Fahrzeuge diesem Test zu unterziehen. Da es sich hierbei jedoch um firmeninterne Untersuchungen handelt, ist nur wenig darüber bekannt, wie die einzelnen Fahrzeuge bei diesem Test abschneiden.

Welche Maßnahmen Hersteller ergreifen, um besonders die A-Säule und den Scheibenrahmen zu verstärken, der im Falle eines Überschlags beinahe die gesamten Lasten zu tragen hat, soll im Folgenden beschrieben werden.

Die Außenmaße einer A-Säule sind in der Regel durch das Package und gesetzliche Regelungen bezüglich der Sichtwinkel begrenzt und können im Querschnitt nicht beliebig vergrößert werden. Um die Stabilität in diesem Bereich zu erhöhen, konzentrieren sich Verstärkungsmaßnahmen in der Regel auf Verstärkungsrohre oder Bleche, die zusätzlich in die A-säule integriert werden.



Verstärkungsrohr aus ultrahochfestem Stahl

Abbildung 22: A-Säule des Mercedes E-Klasse Cabriolets [BLO10a]

Solche Rohre und Einsatzteile bestehen aus hoch- und höchstfesten Stählen, um den Anforderungen im Überschlagsfall zu entsprechen. [Braess 2013]

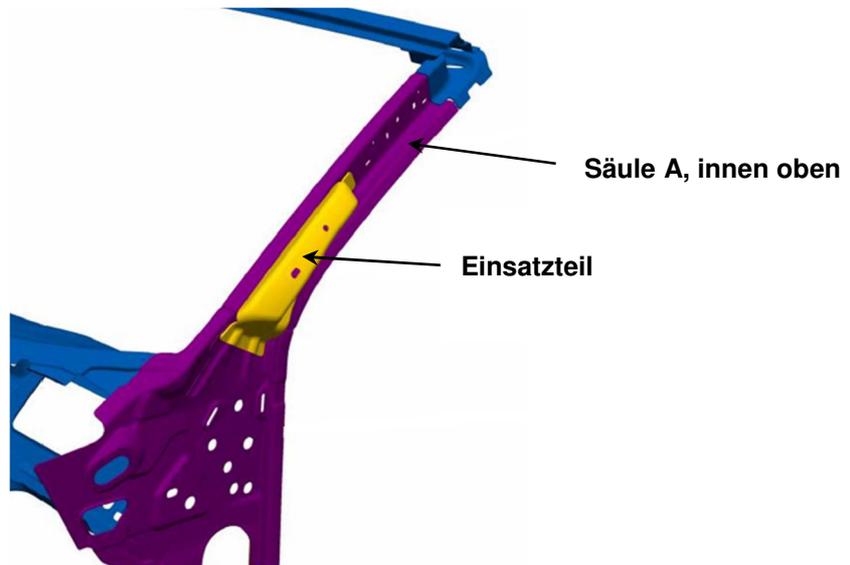


Abbildung 23: A-Säule des VW Eos mit verstärkendem Einsatzteil [AUT12]

Neben den durch Rohre oder Bleche verstärkten A-Säulen gibt es auch Cabriolets, die eine aus einem Stück gefertigte A-Säule besitzen. Diese Säulen werden mittels IHU-Verfahren, in Kombination mit Tailored Blanks, hergestellt. Dabei entstehen äußerst komplexe Bauteile, deren Wandstärken über den Verlauf der Struktur variieren und somit an die gegebenen Belastungen angepasst werden. Ein Fahrzeug, das solch eine A-Säule verwendet, war beispielsweise der Volvo C70. Im nebenstehenden Bild (Abbildung 24) ist die Konstruktion einer solchen Säule dargestellt.

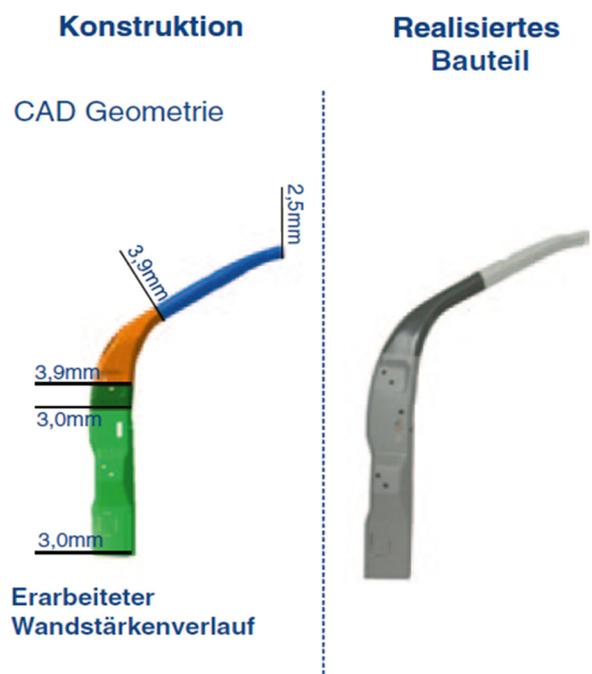


Abbildung 24: A-Säule aus einem innenhochdruckumgeformten Rohr [Friedrich 2013]

9 Ausgangssituation

Die Grundlage dieser Arbeit bildet ein CAD-Part (CAD= computer-aided design), welches mit Hilfe von grundlegenden Flächen, Ebenen und Fixpunkten, Bauräume für den Bereich einer Cabriolet-A-Säule definiert (siehe Abbildung 25). Das Koordinatensystem, auf das sich das CAD-Part bezieht, ist ein rechtshändiges Koordinatensystem, das seinen Ursprung mittig zwischen den zwei gedachten Vorderrädern hat. Die positive X-Achse zeigt entgegen der Fahrtrichtung, die positive Y-Achse in Richtung der Beifahrerseite und die positive Z-Achse nach oben.

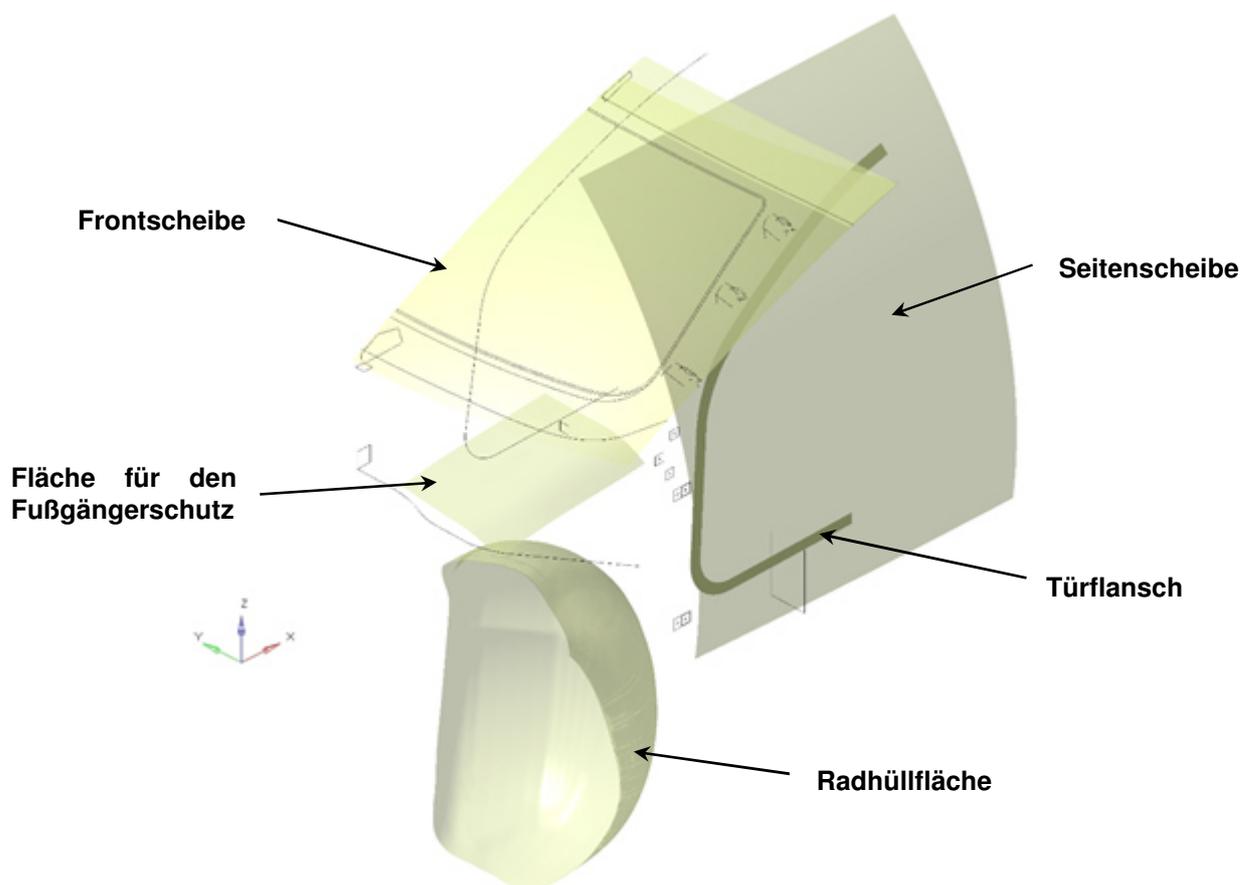


Abbildung 25: CAD-Vorgaben

Bestandteil dieser Daten sind: die Fläche der Frontscheibe, die Fläche der Seitenscheibe und die Fläche eines Türflansches. Dazu kommen eine Radhüllfläche, die die Ausmaße eines Rades in jeder möglichen Position darstellt und eine Fläche für den Fußgängerschutz, die sicherstellen soll, dass sich oberhalb von ihr keine massiven Bauteile befinden, auf die ein Fußgänger während eines Unfalls aufprallen kann.

Des Weiteren geben 3D-Geometrien, in Verbindung mit Leitkurven, die maximalen Bauraumgrößen für den Schweller, den Stirnwandquerträger, den Scheibenquerträger und den Dachrahmenquerträger vor. Außenmaße, an die sich der obere Bereich der A-Säule halten muss, werden in Form von Schnitten durch die Außenhaut sowie durch die innere Verkleidung der A-Säule definiert. Anbindungspunkte für die Türscharniere und den Instrumententafelträger begrenzen die Ausdehnung der A-Säule im unteren Bereich.

Die gesamte konstruktive Arbeit erfolgt mit dem CAD-Programm Catia V5 und umfasst die gesamte A-Säule sowie unmittelbar daran anschließende Bauteile, die für die Dacheindrückung von Relevanz sind. An dieser Stelle sollen, zusätzlich zu dem Vorgabenpart, weitere Prämissen definiert werden, um den Arbeitsaufwand in einem angemessenen Rahmen zu halten.

So ist zu Beginn zu sagen, dass die Konstruktion in erster Linie als Grundlage für die anschließenden Berechnungen dienen soll. Dabei wird lediglich der Lastfall der Dacheindrückung berücksichtigt. Die belastungsgerechte Auslegung der Bauteile auf andere Beanspruchungen wie z.B. den Frontcrash, den Seitencrash, den Heckaufprall und die Eigensteifigkeit der Gesamtkarosserie, ist nicht zu beachten.

Auf eine Verrundung des CAD-Modells wurde bewusst verzichtet. Die meisten Radien hätten wegen der in den Berechnungen gewählten Elementgröße wieder aus dem Modell herausgenommen werden müssen oder wären entfallen.

Eine weitere Vereinfachung ist, dass es sich bei der CAD-Ausführung um eine reine Flächenkonstruktion handelt, die Wandstärken der einzelnen Bauteile werden hier, mit wenigen Ausnahmen, nicht berücksichtigt. Diese Vorgehensweise ist in der frühen Konzeptphase durchaus üblich. Ein Vorteil, der mit dieser Konstruktionsweise einhergeht ist, dass das Flächenmodell mit Hilfe einer IGES-Datei problemlos in das verwendete Berechnungsprogramm übernommen werden kann. Erst während der Aufbereitung der Berechnung werden dem Flächenmodell die einzelnen Wandstärken zugeordnet.

Allgemein gilt, dass der Reifegrad der Konstruktion einer prinzipiellen Darstellung gleicht. Es soll mit einem angemessenen Aufwand eine, auch in Hinblick auf Fertigungs- und Fügeverfahren, realitätsnahe Datenbasis geschaffen werden, die sich im Verlauf der Arbeit möglichst schnell verändern und erweitern lässt.

10 Finite-Element-Methode

10.1 Grundlagen

In vielen Bereichen des Ingenieurwesens wird heutzutage die Finite-Element-Methode (FEM) zur Simulation und Lösung verschiedenster Berechnungsaufgaben herangezogen. Sie bietet die Möglichkeit, bereits in einem frühen Stadium der Entwicklung, Aussagen über das Verhalten von Strukturen zu treffen, und trägt so maßgeblich zur Verkürzung des gesamten Produktentstehungsprozesses bei.

Bei einem Festigkeitsnachweis mithilfe der FEM wird ein statisch bestimmtes Berechnungsmodell in eine beliebige Anzahl aus finiten Elementen (endlich kleinen Elementen) unterteilt. So gibt es beispielsweise Stab-, Balken-, Scheiben-, Schalen-, Platten- und Volumenelemente. Diese Elemente unterscheiden sich in ihrer Form und Funktion und sind je nach Berechnungsmodell auszuwählen. Unter der Annahme von sowohl geometrisch, als auch physikalisch linearem Verhalten eines solchen Modells, gilt zwischen der Kraft F , den Verschiebungen u und den Steifigkeiten k für ein einzelnes Element, der folgende Zusammenhang:

$$F = k \cdot u$$

Fasst man die Einzelsteifigkeiten k aller Elemente des Modells in einer Gesamtsteifigkeitsmatrix K zusammen, so gilt $F = K \cdot U$ oder in Matrixschreibweise:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}$$

Abbildung 26: Kraft-Verschiebungsbeziehung [Klein 2014]

Unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen lässt sich diese Gleichung lösen, und man erhält die unbekanntenen Knotenverschiebungen sowie Reaktionskräfte. [Klein 2014]

10.2 Berechnungsmodell

In dieser Arbeit soll die FEM-Berechnung dazu genutzt werden, die verschiedenen Varianten einer Cabriolet-A-Säule hinsichtlich ihrer Stabilität bei der Dacheindrückung nach FMVSS 216a zu untersuchen. Es soll gezeigt werden, wie das Berechnungsmodell aufgebaut ist und welche Schritte benötigt werden, um es zu erstellen. Die Berechnung erfolgt mit dem Programm Altair Hyperworks 12.0.

Im ersten Schritt muss die jeweilige Geometrie eines Modells in das FEM-Programm importiert werden. Die einzelnen Modelle werden in CATIA bereits so konstruiert, dass für die Berechnung keine größeren Anpassungen mehr vorgenommen werden müssen. An einigen Stellen muss jedoch die Geometrie bereinigt werden, sodass sie für die Vernetzung verwendet werden kann. Beispielsweise ist es notwendig, bei den als Profile gestalteten Bauteilen, Mittelflächen abzuleiten, die in der Berechnung mit der entsprechenden Materialstärke aufgedickt werden. Ist die Geometrie bereinigt, so wird mit einem automatischen Vernetzer ein Netz aus quadratischen Scheibenelementen, sogenannten QUAD-Elementen, mit einer Kantenlänge von 5mm über die Bauteile gezogen. Die Kantenlängen werden so gewählt, dass sie bei einem vertretbaren Rechenaufwand eine ausreichende Genauigkeit liefern. In dem Zusammenhang bedeutet ein feineres FE-Netz immer auch eine Erhöhung des Rechenaufwands.

Obwohl die einzelnen Teile relativ einfach gestaltet sind, ist an manchen Stellen das Netz sehr ungleichmäßig und einzelne Elemente sind stark verzogen.

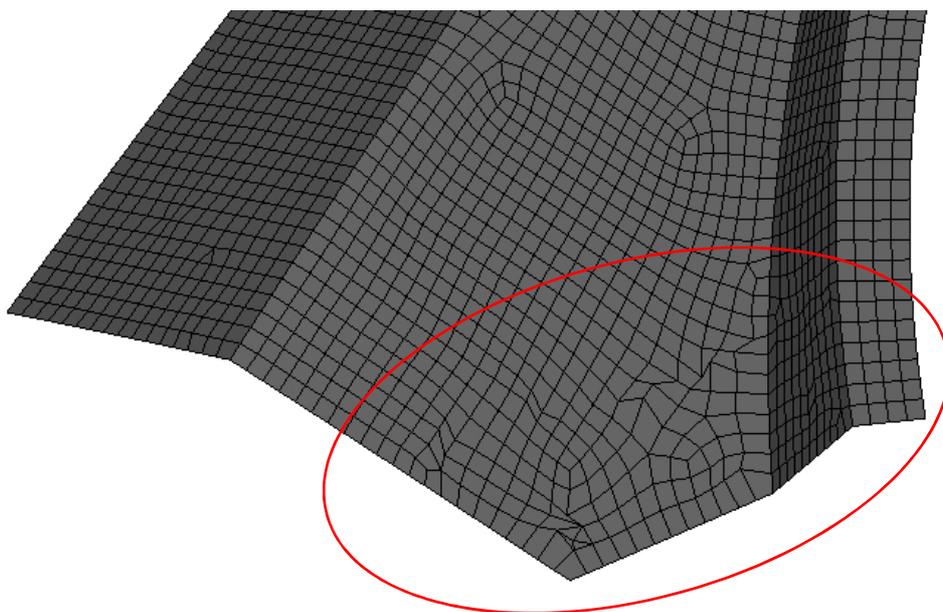


Abbildung 27: Stark verzogenes FEM-Netz

Hyperworks nutzt für die Bewertung der Elementqualität einen sogenannten Quality-Index, der verschiedene Kriterien, wie zum Beispiel die angestrebte Elementkantenlänge, das Seitenverhältnis von Höhe zu Breite oder die Verdrehung des Elements in sich überprüft. Elemente, die den vordefinierten Anforderungen nicht entsprechen, werden dementsprechend angezeigt. Da solche „beschädigten“ Elemente die Qualität der Berechnungsergebnisse verschlechtern, werden sie im Vorfeld manuell beseitigt.

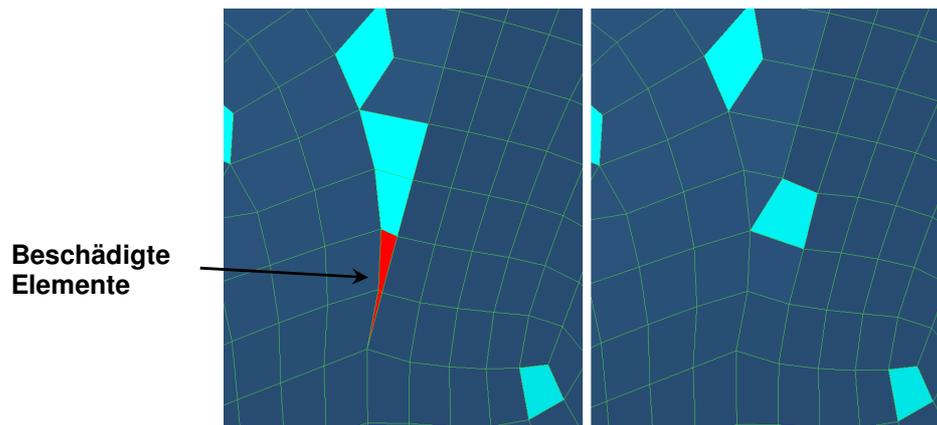


Abbildung 28: Ausbesserung beschädigter Elemente

Ist die Vernetzung abgeschlossen, so müssen den einzelnen Bauteilen Materialien und entsprechende Wandstärken zugeordnet werden. Die Wandstärken werden dabei rechnerisch auf beide Seiten der vorhandenen Flächen gleichmäßig aufgetragen. Für die hier verwendete Art der Berechnung, auf die später noch eingegangen wird, sind drei Materialparameter von Bedeutung: der Elastizitätsmodul (E-Modul), die Dichte (ρ) und die Querkontraktionszahl (ν). Da sich diese Parameter bei den meisten Stahl- und Aluminiumwerkstoffen nicht wesentlich voneinander unterscheiden, werden lediglich die in der folgenden Tabelle gezeigten Werte verwendet.

Tabelle 3: Materialparameter von Aluminium und Stahl [Bargel 2005]

Werkstoff	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [kg/m ³]	Querkontraktionszahl
Stahl	210.000	7850	0,3
Aluminium	70.000	2700	0,33

Sobald jedem Bauteil ein Material und eine Wandstärke zugeordnet wurden, müssen die einzelnen Teile miteinander verbunden werden, da sie bis zu diesem Zeitpunkt keinerlei Bezug zu ihrem Nachbarn haben. Zu diesem Zweck werden bereits in der Konstruktion an Stellen, an denen die Bauteile zusammengefügt werden sollen, Punkte und Linien gesetzt. Mithilfe dieser Geometrien werden in Hyperworks so genannte Connectoren (Verbindungselemente) erzeugt. Diese Connectoren stellen, wie in Abbildung 29 gezeigt,

über so genannte Rigid Body Elements (RBE), eine ideal starre Verbindung zwischen einzelnen Knotenpunkten her. Der Referenzpunkt (independent node) auf der einen Seite gibt dabei die Verschiebungen der abhängigen Knoten (dependent nodes) auf der anderen Seite vor. Die über Connectoren miteinander verbundenen Knotenpunkte werden in diesem Fall über RBE2-Elemente kinematisch so miteinander gekoppelt, dass sie keine Relativbewegung zueinander ausführen können.

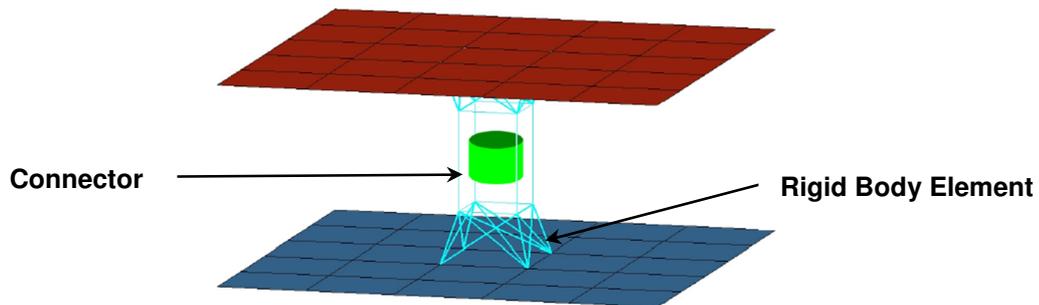


Abbildung 29: Darstellung eines Connectors [ALT14]

Hierzu ist zu sagen, dass die Connectoren die jeweilige Verbindungstechnik stark idealisieren. Je nach Auswahl dieser Elemente, simulieren sie entweder punkt- oder linienförmige Verbindungen. Eine Unterscheidung zwischen Schweißpunkt, Stanzniet und FDS Schraube ist mit dieser Vorgehensweise nicht möglich. Allerdings steht bei den Untersuchungen die Gesamtstruktur im Mittelpunkt und weniger die Verbindungstechnik, sodass dieses Verfahren trotzdem gewählt wird. In Abbildung 30 ist die gesamte Verbindungstechnik einer Modellvariante exemplarisch dargestellt.

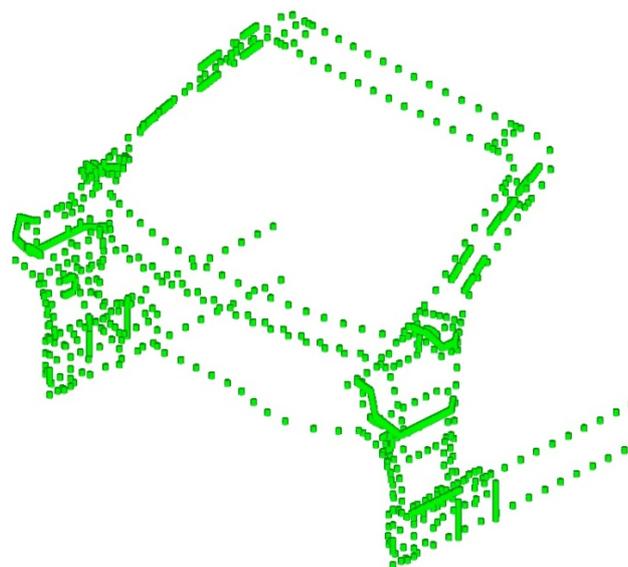


Abbildung 30: Gesamte Verbindungstechnik einer Modellvariante

Nachdem die Verbindungstechnik erzeugt wurde, müssen in einem weiteren Schritt die Randbedingungen der Berechnung festgelegt werden. Diese Bedingungen ergeben sich hauptsächlich aus dem in der FMVSS 216a dargestellten Aufbau. So wird, um das Modell statisch zu bestimmen, die gesamte untere Fläche des jeweiligen Schwellers eingespannt. Das heißt, es werden alle Freiheitsgrade, der zur unteren Schwellerfläche gehörenden Knoten, gesperrt.

Die Krafteinleitung erfolgt über einen Stempel, der auf den Dachrahmen der Struktur drückt. Dieser Stempel wird durch eine ebene Fläche dargestellt, die so positioniert ist, wie es die FMVSS 216a vorschreibt. Die vorgegebenen Maße des Stempels konnten in Fahrzeuglängsrichtung gekürzt werden, da die konstruierten Modellvarianten den hinteren Fahrzeugbereich ebenfalls nicht abdecken. Durch diese Maßnahme wird zusätzliche Rechenzeit

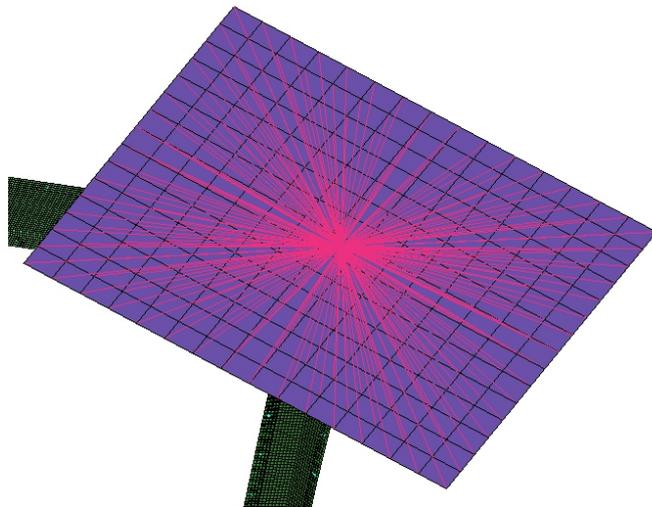


Abbildung 31: Stempelfläche mit RBE-Spinne

eingespart. Damit die vernetzte Stempelfläche ideal starr ist, wird auf sie, wie in Abbildung 31, eine RBE-Spinne gelegt. Diese Spinne sorgt dafür, dass jedes Element, das auf dem Stempel liegt, die gleiche Bewegung durchführt, wie ihr Mittenknoten. Dieser Mittenknoten wird über eine Randbedingung so gelagert, dass er sich nur senkrecht zu der Stempelfläche bewegen kann.

Die Kraft, mit der der Stempel auf den Dachrahmen drückt, hängt von der Fahrzeuggesamtmasse ab. Wie man sie ermittelt, wird ist bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben. Bei einem angenommenen Fahrzeuggewicht von 1700kg, welches dem Gewicht der in Tabelle 4 gezeigten Fahrzeuge der oberen Mittelklasse entspricht, ergibt sich somit eine Kraft $F = 49.980\text{N}$ ($\approx 50.000\text{N}$). Obwohl sich die einzelnen Modelle durch ihre Bauart im Gewicht voneinander unterscheiden, wird die Kraft für alle Varianten gleich angenommen. Dies dient dazu, dass sich die Modelle besser untereinander vergleichen lassen. Die Kraft wird in der FEM-Berechnung, senkrecht zur Stempelfläche, auf den Mittenknoten der RBE-Spinne aufgebracht. Damit der Stempel nicht durch das Modell hindurch gleitet, muss eine weitere Beziehung zwischen ihm und dem Dachrahmen

hergestellt werden. Dies geschieht, wie bei dem realen Versuch auch, durch einen Kontakt. Hierzu werden in Hyperworks sowohl auf dem Dachrahmen, als auch auf dem Stempel, Kontaktflächen definiert (siehe Abbildung 32).

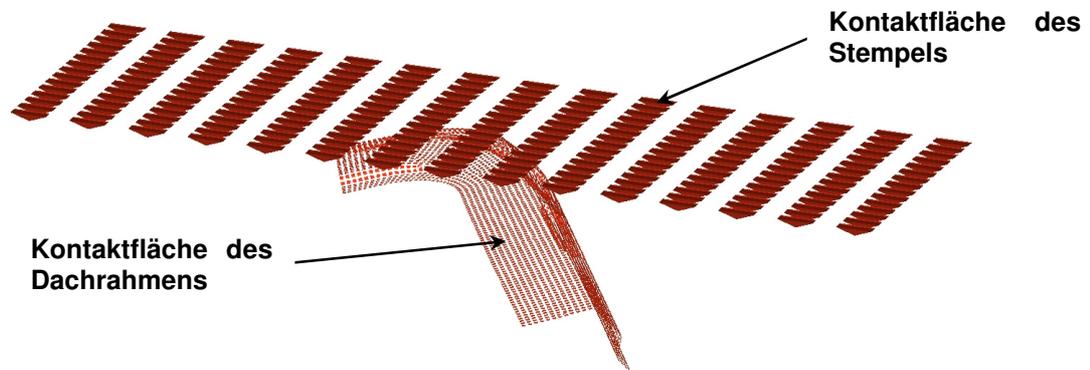


Abbildung 32: Kontaktfläche des Stempels und des Dachrahmens

Nachdem das FEM-Modell erstellt ist, muss in einem letzten Schritt die Berechnungsart festgelegt werden. Weil in diesem Fall die Last über einen Kontakt in das Modell eingeleitet wird und bei einer Kraft von 50.000N, die auf den Dachrahmen wirkt, davon auszugehen ist, dass sich die Struktur nur linear verformt, wird auf eine nichtlinear-quasistatische Berechnung zurückgegriffen. Im Gegensatz zur linearen Statik, beruht die nichtlinear-quasistatische Berechnung auf dem Lösen einer nichtlinearen Gleichung der Form:

$$P = K(U) \cdot U$$

Bei dieser Berechnung sind die Steifigkeitsbeziehungen zustandsabhängig von den Knotenverschiebungen. Diese Gleichung ist nicht direkt lösbar, sondern kann nur iterativ gelöst werden. [Klein 2014] In Hypermesh geschieht dies mithilfe des Newton-Raphson-Verfahrens. Das Materialverhalten wird allerdings auch bei diesem Verfahren als elastisch angenommen, wodurch ein Fehler in den absoluten Werten auftritt. Im Vergleich zu einer Berechnung, die plastisches Materialverhalten annimmt, sind die Werte überhöht. Eine Berechnung, die plastische Verformungen der Struktur berücksichtigt, war zunächst nicht möglich. Hierfür sind empirisch ermittelte Materialdaten, sogenannte Materialkarten, notwendig, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht zurückgegriffen werden konnte.

11 Variante 1

Bei der ersten Variante geht es zunächst darum, die vorhandenen Bauräume bestmöglich auszunutzen und die Geometrie der einzelnen Bauteile an sich festzulegen. Im weiteren Verlauf müssen an den Knotenpunkten, an denen die Teile aufeinandertreffen und miteinander verbunden werden, sinnvolle Übergänge geschaffen werden. Besonders die Bereiche, an denen mehrere Bauteile zusammenkommen, sind dabei unter Umständen sehr zeit- und arbeitsintensiv, da immer wieder Abstimmungen unter den einzelnen Komponenten notwendig sind. Die in diesem Abschnitt dargestellte Variante dient bei der Konstruktion folgender Modelle als Basis. In ihrer Konstruktionsweise orientiert sie sich stark an dem Gedanken des Materialleichtbaus, unter der Verwendung von Gussknoten, Strangpressprofilen und Tiefziehblechen aus Aluminium.

In der nachfolgenden Abbildung ist der gesamte Aufbau, der später als Grundlage für die Berechnung dient, dargestellt.

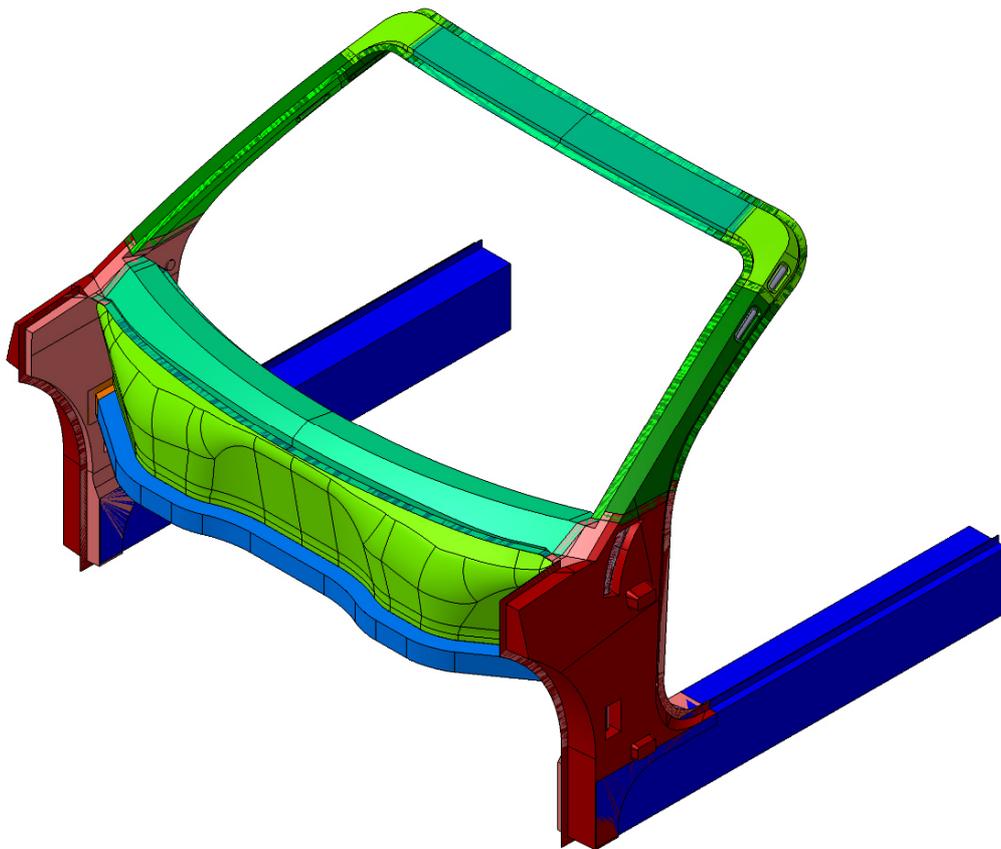


Abbildung 33: Modell der Variante 1

Wie an dem Modell zu sehen ist, sind die unterschiedlichen Bauteile in verschiedenen Farbtönen eingefärbt. Diese Farbtöne geben Auskunft über die Bauteilart und das verwendete Material. In der folgenden Tabelle werden die Farben erläutert.

Tabelle 4: Farbcodierung der konstruierten Bauteile

Farbe	Halbzeug	Material
Rot/ Orange/ Pink	Gussteil	Aluminium
Blau	Profil	Aluminium
Grün	Blechteil	Aluminium
Grau	Blechteil /Rohr	Stahl

11.1 Der Schweller

Der verwendete Schweller besteht, wie in Abbildung 34 dargestellt, aus einem Aluminiumprofil, welches parallel zur Fahrzeuglängsachse verläuft. Um den relativ großen Hohlquerschnitt auszusteifen, wurden zusätzlich Stege in horizontaler und vertikaler Richtung eingezogen.

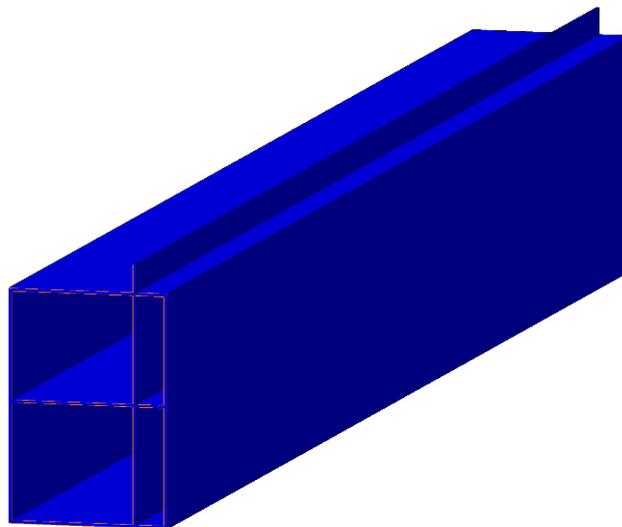


Abbildung 34: Schweller

Der Steg, der oben über das rechteckige Profil hinaussteht, ist dort positioniert, wo auch der Türflansch verläuft. Diesen nimmt er später auf und dient als Verbindungsstelle zu den beiden Schalen der unteren A-Säule.

Da in diesem Fall der Seitencrash, als zusätzlicher Lastfall bei der Auslegung des Schwellers, nicht berücksichtigt wird, ist er relativ einfach gestaltet. Im Vergleich dazu ist

in Abbildung 35 der Schweller des im Jahr 2012 eingeführten Mercedes SL dargestellt, der einen wesentlich komplizierteren Querschnitt aufweist.

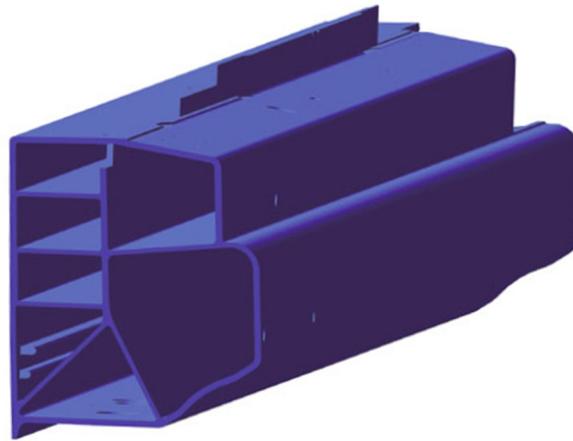


Abbildung 35: Schweller des Mercedes SL [Ernstberger 2013]

11.2 Der Stirwandquerträger

Ein weiteres Teil, das aus einem Aluminiumprofil besteht, ist der Stirwandquerträger. Er dient in der Regel dazu, zusammen mit anderen Bauteilen, im Fall eines Frontcrashes, den Motor daran zu hindern, in die Fahrgastzelle einzudringen. Da die Belastung bei der Dacheindrückung nicht nur in vertikaler Richtung auf die A-Säule wirkt, sondern auch eine Komponente quer zum Fahrzeug besitzt, die der Stirwandquerträger zum Teil mit überträgt, wird er mit in das Modell aufgenommen. Zudem dient er als Anbindung für die ebenfalls vorhandene Stirnwand.

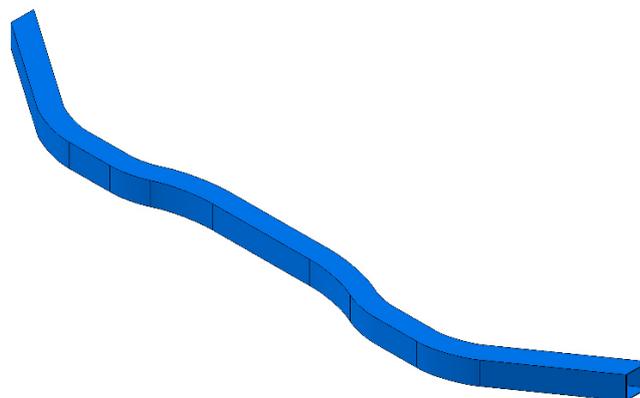


Abbildung 36: Stirwandquerträger

11.3 Der Scheibenquerträger

Im Gegensatz zu den zuvor gezeigten Bauteilen, setzt sich der Scheibenquerträger aus zwei einzelnen Blechschalen zusammen, die der Wölbung der Frontscheibe folgen. In Abbildung 37 sind diese beiden Schalen zu sehen.

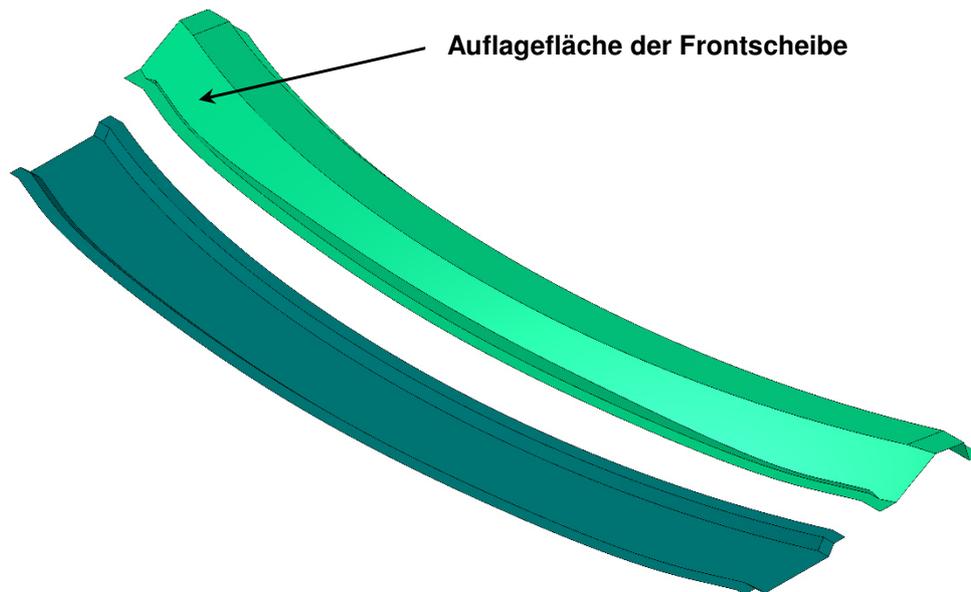


Abbildung 37: Obere und untere Schale des Scheibenquerträgers

Der Scheibenquerträger dient in erster Linie als Auflage für die eingeklebte Frontscheibe. Durch seine Struktur erhöht er außerdem die Torsionssteifigkeit der Gesamtkarosserie. Bei der hier vorgestellten Variante, wird an der unteren Schale zudem die Stirnwand angebunden. In der Regel werden in den Scheibenquerträger, zusätzlich zur Scheibenauflagefläche, weitere Funktionsflächen integriert, um beispielsweise das Armaturenbrett aufzunehmen. Die Randbedingungen für diese Funktionsflächen sind nicht definiert und für die Berechnung nicht von Interesse.

Im Zusammenbau werden die beiden Blechschalen rechts und links mit den Seitenteilen der unteren A-Säule verbunden. Damit der Scheibenquerträger genügend Stabilität erhält, müssen die einzelnen Blechschalen zusammengefügt werden. Um eine ausreichende Fügefläche zu gewährleisten, werden an der Vorder- und Hinterkante jeweils Flansche vorgehalten.

11.4 Die Stirnwand

Die Aufgabe der Stirnwand ist es, den Innenraum eines Fahrzeugs vom Motorraum, mit all seinen störenden Einflüssen, zu trennen. Dabei ist zu beachten, dass z.B. die Lenksäule, die Pedalerie, die Klimaanlage und verschiedene Leitungen mittels Freischnitten durch sie hindurch geführt werden müssen. Indem sie sich wie ein Schubfeld verhält, trägt die Stirnwand, trotz dieser vielen Durchgänge, deutlich zur Torsionssteifigkeit eines Fahrzeugs bei. In den vorgegebenen Randbedingungen sind solche Freischnitte nicht definiert und somit auch nicht relevant. Abbildung 38 zeigt die, in den CAD-Modellen, verwendete Stirnwand

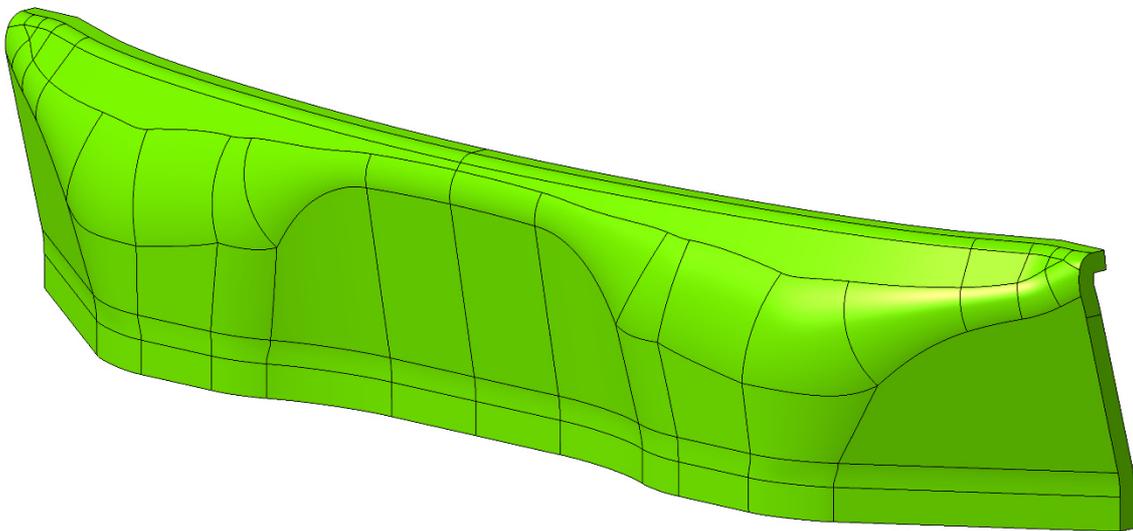


Abbildung 38: Stirnwand

Sie besteht aus einem Aluminiumblech und wird an den seitlichen Flanschen mit den A-Säulen verbunden. Im oberen und unteren Bereich dienen der Scheiben- und der Stirnwandquerträger als zusätzliche Aufnahmepunkte.

11.5 Der Dachrahmenquerträger

Der Aufbau des Dachrahmenquerträgers gleicht in seiner zweischaligen Bauweise dem des Scheibenquerträgers (siehe Abbildung 39).

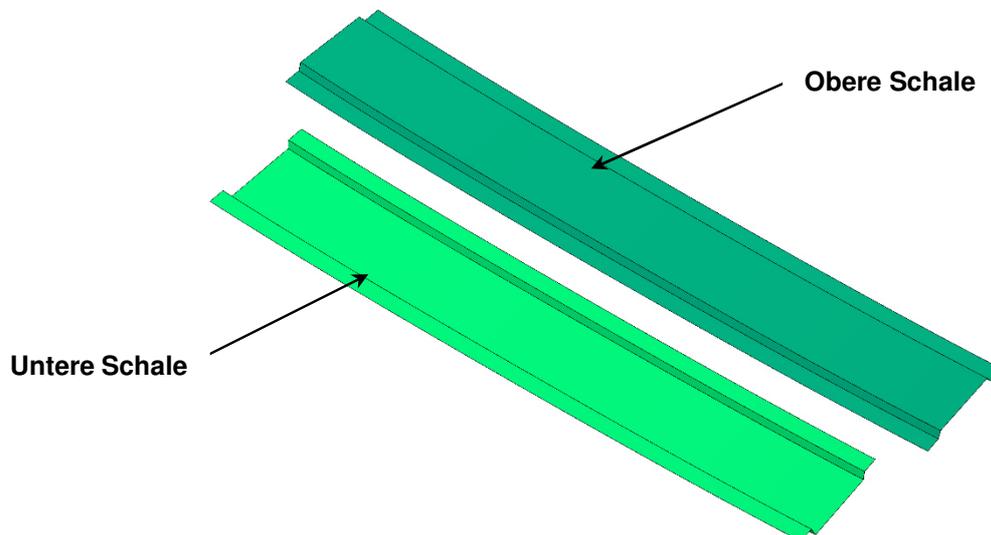


Abbildung 39: Dachrahmenquerträger

Auch in den Funktionsweisen ähneln sich die beiden Bauteile. So verbindet der Dachrahmenquerträger die beiden Seitenteile der Karosserie und bietet durch seinen vorderen Verbindungsflansch gleichzeitig eine Auflagefläche für die Frontscheibe. Des Weiteren wird bei Cabriolets an ihm, über verschiedene Mechanismen, das Verdeck verriegelt. Bei geschlossenen Fahrzeugen kann das Dach, wie in Abbildung 40 exemplarisch dargestellt, direkt mit dem Dachrahmenquerträger verbunden werden.

Bei der Dacheindrückung nach FMVSS 216a, ist der Querträger maßgeblich dafür verantwortlich, dass ein Teil der Kraft, die durch den Stempel auf den Dachrahmen wirkt, auf die gegenüberliegende Fahrzeugseite verteilt wird. Aus diesem Grund darf er unter der Belastung nicht wegknicken.

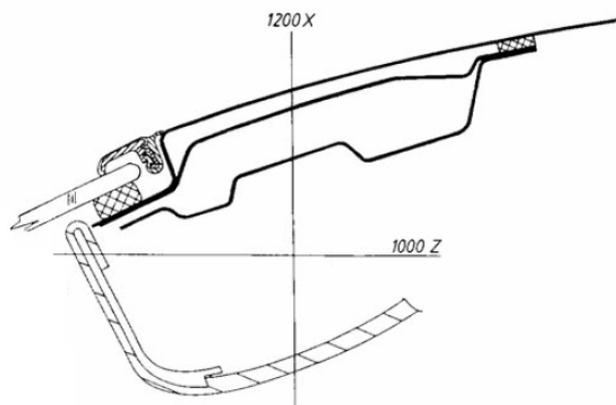


Abbildung 40: Schnitt durch den Dachrahmen auf Y0 [Grabner; Nothhaft 2006]

11.6 Der obere Bereich der A-Säule

Die obere A-Säule ist, was die Verformung des Dachrahmens bei einem Überschlag angeht, einer der wichtigsten Bereiche. Auch ohne Berechnung kann man sagen, dass hier die größten Belastungen auf die gesamte Struktur wirken. Um die Belastungen dennoch aufzunehmen und die Verformung zu minimieren, ist es umso wichtiger, den zur Verfügung stehenden Bauraum maximal auszunutzen und große Querschnitte zu verwenden, um ein möglichst großes Flächenträgheitsmoment zu erzeugen. Über den vorgegeben Bauraum darf die A-Säule, aufgrund gesetzlich vorgeschriebener Sichtbereiche und Verdeckungswinkel, dabei nicht überstehen.

Geometrisch ist die obere A-Säule an die folgenden Vorgaben gebunden: den Verlauf des Türflanschs, die Form der Front- und Seitenscheibe, den Verlauf der unteren A-Säule und an die Schnitte durch die Außenhaut. Wie in Abbildung 41 zu sehen, ist die obere A-Säule wiederum in einer zweischaligen Blechvariante ausgeführt.

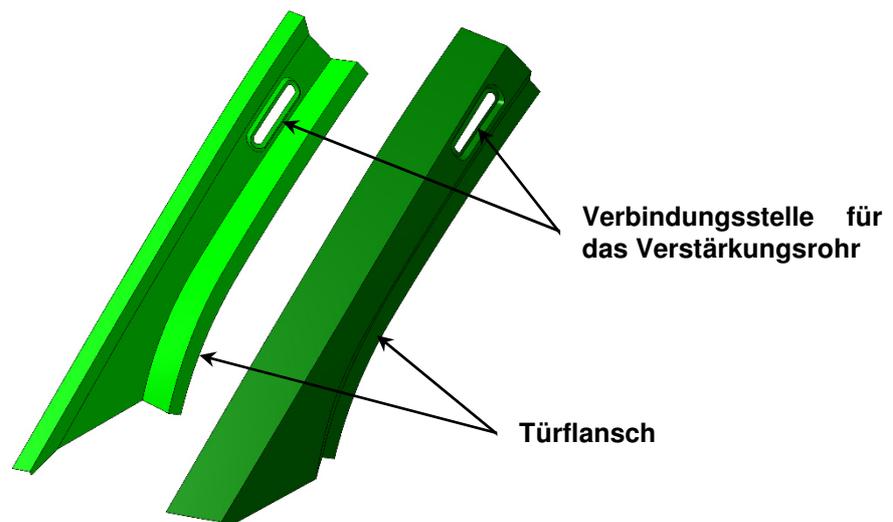


Abbildung 41: Blechschalen der oberen A-Säule

Im oberen Bereich dieser beiden Blechschalen ist zudem eine Durchsetzung eingebracht, die das innerhalb der beiden Schalen verlaufende Verstärkungsrohr aufnimmt. Dieses soll der Struktur zusätzliche Stabilität verleihen.

11.7 Knotenbleche

Um den Dachrahmenquerträger und die Schalen der oberen A-Säule miteinander zu verbinden, wurden in der Konstruktion zwei zusätzliche Knotenbleche eingesetzt (siehe Abbildung 42). Der vordere Verbindungsflansch dieser beiden Teile dient der Frontscheibe als Auflagefläche. Des Weiteren nehmen sie, wie schon die obere A-Säule, über Durchsetzungen, das Verstärkungsrohr auf. Durch diese Aufnahme wird eine zu große Relativbewegung zwischen dem Rohr und den Blechschalen verhindert, was für eine gleichmäßigere Kraftverteilung sorgen soll.

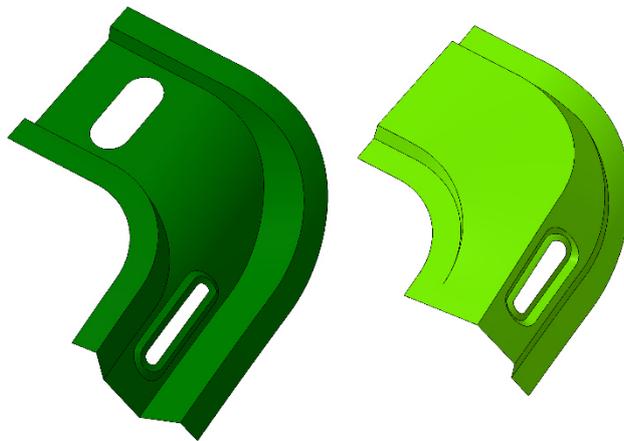


Abbildung 42: Knotenbleche

Auf der oberen dieser beiden Blechschalen (in Abbildung 42 hellgrün dargestellt) liegt der Angriffspunkt des Stempels. Bereits im Vorfeld wird davon ausgegangen, dass die Kraft, die bei der Dacheindrückung auf das Blechteil wirkt, eine starke plastische Verformung an diesem nach sich zieht.

11.8 Gussteile der inneren und äußeren A-Säule

Die komplexesten Komponenten, die in dieser Konstruktion auftreten, sind die beiden Aluminiumgussteile der unteren A-Säule (siehe Abbildung 43). Bei der Konstruktion solcher Gussteile ist vor allem darauf zu achten, dass die Flächen immer in einem gewissen Winkel zur Entformungsrichtung stehen müssen. Die Entformungsrichtung der hier gezeigten Bauteile steht jeweils in Y-Richtung des Fahrzeugs. Hierzu ist zu sagen, dass in den CAD-Daten der Einfachheit halber nicht alle Flächen mit einem Entformungswinkel dargestellt werden, so z.B. die Rippen.

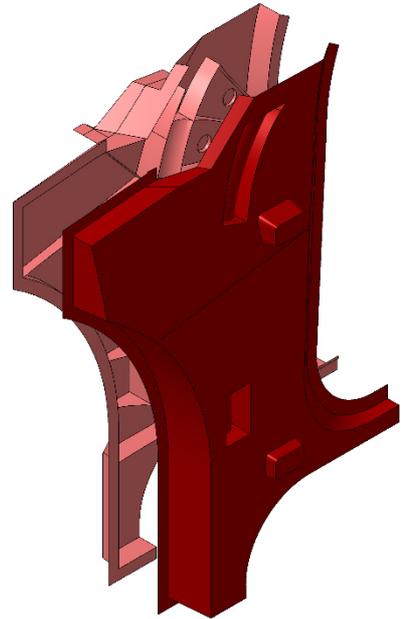
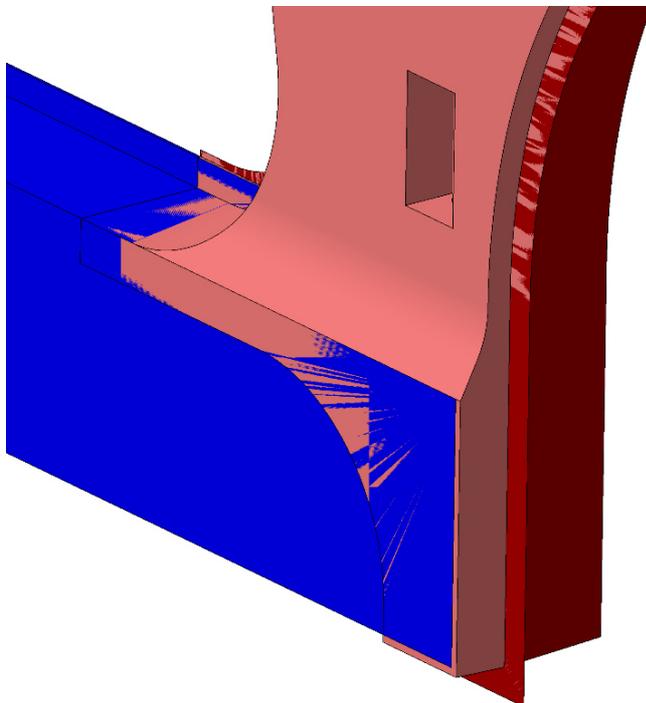


Abbildung 43: A-Säule unten

Da die beiden Gussteile einen Knoten bilden, der fast alle zuvor vorgestellten Bauteile miteinander verbindet, ist es im Verlauf der Konstruktion immer wieder notwendig, die Verbindungspartner aufeinander abzustimmen.



Im unteren Bereich umfassen die beiden Gussteile den Schweller und stützen sich dabei gleichzeitig auf ihm ab. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zwischen der Vorder- und Unterkante des Schwellers und den beiden Gussteilen jeweils etwas Spiel gelassen wird, um Fertigungstoleranzen ausgleichen zu können.

Abbildung 44: Schweller und untere A-Säule

Auf der Innenseite der unteren A-Säule gilt es, den Stirnwandquerträger anzubinden. Dies geschieht relativ einfach über einen zusätzlichen Gussknoten, der auf einer ebenen Fläche der inneren Säule angeschweißt wird (Abbildung 45).

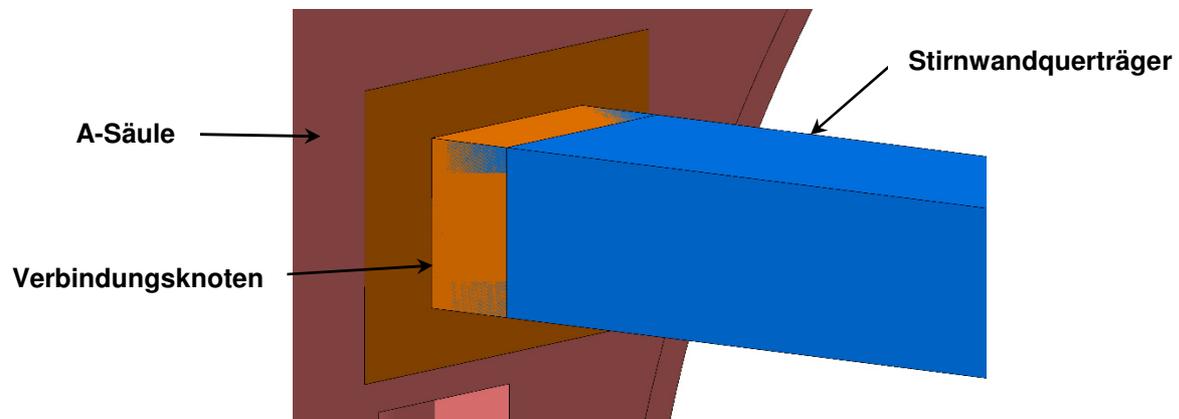


Abbildung 45: Stirnwandquerträger mit Verbindungsknoten

Demgegenüber gestaltet sich die Anbindung des Scheibenquerträgers nicht so einfach. Das Problem besteht darin, dass die Frontscheibe nicht ausschließlich auf dem Scheibenquerträger aufliegt, sondern auch über die Gussteile hinausragt. Die Fläche, an der die Scheibe verklebt wird, muss also zusätzlich mit in die A-Säule übernommen werden.

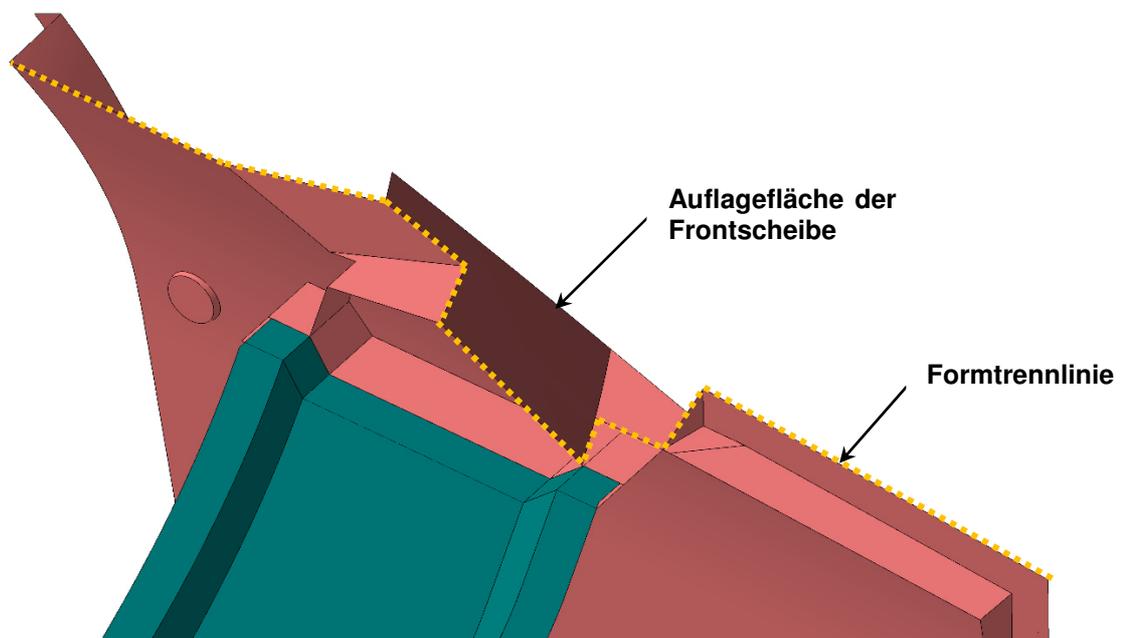


Abbildung 46: Verbindung Scheibenquerträger zu A-Säule

Diese Fläche ist als eine Rippe ausgeführt, die auf der Innenseite der A-Säule steht. In Abbildung 46 ist sie dunkel eingefärbt. Um die Scheibenauflagefläche nicht zu unterbrechen, legt sich die obere Schale des Scheibenquerträgers an genau dieser Fläche an. Damit sich der gesamte Scheibenquerträger mit der Säule verbinden lässt, wurden weitere Rippen, die in Entformungsrichtung stehen, so abgestellt, dass sie der Kontur des Scheibenquerträgers entgegen kommen. Diese bieten ausreichend Platz, um die Schalen des Scheibenquerträgers daran zu befestigen.

Weil die dunkel eingefärbte Scheibenauflagefläche zwangsläufig erforderlich ist, jedoch nicht in Entformungsrichtung der inneren Werkzeugform steht, ergibt sich daraus die gelbe Formtrennlinie, die in diesem Bereich mehrmals die Richtung wechselt.

Die Verbindung der unteren mit der oberen A-Säule entsteht durch einen sich überlappenden Bereich. Die einzelnen Teile der Säulen sind so zueinander gestaltet, dass sich ein homogener Übergang ergibt.

Um die gesamte A-Säule zu verstärken, verläuft in ihrem Inneren ein zusätzliches Rohr (Abbildung 47). Dieses Rohr soll während der Dacheindrückung die Blech- und Gusschalen unterstützen und die Verformung der gesamten Struktur minimieren. Aufgenommen wird es im oberen Bereich, wie bereits dargestellt, von Durchsetzungen in den Blechschalen. In dem in Abbildung 47 dargestellten Gussteil wurden Anlageflächen erzeugt, die das Verstärkungsrohr zum Teil umschließen und an denen es verschweißt werden

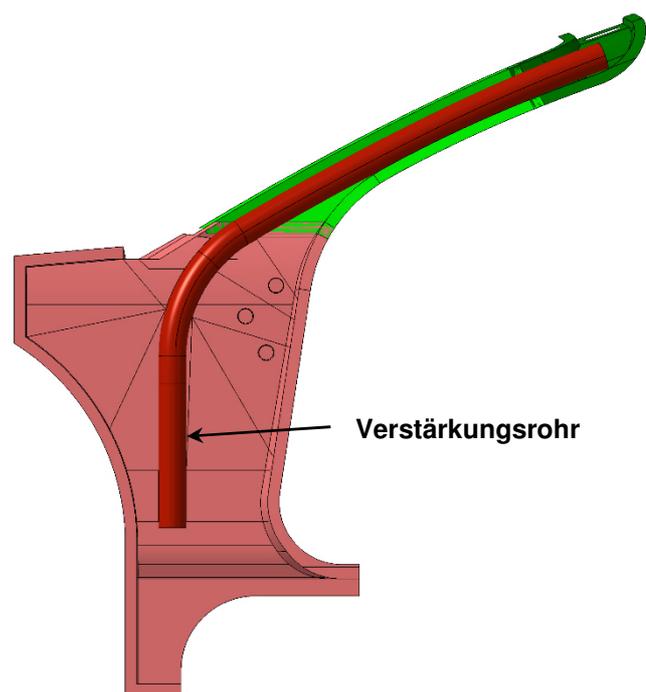


Abbildung 47: A-Säule mit Verstärkungsrohr

kann. Spiegelbildlich gibt es diese Anlageflächen ebenfalls in dem äußeren Gussteil. Werden die unteren Säulen über die Verbindungsflansche miteinander verbunden, so liegt das Verstärkungsrohr formschlüssig an den Anlageflächen der äußeren Säule an. Als zusätzliche Aussteifungen wurden in das Innere der Gussteile zusätzlich Rippen eingezogen.

11.9 Fügetechnik und Fügefolge

Damit die gezeigte Konstruktion den dargestellten Karosseriebereich möglichst realitätsnah abbildet, sind, zusätzlich zu der Ausführung und Herstellbarkeit der einzelnen Bauteile, auch die möglichen Fügetechniken und die Fügereihenfolge zu berücksichtigen. Nachfolgend wird ein Vorschlag dargestellt, wie der Einsatz von Fügeverfahren und die Fügefolge, nach der der Karosseriebereich zusammenkommt, aussehen könnten. Ob dieser Vorschlag so oder in ähnlicher Weise in der Realität umsetzbar ist, hängt allerdings von zahlreichen weiteren Einflussfaktoren, wie der Gesamtkonstruktion, Taktzeiten und der Wirtschaftlichkeit ab. Diese Randbedingungen finden in dieser Arbeit allerdings keine Berücksichtigung.

In den CAD-Daten werden die Verbindungspunkte bzw. -nähte über Kugeln und Kreisprofile dargestellt. Diese werden an den Stellen platziert, an denen in der Fertigung das entsprechende Fügeverfahren zum Einsatz kommt.

Um welches Verfahren es sich dabei handelt, lässt sich an der Farbe der entsprechenden Kugeln und Kreisprofile erkennen. Die entsprechende Zuordnung ist in der Tabelle 5 dargestellt und wird auch bei den folgenden Varianten so angewendet.

Tabelle 5: Farbcodierung der verwendeten Fügetechnik

Verbindungsart	Farbe
HSN 2-Blechverbindungen	Rot
HSN 3-Blechverbindungen	Grün
FDS 2-Blechverbindung	Blau
WPS 2-Blechverbindung	Braun
WPS 3-Blechverbindung	Orange
MIG-Verbindung	Gelb
Strukturkleben	Dunkelblau

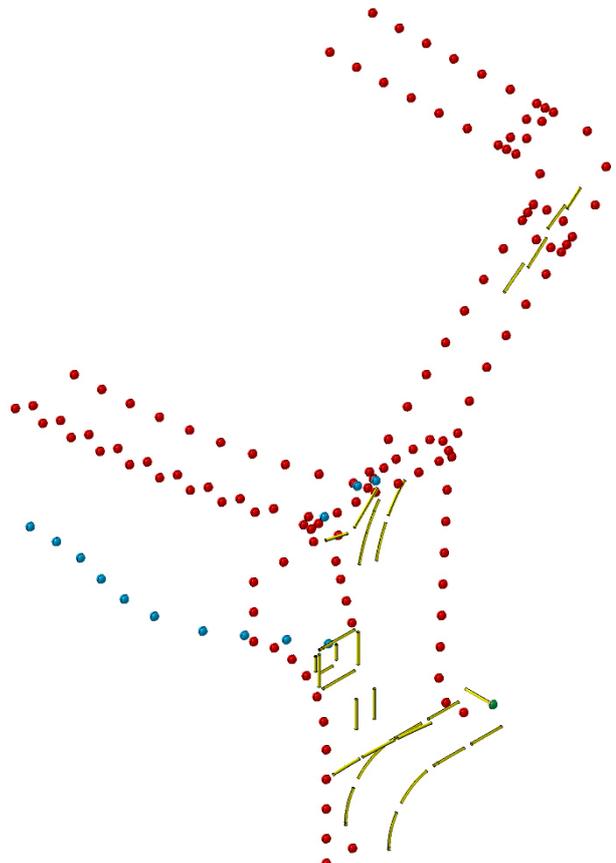


Abbildung 48: Verbindungstechnik der Variante 1

Da die erste Variante vollständig aus dem Werkstoff Aluminium besteht, ist das dominierende Fügeverfahren das Stanznieten. Alle Baugruppen, die aus zwei Blechschalen bestehen, sowie die Gussteile der unteren A-Säule, werden über dieses Verfahren an den dafür vorgehaltenen Flanschen gegeneinander verbunden. Dabei gilt es, die einzelnen Nieten möglichst gleichmäßig über die gesamte Länge der Flansche zu verteilen. Hierbei werden Nietabstände von ca. 50mm - 60mm zueinander angestrebt. In den Bereichen, in denen zwei Bauteile aufeinander treffen, werden die Überlappungen so gestaltet, dass vermieden wird, 3-Blechverbindungen zu setzen. In der Konstruktion können die Abstände zwischen den einzelnen Nieten dadurch jedoch nicht immer gehalten werden, sie sitzen zum Teil sehr dicht nebeneinander (siehe Abbildung 49).

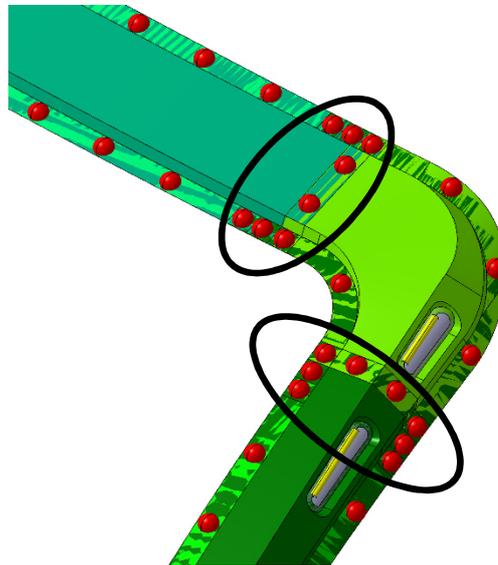


Abbildung 49: Dicht nebeneinander sitzende Nietverbindungen

Während die Stirnwand zur unteren A-Säule und zum Scheibenquerträger ebenfalls mit HSN verbunden wird, kommt dieses Verfahren aufgrund der einseitigen Zugänglichkeit am Profil des Stirnwandquerträgers nicht in Frage. Stattdessen wird das Fügen mit FDS-Schrauben eingesetzt.

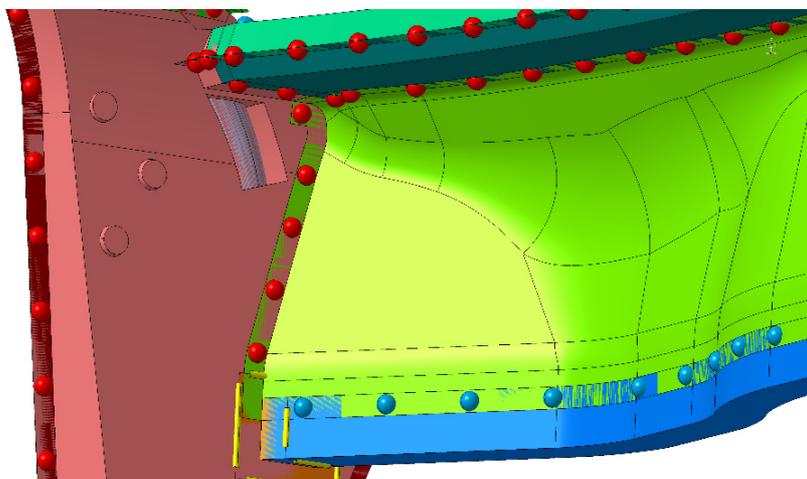


Abbildung 50: Verbindungstechnik an der Stirnwand

Da das Verstärkungsrohr mit der restlichen Struktur der A-Säule verbunden werden muss, um die Kräfte, die auf den Dachrahmen wirken, aufnehmen zu können, wird es mittels Schweißnähten an den Auflageflächen des inneren Gussteils und der oberen Blechschalen verbunden. Weitere Schweißnähte werden eingesetzt, um die unteren Säulen am Schweller zu fixieren.

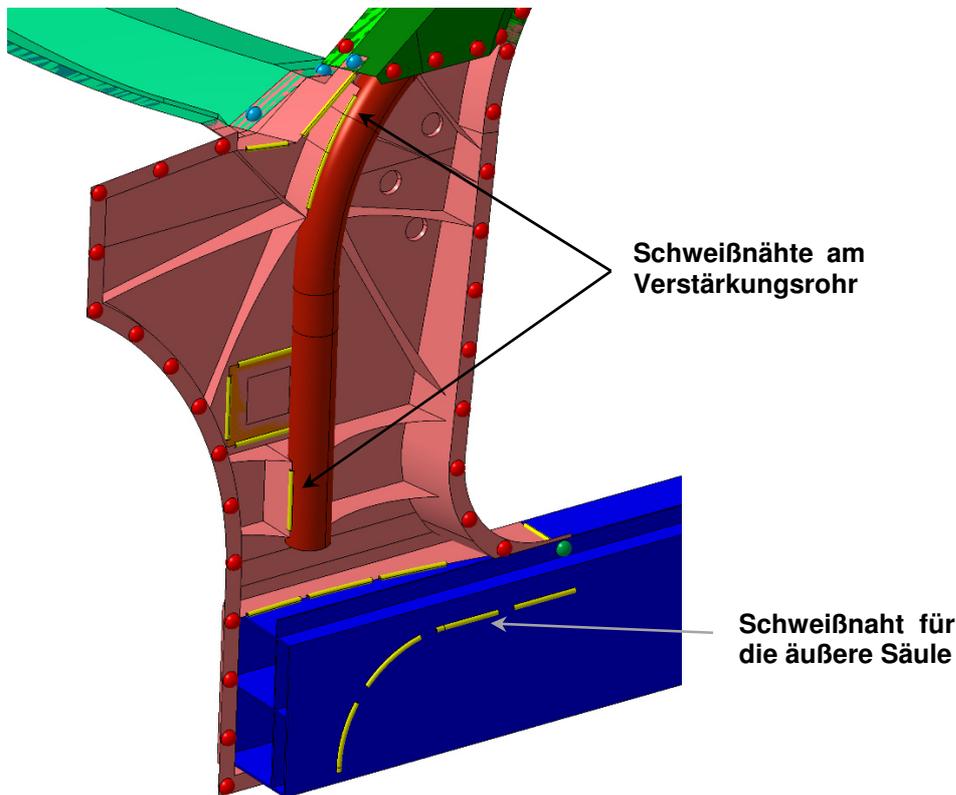


Abbildung 51: Verbindung des Verstärkungsrohrs mit der A-Säule

Im Fertigungsprozess einer Karosserie spielt neben den eingesetzten Fügeverfahren auch die Fügefolge eine entscheidende Rolle. Wird die Reihenfolge der zu verbindenden Teile nicht beachtet, kann es leicht dazu kommen, dass ein bereits montiertes Bauteil die Verbindungsstelle eines anderen versperrt. Um dies zu vermeiden, wird im CAD eine exakte Abfolge erstellt, nach der die Bauteile verbunden werden. Zusätzlich ist in den CAD-Daten in jeder einzelnen Verbindungsgruppe ein Part mit der entsprechenden Füge-technik angehängt, die notwendig ist, um die Teile einer Gruppe zu verbinden.

Ausgangspunkt der Fügefolge ist der Stirnwandquerträger mitsamt den Gussknoten, mit denen er an den unteren, inneren A-Säulen verbunden wird. An ihn werden die inneren A-Säulen und die Schweller, die vorab miteinander verbunden wurden, in Y-Richtung zugefahren und verschweißt.

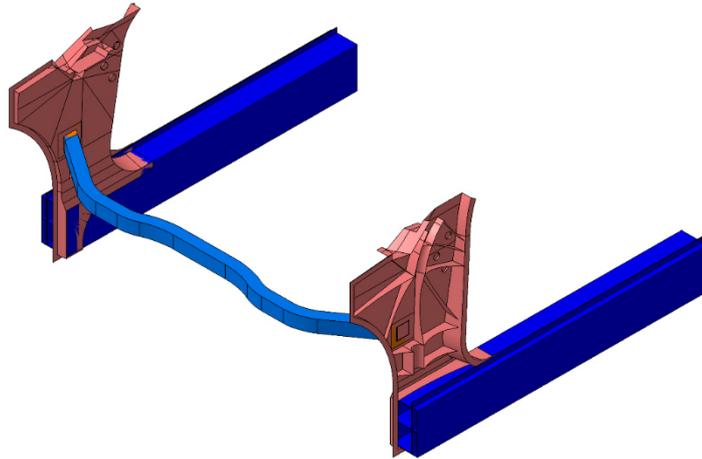


Abbildung 52: Erster Schritt der Fügefolge

Sind diese Bauteile miteinander verbunden, so kann der untere Scheibenquerträger zwischen den Säulen eingelegt und vernietet werden. Nachdem er in die Struktur integriert ist, wird die Stirnwand eingesetzt und mit dem Scheibenquerträger, dem Stirnwandquerträger und den inneren A-Säulen vernietet.

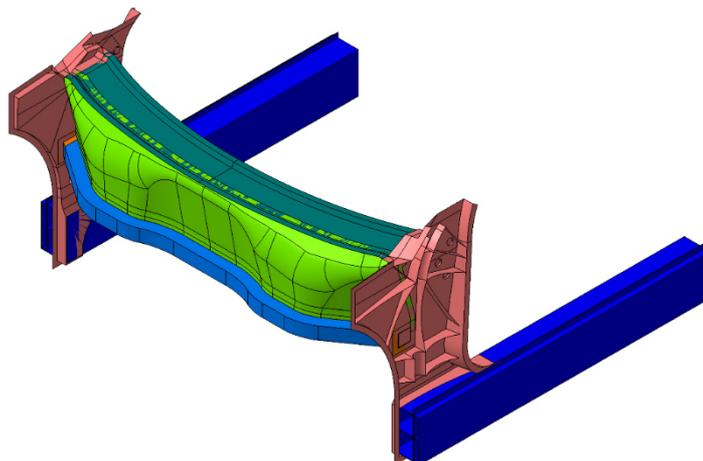


Abbildung 53: Zweiter Schritt der Fügefolge

Im nächsten Schritt wird das Modell mit den oberen, inneren A-Säulen und den unteren Knotenblechen des Dachrahme, die im Vorfeld separat gefügt werden, ergänzt. Diese werden von der Innenseite an die unteren, inneren A-Säulen angenietet. Danach wird

zusätzlich das Verstärkungsrohr an den unteren und oberen A-Säulen, sowie den Knotenblechen verschweißt.

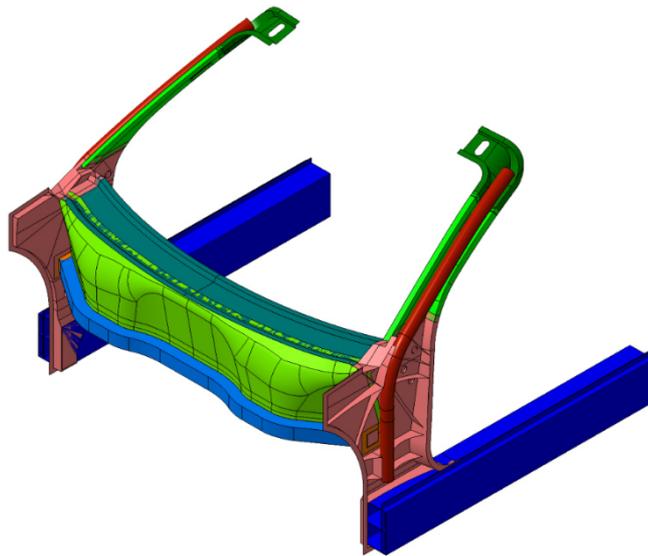


Abbildung 54: Dritter Schritt der Fügefolge

Die äußere A-Säule bildet in sich eine extra Baugruppe, ihre Einzelteile werden vorab miteinander verbunden. Im letzten Schritt werden die äußeren A-Säulen in Y-Richtung an die bereits bestehende Struktur herangefahren und ebenfalls vernietet, bevor die obere Schale des Dachquerträgers eingesetzt werden kann.

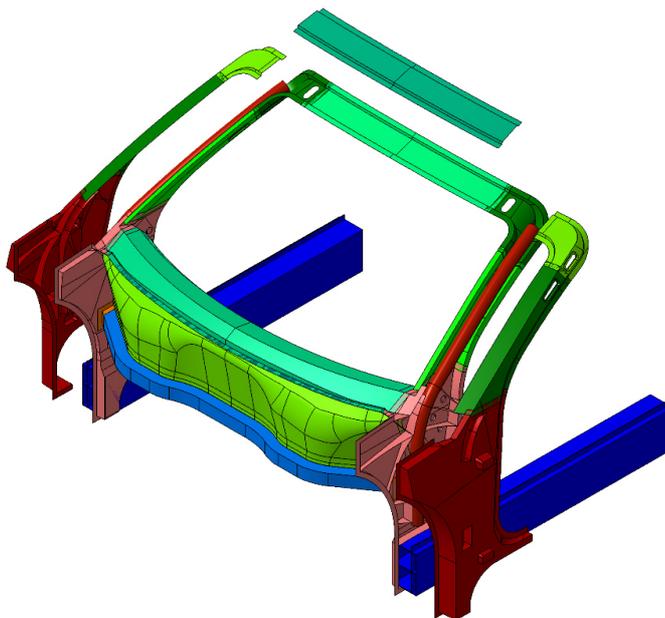


Abbildung 55: Vierter Schritt der Fügefolge

11.10 Berechnungsergebnisse

Obwohl in der Fahrzeugindustrie die A-Säulen von Cabriolets, zumindest im Bereich des Dachrahmens, aus hoch- und höchstfesten Stählen gefertigt werden, wird die gesamte erste Variante in Aluminium ausgelegt, um deren Verhalten während einer Dacheindrückung zu untersuchen. In der nachfolgenden Abbildung 56 ist diese Variante mit der Zuordnung der Wandstärken dargestellt. Unter Verwendung dieser Wandstärken, kommt das Modell auf ein Gewicht von 50,5kg.

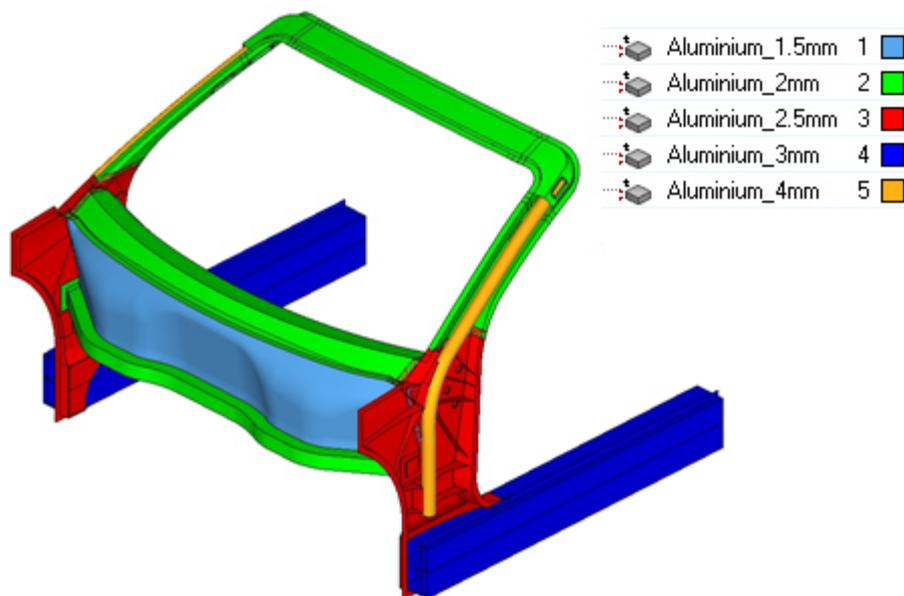


Abbildung 56: Zuordnung der Wandstärken

Die Anforderungen, die die FMVSS 216a an geschlossene Fahrzeuge stellt, erfüllt diese Variante unter den gegebenen Umständen nicht. Unter der Last von 50.000N, die der Stempel auf die linke, obere Ecke des Dachrahmes aufbringt, liegen die maximalen Knotenverschiebungen, normal zur Stempelfläche, bei 144,3mm. Die zulässige maximale Verformung wird in der durchgeführten Rechnung somit um 17,2mm überschritten. Die sehr großen Verschiebungen sorgen zudem

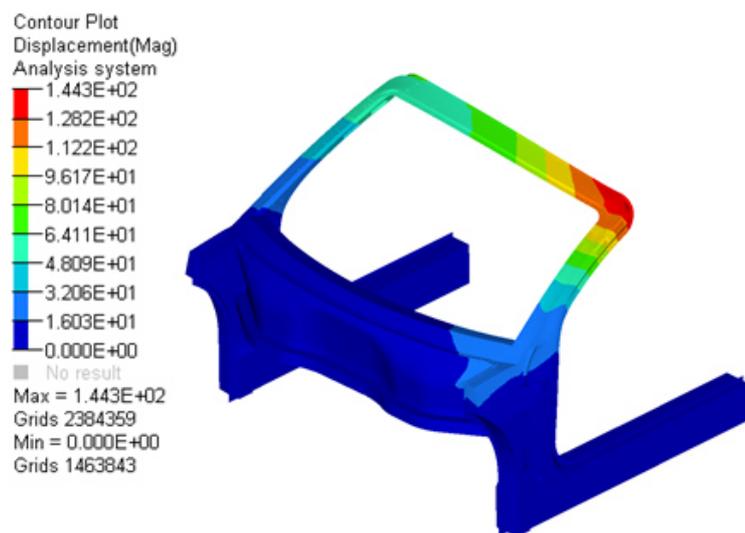


Abbildung 57: Verschiebung aufgrund der Dacheindrückung

dafür, dass in den meisten Teilen der A-Säule die Spannungen, nach von Mises, deutlich oberhalb der Zugfestigkeit von Aluminium liegen.

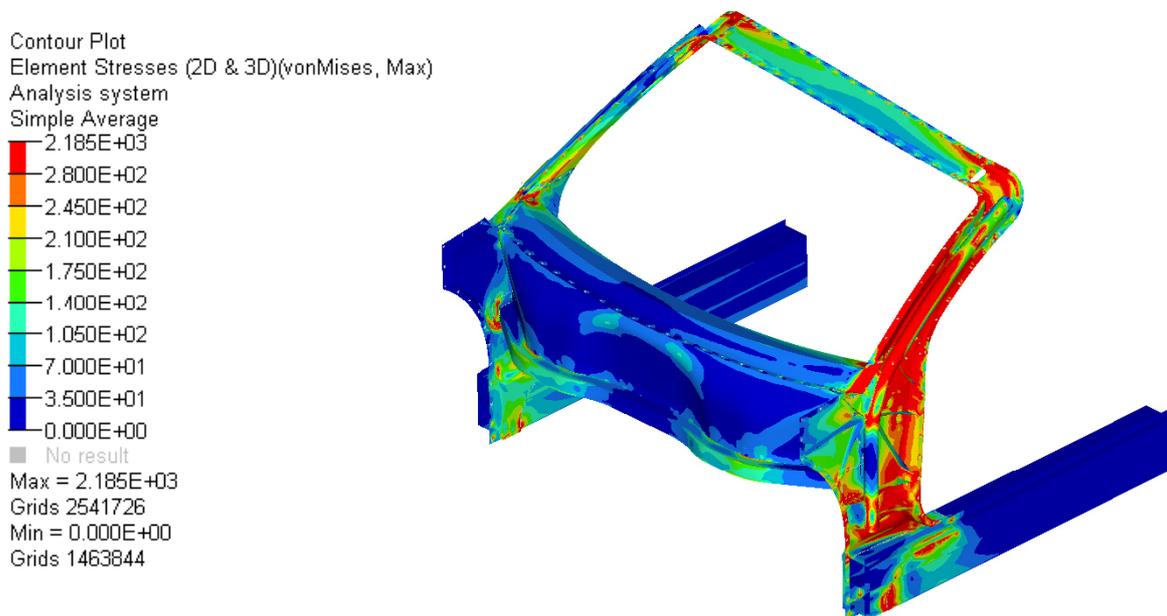


Abbildung 58: Spannungen nach von Mises

In der nachfolgenden Tabelle ist eine Auswahl an Aluminiumlegierungen mit ihren Dehngrenzen und Zugfestigkeiten dargestellt, die im Karosseriebau verwendet werden.

Tabelle 6: Auswahl an Aluminiumlegierungen für Teile der Rohkarosserie [Ostermann 2007]

Werkstoffe	Dehngrenze ($R_{p,0,2}$) [MPa]	Zugfestigkeit (R_m) [MPa]
Gusswerkstoffe:		
EN AC-43000-T6	220	260
EN AC-42100-T6	210	290
Profile:		
EN AW-6060-T6	215	245
EN AW-6106-T6	240	275
EN AW-6005A-T6	260	285
EN AW-6082-T6	280	340
Blechwerkstoffe:		
EN AW-5754-H18	270	315
EN AW-6181A-T6	250	300

Die maximalen Spannungen, die in der A-Säule der ersten Variante auftreten, entstehen an drei verschiedenen Stellen. Zum einen am Kontaktpunkt zwischen Stempel und Dachrahmen und im Übergang der oberen zur unteren A-Säule, zum anderen dort, wo die untere A-Säule auf den Schweller läuft. Mit Werten von bis zu 2185MPa überschreiten sie die Zugfestigkeiten der in der Tabelle 6 gezeigten Werkstoffe beinahe um den Faktor

Zehn. Aufgrund der deutlich zu hohen Spannungen, die ein Versagen des Modells nach sich ziehen werden, wird die Variante mit einer A-Säule aus Aluminium nicht weiter verfolgt. Trotzdem werden mit dem bereits bestehenden Modell weitere Berechnungen durchgeführt, die zeigen sollen, wie sich Änderungen im Materialeinsatz und der Geometrie einzelner Bauteile auswirken. Erkenntnisse daraus werden in die Konstruktion weiterer Varianten mit aufgenommen. Ein Hauptaugenmerk wird hierbei auf den Verlauf des Verstärkungsrohrs, sowie die Substitution von Aluminium durch Stahl gelegt.

In einer ersten Nebenrechnung werden die Schalen der oberen A-Säule aus Stahl mit einer Dicke von 1,5mm ausgeführt. Auch bei dem Verstärkungsrohr wird der Werkstoff in Stahl geändert. Da es sich bei diesem Versuch lediglich um eine Hilfsrechnung handelt, wird die Verbindungstechnik so wie bisher beibehalten. Allerdings wäre sie an einem realen Modell durch die Materialänderung so nicht mehr durchführbar.

Allein der Wechsel von Aluminium auf Stahl bei den Teilen der oberen A-Säule und dem Verstärkungsrohr sorgen dafür, dass die maximalen Verschiebungen in der Berechnung auf 118,1mm reduziert werden. Rein von der Verformung, sind somit die Anforderungen der FMVSS 216a bereits erfüllt. Die hohen Spannungen, die wiederum in nahezu allen Bereichen der A-Säule auftreten, würden jedoch dafür sorgen, dass die Bauteile im realen Fall versagen. Diese Spannungen gilt es, in den folgenden Konstruktionen zu verringern.

Weitere Betrachtungen liefern Aussagen darüber, wie das Verstärkungsrohr innerhalb der Säule gestaltet werden kann. Für diese Rechnungen werden, zusätzlich zu der ersten Variante, zwei weitere Modelle erzeugt, die mit den gleichen Randbedingungen berechnet werden. Wie der Verlauf der Rohre aussieht, zeigt die folgende Abbildung:

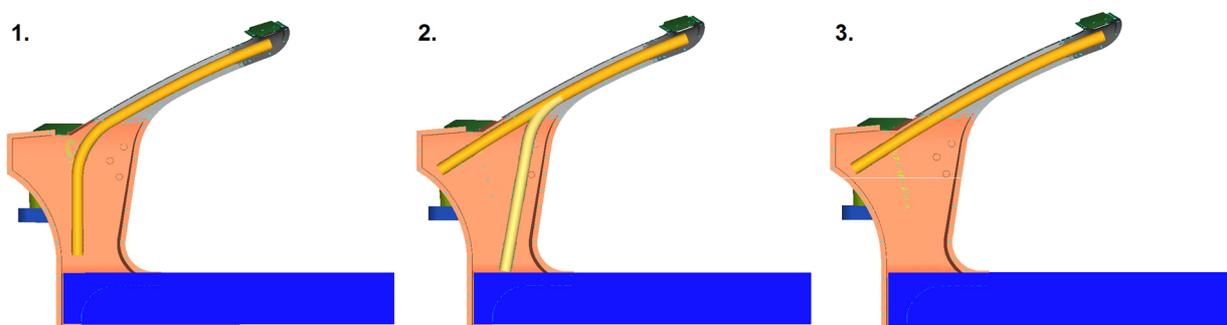


Abbildung 59: Verschiedene Varianten des Verstärkungsrohrs

Die Idee, die hinter dem zweiten Rohrverlauf steckt ist, dass durch die Gabelung des Verstärkungsrohrs die Spannungen in der unteren Säule aufgeteilt werden und sich nicht

auf einen Punkt konzentrieren. Dadurch, dass das untere Rohr möglichst weit an den Türflansch gesetzt wird, soll zudem der Hebelarm verkürzt werden, über den die Kraft an der unteren A-Säule angreift.

Bei der dritten Variante wird das Verstärkungsrohr möglichst gerade durch den Querschnitt des Dachrahmens geführt. Durch die Form des Dachrahmens ist es nicht möglich ein gerades Rohr in dessen Querschnitt einzusetzen. Es wird jedoch vermieden, dass das Rohr mehr als nötig gebogen und dadurch geschwächt wird.

Wie sich die verschiedenen Rohrvarianten in der Berechnung verhalten, wird in der Abbildung 60 dargestellt.

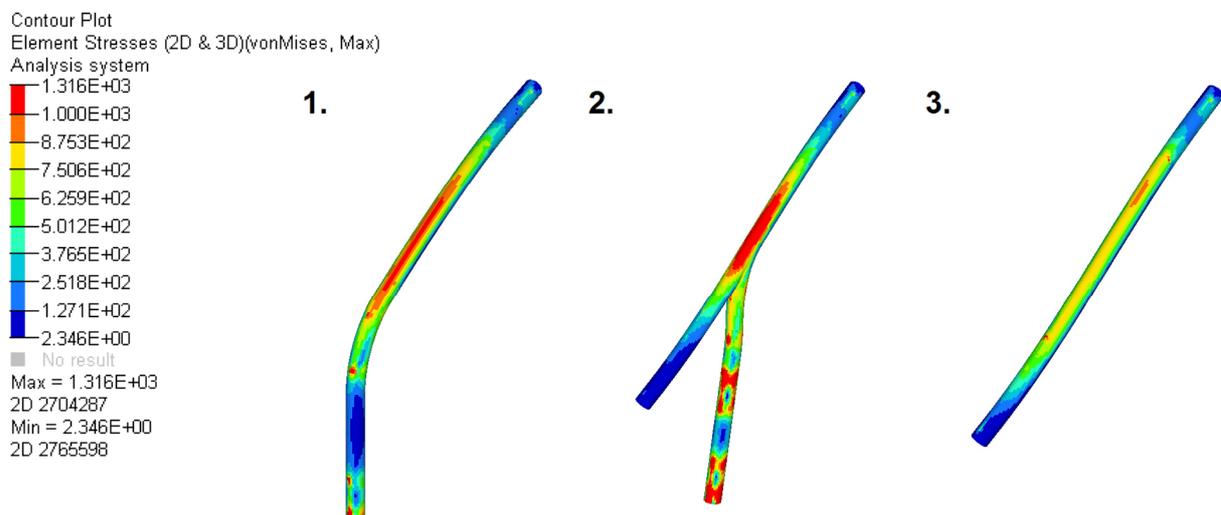


Abbildung 60: Spannungen in den jeweiligen Verstärkungsrohren

Im Vergleich zur Ausgangsvariante zeigt sich, dass die Spannungen in dem zweiten Verstärkungsrohr noch einmal deutlich ansteigen. Besonders in dem Punkt, wo das obere durch das untere Rohr abgestützt wird, ist eine Spannungskonzentration von maximal 1623,7MPa festzustellen.

Der beste Spannungsverlauf wird in der dritten Variante erzielt. Zwar ist hier die Gesamtverformung des Systems mit 120,2 mm größer als bei den anderen Berechnungen (erste Variante= 118,1mm, zweite Variante= 101mm Verformung), jedoch ist das möglichst gerade geführte Rohr auch das Rohr, welches am homogensten belastet wird. Aus diesem Grund wird in den nächsten Konstruktionsvarianten der Verlauf dieses Rohrs favorisiert.

12 Variante 2

Durch die Erkenntnisse der Berechnung der Variante 1, wird die Konstruktion so abgeändert, dass die unteren Teile der A-Säule in einer Blechschalenbauweise aus Stahl ausgeführt werden. Durch diese Änderung in der Bauweise ergeben sich zum Teil neue geometrische Bedingungen, die konstruktiv berücksichtigt werden müssen. Die Unterschiede werden im Einzelnen an den jeweiligen Bauteilen dargestellt. Teile, die von der ersten Variante übernommen werden, sind lediglich die Stirnwand und der Stirnwandquerträger. Die Geometrie des Dachrahmenquerträgers und der Knotenbleche des Dachrahmens wird ebenfalls beibehalten, allerdings ändert sich ihr Material von Aluminium in Stahl.

12.1 Die untere A-Säule

In dieser Variante wird die untere A-Säule durch tiefgezogene Blechschalen dargestellt. Die Grundflächen der einzelnen Bauteile bleiben hierbei größtenteils erhalten, da sie durch die Vorgaben definiert werden. Durch die neue Konstruktion nimmt die Komplexität der beiden Schalen, im Vergleich zu den Gussbauteilen, deutlich ab. Funktionen, wie zum Beispiel das Aufnehmen des Verstärkungsrohrs, müssen aber durch zusätzliche Teile übernommen werden. Ein weiterer Unterschied ist, dass die Entformungswinkel von Tiefziehteilen gegenüber den Entformungswinkeln bei Gussteilen deutlich größer sind. Abhängig von der Geometrie, liegen sie im Bereich von mindestens 5° - 15° . Diesen Unterschied kann man besonders an den Anbindungspunkten für die Türscharniere und den Instrumententafelträger wahrnehmen.

Wegen der Scheibenauflagefläche, die weiterhin in die A-Säule integriert werden muss, ändert sich der Flanschverlauf im Bereich unterhalb der Fläche für den Fußgängerschutz. Da ein Richtungswechsel des Flanschs, wie bei der

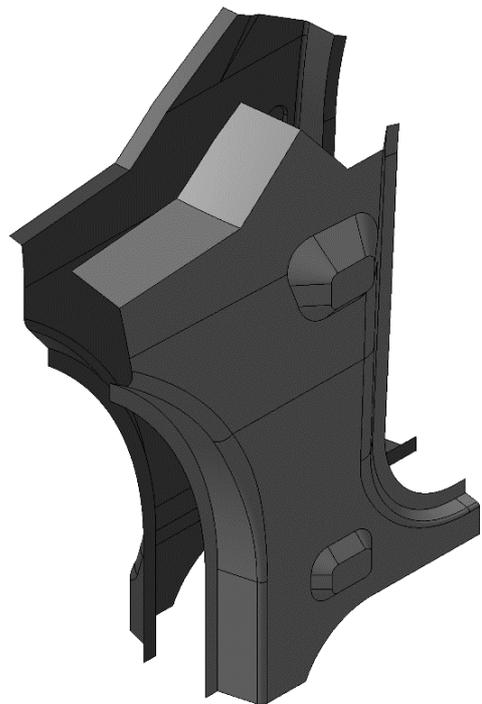


Abbildung 61: Schalen der A-Säule

Gusssäule, in der Blechschalenbauweise nicht realisiert werden kann, zeigt der Flansch hier in Richtung der Fahrzeugmitte.

12.2 Die obere A-Säule

An den Blechschalen der oberen A-Säule beschränken sich die Änderungen für die

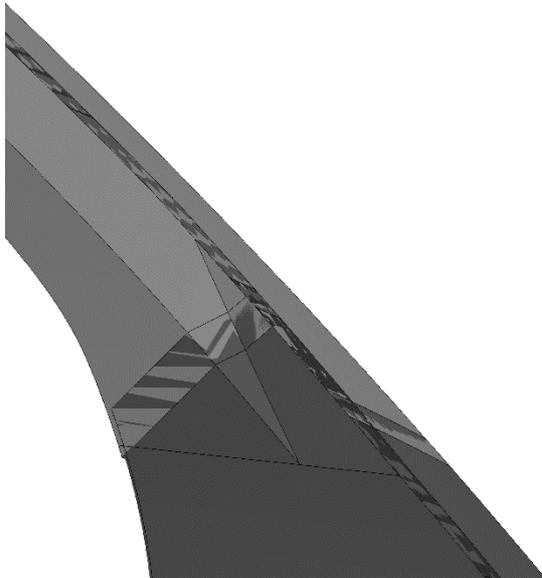


Abbildung 62: Verlauf von der oberen zur unteren A-Säule

zweite Variante auf deren unteren Bereich.

An dieser Stelle muss erneut darauf geachtet

werden, dass ein homogener Verlauf

zwischen oberer und unterer Säule entsteht.

Damit dies der Fall ist, muss hier, wie in der

nebenstehenden Abbildung dargestellt, ein

Sprung in die Flächen eingebaut werden.

Durch diese Übergangsfläche ist es möglich,

die Verbindungsflansche, auf denen die

Scheibe aufliegt, aufeinander zu führen. In

der Realität muss ein solcher Übergang, z.B.

durch große Verrundungsflächen, deutlich

gleichmäßiger ausgeführt werden.

Eine weitere Änderung betrifft die Lage der sich überlappenden Stellen, an denen die

obere mit der unteren Säule verschweißt wird. Da diese Verbindung in dem Bereich liegt,

in dem während der Dacheindrückung mit die höchsten Belastungen auftreten, wird

versucht, die Fügestelle auseinanderzuziehen. Dafür wird die obere, äußere Blechschale

weiter nach unten verlängert. Somit liegt die Verbindungsstelle nicht mehr auf exakt

derselben Höhe, was die Stabilität der Struktur verbessern soll.

12.3 Der Scheibenquerträger

Durch das Wegfallen der Rippen, auf denen der Scheibenquerträger in der ersten

Variante aufliegt, muss dessen Geometrie ebenfalls verändert werden. Die Gestalt der

unteren A-Säule ermöglicht in diesem Fall jedoch eine relativ simple Lösung. An dem

linken und rechten Ende des Scheibenquerträgers werden Verbindungsflansche

abgestellt, über die er an der Innenfläche der Säule vernietet werden kann.

12.4 Der Schweller

Obwohl der Schweller aus einem Aluminiumprofil einen Gewichtsvorteil gegenüber einem Schweller aus Stahl hat und er der Belastung der Dacheindrückung unter Umständen standhalten würde, wird in der zweiten Variante auf einen zweischaligen Stahlschweller gesetzt (siehe Abbildung 63). Der Vorteil, der daraus resultiert, liegt vor allen Dingen in der Montage. Der Fuß der A-Säule wird im Verlauf der Konstruktion mit zusätzlichen Verstärkungsblechen ausgesteift. Dadurch, dass der Schweller zweiteilig ausgeführt ist, ist es möglich, diese Verstärkungsbleche mit dem jeweiligen Schwellerteil zu verbinden. Bei dem Aluminiumprofil,

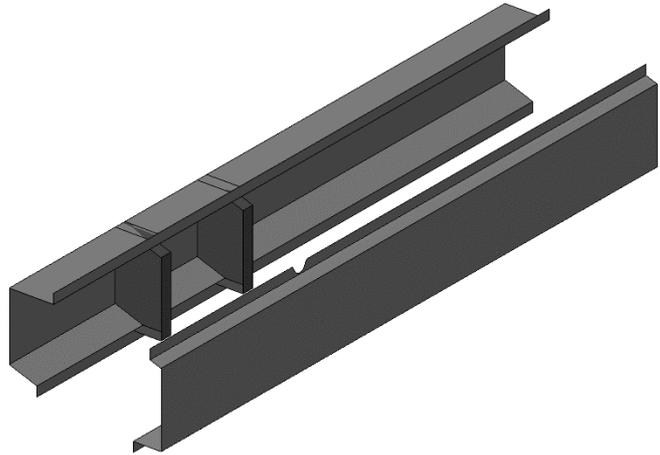


Abbildung 63: Schweller in Schalenbauweise

welches in den meisten Situationen nur einseitig zugänglich ist, wäre dies nicht möglich. Obwohl sich die Schalen des Schwellers ebenfalls aus Aluminium herstellen ließen, wird darauf verzichtet, da die umliegenden Bauteile allesamt aus Stahl bestehen.

Nachteilig bei dieser Art von Schweller ist jedoch, dass ein relativ großer Hohlquerschnitt entsteht. Gegenüber dem Aluminiumprofil mit seinen horizontalen und vertikalen Stegen, büßt er dadurch einen Großteil seiner Torsionssteifigkeit ein. Dieser Verlust an Steifigkeit muss durch zusätzlich in den Querschnitt eingebrachte Schotte aufgefangen werden. Bei der Dacheindrückung würde sich der Schweller ansonsten in sich verdrehen und zu den Seiten ausbeulen.

12.5 Verstärkungen

Die größten Unterschiede, die die zweite Variante ausmachen, befinden sich im Inneren der A-Säule. Besonders im unteren Bereich müssen zusätzliche Teile eingesetzt werden, die die Struktur verstärken, da diese Funktion nicht mehr, wie bei Gussteilen, von Rippen übernommen werden kann. Außerdem muss eine neue Möglichkeit bereitgestellt werden, um das Verstärkungsrohr aufzunehmen. Aufgrund von Zieh winkeln und der Ziehtiefe ist

es nicht möglich, die Blechschalen so zu formen, dass sie eine direkte Anlagefläche für das Rohr bilden. Eine solche Durchsetzungen würde zudem die Anbindung der Stirnwand behindern. Eine andere Option ist der Einsatz von zwei zusätzlichen Blechteilen, die das Rohr jeweils zur Hälfte umschließen und an der Innenseite der jeweiligen unteren A-Säule verschweißt werden (siehe Abbildung 64). Ein Problem, das bei dieser Anbindung auftritt ist, dass sie relativ viel Platz benötigt, weshalb sie nur im vorderen Bereich des Verstärkungsrohrs eingesetzt werden kann. Ziel sollte es jedoch sein, das Rohr so früh wie möglich in der unteren Säule aufzunehmen, da sich

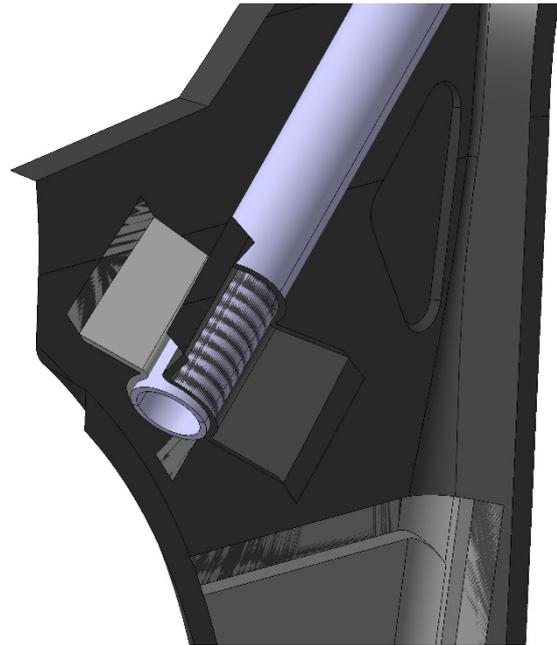


Abbildung 64: Anbindungsvariante für das Verstärkungsrohr

ansonsten der Hebelarm zwischen der Krafteinleitung durch den Stempel und der Anbindung verlängert. Dies würde zu einer höheren Belastung führen. Außerdem könnte durch diese beiden Bleche das Verstärkungsrohr nur auf der Innenseite verschweißt

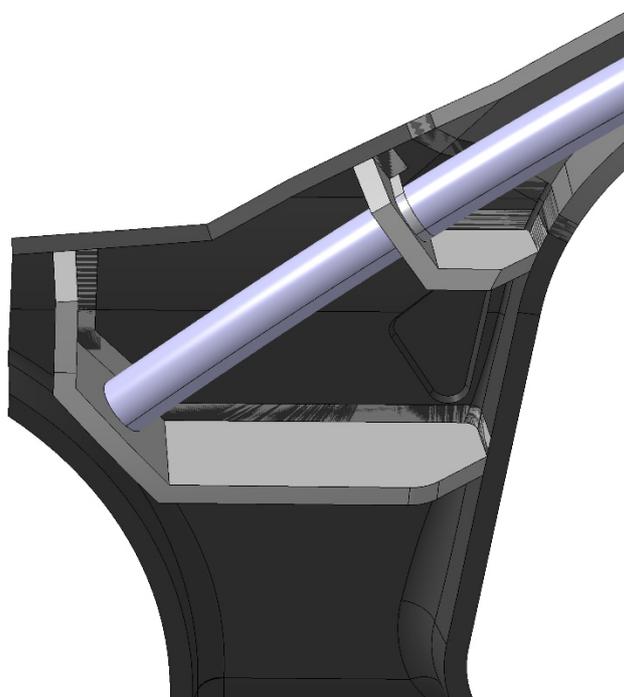


Abbildung 65: Anbindung des Verstärkungsrohrs

werden. Auf der Außenseite würde, durch die begrenzte Zugänglichkeit, lediglich ein Formschluss entstehen, der gegebenenfalls durch Kleber unterstützt wird. Diese negativen Eigenschaften sorgen letztendlich dafür, dass diese Aufnahme aus der Konstruktion verschwunden ist. Stattdessen werden als Rohraufnahme Schotte eingesetzt, die das Rohr umschließen und über einen abgestellten Kragen mit ihm verschweißt werden (siehe Abbildung 65). Allerdings entsteht auch bei dieser Anbindung das Problem der einseitigen Zugänglichkeit.

Aus diesem Grund werden die Schotte am Verbindungsflansch zur äußeren Säule lediglich verklebt. Alternativ dazu könnte

jedoch auch eine Lochschweißung durchgeführt werden. Die Schotte haben den Vorteil, dass sie wie Schubfelder wirken und dadurch ein Verdrehen der Säule in sich verhindern.

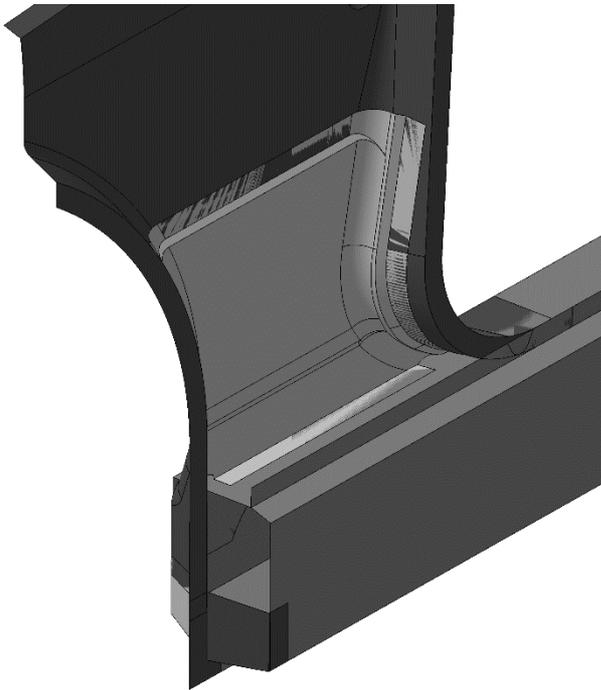


Abbildung 66: Verstärkungsblech

Wie bereits am Anfang erwähnt, werden in dem Bereich oberhalb des Schwellers zusätzliche Verstärkungen in die A-Säule eingesetzt. Diese Verstärkungsbleche werden unmittelbar an den bereits vorhandenen Säulen angelegt und verschweißt. Nach unten stützen sie sich zusätzlich auf dem Schweller ab und leiten somit Kraft aus der Säule in diesen ein. Der Grund, warum diese Verstärkungen eingesetzt werden, wird in den Berechnungsergebnissen erläutert.

12.6 Fügetechnik und Fügefolge

Die Fügetechnik der zweiten Variante ändert sich insofern, dass durch den Einsatz von Stahl, anstatt von Nieten, das schnellere und kostengünstigere Widerstandspunktschweißen eingesetzt werden kann. Aufgrund mangelnder Zugänglichkeit im Bereich des Schwellers und der Schotte, zur Anbindung des Verstärkungsrohrs, wird mehrfach Strukturkleber eingesetzt. In der Berechnung werden die Klebenähte wie Schweißnähte behandelt und über ideal steife „Rigid Elemente“ dargestellt. Insgesamt kommen bei der zweiten Variante 606 Schweiß- bzw. Nietpunkte, ca. 2180mm Klebenähte und ca. 1040mm Schweißnähte zum Einsatz.

In der Fügefolge der Variante 2 werden die Säulen, der Schweller sowie das Verstärkungsrohr in Unterbaugruppen vorab mit ihren Verstärkungsblechen bzw. Anbindungsschotten verbunden. Die prinzipielle Reihenfolge, in der die Bauteile miteinander gefügt werden, gleicht danach der Fügefolge der Variante 1 und wird daher nicht noch einmal separat aufgelistet.

12.7 Berechnungsergebnisse

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse dargestellt, die auf Basis der zweiten Konstruktionsvariante erzeugt wurden. Um die Berechnungsergebnisse untereinander vergleichen zu können, werden die Randbedingungen der FEM-Berechnung so beibehalten, wie sie bereits in der Variante 1 definiert sind. Das heißt, dass die Lagerung des Modells, die aufgebrachte Kraft und die Art der Kräfteinleitung sowie die Berechnungsmethode nicht verändert werden.

In der nachfolgenden Abbildung ist ein Bruchdehnungs-Zugfestigkeits-Diagramm verschiedener Stahlsorten dargestellt.

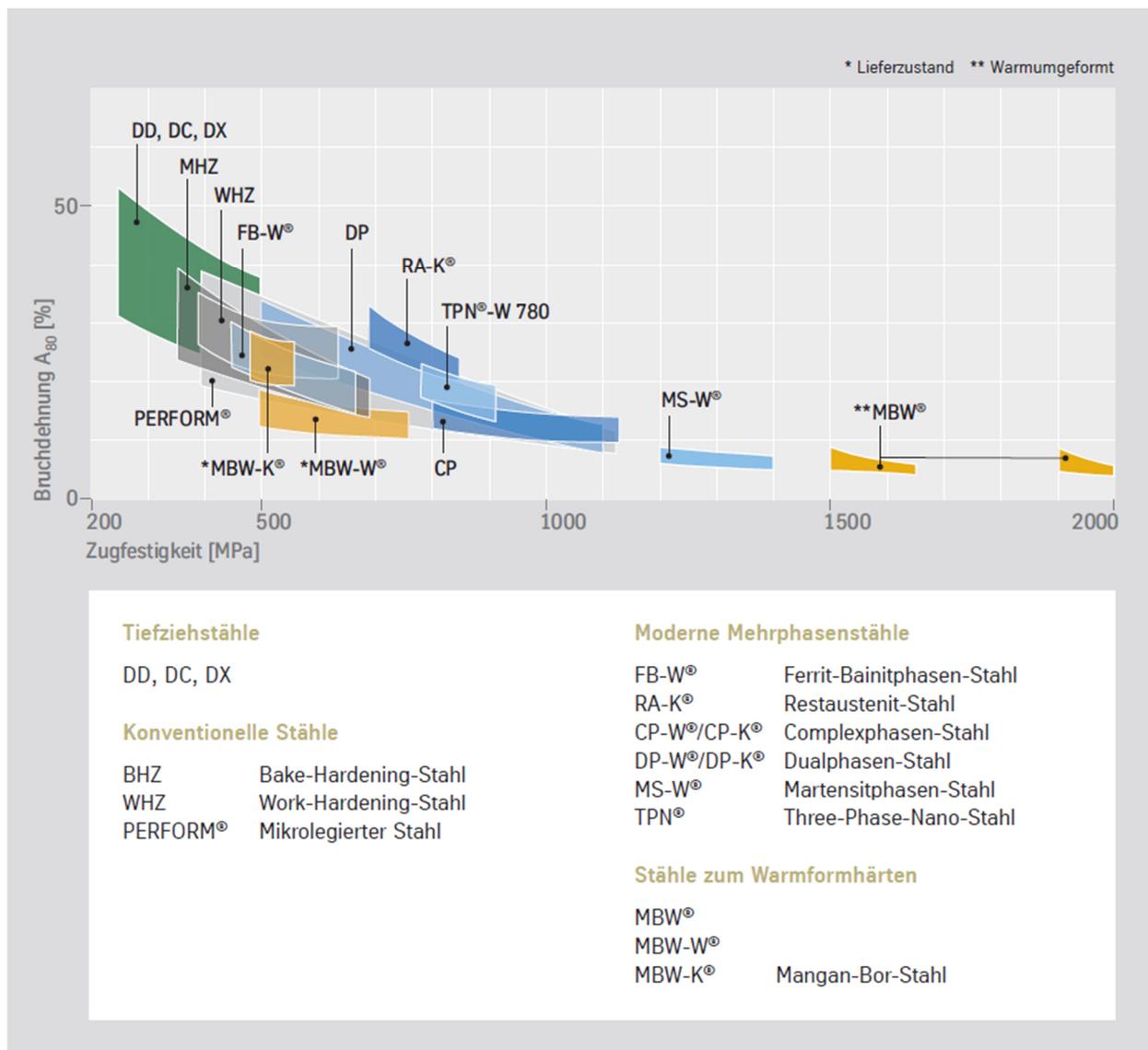


Abbildung 67: Bruchdehnungs-Zugfestigkeits-Diagramm [THY14]

Die Zugfestigkeiten der im Schaubild gezeigten Stähle sollen im Verlauf dieser Arbeit als Richtwerte dienen. Es wird davon ausgegangen, dass die Kraft, die durch die Dacheindrückung auf den Dachrahmen des Fahrzeugs wirkt, eine plastische Verformung nach sich ziehen wird. Spannungen, die im Modell auftreten und deren Werte oberhalb der Zugfestigkeiten der Stähle liegen, führen jedoch dazu, dass sich an diesen Stellen das Material nicht nur plastisch verformt, sondern ganz versagt.

In der Abbildung 67 sind die Wandstärken und das verwendete Material den einzelnen Bauteilen der Variante 2 zugeordnet.

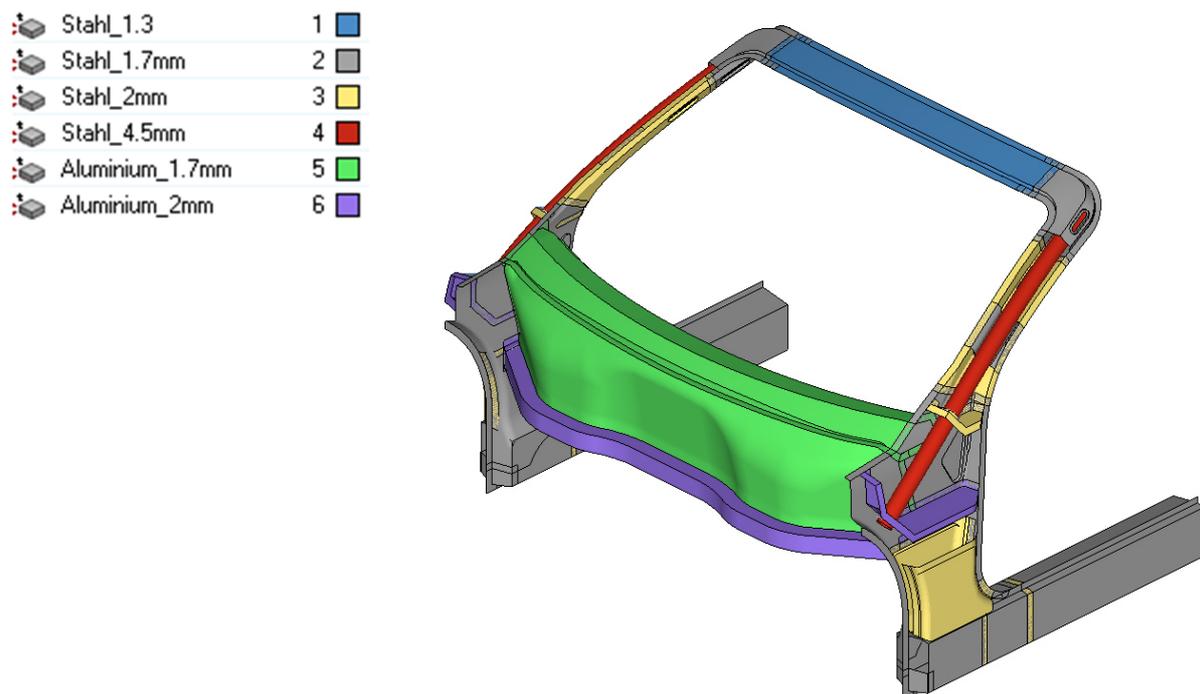


Abbildung 68: Wandstärken- und Materialzuweisung

Dadurch, dass die Bauteile dieses Modells größtenteils aus Stahl gefertigt werden und an hoch belasteten Stellen relativ große Wandstärken aufweisen, wächst das Gewicht im Vergleich zu der Variante aus Aluminium um ganze 21,6kg auf 72,1kg an. Die maximale Verformung aus der Berechnung liegt bei gerade einmal 76,4mm. Dies würde bedeuten, dass die A-Säule aus Stahl bereits überdimensioniert ist, da die Verformung des Dachrahmens deutlich unter den geforderten 127mm liegt.

Um die ermittelten Verschiebungen zu verifizieren, werden zur weiteren Beurteilung der Variante 2 die Vergleichsspannungen nach von Mises herangezogen. Unter der Belastung der Dacheindrückung ergibt sich das in Abbildung 69 dargestellte Spannungsbild.

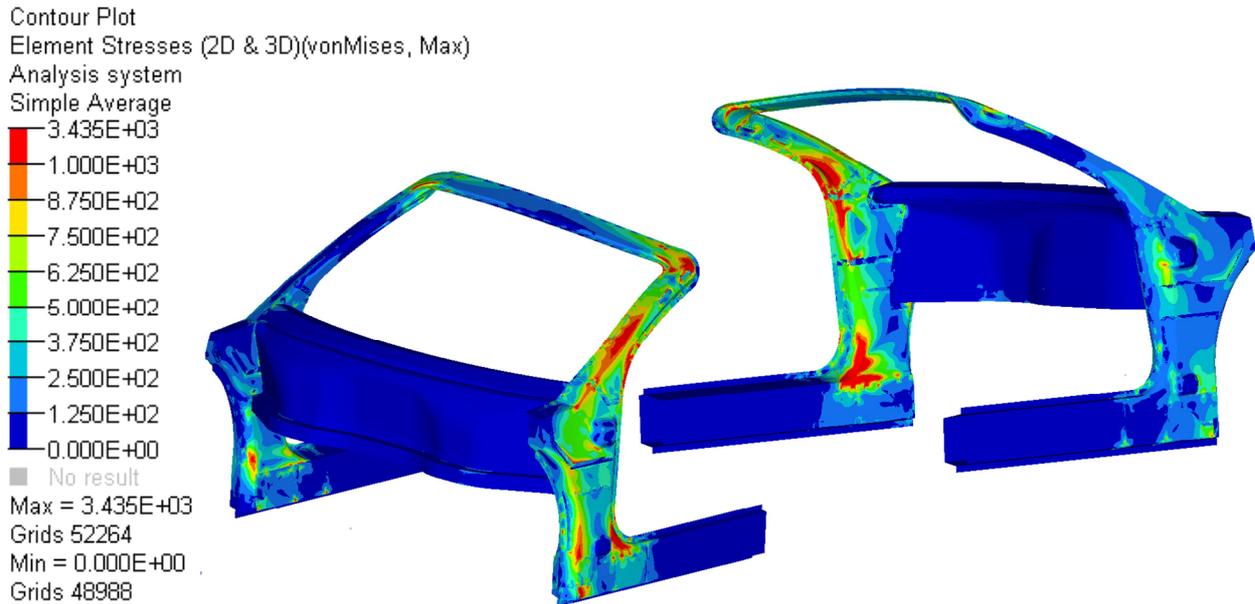
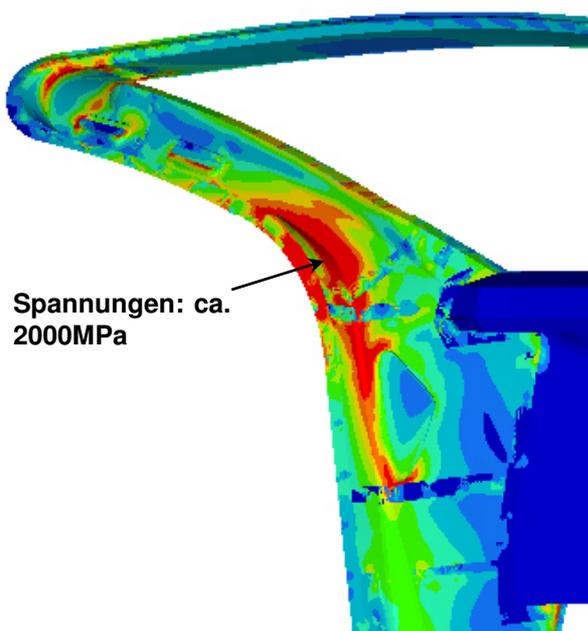


Abbildung 69: Spannungsbild der Variante 2

Wie bei der Variante 1, sind auch in diesem Modell drei einzelne Bereiche der Struktur besonders hoch belastet. Die maximalen Spannungen von 3435MPa entstehen am oberen Knotenblech des Dachrahmens. Da dieses Knotenblech jedoch nicht Hauptbestandteil der tragenden Struktur der A-Säule ist, werden die Spannungen, die zu einem Versagen des Materials führen, hier vernachlässigt.



Von größerer Bedeutung für die Gesamtstruktur ist die zweite kritische Stelle. Sie ist der Übergang zwischen der oberen zur unteren A-Säule. Besonders auf der Innenseite des Fahrzeugs entstehen hier lokale Spannungsspitzen, die im Bereich von 2000MPa liegen. Diese Spannungen konzentrieren sich vor allen Dingen an einer nicht verrundeten Kante des Modells.

Abbildung 70: Spannungsspitze in der oberen A-Säule

Der letzte Bereich, in dem verstärkt hohe Spannungen auftreten, ist der Bereich, in dem die untere, innere A-Säule über einen Radius auf den Schweller geführt wird. Hier beult sich die Blechschale der inneren A-Säule unter der Belastung lokal ein. Zwar sind die

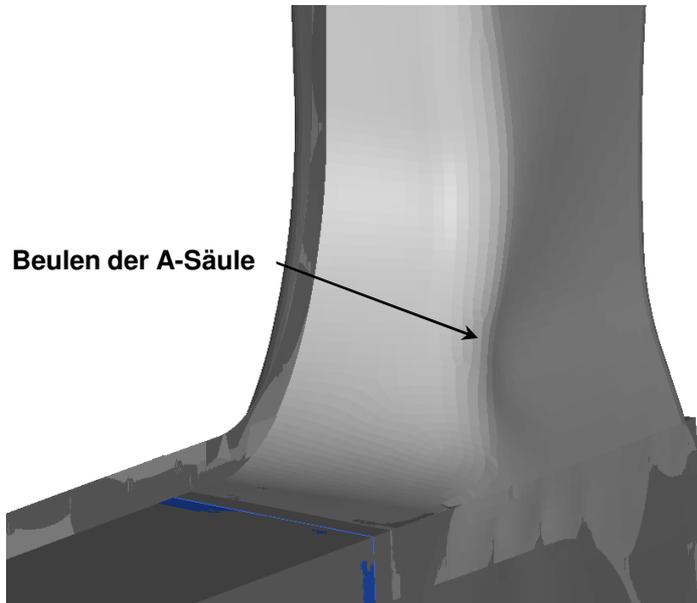


Abbildung 71: Beulen der unteren A-Säule

Verformungen, die durch das Beulen entstehen, im Vergleich zur Gesamtverformung des Systems relativ klein, jedoch wird das Bauteil dadurch geschwächt. Nach dem oberen Knotenblech des Dachrahmens, treten an genau dieser Stelle die zweitgrößten Spannungen im Modell auf. Dem Einbeulen und den damit verbundenen hohen Spannungen, wirken die im Verlauf der Konstruktion in die unteren, inneren

A-Säulen eingesetzten Verstärkungen, entgegen. In Abbildung 72 ist der Unterschied zwischen der verstärkten und der nicht verstärkten Säule zu sehen. Es lässt sich erkennen, dass die zusätzlich eingebrachten Verstärkungen einen Teil der Belastung aufnehmen, wodurch die Spannungen in den Schalen um ca. 145MPa verringert werden. Jedoch bleiben die Spannungen mit bis zu 3179MPa in einzelnen Elementen auf einem extrem hohen Niveau.

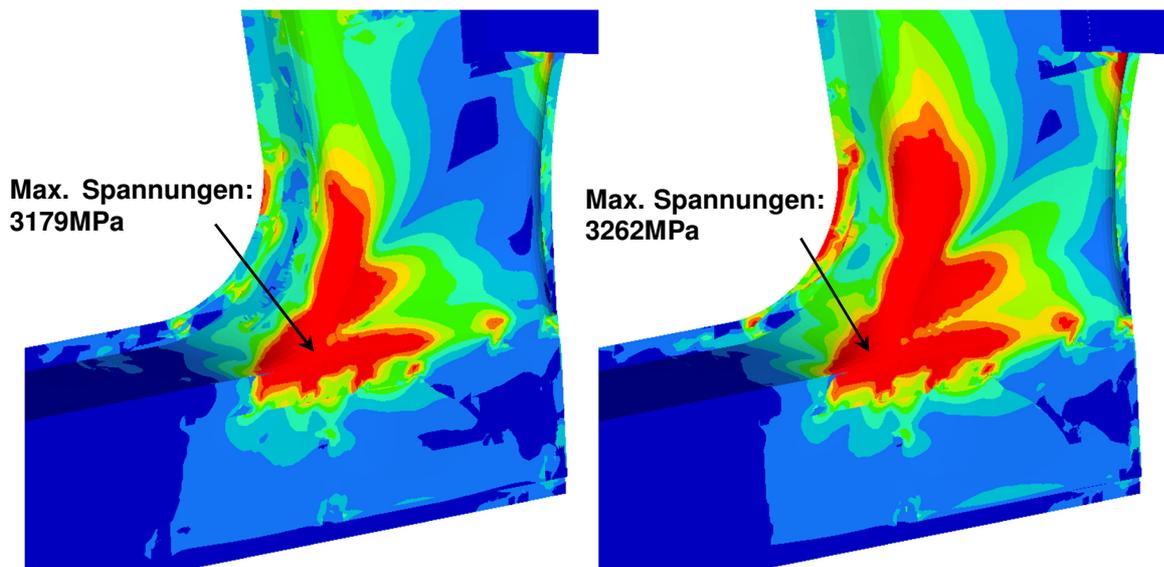


Abbildung 72: Spannungen links mit und rechts ohne Verstärkungen

Somit ist das Verstärkungsrohr samt seinen Anbindungen das einzige Bauteil, das unmittelbar die Kraft der Dacheindrückung aufnimmt und in dem die Spannungen konstant unter 1000MPa liegen.

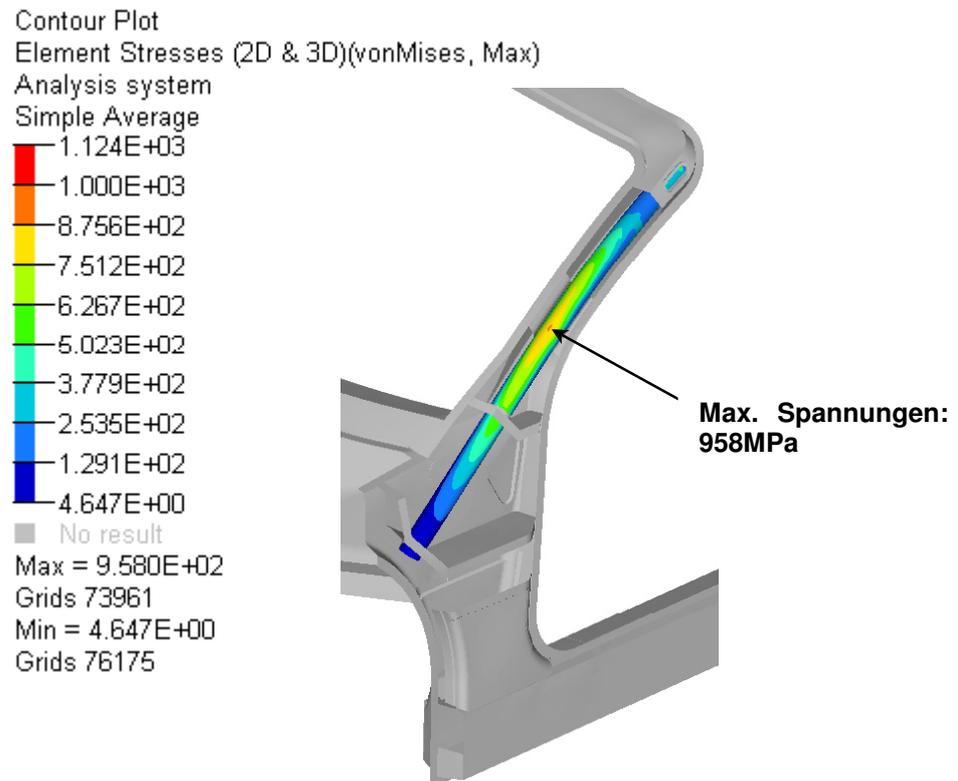


Abbildung 73: Spannungsverlauf im Verstärkungsrohr

Im Vergleich zu Variante 1 kommt die Variante 2 den Anforderungen einer Dacheindrückung deutlich näher. Spannungsspitzen treten nicht mehr großflächig im gesamten Modell auf, sondern verteilen sich auf einzelne lokale Bereiche. Fest steht jedoch, dass dort, wo die Spannungen Werte von 2000MPa bis hin zu 3435MPa annehmen, die Zugfestigkeit von Stählen, die im Karosseriebau eingesetzt werden, deutlich überschritten wird. An den Stellen, wo sie auftreten, war es jedoch auch durch zusätzliche Verstärkungen und dem dadurch erhöhten Materialeinsatz nicht möglich, die Spannungen signifikant zu reduzieren. In welcher Form der Werkstoff unter der Dacheindrückung, die definitiv eine plastische Verformung nach sich ziehen wird, versagt und ob beispielsweise das Verstärkungsrohr ein solches Versagen kompensieren könnte, darüber lässt sich anhand der durchgeführten Berechnung keine Aussage treffen. Allerdings sind die ausgegebenen Verformungen von 76,4mm äußerst kritisch zu betrachten.

13 Variante 3

In der Variante 2 wurde der Radius, der den Übergang zwischen der inneren A-Säule zum Schweller bildet, als eine Schwachstelle identifiziert. Durch eine zusätzliche Variante soll dieser Bereich umgestaltet werden, um das Spannungsniveau hier deutlich zu reduzieren. Die Idee, die hinter der Variante 3 steckt ist, dass sich die untere, innere A-Säule nicht mehr auf der oberen Fläche des Schwellers aufliegt, sondern gerade in diesen hineingeführt wird. Durch diese Änderung wird ein Querschnittsprung vermieden, der bei der Variante 2 dafür sorgt, dass sich die A-Säule im unteren Bereich einbeult. Die Konstruktion konzentriert sich ausschließlich auf die unteren A-Säulen samt Verstärkungsblechen und die Schweller. Wie sie ausgeführt ist, wird im Folgenden beschrieben. Die restlichen Bauteile werden aus den vorherigen Modellen übernommen.

13.1 Die untere A-Säule

In der nachfolgenden Abbildung ist der Bereich der unteren, inneren A-Säule zu sehen. Die Grundfläche der Säule wird in dieser Konstruktion senkrecht bis auf die untere Fläche des Schwellers geführt, auf der sie sich mithilfe eines Verbindungsflansches abstützt. Das Y-Niveau dieser Fläche wird durch die Anbindungspunkte des Instrumententafelträgers vorgegeben.

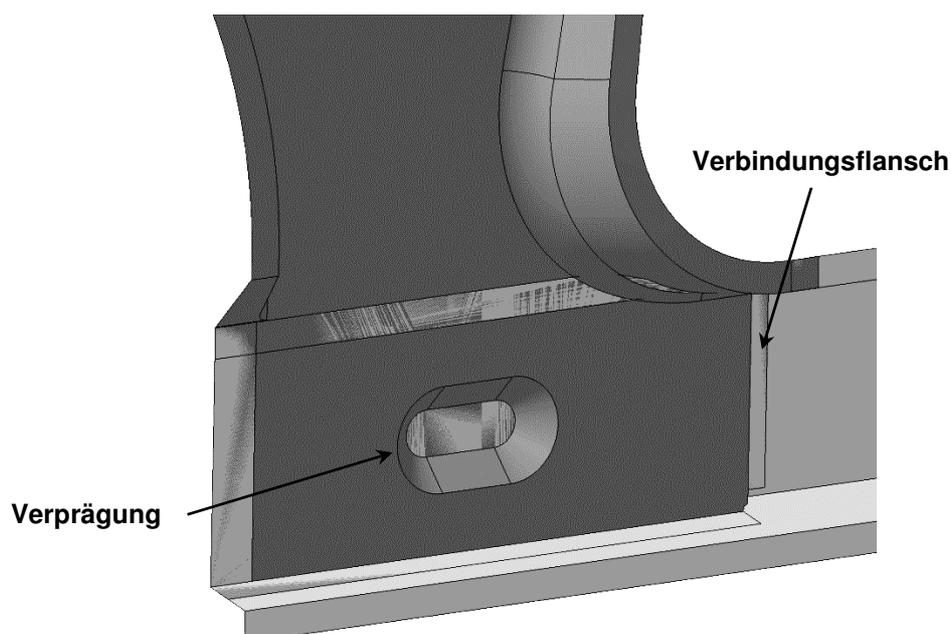


Abbildung 74: Untere, innere A-Säule der Variante 3

Mithilfe einer Verprägung und eines weiteren Verbindungsflanschs wird die Säule zusätzlich über Schweißpunkte mit dem Schweller verbunden. Diese Maßnahmen sollen dafür sorgen, dass die planare Fläche innerhalb des Schwellers zusätzlich ausgesteift ist. Eine weitere Änderung betrifft den vorderen Verbindungsflansch der A-Säulen. Im unteren Bereich laufen die Flansche der jeweiligen Säule auseinander. Dadurch kann die Ziehtiefe des inneren Schwellers verringert werden, der an diesem Flansch mit der Säule verbunden wird. Die entstehende Öffnung wird mit einem zusätzlichen Blechteil, dem so genannten Schließteil, verschlossen.

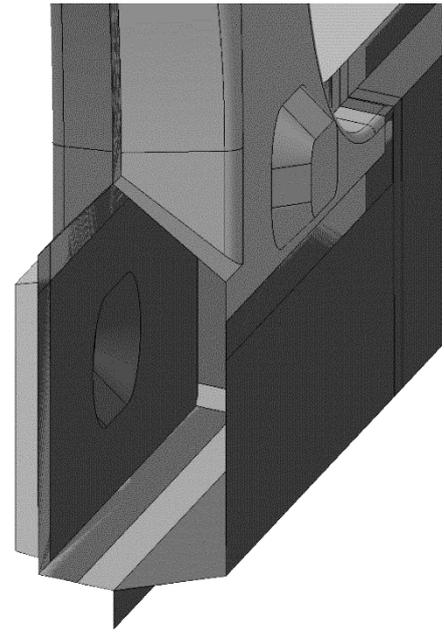


Abbildung 75: Öffnung im Schweller und den A-Säulen

13.2 Der Schweller

Auf die neue Form der A-Säulen müssen die beiden Schalen des Schwellers angepasst werden. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Schwellern, werden die Schalen der Variante 3 nicht mehr komplett von den A-Säulen umfasst. Auf der Innenseite legt sich die Schale des Schwellers vielmehr an der Schale der A-Säule an. Damit dies gewährleistet werden kann, folgt der obere Flansch des Schwellers den Flächen der inneren A-Säule. Schaut man sich den Schweller in Abbildung 75 an, sieht man im vorderen Bereich den Ausschnitt, durch den sowohl die innere A-Säule als auch ein Verstärkungsblech der äußeren A-Säule geführt wird.

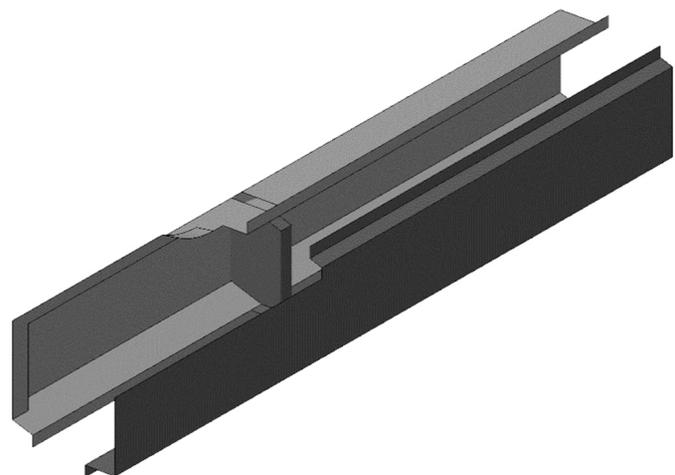


Abbildung 76: Schweller der Variante 3

13.3 Verstärkungen

In der Abbildung 77 wird ein X-Schnitt durch den Schweller, die unteren A-Säulen und das äußere Verstärkungsblech gezeigt. Wie zu sehen ist, bildet der innere Schweller mit der inneren A-Säule einen zusätzlichen Querschnitt. Darum wird an dieser Stelle auf eine weitere Verstärkung verzichtet.

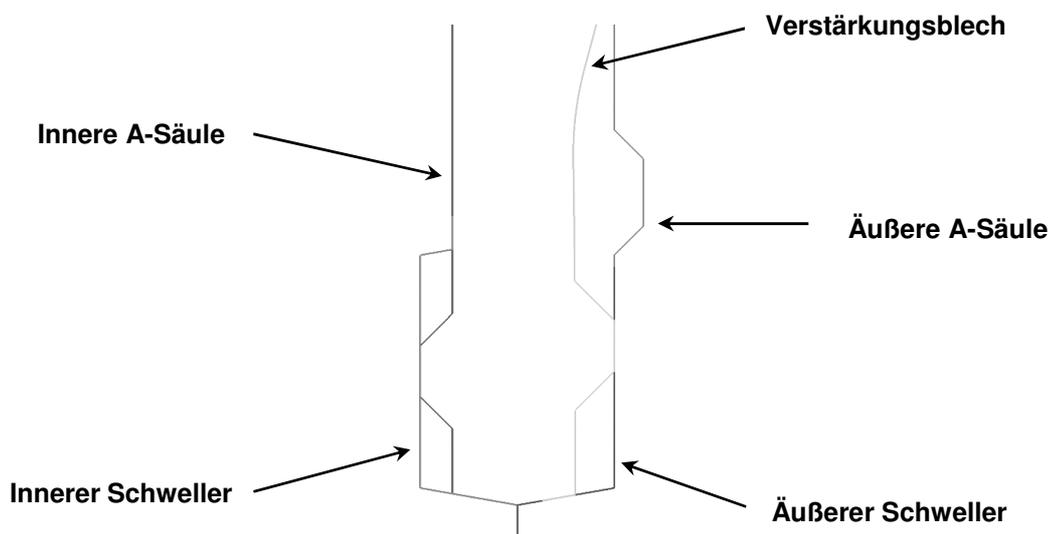


Abbildung 77: X-Schnitt durch die untere A-Säule

Um Schweller und A-Säule auf der Außenseite in dem gleichen Maß zu versteifen, wird ein zusätzlicher Aufdoppler in die Konstruktion eingezogen (siehe Abbildung 78). Wie bei der inneren A-Säule, sollen Durchsetzungen und Verbindungsflansche zum Schweller dafür sorgen, dass das Verstärkungsblech zusätzlich ausgesteift wird und nicht ausbeult.

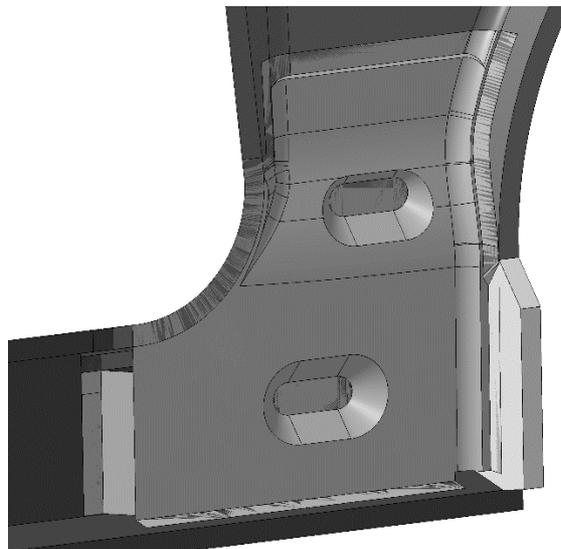


Abbildung 78: Verstärkungsblech der unteren, äußeren A-Säule

13.4 Berechnungsergebnisse

Bei der Variante 3 wurde im Vergleich zu Variante 2 lediglich eine geometrische Veränderung im unteren Bereich der A-Säule vorgenommen. Das Material und die Wandstärken der einzelnen Bauteile, sowie die Randbedingungen der Berechnung, werden von der Variante 2 übernommen. Obwohl sich die Wandstärken und die verwendeten Materialien nicht geändert haben, konnte das Gewicht des Modells um 2,45kg auf 69,6kg reduziert werden. Das Gewichtersparnis resultiert hauptsächlich aus dem Entfall der Verstärkung der unteren, inneren A-Säule.

Im Vergleich zur Variante 2 hat sich bei den maximalen Knotenverschiebungen, die durch die Dacheindrückung entstehen und wiederum an der linken oberen Ecke des Dachrahmens auftreten, lediglich ein sehr geringer Unterschied ergeben. Die Verformungen liegen bei 75,3mm und somit 1,1mm unterhalb derer von Variante 2. Zieht man nur die berechneten Verformungen als Bewertungskriterium heran, bedeutet das, dass die Variante 3 den Anforderungen der Dacheindrückung genügt. Allerdings sind auch diese Verschiebungen wieder kritisch zu betrachten.

Das Ziel, welches mit der Variante 3 verfolgt wird, ist es jedoch, die sehr hohen Spannungen in der unteren A-Säule zu reduzieren. In der nachfolgenden Abbildung sind die Spannungen nach von Mises in genau diesem Bereich dargestellt.

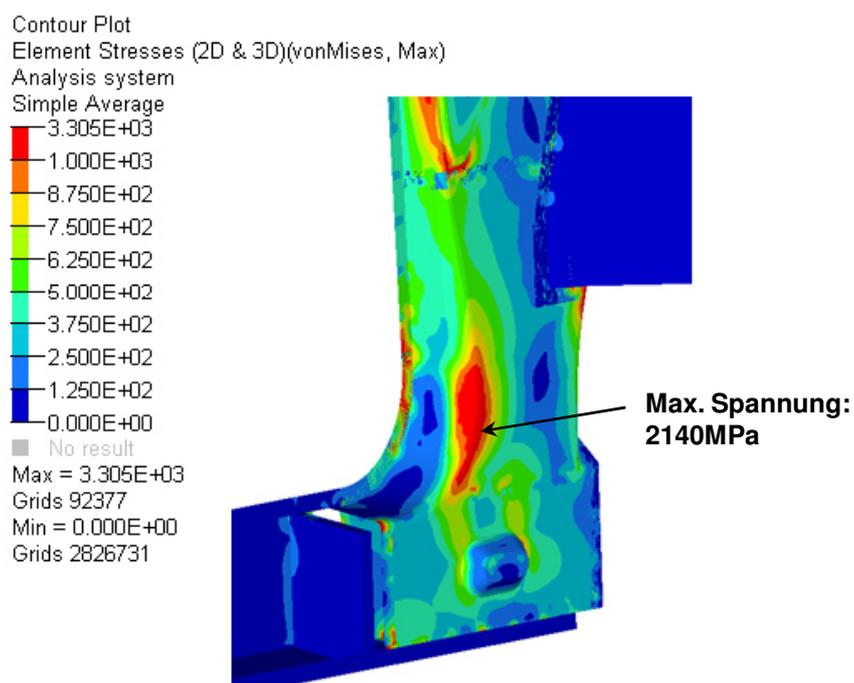


Abbildung 79: Spannungen an der unteren, inneren A-Säule

Wie gezeigt, konzentrieren sich auch weiterhin hohe Spannungen an der als kritisch anzusehenden Stelle. Das Niveau dieser Spannungen liegt jedoch weit unterhalb von dem aus Variante 2. Mit einer Spannungsspitze von 2140MPa in der unteren Säule wurden die maximalen Spannungen in diesem Bereich um mehr als 1000MPa reduziert. Dieses Bild spiegelt sich ebenfalls auf der äußeren Schale der A-Säule wieder, in der die Spannungen reduziert werden konnten und sich homogener im Bauteil verteilen.

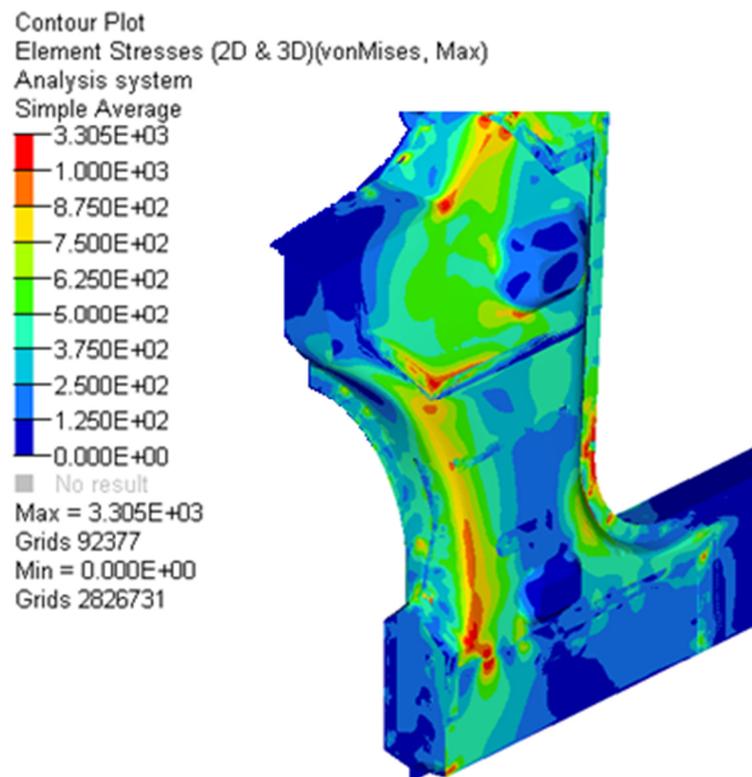


Abbildung 80: Spannungen in der unteren, äußeren A-Säule

Die Spannungsreduzierung in den unteren Teilen der A-Säule bedeutet jedoch nicht, dass das Material der Belastung durch die Dacheindrückung standhält. Die lokale Spannungsspitze, mit einem Wert von 2140MPa, liegt weiterhin oberhalb der Zugfestigkeit selbst höchstfester Stähle. Zudem haben die durchgeführten Änderungen kaum Auswirkungen auf den oberen Teil des Dachrahmens. In den oberen Schalen liegen die Spannungen weiterhin bei 2274MPa und entsprechen damit in etwa den Spannungen aus der Variante 2. Die global höchsten Spannungen der Variante 3 sind mit 3305MPa wiederum auf dem oberen Knotenblech des Dachrahmens angesiedelt und somit zu vernachlässigen.

14 Berechnung mit plastischer Materialmodellierung

Im Verlauf dieser Arbeit ergab sich die Möglichkeit, mithilfe eines externen Unternehmens, eine der vorgestellten Modellvarianten, unter der Berücksichtigung von plastischem Materialverhalten hinsichtlich ihrer Festigkeit, zu berechnen. Zu diesem Zweck wird das bereits fertig vernetzte Berechnungsmodell an das Automotive Center Südwestfalen (acs) übergeben. Das acs ist ein Gemeinschaftsunternehmen zwischen verschiedenen Hochschulen und Automobilzulieferern aus Südwestfalen und betreibt Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des automobilen Leichtbaus. Die Entwicklungsfelder des Instituts umfassen dabei Fahrzeugkonzepte ebenso wie den Einsatz neuer Werkstoffe und Werkstoffkombinationen.

Mit Hilfe des acs werden die Randbedingungen der Berechnung um die notwendigen Materialparameter erweitert, die durch empirische Versuche ermittelt wurden. Die nichtlinear-quasistatische Berechnungsmethodik und die Randbedingungen werden dabei aus den vorherigen Modellen beibehalten. Als Ergebnis entstehen unterschiedliche Materialausführungen der Variante 2. In den Berechnungsergebnissen wird neben den Verformungen und den Spannungsverläufen zudem die plastische Dehnung mit ausgegeben. Sie liefern weitere Schlüsse bezüglich des Strukturverhaltens der A-Säule, sowie zu der angewendeten Berechnungsmethodik.

14.1 Materialvariante 1

Bei der ersten Materialvariante wird die A-Säule vorwiegend aus dem hochfesten Dualphasenstahl DP600 ausgeführt. Dieser Stahl verfügt über die folgenden mechanischen Eigenschaften: Streckgrenze $R_{p0,2} \approx 330\text{MPa} - 470\text{MPa}$, Zugfestigkeit

$R_m \approx 580\text{MPa} - 670\text{MPa}$,

Bruchdehnung $A_5 \geq 24$.

[SAL14]

 AlMgSi1F31	1	
 MHZ340	3	
 DP600	5	
 DP1000	6	

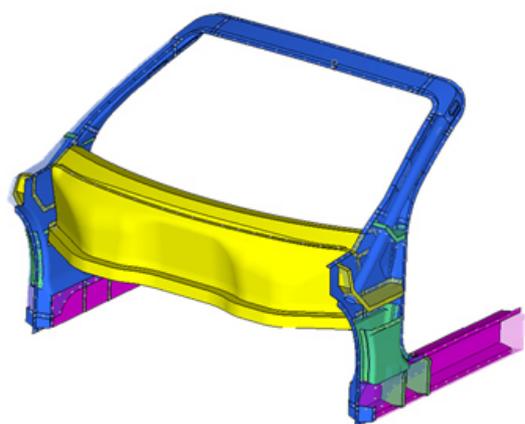


Abbildung 81: A-Säule aus vorwiegend hochfestem DP600-Stahl

Die Eindrückung der A-Säule mit der zuvor gezeigten Materialzuordnung, liegt mit 132mm oberhalb der zulässigen Maximalverformung. Zudem weichen die ermittelten Verschiebungen zwischen der Berechnung mit und der Berechnung ohne plastischem Materialverhalten stark voneinander ab. Der Unterschied beträgt ganze 55,6mm. Auch in dem Spannungsbild ergeben, sich zu den in Abschnitt 11.7 gezeigten Ergebnissen, deutliche Unterschiede. Zwar sind sich die Spannungsverläufe der einzelnen Varianten sehr ähnlich, jedoch sinkt das Spannungsniveau dadurch, dass die plastischen Dehnungen berücksichtigt werden. Die maximalen Spannungen liegen bei 919MPa und treten, wie bereits zuvor, unmittelbar im Radius von der A-Säule zum Schweller und im Schweller selber auf. Die Zugfestigkeiten der eingesetzten Materialien werden dabei vereinzelt überschritten.

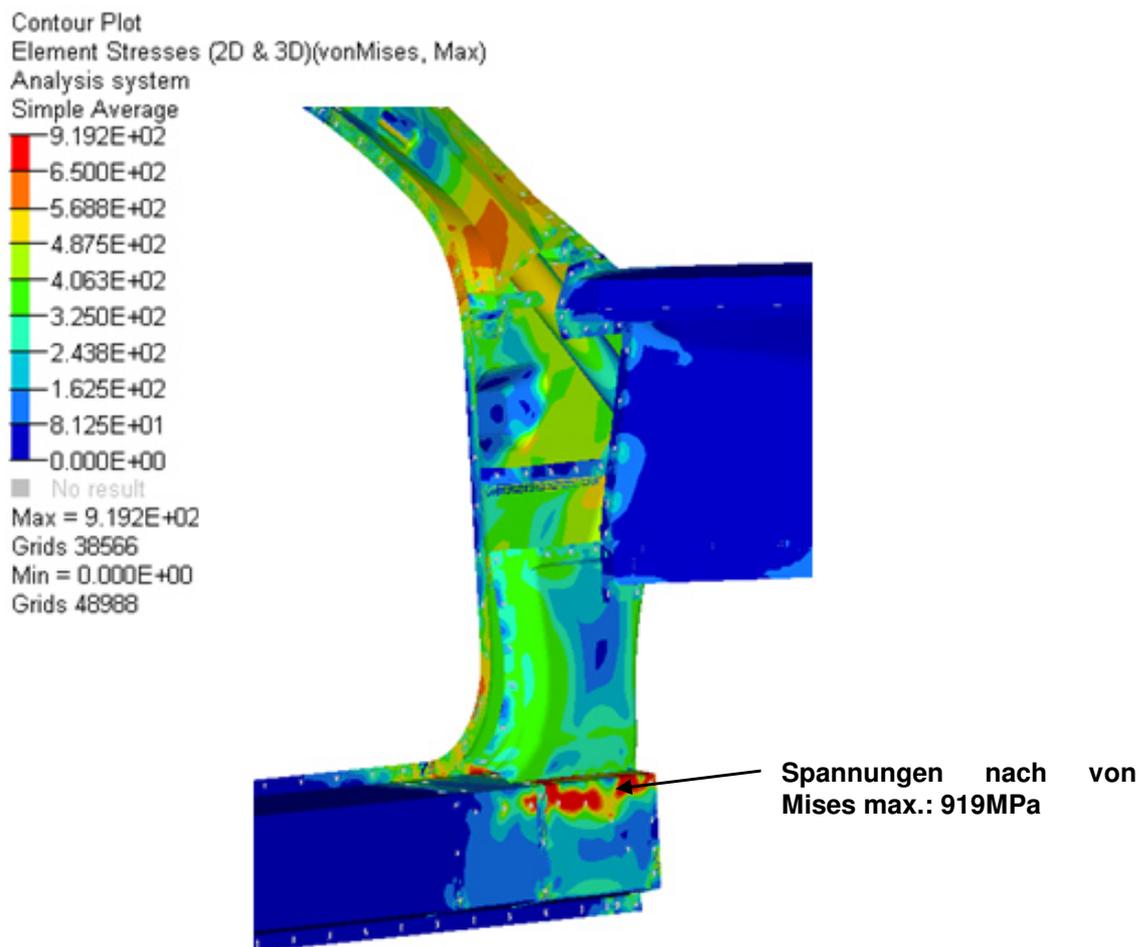


Abbildung 82: Spannungsspitzen im Schweller

An den hoch belasteten Stellen des Modells treten lokal plastische Dehnung des Materials auf. Besonders einzelne Stellen auf der Innenseite der A-Säule sind hiervon betroffen.

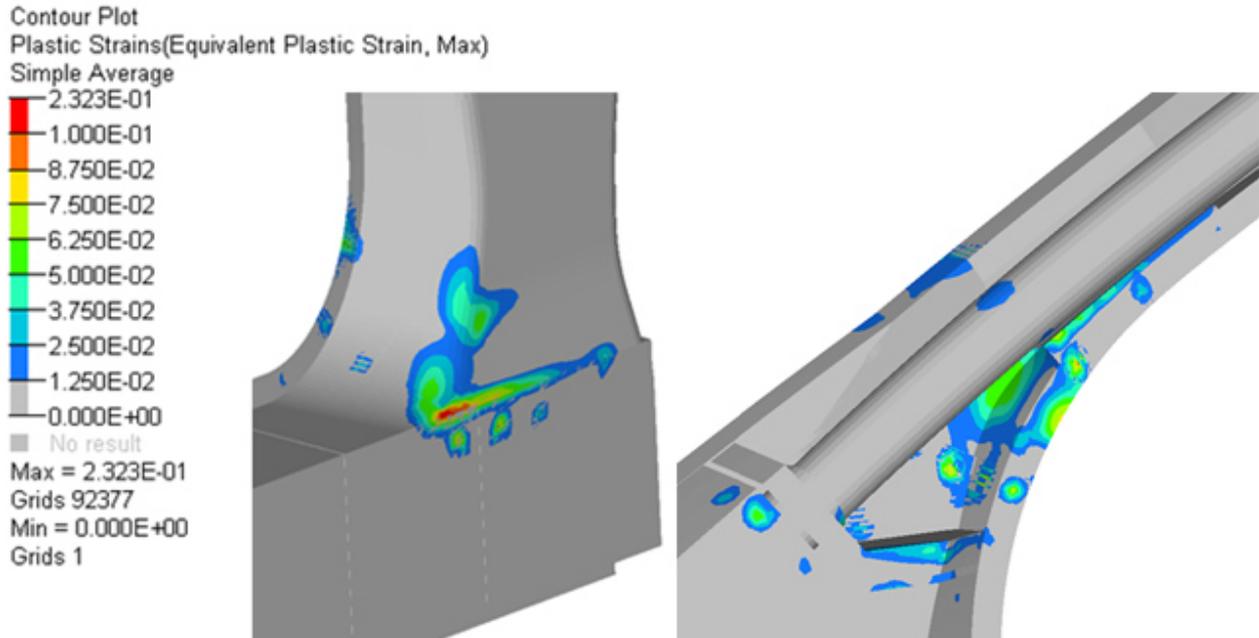


Abbildung 83: Plastische Dehnungen auf der Innenseite der A-Säule

Die Dehnungen liegen an der unteren A-Säule bei 14% (Abbildung 83 links) und bei 6% an der oberen (Abbildung 83 rechts). Der maximale Wert von 23% tritt unmittelbar an der Kontaktstelle zwischen Stempel und dem Dachrahmen auf. Die Bruchdehnung des hauptsächlich verwendeten DP600-Stahls wird an keiner Stelle des Modells überschritten.

14.2 Materialvariante 2

Um den Anforderungen der Dacheindrückung gerecht zu werden, wurde in einer zweiten Materialvariante bei den hoch belasteten Blechschalen der A-Säule, überwiegend auf den ultra-hochfesten MBW1500-Stahl zurückgegriffen. Im warmumgeformten Zustand liegt dessen Dehngrenze $R_{p0,2} \approx 1000\text{MPa} - 1100\text{MPa}$ und seine Zugfestigkeit $R_m \approx 1450\text{MPa} - 1550\text{MPa}$. Der Nachteil dieser hohen Festigkeiten ist jedoch, dass die Bruchdehnung A_{80} gerade einmal bei 5% bis 6% liegt. Die Materialvariante 2 stellt sich folgendermaßen dar:

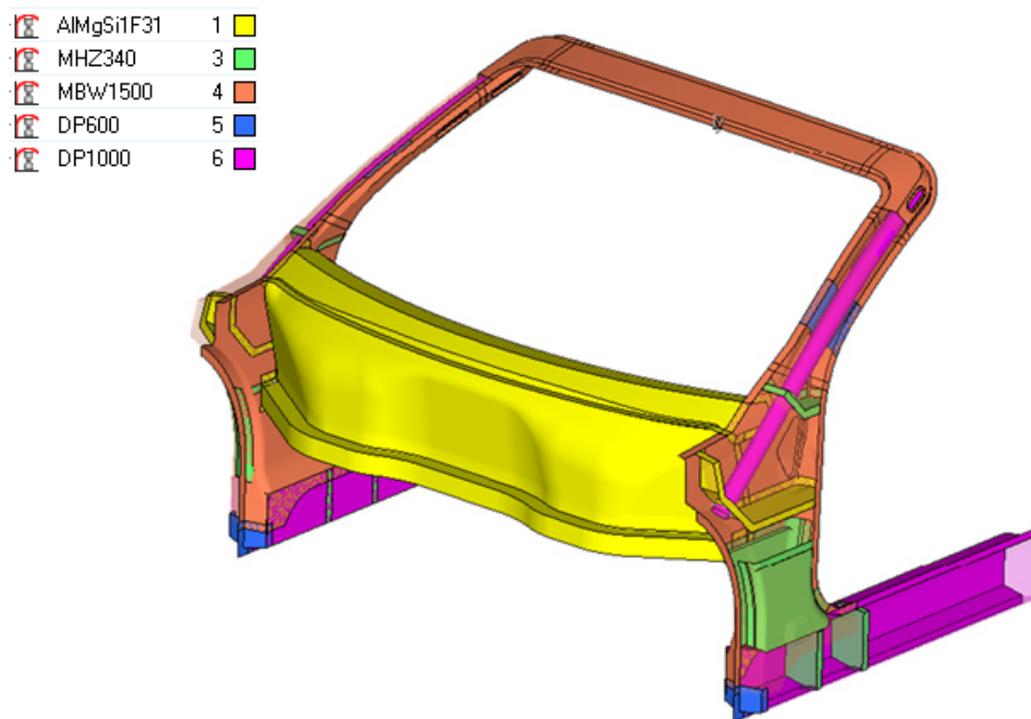


Abbildung 84: A-Säule aus vorwiegend ultra-hochfestem MBW1500-Stahl

Durch den Einsatz des ultra-hochfesten Stahls wird die Eindrückung des Dachrahmens auf 73,3mm verringert. Das Spannungsbild dieser Variante unterscheidet sich, vom Verlauf, nur unwesentlich von dem der bisher gezeigten Varianten. Einziger Unterschied ist, dass bei der Materialvariante 1 die Spannungen homogener verteilt sind. Bei der Materialvariante 2 treten dagegen vermehrt lokale Spannungsspitzen im oberen Bereich der A-Säule auf. Diese Spannungsspitzen liegen mit maximal 1535MPa nahe der Zugfestigkeit des MBW1500-Stahls.

Die Stellen, an denen es zu einer plastischen Dehnung des Materials kommt, sind in dieser Variante deutlich zurückgegangen.

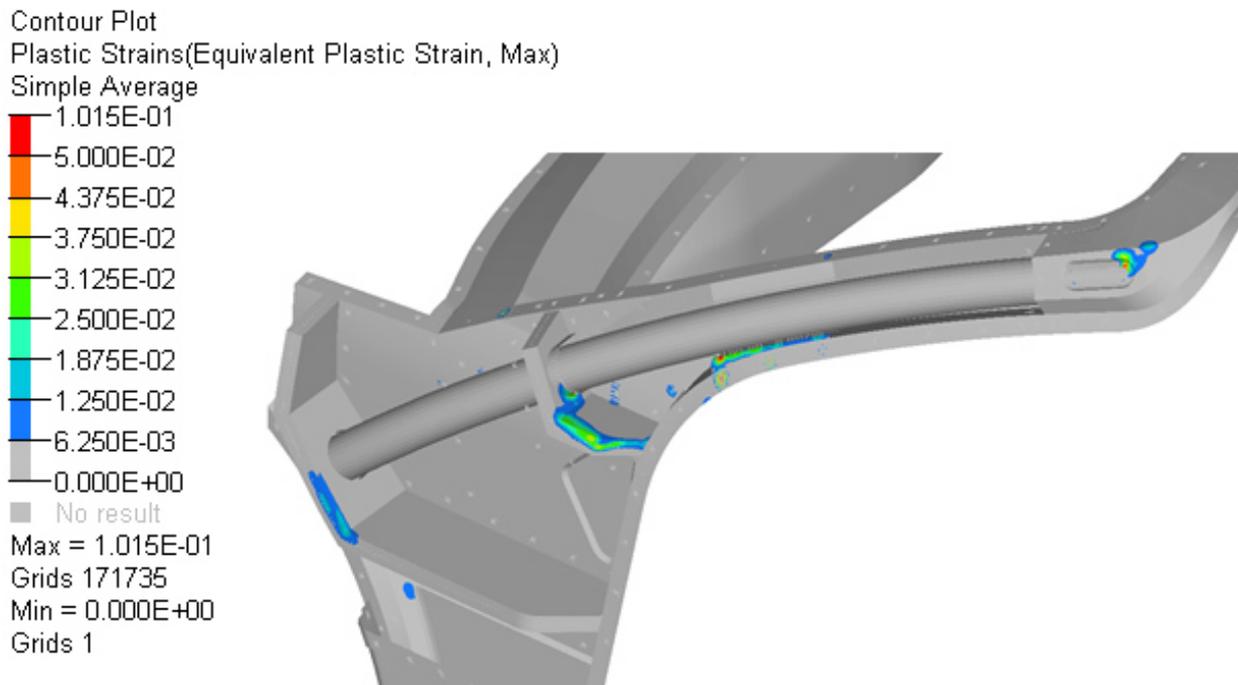


Abbildung 85: Plastische Dehnungen der Materialvariante 2

Grundsätzlich treten plastische Dehnungen an denselben Stellen wie in der Materialvariante 1 auf. Die höchsten plastischen Dehnungen von etwa 10% sind an der linken oberen Ecke des Dachrahmens zu finden. Des Weiteren treten plastische Dehnungen, die im Bereich von 1%-6% liegen, an den Halterungen des Verstärkungsrohrs auf. Auffällig ist, dass sich diese Dehnungen besonders in den Elementen konzentrieren, an denen die Verbindungstechnik anliegt.

Obwohl vereinzelt kleinflächige Bereiche die Bruchdehnung von etwa 5% des MBW1500-Stahls überschreiten, wird dies nicht zwangsläufig zu einem Versagen der Struktur führen.

15 Fazit

In dieser Arbeit soll die Fragestellung beantwortet werden, ob es einem Cabriolet möglich ist, die Anforderungen, die die Dacheindrückung nach FMVSS 216a an geschlossene Fahrzeuge stellt, zu erfüllen. Aufgrund des nicht betrachteten plastischen Materialverhaltens, lassen die Ergebnisse der anfangs gewählten Berechnungsmethodik auf diese Frage keine Antwort zu. Einzig die kritischen Stellen, an denen sich Spannungen im Modell konzentrieren, lassen sich über die Spannungsverläufe identifizieren. Die absoluten Werte der Spannungen sind dabei jedoch deutlich überhöht und die ausgegebenen Verformungen in Frage zu stellen. Die hohen Kräfte, die aufgrund der Dacheindrückung entstehen und die eine nichtlineare, plastische Verformung nach sich ziehen, erfordern zwingend eine detaillierte Materialmodellierung.

Die Berechnungsergebnisse, in denen diese berücksichtigt wird, zeigen, dass die Möglichkeit besteht, dass eine A-Säulen-Struktur der Belastung durch die Dacheindrückung standhält. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei die Auswahl der verwendeten Materialien. Besonders der Einsatz hochfester und ultra-hochfester Stähle führt dazu, dass eine Modellvariante entsteht, deren maximale Verformung unterhalb von 127mm liegt. Laut der Berechnung führen die plastischen Dehnungen sowie die auftretenden Spannungen nicht zu einem Versagen des Materials. Möglich wurde dies jedoch nur durch einen sehr hohen Materialeinsatz, aus dem ein hohes Gewicht des Gesamtmodells resultiert.

Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die konstruierten A-Säulen überdimensioniert sind. Schließlich wurde bei allen Modellen die Frontscheibe, aufgrund komplizierter Bruchmechanismen, die mit der Finiten Elemente Methode äußerst schwer zu simulieren sind, nicht berücksichtigt. Die Kräfte, die im Rahmen einer Dacheindrückung von der Fahrzeugstruktur aufgenommen werden, hängen jedoch stark von der Steifigkeit der Frontscheibe ab. In den berechneten Modellen haben die A-Säulen somit eine höhere Last zu tragen, als dass bei einer realen Fahrzeugstruktur der Fall wäre.

Um die Berechnungsergebnisse zu verifizieren und sicher zu stellen, ob es einen Spielraum für eine Gewichtsoptimierung gibt, oder ob die entwickelten A-Säulen trotz positiver Berechnungsergebnisse versagen, sind Versuche an einem physischen Modell

unerlässlich. Besonders die stark vereinfachte Verbindungstechnik muss hierbei separat überprüft werden.

Aufgrund des Gewichts und den erzielten Berechnungsergebnissen eignet sich, von den drei vorgestellten Varianten, besonders das Konzept der Variante 3 für weiterführende Untersuchungen oder eine Detaillierung der Konstruktion.

16 Quellenverzeichnis

- [ADA14] <http://www.adac.de>. (Zitat vom 11.11.2014).
http://www.adac.de/infotestrat/tests/crash-test/cabrio_rollover_2014/default.aspx?ComponentId=208289&SourcePageId=31799#tabid=tab2
- [ALL10] <https://www.allianzdeutschland.de>. (Zitat vom 06.11.2014).
<https://www.allianzdeutschland.de/news/news-2010/23-02-10-azt-bumper-test-neuer-standard-fuer-stossfaenger/>
- [ALT14] <http://training.altairuniversity.com>. (Zitat vom 30.11.2014).
<http://training.altairuniversity.com/modeling/meshing-2/1d-2/1d-connectors/>
- [AUD14] <http://www.audi-technology-portal.de/de>.
(Zitat vom 12.11.2014). <http://www.audi-technology-portal.de/de/karosserie/aluminiumkarosserien/audi-space-frame-asf>
- [AUD14a] http://app.audi-presskit.de/de/future_lab_tron_experience.
(Zitat vom 12.11.2014). http://app.audi-presskit.de/de/future_lab_tron_experience/audi-r8-e-tron/technical
- [AUT12] <https://www.autouni.de>. (Zitat vom 22.11.2014).
https://www.autouni.de/content/master/de/home/Veranstaltungen/institute/institut-fuer-produktion/veranstaltungen-produktion-archiv2012/Aktuelle_Themen_aus_der_Fertigung.html
- [Barényi 1951] Barényi, Béla.: Kraftfahrzeug, insbesondere zur Beförderung von Personen. Bundesrepublik Deutschland, 1951
- [Bargel 2005] Bargel, Hans-Jürgen.: Werkstoffkunde. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005
- [BLO10] <http://blog.mercedes-benz-passion.com>. (Zitat vom 14.11.2014).
<http://blog.mercedes-benz-passion.com/2010/10/der-neue-mercedes-benz-cls-erstmal-rahmenlose-turen-in-vollaluminium/>

- [BLO10a]** <http://blog.mercedes-benz-passion.com>. (Zitat vom 22.11.2014).
<http://blog.mercedes-benz-passion.com/2010/03/das-neue-mercedes-benz-e-klasse-cabriolet-gute-basis-gezielt-verstarkt-die-rohkarosserie/>
- [BMV14]** <http://www.bmvi.de>. (Zitat vom 09.11.2014).
<http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LA/internationale-harmonisierung-der-technischen-vorschriften-fuer-kraftfahrzeuge.html?nn=58354>
- [BMW14]** <http://www.bmw.de>. (Zitat vom 14.11.2014).
<http://www.bmw.de/de/footer/publications-links/technology-guide/ueberrollschutzsystem.html>
- [BOE14]** <http://www.boellhoff.de>. (Zitat vom 20.11.2014).
<http://www.boellhoff.de/static/pdf/downloadcenter/DE/RIVSET-DE-6701.pdf>
- [Bohlin 1958]** Bohlin, Nils Ivar.: Sicherheitsgurt für Fahrzeuge, insbesondere Kraftfahrzeuge. Schweden, 1958
- [Braess 2013]** Braess, Hans-Hermann.: Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [CAH14]** <http://www.carhs.de>. (Zitat vom 11.11.2014).
http://www.carhs.de/newsletter-archive/downloads_safetynews/SafetyWissen-RoofCrush-de.pdf
- [DAI14]** <http://www.daimler.com>. (Zitat vom 17.10.2014).
<http://www.daimler.com/dccom/0-5-1301673-49-1281369-1-0-0-1301966-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0.html>
- [DES14]** <https://www.destatis.de>. (Zitat vom 17.10.2014).
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/UnfaelleVerunglueckte.htm>
- [Ernstberger 2013]** Ernstberger, Uwe.: Mercedes-Benz SL. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [EUR14]** <http://de.euroncap.com>. (Zitat vom 06.11.2014).
<http://de.euroncap.com/de/home.aspx>

- [Friedrich 2013]** Friedrich, Horst E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [Grabner; Nothhaft 2006]** Grabner, Jörg; Nothhaft, Richard.: Konstruieren von Pkw-Karosserien. Berlin: Springer, 2006
- [IEJ14]** <http://www.industrie.ejot.de>. (Zitat vom 20.11.2014).
http://www.industrie.ejot.de/Verbindungstechnik/Produkte/FDS<sup>%26reg%3B<-sup>/p/VBT_FDS
- [IND14]** <http://www.industrieanzeiger.de>. (Zitat vom 20.11.2014).
http://www.industrieanzeiger.de/image/image_gallery?img_id=33195802
- [KBA14]** <http://www.kba.de>. (Zitat vom 17.10.2014).
http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html
- [KBA14a]** <http://www.kba.de>. (Zitat vom 14.11.2014).
http://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2011_2013/2012/Fahrzeugbestand/fz_bestand_pm_text.html
- [Klein 2014]** Klein, Bernd.: FEM. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2014
- [Kramer 2013]** Kramer, Florian.: Integrale sicherheit von kraftfahrzeugen. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013
- [Linderer 1951]** Linderer, Walter.: Einrichtung zum Schutz von in Fahrzeugen befindlichen Personen gegen Verletzungen bei Zusammenstößen. Bundesrepublik Deutschland, 1951
- [MCL14]** <http://cars.mclaren.com>. (Zitat vom 15.11.2014).
http://cars.mclaren.com/files/live/sites/mclaren/files/cars.mclaren.com%20-%20Main/McLaren%20Model%20Section/P1%20New%20Images/Design%20-%20P1%20Parts%20High%20Res/P1_Tub_%20MK%20edit.jpg

- [MOT14]** <http://www.motorvision.de>. (Zitat vom 12.11.2014).
<http://www.motorvision.de/news/bessere-wind-vw-passat-laessiger-160976.html>
- [NHT09]** <http://www.nhtsa.gov>. (Zitat vom 08.11.2014).
<http://www.nhtsa.gov/Vehicle+Safety/Test+Procedures?procedurePage=1>
- [Ostermann 2007]** Ostermann, Friedrich.: Anwendungstechnologie Aluminium. Berlin [u.a.]: Springer, 2007
- [SAL14]** <http://www.salzgitter-flachstahl.de>. (Zitat vom 15.12.2014).
<http://www.salzgitter-flachstahl.de/de/produkte/warmgewalzte-produkte/stahlsorten/dualphasenstaehle.html>
- [THY14]** <http://www.thyssenkrupp.com>. (Zitat vom 08.12.2014).
http://www.thyssenkrupp.com/documents/Publikationen/TK_Magazine/InTruck_de.pdf
- [TOW14]** <http://www.towerinternational.com>. (Zitat vom 22.11.2014).
<http://www.towerinternational.com/products/fullframes.html>
- [Trzesniowski 2008]** Trzesniowski, Michael.: Rennwagentechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2008
- [UAU14]** <http://www.unsere-autos.de>. (Zitat vom 12.11.2014).
<http://www.unsere-autos.de/unsere-autos/ingenieurskunst/dieselbsttragende-karosserie/>
- [Wallentowitz; Freialdenhoven; Olschewski 2009]** Wallentowitz, Henning; Freialdenhoven, Arndt; Olschewski, Ingo.: Strategien in der Automobilindustrie. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009
- [Westkämper; Warnecke 2010]** Westkämper, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen.: Einführung in die Fertigungstechnik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010

