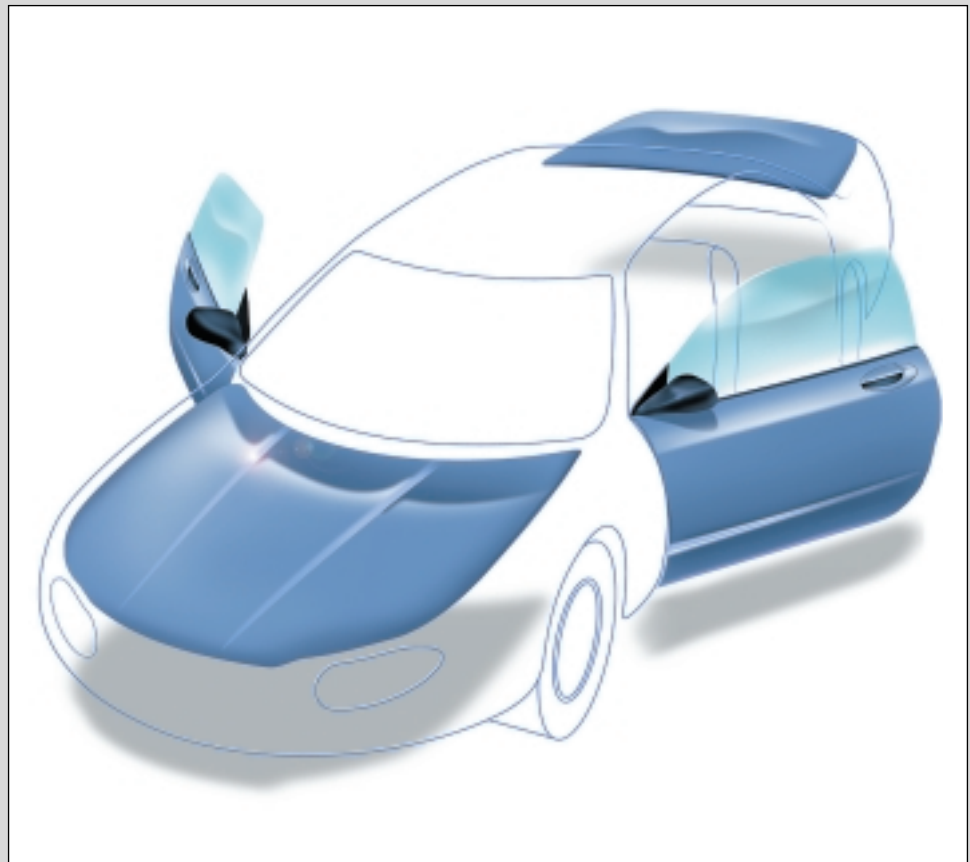




Ultraleichte Automobil-Anbauteile aus Stahl



UltraLight Steel Auto Closures

	Highlights	3
1	Einleitung	4
2	Konzeptionsphase	5
2.1	Ansatz	5
2.2	Benchmarking	5
2.3	Zielsetzung	5
2.4	Ergebnisse der Konzeptionsphase	6
3	Umsetzungsphase	7
3.1	Umfang	7
3.2	Zusätzliches Benchmarking	7
4	Konstruktive Gestaltung und Auslegung	8
4.1	Abschließendes Design	8
4.1.1	Spiegeldreieck	9
4.1.2	Türaußenhaut	9
4.1.3	Türrahmenstruktur	10
4.1.4	Vorderer und hinterer Türkörperabschluss	12
4.2	Komplette Tür	14
5	CAE-Analyse	16
6	Werkstoffe und Verfahren	18
6.1	Auswahl der Werkstoffe	18
6.1.1	Höher- und hochfeste Stähle	18
6.2	Verfahren	20
6.2.1	Tailored Blanks	20
6.2.2	Innenhochdruckumformung	20
6.2.3	Tiefziehen	22
7	Umformsimulationen	23
8	Produktion und Montage	24
8.1	Teilefertigung	24
8.2	Montage	24
8.2.1	Montage des Türkörpers	25
8.2.2	Montage der kompletten Tür	26
9	Tests und Testergebnisse	27
9.1	Gewicht	27
9.2	Beulfestigkeit und Beulsteifigkeit	28
9.3	Torsionssteifigkeit	30
9.4	Türdurchhang	30
9.5	Türeindrückung	31
10	Wirtschaftlichkeitsanalyse	32
10.1	Entwicklung und Anwendung eines Kostenmodells	32
10.2	Überblick über die Analyse	32
10.3	Ergebnisse der Analyse	33
11	Weitere Schritte	34

Ultraleichte Automobil-Anbauteile aus Stahl

Bericht über Konstruktion, Materialien, Herstellung, Struktureigenschaften und Wirtschaftlichkeitsanalyse des Projekts **UltraLight Steel Auto Closures (ULSAC)**

Highlights der fensterrahmenlosen ULSAC-Tür

Ergebnisse

- Gewicht der Türstruktur: 10,47 kg
- Gewicht, normalisiert: 13,27 kg/m²
- Normalisiertes Gewicht um 33 % geringer als der Mittelwert von 18 Fahrzeugtüren der Vergleichsstudie
- Normalisiertes Gewicht um 42 % geringer als der Durchschnitt der fensterrahmenlosen Türen
- Normalisiertes Gewicht 22 % geringer als das der leichtesten Tür mit Fensterrahmen
- Trotz Gewichtsreduzierung keine Einbußen bei der Sicherheit und bei den Struktureigenschaften
- Großserienherstellung ohne Mehrkosten

Besondere Merkmale

- Innovative Rohrstruktur
- Türaußenhaut aus 0,7 mm Bake-Hardening-Stahl H260BD
- Gezielte Verwendung von höher- und hochfesten Stählen, Tailored Blanks und innenhochdruckumgeformten Teilen

1 Einleitung

Das Programm UltraLight Steel Auto Closures (ULSAC) ist ein Projekt der internationalen Stahlindustrie, mit dem die Möglichkeiten des Einsatzes von Stahl zur Herstellung von leichten, steifen Karosserieanbauteilen aufgezeigt werden sollen, die in Großserie kostengünstig herzustellen sind. ULSAC begann als Entwicklungsprogramm für innovative Konstruktionskonzepte für Türen, Motorhauben, Kofferraumdeckeln und Heckklappen.

Die Ergebnisse belegen, dass die Bauteile bis zu 33 % leichter sind als die durchschnittlichen Gewichte der Bauteile der Vergleichsstudien und 10 % leichter als die besten konventionell gefertigten ihrer Klasse herzustellen sind. Dennoch erfüllen sie die hohen Vorgaben bezüglich der Struktureigenschaften. Sie können in Großserie produziert werden, da die für die Herstellung vorgesehenen Verfahren und Werkstoffe verfügbar sind.

Die Resultate der Konzeptionsphase werden weitgehend durch die Verwendung von höher- und hochfesten Stählen sowie durch den Einsatz von neueren Fertigungstechnologien wie Tailored Blanks und Innenhochdruckumformung erreicht.

Nach dem erfolgreichen Abschluss der Konzeptphase ist das ULSAC-Programm in die Umsetzungsphase übergegangen. Das ULSAC-Konsortium hat sich entschlossen, eine fensterrahmenlose Tür als repräsentatives Beispiel für eine Palette von Bauteilen zu bauen und zu testen. Diese rahmenlose Tür zeigt die wichtigsten Fortschritte bei Konstruktion, Fertigungstechnologie und Stahleinsatz auf. Gleichzeitig dient die Tür als Nachweis der praktischen Durchführbarkeit.

Die erfolgreiche Herstellung der fensterrahmenlosen Tür demonstriert die leistungsfähige Kombination von Stahl mit fortschrittlicher Technologie.

In den einzelnen Projektphasen sind Türen von mehr als 18 Fahrzeugtypen bewertet worden. Die gebaute fensterrahmenlose Türstruktur ist 22 % leichter als die beste vergleichbare Tür mit Fensterrahmen, 33 % leichter als der Durchschnitt aller in der Konzeptionsphase verglichenen Türen und 42 % leichter als der Durchschnitt der in den Vergleich einbezogenen fensterrahmenlosen Türen. Die ULSAC-Tür kann ohne Mehrkosten gefertigt werden, wobei keine Kompromisse hinsichtlich Sicherheit und Struktureigenschaften eingegangen werden. Sie belegt eindrucksvoll, dass leichte, sichere und kostengünstige Türkonstruktionen aus Stahl hergestellt werden können.

Versuche zur Fertigung der Türaußenhaut mit aktiven hydromechanischen Umformverfahren, die zu weiteren Verbesserungen bei der Entwicklung von Karosserieanbauteilen führen können, sind zurzeit in Gang (siehe hierzu Kapitel 11).

Wie schon beim ULSAB-Projekt zur Entwicklung und zum Bau einer ultraleichten Rohkarosserie aus Stahl, ist das ULSAC-Projekt durch ein internationales Konsortium von Stahlherstellern initiiert worden. Das ULSAC-Konsortium hat Porsche Engineering Services, Inc., in Troy, Michigan, USA, unter Vertrag genommen. Porsche Engineering Services übernahm die Konstruktion und die technische Leitung sowohl in der Konzeptionsphase als auch in der Umsetzungsphase des Programms.



2 Konzeptionsphase

2.1 Ansatz

Die ULSAC-Konzeptionsphase umfasst Benchmarking, Zielsetzung und konzeptionelle Gestaltung, die Kostenanalyse und FEA-Kalkulation enthält. Mit dem Benchmarking wird der aktuelle Stand bei Karosserieanbauteilen beschrieben, und die Ziele werden festgelegt. Mit der konzeptionellen Entwicklung sind Lösungsmöglichkeiten angestrebt worden, die die Zielvorgaben erfüllen.

2.2 Benchmarking

In der Konzeptionsphase hat Porsche Engineering Services Karosserieanbauteile von achtzehn Fahrzeugen des Baujahres 1997 verglichen. Sie sind nach Kriterien ausgewählt worden, die eine objektive Bewertung sicherstellen. Bei den Türkonzepten handelt es sich um dachintegrierte Türen, Türen mit Fensterrahmen und fensterrahmenlose Türen. Die Konstruktionskonzepte für Motorhauben beziehen sich auf konventionelle Hauben und solche mit integriertem Kühlergrill. Bei den Kofferraumdeckeln sind Fahrzeuge mit Stufenheck und mit Heckklappe ausgewählt worden.

An den Bauteilen sind Gewichte (bei den Türen ohne Glas), Abmessungen und Strukturausführungsstandards ermittelt worden. Porsche Engineering Services hat diese Daten standardisiert, um einen genauen Vergleich der Anbauteile durchführen zu können, und dann Konstruktionen und Komponenten bewertet. Die Gewichtsdaten sind normalisiert worden, indem man das Gesamtgewicht eines Bauteils

auf seine reale Oberfläche bezogen hat. Der daraus ermittelte Kilogrammwert pro Quadratmeter macht einen direkten Vergleich der unterschiedlich großen Karosserieanbauteile möglich.

Darüber hinaus sind von Porsche Engineering Services die Kosten für die Herstellung der einzelnen Anbauteile ermittelt worden.

2.3 Zielsetzung

Auf Basis des Benchmarking sind die Ziele für die Entwicklung ultraleichter Karosserieanbauteile in Bezug auf Abmessungen, Struktureigenschaften und Gewicht festgelegt worden. Die Zielvorgaben der Abmessungen von Türen, Motorhauben und Kofferraumdeckeln basieren auf dem ULSAB-Oberflächenmodell aus der Stylingstudie, da diese den durchschnittlichen ULSAC-Vorgaben sehr nahe kommen. Außerdem hat es die Daten für die Außenhautfläche der Teile geliefert. Die Zielvorgaben für die Abmessung der Heckklappe beruhen auf Daten der leichtesten und kleinsten Heckklappe des Fahrzeugs aus der Vergleichsstudie. Die Ziele für die Struktureigenschaften orientieren sich am Mittelwert einer Studie, die aus einer Untersuchung von OEM-Anforderungen (Erstausrüster) hervorgegangen ist. Die Gewichtsvorgabe ist um 10 % niedriger angesetzt als die günstigsten Teilgewichte der Vergleichsstudie.

2.4 Ergebnisse der Konzeptionsphase

Diese erste Phase hat innovative Ausführungen von Karosserieanbauteilen geliefert, die einerseits die Anforderungen an die Struktureigenschaften erfüllen bzw. übertreffen und andererseits das Gewicht erheblich reduzieren. Die ermittelten Kosten haben dabei im Vergleich zu den konventionellen Teilen etwa gleich bzw. nur geringfügig höher gelegen.

Eine Übersicht über die Gewichts- und Kostenvergleiche für die einzelnen Anbauteile ist aus den Tafeln 1 und 2 zu entnehmen. Detailliertere Informationen zur Konzeptphase können bei den als Herausgeber dieser Broschüre genannten Unternehmen angefordert werden. Eine Zusammenfassung im Internet ist auf der ULSAC-Homepage unter www.ulsac.org zu finden.

	Benchmarking		Ziel	ULSAC-Konzept	
	Bandbreite (kg/m ²)	Durchschnitt (kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg)
Tür, dachintegriert	17,0 – 23,4	19,7	15,5	15,1	13,2
Tür mit Fensterrahmen				15,5	13,2
Tür ohne Fensterrahmen				14,3	11,4
Motorhaube, konventionell*	8,8 – 14,2	11,5	8,0	7,9	13,3
Motorhaube, mit Kühlergrill*				7,9	13,7
Motorhaube, konventionell**				8,5	14,3
Motorhaube, mit Kühlergrill**				8,4	14,7
Kofferraumdeckel, konventionell*	8,9 – 16,1	11,2	8,0	8,0	9,8
Kofferraumdeckel, konventionell**				8,6	10,6
Heckklappe, Rohr innenhochdruckumgeformt	12,5 – 15,2	13,9	11,3	10,3	6,7
Heckklappe, Tailored Blank				10,6	6,9
Heckklappe, Rahmen innenhochdruckumgeformt				10,9	7,1
Heckklappe, Blech hydroumgeformt				9,5	6,2

* ULSAC: unter Verwendung von Stahl-Sandwichmaterial für Innenteile

Tafel 1 Ergebnisse Konzeptphase – Gewichtsvergleich

** ULSAC: unter Verwendung von Stahlblechen für Innenteile

	Basis Kosten (US \$)	ULSAC-Konzept Kosten (US \$)
Tür, dachintegriert	67 für eine Tür mit Fensterrahmen	67
Tür mit Fensterrahmen		72
Tür ohne Fensterrahmen		65
Motorhaube, konventionell*	40	44
Motorhaube, mit Kühlergrill*	46	52
Motorhaube, konventionell**	40	40
Motorhaube, mit Kühlergrill**	46	46
Kofferraumdeckel, konventionell*	31	36
Kofferraumdeckel, konventionell**	31	33
Heckklappe Rohr, innenhochdruckumgeformt	29	36
Heckklappe, Tailored Blank	29	33

Tafel 2 Ergebnisse Konzeptphase – Kostenvergleich

3 Umsetzungsphase

Das Konsortium hat sich entschieden, in der Umsetzungsphase eine fensterrahmenlose Tür zu bauen und zu testen. Die Tür soll als Demonstrationsmodell aufzeigen, welche Fortschritte mit innovativer Konstruktion, fortschrittlicher Fertigungstechnologie und neuen Stahlwerkstoffen zu erzielen sind.

3.1 Umfang

Die Umsetzungsphase schließt sowohl die weitere Optimierung der Tür als auch die Durchführung geeigneter Tests am Demonstrationsteil ein, um die Möglichkeiten der kostengünstigen Herstellung aufzuzeigen.

Das Programm enthält:

- detaillierte Konstruktionsoptimierung und CAE-Analyse der Strukturausführung
- Umformsimulation für alle Teile
- Bau der Türen für Tests und zu Demonstrationszwecken
- Tests von Beulverhalten (Dent Resistance und Oil Canning)
- Tests der Struktureigenschaften
- Ergebnisvergleich der Umformsimulationen mit experimentell ermittelten Werten
- Dokumentation der Herstellungsparameter
- Dokumentation der Werkstoffkennwerte
- Dokumentation der Bauteilabmessungen
- Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Bestimmung der Kosten

3.2 Zusätzliches Benchmarking

Die ULSAC-Konzeptionsphase hat sich ursprünglich bei den ausgewählten Fahrzeugen der Vergleichsstudie auf einen Türenmix ohne besondere Schwerpunktbildung bei fensterrahmenlosen Türen konzentriert. Um den aktuellen Stand der Technik bezüglich Gewicht und Eigenschaften solcher Türen besser dokumentieren zu können, ist das Benchmarking ausgeweitet worden. Es sind drei Türen von aktuellen Fahrzeugen getestet worden, die zurzeit weltweit verkauft werden. Diese Türen werden nachstehend Tür A, B und C genannt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, sind alle Türkonstruktionen auf demselben Prüfstand getestet worden.

4 Konstruktive Gestaltung und Auslegung

Bei Detailkonstruktion und Auswahl der Verbindungstechnik haben die Optimierung des Konzepts bezüglich Herstellung und Montage sowie eine weitere Reduzierung des Türgewichts unter Beibehaltung der Struktureigenschaften und der kostengünstigen Herstellung im Vordergrund gestanden.

4.1 Abschließendes Design

Den konstruktiven Aufbau der fensterrahmenlosen Tür in der abschließenden Version zeigt **Bild 1**. Porsche Engineering Services hat detailliert jedes Bauteil analysiert und den ganzheitlichen Lösungsansatz der Türkonstruktion fortgeführt.

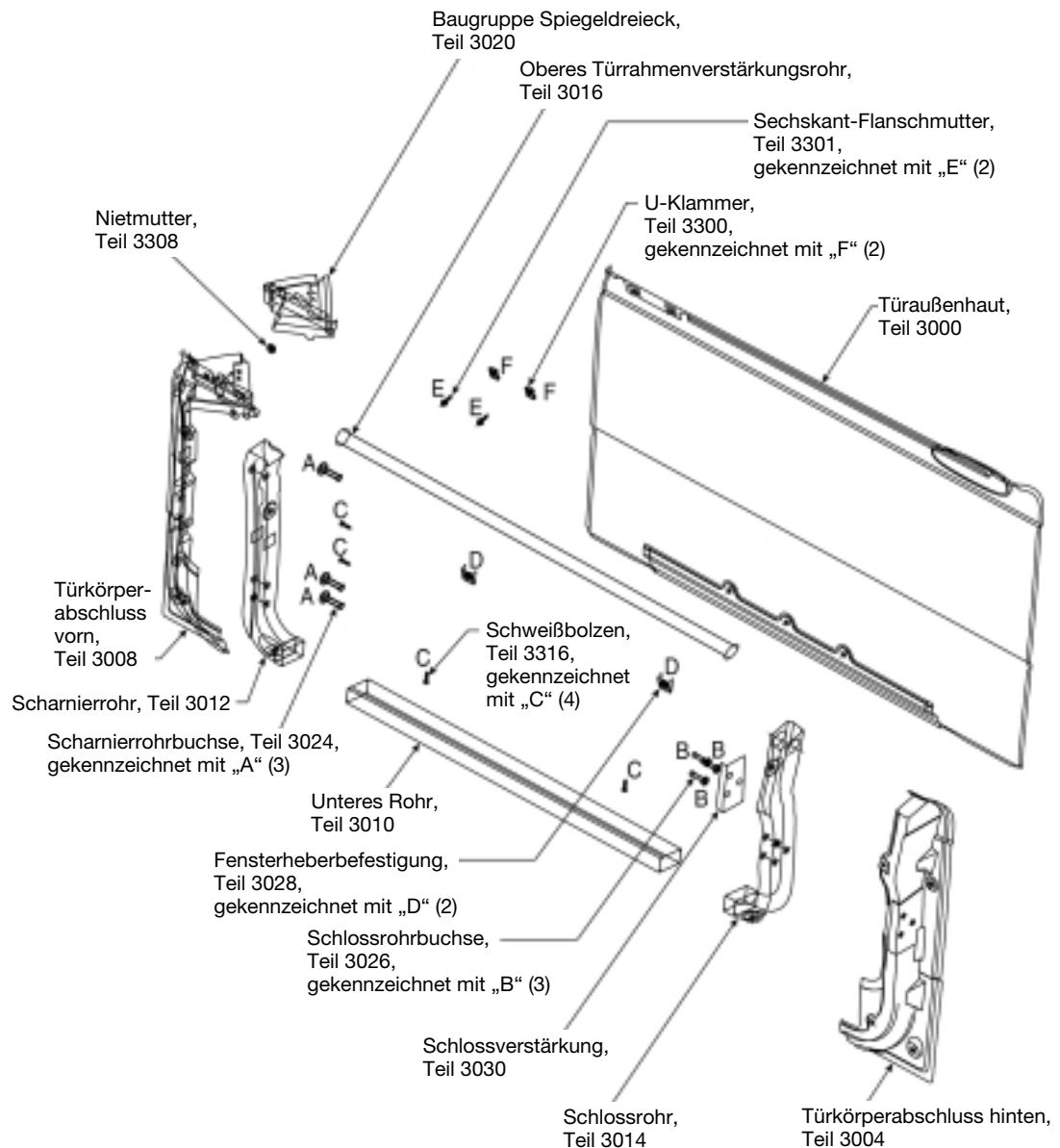


Bild 1 Umgesetzte fensterrahmenlose Tür

In jedem Iterationsschritt hat die Analyse die Effizienz der letzten Optimierung bestätigt und es den Ingenieuren ermöglicht, das Gewicht zu reduzieren, indem Funktionen zusammengefasst und Komponenten eingespart werden. Dies führt zu einer effizienten, optimierten Türkonstruktion.

Simultaneous Engineering unter Einbeziehung von Zulieferern und Stahlproduzenten garantiert ausreichend Feedback bezüglich Werkstoffauswahl, Herstellbarkeit und Kosten. Dies hat zu folgenden Präzisierungen bei Konstruktion und Montage in der Umsetzungsphase geführt:

4.1.1 Spiegeldreieck (Teil 3020)

Die Spiegelhalterung ist ursprünglich in der Konzeptionsphase als dünnwandiges Gussstück konstruiert worden, in dem die Befestigungen des Spiegels, die Glasführungsschiene und das obere Scharnier in einem Knotenpunkt integriert sind. Aus Gründen der Optimierung bezüglich Maßhaltigkeit, Montage und Kosten ist in der Umsetzungsphase die gegossene Spiegelhalterung durch zwei Umformteile ersetzt worden. Diese beiden Teile bilden die Türscheibenführungsschiene und halten das obere Türrahmenverstärkungsrohr, wobei sie einen starken Strukturknoten bilden. Von dort werden die Belastungskräfte zum Scharnierrohr hin- bzw. von ihm weggeführt. Das äußere Spiegeldreieck (**Bild 2**) ist mit einer Nietmutter zum Befestigen des Fensterhebermoduls ausgestattet. Der innere Spiegelhalter ist Teil des vorderen Türkörperabschlussblechs.

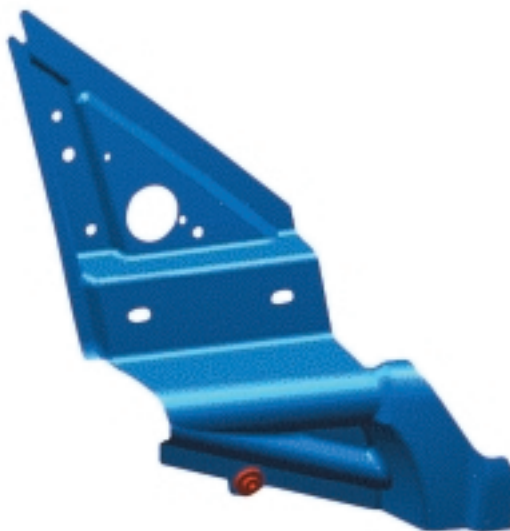


Bild 2 Spiegeldreieck

4.1.2 Türaußenhaut (Teil 3000)

In der Konzeptionsphase ist die Ausführung der Türaußenhaut mit einem Tailored Blank angedacht gewesen. Diese maßgeschneiderte Platine sollte zu einer Verstärkung der Brüstungslinie führen und den Aufprallschutz bei Frontalkollisionen verbessern. Durch die neue Konstruktion der Türstruktur und die Verwendung einer oberen Türrahmenverstärkung aus hochfestem Stahl (s. 4.1.3 und 6.1.1) kann bei der Türaußenhaut auf den Einsatz eines Tailored Blanks verzichtet werden.

Der untere Teil des Innenblechs zwischen dem Türkörperabschluss vorn und hinten wird auf die Türaußenhaut gepresst und nach innen gefalzt. Das führt zu einer Gewichtsreduzierung durch Einsparung des Bördelflansches an dieser Stelle.

Die Türaußenhaut besteht aus einem Pressenteil aus Bake-Hardening-Stahl mit 260 MPa Streckgrenze und 0,7 mm Wanddicke.

4.1.3 Türrahmenstruktur

In der Konzeptionsphase hat die Türstruktur zunächst aus einer Rahmenkonstruktion bestanden, die sich aus einem einteiligen, mittels Innenhochdruck umgeformten unteren Türrahmen und einer Verstärkung zusammensetzt. Diese wird ersetzt durch zwei kleinere innenhochdruckumgeformte Rohre und ein gerades rechteckiges Hohlprofil (**Bild 3**). Dadurch werden die Werkzeugkosten reduziert. Ein weiterer wichtiger Vorteil: Der Konstrukteur kann den Durchmesser, die Materialqualität und die Wanddickenkombination für das vordere Scharnierrohr, das hintere Schlossrohr und das unten liegende Hohlprofil entsprechend den Funktionsanforderungen unabhängig voneinander bestimmen. Dadurch wird das Gewicht der Türstruktur reduziert.



Bild 3 Türrahmenstruktur

Schlossrohr (Teil 3014)

Gegenüber der Konstruktion des unteren Türrahmens aus der Konzeptphase wird die Materialdicke des innenhochdruckumgeformten Schlossrohres (**Bild 4**) von 1,2 mm auf 1,0 mm reduziert. Die Streckgrenze des Stahls beträgt 280 MPa. Diese Verringerung der Materialdicke führt zwar zu reduziertem Gewicht, verlangt aber an dieser Stelle eine Verstärkung im Schlossbereich, die für den Seitenaufprallschutz benötigt wird. Die Schlossverstärkung besteht aus 1,2 mm dickem Blech aus einer Tiefziehgüte mit 140 MPa Streckgrenze und wird mittels Laserschweißen mit dem Schlossrohr verbunden. Das untere Ende des Schlossrohres ist so konzipiert, dass es das untere Hohlprofil des Türrahmens aufnehmen kann. Beim Zusammenbau des Rahmens wird das Hohlprofil in das Schlossrohr gesteckt und MIG-verschweißt.



Bild 4 Schlossrohr

Scharnierrohr (Teil 3012)

Das mittels Innenhochdruck umgeformte Scharnierrohr (**Bild 5**) ist Teil des Neuentwurfs der Türstruktur. Wie in der Konzeptionsphase geplant, wird aufgrund der Materialdicke von 1,2 mm ein höherfester Stahl mit einer Streckgrenze von 280 MPa eingesetzt. Das untere Ende des Scharnierrohres ist analog dem Schlossrohr so konzipiert, dass es das untere Rohr des Türrahmens aufnehmen und im MIG-Verfahren verschweißt werden kann.

Zur Befestigung der oberen und unteren Scharniere werden drei Buchsen in das Scharnierrohr eingeführt und mittels Laserschweißen verbunden. Auf der Innenseite sind sie MIG-verschweißt. An diesen eingeschweißten Buchsen werden die Scharniere befestigt. Die Buchsen dienen als Querverbund im Innern des Rohres und stabilisieren das Rohrteil bei Belastung durch die Scharniere.



Bild 5 Scharnierrohr

Unten liegendes Hohlprofil (Teil 3010)

Das untere Rohr (**Bild 6**) ist als gerades hochfestes Rechteck-Stahlrohr mit einer Zugfestigkeit von 800 MPa und einer Materialdicke von 1,6 mm konzipiert. Es ersetzt die in der Konzeptionsphase im mittleren Teil vorgesehene rollgeformte Aufprallträgerverstärkung, was zu Kostenreduzierungen bei der Teileherstellung, den Werkzeugen und der Montage führt.

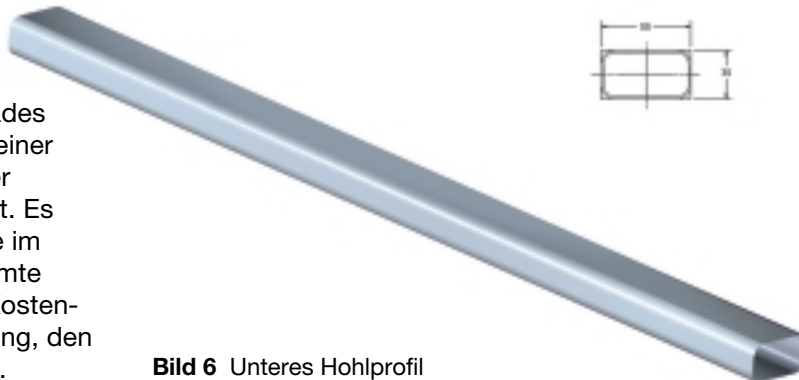


Bild 6 Unteres Hohlprofil

Oberes Türrahmenverstärkungsrohr (Teil 3016)

Der Neuentwurf des Spiegeldreiecks erleichtert den Austausch des oberen Türrahmenverstärkungsrohres, das in der Konzeptionsphase noch als innenhochdruckumgeformtes Bauteil vorgesehen war (1,2 mm Dicke/350 MPa Streckgrenze). Nun ist das Verstärkungsrohr ein gerades Rohr aus hochfestem Stahl mit 800 MPa Zugfestigkeit und 1,0 mm Dicke (**Bild 7**).

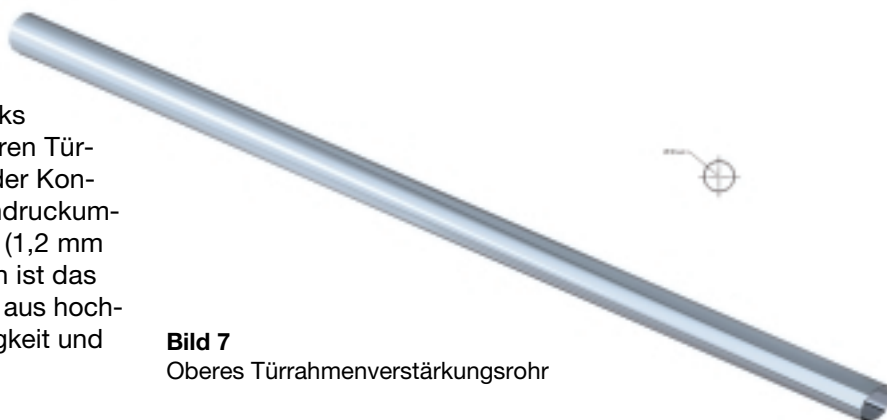


Bild 7
Oberes Türrahmenverstärkungsrohr

Da die Dicke des Türrahmenverstärkungsrohrs von ursprünglich 1,2 mm auf 1,0 mm reduziert wird, nimmt das Gewicht ab, ohne die Struktureigenschaften der Tür zu beeinträchtigen. Die Verwendung eines Rohres aus hochfestem Stahl verbessert darüber hinaus in Kombination mit dem unteren Rohr den Seitenaufprallschutz der Tür. Der Einsatz des geraden Rohres anstelle eines hydroumgeformten reduziert Teile- und Umformwerkzeugkosten.

Bild 8
Vorderer
Türkörperabschluss



4.1.4 Vorderer und hinterer Türkörperabschluss

In der Umsetzungsphase werden hinterer und vorderer Türkörperabschluss neu entwickelt, um den Veränderungen, die an dem Spiegeldreieck und bei der Optimierung der Türstruktur vorgenommen wurden, gerecht zu werden.

Vorderer Türkörperabschluss (Teil 3008)

Das Spiegeldreieck als zweiteiliges Umformteil erfüllt die gleichen vielfältigen Funktionen wie ursprünglich das Gussteil. Der vordere Türkörperabschluss (**Bild 8**) ist so gestaltet, dass er gleichzeitig die Innenseite des Spiegeldreiecks darstellt und eine Hälfte des Hohlraums bildet, in dem das Türrahmenverstärkungsrohr endet und in den das äußere Spiegeldreieck eingelassen wird. Zusammen bilden diese Teile einen starken Strukturknoten. Der gesamte Türkörperabschluss vorn muss in Höhe und Breite vergrößert werden, um das Spiegeldreieck aufnehmen zu können und gleichzeitig als Befestigung des Fensterhebermoduls zu dienen.

Ein zweiteiliges Tailored Blank mit Blechdicken von 1,0 und 1,2 mm aus einem Werkstoff mit 140 MPa Streckgrenze macht eine Verstärkung des unteren Scharniers überflüssig. Die größere Materialdicke im unteren Teil des Bleches wird benötigt, um die erforderliche Struktureigenschaft zu erhalten. Das dünnere Material im oberen Teil trägt zur Verstärkung des Spiegeldreiecks bei und erhöht so die Stabilität des Außenspiegels. Gleichzeitig wird hieran das Außenblech befestigt, so dass die Kombination aller Anforderungen in diesem Teil zur Reduzierung des Gesamtgewichts beiträgt.

Hinterer Türkörperabschluss (Teil 3004)

Während des Optimierungsprozesses der Montage ist der hintere Türkörperabschluss (**Bild 9**) vergrößert worden, um mehr Anlagefläche zum Überziehen des Schlossrohres zu erhalten. Der hintere Türkörperabschluss nimmt auch die Befestigungspunkte für das Türinnenblechmodul auf.



Bild 9 Hinterer Türkörperabschluß

Teile-Nr.	Teile-bezeichnung	Gewicht (kg)
3000	Türaußenhaut	4,600
3004	Hinterer Türkörperabschluss	0,467
3008	Vorderer Türkörperabschluss	1,130
3010	Unteres Rohr	1,438
3012	Scharnierrohr	0,653
3014	Schlossrohr	0,601
3016	Oberes Türrahmenverstärkungsrohr	0,778
3020	Spiegeldreieck	0,371
3024	Scharnierrohrbuchsen (3 Stück)	0,132
3026	Schlossrohrbuchsen (3 Stück)	0,039
3028	Fensterheberbefestigung (2 Stück)	0,013
3030	Schlossverstärkung	0,054
3300	U-Klammer (2 Stück)	0,021
3301	Sechskant-Flanschmutter (2 Stück)	0,080
3312	Klebeverbindung unteres Rohr	0,070
3316	Schweißbolzen (4 Stück)	0,020
Gesamtgewicht der Türstruktur		10,467

Tafel 3 Teilleiste der ULSAC-Türstruktur

4.2 Komplette Tür

Im Zuge der Konstruktion der Strukturkomponenten hat Porsche Engineering Services ein Konzept für das Türkomponentenpackage entwickelt, um die vollständige Funktionalität der Tür zu gewährleisten. Als Ergebnis wird eine voll funktionsfähige leichte Tür vorgestellt, für die die Einflüsse von ausgewählten Komponenten auf die Endmontage der Tür und auf die Montagefolge untersucht werden.

Vor der Zusammenstellung der Türkomponenten wurden verschiedene Faktoren berücksichtigt, so z.B. das Gewicht der Komponenten und die Auswirkung des Gewichts auf die Konstruktion der Türstruktur. Porsche Engineering Services hat alle zur Verfügung stehenden Technologien, modulare Konstruktionsmöglichkeiten und geeignete Montageprozesse analysiert. Eine Explosionszeichnung der ULSAC-Tür, die alle im Package enthaltenen Komponenten enthält, zeigt **Bild 10**.

Äußere Form, Sicherheit und Komfort werden bei der Auswahl der Türkomponenten berücksichtigt. Merkmale der Tür sind der ins Verkleidungsblech integrierte Schaumstoffkern zur Energieabsorption (normalerweise wird hier ein separater Schaumstoffblock verwendet), elektrische Türverriegelung, Außengriff, elektrische Fensterheber mit Einklemmschutz sowie heizbare, elektrisch verstellbare Außenspiegel.

Eine Übersicht über die Montagefolge der kompletten Tür gibt Kapitel 8.2.2.

Nr. Teilebezeichnung

- ① Türstruktur
- ② Türanschlag
- ③ Halter für Verkleidung
- ④ Halter für Verkleidung
- ⑤ Schlosseinheit
- ⑥ Außengriff
- ⑦ Äußere Türdichtung
- ⑧ Spiegeldreiecksdichtung
- ⑨ Spiegeleinheit
- ⑩ Kabelmanschette
- ⑪ Fensterheber
- ⑫ Türscheibe
- ⑬ Wasser abweisende Folie
- ⑭ Türinnenverkleidungseinheit
- ⑮ Innere Türdichtung
- ⑯ Schaltereinheit
- ⑰ Fensterheberschalter
- ⑱ Lautsprecher
- ⑲ Spiegeldreiecksabdeckung
- ⑳ Kabelstrang

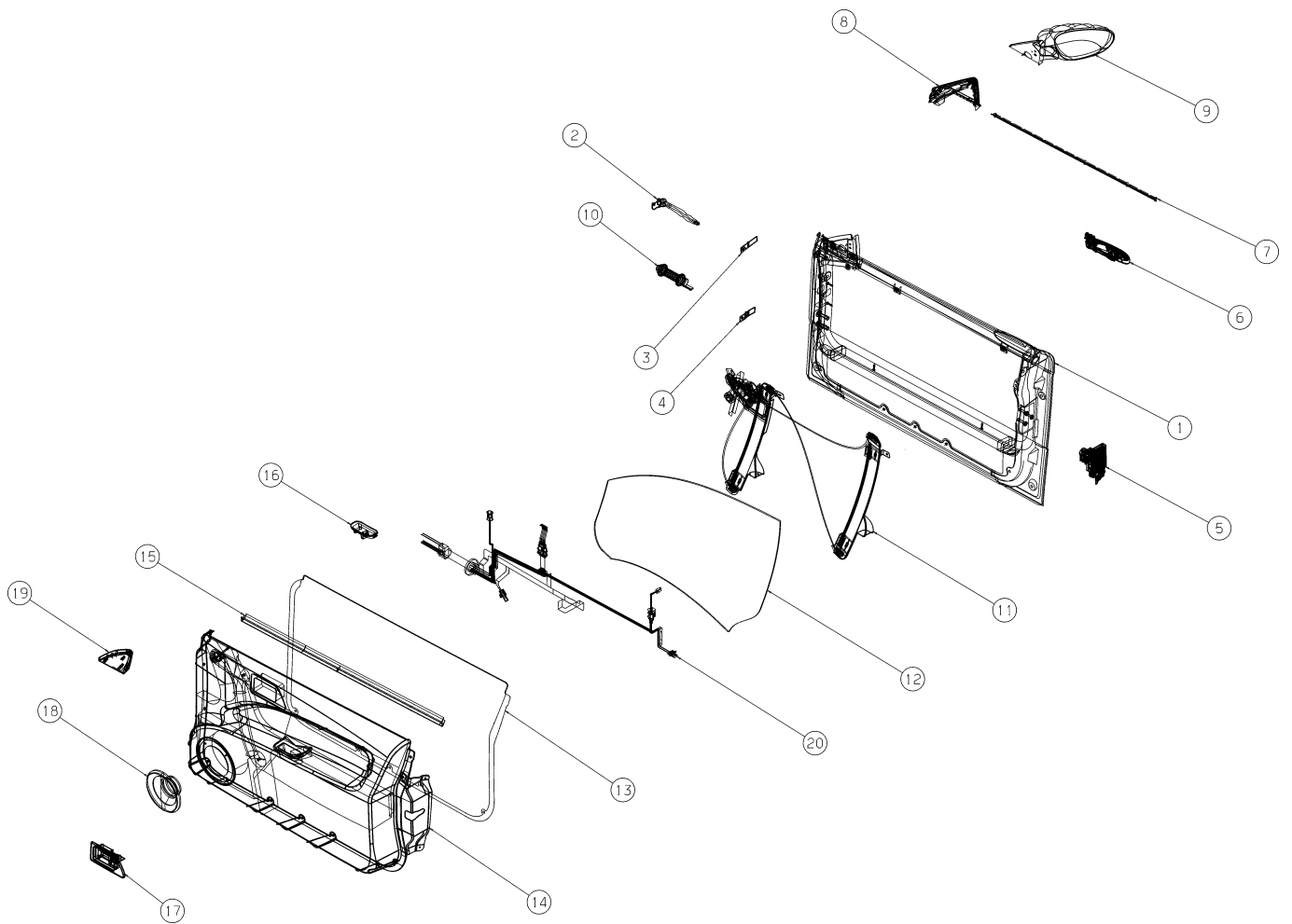


Bild 10 Explosionszeichnung der ULSAC-Tür

5 CAE-Analyse

Die CAE-Analyse ist während der Entwicklung der fensterrahmenlosen ULSAC-Tür zur Unterstützung der Optimierung von Design und Struktureigenschaften genutzt worden. Es werden sowohl lineare als auch nicht-lineare Varianten der Analyse verwendet. Lineare Berechnungen mit „NASTRAN“ dienen der Ermittlung von Türdurchhang, Torsionssteifigkeit und Eigenfrequenz.

Die nichtlineare Berechnung mit „LS-DYNA“ wird zur Analyse des Türeindrückverhaltens (**Bild 11**) und des Verhaltens der Türstruktur bei Druckbelastung in Längsrichtung (**Bild 12**) eingesetzt.

Die „HyperMesh“-Modellierungssoftware wird für die Entwicklung des Finite-Elemente-Modells sowohl für die lineare als auch für die nichtlineare Berechnung genutzt.

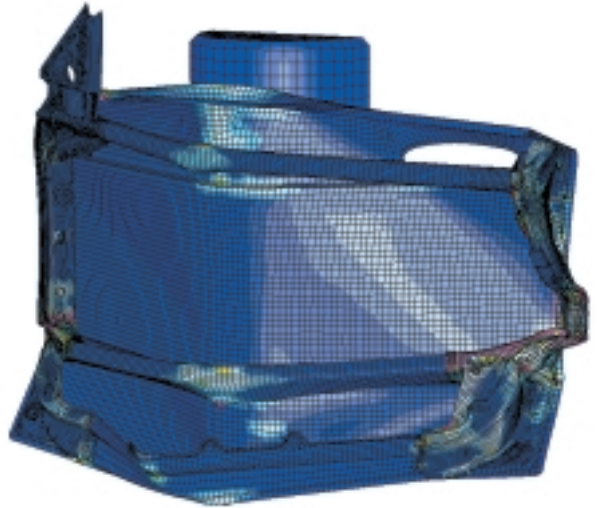


Bild 11 Analyse Türeiteneindrückung

Das Ergebnis der CAE-Analyse deckt sich im Wesentlichen mit den Resultaten aus den real durchgeführten Tests. Ausgenommen ist der Test der Druckbelastung in Längsrichtung, da dieser Test physikalisch nicht durchgeführt worden ist. Die Merkmale der Türstruktur bei der Druckbelastung in Längsrichtung sind aus dem Kraft-Weg-Diagramm in **Bild 13** abzulesen. Das Diagramm zeigt für die gesamte Tür einen berechneten Spitzenwert für die Eindrückkraft von 60 kN bei einer Durchschnittskraft von ca. 20 kN. Aus der gleichen Grafik sind die Kräfte abzulesen, die zur Verformung der Türaußenhaut sowie des unteren und des oberen Trägers benötigt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die ULSAC-Tür einen wesentlichen Beitrag zum Crashmanagement des Fahrzeugs im Falle eines Frontalzusammenstoßes leisten würde.

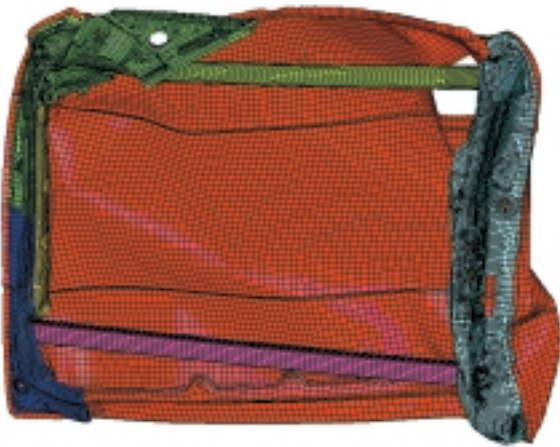


Bild 12 Analyse Druckbelastung in Längsrichtung

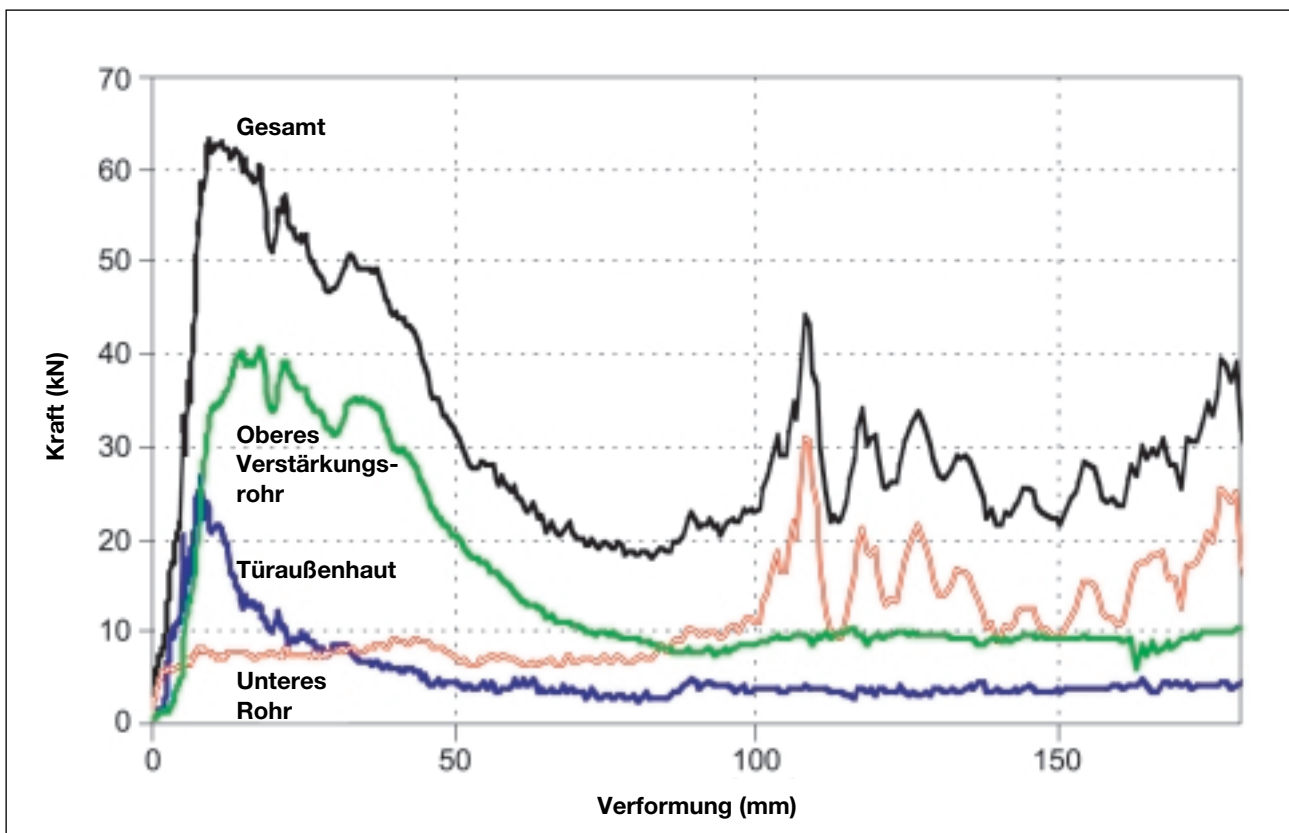


Bild 13 Druckbelastung in Längsrichtung

6 Werkstoffe und Verfahren

Die am ULSAC-Konsortium beteiligten Stahlunternehmen haben alle für die Herstellung verwendeten Stähle mit den werkstoffspezifischen Daten bereitgestellt.

In **Tafel 4** sind die mechanischen Eigenschaften der für die Bauteile eingesetzten Werkstoffe aufgelistet.

6.1 Auswahl der Werkstoffe

Da die Konstruktion der Tür während der Umsetzungsphase weiterentwickelt worden ist, sind die in der Konzeptionsphase ausgewählten Werkstoffe noch einmal hinsichtlich Gewicht, Leistungsfähigkeit und Sicherheitsverhalten überprüft worden, um die Eigenschaften des Stahls optimal zu nutzen. Eine wesentliche Forderung besteht darin, die Tür mit gegenwärtig verfügbaren Stählen in Großserie herzustellen. Folglich werden für die fensterrahmenlose Tür auch nur die Stahlsorten und Blechdicken ausgewählt, die aus der normalen Produktion stammen.

6.1.1 Höher- und hochfeste Stähle

Für die ULSAC-Tür finden höher- und hochfeste Stähle Verwendung, um bei reduziertem Gewicht gute Ergebnisse hinsichtlich Crashsicherheit und Strukturfestigkeit zu erzielen. Das ULSAC-Programm definiert höherfeste Stähle als Stähle mit einer Streckgrenze von 210 bis 550 MPa und hochfeste Stähle als solche mit einer Streckgrenze über 550 MPa. Bei den nachfolgend beschriebenen Bauteilen kommen solche Stähle zum Einsatz.

Teile-Nr.	Teilebezeichnung	Stahlsorte	Beschichtung	Materialdicke (mm)	Streckgrenze $R_{p0,2}$ (MPa)	Zugfestigkeit %	Bruchdehnung A_{80} %	r-Wert	n-Wert
3000	Türaußenhaut	H260BD (ZStE 260 BH)	+ ZF	0,70	250	380	34	1,20	0,17
3004	Hinterer Türkörperabschluss	DX54D (Fe P06 G)	+ Z	0,60	150	294	43	1,98	0,23
3008	Vorderer Türkörperabschluss (Tailored Blank)	DX54D (Fe P06 G)	+ ZF + ZF	1,02 1,23	174 177	308 301	48 50	2,40 2,40	0,21 0,20
3010	Unteres Rohr	DP800	+ ZE	1,56	650	868	13	*	0,04
3012	Scharnierrohr	H300LAD (ZStE 300)	+ Z	1,20	357	394	37	*	0,08
3014	Schlossrohr	H280G1 (Isotroper Stahl)	+ ZE	0,97	273	361	41	*	0,19
3016	Oberes Türrahmenverstärkungsrohr	DP800	+ Z	0,96	848	999	11	*	0,05
3020	Spiegeldreieck	DX54D (Fe P06 G)	+ Z	1,02	154	291	52	1,72	0,23
3030	Schlossverstärkung	DX54D (Fe P06 G)	+ ZF	1,23	177	301	50	2,40	0,20

* Rohre: kein r-Wert verfügbar

Z = Feuerverzinkt, ZE = Elektrolytisch verzinkt, ZF = Zink-Eisen-Legierung (Galvanealed)

Tafel 4 Material und mechanische Eigenschaften

Türaußenhaut (Teil 3000)

Sechs verschiedene Stahlsorten mit zwei unterschiedlichen Blechdicken von 0,6 und 0,7 mm sind für die Verwendung als Türaußenhaut vorgesehen, um die Gewichtsreduktion in Abhängigkeit vom Leistungspotenzial des jeweiligen Werkstoffs zu optimieren:

- Bake-Hardening-Stahl H220BD (ZStE 220 BH)
- Bake-Hardening-Stahl H260BD (ZStE 260 BH)
- Isotroper Stahl H260G1
- IF-Stahl H260YD
- Dual-Phasen-Stahl H300X (DP500)
- Dual-Phasen-Stahl H340X (DP600)

Aus allen sechs Stahlsorten sind mit konventioneller Umformtechnik hochwertige Türaußenhautteile erfolgreich gefertigt worden.

Für Eindrücktests werden die Stähle H220BD, H260BD und H340X mit den Blechdicken von 0,6 und 0,7 mm verglichen. Diese drei Sorten sind ausgewählt worden, weil sie das Gesamtfestigkeitsspektrum abdecken und somit zu Vergleichszwecken herangezogen werden können.

Nach Abschluß der Testserie für alle Türen haben die Werkstoffexperten des Konsortiums die Sorte H260BD mit 0,7 mm Blechdicke für die Türaußenhaut ausgewählt (**Bild 14**). Dieses Material zeigt gute Eigenschaften sowohl in Bezug auf Beulfestigkeit (Dent Resistance) als auch Beulsteifigkeit (Oil Canning).

Oberes und unteres Rohr des Türinnenrahmens (Teile 3010 und 3016)

Sowohl das untere Hohlprofil als auch das obere Verstärkungsrohr des Türinnenrahmens bestehen aus hochfestem Dual-Phasen-Stahl DP800. Beide werden wegen ihrer Kombination der Eigenschaften und ihres Einsatzzwecks innerhalb des Struktursystems für die

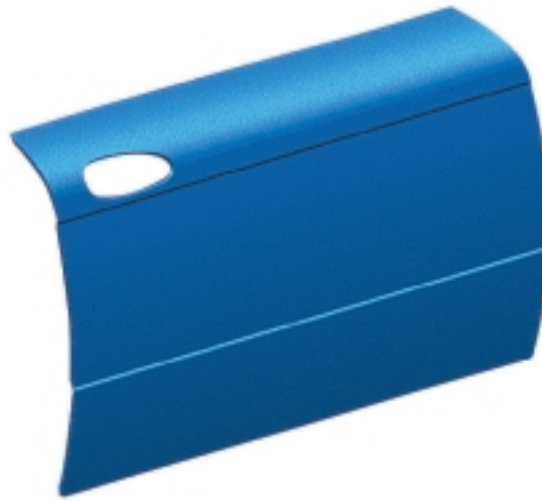


Bild 14 Türaußenhaut

ULSAC-Tür ausgewählt. Während das obere Verstärkungsrohr feuerverzinkt wird, ist das untere elektrolytisch verzinkt. Daraus resultieren unterschiedliche chemische Zusammensetzungen und mechanische Eigenschaften (siehe **Tafel 4**).

Dual-Phasen-Stähle sind niedrig legierte Stähle, die sich durch hohe Festigkeit, gute Umformeigenschaften und hohes Kaltverfestigungspotenzial auszeichnen. Sie sind somit für Anwendungen gut geeignet, bei denen eine hohe Bauteilfestigkeit in Verbindung mit einer guten Absorption von Verformungsenergie bei einem Unfall gefordert ist. Diese beiden Merkmale sind gleichrangig, wenn die Unversehrtheit des Passagierraums sicherzustellen ist. Daher sind Dual-Phasen-Stähle eine ausgezeichnete Wahl für die beiden Bauteile, da sie in hohem Maße die Eigenschaften der Türstruktur und die Insassensicherheit bei einem Aufprall auf die Tür sicherstellen.

Bei einem Frontalzusammenstoß nehmen diese beiden Teile hohe Kräfte auf, um A- und B-Säulen gegeneinander abzustützen. Bei einem Seitenaufprall sind gute Festigkeits- und Absorptionseigenschaften gefragt, damit die einwirkenden Stoßkräfte aufgefangen werden können.

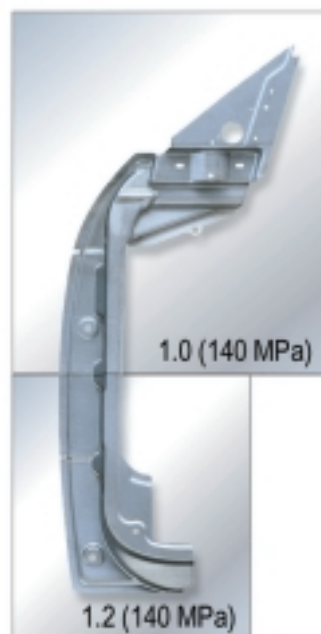
Scharnier- (Teil 3012) und Schlossrohre (Teil 3014)

Beide Bauteile sind aus höherfesten Rohren mittels Innenhochdruckumformung hergestellt. Das Verfahren wird wegen seiner Vorteile im Hinblick auf ausgezeichnete Formgebung, hohe Festigkeit der Teile und Gewichtseinsparpotenziale gewählt. Die komplexe Form der Teile erleichtert die Befestigung am oberen Verstärkungsrohr und am unteren Hohlprofil des Türinnenrahmens, wodurch ein starker Strukturknoten entsteht. Das Verfahren zur Umformung von Rohren mittels Innenhochdruck wird in Abschnitt 6.2.2 beschrieben.

6.2 Verfahren

6.2.1 Tailored Blanks

Tailored Blanks sind maßgeschneiderte Platinen, die aus Blechzuschnitten unterschiedlicher Stahlsorten, Dicken und/oder Oberflächenveredelungen bestehen, die durch Laser- oder Quetschnahtschweißen miteinander verbunden sind. Sie versetzen den Konstrukteur in die Lage, spezielle Werkstoffeigenschaften und Blechdicken entsprechend den lokalen Bauteilbeanspruchungen so einzusetzen, dass sie zur Verbesserung des Strukturverhaltens führen.



Durch den Einsatz von Tailored Blanks lässt sich

- die Fahrzeugsicherheit durch verbesserte Struktureigenschaften erhöhen
- das Gewicht reduzieren
- die Anzahl der Einzelteile verringern
- die Bauteiltoleranz optimieren
- die Fertigungszeit kürzen und
- das Kostenniveau senken.

Bei der ULSAC-Tür ist der vordere Türkörperabschluss aus einem Tailored Blank hergestellt (**Bild 15**). Die Ergebnisse der CAE-Analyse für die Struktureigenschaften zeigen, dass die Kraftaufnahme im Bereich des anhängenden Türscharniers durch den verstärkten Materialeinsatz unterstützt wird.

6.2.2 Innenhochdruckumformung

Das Innenhochdruckumformverfahren findet zunehmend Eingang in den Automobilbau. Zu den gegenwärtigen Anwendungen zählen beispielsweise Fahrwerksrahmen, Karosseriestrukturen, Antriebsstrangkomponenten und Abgasrohre.

Bei der ULSAC-Tür werden innenhochdruckumgeformte Bauteile zur Herstellung der Schloss- und Scharnierrohre verwendet. Der Türaufbau erhält dadurch zusätzliche Festigkeit und ermöglicht die Integration weiterer Funktionsteile, wie z. B. der Scharnierplatte, der Türschlossbefestigung und der Buchsen zur Durchführung der Scharnierschrauben.

Bild 15 Tailored Blank-Layout

Die innenhochdruckumgeformten Bauteile bieten mehrere Vorteile gegenüber geschweißten Blechstrukturen:

- belastungsangepaßte Querschnittsverläufe
- gute Bauteilsteifigkeit und Bauraumausnutzung
- geringeres Gewicht
- Teileintegration und geringere Stückkosten
- Integration von Bohr- und/oder Stanzvorgängen
- Wegfall von Punktschweißflanschen,
- Verbesserungen der Maßgenauigkeit
- niedrigere Werkzeugkosten

Beim Einsatz von Rohren aus höherfesten Werkstoffen können mit diesem Verfahren im Vergleich zur Blechschalenbauweise strukturell verbesserte Bauteile mit geringeren Wanddicken und somit reduziertem Gewicht gefertigt werden.

Obwohl Scharnier- und Schlossrohr mit ähnlichen Fertigungsschritten der Innenhochdruckumformung gefertigt werden, ist das Schlossrohr durch die geringere Wanddicke und den dreidimensionalen Kurvenverlauf komplizierter herzustellen und soll deshalb exemplarisch beschrieben werden. Die Herstellung des Schlossrohres umfaßt vier Schritte:



Bild 16 Ausgangsprofil des Schlossrohrs

Herstellung des Rohrs

Das Schlossrohr besteht aus höherfestem Stahlblech mit einer Streckgrenze von 280 MPa, wobei Schweißverfahren wie Hochfrequenz- und Laserschweißen problemlos eingesetzt werden können (**Bild 16**).

Vorbiegen

Aufgrund des dreidimensionalen Kurvenverlaufs muss das gerade Rohr vorgebogen werden. Für diesen Arbeitsschritt wird eine konventionelle Dornbiegemaschine verwendet (**Bild 17**).

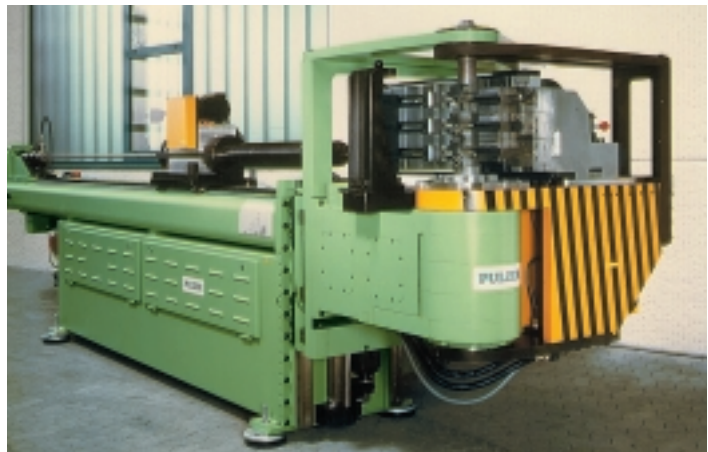


Bild 17 Dornbiegemaschine

6.2.3 Tiefziehen

Tiefziehen ist das am meisten verbreitete Herstellungsverfahren für Blechteile in der Automobilindustrie. Die Türaußenhaut, der vordere und hintere Türkörperabschluss, das Spiegeldreieck und die Schlossverstärkung sind tiefgezogene Blechkomponenten. Das hintere Türkörperabschlussblech ist sehr dünn ausgeführt (0,6 mm), wodurch bei guter Struktureigenschaft das Gewicht verringert wird. Eine Verlängerung des Türkörperabschlusses vorn ergibt in Verbindung mit der äußeren Spiegelhalterung, die aus einem separat gepressten Blechteil besteht, ein doppelschaliges Spiegeldreieck. Diese Konstruktion ermöglicht das Einschieben des oberen Türrahmenverstärkungsrohrs und schafft so einen festen Strukturknoten.

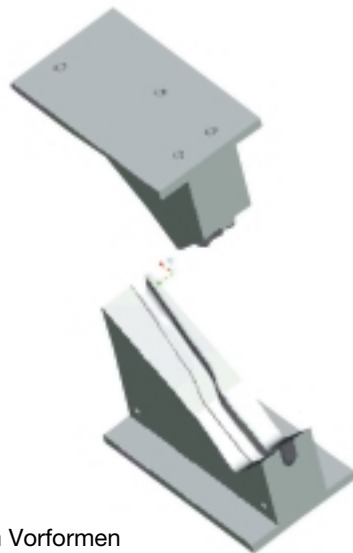


Bild 18
Werkzeug zum Vorformen

Vorformen

Das Vorformen ist erforderlich, um dem Teil eine korrekte Startgeometrie zu geben, die für das anschließend einzusetzende Werkzeug zur Innenhochdruckumformung nötig ist (**Bild 18**).

Innenhochdruckumformung

Das vorgeformte Rohr wird in einem geschlossenen Werkzeug mittels einer mit hohem Druck (im Fall des Schlossrohrs 1500 bar) beaufschlagten Flüssigkeit in die endgültige Form gebracht. Dabei wird das Ausgangsbauteil an die Innenkontur des Werkzeugs angeformt. Die an den Rohrenden wirkende Axialkraft führt Material während des Verformungsprozesses in das Werkzeug nach (**Bild 19**).

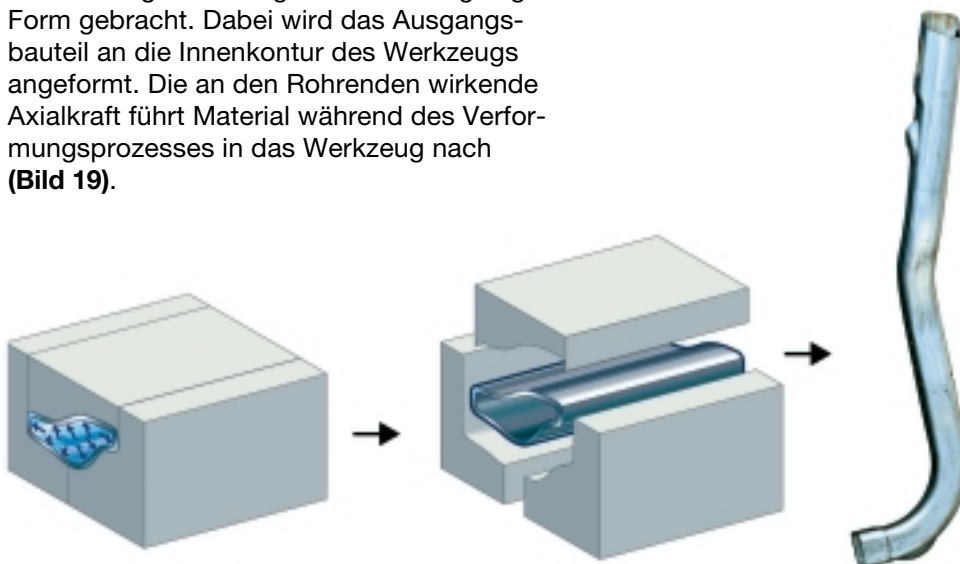


Bild 19 Innenhochdruckumformprozess

7 Umformsimulationen

Porsche Engineering Services hat Simulationen zur Blech- und Innenhochdruckumformung durchgeführt. Diese Simulationen dienen zur Bewertung der Machbarkeit. Ermittelt werden dabei die Abnahme der Wanddicke der Platine, die Materialbelastungsbedingungen und die Faltenbildung, damit die Umformgrenzen und -parameter festgelegt werden können. Die Simulationen sind parallel zur Werkzeugentwicklung durchgeführt worden, um eine Basis für die Großserienproduktion zu schaffen.

Die Umformsimulation (**Bild 20**) und die Formänderungsanalyse sind an beiden Türkörperabschlüssen, am Spiegeldreieck und bei der Türäußenhaut durchgeführt worden. In allen Fällen korrelieren die Simulationen mit den am Bauteil gemessenen Werten.

Für die mit Innenhochdruck umgeformten Teile des Schloss- und Scharnierrohres sind ein- und mehrstufige Simulationen durchgeführt worden (**Bild 21**). Auch bei diesen Umformsimulationen kann eine gute Übereinstimmung mit den gefertigten Teilen festgestellt werden. Die Ergebnisse belegen, dass mittels Simulation – besonders mit einer mehrstufigen – die Eigenschaften von innenhochdruckumgeformten Rohrteilen recht präzise vorherzusagen sind.

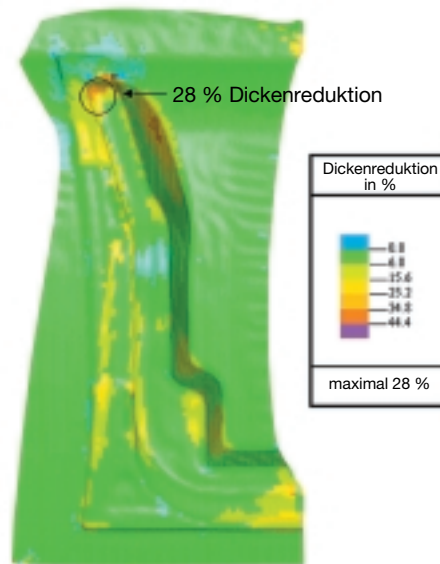


Bild 20 Umformsimulation

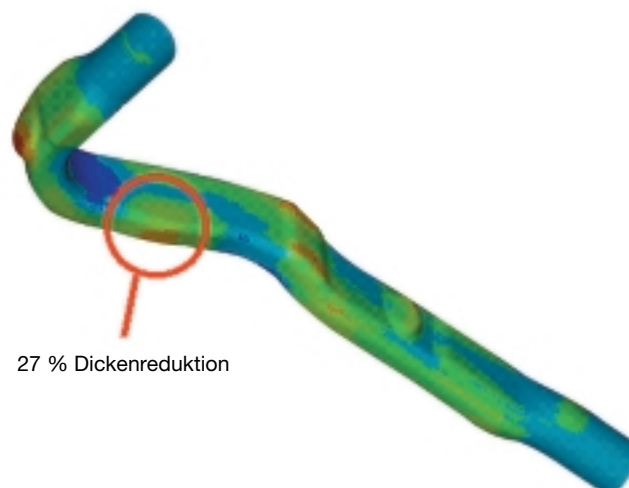


Bild 21 Mehrstufige Simulation der Formänderung bei Innenhochdruckumformung

8 Produktion und Montage

8.1 Teilefertigung

Die Bauteillieferanten sind auf der Basis eines von Porsche Engineering Services erarbeiteten Kriterienkatalogs aus mehreren Bewerbern ausgewählt worden. Das wichtigste Kriterium ist dabei die Erfahrung des Bewerbers mit der Produktion von Prototypen gewesen. Ein weiteres Kriterium hat die Nähe zum Werk der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in Weissach, Deutschland, dargestellt, wo die Türen dann schließlich montiert worden sind.

Im ULSAC-Programm ist Simultaneous Engineering konsequent angewandt worden, um die Teile für die fensterrahmenlose Tür zu konstruieren und herzustellen. Dabei hat Porsche Engineering Services Teilelieferanten, Montagespezialisten und Werkstoffexperten mit einbezogen. Durch diesen effizienten Prozess ist erreicht worden, dass alle Teile erfolgreich und termingerecht hergestellt werden konnten, da mögliche Schwierigkeiten bezüglich der Umformbarkeit, des Rückfederungsverhaltens der Werkstoffe, der Toleranzkontrolle und Montage Berücksichtigung gefunden haben.

Um die Machbarkeit einer effizienten Fertigung sicherzustellen, hat das Konsortium die Produktionsstandards für alle Teile festgelegt. Eine Forderung ist gewesen, dass diese ausschließlich mit Werkzeugen, also ohne manuelle Nacharbeit, umgeformt werden sollen.

Alle Presswerkzeuge in dem Programm sind „Soft-Tools“. Die Optimierung der Werkzeuge hat das Umformen von hochwertigen Tür- außenhautteilen aus den genannten sechs Stahlsorten ermöglicht.

Die Werkzeuge für das Innenhochdruckumformen werden aus Stahl gefertigt. Die Toleranzen für die Teileherstellung und die Qualitätsstandards allgemein entsprechen denen der Großserienfertigung.

Während der Herstellung der Teile hat Porsche Engineering Services die Vormateriallieferung koordiniert und Formänderungsanalysen durchgeführt, um diese Daten mit den Ergebnissen der Umformungssimulation zu vergleichen. Hierbei hat sich bestätigt, dass die Standards für die Großserienproduktion eingehalten werden.

Die Formänderungsanalyse der innenhochdruckumgeformten Bauteile ist an ausgewählten kritischen Bereichen erfolgt. Diese Teile sind in kleine Stücke zerschnitten worden, um Wanddickenveränderungen zu messen.

Die Dokumentation der Teileherstellung beinhaltet Informationen über Materialcharakteristika, Umformbedingungen, Grenzformänderungsdiagramme, Fertigungsdatenblätter und Toleranzmaße.

8.2 Montage

Unter Verwendung von „CATIA“ sind die Montagevorrichtungen entwickelt worden, in denen der Zusammenbau im virtuellen System simuliert werden kann. Dies ermöglicht die Konstruktion eines kompletten Vorrichtungssystems, wie es für die spätere Montage geplant ist. Die Montagesimulation hat dazu beigetragen, die Anzahl der Montagevorrichtungen zu reduzieren, indem mehrere Montageschritte zusammengefasst worden sind. Daraus resultiert die Senkung von Montagezeit und -kosten für die ULSAC-Tür.

8.2.1 Montage des Türkörpers

Bei der Montage werden die folgenden Module zusammengebaut:

Baugruppe 1

Zusammenbau des Rahmens, bestehend aus Scharnierrohr, Schlossrohr, Türrahmenverstärkungsrohr, unterem Rohr, Scharnierbuchsen, Fensterheberbefestigungsbügel und Schlossverstärkung (**Bild 22**):

Das Scharnier- und Schlossrohr, das Türrahmenverstärkungsrohr und die Befestigungsbügel des Scheibenhebers werden durch MIG-Schweißen gefügt. Die zwei Befestigungsbügel des Fensterhebers sind aus konventionellem Tiefziehstahl gefertigt und mit Nietmuttern versehen. Die Scharnierbuchsen sind durch eine Kombination von Laser- und MIG-Schweißung befestigt. Die Verstärkung des Türschlosses wird durch Laserschweißen mit dem Schlossrohr verbunden.



Bild 22 Baugruppe 1

Baugruppe 2

Verbinden des Rahmens mit den beiden Türkörperabschlüssen, äußerem Spiegeldreieck und Schloßbuchsen (**Bild 23**):

Durch Laserschweißen werden vorderer und hinterer Türkörperabschluss mit dem Scharnier- bzw. Schlossrohr verbunden. Das äußere Spiegeldreieck wird durch Punktschweißen mit dem vorderen Türkörperabschluss gefügt und mittels Laser an das Türrahmenverstärkungsrohr geschweißt. Wie bei den Scharnierbuchsen werden die Schloßbuchsen und das Schlossrohr mit einer Kombination aus MIG- und Laserschweißen verbunden.



Bild 23 Baugruppe 2

Baugruppe 3

Verkleben und Falzen der Türaußenhaut mit der Baugruppe 2 (**Bild 24**):

Die Türaußenhaut und die Baugruppe 2 werden mit einem Epoxydharzkleber per Bördelflansch verbunden. Durch Punktschweißen wird die untere innere Überlappung der Türaußenhaut mit dem vorderen und hinteren Türkörperabschluss befestigt. Ein selbstdichtender Kunststoffkleber, der sich unter Hitze einwirkung ausdehnt, verklebt das untere Rohr mit der Türaußenhaut und sorgt so für Stabilität sowie akustische Dämpfung.



Bild 24 Baugruppe 3

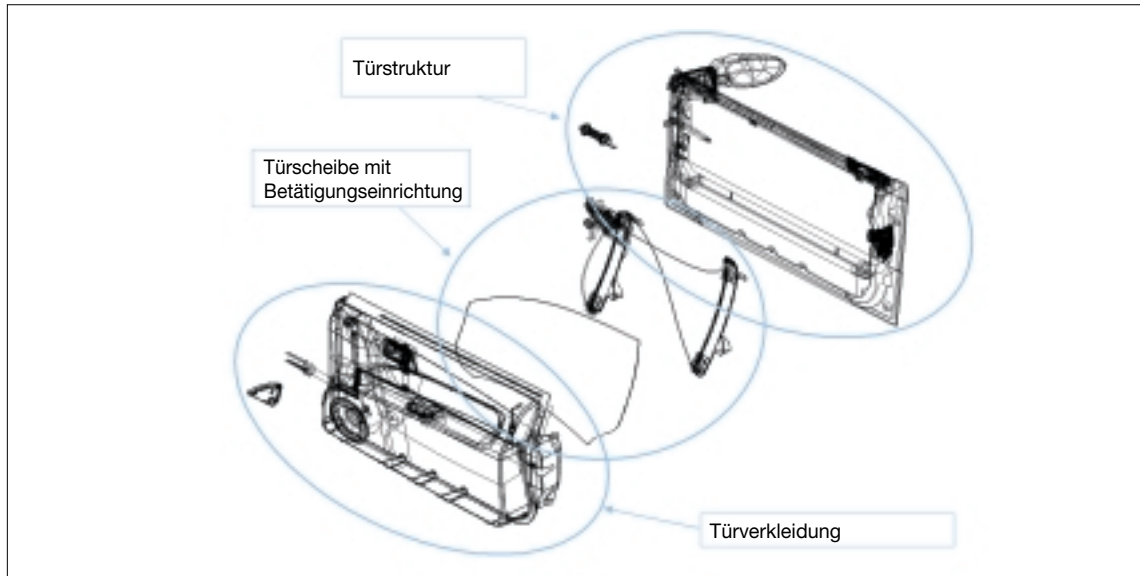


Bild 25 Zusammenbaufolge der Hauptbaugruppen

8.2.2 Montage der kompletten Tür

Um die Tür zu montieren, wird das in Abschnitt 4.2 aufgelistete Komponentenpackage, wie **Bild 25** zeigt, in Form von drei Modulen zusammengebaut. Die Abbildung zeigt die Reihenfolge der Montage:

- Türstruktur
- Türscheibe mit Fensterheber
- Türverkleidung

Türstruktur

Diese Unterbaugruppe beinhaltet neben dem lackierten Türkörper die folgenden Komponenten:

- äußerer Türgriff
- Türdichtung
- Türschloss
- Spiegeldreiecksdichtung
- Außenspiegel
- Kabelmanschette
- Türbremse

Türscheibe mit Fensterheber (Bild 26)

Die Betätigungseinrichtung ist montiert und die Türscheibe befestigt.

Türverkleidung (Bild 27)

Die Feuchtigkeitssperre und die Türverkleidung sind angebracht.

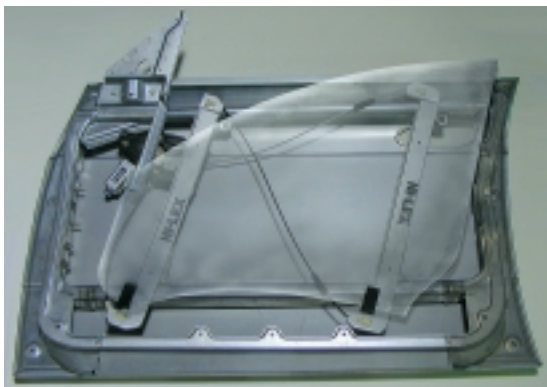


Bild 26 Fensterheber



Bild 27 Innenansicht der kompletten Tür

9 Tests und Testergebnisse

9.1 Gewicht

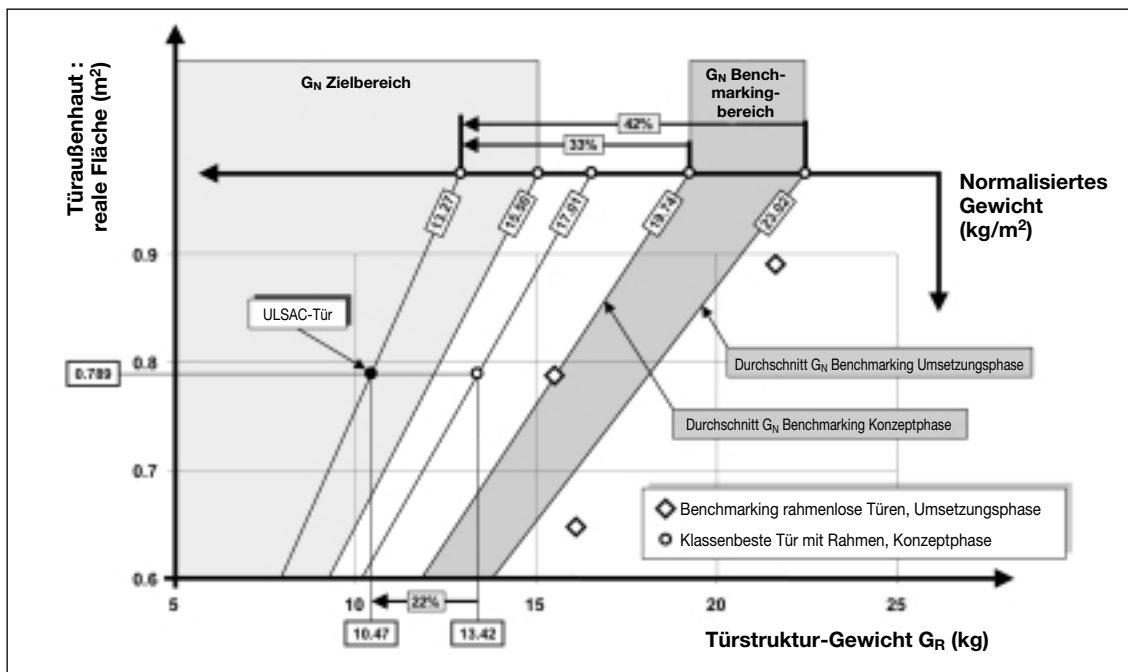
Die fensterrahmenlose ULSAC-Türstruktur wiegt lediglich 10,47 kg. Das sind 1,76 kg weniger als das in der Konzeptionsphase spezifizierte Zielgewicht von 12,23 kg.

Um das Ergebnis mit rahmenlosen Türen aus dem Benchmarking vergleichen zu können, ist das Gewicht aller Türen normalisiert worden, d. h. das Gewicht der Rohbautür wird durch die Oberfläche der Türaußenhaut unter Berücksichtigung der Wölbung dividiert. So entsteht für jede Tür das normalisierte Gewicht in Kilogramm je Quadratmeter. Diese Vorgehensweise wird aus der Konzeptionsphase übernommen.

Während der Konzeptionsphase wird eine breite Palette von Türen aus dem Benchmarking untersucht. Die leichteste ist eine Türstruktur mit Fensterrahmen, deren normalisiertes Gewicht 17,01 kg/m² beträgt. Im Hinblick auf die Konstruktion der fensterrahmenlosen Tür in der Umsetzungsphase analysiert Porsche Engineering Services drei weitere rahmenlose Türen, die der ULSAC-Tür ähnlich sind. Die leichteste hat ein normalisiertes Gewicht von 19,76 kg/m² (**Tafel 5**).

	Normalisiertes Gewicht pro Flächeneinheit (kg/m ²)	Gewicht der Türstruktur (kg)	Reale Außenfläche (m ²)
ULSAC Ergebnisse Umsetzungsphase	13,27	10,47	0,789
ULSAC Zielvorgabe Konzeptionsphase	15,50	12,23	0,789
Tür mit Rahmen Klassenbeste der Konzeptphase	17,01	13,42	0,789
Rahmenlose Tür A	24,94	16,14	0,647
Rahmenlose Tür B	19,76	15,55	0,787
Rahmenlose Tür C	24,36	21,68	0,890
Durchschnittliche Bezugsgröße Umsetzungsphase	23,02		
Durchschnittliche Bezugsgröße Konzeptionsphase	19,74		

Tafel 5 ULSAC-Benchmarking und Vergleichsdaten



G_R = reales Gewicht
G_N = normalisiertes Gewicht

Bild 28 Zusammenfassung der Gewichtsergebnisse

Die ULSAC-Türstruktur zeigt deutliche Gewichtsvorteile: Sie ist 22 % leichter als die klassenbeste Tür mit Fensterrahmen in der Vergleichsgruppe, 33 % leichter als die durchschnittliche Tür in der Konzeptionsphase und 42 % leichter als die durchschnittliche fensterrahmenlose Tür aus dem Benchmarking in der Umsetzungsphase, und dies bei gleichguter bzw. verbesserter Strukturfestigkeit und Beulverhalten der Außenhaut (**Bild 28**).

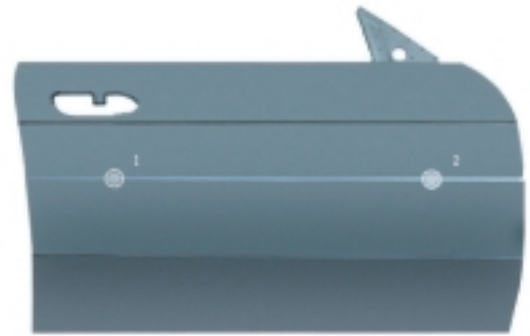


Bild 29 Definition der Testpunkte

9.2 Beulfestigkeit und Beulsteifigkeit (Dent Resistance and Oil Canning)

Während der Umsetzungsphase werden an der ULSAC-Tür Tests zur Bewertung des Strukturverhaltens durchgeführt. Weiterhin wird das Beulverhalten der Außenhaut untersucht, um die am besten geeignete Stahlsorte auszuwählen.

Ein Ziel der Tests besteht darin, die Auswirkung von Stahlsorten und Blechdicken der Außenhaut, bezogen auf das Gewicht, zu ermitteln.

Die Tür wird Labortests unterzogen, um den Widerstand gegen bestimmte Beschädigungsarten zu ermitteln, denen Karosserien üblicherweise ausgesetzt sind. Vier Arten von Beultests werden an definierten Stellen der Außenhaut durchgeführt (**Bild 29**):

Quasi-statisch inkremental

Dieser standardisierte Test wird angewandt, um die relative Beulfestigkeit verschiedener Stahlsorten in einer vorgegebenen Blechkonstruktion zu bewerten. Dabei wirkt eine Belastung mit 50 mm/s, dies entspricht den Verhältnissen in einer Waschstraße, mit zunehmenden Kräften auf das Blech ein. Die Beultiefe wird bei jedem Belastungszuwachs gemessen. Der Test wird abgebrochen, wenn eine verbleibende Beultiefe von 0,1 mm erreicht ist.

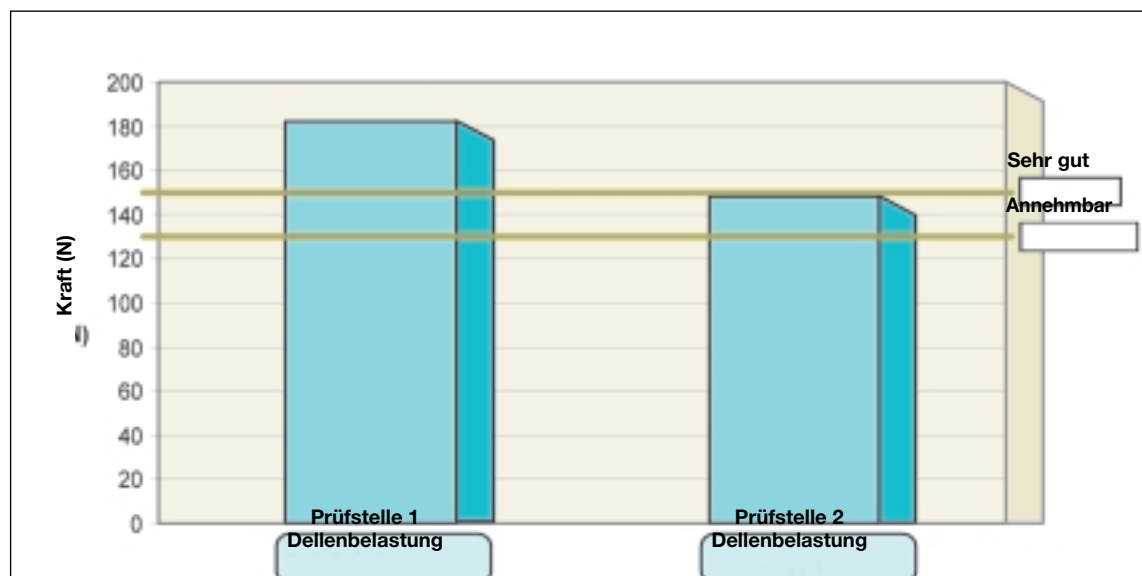


Bild 30 Ergebnisse: Quasi-statische Beulfestigkeit (Druckkraft bei 0,1 mm verbleibende Tiefe)

Dynamisch inkremental

Diese Prüfung ähnelt dem Aufprall, der durch einen rollenden Einkaufswagen oder durch das Zusammenstoßen von zwei sich gleichzeitig öffnenden Fahrzeugtüren verursacht wird. In diesem Fall wirkt die Prüflast mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 250 mm/s. Die Messung wird nach dem gleichen Verfahren wie bei dem quasi-statischen Test durchgeführt.

Dynamisch mit Hochgeschwindigkeit

Zwei Typen von dynamischen Tests werden eingesetzt, um die Beulfestigkeit bei Hochgeschwindigkeit aufprall zu messen. Test 1 stellt die Einwirkungskraft eines Steinschlags dar, während Test 2 die Einwirkungskraft eines Hagelkorns simuliert. Die Tests werden mit verschiedenen Einrichtungen an eingebauten Türen durchgeführt. Dabei kommen Testgeräte ähnlich einem Luftgewehr zum Einsatz, die eine Stahlkugel auf die Tür abschießen. Form und Tiefe der Dellen werden in Längs- und Querrichtung gemessen, um die Testergebnisse zu ermitteln.

Die Ergebnisse sind in den **Tafeln 6 und 7** sowie in **Bild 30** dargestellt.

Springbeulverhalten

Die ULSAC-Tür wird auch hinsichtlich ihres Springbeulverhaltens bewertet. Eine Springbeule ist die plötzliche Umkehr einer Krüm-

mung im Blechteil, die eventuell auch akustisch wahrnehmbar ist. Im Fachjargon wird auch von einem „Kuckuck“ bzw. „Frosch“ gesprochen. Der bei dieser Tür festgestellte Widerstand gegen Springbeulen erfüllt die heutigen Erwartungen. Die Tür weist eine leichte Springbeule in der mittleren Fläche auf. Mit kleineren konstruktiven Änderungen oder einer zusätzlichen Zierleiste wird sich die Springbeule beseitigen lassen.

Wie in Kapitel 6 beschrieben, haben die Materialexperten entschieden, den härtesten Stahl H260BD mit 0,7 mm Blechdicke für die Türaußenhaut einzusetzen. Mit ihm ist eine ausgezeichnete Beulfestigkeit bei geringer Materialdicke gegeben. Die Auswahl dieser Stahlqualität und Materialdicke erfolgte auf Basis der drei auf Beulfestigkeit getesteten Sorten in den zwei Dickenvarianten.

	Kritische Dellenbelastung bei 0,1 mm Dellentiefe	
Material	Prüfstelle 1 Belastung (N)	Prüfstelle 2 Belastung (N)
H260BD/0,7 mm	217	188

Tafel 6 Dynamische Beulfestigkeit

Testmerkmal	Test 1		Test 2	
Kugeldurchmesser/ -gewicht	6 mm/0,88 g		18 mm/23,8 g	
Kugelgeschwindigkeit	47,6m/s; 170 km/h		22,3 m/s; 80 km/h	
Kugelenergie	1 J		5,9 J	
Material	Prüfstelle 1 Tiefe (mm)	Prüfstelle 2 Tiefe (mm)	Prüfstelle 1 Tiefe (mm)	Prüfstelle 2 Tiefe (mm)
H260BD/0,7 mm	0,742	0,732	1,24	1,26

Tafel 7 Dynamischer Hochgeschwindigkeitstest

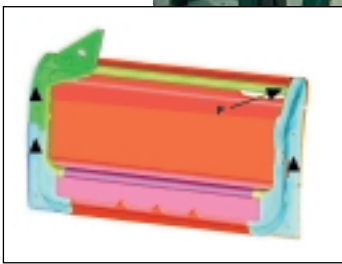


Bild 31 Aufbau:
Torsionstest oben

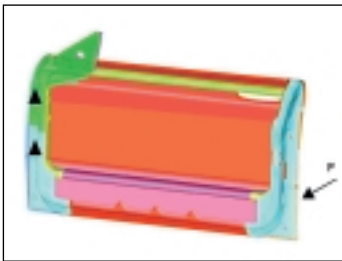


Bild 32 Aufbau:
Torsionstest unten

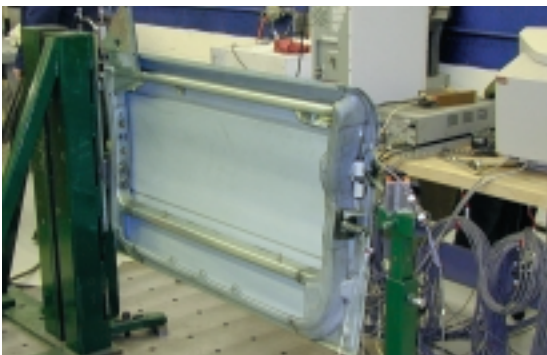
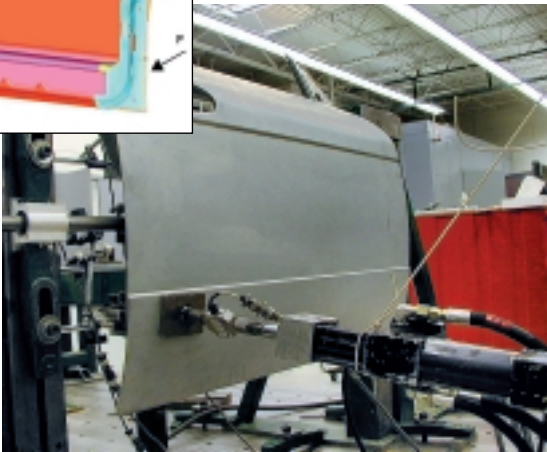


Bild 33 Testaufbau: Durchhängen der Tür

9.3 Torsionssteifigkeit

Um die Torsionssteifigkeit bei Belastung im oberen bzw. unteren Bereich zu testen, wird die Tür am Schloss und an den Scharnieren fixiert. Beim Test der oberen Torsionssteifigkeit wirkt die Kraft auf die obere hintere äußere Ecke und bei dem der unteren Torsionssteifigkeit entsprechend auf die untere hintere äußere Ecke ein. Die Durchbiegung wird mit einem Meßwertgeber gemessen (**Bilder 31 und 32**).

Die ULSAC-Tür erreicht im Vergleich mit den fensterrahmenlosen Türen des Benchmarking eine Torsionssteifigkeit entsprechend dem neuesten Stand der Technik (**Tafel 8**).

9.4 Türdurchhang

Um die ULSAC-Tür auf einseitiges Durchhängen zu prüfen, wird diese an den Scharnieren fixiert, um anschließend eine senkrechte Kraft am Schloss angreifen zu lassen. Das vertikale Durchhängen wird mit einem Messwertgeber registriert (**Bild 33**).

Im Vergleich mit den rahmenlosen Türen des Benchmarking weist die ULSAC-Tür hinsichtlich des vertikalen Durchhängens ähnlich gute Werte auf (**Tafel 9**).

	Tür A	Tür B	Tür C	ULSAC-Tür
Torsionssteifigkeit oben (Nm/Grad)	352	197	188	245
Torsionssteifigkeit unten (Nm/Grad)	467	309	188	250

Tafel 8 Obere und untere Torsionssteifigkeit

	Tür A	Tür B	Tür C	ULSAC-Tür
Ab-sackung (N/mm)	109	199	497	157

Tafel 9 Türdurchhang

9.5 Türeindrückung

Ob die leichtgewichtige rahmenlose ULSAC-Türstruktur ausreichenden Seitenaufprallschutz bieten kann, wird mit einem quasi-statischen Druckversuch ähnlich dem der amerikanischen Norm FMVSS 214 untersucht, bei dem eine Tür in einem kompletten Fahrzeug getestet wird. Da die Tür nicht zum Einbau in ein bestimmtes Fahrzeug vorgesehen ist, werden für diese Prüfung die fensterrahmenlosen Türen des Benchmarking herangezogen.

Um einen fairen Vergleich zu erhalten, sind diese Türen auf die gleiche Weise getestet worden wie die ULSAC-Tür. Die Türen der Vergleichsgruppe stammen aus Fahrzeugen, die zurzeit in den USA produziert werden. Deshalb ist davon auszugehen, dass sie die Norm FMVSS 214 erfüllen.

Testaufbau (Bild 34):

- Die Tür wird in einem Prüfstand mit einer vorderen Scharniersäule und einer B-Säule montiert. Sie ist an Scharnier und Schloß fixiert, kann sich aber in den Scharnieren drehen.



Bild 34 Testaufbau: quasi-statische seitliche Eindrückung

- Ein Zylinder fährt horizontal mit einer Geschwindigkeit von 127 mm/s und einem Weg von 457 mm in die Tür.
- Die Kräfte werden in Abhängigkeit von der Wegstrecke bis zum Erreichen der vorgegebenen Endposition aufgezeichnet.

Die Ergebnisse belegen, dass die ULSAC-Tür bei diesem Test ein besseres Verhalten als die im Vergleich stehenden Türen aufweist (**Bild 35**).

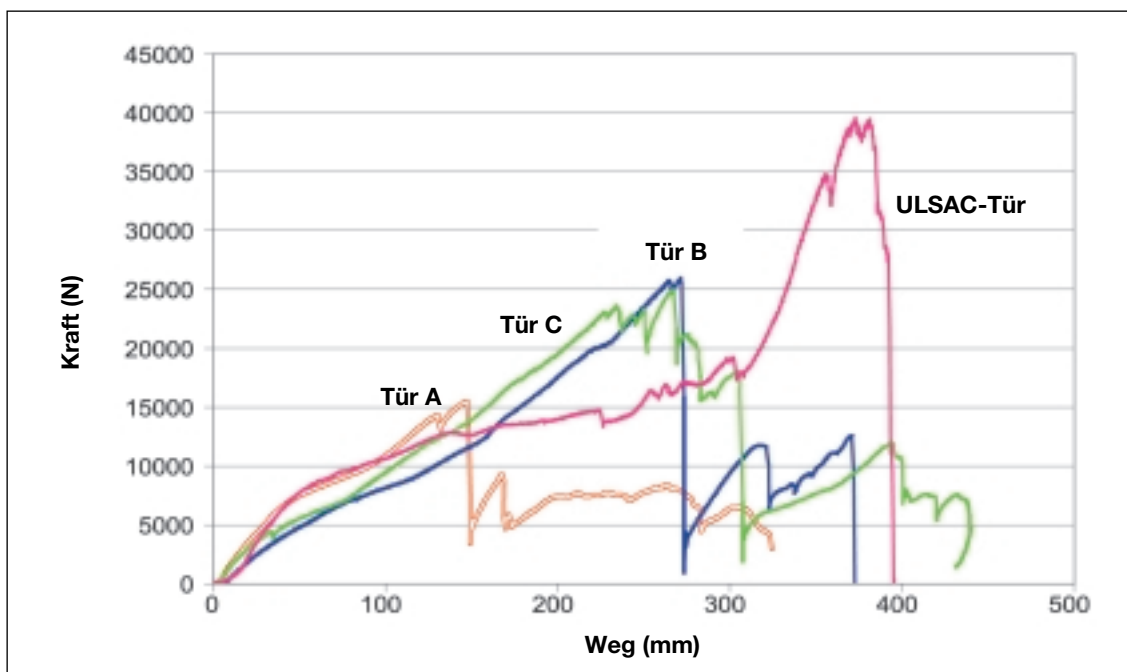


Bild 35 Seitliche Türeindrückung

10 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Eine wesentliche Rahmenbedingung des ULSAC-Projekts ist die kostenneutrale Herstellung der ultraleichten Stahltür. Zur Ermittlung der Herstellungskosten wird eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, an der sich Produktentwickler, Verfahreningenieure, Montagespezialisten und Kostenanalytiker in einem interaktiven Prozess beteiligen.

10.1 Entwicklung und Anwendung eines Kostenmodells

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird ein Kostenmodell verwendet, das eine Weiterentwicklung des Modells aus dem ULSAB-Programm darstellt.

Das Ziel bei der Entwicklung des Kostenmodells ist es, dem Anwender die Möglichkeit zu geben, das ULSAC-Modell zur individuellen Untersuchung verschiedener Produktionsszenarien zu nutzen und eigene bestehende oder zukünftige Türen mit der ULSAC-Türstruktur zu vergleichen. Daher ist das Kostenmodell so aufgebaut, dass der Anwender Produktionsfaktoren derart verändern kann, dass sie seine eigene spezifische Produktionsumgebung abbilden bzw. er charakteristische Faktoren für alternative Lösungen ändern kann. Da die im ULSAC-Modell aufgeführten Kosten jedoch nur die direkten Herstellungskosten widerspiegeln und sich auf den heutigen Stand der Technik beziehen, wird das Modell außerdem so erstellt, dass die Erweiterung um zusätzliche Kostenkategorien jederzeit möglich ist.

10.2 Überblick über die Analyse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse des ULSAC-Projektes basiert auf den in der Automobilindustrie üblichen Rahmenbedingungen für die Großserienproduktion. Dabei werden alle Aspekte von der Teileherstellung über die Montage bis hin zu den Investitionen für technische Ausrüstung und Werkzeuge berücksichtigt. Den so ermittelten allgemeinen Produktionskosten werden die detaillierten Produktionskosten der ULSAC-Türstruktur gegenübergestellt.

Bei der Teileherstellung wird jedes Pressteil und jedes per Innenhochdruck umgeformte Bauteil untersucht, um das Herstellverfahren festzulegen. Die Lieferanten der Teile erstellen einen Vorschlag für das Fertigungsverfahren und geben entsprechende Daten bekannt.

Parallel dazu werden die Teile analysiert, um auf einem zweiten Weg entsprechende fertigungstechnische Daten zu erhalten. Diese Daten und die Vorschläge der Lieferanten werden verglichen, damit die Verlässlichkeit des Herstellungsverfahrens abgesichert werden kann. Anschließend sind die in der Kostenanalyse verwendeten Daten definiert worden. Bei extrem kleinen Teilen, die keinen aufwendigen Herstellungsprozess erfordern, wird davon ausgegangen, dass diese zugekauft werden. Für die Planung der Montage und der Teileherstellung erhalten die Lieferanten eine detaillierte Aufstellung der Materialien und der Bearbeitungsfolge. Daraus wird der Türmontagebereich in Makroansicht entwickelt. Hieraus können die zur Erfüllung der Produktionsanforderungen nötigen Einzelheiten genau festgelegt werden, wie z. B. Anlagenausführung, bauliche Voraussetzungen, Werkzeuge und Arbeitskräfte. Nach der Bewertung der Daten werden diese in das Kostenmodell für die endgültige Kostenschätzung integriert.

	ULSAC- Türenpaar (rechts + links)	Vergleichs- türenpaar (rechts + links)
Teileherstellung	\$ 79	\$ 91
Material	\$ 28	\$ 48
Umformen	\$ 15	\$ 16
Tailored Blank-Umformen	\$ 12	\$ 20
Innenhochdruck- umgeformte Rohre	\$ 15	\$ 0
Zukaufteile	\$ 9	\$ 7
Zusammenbau	\$ 54	\$ 47
Gesamtkosten	\$133	\$138

Tafel 10 Wirtschaftlichkeitsanalyse: Kostenvergleich in US \$

Nachdem die Kosten der ULSAC-Türstruktur anhand dieses Modells bestimmt sind, werden mit einer Varianzanalyse unter Berücksichtigung der verschiedenen Kostenarten, wie Löhne, Produktionslaufzeit, Lebensdauer der Anlagen, Zinsen, nicht eingeplante Maschinenausfallzeiten und Materialkosten, die Kostenveränderungen untersucht. Unter Berücksichtigung der Basisdaten aus dem Benchmarking von drei dem Stand der Technik entsprechenden Türen wird eine Vergleichstür entwickelt. Die dafür anschließend ermittelten Kosten können mit denen der ULSAC-Türstruktur verglichen werden.

10.3 Ergebnisse der Analyse

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse für konventionelle Türen und die leichte ULSAC-Türstruktur belegen, dass bei gleichen Produktionsvolumina (225.000 Türsätze pro Jahr) keine Mehrkosten entstehen (**Tafel 10**).

11 Weitere Schritte

Schon während der Konstruktion und Entwicklung der fensterrahmenlosen Tür ist eine weitere Gewichtsreduktion durch eine geringere Blechdicke der Türaußenhaut aus Stahl diskutiert worden. Als Produktionsverfahren käme das aktive hydromechanische Umformen in Betracht. Mit diesem Verfahren könnte durch eine zusätzliche Streckung im Mittelteil des Bleches das Beulverhalten verbessert werden.

Zurzeit wird bei keinem Fahrzeug die Türaußenhaut mit diesem Verfahren hergestellt. Daher können bisher die theoretischen Vorteile des Verfahrens in der Praxis noch nicht nachgewiesen werden. Die ULSAC-Umsetzungsphase wird mit der Entwicklung einer hydroumgeformten Türaußenhaut weiter fortgesetzt.

Der Einsatz des aktiven Hydro-Mech-Umformens für Bleche wird durch Begrenzung der Zuhaltekräfte der Pressen eingeschränkt. Dadurch können derzeit die kleinen Radien der ULSAB-Tür und andere besondere Linienführungen nicht optimal verwirklicht werden. Hier sind die Pressenhersteller gefordert, da derartige Details auch heute schon zur Produktion von Serientüren gehören. Die bisher durchgeführten Versuche mit bestehenden Komponenten und Werkzeugdimensionierungen haben hierbei Herstellungsprobleme aufgezeigt. Eine Optimierung der Werkzeuge und der Pressen ist erforderlich.

Zurzeit werden u. a. schon folgende Schritte unternommen, um eine hydroumgeformte Türaußenhaut produzieren zu können:

- FEM-Simulationen zur weiteren Werkzeugpräzisierung
- Anpassung der Werkzeugsysteme und des Pressvorgangs

Mitglieder des ULSAC-Konsortiums

ACERALIA Corporación Siderúgica, S.A., Spanien
AK Steel Corporation, USA
Bethlehem Steel Corporation, USA
BHP Steel, Australien
China Steel Corporation, Taiwan
USINOR/Cockerill, Belgien
Corus Group, Niederlande
Corus Group, Großbritannien
Dofasco Inc., Kanada
Ispat Inland, Inc., USA
Kawasaki Steel Corporation, Japan
Kobe Steel, Ltd., Japan
LTV Steel Company, Inc., USA
National Steel Corporation, USA
Nippon Steel Corporation, Japan
NKK Corporation, Japan
Pohang Iron and Steel Co., Ltd. (POSCO), Südkorea
Rautaruukki Oyj, Finnland
Rouge Steel Company, USA
Salzgitter AG Stahl und Technologie, Deutschland
SIDERAR S.A.I.C., Argentinien
Sidmar NV, Belgien
Stelco Inc., Kanada
The Tata Iron and Steel Company, Ltd. (TISCO), Indien
Thyssen Krupp Stahl AG, Deutschland
USINOR Group, Frankreich
U.S. Steel Group (USX Corporation), USA
VOEST-ALPINE STAHL LINZ GmbH, Österreich
WCI Steel, Inc., USA
Weirton Steel Corporation, USA

Impressum

„Ultraleichte Automobil-Anbauteile aus Stahl“
Übersetzung des ULSAC Overview Report

1. Auflage 2000, ISSN 0175-2006

Bearbeitung:

Stahl-Informations-Zentrum

Postfach 10 48 42

40039 Düsseldorf

Salzgitter AG
Stahl und Technologie
Eisenhüttenstraße 99 · D-38223 Salzgitter
Tel.: +49 (0)53 41-21-34 66
Fax: +49 (0)53 41-21-38 16

Thyssen Krupp Stahl AG
Kaiser-Wilhelm-Straße 100 · D-47166 Duisburg
Tel.: +49 (0)2 03-52-4 41 30
Fax: +49 (0)2 03-52-2 53 20

VOEST-ALPINE STAHL LINZ GmbH
VOEST-ALPINE-Straße 3 · A-4020 Linz
Postfach 3 · A-4031 Linz
Tel.: +43-732-65 85-92 61
+43-732-65 85-42 17
Fax: +43-732-69 80-98 14