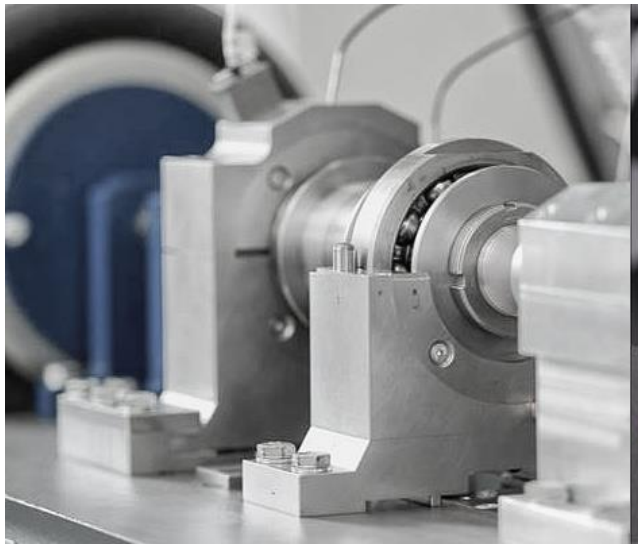
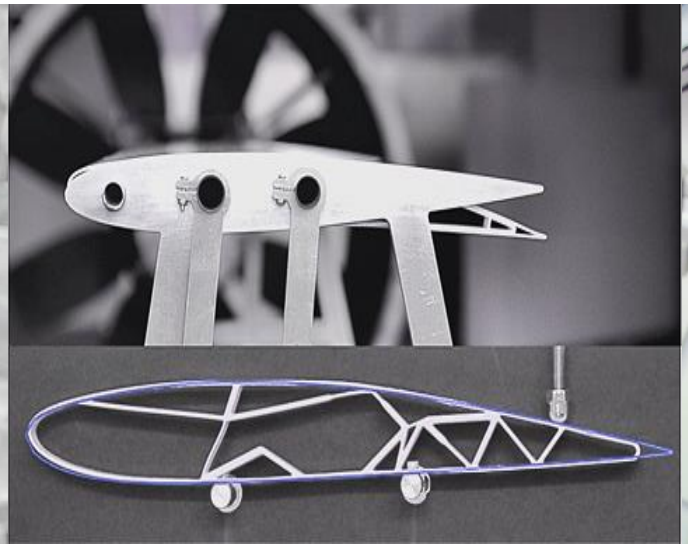
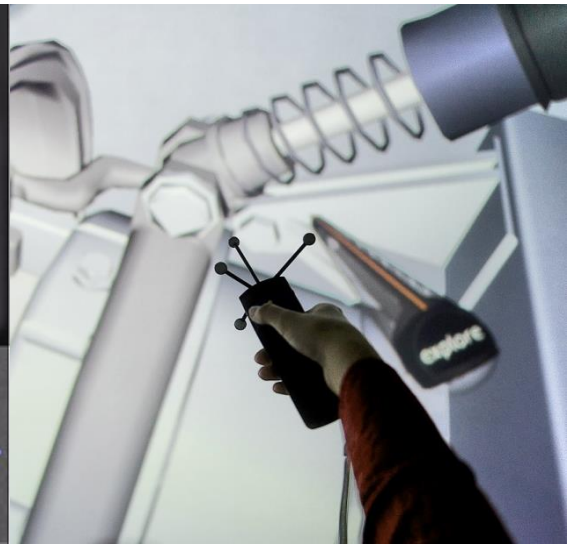
GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Vereinfachte Simulation von Klebeverbindungen an Hybridstrukturen durch Einsatz von Metamodellen

C. Witzgall; S. Wartzack

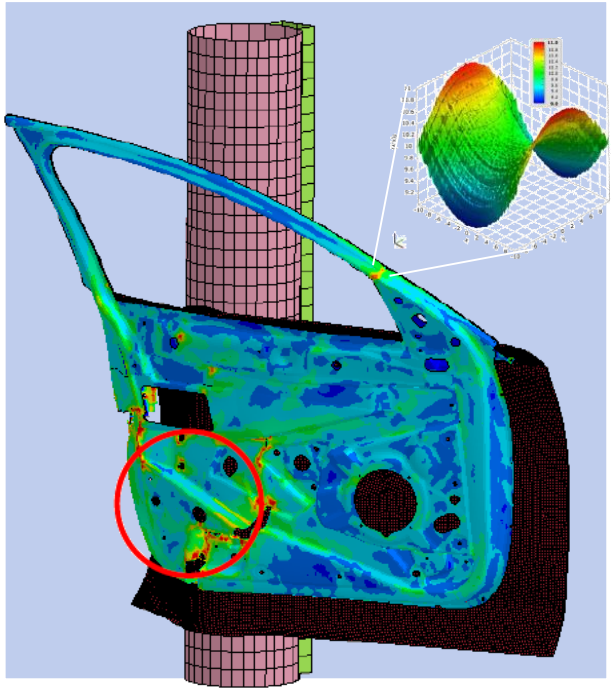






GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Gliederung



- Einführung: Problemstellung und Motivation
- Experimentelle Charakterisierung
- Detaillierte Simulation zur Bildung des Metamodells
- Validierung im Seitenaufprall-Test

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Unsere Lage

- …im Zentrum der Metropolregion Nürnberg
- …in einer der industriell stärksten Regionen Deutschlands
- …in einer der innovativsten Regionen Deutschlands
- Schwerpunkte:
  - Automotive
  - Maschinenbau
  - Herz der Wälzlagerindustrie
  - Energietechnik
  - Elektrotechnik
  - Medizintechnik

© LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Struktur

- Philosophische Fakultät und Fachbereich Theologie
- Rechts- und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät
- Medizinische Fakultät
- Naturwissenschaftliche Fakultät
- **Technische Fakultät**
  - Department Chemie- und Bioingenieurwesen
  - Department Elektrotechnik – Elektronik – Informationstechnik
  - Department Informatik
  - Department Werkstoffwissenschaften
  - Department Maschinenbau

© LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

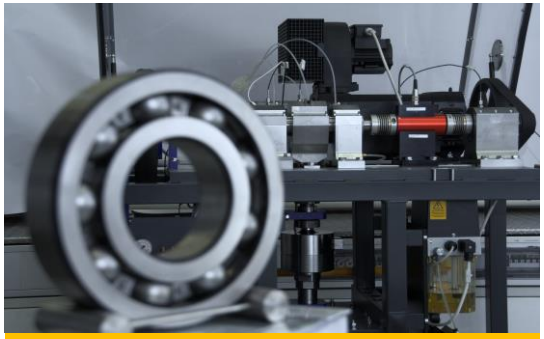
Organigramm und Fachgruppen

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

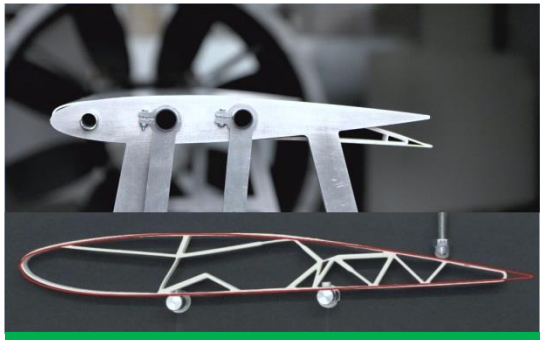
Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

- Assistenzsysteme
- Leichtbau
- Nutzerzentrierte Produktentwicklung
- Toleranzmanagement



Maschinenelemente und Bauteilauslegung

- Tribologische PVD-/ PACVD-Schichten
- Wälzlagertechnik



Mechatronische Systeme im Maschinenbau

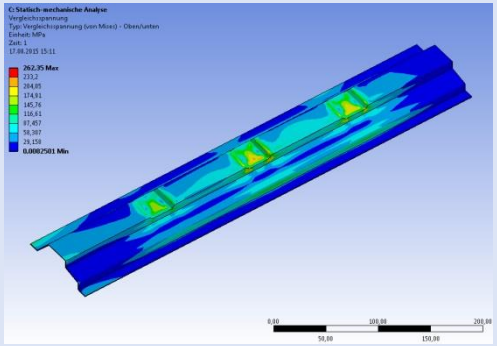
- Nachgiebige Mechanismen
- Formadaptive Strukturen
- Elastische Sensoren und Aktoren

© LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

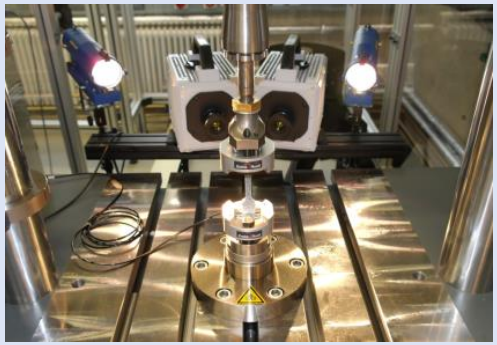
Leichtbau

Simulationsbasierte Auslegung



Auslegung faserverstärkter Kunststoffbauteile in frühen Entwicklungsphasen

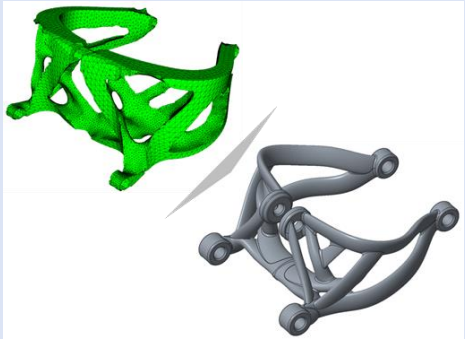
Werkstoffcharakterisierung



Generierung von Materialkarten für FEM

Materialparameteroptimierung

Strukturoptimierung



Automatisierte Interpretation von Strukturoptimierungs-ergebnissen

LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
Prof. Dr. sc. ETH Alexander Hasse

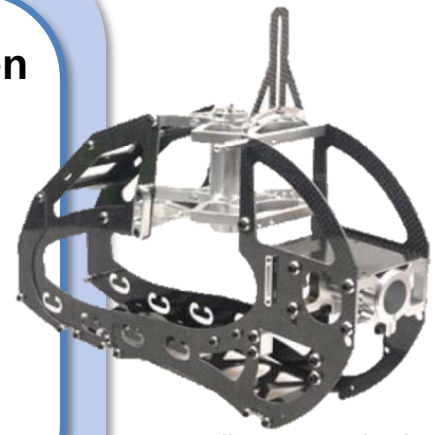
Problemstellung

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

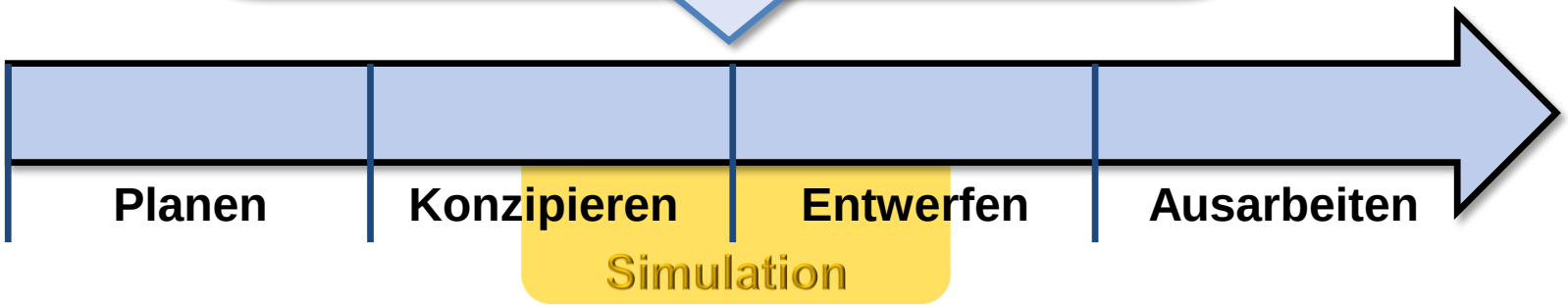
Quelle: BMW

Probleme bei CFK-/Aluminium-Fügeverbindungen

- Komplexe mechanische Eigenschaften des CFK
- $\Delta\alpha$ – Problematik
- Unbekannte Crash-Eigenschaften
- Schwierige Auslegung



Quelle: MIT Robotics



Frühzeitiger Einsatz simulativer Methoden zur Absicherung der Produkteigenschaften

Adhäsiv gefügte Hybridstrukturen

Leichtbau-Fahrzeugtür

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

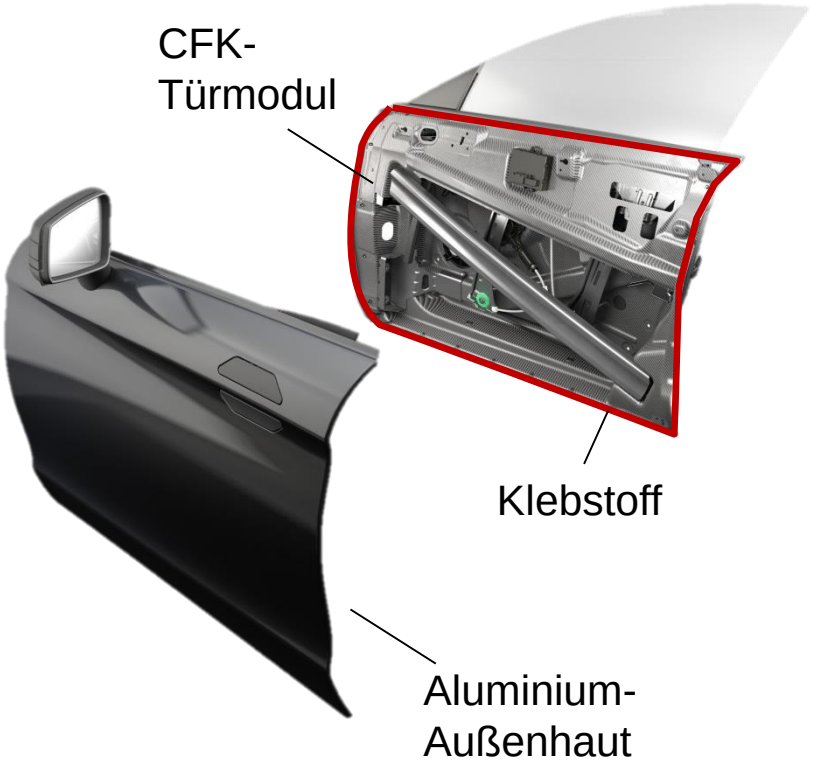
Ausgangssituation: Leichtbau-Fahrzeugtür

- Aluminium-Außenhaut
- Innenliegendes CFK-Türmodul
- Verklebt durch Polyurethan-Klebstoff

- Detaillierte Simulation der Fügeverbindung komplex und aufwändig

Zielsetzung:

- Auf Metamodellen basierende Simulationsmethode für hochwertige Ergebnisse bei geringem Aufwand



Quelle: Brose

Simulation von Fügeverbindungen

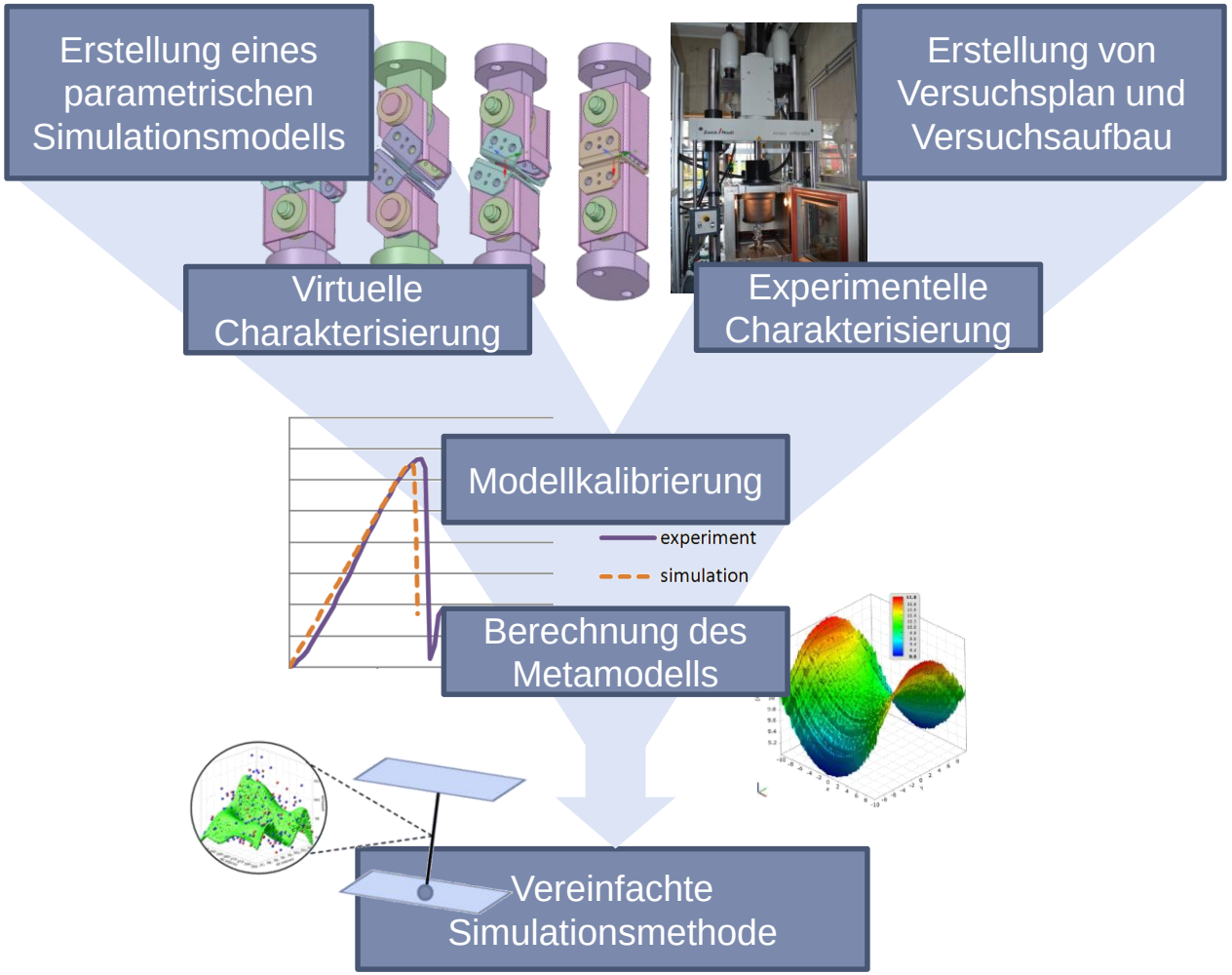
BMBF-Verbundprojekt „REAL4HYBRID“

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

KT mfk

Rechnergestützte **Aus**legung von Fügeverbindungen an Aluminium/CFK-**Hybrid**strukturen



Projektpartner:

brose Technik für Automobile

CADFEM®

dynardo

REAL4HYBRID

© LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

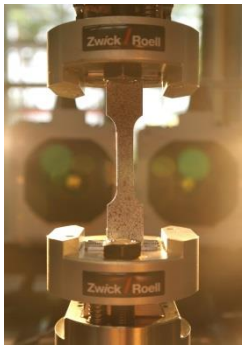
Experimentelle Charakterisierung

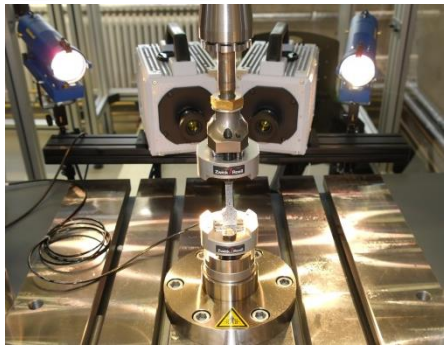
Prüfausstattung

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Zwick HTM5020

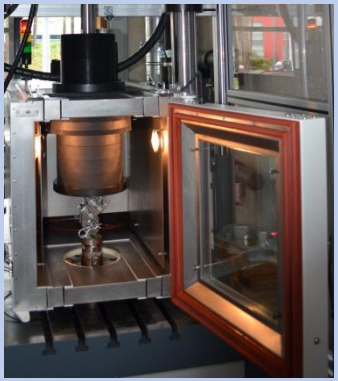
Bildquelle: Zwick





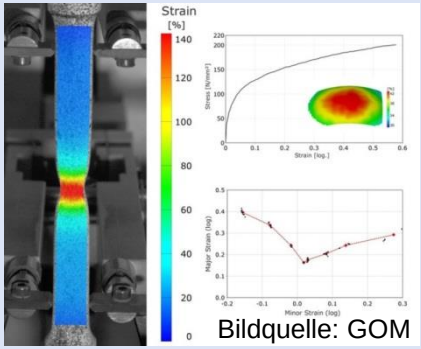
Durchführung hoch-dynamischer Zug- und Druckversuche (0,001 bis 20 m/s)

Temperaturkammer



Temperierung zwischen -60 und 150 °C

Messsystem GOM Aramis



Bildquelle: GOM

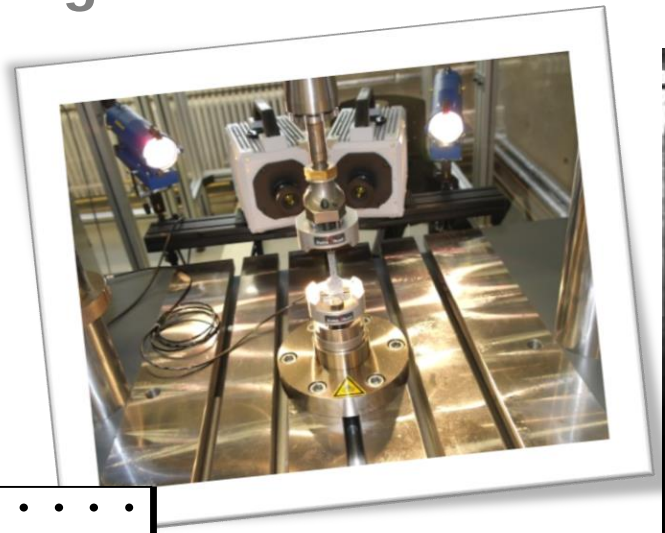
Aufnahmen mit bis zu 750.000 fps und optische Dehnungsmessung

Ermittlung von Materialparametern

Optische Dehnungsmessung

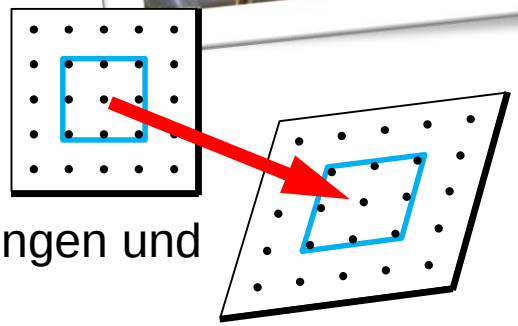
Hochgeschwindigkeitskameras

- Aufnahmen bis 150.000 fps
- Stereoskope Anordnung
- 0,01% - 100% Dehnungs-auflösung



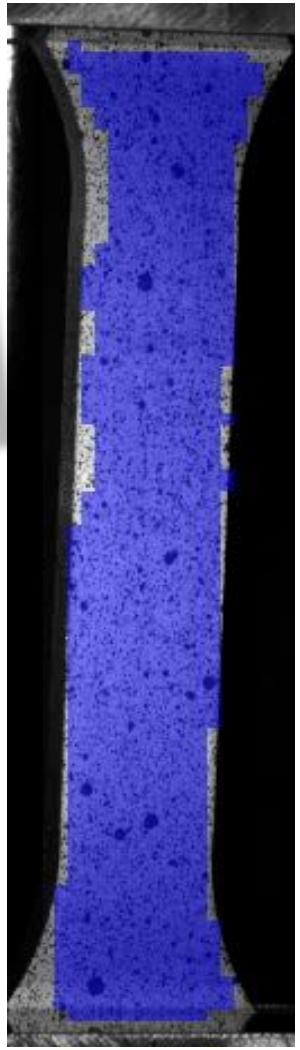
Grauwertkorrelation

- Bestimmung der Dehnung durch Relativverschiebung der Sprenkelflächen
- Identifikation von Einschnürungen und Dickenabnahme



Beispiel

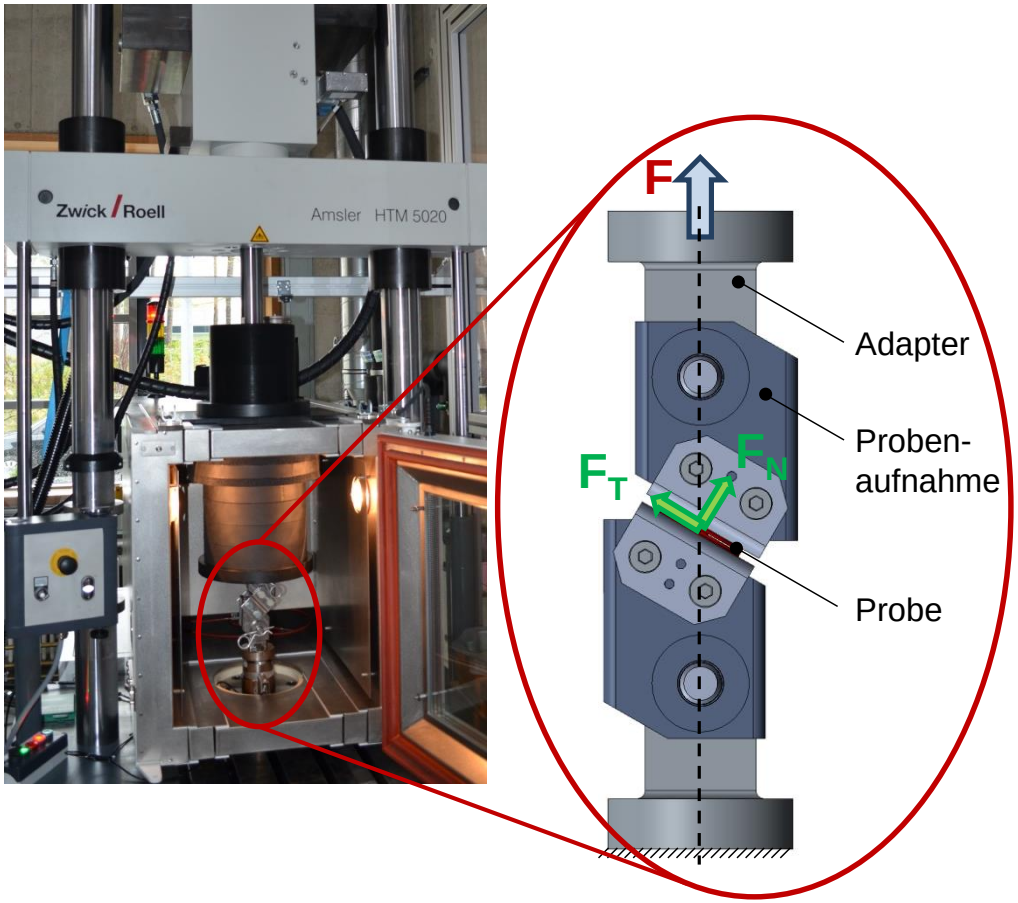
- Zugversuch, Abzugsgeschwindigkeit 5 m/s
- Aufnahme mit 60.000 fps, Dehnung überlagert



Experimentelle Charakterisierung

Klebeverbindungen auf dem Prüfstand

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung



Prüfbedingungen

- Temperaturen von -30 bis +80°C
- Verschiedene Prüfgeschwindigkeiten
- Überlagerte Spannungszustände aus Normal- und Schubspannungen
- Verschiedene CFK-Lagenaufbauten

Zielsetzung:

- Untersuchung verschiedener Versagensmoden
- Ermittlung der Zerreißkräfte

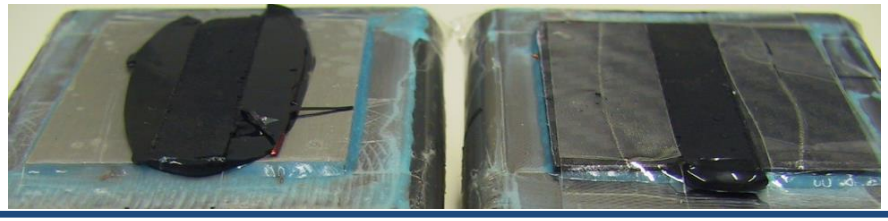
© LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK

Prüfergebnisse
Versagensarten

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

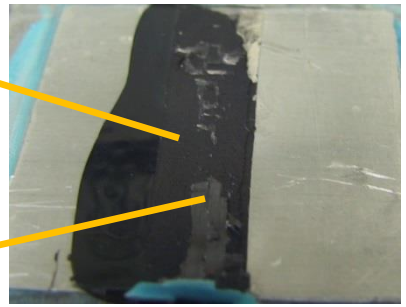
Adhäsives Versagen auf der Aluminium-Oberfläche

Kohäsives Versagen



Delamination des CFK

Mischversagen



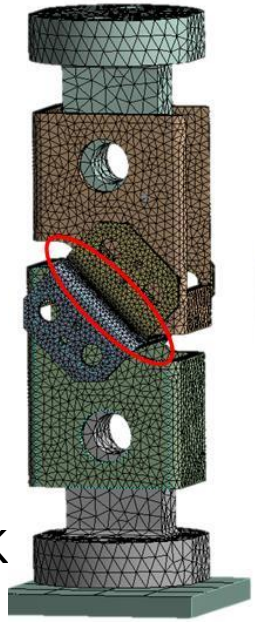
© LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

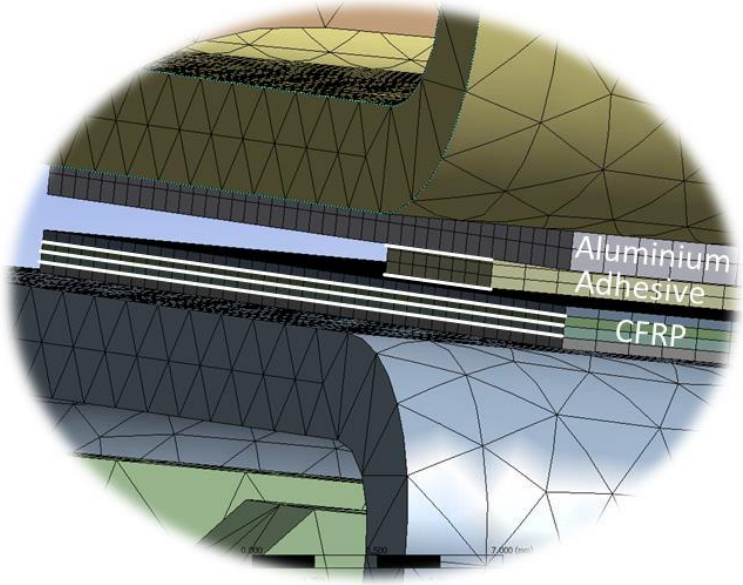
Detailsimulation des Prüfszenarios

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Virtuelle Charakterisierung:

- Detaillierte Modellierung des Prüfaufbaus:
  - Parametrisches Simulationsmodell
  - Volumenvernetzung der Klebschicht
  - Kohäsivzonen-Modelle
  - Schichtweise Volumenvernetzung der CFK Lagen





- Kalibrierung der Detailsimulation an den experimentellen Ergebnissen
- **Sampling** der Detailsimulation als Datenbasis des Metamodells

Einsatz der Metamodelle:

- Statt einer detaillierten Modellierung der Klebung greifen Kontakt-elemente auf das Metamodell zu
- Kontaktstatus und –festigkeit werden aus dem Metamodell abgerufen

© LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

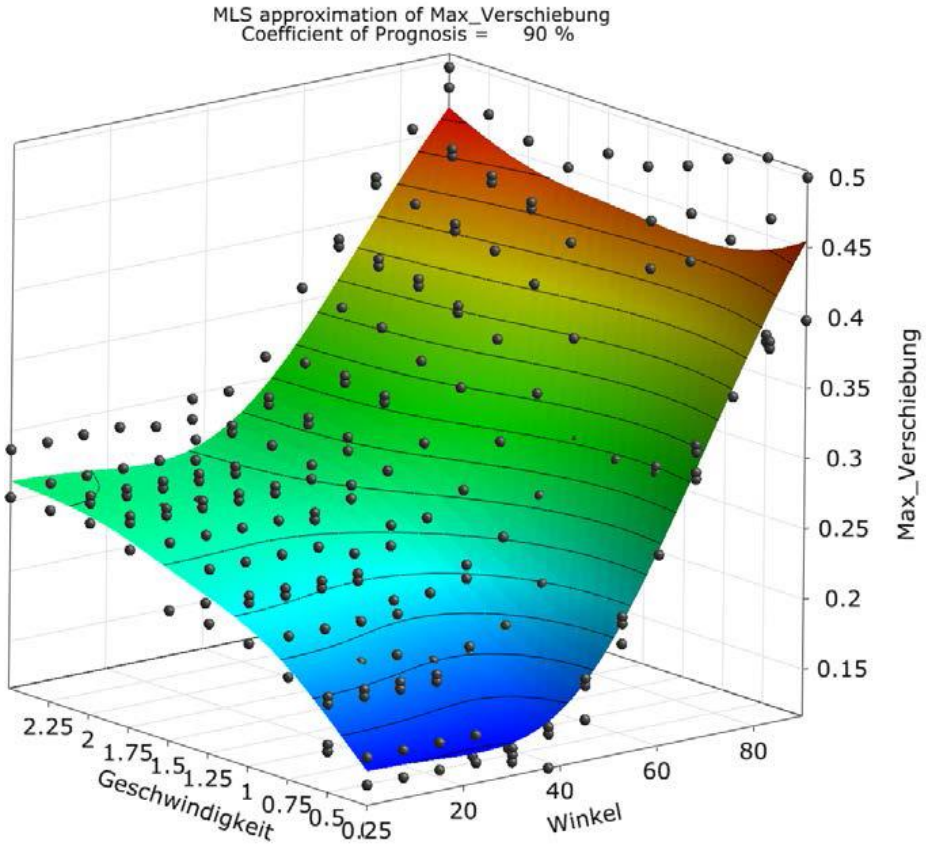
Aufbau des mathematischen Metamodells

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Metamodellierung:

- Mathematische Repräsentation des detaillierten Simulationsmodells:
  - Abbildung der maximalen Verschiebung bzw. maximalen Kraft
- Identifizierung der dominanten Einflussparameter:
  - Geschwindigkeit
  - Winkel
  - Temperatur

- Prognosequalität der Charakterisierungsergebnisse bei **99%(Kraft)** bzw. **90% (Verschiebung)**
  → gute Eignung als Ersatz der detaillierten Simulation



Antwortfläche der maximalen Verschiebung über Lastgeschwindigkeit und -winkel. Punkte: gemessene Werte

© LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK

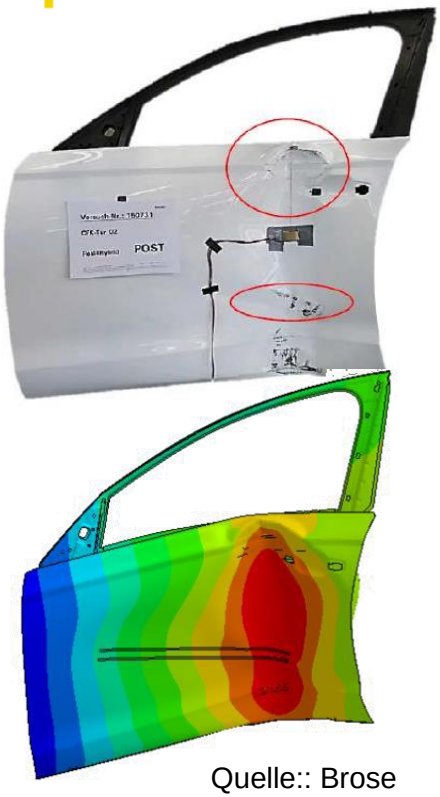
Validierung

Seitenaufpralltest einer Fahrzeugtür

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

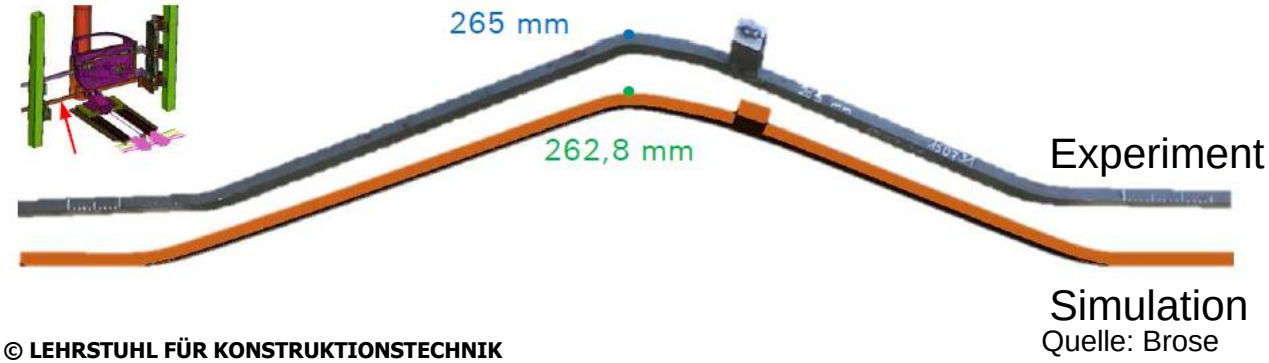
Pfahl-Seitenaufpralltest einer Fahrzeugtür

- Komponentenprüfstand zur Abbildung der Nachgiebigkeit des Rahmens
- Testaufbau gemäß EuroNCAP
- Aufprallgeschwindigkeit 30 km/h



Quelle:: Brose

- **Abgleich von Simulation und Experiment:**
  - Versagen des Klebstoffs
  - Eindringtiefe des Pfahls: 265 mm (Experiment) vs. 262,8 mm (Simulation)



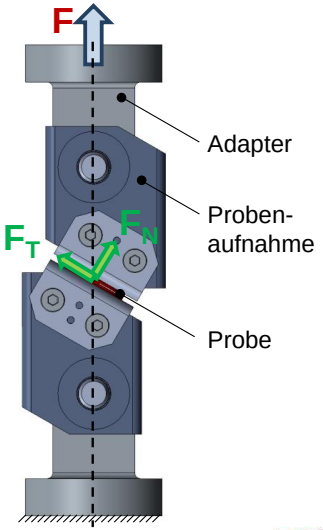
Quelle: Brose

Zusammenfassung

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

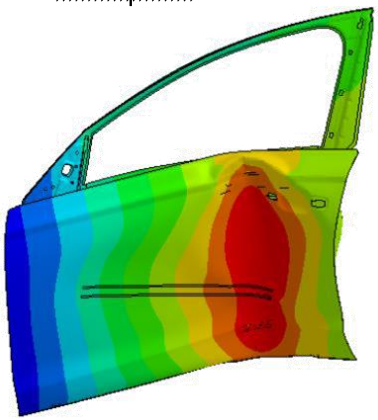
Experimentelle Charakterisierung

- Prüfung der Klebeverbindung bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Temperaturen
- Überlagerung verschiedener Spannungszustände in der Klebefuge
- Auftreten verschiedener Versagensarten



Detailsimulation zur Metamodellierung

- Parametrische Simulation der Charakterisierungs-Experimente
- Kalibrierung der Simulation an die Testergebnisse
- Sampling zum Aufbau der Metamodelle



Validierung

- Pfahl-Seitencrash auf Fahrzeugtür
- Gute Korrelation der experimentellen und simulativen Ergebnisse

Zukünftige Arbeiten

- Ausbau der Simulationsmethode auf andere Fügeverbindungen, z. B. Nieten oder Flowdrill-Schrauben