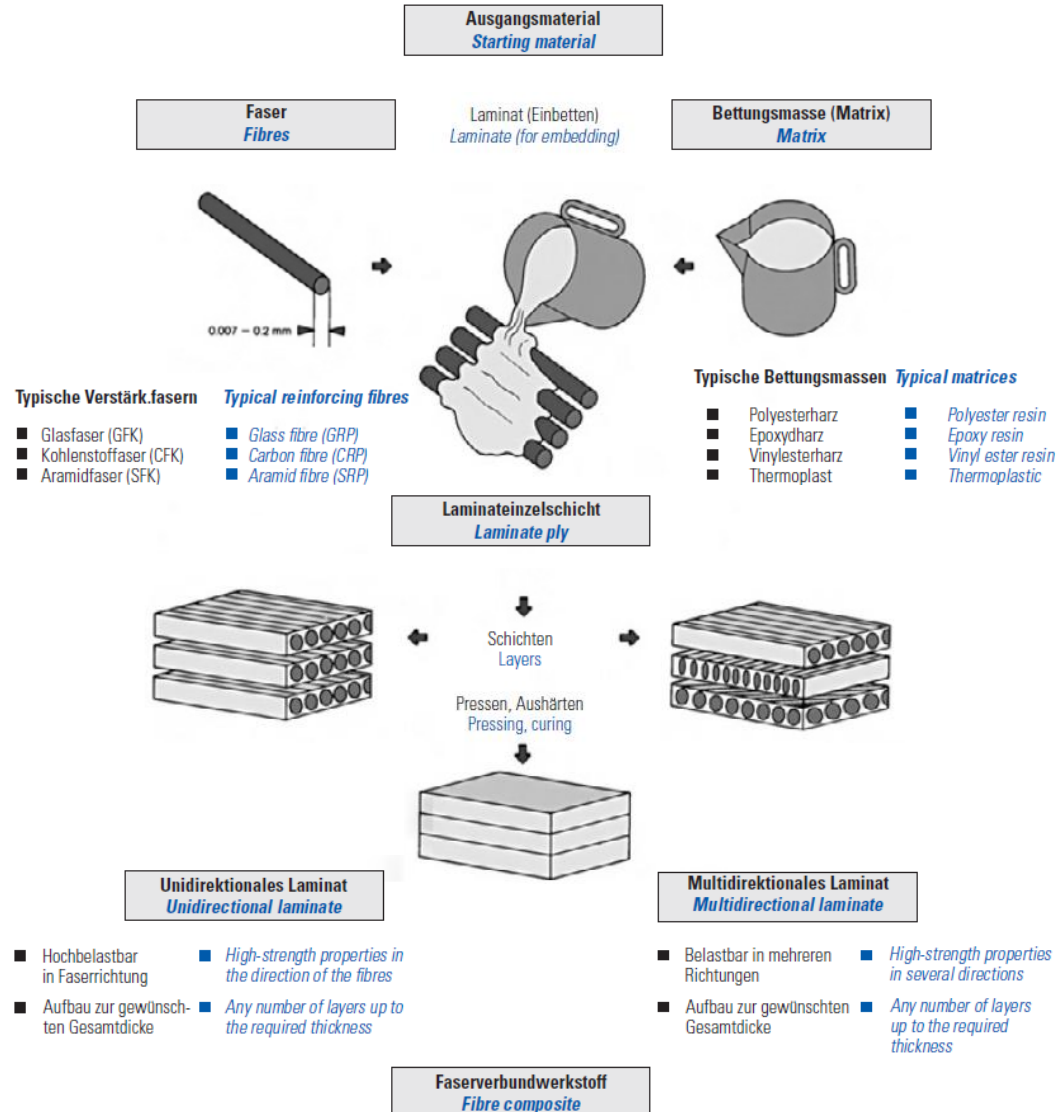


2.3.1. Einführung & Aufbau

2.3.2. Wichtige Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen

2.3.3. Bauweisen & Anwendungsbeispiele

Folie Aufbau Faserverbundwerkstoff



(Quelle: R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH)

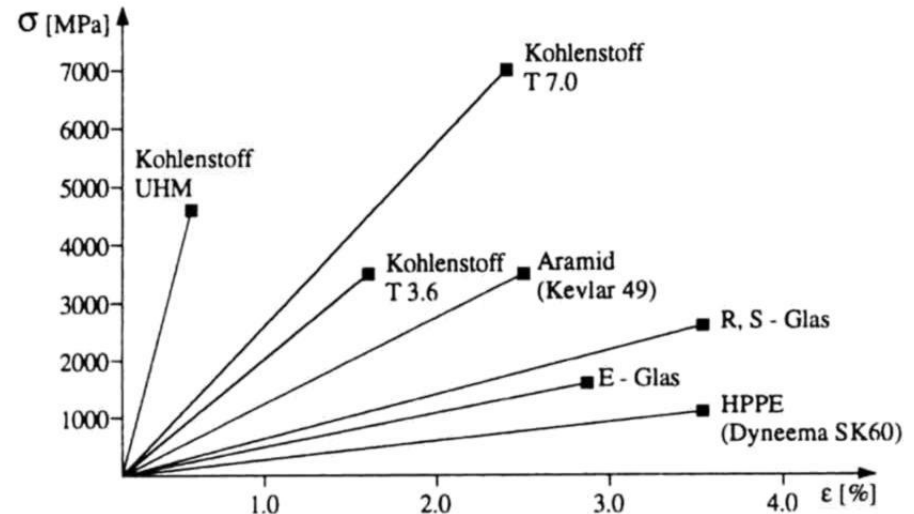
Folie Vergleich wichtiger Faserwerkstoffe

| 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)

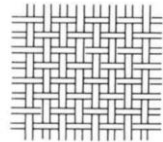
Folie Komponente Faser – Faserausrichtung

Rovings

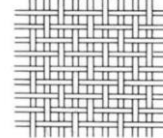


Gewebe

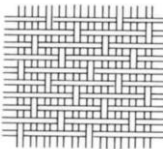
Leinwand



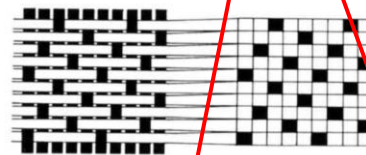
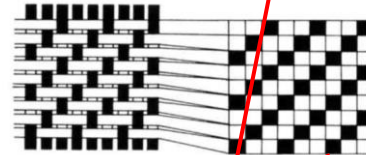
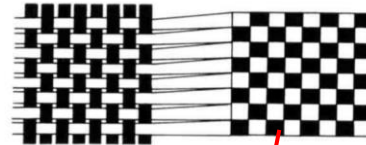
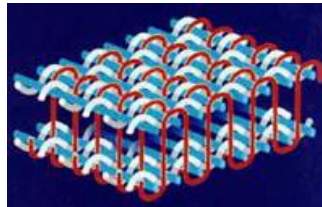
Köper



Atlas



Abstandsgewebe



Vlies



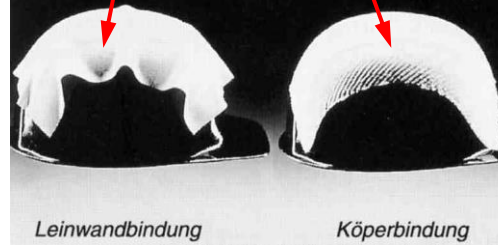
Roving-Gelege



Bänder

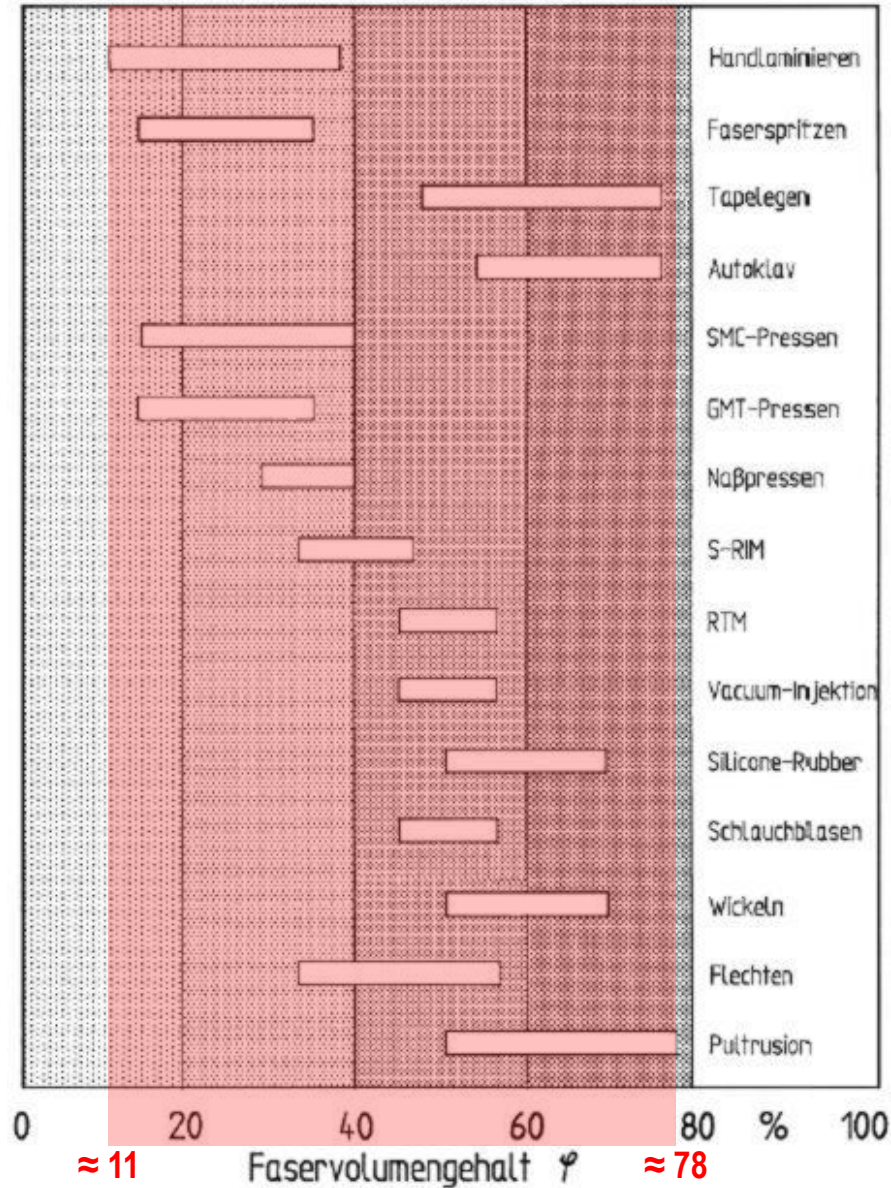


Drapierfähigkeit



(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 |

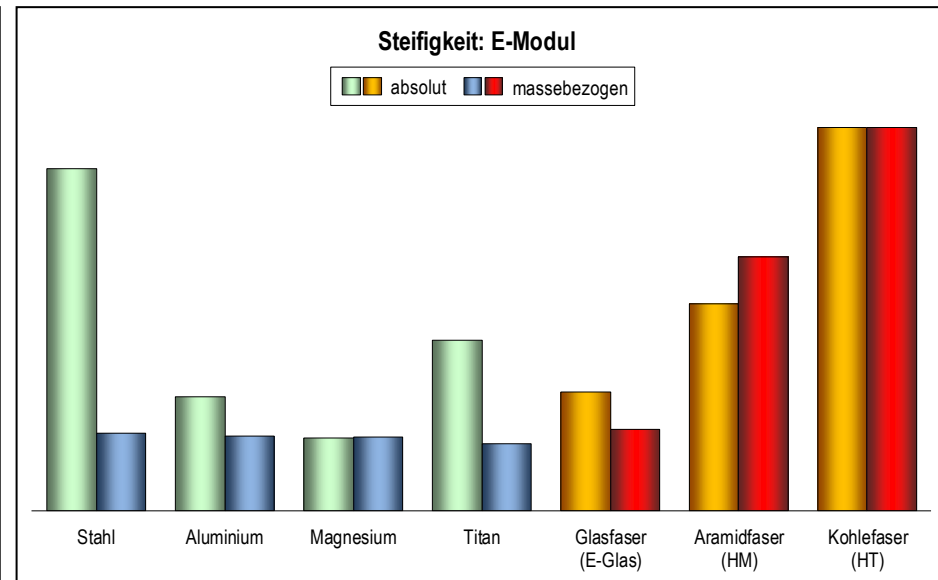
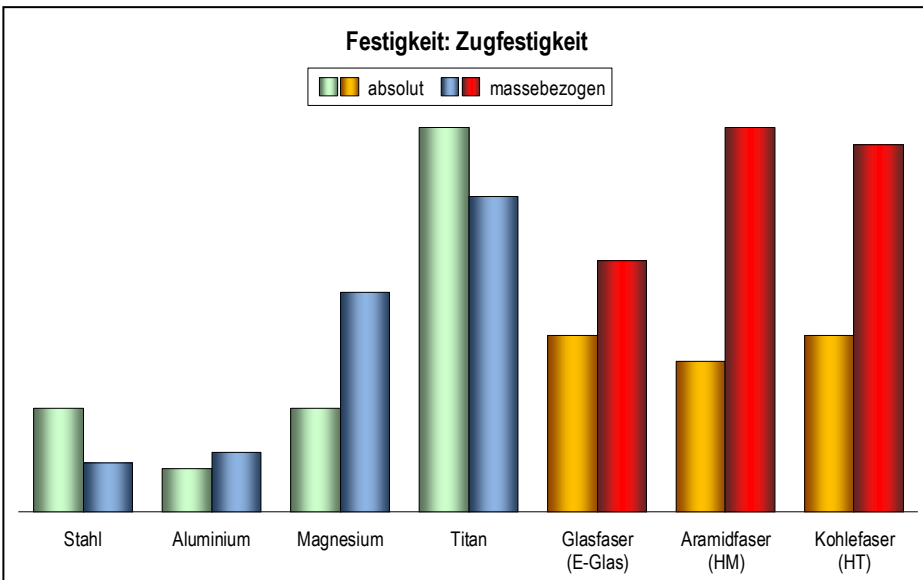
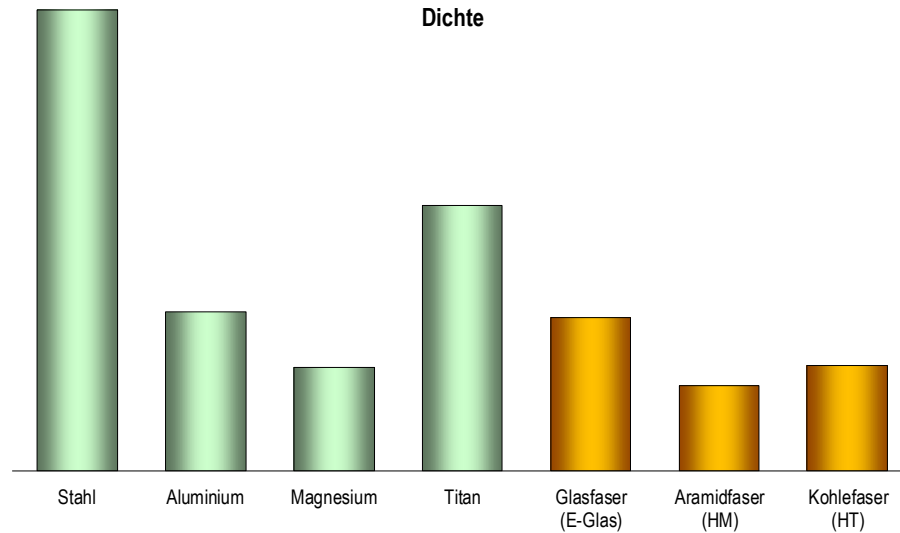
(Quelle: FOMEKK Weimar)

Folie Bedeutung von Faser und Matrix für wesentliche Eigenschaften des FVW

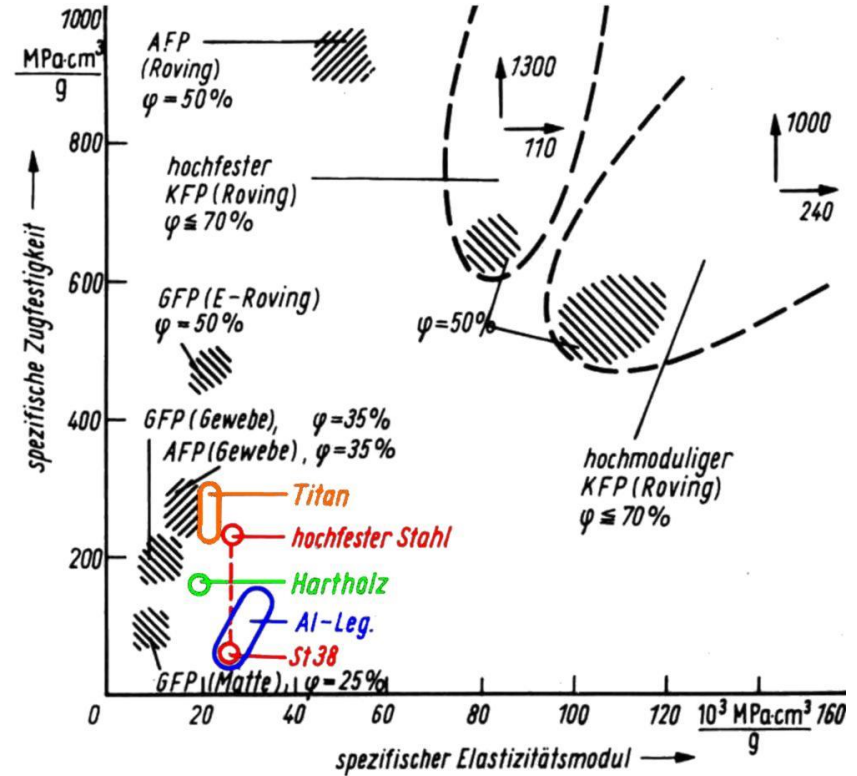
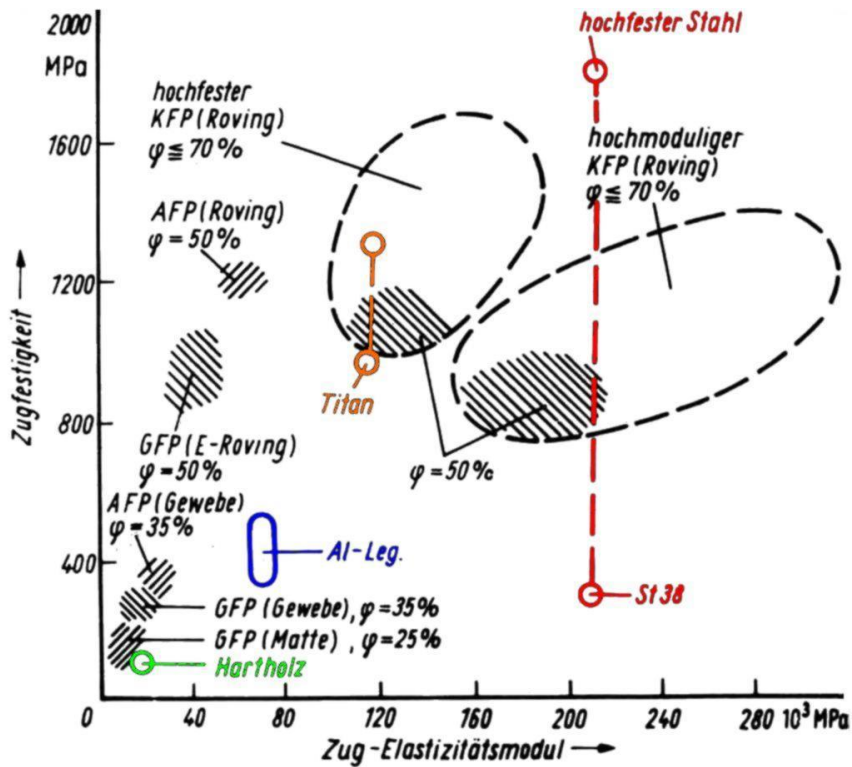
| | Faser | Matrix |
|------------------------------------|-------|--------|
| Mechanische Eigenschaften | | |
| • Steifigkeit | | |
| • Festigkeit | | |
| • Ermüdung | | |
| • Schadenstoleranz | | |
| • Impactverhalten | | |
| • Thermomechanische Eigenschaften | | |
| • Faser-Matrix-Haftung | | |
|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

(Quelle: nach Ermanni, ETH Zürich)

Folie Werkstoffkennwerte FVK

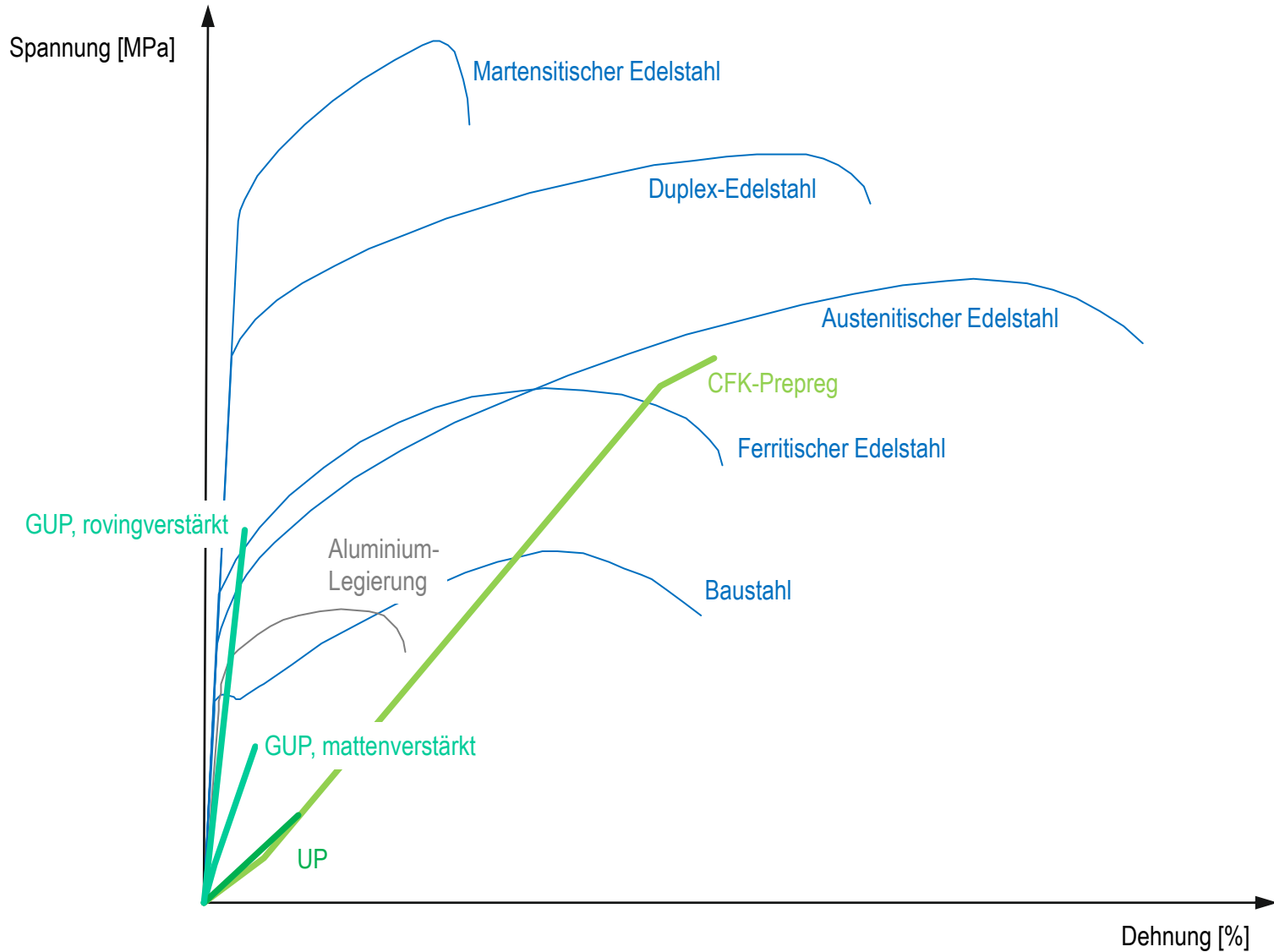


Folie Festigkeiten / Steifigkeiten ausgewählter Werkstoffe

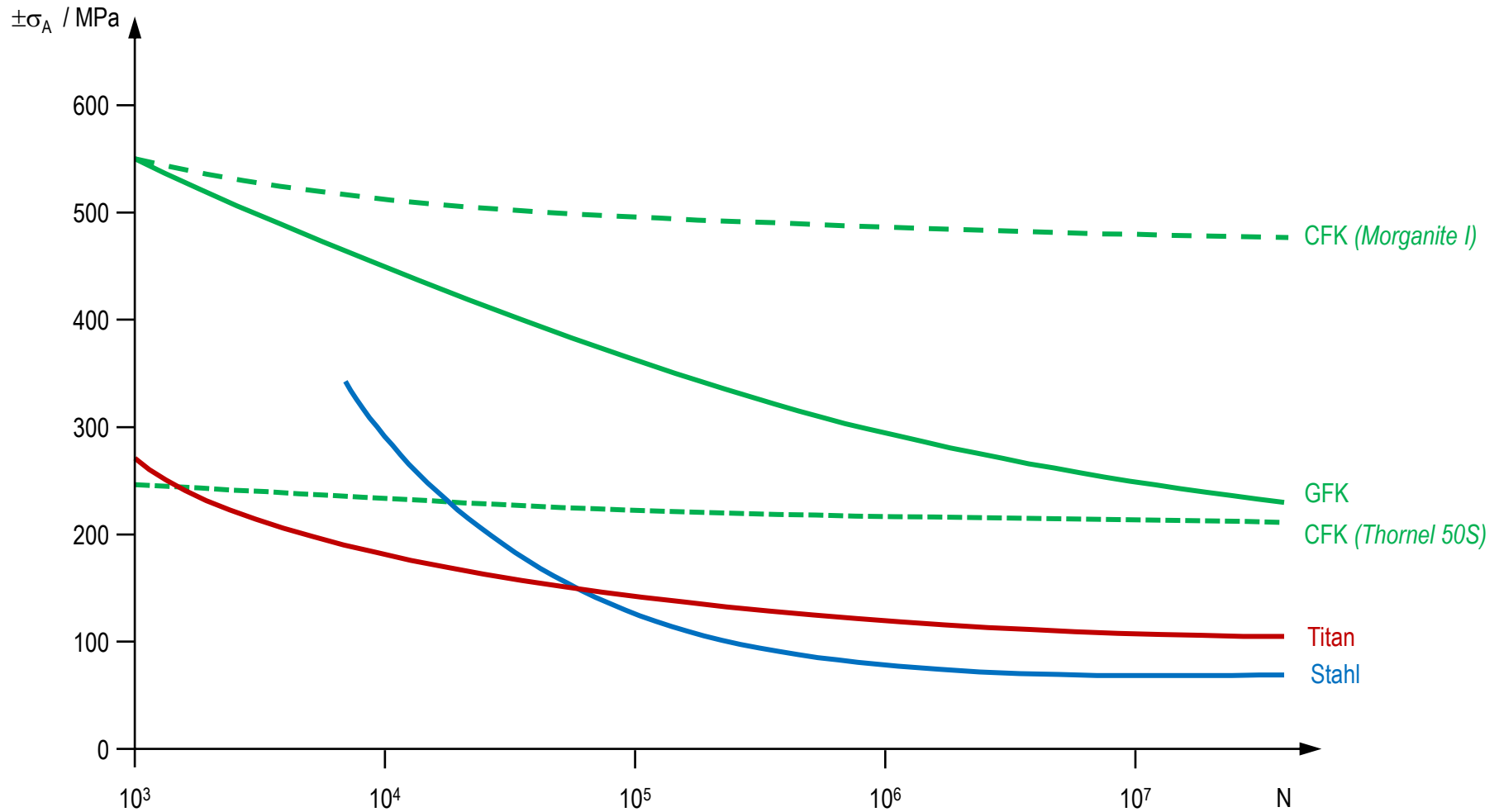


(Quelle: Nowak; Lauck: Maschinentechnik 34(1985)1)

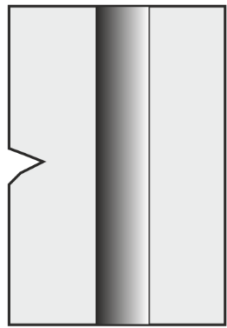
Folie Spannungs-Dehnungs-Diagramm



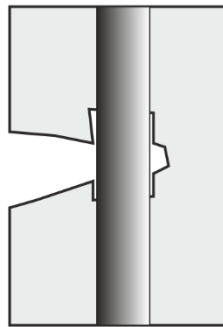
Folie Dauerfestigkeit von Faserverbundwerkstoffen



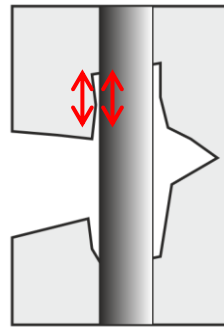
(Quelle: nach Leo: ZEV Glas. Ann. 112(1988)10)



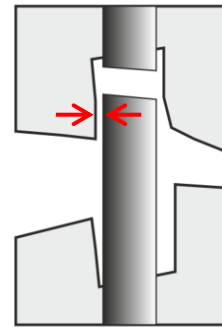
Riss



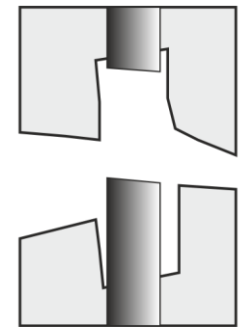
Ablösung



Gleiten

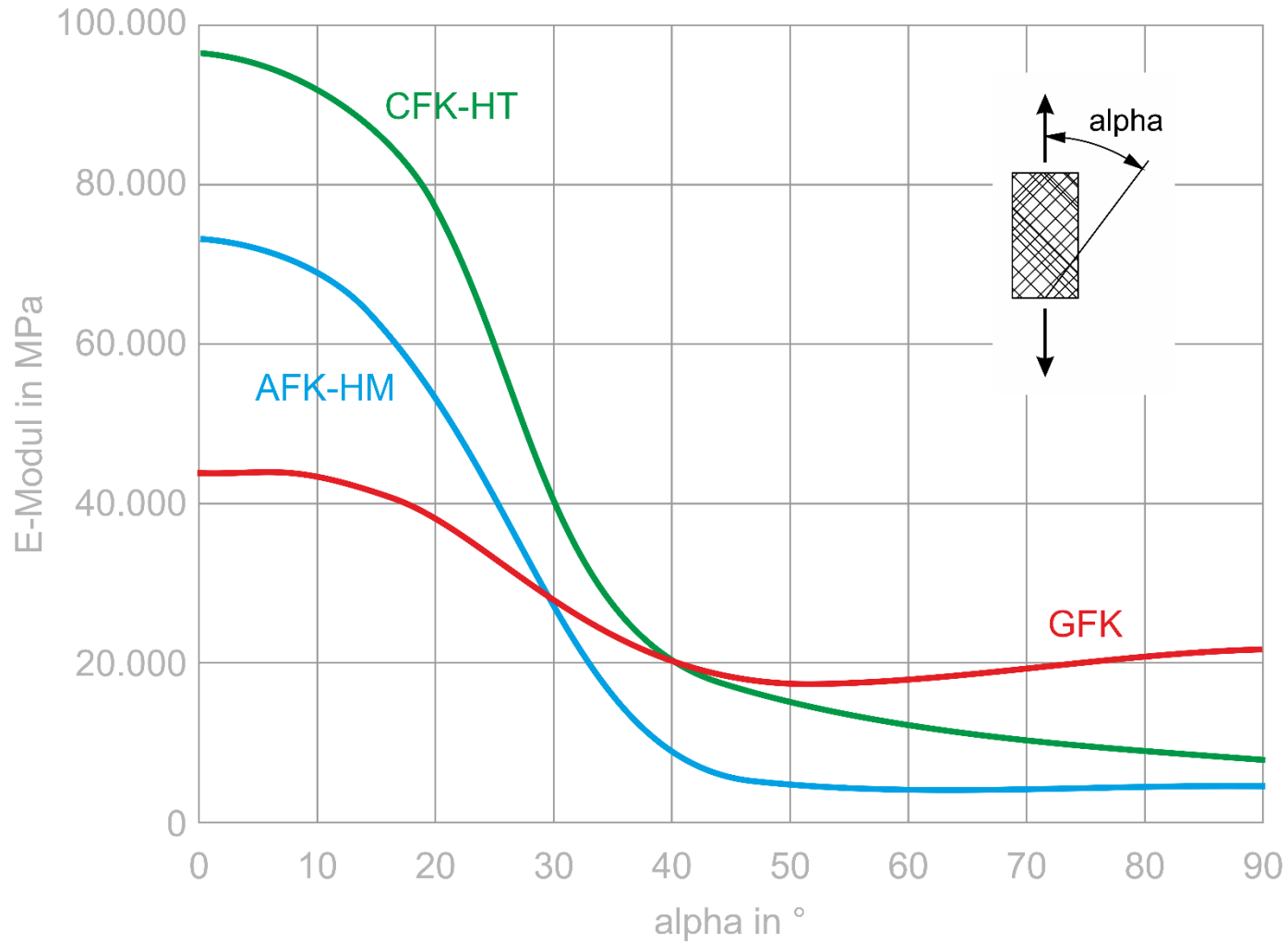


Faserbruch

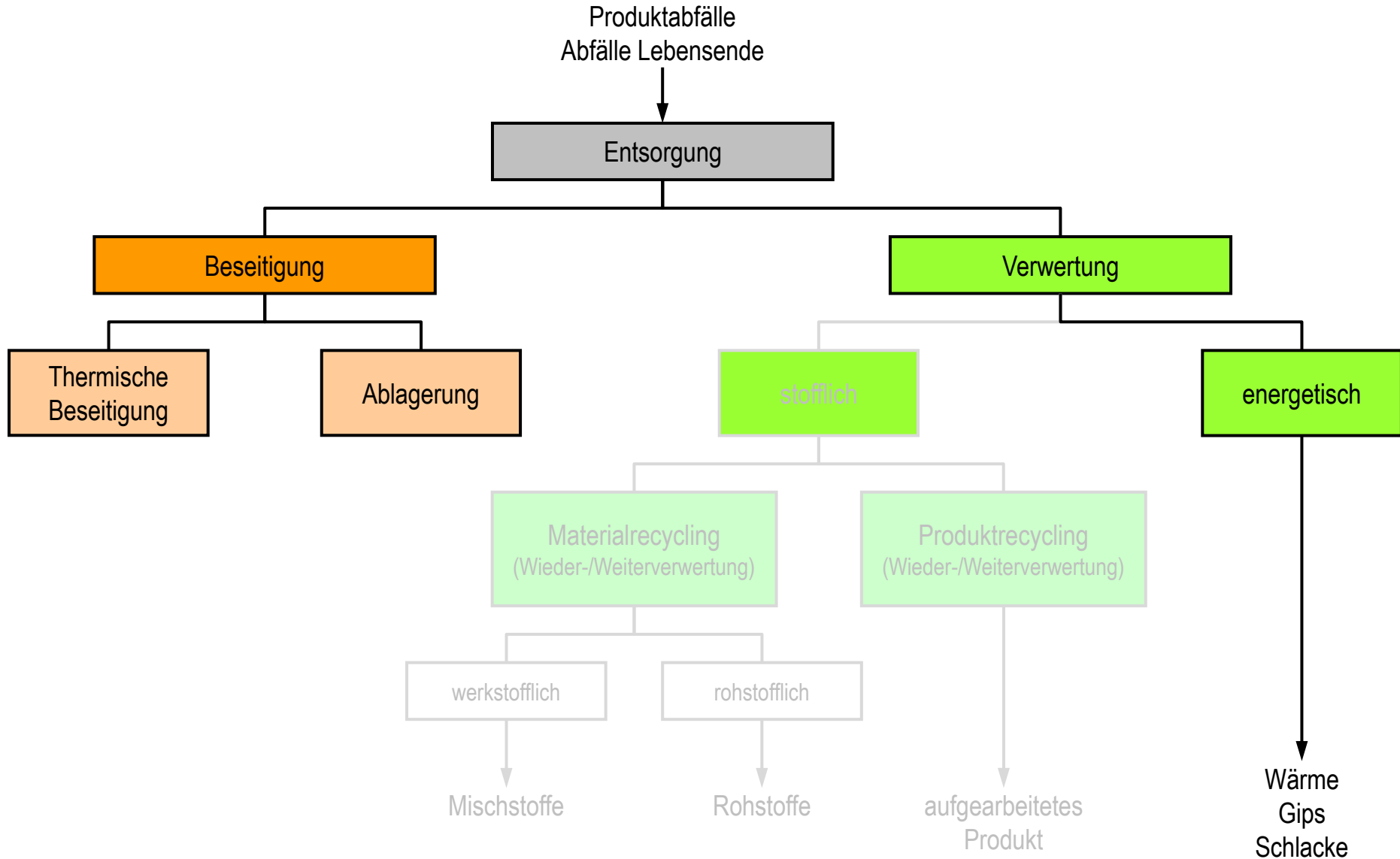


“pull out”

Folie Richtungsabhängigkeit E-Modul FVK



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

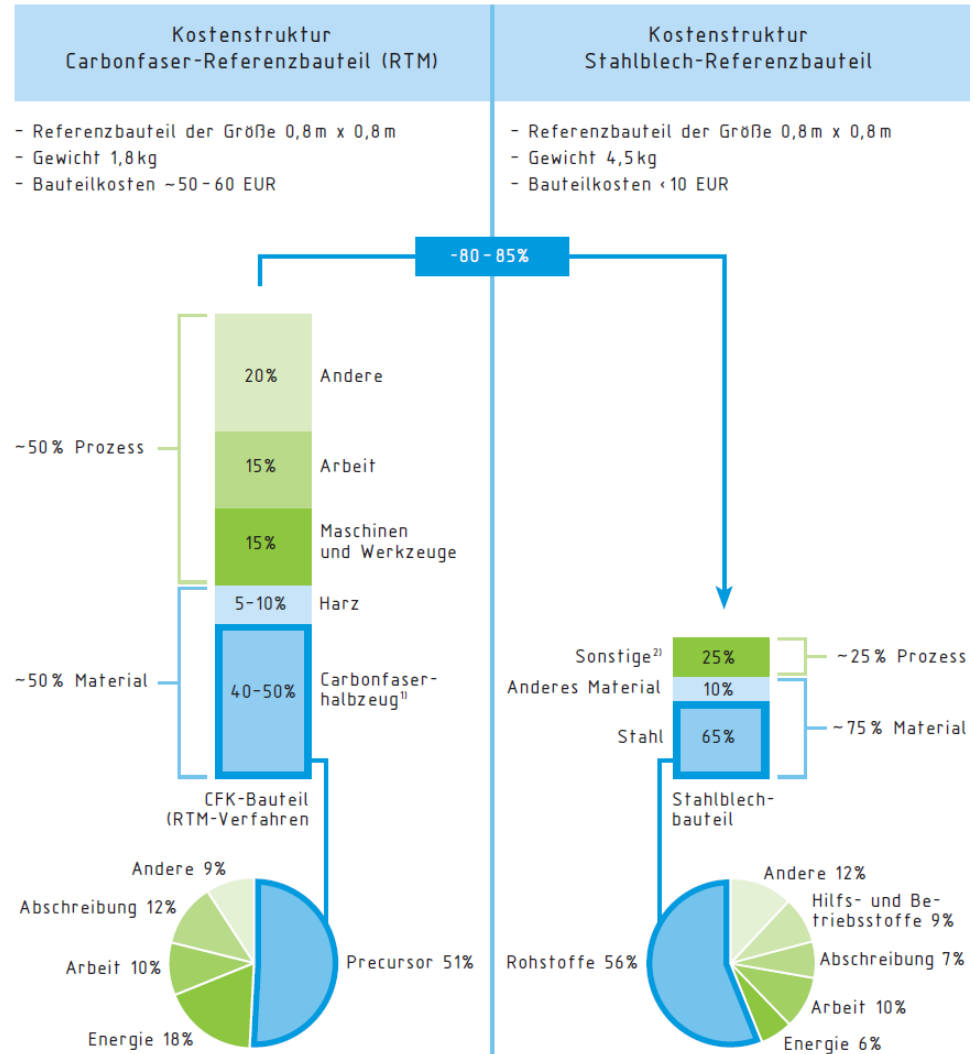


Folie Vergleich Metalle – Faserverbundwerkstoffe

| 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

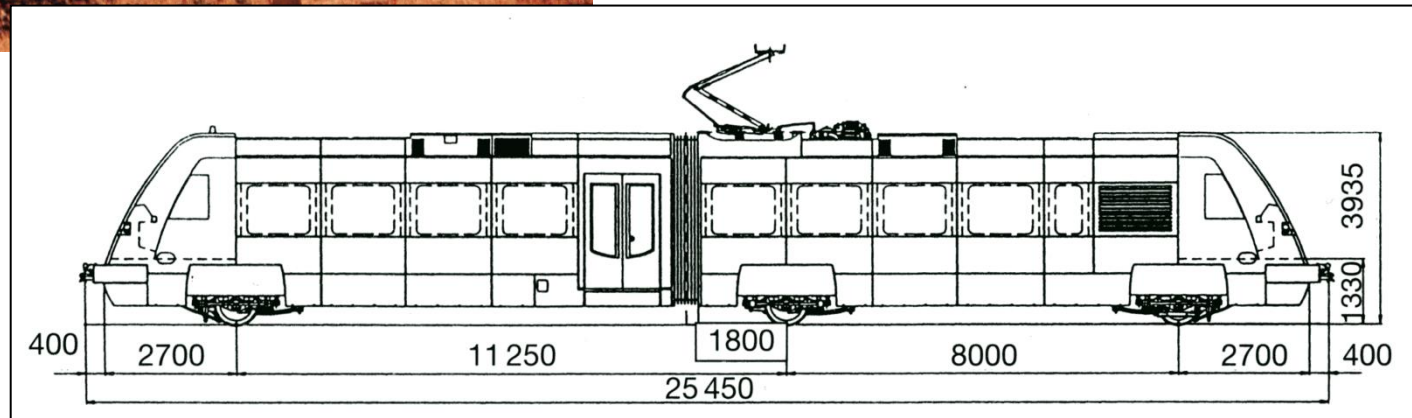
| Anforderung | Stahl | Alu-Leg. | FVK |
|---|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Festigkeit, Steifigkeit: <ul style="list-style-type: none"> – hohe Längsfestigkeit, hohe lokale Festigkeit ↔ Energieverzehbereiche – große Struktursteifigkeit (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

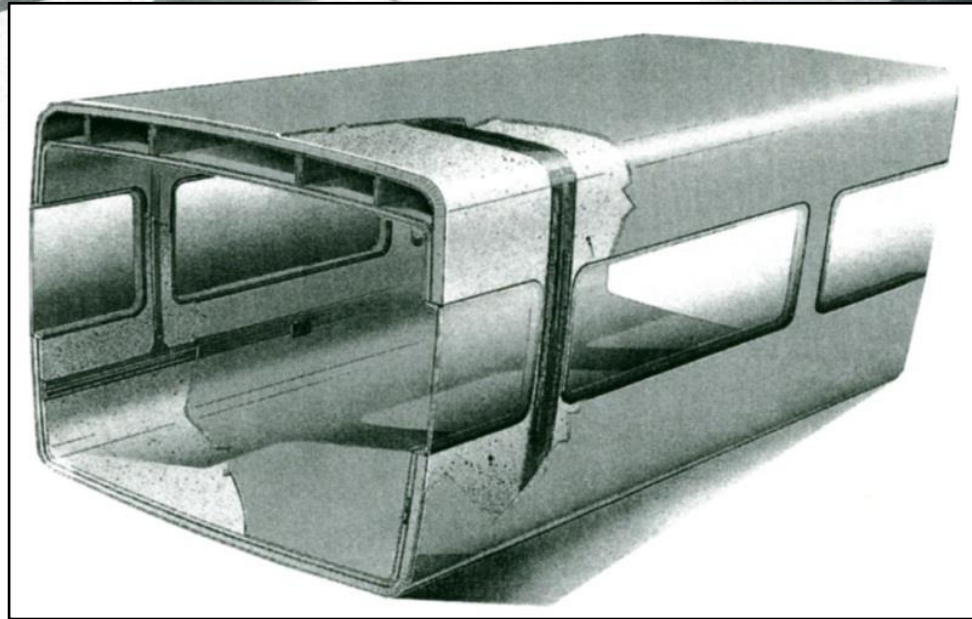
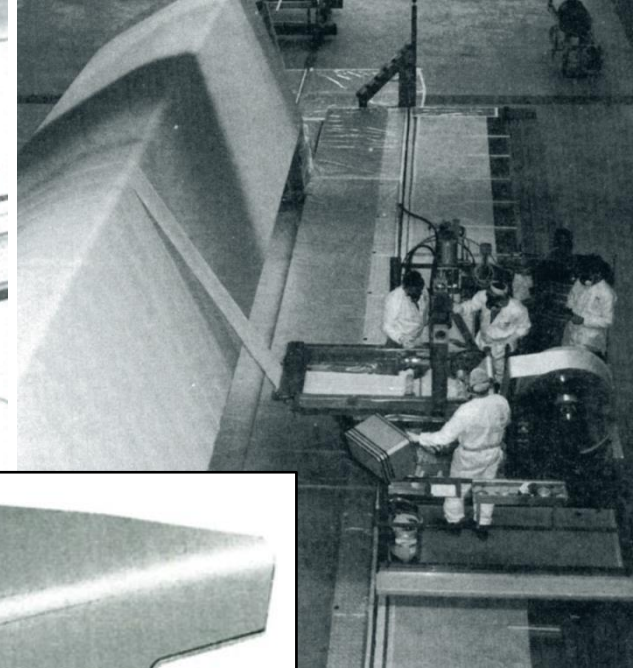
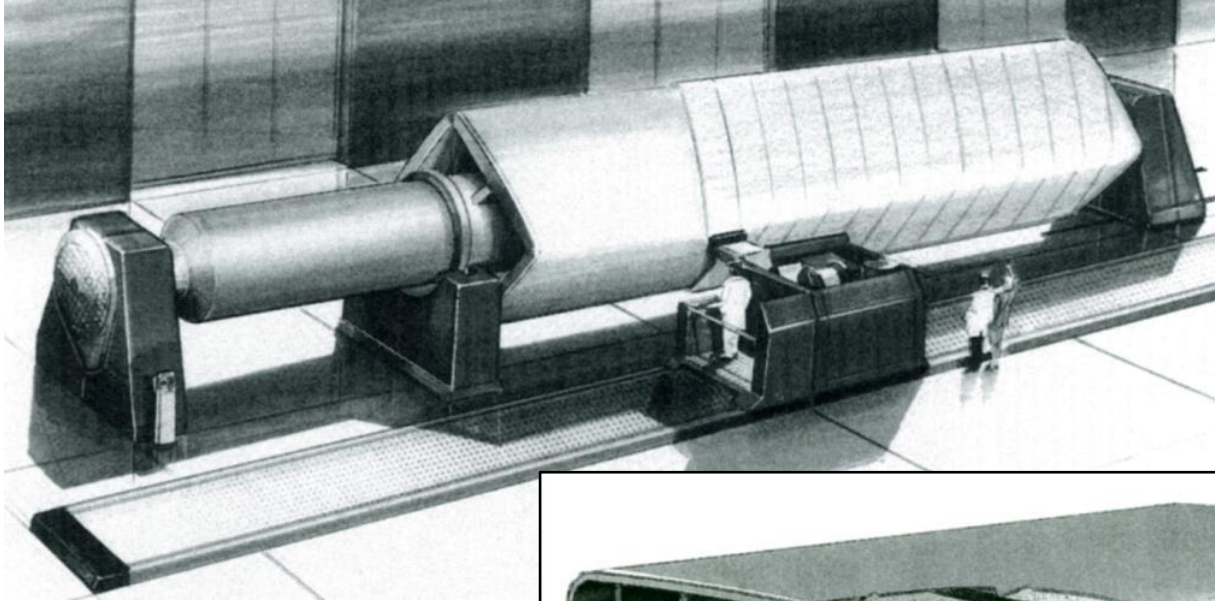


Technologieträger ET 2000 TT (DWA, 1997)



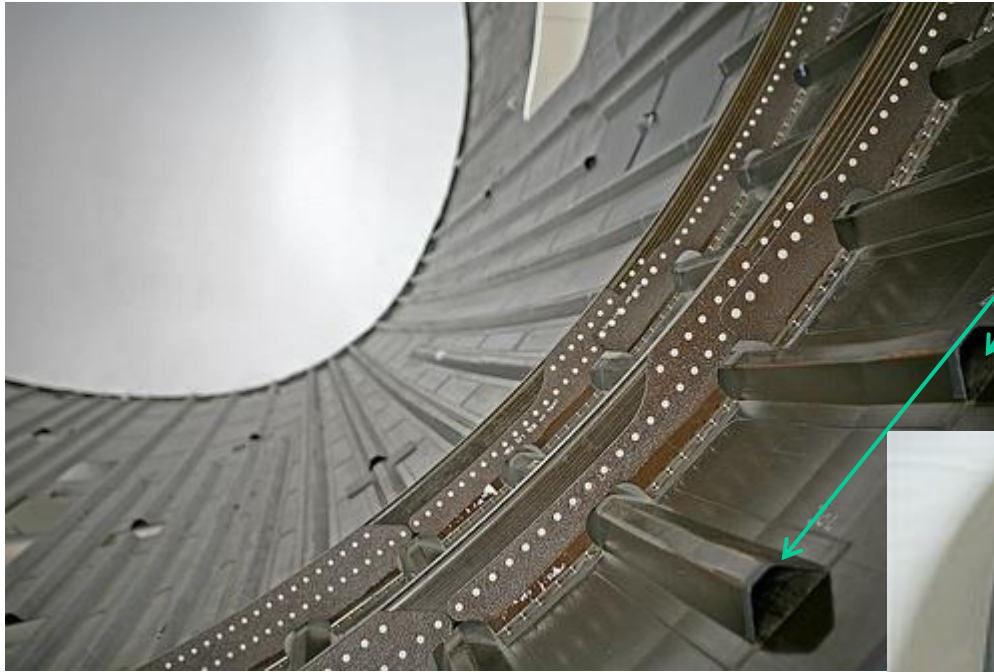
(Quelle: Marek, Dürschmied, u.a.: ETR 46(1997)7/8)

Folie Sandwichbauweise – Wickeltechnologie

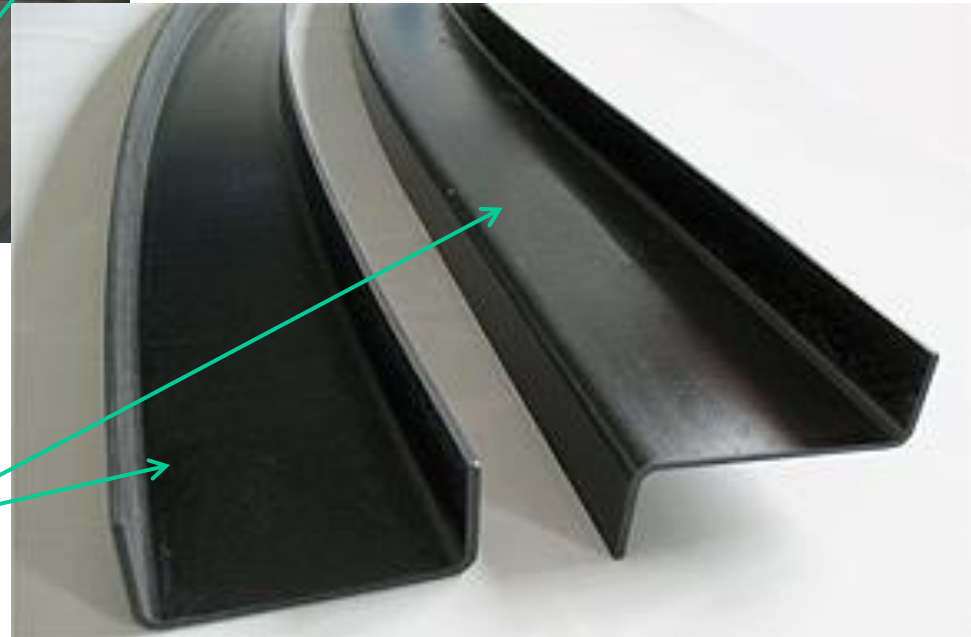


(Quelle: Anderegg: ZEV+DET Glas.Ann. 119(1995)9/10; ETR 45(1996)7/8)

Folie Differentiale Spant-Stringer-Bauweise



Geklebte CFK-Omega-Stringer (Boeing 787)



Komplexe Spantgeometrien
(unidirektionalen Flechttechnologie)

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

Fertigungsstudie ICE-Seitenwandmodul als Flächentragwerk



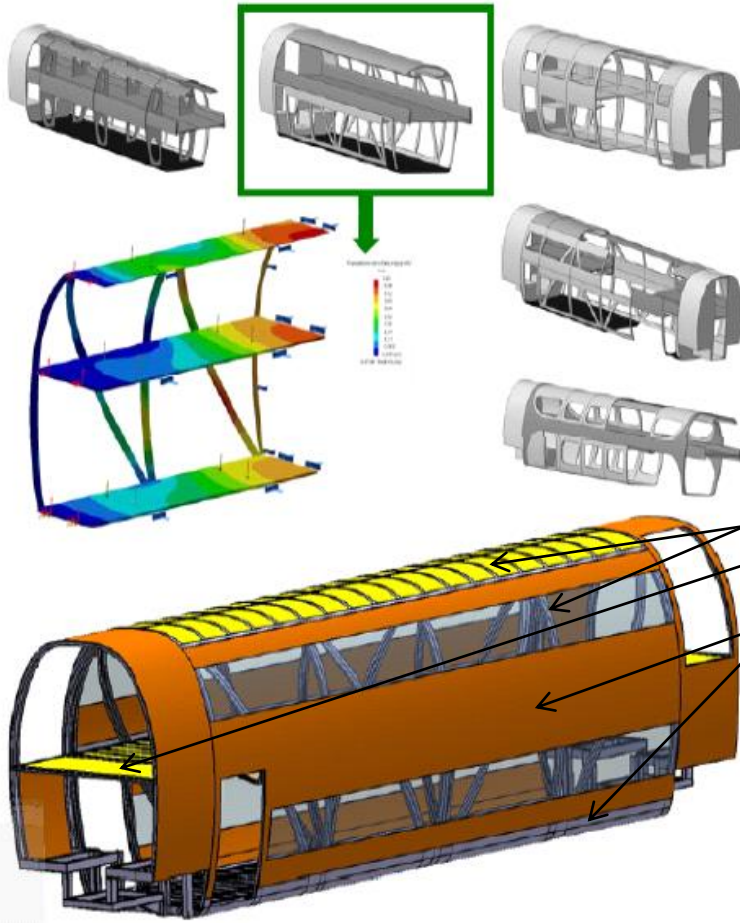
Vorteile dieser Bauweise:

- 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)

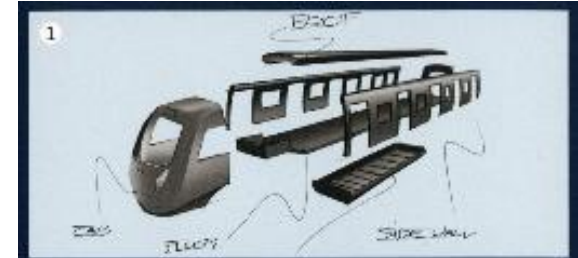
FVK-gerechte Bauweise:

- 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



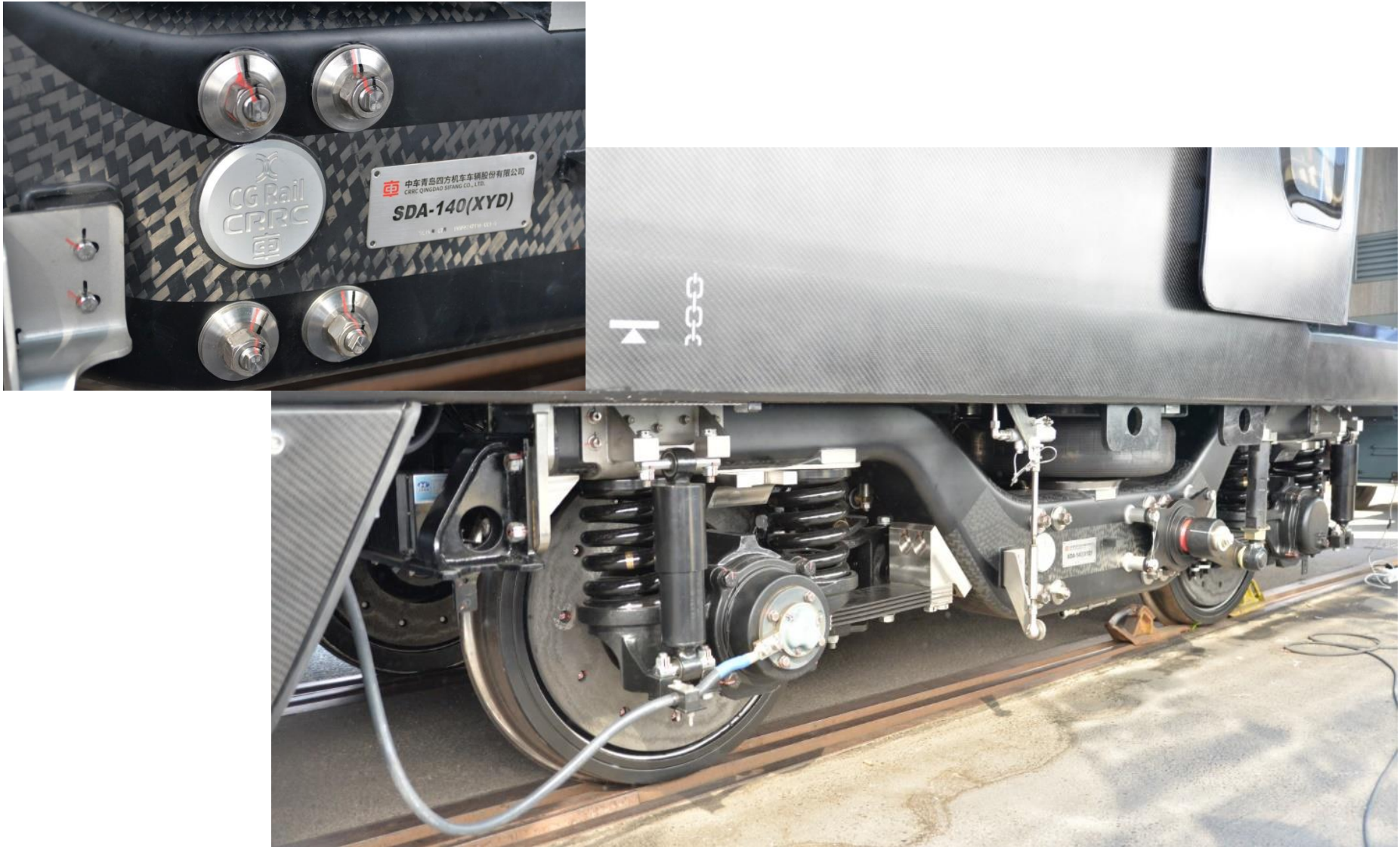
(Quelle: nach DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik)

Folie CFK-Wagenkasten CRRC



(Quelle: Prospekt CRRC Innotrans 2018)

Folie CFK-Drehgestell CRRC



(Quelle: Innotrans 2018, M. Kache)

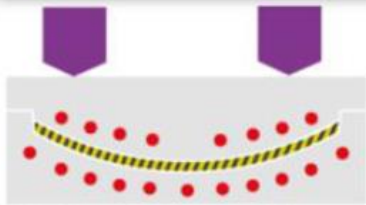
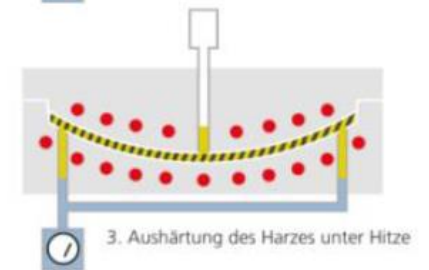
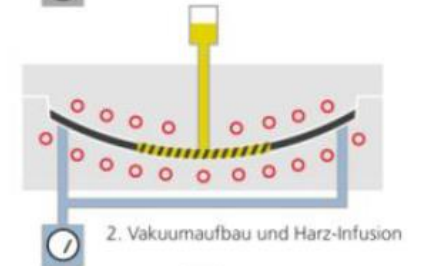
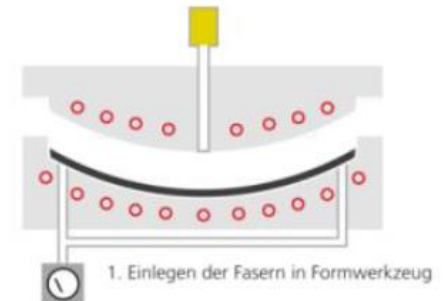
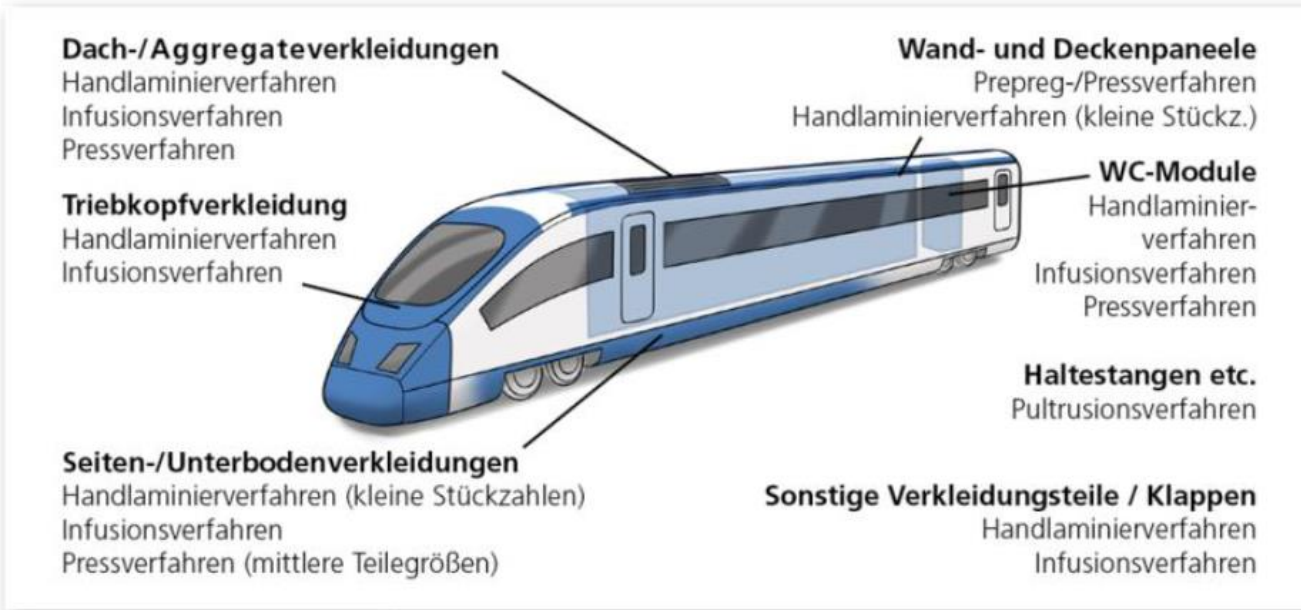
Folie FVK-Fertigungsverfahren im Schienenfahrzeugbau

| 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 |

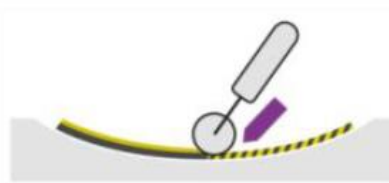
BP = Biopolymer, UP = ungesättigtes Polyesterharz, VE = Vinylesterharz, PF = Phenolharz

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

FKV in Schienenfahrzeugen und Beispiele für Fertigungsverfahren



SMC Pressverfahren



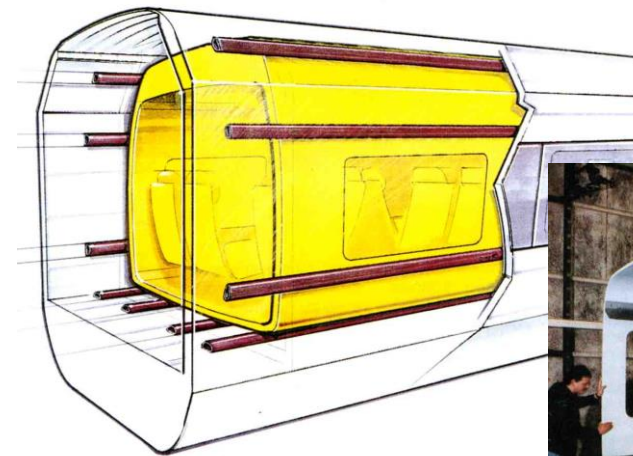
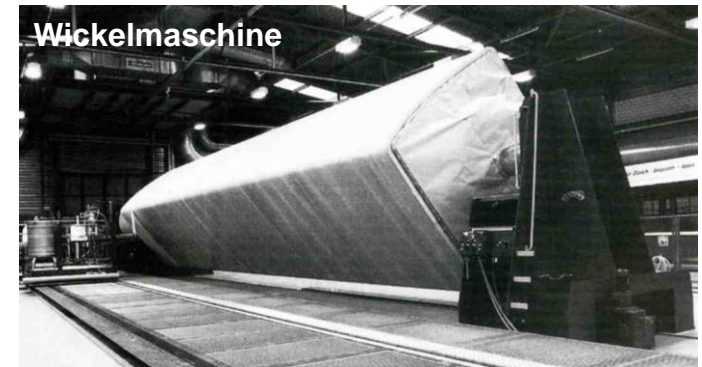
Handlaminierverfahren



Pultrusionsverfahren

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

Folie Faserverbundwerkstoffe – Anwendungsbeispiele (I)



Innenausbaukonzept Schindler



Folie Faserverbundwerkstoffe – Anwendungsbeispiele (II)



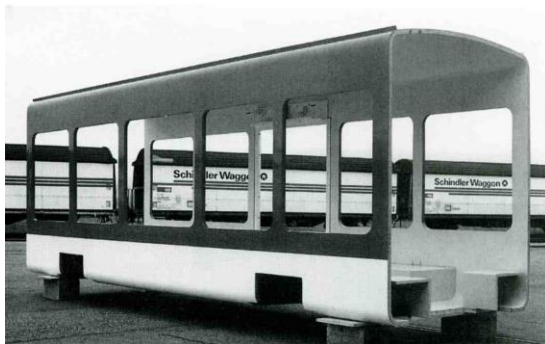
Niederflurstraßenbahn „COBRA“



Vollbahn-Gliederzug FVW



Versuchsdrehgestell HLD 300

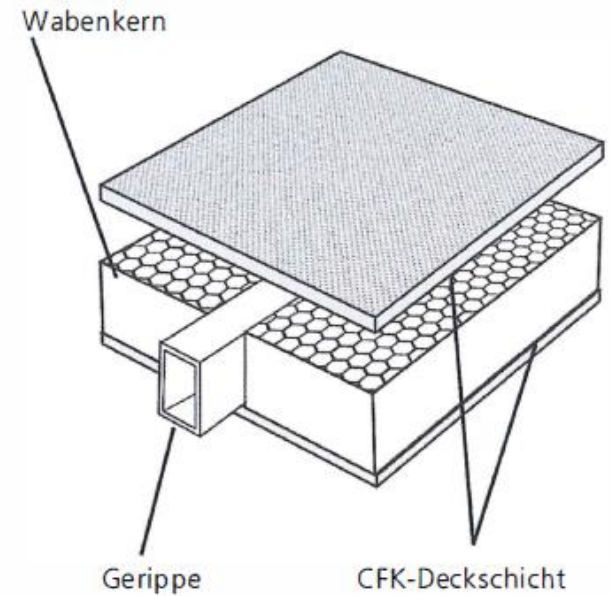
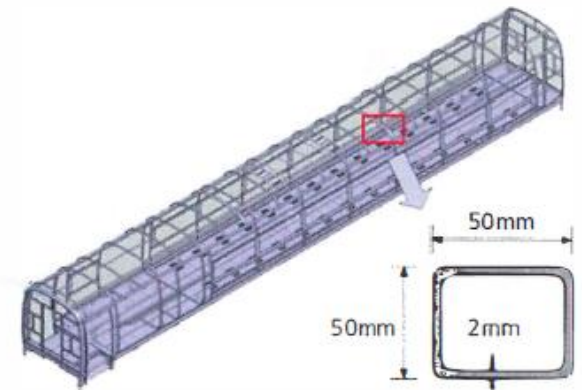
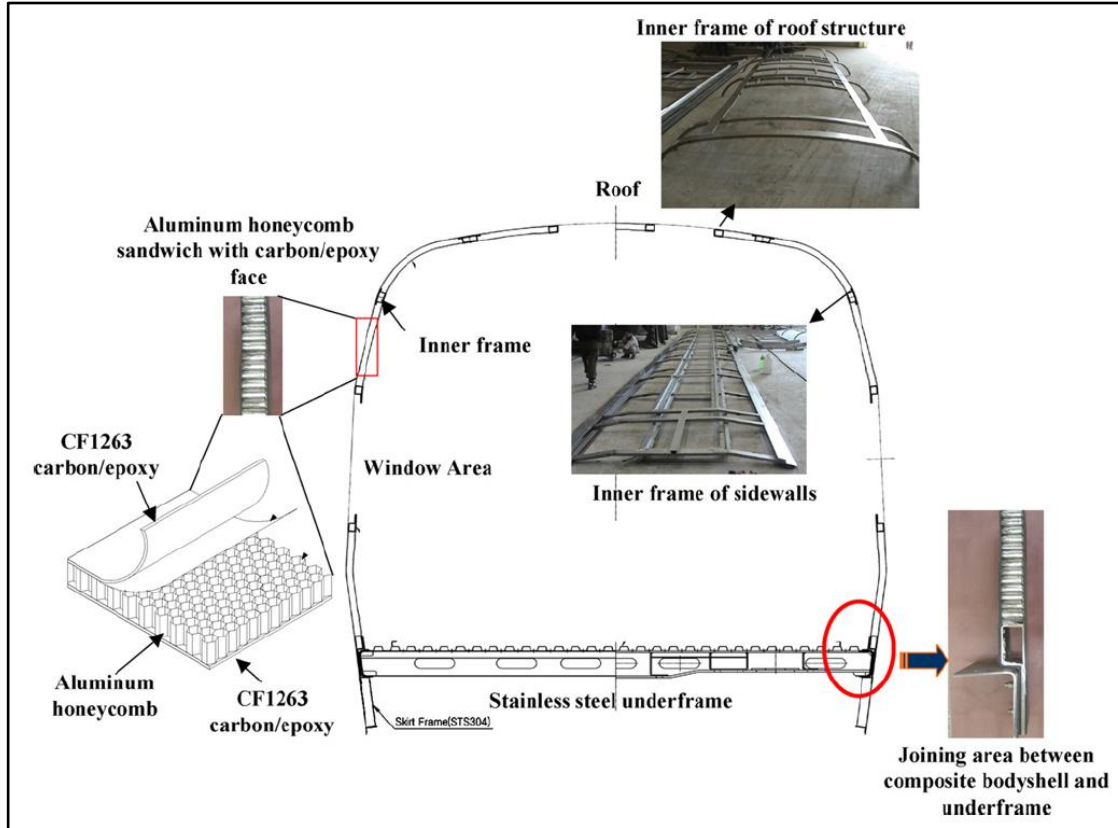


Mittelwagen-
erweiterung
KT4D Cottbus



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)



(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)