



Konstruktive Auslegung faserkeramischer Komponenten

Faserkeramik Kolloquium 2009

Köln, 03.11.2009

Sandrine Denis, Bernhard Heidenreich, Severin Hofmann

DLR Stuttgart, Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung



Inhalt

- Einführung
- Schwerpunkte der Auslegung
- CMC-Befestigungskonzepte
- Aktueller Simulationsprozess
- Entwicklungsschwerpunkte
- Zusammenfassung



Inhalt

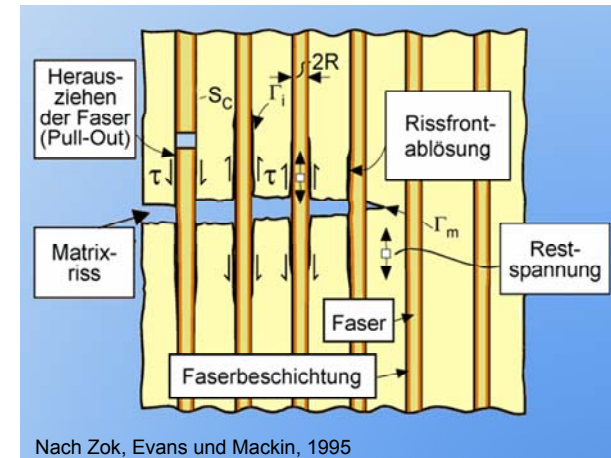
➤ Einführung

- Schwerpunkte der Auslegung
- CMC-Befestigungskonzepte
- Aktueller Simulationsprozess
- Entwicklungsschwerpunkte
- Zusammenfassung

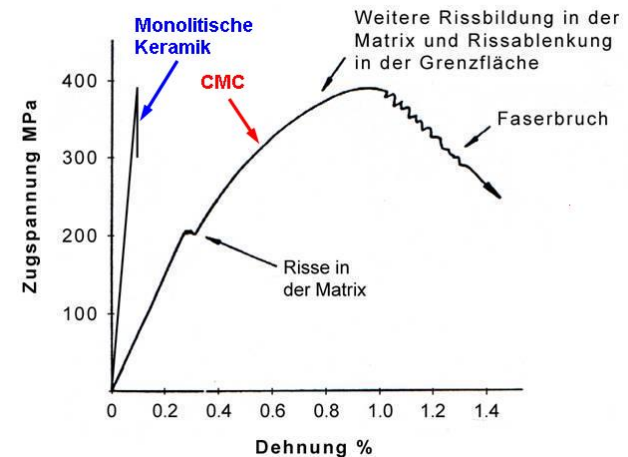
Keramische Faserverbundwerkstoffe (CMC)

Einbettung von Fasern in eine keramische Matrix mit schwacher Bindung der Faser an die Matrix oder schwacher Matrix

- Faser / Matrix – Grenzflächen und Mikrorisse wirken als Rissstopper
- Quasiduktiles Bruchverhalten durch Energiedissipation (Rissumlenkung, Rissüberbrückung, Faser-Pull-Out)
- Hohe Schadenstoleranz
- Geringere Steifigkeit im Vergleich zu monolithischen Keramiken



Rissausbreitung in CMCs



Typische Spannungsdehnungskurven

Vorteile von CMCs gegenüber monolithischer Keramik

Monolithische Keramik

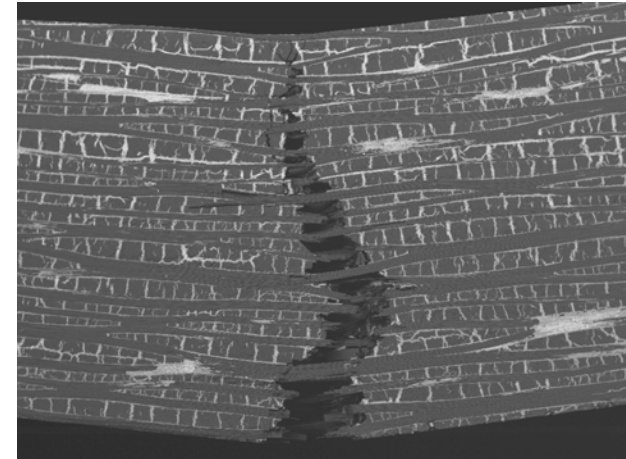
- Fehlstellen (Poren, Einschlüsse) unter Belastung → lokale Spannungsspitzen und Risse
- Risse werden nicht gestoppt → Katastrophaler Sprödbruch



**Monolithische Keramik,
Biegeprobe**

CMC

- Lokale Überlastung → Risse
- Energiedissipationsmechanismen wie Rissumlenkung, Rissüberbrückung, Faser-Pull-Out
- Mikrorisse → Bruchzähes Verhalten



4mm

C/C-SiC, Biegeprobe

Vorteile von CMCs gegenüber monolithischer Keramik

Monolithische Keramik

- Werkstofffestigkeit abhängig von Fehlstellen und deren stochastischer Verteilung (Weibull-Werkstoffe)
- „Bauteilfestigkeit“ abhängig von Geometrie (Volumen, Oberfläche)
- Probabilistische Auslegung der Versagenswahrscheinlichkeit
- Große Bauteile führen zu dicken Wandstärken und hohem Gewicht



Waschbecken

CMC

- Werkstofffestigkeit abhängig von Zusammensetzung (Fasergehalt, Orientierung)
- „Bauteilfestigkeit“ unabhängig von Bauteilgröße
- Deterministische Auslegung
- Dünnwandige Leichtbaustrukturen



**Nasenkappe aus C/C-SiC,
Ø 700mm, Wandstärke 6mm**



Inhalt

➤ Einführung

➤ **Schwerpunkte der Auslegung**

➤ CMC-Befestigungskonzepte

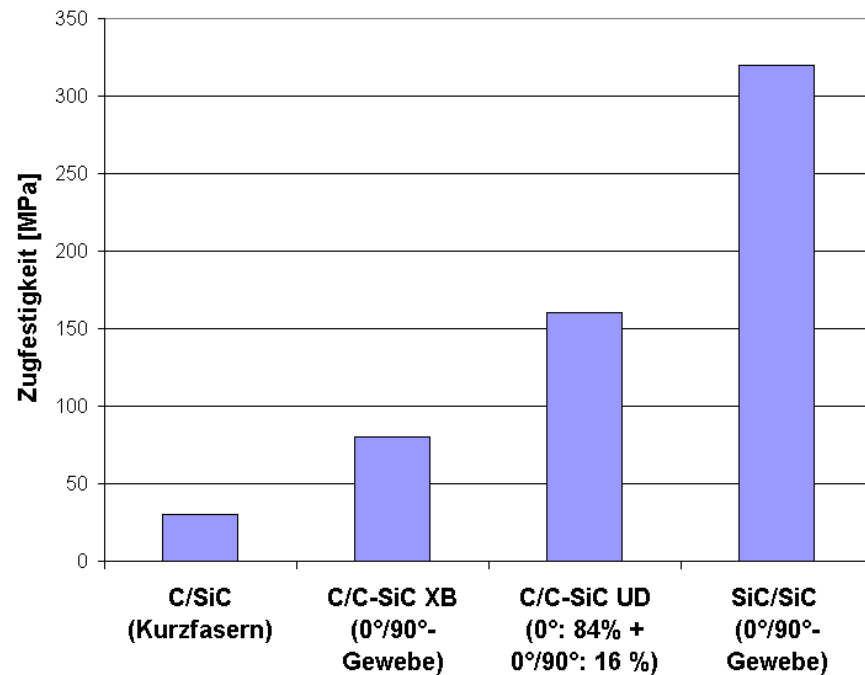
➤ Aktueller Simulationsprozess

➤ Entwicklungsschwerpunkte

➤ Zusammenfassung

Werkstoffgerechte Auslegung

- CMC-Werkstoffe: „faserdominant“ und anisotrop
- Vielfalt von Werkstoffvarianten
→ aufwändige Ermittlung der Werkstoffkennwerte
- Fasergerechte Bauweisen für Leichtbaustrukturen gekennzeichnet durch Faserorientierung parallel zu Lastrichtung und Langfaserverstärkung
→ Endkonturnahe Fertigung
- Sorgfältige Integration von CMC-Bauteilen in metallische Strukturen



Zugfestigkeiten unterschiedlicher CMCs

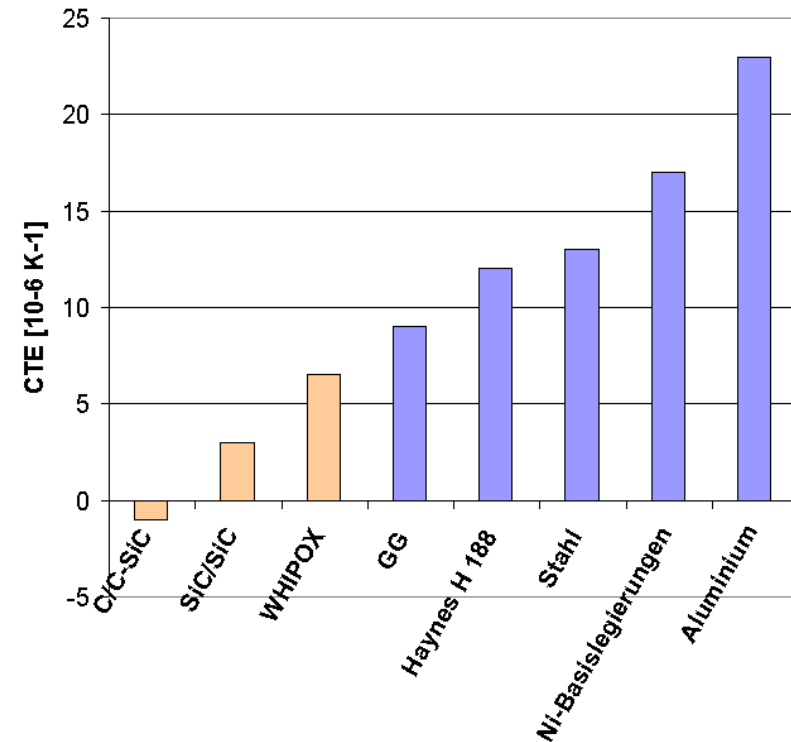
Integration von CMC-Bauteilen in Metallstrukturen

Schwerpunkte der Auslegung:

- Stark unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von CMCs und Metallen
- Hohe Einsatztemperaturen
- niedrige Wärmeleitfähigkeit bei schnellen Temperaturveränderungen
→ Spannungsspitzen im CMC

Ziele der Auslegung:

- Ausdehnungskompatible Befestigungskonzepte und Krafteinleitungen



**Ausdehnungskoeffizienten
unterschiedlicher CMC und Metalle**



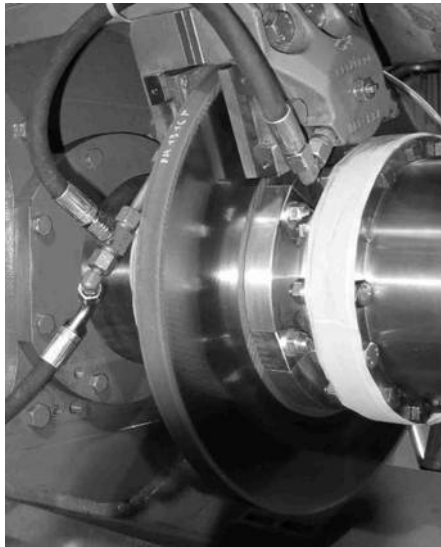
Inhalt

- Einführung
- Schwerpunkte der Auslegung
- **CMC-Befestigungskonzepte**
- Aktueller Simulationsprozess
- Entwicklungsschwerpunkte
- Zusammenfassung

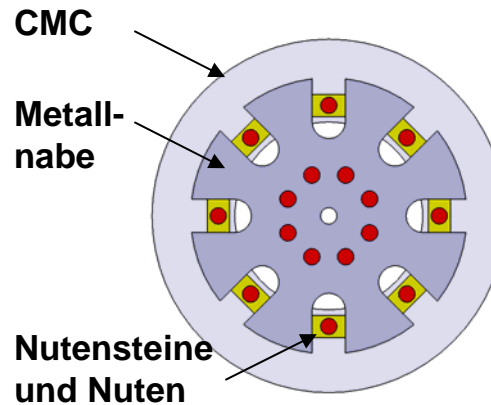
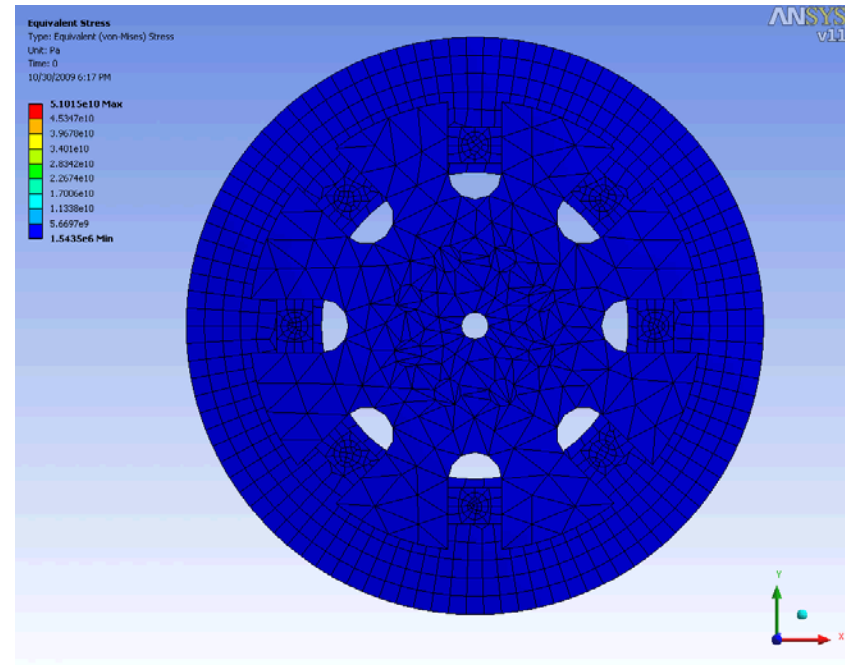
Ausdehnungskompatible Befestigungskonzepte

C/C-SiC Brems Scheibe auf Metallnabe

- Befestigung über Nutensteine und Nuten
- Sichere Positionierung
- Ungehinderte thermische Ausdehnung von CMC- und Metallstruktur



C/C-SiC Brems Scheibe in Prüfstandanlage

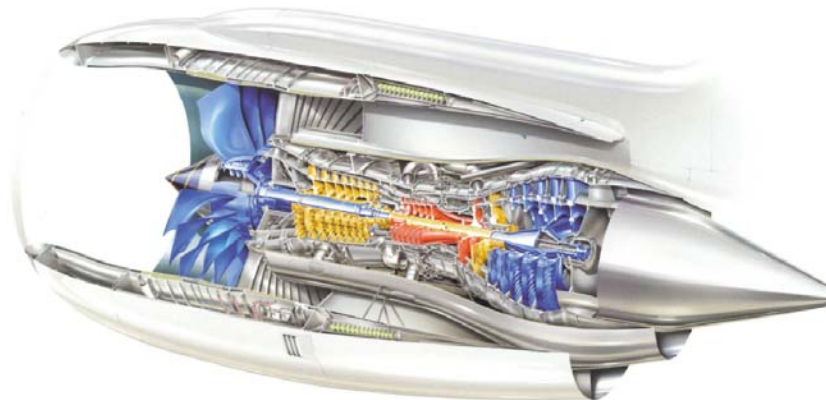


Animation Brems Scheibe unter Temperaturerhöhung

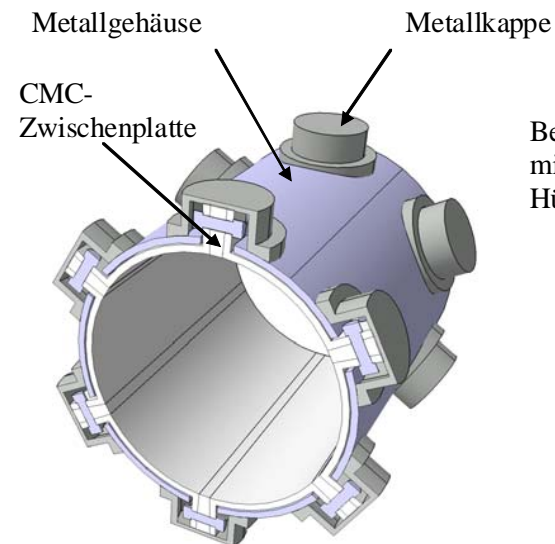
Ausdehnungskompatible Befestigungskonzepte

WHIPOX-Brennkammerauskleidung für
Flugzeugtriebwerke

- Ringstruktur zusammengesetzt aus Einzelkacheln
- Befestigung über radiale Laschen
- Ungehinderte thermische Ausdehnung von CMC-Liner und Metallgehäuse

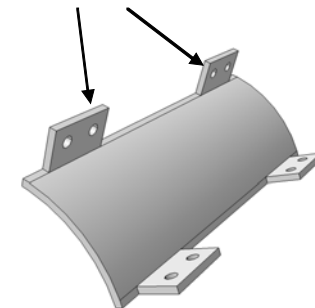


Triebwerk
(Rolls-Royce, the Jet Engine)



Brennkammerrohr
aus mehreren Schindeln

Befestigung der Schindeln
mittels Schrauben und
Hülsen



CMC-Brennkammerschindel

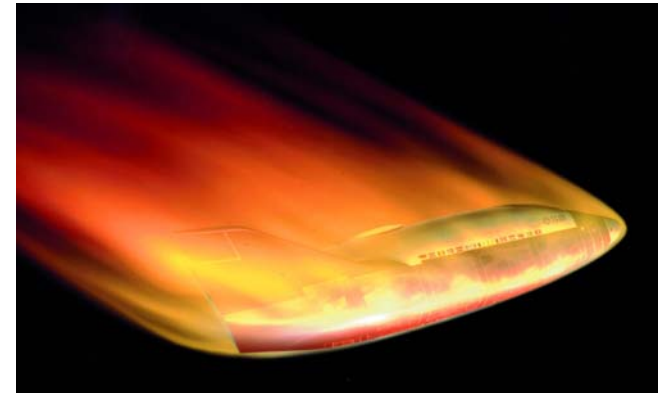
**Bauweise eines Brennkammerrohrs für
Luftfahrt-Triebwerke**



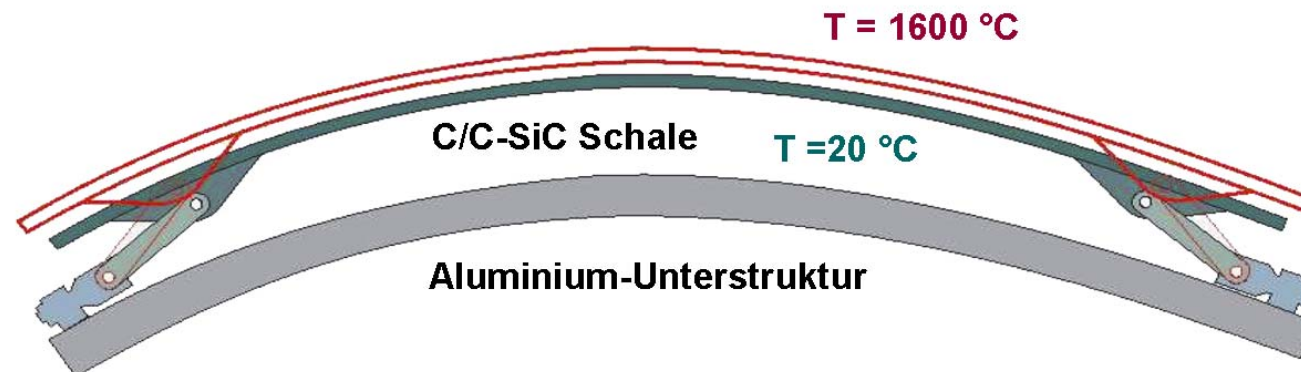
Befestigungskonzepte mit kinematischem Dehnungsausgleich

C/C-SiC Nasenkappe für
Raumtransporter

- Acht Befestigungselemente auf der Rückseite
- C/C-SiC Hebelsystem
- Unterstruktur-Lagerung aus ODS-Legierung
- Dehnung bis ca. 3 mm bei $T_{\text{max.}} = 1600 \text{ °C}$



X38-Raumfahrzeug



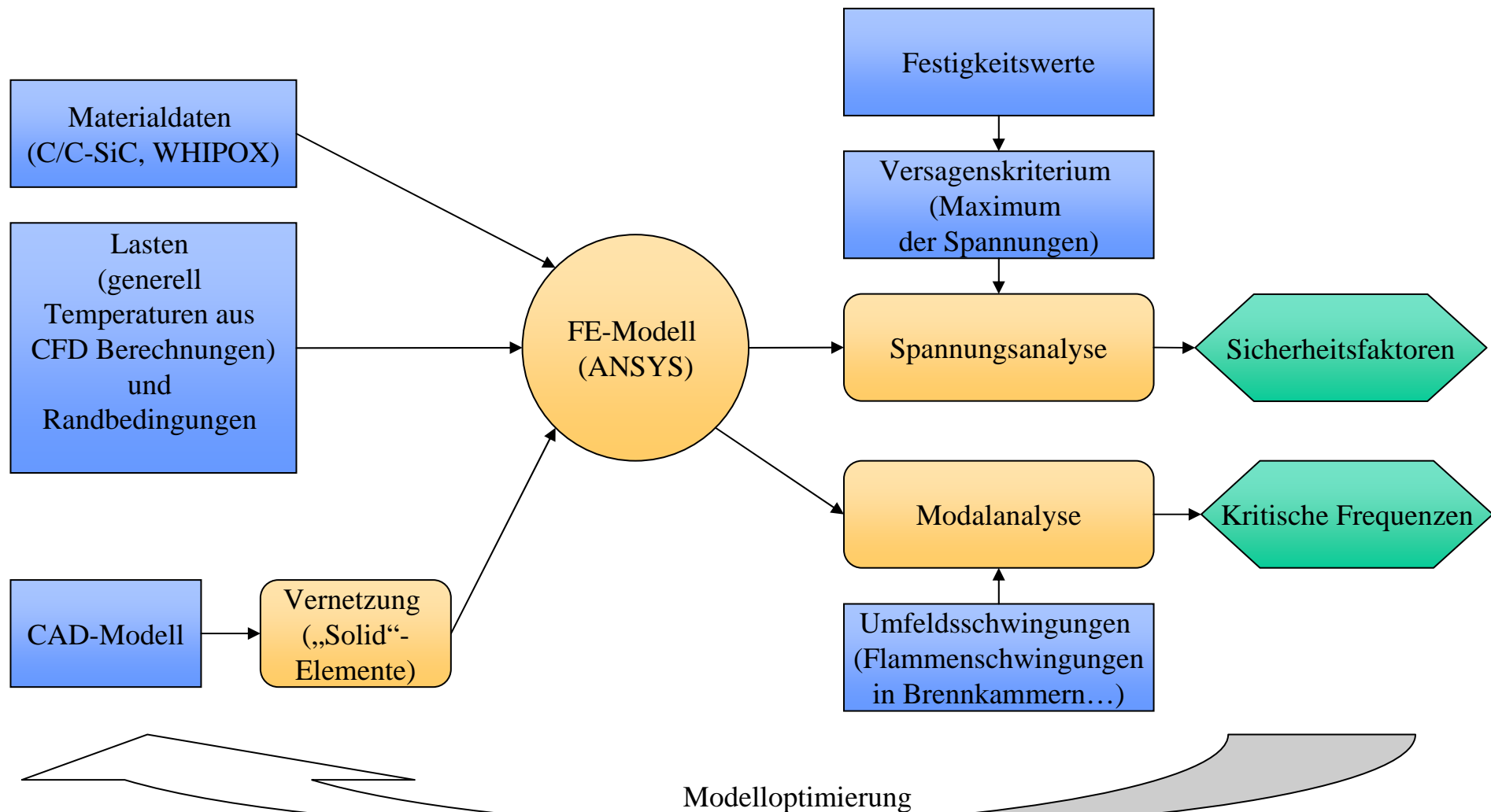
*Befestigungskonzept der Nasenkappe
von X38-Raumfahrzeug*



Inhalt

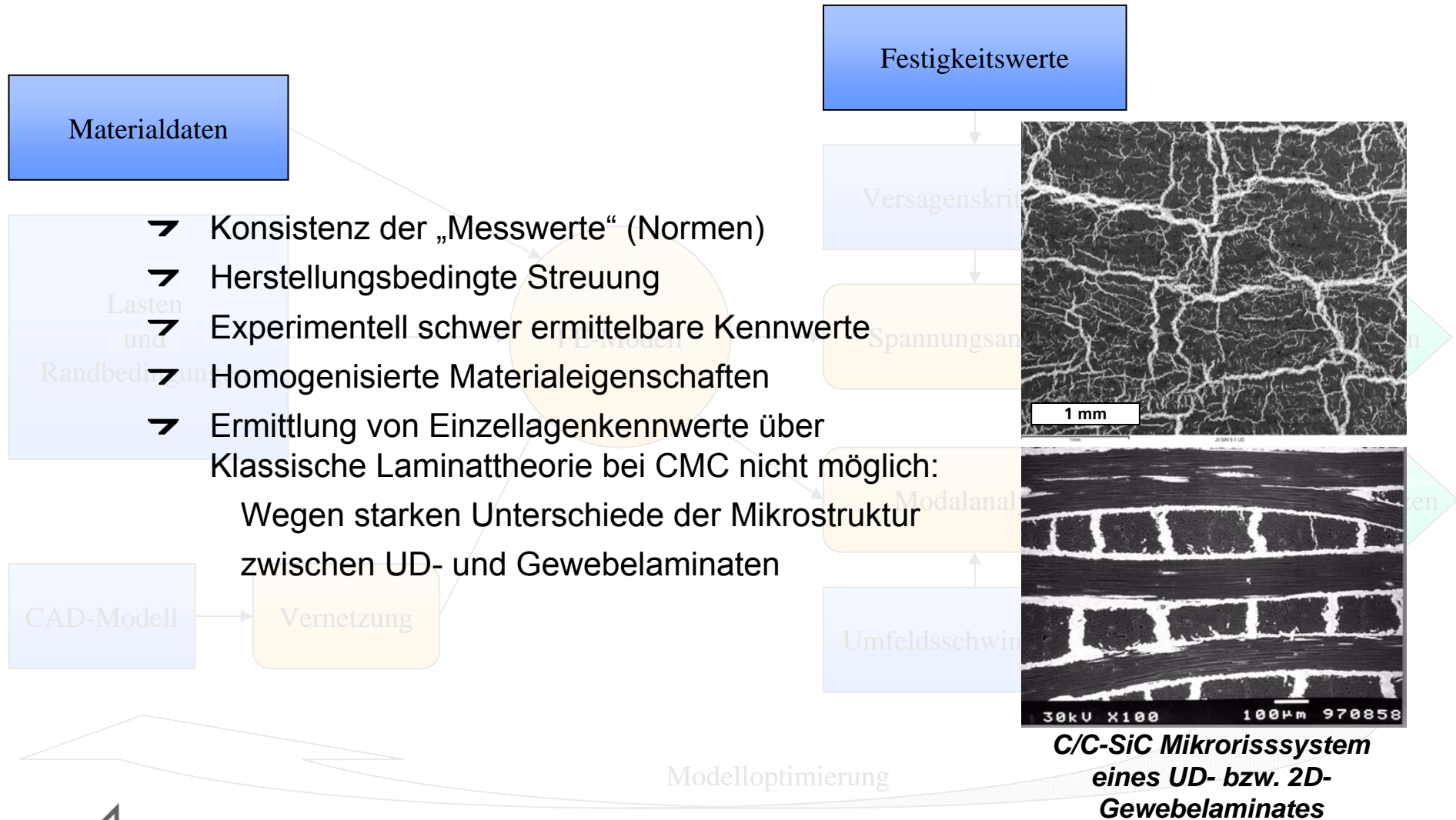
- Einführung
- Schwerpunkte der Auslegung
- CMC-Befestigungskonzepte
- **Aktueller Simulationsprozess**
- Entwicklungsschwerpunkte
- Zusammenfassung

Aktuelles Vorgehen bei der Auslegung mittels FEM



Materialmodellierung

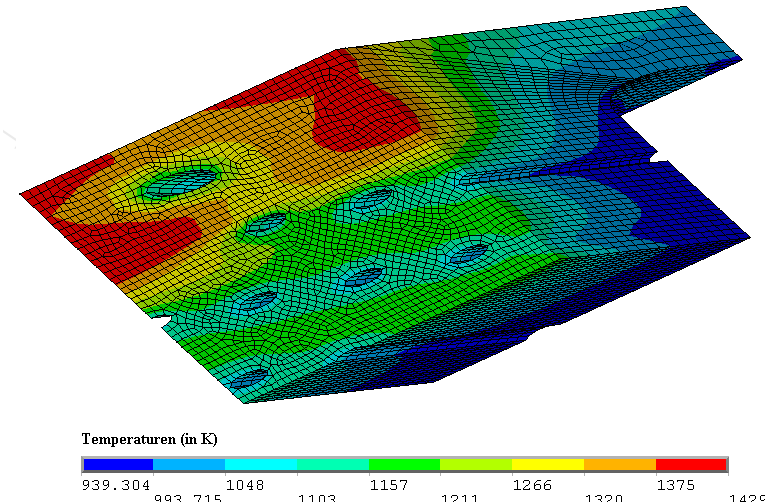
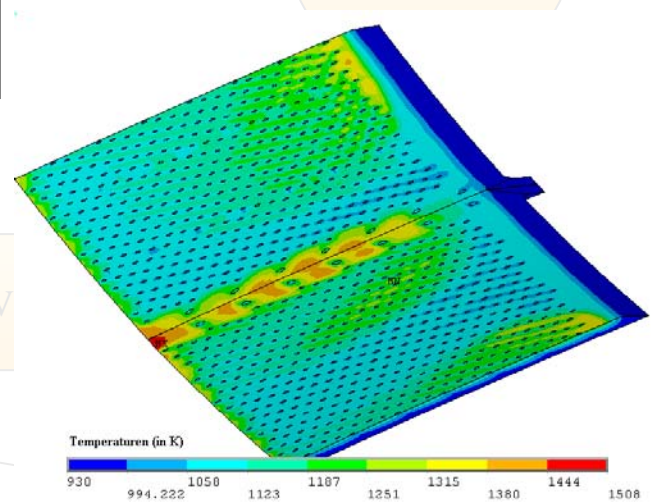
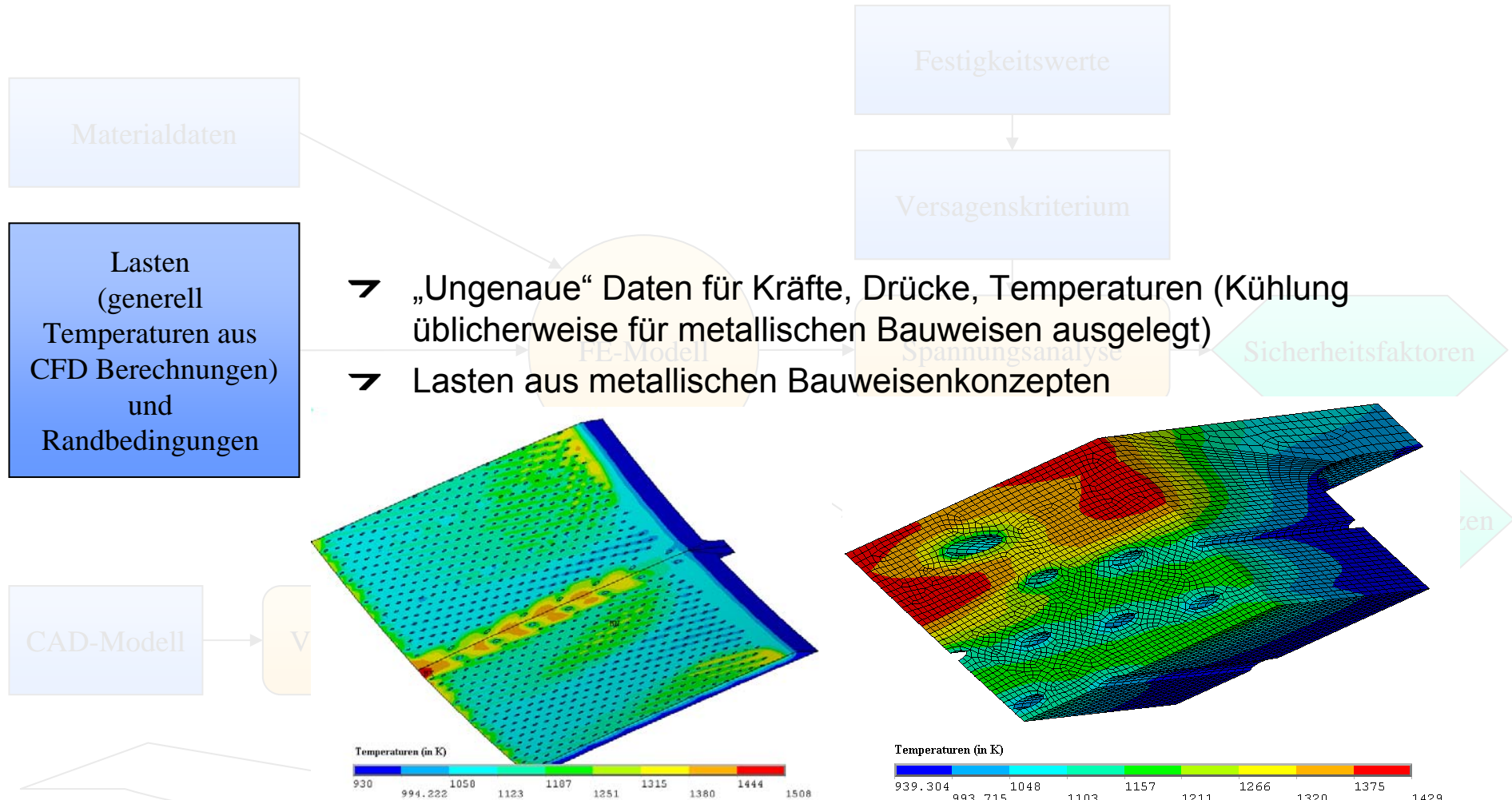
Aktuelle Schwierigkeiten und Begrenzungen





Lasten, Randbedingungen

Aktuelle Schwierigkeiten und Begrenzungen

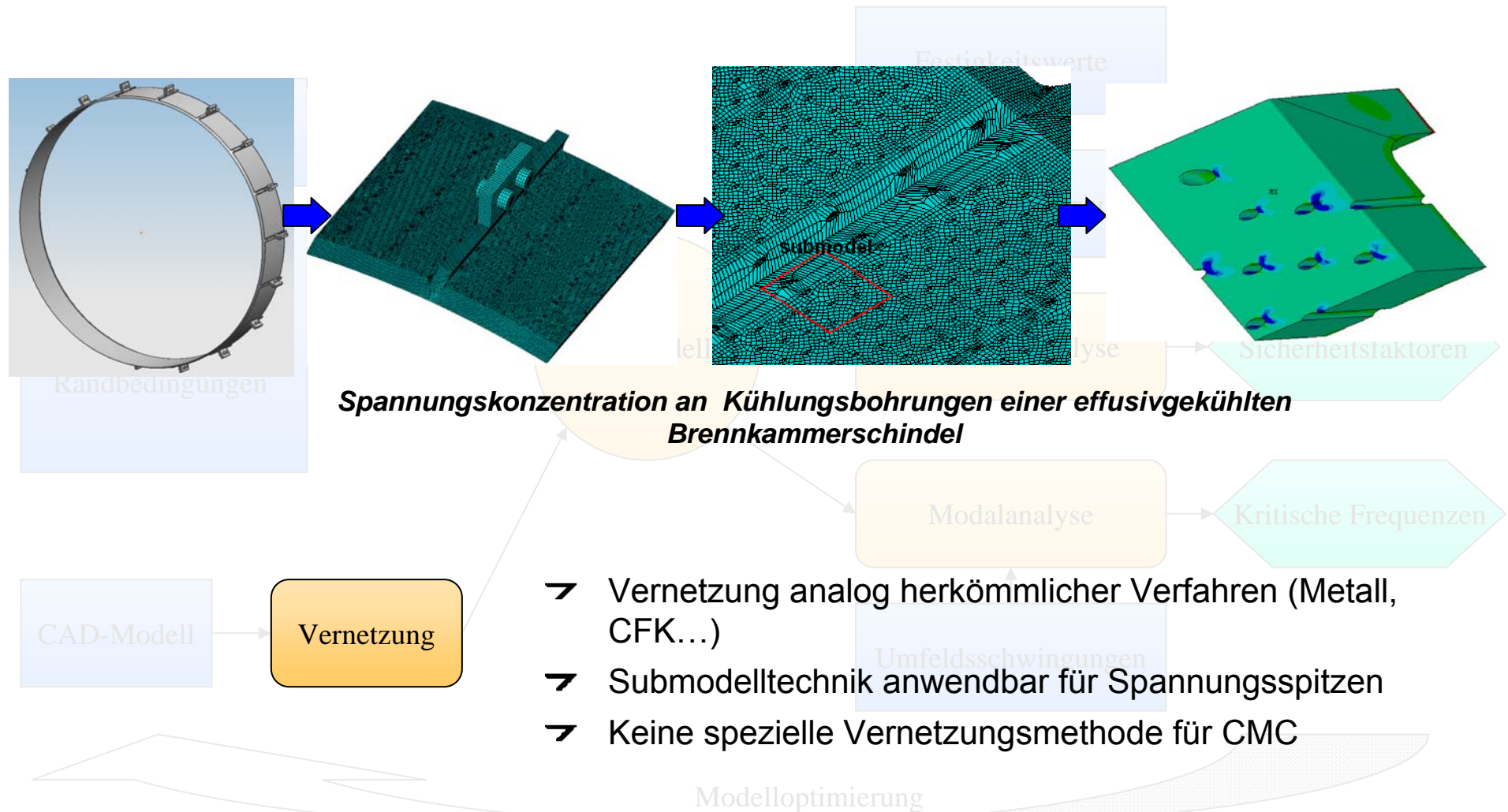


Temperaturverteilungen aus CFD-Berechnungen (DLR AT Köln)

Modell bzw. Sub-Modell einer Brennkammerschindel

Vernetzung

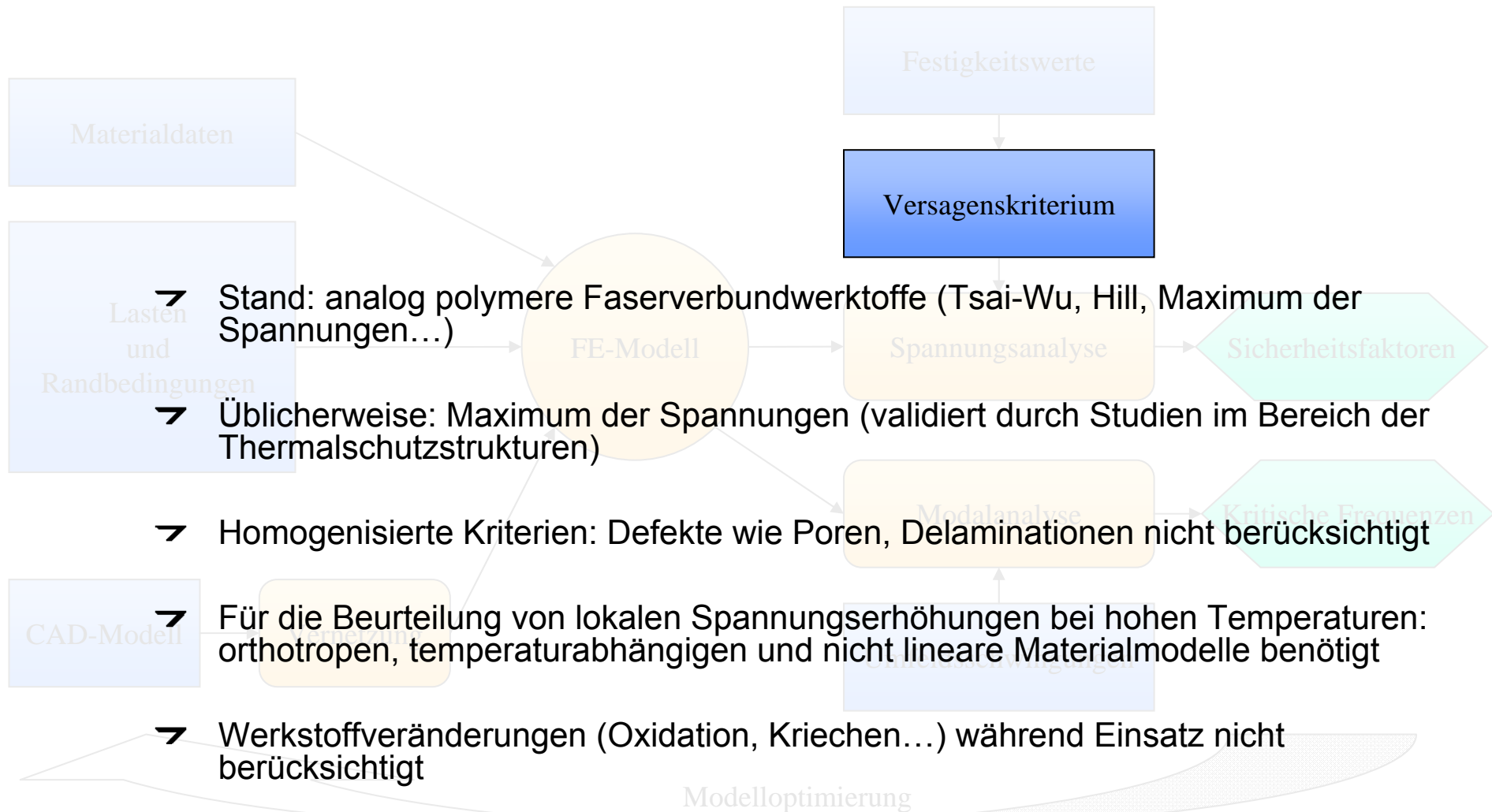
Aktuelle Schwierigkeiten und Begrenzungen





Versagenskriterium

Aktuelle Schwierigkeiten und Begrenzungen





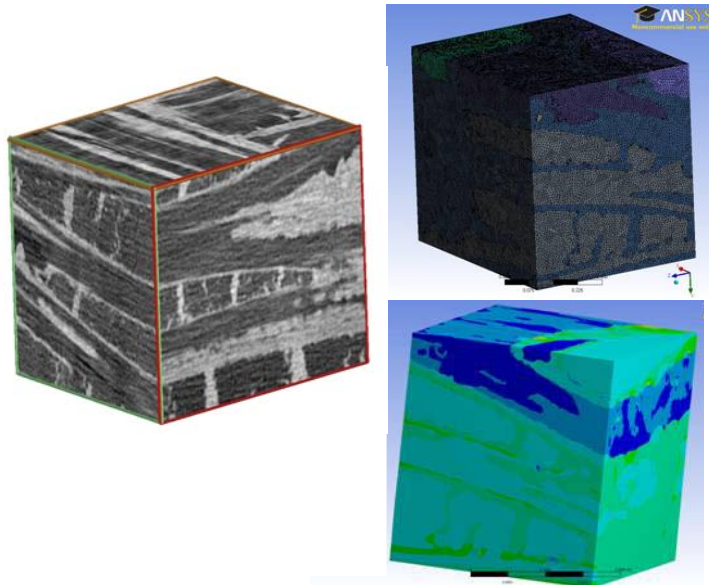
Inhalt

- Einführung
- Schwerpunkte der Auslegung
- CMC-Befestigungskonzepte
- Aktueller Simulationsprozess
- **Entwicklungsschwerpunkte**
- Zusammenfassung

Erzeugung von numerischen Modellen aus 3D-CT-Daten

Mikrostrukturmodelle

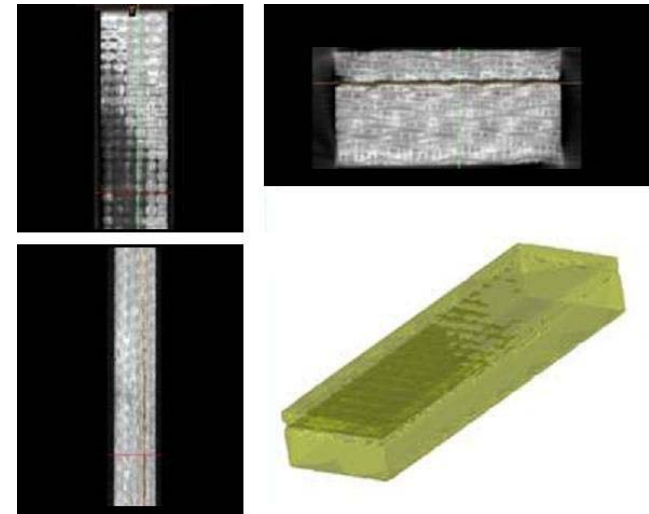
- Berücksichtigung der morphologischen Besonderheiten (Mikroporen, Mikrorisse, Faserverläufe, Grenzflächen)
- Ziel: Einfluss der Mikrostruktur auf die mechanischen Kennwerte



**Beispiel: C/C-SiC-Ausschnitt
ca. 0,5 mm Kantenlänge**

Realdefektmodelle

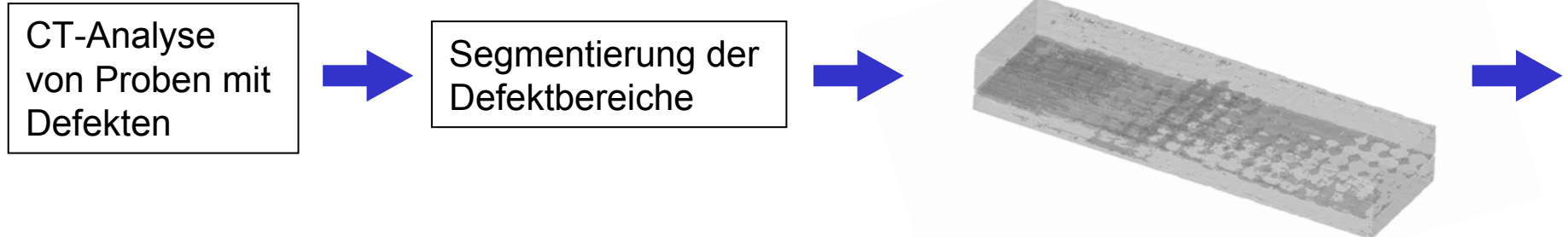
- Berücksichtigung von Makrodefekten: Form, Größe und Lage in Proben und Bauteilen
- Ziel: Bewertung des Defekteinflusses auf mechanische Eigenschaften



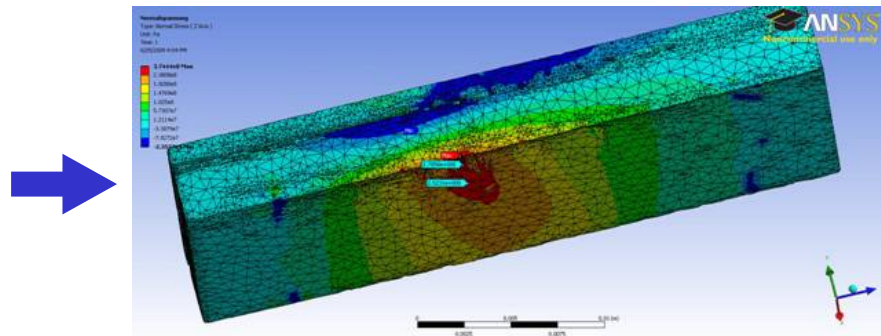
**Beispiel: C/C-SiC Biegeprobe mit
Delamination,
Maße: 10x5x35 mm**



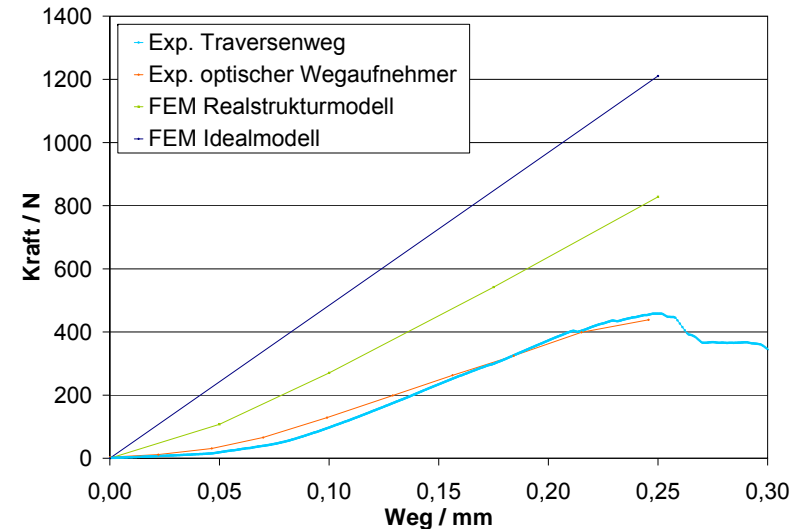
Bewertung von Defekten durch Realstrukturmodelle



Erzeugung von 3D-Volumenkörper
Beispiel: C/C-SiC Biegeprobe mit Delaminationen



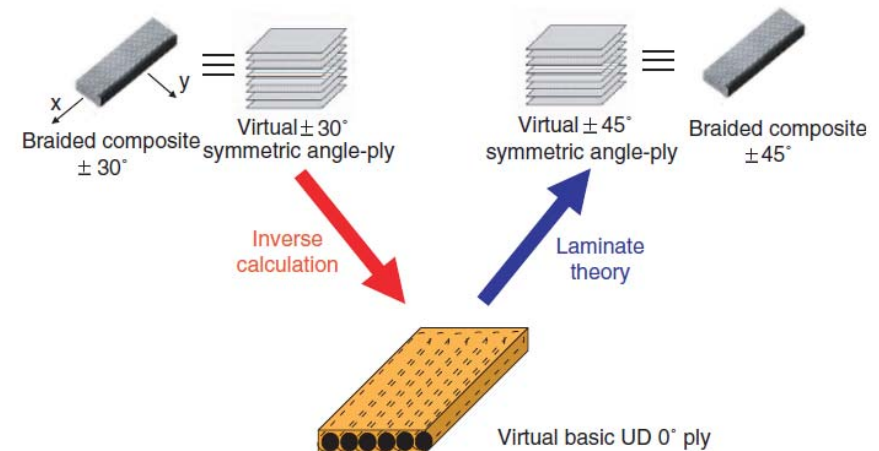
Vernetzung und linear-elastische Berechnung
Darstellung der Normalspannungen
im Realstrukturmodell einer Biegeprobe



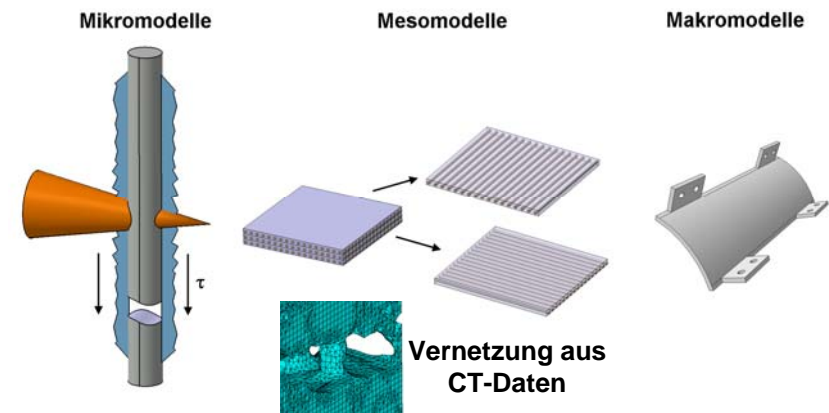
Kraft-Weg-Kurven im Vergleich: Experiment,
Ideal- und Realstrukturmodell

Kopplung Mikro- / Meso- / Makromodelle

- Bestimmung von Materialkenngrößen mit Hilfe der inversen Laminattheorie
- Validierung und Anpassung bestehender Versagenskriterien von polymeren Faserverbundwerkstoffen
- Experimentelle Bestimmung von Versagenskriterien (Makroebene)
- in Kooperation mit DLR Köln und andere :
 - Kopplung Mikro- / Meso- / Makromodelle
 - Nicht lineare Berechnungen
- Untersuchung Berechnungsmethoden für Brennkammer
- Vergleich zwischen:
 - FEM-Ergebnisse
 - und Dehnungsmessungen bei hohen Temperaturen im Brennkammerprüfstand (optische Messverfahren)



Prinzip der inversen Laminattheorie
(Zebdi, Boukhili, Trochu 2008)



FEM: Mikro-, Meso- und Makromodelle



Inhalt

- Einführung
- Schwerpunkte der Auslegung
- CMC-Befestigungskonzepte
- Aktueller Simulationsprozess
- Entwicklungsschwerpunkte
- **Zusammenfassung**



Zusammenfassung

- Auslegungsschwerpunkte von CMCs bekannt
- Wegen Vielfalt von CMC-Varianten, Anwendung „einer“ Simulationemethode schwierig
- Simulation und Experiment müssen weiter parallel verfolgt werden
 - Nötige Weiterentwicklung von Messtechnologie bei hohen Temperaturen (Dehnungsmessungen)
- Grundlagenforschung für Simulationsmodelle:
 - Inverse Laminattheorie
 - Versagenskriterien
 - Parametrisierte Mikrostruktur-Modelle (Vortrag H.Richter, M.Bartsch)
 - Kopplung Mikro-, Meso- und Makromodelle
- Grundlagenforschung für Lebensdauervorhersage von CMCs im Einsatz notwendig:
 - Defekteinflüsse
 - Schadensentwicklung





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !



Et Merci !