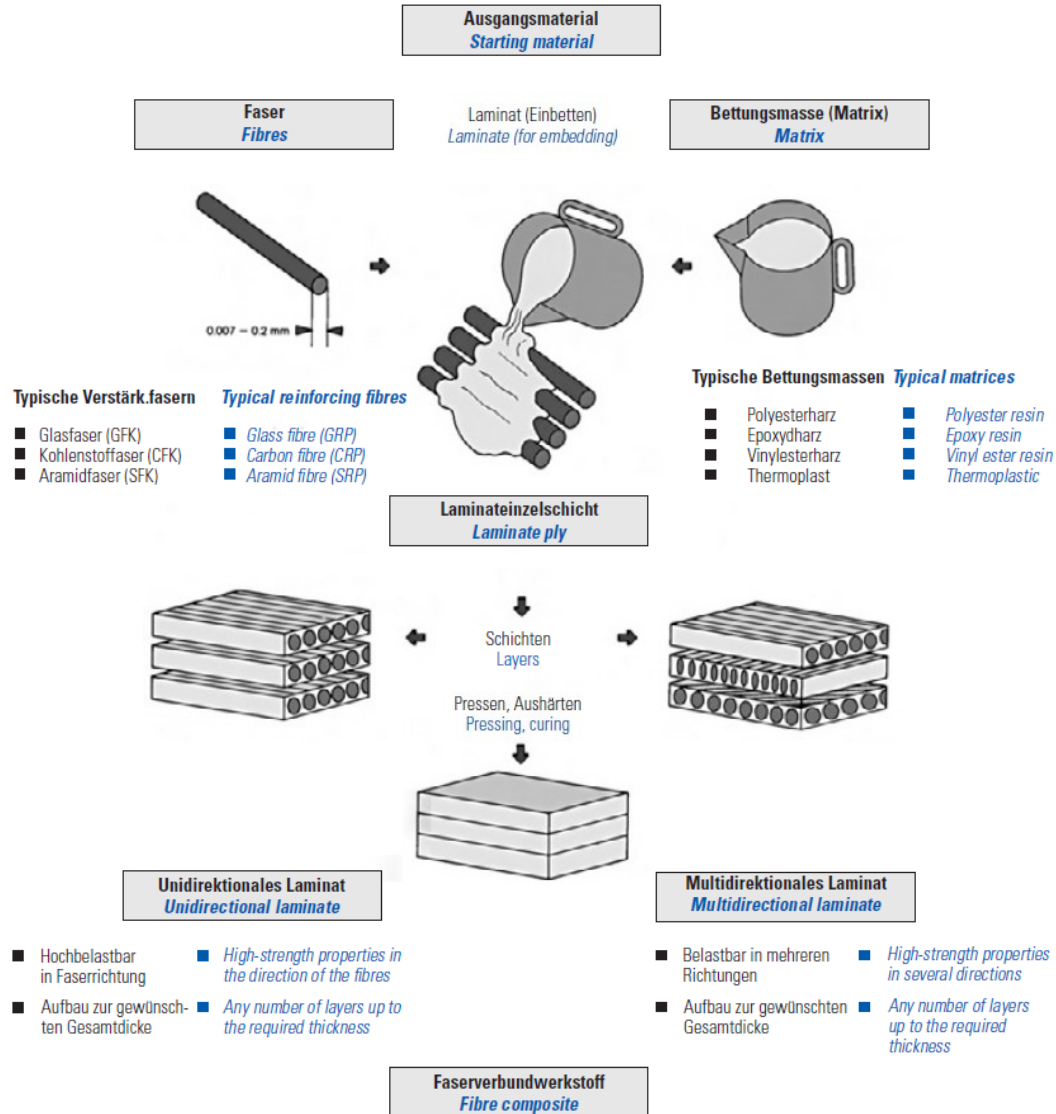


2.3.1. Einführung & Aufbau

2.3.2. Wichtige Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen

2.3.3. Bauweisen & Anwendungsbeispiele

Folie Aufbau Faserverbundwerkstoff



(Quelle: R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH)

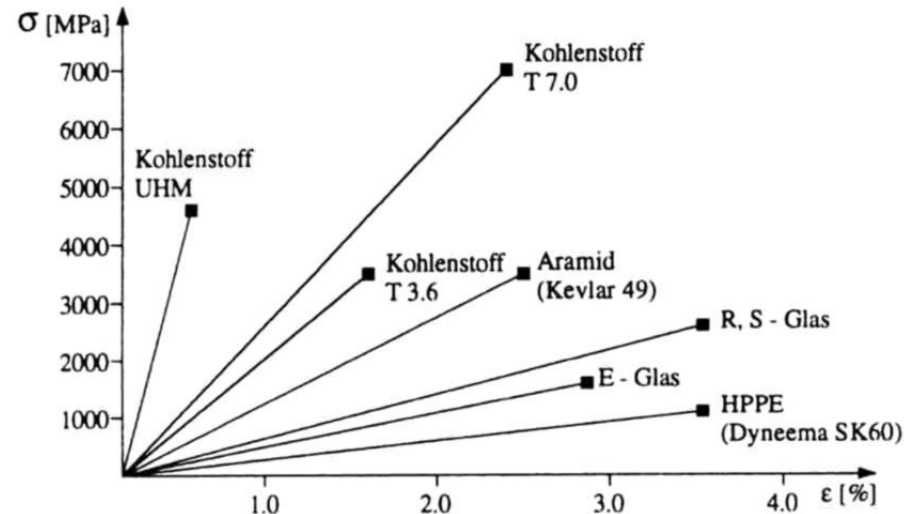
Folie Vergleich wichtiger Faserwerkstoffe

Faserwerkstoffe			
Naturfaser	Kunstfaser		
	Glasfaser	Aramidfaser	Kohlenstofffaser
Hanf, Jute, Sisal, Flachs, Baumwolle, Ramie	E-Glas R, S-Glas D, C-Glas	Hochmodulfaser Niedermodulfaser	HT-Faser HM-Faser HST-Faser IM-Faser
+ Umwelt - Festigkeit - Feuchteaufnahme	++ Preis - feuchteempfindlich	+ Festigkeit + Gewicht + Schlagzähigkeit - UV-Empfindlichkeit - Feuchteaufnahme	++ Festigkeit ++ Steifigkeit - Schlagzähigkeit -- Preis

(Quelle: FOMEKK Weimar)

Folie Komponente Faser – Physikalische Eigenschaften

Werkstoff	Dichte g/cm ³	Zugfestigkeit GPa	E-Modul GPa	lineare Dehn- grenze %	Reißlänge km
Stahl	7,8	1,8 - 2,2	210	1,4 - 1,7	bis 30
Glas	2,6	1,8 - 3,0	72 - 83	2 - 3	70 - 120
Kohlenstoff	1,7 - 1,9	2,4 - 7,0	230 - 700	0,5 - 2,3	150 - 380
Aramid	1,4 - 1,5	2,5 - 3,5	60 - 130	2,0 - 4,0	180 - 240
HPPE	0,97	2,7	89	3,5	295
Flachs	bis 1,5	bis 0,85	bis 25	1,4 - 4	bis 60
Jute	bis 1,5	0,32	27	2,5	bis 25
Ramie	1,5	bis 0,9	bis 24	2,5	bis 61
Baumwolle	1,5	bis 0,75	bis 9	bis 10	bis 50



(Quelle: R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH)

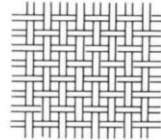
Folie Komponente Faser – Faserausrichtung

Rovings

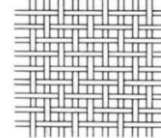


Gewebe

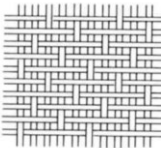
Leinwand



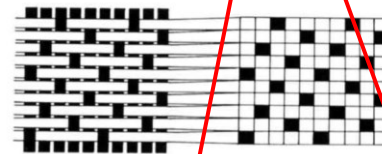
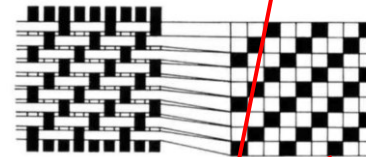
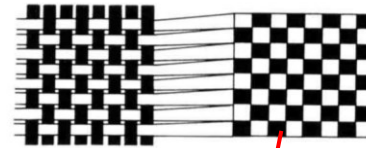
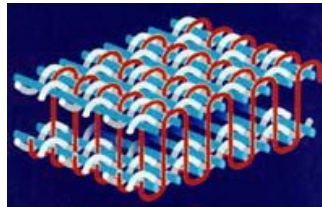
Köper



Atlas



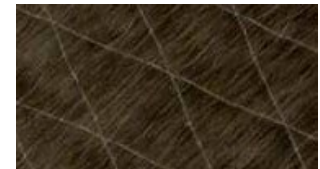
Abstandsgewebe



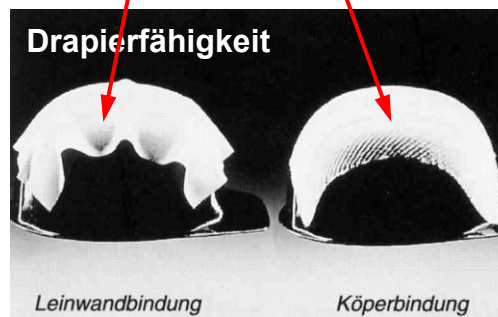
Vlies



Roving-Gelege

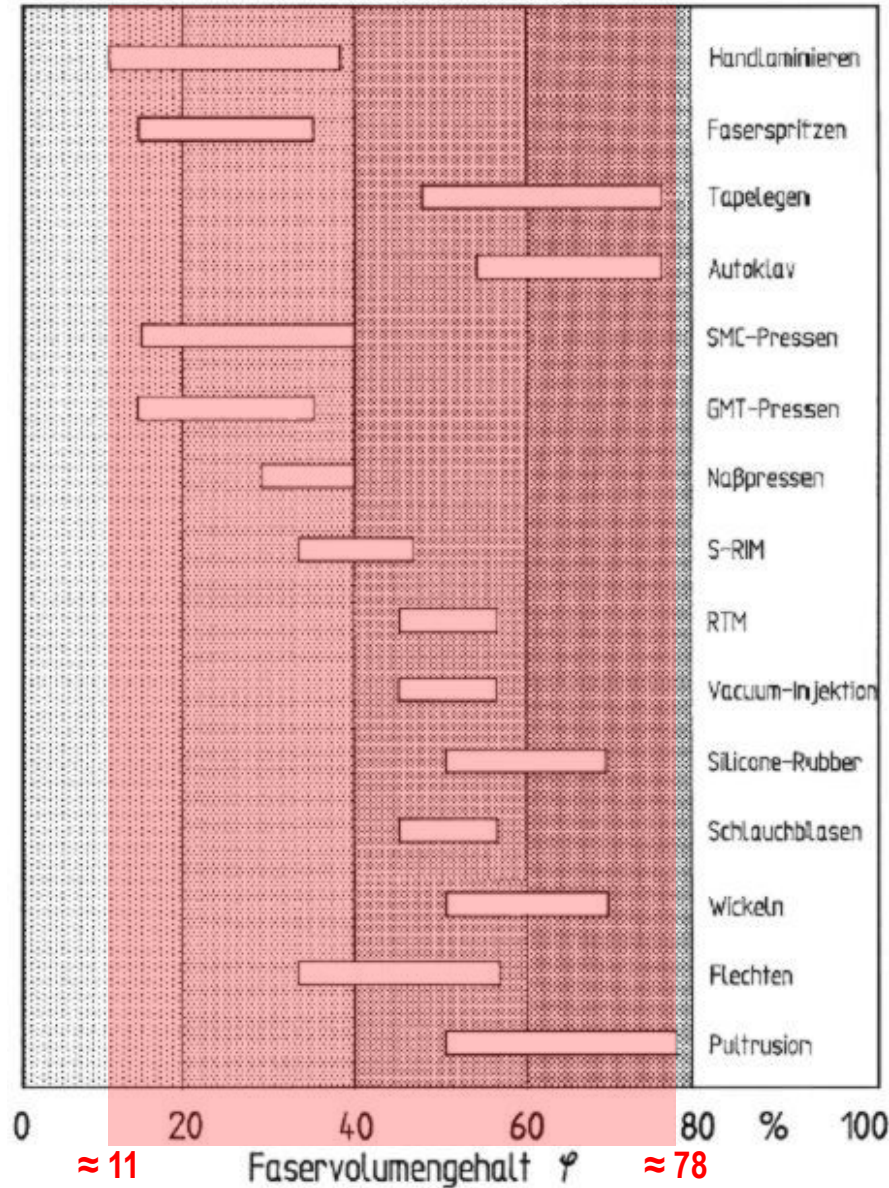


Bänder



(Quelle: R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH)

Folie Typische Fasergehalte in Abhängigkeit vom Herstellungsprozess



(Quelle: FOMEKK Weimar)

Folie Vergleich Matrixwerkstoffe

Matrixwerkstoffe		
Thermoplaste	Duroplaste	Elastomere
Polyesterharze (UP)	Epoxidharze (EP)	Phenolharze
<ul style="list-style-type: none"> + Preis - Gesundheit -- Schwindung + mechanische Eigenschaften - Mischungstoleranz 	<ul style="list-style-type: none"> - Preis + Gesundheit + Schwindung ++ mechanische Eigenschaften - Mischungstoleranz 	<ul style="list-style-type: none"> ++ hohe Temperaturen ++ Brandschutz + Schwindung - Wasserdampffreisetzung
Härter nötig	Härter nötig	in Deutschland selten
Bauwesen, Freizeit- u. Sportartikel	Luftfahrt, Raumfahrt, Sportartikel	Verkehrsmittel, Anlagenbau

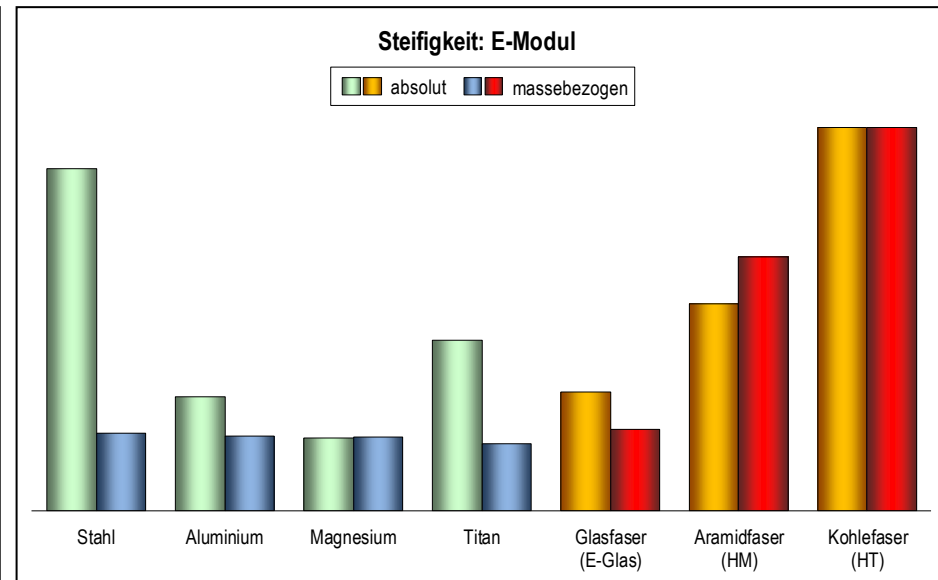
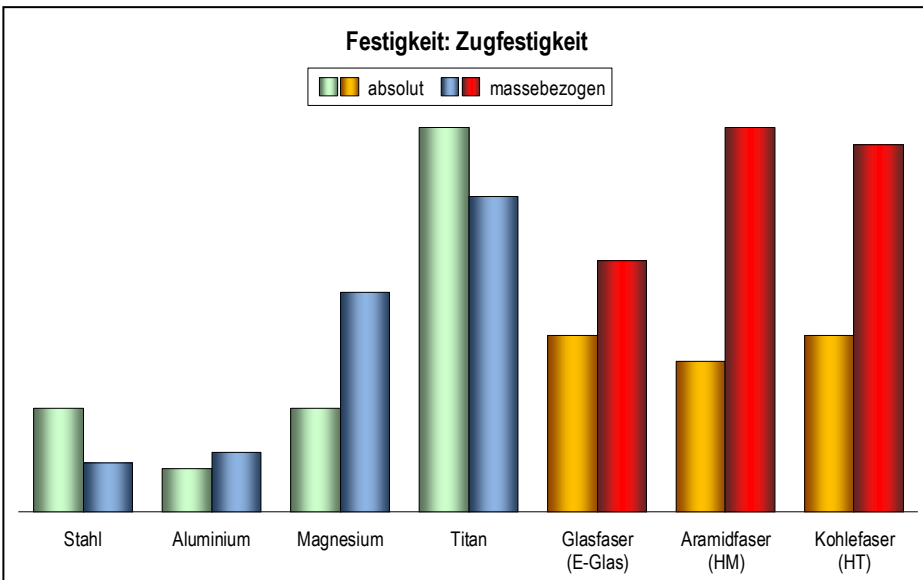
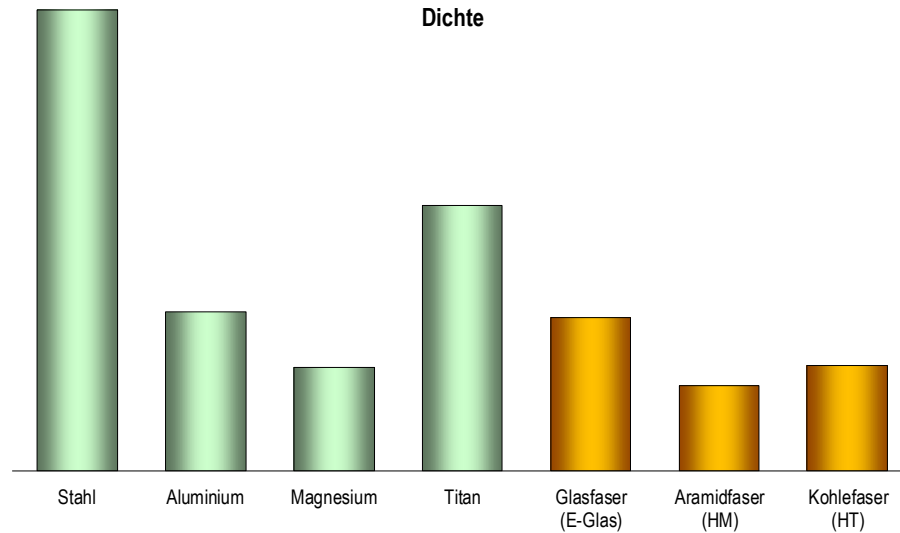
(Quelle: FOMEKK Weimar)

Folie Bedeutung von Faser und Matrix für wesentliche Eigenschaften des FVW

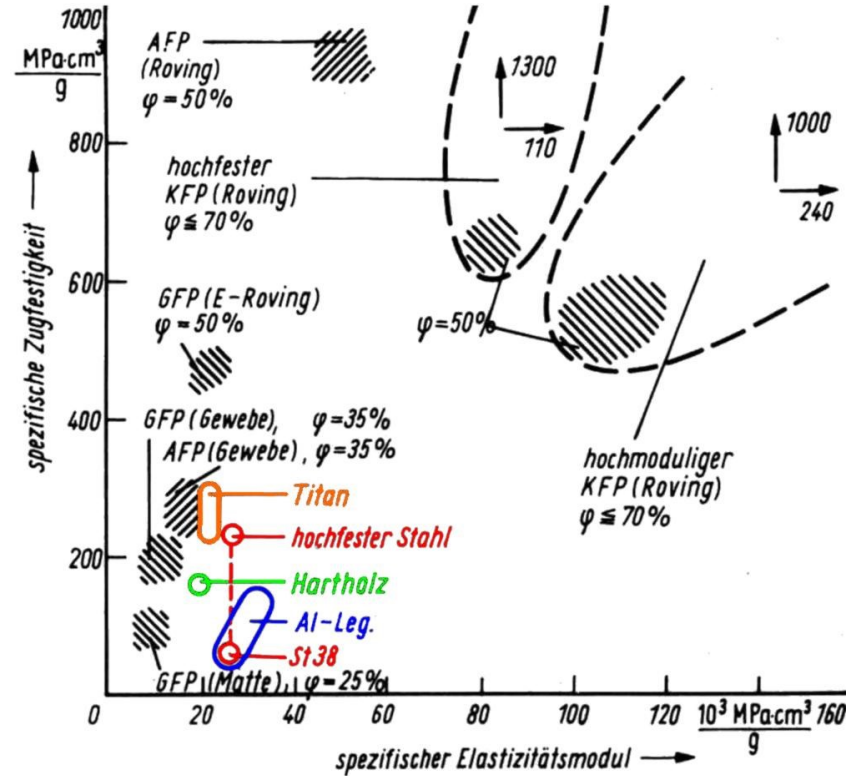
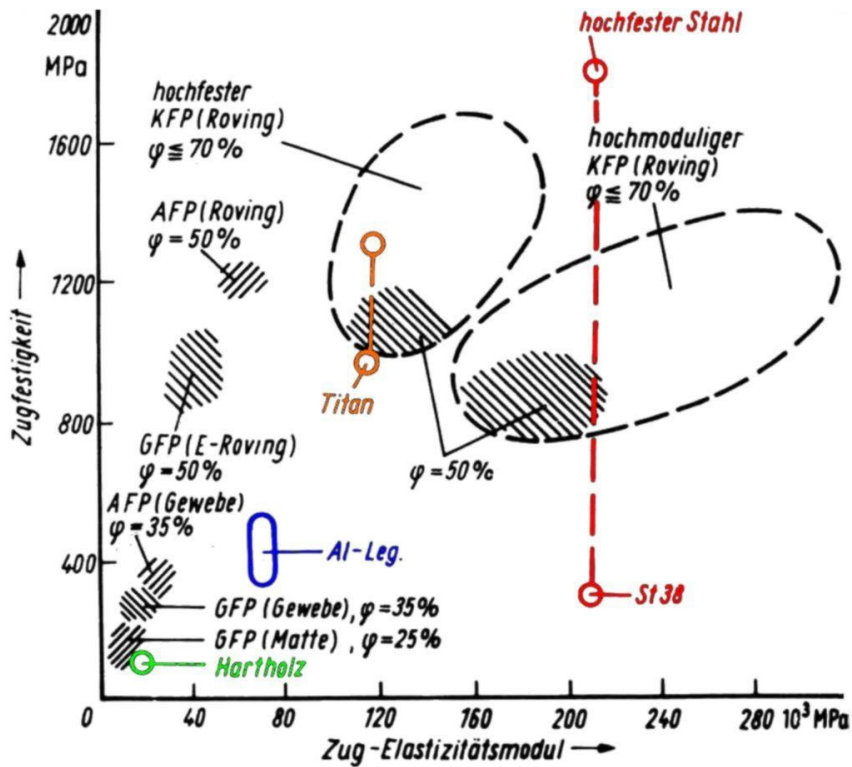
	Faser	Matrix
Mechanische Eigenschaften		
• Steifigkeit		
• Festigkeit		
• Ermüdung		
• Schadenstoleranz		
• Impactverhalten		
• Thermomechanische Eigenschaften		
• Faser-Matrix-Haftung		
Physikalische Eigenschaften		
• Korrosionsverhalten		
• Temperatureigenschaften		
• Chemikalien-Beständigkeit		
• Elektrische Eigenschaften		
Verarbeitungseigenschaften		

(Quelle: nach Ermanni, ETH Zürich)

Folie Werkstoffkennwerte FVK

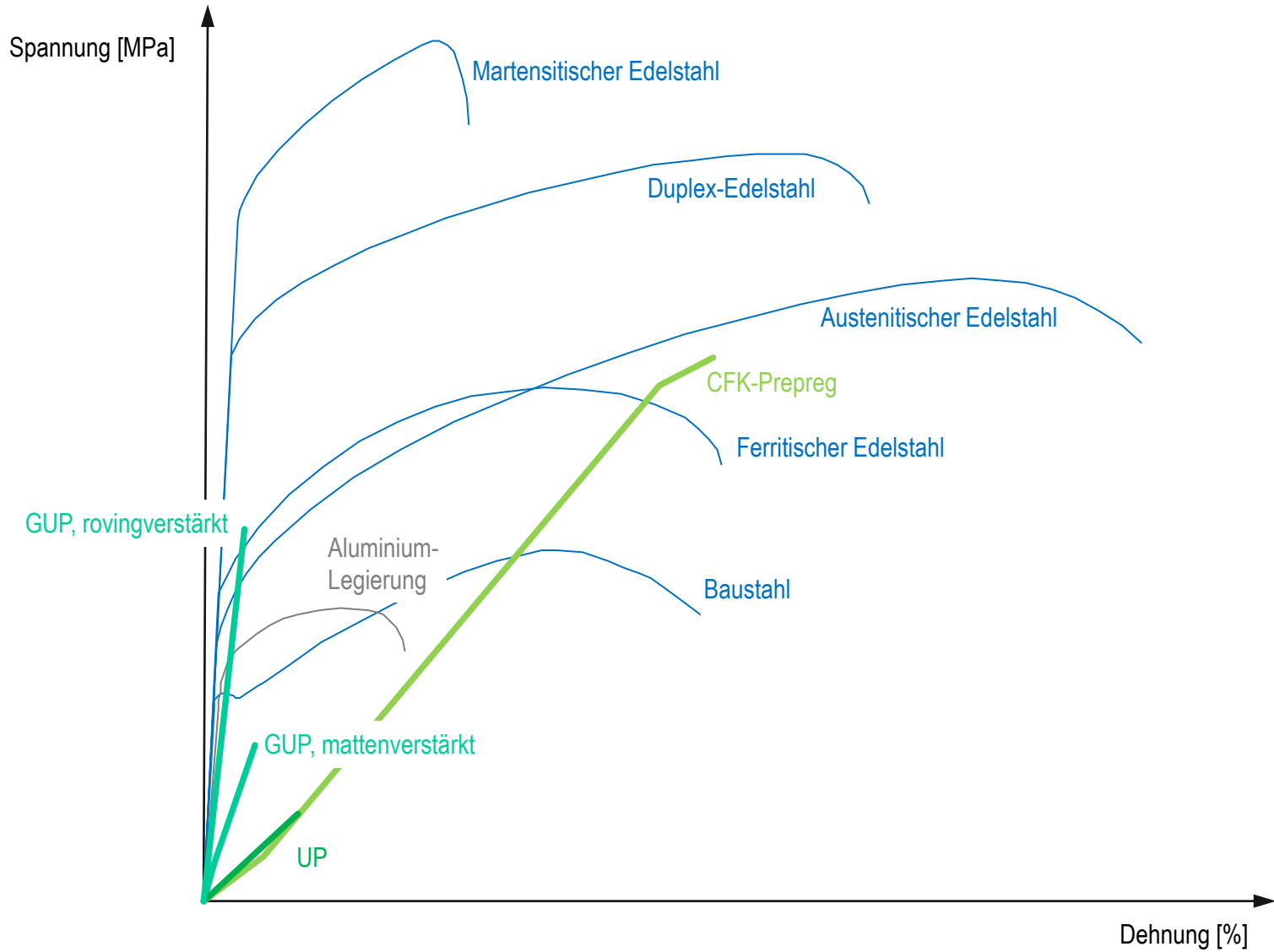


Folie Festigkeiten / Steifigkeiten ausgewählter Werkstoffe

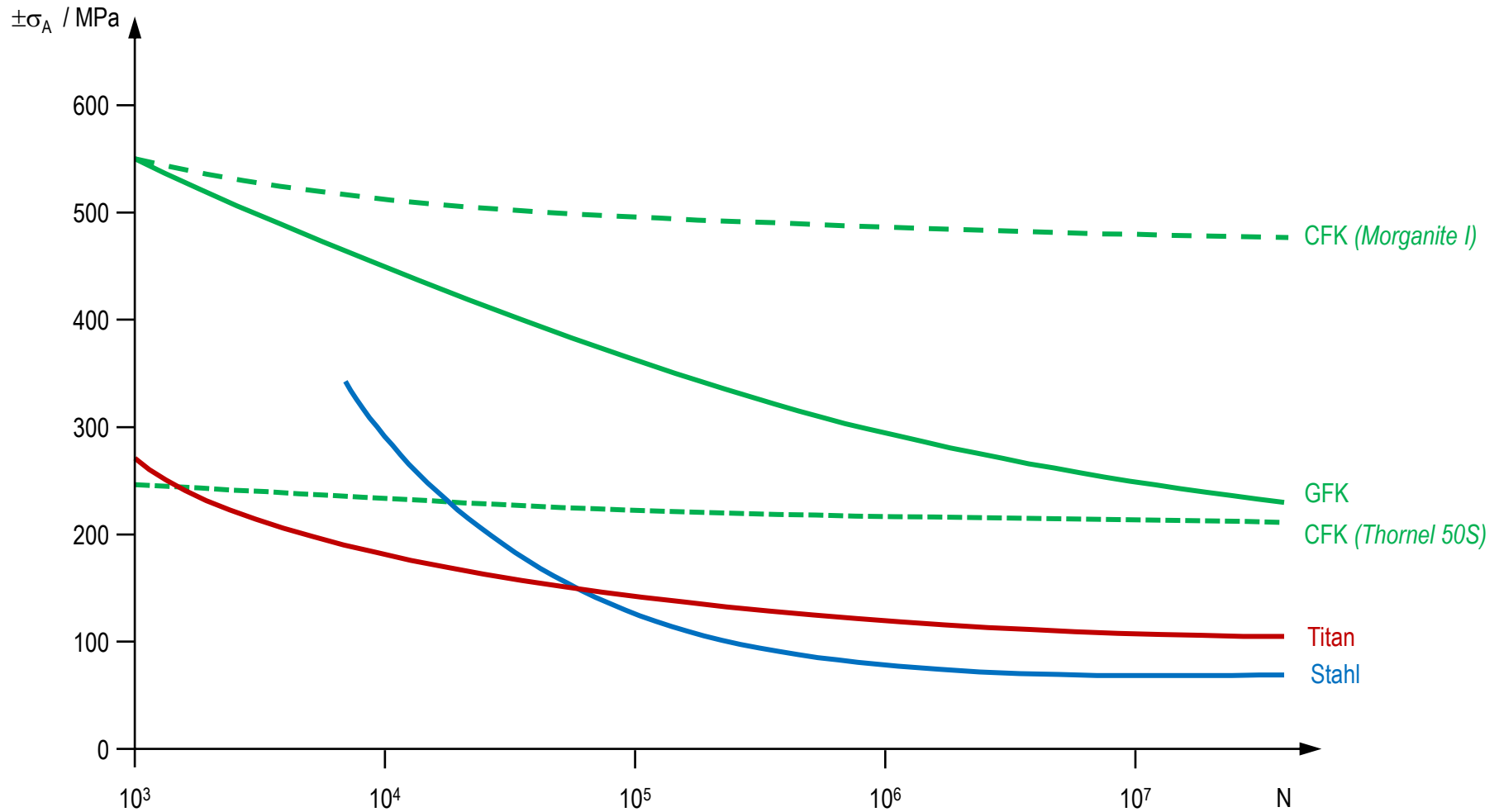


(Quelle: Nowak; Lauck: Maschinentechnik 34(1985)1)

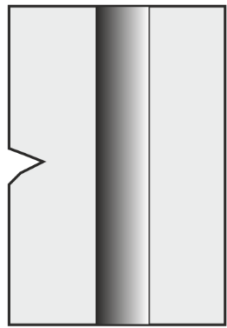
Folie Spannungs-Dehnungs-Diagramm



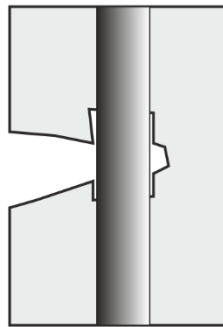
Folie Dauerfestigkeit von Faserverbundwerkstoffen



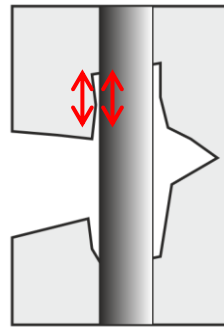
(Quelle: nach Leo: ZEV Glas. Ann. 112(1988)10)



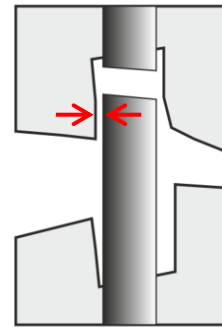
Riss



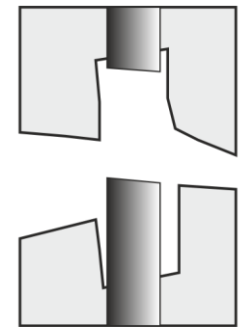
Ablösung



Gleiten

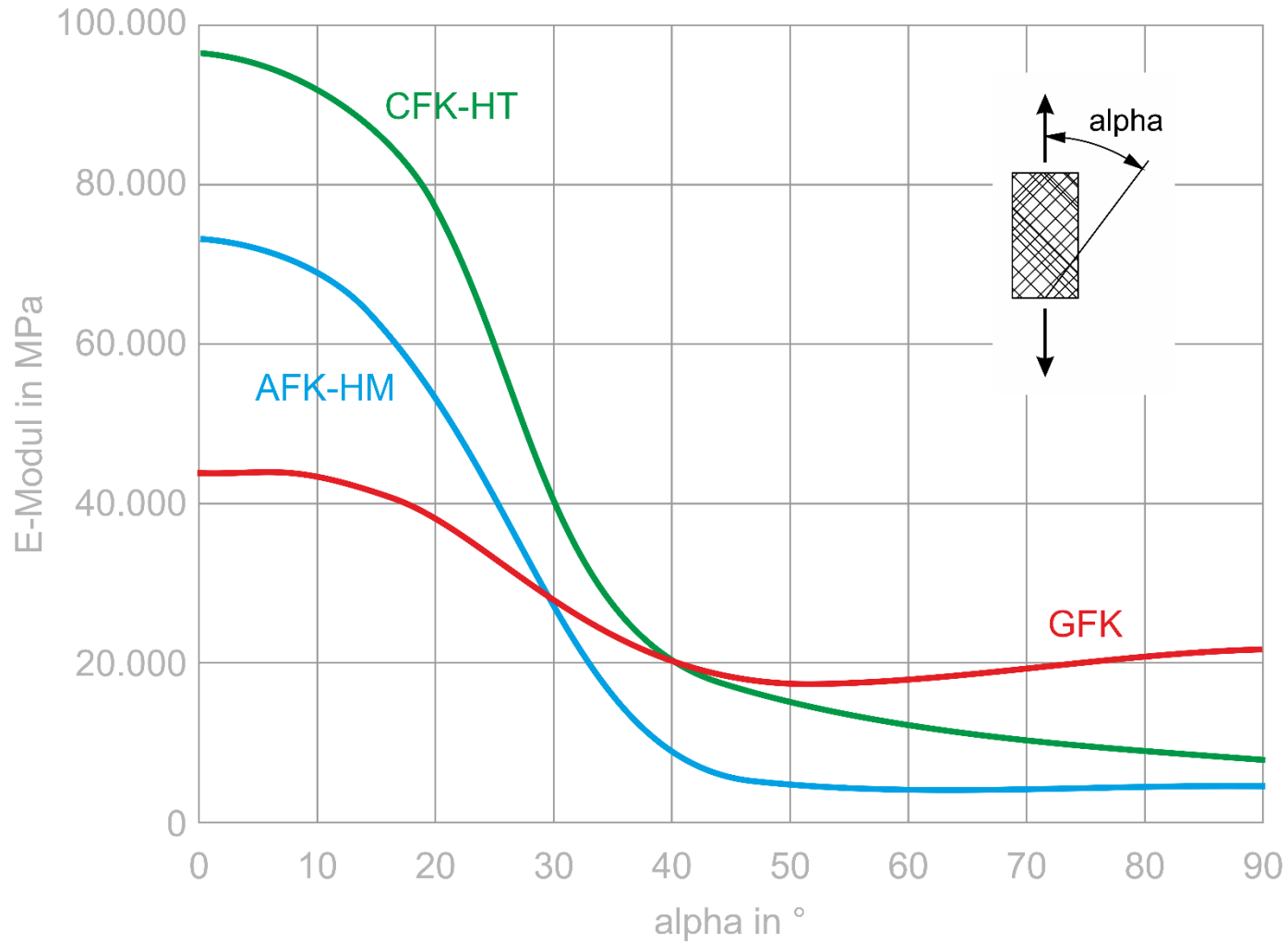


Faserbruch



“pull out”

Folie Richtungsabhängigkeit E-Modul FVK



(Quelle: nach Schulz, M., Musch, G.: GFK-Technik im Modellbau)

Folie Brandschutz-Lösung SARTEX LEO®

HLU with standard PES

1,850 °C

3,362 °F

3 Minuten



SAERTEX LEO®

1,850 °C

3,362 °F

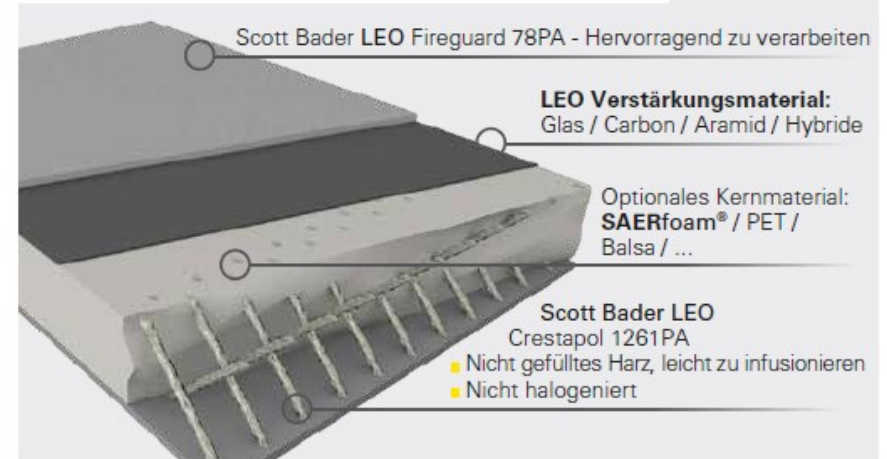
3 Minuten



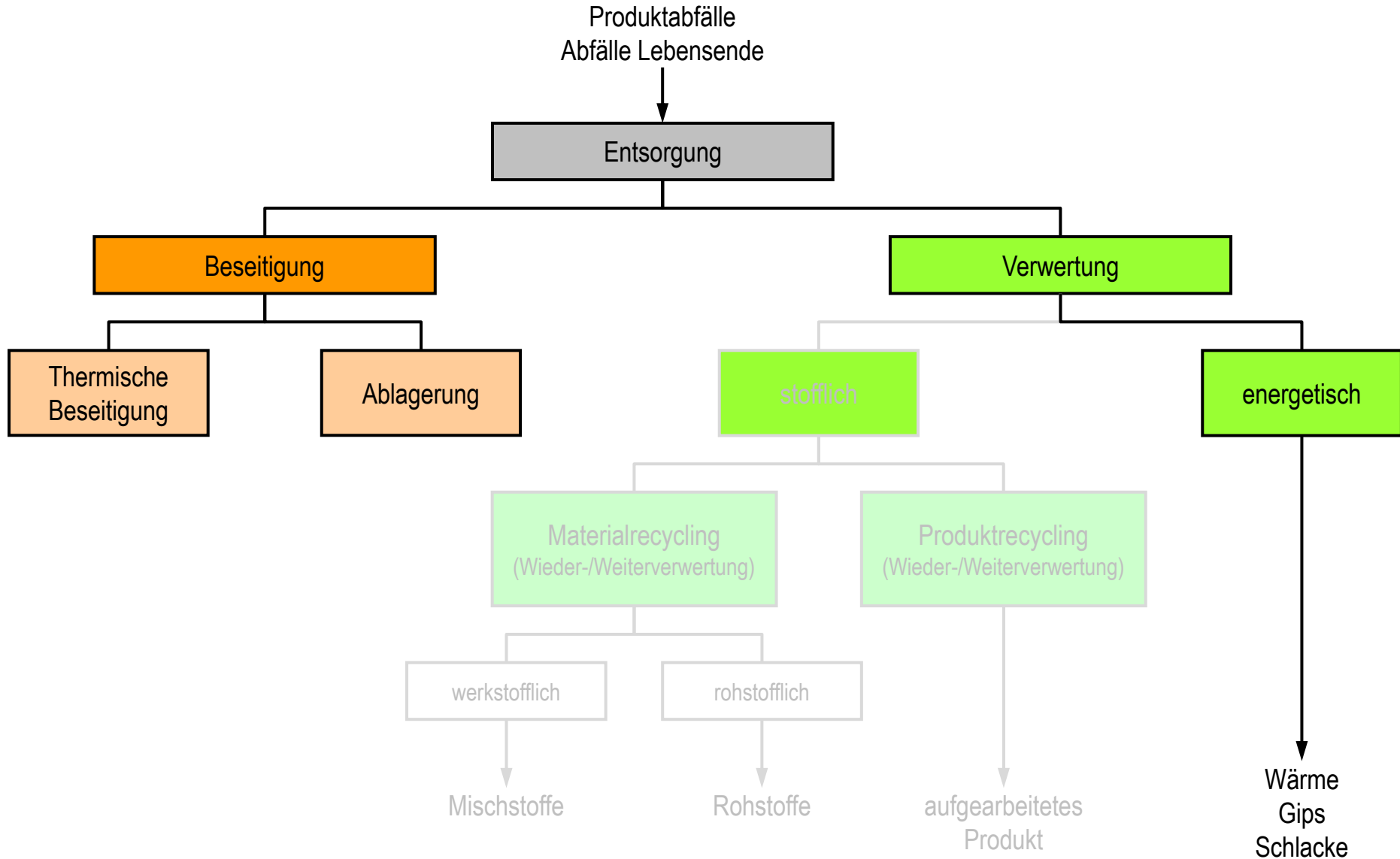
SAERTEX LEO® SYSTEM



Beispiel eines Laminats mit LEO Brandschutz



(Quelle: SAERTEX Produktflyer LEO-SYSTEM, 2019-06)

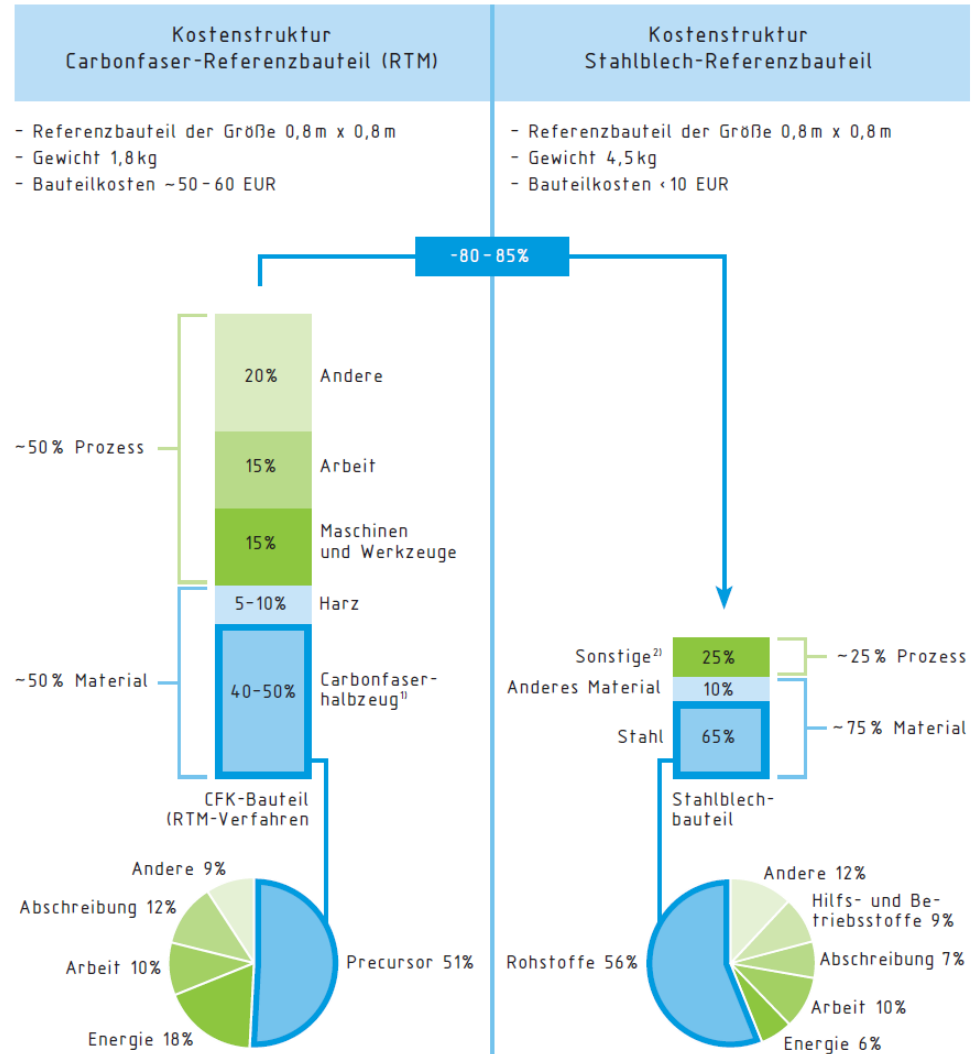


Folie Vergleich Metalle – Faserverbundwerkstoffe

Eigenschaften	Metalle	Faserverbundwerkstoffe
elastisches Verhalten	lokale Plastifizierung möglich	sprödes Verhalten
Umwelteinflüsse	geringer Einfluss	Temperatur- und Feuchtigkeitseinfluss
Versagenskriterium	Ermüdung, Korrosion Spannungsrisskorrosion	Beschädigung und Herstellungsfehler
Schadensart	Risse	Delamination
krit. Spannungszustand	Zugspannung	Druckspannung
Schadenserkennung	optisch	NDI Erkennung
Schadensvoraussage	gut	schlecht bis unmöglich
Reparaturerfahrungen	sehr groß	gering

(Quelle: nach Dr. Bergner, TU Chemnitz)

Folie Kostenvergleich CFK – Stahl anhand Referenzbauteil



¹⁾Textile Rollenware ohne weiteren Zuschnitt etc.

²⁾Split: Maschinen und Werkzeuge ca 5%; Arbeit ca. 12%; Andere ca. 8%

(Quelle: VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2013)

Folie Einschätzung FVK hinsichtlich Werkstoffanforderungen

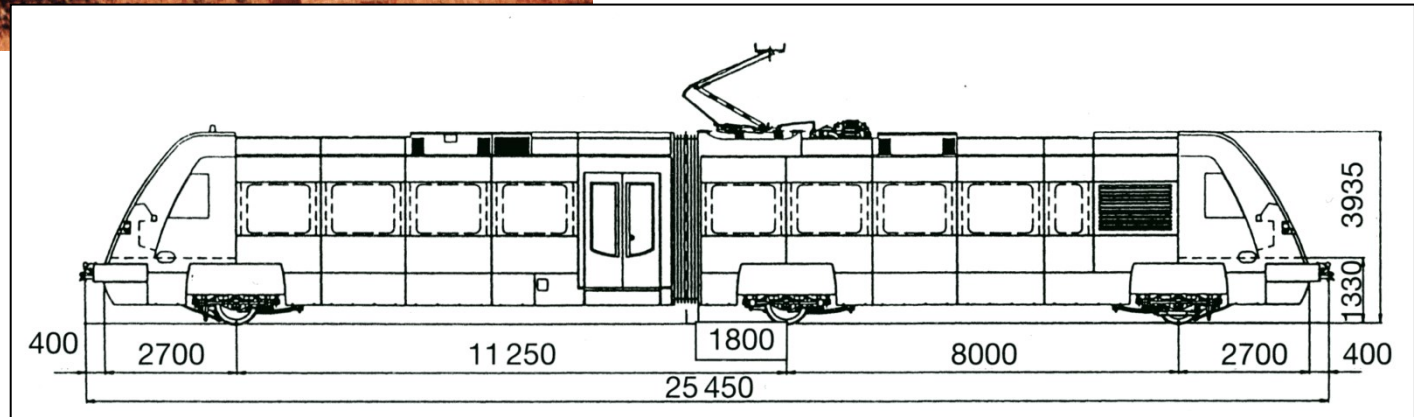
Anforderung	Stahl	Alu-Leg.	FVK
Festigkeit, Steifigkeit: <ul style="list-style-type: none"> – hohe Längsfestigkeit, hohe lokale Festigkeit ↔ Energieverzehbereiche – große Struktursteifigkeit (Stützweite, Überhang) ↔ definierte Elastizitäten – Strukturdämpfung 	↗	→	↑
Schweißbarkeit	↗	↘	↓
Möglichst ebene Oberfläche¹	→	↗	↑
Geringe Masse → Leichtbau	↓	↗	↑
Wirtschaftlichkeit <ul style="list-style-type: none"> – Materialkosten – Herstellungskosten¹ → Beschleunigung der Fertigungsabläufe – Folgekosten¹ im langen Betriebszeitraum <ul style="list-style-type: none"> • Korrosionsbeständigkeit • Reparaturfreundlichkeit 	↗ ↗ → ... ↑ ↓ ... ↑ ↑	↘ ↗ → ... ↗ ↗ →	↓ ↓ ... ↗ ↗ ↑ ↓ ... ↗

¹Einschätzung im Zusammenhang mit typischer Bauweise

Folie Spaceframe-Bauweise

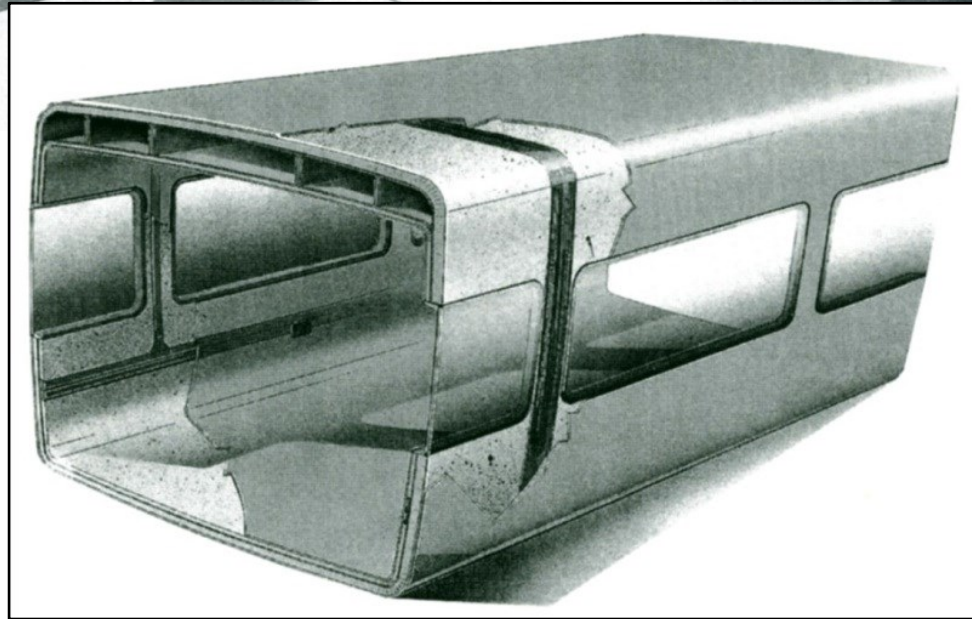
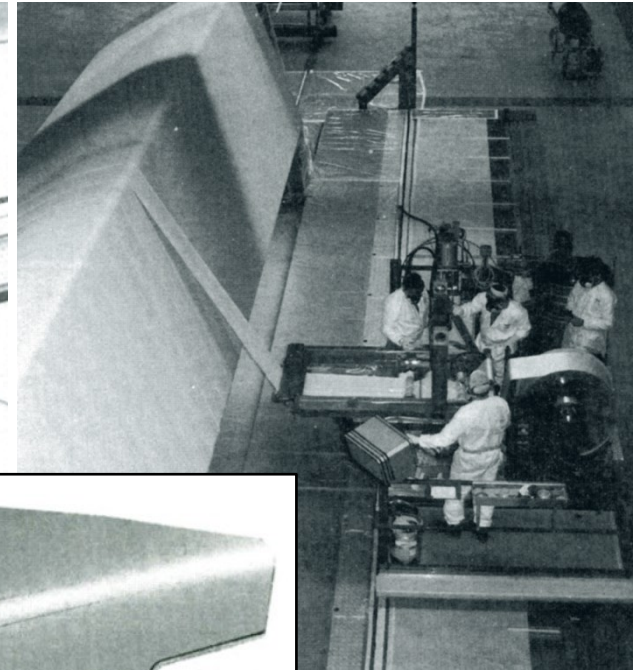
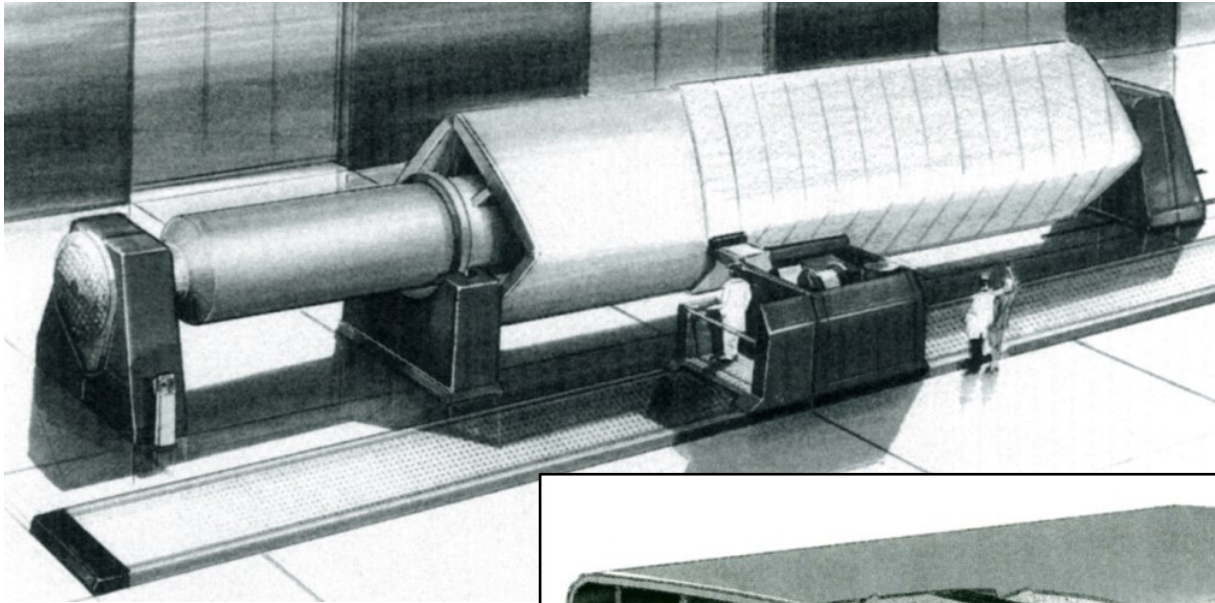


Technologieträger ET 2000 TT (DWA, 1997)



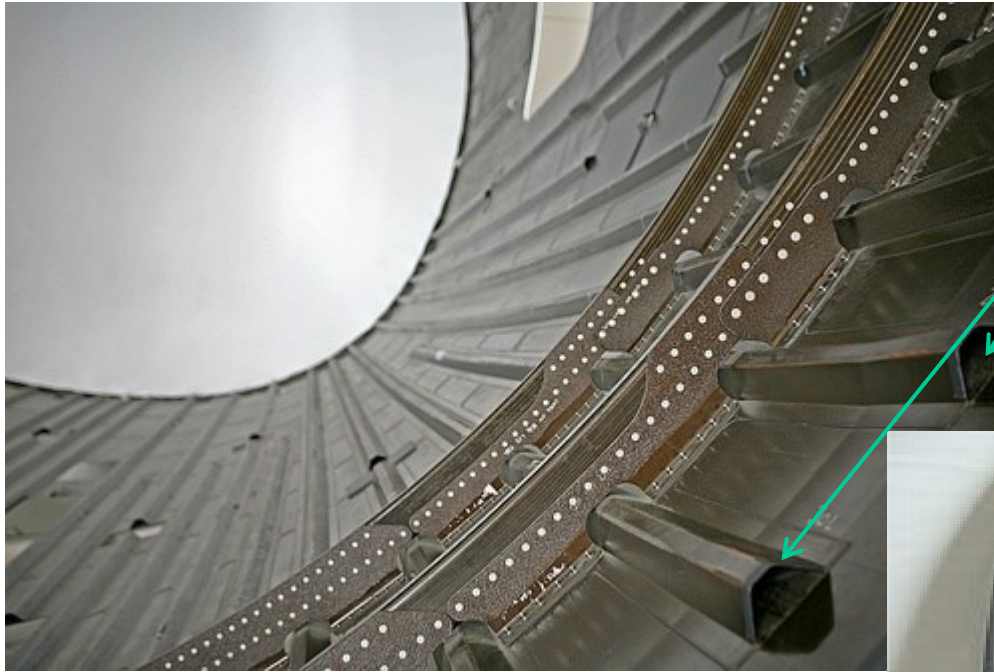
(Quelle: Marek, Dürschmied, u.a.: ETR 46(1997)7/8)

Folie Sandwichbauweise – Wickeltechnologie

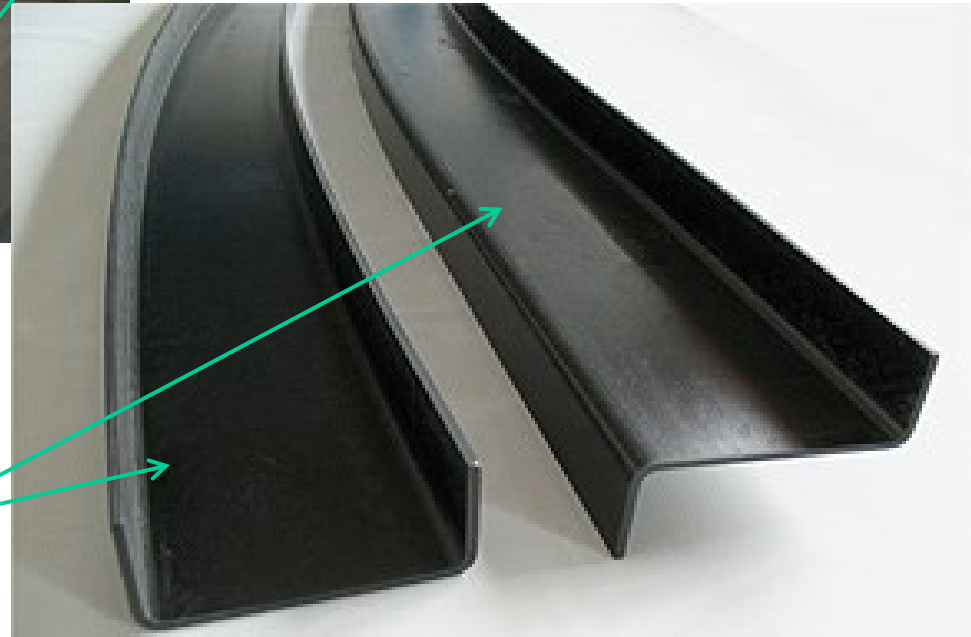


(Quelle: Anderegg: ZEV+DET Glas. Ann. 119(1995)9/10; ETR 45(1996)7/8)

Folie Differentiale Spant-Stringer-Bauweise



Geklebte CFK-Omega-Stringer (Boeing 787)



Komplexe Spantgeometrien
(unidirektionalen Flechttechnologie)

(Quelle: Wikipedia; Arold, Beaumont: *LightweightDesign*, 2010-05)

Fertigungsstudie ICE-Seitenwandmodul als Flächentragwerk



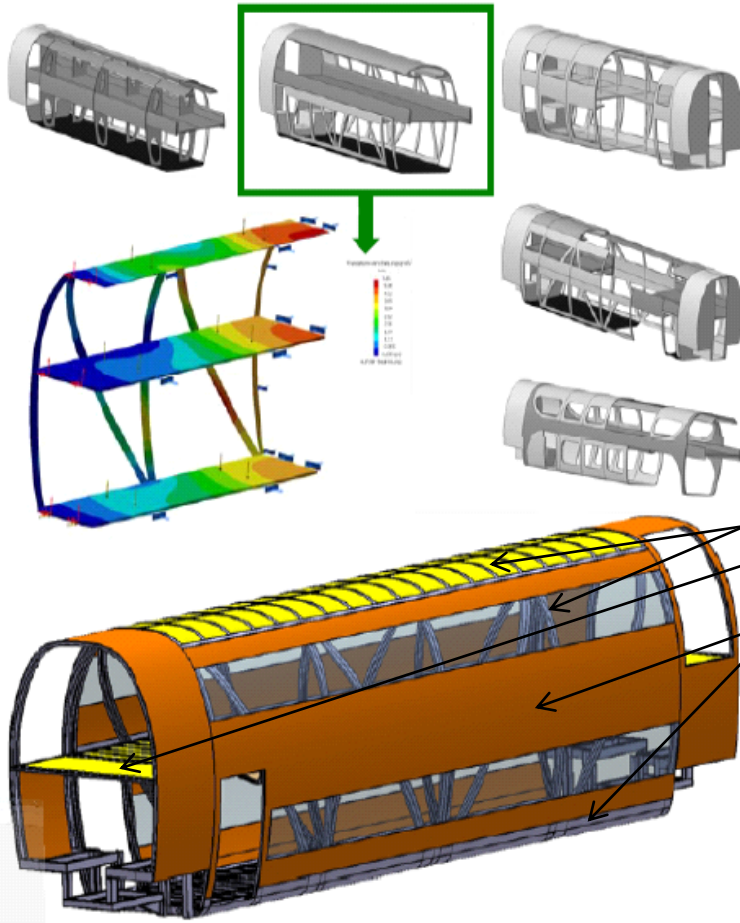
Vorteile dieser Bauweise:

- hohe Tragfähigkeit / geringes Gewicht
- gute Dauerfestigkeit
- hervorragende Wärme- und Schalldämmung
- Möglichkeit der Integration von Systemen in den Hohlräumen

(Quelle: nach DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik)

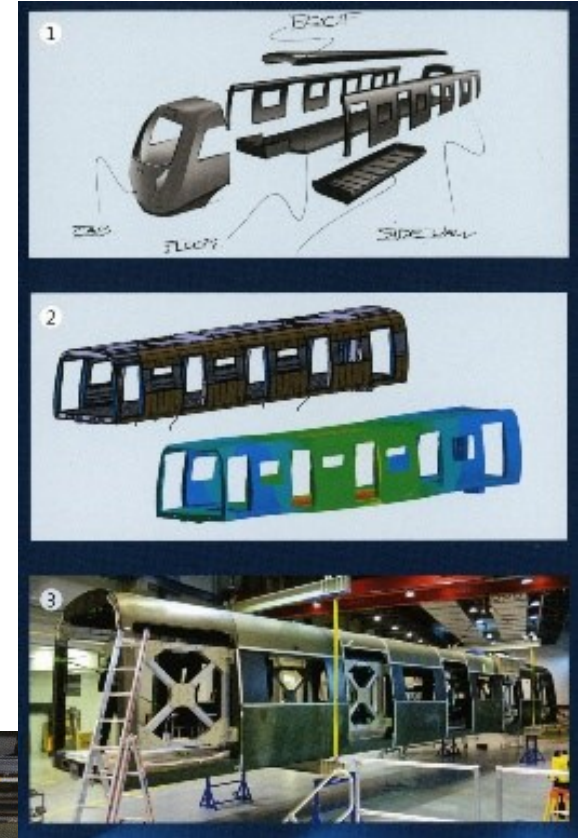
FVK-gerechte Bauweise:

- ebene Spannungszustände:
 - FVK für flächige Strukturen (Dach, Wände, Böden)
- räumliche Spannungszustände:
 - Metalle / hybride Strukturen (komplexe Fachwerke)
- modularer hybrider Ansatz:
 - Metall-Skelettstruktur
 - tragende FVK-Dächer und Böden
 - mittragende FVK-Verkleidung



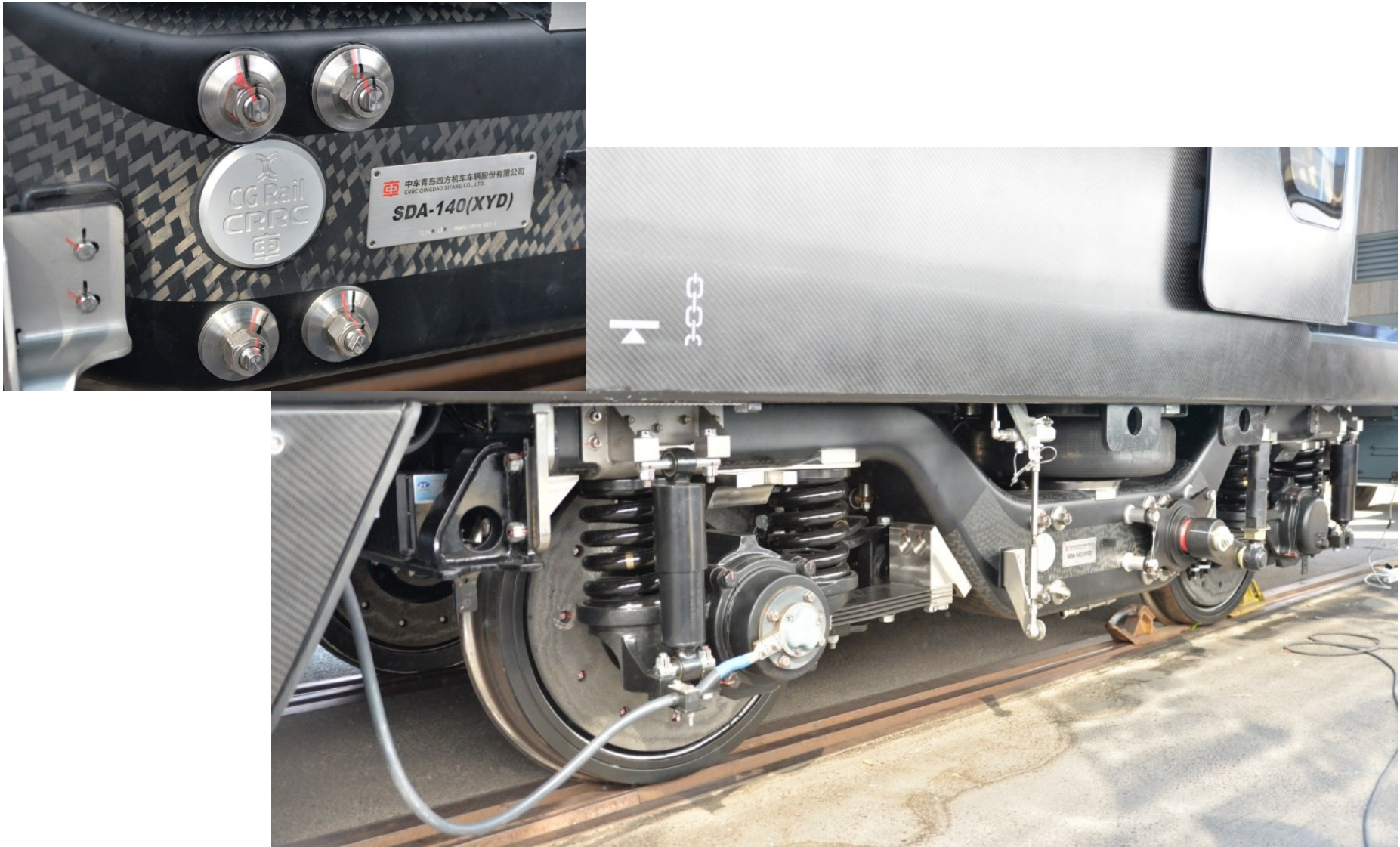
(Quelle: nach DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik)

Folie CFK-Wagenkasten CRRC



(Quelle: Prospekt CRRC Innotrans 2018)

Folie CFK-Drehgestell CRRC



(Quelle: Innotrans 2018, M. Kache)

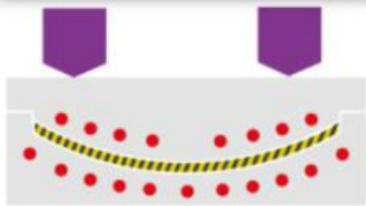
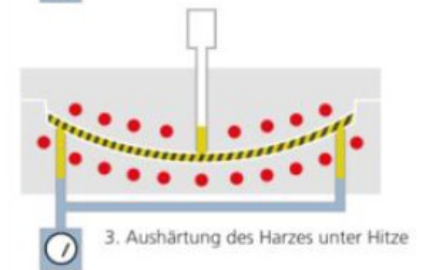
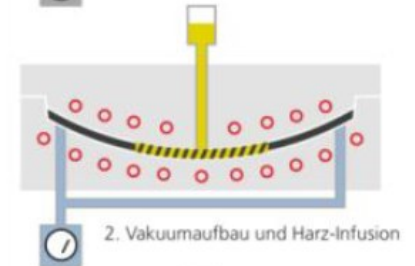
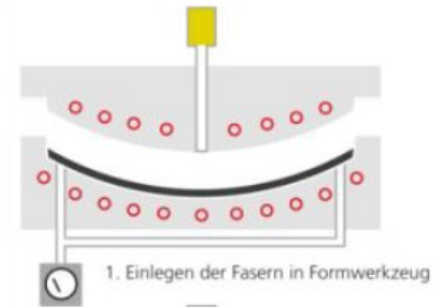
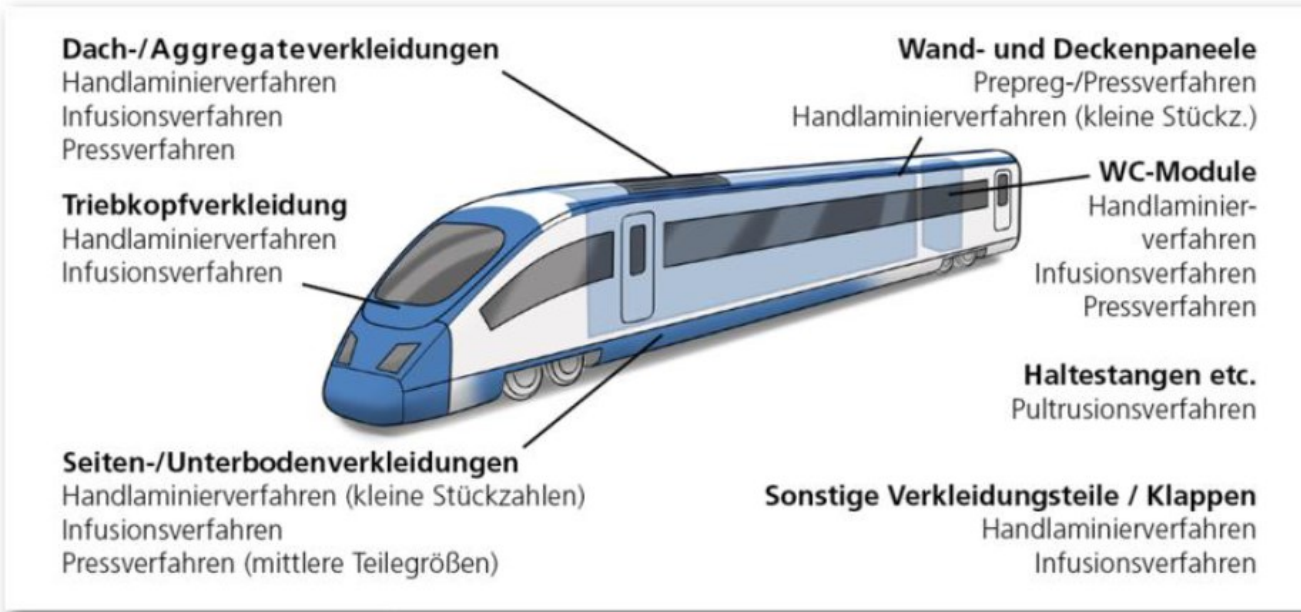
Folie FVK-Fertigungsverfahren im Schienenfahrzeugbau

Verfahren	Merkmal	Vorteile	Nachteile	Anteil an den Fertigungsverfahren	Beispiele	
Handwerkliche	Handlaminierten	„handwerkliches, offenes Verfahren in einfachem, einschaligem Werkzeug; geeignet für kleine Serien; Verarbeitung von Faserhalbzeugen aller Art möglich“	große Teile mit variablen Geometrien herstellbar, kurze Realisierungszeit	„Umweltprobleme, häufiger Prozessunsicherheiten und Qualitätsprobleme, meist geringere erzielbare Faseranteile; lange Prozesszeit“	hoch	WC-Boden aus PF, Velaro E WC-Seitenteile aus UP, Lirex BP-Tür mit Flachsvlies, Hamburger Hochbahn Außenverkleidungen aus UP für Regio Shuttle UP-Front- und Dachverkleidung Lirex UP-Bugnase Velaro E
Prepreg- bzw. Pressverfahren	Prepreghärtung Vakuum	Aushärtung von Prepregs unter Vakuum in einfachem Werkzeug für Kleinserienfertigung	kostengünstig im Vergleich zu Autoklav, hohe Festigkeiten	etwas geringere Qualität im Vergleich zu Autoklav	gering, Tendenz steigend	PF-Seitenwand- und Loungeverkleidungen für Velaro E PF-Außenverkleidungsteile, z.B. Klimaanlagendeckel ICE3
	SMC- Pressen	„Pressverfahren für SMC-Prepregs (Kurzglasfaser) in stabilem Werkzeug bei hohen Temperaturen, z.B. 150 °C; hohe Stückzahlen“	kurze Taktzeiten, gute Oberflächenqualität	„begrenzte Lagerstabilität des Halbzeugs; Faserorientierung nur bedingt möglich; hohe Werkzeuginvestition“	hoch	Großraum-Seitenwandverkleidungen, Holmverkleidung, Innendecken Velaro E Innenverkleidungen Metro Tucheng Sitze Metro Tucheng
	Heißpressen (Nasspressen)	„Pressverfahren für getränkte Faserhalbzeuge bei hohen Temperaturen; hohe Stückzahlen, stabiles Werkzeug“	„kurze Taktzeiten; gegenüber SMC keine Probleme der Lagerstabilität, da Nassverfahren“	„hohe Werkzeuginvestition; Handhabung der flüssigen Harze“	gering	hanfverstärkte BP- Luftsäulenverkleidung für Lirex naturfaserverstärkte BP-Sitzkastenverkleidungen für Hamburger Hochbahn PF-Deckenverkleidungen für Desiro UK
Injektionsverfahren	RTM	„geschlossenes Injektionsverfahren unter geringem Druck und ggfs. Vakuum und Temperatur; stabile zweisehalige Formen, mittlere Prozesszeit; für mittlere Stückzahlen“	hohe Qualität, beidseitig glatte Flächen, geringe Porosität	Beschnitt notwendig	gering, Tendenz steigend	PF-Stirnwand-Fahrradabstellplatz für Desiro UK PF-Seitenwand- und Deckenverkleidungen für Avanto
	Vakuuminjektion „klassisch“	geschlossenes Verfahren in einfachen GFK-Formen, für mittelgroße Serien	gute Qualität, große Teile herstellbar	Nacharbeit, niedrige Harzviskosität notwendig, Wanddickentoleranz	gering, Tendenz steigend	VE-Dachverkleidung Turbostar UP-Dachverkleidung Velaro E PF-Seitenverkleidung für Desiro UK Wagenkasten Variobahn
	Vakuuminjektion SLI	„Single-Line-Injection; Kombination aus Injektions- und Autoklavprozess in geschlossener, massiver Form; niedrige bis mittlere Stückzahlen“	gezielte lokale Steuerung des Differenzdrucks möglich	höhere Investition als klassische Vakuuminjektion	gering	CFK-Sitzträger für Regionalbahn
Kontinuierliche	Pultrusion	„Tränkung und Aushärtung von Endlosfasern zur Profilherstellung; für mittlere bis hohe Stückzahlen zweidimensionaler Profile; offenes oder geschlossenes Verfahren“	hoher Durchsatz, geringe Werkzeugkosten, längenunabhängig	keine dreidimensionalen Teile möglich, Großserien (>600) unwirtschaftlich	nur auf Profile beschränkt	UP-Voutenverkleidung Metro Shanghai/ Guangzhou UP-Haltestangen, Deckenprofile Combino UP-Außenverkleidung Avanto / S70 UP-Außenverkleidung Tram Turin

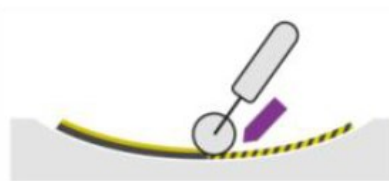
BP = Biopolymer, UP = ungesättigtes Polyesterharz, VE = Vinylesterharz, PF = Phenolharz

(Quelle: nach Bittmann: „Leichtbau Zug um Zug“ in Kunststoffe 10/2004)

FKV in Schienenfahrzeugen und Beispiele für Fertigungsverfahren



SMC Pressverfahren



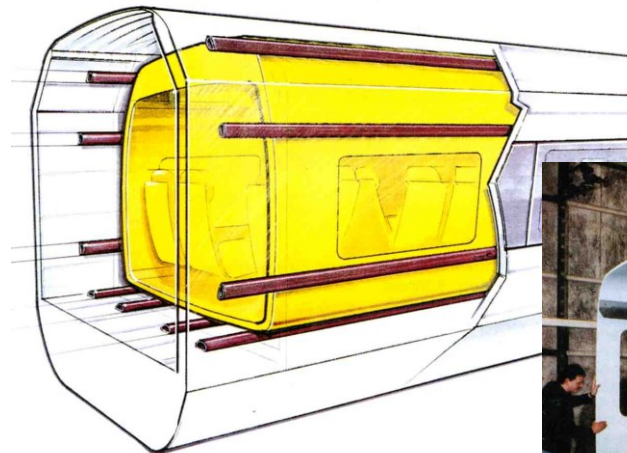
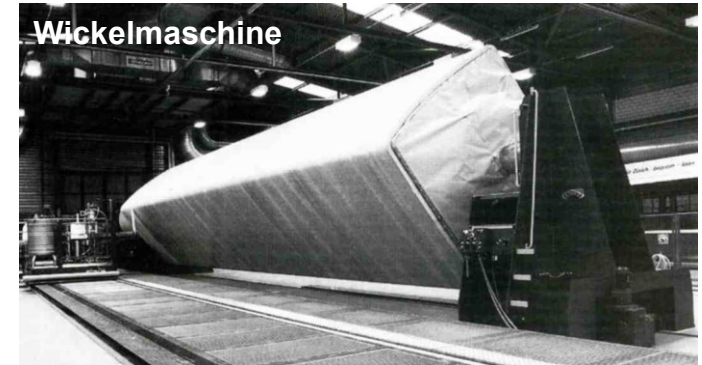
Handlaminierverfahren



Pultrusionsverfahren

(Quelle: Nickel: Faserverbundleichtbau für Schienenfahrzeuge; DLR, 2020-09)

Folie Faserverbundwerkstoffe – Anwendungsbeispiele (I)



Folie Faserverbundwerkstoffe – Anwendungsbeispiele (II)



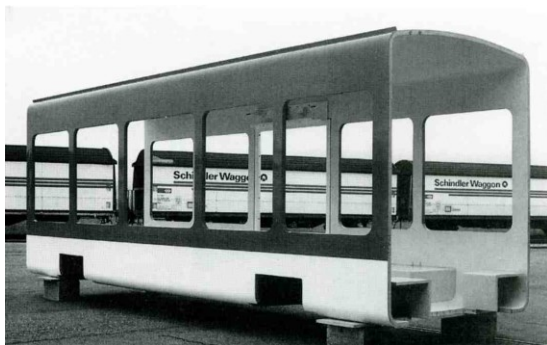
Niederflurstraßenbahn „COBRA“



Vollbahn-Gliederzug FVV



Versuchsdrehgestell HLD 300

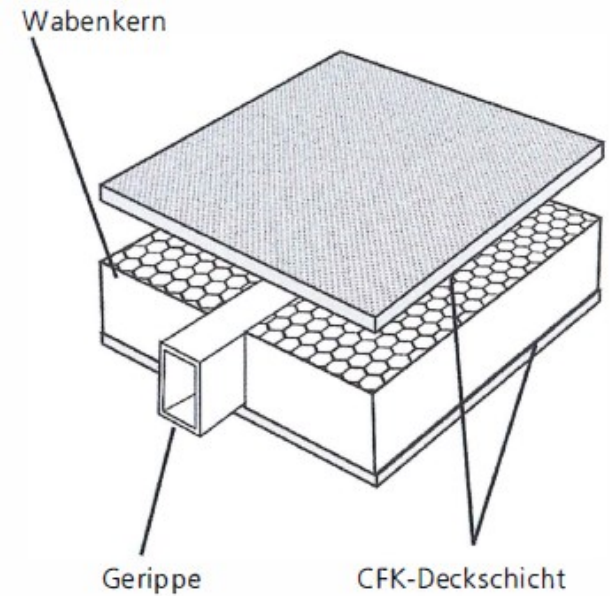
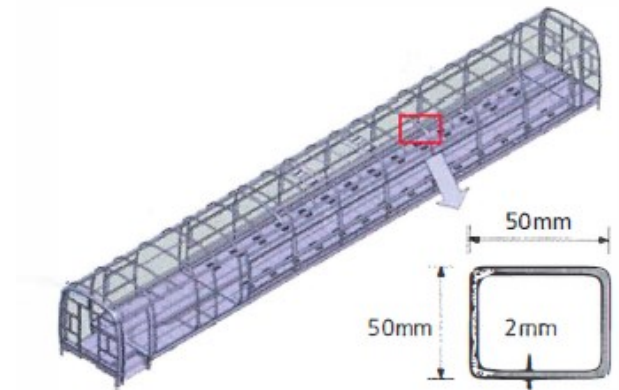
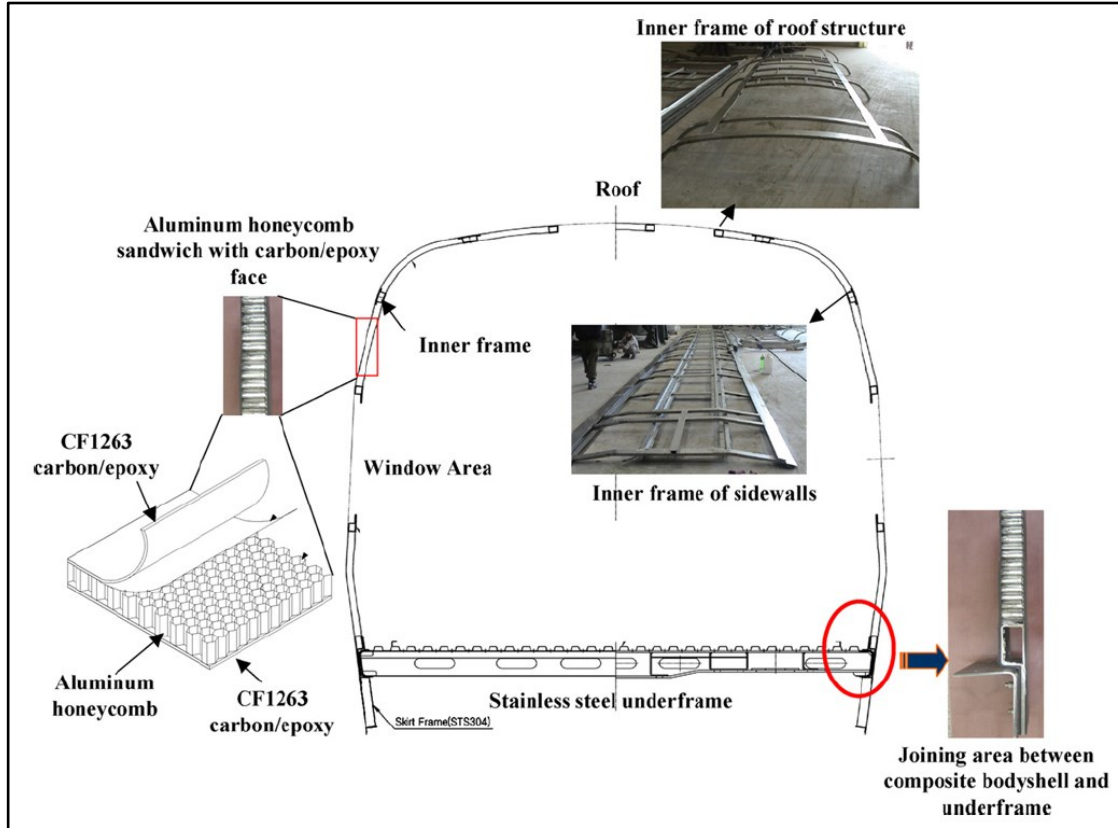


Mittelwagen-
erweiterung
KT4D Cottbus



Komponenten:
z.B. Türen WC

Folie Korean Tilting Train TTX



(Quelle: nach DLR: Einsatz von CFK-Leichtbau-Faserverbund-Technologien ..., Kung, Lee, Shin: Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody, wikipedia)



(a)



(b)



(c)



(d)

Einlege- / Aushärtungsprozess Außenhaut

- (a) Installation der Einlage-Schablonen in Form
- (b) Einlegen von CF-EP-Prepregs und Deckschicht-Gewebe
- (c) Vakuumformen
- (d) Aushärtung im Autoklaven

(Quelle: Kung, Lee, Shin: Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody)

Folie Einbau Innenrahmen & Wabenkern TTX



(a)



(b)



(c)



(d)

Einbau Innenrahmen und Wabenkern in ausgehärtete Außenhaut

- (a) Installation Innenrahmen
- (b) Platzierung Wabenkern
- (c) Vakuumformen
- (d) Zweite Aushärtung im Autoklaven

(Quelle: Kung, Lee, Shin: Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody)



(Quelle: LightweightDesign Ausgabe Nr.: 2012-05)