

Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund: - Struktursimulation, Teil der Entwicklungs-Prozeßkette -

Vorspann: CCEV –Vorstellung und NAFEMS-Umfrage 2012

1. Ziele und Einführung

2. Auslegung (statisch, zyklisch, dynamisch Impakt)

3. Modellierung und Analyse

4. Nachweis, Zertifizierung Was ist für den Konstrukteur wichtig ?

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralf Cuntze

Früher : Leiter “Struktur- und Thermalanalyse “ bei MAN-Technologie Augsburg

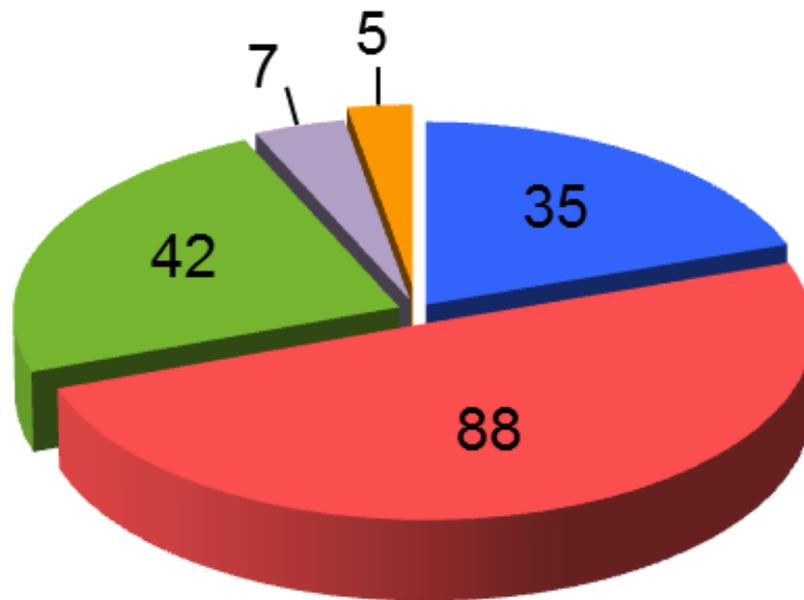
Ralf Cuntze, *vormals bei* MAN-Technologie AG

Leiter der Hauptabteilung 'Struktur- und Thermal-Analyse'

- 1964, Bau-Statiker
 - 1968, Dr.-Ing. in Strukturdynamik
 - 1978, Dr.-Ing. habil. in **Mechanik des Leichtbaus**
 - 1970 - 2004 bei MAN-Technologie: *Entwicklung + Bau*
ARIANE 1-5 Trägerraketen-Familie, Ariane-Transfer -Vehicle
ATV + Crew Rescue Vehicle X38 (für die Raumstation ISS),
Windenergieanlagen (Growian), Satellitenkomponenten,
Solaranlagen (Almeria), Gasultrazentrifugen, etc.....
-
- **Mitersteller des HSB** (*AIRBUS-D Struktur-Handbuch, seit 1972*) und
von ESA/ESTEC- Handbüchern und Standards (seit 1980)
 - **seit 1980 Gutachter für BMFT, BMBF, DFG**
 - **Obmann der VDI Richtlinie 2014** "Entwicklung von Bauteilen aus
Faser-Kunststoff-Verbund, Teil 3 Berechnungen"
 - **Gewinner World-Wide-Failure-Exercise I - Wettbewerb über**
Versagenskriterien für Laminate aus unidirektionalen Schichten.

Das Kompetenznetzwerk

Carbon Composites e.V. (CCeV)



Mitgliederstruktur

- Forschungseinrichtungen
- KMU
- Großunternehmen
- Sonstige
- Assoziierte Mitglieder

177 Mitglieder / Stand vom 10.12.2012

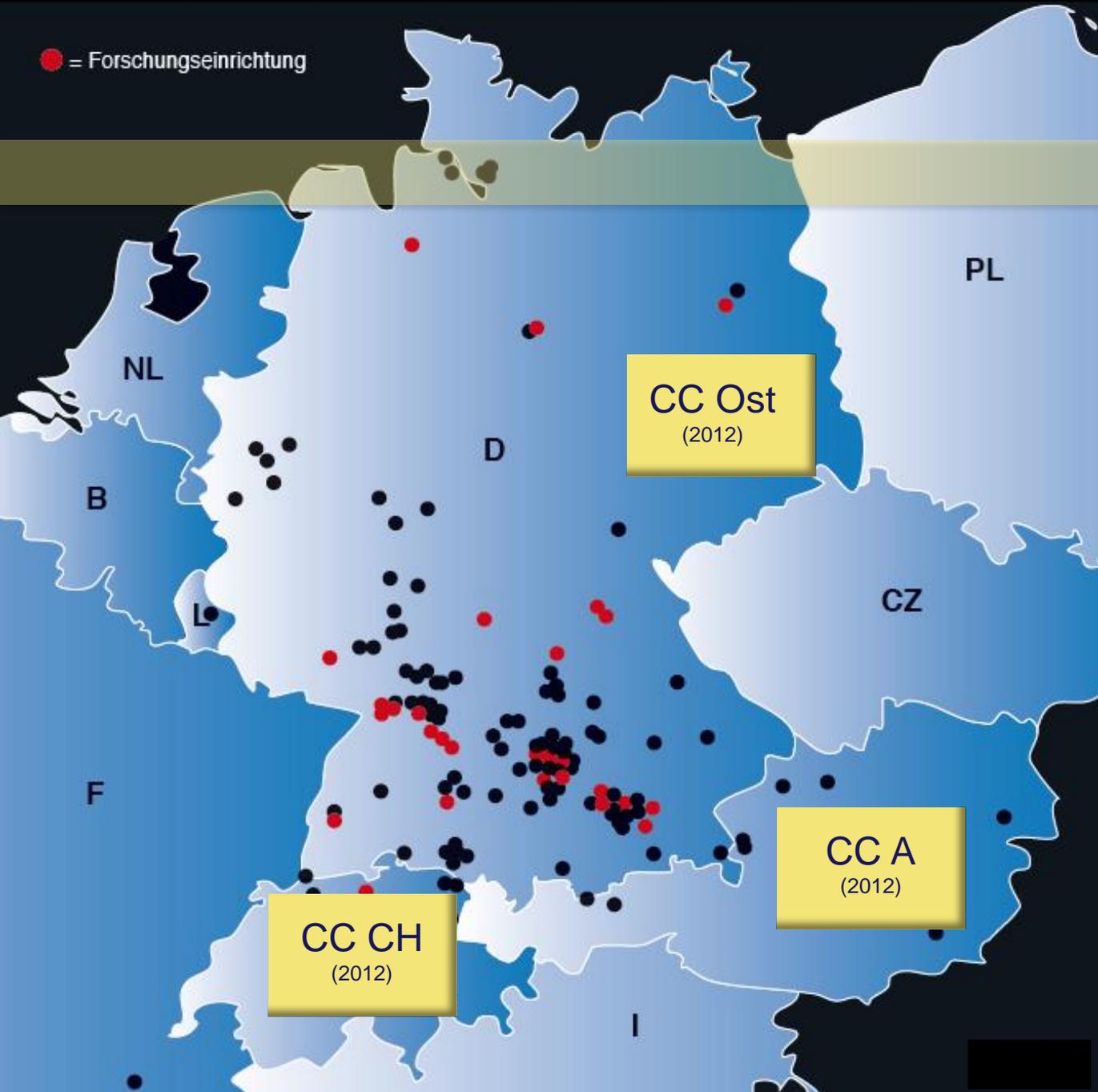
Leistungsspektrum des CCeV

- **Faserverstärkte Kunststoffe** (Gesamtverein und Regionalabteilungen)
- **Ceramic Composites** (Fachabteilung)
- **CC-Tudalit (faserverstärkter Beton)** (Fachabteilung)

- Technische Arbeitsgruppen
- Aus- und Weiterbildung, Nachwuchsförderung
- Gemeinschaftsstände bei Messen
- Veranstaltungen
- Gemeinschaftsprojekte

- Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Netzwerken
- Fach- und Marktinformationen / Außendarstellung / Marketing / Lobbyarbeit
- Weiterentwicklung der Technologieentwicklungs-Infrastruktur

● = Forschungseinrichtung



CARBON COMPOSITES

Regionalabteilungen

Clusterabteilung



(2012)

Fachabteilungen



(2008)

CCEV Abteilungen
Stand: November 2012

**Faser-Verstärkte Kunststoffe (FVK) nicht Faser-Verbund-Kunststoff
oder auch Faser-Kunststoff-Verbund (FKV)
ist eigentlich keine so neue Technologie mehr.**

- Seit mehr als 50 Jahren Segelflugzeuge und Boote aus Glas-Faserverstärktem-Kunststoff (GFK).
- In neuerer Zeit werden mehr und mehr Bauteile aus FVK hergestellt, wobei der teure Carbon-Faserverstärkter-Kunststoff (CFK) zunehmenden Anteil erfährt: Sportgeräte, Automobilbauteile, Hubschrauber, Windkraftrotorblätter, und langsam auch im Bauwesen (Korrosion der Stahlbewehrung, schnelle Reparatur von Dächern etc.).

Treiber: CO2-Ersparnis durch Verringerung der Masse.

- * **Entwicklung der theoretischen Erkenntnisse: *Nicht sehr ziel-konsequent weiter betrieben. Dies gilt speziell für die Erfassung des Festigkeitsverhaltens ohne das - vor der benötigten Bauteil-Zulassung – zu viel teure Versuche gefahren werden müssten.***
- * **Praxisnahe, relative einfache Analyse-Werkzeuge sind gefragt, deren Input-Parameter gemessen werden können.**
- * **Die Modelle sollten eine physikalische Basis haben.**

Unterschiede Faser-Verstärkter-Kunststoff zu Metall

- * Metalle für übliche tragende Bauteile verhalten sich plastisch**
- * FVK verhält sich höchstens quasi-plastisch aufgrund der vielen Mikrorisse, die bei höherer Beanspruchung entstehen**

Was ist ein Werkstoff ?

Werkstoff-Definition

= Homogenisiertes Modell des betrachteten komplexen Materials oder der Materialkombination.

Variable bei Composites sind dabei :

Faser, Roving, Tape, Schichtwerkstoff, Laminataufbau, Textilarten.

*Bzgl. Definitionen: siehe
Glossary von Cuntze auf
CCeV-Website !*

Was ist ein Composite ?

Ein Werkstoff, in dem sich mehrere Komponenten wie Fasern, Metalle, Keramik, Glas, Polymere verbinden, um einen *Composite*-Werkstoff zu erhalten, der funktionell günstigere Eigenschaften hat als die einzelne Komponente.

Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) ist also nur eine Composite-Familie !

Was sind die wesentlichen Bausteine des Composite, mit Definition?

Matrix = Harz + Härter + Beschleuniger

Filamente: Einzelfaser.

Carbonfilament Durchmesser $< 3/10$ eines dünnen menschlichen Haares

Roving: Bündel aus Tausenden (k) von Filaments (Beispiel 50k-Roving)

Laminat: ‚Produkt‘, das aus zwei oder mehreren flächig miteinander verklebten Schichten besteht. Die Schichten können aus gleichen oder unterschiedlichen Materialien bestehen.

Delamination: Ablösung einzelner parallel übereinander liegender Schichten und damit Bruch zwischen den Schichten

Duroplast: Kunststoff, auch Duromer genannt, der nach seiner Aushärtung nicht mehr verformt werden kann.

Thermoplast: Kunststoff, der sich in einem bestimmten Temperaturbereich (thermo-plastisch) verformen lassen. Alleinstellungsmerkmal ist die Schweißbarkeit von Thermoplasten

Vorteile von CFK

- * Hohe Steifigkeit: Faser-Elastizitätsmodul, je nach Faser mehrfach so hoch wie beim Stahl. Vorteile reduzieren sich, wenn man mehrachsig auslegen muss
- * Hohe Festigkeit. Vergleich: doppelt so hoch wie Stahl. Vorteile halbieren sich, wenn man bi-axial auslegen muss (flächige Bauteile) Zweiachsig beansprucht bis zu 15% leichter und einachsig beansprucht bis zu 60% leichter als Aluminium, etwa 40% leichter als übliche Maschinenbau-Stähle
 - * Niedrige Dichte im Vergleich zu Metallen
 - * Korrosionsbeständigkeit, hohe chemische Beständigkeit
- * Gutes Dämpfungsverhalten (nicht der einzelnen UD-Schicht) ins Laminat 'designbar', damit z.B. Laufruhe durch Schwingungsdämpfung
 - * Fast keine Wärmedehnung in Faserrichtung
 - * Konstruierbare Eigenschaften des Laminates
- * Ausgezeichnete Ermüdungsfestigkeit falls Laminat 'faserdominiert' ausgelegt ist
 - * Durchlässigkeit für Röntgenstrahlung
- * Fasern sind elektrisch leitend, sie können auch als Heizung verwendet werden.

Was sind Hauptgründe Composites anstelle von Metallen zu verwenden?

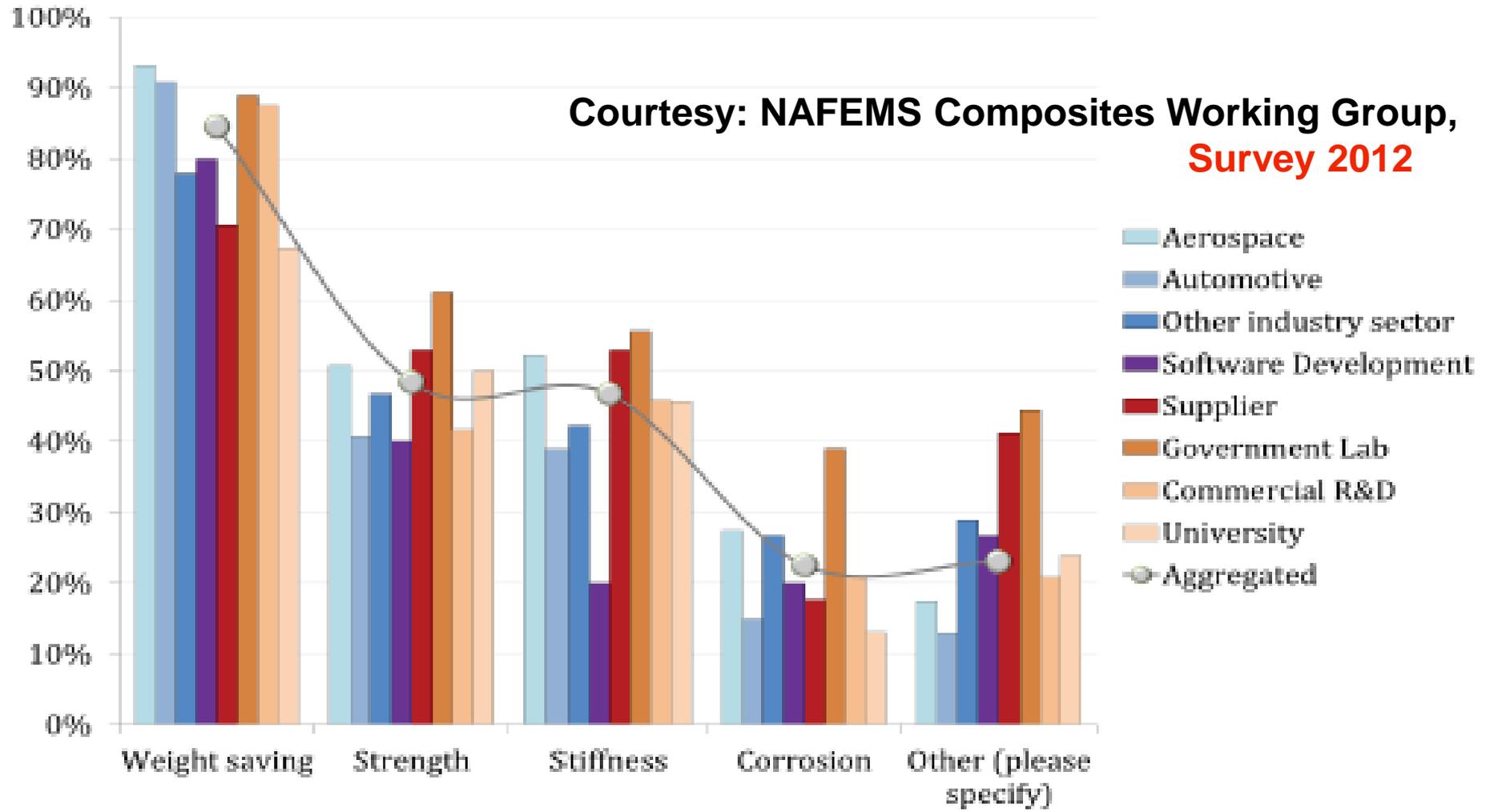


Figure 3: *What are the primary reasons your company uses composite materials instead of metals?*

Welche Compositetypen werden verwendet ?

Umfrage 2012

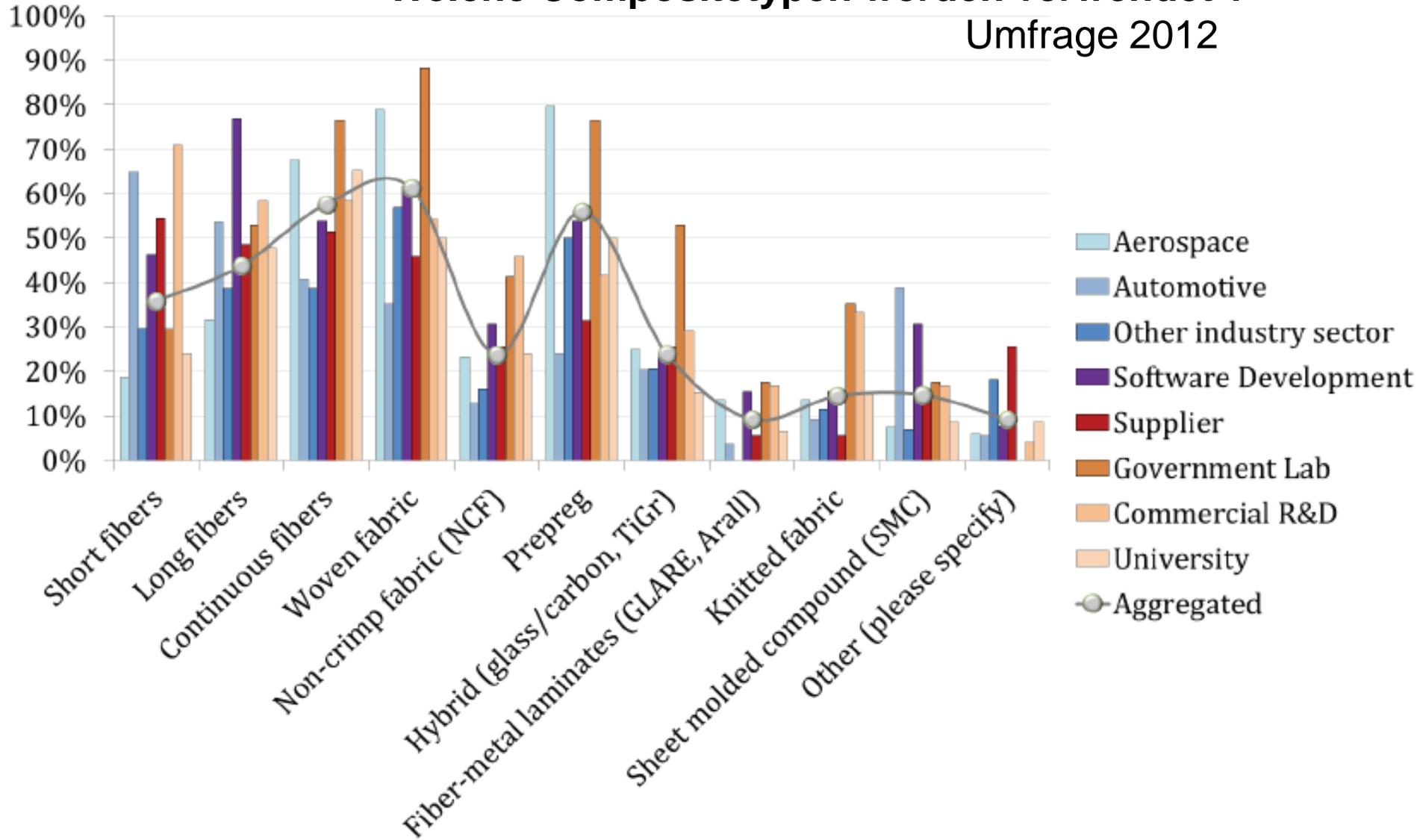


Figure 4: Which kind of composites do you use?

Welche Fasern werden verwendet ?

Umfrage 2012

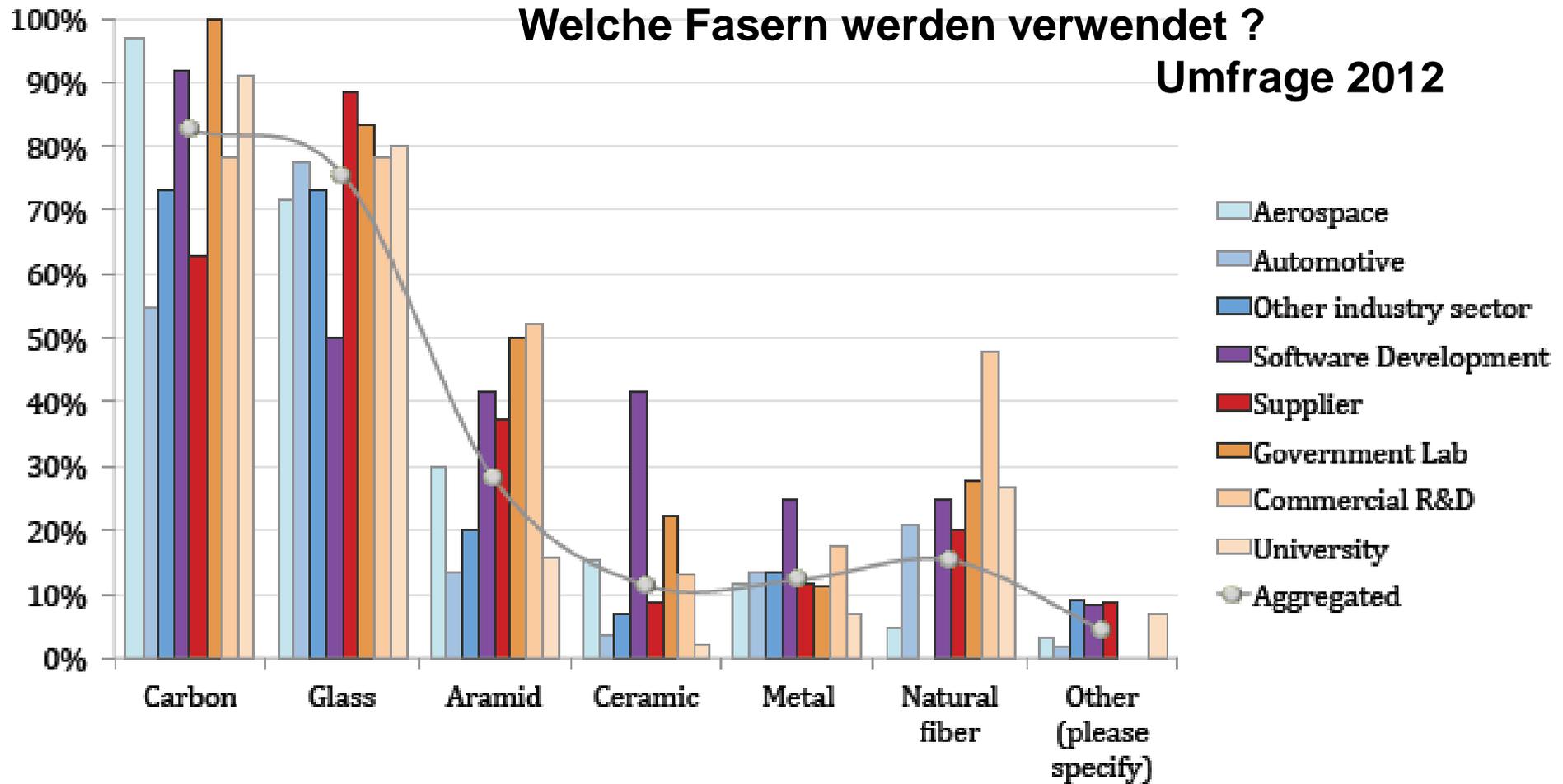


Figure 5: *What type of fiber material do you use?*

Welche Matrizes werden verwendet?

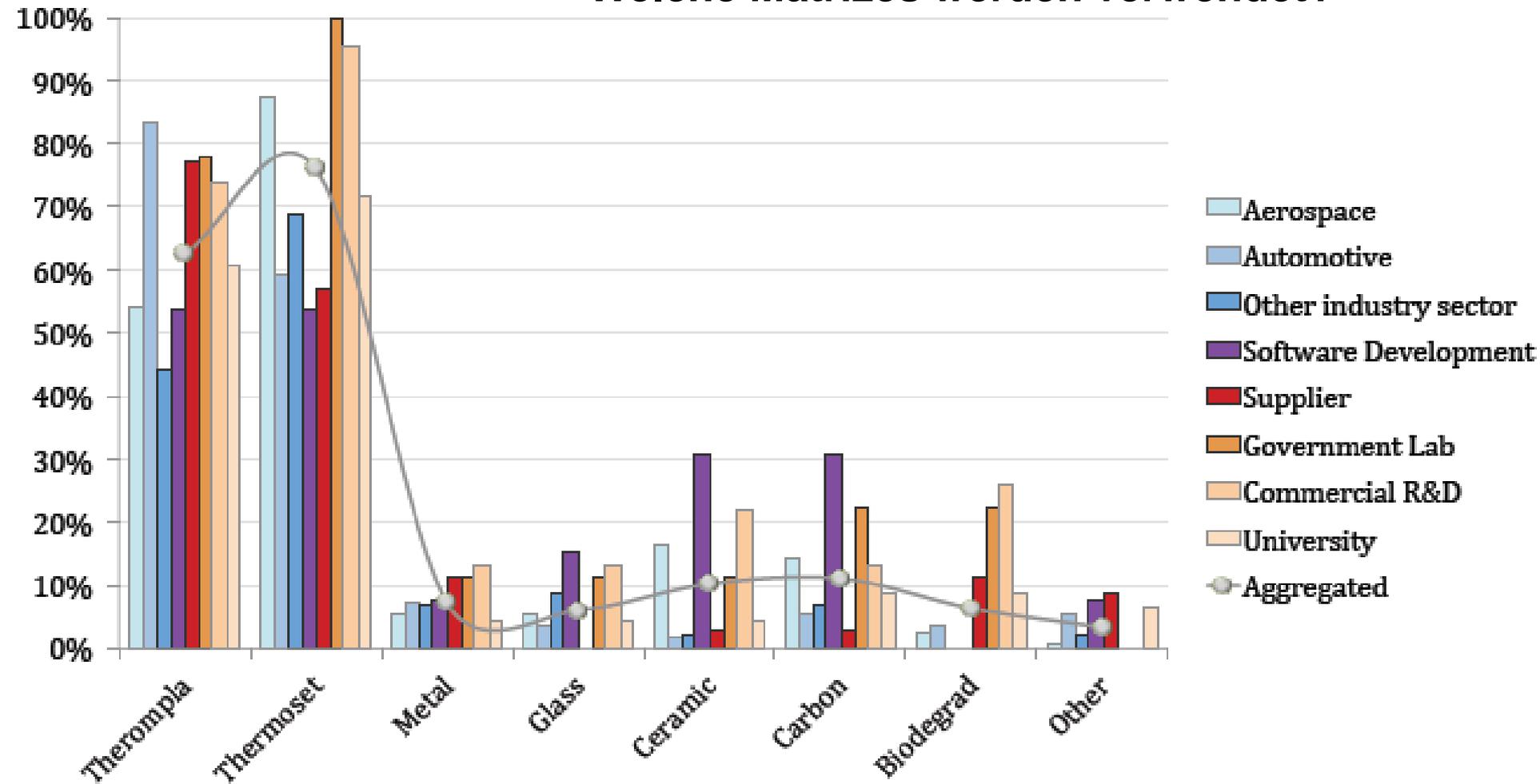
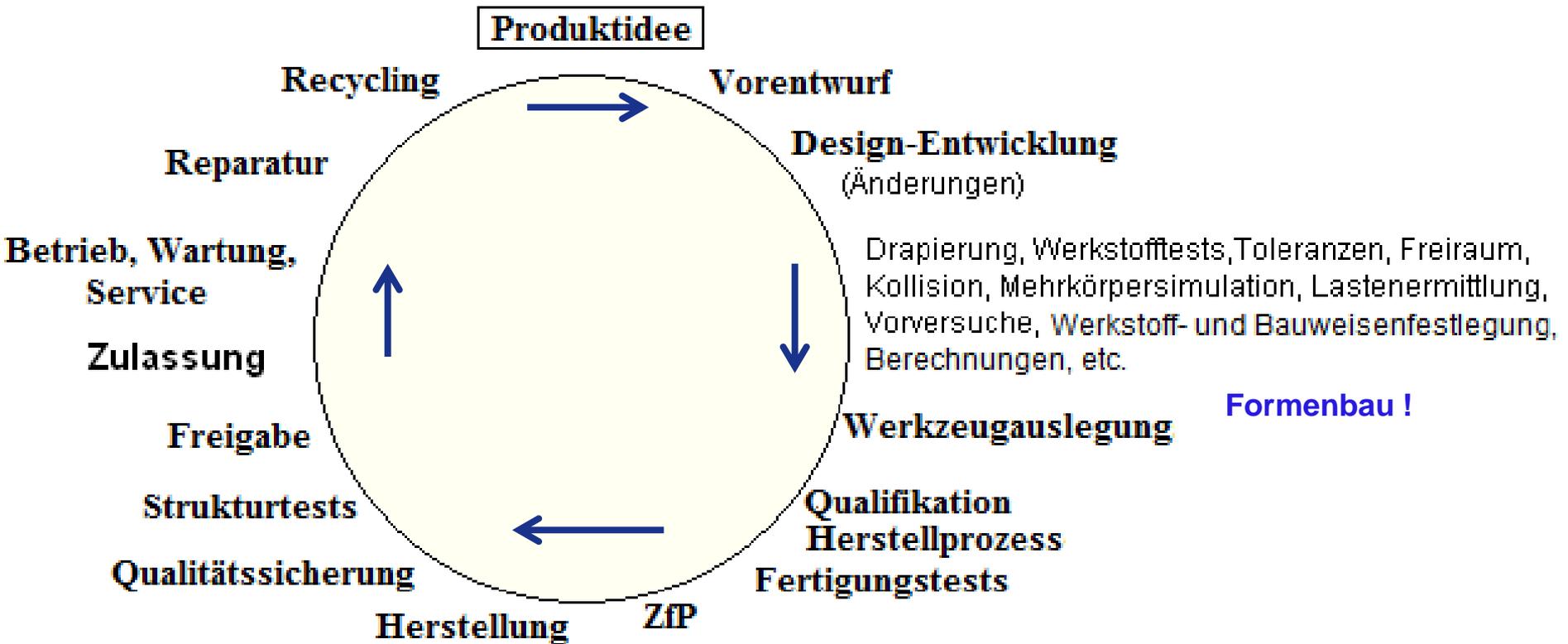


Figure 6: *What type of matrix material do you use?*

1 Ziele und Einführung, einige Definitionen

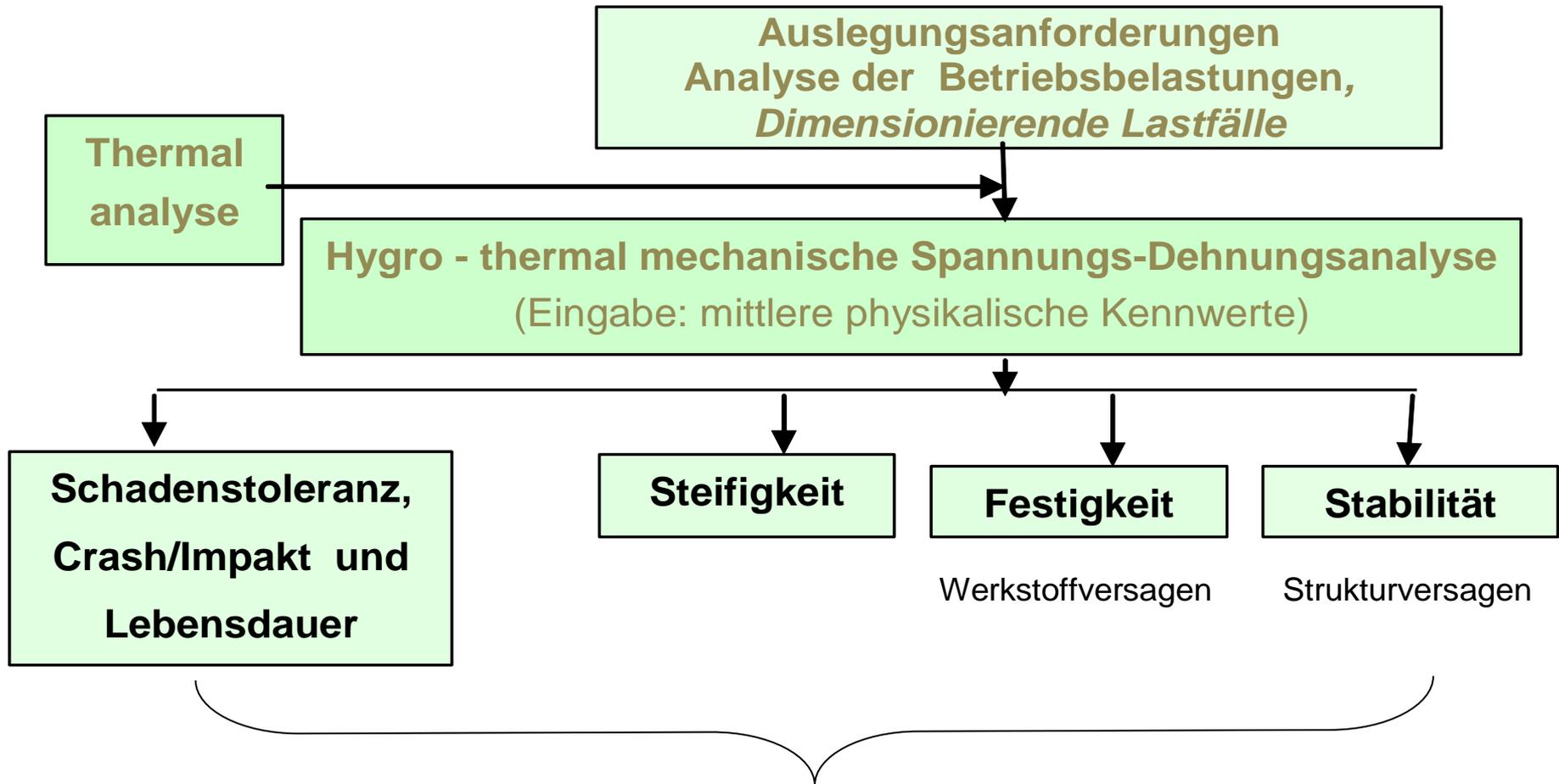
1.1 Engineering-Prozeßkette in der Bauteilentwicklung



Simulationsgebundene Aufgaben ?
Überall

- Ziele dabei:**
- * robuste Prozesse
 - * klare Verantwortlichkeiten
 - * durchgängiges Prozeßdatenmanagement
(Monitoring, Haltung, Weitergabe)

1.2 Flußdiagramm: Strukturanalyse und Nachweis



zu führende **statische, zyklische und dynamische Struktur-Nachweise**
bei Automobilbauteilen etc.

1.3 Variablen in der Herstellung Faser-Kunststoff-Verbund--Bauteilen

Werkstoff: Faserarten, Roving (1k - 50k), Matrix (Thermoplast, Duromer, Phenol, PU, EP)

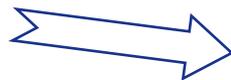
Polymers (crystalline and amorphous)		
Plastics		Elastomers
thermo-plastics	thermo-sets	
Acrylic, polycarbonat, polyimide, polypropylene	<u>epoxy</u> , phenolic, polyurethane, silicon	natural rubber, silicone rubber, polyurethan elastomer

Halbzeug: Gelege (NCF), Gewebe, Gewirke, Geflecht, Wicklung, 3D-Textilien

Pre-pregs, textile Halbzeuge, Profile und Platten als Strukturelemente, ..

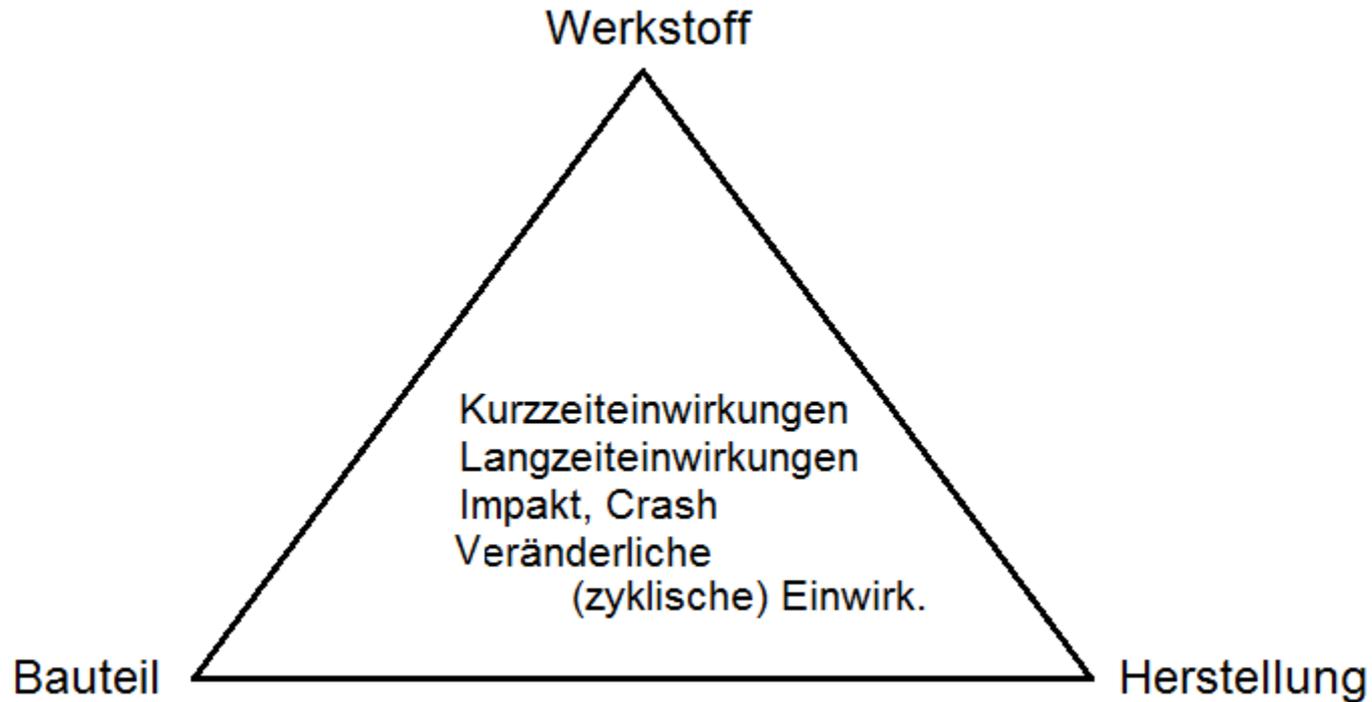
Bauteil-Herstellungsprozeß: Pre-pregging, Naßwickeln, RTM, etc.

Werkzeugauslegung, Infusion, Infiltration, Umformen, Aushärtungsprozeß, Imprägnieren mit und ohne Druck, Fließfront der Matrix, Räumliche Temperaturverteilung und konsequente Aushärtegradverteilung, Faserorientierungsverteilung, Reaktionskinetik, Tg-Wert, chemisches Schwinden (Harz), thermo-physikalisches Schrumpfen, Eigenspannungen (spring-in-Verwölben), **Prozeßsimulation** (Spritzgießen, Drapieren etc.), Drapieren,



... **d. b. Simulation ist immer dabei !**

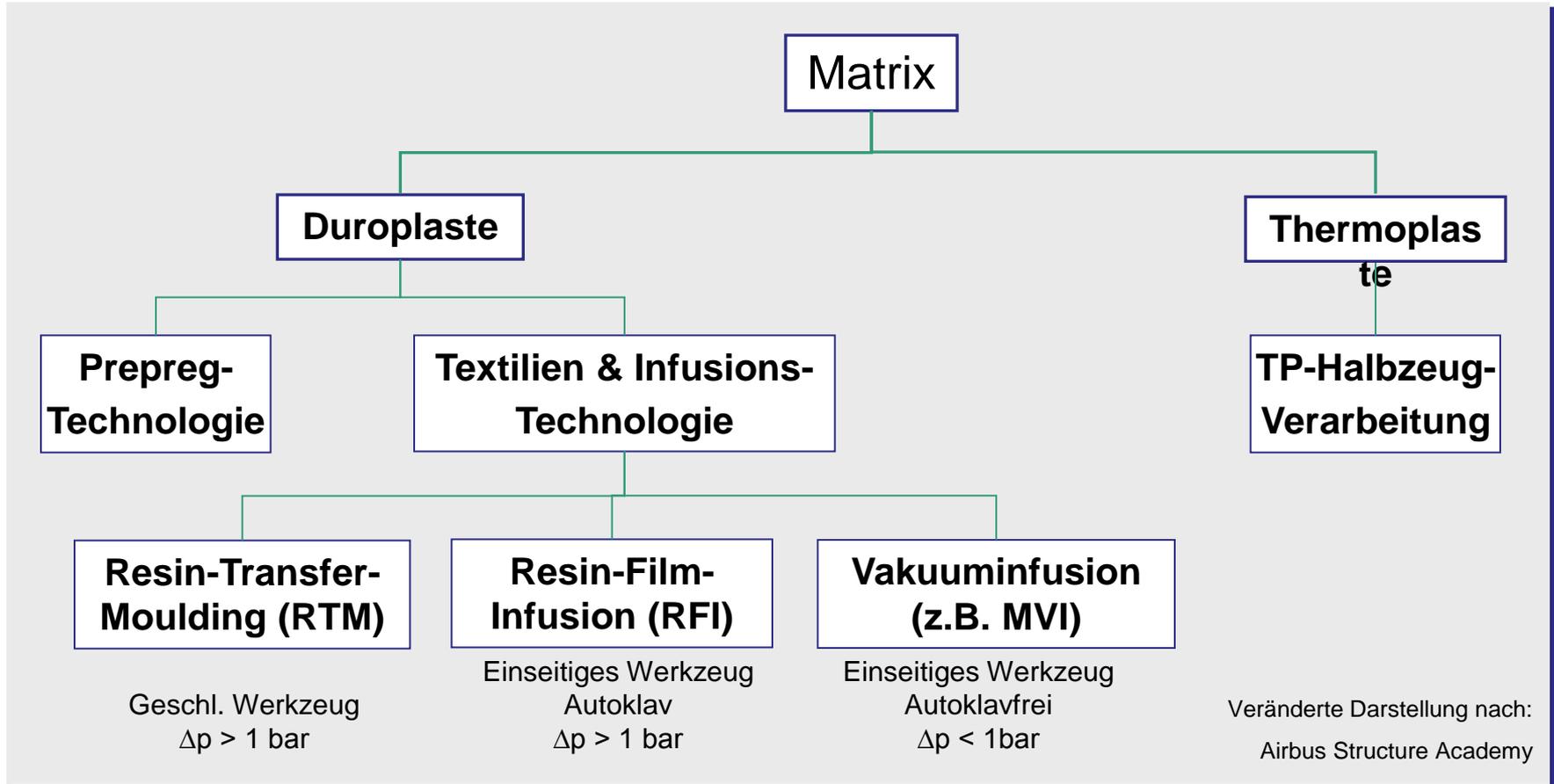
1.4 Spannungsbogen: Simulation = Hauptwerkzeug des Konstrukteurs



Gliederung der Fertigungsverfahren

Einteilung nach dem Kunststofftyp der Matrix

courtesy

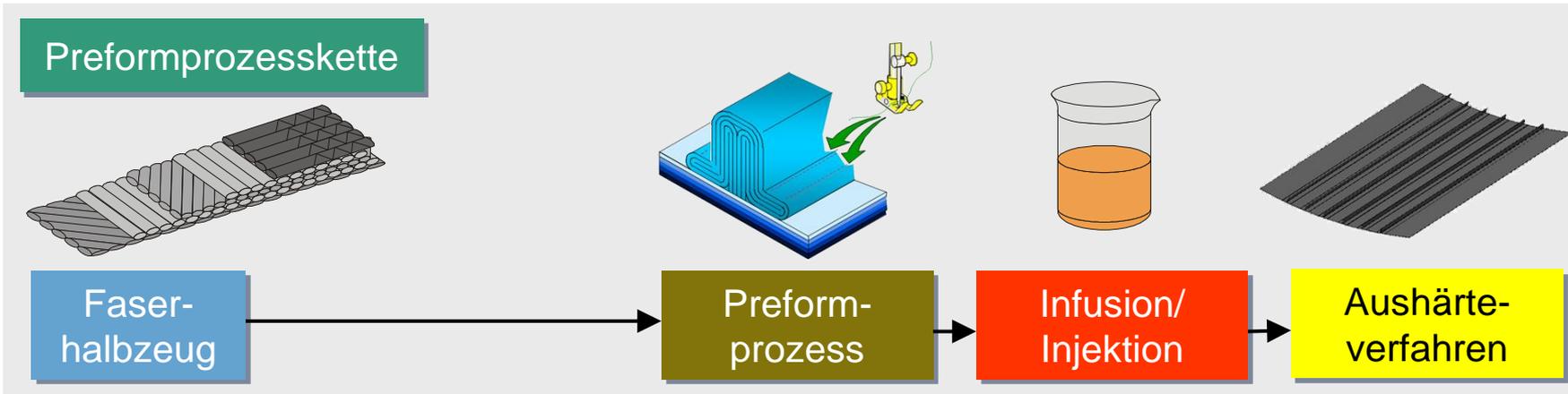
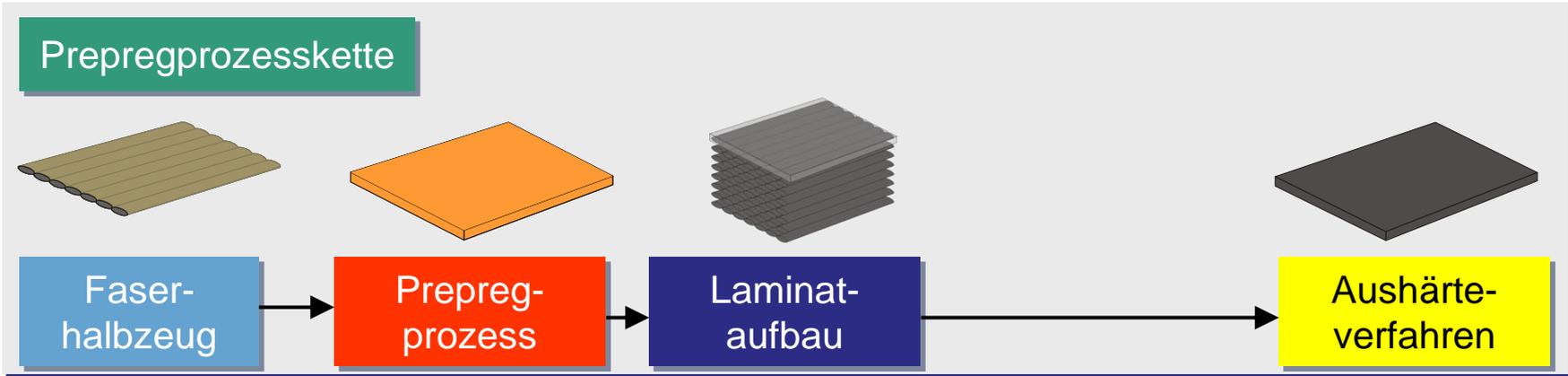


Für eine effiziente Verfahrensauswahl ist eine systematische Gliederung der Fertigungsverfahren für (Faser-)Verbundwerkstoffe erforderlich.

Gliederung der Fertigungsverfahren

courtesy

„Klassische“ Einteilung in Prepreg- und „nasstechnische“ Verfahren



Viele bedeutende Verfahren können nicht sinnvoll in diese Systematik eingegliedert werden (Thermoplast-Umformung, Kurzfaserspritzguss etc.)

2. Auslegung

2.1 Auf was ist zu achten ?

* **Design = Kompromiß** von *Design-to-Cost* mit *Design-to-Quality*.

Robustes Design hilft Änderungen, kleinere Fertigungsfehler auszubügeln und spart Kosten und Ärger !

Fertigungsgerechte Optimierung

• **Sinnvolle Funktionsintegration**

sollte der Treiber bei FVW-Anwendungen sein, um damit Kostenvorteile gegenüber höherem Werkstoffpreis zu holen !



2.2 Festlegungen

- Ermittlung von Tragstruktur mit Bauweise
- Werkstoffe, Festigkeit, 'Strength Design Allowables'
- Standards, Richtlinien
- Herstellungsart, Herstellformen, Fügeprozeß (kleben, nieten, ...)
- Lasteinleitung, Verbindungen
- Zerstörungsfreie Prüfverfahren
- Montage, Wartung, Reparaturverfahren.

ZIEL dabei ist Erfüllung von:

Belastbarkeit, Funktionssicherheit, Lebensdauer, Impakt, Vibration, Schallpegel, ..

unter Beachtung von:

- *Herstellverfahren und Bauweisen (bedingen sich bei FKV besonders !)*
- *Geeigneter Werkstoff an der richtigen Stelle des Bauteils !*

Wie ist die Faserorientierung im fertigen Bauteil?

2.3 Dimensionierende Lastfälle, Lastannahmen

Belastungen können vorgegeben sein: in

Richtlinien und Standards wie Automotive Standards, EN, ...

Daraus sind herzustellen ein

Minimal-Satz an Dimensionierenden Lastfällen.

- Dies unterstützt schnelle Entscheidungen bei 'Input'-Änderungen
- umgeht den Datenauswerte-Tod und
- gibt dem Ingenieur ein besseres Verständnis des Strukturverhaltens.

2.4 Sicherheitskonzept

- Das **Sicherheitskonzept** implementiert Zuverlässigkeit in die Konstruktion
- Vergrößert die Lasten (deterministische Variante)
- Schafft einen **Sicherheits-Abstand** der Last zum Last-Widerstand, Festigkeit.

Mittel: Sicherheitsfaktor j (*vorgegeben, nicht zu berechnen !*)

Dieser deckt ab:

- Unsicherheiten, kleine Ungenauigkeiten und Vereinfachungen bei Analyse
bzgl. Belastungen, Festigkeiten, Toleranzen, Geometrie, Elastizitätsgrößen, .

Dieser deckt nicht ab:

- fehlende Genauigkeit bei Modellierung, Berechnung, Test-Daten, Auswertung !

Beispiel,
warum wichtig 

2.5 Welche Werkstoffkennwerte benötigt man für die Analyse (Beispiel UD) ?

Beispiel: Transversal-isotroper UD-Werkstoff (1 = ||, 2 = ⊥)

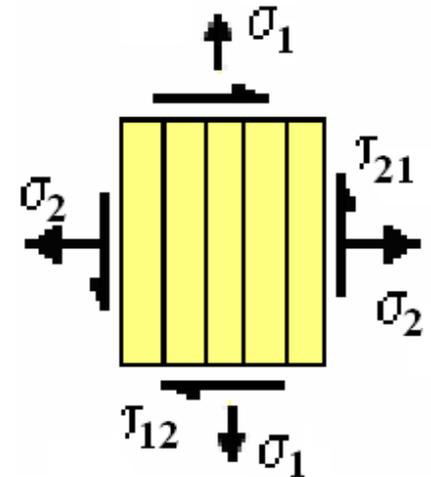
Festigkeit : $\{R\} = (R_{||}^t, R_{||}^c, R_{\perp}^t, R_{\perp}^c, R_{\perp||})^T$

Wärmeausdehnung CTE: $\alpha_{T||}, \alpha_{T\perp}$

Feuchteausdehnung CME: $\alpha_{M||}, \alpha_{M\perp}$

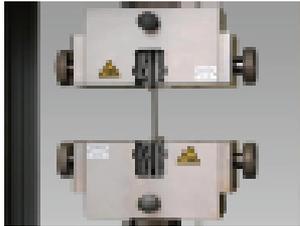
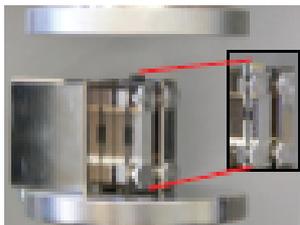
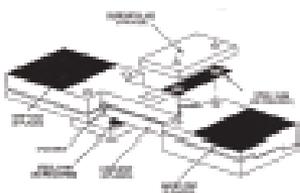
Elastizitätsgrößen : $E_{||}, E_{\perp}, G_{||\perp}, \nu_{\perp||},$

etc. (und $\nu_{\perp\perp}$, falls 3D)



Dazu Messungen mit **Teststandards** notwendig.

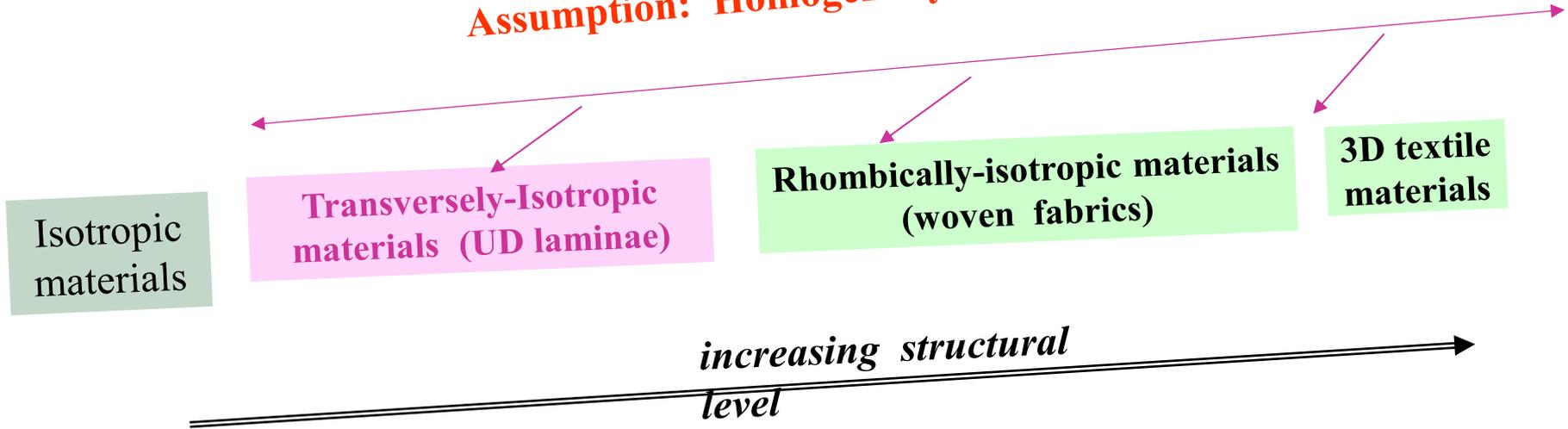
*Ein solcher Standard ist lediglich eine 'Vereinbarung',
damit man vergleichbare Werkstoffkennwerte erhält !*

Prinzip	Prüfart	Normenbeispiele	Aussage
	Zugversuch	ASTM D 3039, EN 2581, EN 2597, ISO 527 Teil 4 und Teil 5, DIN 675378, Airbus AITM 1-0007, Boeing BSS 7320, SACMA SRM 4 und SRM 9 Für Filamentstränge: ASTM D 4018, ASTM D 3918, ISO 11588	Zugeigenschaften wie Zugmodul, Zugfestigkeit und Bruchdehnung, Poissonsche Zahl an flachen Probekörpern, Messungen an Filamentsträngen. Bei unidirektionalen Laminaten auch längs und quer zur Faserrichtung.
	Kerbzugversuch (open hole / bolted hole)	ASTM D 5786, ASTM D 6742, prEN 6035, Airbus AITM 1.0007	Beurteilung des Schädigungsmerkmals.
	Druckversuch mit stirnseitiger Krafteinleitung (end loading)	ASTM D 695 (modifiziert), prEN 2850, ISO 14126, AITM 1-0008, Boeing BSS 7260 - type III and IV	Druckmodul, Druckfestigkeit, Druckstauchung, Versagensart.
	Druckversuch mit flachseitiger Krafteinleitung (Shear loading / combined loading)	ASTM D 3410, ASTM D 6641, prEN 2850, ISO 14126, Airbus AITM 1-0008	Druckmodul, Druckfestigkeit, Druckstauchung, Versagensart Bei dieser Prüfmethodik werden die Spannungskonzentrationen an den Probenenden vermieden und die Führung des Probekörpers ist besser als bei
	Kerbdruckversuch (open hole / bolted hole)	ASTM D 6484, ASTM D 6742, prEN 6036, Airbus AITM 1-0008, Boeing BSS 7260 - Type 1	Beurteilung des Schädigungsmerkmals.
	Interlaminarer Scherversuch, Kurzbiegemethode	ISO 14130, ASTM D 2344, EN 2377, EN 2563	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit. Bei dieser Prüfmethode wirken starke Flächenpressungen an der

3. Modellierung und Analyse

3.1 Werkstoffmodellierung

Assumption: Homogeneity as far as possible



Homogenisierung zu einem Werkstoff = 'Verschmieren'

3.2 Modellierung des 'einfachen' UD-Werkstoffs

Eine Schicht = Lage eines Laminates, z.B. aus UD-Schichten = "Baustein"

- *Homogenisierung zu einem Werkstoff bringt Vorteile.*
- *Kenntnisse der Werkstoffsymmetrie nutzbar (Anzahl der Werkstoffdaten minimiert, Test-Kosten ebenfalls)*

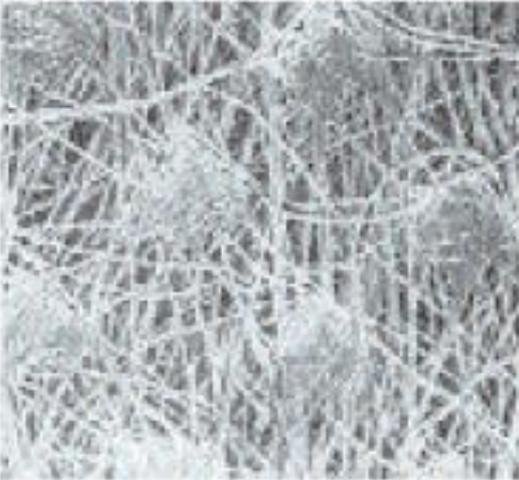
UD-Schicht ist als verschmierter Werkstoff modelliert

Werkstoff-Charakterisierung : $f(\mathbf{T}, \mathbf{M}, t, d\epsilon/dt)$

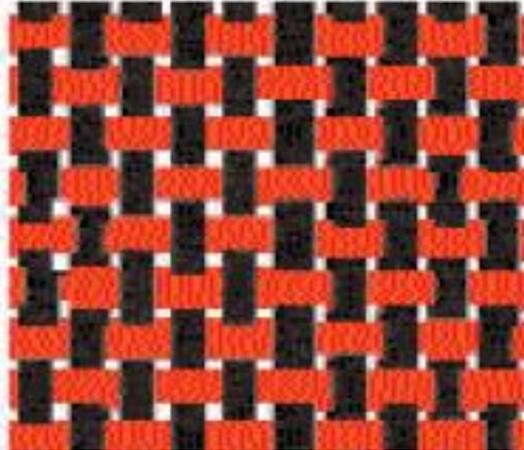
Inwieweit Textilien ingenieurmäßig modellierbar sind, hängt von ihrem Aufbau ab.

3.3 Einteilung der Textilien nach Grundtypen

Vlies



Gewebe

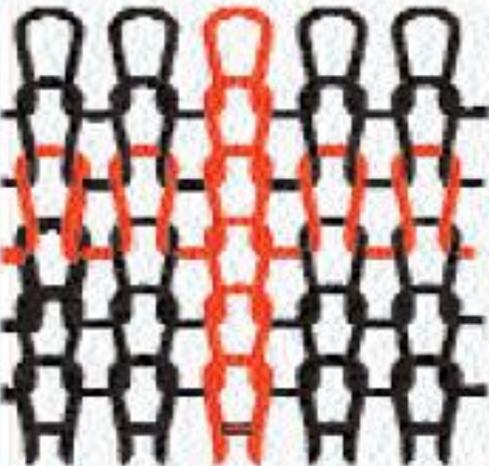


Geflecht



weben, stricken, flechten, nähen

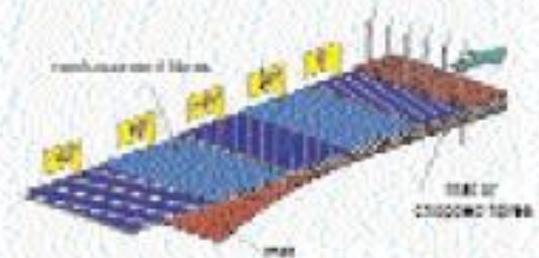
Gestrick



Gewirk



Gelege



Unter dem Oberbegriff Technische Textilien können diese aufgeteilt werden in

- 2D (vorzugsweise eben, planar): gute Eigenschaften in der Ebene
- 3D (tri-axial): gut bei Impakt (Delamination), schädigt aber 2D-Güte

Werkstoff: Schicht = Lage in einem Laminat

- 2D-Schicht relativ einfach modellierbar,
- 3D-Schicht aufwendig(falls z. B. Bindefäden, ..)

Berücksichtigung der Streuung der Konstruktionsparameter:

Tragsystem:

- Tragsystem aus Elementen: Balken, Platte, Schale
- Lastannahmen: (quasi-)statisch, zyklisch, Impact

Dimensionierende Lastfälle

- Randbedingungen

Beispiel

3.5 Ermüdungsverhalten heutiger Composites

Laminates, anfänglich frei von wesentlichen Defekten und ungekerbt :

- *zeigen sprödes Verhalten*
- *sind anfänglich sehr sensitiv bzgl. Defekten und Kerben*
- *zeigen dann gutmüdiges Ermüdungs-Verhalten bis Bruch*
- *die Zerrüttung ist bei zyklischer Beanspruchung verteilter als bei statische Beanspruchung.*

Annahmen: Falls Versagensmechanismen(-modi) gleich?

Dann auch die schädigungstreibenden Versagensparameter gleich!

- Übertragbarkeit statisches Versagen auf Ermüdung möglich,
Statische Festigkeit aber zu ersetzen durch *Ermüdungsfestigkeit*.

Meßbare Schädigungsgrößen:

Mikrorißdicke, Restfestigkeit, Reststeifigkeit

3.7 Was sind die benötigten zyklischen Eigenschaften?

- Wöhlerkurven $R = const = \sigma_{unter} / \sigma_{ober}$
- Schädigungsakkumulationshypothese
- Quantifizierte Schädigungs‘portionen‘
- Anwendbarkeit der statischen Festigkeitshypothesen, wenn die *statischen Festigkeitswerte* durch die *Restfestigkeitswerte für eine bestimmte Lebensdauer* ersetzt werden

**Für jeden dimensionierenden Lastfall ist nachzuweisen,
dass kein Grenzzustand erreicht ist.**

Solche **Grenzzustände** sind z.B.:

- (Quasi-)Fließbeginn, Bruch: Faserbruch (FB), Zwischenfaserbruch (ZfB)
- Überschreitung der erlaubten Leckrate
- Verformungsgrenzen etc. ..

Dabei ist im Automobilbereich zu untersuchen:

- statische Belastung (ruhende Maximalbeanspruchung)
- zyklische Belastung (Lebensdauer)
- dynamische Belastung (Impakt, Crash),
- Langzeitbelastung (Kriechen).

4.2 Input bei Strukturanalyse und Nachweis

- Die beste Vorhersage des *mittleren* Bauteilverhaltens gelingt mit '*Mittelwerten*'
- Je nach Anforderung beim Nachweis:
mittlere oder *obere* oder *untere* Werkstoffwerte einzusetzen.

4.4 Statische Festigkeit, Bruchlastnachweis

Nachweis, daß z. B. die Rechnerische Bruchlast $DUL = j_{ult} \cdot \text{Auslegungslast}$
gerade noch nicht zum Bruch führt :

durch positive Sicherheitsmarge (Margin of Safety)

$$MoS = (\text{vorhergesagte Bruchlast} / DUL) - 1 > 0$$

Zu berücksichtigen beim Nachweis:

Eigenspannungen aus Aushärtung, Schrumpfen, Montage, etc.

4.5 Betriebsfestigkeit (zyklisch)

Derzeit ist noch keine Lebensdauervorhersage-Methode vorhanden,
die die Schädigungsentwicklung in UD-Laminaten
allgemein berechnen läßt auf Basis des

Bausteins *‘In das Laminat eingebettete UD-Schicht (in-situ)’*

$$MoS_{Life} = (\text{vorhersagte Lebensdauer}) / (j_{Life} \cdot \text{Auslegungslebensdauer}) - 1 > 0 .$$

**Derzeitige Sicht aufgrund von Erfahrung: *unter einer
„ Statischen Auslegungsgrenzdehnung von ca. 0.3%
besteht für multi-axiale Lamine keine Ermüdungsgefahr“.***

Globale Instabilität der Gesamtstruktur

Lokale Instabilitäten wie bei einer Sandwichhaut (wrinkling, dimpling, ...)

Beachtung von Imperfektionen:

- Toleranzen
- Herstellfehler
- Lagerung, Auflagerung

ZfP: *Werkzeuge detektieren den potentiellen Schaden bzgl.*

- Lage
- Tiefenlage
- Größe
- Form

Festigkeitsingenieur bewertet, ob es ein technischer Schaden ist.

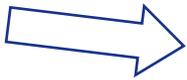
Schaden = Akkumulation von **Schädigungen** oder ein Ereignis (Impakt)
= risikorelevantes Ergebnis eines Schädigungsprozesses.

Strukturtests:

- Zumeist zerstörende Belastungstests
- Dichtigkeit
- Elektrische Leitfähigkeit
- Eigenfrequenz

4.8 Unterlagen für Zertifizierung / Zulassung

- Mit Test-Standards erzeugte Werkstoffkennwerte, Design Allowables
- Rechnerische Nachweisdokumente (anerkannte Methoden)
- Strukturtest-Dokumente inkl. 'Kalibrierung' der Analyse
- Qualifizierter Herstellprozeß
- Qualitätssicherungs-Prozeß inkl. ZfP-Verfahren



'Compliance-Dokumente' vorhanden = ZIEL



**Nur wenn alle Disziplinen richtig zusammenarbeiten
gibt es für die Composite-Sache den richtigen Auftrieb
und Bauteilzulassung sowie das große Ziel
Taktzeitverkürzung werden erreicht !**