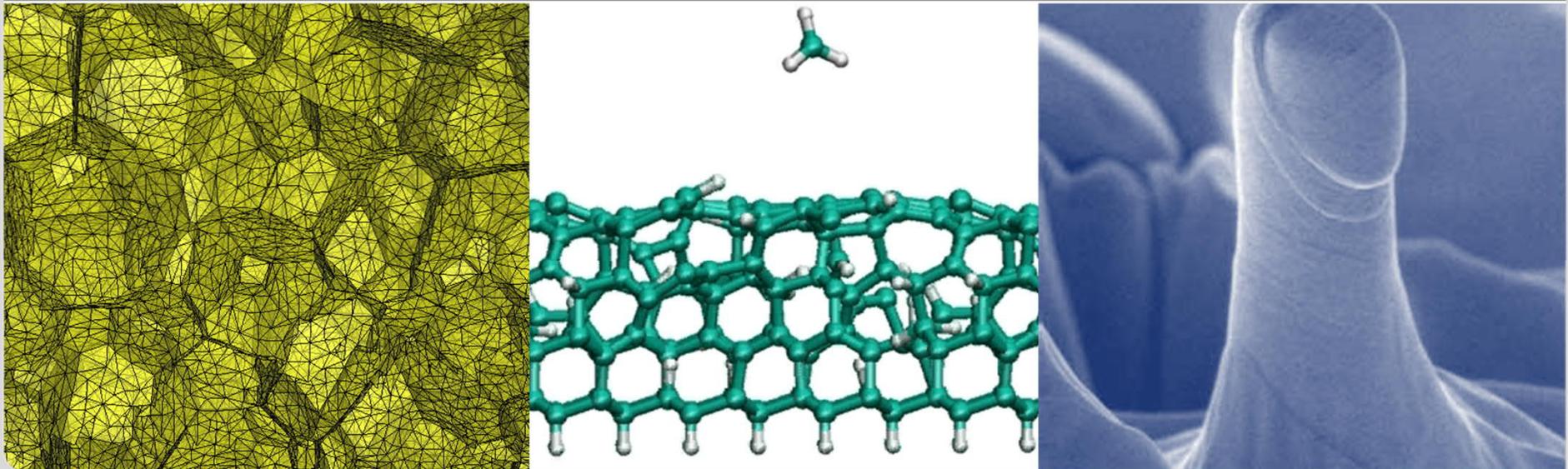


# Schwerpunkt 49: Zuverlässigkeit im Maschinenbau

**Koordinator: Prof. Dr. Peter Gumbsch, IAM-CMS**

INSTITUT FÜR ANGEWANDTE MATERIALIEN -- IAM-CMS

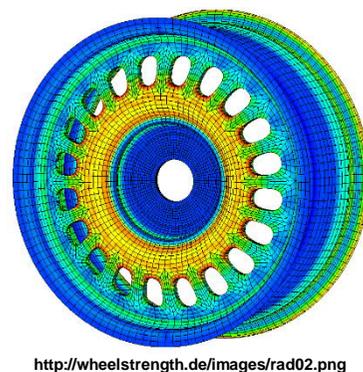
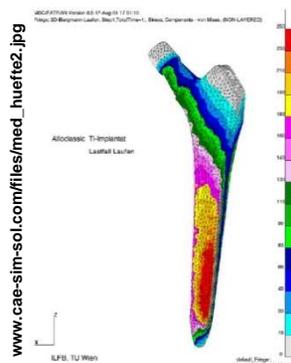


# SP49 Zuverlässigkeit im Maschinenbau

## *Für wen ist der Schwerpunkt 49 genau das Richtige?*

**Freude am und Erfolg im Schwerpunkt 49 sind nicht unwahrscheinlich, wenn ...**

- **bei eher klassischer Ausrichtung**
  - ein ausgeprägtes Interesse am und sehr gute Vorkenntnisse in der Werkstoffkunde bestehen
  - TM und HM während des Bachelor-Studiums nicht zu schlaflosen Nächten geführt haben
- **bei eher rechnergestützter Ausrichtung**
  - zusätzlich großes Interesse an TM und HM besteht
  - Spaß am Programmieren vorhanden ist

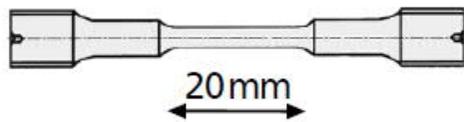


# SP49 Zuverlässigkeit im Maschinenbau

## Beispiel aus der Praxis

### Mehrstufen-Nachweiskonzept der Crashesicherheit des ICE3

#### Werkstoff



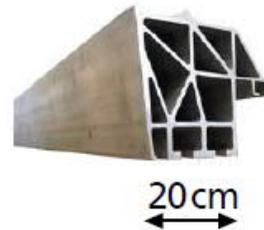
- Zug-, Druck-, Scherversuch statisch, dynamisch



- Simulation Probenversuche



#### Sub-Struktur



- Crash: Langträger, Bodenstruktur, A-Säule



- Simulation Substruktur



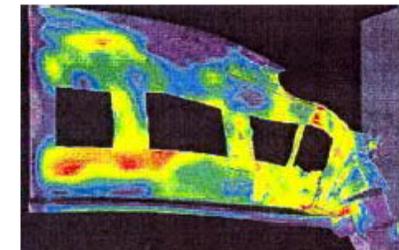
#### Bauteil



- Full-Scale-Test, UIC-Kriterium 2



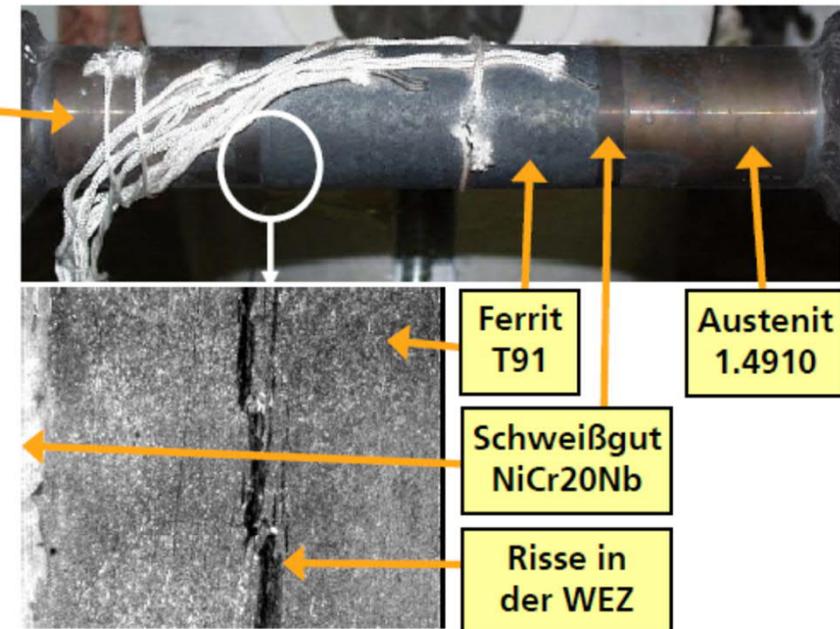
- Simulation Bauteilversuch



# SP49 Zuverlässigkeit im Maschinenbau

## Beispiel aus der Praxis

### Lebensdauervorhersage von ferritisch-austenitischen Rohrmischschweißverbindungen für moderne Kohlekraftwerke



Rohrversuche, zyklische Innendruck-, Zug und Temperaturbelastungen (in Phase)

begleitende Zug-, Kriech- und LCF-Versuche (RT .... 650°C) für die Grundwerkstoffe, das Schweißgut und drei Gefügestände von Wärmeinflusszonen

Temperaturzyklus für Rohrversuche:  
 $T_{\min} = 250^{\circ}\text{C}$ , 3h Aufheizen auf  
 $T_{\max} = 625^{\circ}\text{C}$ , Haltezeit 18h, 3h Abkühlen

## SP49 Zuverlässigkeit im Maschinenbau

### *Beispiel aus der Praxis*

## Schiffshavarie im Indischen Ozean am 17. Juni 2013

### “MOL Comfort”

- Bau 2008
- 316 m Länge
- 45,6 m Breite
- 8110 Standardcontainer
- Schaden > 100 Mio €



### Mögliche Ursachen

- Überladung oder falsche Verteilung von Ladung bzw. Ballastwasser
- fehlerhafte Konstruktion und Auslegung (“non robust design”)
- Versprödung des hochfesten Stahls ( $R_{es} = 460 \text{ MPa}$ ) beim Schweißen

FAZ, 14.10.2014

# SP49 Zuverlässigkeit im Maschinenbau

## Kernfächer

Kat.	V.-Nr. / TL-Nr.	Vorlesung	Dozent/in	SWS	Sem.	LP	Institut
K	T-MACH-102139	Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen Ermüdung und Kriechen (Kernfach)	P. Gruber, P. Gumbsch	2	W	4	IAM-WBM / CMS
K	T-MACH-102140	Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen Verformung und Bruch (Kernfach)	P. Gumbsch, D. Weygand	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105724	Schadenskunde	C. Greiner, J. Schneider	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105354	Schwingfestigkeit metallischer Werkstoffe	S. Guth	2	W	4	IAM-WK
E	T-MACH-105310	Auslegung hochbelasteter Bauteile	J. Aktaa	2	W	4	IAM-WBM
E	T-MACH-105984 / -109304	Ermüdungsverhalten geschweißter Bauteile und Strukturen (V + Ü)	M. Farajian	2	W	4	IAM-WK
E	T-MACH-105516	Plastizität auf verschiedenen Skalen	K. Schulz, C. Greiner	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105334	Mechanik von Mikrosystemen	P. Gruber, C. Greiner	2	W	4	IAM-WBM / CMS
E	T-MACH-105308	Atomistic Simulations and Molecular Dynamics (V + Ü)	D. Weygand, P. Gumbsch	2 + 1	S	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105369	Werkstoffmodellierung: versetzungs-basierte Plastizität	D. Weygand	2	S	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105321	Einführung in die Materialtheorie	M. Kamlah	2	S	4	IAM-WBM
E	T-MACH-100532	Wissenschaftliches Programmieren für Ingenieure	D. Weygand, P. Gumbsch	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-110378 / -110379	Mathematische Methoden der Mikromechanik	T. Böhlke	2 + 1	S	5+1	ITM
E	T-MACH-105392	FEM Workshop -- Stoffgesetze	D. Weygand	2	W/S	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105417	Finite-Element-Workshop	I. Tesari, C. Mattheck, D. Weygand	2	S	4	IAM-WBM / CMS
E	T-MACH 105970	Strukturberechnung von Faserverbundlaminate	L. Kärger	2	WS	4	FAST
E	T-MACH-110954	Leichtbau mit Faser-Verbund-Kunststoffen – Theorie und Praxis	L. Kärger, W. Liebig	2	WS	4	FAST IAM-WK

### Empfohlenes Wahlpflichtfach

T-MACH-100531 Systematische Werkstoffauswahl / S. Dietrich, V. Schulze (IAM-WK)

## Kernfach

### Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen

### Ermüdung und Kriechen -- P. Gruber, P. Gumbsch, IAM-WBM / CMS

Konstruktionswerkstoffe sind vielseitigen Belastungen ausgesetzt, die zu verschiedenen Ursachen und Erscheinungsformen des Versagens von Bauteilen führen.

#### Inhalt

- **Ermüdung, Ermüdungsmechanismen**

- Einführung
- Statistische Aspekte
- Lebensdauer
- Stadien der Ermüdung
- Materialwahl
- Thermomechanische Belastung
- Kerben und Kerbformoptimierung
- Fallbeispiel: ICE-Unglück



- **Kriechen**

- Einführung
- Hochtemperaturplastizität
- Kriechmechanismen
- Phänomenologische Beschreibung
- Legierungseinflüsse

## Kernfach

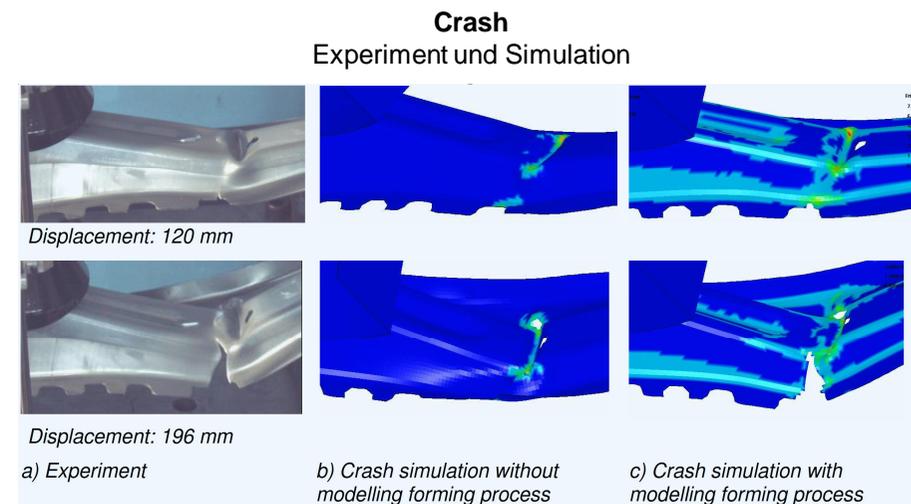
### Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen

### Verformung und Bruch -- D. Weygand, P. Gumbsch, IAM-CMS

Konstruktionswerkstoffe sind vielseitigen Belastungen ausgesetzt, die zu verschiedenen Ursachen und Erscheinungsformen des Versagens von Bauteilen führen.

#### Inhalt

- Einführung
- Grundlagen der Elastizitätstheorie
- Klassifizierung von Spannungen
- Versagen durch plastische Verformung
  - *Zugversuch, Versetzungen, Verfestigungsmechanismen, Dimensionierungsrichtlinien*
- Verbundwerkstoffe
- Bruchmechanik
  - *Bruchhypothesen, linear elastische Bruchmechanik, Risswiderstand, experimentelle Bestimmung der Risszähigkeit, Fehlerfeststellung, Risswachstum, Anwendungen der Bruchmechanik, Atomistik des Bruchs*



[www.dynamore.de/de/download/papers/forum10/papers/H-I-01.pdf/view](http://www.dynamore.de/de/download/papers/forum10/papers/H-I-01.pdf/view)

# SP49 Zuverlässigkeit im Maschinenbau -- **Ergänzungsfächer** *eher klassische Ausrichtung*

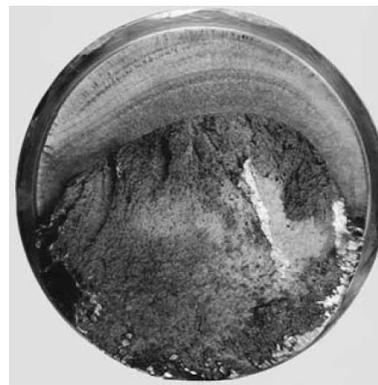
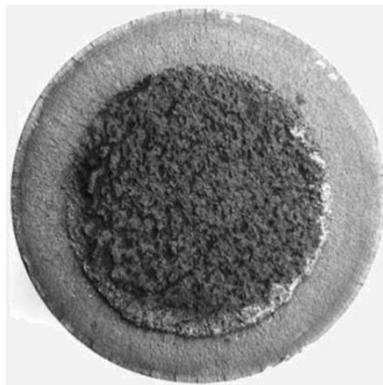
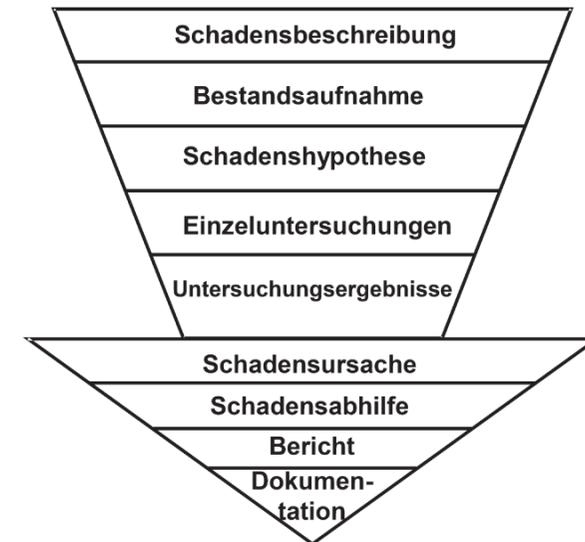


Kat.	V.-Nr. / TL-Nr.	Vorlesung	Dozent/in	SWS	Sem.	LP	Institut
K	T-MACH-102139	Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen Ermüdung und Kriechen (Kernfach)	P. Gruber, P. Gumbsch	2	W	4	IAM-WBM IAM-CMS
K	T-MACH-102140	Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen Verformung und Bruch (Kernfach)	P. Gumbsch, D. Weygand	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105724	Schadenskunde	C. Greiner, J. Schneider	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105354	Schwingfestigkeit metallischer Werkstoffe	S. Guth, K.-H. Lang	2	W	4	IAM-WK
E	T-MACH-105310	Auslegung hochbelasteter Bauteile	J. Aktaa	2	W	4	IAM-WBM
E	T-MACH-105984 / -109304	Ermüdungsverhalten geschweißter Bauteile und Strukturen (V + Ü)	M. Farajian	2	W	4	IAM-WK
E	T-MACH-105516	Plastizität auf verschiedenen Skalen	K. Schulz, C. Greiner	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105334	Mechanik von Mikrosystemen	P. Gruber, C. Greiner	2	W	4	IAM-WBM / CMS

**Weitere Ergänzungsfächer nach Absprache mit dem/der Dozenten/in und Genehmigung durch den Schwerpunktverantwortlichen Prof. Gumbsch möglich!**

## Inhalt

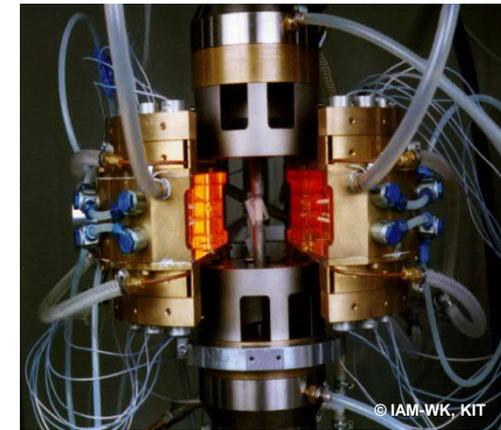
- Ziel, Ablauf und Inhalt von Schadensanalysen
- Untersuchungsmethoden
- Schadensarten
  - Schäden durch mechanische Beanspruchung
  - Versagen durch Korrosion in Elektrolyten
  - Versagen durch thermische Beanspruchung
  - Versagen durch tribologische Beanspruchung
- Grundzüge der Versagensbetrachtung



**Schwingbruchflächen unterschiedlicher Ausprägung**

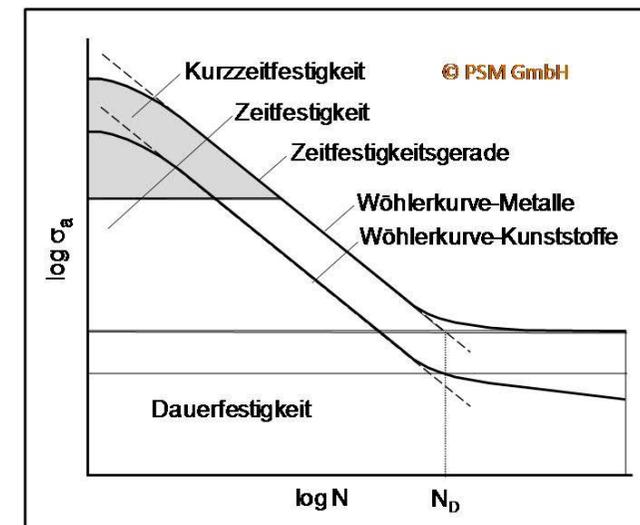
### Ziele

- Überblick über das Verformungs- und Versagensverhalten metallischer Werkstoffe unter zyklischer Beanspruchung
- Beschreibung der grundlegenden mikrostrukturellen Vorgänge als auch der Entwicklung makroskopischer Schädigungen
- Erkennen von Schädigungen durch zyklische Beanspruchungen und Bewertung des Schwingfestigkeitsverhalten zyklisch beanspruchter Bauteile



### Inhalt

- Einleitung: einige „interessante“ Schadenfälle
- Prüfeinrichtungen
- Zyklisches Spannung-Dehnung-Verhalten
- Rissbildung
- Lebensdauer bei zyklischer Beanspruchung
- Kerbermüdung
- Betriebsfestigkeit

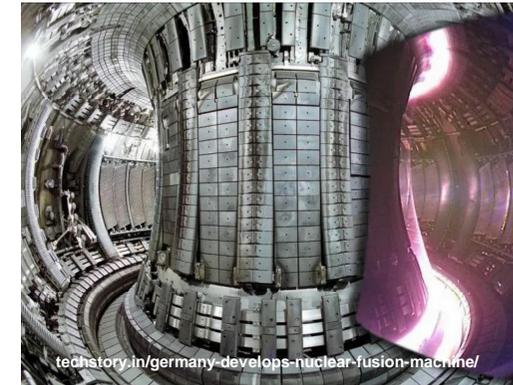
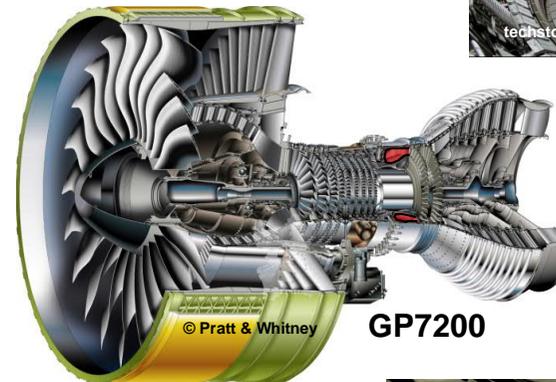


### Stand der Technik

- Regeln gängiger Auslegungsvorschriften: ASME-PVP, RCC-MR, R5 (BS), KTA
- Klassische Stoffgesetze der Elasto-Plastizität und des Kriechens
- Lebensdauerregeln für Kriechen, Ermüdung und Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkung

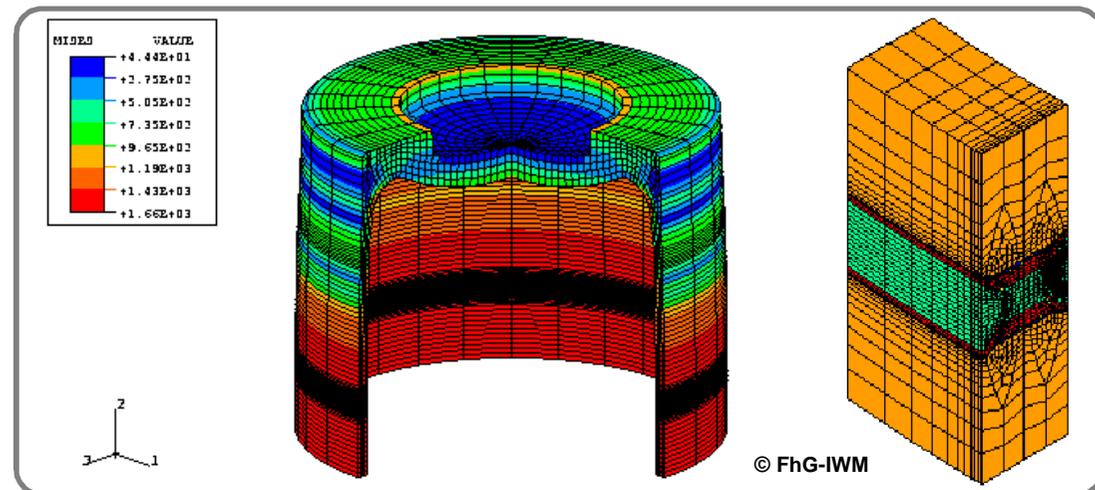
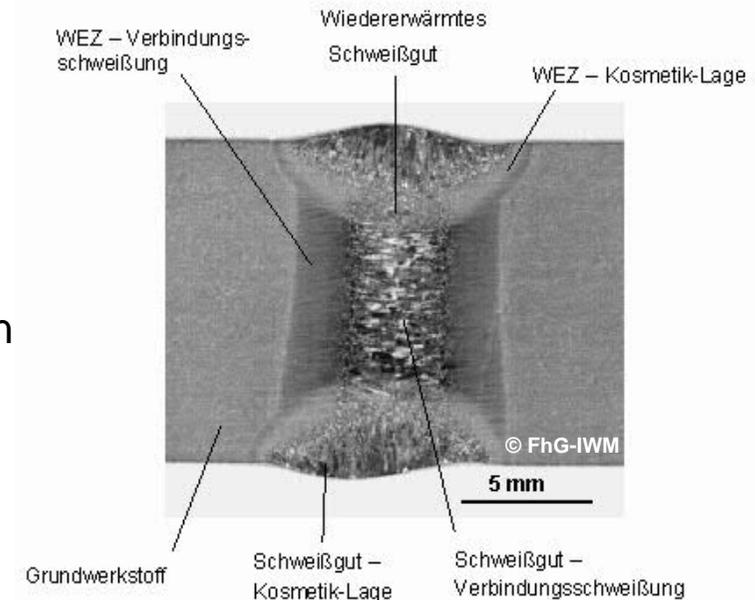
### Stand der Forschung

- Fortgeschrittene Stoffgesetze der Thermo-Elasto-Viskoplastizität
- Kontinuumsmechanische Stoffgesetze für die Schädigung bei hohen Temperaturen
- Einsatz fortgeschrittener Stoffgesetze bei der Strukturanalyse von Komponenten



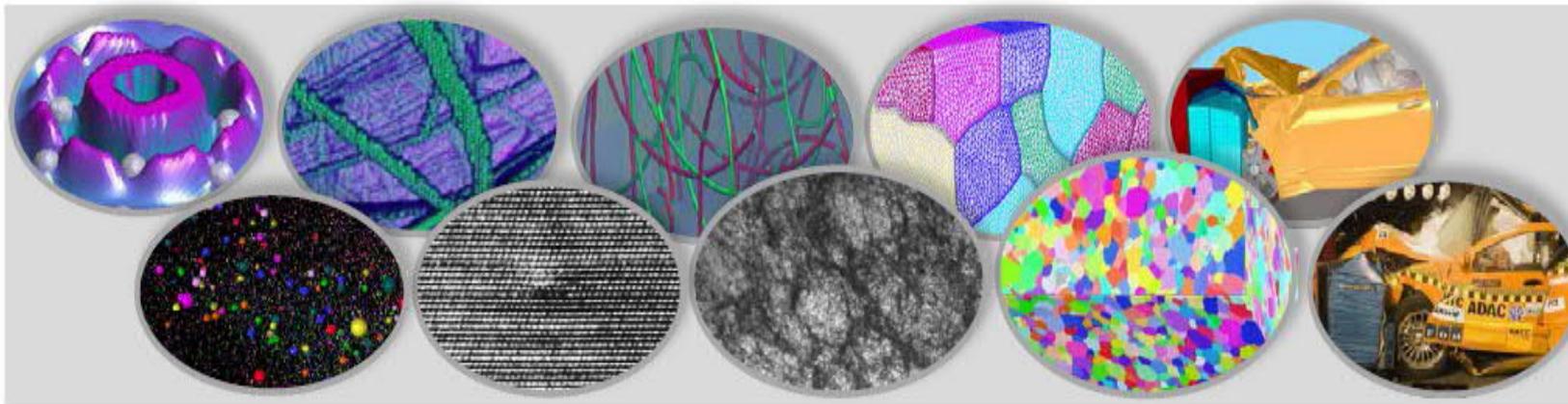
## Inhalt

- Schweißnahtqualität
- Schadensfälle bei Schweißverbindungen
- Bewertung von Kerben, Fehlern und Eigenspannung
- Festigkeitskonzepte
  - Nenn-, Struktur-, Kerbspannungskonzepte
  - Bruchmechanik
- Lebensdauerbewertung
- Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer mittels Nachbehandlungsverfahren
- Instandsetzung, Ertüchtigung und Reparaturmaßnahmen



#### Inhalt

- Die Studenten werden an komplexe Themengebiete der Werkstoffmechanik herangeführt. Dies geschieht durch studentische Vorträge und Besprechung von bedeutenden Veröffentlichungen aus dem Bereich Plastizität.



### Inhalt

- Verständnis mechanischer Phänomene in kleinen Dimensionen
- Materialien und deren Eigenschaften für Mikrosysteme
- Messung mechanischer Eigenschaften von Mikrostrukturen und -materialien
- Wirkprinzipien mechanischer Sensoren
- Wirkprinzipien Mikroaktoren

**Produkt**

**Eigenschaften**

**Testen**

digital camera  
linear air bearing  
1 N max load cell  
capacitance gage  
5-axis picomotor stage

**Wirkprinzip**

fixed electrode  
proof mass  
cantilever  
anchor  
L  
t  
W  
x  
y  
z

# SP49 Zuverlässigkeit im Maschinenbau -- **Ergänzungsfächer** *eher rechnergestützte Ausrichtung "Werkstoffkunde"*

Kat.	V.-Nr. / TL-Nr.	Vorlesung	Dozent/in	SWS	Sem.	LP	Institut
K	T-MACH-102139	Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen Ermüdung und Kriechen (Kernfach)	P. Gruber, P. Gumbsch	2	W	4	IAM-WBM IAM-CMS
K	T-MACH-102140	Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen Verformung und Bruch (Kernfach)	P. Gumbsch, D. Weygand	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105308	Atomistic Simulations and Molecular Dynamics (V + Ü)	D. Weygand, P. Gumbsch	2 + 1	S	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105369	Werkstoffmodellierung: versetzungs-basierte Plastizität	D. Weygand	2	S	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105321	Einführung in die Materialtheorie	M. Kamlah	2	S	4	IAM-WBM
E	T-MACH-100532	Wissenschaftliches Programmieren für Ingenieure	D. Weygand, P. Gumbsch	2	W	4	IAM-CMS
E	T-MACH-110378 / -110379	Mathematische Methoden der Mikromechanik	T. Böhlke	2 + 1	S	5+1	ITM
E	T-MACH-105392	FEM Workshop -- Stoffgesetze	D. Weygand	2	W/S	4	IAM-CMS
E	T-MACH-105417	Finite-Element-Workshop	I. Tesari, C. Mattheck, D. Weygand	2	S	4	IAM-WBM / CMS
E	T-MACH 105970	Strukturberechnung von Faserverbundlaminate	L. Kärger	2	WS	4	FAST
E	T-MACH-110954	Leichtbau mit Faser-Verbund-Kunststoffen – Theorie und Praxis	L. Kärger, W. Liebig	2	WS	4	FAST IAM-WK

**Weitere Ergänzungsfächer nach Absprache mit dem/der Dozenten/in und  
Genehmigung durch den Schwerpunktverantwortlichen Prof. Gumbsch möglich!**

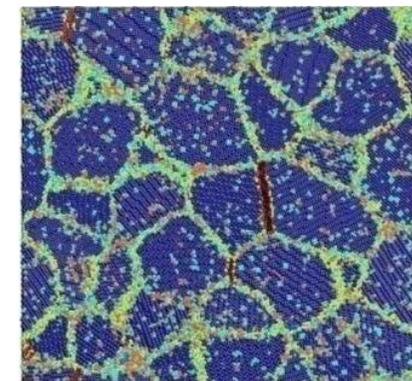
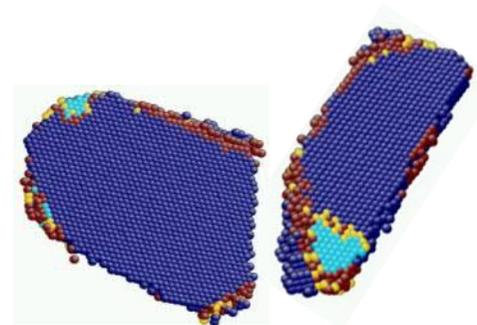
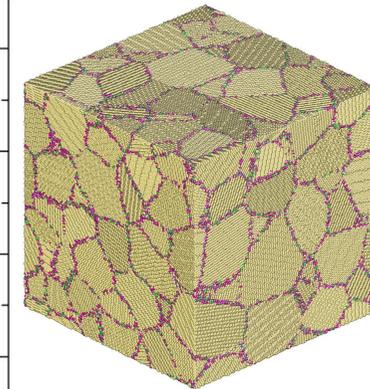
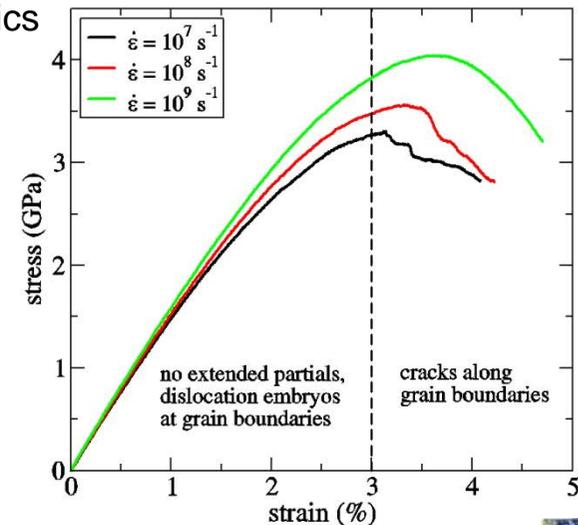
### Aim

introduction to the physical foundation of particle based simulation methods focussing on molecular dynamics

### Content

- physics of materials
- MD basics, atom-billard
  - particle, position, energy, forces, pair potentials
  - initial and boundary conditions
  - time integration
- algorithms
- statics, dynamics, thermodynamics
- MD output
- interaction between particles
  - pair potential – multi body potentials
  - principles of quantum mechanics
  - tight binding methods
  - dissipative particle dynamics
- application of particle based methods

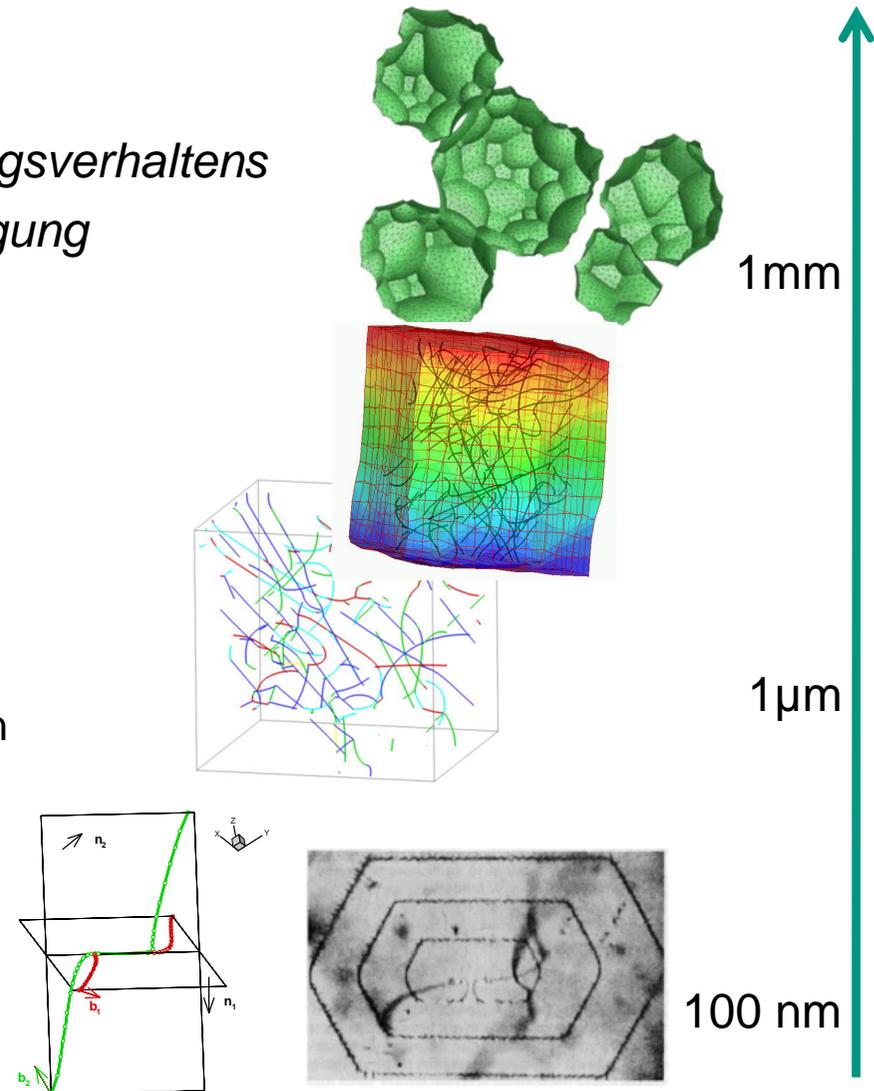
### deformation mechanisms of nano-crystalline materials



#### Ziel

*Beschreiben und Verstehen des Verformungsverhaltens aufgrund der kollektiven Versetzungsbewegung*

- Elastische Felder von Versetzungen
- Abgleiten, Kristallographie
- Bewegungsgesetze von Versetzungen in kfz und krz Materialien
- Wechselwirkung zwischen Versetzungen
- Versetzungsdynamik in 2 und 3 Dimensionen
- Kontinuumsbeschreibung von Versetzungen
- Mikrostrukturentwicklung - Gefügeentwicklung - Kornwachstum





### Ziel

Vermittlung des theoretischen und praktischen Grundwissen des wissenschaftlichen Rechnens, um die Analyse und die numerische Behandlung einer wissenschaftlichen Fragestellung erfolgreich durchzuführen.

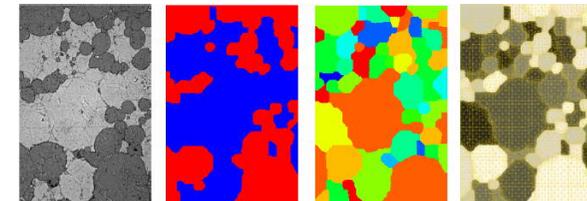
Anhand der Übungsaufgabe "**Entwicklung einer einfachen Teilchendynamiksimulation**" werden alle Elemente eines Simulationsprogramms behandelt.

### Inhalt

- Umgang mit Linux/Unix Umgebung  
Login - Organisation der Daten – Dateisystem  
Shellkommandos - Jobverwaltung - Editoren
- **Programmiersprache C++**  
Aufbau des Quellcodes - Programmierung - Compilation - Debuggen
- Umgang mit Bibliotheken, Visualisierung  
STL - BLAS - VTK
- Konzeption eines Programms: Partikeldynamik
- Visualisierung von Daten und Ergebnissen unter Unix

### Ziel

Einführung in die grundlegenden Prinzipien der Variationsrechnung und die Variationsprinzipien der Mechanik sowie in die Homogenisierungsmethoden zur Beschreibung von Werkstoffen mit Mikrostruktur



### Inhalt

- **Grundlagen der Variationsrechnung**
  - Funktionale; Frechet-Differential; Gateaux-Differential; Extremwertprobleme; Grundlemma der Variationsrechnung und Lagrange'scher Delta-Prozess; Euler-Lagrange-Gleichungen
- **Anwendungen: Prinzipien der Kontinuumsmechanik**
  - Variationsprinzipien der Mechanik; Variationsformulierung des Randwertproblems der Elastostatik; Verfahren von Ritz; Finite-Element-Methode
- **Anwendungen: Homogenisierungsmethoden für Werkstoffe mit Mikrostruktur**
  - Mesoskopische und makroskopische Spannungs- und Dehnungsmaße
  - Homogenisierung elastischer Werkstoffeigenschaften I: Elementare Schranken nach Voigt und Reuss; Hashin-Shtrikman-Schranken
  - Homogenisierung elastischer Werkstoffeigenschaften II: Abschätzungen effektiver elastischer Eigenschaften

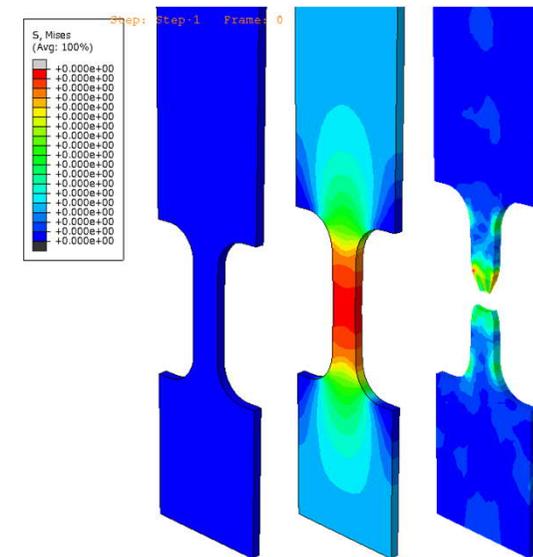
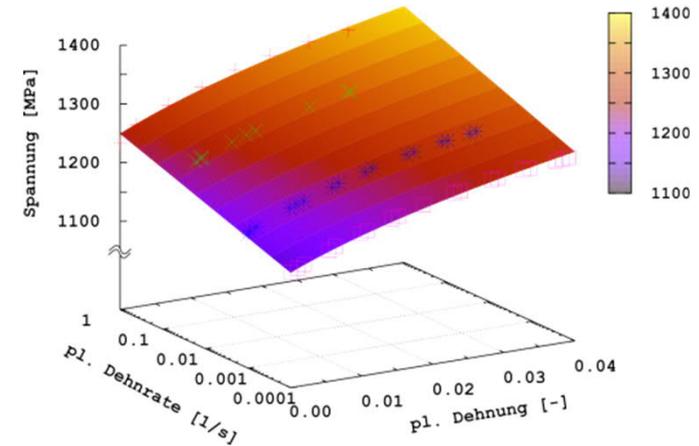
## Inhalt

Wiederholung theoretischer Grundlagen und  
Vermittlung praxisorientierter Aspekte der  
Werkstoffmodellierung

## Veranstaltungsmodus

Ergänzung zu „Einführung in die Materialtheorie“  
und als Einzelveranstaltung mit den Themen

- Einführung in die FEM-Grundlagen  
und grundlegende Stoffgesetzklassen
- Einführung in das Programmpaket **ABAQUS**
- Simulation von Zugversuchen bei elastischen  
und plastischen Werkstoffeigenschaften
- Berücksichtigung zeitabhängigen Materialverhaltens

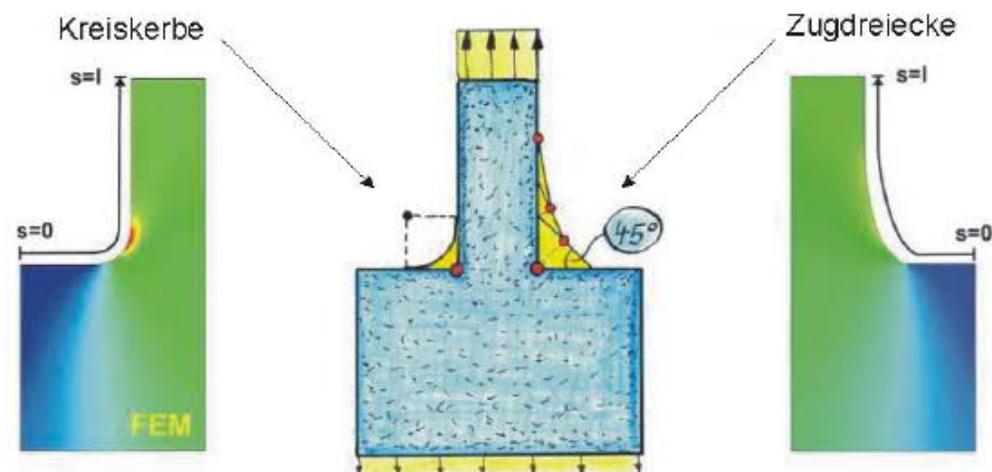


## Ziel

- Durchführung von Spannungsanalysen für einfach Bauteile mit Hilfe der kommerziellen Finite Element Software ANSYS
- Optimierung der Gestalt von Bauteilen hinsichtlich der Spannungsverteilung mit Hilfe der Methode der Zugdreiecke

## Inhalt

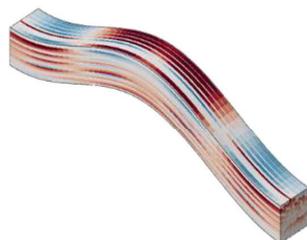
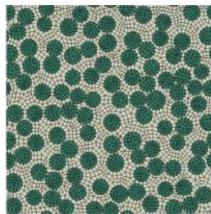
- Finite Element Methode  
*Modellierung, Analyse, Post-Processing*
- Kerbspannungen  
*Spannungsanalysen an Bauteilkonkavitäten (Kerben)*
- Methode der Zugdreiecke  
*Kerbformoptimierung mit der Zugdreieckmethode*



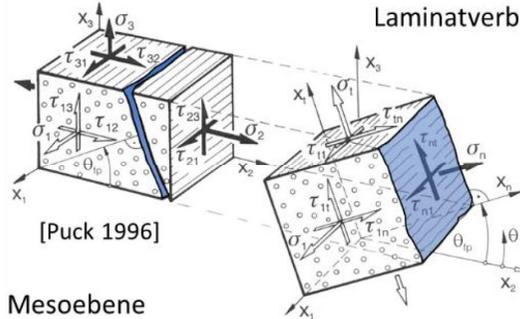
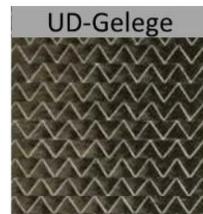
### Inhalt

Die Lehrveranstaltung widmet sich der Berechnung des Material- und Strukturverhaltens von FVK-Bauteilen mit kontinuierlicher Faserverstärkung und vermittelt das dafür nötige Werkstoff- und Prozessverständnis.

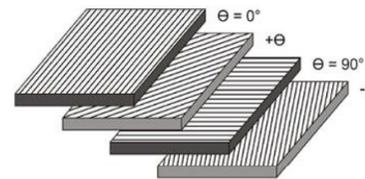
- Mikromechanik und Homogenisierung des Faser-Matrix-Verbundes
- Makromechanisches Verhalten der Einzelschicht
- Verhalten des Mehrschichtverbunds
- FE-Formulierungen
- Versagenskriterien
- Schädigungsanalyse
- Auslegung von FVK-Bauteilen



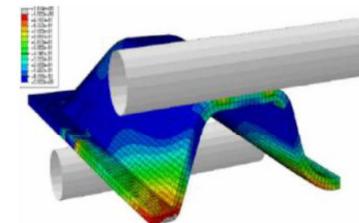
Mikroebene  
(Faser und Matrix)



Mesoebene  
(Einzelschicht)



Laminatverbund



Makroebene  
(Bauteil)

## Inhalt

Ein gemeinsames Lehrkonzept des FAST-LBT und IAM-WK bringt den Studierenden Theorie und Praxis in Bezug auf Leichtbau mit Faserverbundkunststoffen näher. Die Studierenden werden in kleinen Gruppen (max. 4 Personen) mit einer Ingenieuraufgabe im Leichtbaukontext konfrontiert, z.B. der Auslegung eines möglichst tragfähigen Biegebalkens mit Bauraum- und Gewichtsbeschränkung. Zur Lösung des Problems werden verschiedene Materialien (Fasern, Harze, Schäume, etc.) und die notwendigen Materialdaten zur Verfügung gestellt, welche beliebig kombiniert werden können.

- Grundlagen Leichtbaustrategien
- Grundlagen Faser-Verbund-Kunststoffe
- Grundlagen FEM-Simulation  
mit nicht-isotropen Multimaterialsystemen
- Simulative Bauteilbetrachtung
- Fertigung von Faser-Verbund-Kunststoffen
- Mechanische Prüfung

