AUTOMOTIVE

INFOKOM

MOBILITÄT, ENERGIE & UMWELT

LUFTFAHRT

RAUMFAHRT

VERTEIDIGUNG & SICHERHEIT

FatiLaminate - Schichtweise Bewertung der Lebensdauer von multidirektionalen Faser-Kunststoff-Verbunden

Markus Neumeister, IABG mbH Ottobrunn

TAF3-PPT-17-008

4a Technologietag 2017 „Leichtbau und Composites“; 23. und 24. März 2017 in Schladming

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

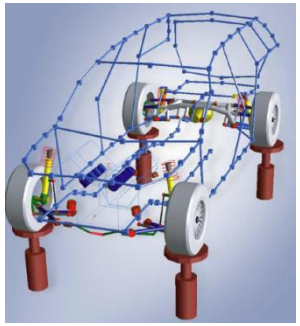
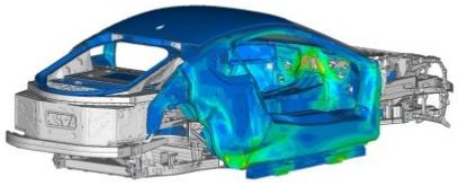
Gliederung

- Einleitung
- Konzept
  - Spannungsbewertung auf Basis eines Bruchkörpers
  - Steifigkeitsdegradation
  - Anwendung
- Beispiele
  - Lasteinleitung in eine Platte
  - „Zugprobe“
- Ermittlung der mechanischen Kennwerte
- Zusammenfassung und Ausblick

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Einleitung

- Der Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) hat in vielen Bereichen eine lange Tradition und erfreut sich auch aktuell zunehmender Beliebtheit

Optik

Strömungssimulation

Umweltsimulation

Strukturoptimierung

Stabilität

Crash

Idee → Anforderungen

Betriebsfestigkeit

→ Produkt

Lastdatenermittlung

Festigkeit

Prüfstand

Absicherung

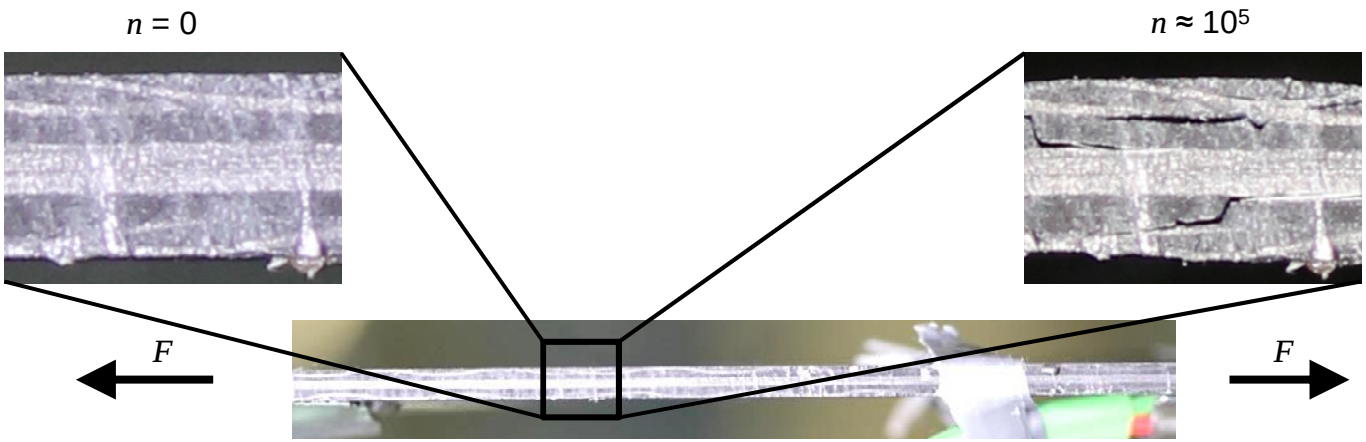
Dynamik

Akustik

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Einleitung

- Bewertung der Betriebsfestigkeit stellt eine besondere Herausforderung dar
- Lastumlagerungen in Laminat und Struktur infolge auftretender Steifigkeitsdegradationen
  - Risse (Faser – Matrix, Matrix – Matrix)
  - Faserbrüche



- Erhebliche Einflüsse durch die Werkstoffkomponenten, Halbzeuge und Fertigungsprozess

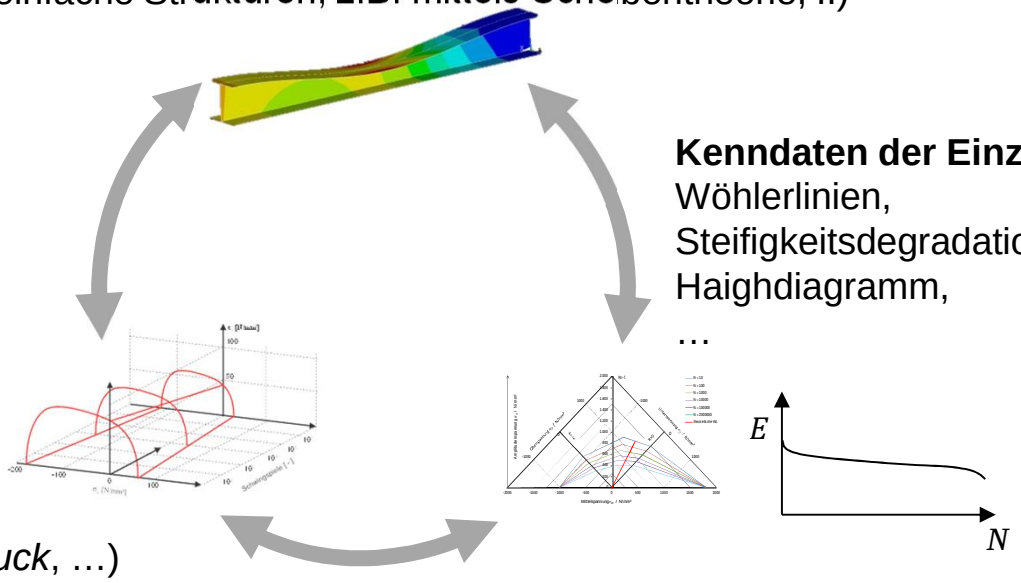
è Zur effizienten Gestaltung von Strukturen sind neue Methoden zur Bewertung notwendig

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Konzept

- Schichtweise Bewertung der Lebensdauer von Faser-Kunststoff-Verbunden unter zyklischer Beanspruchung
- Herausforderung liegt in der Berücksichtigung sich ändernder Festigkeiten und Steifigkeiten
- Anwendung mittels numerischer und analytischer Strukturberechnungsmethoden

Strukturberechnung
FEM (komplexe Strukturen),
Analytik (einfache Strukturen; z.B: mittels Scheibentheorie, ..)

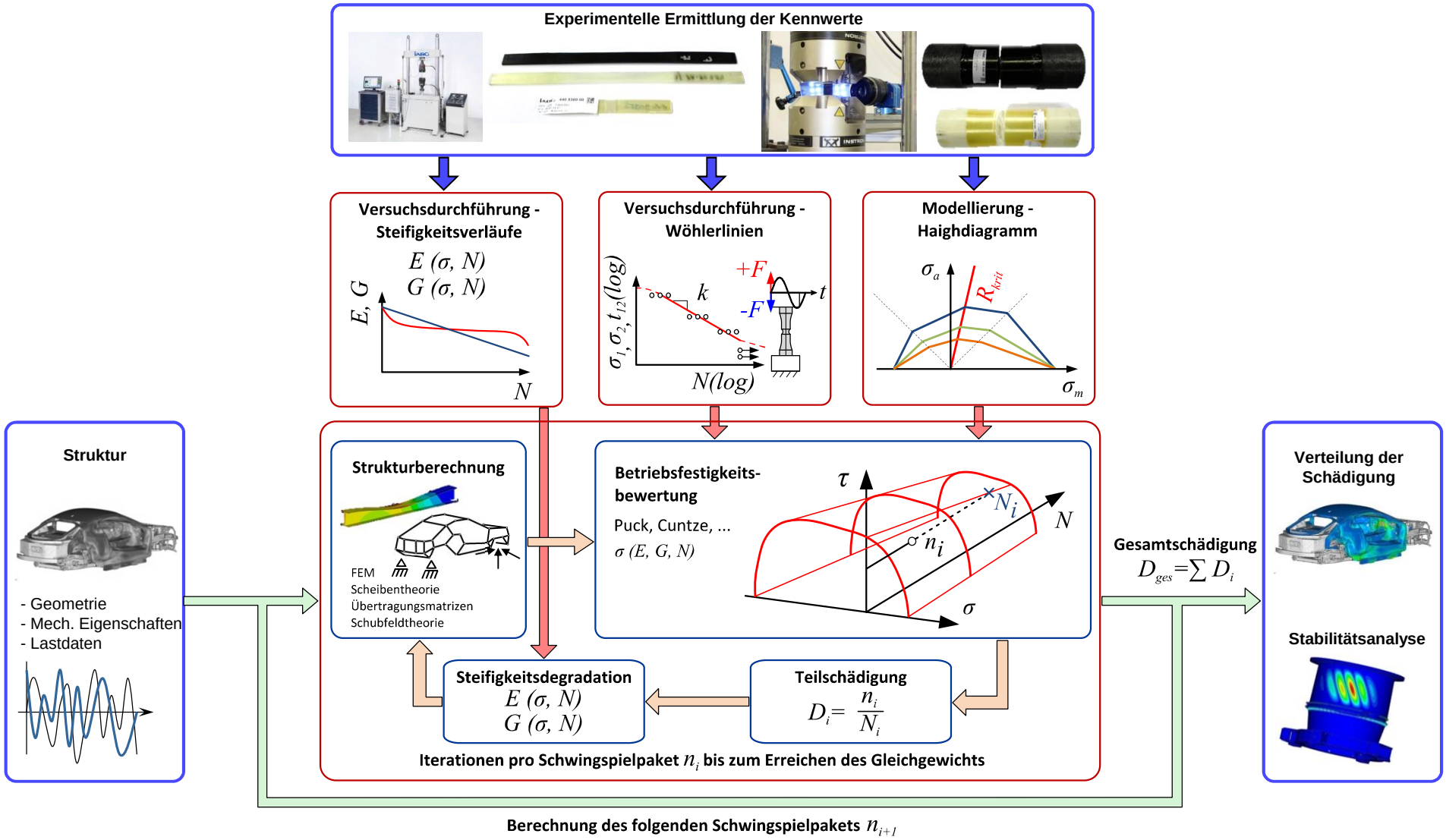


Kenndaten der Einzelschichten
Wöhlerlinien,
Steifigkeitsdegradation,
Haighdiagramm,
…

Spannungsbewertung
Bruchkörper (z.B. *Cuntze*, *Puck*, …)

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

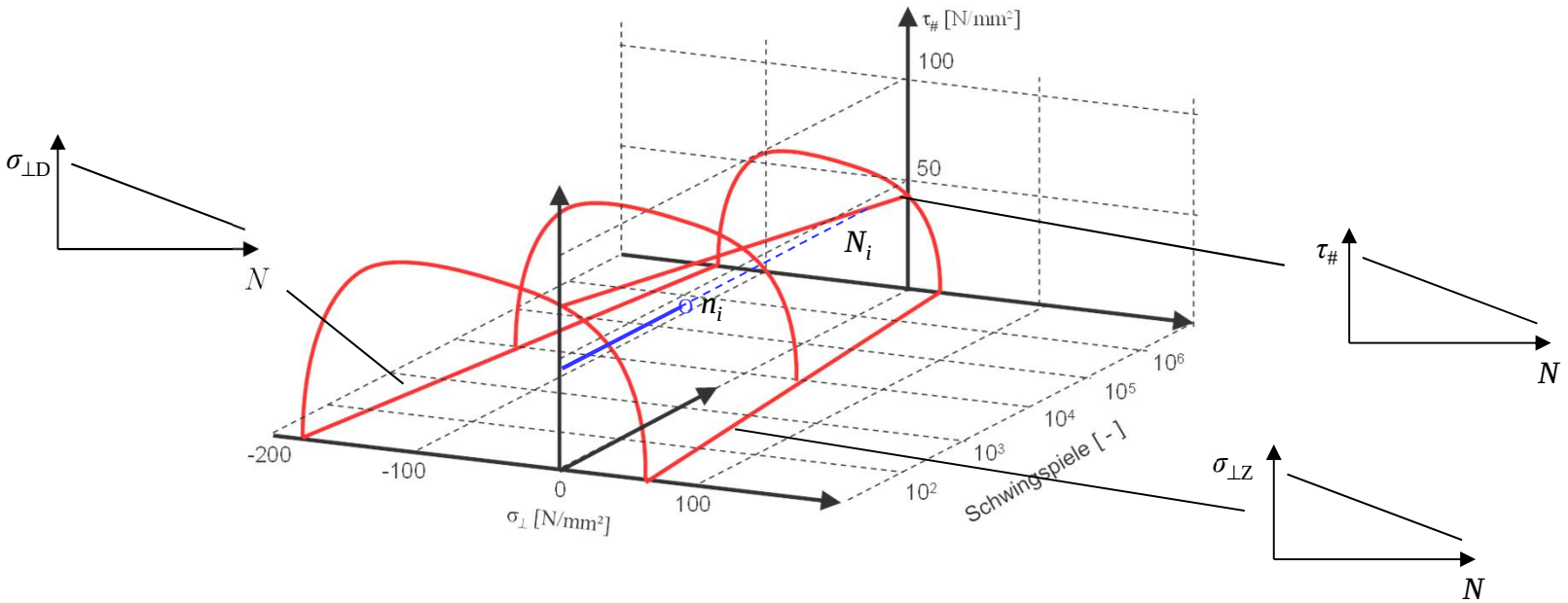
Konzept



© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Konzept - Spannungsbewertung auf Basis eines Bruchkörpers

- Annahme der Gültigkeit eines „Bruchkörpers“ sowohl unter quasistatischer als auch unter zyklischer Beanspruchung

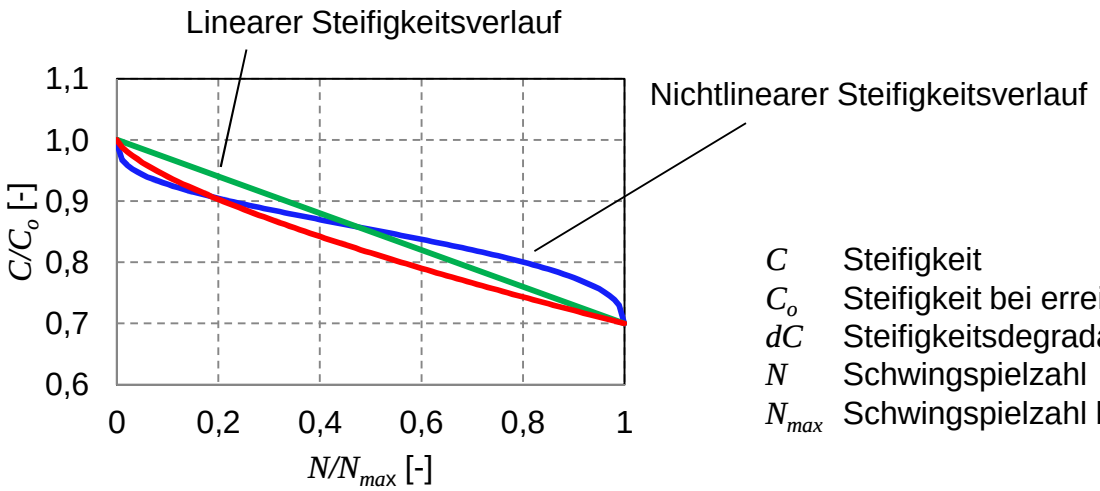


- Berechnung der Schwingspielzahl bei Totalversagen einer Schicht
- Die Vorgehensweise lässt sich auf unterschiedliche Bruchkörper anwenden
- Aktuell ist der 3D Bruchkörper nach *Cuntze* (Faserbruch und Zwischenfaserbruch) hinterlegt

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Konzept - Steifigkeitsdegradation

- Berücksichtigung einer Steifigkeitsdegradation in Abhängigkeit der Schwingspielzahl
- In der Literatur werden hierzu unterschiedliche Zusammenhänge zur Beschreibung der Degradation vorgestellt



C	Steifigkeit
C_o	Steifigkeit bei erreichen der Lastamplitude
dC	Steifigkeitsdegradation bei Totalversagen
N	Schwingspielzahl
N_{max}	Schwingspielzahl bei Totalversagen

- In Abhängigkeit des Werkstoffverhaltens müssen die Steifigkeitsverläufe angepasst werden („Parameteroptimierung“)!

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

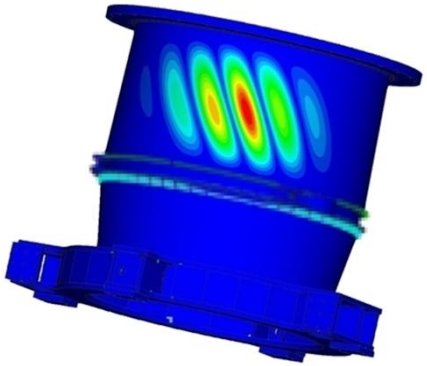
Konzept – Anwendung

- Einfache Berechnungen erfolgen mittels Excel/VBA unter Berücksichtigung der Laminattheorie
- Implementierung der beschriebenen Vorgehensweise im FE-Programmsystem
  - Programmierung in Form eines benutzerdefinierten Materialmodells (UMAT)
  - Anwendbar für Volumenelemente mit einem Integrationspunkt
  - „Bruchkörper“ nach *Cuntze* (3D)
  - Nichtlineare Steifigkeitsdegradation
  - Elementversagen und definierte Steifigkeitsreduktion
- Eingaben der mechanischen Kenngrößen der unidirektionalen Einzelschichten
  - Allgemeine Grundgrößen unter quasistat. Beanspruchung
  - Daten der Wöhlerlinien (k, σ_A)
  - Degradationsparameter dE

è Schädigungsverteilung

è Stabilitätsanalyse (basierend auf der Reststeifigkeit)

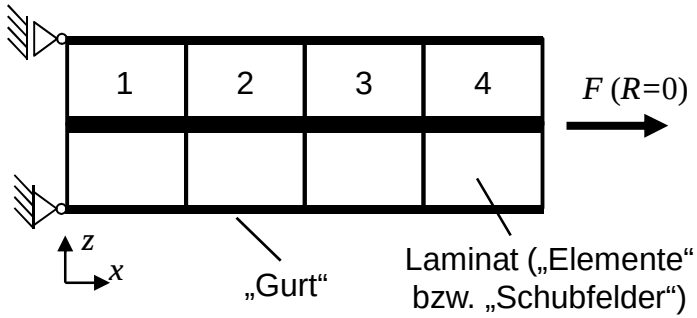
Stabilitätsanlyse



© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Beispiel - Lasteinleitung in eine Platte

- Kontrollrechnung zum Degradations-/Schädigungsverhalten am Beispiel einer Lasteinleitung in eine Platte (GFK Laminat: +-17° / 90° $|_{sym}$)
  - Spannungsumlagerung im Laminat!
  - Lastumlagerungen in der Struktur!



- Die „Strukturberechnung“ erfolgt mittels der Methode der Übertragungsmatrix einer Dreigurtscheibe

$$\{z\}_{i+1} = [T] \cdot \{z\}_i$$

$\{z\}$ Zustandsvektor
$[T]$ Übertragungsmatrix

- Schnittstellen:
  - Aus dem Berechnungsmodell werden die Schnittlasten der Scheibe (n_x, n_y, n_{xy}) übergeben
  - Aus der „Betriebsfestigkeitsbewertung“ werden die Steifigkeitsgrößen (E_x, E_y, $G_\#$) der Scheibe bereitgestellt

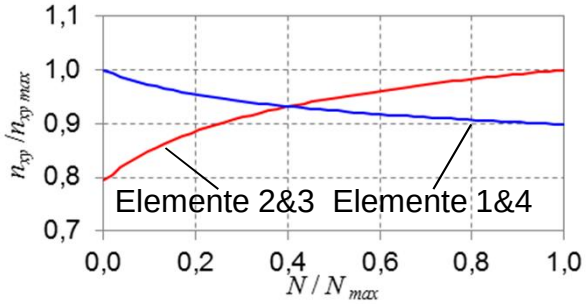
H. Rapp, M. Neumeister, M. Grafen, J. Birkel; *CFK-Strukturen – Verfahren zur Auslegung und zum Nachweis*, Vortragsreihe im Rahmen der 40 Jahre Jubiläumsfeier der Universität der Bundeswehr München, November 2013

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

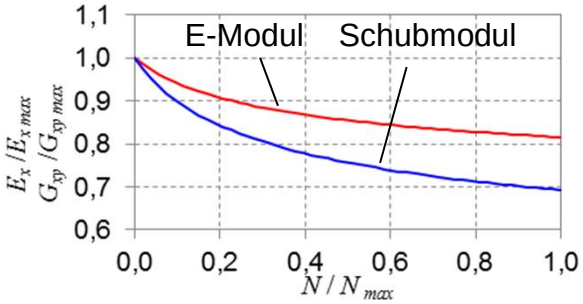
Beispiel - Lasteinleitung in eine Platte

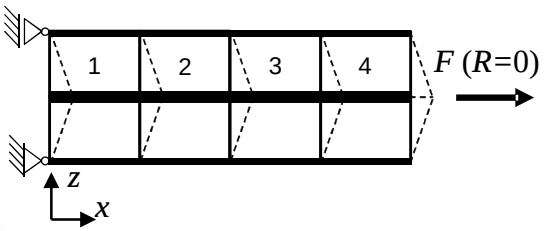
- Deutliche Steifigkeitsdegradation der Laminate in den Elementen 1 und 4

Schublast



Steifigkeitsdegradation (Element 1)





- Versagen tritt in den Elementen 1 und 4 in den +/-17° Lagen ein
- Lebensdauer:
  - Ohne Spannungsumlagerung / ohne Lastumlagerung: 701 Lastwechsel
  - Mit Spannungsumlagerung / ohne Lastumlagerung: 2476 Lastwechsel
  - Mit Spannungsumlagerung / mit Lastumlagerung: 6626 Lastwechsel

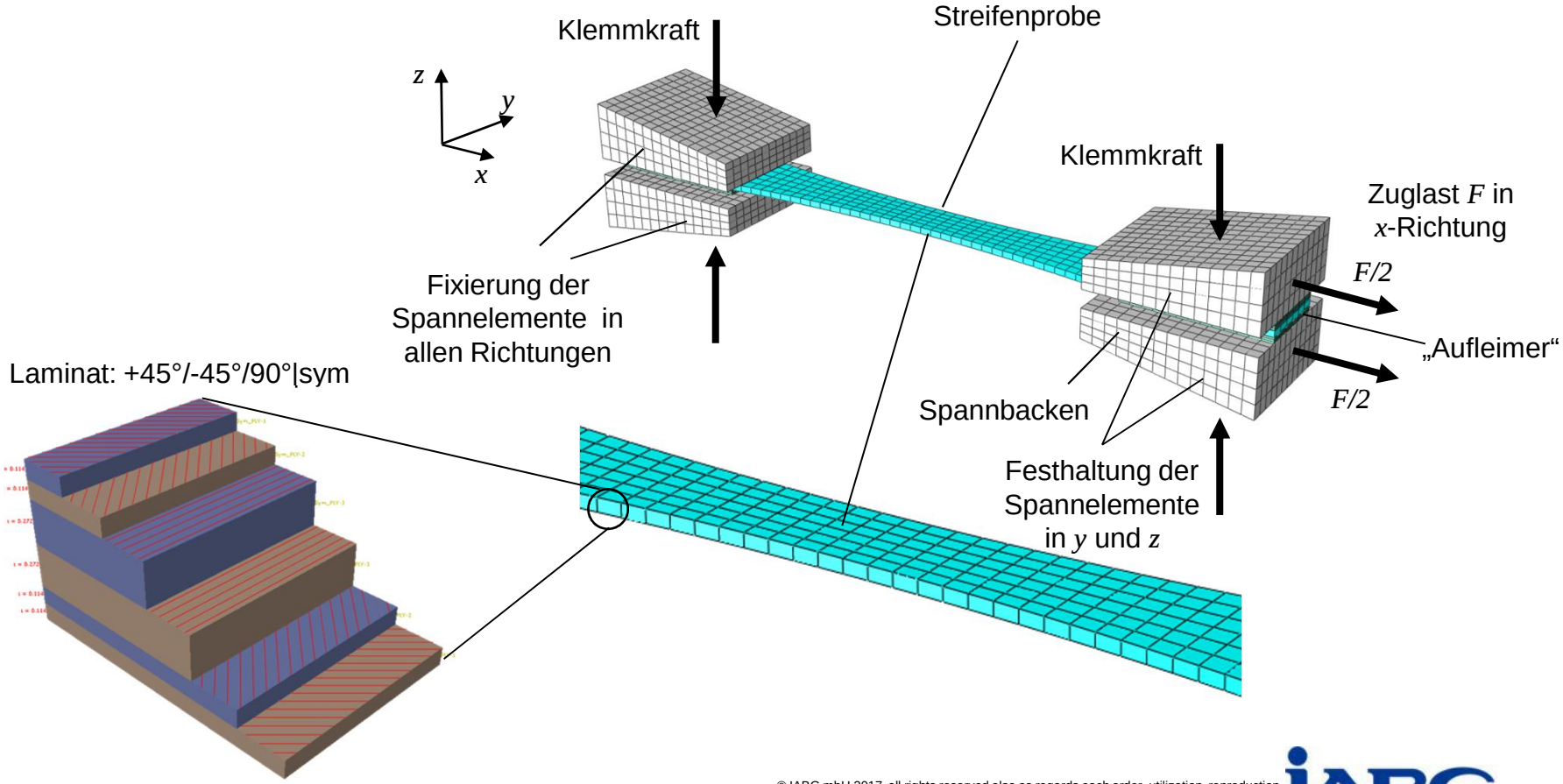
è Infolge der Degradation kommt es zu einer Lastumlagerung und in diesem Fall zu einer Vergrößerung der Lebensdauer

è Dieses Verhalten hängt jedoch von der Struktur ab!

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Beispiel - „Zugprobe“

- Taillierte Streifenprobe mit Lasteinleitung (zugschwellende Beanspruchung)
- GFK MD Beispiellaminat aus 6 UD Schichten (+45°/-45°/90°$|_{sym}$)
- Ein Solid Element mit 6 Einzelschichten über die Dicke (ein Integrationspunkt je Einzelschicht)

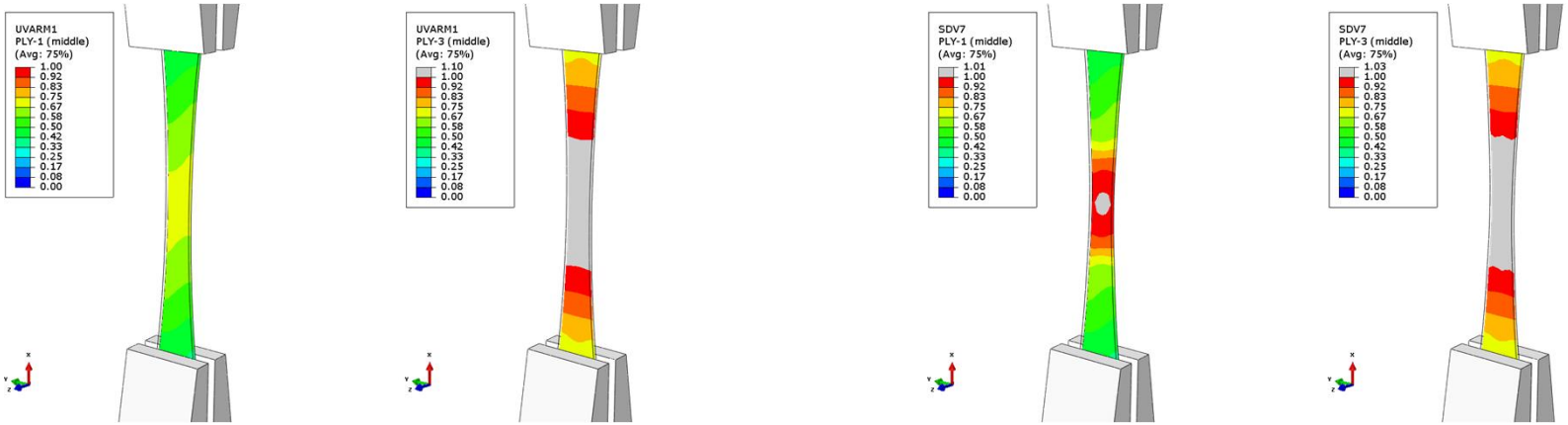


© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Beispiel - „Zugprobe“ unter statischer Beanspruchung

- Statische Rechnung mit Degradation zur Identifizierung der Hotspots
- Gesamtschädigung nach *Cuntze*
  - Lineare Rechnung: Schädigungsberechnung im Nachgang (Postprocessing)
  - Rechnung mit progressiver Degradation (UMAT)

Lineare Rechnung | **Rechnung mit Degradation**



Ply1 (+45°) | **Ply3 (90°)** | **Ply1 (+45°)** | **Ply3 (90°)**

- In der linearen Rechnung unterscheidet sich die Schädigung in den äußeren Schichten deutlich von der Rechnung mit Degradation

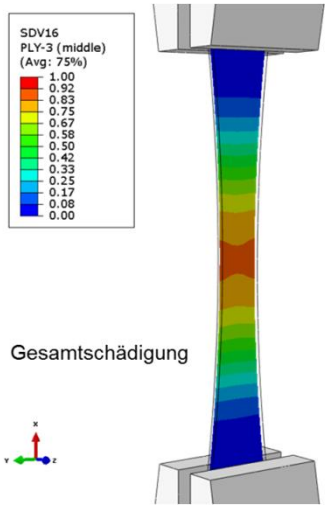
è Zyklische Rechnung für Hotspots zur Lebensdaueranalyse

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

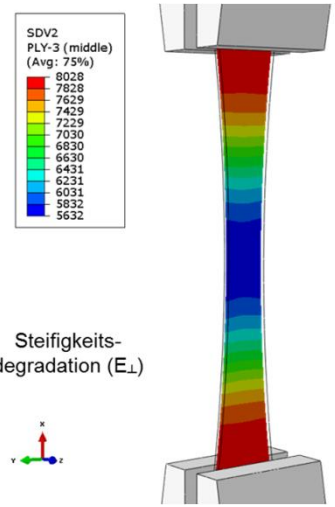
Beispiel - „Zugprobe“ unter zugschwellender Beanspruchung

- Wesentliche Schädigung und Steifigkeitsdegradation tritt wie erwartet in der Mitte des Prüfkörpers auf
- Versagen tritt in der mittleren Lage ein
- Die Randschichten ertragen weitere Lastwechsel bis zum Totalversagen

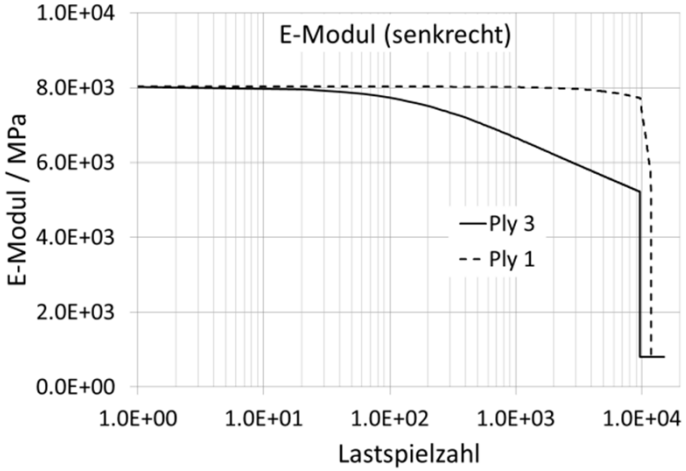
Gesamtschädigung



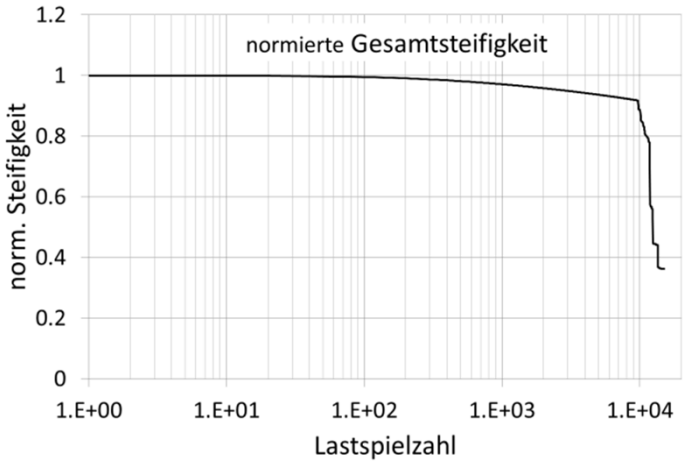
Steifigkeit



Steifigkeiten der Einzelschichten



Gesamtsteifigkeit

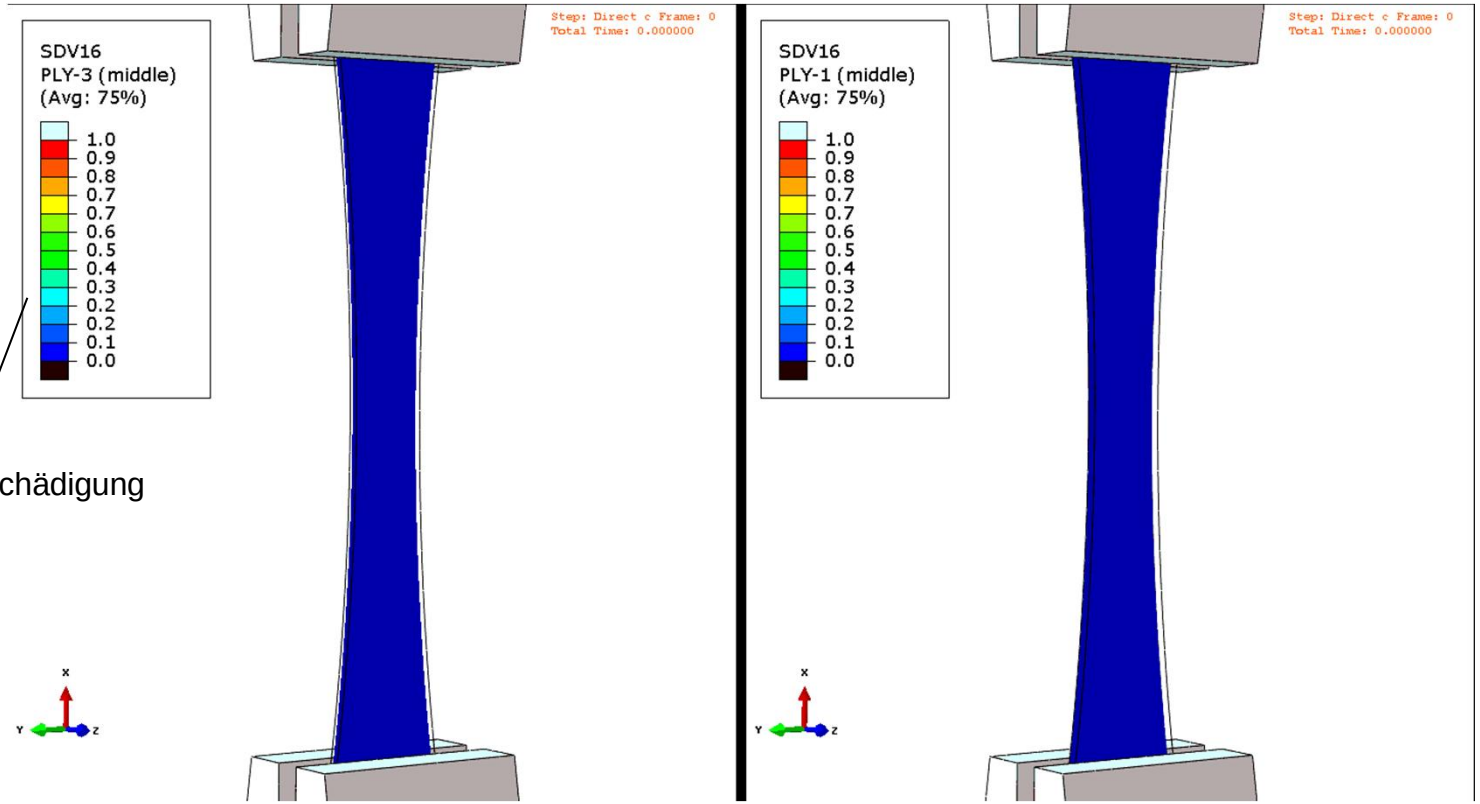


© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Beispiel - „Zugprobe“ unter zugschwellender Beanspruchung

- Zeitliche Entwicklung des Gesamtschädigung in den Lagen 90° und +45°

90° Lage **+45° Lage**



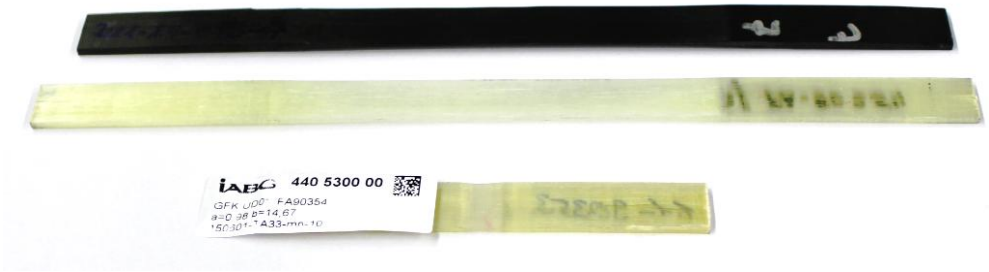
Gesamtschädigung

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Ermittlung der mechanischen Kennwerte

- Neben „Normprüfkörpern“ kommen auch Sonderformen zum Einsatz
  - Prüfkörper mit unterschiedlichen Taillierungen
  - Rohrförmige Prüfkörper (gleiche Prüfkörpergeometrie für Zug-, Druck- und Torsionsversuche)

Prüfkörper mit Dickentaillierung

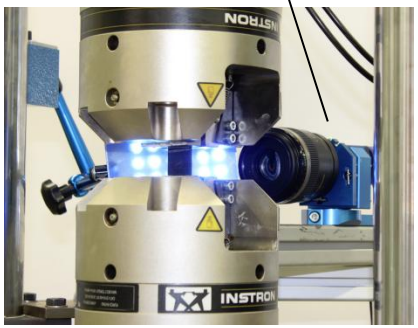


Rohrförmiger Prüfkörper

- Ermittlung der Steifigkeitsdegradation mittels geeigneter Messinstrumente

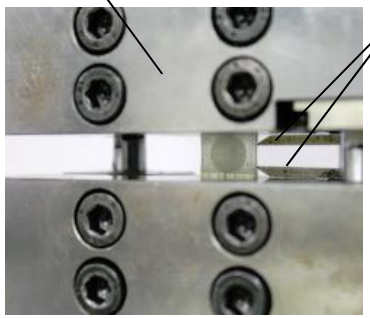
„Clip On“ Extensometer

Videoextensometer



Prüfvorrichtung „combined loading compression“

Messschneiden

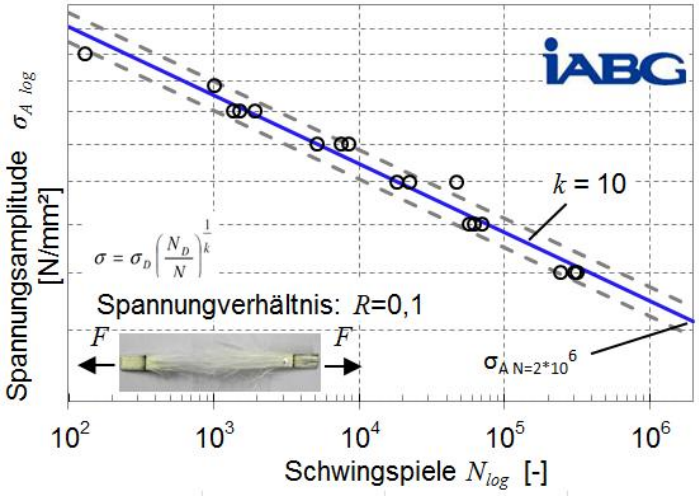


© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

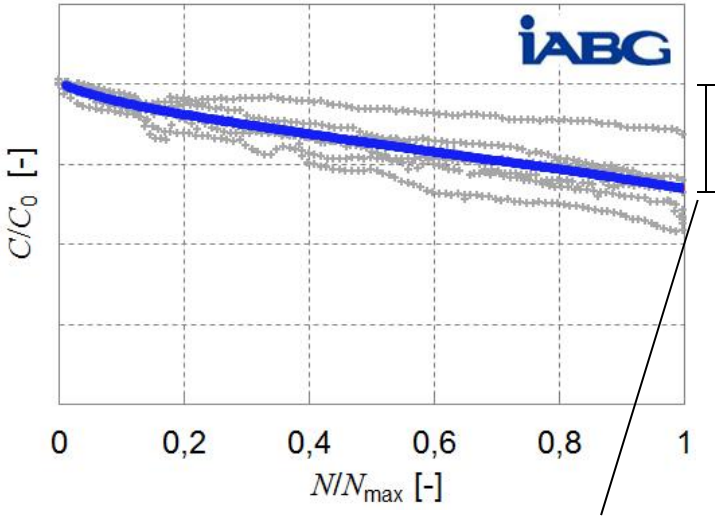
Ermittlung der mechanischen Kennwerte

- Kenngrößen für ein Beispiellaminat (GFK UD 0°) unter zugschwellender Beanspruchung (R=0,1)

Beispielwöhlerlinie



Steifigkeitsverlauf



Steifigkeitsdegradation bei Totalversagen

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Zusammenfassung

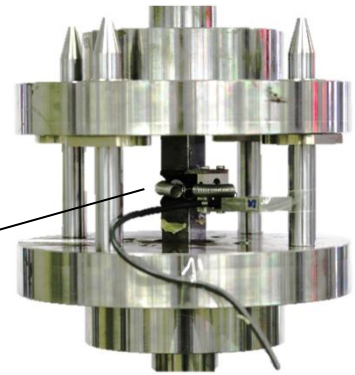
- Die vorgestellte Vorgehensweise erlaubt eine Bewertung der Betriebsfestigkeit mit numerischen und analytischen Berechnungsmethoden
- Bruchkörper und Steifigkeitsverläufe der unidirektionalen Einzelschichten lassen sich an unterschiedliche Werkstoffe anpassen
- Infolge der Steifigkeitsdegradation treten nicht zu vernachlässigende Lastumlagerungen auf

è Zur optimalen Nutzung des Leichtbaupotentials darf eine Degradation der Steifigkeiten und Festigkeiten nicht vernachlässigt werden

Ausblick

- Erweiterung (z.B. Delaminationen, Restfestigkeiten, …)
- Optimierung der Laufzeit
- Anwendung auf weitere Bauteile

Versuchsaufbau „Out of plane“



© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

- Lebensdaueranalyse und -prognose von Drucktankbehältern
- Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi

Programmierung UMAT
Martin Wagner
wagnerm@iabg.de

Simulation
Dr. Ingo Becker
beckeri@iabg.de

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

Ihre Ansprechpartner

IABG mbH

M. Neumeister, I. Becker, M. Wagner, A. Mösenbacher

Festigkeit, Berechnung, Methodenentwicklung

Einsteinstraße 20
85521 Ottobrunn

Telefon +49 89 6088-2486

neumeister@iabg.de

moesenbacher@iabg.de

www.iabg.de

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.

IABG
Einsteinstraße 20 Telefon089 6088-0
85521 Ottobrunn/München Fax 089 6088-4000

IABG Koblenz
Ferdinand-Sauerbruch-Str. 26
56073 Koblenz
Telefon 0261 94729-60
Fax 0261 94729-80

IABG Berlin
Alt Moabit 94
10559 Berlin
Telefon 030 293991-0
Fax 030 293991-44

IABG Lathen
Hermann-Kemper-Str. 23
49762 Lathen
Telefon 05933 62-0
Fax 05933 62-54

IABG Bonn
Kaiserstr. 185-187
53113 Bonn
Telefon 0228 91767-0
Fax 0228 91767-70

IABG Leipzig
Maximilianallee 4
04129 Leipzig
Telefon 0341 65923-0
Fax 0341 65923-29

IABG Dresden
Zum Windkanal 17
01109 Dresden
Telefon 0351 88878-0
Fax 0351 88878-78

IABG Lichtenau
Gut Burghof, Lange Straße 85
33165 Lichtenau
Telefon 05295 88-0
Fax 05295 88-777

IABG Hamburg
Wandsbeker Königstraße 62
c/o MTG Marinetechnik
22041 Hamburg
Telefon 040 6891-4982
Fax 040 6891-6120

IABG Meppen
Schießplatz (Gebäude 170)
49716 Meppen
Telefon 05932 7343-0
Fax 05932 7343-40

IABG Köln-Wahn
Heidestr. 222
51147 Köln
Telefon 02203 685-96
Fax 02203 640-84

IABG Niederlande
c/o ETS, Keplerlaan 1
NL 2201 AZ Noordwijk
Telefon +31 71 565-5969
Fax +31 71 565-5659

IABG USA
c/o Meads, LLC
555 Sparkman Dr., Suite 1440
P.O. Box 5900
Huntsville, AL 35814
Telefon +1 256 864-8603
Fax +1 256 854-0146

© IABG mbH 2017, all rights reserved also as regards each order, utilization, reproduction, processing, passing on as well as for the case of property right applications.