
Fahrzeugleichtbau – Strategien, Konzepte, Werkstoffe

-
1. Einführung
 2. Leichtbaustrategien und Bauweisen
 3. Werkstoffe für den Leichtbau

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Leichtbaustrategien

Ein erfolgreicher Leichtbau erfordert einen interdisziplinären Ansatz mit folgenden Handlungsfeldern:

- Werkstofftechnik
- Konzeption und Konstruktion
- Dimensionierung und Berechnungsmethodik
- Fertigungstechnik
- Fügetechnik
- Reparatur- und Wartungsabläufe
- Recycling

Leichtbaustrategien

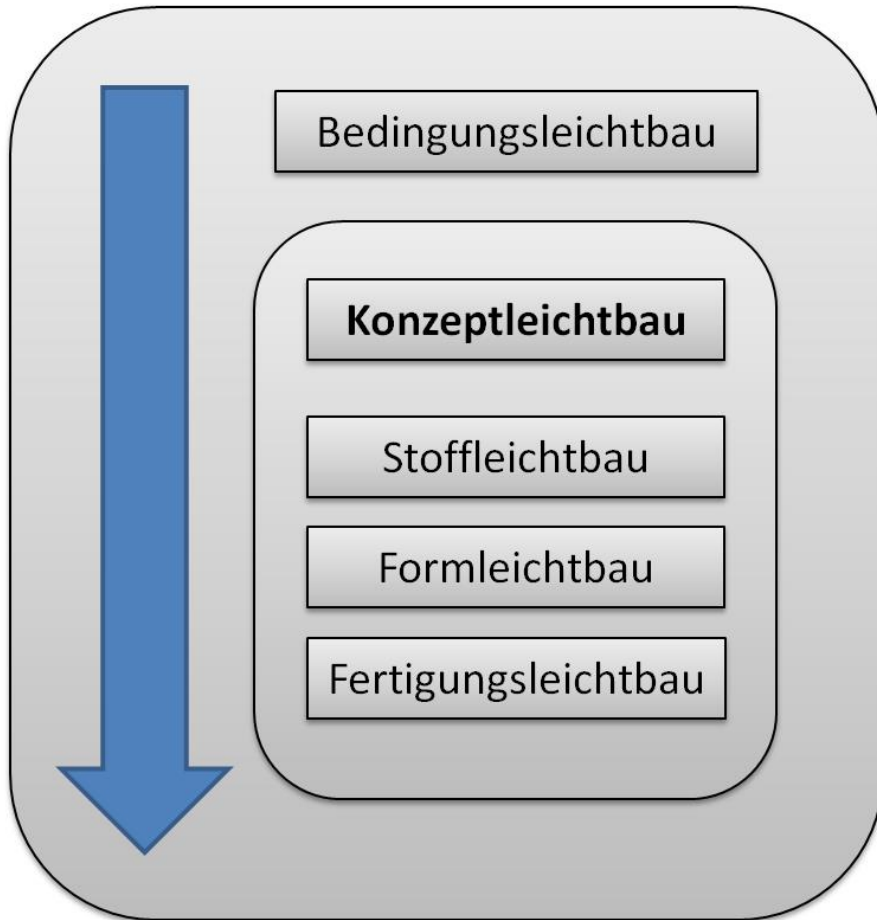
Zur Umsetzung der Leichtbauziele gibt es verschiedene Methoden (**Leichtbaustrategien**) und konstruktive Herangehensweisen (**Bauweisen**)

- Diese sind allgemein gültig und nicht auf die Fahrzeugtechnik beschränkt

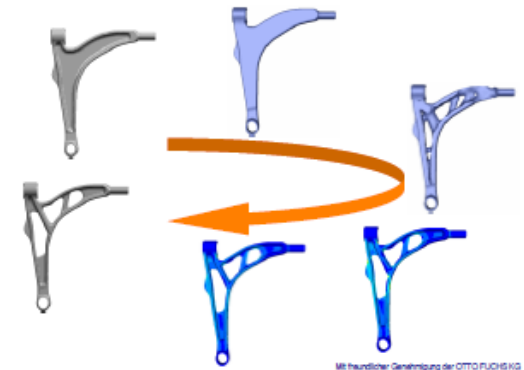
Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Bauweisen zu den heutigen **Karosseriebauweisen** weiterentwickelt

- Diese sind auf die Fahrzeugtechnik beschränkt

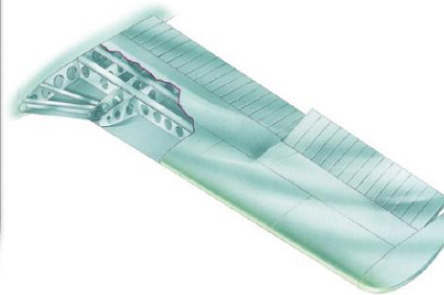
Leichtbaustrategien



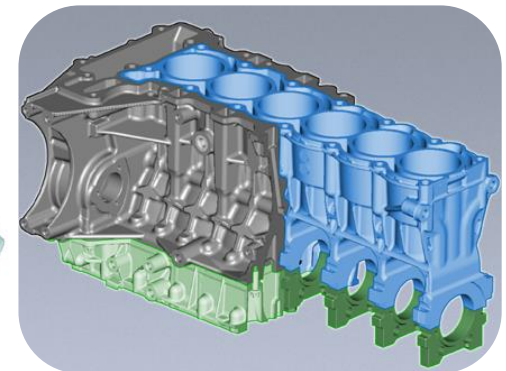
Schauerte et Al. 2001



Mit freundlicher Genehmigung der OTTO FLUGS KG



fotolibra



MTZ: Konzept und Konstruktiver Aufbau, Klüftung

Zuverlässigkeit des Gesamtsystems erhöhen

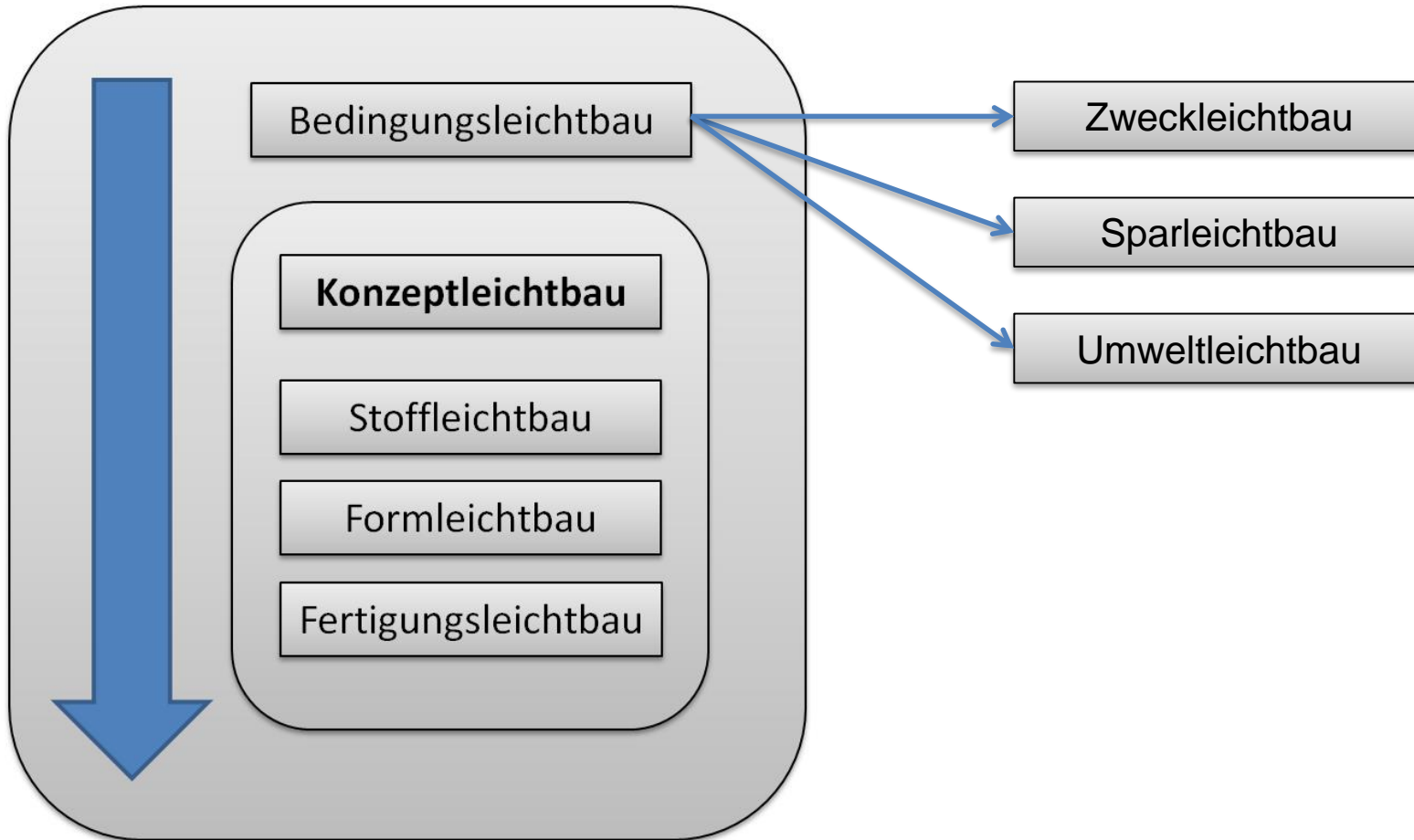
- Geltende gesetzliche Regelungen hinterfragen
- Gleichzeitig bestehende Unsicherheiten (Sicherheitsfaktoren) eingrenzen
 - └ Reduktion der Bauteilmasse durch Senkung der Sicherheitsfaktoren während der Dimensionierung
- Folge: Höherer Aufwand bei der Bauteilgestaltung
 - └ Bsp: Luftfahrtindustrie legt Strukturen sehr nahe am Limit aus
- Voraussetzung sind regelmäßige zerstörungsfreie Bauteilprüfungen während der Nutzungsphase



Äußere Anforderungen kritisch hinterfragen

- Aus der Politik, Gesellschaft und den unterschiedlichen regionalen Märkten kommen eine Vielzahl an Sicherheits-, Komfort- und Performanceanforderungen
- Aus der Analyse möglichst aller Anforderungen und dem streichen nicht notwendiger Anforderungen, kann Gewicht eingespart werden, wenn diese direkt oder indirekt die Fahrzeugstruktur beeinflussen
- Bsp. Fahrzeug: Muss das Fahrzeug den europäischen und den amerikanischen Sicherheits-Vorschriften genügen, oder kann unterschieden werden?

Leichtbaustrategien – Bedingungsleichtbau



➤ Zweckleichtbau

- Bedingung: Funktionserfüllung
- Gewichtseinsparung ist notwendig zur Erfüllung der Funktion
- Beispiel Flugzeug:
 - └ Geringes Gewicht zur Funktionserfüllung notwendig
- Beispiel Achslastverteilung:
 - └ Richtige Achslastverteilung gewährleistet stabile Fahrdynamik



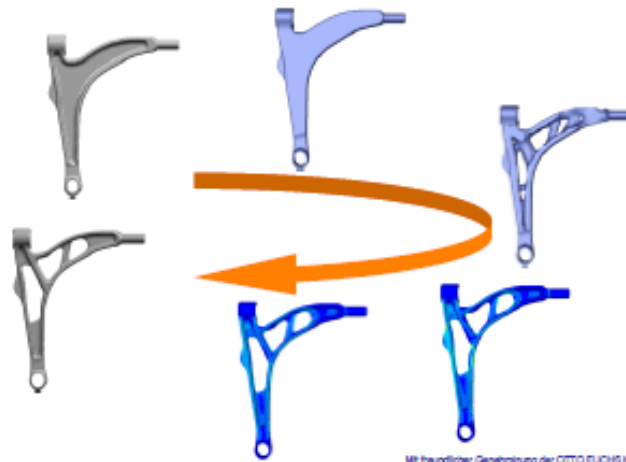
<http://p3.focus.de>



<http://www.onlinewahn.de/b34.htm>

➤ Sparleichtbau

- Bedingung: Geringe Kosten
- Gewichtseinsparung führt zu einer Kostenreduktion bei der Produktion
 - └ Einsparung von Werkstoffen
 - └ Verkürzung der Prozessketten
 - └ Weniger Bauteile durch Integration der Funktion



➤ **Umweltleichtbau (auch Ökoleichtbau)**

- Bedingung: Ökologische Randbedingungen

- **Aktuelles Beispiel: Altfahrzeugverordnung**
Die deutsche Altfahrzeug-Verordnung bildet seit 2006 den rechtlichen Rahmen für die Altautoentsorgung und setzt die Vorgaben der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG um. Darin wird die umweltgerechte Trockenlegung, Demontage und stoffliche Verwertung von Kraftfahrzeugen geregelt.
 - └ Die Verwertungsquote soll bis zum Jahr 2015 von 85% auf 95 % des Leergewichts steigen
 - Die Verwertungsquote teilt sich auf in 85 % stoffliche und 10 % energetische Verwertung
 - Es bleiben 5 % für die Beseitigung

 - └ Die Verordnung enthält unter anderem auch Stoffverbote für z.B. Schwermetalle

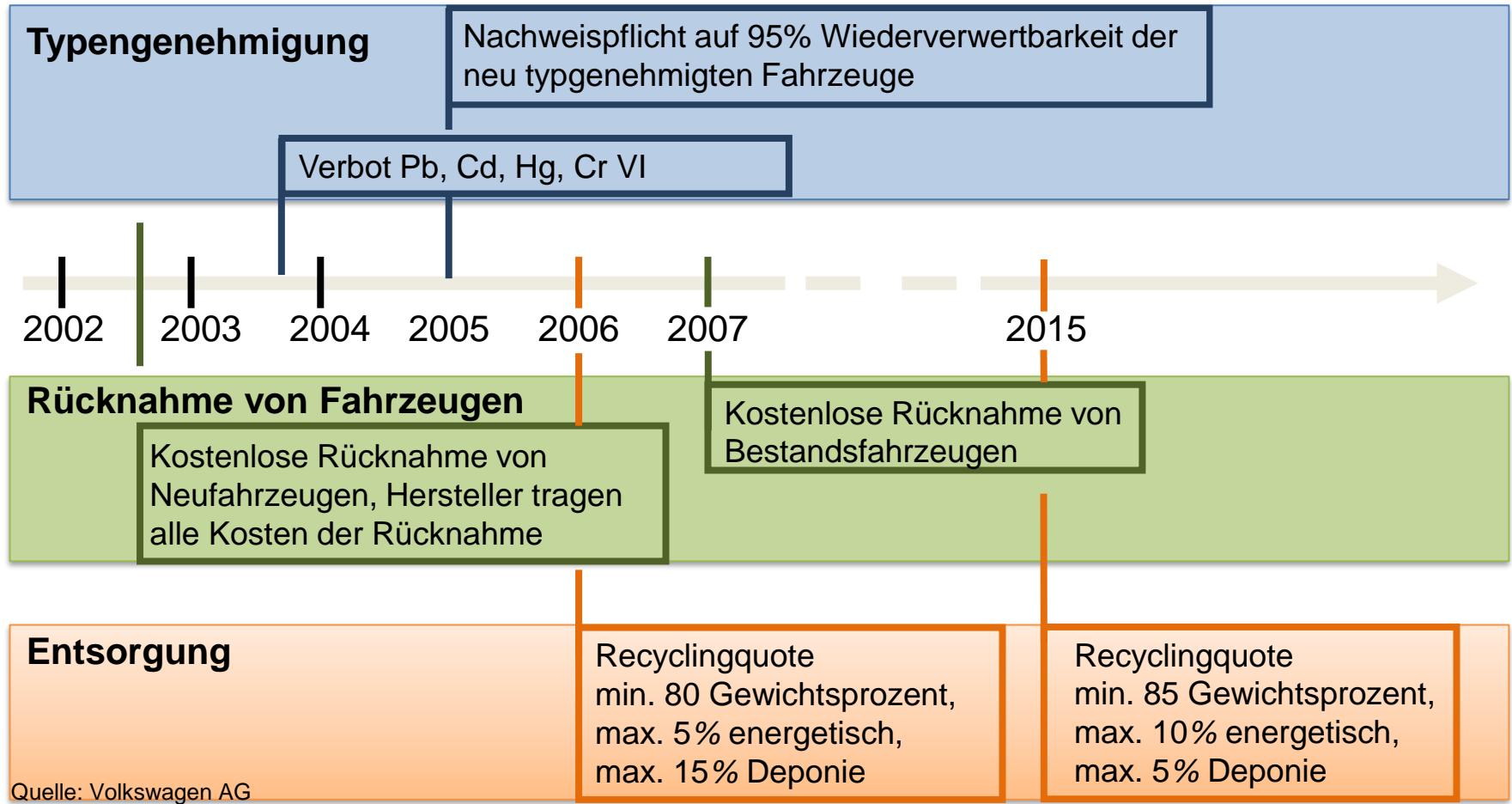
- **Aktuelles Beispiel: Grenzwerte für CO₂ – Emissionen**

Die Verordnung 443/2009/EG der EU setzt CO₂-Emissions-Grenzwerte für neue Pkw's (Vans werden gesondert behandelt) fest

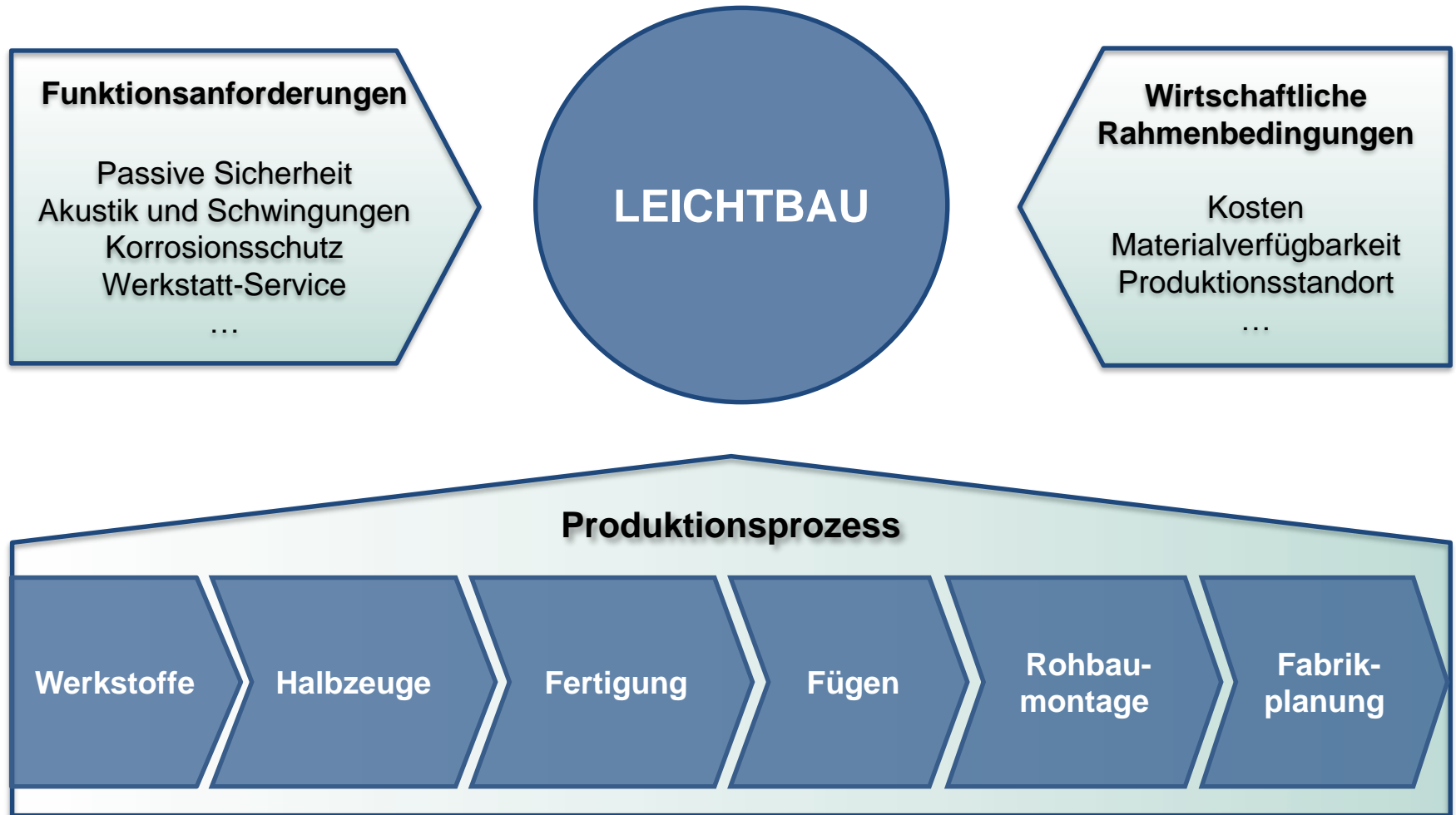
 - └ Ab dem Jahr 2012 muss ein durchschnittlicher Grenzwert von 130 g/km für die Neuwagenflotte eines Herstellers eingehalten
 - └ Der Grenzwert gilt nicht sofort für die gesamte Neuwagenflotte, sondern wird jährlich gestaffelt
 - └ 65% der Neuwagenflotte ab 2012
 - └ 100 % ab 2015
 - └ Bei Überschreitung des Grenzwertes folgen Strafzahlungen für den Fahrzeughersteller
 - └ Bis zum Jahr 2020 soll der durchschnittliche Grenzwert auf 95 g/km sinken

Leichtbaustrategien – Bedingungsleichtbau

Umsetzung der EU-Richtlinie 2000/53/EG Altfahrzeugrecycling u. Schwermetallverbot

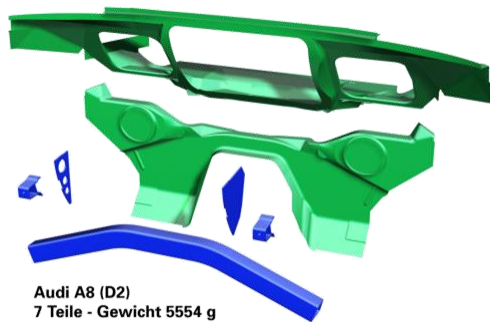


Leichtbaustrategien – Bedingungsleichtbau



Fokus liegt auf der Optimierung des Gesamt- oder Teilsystems

- Bietet das höchste Potential zur Einsparung bei der Strukturmasse
 - └ Erfordert allerdings viel Kreativität und oft neue Technologien
- Teileanzahl und Fügestellen optimieren
- Einzelbauteil auf das System hin optimieren
- Dieser Ansatz geht oft über die Integration mehrerer Funktionen in ein Bauteil
- Auch interdisziplinäre Ansätze wie Mechatronik zielführend



Audi A8 (D2)
7 Teile - Gewicht 5554 g



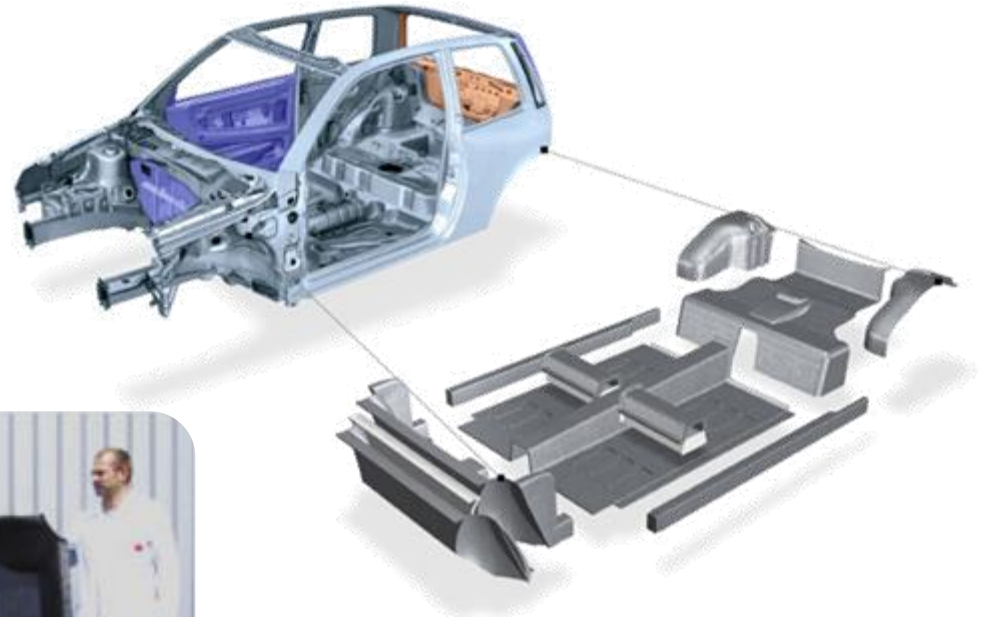
Audi A8 (D3)
4 Teile - Gewicht 3742 g

Leichtbaustrategien – Konzeptleichtbau

TECABS-Studie

Technologies for carbon fibre reinforced modular automotive structures

- RTM-Technologie
 - Fertigung von 50 Stück pro Tag
 - 50% Gewichtseinsparung
 - Stahl: 28 Bauteile
- TECABS: 8 Bauteile (5 Kerne)



Quelle: TECABS (www.tecabs.org), 2005

Leichtbausitze aus thermoplastischen Kunststoffen

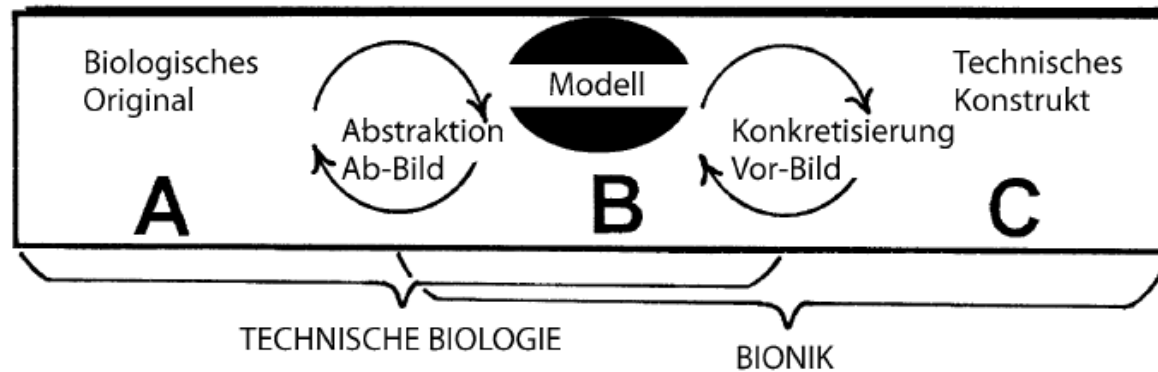
- Ganzheitliche Betrachtung der Baugruppe „Fahrzeugsitz“
 - Funktionsintegration
 - Einsatz von Thermoplast-Spritzguss mit lokaler Endlosfaserverstärkung
 - Metallinsert-Technologie für Verschraubungen
- Gewichtsreduktion und Reduktion der Lehnendicke



Quelle: BASF, Faurecia

Leichtbaustrategien – Konzeptleichtbau – Bionik

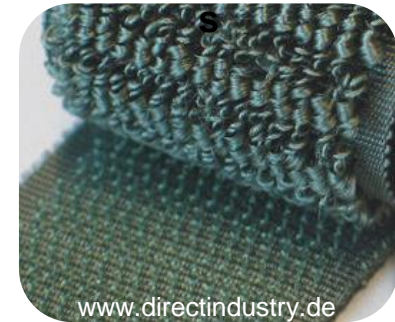
Erkannte Wirkzusammenhänge aus der Natur abstrahieren und in einem technischem System umsetzen



Klette



Klettverschluss



Quelle: Bionik als Wissenschaft, Nachtigall

Die 10 Gebote bionischen Designs (Werner Nachtigall 1997)

1. Integrierte, statt additiver Konstruktion
2. Optimierung des Ganzen, statt Maximierung des Einzelements
3. Multifunktionalität, statt Monofunktionalität
4. Feinabstimmung gegenüber der Umwelt
5. Energieeinsparung, statt Energieverschwendung
6. Direkte und indirekte Nutzung der Sonnenenergie
7. Zeitliche Limitierung, statt unnötiger Haltbarkeit
8. Totale Rezyklierung, statt Abfallanhäufung
9. Vernetzung, statt Linearität
10. Entwicklung im Trial-Error Prozess

Vorgehensweisen

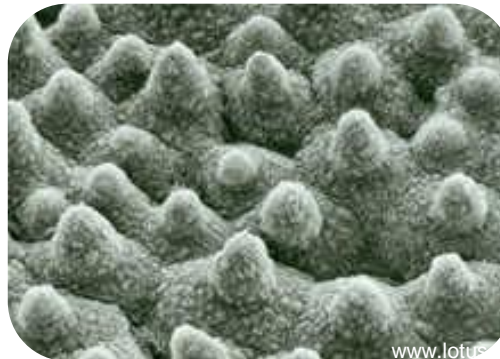
➤ Top-Down (Analogie-Bionik)

- Problemdefinition
- Analogiensuche in der Natur
- Analyse der gefundenen Vorbilder
- Übertragung der Lösungen der Natur auf die technische Anwendung



➤ Bottom-Up (Abstraktions-Bionik)

- Biologische Grundlagenforschung
 - └ Biomechanik und Funktionsweise biologischer Systeme
- Zugrundeliegendes Prinzip erkennen und definieren
- Abstraktion des gefundenen Prinzips
- Suche nach Möglichkeiten für die technische Anwendung
- Technische Umsetzung



Leichtbaustrategien – Konzeptleichtbau – Bionik

Beispiele



Aktuelles Beispiel:

- Funktionsintegrierte, bionisch optimierte Fahrzeugleichtbaustruktur in flexibler Fertigung
- Spaceframe aus Stahl mit bionisch geformten und generativ gefertigten Knoten
- Noch nicht Serienreif – Entwicklung in Zusammenarbeit mit der TUHH



Quelle: ATZ 09/15, www.edag.de

Leichtbaustrategien – Stoffleichtbau

Substitution des verwendeten Werkstoffs durch einen Werkstoff geringerer Dichte

- Oft nur möglich bei gleichzeitigem Wechsel der Form und Fügetechnik
- Alternativ Steigerung der Festigkeit / Steifigkeit um Materialstärke zu reduzieren
- Fertigungstechnische Realisierbarkeit muss gegeben sein



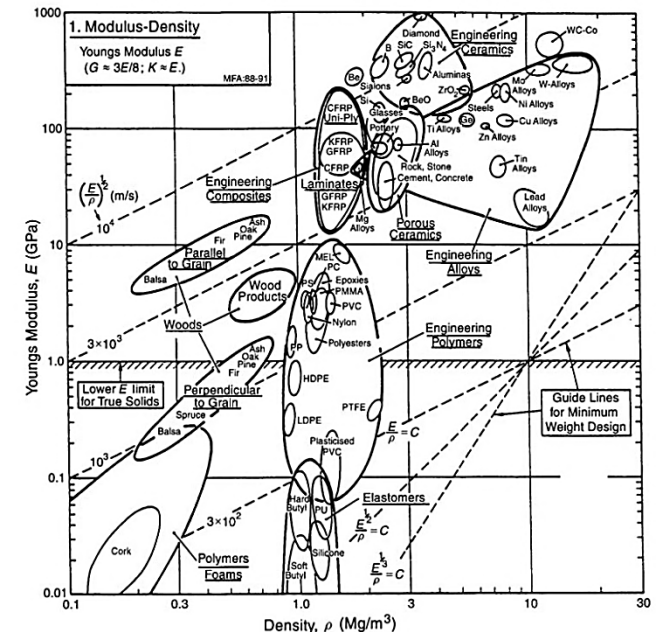
www.auto.freenet.de



www.ua.all.biz

Systematische Werkstoffauswahl

- Bewertung / Auswahl der Konstruktionswerkstoffe mittels **Materialindizes**
 - jeweils für spezielle Funktionen, z.B. Balkenbiegung
 - Annahme: keine Änderung der Geometrie
 - └ nur Bewertung der Materialperformance, nicht der Bauteilperformance
- Genauere Betrachtung im Kapitel „Werkstoffe für den Leichtbau“



Quelle: Wanner/ Systematische WS-Auswahl

Systematische Werkstoffauswahl

- Bewertung / Auswahl der Konstruktionswerkstoffe mittels **Materialindices**
 - jeweils für spezielle Funktionen, z.B. Balkenbiegung
 - Annahme: keine Änderung der Geometrie
 - └ nur Bewertung der Materialperformance, nicht der Bauteilperformance
 - bei gleichzeitiger Erfüllung der Bauteil – Randbedingungen
 - └ Einsatztemperatur
 - └ Bauraum
 - └ Umgebungsmedien
 - └ Kerbempfindlichkeit
 - └ el. Leitfähigkeit
 - └ ...

Funktion	Steifigkeit	Festigkeit
Zug (Stab)	ρ/E	ρ/R_{eS}
Biegung (Balken)	$\rho/E^{1/2}$	$\rho/R_{eS}^{2/3}$
Biegung (Platte)	$\rho/E^{1/3}$	$\rho/R_{eS}^{1/2}$

Minimieren!

Quelle: Wanner/ Systematische WS-Auswahl

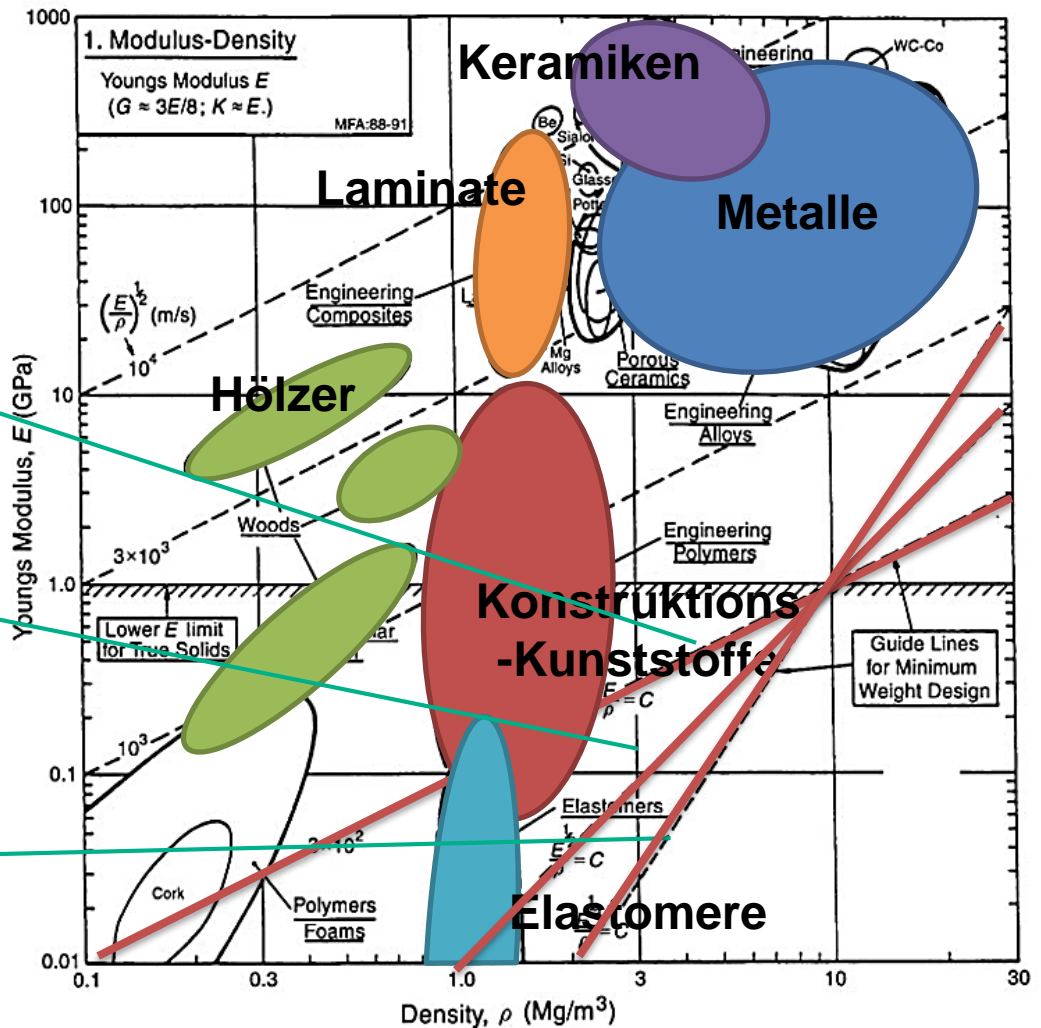
Leichtbaustrategien - Stoffleichtbau

- Materialauswahldiagramm nach Prof. M. Ashby:

Linien konstantem Index
 $M = E/\rho$
 für Bauteile unter
Zugbelastung

Linien konstantem Index
 $M = \sqrt{E/\rho}$
 für Bauteile unter
Biegebelastung (Balken)

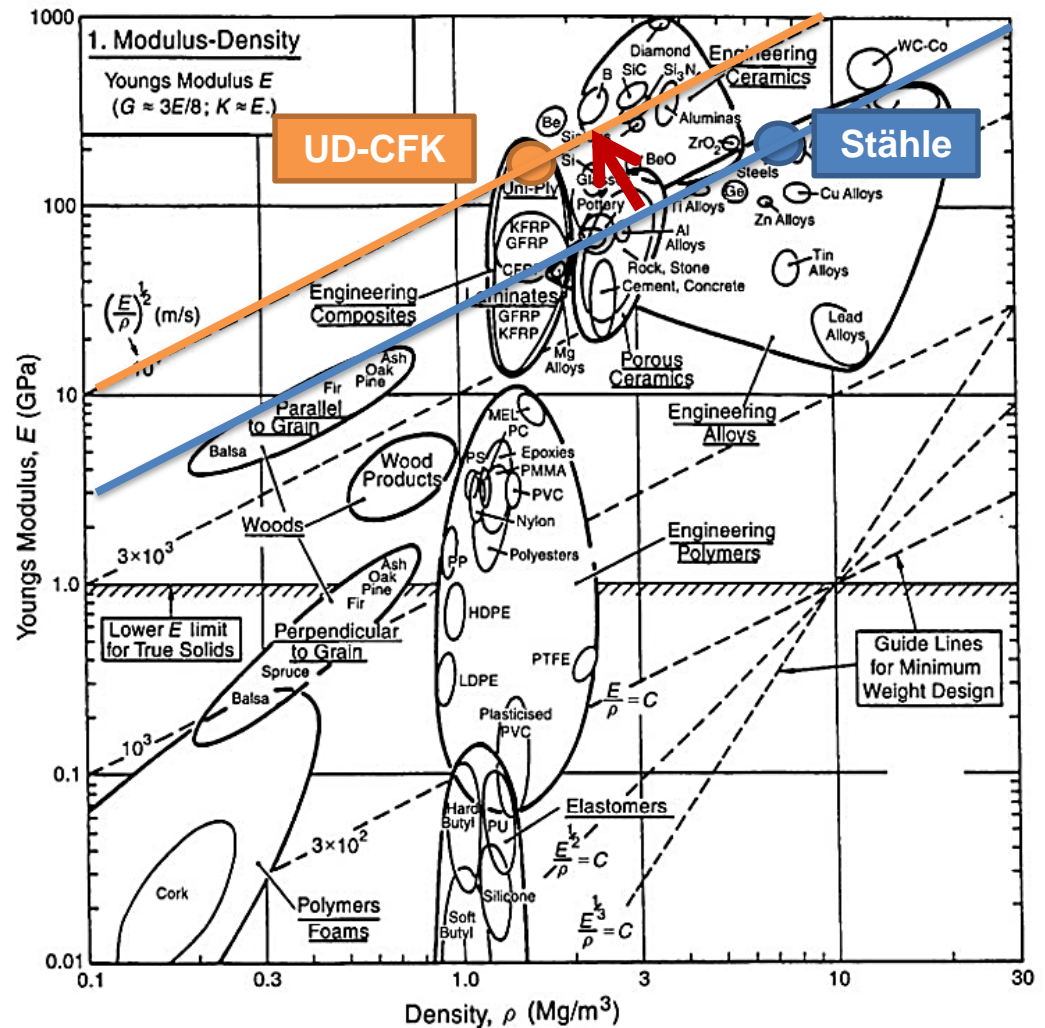
Linien konstantem Index
 $M = \sqrt[3]{E/\rho}$
 für Bauteile unter
Biegebelastung (Platte)



Quelle: Ashby

Leichtbaustrategien - Stoffleichtbau

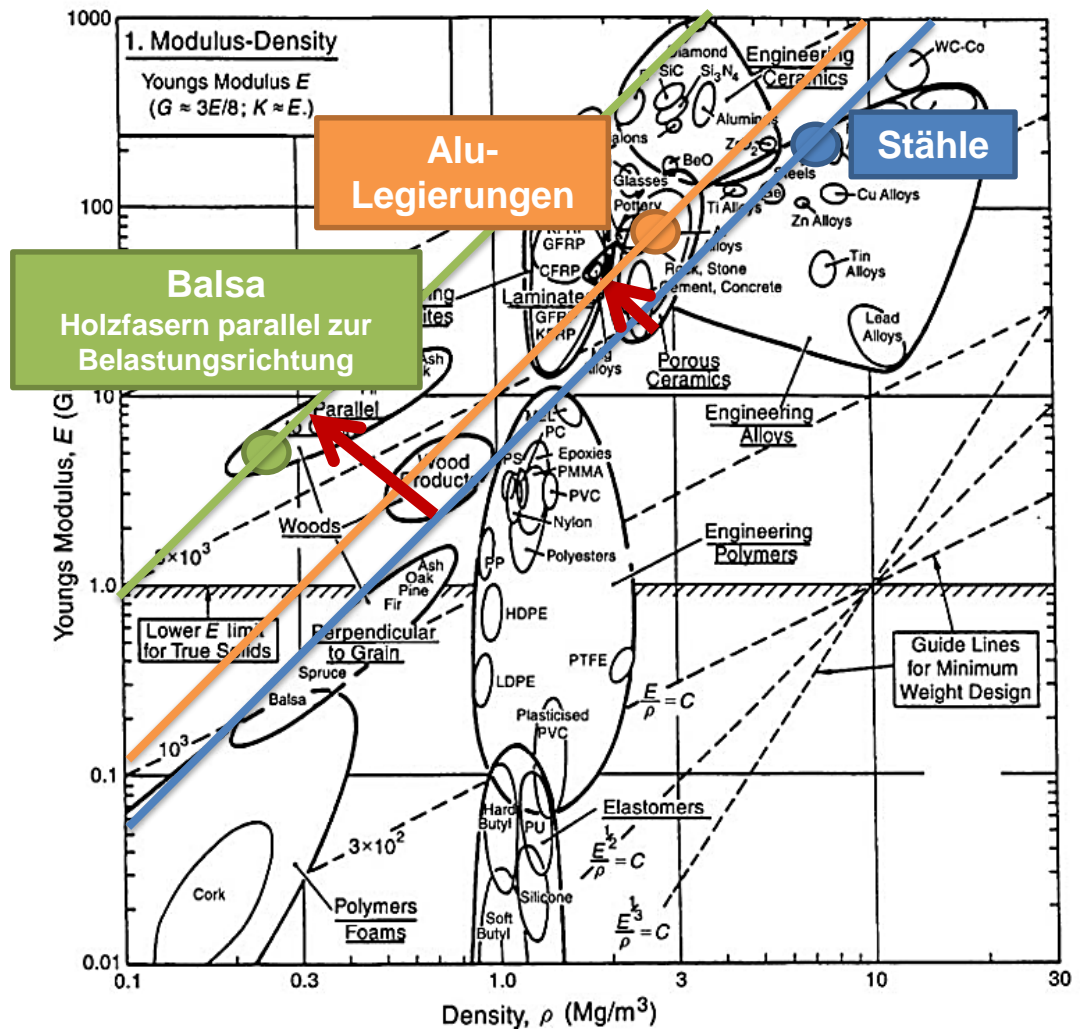
- Suche nach einem leichteren und steiferen Material für Zugstäbe (bei gleicher Geometrie)



Quelle: Ashby

Leichtbaustrategien - Stoffleichtbau

- Suche nach einem leichteren und steiferen Material für Balken unter Biegebelastung (bei gleicher Geometrie)



Quelle: Ashby

Leichtbaustrategien – Stoffleichtbau

- Reduktion des Bauteilgewichts durch Substitution des bisher eingesetzten Werkstoffs durch einen spezifisch leichteren Werkstoff
- Anpassung der Bauteilgestaltung und der Fertigungsverfahren



Abbildung 1

Türe (Demonstrator)

Mg-Innenteil (AM60): 6,4 kg

Stahl-Referenzbauteil: 12,5 kg



Abbildung 2

Motorhaube (Demonstrator)

Mg-Al-Hybridhaube: ca. 5,5 kg

Quelle: H. Friedrich, S. Schumann, Volkswagen AG

Hinterachsfedern im VW Lupo (Serie)



Stahl
1040 g

Titan
625 g
60 % Gewicht der
Stahlversion

Vorderachsfeder im Audi A4



GFR - Epoxy
1530 g
59 % Gewicht der
Stahlversion

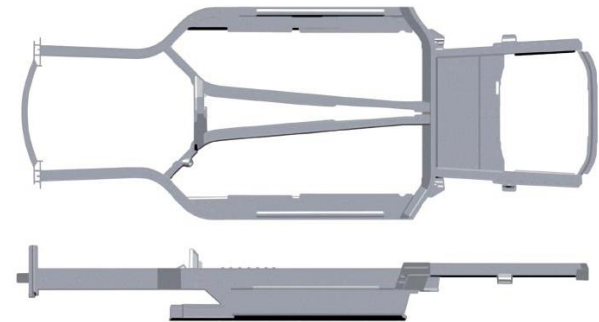
Stahl
2660 g

Quelle: Audi, Sogefi

While *man* uses solid metals to construct high strength *structures*, *nature* chooses *cellular* materials. Wood, bone, coral are some examples.

Ashby, Acta. Mater. (Vol. 53, 2005)

Aluminiumrohkarosserie – BMW Z8 (Serie)



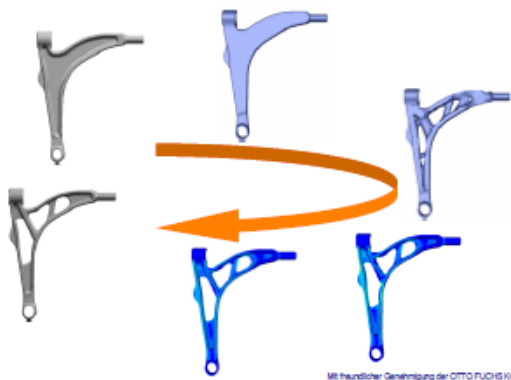
- Aufgeschraubte Außenhaut aus warm aushärtendem AlMg0,2Si2
- Innenteile werden aus AlMg3 und AlMg4,5 Legierungen tiefgezogen
- Gewicht der Rohkarosse 275 kg:
 - 68 % Al-Strangprofile, 31 % Bleche
 - 890 Stanznieten
 - 57 m MIG-Schweißnaht



Quelle: M. Brune, BMW AG, Dresdner Leichtbausymposium 2002

Konstruktion eines Bauteils optimieren

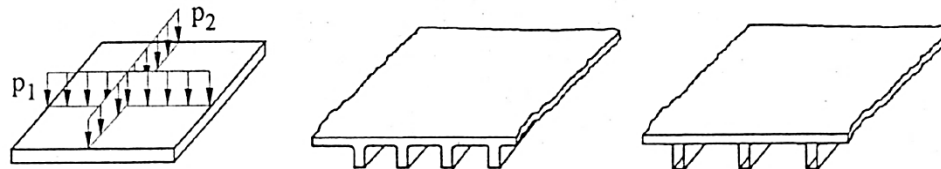
- Geometrie entsprechend Kraftfluss und -einleitung ideal anpassen
 - └ Stichwort **Topologieoptimierung** zur Reduzierung der wirkenden Lasten



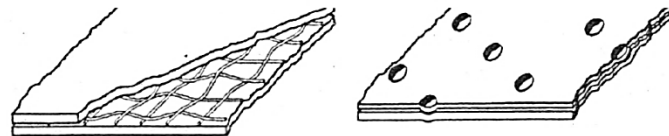
- unter Beachtung der Fertigbarkeit der Bauteile
- ABER: neue Fertigungstechniken ermöglichen meist eine optimalere Bauteilgestaltung

Werkstoffeinsatz minimieren durch **geometrische Versteifungen**

- Rippen, Sicken, gewölbte Schalen, Randversteifungen,



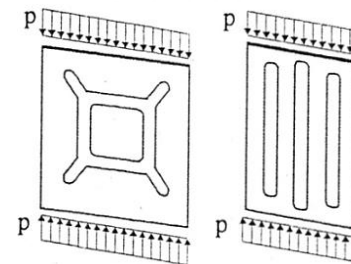
Dünnwandige Stützquerschnitte sind Vollquerschnitten vorzuziehen



Gitterblech

Noppenblech

Einbringen von Sicken zur Versteifung knickgefährdeter Bauteile



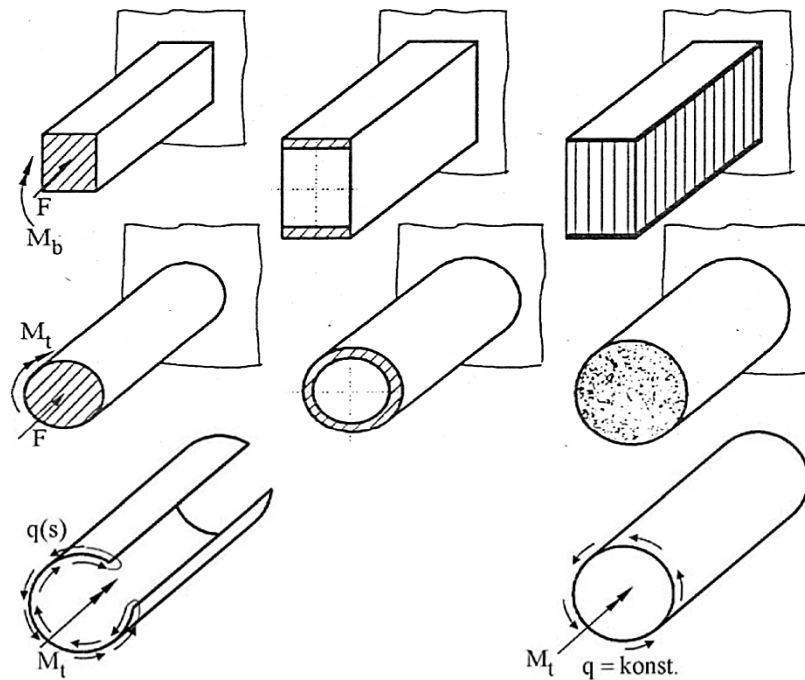
Ungünstig  Besser

Quelle: Leichtbau-Konstruktion, Klein

Werkstoffeinsatz minimieren durch **geometrische Versteifungen**

- Erhöhung der Flächenträgheits- und Widerstandsmomente

Einsatz von
Dünnwandigen
Profilen mit leichtem
Stützkern



Offene Strukturen
möglichst schließen

Ungünstig  Besser

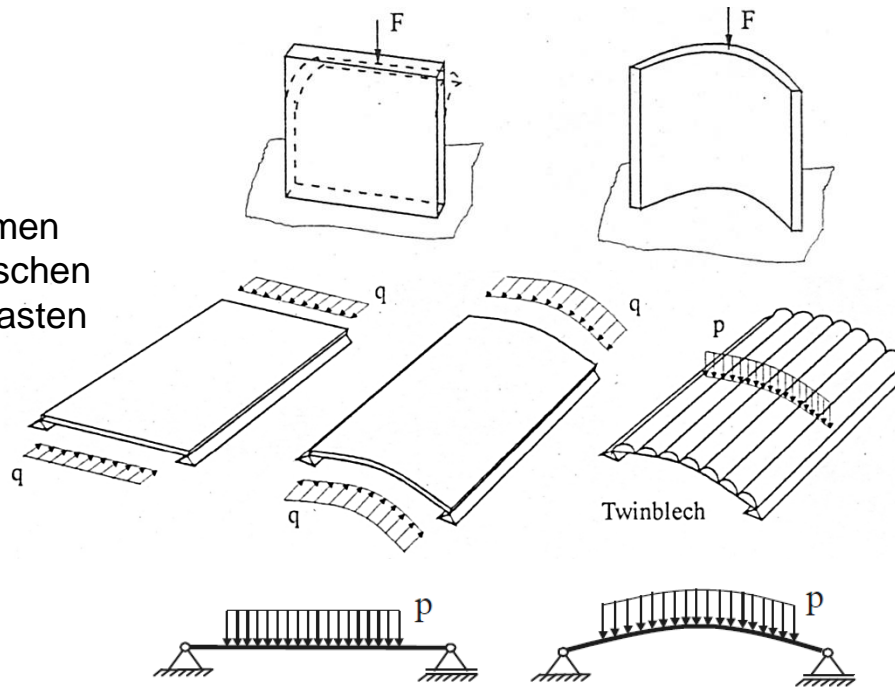
Quelle: Leichtbau-Konstruktion, Klein

Leichtbaustrategien – Formleichtbau

Werkstoffeinsatz minimieren durch **geometrische Versteifungen**

- Krümmen von flächigen Strukturen und Blechfeldern

Gekrümmte Formen erhöhen die kritischen Knick- und Beullasten



Den Lasten entgegengesetzte Krümmungen wirken Durchbiegung und -schlagen entgegen

Ungünstig  Besser

Quelle: Leichtbau-Konstruktion, Klein

Leichtbaustrategien – Formleichtbau

Eignung verschiedener Querschnittsformen hinsichtlich

Torsion

		20	40	60	80	100 [%]
Rohr (dünnwandig)		100 %				
Vierkantrohr		93,3				
Rohr (dickwandig)		40,9				
Kreis (massiv)		24,1				
Quadrat		17,8				
Rechteck 2:1		14,9				
Rechteck 5:1		11,2				
T-Profil (hoch)		8,8				
T-Profil (breit)		8,5				
Winkel		6,5				
I-Profil (breit)		6,4				
U-Profil		5,2				
I-Profil (schmal)		2,2				

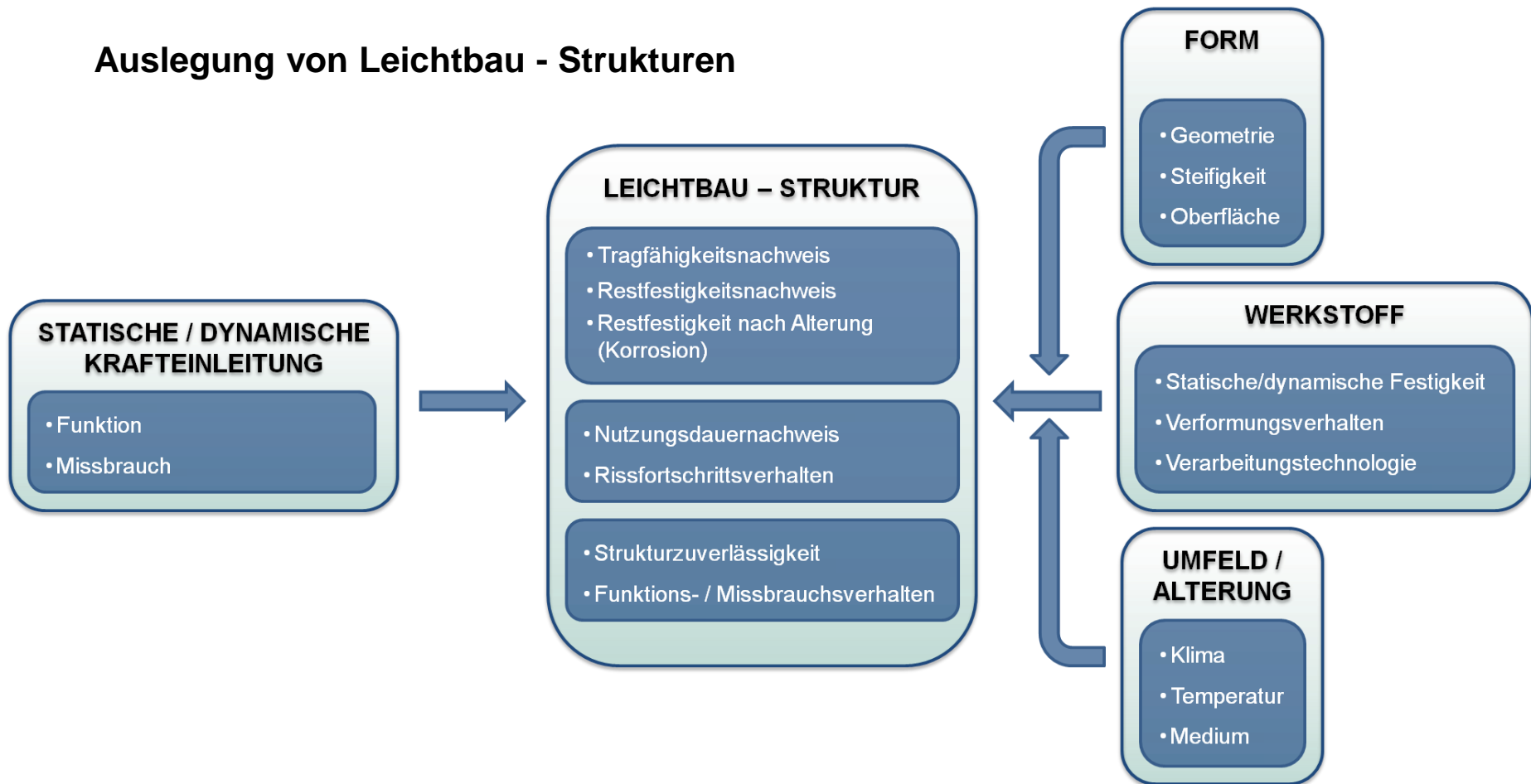
Biegung

		20	40	60	80	100 [%]
I-Profil (schmal)		100 %				
U-Profil		81,3				
I-Profil (breit)		57,6				
Vierkantrohr		57,5				
Rohr (dünnwandig)		48,7				
Winkel		40,7				
Rechteck 5:1		30,9				
T-Profil (hoch)		26,5				
T-Profil (breit)		21,1				
Rohr (dickwandig)		19,9				
Rechteck 2:1		19,6				
Quadrat		13,8				
Kreis (massiv)		11,7				

Skript: Konstruieren mit Polymerwerkstoffen, Liedel

Leichtbaustrategien – Formleichtbau

Auslegung von Leichtbau - Strukturen



Skript: Werkstoffe und Bauweisen, DLR-FK

Leichtbaustrategien – Fertigungsleichtbau

- Gewichtseinsparungspotenzial durch **geeignete Wahl der Fertigungsverfahren**
- Dazu gehören alle Verfahren, die ein höheres Leichtbaupotential als die herkömmlichen Verfahren bieten
 - Fertigungsverfahren, z.B.:
 - └ Tailored Tempering
 - └ Tailored Welded Blanks
 - Füge- und Montageverfahren, z.B.:
 - └ Kleben
 - └ Laserschweißen
 - └ Löten



Quelle: ThyssenKrupp Steel Leichtbau mit Stahl

Quelle: Fraunhofer ILT

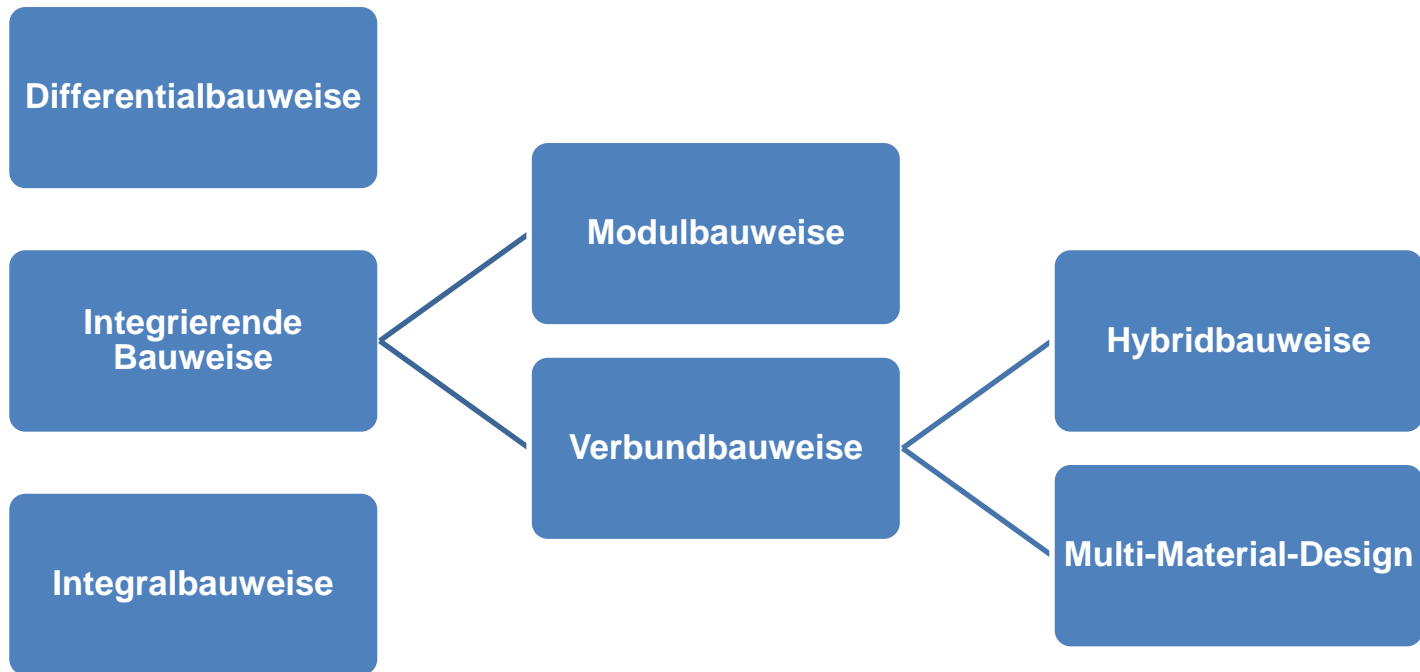
Fahrzeugleichtbau – Strategien, Konzepte, Werkstoffe

-
1. Einführung
 2. Leichtbaustrategien und **Bauweisen**
 3. Werkstoffe für den Leichtbau

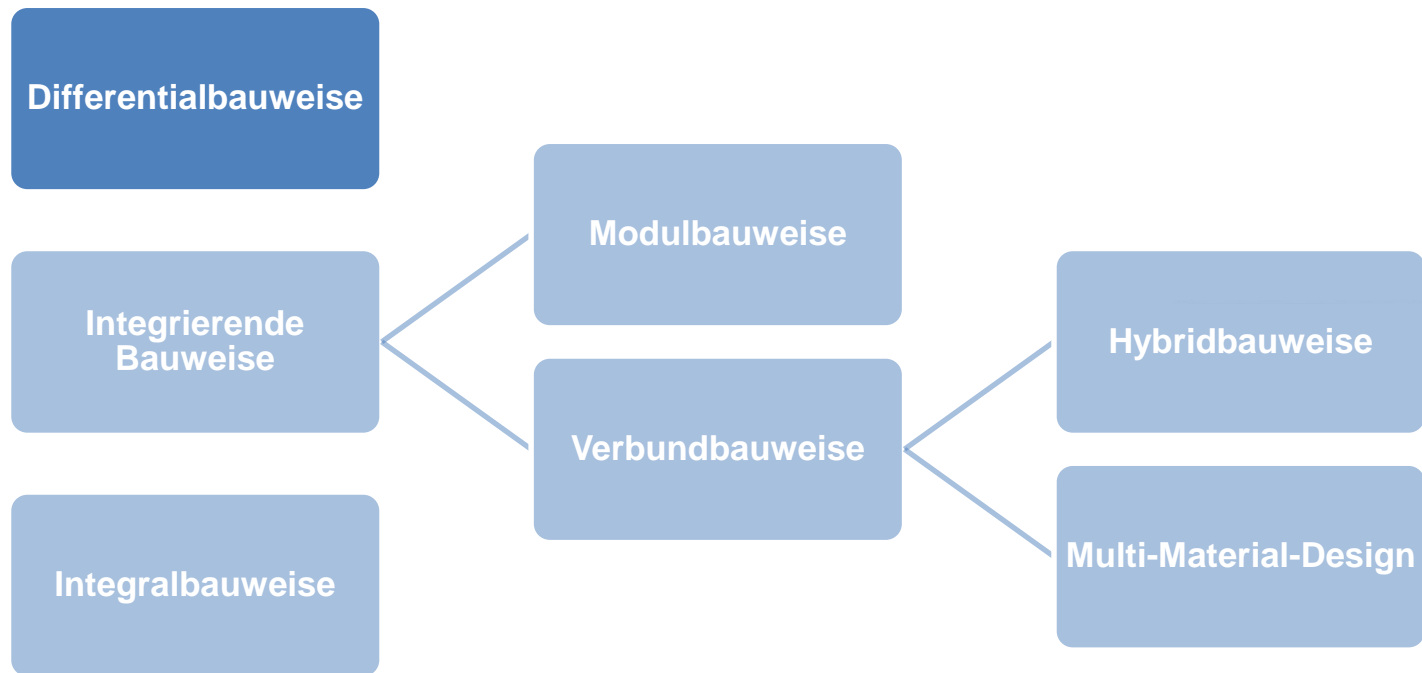
Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Bauweisen

Bauweisen sind konstruktive Herangehensweisen zur Umsetzung von Leichtbauzielen



Bauweisen – Differentialbauweise



➤ Trennung der Funktionen

- Erhöhung der Bauteilanzahl einer Baugruppe
- Einfache Konstruktionselemente oder Einzelteile
 - └ Wenn möglich genormte Teile
- Möglichkeit die Einzelteile nach Kriterien einzuteilen
 - └ Lagerung, Instandhaltung, Transport, ...

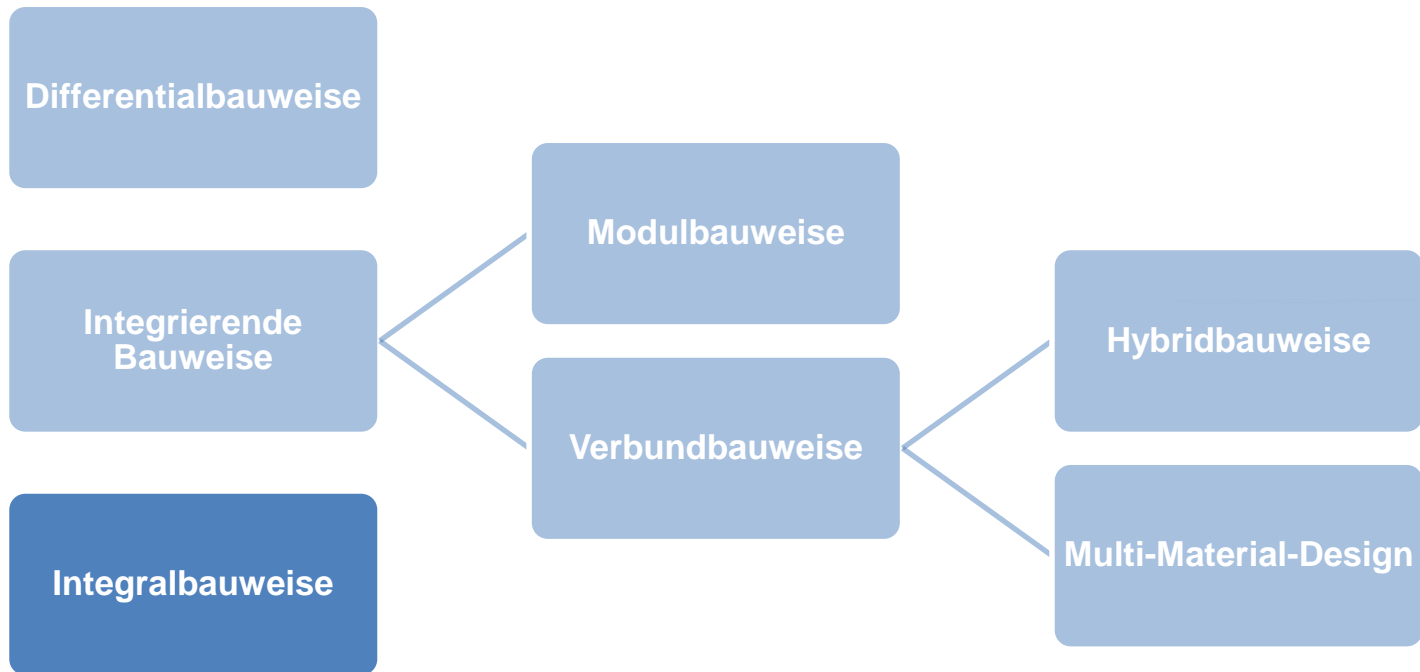
➤ Hauptmerkmale

- Einfache Geometrien der Einzelteile
- Viele Verbindungsstellen
- Viele Stoßstellen
- Hoher Montageaufwand

Bauweisen – Differentialbauweise

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▪ Niedrige Komplexität der Einzelteile▪ Flexibilität steigt▪ Optimierte Werkstoffauswahl für jede Komponente möglich▪ Fertigung relativ einfach▪ Kostengünstigere Verfahren möglich▪ Höhere Losgrößen möglich▪ Ausschuss geringer▪ Erleichterte Reparatur▪ Besseres Recycling (Demontage)▪ Günstigeres Schädigungsverhalten<ul style="list-style-type: none">└ Ausbreitung von Rissen wird an Fugestellen behindert	<ul style="list-style-type: none">▪ Erhöhung des Bauteilgewichts<ul style="list-style-type: none">└ Durch Verbindungselemente und Überlappungen▪ Spannungsspitzen an Fugestellen möglich▪ Meist ungünstigerer Kraftverlauf im Bauteil▪ Füge-/Montageaufwand höher<ul style="list-style-type: none">└ Kann zusätzliche Fertigungsverfahren erfordern▪ Qualitätsmanagement komplexer▪ Korrosionsgefährdete Kontaktstellen

Bauweisen – Integralbauweise



- **Kombination möglichst vieler Funktionen in einem einzelnen Bauteil**
 - Verringerung der Teileanzahl einer Baugruppe
 - └ weniger Fügestellen
 - Die Integralbauweise ist eng verknüpft mit dem Konzeptleichtbau

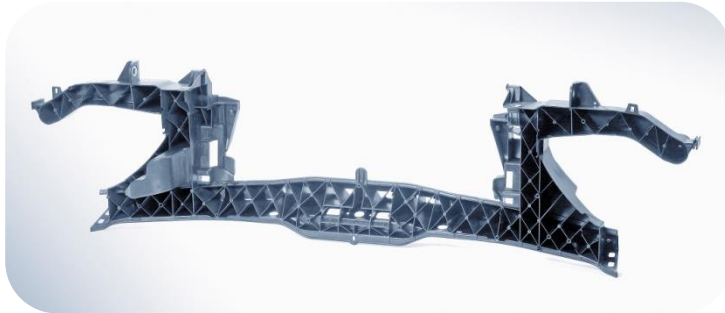
- **Hauptmerkmale**
 - Komplexe Geometrien der Einzelteile
 - Hoher Fertigungsaufwand bzw. komplexe Fertigungsverfahren nötig
 - Hoher Verlust durch Abfall
 - Geringer Montageaufwand
 - Geringes Strukturgewicht

Bauweisen – Integralbauweise

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▪ Sehr hohes Leichtbaupotential<ul style="list-style-type: none">└ Weniger Fügstellen└ Keine Überlappungen▪ Geometrie optimal auf Belastungen abstimmbaar▪ Form auf Kraftfluss hin optimierbar▪ Wandstärke kann lokal angepasst werden▪ Montageaufwand sehr gering	<ul style="list-style-type: none">▪ Geringere Flexibilität▪ Aufwändige Werkzeugformen▪ Fertigung kostenintensiv▪ Verfahrensoptimierung nötig▪ Hohe Verfahrenskomplexität▪ Teure Werkzeuge▪ Teils nicht optimale Nutzung des Materials<ul style="list-style-type: none">└ Überall der gleiche Werkstoff▪ Sehr schlechtes Schädigungsverhalten<ul style="list-style-type: none">└ Rissausbreitung

Bauweisen – Integralbauweise

Beispiele



www.daimler.com



Fraunhofer ICT



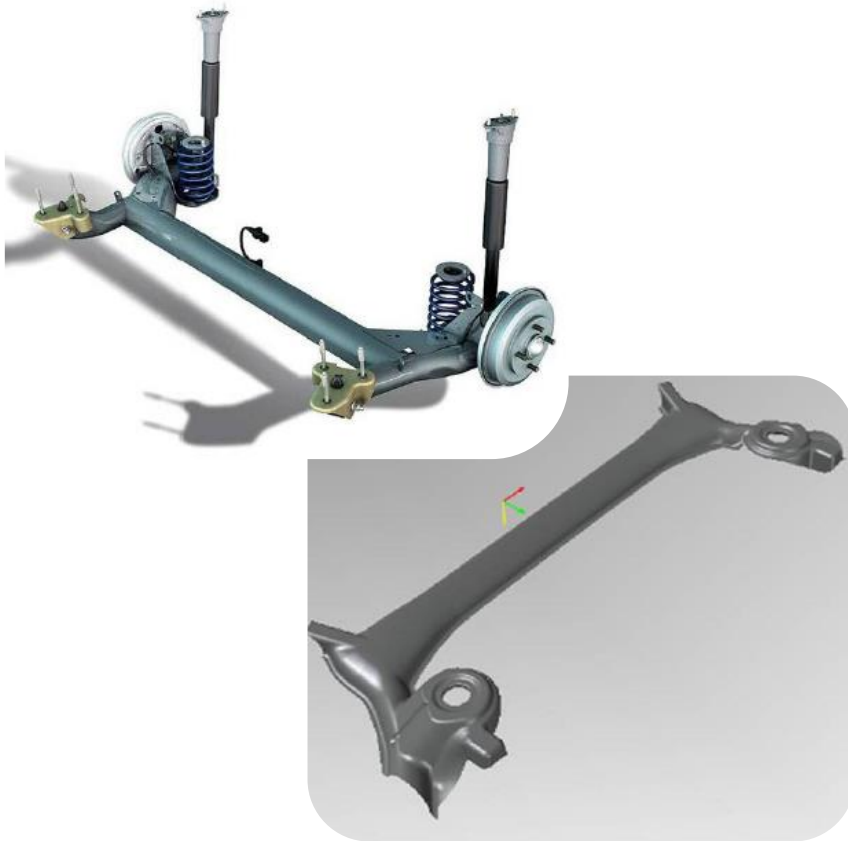
Fraunhofer ICT



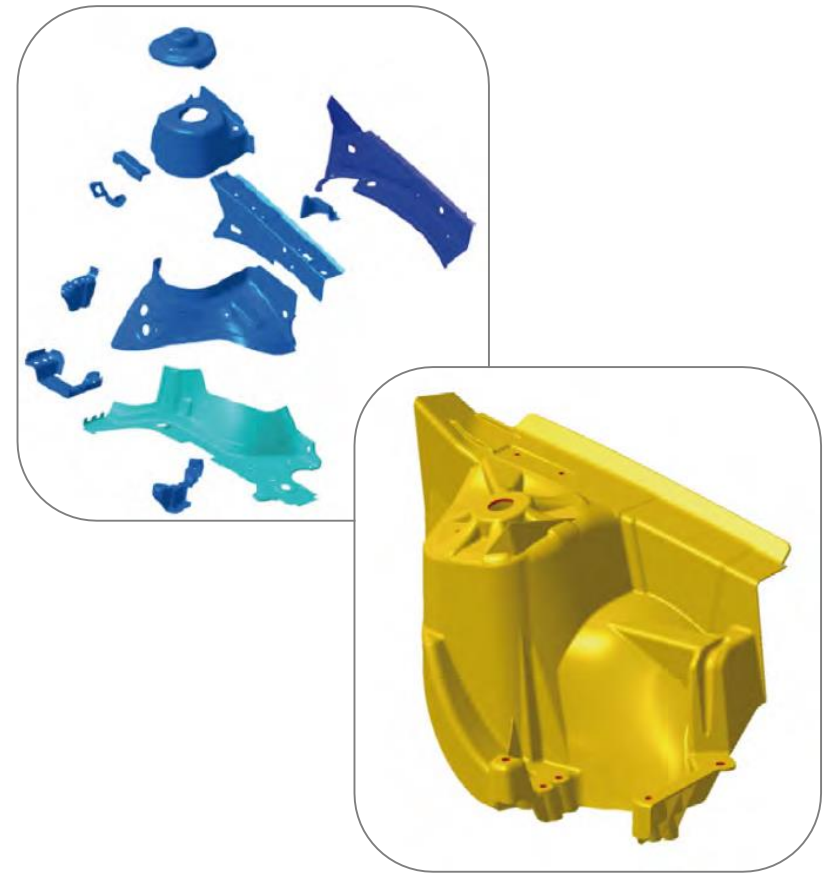
www.volkswagen.de

Bauweisen – Differential vs. Integralbauweise

Starre PKW - Hinterachse



PKW - Federbeindom

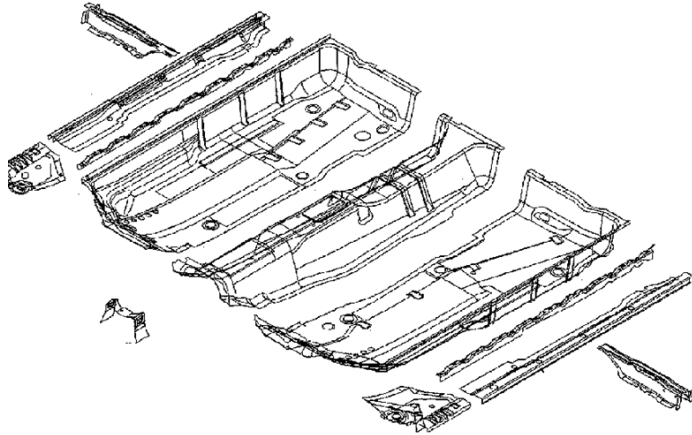


Quelle: KLT Group, CTI Konferenz, 2013

Quelle: Super Light Car

Bauweisen – Differential vs. Integralbauweise

PKW - Unterboden



- Boden aus Stahlblech
- 12 Teile
- **18,2 kg**

- 46%



- CFK-Boden
- 1 Teil
- Unterschiedliche Wandstärken je nach Bauteilbereich
- **9,7 kg**

Quelle: Volkswagen AG

Bauweisen – Differential vs. Integralbauweise

PKW – Sitzschale der Rückbank



- verschweißte Stahlbleche
- 5 Teile
- **4,63 kg**

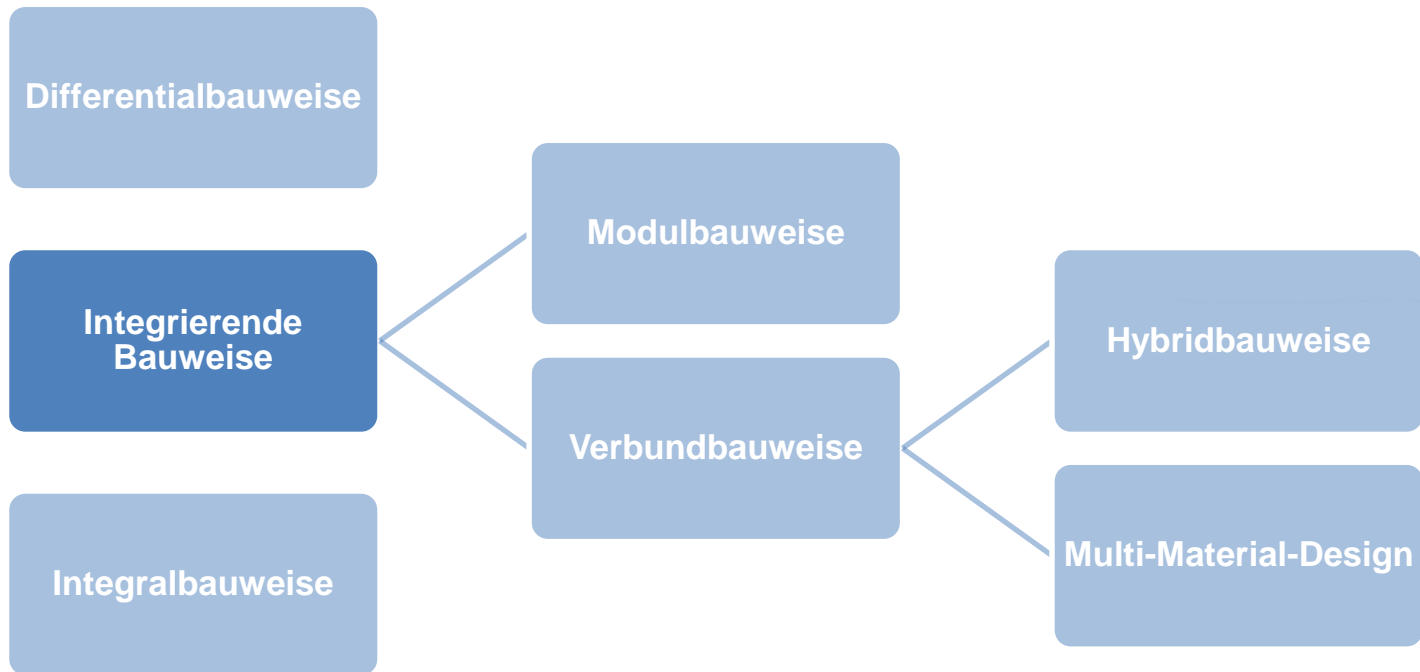
- 44%



- CFK-Bauteil
- 1 Teil
- Unterschiedliche Wandstärken je nach Bauteilbereich
- **2,59 kg**

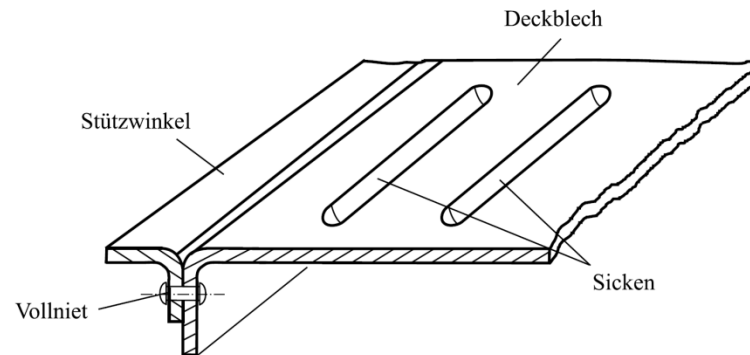
Quelle: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik / Friedrich

Bauweisen – Integrierende Bauweise



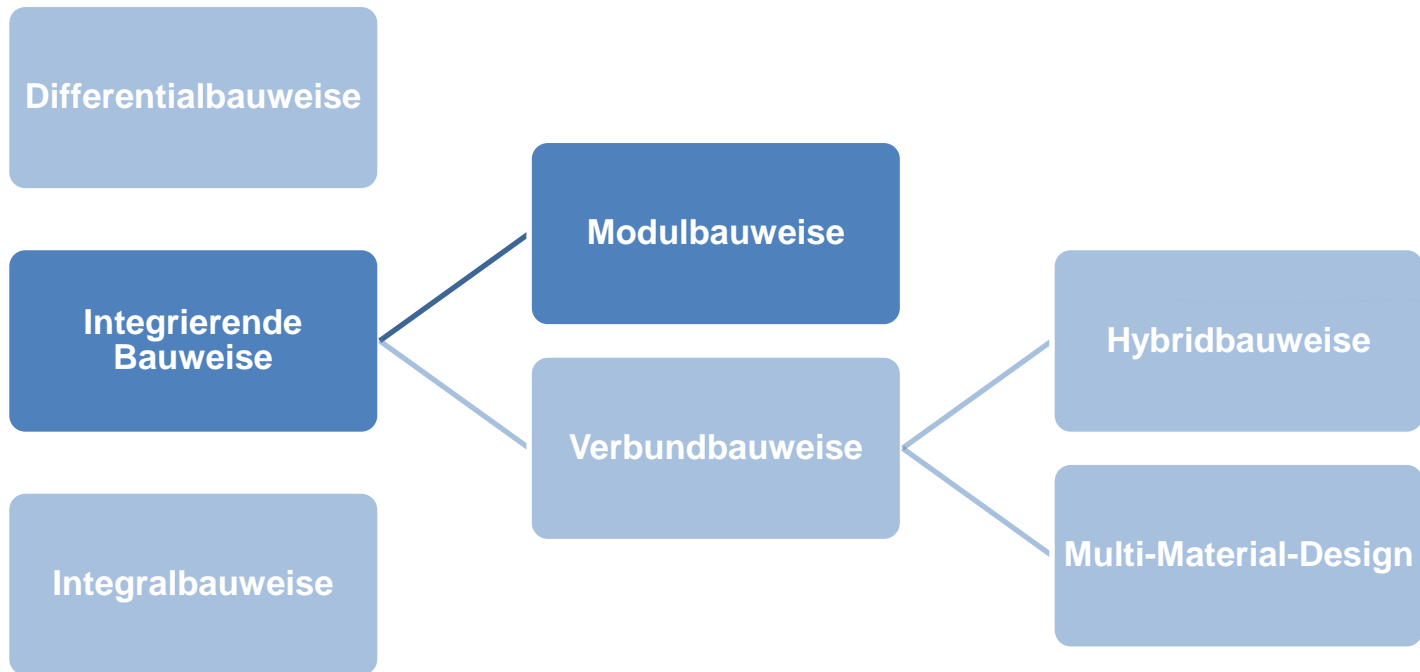
Bauweisen – Integrierende Bauweise

- Kompromiss zwischen Integral- und Differentialbauweise
- **Integration sinnvoll begrenzen** um Nachteile aufzulösen:
 - Schädigungsverhalten
 - Reparaturmöglichkeit
 - Austauschbarkeit
 - Recycling
- Bsp.: Sicken integriert, Stützwinkel als zusätzliches Bauteil



Quelle: Leichtbau - Konstruktion/ Klein

Bauweisen – Modulbauweise



➤ **Gesamtsystem in Teilsysteme aufgliedern**

➤ Modulbauweise nur auf Systemebene

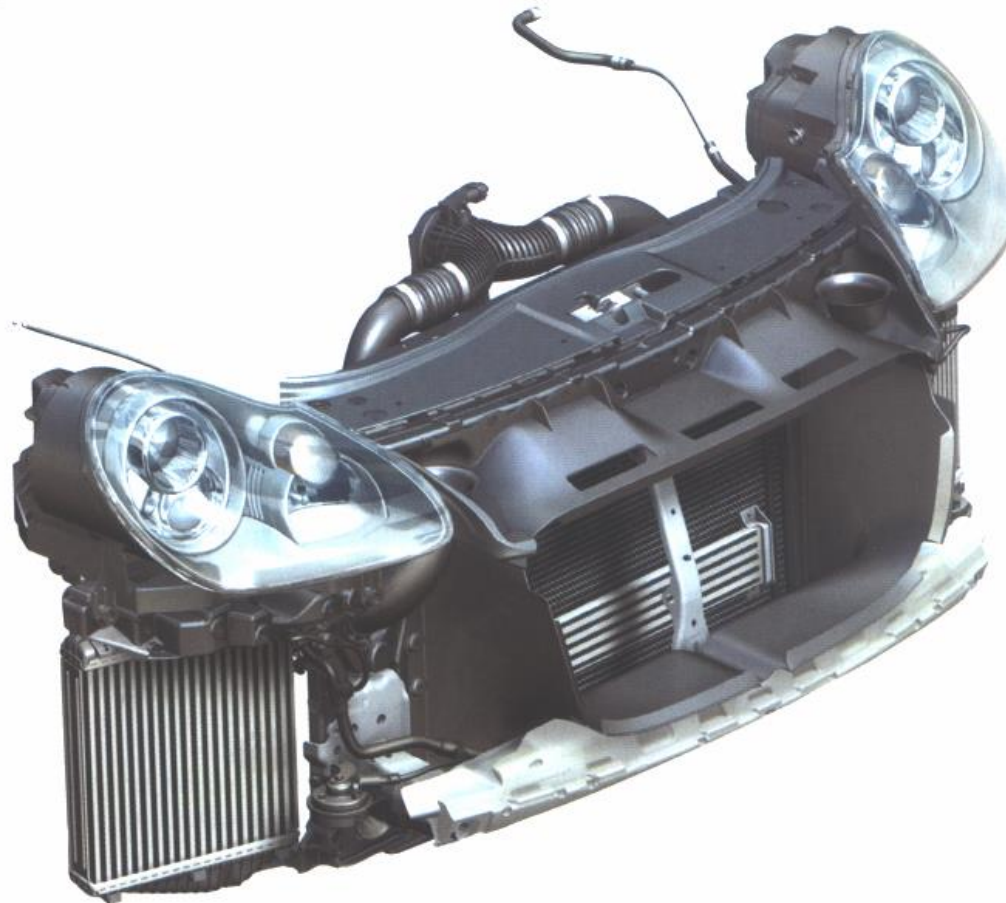
➤ Definition Modul:

Teilsystem, dessen Bauteile untereinander wesentlich stärker in Beziehung zueinander stehen, als zu Bauteilen anderer Teilsysteme

➤ Art der Beziehung:

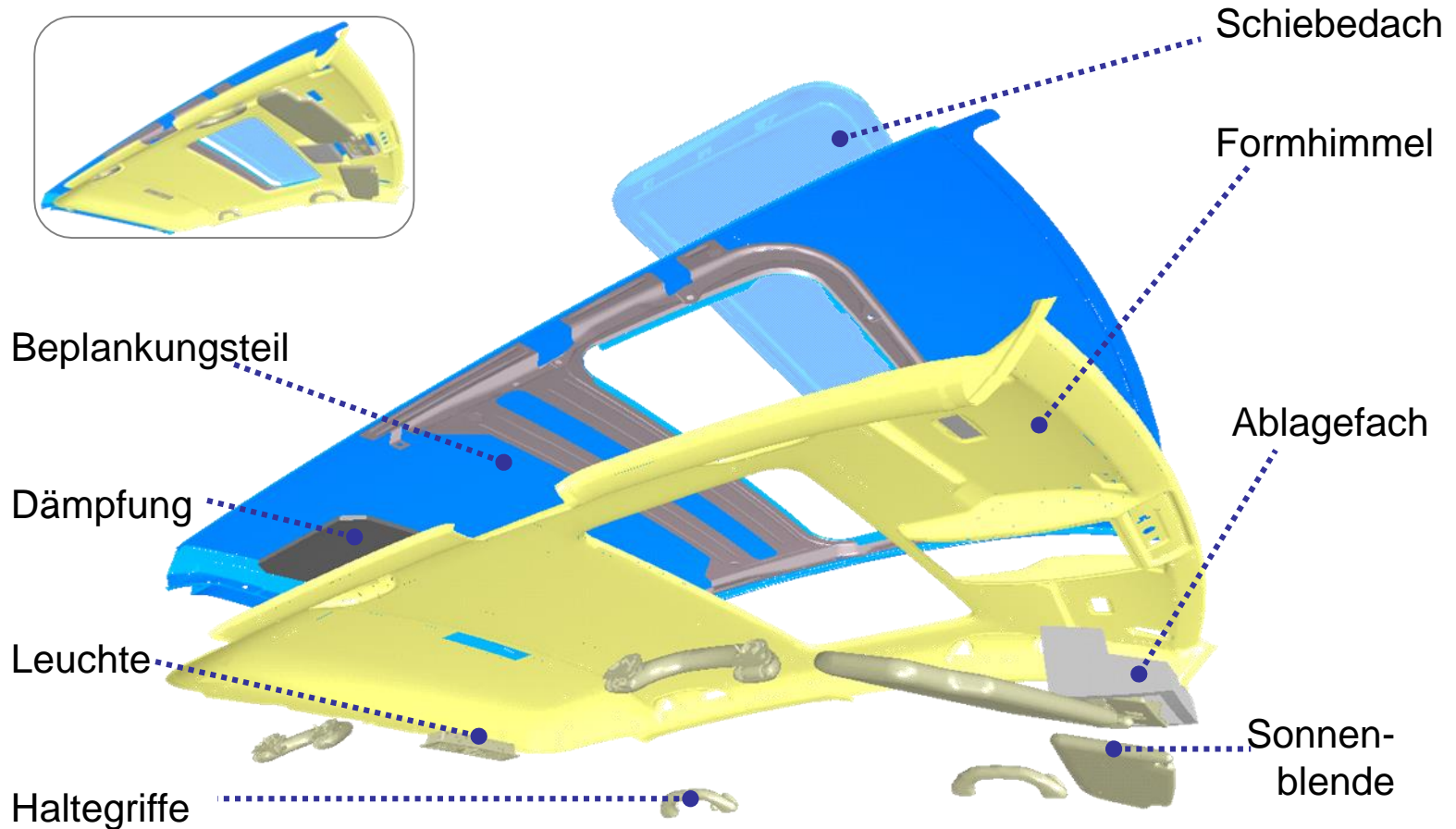
- Funktionsbezogen → Funktionsmodul (Bsp.: Klimaanlage)
- Prozessbezogen → Montagemodul (Frontend)
→ Entwicklungsmodul (Antriebsstrang)
- Strukturbezogen → Strukturmodul (Vorderwagen)

Frontend – Modul des Porsche Cayenne



Quelle: H. Eck u.a. in: Sonderausgabe ATZ+MTZ, Juli 2003

Dachmodul des VW Polo



Quelle: Volkswagen AG

Bauweisen – Modulbauweise

”Drive und Life Modul” des BMW i3



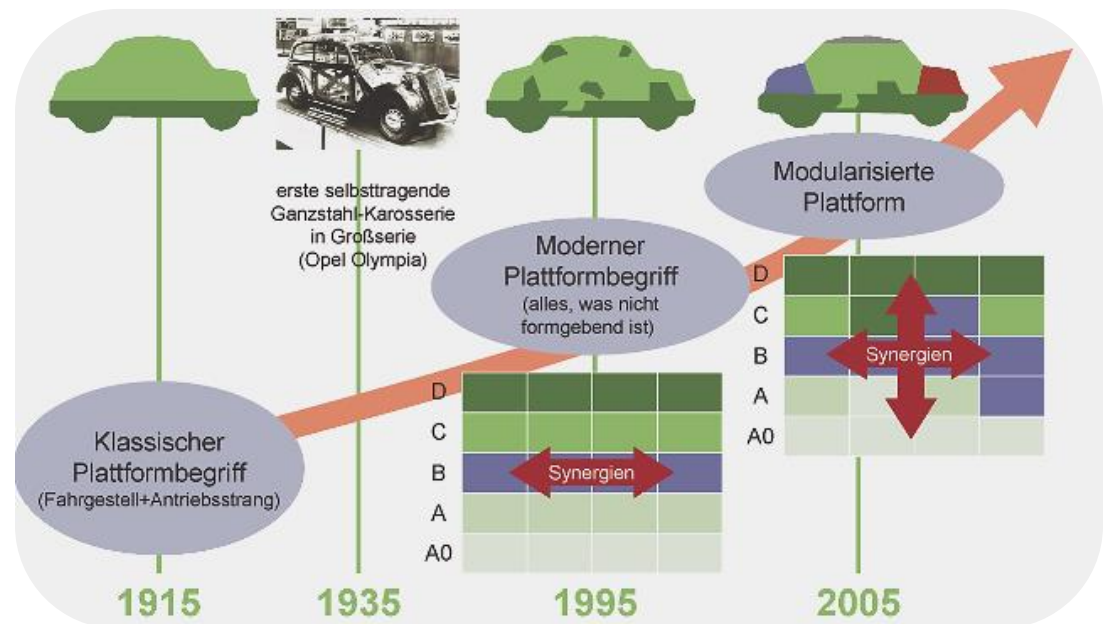
Bauweisen – Modulbauweise

➤ Modellübergreifende Module → Plattformen

- Senkung von Kosten und Entwicklungszeit
- Steigerung der Qualität durch Standardisierung der Module
- Optimierung des Komplexitätsgrades und der Variantenvielfalt

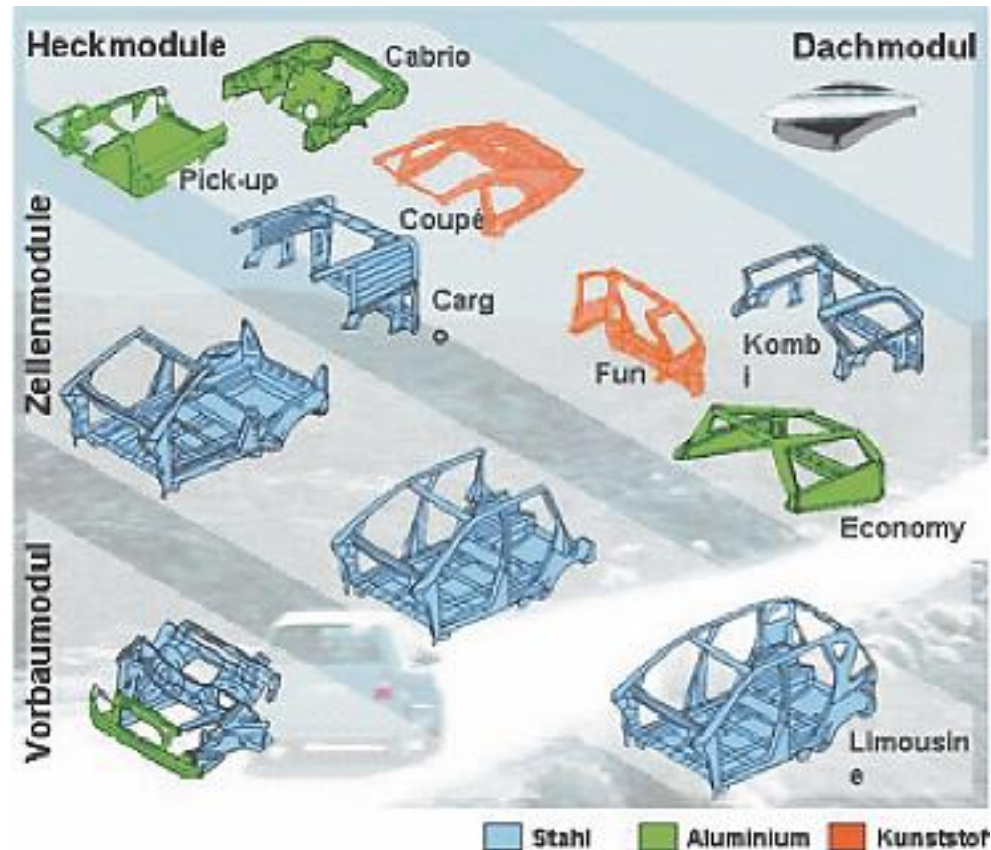
„Vom Kunden Wahrnehmbares wird individualisiert, Nicht-wahrnehmbares wird standardisiert.“

Quelle: Audi AG



Quelle: Schindler/ Forschung für das Auto von Morgen

Bauweisen – Modulbauweise



Quelle: Schindler/ Forschung für das Auto von Morgen

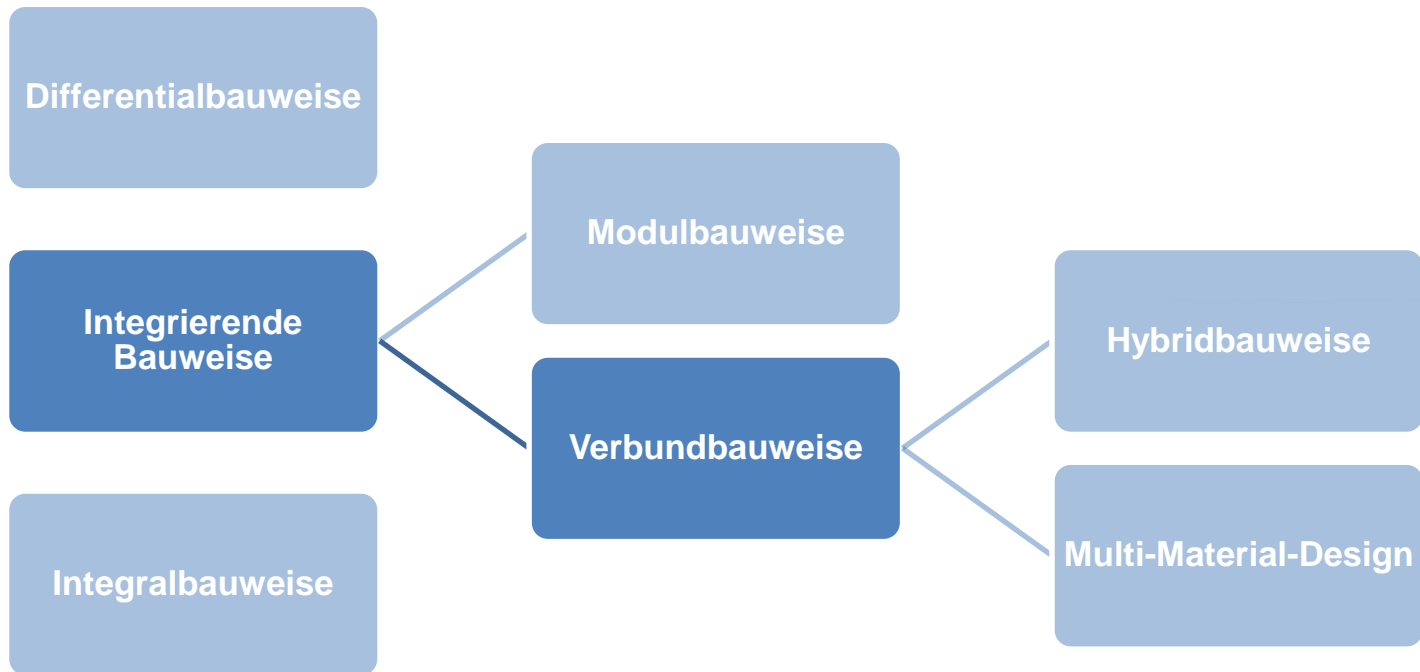
Bauweisen – Modulbauweise

Studie zu Karosserie-Plattformen



Quelle: CTI Conference 2013, Prof. J.H. Tomforde

Bauweisen – Verbundbauweise



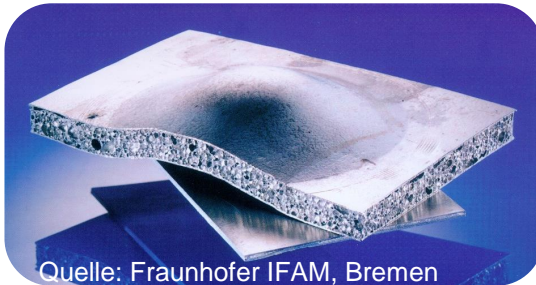
Bauweisen – Verbundbauweise

- **Verschiedene Werkstoffe** in einem Bauteil vereint
 - └ Ziel: reduzierte Masse bei gleichbleibenden oder verbesserten Eigenschaften
- Beispiele auf Werkstoffebene: Sandwichstrukturen oder Faserverbundwerkstoffe

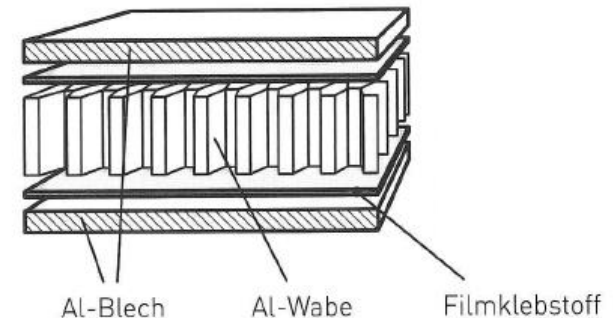
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▪ Gute Nutzung der Werkstoff-Eigenschaften▪ Materialeigenschaften können sich gegenseitig unterstützen und ergänzen▪ Hohes Leichtbaupotential▪ Hohe akustische und thermische Dämmung möglich	<ul style="list-style-type: none">▪ Hoher Fertigungs- und Fügeaufwand▪ Teilweise erhöhte Werkstoffkosten▪ Schlechte Fail-Safe-Eigenschaften▪ Komplexe Simulationsmodelle nötig▪ Komplexe Krafteinleitung▪ Recycling schwierig▪ Reparaturfähigkeit innerhalb der Bauteilgrenze

Verbundwerkstoff \longleftrightarrow Werkstoffverbund

Makroskopisch homogener Werkstoff aus mindestens zwei ineinander nicht löslichen Komponenten mit signifikant unterschiedlichen Eigenschaften. Es entsteht ein Werkstoff mit eigenem neuen Eigenschaftsprofil.



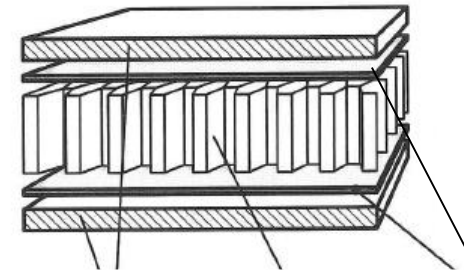
Zusammenführen unterschiedlicher Werkstoffe in einem Verbund, der die individuellen Werkstoffeigenschaften zu einer Funktionserfüllung kombiniert.



Bauweisen – Verbundbauweise – Sandwichstruktur

- **Kombination von tragenden, steifen Deckschichten geringer Dicke mit einem füllenden, schubsteifen Kernmaterial**

- Verbindung von Deckschichten und Kernmaterial über eine Klebeschicht



Deckschichten Kern Klebeschichten

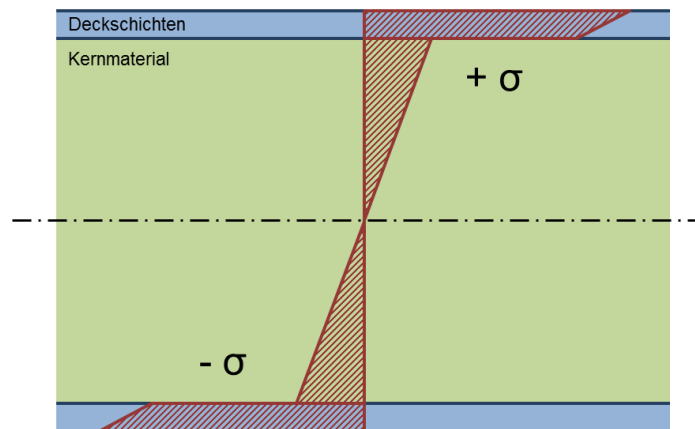
- Hauptmerkmale

- Last tragendes Material dort lokalisieren, wo die höchsten Lasten wirken
 - └ Verlagerung der tragenden Strukturanteile in die Randzone
 - └ Sandwich vor allem bei Biegebeanspruchung effektiv
- Ausführung der Kernschicht mit möglichst leichtem Material
- Ziel ist Steifigkeit und Tragfähigkeit bei möglichst geringem Gewicht zu optimieren

Quelle: Methodisches Konstruieren von Faserverbund – Strukturen / Hlems

Bauweisen – Verbundbauweise – Sandwichstruktur

- Ein Problem bei Sandwichmaterialien ist der große Spannungssprung zwischen den Deckschichten und dem Kernmaterial bei Biegebelastungen
 - Erfordert eine sehr schubfeste Verbindung zwischen Deckschicht und Kernmaterial



Biegespannungsverlauf in einer Sandwichstruktur

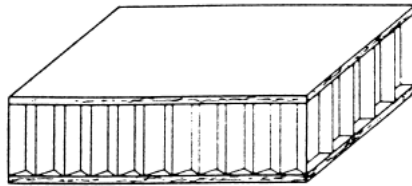
Bauweisen – Verbundbauweise – Sandwichstruktur

Bewertung von Sandwichstrukturen:

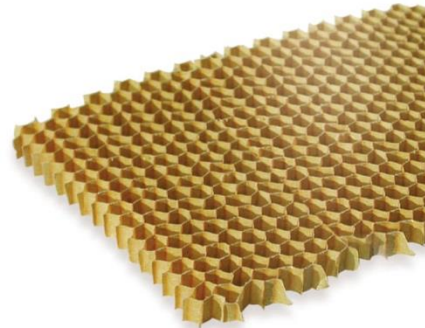
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▪ Sehr hohe spez. Biegesteifigkeit▪ Geringes Gewicht▪ Gute Dämpfungseigenschaften▪ Gute Schall- und Energieabsorption▪ Gute Wärmedämmung▪ Vielfältige Materialkombinationen möglich	<ul style="list-style-type: none">▪ Höherer Fertigungsaufwand▪ Haftung der Deckplatten an der Kernschicht meist über Klebstoff▪ Relativ schlechtes dynamisches Verhalten von Schäumen▪ Krafteinleitung schwierig▪ Nur bedingt reparaturfähig▪ Recycling schwierig<ul style="list-style-type: none">└ Bei unterschiedlichem Kern- und Deckmaterial▪ 3 dimensional gekrümmte Bauteile schwierig umsetzbar

Bauweisen – Verbundbauweise – Sandwichstruktur

Mögliche Kernmaterialien



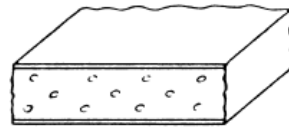
Waben



PUR - Schaumplatten

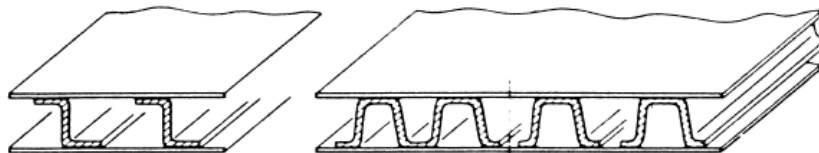


Holz



Schaumstoff

Kernmaterial: Balsa



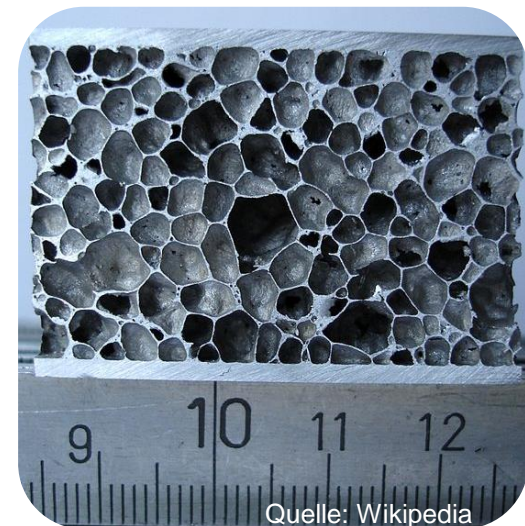
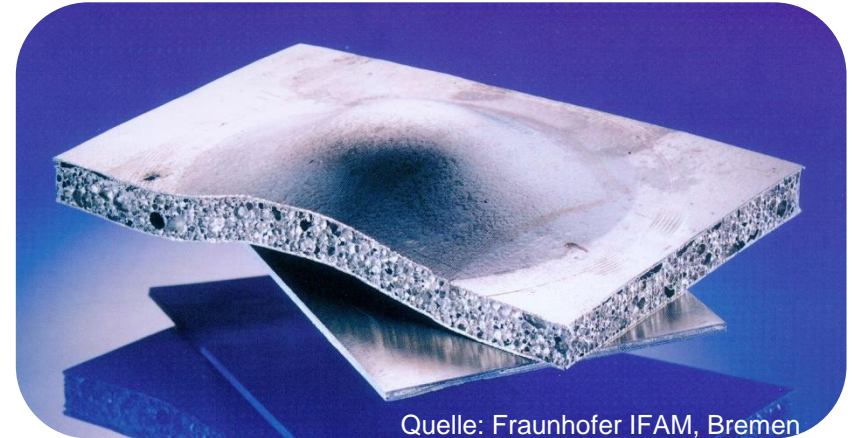
Profile

Quelle: FVW Handbuch, R und G, 2010

www.nauticexpo.de

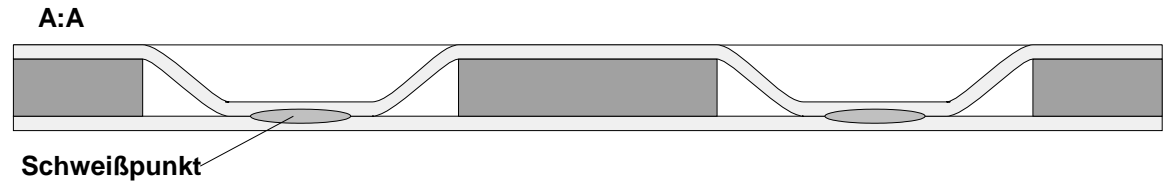
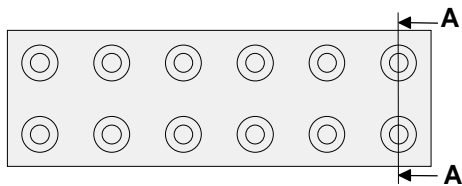
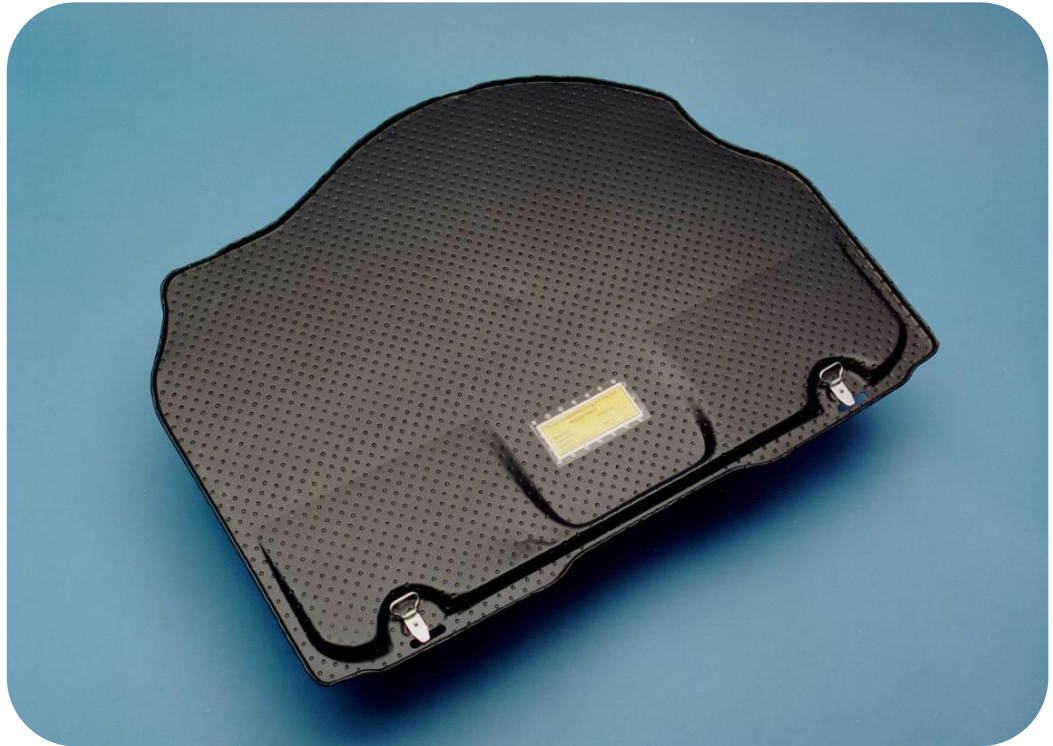
Integralschaum aus Aluminium

- Deck- und Kernmaterial werden innerhalb eines Prozesses gefertigt
- Vorteile
 - Kein Klebstoff zur Verbindung von Schaum und Deckschichten notwendig
 - Bis zu 50 % geringeres Gewicht als vergleichbares Stahlblech
 - Gute Schallabsorption ab etwa 800 Hz
 - Ca. 95 % bessere Wärmedämmung als massives Aluminiumblech



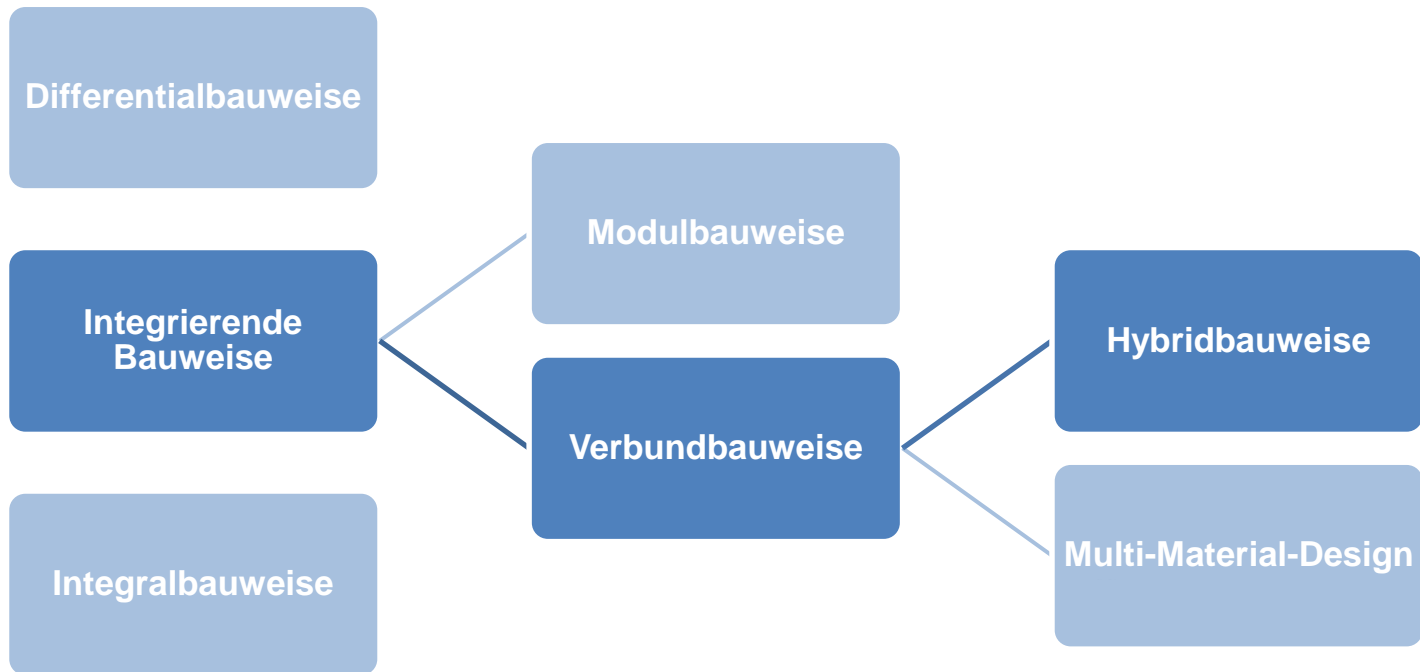
Bauweisen – Verbundbauweise – Sandwichstruktur

Abdeckung Reserveradmulde Golf Variant aus Noppenblech (Demonstrator)



Quelle: Volkswagen AG

Bauweisen – Hybridbauweise



Bauweisen – Hybridbauweise

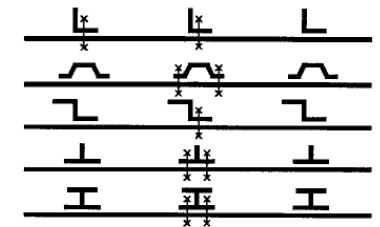
Definition von extrinsischer und intrinsischer Hybridisierung



www.siemens.ch

Fügen unterschiedlicher Bauteile nach deren Herstellung
→ post processing

Kalte und warme Fügeverfahren



Skript Composite Technologien, ETH Zürich

Zusammenführen unterschiedlicher Komponenten während der Bauteilherstellung

→ in-mold assembly

Einleger, metallische oder Endlosfasereinleger



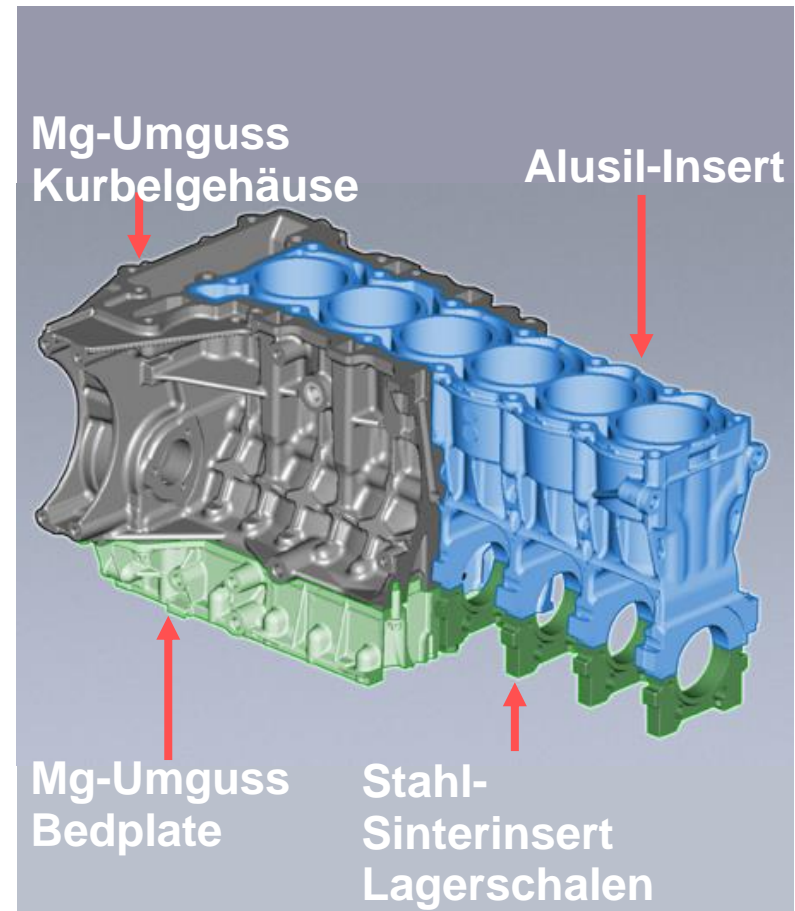
Fraunhofer ICT

Bauweisen – Intrinsische Hybridisierung

- Verschiedene Werkstoffe werden hauptsächlich im Prozess zusammengeführt (Ein Werkstoff wird i.d.R. im Urformverfahren des zweiten Werkstoffs integriert)
- Auf Bauteilebene
- Verbindung stoffschlüssig
- Hohes Leichtbaupotential
- Nachteile:
 - Hoher Fertigungsaufwand
 - Schadensbeurteilung und Reparaturfähigkeit
 - Hohe Korrosionsgefahr

BMW – Reihensechszylinder-Ottomotor

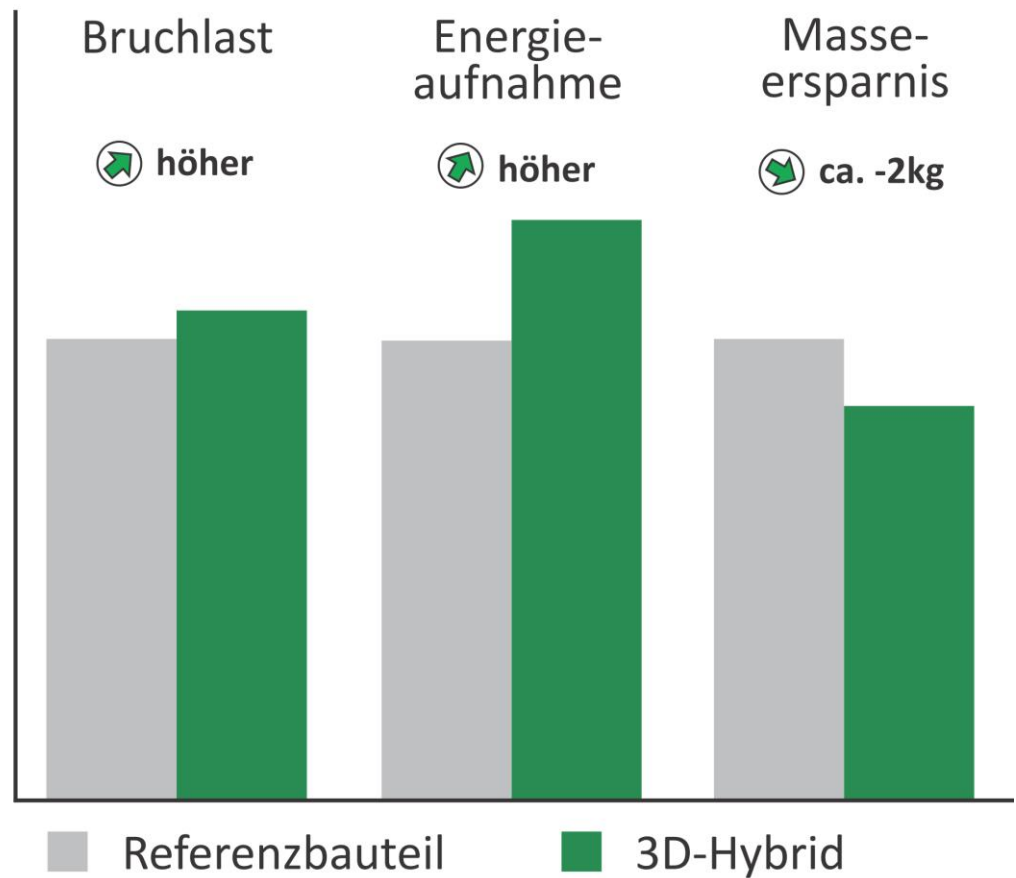
- 24 % leichter als ein vergleichbares Kurbelgehäuse aus Aluminium durch Einsatz vom Mg-Guss
- Alu-Insert
 - └ Präzise Zylinderlaufflächen
 - └ Besseres Kriechverhalten und thermische Belastbarkeit als Mg



MTZ: Konzept und Konstruktiver Aufbau, Klütting

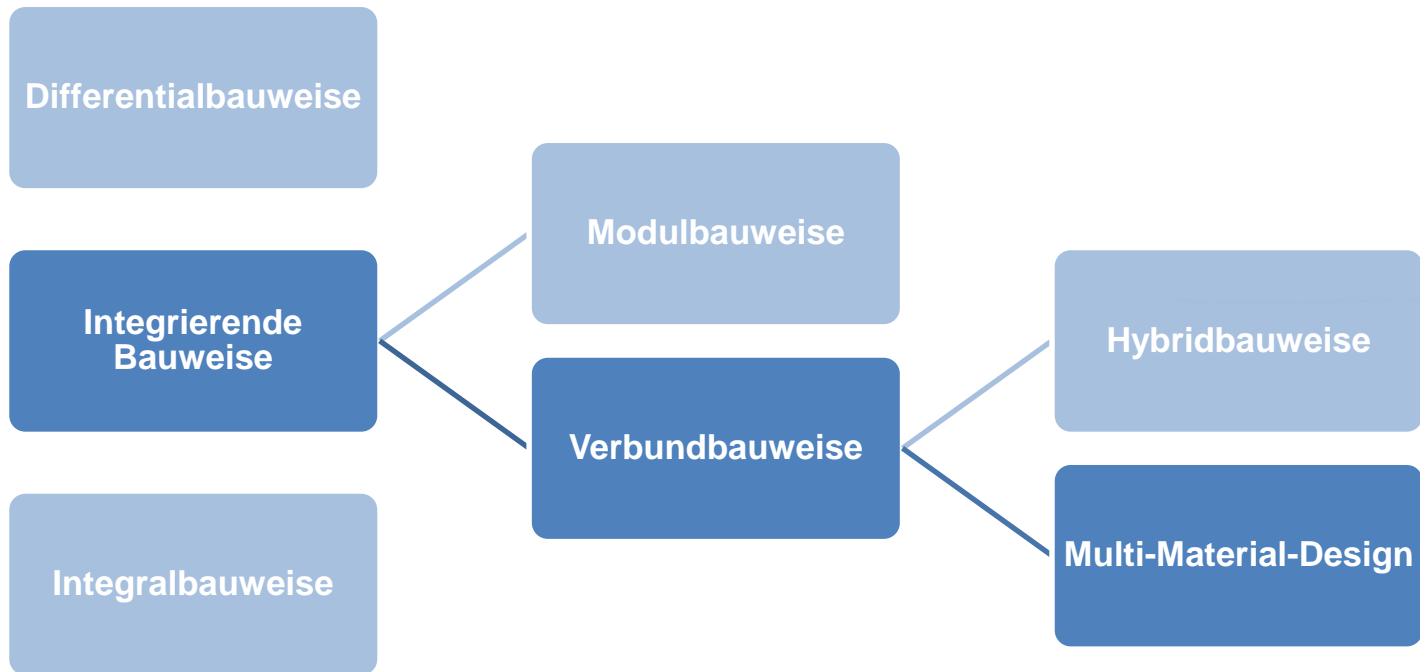
Bauweisen – Intrinsische Hybridbauweise

3D-Hybrid B-Säule



Forel Studie 2015

Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)



Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

- Multi-Material-Design ist eine **produktbezogene, sinnvolle Kombination** von Werkstoffen und **deren werkstoffgerechte Konstruktion/ Bauweise** sowie der Integration in eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Gesamtstruktur
- Konsequente Weiterentwicklung der Hybridbauweise
- Auf Systemebene
- Verschiedene Werkstoffe können mit **allen Fügeverfahren** gefügt werden



Bisher existiert noch kein Fahrzeug, bei dem das MMD konsequent und ganzheitlich angewandt wurde.

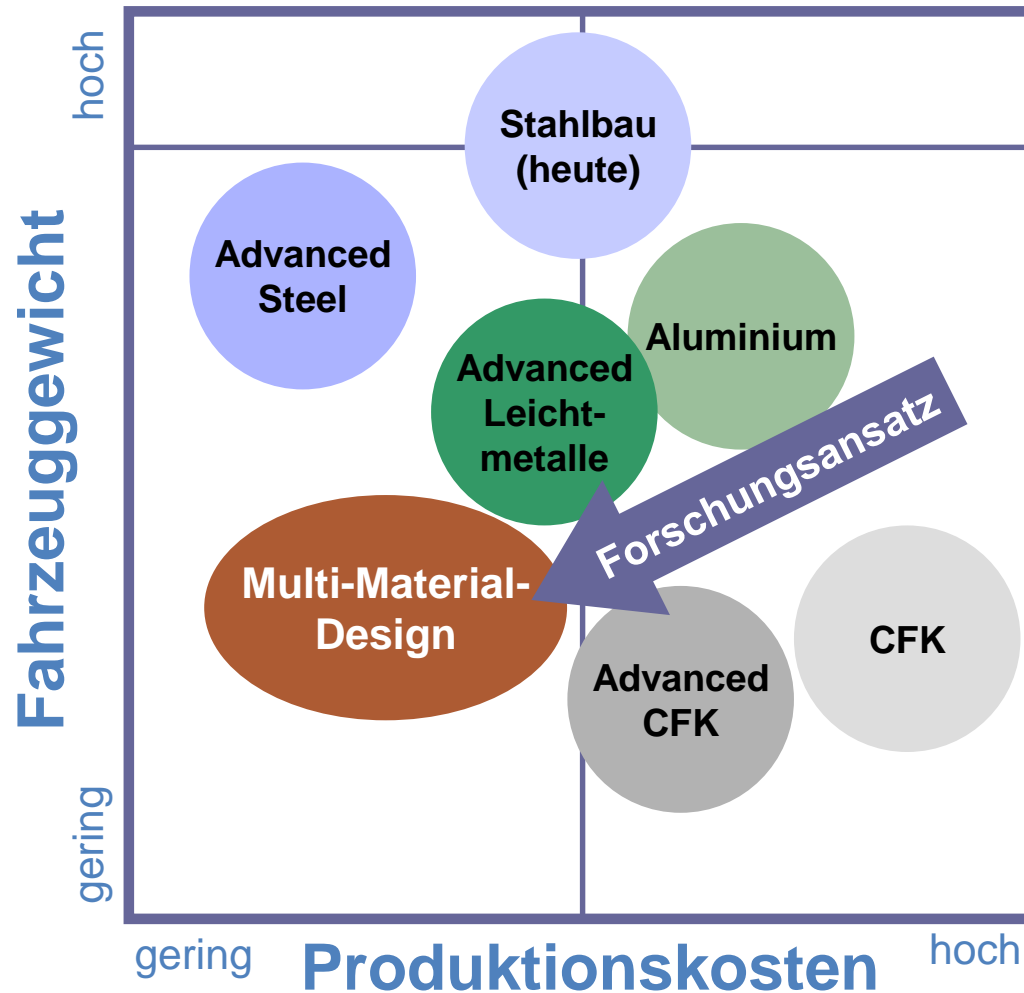


Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

Bewertung des MMD:

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▪ Ideale Nutzung der Werkstoffeigenschaften▪ Materialeigenschaften können sich gegenseitig unterstützen und ergänzen▪ Höchstes Leichtbaupotential▪ (Kosten)	<ul style="list-style-type: none">▪ Hoher Fertigungs- und Fügeaufwand▪ Schadensbeurteilung aufwendiger▪ Komplexe Simulationsmodelle erforderlich▪ Korrosionsgefahr an den Fügstellen▪ Recycling schwieriger▪ Unterschiedliche Wärmeausdehnungen

Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

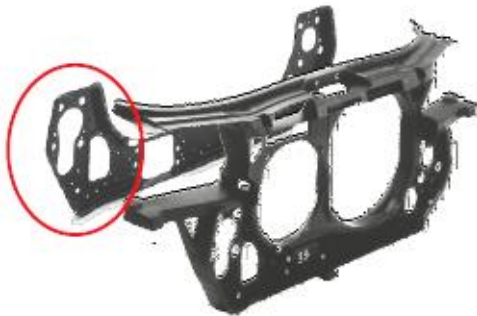


EU Vorhaben Super Light Car

Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

Optimierung der einzelnen Materialien, der Materialkombination, sowie Gestaltoptimierung am Beispiel von PKW – Frontends

Serienstart: 1997



- Stahlblech (1.5 mm)
- überspritzt mit GFK (30 Gew.%)

→ ca. 30 %
Gewichtseinsparung zur
Stahlvariante

2005



- Alu- (1.2 mm) und
Stahlbleche (0.8 mm)
- überspritzt mit GFK (30
Gew.%)

→ ca. 15 %
Gewichtseinsparung zur
1997 - Variante

2012



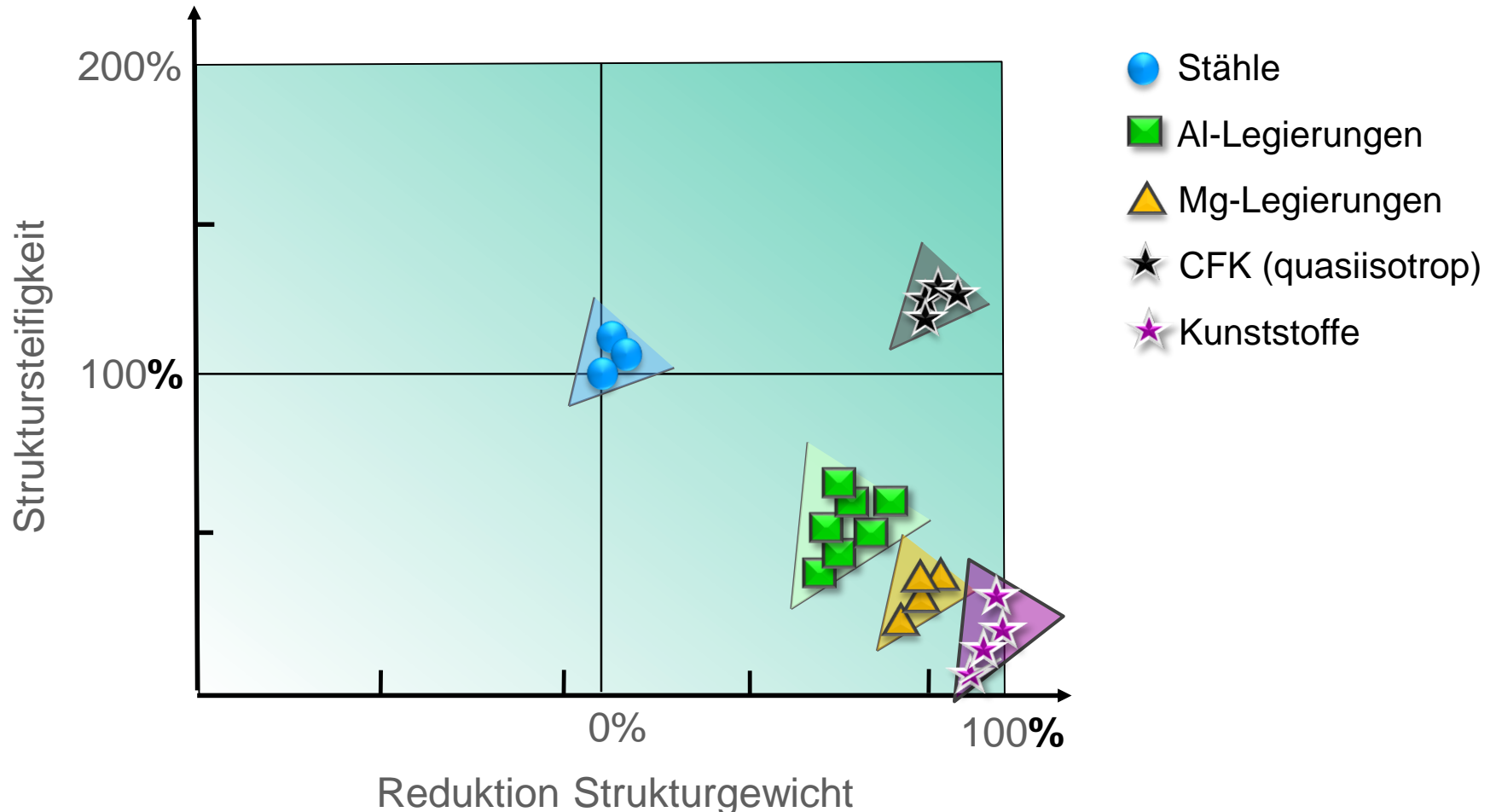
- Alu- (1.0 mm) und
Stahlbleche (0.7 mm)
- überspritzt mit GFK (60
Gew.%) (High Modulus
Polymer)

→ ca. 15 %
Gewichtseinsparung zur
2012 - Variante

Quelle: Lanxess, CTI Konferenz 2013

Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

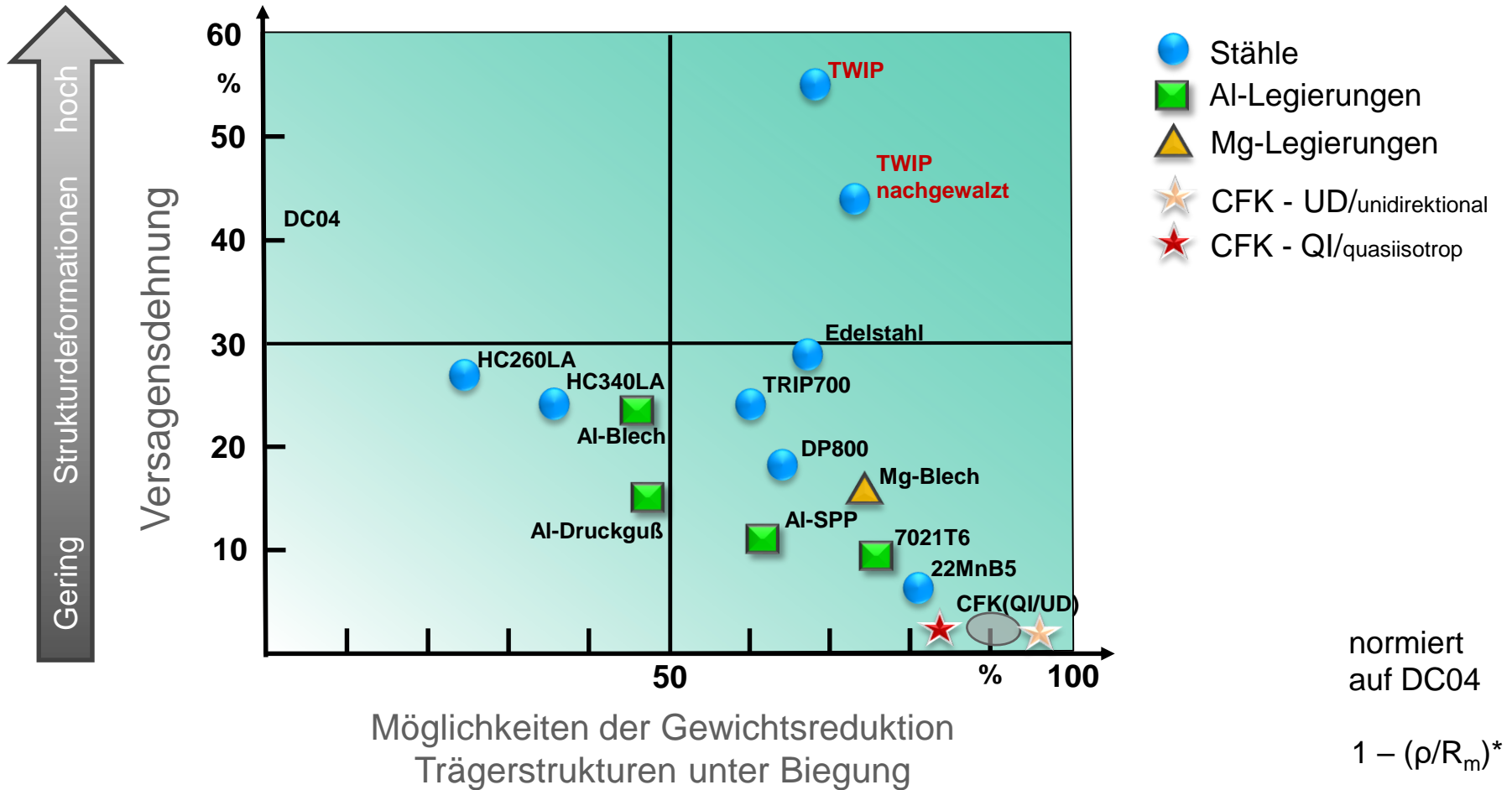
Prämissen Materialauswahl → Akustik und Schwingungen (NVH)



Ulrich Mellinghoff, Daimler AG, Werkstoffsymposium Stuttgart, 25.-26. Juni 2009

Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

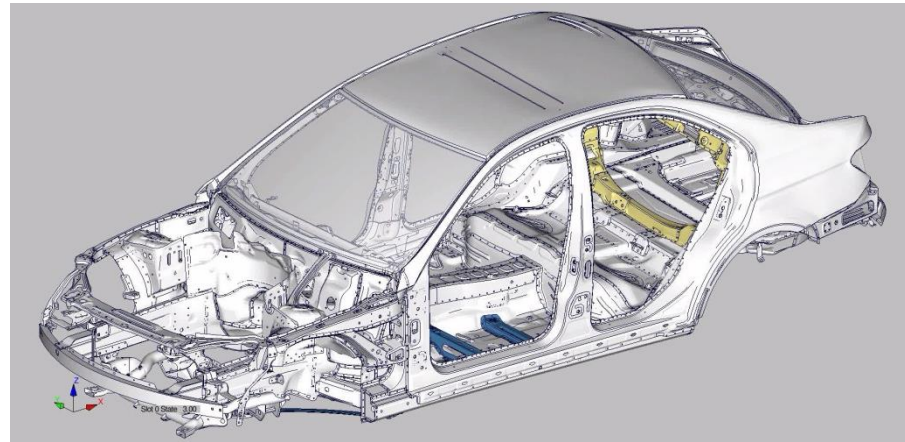
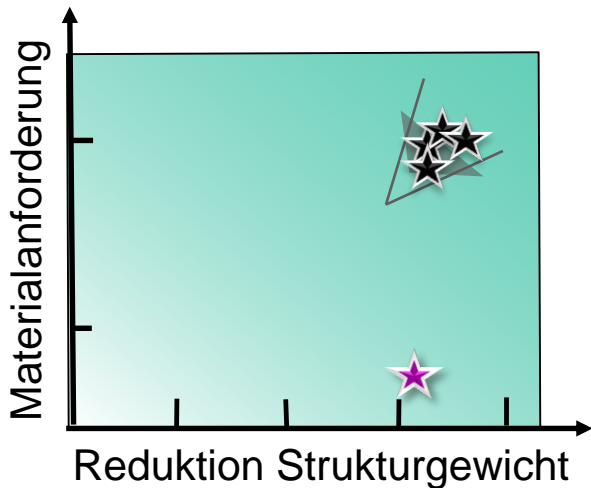
Prämissen Materialauswahl → Passive Sicherheit



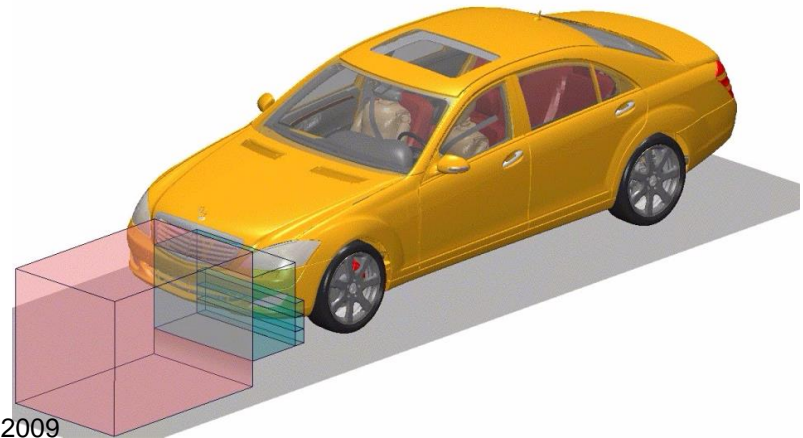
Ulrich Mellinghoff, Daimler AG, Werkstoffsymposium Stuttgart, 25.-26. Juni 2009

Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

Unterschiedliche Funktionsanforderungen an Materialien erfordern spezifische Maßnahmen



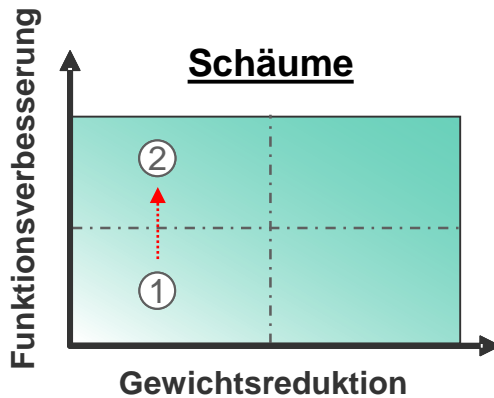
- ★ CFK – Bewertung Akustik und Schwingungen (NVH)
→ Struktursteifigkeit
- ★ CFK – Bewertung Passive Sicherheit
→ Versagensdehnung



Ulrich Mellinghoff, Daimler AG, Werkstoffsymposium Stuttgart, 25.-26. Juni 2009

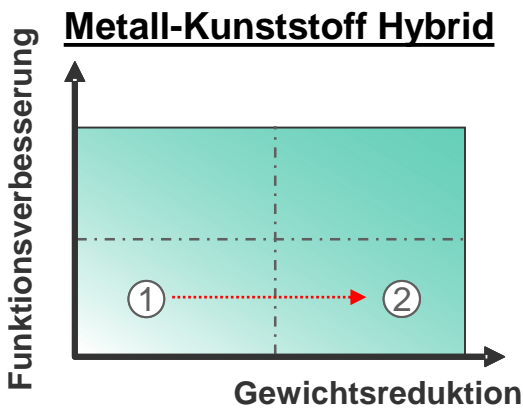
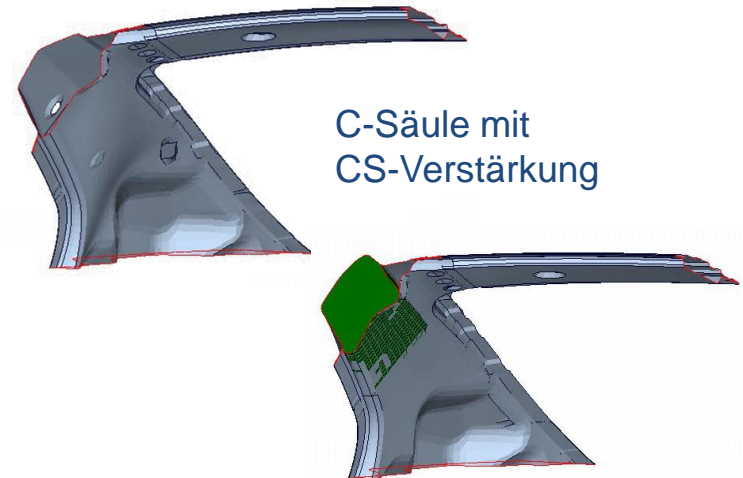
Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

Technische Lösungen Leichtbau für Funktion Akustik/Schwingungen ohne Einschränkung Passive Sicherheit



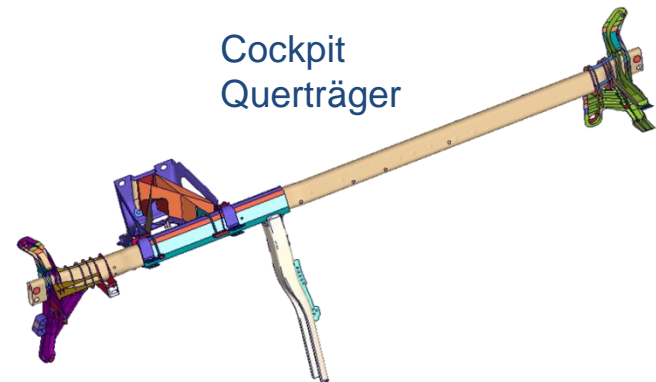
Gewicht:
Beibehaltung des Gewichtsziels

Funktion:
Erhöhung der Steifigkeit und Absenkung des Schalldruckpegels



Gewicht:
Gewichtsreduktion um 0,7 kg je Biegequerträger

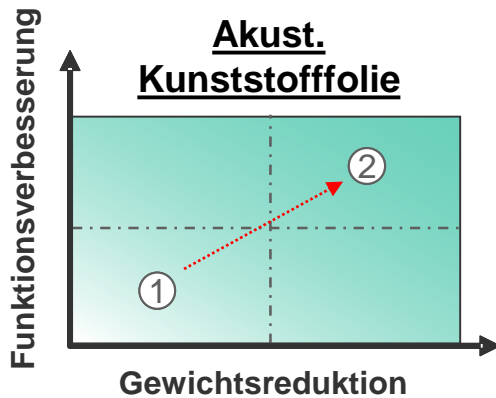
Funktion:
Beibehaltung des Eigenschwingverhaltens



Ulrich Mellinghoff, Daimler AG, Werkstoffsymposium Stuttgart, 25.-26. Juni 2009

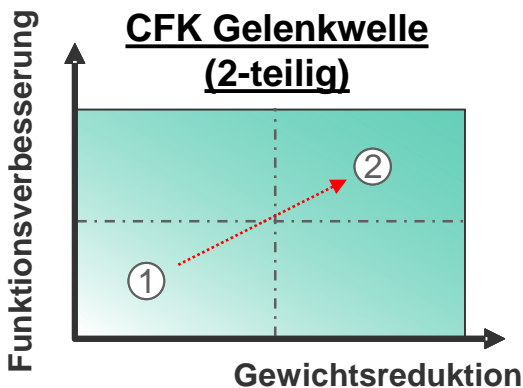
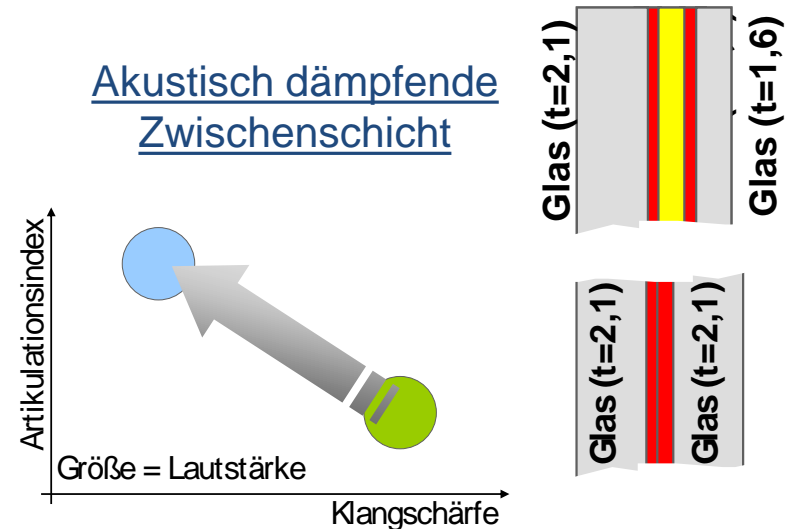
Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

Technische Lösungen Leichtbau für Funktion Akustik/Schwingungen ohne Einschränkung Passive Sicherheit



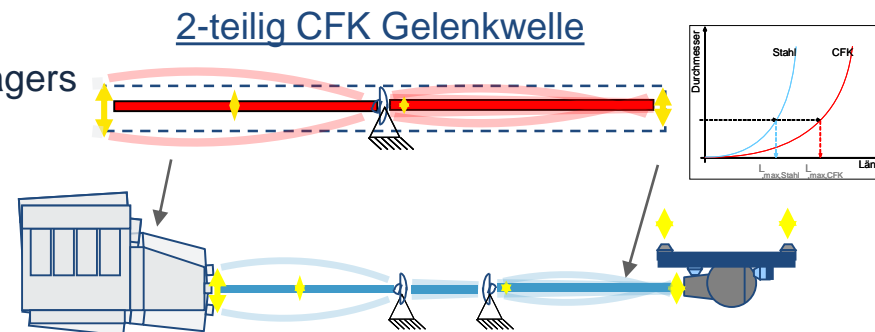
Gewicht:
Gewichtsvorteil (12% zur Serie)

Funktion:
Zunahme des akustischen Komforts



Gewicht:
Gewichtsvorteil durch Entfall des Zwischenlagers

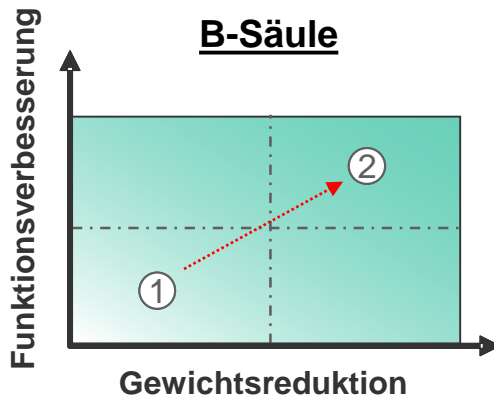
Funktion:
Verbesserung der mechanischen Eigenschaften



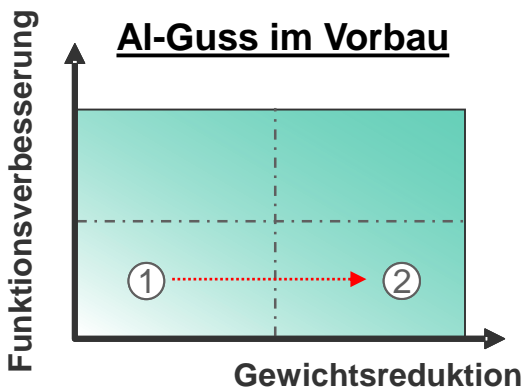
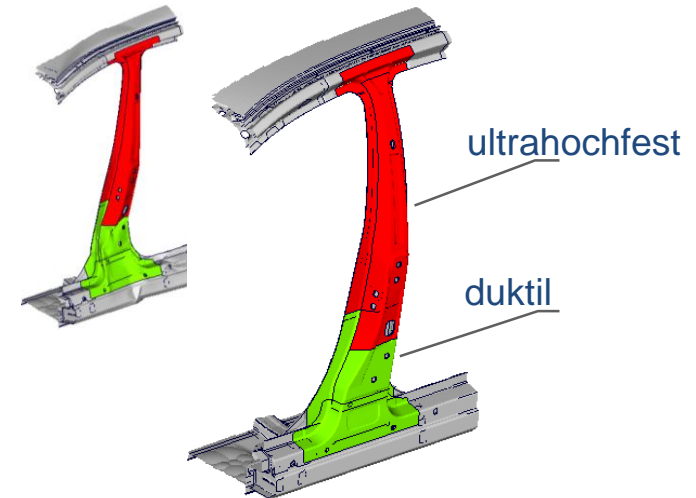
Ulrich Mellinghoff, Daimler AG, Werkstoffsymposium Stuttgart, 25.-26. Juni 2009

Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

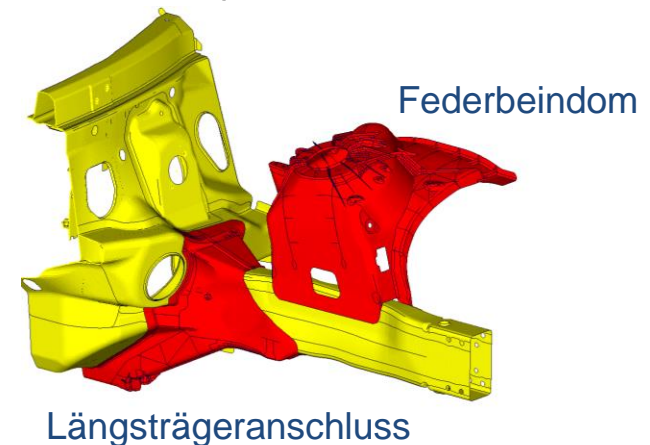
Technische Lösungen Leichtbau für Funktion Passive Sicherheit ohne Einschränkung Akustik/Schwingungen



Gewicht:
ca. 4 - 6 kg je Fahrzeug
Funktion:
Optimierung
Seitencrashverhalten,
Intrusionsverhalten,
Strukturintegrität



Gewicht:
ca. 10 kg je Fahrzeug
Funktion:
Funktionsintegration durch
Guss,
Optimierung Steifigkeit,
Festigkeit



Ulrich Mellinghoff, Daimler AG, Werkstoffsymposium Stuttgart, 25.-26. Juni 2009

Bauweisen – Multi-Material-Design (MMD)

Vergleich der Verbundbauweisen:

	Multi-Material-Design	Hybridbauweise
Wirkungsebene	<ul style="list-style-type: none">▪ Systemebene	<ul style="list-style-type: none">▪ Bauteilebene
Fügeverfahren	<ul style="list-style-type: none">▪ Alle Fügeverfahren<ul style="list-style-type: none">- Urformen- Umformen- Fügen- Hybridfügen	<ul style="list-style-type: none">▪ Intrinsische Fügeverfahren<ul style="list-style-type: none">- Urformen- Umformen
Werkstoffe	<ul style="list-style-type: none">▪ Alle Konstruktionswerkstoffe	<ul style="list-style-type: none">▪ Intrinsisch miteinander verarbeitbare Konstruktionswerkstoffe
Leichtbaupotential	<ul style="list-style-type: none">▪ Sehr hoch	<ul style="list-style-type: none">▪ Hoch

Fahrzeugleichtbau – Strategien, Konzepte, Werkstoffe

2. Leichtbaustrategien und Bauweisen

2.1 Leichtbaustrategien

2.2 Allgemeine Bauweisen

2.3 Karosseriebauweisen

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Anforderungen an die Karosserie

- Aufnahme der Fahrzeugbetriebslasten (z.B. Motor) sowie statischen Lasten (Zuladung, Insassen)
- Ausreichende Schwingfestigkeit während der Betriebsphase
- Zulässige Verdreh- und Biegesteifigkeiten
- Zulässige Beulsteifigkeit und -festigkeit
- Aufnahme von Beanspruchungen während der Produktion
- Korrosionsschutz
- Definiertes Energieabsorptionsvermögen und Versagensverhalten im Crashfall
 - └ Fahrzeuge mit kurzem Vorbau möglichst steif
 - └ Fahrzeuge mit langem Vorbau möglichst mit hohem Energieabsorptionsvermögen

Karosseriebauweisen – Anforderungen und Bewertung

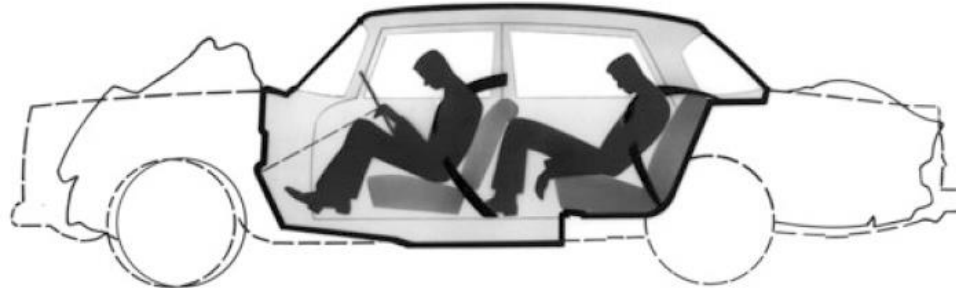
Kurzer Vorbau



Langer Vorbau



- Bei beiden Varianten muss im Crash Fall ein Überlebensraum (Safty Box) gewährleistet sein



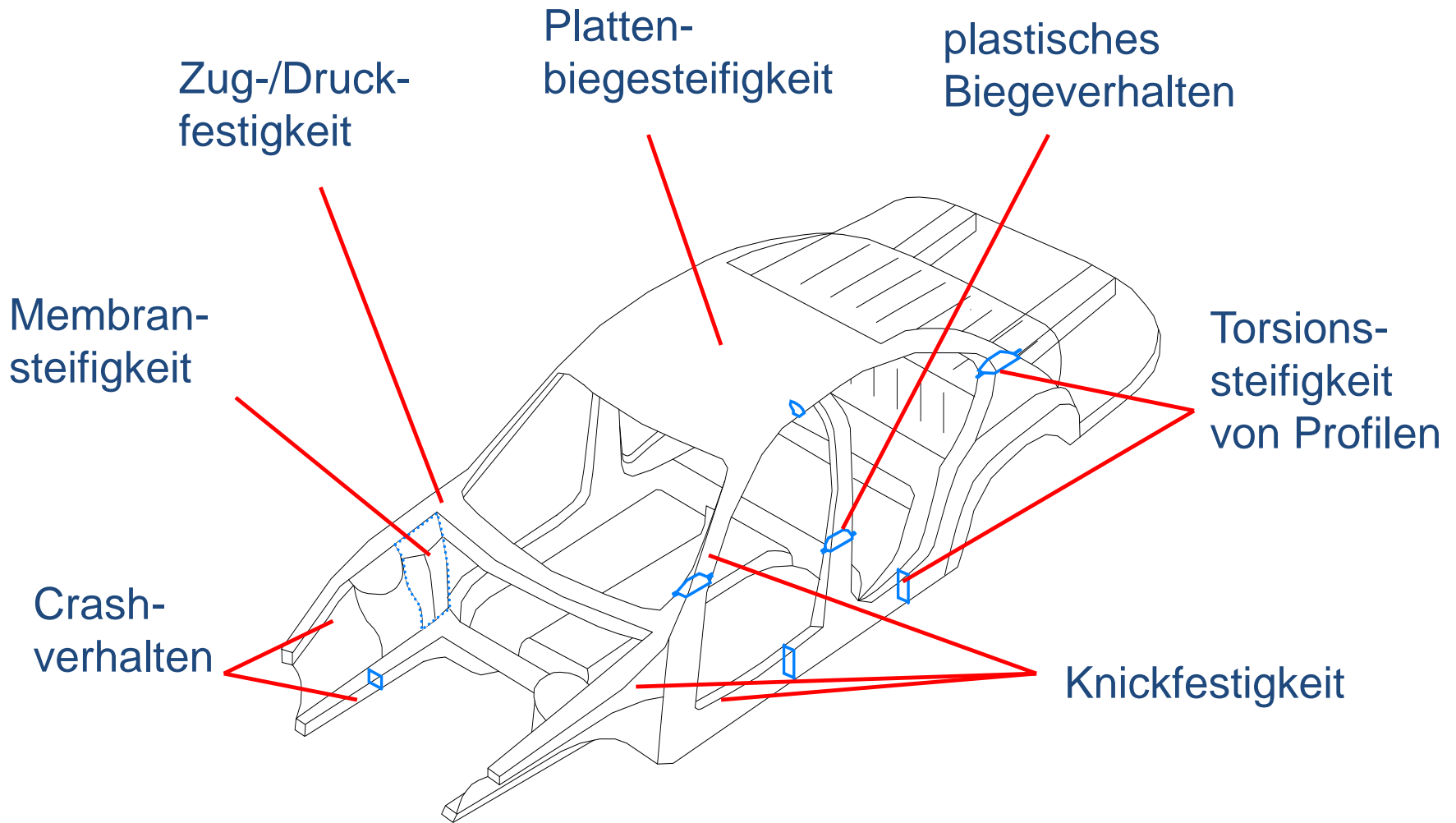
Quelle: KLT Group, CTI Konferenz, 2013

Quelle: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Klein

- **Auslegung von Karosserie-Rohbaustrukturen** und Anbauteilen nach...
 - Steifigkeit (geringe Beanspruchungsdichte)
 - Knickstabilität
 - Festigkeit (hohe Beanspruchungsdichte)
 - Arbeitsaufnahme-, Energieaufnahmevermögen

- **Beanspruchungsdichte**
 - Im Leichtbau als **Strukturkennwert** bezeichnet ist das Verhältnis der aufgetragenen Last zur geometrischen Vorgabe (Länge, Durchmesser, Dicke,...)

Karosseriebauweisen – Anforderungen und Bewertung



Quelle: ika, RWTH Aachen

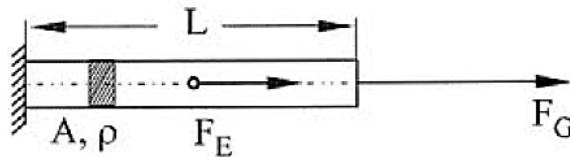
Leichtbaukennzahlen

- Eine Leichtbaukennzahl stellt das Verhältnis von Traglast F_G zur Eigenlast F_E dar:

$$LBK = \frac{F_G}{F_E}$$

- Es können Leichtbaukennzahlen für einzelne Strukturelemente oder für komplette Strukturen definiert werden

Beispiel Zugbeanspruchung eines Strukturelements



$$\rightarrow F_G = A \cdot R_{p0,2}$$

Eigenlast des Zugstabes: $F_E = \rho \cdot g \cdot A \cdot L$

$$\rightarrow LBK = \frac{R_{p0,2}}{\rho \cdot g \cdot L}$$

Maximale Belastung: F_G aus $\sigma_B \leq R_{p0,2}$

Bildquelle: Lüdke, BMW AG, 1999

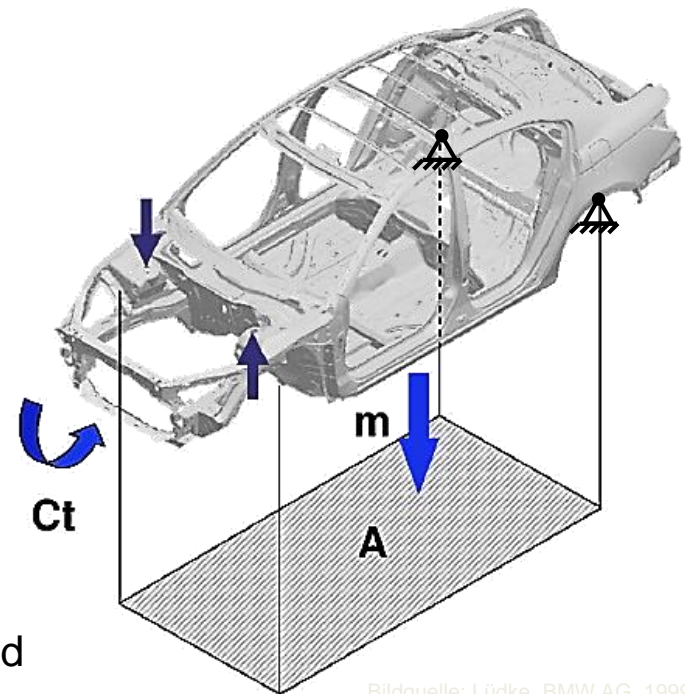
Karosseriebauweisen – Anforderungen und Bewertung

Leichtbaukennzahlen

- Für Karosseriestrukturen
 - ↳ Je kleiner der Zahlenwert der Leichtbaugüte ist, desto effizienter setzt eine Karosseriestruktur Gewicht in Steifigkeit um.

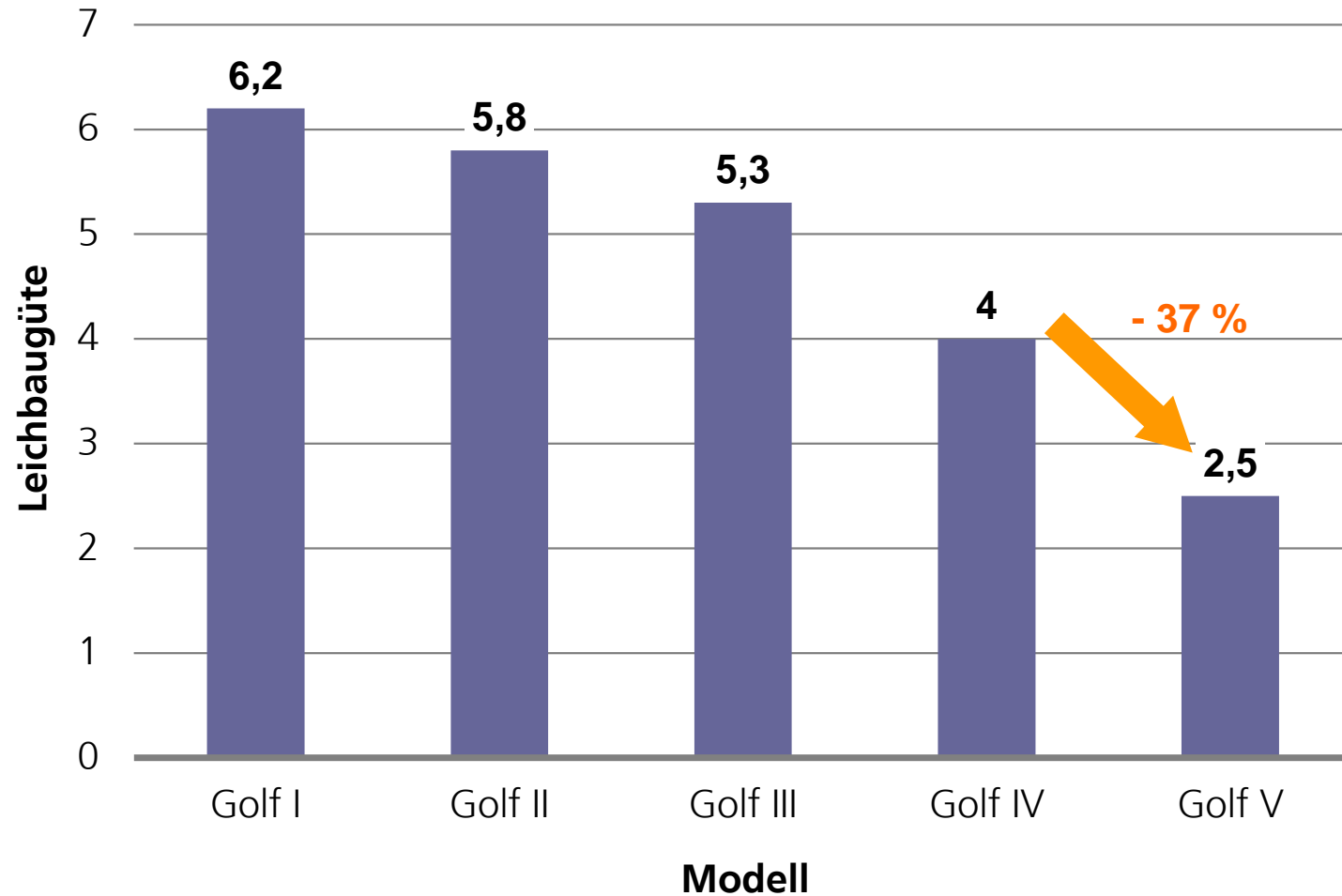
$$L = \frac{m_{\text{RK}}}{C_T \cdot A}$$

- L → Leichtbaugüte
- m_{RK} → Masse der Rohkarosserie
(ohne Türen und Klappen)
- C_T → Torsionsmoment pro Drehwinkel
- A → Aufstandsfläche = Spurweite x Radstand



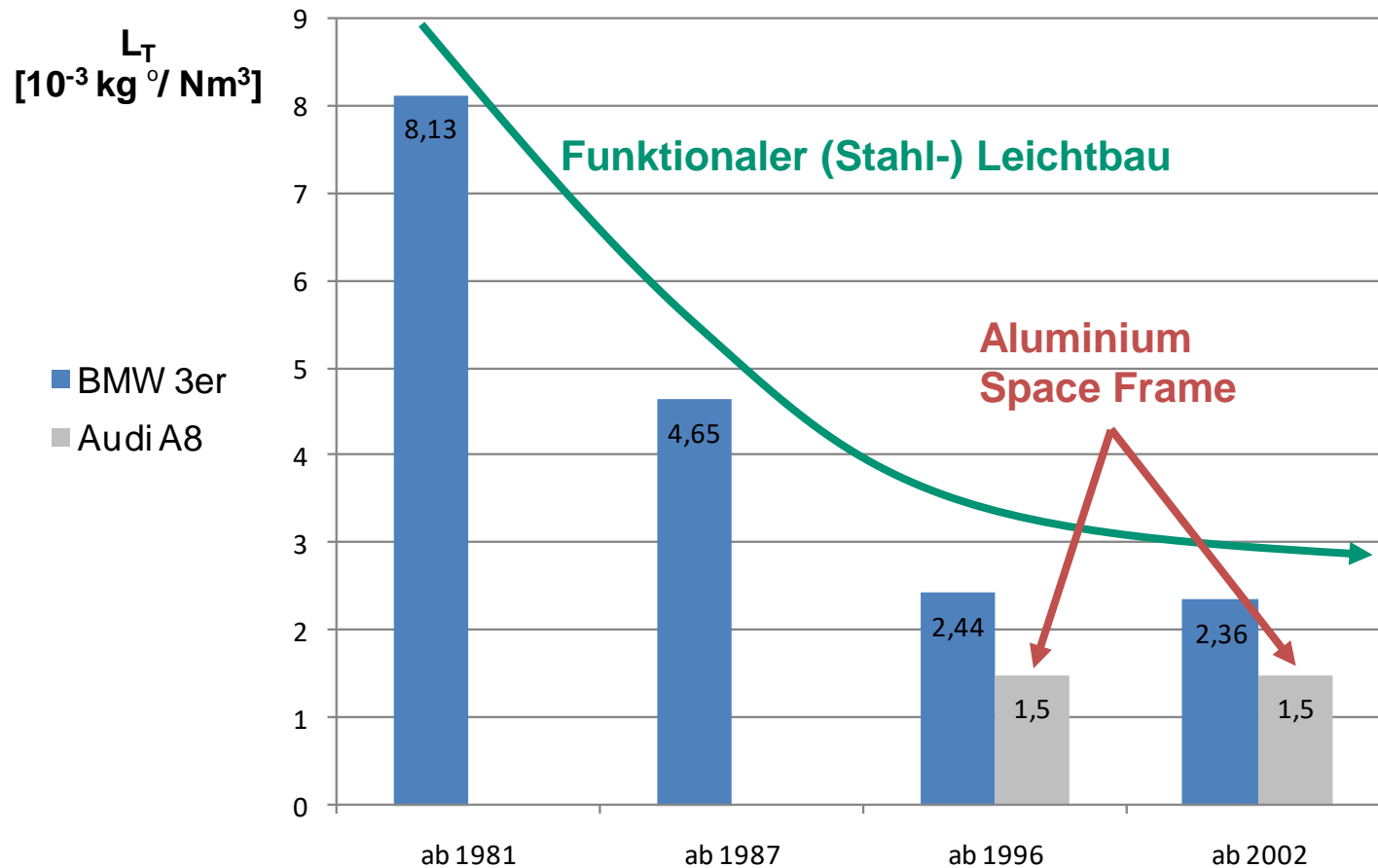
Bildquelle: Lüdke, BMW AG, 1999

Karosseriebauweisen – Anforderungen und Bewertung



Quelle: Sonderausgabe ATZ und MTZ, Oktober 2003 „Der neue GolfV“

Karosseriebauweisen – Anforderungen und Bewertung



Uni Paderborn, Tröster

Karosseriebauweisen – Überblick

Karosseriebauweisen

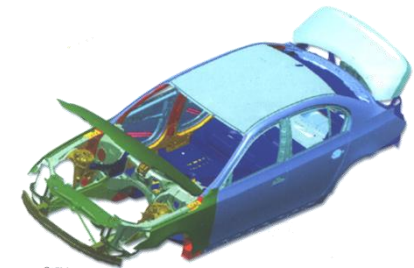
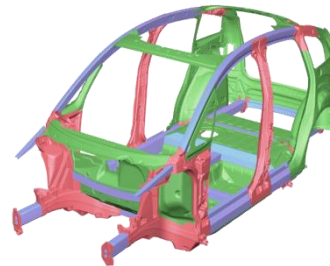
Rahmenbauweisen

Schalenbauweise

Space-Frame

Monocoque

Mischbauweise



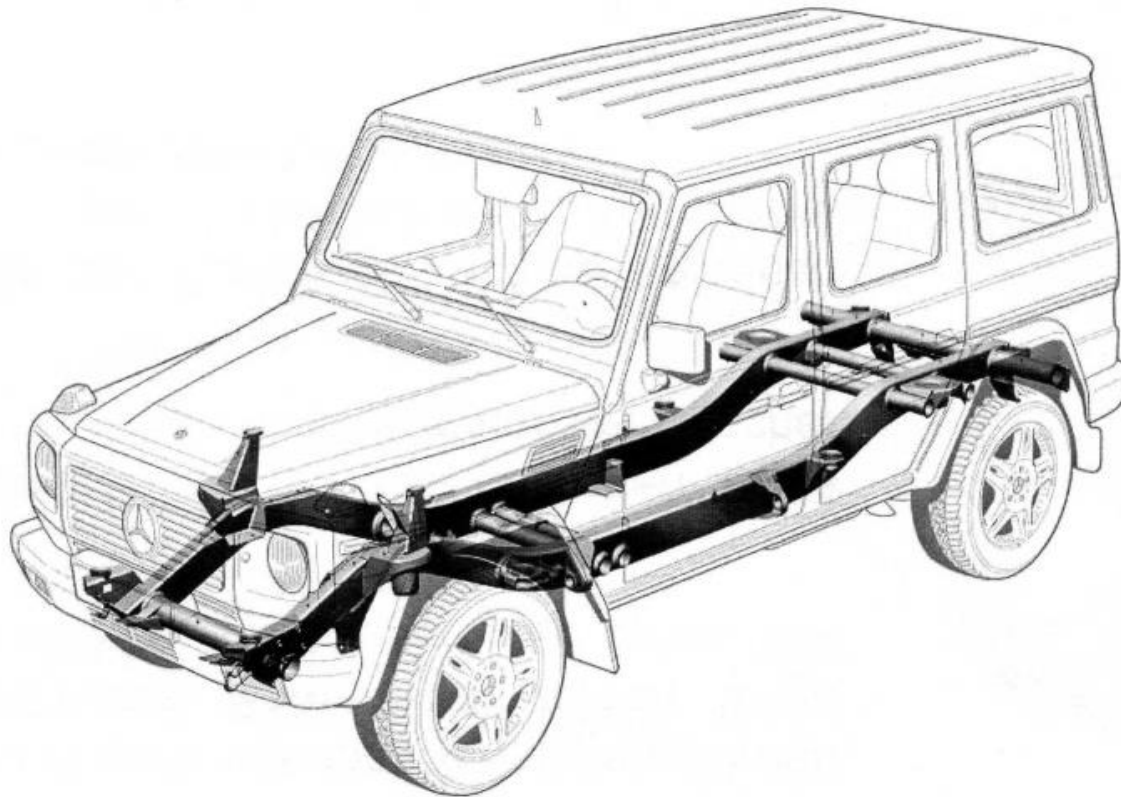
- Eine **nicht selbsttragende** Karosseriebauweise

- Ein verwindungssteifer Leiterraum, aus miteinander verschweißten Profilen, nimmt alle Kräfte und Schwingungen auf
- Sehr gut geeignet für
 - Kleinserien
 - Nutzfahrzeuge mit großen Federwegen und Achsverschränkungen

- Eine Unterart ist die **Gitterrohrrahmen-Bauweise**:
 - Aufbau aus verschweißten Rohrprofilen
 - Hauptsächliche Belastung auf Zug und Druck

Karosseriebauweisen – Rahmenbauweise

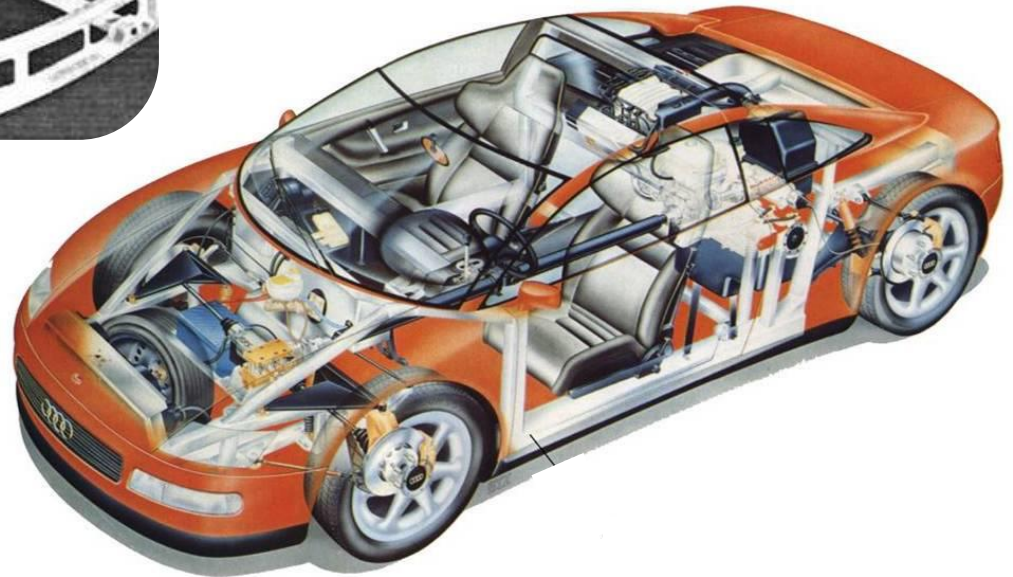
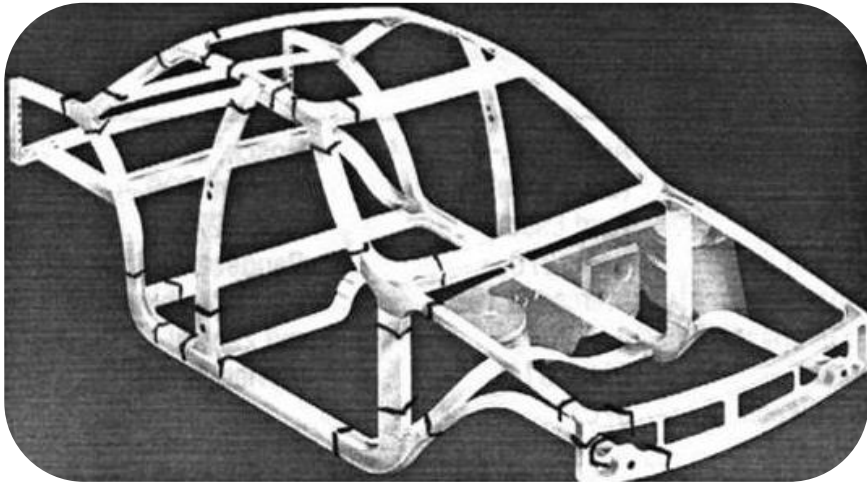
Mercedes G-Klasse



Quelle: Daimler AG

Karosseriebauweisen – Rahmenbauweise

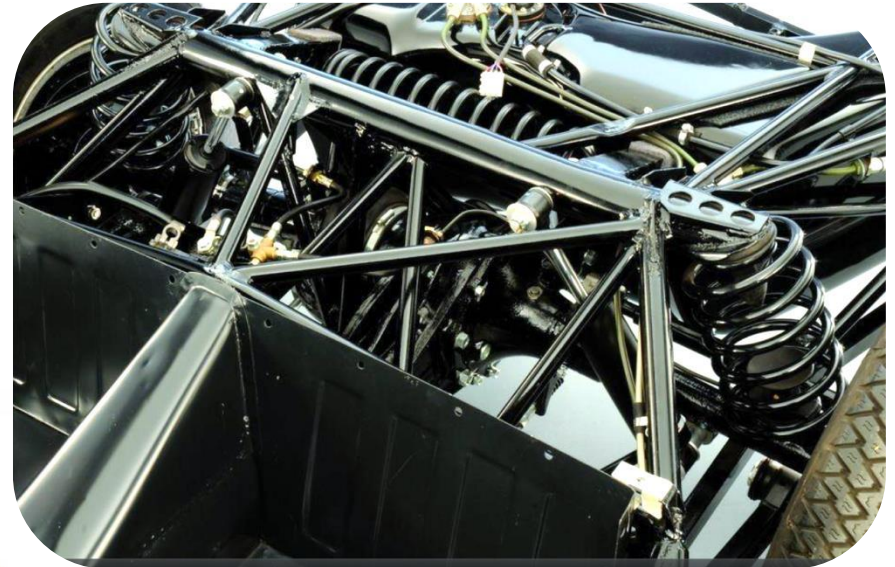
Audi Quattro Spyder



Quelle: H.-G. Haldenwanger, Audi AG

Karosseriebauweisen – Rahmenbauweise

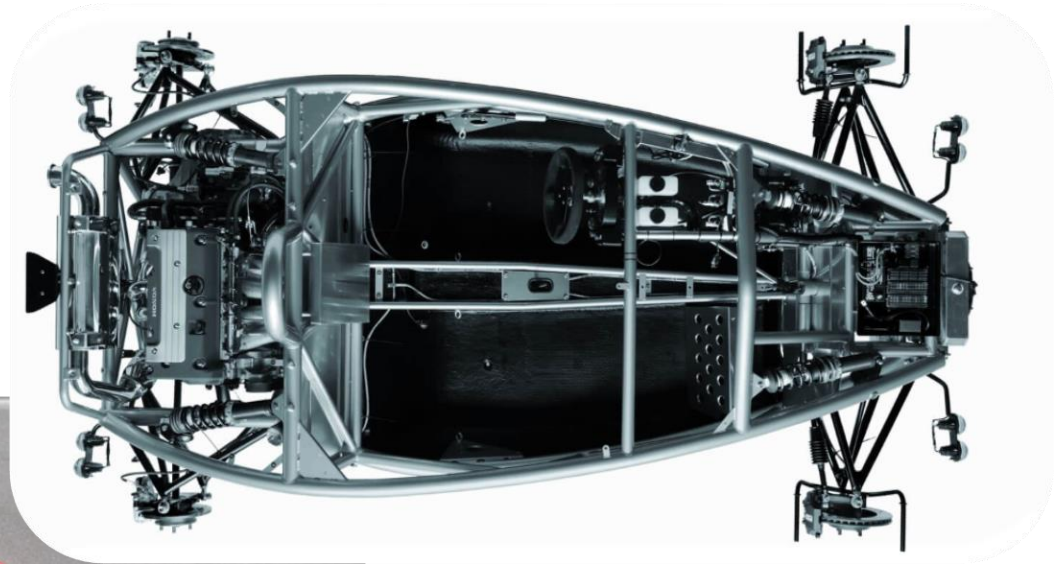
Mercedes Benz 300 SL



www.hemmings.com

Karosseriebauweisen – Rahmenbauweise

Ariel Atom 3.5



www.arielmotor.co.uk

Karosseriebauweisen – Schalenbauweise

- Eine **selbsttragende** Karosseriebauweise
- Umgeformte Blechteile werden durch verschiedene Fügeverfahren (Schweißen, Nieten, Kleben) miteinander verbunden
- Sehr gut für die Großserie geeignet

Karosseriebauweisen – Schalenbauweise

VW Golf IV

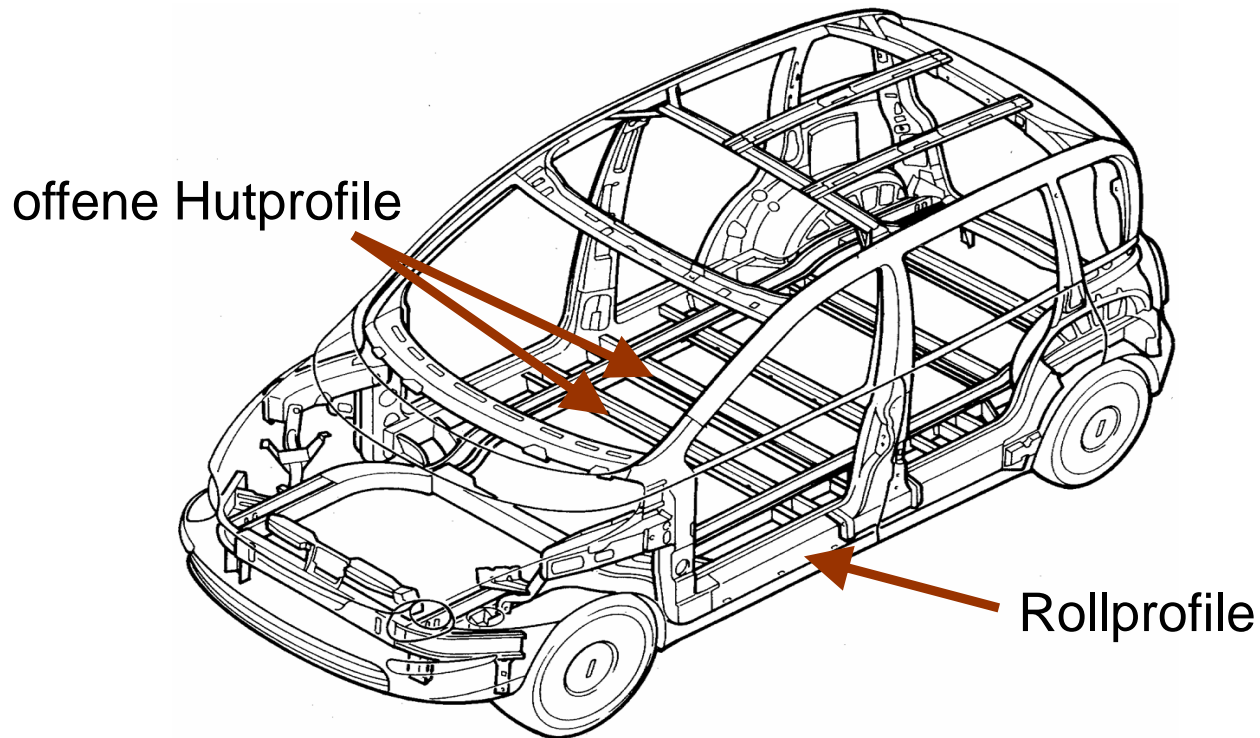


Quelle: Volkswagen AG

Karosseriebauweisen – Schalenbauweise

Fiat Multipla

- Schalenbauweise kombiniert mit Pressteilen und Rollprofilen/Biegeprofilen
- Offene (Hut-)Profile werden z. B. durch das Bodenblech geschlossen

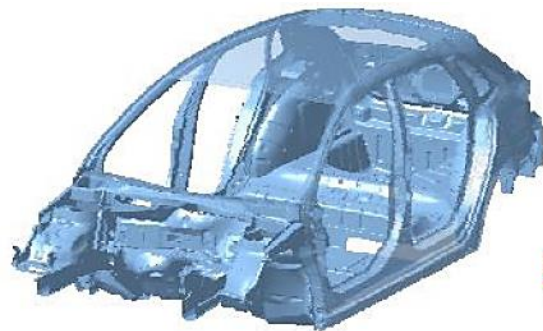


Quelle: Fiat AG

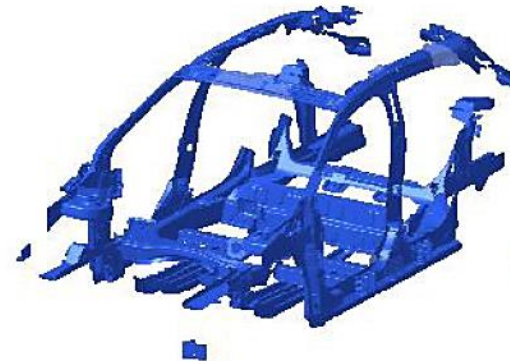
Karosseriebauweisen – Schalenbauweise

Einsatz verschiedener Werkstoffe

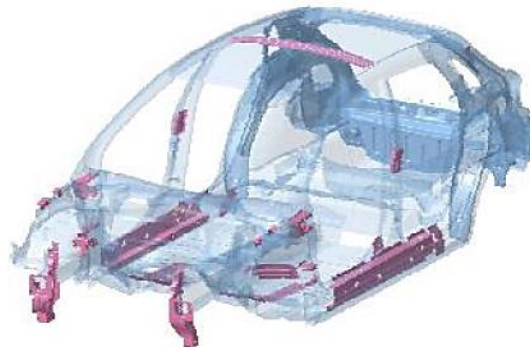
- Stähle unterschiedlicher Festigkeitsklassen – **Citroën C4**



Low
Strength
Steels



High
Strength
Steels



Advanced
High
Strength
Steels

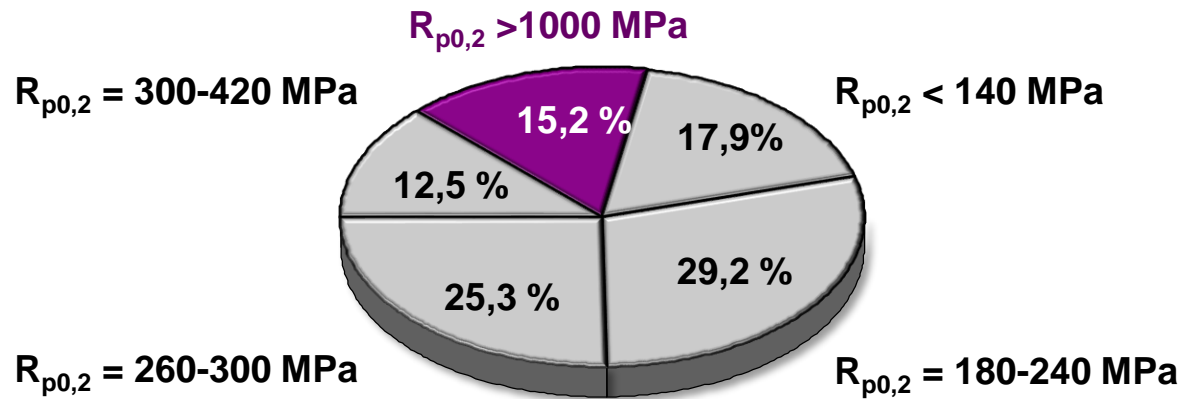


Press
Hardened
Steels
(22MnB5)

Quelle: KLT Group, CTI Konferenz, 2013

Karosseriebauweisen – Schalenbauweise

- Stähle unterschiedlicher Festigkeitsklassen – VW Passat (B6)



Quelle: Volkswagen AG

Karosseriebauweisen – Schalenbauweise

➤ Aluminiumlegierungen – **Jaguar XJ**

- Gesinterte Alupressteile an der Außenhaut
- Hochdruck-Vakuum-Aludruckgussteile
- Alu-Strangpressteile kommen in den Türstrukturen zum Einsatz
- Magnesium kommt in den Sitzrahmen und in der Traverse zum Einsatz
- Gewicht der Karosserie: 220 kg (40% weniger als der Vorgänger)



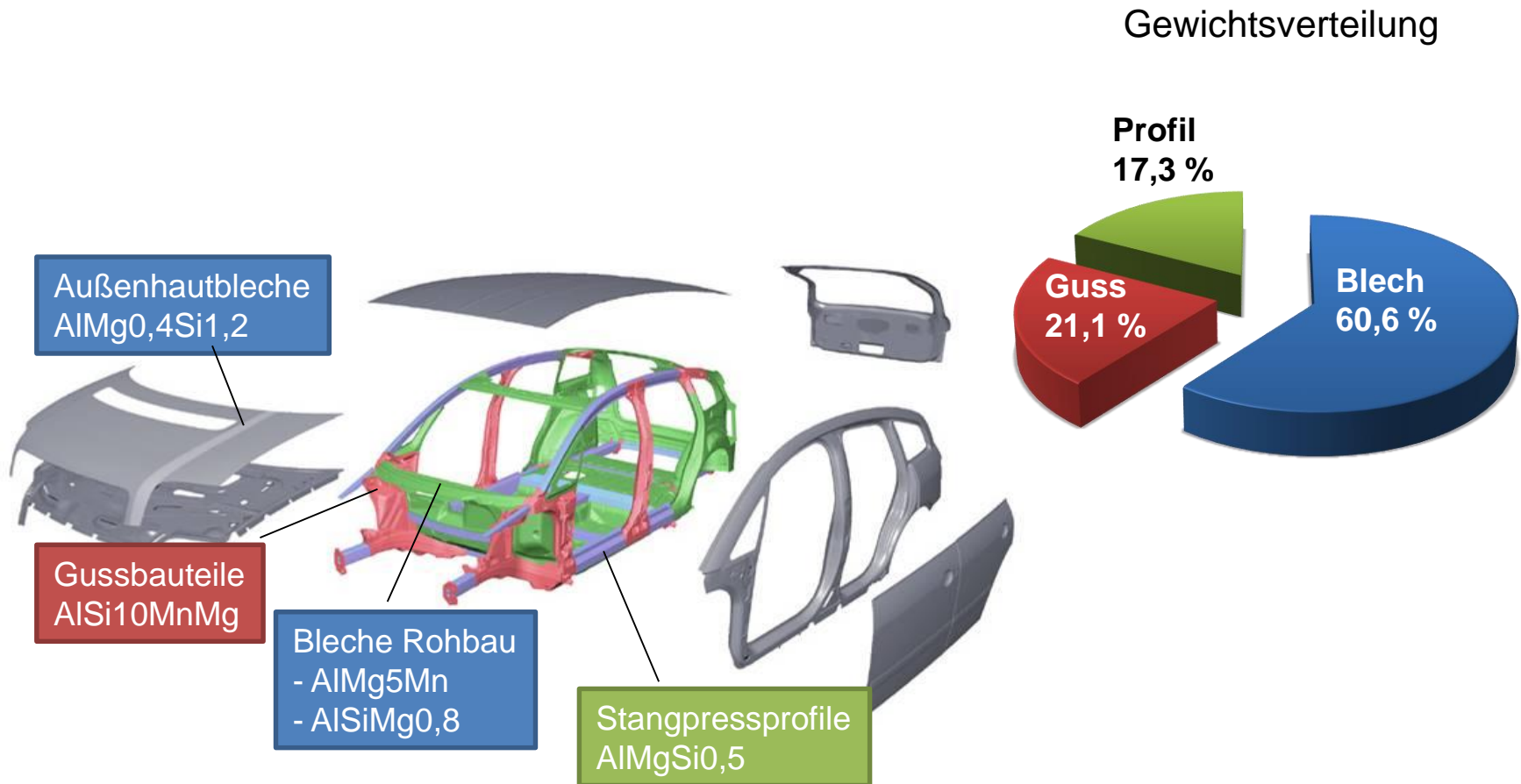
Quelle: Jaguar AG

Karosseriebauweisen – Space-Frame-Bauweise

- Eine **selbsttragende** Karosseriebauweise
- Statt umgeformten Blechteilen werden nahtlos geschlossene Strangpressprofile verwendet
 - Dadurch wird ein höheres Widerstandsmoment erreicht
- Diese werden über Gussknoten und durch Laserschweißtechniken verbunden

Karosseriebauweisen – Space-Frame-Bauweise

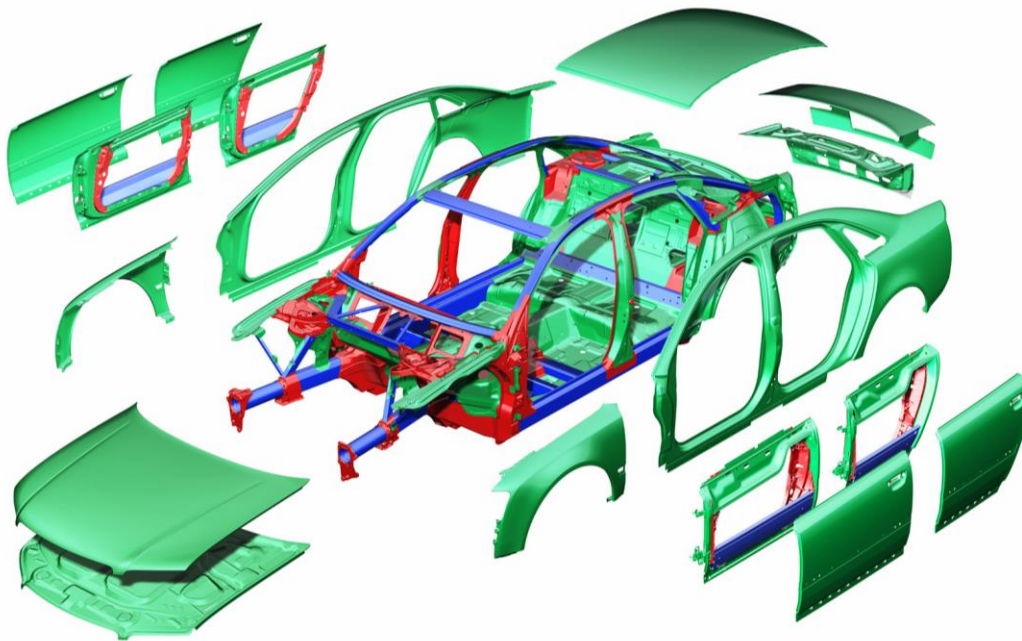
Audi A2



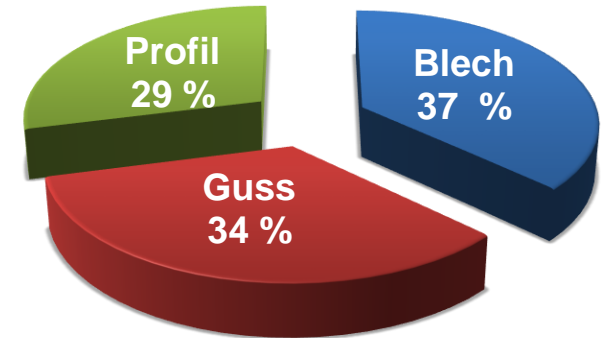
Quelle: Audi AG

Karosseriebauweisen – Space-Frame-Bauweise

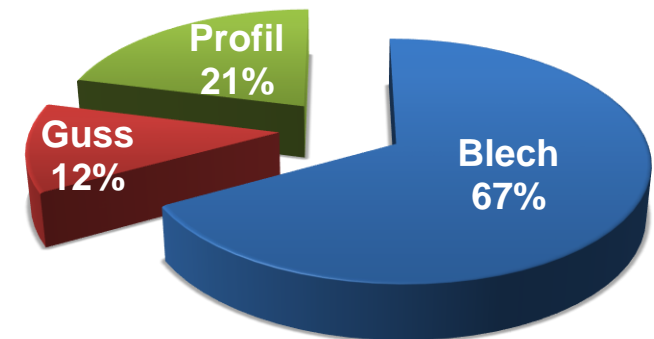
Audi A8 (2003)



Gewichtsverteilung



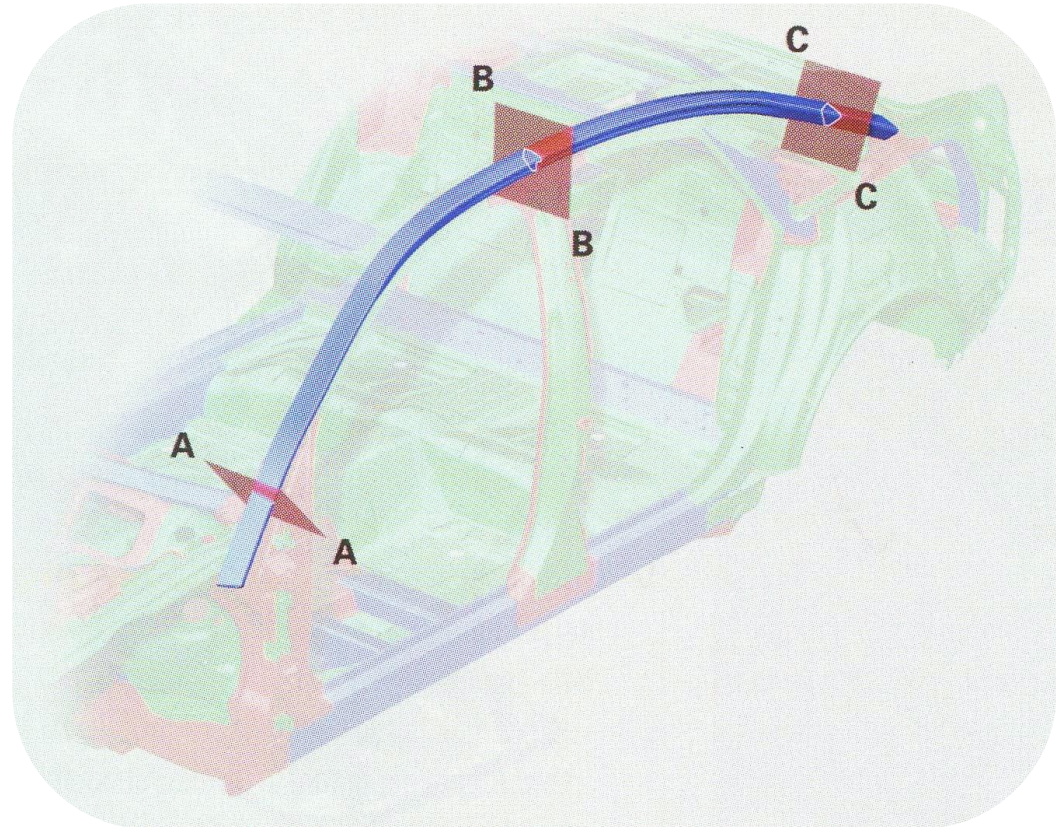
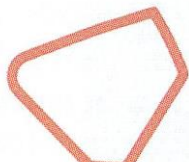
Teileanzahl



Quelle: Audi AG

Karosseriebauweisen – Space-Frame-Bauweise

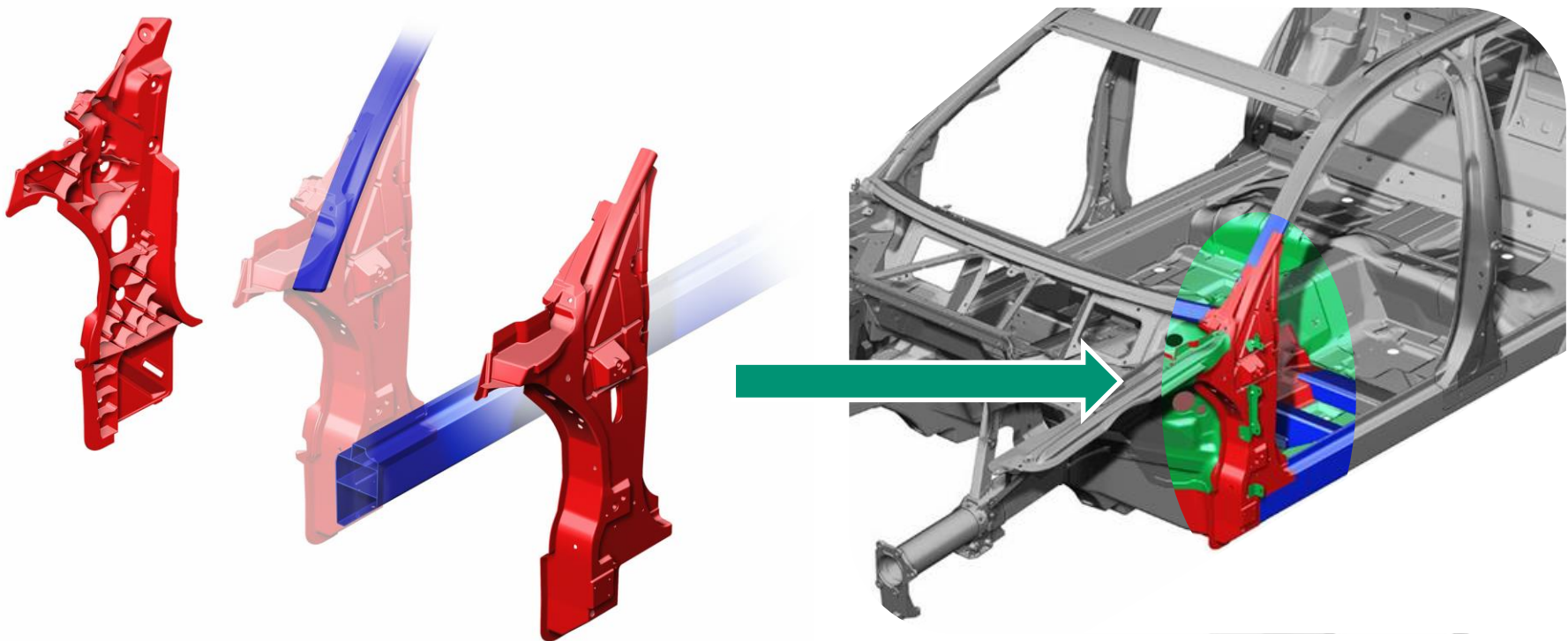
➤ Profilverlauf im Dachrahmen



Quelle: Audi AG

Karosseriebauweisen – Space-Frame-Bauweise

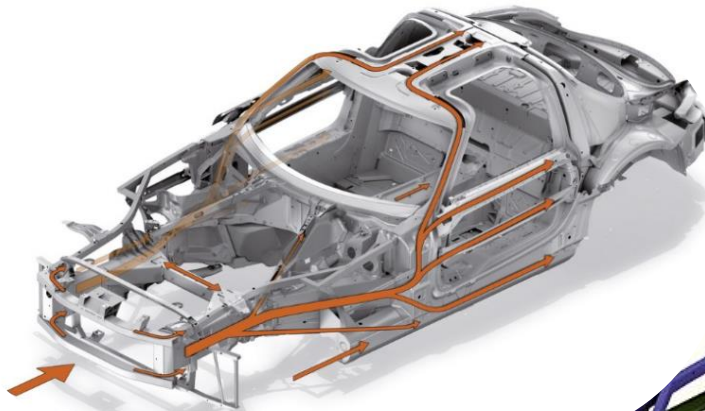
Verbindung von Dach- und Türrahmen über Alu-Gusknoten



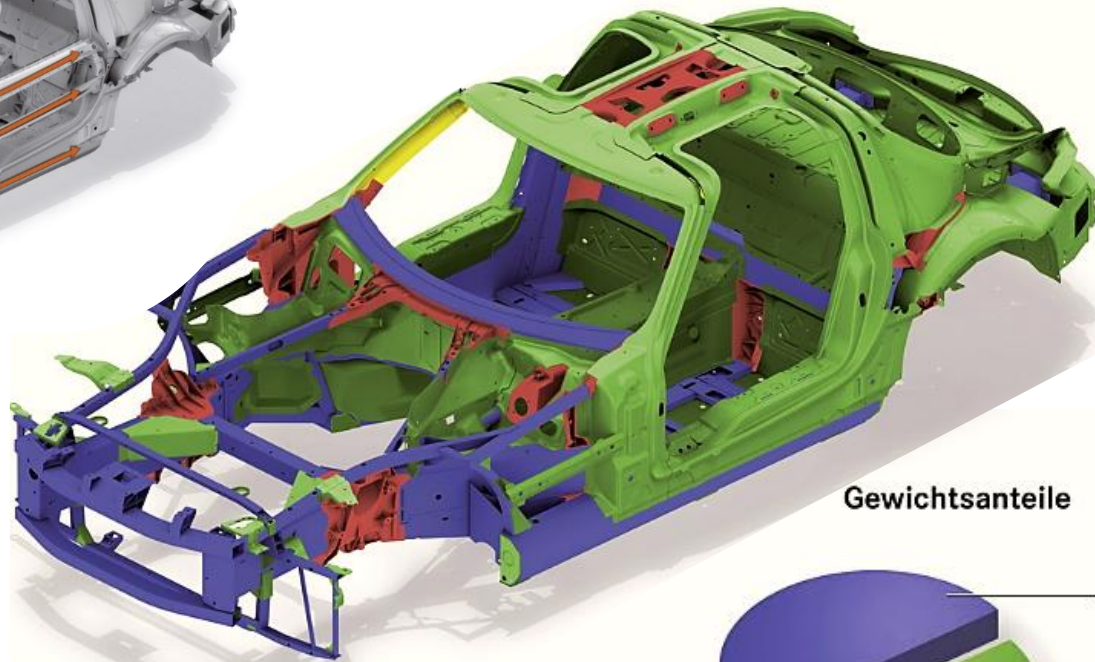
Quelle: Audi AG

Karosseriebauweisen – Space-Frame-Bauweise

Mercedes Benz SLS AMG



Kraftfluss im Fall eines Frontalaufpralls



Gewichtsanteile



Quelle: <http://mercedes-benz-blog.blogspot.de>

Karosseriebauweisen – Space-Frame-Bauweise

Audi R8 – Multimaterial Space-Frame Bauweise



Quelle: Audi

Karosseriebauweisen – Monocoque

- Eine **selbsttragende** Karosseriebauweise
- [griech.] mono = einzeln, [franz.] coque = Schale
 - Die Außenschale der Karosserie ist aus einem Stück gefertigt und nimmt alle Lasten auf
 - Dadurch werden sehr hohe spezifische Steifigkeiten erreicht
- Wird hauptsächlich im Rennsport eingesetzt
- Faserverbundwerkstoffe bei diesem Anwendungsfall günstiger als Metalle

Karosseriebauweisen – Monocoque

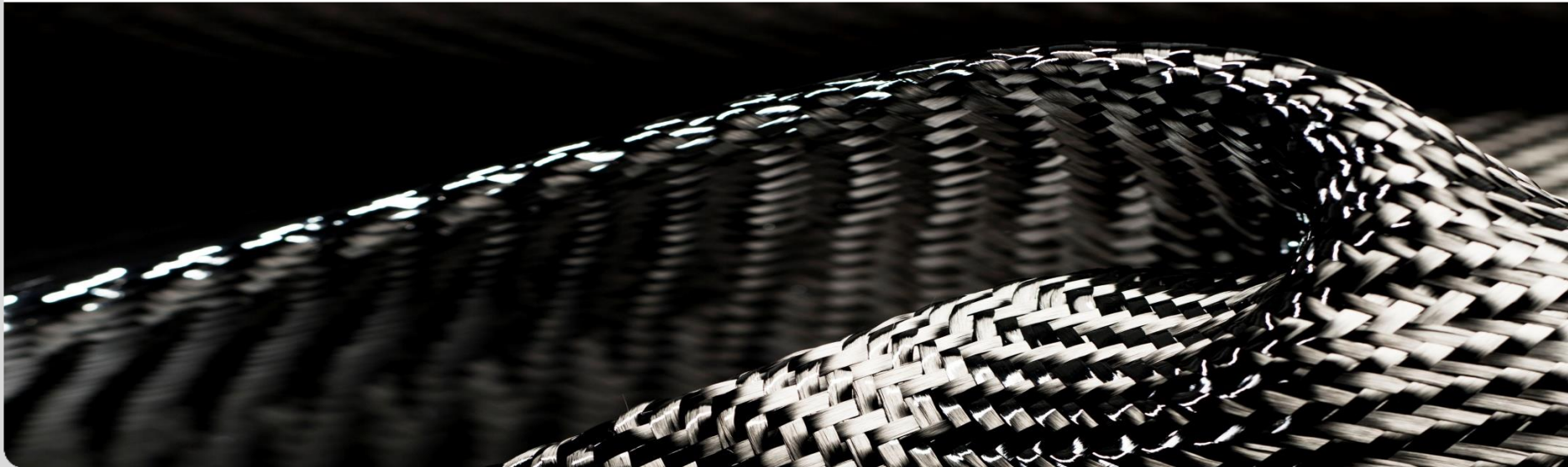
McLaren MP4 / 1



Quelle: www.eurocarnews.com

Limits of Multi-Material-Design

Institute of Vehicle System Technology (FAST), Lightweight Technology



Multi-Material-Design – Motivation

- Gezielte Kombination unterschiedlicher Werkstoffe/
Werkstoffeigenschaften
 - ➔ völlig neues und erweitertes
Eigenschaftsprofil
- Optimale Ausnutzung der Einzelwerkstoffe
- Anwendungsspektrum der Werkstoffe vergrößern
- ➔ „Richtiger Werkstoff / richtige Verstärkung am richtigen Ort“

- Oberflächenqualität
- Verbesserung der physikalischen und chemischen Eigenschaften
- Funktionsintegration
 - Anbindungselemente
 - Funktionalisierung der Oberflächen
 - Integration von Sensorik
- Leichtbaupotenzial ➔ reduziertes Bauteilgewicht



Quelle: BMW AG

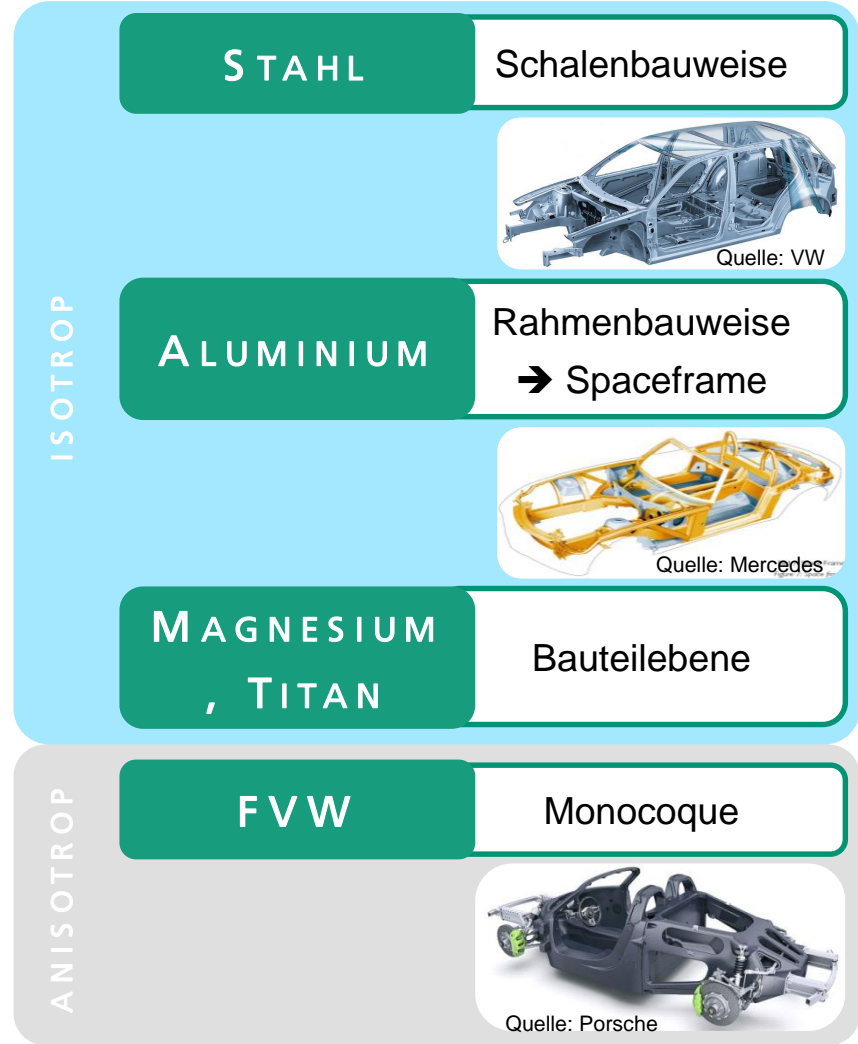
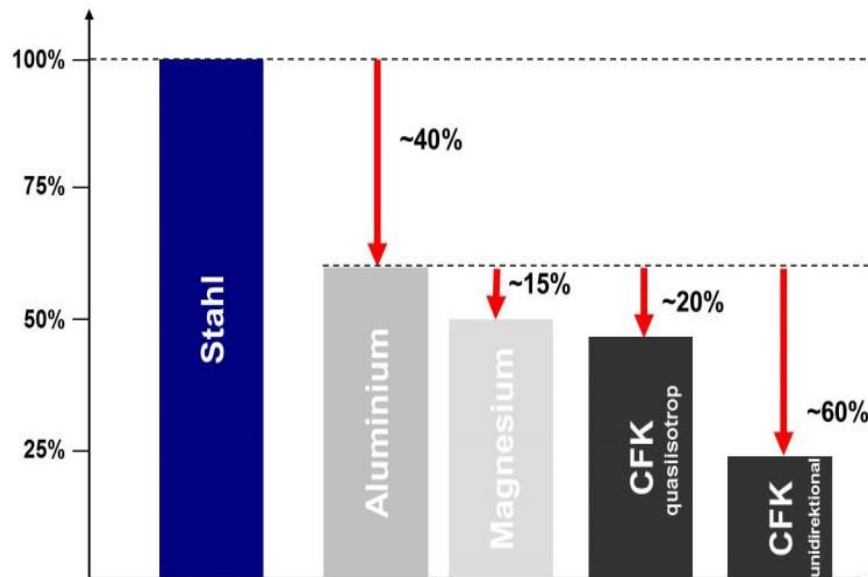


Quelle: M. Wanders, LANXESS, 4th CTI Conference

Einführung – Leichtbauwerkstoffe

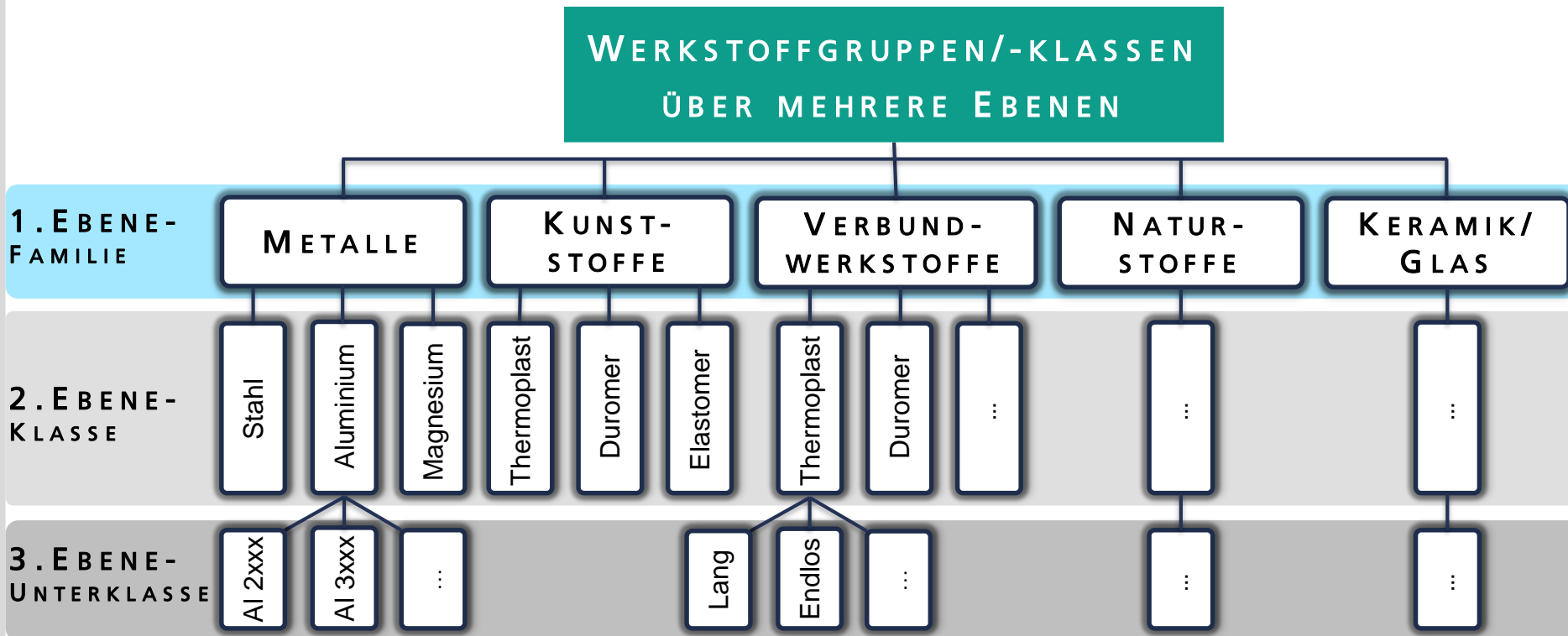
- Stähle
- Aluminium
- Magnesium
- Titan
- Faserverbundwerkstoffe (z.B. CFK)

Durchschnittliche prozentuale Verteilung der Bauteilgewichte bei gleicher Funktion



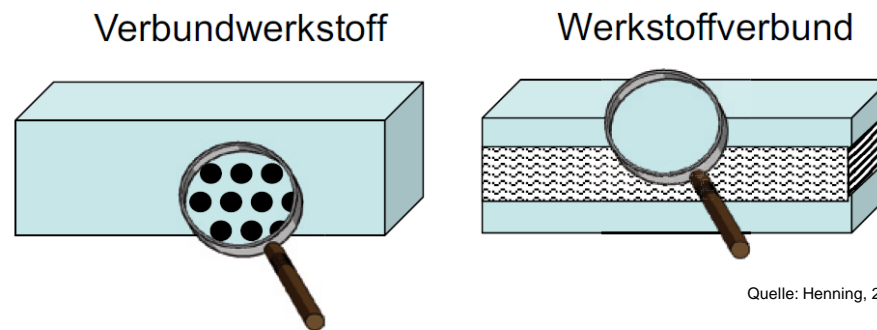
Multi-Material-Design – Definition

Hybrider Leichtbau bzw. Multi-Material-Design bezeichnet die **gezielte Kombination von Werkstoffen aus unterschiedlichen Klassen und/oder Ebene**. Dadurch lässt sich auf Bauteilebene ein völlig neues und **erweitertes Eigenschaftsprofil** erzielen, welches mit den Einzelwerkstoffen nicht realisierbar wäre.



Multi-Material-Design – Definition

Beim hybriden Leichtbau entsteht ein Werkstoffverbund, bei welchem die verschiedenen Komponenten bereits auf makroskopischer Ebene unterscheidbar sind und intrinsisch oder extrinsisch miteinander verbunden werden.



Quelle: Henning, 2011

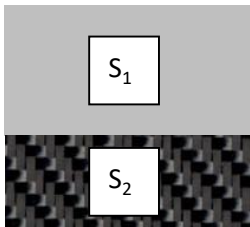
Bei der Hybridisierung erfolgt eine Anpassung der Materialeigenschaften an die jeweilige Anwendung

➔ „Auslegung des Materialsystems während der Auslegung des Bauteils“

Multi-Material-Design – Klassifizierung

INTRINSISCHE

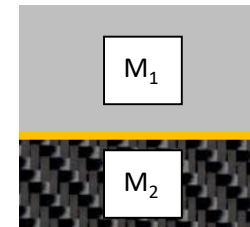
- Komponenten werden während der Bauteilherstellung gefügt
- form- und/oder stoffschlüssig
- ➔ Integralbauweise



Quelle: LKT, Uni Erlangen

EXTRINSISCHE

- unterschiedliche Bauteile werden nach deren Herstellung gefügt
- meist formschlüssig
- ➔ Differenzialbauweise



Quelle: Böllhoff

HYBRIDISIERUNG

Multi-Material-Design – Klassifizierung



INTRINSISCHE HYBRIDISIERUNG

SCHEIBEN-/ PLATTENEbene

Verschiedene
Schichtmaterialien

z.B.: GLARE®



STRUKTUR-EBENE

Kernverbund
(Sandwich)

- 2 Deckschichten
- Zwischenschicht
(Kern)

z.B.: CFK/Rohacell®-Sandwich



BAUTEILEBENE

Bauteil aus
unterschiedlichen
Materialien
➔ Komplexe Struktur

z.B.: Erlanger Träger



Multi-Material-Design – Klassifizierung

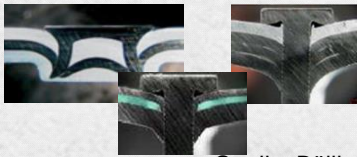


EXTRINSISCHE HYBRIDISIERUNG

SCHEIBEN-/ PLATTENEbene

Verschiedene
Schichtmaterialien
→ Hybridfügen

z.B.: Litecor®, Schicht-
verbunde mit Hybridfügen



Quelle: Böllhoff

STRUKTUR-Ebene

Kernverbund
(Sandwich)
– 2 Zwischenschicht
(Kern)
– Deckschichten

z.B.: Metawell®



Quelle: Metawell

BAUTEILEbene

Bauteil aus
unterschiedlichen
Materialien
→ Komplexe Struktur

z.B.: RIVTAC® für „Light Car“



Quelle: Böllhoff

Multi-Material-Design – Vergleich

PRODUKTION	INTRINSISCH	EXTRINSISCH
BAUWEISEN	INTEGRAL	DIFFERENTIAL
VORTEILE	<ul style="list-style-type: none"> ■ hohes Leichtbaupotential (wenig Fügstellen, keine Überlappungen) ■ Lokale Wandstärkenanpassung möglich ■ Belastungsgerechte Geometrie- ■ Kraftflussgerechte Formoptimierung ■ Geringer Montageaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verschiedene Materialien einsetzbar und kombinierbar ■ Optimierte Materialauswahl ■ Einfache Fertigung (Flexibilität, kostengünstig, hohe Losgrößen) ■ Besseres Schädigungsverhalten ■ Reparatur & Recycling einfacher
NACHTEILE	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fertigungstechnisch aufwendiger und kostenintensiver (Formenbau) ■ Schlechteres Schädigungsverhalten (Rissausbreitung) ■ Eingeschränkte Materialvariation (Interface) → keine optimale Ausnutzung des Materials ■ Erschwerte Reparatur & Recycling 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Höhere Montage- & Materialaufwand ■ höheres Bauteilgewicht (Verbindungselemente & Überlappungen) ■ Spannungsspitzen an Fügstellen ■ Kontaktkorrosion an Fügstellen ■ Ungünstigerer Kraftverlauf im Bauteil

Multi-Material-Design – Potenzial in der Praxis



konventioneller Werkstoff



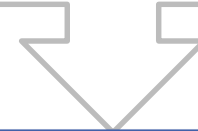
FVK



Neues Material



Neue
Herausforderungen
& Potentiale

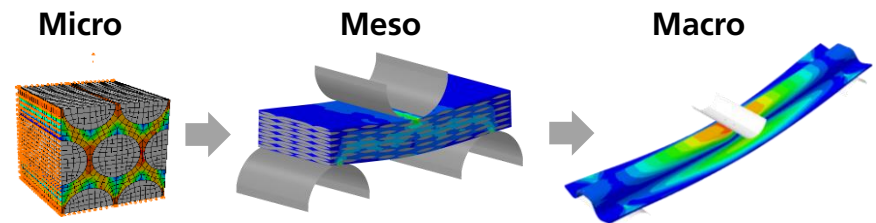


Weiterentwicklung
vorhandener Methoden,
um das Potential für den
Automobilbau voll zu nutzen

Quelle: Audi, Porsche

Multi-Material-Design – Herausforderungen

- Großserienproduktion durch hohe Zykluszeiten und Materialkosten erschwert
- Fehlende Erfahrung → Wissen auf anderen Industriezweigen nur bedingt anwendbar
- Komplexes Versagensverhalten
- Vorhersagbarkeit/Simulierbarkeit des Materialverhaltens
- Komplexe Bauteildimensionierung
- Verbindungsstellen
 - Kontaktkorrosion (CFK/Al)
 - Unterschiedliche Wärmeausdehnungen
 - Oberflächenbehandlungen
 - Neue Fügetechnologien
- Recycling und Reparatur



Quelle: DLR



Quelle: Böllhoff

Lösungsansätze – Systemansatz

Fahrzeugkarosserie

- **Hybride Karosserie:** Life-Modul aus CFK und Drive-Modul aus Aluminium



Quelle: BMW

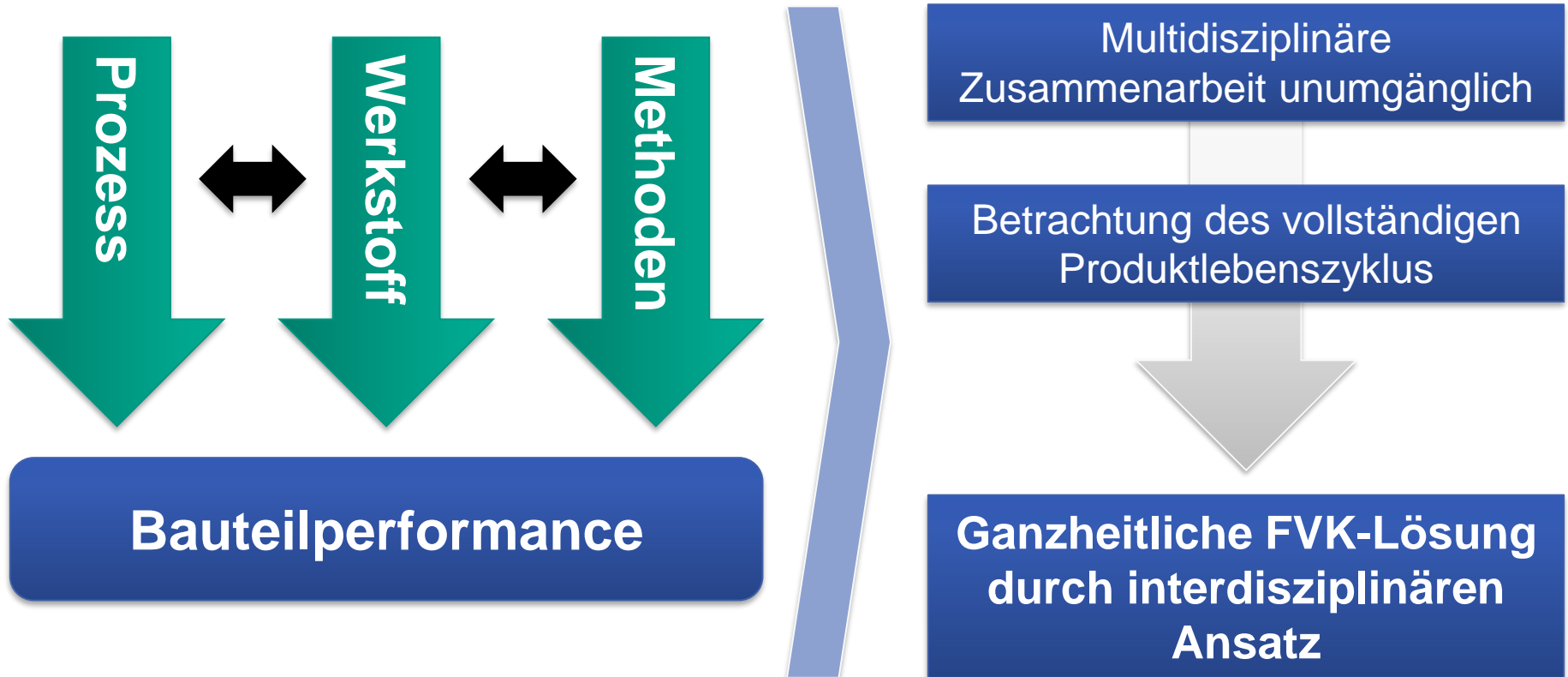
Fahrzeugkomponente

- **Hybride Bauteile:** Optimale Nutzung des Leichtbaupotentials bei maximal sinnvoller Funktionsintegration



Quelle: M. Wanders, LANXESS, 4th CTI Conference

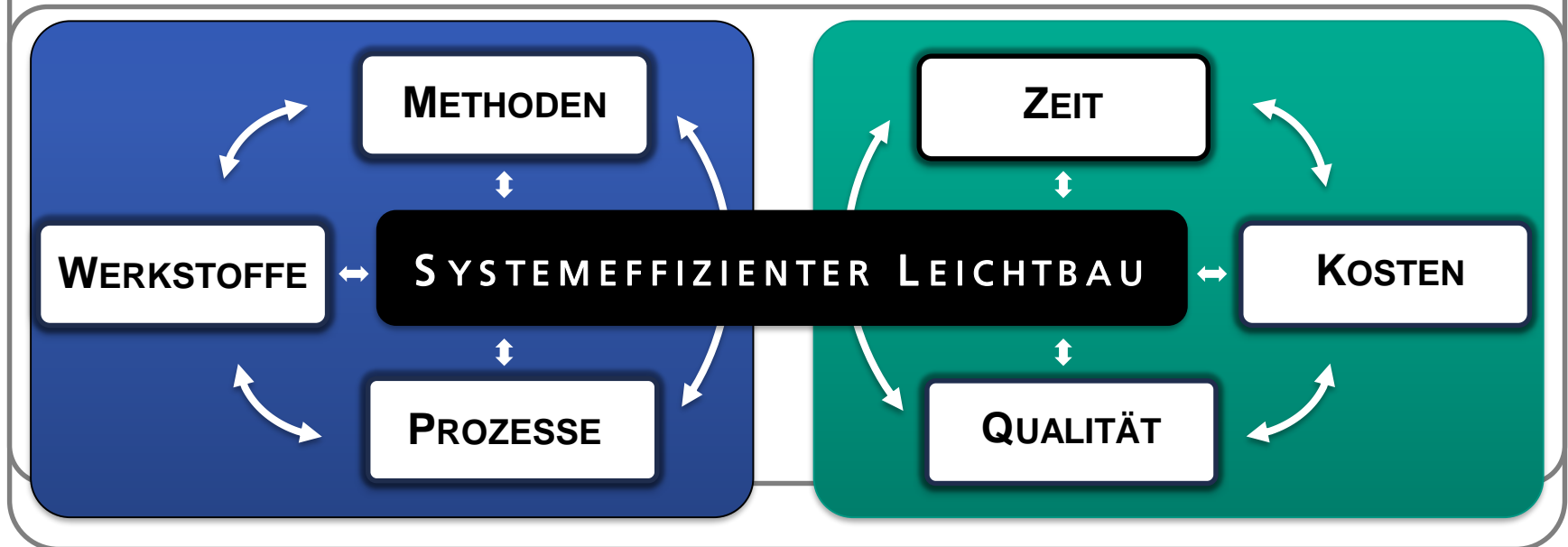
Lösungsansätze – Interdisziplinärer MWP-Ansatz



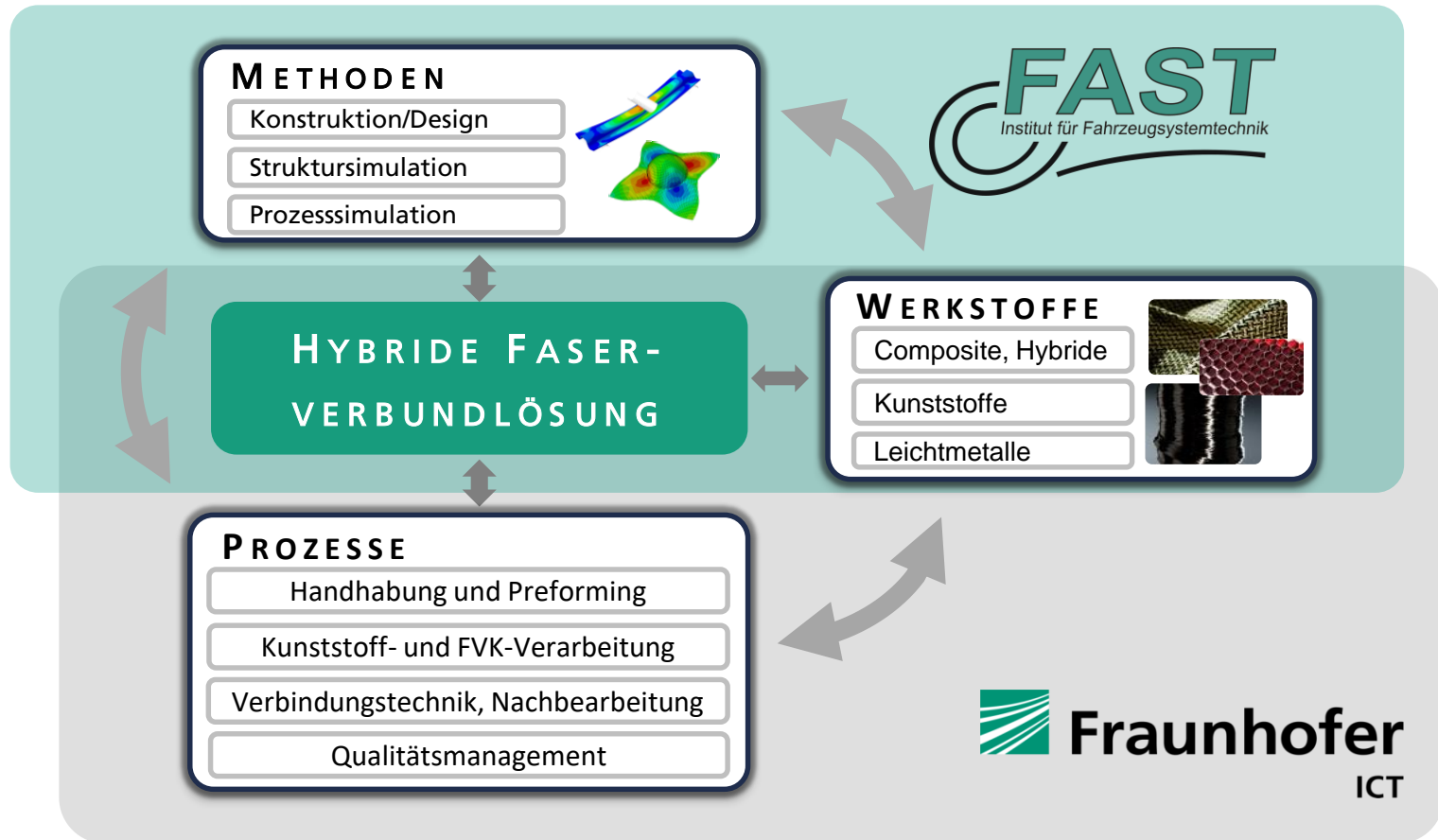
Lösungsansätze – Interdisziplinärer MWP-Ansatz



SPANNUNGSFELDER BEIM FVK-EINSATZ



Lösungsansätze – Interdisziplinärer MWP-Ansatz



Zur Entwicklung großserienfähiger, leichter und leistungsfähiger Faserverbund-Bauteile sowie hybrider Bauteile ist es essentiell, Kompetenzen aus den Bereichen **M**ethoden, **W**erkstoffe und **P**roduktion (MWP-Ansatz) zu bündeln und zu vernetzen.

Lösungsansätze – Interdisziplinärer MWP-Ansatz

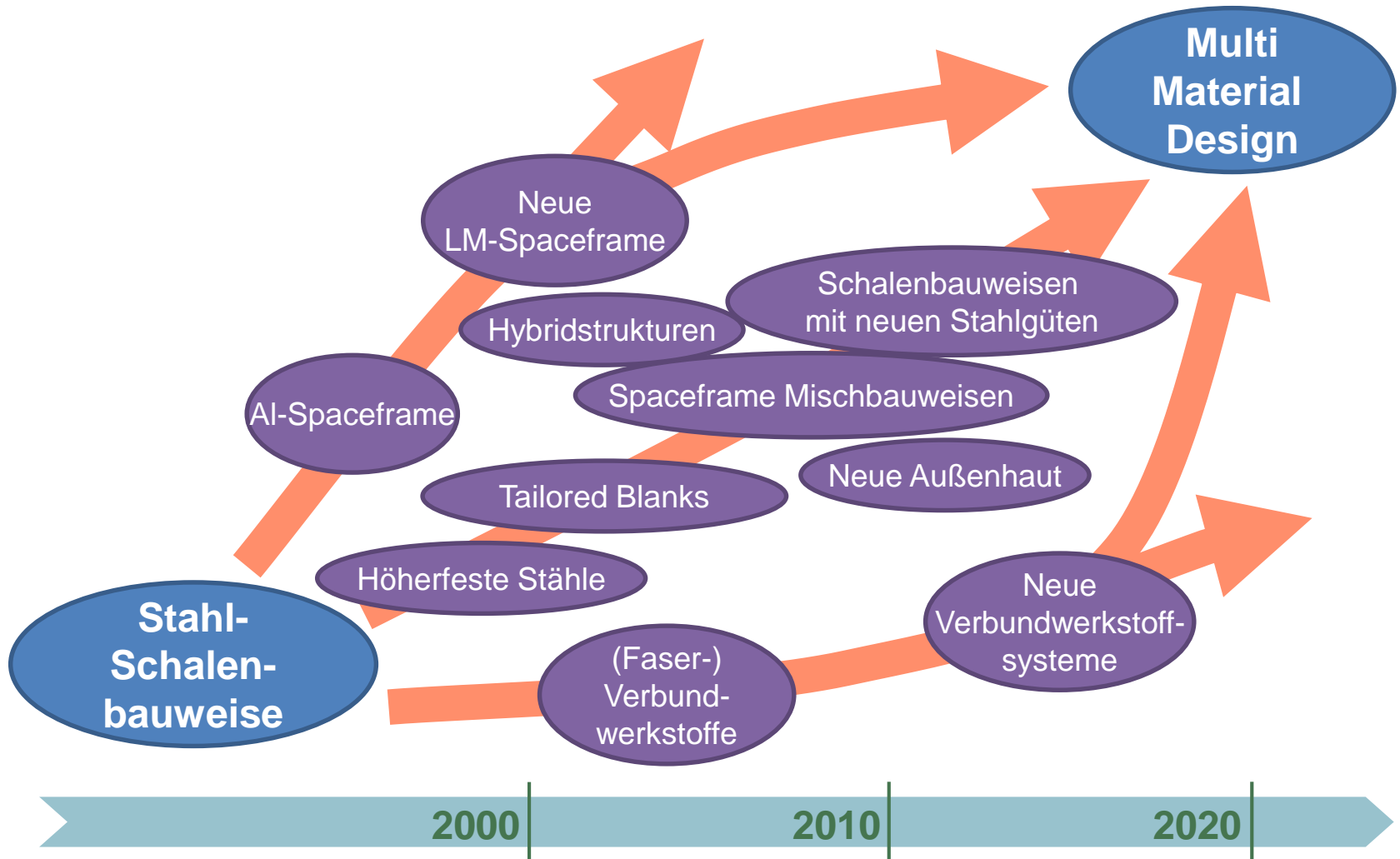


Zur Entwicklung großserienfähiger, leichter und leistungsfähiger Faserverbund-Bauteile sowie hybrider Bauteile ist es essentiell, Kompetenzen aus den Bereichen **M**ethoden, **W**erkstoffe und **P**roduktion (MWP-Ansatz) zu bündeln und zu vernetzen.

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

- Verschiedene Karosseriebauweisen kombiniert mit **unterschiedlichen Werkstoffen und Fügeverfahren**
- Hohe Beeinflussung durch das **Multi-Material-Design**
- Die Mischbauweise/Hybrider Leichtbau wird als die Karosseriebauweise der Zukunft gesehen und stellt weitere Anforderungen an die Herstellprozesse und Methoden. **Das Optimierungsproblem wird durch Hybridisierungsbestrebungen um weitere Parameter erweitert.**
- Beispiele:
 - Monocoque + Gitterrohrrahmen
 - Schalenbauweise mit Aluminium, Stählen und höherfesten Stählen

Karosseriebauweisen – Mischbauweise



DLR Institut für Fahrzeugkonzepte Prof. Friedrich

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

Audi TT (2008)

- Gewicht der Karosserie: 206 kg
- Referenzkarosserie aus Stahl wäre 48% schwerer
- reine Al-Karosserie wäre 12% leichter

Aluminium 69%

- Bleche 63 kg
- Gusskomponenten 45 kg
- Strangpressprofile 32 kg

Stahl 31%

- Bleche 66 kg

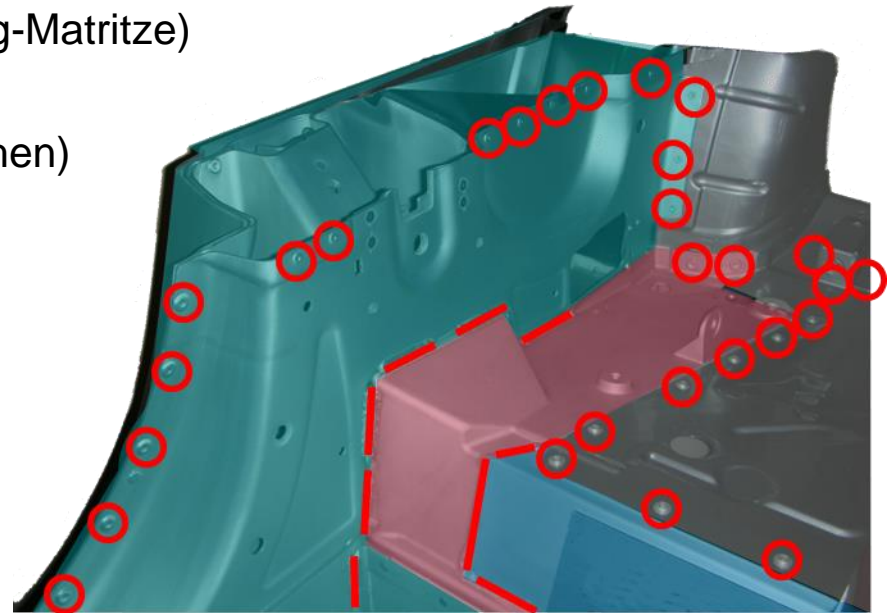
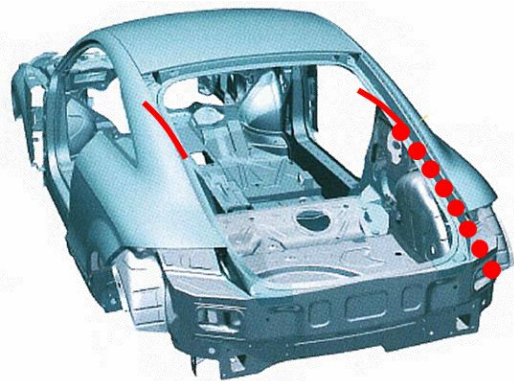


Quelle: Automobil Industrie. Sonderheft Audi TT, 2006

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

Einsatz verschiedener Fügeverfahren

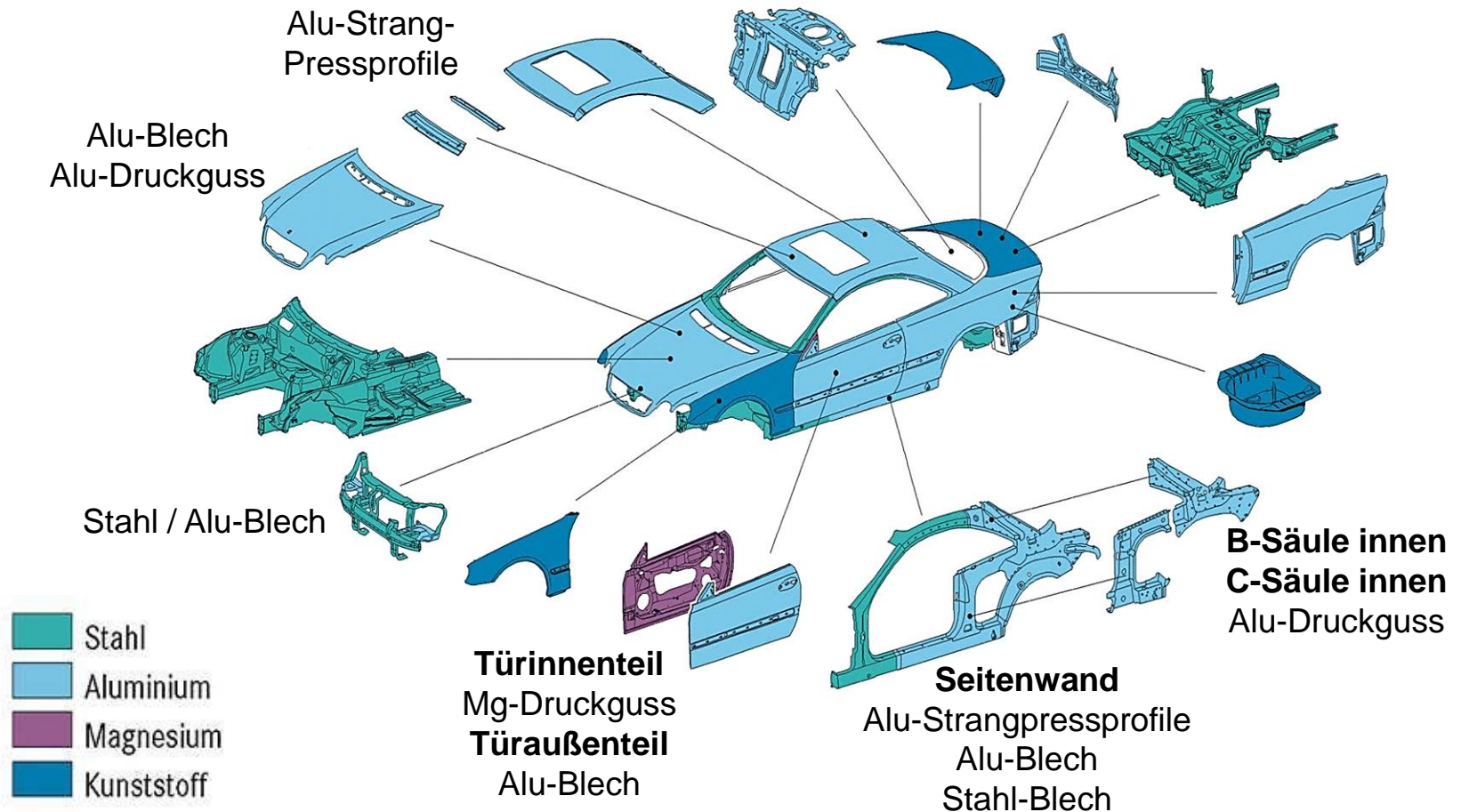
- Selbstfurchende Direktverschraubung
- Stanznieten, teilw. mit Kleben (St/Al)
- MIG-Schweißen (unzugängliche Stellen)
- Widerstandspunktschweißen (Stahl)
- Vollaluminium-Stanznieten (Ring-Matritze)
- Laserschweißen (Nullfuge)
- Clinchen (vereinzelt bei St-Blechen)



Quelle: Automobil Industrie. Sonderheft Audi TT, 2006

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

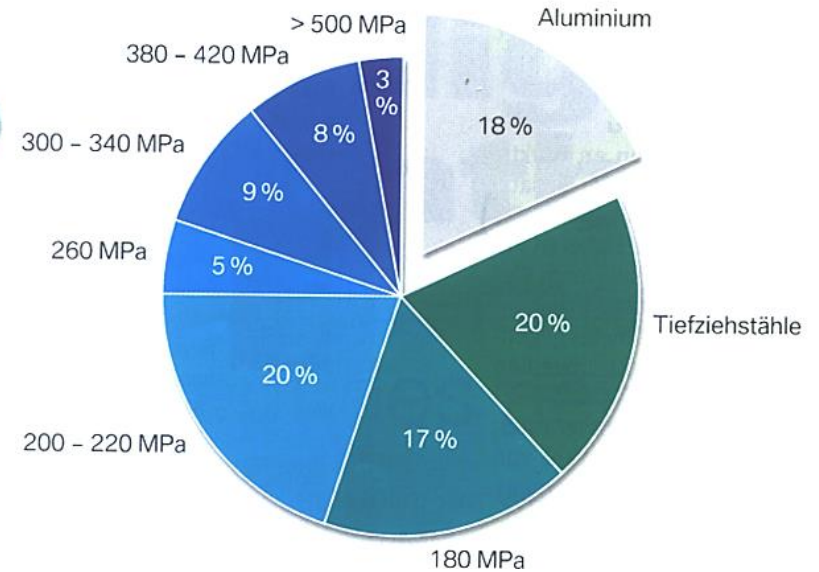
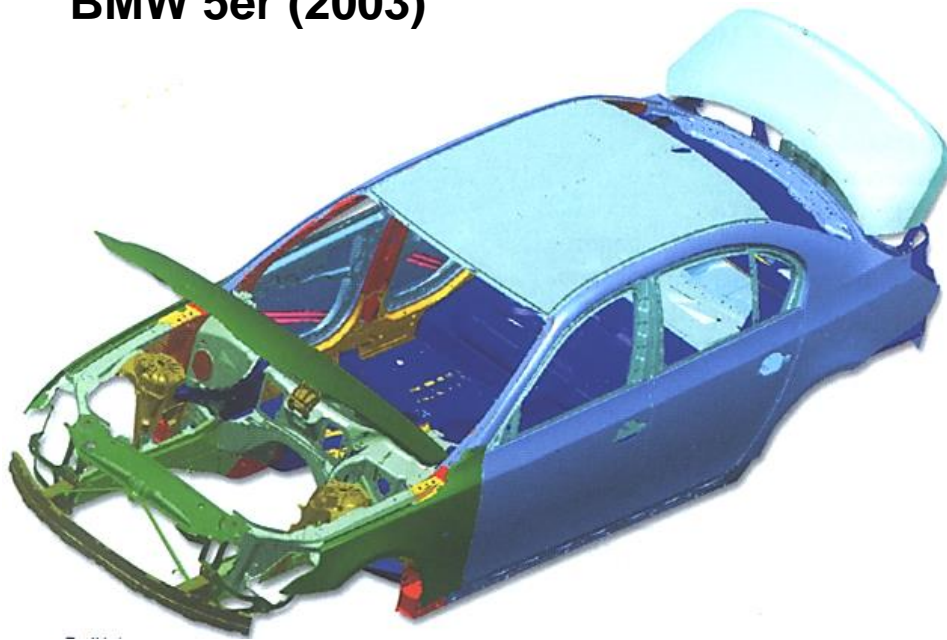
Mercedes Benz CL



Quelle: Daimler AG

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

BMW 5er (2003)



- Stähle**
- Sonst. Stähle
 - DC 03/04/06
 - DX 54
 - DX 56
 - 180 MPa
 - 220 MPa
 - 260 MPa
 - 300 MPa

- 340 MPa
- 380 MPa
- 400 MPa
- 420 MPa
- 500 MPa (DOGAL 800)
- D680 C
- 950 MPa (BTR 165)

- Aluminium**
- AlMg3,5 Mn
 - AlMg3,5Mn0,5
 - AlMg4,5Mn0,4
 - AlMg4,5Mn0,4 H24
 - AlMg0,4Si1,6
 - AC-300 HF
 - AlMgSi
 - AlMgSi1
 - Guss

Quelle: Sonderausgabe ATZ/MTZ August 2003

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

St/Al-Vorderbau (35/65%)

- **Aluminium**

-  Strangpressprofile

-  Druckguss

-  IHU

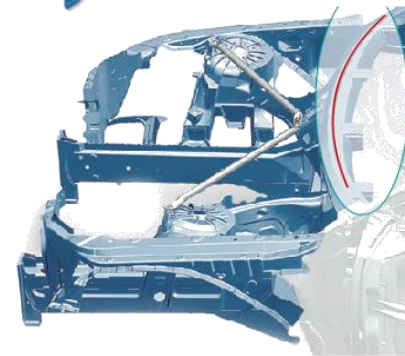
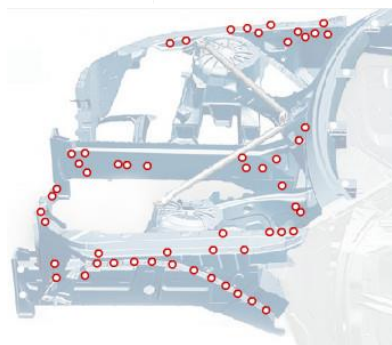
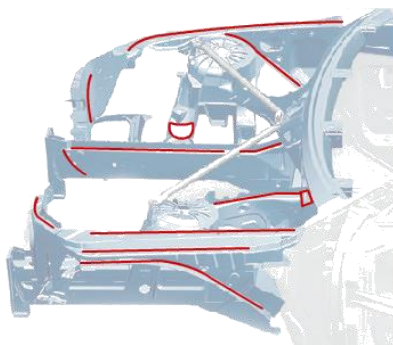
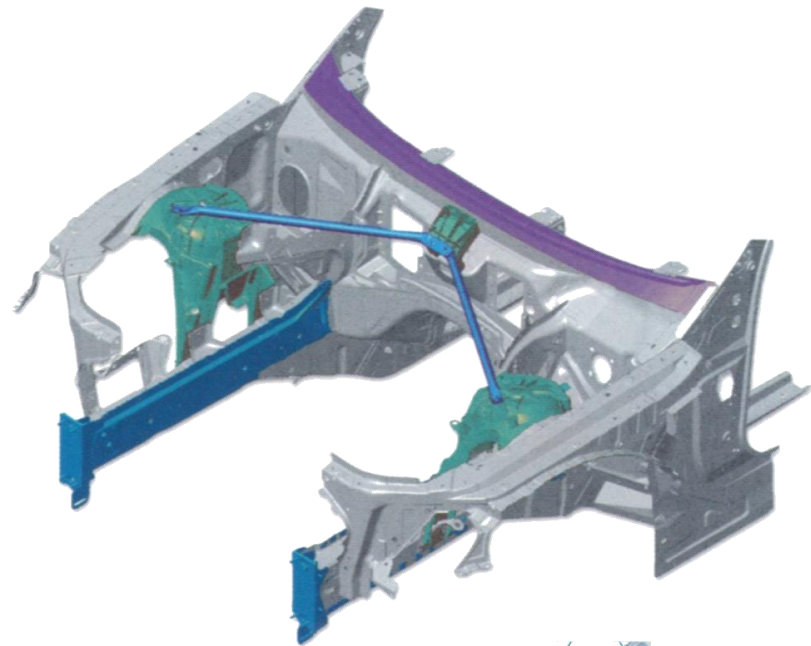
-  Blech-Schalenbauweise

- **Fügetechnologien**

-  Kleben

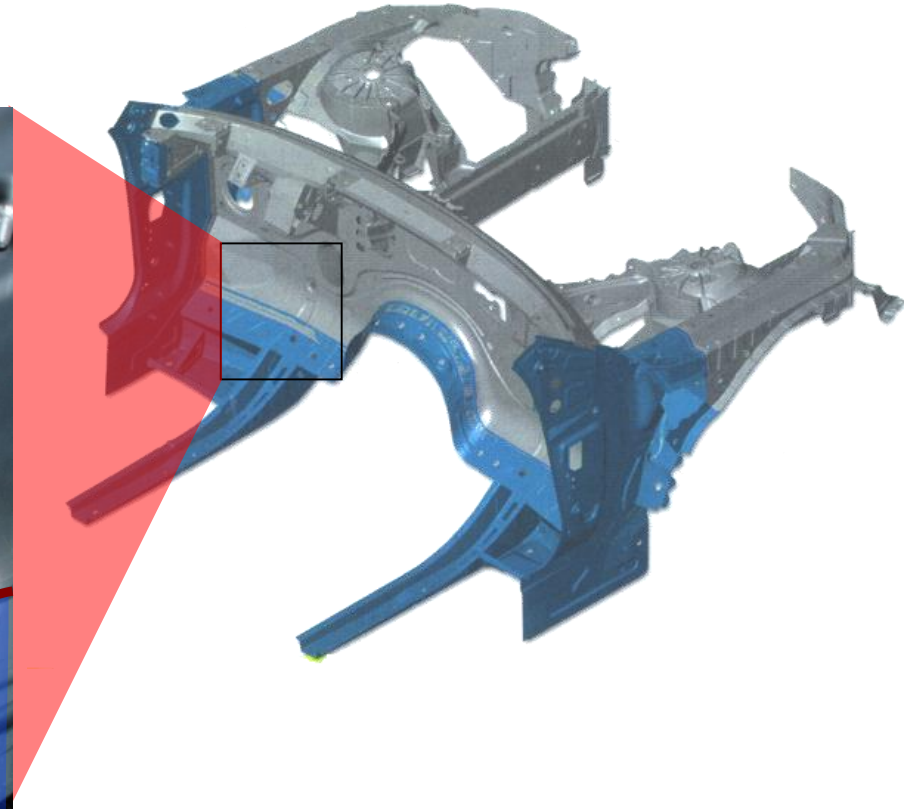
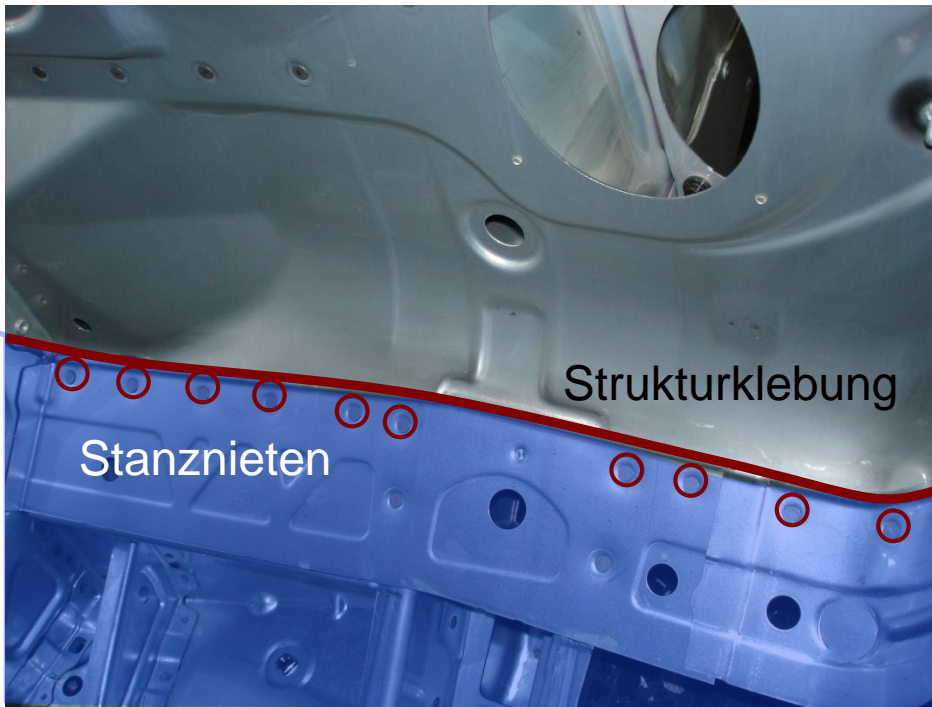
-  Stanznieten

-  Al-Laserschweißen



Quelle: Sonderausgabe ATZ/MTZ August 2003, BMW AG

Karosseriebauweisen – Mischbauweise



Quelle: Sonderausgabe ATZ/MTZ August 2003, BMW AG

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

Lamborghini Aventador (seit 2011)

- Monocoque: CFK
- Vorder- und Hinterbau: Aluminium (Gitterrohrrahmen)



Carscoop, Blogspot.

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

Lamborghini Huricáne (ab 2014)

- Monocoque: CFK
- Vorder- und Hinterbau: Aluminium (Gitterrohrrahmen)
- Höhere Stückzahl als Aventador → geringerer CFK-Anteil



<http://www.autorevue.at/technik/lamborghini-huracan.html>.

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

Audi R8 – Multimaterial Space-Frame Bauweise

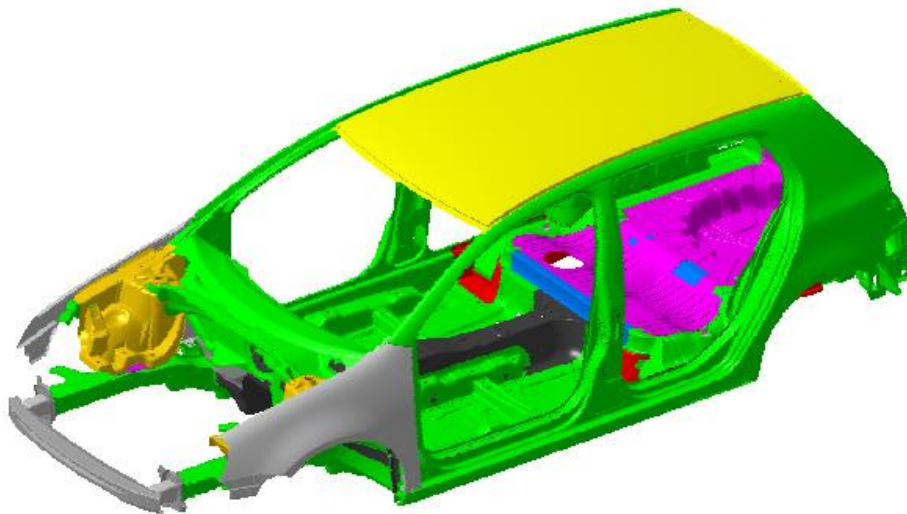


Quelle: Audi

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

EU-Projekt „SuperLightCar“

- Gewichtsreduktion zur Referenzkarosserie eines Mittelklasse PKW's: $\leq 85 \text{ kg}$ ($\sim 30 \%$)
- Karosseriegewicht: 180 kg
- Leichtbaukosten: $\leq 5 \text{ €/kg}$



	Alu - Blech
	Alu – Guss
	Alu - Extrusionsprofile
	Stahl
	Stahl – warmumgeformt
	Mg - Blech
	Mg - Guss
	GFK

Quelle: 2008, VW Research Group

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

MMD Studie für Stadtfahrzeug-Karosserien



-  Alu – mittlere Festigkeit
-  Alu – höchstfest
-  Stahl – mittlere Festigkeit
-  Stahl – höchstfest
-  Stahl – ultrahochfest
-  Cr/Ni-Stahl
-  GFK
-  CFK
-  CFK/Stahl/Schaum - Hybrid

Quelle: FH Aachen, T. Roeth, CTI Conference 2013

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

BMW i8

- Life Modul: CFK - Monocoque
- Drive Modul: Aluminium



Quelle: BMW AG

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

BMW i8

➤ Technische Daten

Leistung – E-Motor	96 kW / 250 Nm
Leistung – Benzinmotor	~ 170 kW / 320 Nm
Leistung – gesamt	~ 266 kW / 570 Nm
Hubraum	1,5-Liter
Verbrauch	≤ 2,5 l / 100 km
El. Reichweite	~ 35 km
Höchstgeschw. – el.	120 km/h
Höchstgeschw. (abgeregelt)	250 km/h
Beschleunigung	0-100 km/h in 4,4 s
Leergewicht	1490 kg



Quelle: BMW AG

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

Porsche 918 Spyder

- Monocoque: CFK
- Vorder- und Hinterbau: Aluminium



Quelle: www.motortrend.com

Karosseriebauweisen – Mischbauweise

Porsche 918 Spyder

➤ Technische Daten

Leistung – E-Motor/ Vorderachse	95 kW
Leistung – V8 Motor	608 kW
Leistung – Hybridmodul /Hinterachse	115 kW
Leistung – kombiniert	652 kW
Hubraum	4,6-Liter
Verbrauch	~ 3,3 l / 100 km
El. Reichweite	~ 30 km
Höchstgeschw. – el.	150 km/h
Höchstgeschw.	> 340 km/h
Beschleunigung	0-100 km/h in 2,8 s
Leergewicht	1640 kg



Quelle: Porsche AG

Karosseriebauweisen – Vergleich

	Schalenbauweise	Space-Frame
Tragstruktur	<ul style="list-style-type: none"> 3D Halbschalenelemente 	<ul style="list-style-type: none"> 3D-Rahmenstruktur aus geschlossenen Profilen
Fügeprinzip	<ul style="list-style-type: none"> I.d.R. Stoffschluss/Punktschweißen 	<ul style="list-style-type: none"> I.d.R. Stoffschluss
Außenhaut	<ul style="list-style-type: none"> Mittragend, in die Tragestruktur integriert 	<ul style="list-style-type: none"> Teilweise mittragend
Biege- / Tors.steifigk.	<ul style="list-style-type: none"> Hoch / sehr hoch 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hoch / hoch
Crashperformance	<ul style="list-style-type: none"> Abgestufte Verzögerungen der Crashelemente, kraftflussgerechte Gestaltung eingeschränkt 	<ul style="list-style-type: none"> Frontalcrash sehr gut, Seitencrash fallabhängig; kraftflussgerechte Gestaltung
Halbzeuge	<ul style="list-style-type: none"> Blechplatinen 	<ul style="list-style-type: none"> Profile, Gusselemente, Bleche
Serieneinsatz	<ul style="list-style-type: none"> Großserie 	<ul style="list-style-type: none"> Mittlere Serie / Großserie
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> Bekannte und kostenoptimierte Fertigungsverfahren für größte Stückzahlen; Theoretisch vorhandener Gewichtsvorteil wird durch Fertigungsverfahren und Kosten eingeschränkt, Gewichtsreduktion durch Materialsubstitution 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Bauteilezahl durch Integration, hohe Toleranz-anforderungen im Zusammenbau, eingeschränktes Spektrum anwendbarer Fügeverfahren

Quelle: Volkswagen AG

Karosseriebauweisen – Vergleich

	Monocoque	Mischbauweise Schale/ Space-Frame
Tragstruktur	<ul style="list-style-type: none"> 2D und 3D-Schalenelemente 	<ul style="list-style-type: none"> 3D-Rahmenstruktur aus geschlossenen Profilen + partielle Schalenelemente
Fügeprinzip	<ul style="list-style-type: none"> Form- und Stoffschluss 	<ul style="list-style-type: none"> I.d.R. Stoffschluss
Außenhaut	<ul style="list-style-type: none"> Nicht mittragend (z.B. Türen) 	<ul style="list-style-type: none"> Mittragend in Tragstruktur integriert
Biege- /Tors.steifigk.	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hoch / sehr hoch 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hoch / Sehr hoch
Crashperformance	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Belastungen möglich, aber auch hohe Insassenbelastung 	<ul style="list-style-type: none"> Frontalcrash sehr gut, Seitencrash fallabhängig; kraftflussgerechte Gestaltung
Halbzeuge	<ul style="list-style-type: none"> Blechplatinen, Sandwichmaterialien 	<ul style="list-style-type: none"> Profile, Gusselemente, Blechplatinen
Serieneinsatz	<ul style="list-style-type: none"> Kleinstserie / Entwicklung zur Mittelserien-Tauglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Großserie
Bemerkungen		<ul style="list-style-type: none"> Nutzung der Schubfeldaussteifung durch Blechschalenelemente; im Tragrahmen hohe Toleranzanforderungen und eingeschränkte Fügeverfahren, etwas geringeres Integrationspotenzial

Quelle: Volkswagen AG

Karosseriebauweisen – Mischbauweise am BMW 7er



Quelle: BMW

Literaturempfehlung

- *Henning, F.; Moeller, E.:* Handbuch Leichtbau, Methoden, Werkstoffe, Fertigung; 2011, Carl Hanser Verlag München Wien
- *Friedrich, H. E.:* Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, ATZ/MTZ Fachbuch; 2013, Springer Fachmedien Wiesbaden
- *Schindler, V., Sievers, I.:* Forschung für das Auto von Morgen; 2008, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg
- *Klein, B.:* Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung; 2009, Vieweg + Teubner/GWV Fachverlag Wiesbaden