

RUB

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

ADVANCED MATERIALS PROCESSING AND MICROFABRICATION

Ein- und mehrphasige Stähle im Automobilbau



Fakultät Maschinenbau

fortschritt studieren

Struktur

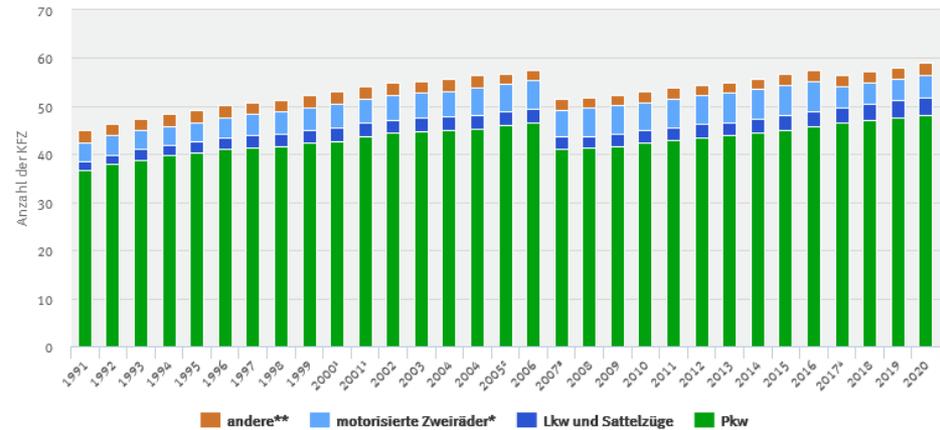
1. Einleitung: Automobilfertigung
2. Ziele und Arten des Leichtbaus
3. Anforderungen an Werkstoffe
4. Karosseriewerkstoffe aus Stahl: P, IF, HSLA, BH, DP, TRIP, CP, MS
5. Einfluss auf die Fertigung
6. Zusammenfassung
7. Überprüfungsfragen

Werkstoffe im Automobil

Automobilindustrie in Deutschland

- Schlüsseltechnologie > 140.000 (22 %) Ing. im Maschinen- und Fahrzeugbau
- rund 48 Mio. PKW in Deutschland (1.1.2013: 43,3 Mio. / 1.1.2021: 48,2 Mio. / ca. 1 Mrd. weltweit)
- Kraftstoffverbrauch BRD 2014: 43 Mrd. Liter Diesel und 25 Mrd. Liter Benzin
- Leichtbau als Forschungsschwerpunkt
 - Ziel: Senkung des Gesamtkraftstoffverbrauchs
 - Weg: u.a. Multimaterialsysteme
- Werkstoffauswahl mit Blick auf
 - Beanspruchung
 - geringes Gewicht, hohe Festigkeit
 - Fertigungsverfahren
 - Kosten
 - Recyclingaspekte

Entwicklung des Kraftfahrzeugbestands



Umweltbundesamt nach BMVI und KBA

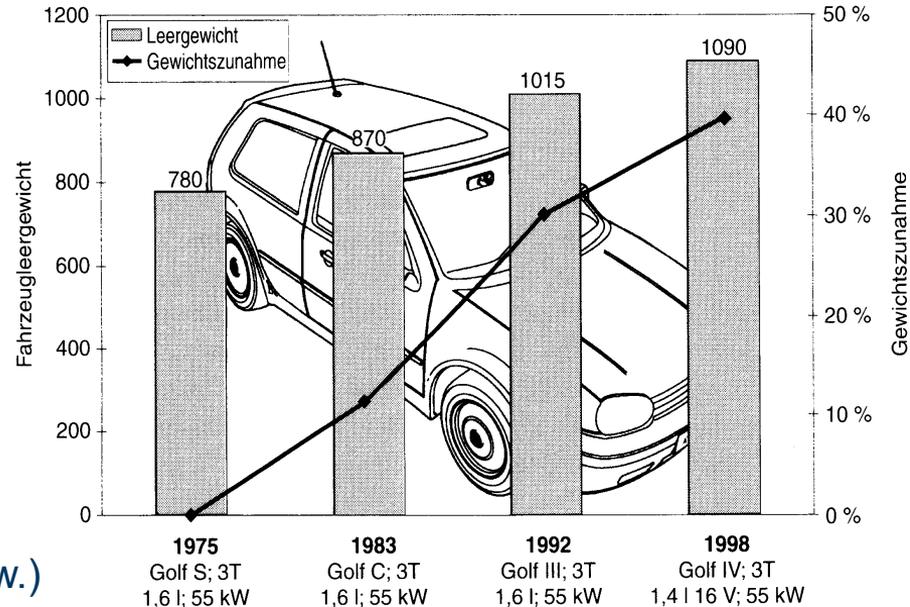
Werkstoffe im Automobil

Hauptziel der Fahrzeugkonstrukteure:

- CO₂-Ausstoß verringern → **Kraftstoffverbrauchsreduktion**
- Verringerung des Luftwiderstandes ca. 3%
- Reduktion des Rollwiderstandes ca. 2%
- Gewichtsminderung durch Leichtbau ca. 3-7%
- höhere Sicherheit → Energieaufnahmeverm.

Konflikt:

- Servolenkung / Airbags / ABS, ESP / Klima
- Breite Räder / Geräuschkämmung
- Hilfsmotoren (Zentralverriegelung, Fensterheber, Sitzverstellung, Scheinwerfer usw.)
- ... und vor allem das Kauf- und Nutzungsverhalten !



Werkstoffe im Automobil

Stoffleichtbau:

- Einsatz von Werkstoffen mit geringerer Dichte
- Höherfeste Stähle, Aluminium, Magnesium, Titan, Kunststoffe
- 100 kg Gewichtseinsparung \Rightarrow 0,3 bis 0,6 l / 100km Kraftstoffeinsparung

Formenleichtbau:

- konstruktiv günstige Gestaltung der Bauteile, Dickenreduktion, Festigkeitserhöhung
- Beanspruchungsgerechte Auslegung \rightarrow Multimaterialmix

Fertigungsleichtbau:

- Einbezug der Fertigungstechnologie
- z.B. Fügen von Multimaterialsystemen oder Einsatz von "tailored blanks" oder Warmblechumformung („Presshärten“)

Werkstoffe im Automobil

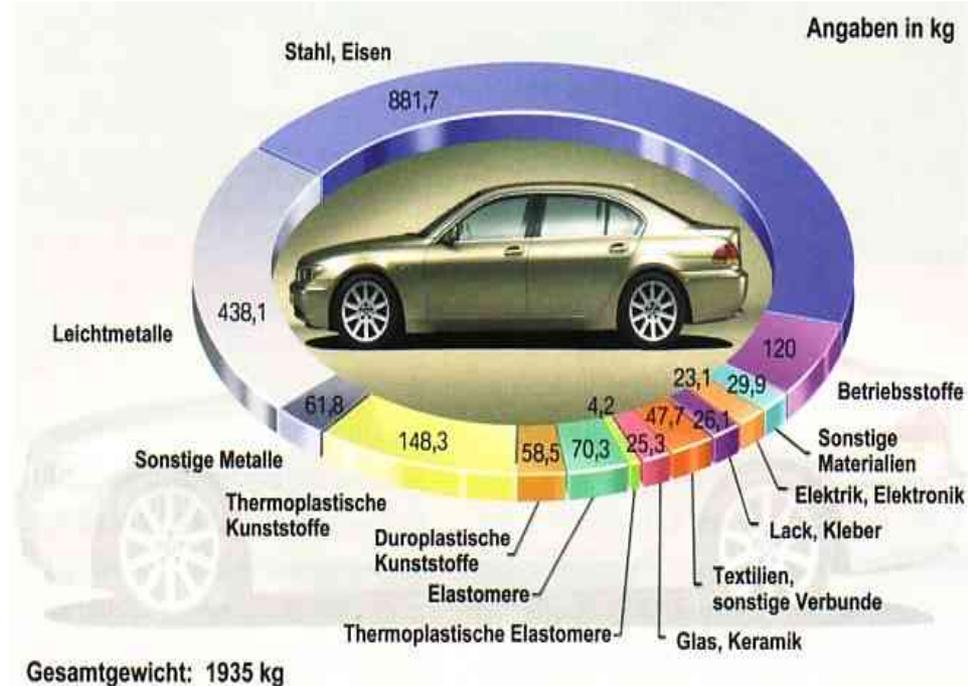
Werkstoffeinsatz im BMW Dixi 20-er Jahre:



Quelle: Sonderheft ATZ/ Werkstoffe 2006

Werkstoffe im Automobil

Werkstoffeinsatz im BMW 7-er Reihe:



Quelle: Sonderheft ATZ/ Werkstoffe 2006

Werkstoffe im Automobil

Werkstoffeinsatz im VW Golf VII



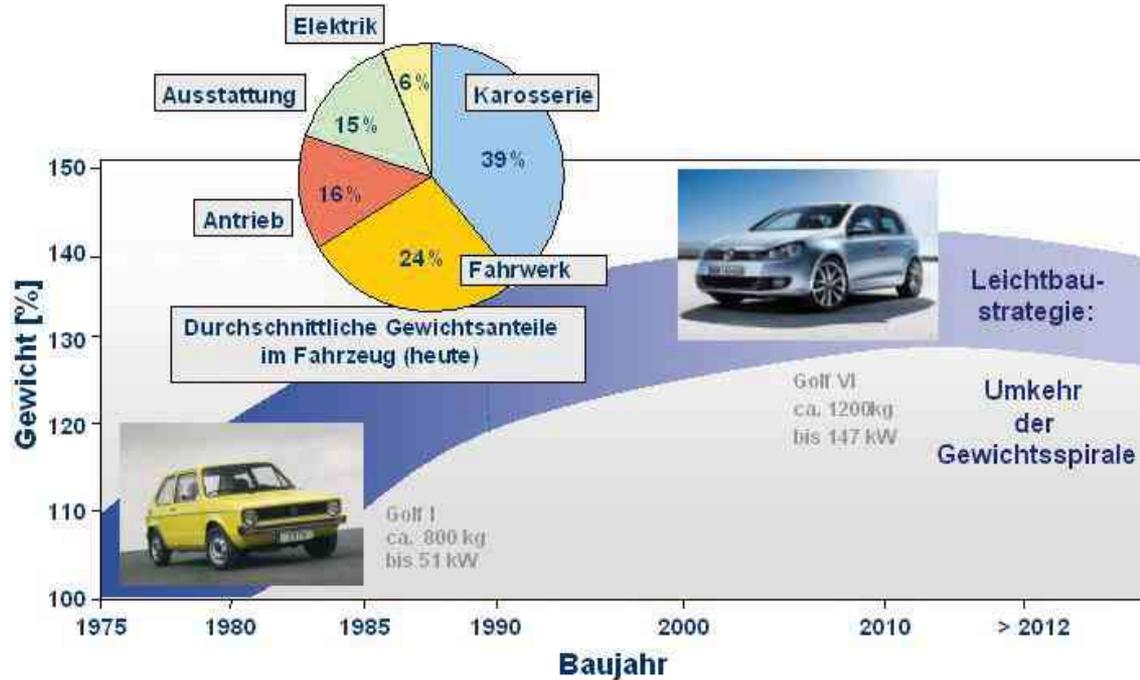
Vgl. Video „Golf 7-Fertigung“ in Moodle:

- Identifizieren Sie Komponenten, die eine dunklere Färbung aufweisen
- Recherchieren Sie Online zum Schlagwort „Presshärten“ (Texte, Videos etc.)
- Welche Karosserieteile können Sie dem Presshärten zuordnen? Welche Vorteile bietet das Verfahren, auch bzgl. der Werkstoff-Eigenschaften?

Quelle: ATZ November 2012

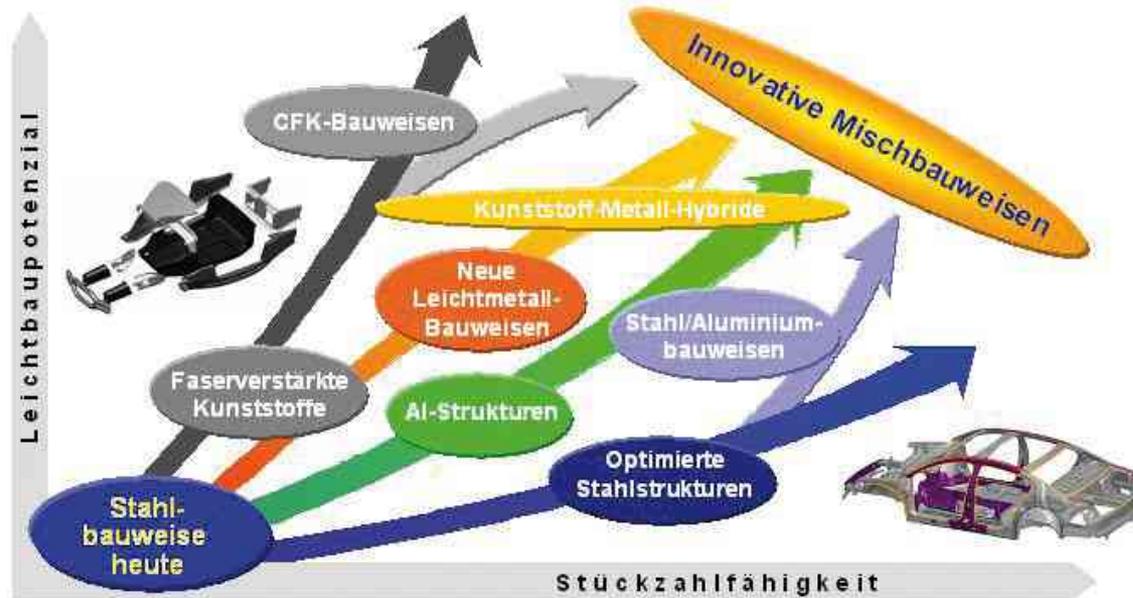
Werkstoffe im Karosseriebau

Leichtbau – Umkehr der Gewichtsspirale



Werkstoffe im Karosseriebau

Mischbauweise – Trend für Leichtbaukonzepte



Werkstoffe im Karosseriebau

Mischbauweisenkonzept für 1-Liter-Autos



Quelle: EK, Dr. Rabe

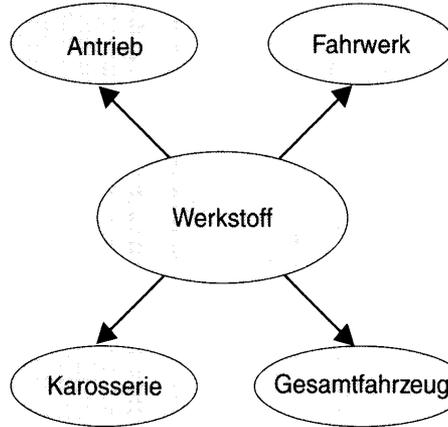


Werkstoffe im Karosseriebau

	Stahl	Aluminium	Magnesium	Kunststoffe
Dichte [kg/dm ³]	7,85	2,7	1,74	0,9 – 2,1
Zugfestigkeit [MPa]	290 – 1000	60 – 450	160 – 240	20 - 70
Kosten/ Bauteile [%]	100	350	150	90 - 160
Gewicht/ Bauteile [%]	100	55 – 75	45	50 - 70

Anforderungen an Werkstoffe

Hochtemperaturbeständigkeit
Dauerfestigkeit
Verschleißfestigkeit
Leichtbau
Herstellbarkeit
Wirtschaftlichkeit
...



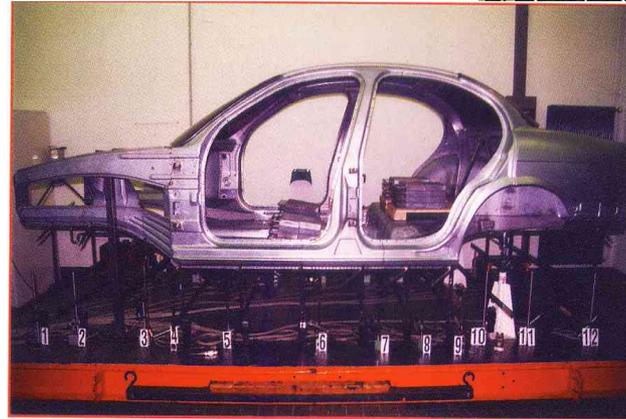
Zeitfestigkeit
Steifigkeit
Festigkeit
Schlagzähigkeit
Korrosionsbeständigkeit
Leichtbau
Herstellbarkeit
Wirtschaftlichkeit
...

Torsionssteifigkeit
Struktursteifigkeit
Schwingungsverhalten
Crashverhalten
Betriebsfestigkeit
Leichtbau
Herstellbarkeit
Wirtschaftlichkeit
Korrosionsbeständigkeit
Oberflächenqualität
Reparaturfreundlichkeit
....

Wirtschaftlichkeit
Recyclingfreundlichkeit
Schadstoff-Freiheit
Leichtbau
...

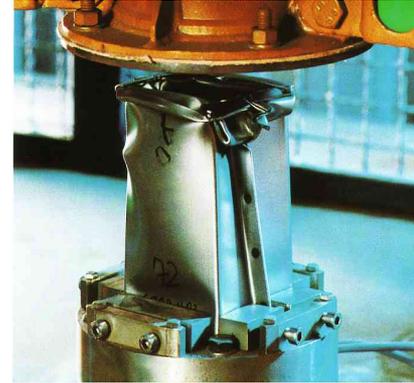
Anforderungen an Werkstoffe

- **Festigkeit** (Zugversuch, Dauerschwingversuch)
- **Umformverhalten** (Hydraulische Pressen, Tief- und Streckziehversuche)
- **Verbindungstechnik** (Fügetechnik, Dauerschwingfestigkeit)
- **Korrosionsschutz** (Korrosionstests)
- **Torsionsteifigkeit** Bauteiltests, Fahrtests



Anforderungen an Werkstoffe

- **Betriebsfestigkeit**
- **Beulsteifigkeit**
- **Crashverhalten**
- **Reparaturverhalten**
- **Rezyklierbarkeit**



Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Flacherzeugnisse: Vielzahl von Stahlsorten im Karosseriebau

- warmgewalzte Flacherzeugnisse 3 - 12mm Blechdicke
- kaltgewalzte Flacherzeugnisse < 3mm, d.h Fertigerzeugnisse die ohne Vorwärmung eine Querschnittsveränderung von min. 25% durch Kaltwalzen aufweisen

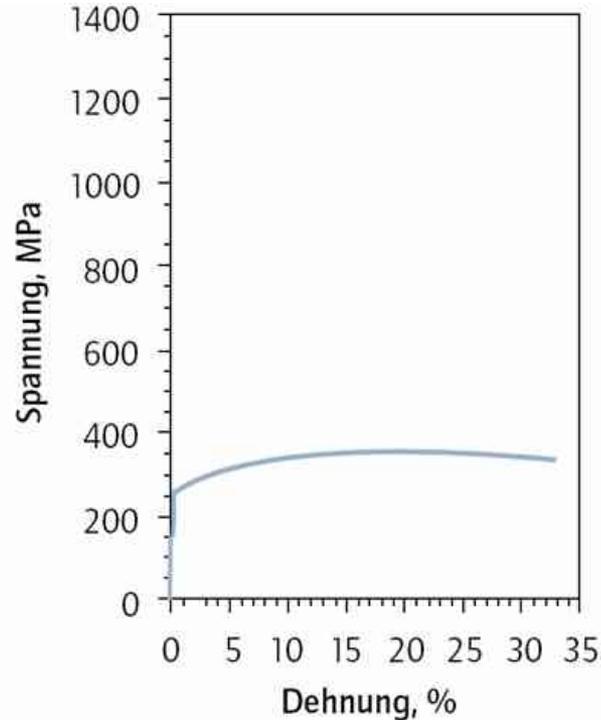
Lieferform:

- unbeschichtet
- metallischer Überzug
- organischer Überzug

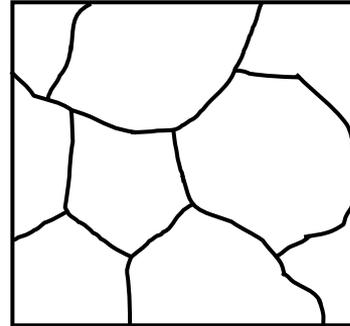


Coils aus Warm- und Kaltband

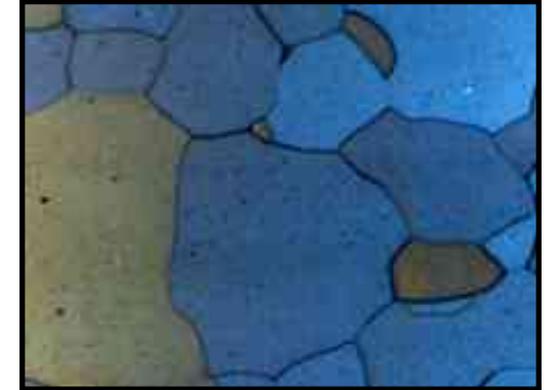
Karosseriewerkstoffe aus Stahl



Quelle: ThyssenKrupp Stahl



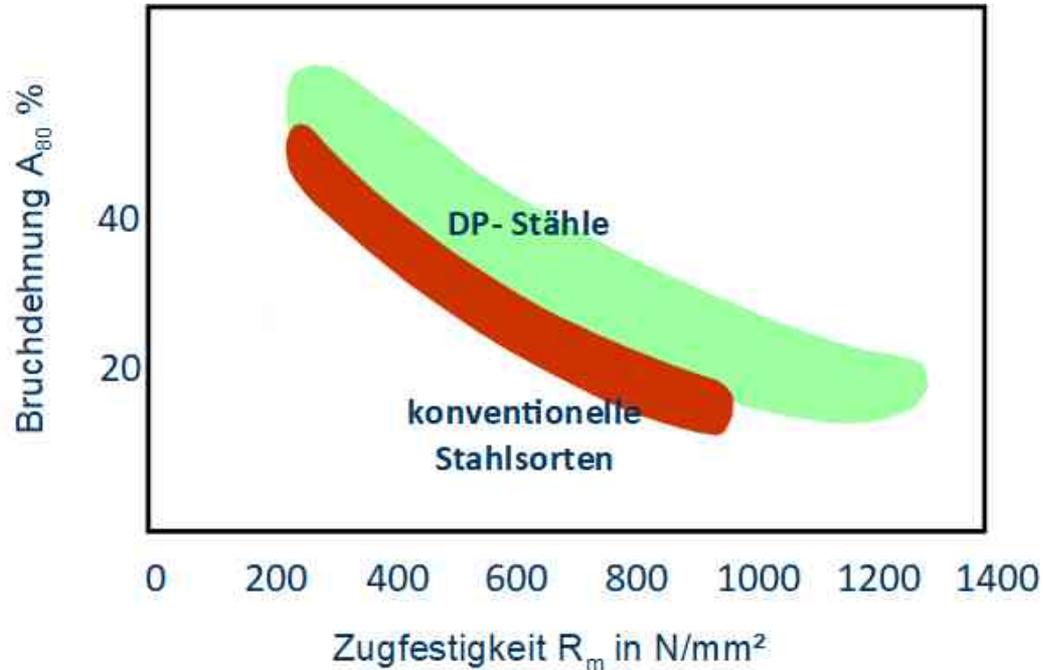
Korngröße
11 μm



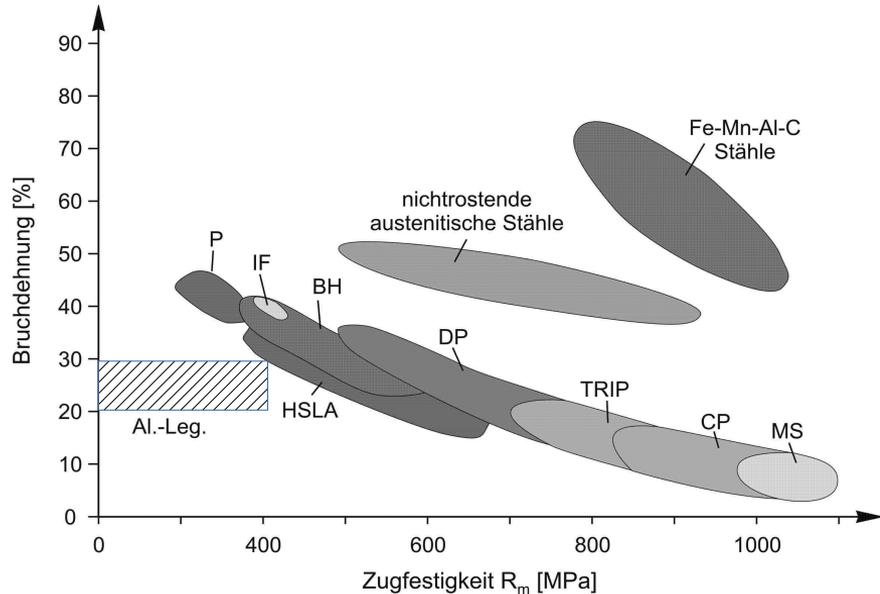
- Niedriger C-Gehalt
- Ferritisches Gefüge
- grobkörnig
- Niedrige Festigkeit
- Hohe Dehnung
- Gute Umformbarkeit

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Problem: Festigkeit \uparrow , Bruchdehnung \downarrow (Verformbarkeit)



Karosseriewerkstoffe aus Stahl



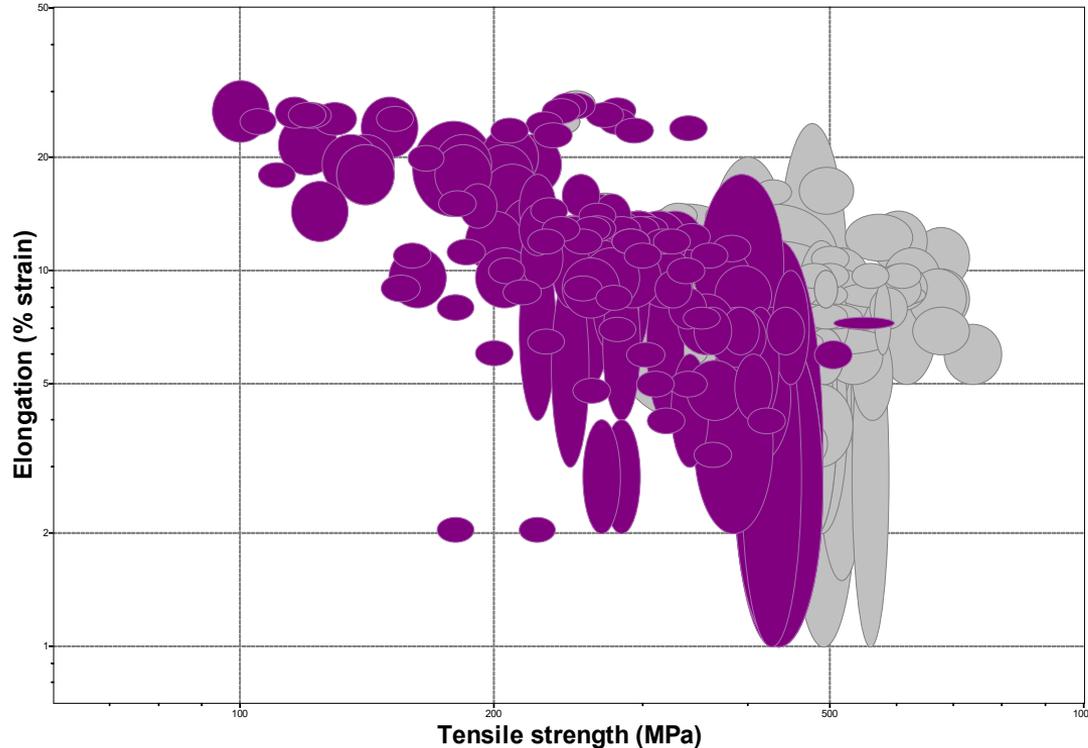
Einordnung höherfester, schweißgeeigneter Stähle

im Vergleich zu austenitischen Stählen und Aluminiumlegierungen:

- P = phosphorlegiert,
- IF = interstitial free,
- HSLA = high strength, low alloy
- BH = bake hardening,
- DP = dual phase,
- TRIP = transformation induced plasticity,
- CP = Complexphasen,
- MS = Martensitphasen (nach U. Brüx und G. Frommeyer).

Quelle: Eisenwerkstoffe: Berns, Theisen 2008

Zum Vergleich: Al-Legierungen



Bruchdehnung und Zugfestigkeit von Al-Knetlegierungen (2000er bis 8000er Serie; ohne 1000er-Serie):

- magenta: gute oder sehr gute Schweißbarkeit
- grau: schlechte Schweißbarkeit
- Fazit: Verwendung von Al-Leg. mit hohen Festigkeiten eingeschränkt

Quelle: GRANTA EduPack 2021

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Weiche, unlegierte Stähle zum Kaltumformen

Stahlsorte			Chemische Zusammensetzung Massenanteile in %					Mechanische Eigenschaften				
DIN EN 10130	Werkst. Nr.	Früher DIN 1623 Teil 1 / SEW 095	C max.	Mn max.	P max.	S max.	Ti max.	Streckgrenze Rp 0,2 MPa min. max.		Zugfestigkeit Rm MPa min. max.		Bruch- dehnung A80 %
DC 01	1.0330	St 12	0,12	0,60	0,045	0,045		140	280	270	410	28
---	1.0333	U St 13	0,10	--	--	--	--	140	250	270	370	32
DC 03	1.0347	R R St 13	0,10	0,45	0,035	0,035		140	240	270	370	34
DC 04	1.0338	St 14	0,08	0,40	0,030	0,030		140	210	270	350	38
DC 05	1.0312	St 15	0,06	0,35	0,025	0,025		140	180	270	330	40
DC 06	1.0873	IF 18	0,02	0,25	0,020	0,020	0,3	120	180	270	350	38

„interstitial free“-Stahl (IF-Stahl):

- durch $Ti + Nb < 0,3$ sind C ($< 0,02$) und N fest gebunden
- kontinuierlich Streckgrenze
- Kaltverfestigung beim Umformen weil $n \uparrow$
- für:
Türinnenbleche, Radhaus,
Reserveradmulden,
Bodenbleche,
Tunnelbereiche

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Höherfeste Tief- und Streckziehgüten (IF)

Stahlsorte	Chemische Zusammensetzung Massenanteile in %							Streckgrenze Rp0,2 MPa		Zugfestigkeit Rm MPa		Bruch- dehnung A80 %
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Al max.	Ti	min.	max.	min.	max.	
HX180Y	0,01	0,50	0,10	0,06	0,025	0,02	0,12	180	240	340	400	34
HX220Y	0,01	0,70	0,10	0,08	0,025	0,02	0,12	220	280	350	510	32
HX260Y	0,01	0,70	0,10	0,08	0,025	0,02	0,12	260	320	380	440	30

- Streckgrenze: 220 – 360 N/mm², hoher Verfestigungsexponent
- ferritische Matrix, tiefstentkohl
- Mischkristallhärtung durch Si, Mn, P
- Mikrolegierung mit Nb, Ti: Kornfeinung und Aushärtung; Karbidbildung mit C
- flache Teile: Türen, Hauben, Kofferraumdeckel

Quelle: ThyssenKrupp Stahl

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

P-legierte & BH-Stähle für Karosserieteile

		Stahlsorte		Chemische Zusammensetzung Massenanteile in %						Streckgrenze		Zugfestigkeit		Bruch-
EN ?	SEW 094	Werkst. Nr.	C max.	Mn max.	Si max	P max.	S max.	Al max.	min.	max.	min.	max.	dehnung A80 %	
Stähle mit Phosphorlegierung														
HX220P	ZStE 220P	1.0397	0,06	0,70	0,50	0,08	0,03	0,02	220	280	340	420	30	
HX300P	ZStE 300P	1.0448	0,10	0,70	0,50	0,12	0,03	0,02	300	360	420	500	26	
Stähle mit Streckgrenzenerhöhung durch Wärmeeinwirkung														
HX180B	ZStE 180BH	1.0395	0,04	0,70	0,50	0,06	0,03	0,02	180	240	300	380	32	
HX300B	ZStE 300BH	1.0444	0,10	0,70	0,50	0,12	0,03	0,02	300	360	400	480	26	

- Streckgrenze: 220 – 360 N/mm²
- Mischkristallhärtung durch Mn, P
- Bake-Hardening Effekt (künstliche Verformungsalterung)
- Streckgrenzenerhöhung durch Erwärmung beim Lackeinbrennen

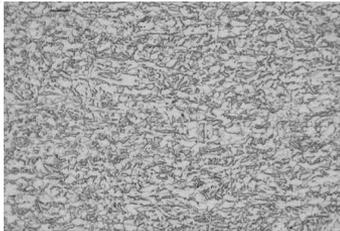


Quelle: ThyssenKrupp Stahl

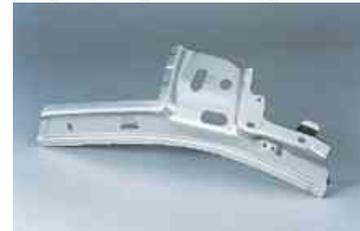
Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Dualphasenstähle

Stahlsorte		Chemische Zusammensetzung Massenanteile in %							Streckgrenze		Zugfestigkeit R_m		Bruch- dehnung A80 %
	TKS	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Al max.	Cr+ Mo	$R_{p0,2}$ MPa min.	$R_{p0,2}$ MPa max.	min.	max.	
HCT500X	DP500	0,14	2,0	0,15	0,08	0,015	0,015	1,0	290	360	500		25
HCT600X	DP600	0,14	2,0	0,15	0,08	0,015	0,015	1,0	330	400	600		20



- Ferritische Matrix mit eingelagerten Martensitinseln
- gute Umformeigenschaften im höheren Festigkeitsniveau
- günstiges Rückfederungsverhalten
- hohes Verfestigungs- und Energieabsorptionsvermögen



- crashrelevante Teile,
- festigkeitsrelevante Teile

Quelle: ThyssenKrupp Stahl

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Nomenklatur höherfester Stahlbleche

H α T0000 β + Beschichtung

H: hohe Streckgrenze

α : X=Walzzustand nicht festgelegt, C=kaltgewalzt, D=warmgewalzt

T: Mindestzugfestigkeit

0000: Wert der Mindeststreckgrenze (LA, Y, B) ODER Mindestzugfestigkeit (F, X, C, M, T)

β : D=für Schmelztauchüberzüge, LA=low alloyed, B=bake hardening, Y=interstitial free

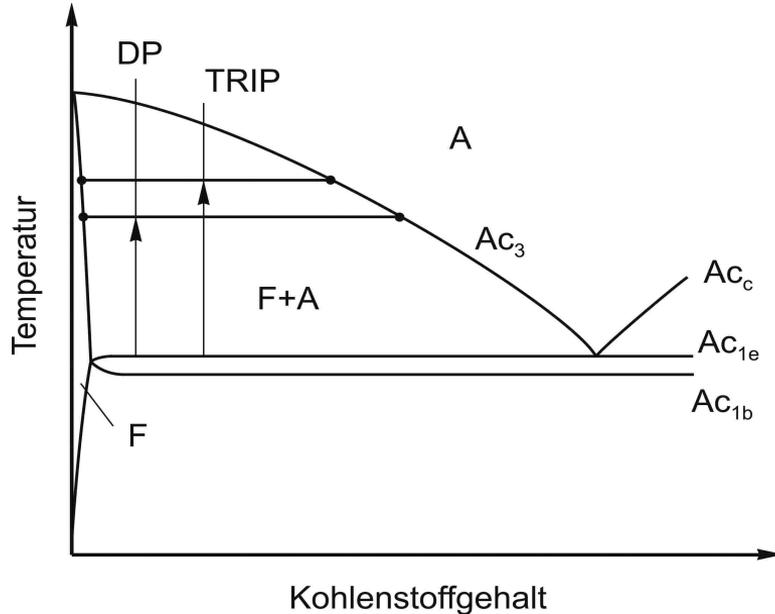
β : F=ferritisch-bainitisch, X=Dualphasen, T=TRIP, C=Complexphasen, M=Martensitphasen

Angefügt: „+ Beschichtungsart“, z.B. „Z“ für Zink oder „ZA“ für Zink-Aluminium

Quelle: VDEh Stahl-Informationszentrum, Merkblatt 109

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Interkritische Gefügeeinstellungen



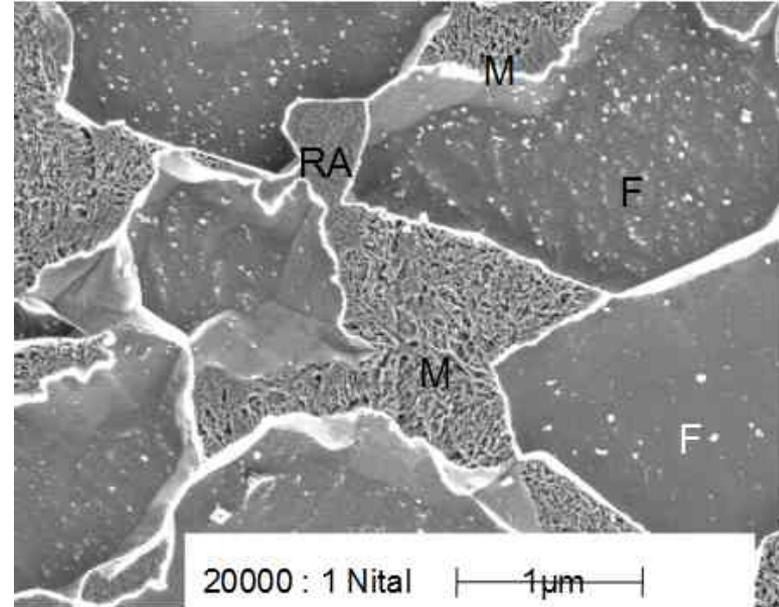
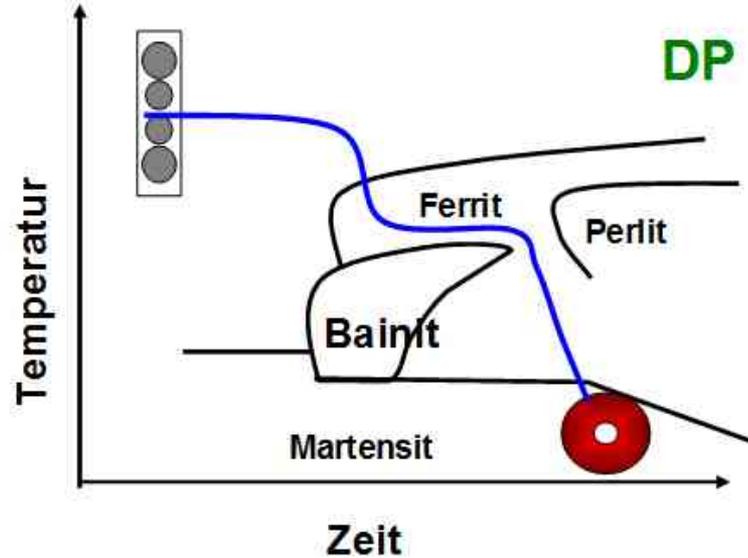
Interkritische Gefügeeinstellung (schematisch):

Durch Halten im Zweiphasengebiet stellen sich nach dem Hebelgesetz gleichgewichtsnaher Anteile von Ferrit und Austenit ein, deren Menge durch Legierungsgehalt und Temperatur variiert werden kann. In einem Dualphasenstahl mit $\approx 0.1\%$ C soll überwiegend Ferrit entstehen, in einem TRIP-Stahl mit $\approx 0.2\%$ C nur zur Hälfte. Da im Ferrit wenig Kohlenstoff gelöst wird, reichert er sich im Austenit an.

Quelle: Eisenwerkstoffe: Berns, Theisen 2008

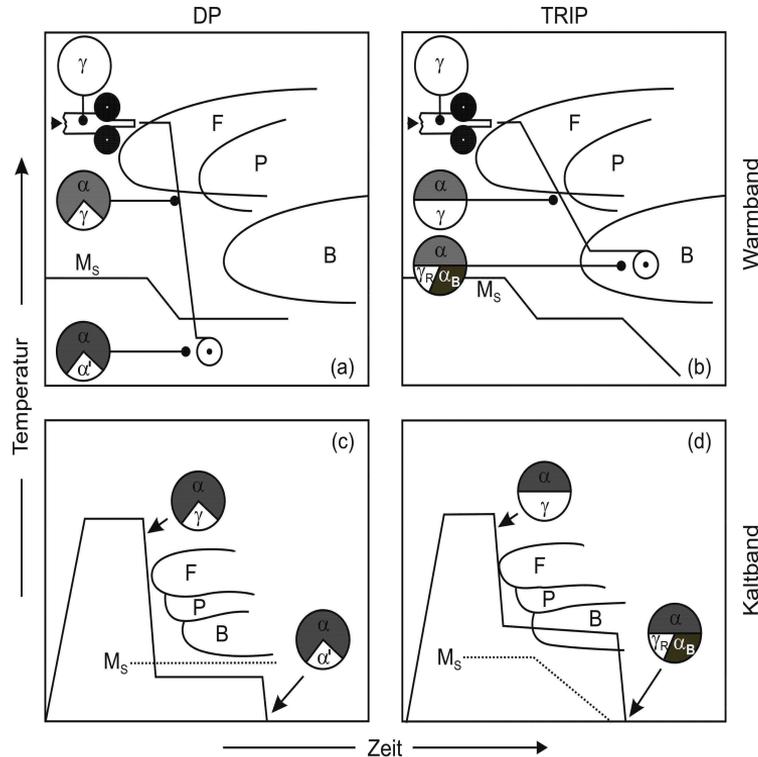
Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Warmgewalzter DP-Stahl



Quelle: Thyssen Krupp

Karosseriewerkstoffe aus Stahl



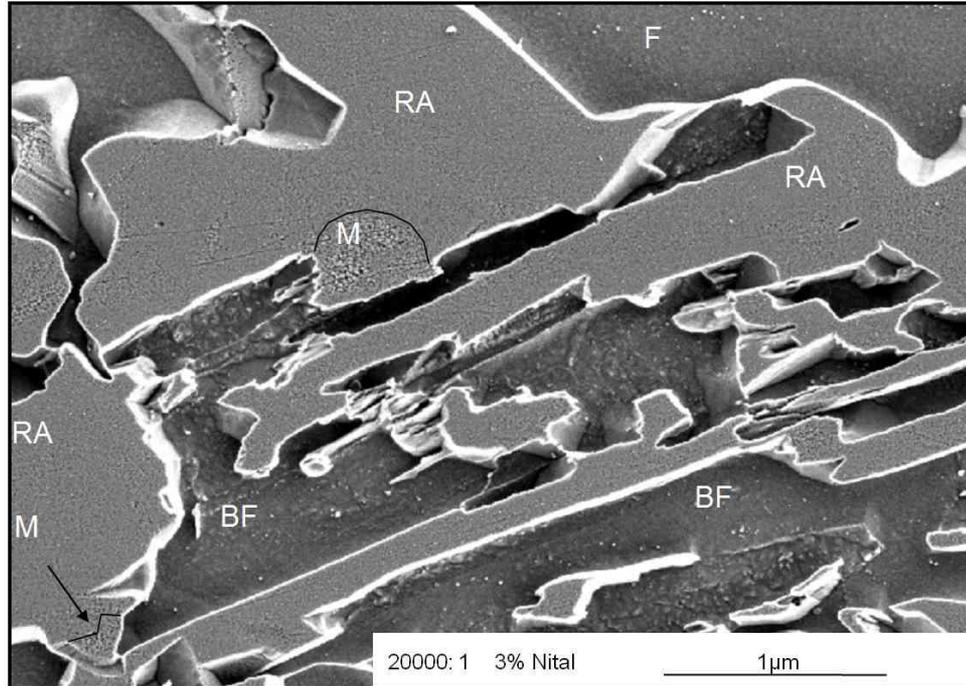
Fertigung von Mehrphasenstählen (schematisch, nach W. Bleck):

- (a) und (b) Warmbandfertigung durch Walzen und Gefügeeinstellung aus der Walzhitze,
- (c) und (d) Kaltbandfertigung durch Kaltwalzen von entzündertem Warmband und Gefügeeinstellung durch Abkühlen von interkritischer Glühtemperatur,
- (a) und (c) Dualphasenstahl,
- (b) und (d) TRIP-Stahl. Die ungefähren Phasenmengen sind als Kreissegmente dargestellt:
 - γ, γ_R=Austenit, Restaustenit,
 - α, α_B, α'= Ferrit, Bainitferrit, Martensit.

Quelle: Eisenwerkstoffe: Berns, Theisen 2008

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Gefüge TRIP-Stahl



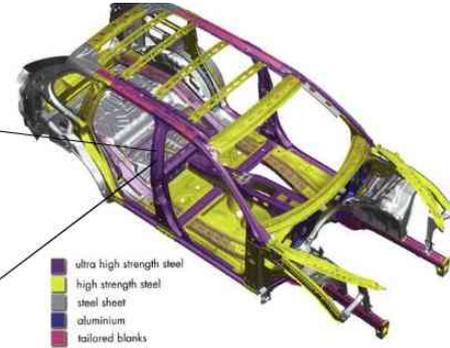
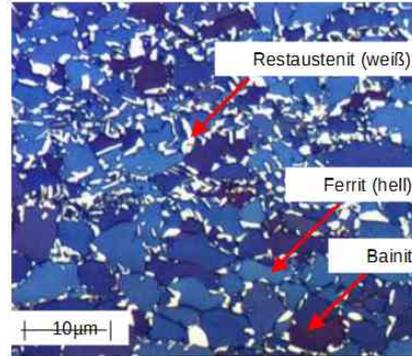
Quelle: ThyssenKrupp Stahl

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Anwendung TRIP-Stahl

- crashrelevante Teile
- festigkeitsrelevante Teile
- Leichtbau

- $R_m = 700$ bis 900 Mpa
- $R_{p0,2} = 400 - 600$ MPa
- Bruchdehnung = $20 - 25$ %
- Ferrit/Bainitgefüge mit Restaustenitinseln (RA)
- RA wandelt verformungsinduziert beim Tiefziehen in α' um
 - hoher Verfestigungsexponent
- Mischkristallhärtung durch Mn und Si
- **Si unterdrückt Bildung Fe_3C während Bainitbildung**
- Bake-hardening Effekt



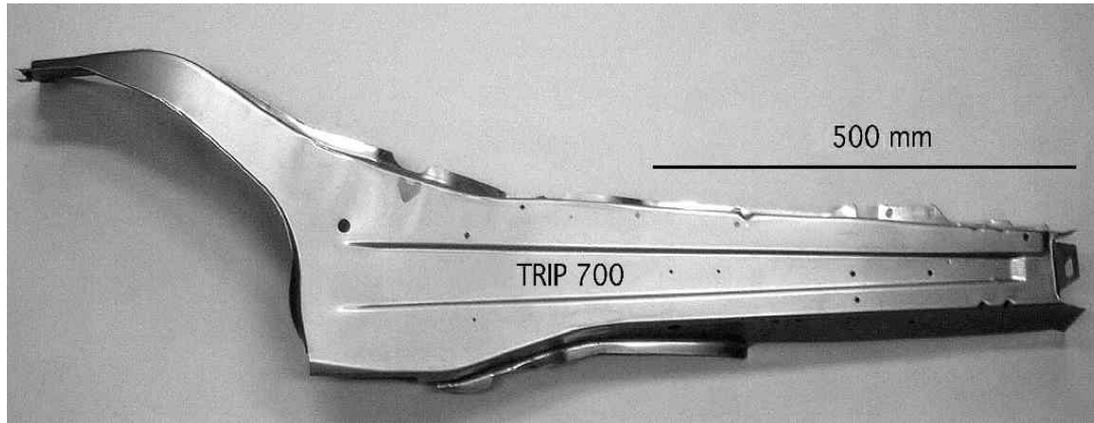
C	Si	Mn	Al
0,1 – 0,4	0,3 – 2,0	1,0 – 3,0	0,05 – 2,0

Quellen: ThyssenKrupp, VoestAlpine Stahl GmbH

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Anwendung TRIP-Stahl (**TRIP**: Transformation Induced Plasticity)

- Gefüge: Ferrit + Bainit + 20% metastabiler Restaustenit (RA)
z.B. HCT590**T** = „TRIP590“, kaltgewalzt
- Verformung: RA \Rightarrow Martensit \Rightarrow Festigkeit \uparrow (600 - 850 N/mm²)



Säulenverstärkung: $d_{\text{Blech}} = 1\text{mm}$

Quelle: ThyssenKrupp Stahl

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Complexphasenstähle (**CP-Stahl**):

Gefüge ((Ferrit), Bainit, (Martensit) + Karbide, Nitride)

↓ ↓
Ausscheidungshärtung

⇒ Festigkeit ↑ (800 - 1000 N/mm²)
z.B. HDT750**C**, warmgewalzt



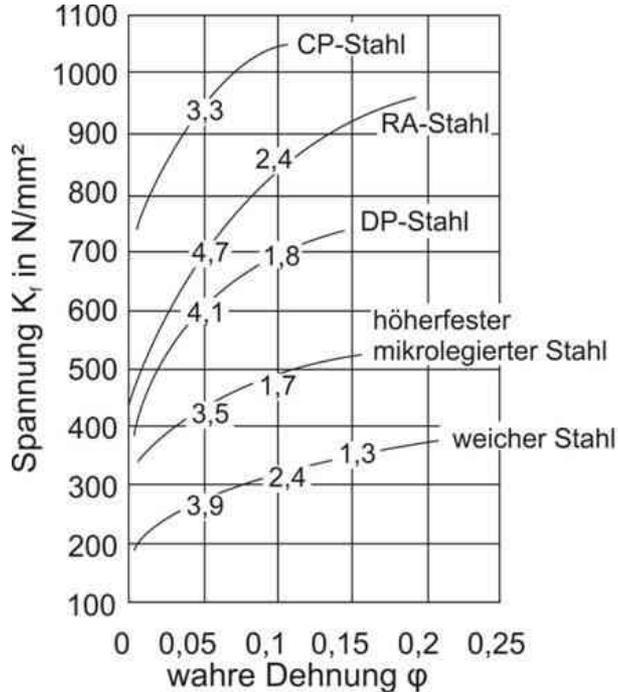
WB: 1,6 - 3,5 mm

Türaufprallträger: $d_{\text{Blech}} = 1,5 \text{ mm}$

Quelle: ThyssenKrupp Stahl

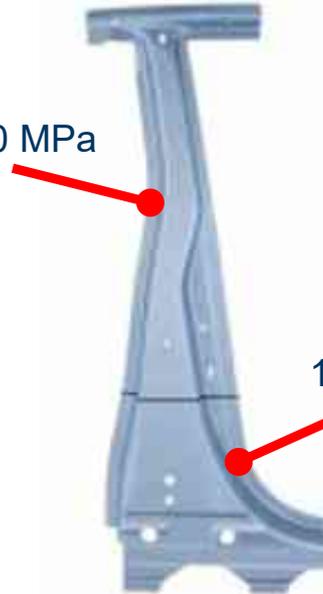
Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Kaltverfestigung und Anwendung von Complexphasenstahl



Streckgrenze und Zugfestigkeit nach der Umformung

895 / 940 MPa



1085 / 1150 MPa

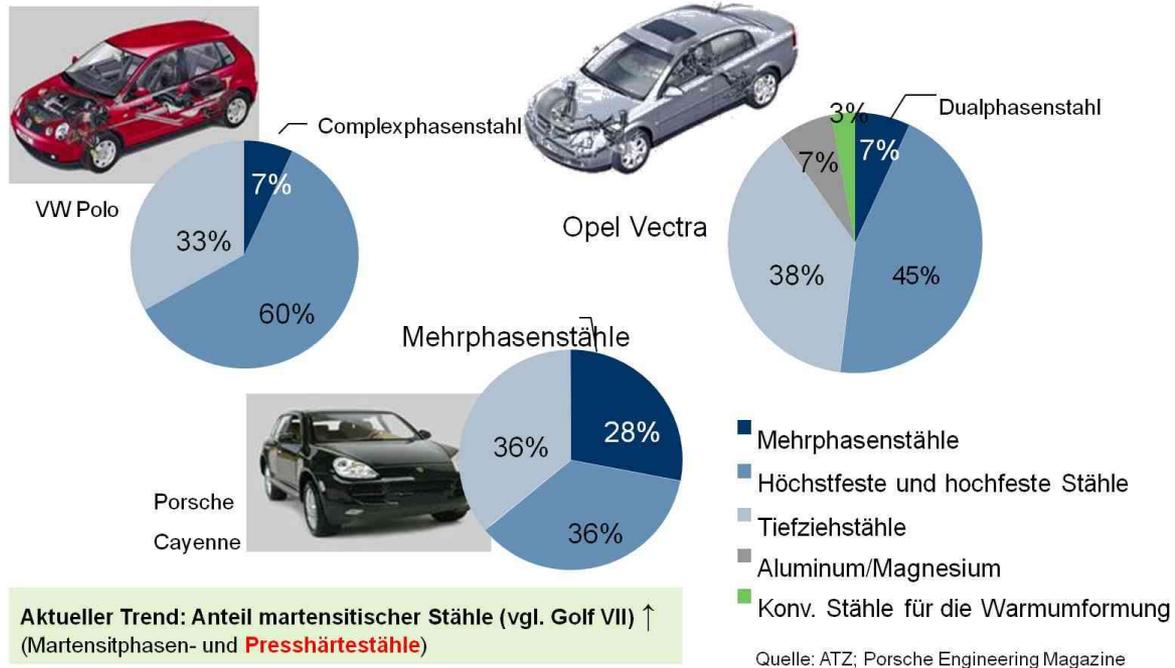
Complexphasenstahl HDT780C

Dicke:	2,0 mm
Streckgrenze:	793 MPa
Zugfestigkeit:	903 MPa
Bruchdehnung A80:	14 %

Quelle: ThyssenKrupp Stahl

Karosseriewerkstoffe aus Stahl

Anteile Mehrphasenstahl in Fahrzeugen



Zusammenfassung

- KFZ-Industrie als eine der Schlüsselindustrien der BRD.
- Verwendung Mehrphasenstahl v.a. im Automobil
- Konflikt: Komfort vs. Gewicht
- Aktueller Trend: Zunahme der Verwendung “Ultra”-hochfester martensitischer Stähle, bspw. hergestellt über das **Presshärteverfahren** (Warmblechumformung inkl. Härtung)
- Mehrphasenstahl für Umformung bei RT optimiert => Forderung nach hoher Festigkeit und Verformbarkeit
- Eigenschaften von Mehrphasenstähle sind das Ergebnis gezielter thermomechanischer Prozessführung
- Wichtig für die Gefügeeinstellung mehrphasiger DP- oder TRIP-Stähle ist das interkritische Glühen im Zweiphasengebiet $\alpha-\gamma$
- Das thermodynamische Gleichgewicht wird während des IK-Glühens i.d.R. nicht erreicht, mit Auswirkungen auf die Prozessfenster (Details im zweiten VL-Teil).

Überprüfungsfragen

1. Welche Bedeutung haben die Abkürzungen “P, IF, HSLA, BH, DP, TRIP, CP, MS” im Zusammenhang mit Karosseriestählen?
2. Welcher prozesstechnische Unterschied besteht in der Fertigung eines Bauteiles aus HDT1200M und 22MnB5?
3. Wie unterscheidet sich die Gefügeeinstellung eines DP und eines TRIP-Stahles und welche Gefügebestandteile liegen hauptsächlich vor?
4. Nennen Sie drei wichtige Randbedingungen des Leichtbaus.
5. Nennen Sie drei Beispiele für den Fertigungsleichtbau.
6. Was verstehen Sie unter dem Begriff “interkritisches Glühen”?
7. Wie wird ein kaltgewalzter Complexphasenstahl mit einer Mindestzugfestigkeit von 980 MPa bezeichnet?
8. Was sind die wesentlichen Unterschiede zwischen TWIP- und TRIP-Stählen?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit und Ihre Mitarbeit !

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Weber
Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl Werkstofftechnik
Universitätsstr. 150, IC 03-319
D-44801 Bochum