

# Einsatz höherfester Stähle im Automobilbau

*Dr.-Ing. Johannes Staevens, Dr.-Ing. Markus Pfestorff, München*

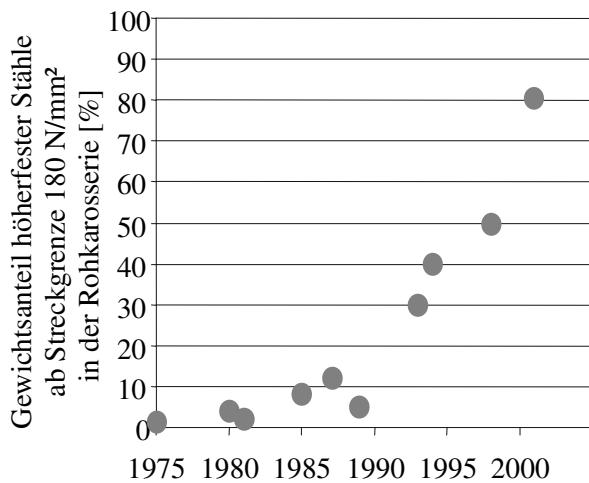
*Höherfeste Stähle stehen zunehmend im Wettbewerb mit anderen Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium und Kunststoff. Neue Stähle mit verbesselter Umformbarkeit und höherer Festigkeit erschließen Potenziale zur Gewichtsreduzierung. Die Beherrschung der Vielfalt von Stählen im komplexen Umfeld der Fahrzeugentwicklung und -fertigung wird zur Herausforderung.*

## **Use of high strength steels in the automotive industry**

*High strength steels have to continuously compete with other light-weight materials such as aluminium and plastics. New steels with increased formability and higher strength offer new potential for weight reduction. The challenge lies within mastering the diverse range of steels in the complex field of vehicle development and production.*

## **Einleitung**

Der Anteil höherfester Stähle in Automobilkarosserien hat in den letzten drei Jahrzehnten stark zugenommen (Bild 1).



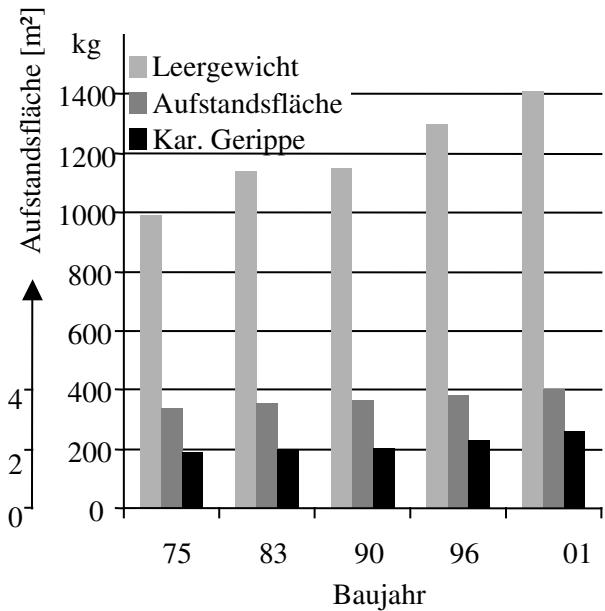
**Bild 1:** Entwicklung des Anteils höherfester Stähle in der Rohkarosserie von BMW Fahrzeugen

Treiber für die Entwicklung war die Forderung nach mehr Sicherheit bei gleichzeitig geringem Gewicht und niedrigen Kosten.

Die Verringerung des Fahrzeuggewichts trägt zum einen zur Senkung des Schadstoffausstoßes und zum anderen zur Erhöhung der Fahrdynamik bei. Die Reduzierung der Blechdicke führt über die Reduzierung des Materialeinsatzes, zur Ressourcenschonung und wirkt sich in vielen Fällen trotz höherer Materialkosten für höherfeste Stähle nicht negativ auf die Gesamtkosten aus.

## **1 Gewichtsentwicklung des Karosseriegerippes**

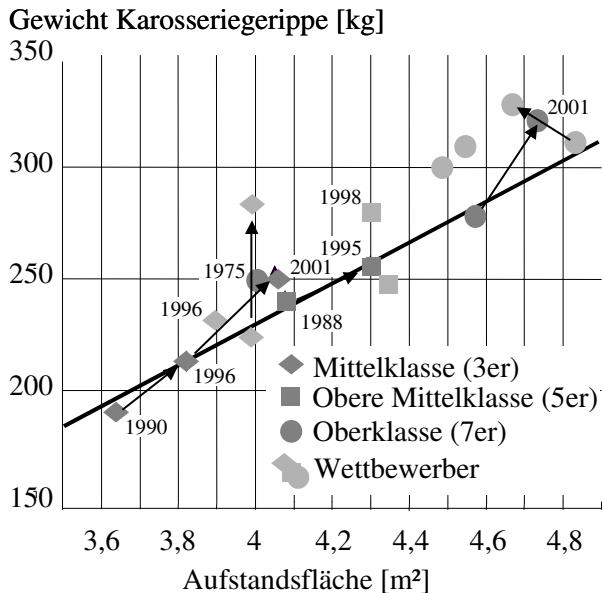
Trotz aller gewichtssenkenden Maßnahmen steigt das Fahrzeuggewicht bei allen Automobilherstellern an. Bild 2 zeigt die Gewichtsentwicklung am Beispiel der BMW 3er Reihe.



**Bild 2:** Gewichtsentwicklung BMW 3er Reihe [1]

Ein Grund für den Anstieg des Gesamtgewichts ist, wie in Tabelle 1 noch gezeigt wird, in der zunehmenden Ausstattung der Fahrzeuge begründet. Aber auch die Fahrzeuggröße und damit das Gewicht der Rohkarosserie steigt an, um der zunehmenden Körpergröße und den Komfortansprüchen gerecht zu werden. Als Maß für die Fahrzeuggröße wird hier die Aufstandsfläche (Radstand x Spurweite) verwendet. Sie ist für das Gewicht aussagekräftiger als Kenngrößen auf Basis der Gesamtfahrzeuglänge, da die Überhänge

nur wenig zum Gesamtgewicht beitragen. Aber auch das Größenwachstum reicht nicht aus, um den Gewichtsanstieg der Rohkarosserie allein zu erklären. Bild 3 zeigt, dass der aktuelle BMW 3er etwa die gleiche Aufstandsfläche und das gleiche Karosseriegewicht wie der BMW 5er von 1987 und der BMW 3,0Si von 1975 (damals Oberklasse) aufweist.



**Bild 3:** Entwicklung von Aufstandsfläche und Karosseriegewicht [1]

Der BMW 3,0Si war seinerzeit ein Oberklassefahrzeug. Hat man demnach in Sachen Leichtbau nichts dazugelernt?

Die Antwort ergibt sich aus dem Vergleich des BMW 3,0Si von 1975 mit dem aktuellen 330i. (Bild 4 und Tabelle 1 Tab. 1)

Die Gesamtfahrzeulgänge des BMW 3,0Si ist um 230 mm größer, weshalb er um etwa 10 kg schwerer sein müsste als der BMW 3,0Si. Die Aufstandsfläche des 330i ist aber größer, was ein um 5 kg höheres Gewicht des 330i begründen würde. Die Steifigkeit der Karosserie wurde nahezu verdoppelt und geht mit ca. 35 kg in die Rechnung ein.

Türverstärkungen, verstärkte Schlosser und Sitzgestelle machen etwa 11 kg Mehrgewicht aus [1]. Der wahrscheinlich größte Faktor, die erhöhte Crashsicherheit, ist nicht eindeutig zu bewerten und deshalb in dieser Rechnung nicht berücksichtigt.



**Bild 4:** BMW 3,0Si von 1975 (oben) und BMW 330i von 2001 (unten)

	3,0 Si Bj. 1975	$\Delta$ Gew. [kg]	330i Bj. 2001
Fahrzeulgänge [m]	4,70	-10	4,47
Innenraumlänge [m]	≈1810		1883
Aufstandsfläche [ $m^2$ ]	3,99	5	4,05
Gewicht [kg]	1440		1430
Gerippegewicht [kg]	250		260
Beschl. 0 auf 100 [sec]	8,5		6,5
Torsionssteifigkeit [Nm/ $^\circ$ ]	≈9000	35	17500

Gewichtszunahme durch Mehrausstattung des BMW 330i:

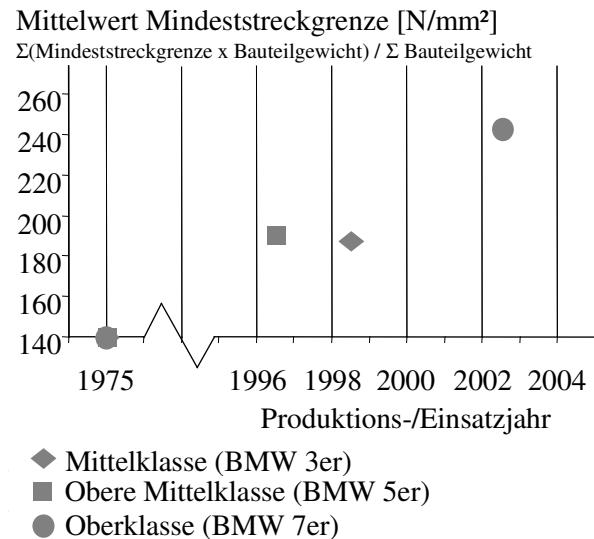
Klima/Heiz. El. (25), Kopfst. Gurtsyst. (6), 5 Ganggetr. (5), el. Fensterheber (4), Türverstärkung (6), Abgasreinigung (8), 6 Airbags (6), ABS, ASR (5), Revers. Stoßfänger (10), 2. Spiegel (2)

**Tab. 1:** Vergleich von BMW 3,0Si und BMW 330i [1]

Diese Faktoren zusammengefasst müsste die Karosserie (Gerippegewicht) des 330i um 41kg schwerer sein als die des BMW 3,0Si, tatsächlich sind es aber nur 10 kg. Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von deutlich über 31 kg oder 12%, die über konstruktive Maßnahmen und Re-

duzierung der Blechdicke durch höherfeste Stähle erreicht worden sind.

Diese Entwicklung setzt sich weiter fort. Bild 5 zeigt, dass die über die Rohkarosserie gemittelte Mindeststreckgrenze der Stähle mit dem aktuellen BMW 3er und BMW 5er von 140 auf ca. 190 N/mm<sup>2</sup> gesteigert wurde. Der aktuelle BMW 7er erreicht schon 243 N/mm<sup>2</sup>.

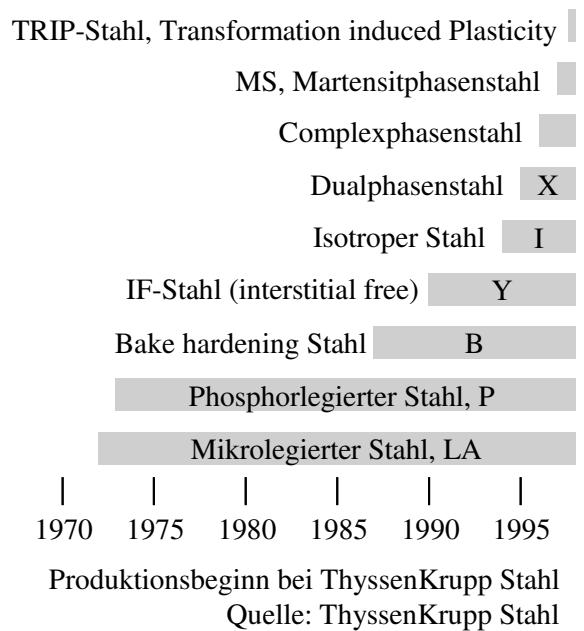


**Bild 5:** Entwicklung der durchschnittlichen Mindeststreckgrenze der Stähle in der Rohkarosserie

## 2 Entwicklung der Stahlwerkstoffe

Zur Reduzierung des Karosseriegewichts und wegen des Wettbewerbs mit Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium, Magnesium und Kunststoff wurden in den letzten Jahren neue Stahlsorten entwickelt. 50% der heute verfügbaren Sorten wurden in den letzten 5 Jahren entwickelt oder zumindest optimiert [2].

Bei den bisher üblichen kaltgewalzten Stählen reicht das Festigkeitsspektrum von speziellen Tiefziehsorten wie DX56 oder DC06 mit einer Mindestfestigkeit von 120 N/mm<sup>2</sup> bis zu mikrolegierten Sorten mit 420 N/mm<sup>2</sup>. Warmgewalzte Stähle erreichen heute schon Zugfestigkeiten von über 1200 N/mm<sup>2</sup>, kaltgewalzte Stähle gleicher Festigkeit sind in Entwicklung. In den meisten Festigkeitsklassen stehen unterschiedliche Stahlsorten mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Verfügung.



**Bild 6:** Entwicklung neuer Stahlsorten

## 3 Bezeichnung und Klassifizierung der Stähle

Der Einstieg in das Thema höherfeste Stähle wird erschwert, weil unterschiedliche Hersteller für gleiche Werkstoffe unterschiedliche Bezeichnungen verwenden, aber auch unterschiedliche Konzepte für gleich bezeichnete Werkstoffe.

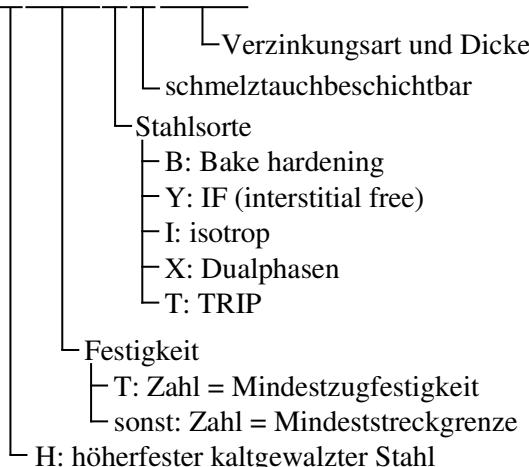
In Tabelle 2 sind exemplarisch in diesem Beitrag verwendete Bezeichnungen anderen ebenfalls üblichen Bezeichnungen gegenübergestellt.

Sorte	Beispiel für Bezeichnung in diesem Beitrag	Andere übliche Bezeichnungen
IF-Stahl (interstitial free)	H220Y	ZStE220, H220IF,
Bake hardening Stahl	H300B	ZStE300, ZStE300BH
Isotroper Stahl	H300I	ZstE300i, HSZ300
Dualphasenstahl, DP-Stahl	H300X	DP600, DP-K30/60
Mikrolegierter Stahl	H380LA, H420LA	ZStE380, ZStE420
TRIP-Stahl	H400T	HT700T, TRIP700
Complexphasen	CP-W 800	
Martensitphasen	MS-W 1200	
Warmumformbare Borstähle	BTR165 Usibor1500	

**Tab. 2:** Unterschiedliche Bezeichnungen von Werkstoffsorten

In der internationalen Normung zeichnet sich ab, dass das in Bild 7 dargestellte System für die Bezeichnung der meisten Stähle Anwendung finden könnte. Dieses Bezeichnungssystem ist ein Weg, unnötige Verwirrung zu vermeiden, und wird deshalb in der BMW Group bereits angewendet.

### HT700TD+Z100



**Bild 7:** Bezeichnungssystem höherfester Stähle

Festigkeitsklassen und Stahlsorten bilden insbesondere bei Berücksichtigung unterschiedlicher Beschichtungsverfahren ein komplexes System von Stählen mit unterschiedlichen Eigenschaften.

Tabelle 3 ist ein Ansatz, Struktur in die Vielfalt der Stahlwerkstoffe zu bringen und sie zu klassifizieren. Oft werden Stähle wie DP600 nach der maximalen Festigkeit, der Zugfestigkeit, bezeichnet. Um bei der Bauteilauslegung auf der siche-

ren Seite zu sein, muss aber der worst case, also die minimale Streckgrenze herangezogen werden. Für die Bezeichnung der Werkstoffe in der BMW Group und als erstes Ordnungskriterium in Tabelle 3 wird deshalb die Mindeststreckgrenze verwendet. In einer Festigkeitsklasse stehen mehrere Werkstoffsorten zur Verfügung. In welchen Fällen welche Sorte Vorteile bringt, muss für jedes Bauteil je nach Geometrie und Funktionsanforderung einzeln entschieden werden. Kriterien dafür sind zusätzliche Festigkeit durch bake hardening und Kaltverfestigung, Eignung für Tief- oder Streckziehen und nicht zuletzt die Materialkosten.

Im Folgenden soll anhand von Bauteilbeispielen detaillierter aufgezeigt werden, welche Gründe für den Einsatz der in Tabelle 3 enthaltenen Sorten ausschlaggebend sein können und mit welchen Nachteilen zu rechnen ist, wenn einzelne dieser Sorten entfallen sollten.

### 4 Höherfeste Stähle in der Außenhaut

Beulfestigkeit und Beulsteifigkeit sind Kriterien, nach denen Werkstoffe und Blechdicken in der Außenhaut auszulegen sind. Die Festigkeit des Werkstoffes hat, abgesehen von sekundären Einflüssen über Eigenspannungen im Bauteil, keine Auswirkung auf die Beulsteifigkeit.

Die Beulfestigkeit kann über die Werkstofffestigkeit erhöht werden. Um eine Reduzierung der Blechdicke zu erreichen, muss die Festigkeit aber überproportional angehoben werden, da die Festigkeit linear, die Blechdicke aber quadratisch bis

	Referenz für Tiefziehen	Zusätzliche Festigkeit durch Bake Hardening bei geringer Umformung	Hohe Kaltverfestigung und bake hardening bei großer Umformung	Streckziehen	Verbesserte Umformbarkeit bei höheren Materialkosten	Deutlich bessere Umformbarkeit bei deutlich höheren Kosten
120	DC06, DX56				DC07, DX57	
140	DC04, DX54					
160	H160Y	H160B				
180	H180Y	H180B				
220	H220Y	H220B		H220I		
260	H260Y	H260B	H270X	H260I		
300		H300B	H300X	H300I		Edelstahl
340	H340LA		H340X			Edelstahl
380	H380LA					Edelstahl
420	H420LA		H400T	H400T		Edelstahl
500	H500X					
700	CP-W 800					
1000	MS-W 1200					Usibor, BTR165

**Tab. 3:** Klassifizierung der Stahlsorten nach Festigkeit und anderen relevanten Eigenschaften

kubisch in die Beulfestigkeit einfließt. Das Potenzial höherfester Stähle in der Außenhaut ist deshalb geringer als bei Strukturteilen, in vielen Fällen aber trotzdem lohnend.

Bake Hardening Stähle haben sich in vielen Bereichen der Außenhaut durchgesetzt, da sie im weichen Zustand gut umformbar sind und im durch die Erwärmung im Lackprozess eine zusätzliche Festigkeitssteigerung erfahren. Bake hardening Stähle zeichnen sich dadurch aus, dass der bake hardening Effekt gerade in gering umgeformten Bereichen relativ groß ist, so dass er bei der Türaußenhaut voll zum Tragen kommt.

Beispiele sind die Türaußenhäute des BMW 3er.

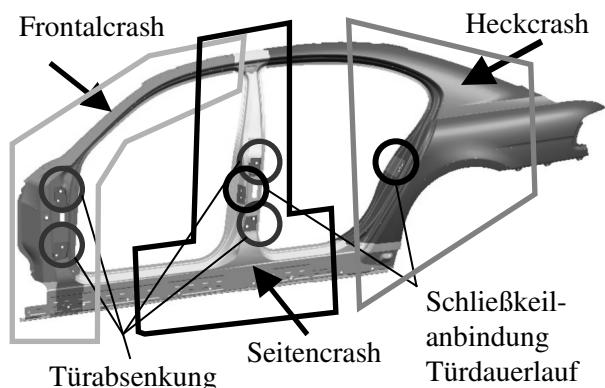
Die Kaltverfestigung von IF-Stählen und isotropen Stählen ist größer als die von bake hardening Stählen. Bei stärker umgeformten Bauteilen kann die Kaltverfestigung dieser Stähle alleine größer sein, als die Kaltverfestigung plus Festigkeitssteigerung durch Wärmebehandlung bei bake hardening Stählen. In diesen Fällen bieten sich isotrope Stähle für Bauteile mit Streckziehbeanspruchung und IF-Stähle für Bauteile mit Tiefziehbeanspruchung an.

Für die überwiegend durch Streckziehen hergestellte Frontklappe des BMW 3er wird deshalb ein isotroper Stahl verwendet.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass bei Strukturteilen im Fahrzeuginnern, insbesondere in Bereichen von Blechdopplungen und Knotenpunkten die für entsprechende bake hardening Effekte erforderlichen Temperatur- Zeitverläufe in den Trocknerprozessen nicht immer erreicht werden. Die Festigkeitssteigerung durch bake hardening ist in diesen Bereichen deshalb häufig gegenüber der Kaltverfestigung bei der Umformung gering.

Dualphasenstähle sind ab Festigkeiten von 270 N/mm<sup>2</sup> verfügbar. Für die Außenhaut können Bleche dieser Festigkeit nur eingesetzt werden, wenn das Design nur geringe Anforderungen an die Umformtechnik stellt. Um das Potenzial der DP-Stähle voll auszuschöpfen, muss die Umformung aber so groß wie möglich sein. DP-Stähle weisen einen bake hardening Effekt auf. Im Gegensatz zu den bisherigen bake hardening Stählen ist die Verfestigung bei geringer Bauteildehnung aber gering und nimmt erst mit zunehmender Dehnung zu. Bei geringer Umformung kann deshalb ein bake hardening Stahl gleicher Ausgangsfestigkeit zu höherer Beulfestigkeit führen.

Im folgenden soll die bauteilspezifische Werkstoffauswahl am Beispiel des Seitenrahmens außen des BMW 7er aufgezeigt werden. Dieses Bauteil ist eines der komplexesten Karosserieteile, da im selben Bauteil hohe Ziehtiefen (Türauschnitte) und Außenhautqualität erreicht werden müssen. Bisher konnten dafür nur weiche Tiefziehsorten DC04 oder DX54 verwendet werden, in einigen Fällen waren sogar Sondertiefziehsorten DC06, DX56, DC07 oder DX57 erforderlich. Bild 8 zeigt, dass der Seitenrahmen bei Frontalcrash, Seitencrash und Heckcrash beansprucht wird.



**Bild 8:** Im Crash beanspruchte Bereiche des Seitenrahmens außen [3]

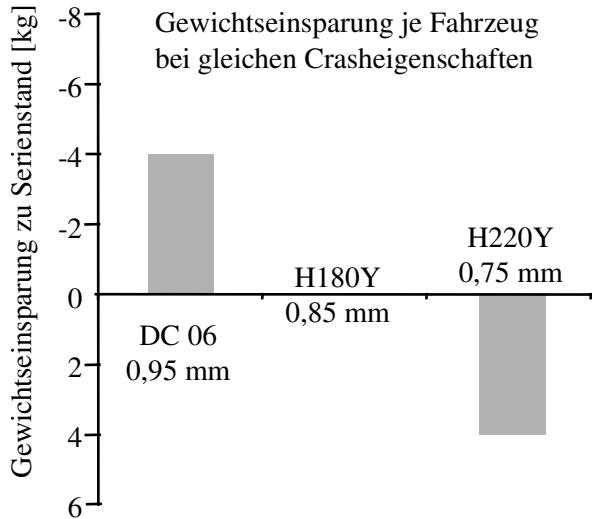
Durch höhere Festigkeit lässt sich die Blechdicke bei gleicher Crashperformance reduzieren und Gewicht sparen.

Beim BMW 3er Compact wurde erstmals eine 160er Sorte verwendet. Diese Sorten sind zwar Zwischensorten, die nur von einigen Stahlherstellern angeboten werden und die Werkstoffvielfalt erhöhen, ohne diese Sorten wäre aber die Gewichtseinsparung nicht möglich gewesen.

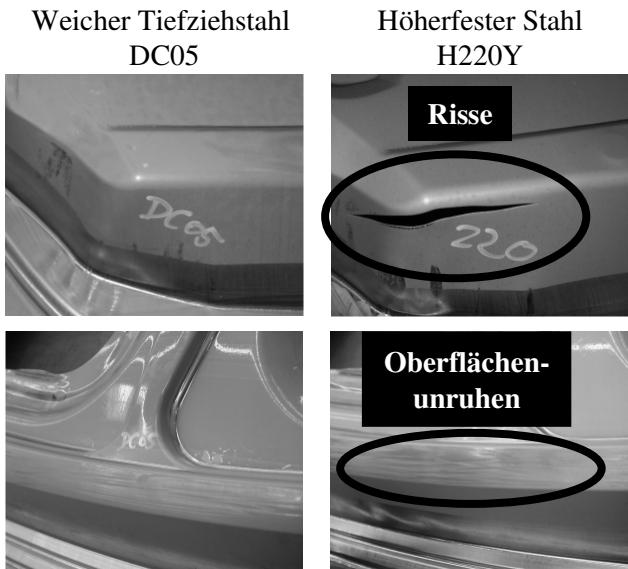
Beim BMW 7er wurde mit einem H180Y erstmals in der BMW Group ein höherfester Stahl für einen Seitenrahmen eingesetzt. Die Blechdicke konnte bei vergleichbarer Crashperformance gegenüber einem weichen Stahl um 0,1 mm reduziert werden was einer Gewichtseinsparung von 4 kg pro Fahrzeug entspricht (Bild 9).

Die Einsparung weiterer 4 kg durch Einsatz eines H220Y war nicht möglich, da mit diesem Werkstoff, wie Bild 10 zeigt, die Grenzen der Umformbarkeit überschritten sind. Auch der Einsatz eines H180B ist nicht möglich. Dieser hätte in weniger stark umgeformten Bereichen, insbesondere im Außenhautbereich, zwar zu einer zusätzlichen Festigkeitssteigerung durch bake hardening geführt, die Tiefziehbeanspruchung in diesem Bauteil ist aber so hoch, dass für eine prozesssi-

chere Fertigung der für Tiefziehen optimierte IF-Stahl H180Y erforderlich ist.

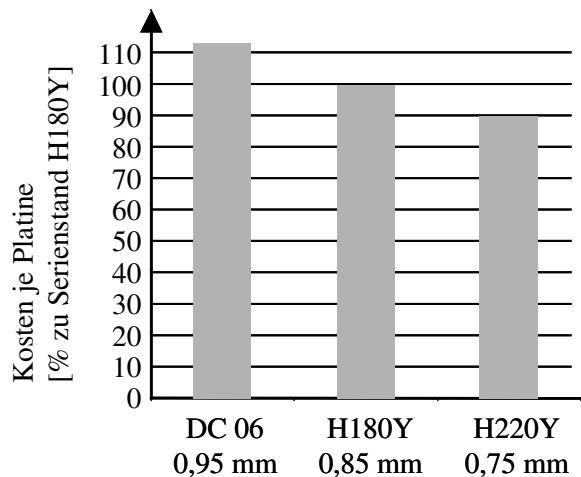


**Bild 9:** Gewichtseinsparung in Seitenrahmen außen des BMW 7er durch Blechdickenreduzierung



**Bild 10:** Ziehkritische Bereiche in Seitenrahmen außen

Neben der Gewichtseinsparung ermöglicht die Reduzierung der Blechdicke auch die Senkung der Materialkosten. Da sich die untersuchten Werkstoffe im Preis pro Gewicht kaum unterscheiden, geht die Dickenreduzierung direkt in die Materialkosten ein (Bild 11).



**Bild 11:** Materialkosteneinsparung beim Seitenrahmen außen des BMW 7er durch höherfeste Stahl

## 5 Höherfeste Stähle in der Karosseriestruktur

In der Karosseriestruktur ist der Einsatz höherfester Stähle noch effizienter als in der Außenhaut. Die Bauteilgeometrie kann hier nach Funktion und Umformbarkeit ausgelegt werden, ohne durch das Design weiter eingeschränkt zu sein. Bei den für Strukturteilen typischen Beanspruchungen hat die Blechdicke meist einen geringeren Einfluss als bei auf Beulen beanspruchten Außenhautteilen, weshalb durch Festigkeitssteigerung die Blechdicke deutlicher reduziert werden kann.

### 5.1 Festigkeitsklasse 340-380 N/mm<sup>2</sup>

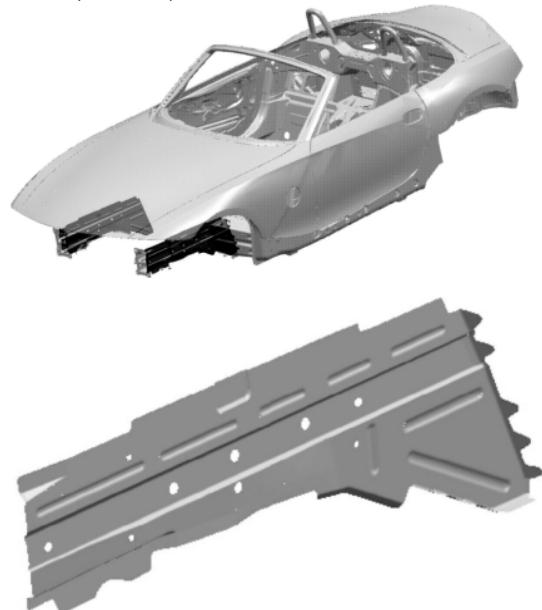
In der Festigkeitsklasse 340-380 N/mm<sup>2</sup> werden mikrolegierte Stähle und Dualphasenstähle angeboten. Im Vergleich zu den konventionellen mikrolegierten Stählen H340LA und H380LA verfestigt der neuere Dualphasenstahl H340X mit zunehmender Umformung oder Deformation im Crash stärker. Die Zugfestigkeit des H340X liegt mit 600 N/mm<sup>2</sup> deutlich über der des H380LA mit 560 N/mm<sup>2</sup>.

Für Strukturteile wie Säulenverstärkungen, Schweller und Querträger, die eine hohe Anfangsfestigkeit benötigen, um bleibende plastische Deformationen zu vermeiden, kann es sinnvoll sein, den H380LA zu verwenden, da er eine höhere Mindeststreckgrenze garantiert.

Die Motorräger der BMW 3er Reihe werden aus dem mikrolegierten Stahl H380LA gefertigt. Eine weitere Steigerung der Festigkeit ist nicht ohne weiteres möglich, da die Motorräger im Fall eines Frontalcrashes kontrolliert nachgeben sollen. Zu hohe Festigkeiten würden in der Anfangsphase eines Frontalaufpralls nach dem Stauchen der

Deformationselemente zu hohe Kräfte in die Fahrzeugstruktur leiten und die Stirnwandintrusion erhöhen. Die Reduzierung der Bauteildicke ist in diesen Fällen meist nicht möglich, da Steifigkeitsanforderungen und Befestigungselemente für den Motor eine Mindestblechdicke erfordern. Darüber hinaus sind Bauteile mit entsprechend hohen Festigkeiten nur noch bedingt umformbar und im Crashfall droht Bauteilversagen durch Risse, was unbedingt zu vermeiden ist.

Im BMW Z4 wurde mit einem H340X ein neuerer Dualphasenstahl für den Motorträger außen verwendet (Bild 12).



**Bild 12:** Dualphasenstahl im Motorträger außen beim BMW Z4

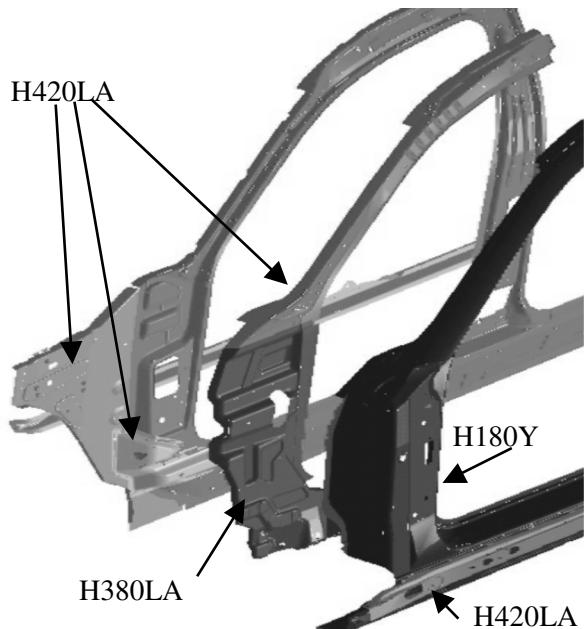
Da das Bauteil nur wenig umgeformt wird, ist die Anfangsfestigkeit und damit die Startbelastung im Crash geringer als bei Verwendung eines mikrolegierten H380LA. Mit zunehmender Deformation im Crash verfestigt der H340X aber stärker und ermöglicht trotz geringer Startbelastung im Crash eine hohe Energieaufnahme.

## 5.2 Festigkeitsklasse 400 N/mm<sup>2</sup>

Dualphasenstähle ab 400 N/mm<sup>2</sup> werden zur Zeit noch nicht in größerem Umfang angeboten. Mikrolegierte Stähle H420LA und die neueren TRIP-Stähle H400T (TRIP700) sind deshalb die höchsten Festigkeiten, die für kaltgewalzte Bleche zur Verfügung stehen. Ähnlich wie die Dualphasenstähle verfestigen auch die TRIP-Stähle stärker als die mikrolegierten H420LA. Zusätzlich wird die Umformbarkeit des H400T durch die Phasenumwandlung von Restaustenit in Martensit erhöht.

Die höheren Materialkosten für TRIP-Stahl rechtfertigen den Einsatz dann, wenn die bessere Umformbarkeit zur Herstellung des Bauteils erforderlich ist, oder wenn die höhere Verfestigung und Energieaufnahme benötigt wird.

Noch bessere Umformbarkeit bei Streckgrenzen um 400 N/mm<sup>2</sup> bieten höherfeste austenitische Stähle (Edelstähle). Die technischen Herausforderungen bei der Verarbeitung sind beherrschbar, aber der Materialpreis der Edelstähle liegt um den Faktor 2,5-4 über dem der konventionellen Stähle. Sie werden in der Karosseriestruktur deshalb bisher nicht in nennenswertem Umfang eingesetzt.

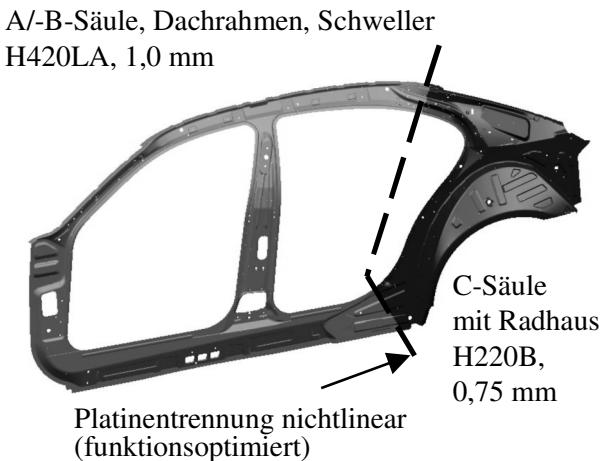


**Bild 13:** Aufbau des Seitenrahmens des BMW 7er im Bereich der A-Säule [3]

Bild 13 zeigt den Aufbau des BMW 7er Seitenrahmens im Bereich der A-Säule. Die A-Säule soll so schmal wie möglich ausgeführt werden, um das Sichtfeld des Fahrers nicht unnötig zu begrenzen. Gleichzeitig muss die A-Säule beim Frontalcrash hohe Kräfte weiterleiten können. Hier wurde deshalb die höchstmögliche Mindeststreckgrenze verwendet und die Bauteile sind so ausgelegt, dass sie umformtechnisch in mikrolegiertem H420LA herstellbar sind. Die hohe Umformbarkeit und die Energieaufnahme eines TRIP-Stahls werden hier nicht benötigt.

Der Seitenrahmen innen erfordert im Bereich der C-Säule und am Radhaus einen besser umformbaren Stahl und nicht die hohe Festigkeit. Um dieses Bauteil nicht teilen zu müssen und in der A- und B-Säule sowie im Dachrahmen trotzdem die Fes-

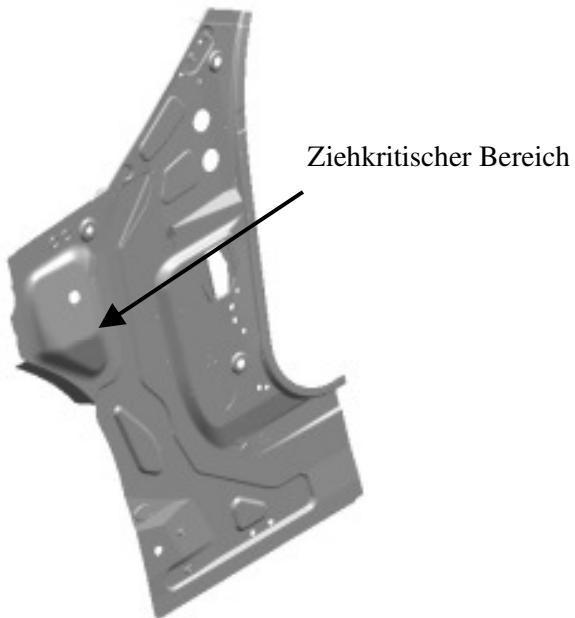
tigkeit des H420LA zu erreichen, wird eine lasergeschweißte Platine eingesetzt (Bild 14).



**Bild 14:** Laserplatine im BMW 7er [3]

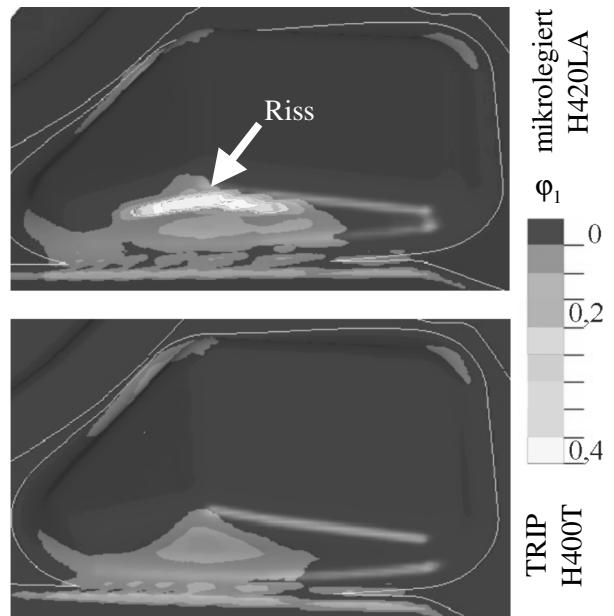
Festigkeit und Blechdicke sind den lokalen Anforderungen angepasst.

Falls in einem stärker umzuformenden Bereich gleichzeitig eine hohe Festigkeit gefordert wird, bleiben nur teurere Lösungen. Ein Beispiel dafür ist in Bild 15 dargestellt.



**Bild 15:** A-Säule innen aus TRIP-Stahl H400T (TRIP700)

Aus H420LA erfüllt diese Verstärkung A-Säule innen die Crashanforderungen bei einer Blechdicke von 1,0 mm. Wie das Ergebnis der Umformsimulation in Bild 16 zeigt ist das Bauteil in diesem Werkstoff aber nicht herstellbar.



**Bild 16:** Vergleich der Umformsimulation mit mikroleiertem Stahl und TRIP-Stahl

Für diesen Anwendungsfall ist der TRIP-Stahl H400T eine Alternative. Er verfestigt an der kritischen Stelle so weit, dass die weitere Umformung erschwert wird, und Material aus den angrenzenden noch weicheren Bereichen zum Fließen gebracht wird. Die Umformung verteilt sich damit gleichmäßiger auf das Bauteil.

Aus TRIP ist die Verstärkung A-Säule herstellbar, und wegen der starken Verfestigung ist die Festigkeit im Bauteil lokal sogar höher als beim H420LA, wenn auch zu erhöhten Materialkosten.

### 5.3 Festigkeitsklasse 500-600 N/mm<sup>2</sup>

In der ULSAB-AVC Studie [4] wurde von Stahlherstellern ein Fahrzeug mit Stählen entwickelt, die erst 2004 verfügbar sein werden. Sie schließen die zur Zeit bestehende Lücke in der Festigkeit zwischen kaltgewalzten Stählen der 400er Klasse und den Warmbändern wie CP-W 800.

Es könnte sogar sinnvoll sein, zwei unterschiedliche Werkstoffgruppen zu definieren. Eine, die von der Festigkeit 500 N/mm<sup>2</sup> bis über 800 N/mm<sup>2</sup> verfestigt, um möglichst komplexe Bauteile herzustellen. Bei weniger komplexen Bauteilen ist eine möglichst hohe Streckgrenze zur Erfüllung der Mindest-Festigkeit sinnvoll. Werkstoffe mit einer Streckgrenze zwischen 600 und 700 N/mm<sup>2</sup>, dafür eingeschränkter Umformbarkeit und einer Zugfestigkeit über 800 könnten diese Anforderungen erfüllen.

Einzelne Stahlhersteller bieten die 500er/600er Sorten wie Dogal/Docol 800 bereits an, andere Hersteller sind noch in der Entwicklung. Wegen

der geringen Verfügbarkeit und des noch fehlenden know how in der Verarbeitung dieser Stähle beschränkt sich der Serieneinsatz noch auf wenige Bauteile.

Beim Seitenrahmen des BMW 7er fällt auf, dass viele wichtige Bauteile aus H420LA gefertigt werden, aber kaum aus Werkstoffen höherer Festigkeit. Bisher fehlen hier die geeigneten Werkstoffe mit Streckgrenzen zwischen 500 und 600 N/mm<sup>2</sup>. Der Schritt zum CP-W 800 wäre zu groß, da die geforderten Bauteilgeometrien nicht mehr darstellbar wären. Hier liegt Bedarf nach neuen Werkstoffen vor.

Wie in der ULSAB-AVC Studie gezeigt, können diese Stähle einen wichtigen Beitrag zur Blechdickenreduzierung im Bereich des Seitenrahmens und der Bodengruppe leisten.

#### 5.4 Festigkeitsklasse 700 N/mm<sup>2</sup>

Warmgewalzte CP-Stähle bieten eine hohe Mindeststreckgrenze von 680 N/mm<sup>2</sup>, verfestigen im Vergleich zu anderen Werkstoffen relativ wenig und sind deshalb auch nur beschränkt umformbar. Das Bauteilspektrum für CP-Stähle ist zusätzlich eingeschränkt, da diese Bleche nicht in Dicken unter 1,6 mm verfügbar sind. Auch hier ist von den in der ULSAB-Studie [4] angekündigten kaltgewalzten Stählen ein großes Potenzial zu erwarten. Die aktuell verfügbaren CP-Stähle eignen sich für Bauteile einfacher Geometrie, die im Crash hohe Festigkeit benötigen, ohne besondere Anforderungen an die Energieaufnahme zu stellen.

Die B-Säulenverstärkungen der aktuellen BMW 5er und BMW 7er sind Beispiele für auf Festigkeit ausgelegte Bauteile (Bild 17, Bild 18). Beim Seitenauftreffen stützt sich die B-Säule unten am Schweller und oben am Dachrahmen ab. In diesem Fall ist die Energieaufnahme des Bauteils von sekundärer Bedeutung. Das Bauteil soll möglichst wenig verformt werden, um den Insassen größtmöglichen Schutz zu geben.

Eine zu weiche B-Säulenverstärkung kann zum Einknicknen des Seitenrahmens auf Brüstungshöhe und damit zu Verletzungen der Insassen führen.

Die ursprüngliche Lösung beim BMW 5er mit einem mikrolegierten Stahl der Festigkeit 340 N/mm<sup>2</sup> erwies sich als zu weich. In Serie wird jetzt mit CP-W 800 ein Stahl der doppelten Streckgrenze (Mindeststreckgrenze 680 N/mm<sup>2</sup>) verwendet. In stärker umgeformten Bereichen steigt die Festigkeit durch die Kaltverfestigung auf Werte bis über 1000 N/mm<sup>2</sup>.

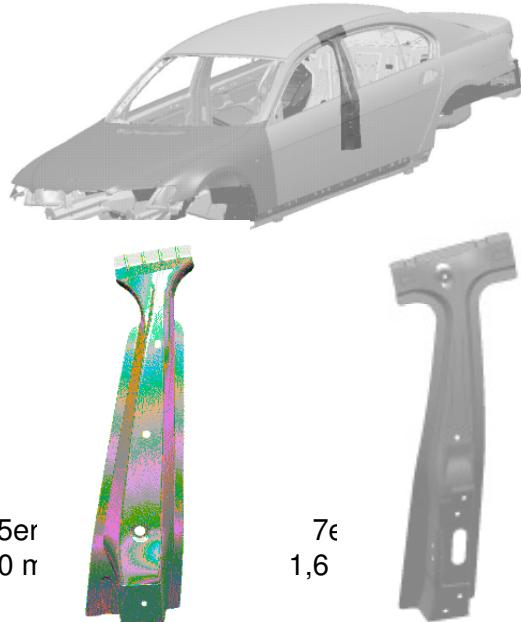


Bild 17: Verstärkungen B-Säule aus CP-W 800

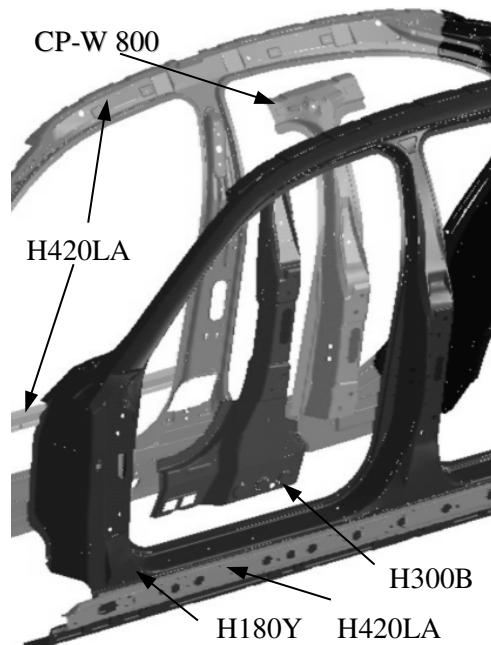


Bild 18: Aufbau des Seitenrahmens des BMW 7er im Bereich der B-Säule [3]

#### 5.5 Festigkeitsklasse über 900 N/mm<sup>2</sup>

Die Mindeststreckgrenze von Martensitphasenstählen wie MS-W 1200 liegt bei 900 N/mm<sup>2</sup>, die Bruchdehnung bei ca. 5%. Für sehr einfache Bauteile kann dieser Werkstoff noch kalt umgeformt werden. Bei Bauteilgestaltung und Umformmethode ist die geringe Umformbarkeit zu berücksichtigen und Werkzeugwerkstoffe und

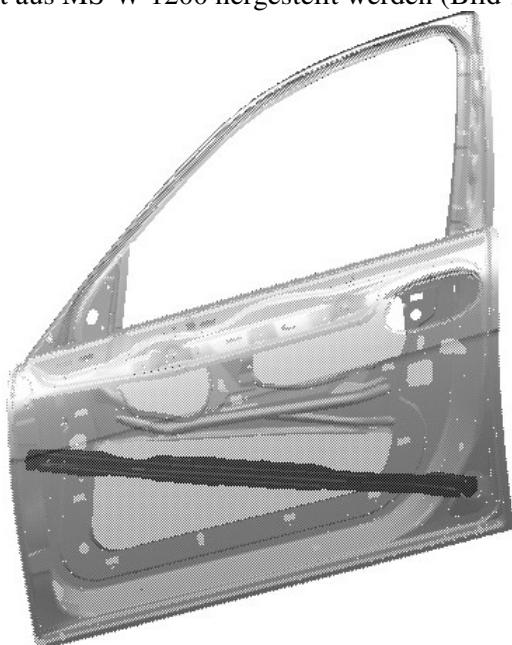
Beschichtungen müssen insbesondere bei hohen Stückzahlen den Verschleißbeanspruchungen standhalten.

Ist für ein Bauteil dieser Festigkeit eine komplexere Geometrie erforderlich, bleibt nur die Warmumformung. Das Bauteil wird im warmen Zustand umgeformt, was hohe Umformgrade bei hoher Maßhaltigkeit ermöglicht. Noch im Umformwerkzeug wird das Bauteil abgekühlt und gehärtet. Die erreichbaren Festigkeiten liegen über 1300 N/mm<sup>2</sup>.

Ein Nachteil der warm umgeformten Bauteile ist, dass keine verzinkten Bleche eingesetzt werden können. Auch die alternativ angebotenen feueraluminierten Schichten erfüllen zur Zeit die Korrosionsschutzanforderungen der BMW Group nicht. Entweder müssen Blechbeschichtungen mit eingeschränktem Korrosionsschutz zum Einsatz kommen oder die Bauteile nachträglich beschichtet werden. In diesem Fall steigen die fertigungsbedingt hohen Kosten noch um die Beschichtungskosten.

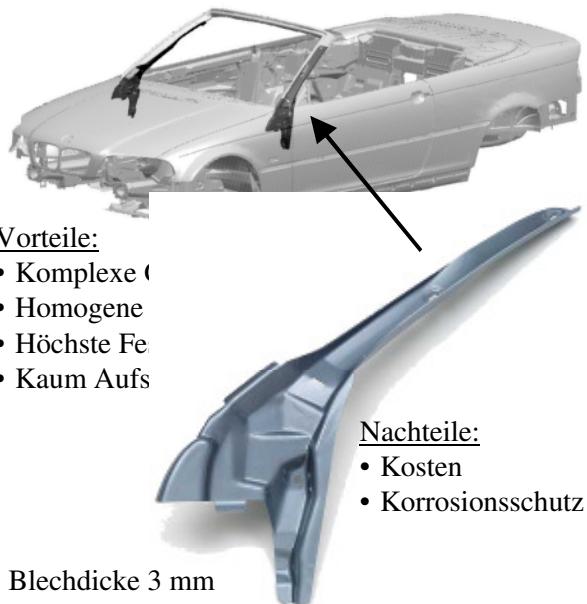
Die höheren Fertigungskosten resultieren aus der zusätzlichen Wärmebehandlung der Platinen, geringeren Taktzeiten, Kühlung des Werkzeugs, Verschleißschutzmaßnahmen im Umform- und in den Beschneidewerkzeugen und je nach Anforderung durch Laserbeschnitt und Sandstrahlen der Oberfläche.

Die Türverstärkungen im BMW 7er, die Insassen beim Seitenauftreffen schützen, können wegen der einfachen und darauf optimierten Geometrie noch kalt aus MS-W 1200 hergestellt werden (Bild 19).



**Bild 19:** Türverstärkung aus MS-W 1200 im BMW 7er

Ein Beispiel für ein komplexeres warm umgeformtes Bauteil aus BTR165 ist die Verstärkung A-Säule beim BMW 3er Cabrio (Bild 20) [5].



#### Vorteile:

- Komplexe Geometrie
- Homogene Struktur
- Höchste Festigkeit
- Kaum Aufschmelzen

#### Nachteile:

- Kosten
- Korrosionsschutz

Blechdicke 3 mm

**Bild 20:** Verstärkung A-Säule beim BMW 3er Cabrio aus warm umgeformtem BTR 165

Der IHU-Rahmen (A-Säule und Windlauf oben) schützt die Insassen bei Überschlägen und muss deshalb möglichst hohe Kräfte aufnehmen können. Die Verankerung der A-Säule in der Karosseriestruktur wird dabei besonders stark beansprucht, weshalb hier das warm umgeformte Bauteil eingesetzt wird.

## 6 Herausforderungen beim Einsatz neuer höherfester Stähle

Noch ist beim Einsatz der relativ neuen Dualphasen und TRIP-Stähle Vorsicht geboten. Exemplarisch seien hier drei Beispiele für mögliche Probleme aufgeführt.

- Von unterschiedlichen Stahlherstellern werden noch Sorten mit stark unterschiedlichen Eigenschaften angeboten. Es ist deshalb nicht immer möglich, wie bei konventionellen Stählen auf einen zweiten Lieferanten auszuweichen. Die Gefahr, dass mit einer neuen Sorte eines Herstellers Fertigungsprobleme auftreten, ist aber höher, da auch beim Hersteller die Fertigung noch nicht so ausgereift ist, wie bei bewährten Sorten.
- Einmal umgeformt beginnt bei TRIP-Stählen auch bei Raumtemperatur ein bake hardening Effekt. Werden Prototypenteile nach der ersten

Ziehoperation erst einige Wochen später weiterverarbeitet, dann reicht die verbleibende Umformbarkeit eventuell nicht mehr für die nachfolgenden Umformoperationen aus. In der Prototypenfertigung ist dieser von anderen Stählen bisher nicht bekannte Effekt zu berücksichtigen.

- Während der Umformung führen Zugspannungen auf Schnittkanten bei TRIP-Stählen eher zum Einreißen der Bauteile als das von anderen Stählen bekannt ist. Bei der Bauteilgestaltung und bei der Auslegung der Umform- und Schneidoperationen (Methode) ist dies entsprechend zu berücksichtigen.

Zur Zeit sind die DP- und TRIP-Stähle nur mit deutlich höherem Aufwand zur Absicherung von Funktion und Prozesssicherheit verwendbar.

Bei der zu erwartenden Vielfalt weiterer Stähle [4] kann es für einen Automobilhersteller nicht zielführend sein, alle neuen Stahlsorten aller Hersteller hinsichtlich Funktionalität und Fertigungsprozess abzusichern und für seine Fahrzeugprojekte zu erschließen. Der Aufwand für die Absicherung einer Sorte ist dafür zu hoch, wie auch die oben genannten Beispiele der TRIP-Stähle zeigen.

Selbst wenn die Herstellung der Bauteile von darauf spezialisierten Zulieferern durchgeführt wird, müssen Fertigung (Fügetechnik, Lackprozess, ...) Funktion im Gesamtfahrzeug (Crashverhalten, Dauerfestigkeit, Korrosionsverhalten, ...) bis hin zu Reparaturlösungen überprüft werden.

Die Herausforderung besteht in der frühzeitigen Identifikation der erfolgversprechendsten Sorten, um sich auf deren Absicherung konzentrieren zu können. Nach welchen Kriterien die Werkstoffe ausgewählt werden hängt vom Hersteller und dessen Produktspektrum ab. Bei kostenorientierten Fahrzeugen liegt der Schwerpunkt eher auf der Senkung der Materialkosten durch Konzentration auf wenige Sorten. Aufwände in der Entwicklung und für die Absicherung der Fertigung lassen sich damit einschränken. Die Beschaffung größerer Mengen ermöglicht niedrigere Preise und reduziert Aufwände bei Lagerung und Logistik.

Dem steht das Motto „Der richtige Werkstoff am richtigen Ort“ entgegen. Je mehr Werkstoffe zur Verfügung stehen, desto seltener muss für ein

Bauteil ein weicherer Werkstoff mit höherer Blechdicke und höherem Gewicht eingesetzt werden. Werden Leichtbau und Funktion eine größere Bedeutung beigemessen, dann liegt im breiten Eigenschaftsspektrum der Stähle ein lohnendes Potenzial.

## 7 Ausblick

Der Einsatz aller hier beschriebenen Stahlsorten hat im jeweiligen Anwendungsfall gute Gründe. Auch die für die nächsten Jahre angekündigten Stähle werden Eigenschaften aufweisen, die ihren Einsatz zumindest in Nischen sinnvoll erscheinen lassen. In Tabelle 3 sind noch weiße Felder vorhanden, die mit neuen Stahlwerkstoffen sinnvoll besetzt werden könnten.

Auf dem Umformtechnischen Kolloquium in Darmstadt 1997 hat Professor Milberg seinen Beitrag mit dem Fazit beendet, dass Strukturen und Produktion der Zukunft Komplexität effizient beherrschen müssen. Die höherfesten Stähle sind ein Beispiel dafür [6].

## Literatur

- 1 Jeschke, H., Gürtler, F.: Das Umdrehen der Gewichtsspirale- Grundsätzliche Überlegungen zum Thema Leichtbau. mobiles 27 (2001), S. 111 - 113
- 2 Köhler, K.-U.: Editorial, Faszination Stahl 2/2002, Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf, [www.made-of-steel.com](http://www.made-of-steel.com)
- 3 Poweleit, A. A., Rebholz, C., Kettner, G.: Die neue BMW 7er Karosserie. Euro Car Body 2001, Bad Nauheim, 2001
- 4 [www.ulsab-avc.org](http://www.ulsab-avc.org)
- 5 Brachvogel, M., Kettner, G., Krieger, L., Sielaff, J.: Innenhochdruckumformen für Karosseriekomponenten, 3. Chemniter Karosserielkolloquium, Chemnitz, 2002
- 6 Milberg, J.: Strukturen bestimmen Verhalten- Neue Anforderungen an die Automobilindustrie, 6. Umformtechnisches Kolloquium, Darmstadt, 1997