

# **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

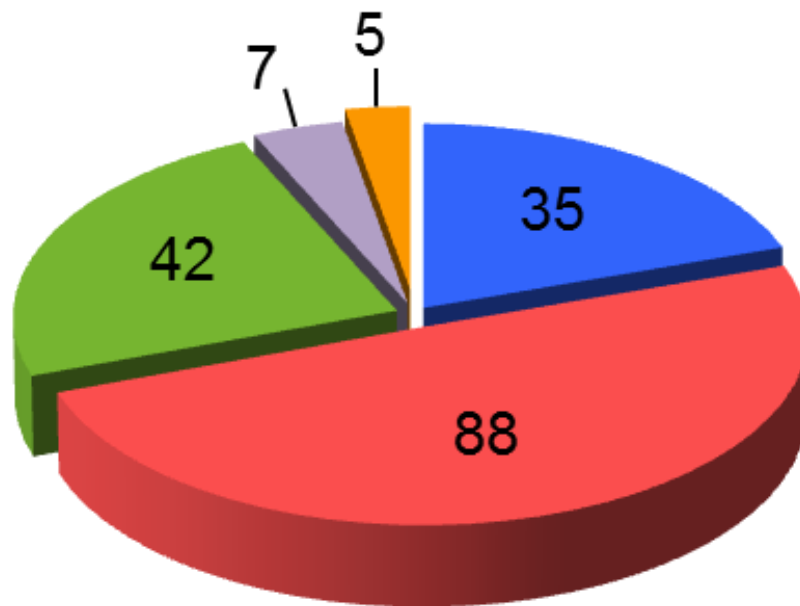
## Leiter der Hauptabteilung 'Struktur- und Thermal-Analyse'

---

- 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

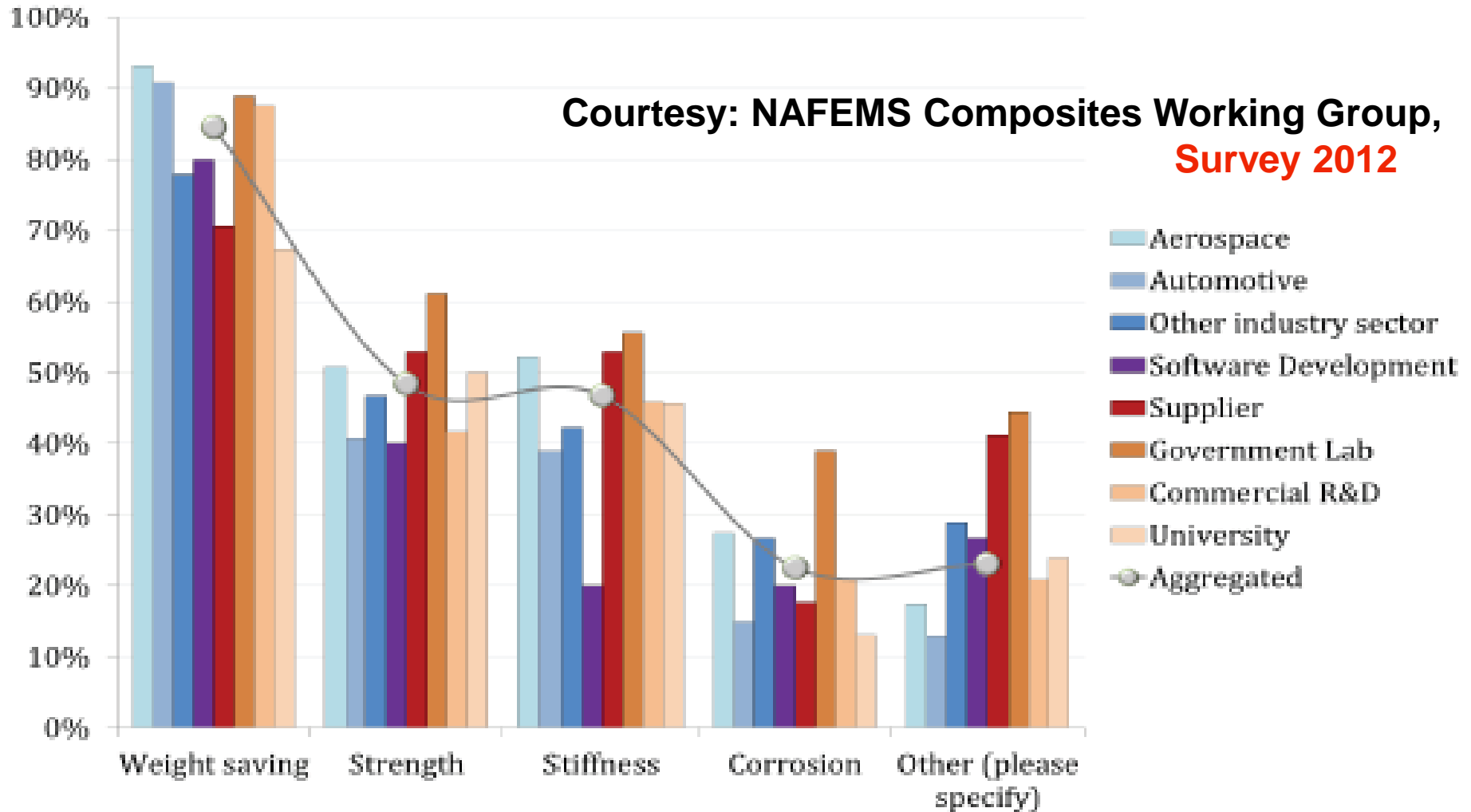
Duroplast: Kunststoff, auch Duromer genannt, der nach seiner Aushärtung nicht mehr verformt werden kann.

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

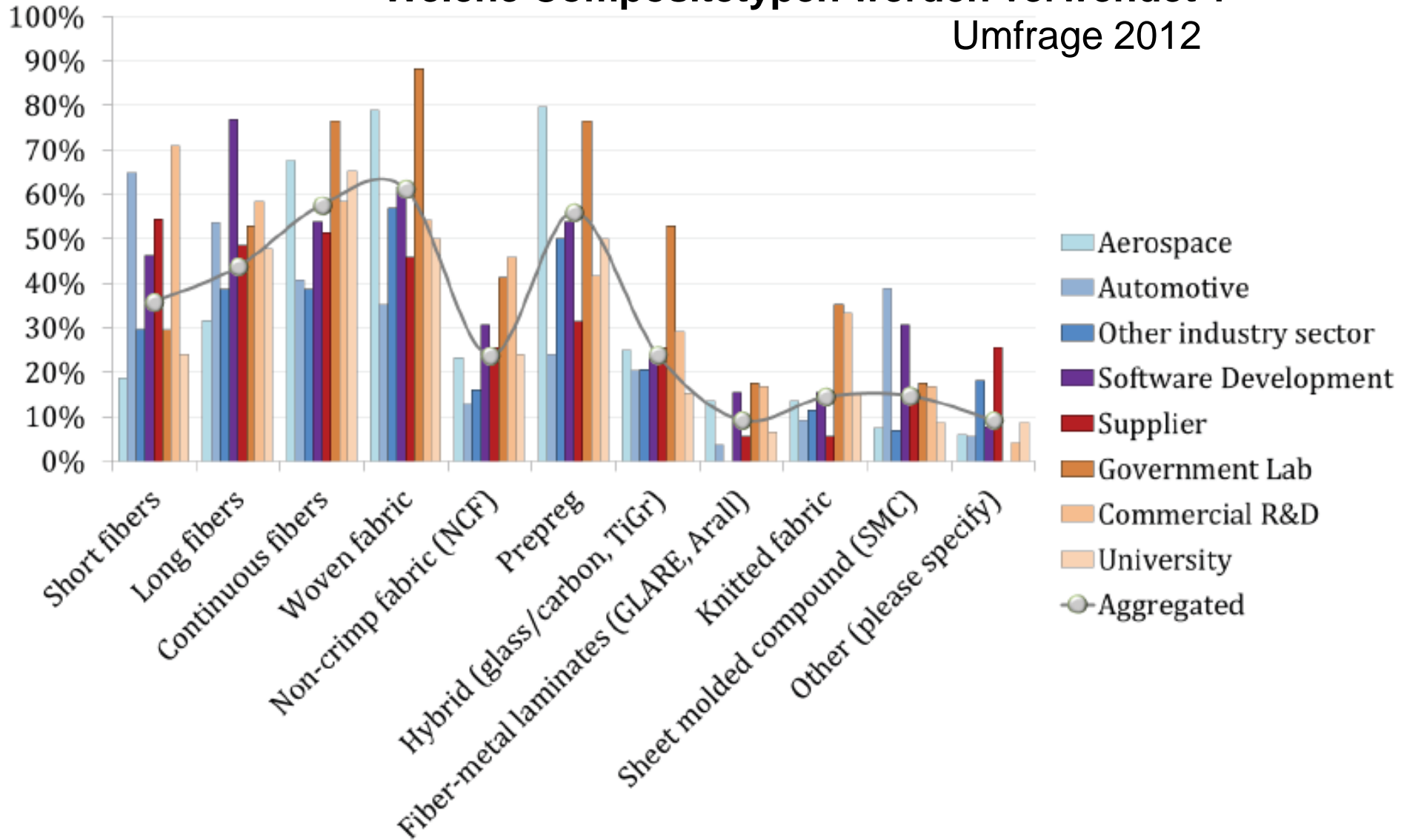


Figure 4: Which kind of composites do you use?

# Welche Fasern werden verwendet ?

Umfrage 2012

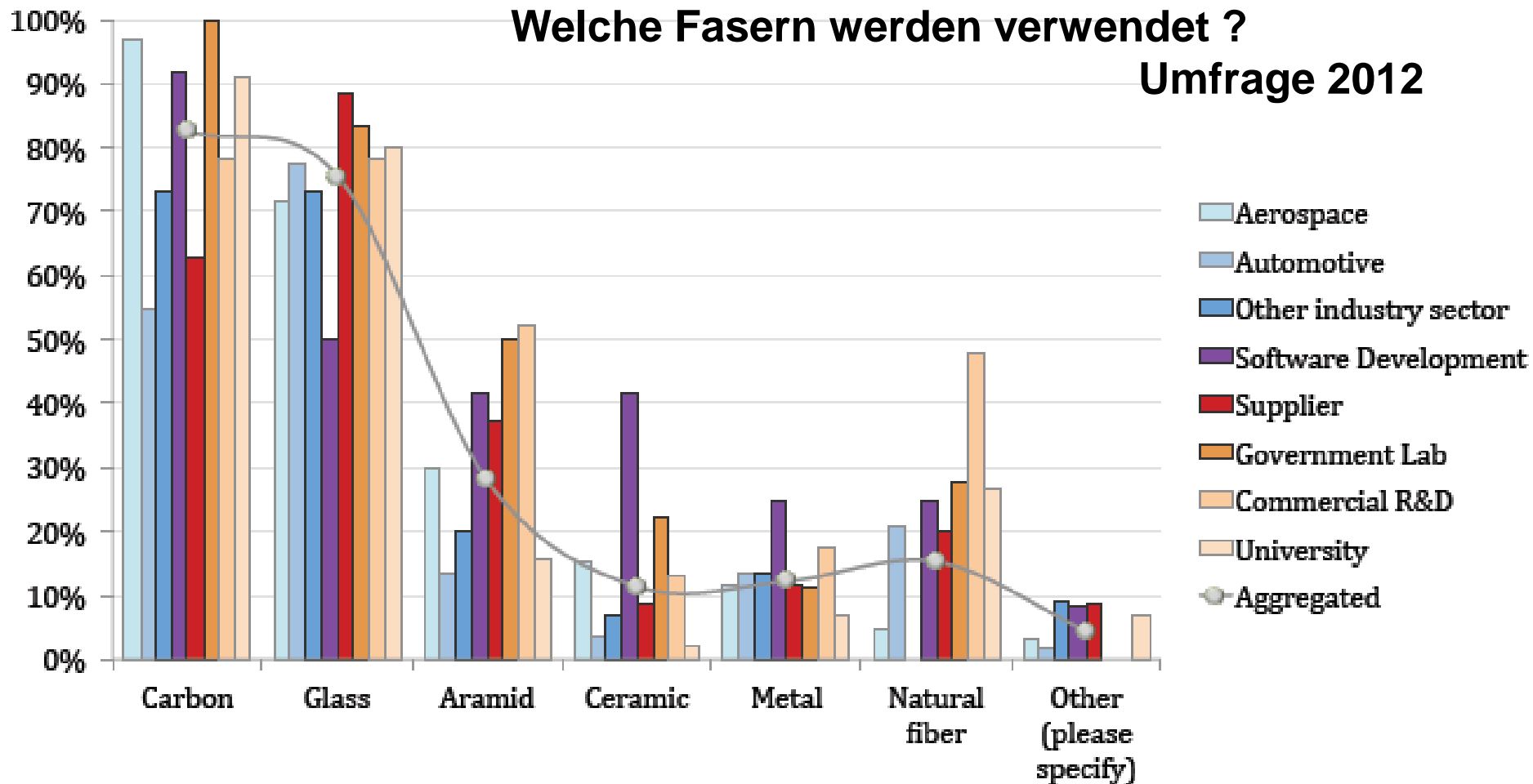


Figure 5: *What type of fiber material do you use?*

# Welche Matrizes werden verwendet?

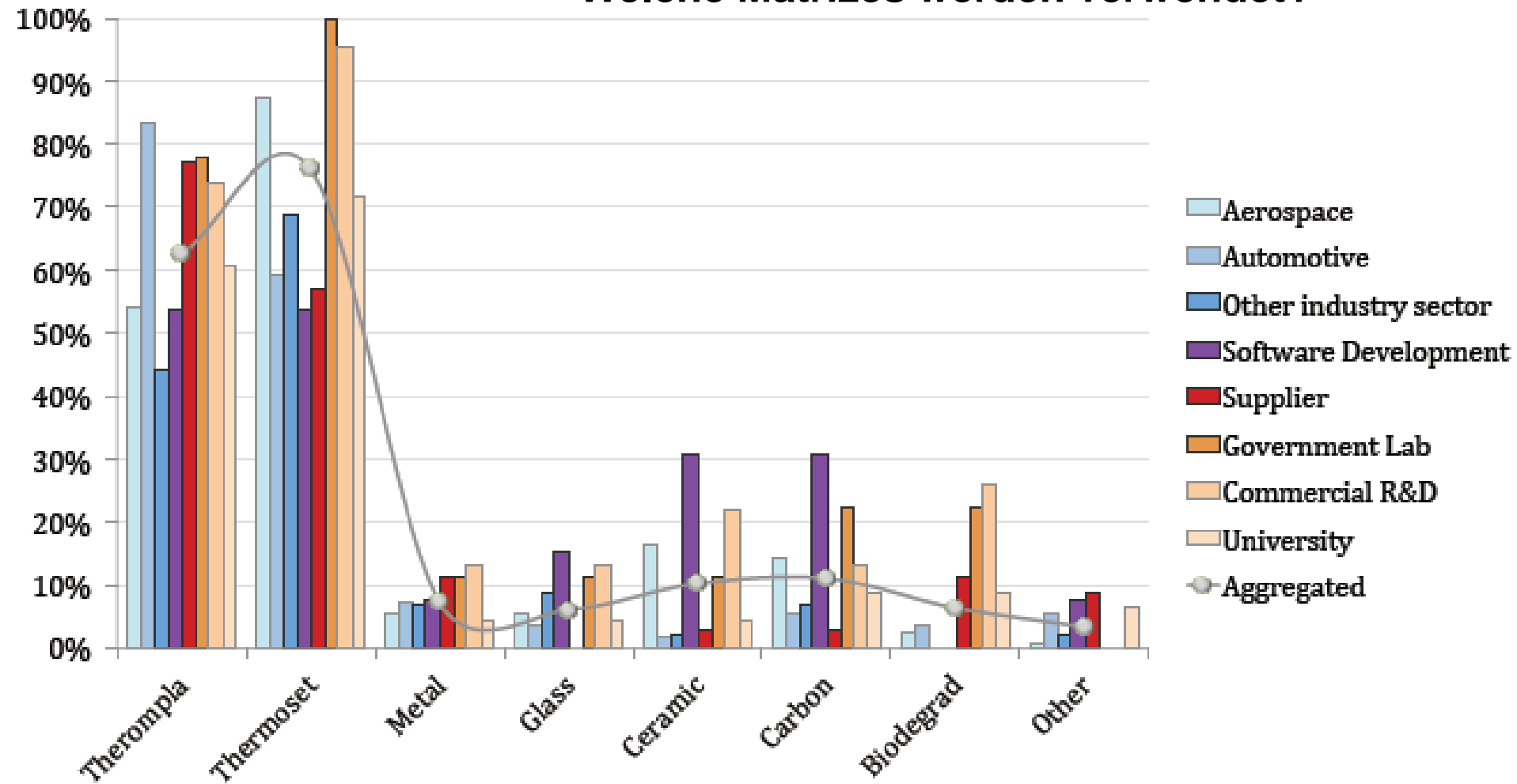
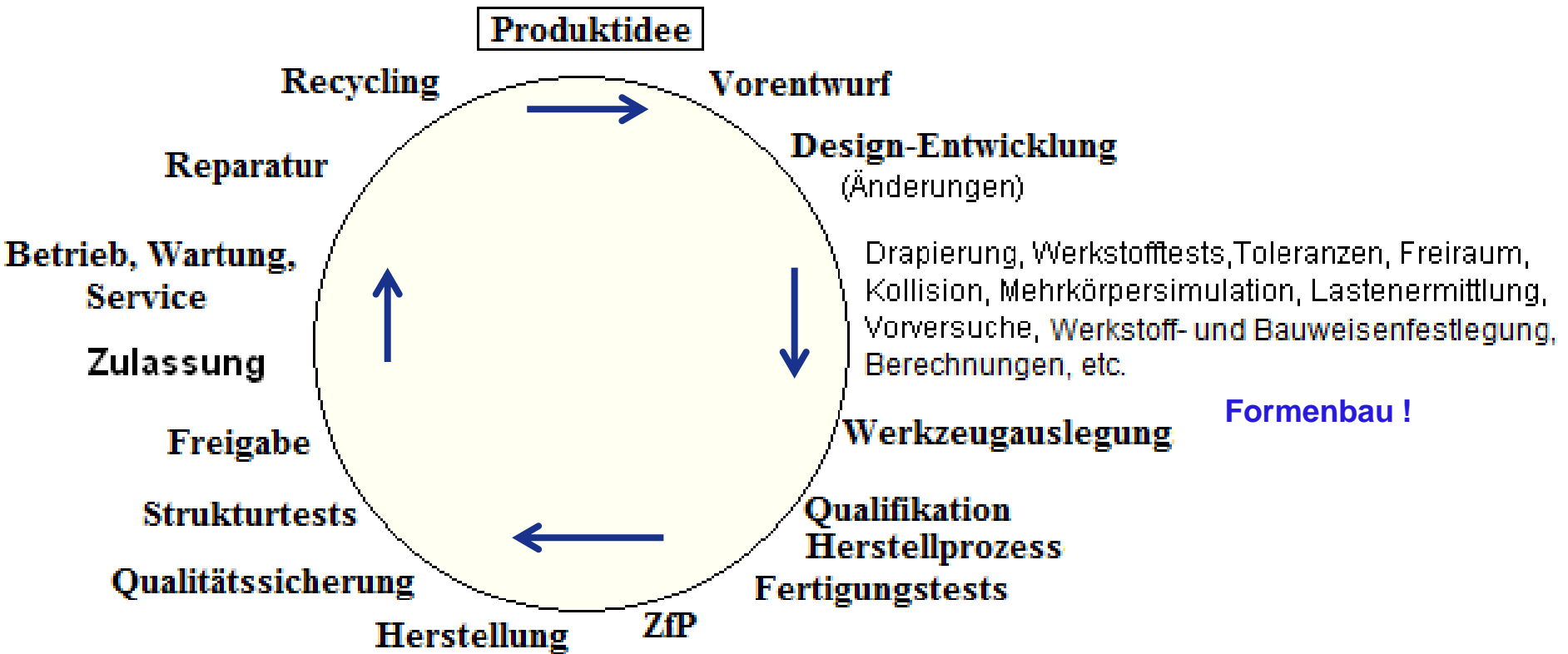


Figure 6: *What type of matrix material do you use?*

# 1 Ziele und Einführung, einige Definitionen

## 1.1 Engineering-Prozeßkette in der Bauteilentwicklung

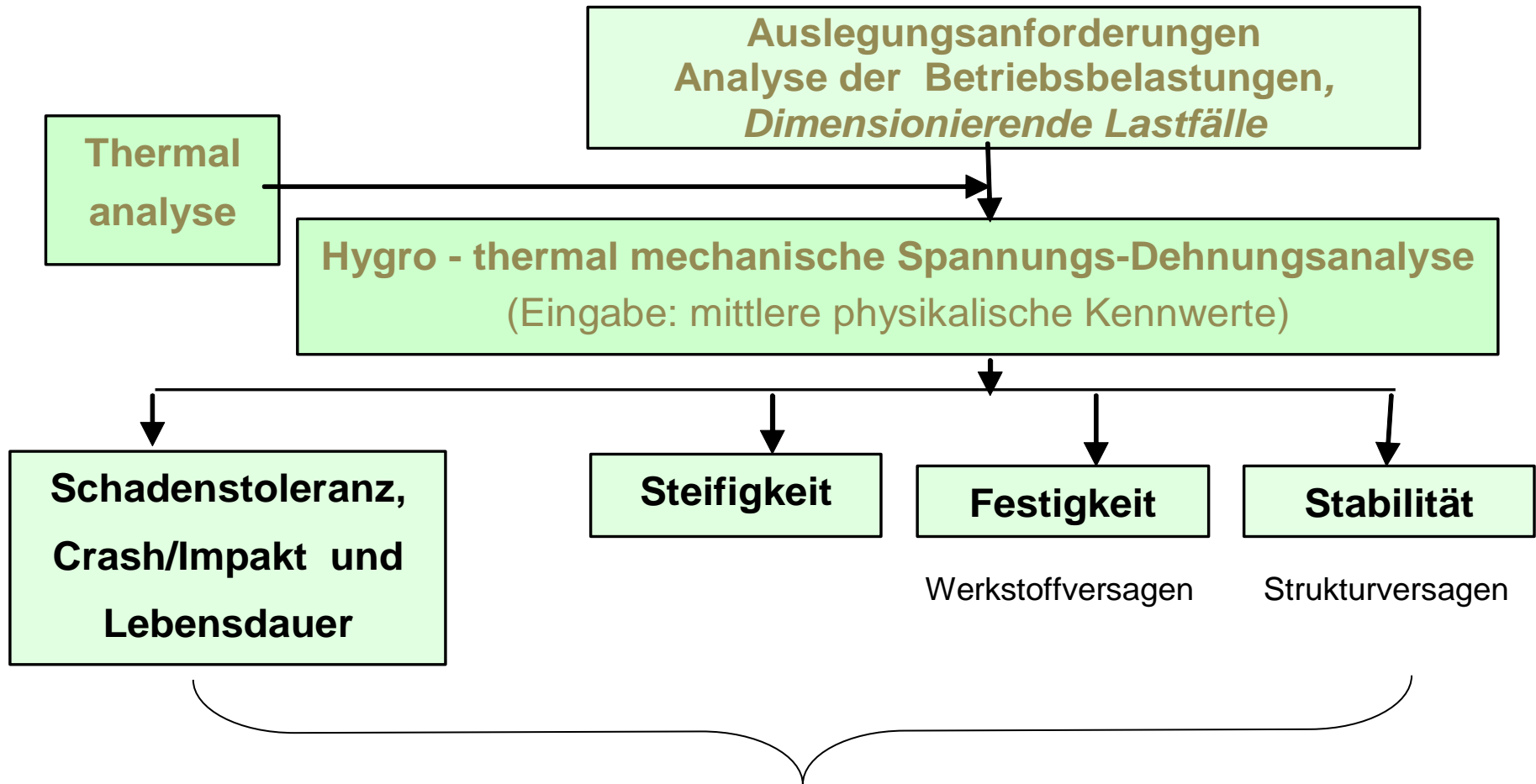


Simulationsgebundene Aufgaben ?  
Überall

- 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.

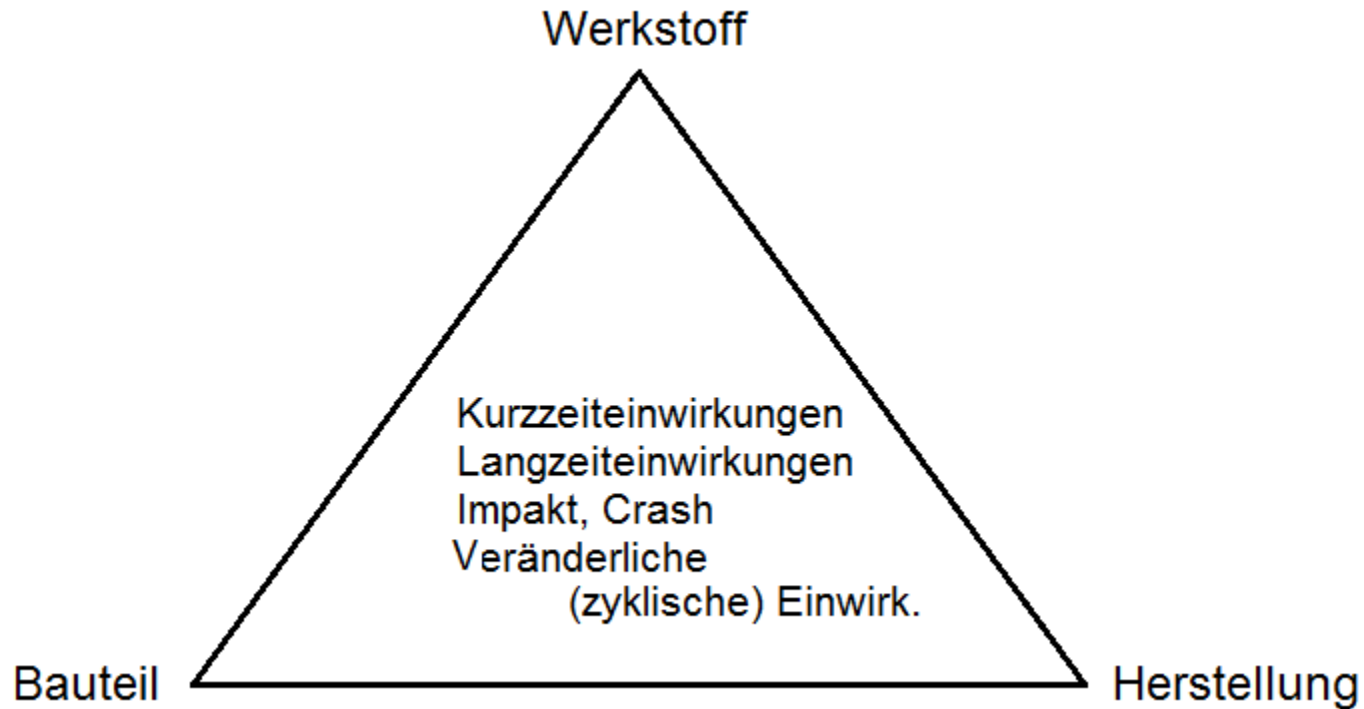
Werkzeugauslegung, Infusion, Infiltration, Umformen, Aushärtungsprozeß, Imprägnieren mit und ohne Druck, Fließfront der Matrix, Räumliche Temperaturverteilung und konsequente Aushärtegradverteilung, Faserorientierungsverteilung, Reaktionskinetik, Tg-Wert, chemisches Schwinden (Harz), thermo-physikalisches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



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

## 1.4 Spannungsbogen: Simulation = Hauptwerkzeug des Konstrukteurs

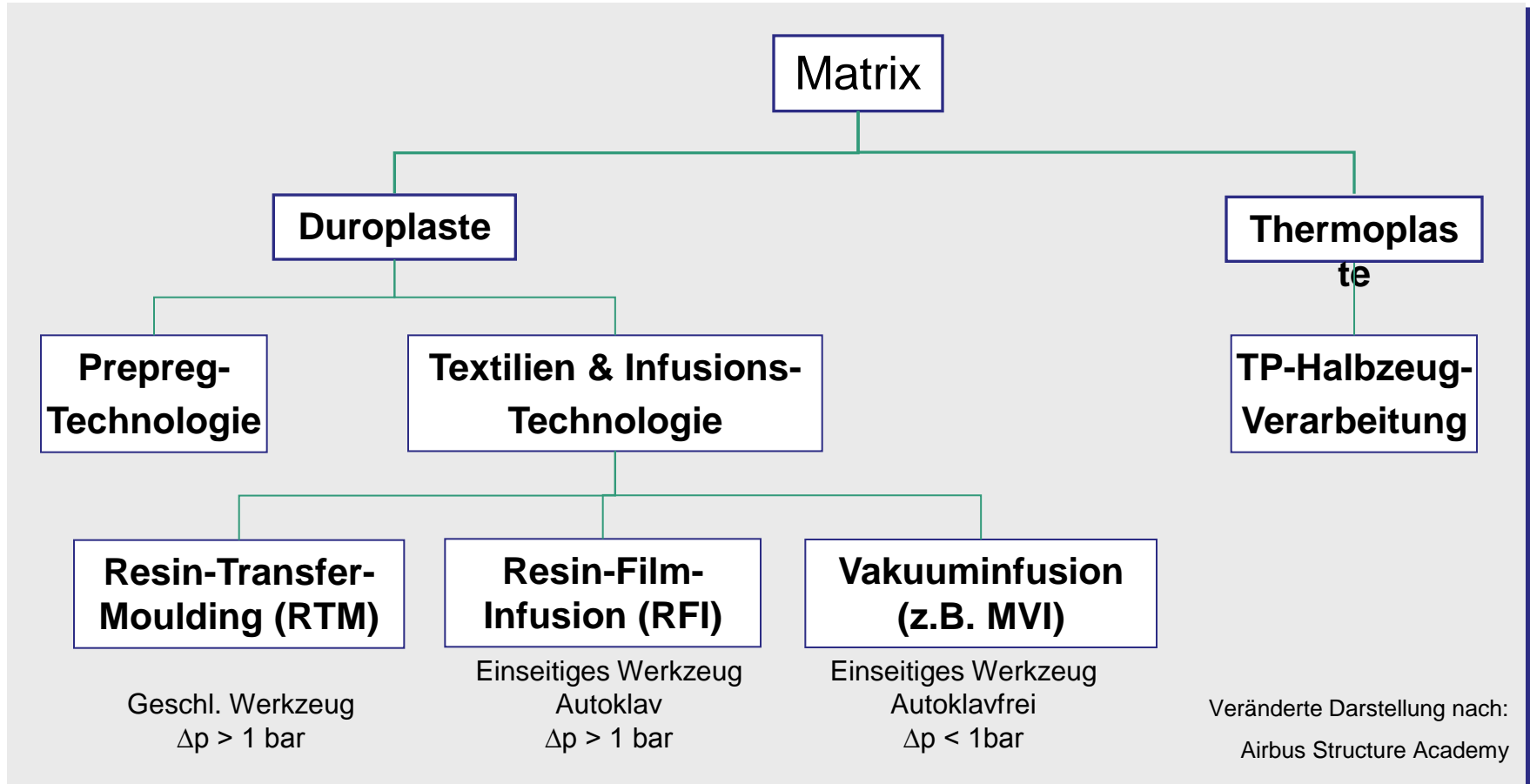
---



# Gliederung der Fertigungsverfahren

Einteilung nach dem Kunststofftyp der Matrix

courtesy

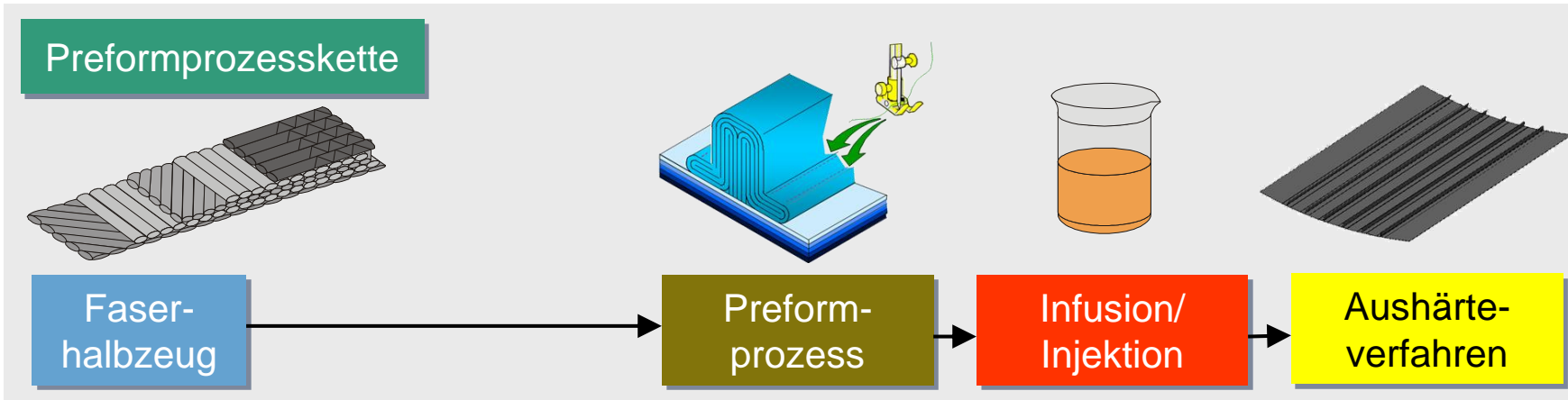
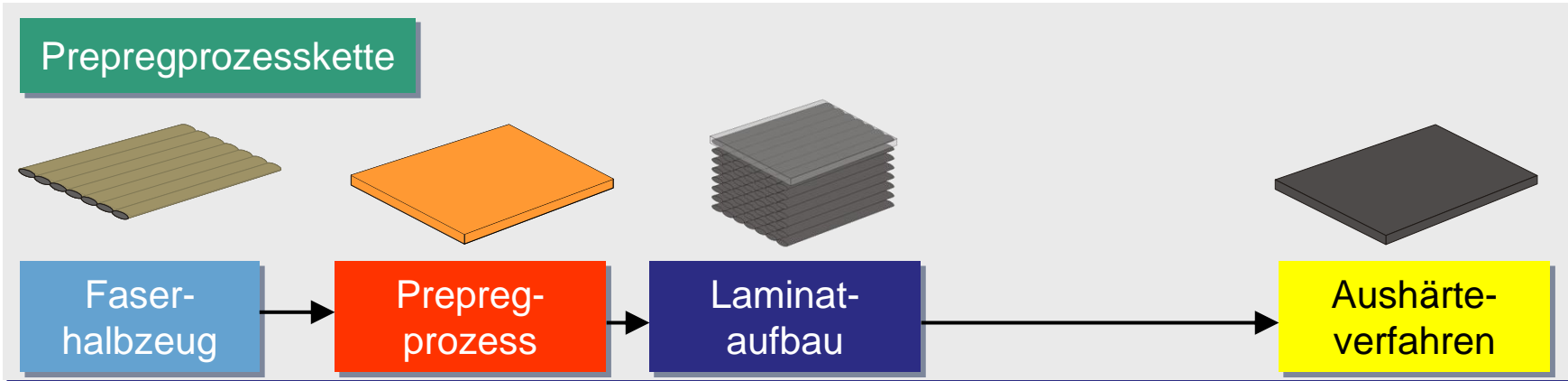


Für eine effiziente Verfahrensauswahl ist eine systematische Gliederung der Fertigungsverfahren für (Faser-)Verbundwerkstoffe erforderlich.

# 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 = ⊥)

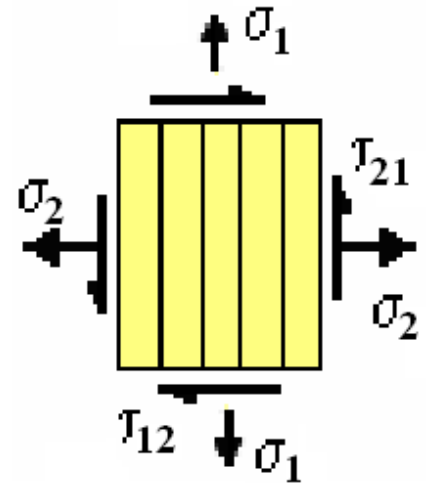
Festigkeit :  $\{R\} = (R_{||}^t, R_{||}^c, R_{\perp}^t, R_{\perp}^c, R_{\perp||})^T$

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

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

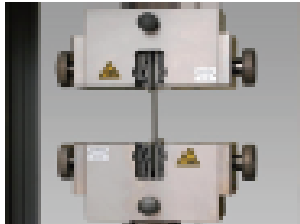

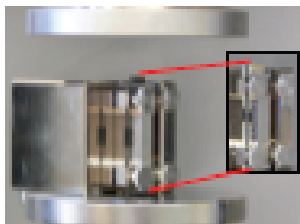

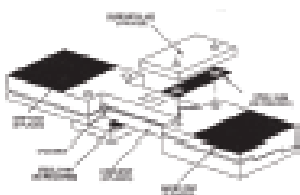

Elastizitätsgrößen :  $E_{||}, E_{\perp}, G_{||\perp}, \nu_{\perp||},$

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



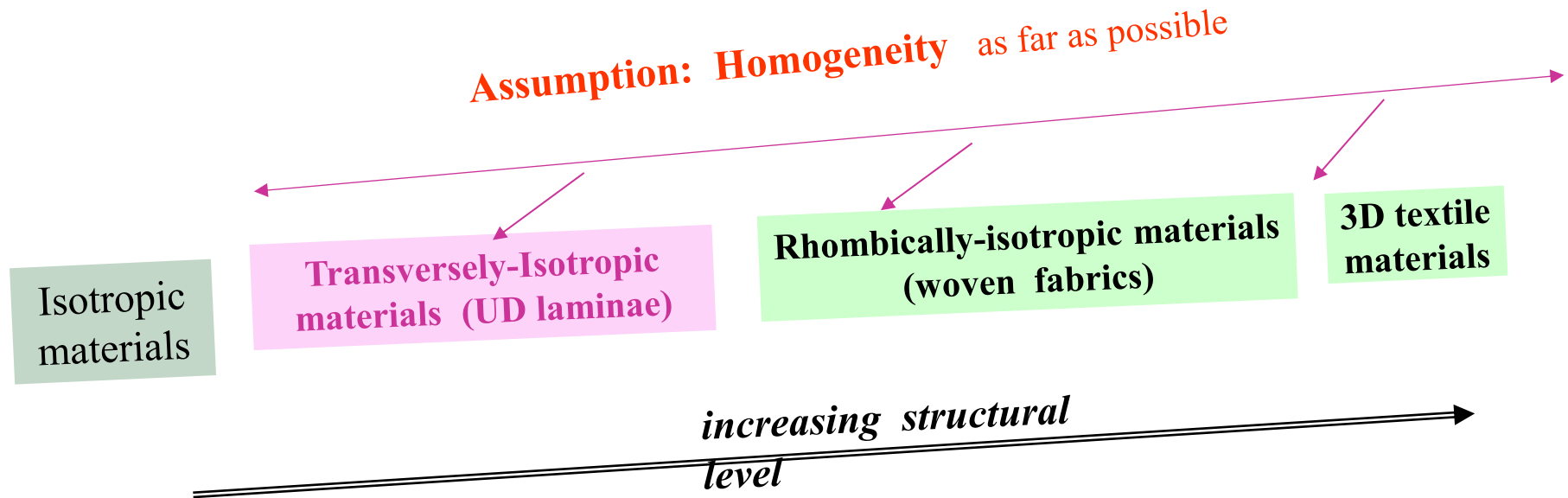
Dazu Messungen mit **Teststandards** notwendig.

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

Prinzip	Prüfart	Normenbeispiele	Aussage
	Zugversuch	ASTM D 3039, EN 2561, 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 11566	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 5766, 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 Prüfmethodik wirken starke Flächenpressungen an der

# 3. Modellierung und Analyse

## 3.1 Werkstoffmodellierung



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 :  $f(\mathbf{T}, \mathbf{M}, t, d\boldsymbol{\varepsilon}/dt)$

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



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
- Randbedingungen

Dimensionierende Lastfälle

*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.

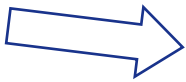
### **Strukturtests:**

- 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 !**