

Ressourceneffizienz durch Leichtbau

Christof Kindervater

Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
DLR Stuttgart



Wissen für Morgen

Überblick

- Das DLR als Forschungspartner
- Meister im Leichtbau – Vorbild Natur
- Leichtbau - ein Überblick
- Leichtbaustrategieansätze
- Leichtbaumaterialien
- Einsparpotenziale von Masse und Kosten
- Recycling (FVK)
- Fallbeispiele zur Massenreduktion
 - Flugzeugstruktur
 - Bremsscheiben
 - Motorenteile
 - Roboterstrukturen
 - Maschinenbau
- Handlungsfelder



DLR-Standorte und Personal

Circa 7.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten in 32 Instituten und Einrichtungen in
■ 16 Standorten.

Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington.



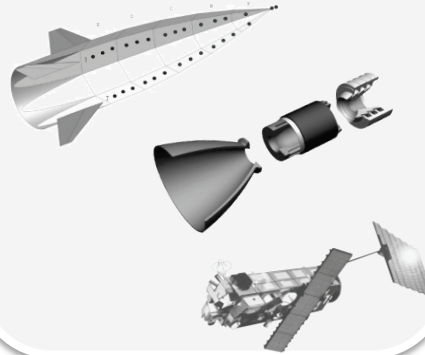
DLR - Forschungspartner für die Wirtschaft

- Geschäftsfelder/Forschungsbereiche -

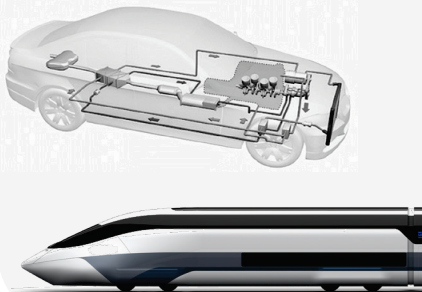
Luftfahrt



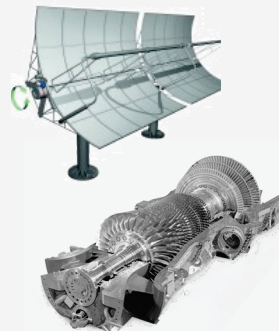
Raumfahrt



Verkehr



Energie



- Raumfahrtmanagement
- Projektträger



Kernziele

Luftfahrt

Raumfahrtforschung
und -technologie

Verkehr

Energie

Raumfahrt-
management

Projektträger

Forschung
/
Hoheitliche
Aufgaben
/
Dienst-
leistungen

- Kontinuierliche Steigerung der wissenschaftlichen Exzellenz
- Stärkung der deutschen Wirtschaft und Wissenschaft im globalen Wettbewerb durch Ausbau der Unterstützung des Luft- und Raumfahrt-Standortes Europa
- Erhöhung der Hebelwirkung für die Wirtschaftszweige Verkehr und Energie
- Steigerung der Verwendung der Forschungsergebnisse für Innovationen in Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr und Energie
- Ausbau der Wahrnehmung hoheitlicher Aufgaben
- Stärkere Einbringung der Projektträger in Deutschland und Europa

Übergreifende Bereiche

Entwicklung neuer Materialien und neuer Fertigungsweisen

Methodenentwicklung, Numerische Simulation, experimentelle Validierung und Bewertung

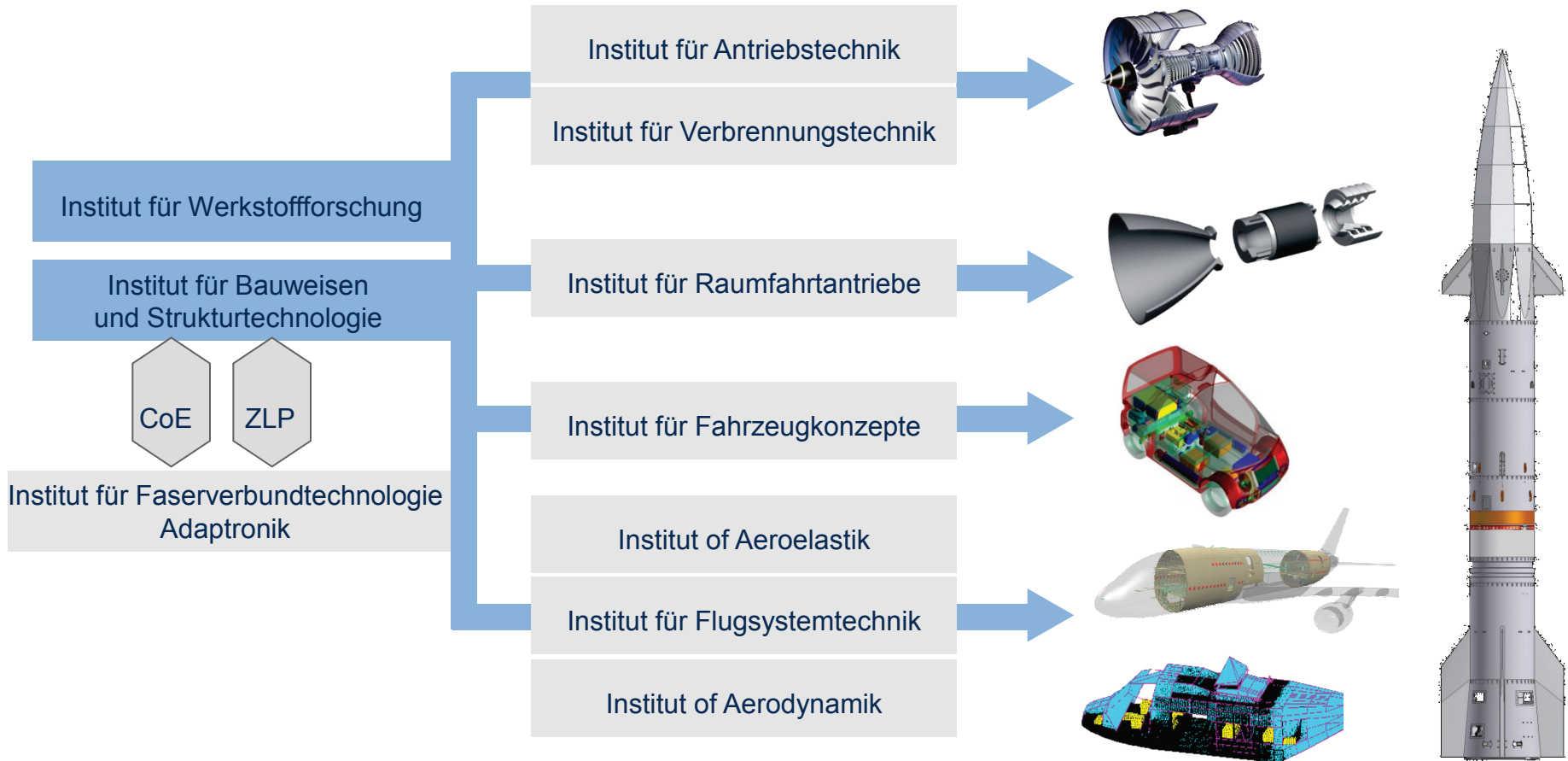
Betrieb und Auslegung von Großanlagen

Koordination und Management übergreifender Projekte mit Wissenschaft, Politik und Industrie

Forschungspolitische Beratung

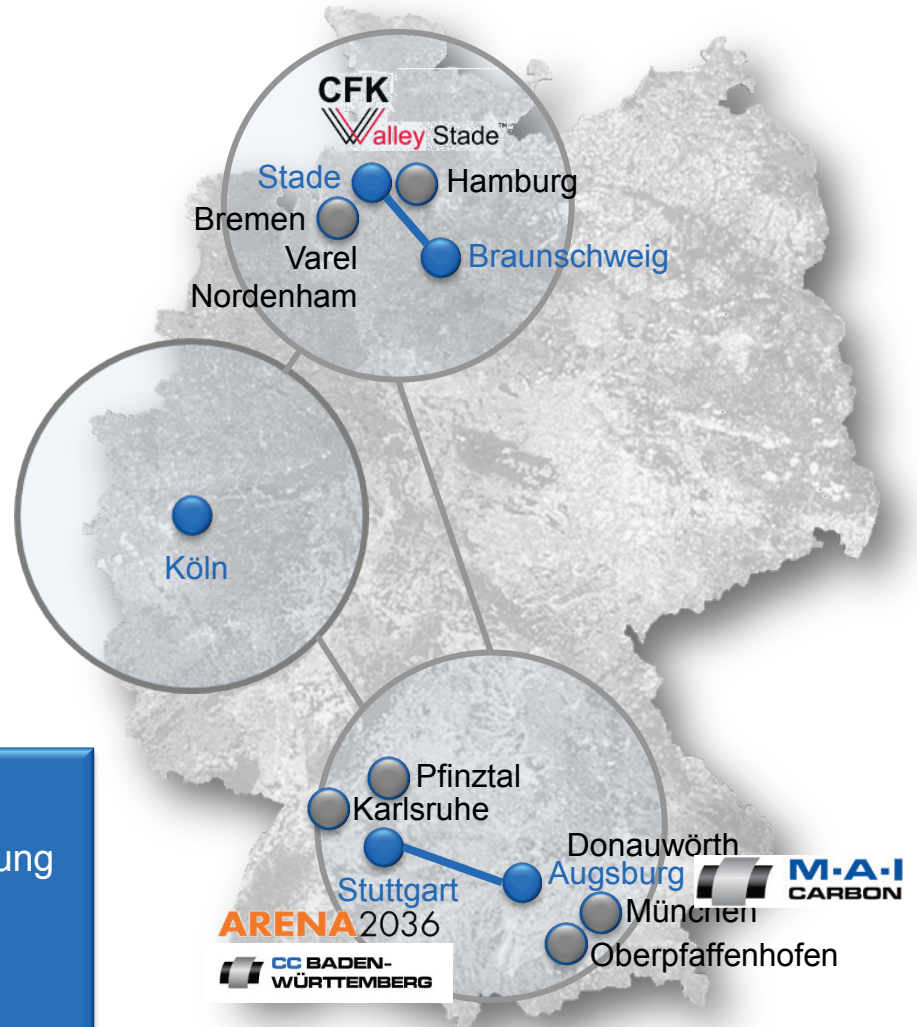
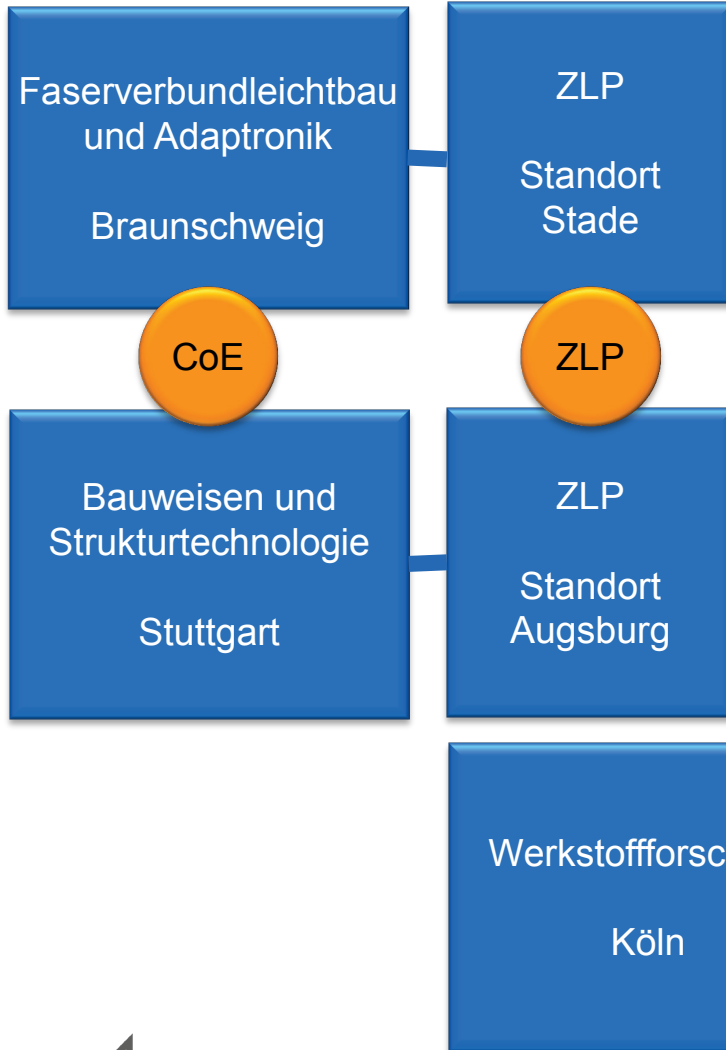


Kooperation im DLR mit Blick auf produktnahe Lösungen



Leichtbau- und FVK-Technologien im DLR

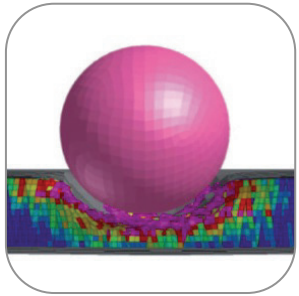
Nationale und regionale Vernetzung



Forschungsschwerpunkte des Instituts BT

Luftfahrt

Strukturelle
Integrität



Aerostrukturen



Strukturen für
Strahlantriebe

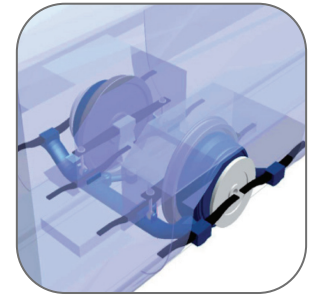


Produktions-
technologie



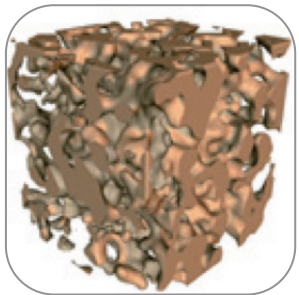
Verkehr

Crashverhalten
Zugstrukturen



Raumfahrt

Faserverbund-
keramiken



Reentry-
Strukturen



Bauweisen
für Antriebe



Energie

Keramische
Bauweisen



Kompetenzportfolio Energie

		Brennstoffzelle	Kraftwerkstechnik	Konzentrierende Solarsysteme
Rationelle Energieumwandlung	Systemanalyse und Technologiebewertung	Material	Verbrennung	
		Herstellungsverfahren	Turbomaschinen	
		Wärmemanagement	System Gasturbine	
			Wärmeübertrager	
	Hybridkraftwerk		Solare Gasturbine	
Erneuerbare Energien	Systemanalyse und Technologiebewertung	Brennstoffzelle mit alternativen Brennstoffen		Solare Gasturbine Wärmespeicher
			Gasturbine mit alternativen Brennstoffen	Solare Wasserstoffherstellung
				Solare Kraftwerke
				Solare Prozesswärme
Simulation / Modellierung				



Meister im Leichtbau: Vorbild Natur

Werner Nachtigall:

Zehn Grundprinzipien natürlicher Konstruktionen - "10 Gebote" bionischen Designs

Prinzip 1: Integrierte statt additiver Konstruktion

Prinzip 2: Optimierung des Ganzen statt Maximierung eines Einzelements

Prinzip 3: Multifunktionalität statt Monofunktionalität

Prinzip 4: Feinabstimmung gegenüber der Umwelt

Prinzip 5: Energieeinsparung statt Energieverschleuderung

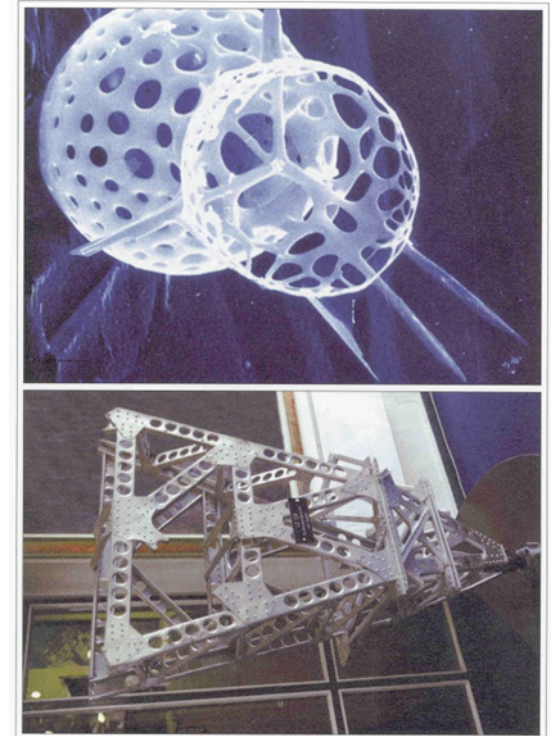
Prinzip 6: Direkte und Indirekte Nutzung der Sonnenenergie

Prinzip 7: Zeitliche Limitierung statt unnötiger Haltbarkeit

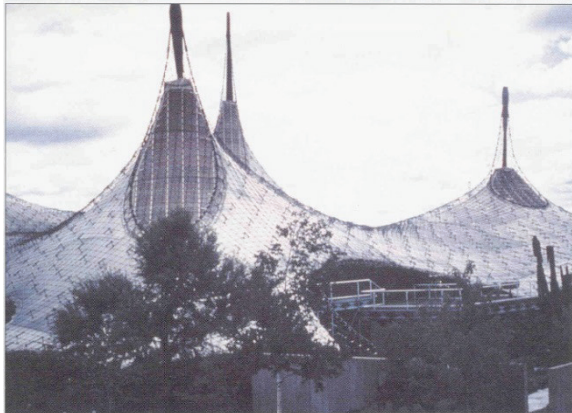
Prinzip 8: Totale Rezyklierung statt Abfallanhäufung

Prinzip 9: Vernetzung statt Linearität

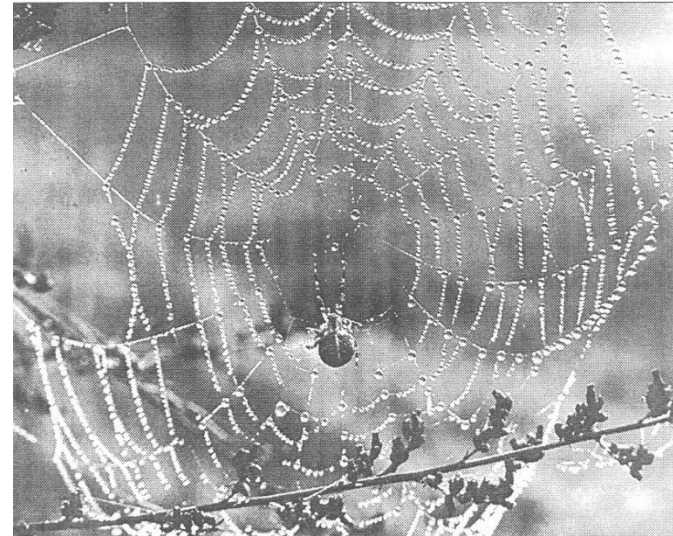
Prinzip 10: Entwicklung im Versuchs-Irrtums-Prozess



Natur als Vorbild für Leichtbaustrukturen, Fasern und Optimierung



- Spinnennetz mit optimierter Krafteinleitung
- Olympia Dach München (Frey Otto)



Spinnennetz:

- “Keratin” Fasern: Bruchdehnung bis 40% auch bei sehr niedrigen Temperaturen, Durchmesser: 1,5-5 μm
- nicht wasserlöslich
- Anwendungen: Ballistischer Schutz, Seidengewebe, Fischernetze, Fadenkreuze

Source: Werner Nachtigall



Leichtbau – ein Überblick

Definitionen nach Johannes Wiedemann (Leichtbau Band 1)

➤ **Spar-Leichtbau**

Bemüht sich um direkte Kosteneinsparung an Material und Herstellung: Materialaufwand wird reduziert durch bessere Nutzung, durch Abmagern oder funktionsgerechtes Gestalten der Struktur, Herstellungsaufwand wird reduziert durch Materialalternativen mit höherem spezifischen Volumen (z.B. Alu gegenüber Stahl)

➤ **Öko-Leichtbau**

Einzelmaßnahmen in Material und Herstellung sind in der Regel kostspielig, aber gerechtfertigt, etwa durch Energieeinsparung. Abschätzung durch den Vergrößerungsfaktor der Gewichteinsparung: Verhältnis von Gesamtgewicht zu Nutzlast (Flugzeuge 4 - 10, Schienenfahrzeuge 1,5 – 3)

➤ **Zweck-Leichtbau**

Ist eine Funktionsbedingung: Massenreduzierung kann zweckmäßig oder notwendig sein, um gewisse Systemfunktionen bei hohen Beschleunigungen oder extremen Ausmaßen zu beherrschen (Bauwerke großer Spannweite, Roboter)



Leichtbau-Strategieansätze (1)

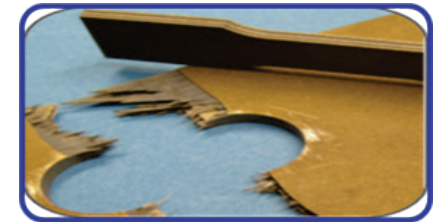
„Weniger ist mehr“

Slogan der Landesagentur Leichtbau Baden-Württemberg



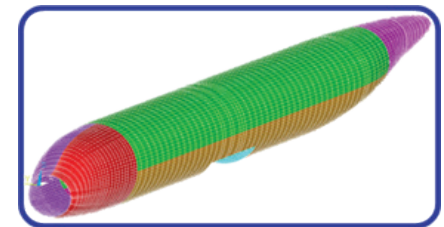
Material

- Materialauswahl/Materialeffizienz
- Neue Materialien/Materialkombinationen
- Nanotechnologie, CNT
- neue Fasern, C-Fasern auf Lignin-Basis, CNT-Fasern, Basaltfasern, keramische Fasern, neue Matrixsysteme (Duromer/Thermoplast)
- Bio-Composites, Naturfasern (Flachs, Hanf,...)



Entwurf/Konstruktion

- Materialeinsparung durch Topologieoptimierung
- Leichtbau gerechtes Design
- Bionisches Design
- Funktionsintegration
- Produktionstechnische Umsetzbarkeit



Leichtbau-Strategieansätze (2)

Herstellung

- Kurze Taktzeiten, wenig Verschnitt
- Generative Herstellungsverfahren (3D-Druck, Lasersinterverfahren)
- Virtuelle Prototypen und Prozesssimulation
- Automatisierte Produktionstechnik mit integrierter Qualitätssicherung



Zielfunktion: Masseneinsparung

- geringere Antriebsleistung
- geringerer Treibstoffverbrauch
- geringerer Schadstoffausstoß (CO₂ Ausstoß, NO_x)
- höhere Nutzlast
- Materialverfügbarkeit ist limitiert
- hervorragende Life-Cycle Bilanz

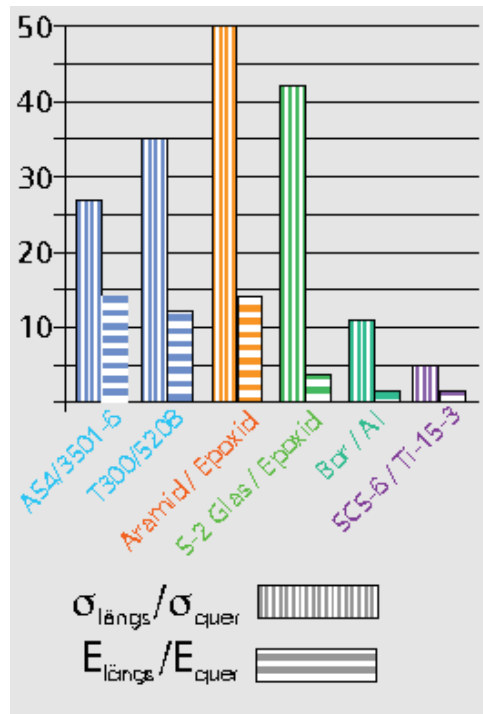
Hybrider Leichtbau

- Das richtige Material an der richtigen Stelle
- Materialmix (Multi-Material): Metall/FVK/Magnesium/Keramik....
- Mischbauweisen

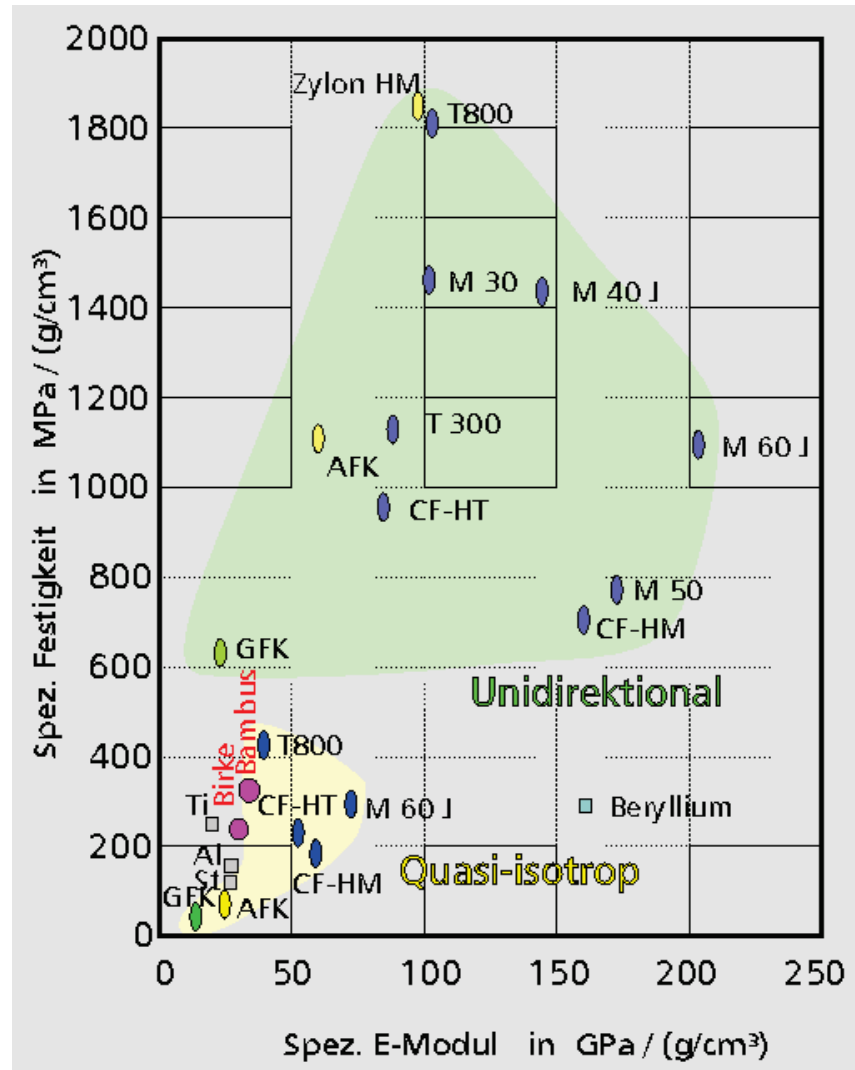


Leichtbau-Materialien

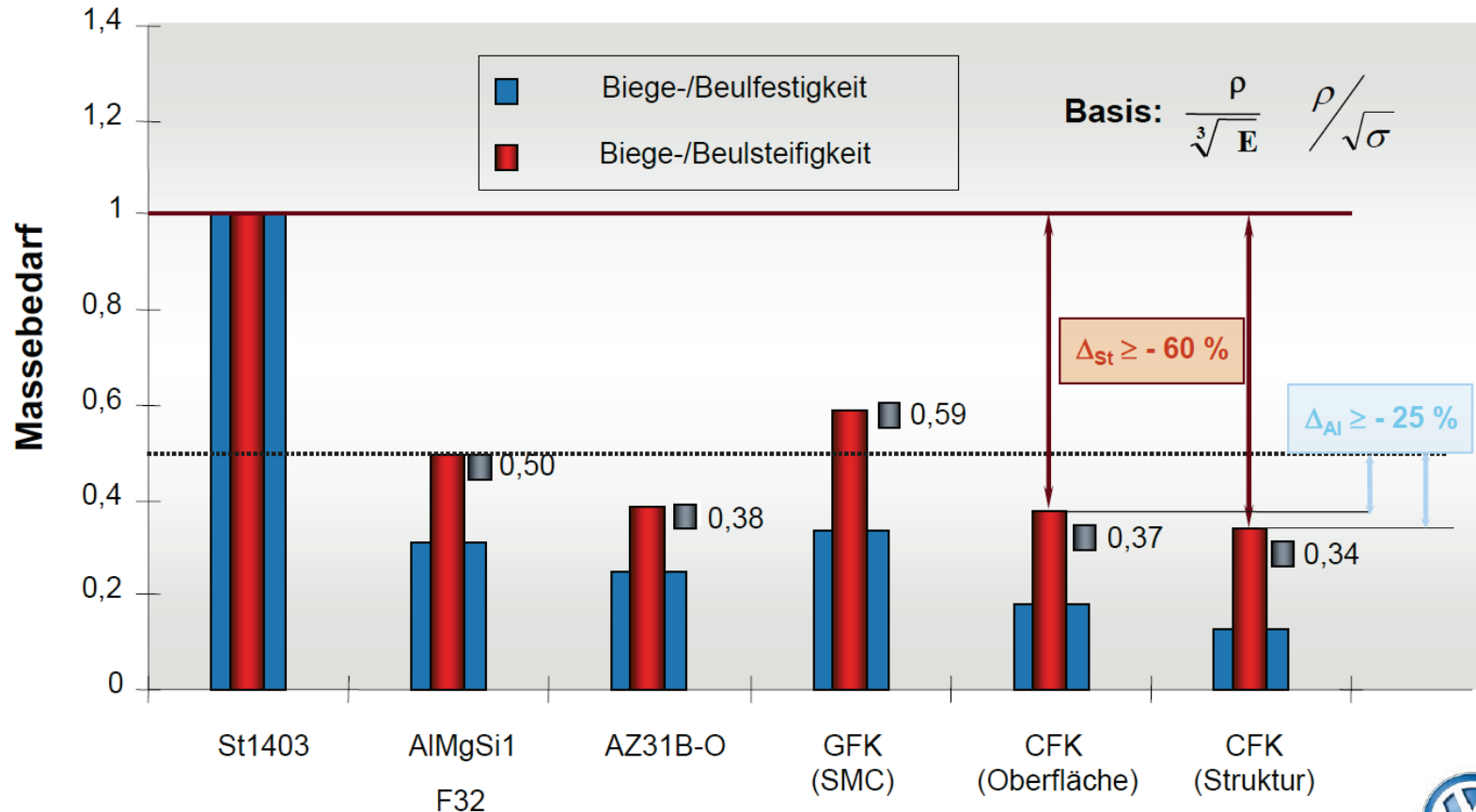
Verbund-Steifigkeiten und -Festigkeiten Auswirkung der Fasereigenschaften



Huybrechts/Wegener/Michaeli (1994)



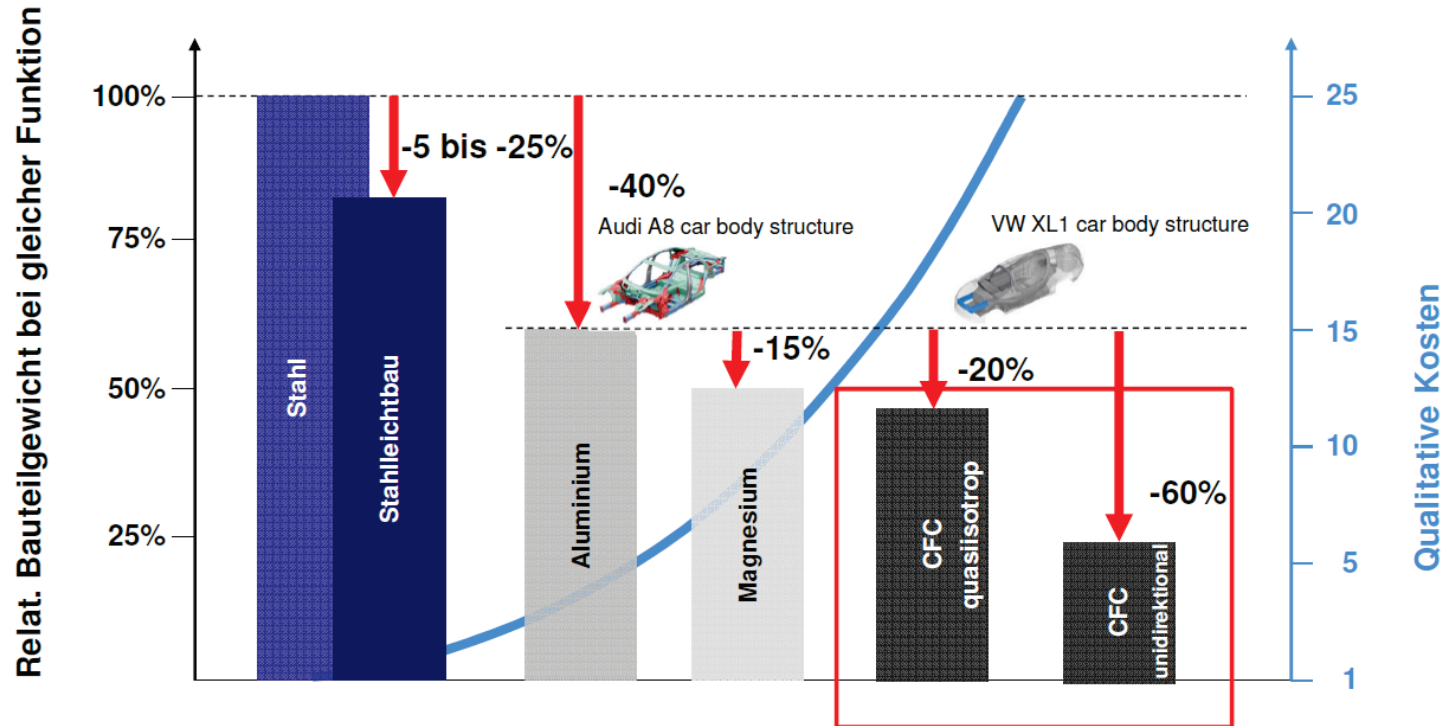
Werkstoffbedingter Massebedarf



Quelle: Prof. Dr. H. Ferkel CCEV Automotive Forum 2010 24.06.2010



Leichtbauwerkstoffe – Eigenschaften und Kosten



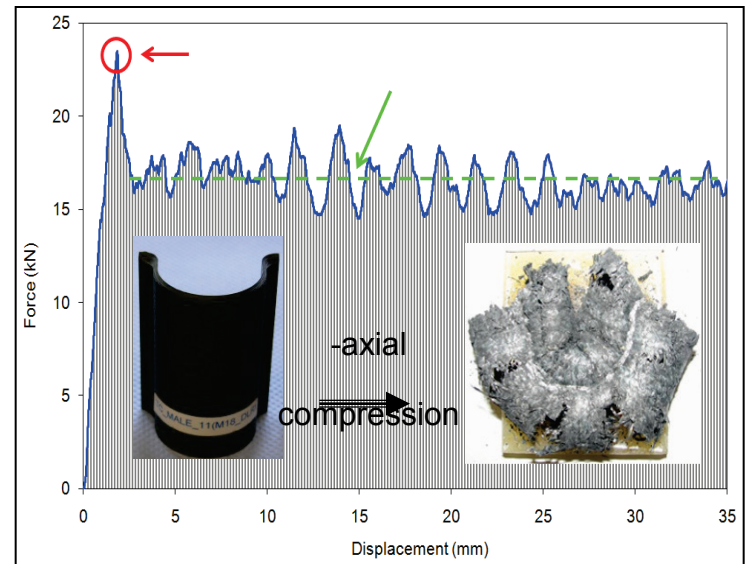
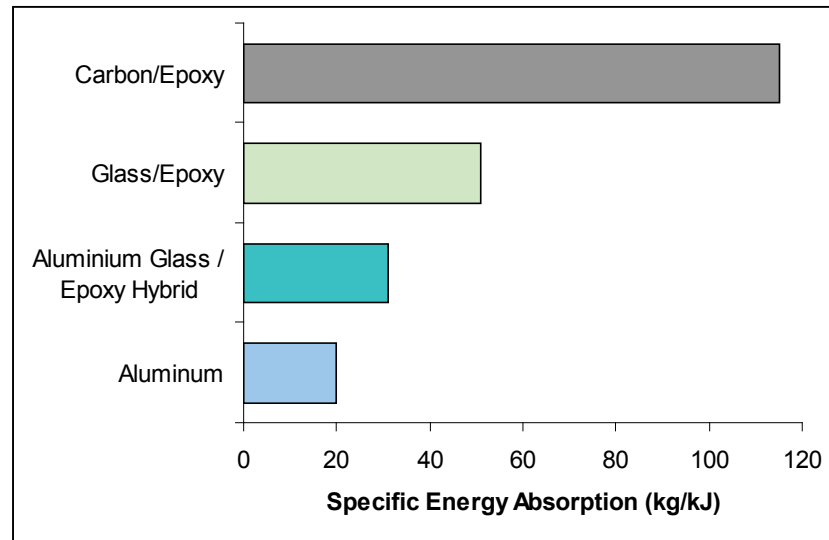
Quelle: Volkswagen



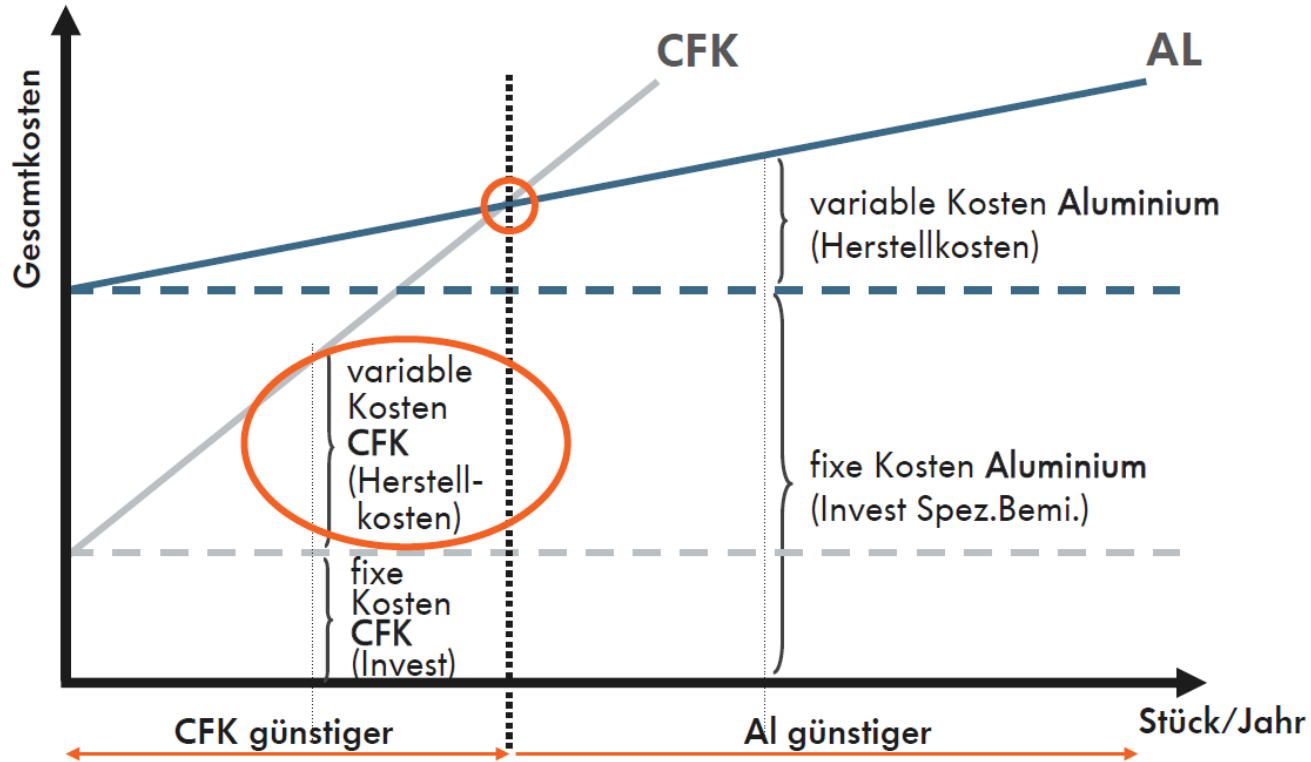
Polymer Composite Materialien

Energieabsorption im Crashfall

- Spezifische Energie und Crushing von Polymer Composites



CFK-Kostenvergleich zu Aluminium (AL) schematisiert



→ CFK-Bauteile aufgrund hoher variabler Kosten bei hohen Stückzahlen unwirtschaftlich.



Was darf Leichtbau kosten?

Tolerierbare Mehrkosten für eine Gewichtsreduzierung um 1kg (Größenordnungen)

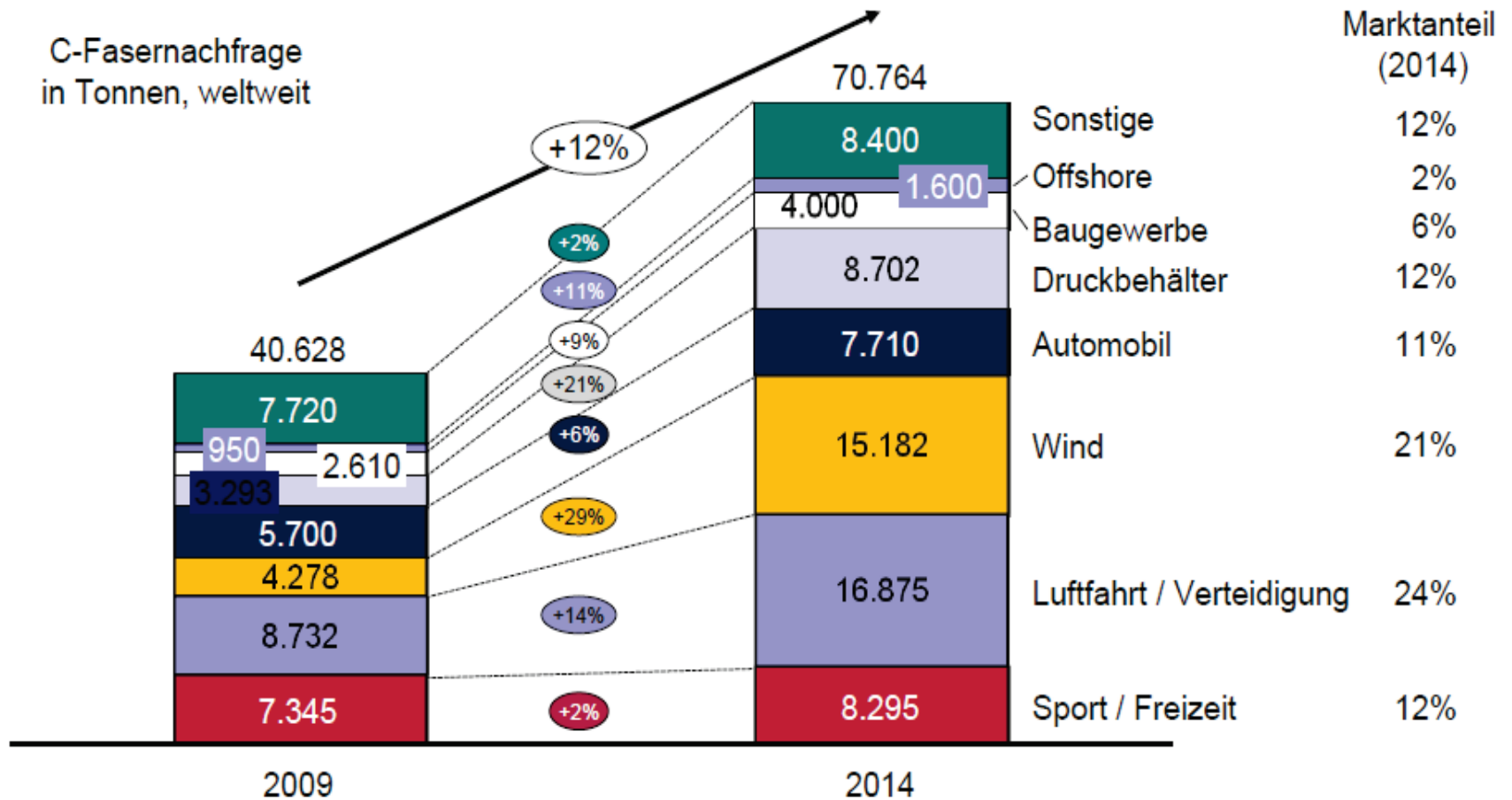
	Mehrkosten € / kg	Stückzahl / Jahr
Raumfahrt	5.000	10^0
Großraumflugzeug	500	10^2
Automobil	5	$10^4 - 10^6$

Quelle Voith/L. Herbeck



Carbonfaser-Einsatz in Branchen

C-Fasernachfrage
in Tonnen, weltweit

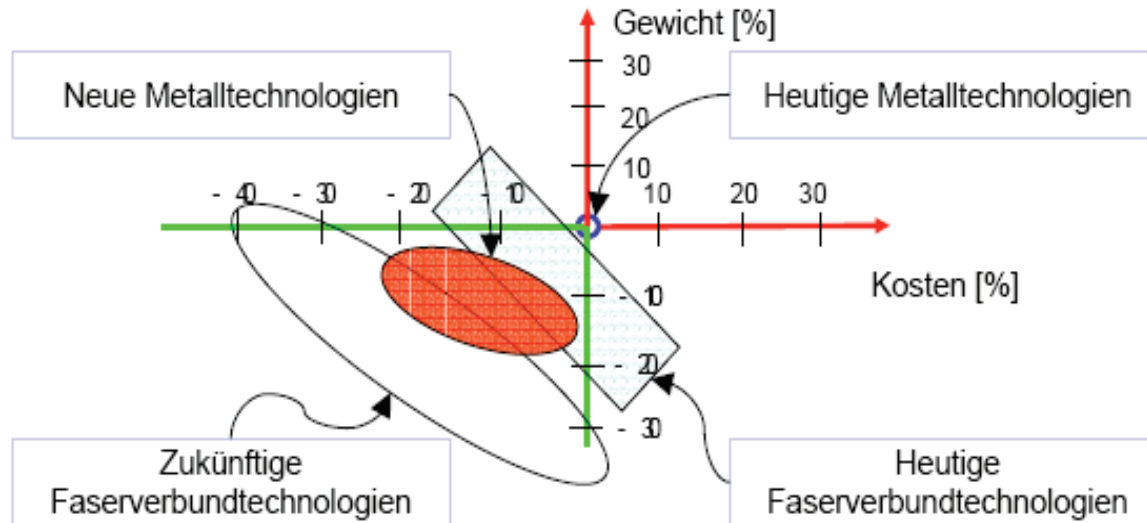


Wind, Luffahrt und Automobil dominierende Märkte für C-Fasern

Quellen: Toray, Marktbericht "The Carbon Fiber Industry"



Globale Technologie Trends bei CFK-Strukturen



Ziele: Gewichtsreduktion → Kostenreduktion → Schonung der Ressourcen

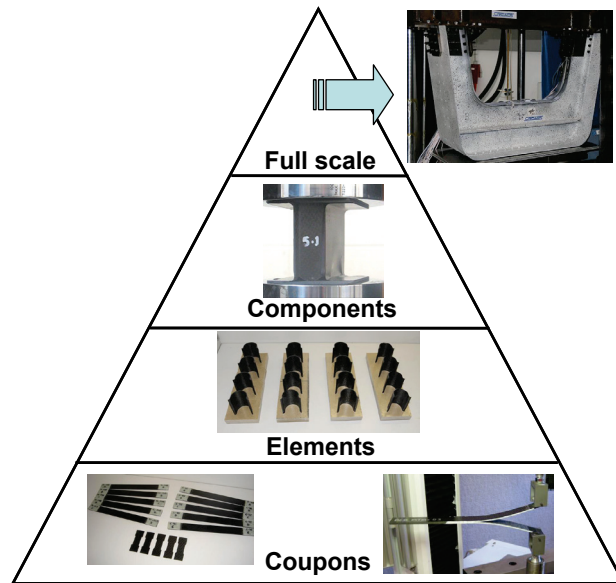
- Gewichtsreduktion
- Kostenreduktion
- Vibrations- und Schallminderung
- Erhöhung der Sicherheit bei Crash, Impact und Feuer



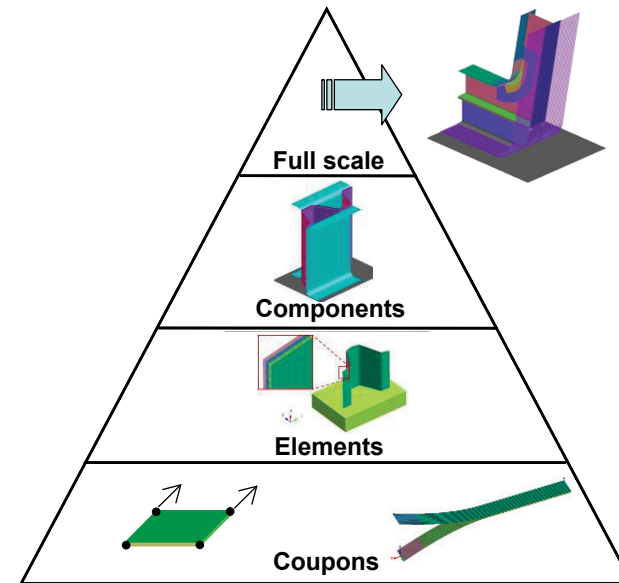
Entwicklungsmethodik

Experiment und Simulation

“Building Block Approaches” – Test und Simulations Pyramiden



Experimenteller “Building Block”



Simulations Building Block
(virtueller Ansatz)



Bedeutung des Recyclings für CFK-Abfälle

1t Carbonfasern

■ kostet > 10.000 €

und benötigt für die Herstellung:

■ bis zu 700 GJ^[1] oder

■ 194.444 kWh

■ 31t CO₂ equivalent emissions



➤ Carbonfasern sind ein höchst werthaltiges Material!

➤ Carbonfasern bergen sehr viel Energie in sich!

➔ Erhalt, Rückgewinnung und Wiedereinsatz der Fasern, auch aus dem EoL-Bauteil!!

[1] vgl. S. Das, Life cycle assessment of carbon fibre-reinforced polymer composites. In: Int J Life Cycle Assess (2011) 16:268-282 (Oak Ridge National Laboratory, managed for United States Department of Energy)

Quelle: bifa



Übersicht Recyclinglösungen

• Verwertungswege in der praktischen Umsetzung

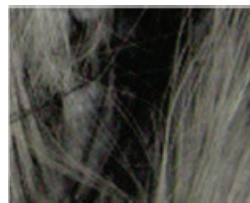
- Energetische Verwertung: ->GFK/CFK Verbrennungseigenschaften weniger günstig, Absatz im Zementwerk, erste Versuche Ende 80er: Ersetzt 30 kg Brennstoff /t Klinker, heute: CompoCycle
- Mechanisches Recycling
 - Bislang oft Zerkleinerung u. Zugabe zu kurzfaserverstärkten Kunststoffen und Füllstoff in z. B. BMC
- Umschmelzen / Umformen: für thermoplastische Compounds
- Freilegung der Fasern:
 - hohe Freiheitsgrade in der Anwendung des Rezyklates u. hohe Wertschöpfungspotenziale
 - Märkte für Rezyklate noch kaum entwickelt



Erfassung



Freilegung



Aufbereitung



Einsatz

Quelle: bifa



Lebenszyklusanalyse

Betrachtung aller Phasen notwendig

Rohstoffe



Produktion



Nutzung



Recycling



Quelle: Prof. Lehold/VW



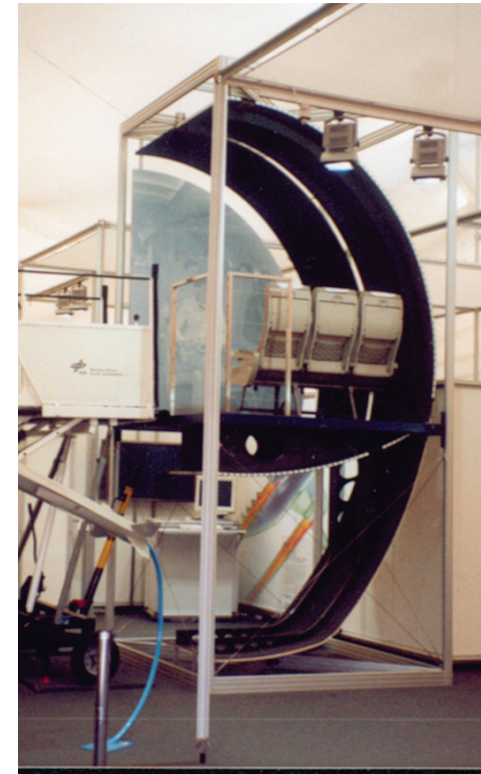
CFK im Transportflugzeug - DLR-Projekt „Schwarzer Rumpf - Gondelkonzept“



Referenzflugzeug

Quelle Airbus

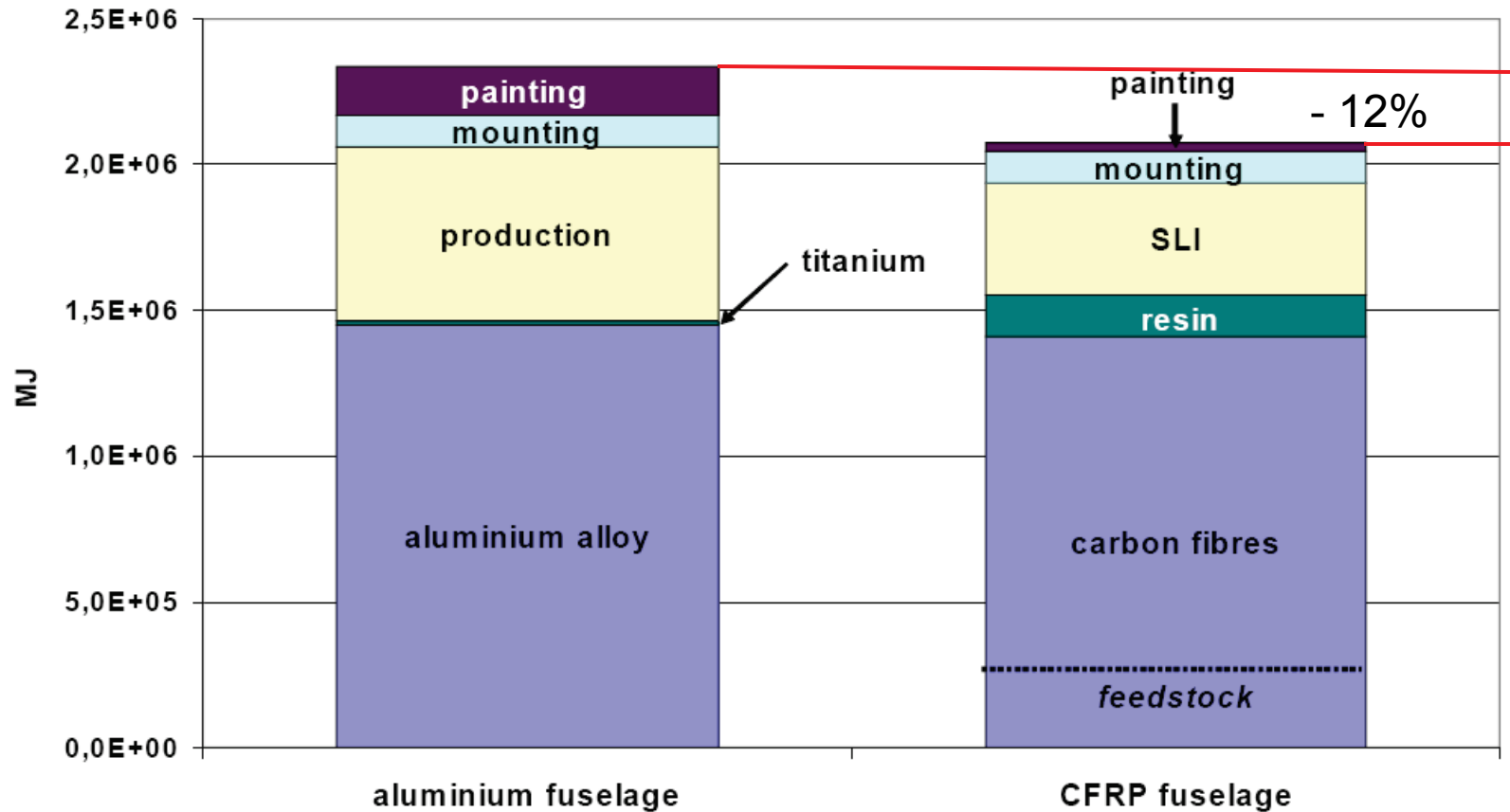
- CFK-Doppelschalenbauweise (Sandwich)
- Nur Kabine bedruckt, Gondel für Cargo
- Multiaxiallege und Harz-Infusionsverfahren (SLI und VARI)
- Multifunktionalität: Tragstruktur, Crash, Impact, Brandschutz, Wärme- und Schallisolation
- Massenersparnis Rumpf: -24%
- Spritersparnis und CO₂-Red. über Life Cycle: -4%



Halbsektion
„Schwarzer Rumpf“



Primary energy consumed for the production of the aluminium and CFRP fuselage



Source: FZK



Einsparpotenziale beim Transportflugzeug



Flugzeug- typ	Redu- zierung	Anzahl		Einsparung	
		Flugzeuge	Flüge	Menge	Einheit
A320 (73,5 to MTOW)	-10kg	1	1	1,75	Liter / Flug / Flugzeug
		1	1125 / Jahr	1.974	Liter / Jahr / Flugzeug
		3404	1125 / Jahr	6.718.875	Liter / Jahr

(Quelle: Airbus)

Nutzen:

- ☐ weniger Treibstoffverbrauch
- ☐ grössere Reichweite
- ☐ mehr Nutzlast

- ☑ bessere Umwelt-Bilanz
- ☑ höherer Passagierkomfort



Fallbeispiel

- Fahrzeugbremse aus Faserkeramik -



- Bremsscheibe aus Faserkeramik C/C-SiC
- Hergestellt im Liquid Silicon Infiltration Prozess (LSI)
- Industrieverision 50% weniger Masse
 - Spart Kraftstoff
 - Reduziert ungefederte Massen > bessere Fahrwerkfederung
- Geringer Abrieb
- Hohe Lebensdauer



Fallbeispiel: C/C-SiC Reibbeläge für Propellerbremse A400M

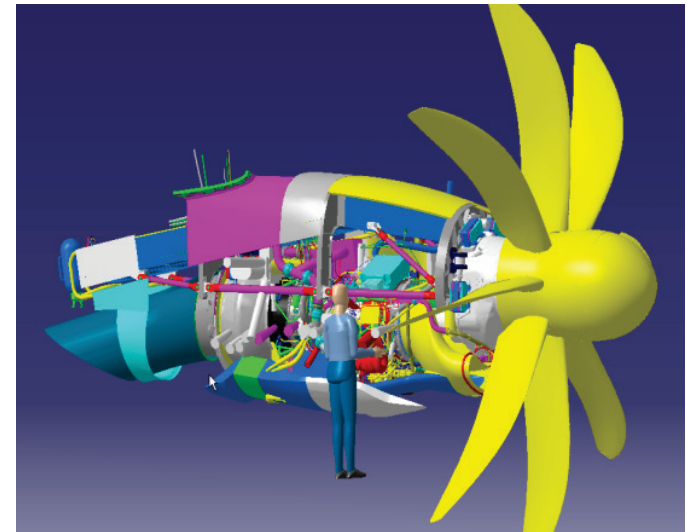
-Today:



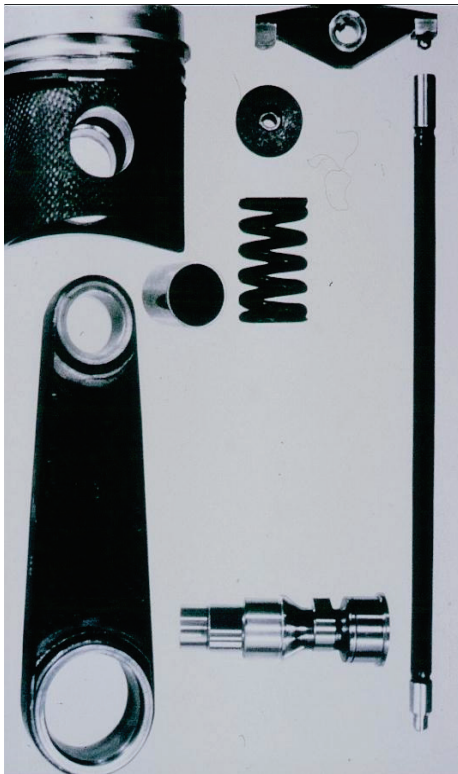
-Tomorrow:



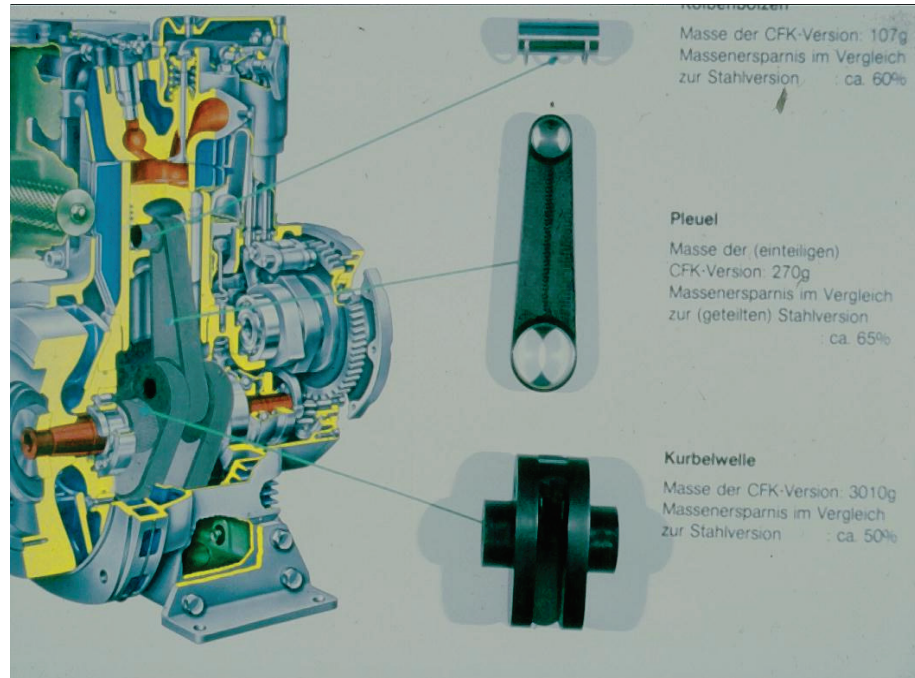
- Reibbeläge in Faserkeramik (C/C-SiC) hergestellt in LSI-Verfahren
- Grauguss und Sintermetalle halten thermischen Belastungen nicht Stand
- Hohe Reibwerte
- Hohe Verschleißbeständigkeit
- Serienproduktion ist angelaufen (Fa. Schunk)



Fallbeispiel: CFK Motorenteile



- Massenreduzierung von schnell oszillierenden Teilen > höhere Leistung
- CF- Rovings und –Gewebe mit Epoxy Novolack Matrix

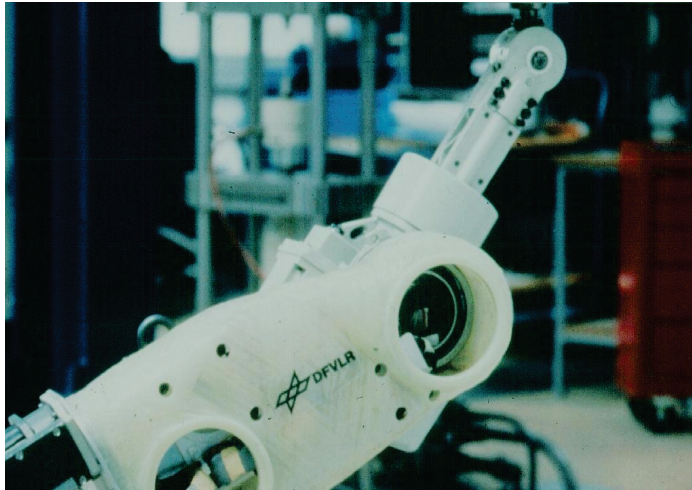


CFK -Teilmasse Massenreduzierung

• Bolzen	107 g	60%
• Pleuel	270 g	65%
• Kurbelwelle	3010 g	50%
• Ventilstange		30%
• Ventilhebel		53%



Fallbeispiel: FVK Robotik-Anwendungen

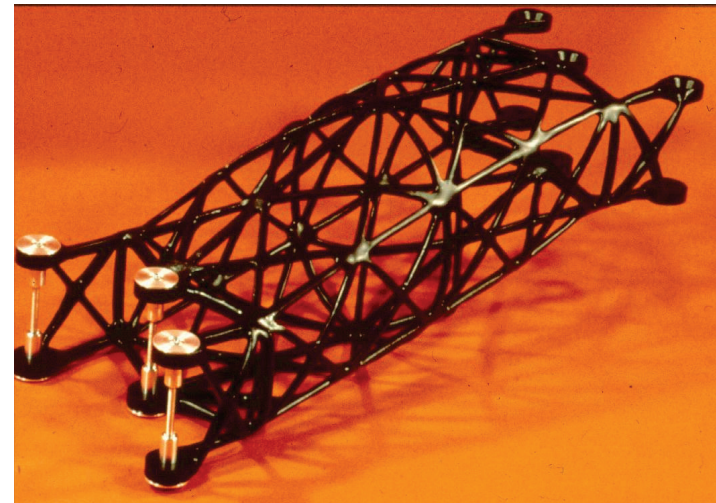


GFK-Roboterarm:

- Wickeltechnik mit Integration von Lagern,
> keine weitere Nachbearbeitung
- Wiederverwendbarer, segmentierter
Wickelkern

Vergleich mit Metall-Ausführung

- 65% Massenreduzierung
- > 13% höhere max. Beschleunigung
- > 34% höhere max. Nutzlast

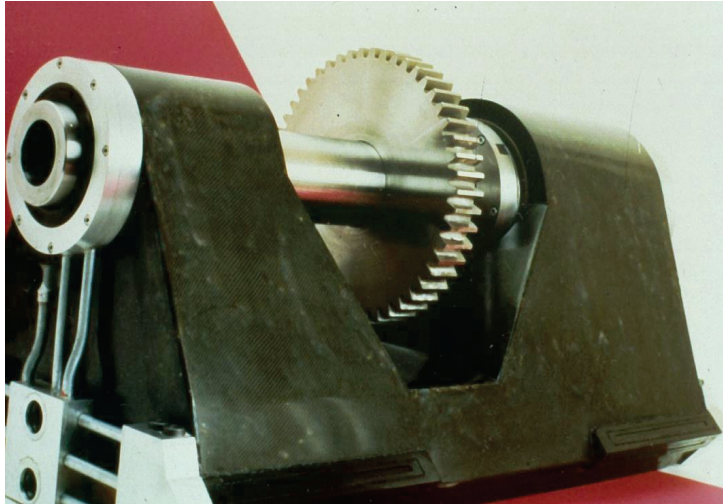


CFRP Manipulator Arm (ROTEX
Bodenexperiment, D2-Mission):

- Fachwerk in CFK-Rovingwicklung
- Masse: 212 g
- Versagenslast: 54 kg am Kragbalken
- Lagerabstand: 340 mm
- max Torsion: 123 Nm
- heute herstellbar in generativer
Fertigung mit Metallen

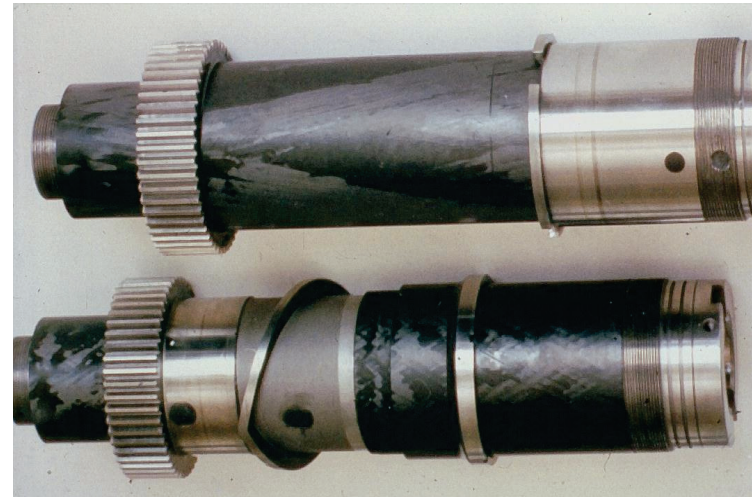


Fallbeispiel: FVK-Anwendungen im Maschinenbau



Schleifbock von Zahnrad- Schleifmaschine:

- Geringes Gewicht und hohe Steifigkeit reduzieren die Bearbeitungszeit
- Masse: 33 kg, Metallguss: 100 kg
- Frequenz: 3 Hz

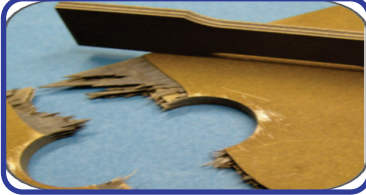


CFK Maschinen-Antriebswellen:

- Wickeltechnik mit Metall-Fittings
- nahezu null Wärmeausdehnung
- höhere dyn. Festigkeit kombiniert mit weniger Masse liefert höhere Drehzahlen

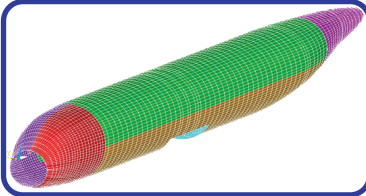


Ressourcensparende Handlungsfelder



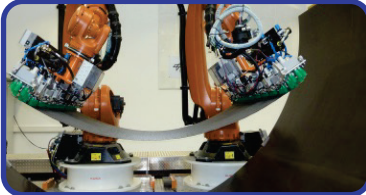
Material

- Neue Materialien: Metalle, Keramik, Fasern, Matrix, Nano
- Ziel: Kostenreduzierung
- Integration von Funktionen/Sensorik
- Bio-Composites



Design

- Topologische Optimierungen (mit allen Materialklassen)
- Virtuelles Design, Testen und Zertifizieren
- Funktionsintegration
- Prozesssimulation
- Hybridleichtbau



Herstellung

- Generative Herstellungsverfahren
- Kostenoptimierung der Prozesskette, Kostenmodelle
- Kurze Taktzeiten, besonders bei FKV
- Großserientauglich, besonders bei FKV, Produktionstechnologie FKV



Nachhaltigkeit

- Recyclierbarkeit aller Werkstoffe/Werkstoffkombinationen
- Life Cycle Management
- Material-Ressourcen sichern – einsparen - erhalten



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie

-Pfaffenwaldring 38 – 40

-70569 Stuttgart

-Dipl.-Ing. Christof Kindervater

-+49 (0)711 / 6862 - 280

-<http://www.dlr.de/bt>

-christof.kindervater@dlr.de

