Einflüsse und Methoden zur Lebensdauer-abschätzung von spritzgegossenen, glasfaser-verstärkten Polymerbauteilen im Automobilbau

Dr.-Ing. Stephan Vervoort

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

- nCode Produkte -

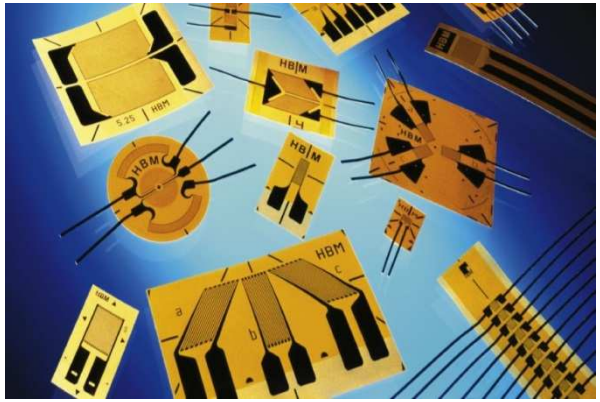
Quelle: sueddeutsche.de, blog.meinauto.de

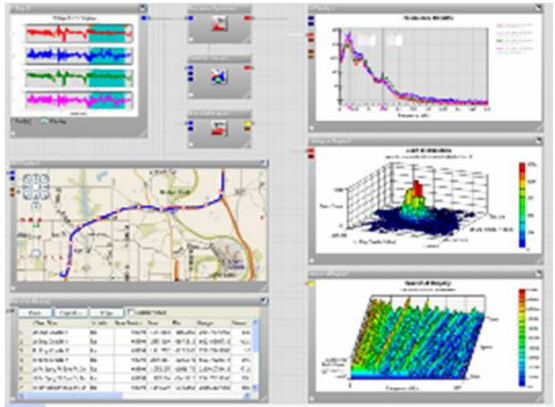
Erfahrung von 65 Jahren
Kompetenz vom Messen physikalischer Größen bis zu virtuellen Tests

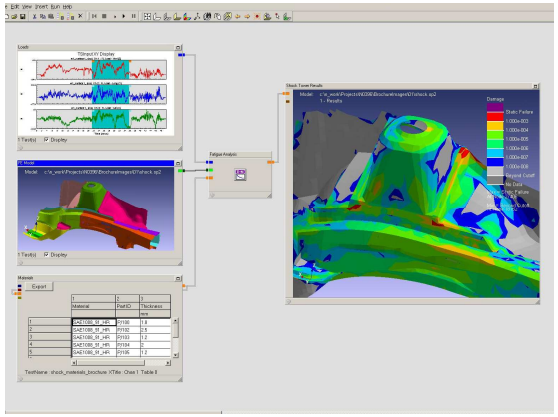
Projekte | Services | Kalibrierung

Sensoren → Datenerfassung Hardware → Datenerfassung Software → Analyse & Daten-verarbeitung

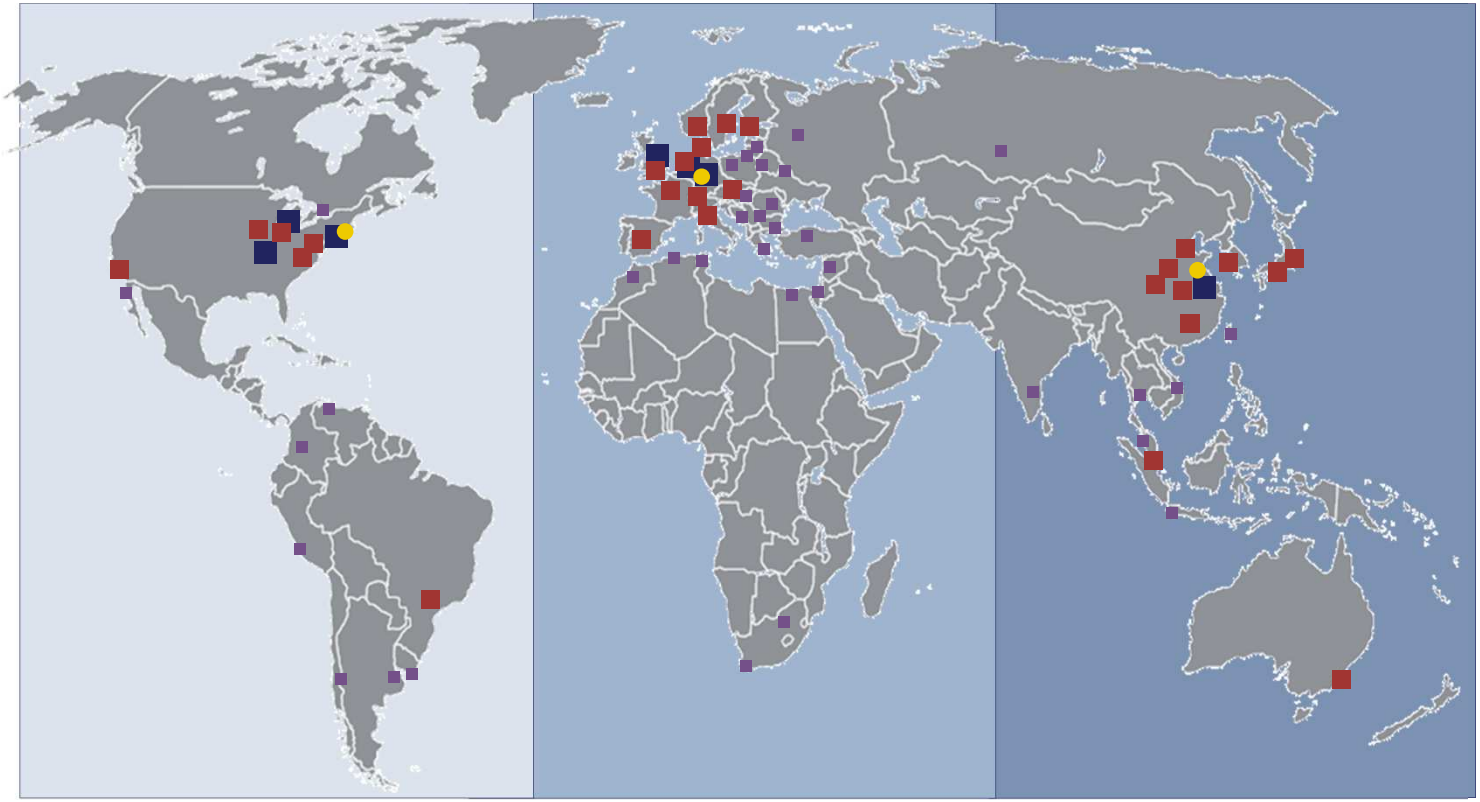
Simulation und Vorhersage







Hottinger Baldwin Messtechnik - Weltweit

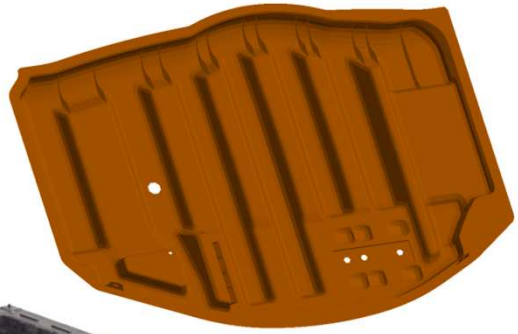


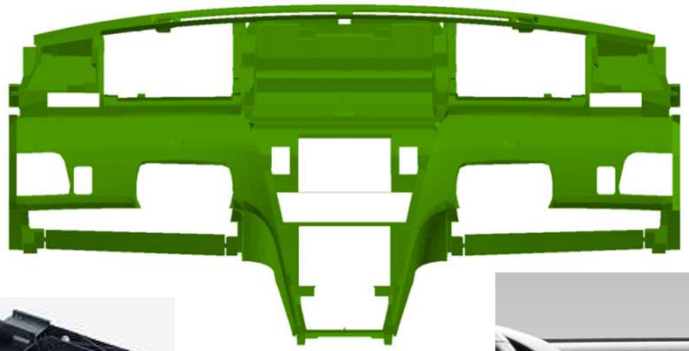
- HBM Entwicklungs-zentren
- HBM Produktions-stätten
- Verkaufs und Services Zentren
- HBM Vertretungen in über 50 Ländern

- HBM gehört zur Spectris plc – am London Aktienmarkt gelistet
- € 1.4 Milliarden Jahresumsatz
- 7,600 Mitarbeiter (1600 HBM Mitarbeiter)

Agenda

1. Herausforderungen im Automobilbau
2. Ermüdung / Verbundwerkstoffe
3. Betriebsfestigkeitsprozess
4. Einflüsse auf den Betriebsfestigkeitsprozess
5. Methoden zur Lebensdaueranalyse
6. Zusammenfassung und Heraus-
   forderungen



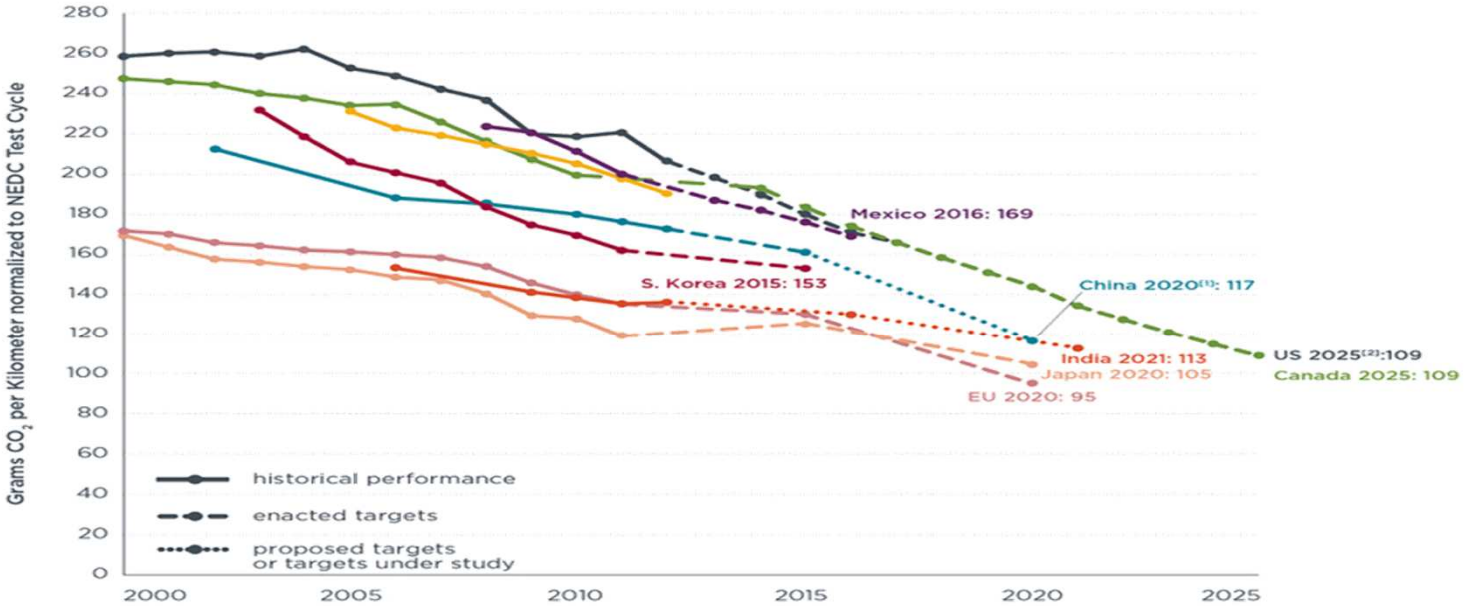


Quelle: lightweight-design.de, plasticker.de,

Herausforderungen im Automobilbau

Rahmenbedingungen

- Energiewende -> Leichtbau
  - Zielsetzung ist eine signifikante Reduzierung von CO_2/km in 2025 aufgrund gesetzlicher Bestimmungen.
  - Ersparnis 0,3 – 0,6 Liter pro 100 kg und 100 km.
  - Einsparung von 8.5 Gramm CO_2 Emissionen/km



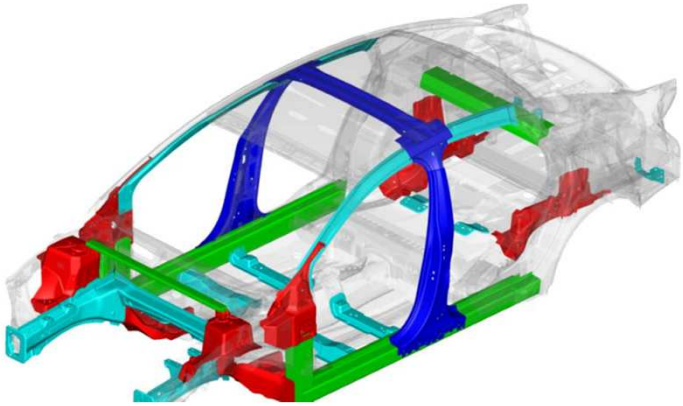
[1] China's target reflects gasoline vehicles only. The target may be higher after new energy vehicles are considered.
[2] US, Canada, and Mexico light-duty vehicles include light-commercial vehicles.
[3] Supporting data can be found at: http://www.theicct.org/info-tools/global-passenger-vehicle-standards

  - Mach1 Fahrzeugprototyp (amerik. Forschungsprojekt) aus Verbundmaterialien mit einer Gewichtsreduzierung von 23%

Quelle: The International Council on Clean Transportation, 2014

Einsatz unterschiedlichster Werkstoffe

- Erhebliche Änderungen am Fahrzeug
  - Materialien
  - Architektur für neue Werkstoffe
  - Architektur für elektrisch/hybrid Fahrzeuge
  - Das Fügen von artfremden Grund-materialien kann herausfordernd sein



U.S. Department of Energy Projekt DE-EE0005574 in Zusammen-arbeit mit der Ford Motor Company und Vehma International

- Konglomerat unterschiedlichster Materialen
  - Hochfeste Mehrphasenstähle (AHSS)
  - Aluminium
  - **Spritzgegossene, kurzfaserverstärkte Werkstoffe**
  - Diskontinuierlich langfaserverstärkte Werkstoffe
  - Karbonfaser-Laminate

Ermüdung / Verbundwerkstoffe

Ermüdung

Ermüdung steht in einem engen Zusammenhang mit Sicherheit, Gewährleistung, Zuverlässigkeit (Metallermüdung ist ein Prozess von Rissentstehung und -wachstum)

Ermüdung von Verbundwerkstoffen ist normalerweise ein fortschreitender Prozess, so dass ein plötzlich auftretendes, großes Loch im Rumpf eher selten ist und der Pilot genügend Vorwarnzeit hat um das Flugzeug sicher zu landen.

Ermüdungsversagen einer Windturbine, Conisholme (GB)

Ermüdung im Querlenkerbereich Versagen in einem manuell-gefertigten Bereich des Querlenkers, wo die Werkstofffestigkeit nicht so hoch ist wie in den automatisierten, maschinell-gefertigten Bereichen.

"Sowohl die Heterogenität der Mikrostruktur als auch die Anisotropie der Eigenschaften sorgen für einer signifikant unterschiedliche Charakteristik der Verbundwerkstoffe in wie sie sich verformen und versagen im Vergleich zu Metallen..." (übersetzt aus dem Englischen)
Prof. R. Talreja, Texas A&M University

Quelle: imechanica.org, telegraph.co.uk, technology.open.ac.uk

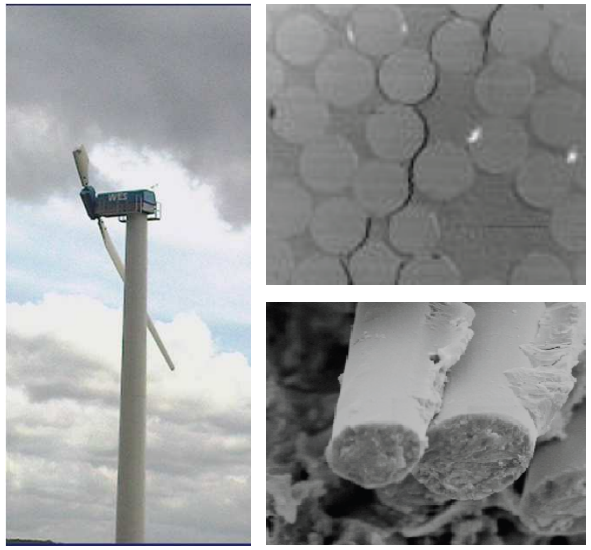
Verbundwerkstoffe

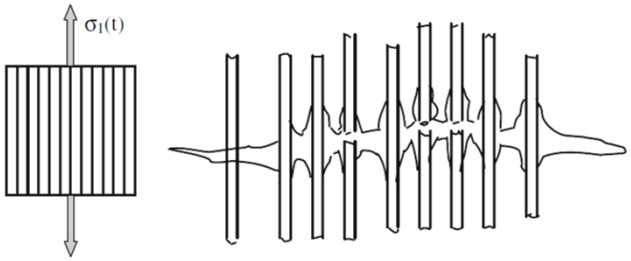
- Vielfache Schädigungsmechanismen
  - Faserversagen
  - Matrixrisse
  - Herausziehen von Fasern
  - Delamination

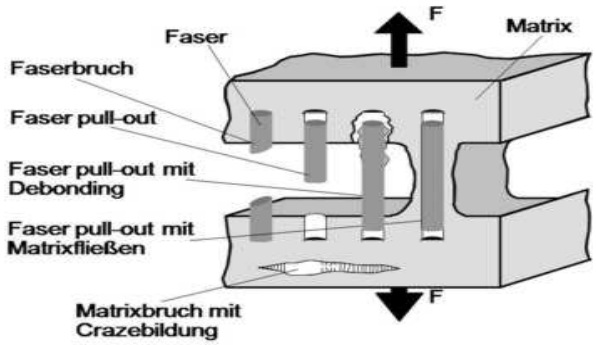
- Versagen wird verursacht durch
  - Scharfe Ränder
  - Herstellungsdefekte
  - Schlagschaden

- Schädigung ist diffus und progressiv

- Verbunde sind inhomogen und anisotrop (und temperatur- und umgebungsempfindlich!)





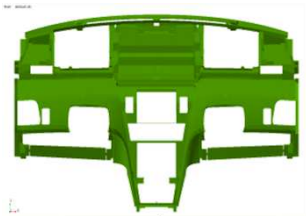


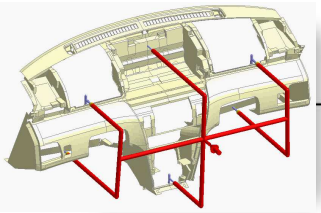
Quelle: imechanica.org, telegraph.co.uk, technology.open.ac.uk

Betriebsfestigkeitsprozess

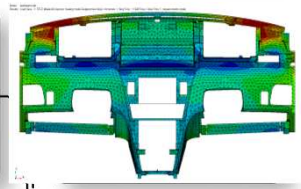
Multidisziplinärer (virtueller) Entwicklungsprozess

Geometrie
Konstruktion





Konstruktion CAD



Material-modellierung

Fundamentale Material-eigenschaften

Simulation:

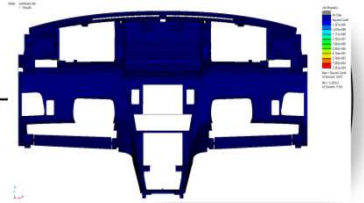
- Fertigungsprozess-Simulation
- CAD
- CAE
- FE Simulation
- Fatigue Analyse

Belastungen

- Gemessen
- Generiert

Betriebslasten

Fatigue Analyse



Fatigue Material-eigenschaften

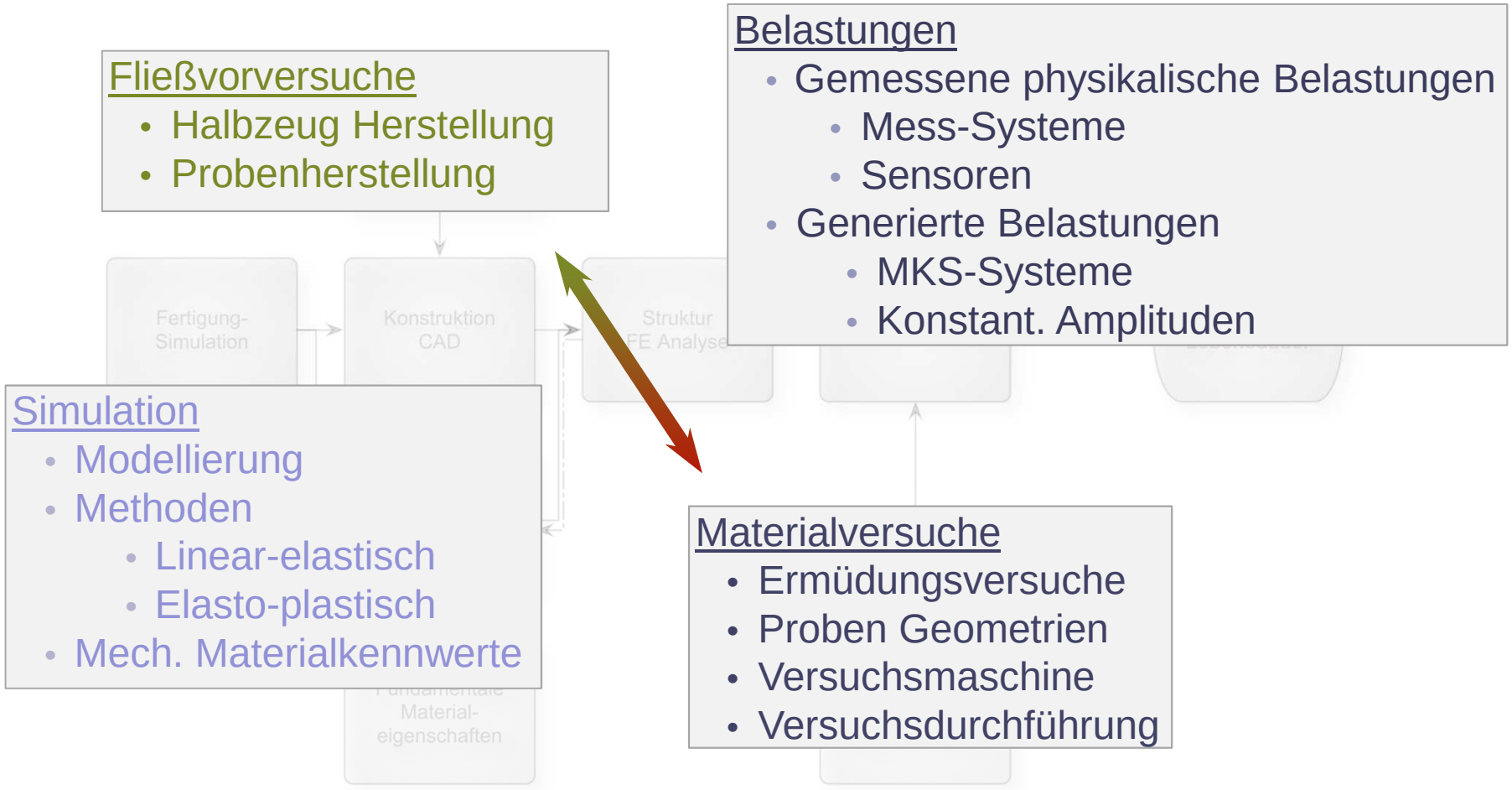
Ergebnisse:

- Schädigung
- Lebensdauer
- Sicherheiten
- Zuverlässigkeit

Materialversuche

Einflüsse auf die Lebensdauerabschätzung

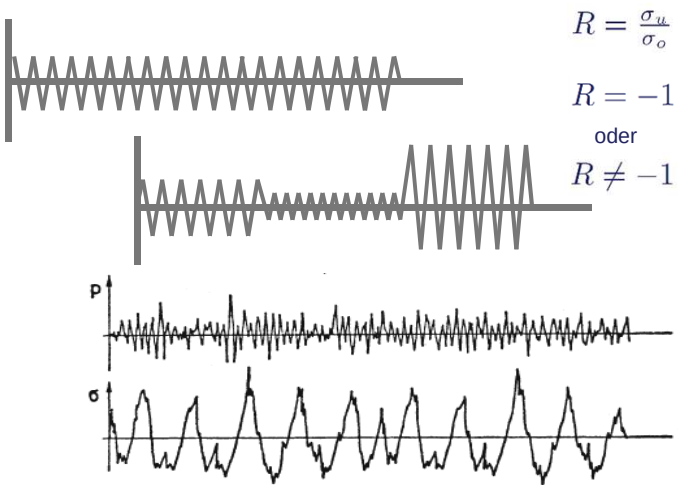
Übersicht: Einflüsse



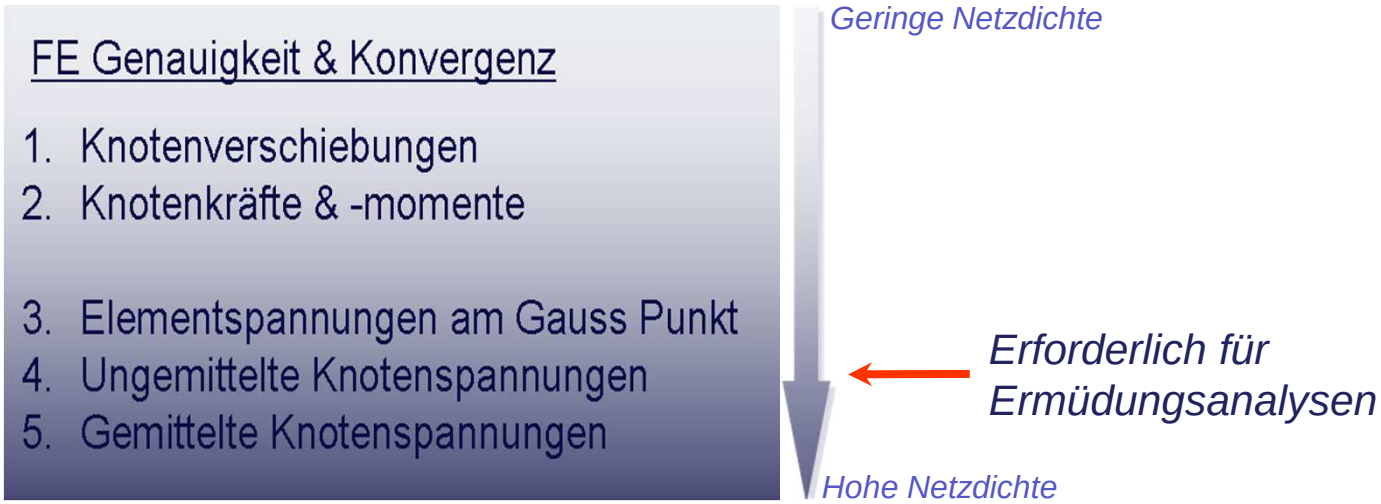
Die Auswahl bzw. Kombination der Berechnungstools kann die Qualität der Ergebnisse beeinflussen !

Schwingenden Belastungen / Spannungsergebnisse

- Arten von schwingende Belastungen
  - Konstante Amplitude
  - Gemessene reale Zeitreihen
  - Zeitschritte



- Gute Spannungswerte!!!
  - Ermüdungsrisse entstehen (normalerweise) an der Oberfläche.
  - Ermüdungsschädigung nimmt exponentiell mit der Spannung zu.
    - 10% Fehler in der Spannung ≈ 100% Fehler in der Lebensdauer!

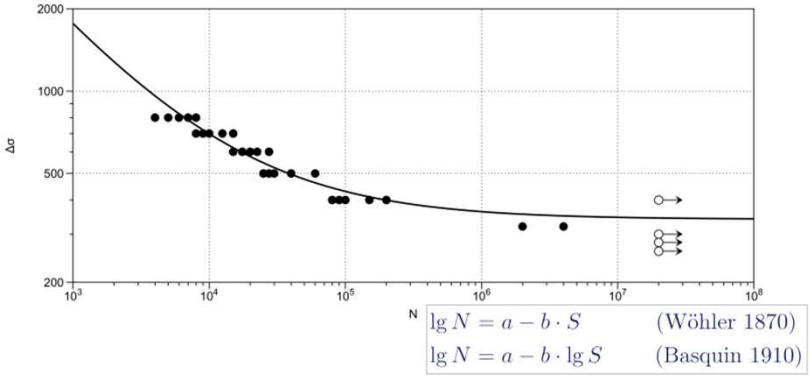


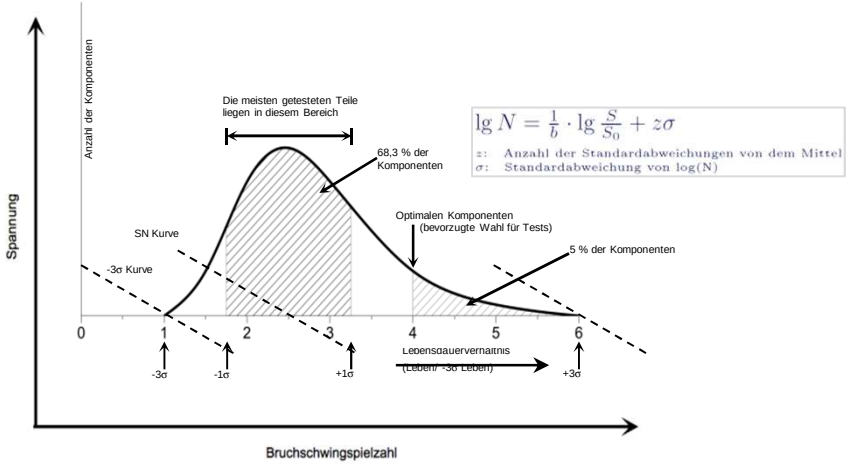
Naturelle Einflüsse

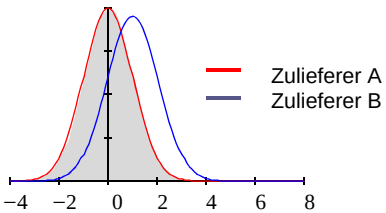
- Die Lebensdauerkurve wird oft als einfache Regressionskurve durch Messpunkte, bei denen 50 % der Teile versagen, dargestellt.

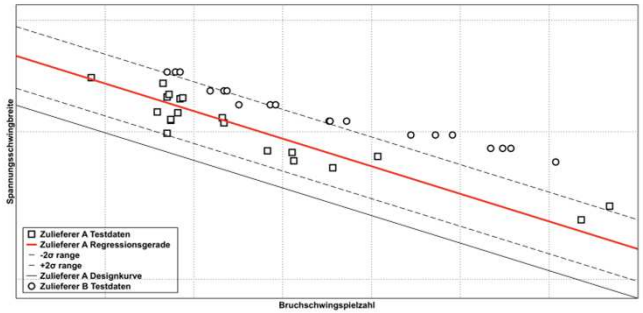
- Eine Erhöhung der Messpunkt-anzahl verstärkt das Vertrauen in die Werte, wobei die Streubreite der Lebensdauer ebenso wichtig ist und Analysen für verschiedene Überlebenswahrscheinlichkeiten erlaubt.

- Vergleiche zwischen Streuungen bei Chargen oder Zulieferern sind möglich.



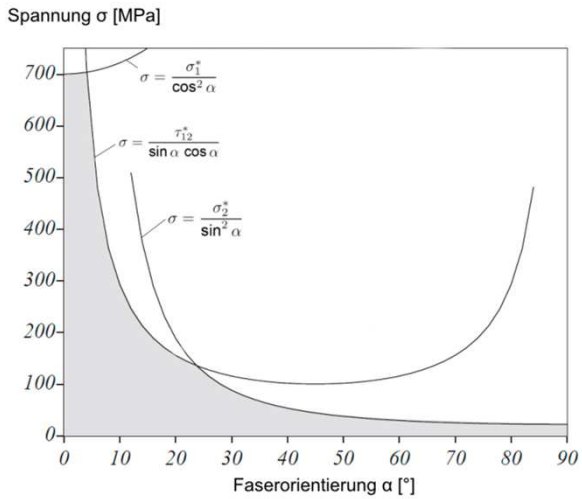






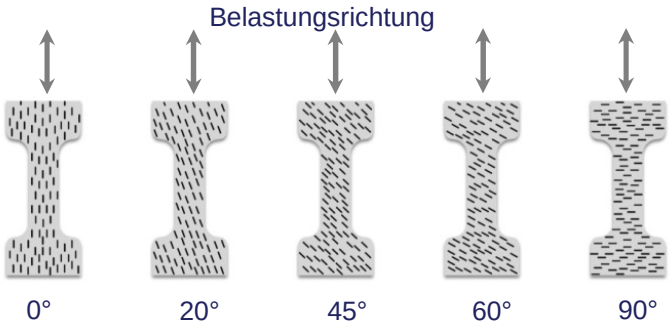
Mechanische Eigenschaften (Festigkeit und Steifigkeit):

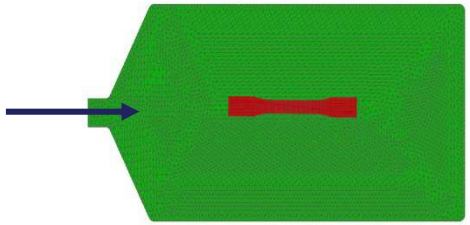
- Abhängigkeit
  - Faservolumenanteil
  - Faserverteilung
  - Faserorientierung
- Versuchsproben
  - Aufwendige Herstellung
  - Hohe Qualitätsanforderung



Tsai-Hill Kriterium

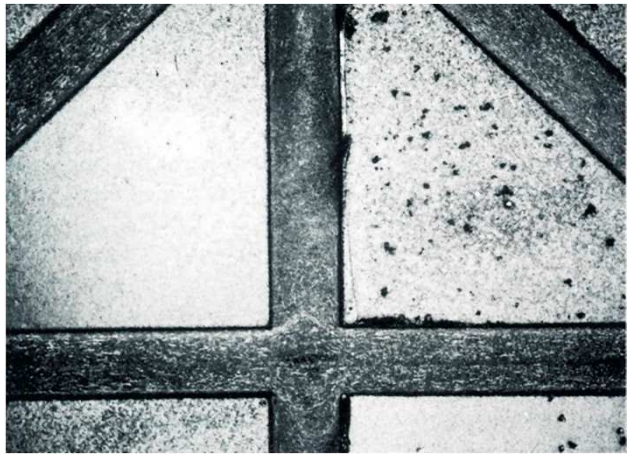
$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^*}\right)^2 - \frac{\sigma_1\,\sigma_2}{\sigma_1^{*2}} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^*}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^*}\right)^2 \geq 1$$

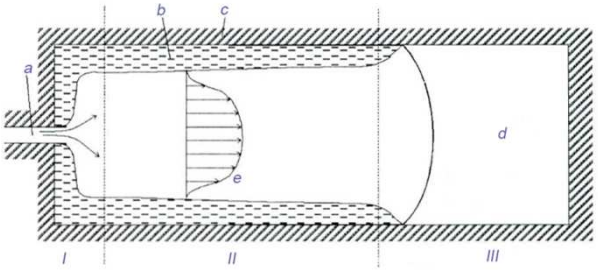




Bauteileinflüsse

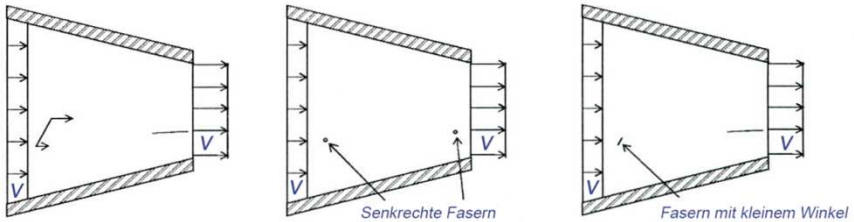
- Komplexe Geometrie
- Geometrieabhängige Effekte
- Fließeffekte beeinflussen
  - Faservolumenanteil
  - Faserverteilung
  - Faserorientierung





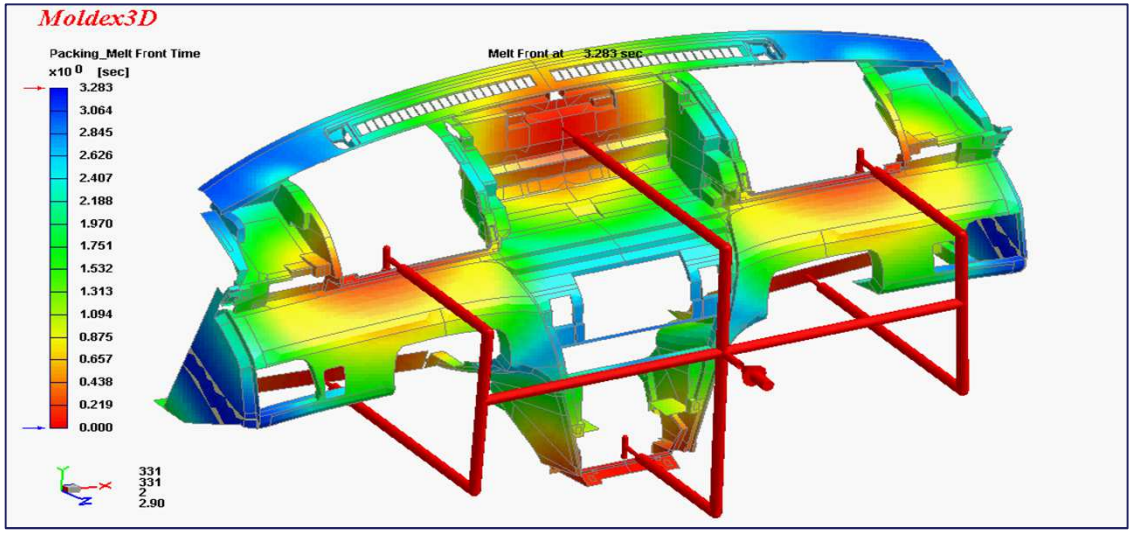
I: Ort der Einspritzung, II: Transportationszone, III: Fließfront

a: Eintritt, b: Abgekühltes Medium, c: Formoberfläche, d: Ungefüllte Zone,
e: Fließgeschwindigkeitsprofil



Quelle: Horst, J. J., Dissertation, Technische Universität Delft, 1997

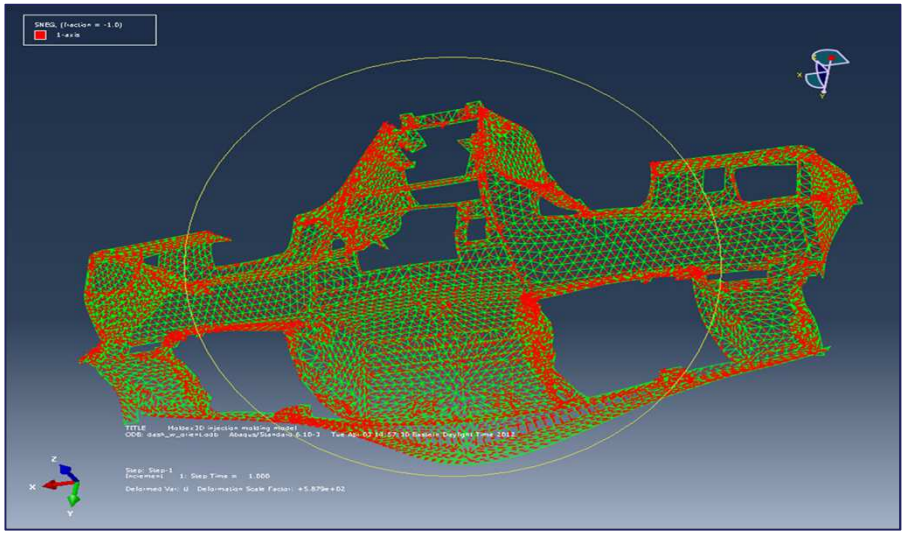
Prozesseinflüsse



Simulation des Spritzguss-Fertigungsprozess

Abhängigkeit vom Herstellungs-verfahren

- Bindenähte
  - Kraftverlauf / Spritzrichtung
- Faserverteilung
- Faserorientierung
- Faservolumenanteil

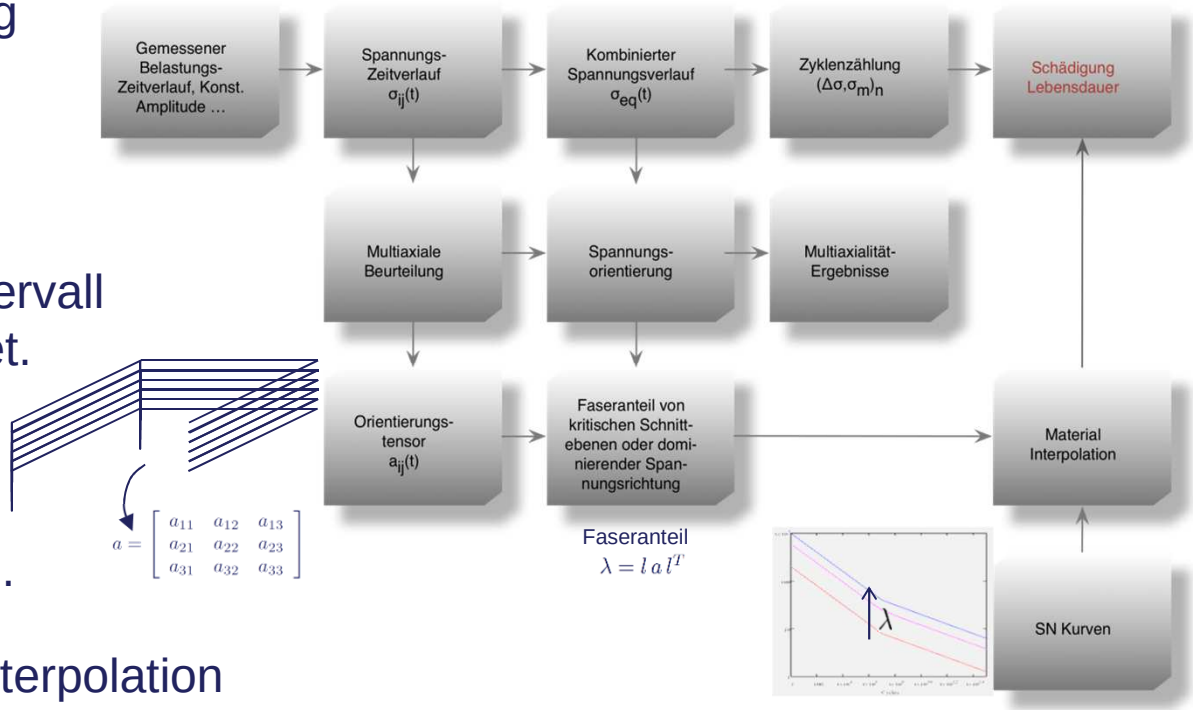


Faserorientierung

Methoden zur Lebensdauerabschätzung

Struktur-mechanische Methoden

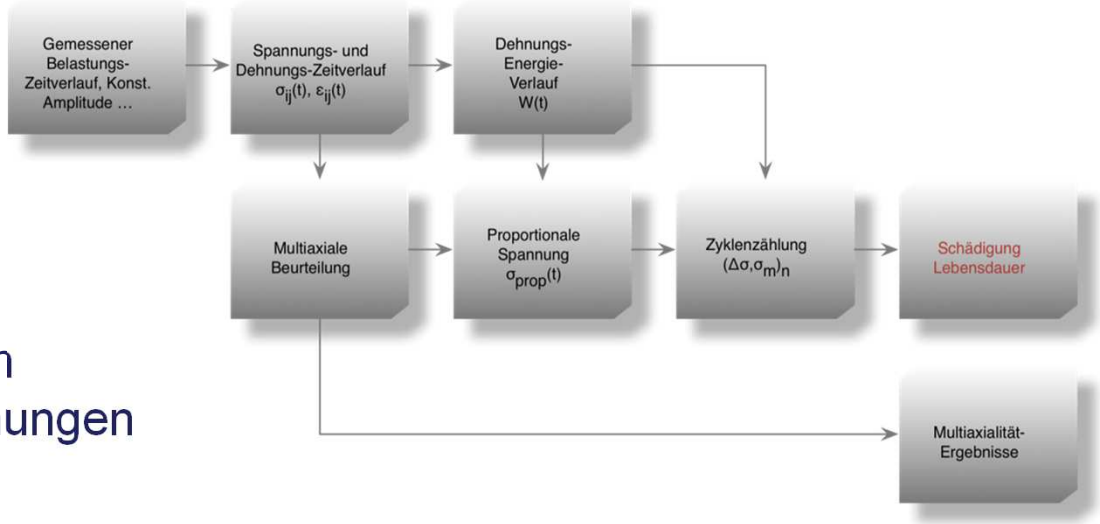
- Abs. max. Hauptspannung oder Spannung auf krit. Schnittebenen wird verwendet.
- Spannung wird im 10° Intervall auf den Ebenen betrachtet.
- *l* ist die kritische Ebene oder die Richtung der dominierenden Spannung.
- SN Kurve wird über die Interpolation basierend auf λ bestimmt.



- Schädigung wird mittels Zyklenzählung und linearer Schädigungsakkumulation berechnet.
- Prozess wird für jedes Element, Schicht und Richtung wiederholt.

Methoden basierend auf der Dehnungsenergiedichte

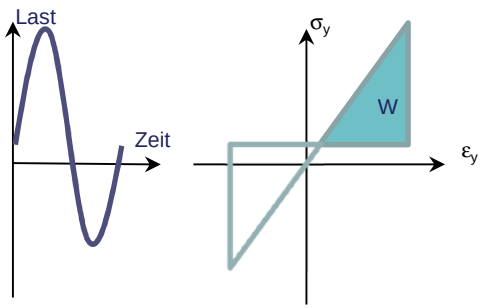
- Es können die proportionale Spannungen, die Hauptdehnungen oder die Spannungen auf krit. Schnittebenen verwendet werden.



- Auf den Schnittebenen werden Normal- und/oder Scherspannungen im 10° Intervall betrachtet.

- Die Materiallebensdauerkurve wird durch eine Dehnungsenergiedichte-Kurve beschrieben: $$W = \kappa \left(N_f\right)^{\alpha}$$

- Schädigung wird mittels Zyklenzählung und linearer Schädigungsakkumulation berechnet.



- Prozess wird für jedes Element und Schicht wiederholt.

Zusammenfassung und Herausforderungen für die Ermüdungsanalyse

Zusammenfassung und Herausforderungen

- Zusammenfassung
  - Der Produktentwicklungsprozess unter Betriebsfestigkeitsaspekten ist bereichsübergreifend und braucht fundiertes Know-How aus unterschiedlichen Ingenieursbereichen.
  - Die Qualität der Ergebnisse ist abhängig von den eingesetzten (standardisierten) Tools, verwendeten Methoden und Erfahrungen.
  - Entscheidender Punkt ist die Werkstoffbeschreibung.
- Herausforderungen
  - Der Fokus der Weiterentwicklung liegt auf der Werkstoffcharakterisierung (Langfasern und Laminate)
  - Verbesserung der Werkstoffversagensmodelle (Inhomogenität, Anisotropie, Nichtlinearität, Komplexität)
  - Berücksichtigung von Effekte von Fügetechniken (z.B. Kleben)

www.ncode.com

Stephan Vervoort
HBM nCode
Carl-Zeiss-Ring 11-13
D - 85737 Ismaning (München)

Tel. +49 89 9605372 18
Fax. +49 89 9605372 21
Email: stephan.vervoort@hbmncode.com