Reverse Engineering
dynamische Materialcharakterisierung mit
4a Impetus

Dipl. Ing. Peter Reithofer , Dipl. Ing. Martin Fritz

4a engineering GmbH
Industriepark 1
8772 Traboch
Austria

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Inhalt

- Klassische Vorgehensweise

  Messtechnik – Belastungssituation - Einschränkungen

- 4a Impetus

  Motivation – Prüfmöglichkeiten – Softwarelösung - Reverse Engineering

- Anwendungsbeispiel Komponentenprüfung

  BioRID II – Kabelbaum

- Zusammenfassung

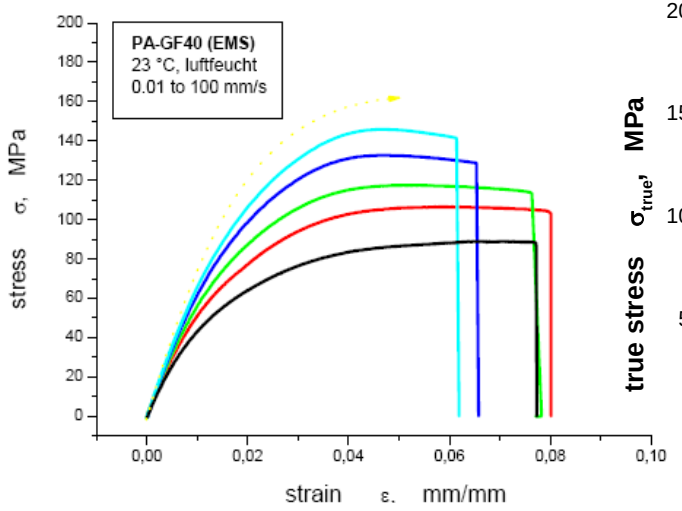
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

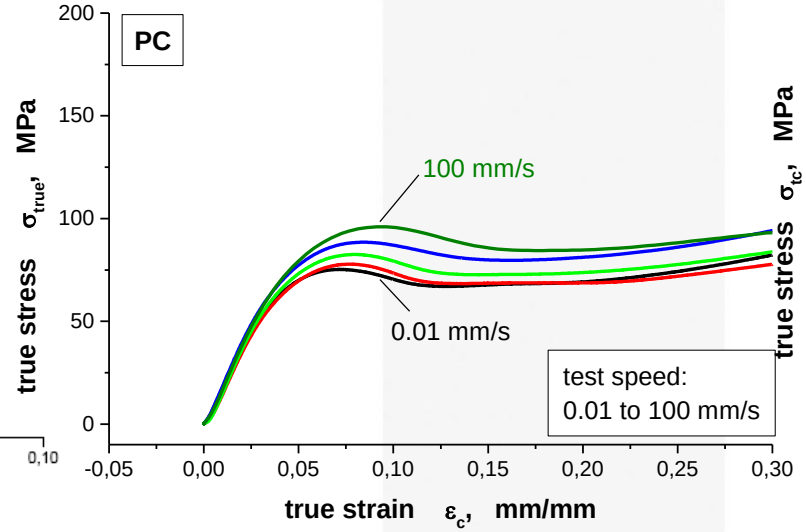
Einflussfaktoren Materialverhalten Kunststoffe

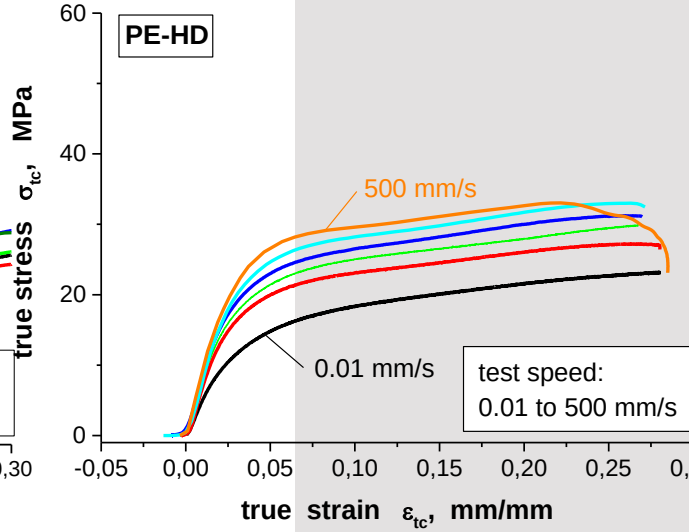
dynamische Materialverhalten

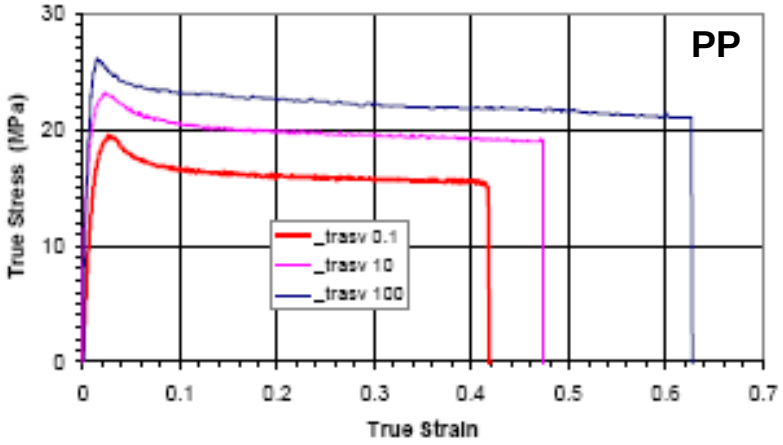
Je nach Material ist das dynamische Verhalten mehr oder weniger ausgeprägt.

Beispielhaft dargestellt für unterschiedliche Materialien. [1], [2], [3]







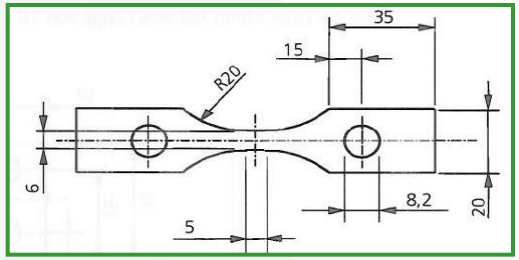


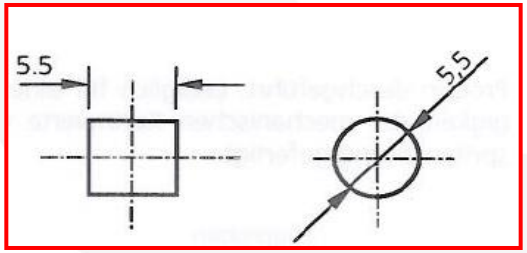
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

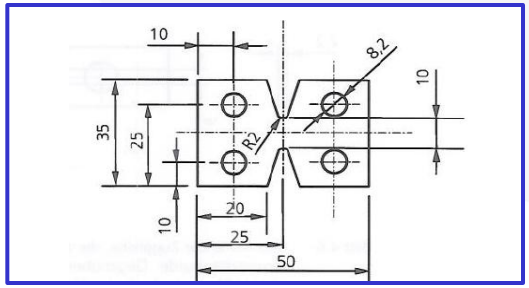
Klassische Vorgehensweise

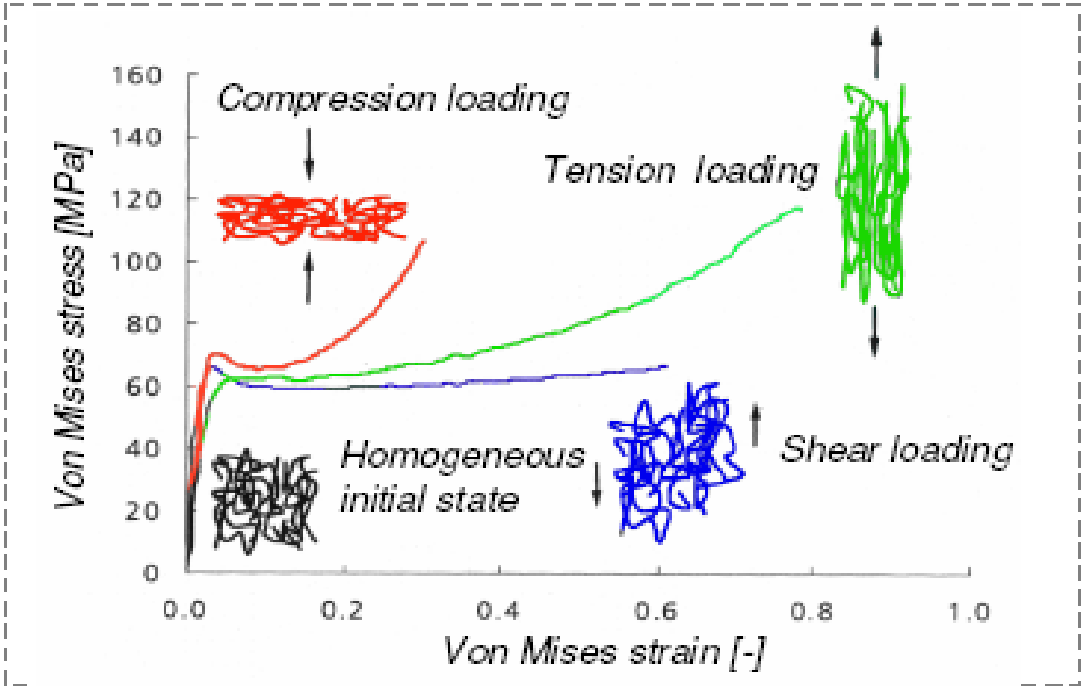
Belastungssituation

Um zum Beispiel von Kunststoffen das unterschiedliche von der Belastungssituation abhängige typische mechanische Verhalten zu untersuchen, werden spezielle Prüfgeometrien als auch optische Messverfahren (z.B. Graufeldanalyse) benötigt. [4] [5] [6] Trotz des hohen Aufwandes ist nicht gewährleistet bei jeder Prüfbedingung hinreichende Informationen aus den Materialversuchen zu gewinnen (z.B. zu hohe Geschwindigkeit aufgrund von Lokalisierung, Prüfbedingen bei dem das optische Verfahren keine Ergebnisse liefert)





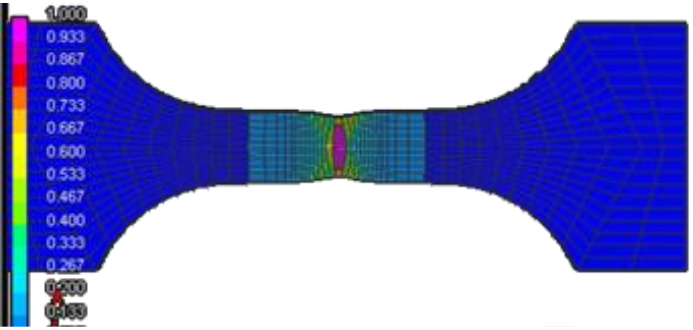


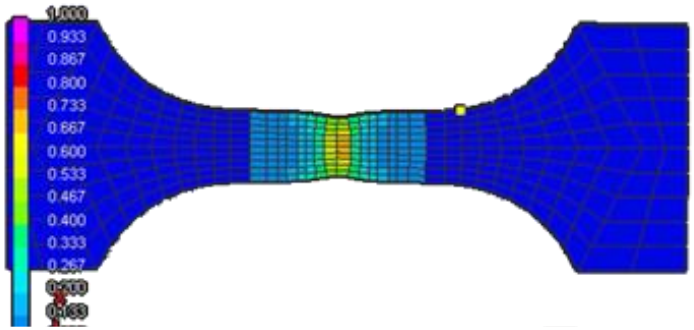


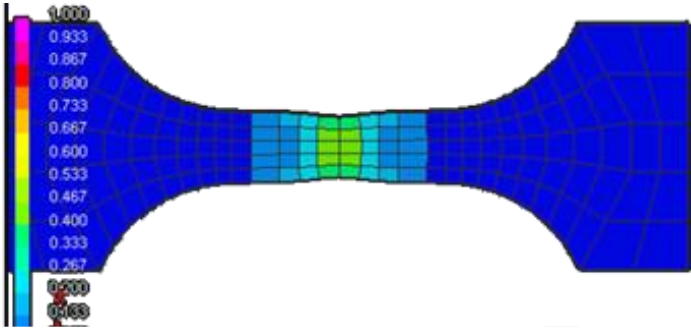
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

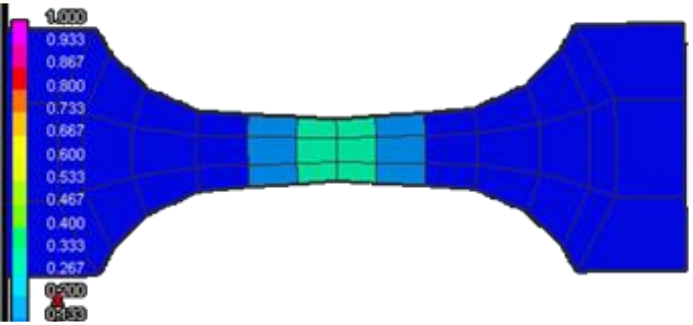
Klassische Vorgehensweise

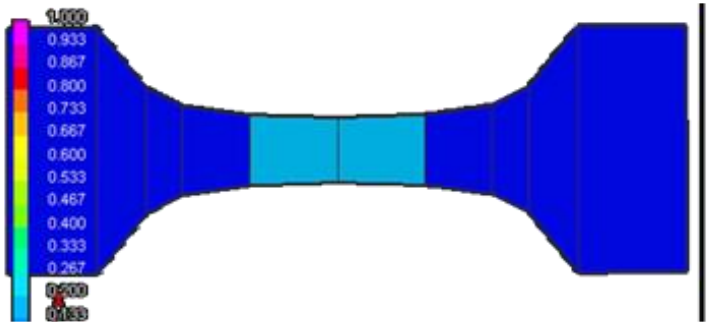
Anpassung Bruchdehnung









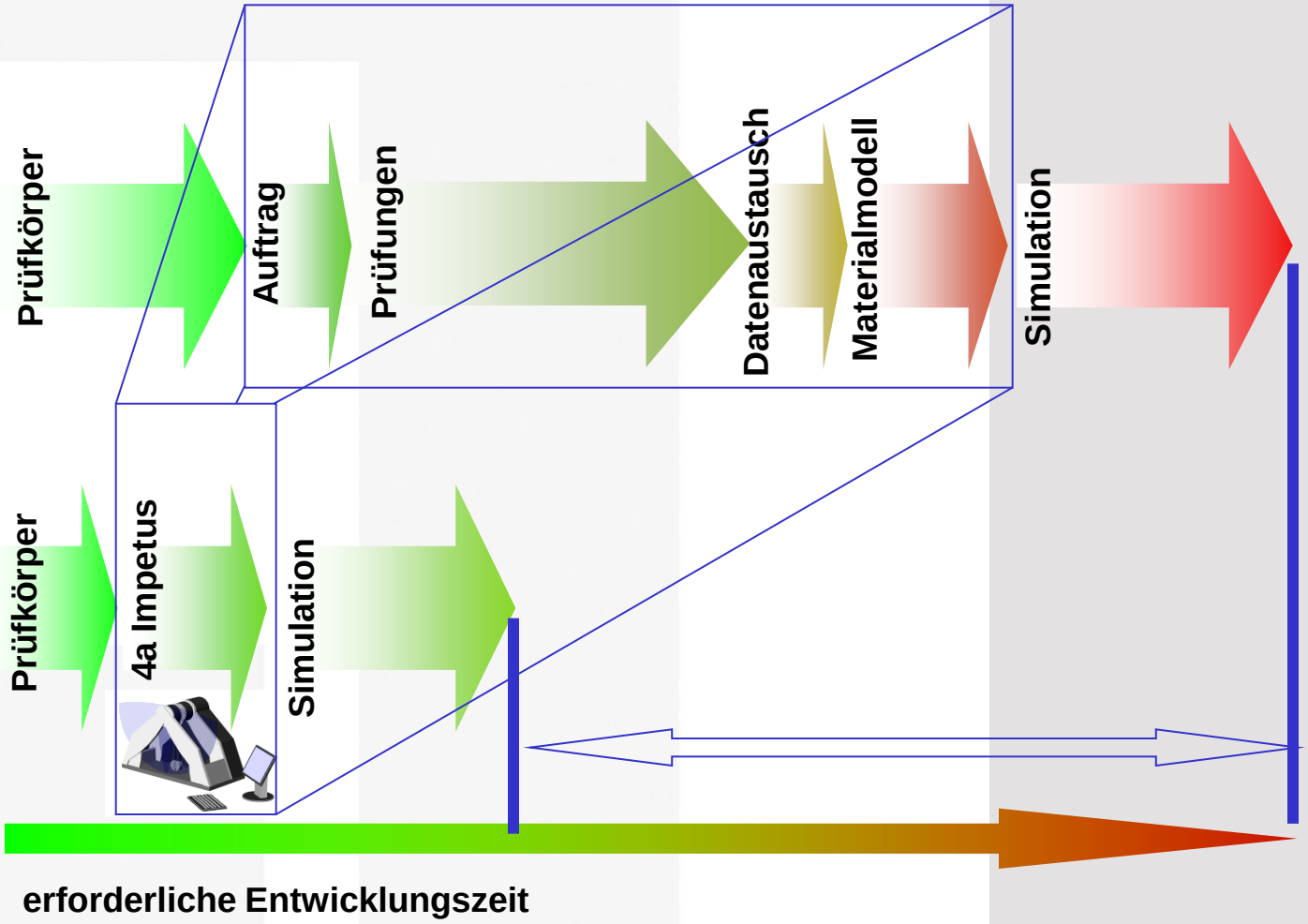


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

Motivation

- Entwicklungszeiten und –kosten senken
- Zeitlicher Vorsprung
- Probekörper aus dem Bauteil
  - Realistisches Versagen an der Oberfläche
  - Belastung und Entlastung
  - Erkenntnisse über die Energieaufnahme
  - Spannungsverlauf über den Querschnitt
  - Dehnraten wie in der Realität aufgrund der Energieaufnahme
- Nachvollziehbar
- Datenbankstruktur
- In sich geschlossenes System
- Tischgerät



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

Möglichkeiten

- Prüfungsarten
  - Elastomere, geschäumte Polymere, unverstärkte und verstärkte Thermoplaste, Duroplaste,
  - Druckversuch → (TxBxL)max 60 x 40 x 40 mm
  - Biegeversuch → (TxBxL)max 40 x 40 x 250 mm
  - Durchstoßversuch → (TxBxL)max 60 x 40 x 40 mm
  - Komponenten → (TxBxL)max 200 x 200 x 200 mm
- Einfachpendelausführung
  - dynamischer Geschwindigkeitsbereich
  - 500 - 4500 mm/s
  - Maximale Energie 50J
  - Betriebstemperatur von + 20 bis + 25 °C
  - Maximal zulässige Beschleunigung 2000 g
- Optionale Doppelpendelausführung
  - dynamischer Geschwindigkeitsbereich
  - 500 - 9000 mm/s
- Optionale quasistatische Prüfvorrichtung
  - quasistatischer Geschwindigkeitsbereich - 10 mm/s
- Sensoren
  - Temperatur und Feuchtesensor
  - Zwei (ein) Beschleunigungssensoren (50g, 200g)
  - Zwei (ein) Winkelsensoren
- Optischer Sensor für die Bestimmung der
  - Anfangsgeschwindigkeit und dem Nullpunkt

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

Versuchsablauf

Probe-körper-herstellung

seriennaher Probekörper
(Flachprobe aus realen Herstellungsverfahren)

realitätsnahe Belastungsart
(dynamische Biegebelastung)

Versuchs-durch-führung

kostengünstige antriebsfreie Belastung der Probekörper
(Pendelmasse – potentielle und kinematische Energie)

Aus-werte-verfahren

semianalytisches Auswerteverfahren
(analytische Auswerteverfahren sowie eventuelle Verwendung von Neuronalen Netzwerken zur schnelleren Startwertfindung, Optische Auswerteverfahren)

Lösung der entstehenden komplexen Belastungssituation durch simultane Simulation
(explizite Simulation)

Werte-rückgabe

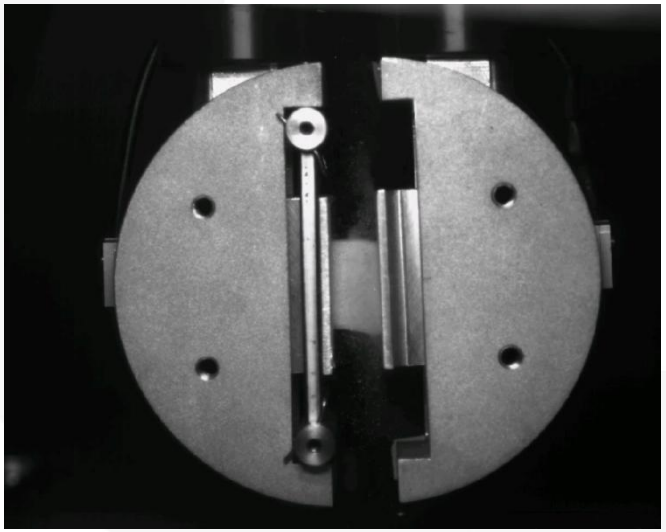
Rückgabe von Materialdaten für die Simulation oder direkte Verwendung
(Ausgabe im entsprechend optimalen Format – Messkurven – Materialkarten – stochastische Ausgabemöglichkeiten)

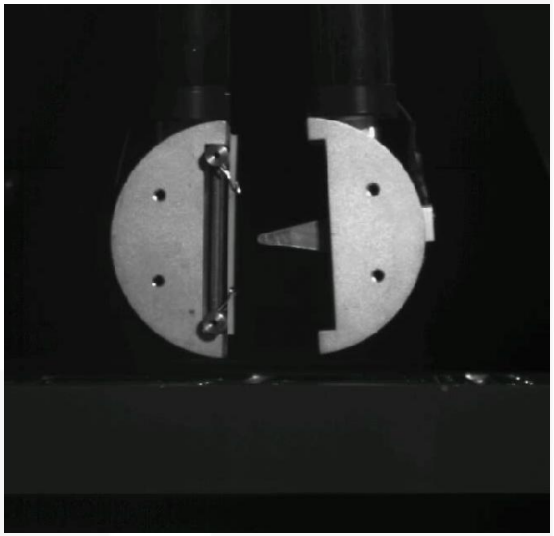
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

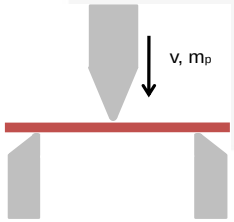
4a Impetus

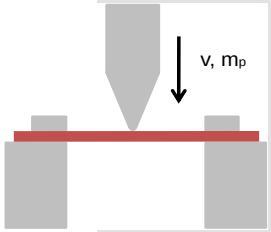
Test Möglichkeiten - Materialcharakterisierung

- Druckversuch (Schaumwerkstoffe)
- Biegeversuch (kompakte Werkstoffe)
- Gespannter Biegeversuch (dominierender Zuganteil)
- Durchstoßversuch (für Textilien)







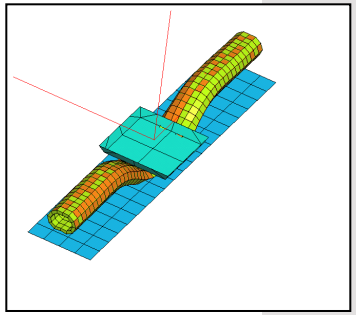


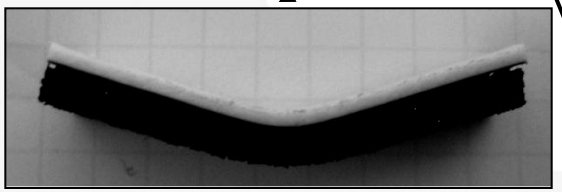
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

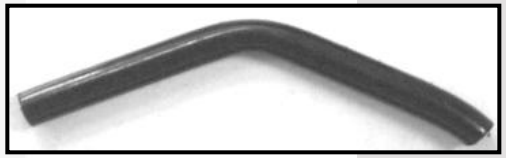
4a Impetus

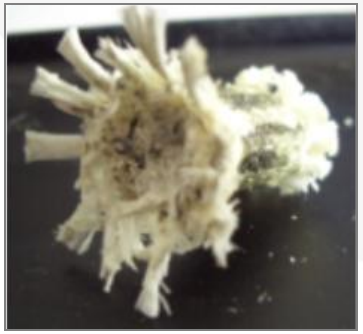
Test Möglichkeiten - Komponenten

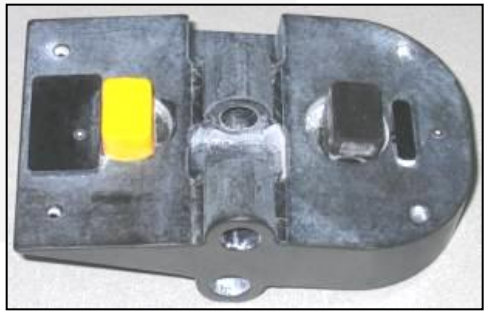
- Kabelbaum
- Wasserschläuche
- Bremsleitungen
- Airbagmodul
- Sonnenblende
- Geschäumt Bauteile
- Wirbelkörper
- Mehrschichtaufbauten







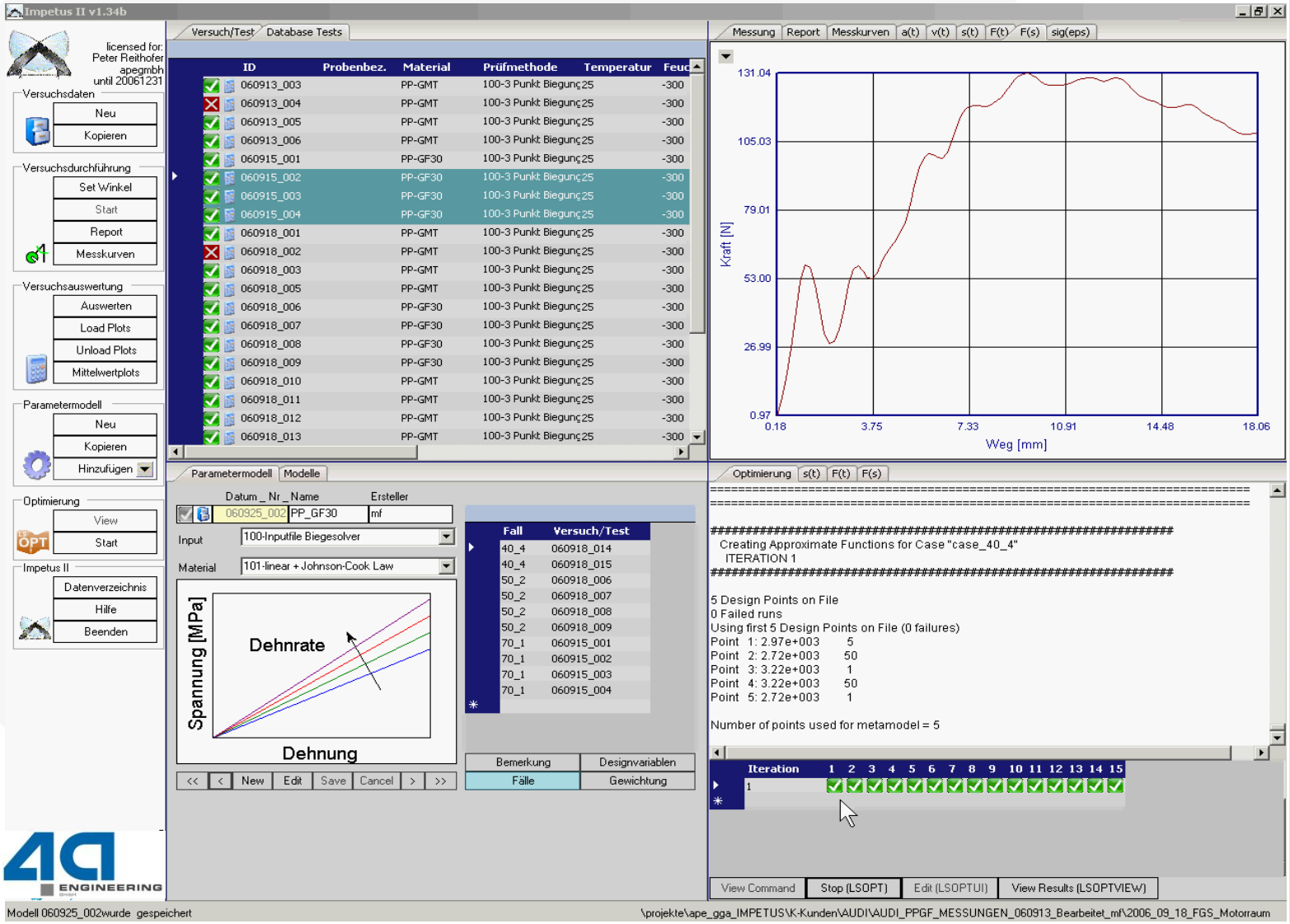




© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

Softwarelösung Versuch bis zur Materialkarte

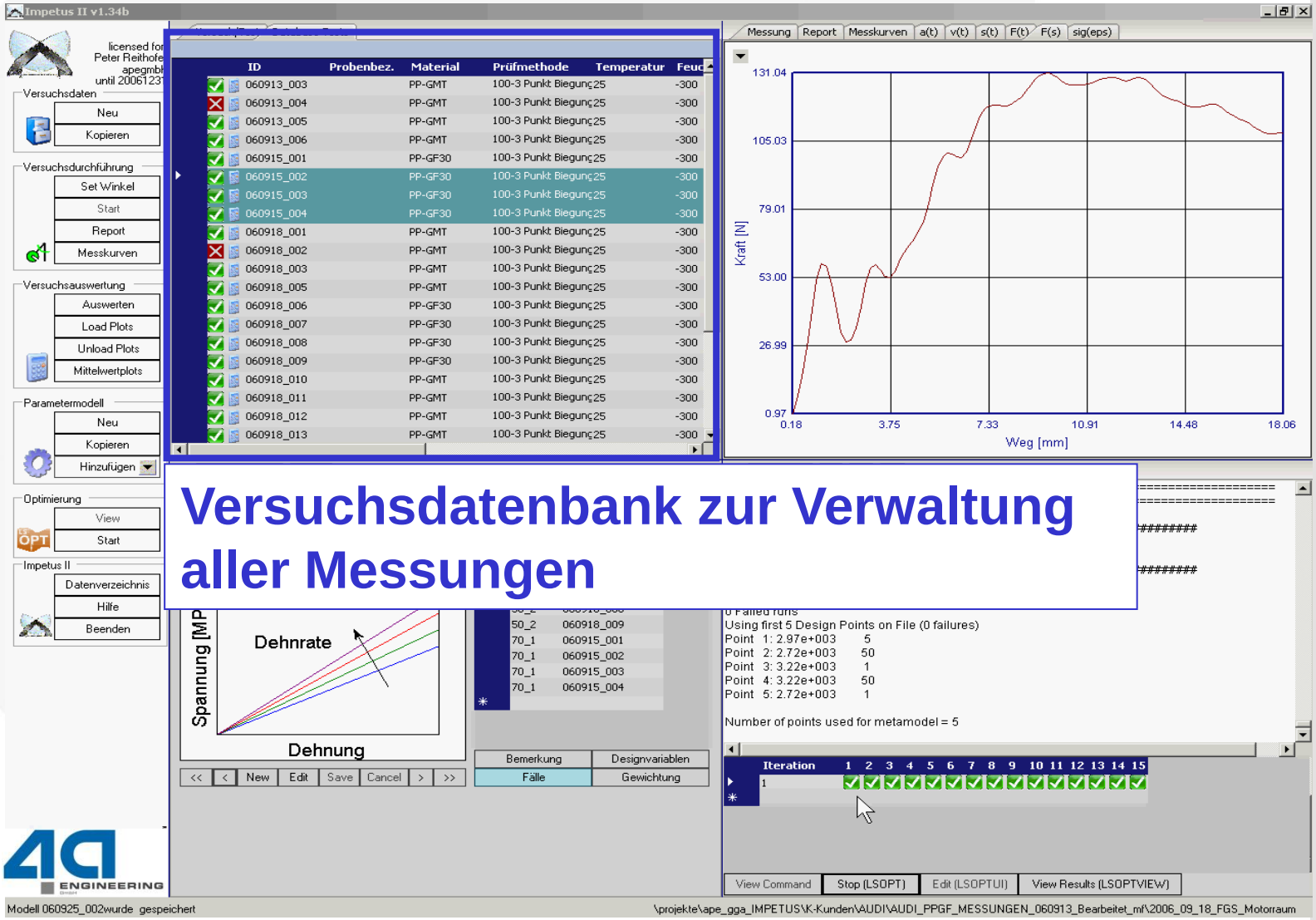


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

I N P H Y S I C S W E T R U S T

4a Impetus

Softwarelösung Versuch bis zur Materialkarte



Versuchsdatenbank zur Verwaltung aller Messungen

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

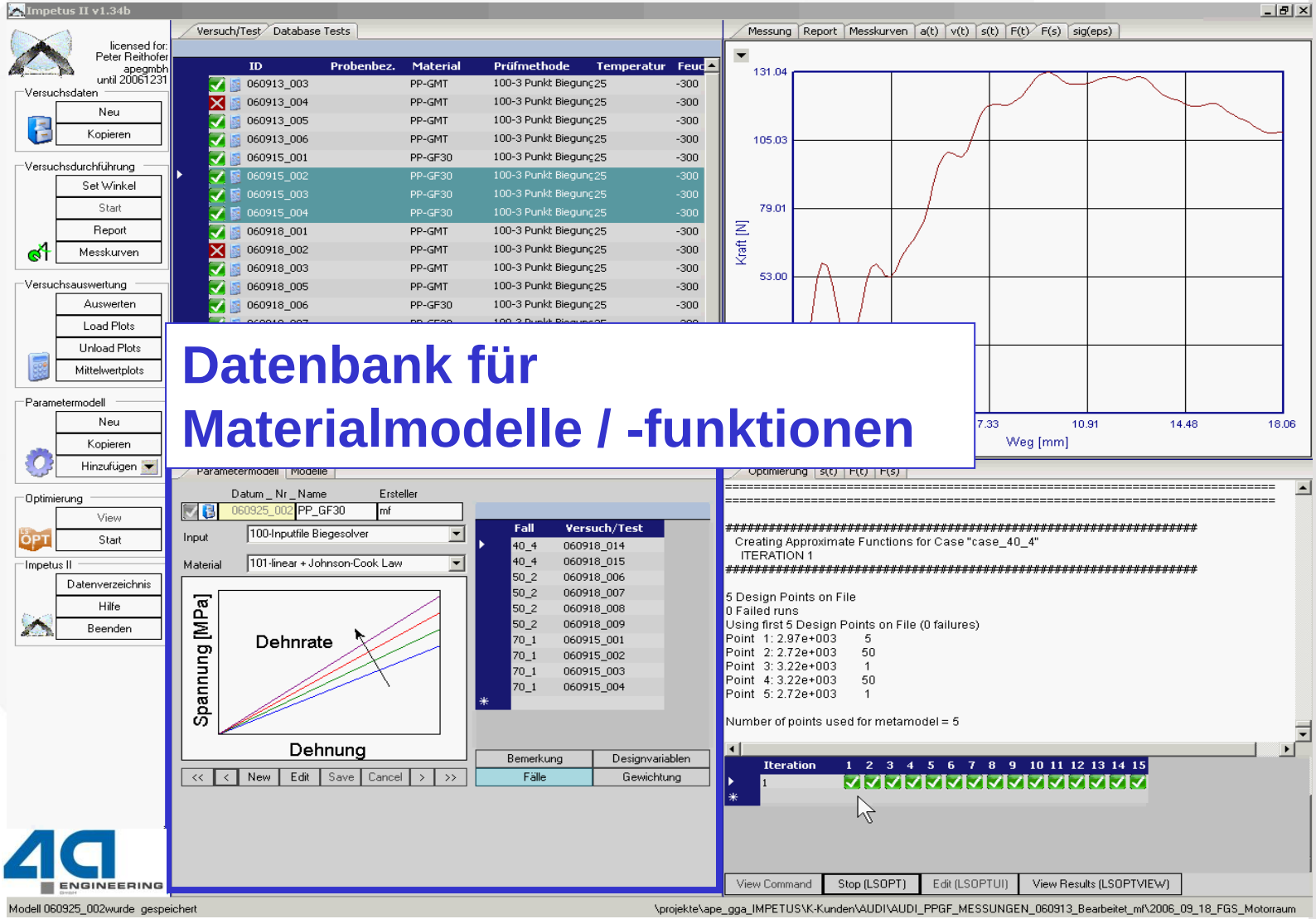
Softwarelösung Versuch bis zur Materialkarte

Intelligente Auswertungsroutinen, benutzerfreundliche Darstellung

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

Softwarelösung Versuch bis zur Materialkarte

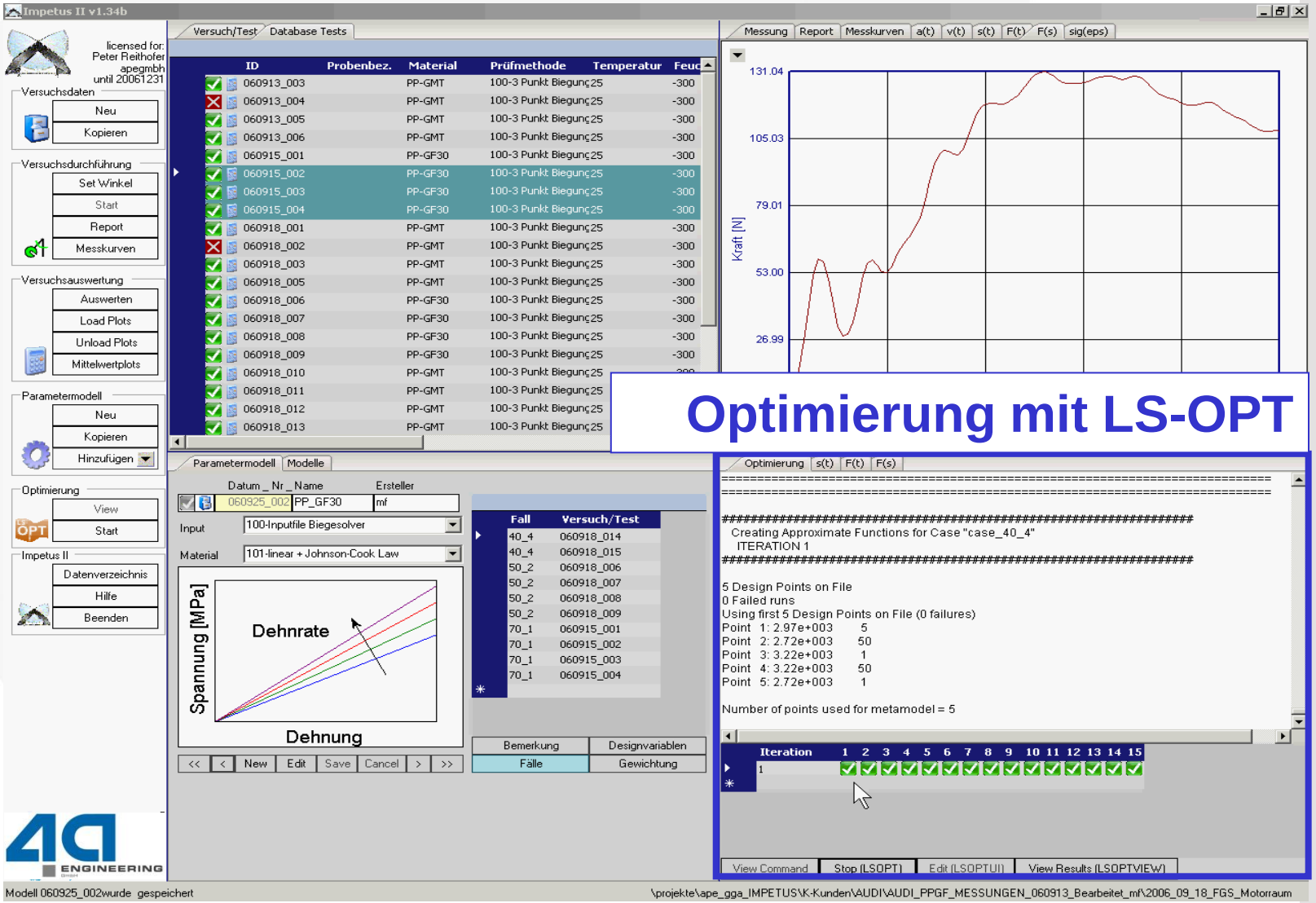


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

I N P H Y S I C S W E T R U S T

4a Impetus

Softwarelösung Versuch bis zur Materialkarte



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

Softwarelösung Versuch bis zur Materialkarte

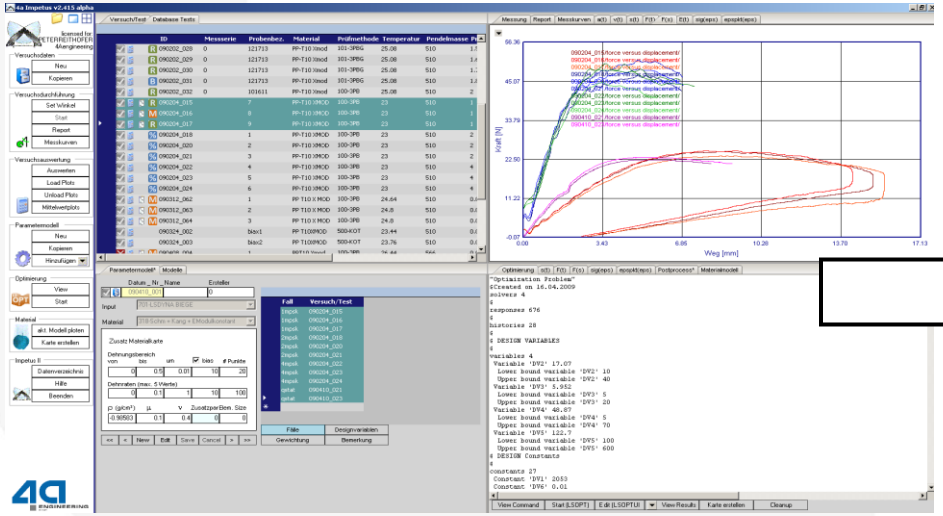
Geschlossenes System vom Versuch bis zur validierten Materialkarte

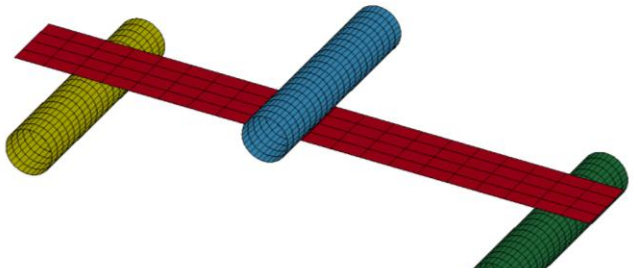
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

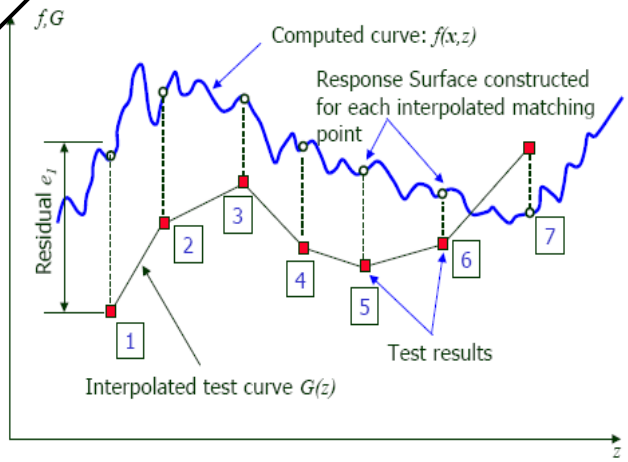
Reverse Engineering – Bestimmung der Materialkarte / -eigenschaften

Mit Hilfe von Simulationsmodellen werden die Versuche nachgestellt und die mittlere Abweichung zwischen Versuch und Simulation berechnet. Sukzessive werden mittels Optimierungsverfahren die Materialeigenschaften des Simulationsmodell so angepasst, das die mittlere Abweichung ein Minimum annimmt.





$$\varepsilon = \frac{1}{P}\sum_{p=1}^{P} W_p \left(\frac{f_p(x) - G_p}{s_p}\right)^2 = \frac{1}{P}\sum_{p=1}^{P} W_p \left(\frac{e_p(x)}{s_p}\right)^2$$

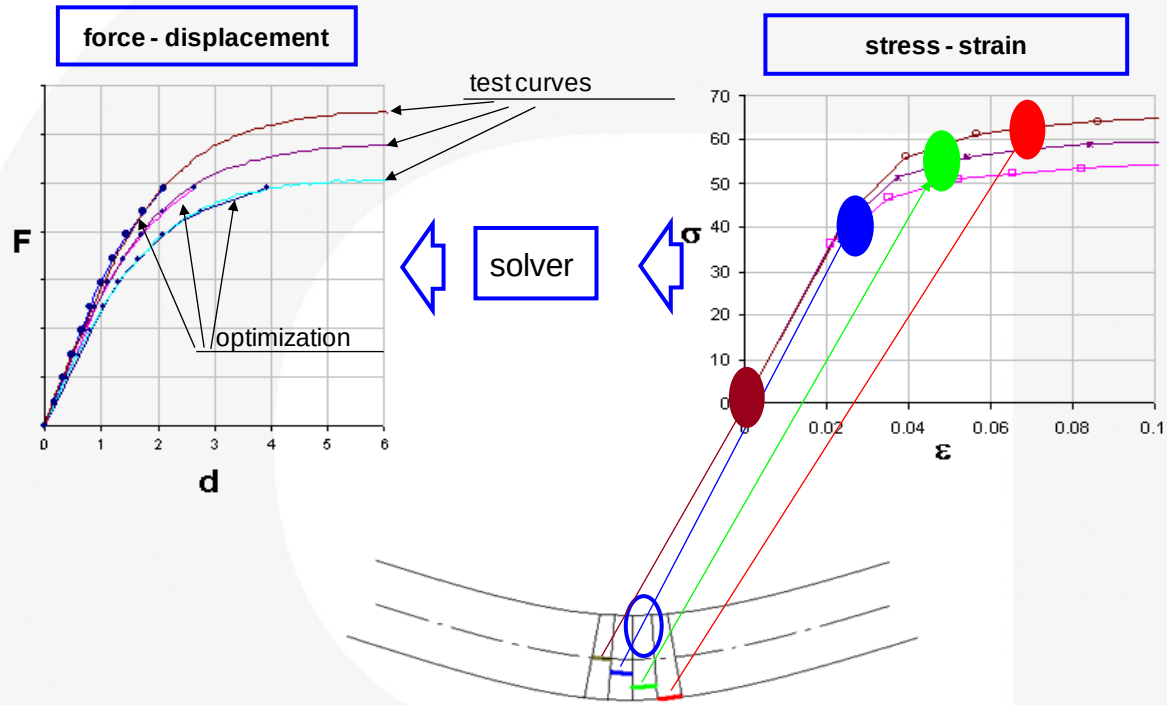


4a Impetus Software Lösung
beinhaltet einen vordefinierten Prozess für das generieren von Materialkarten,
vom dynamischen Test bis hin zu automatischem Reverse Engineering mit Optimierungsverfahren

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

Reverse Engineering – Bestimmung der Materialkarte / -eigenschaften



Source: DA Fritz

Aktuell unterstützt 4a Impetus folgende Materialkarten. Weitere Materialkarten können leicht jederzeit bei Bedarf in den Prozess integriert werden.

- Mat 24 (MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY)
- Mat 81 (MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE)
- Mat 124 (MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION)
- Mat 187 (MAT_SAMP-1)

Ansatzfunktionen

- Bilinear

$$\sigma = \sigma_0 + E_T \cdot \varepsilon_p$$

- Ludwik

$$\sigma = A + B\varepsilon_p^n$$

- Bergström

$$\sigma = A + k\sqrt{1 - \exp(-0.5\,\varepsilon_p)}$$

- G'sell Jonas

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot (1 - e^{-w \cdot \varepsilon_p}) \cdot e^{h \cdot \varepsilon_p^n}$$

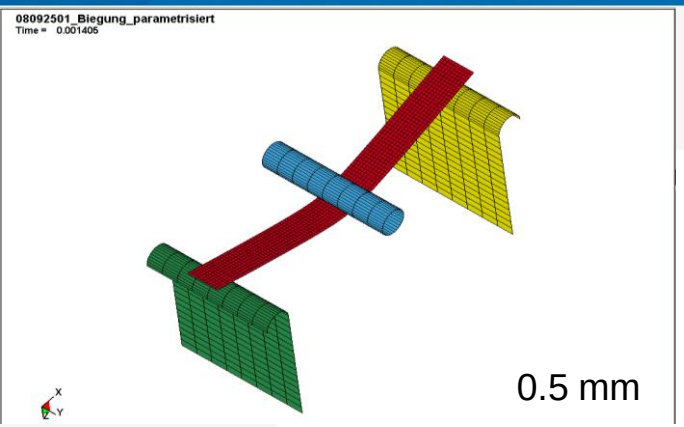
- 4a three parameter law

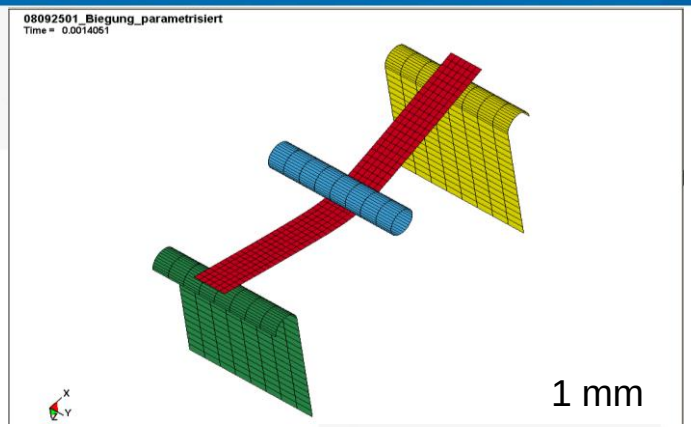
$$\sigma = \sigma_0 + E \cdot \varepsilon_p \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{E}{H} \cdot \varepsilon_p\right]}$$

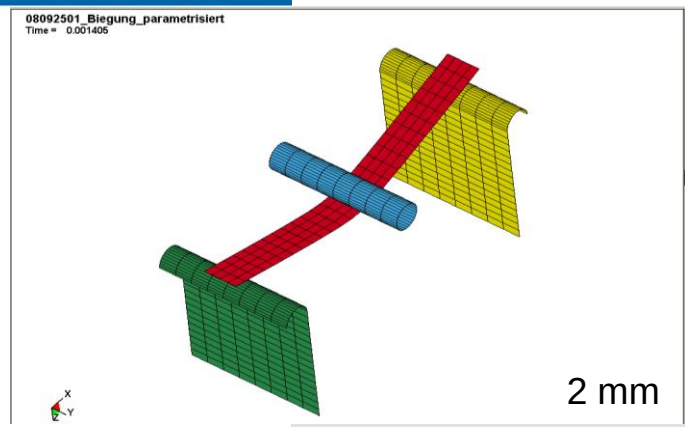
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

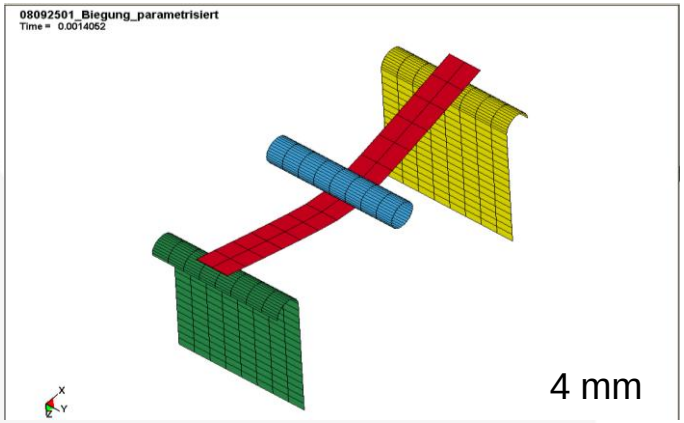
4a Impetus

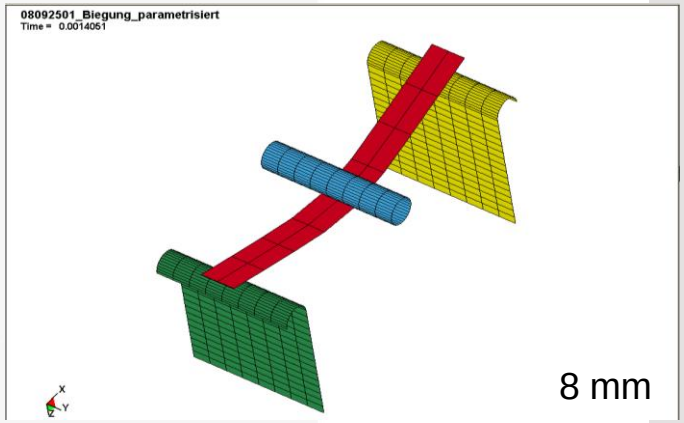
Reverse Engineering – Einfluss Idealisierung











- Unterschiedliche Idealisierung der 3 Punkt Biegeprüfung, dargestellt für einen Auflagerabstand von 40 mm.
  Die unterschiedlichen Modelle werden automatisch mit einem Skript generiert, wobei versucht wird die Sollelementgröße bestmöglich zu erreichen.
  Restriktion dabei ist ein symmetrisches Modell in Probenlänge und –breite.

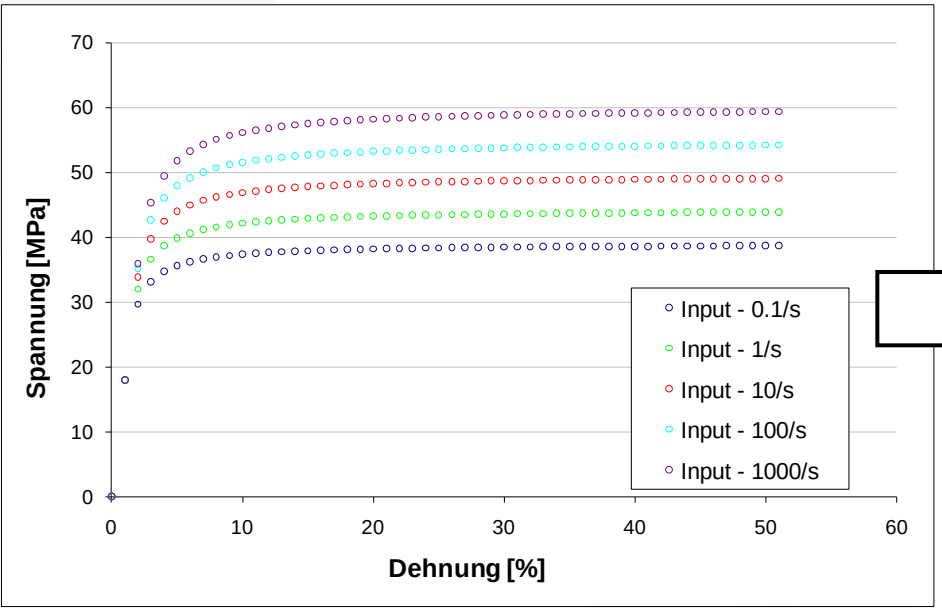
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a Impetus

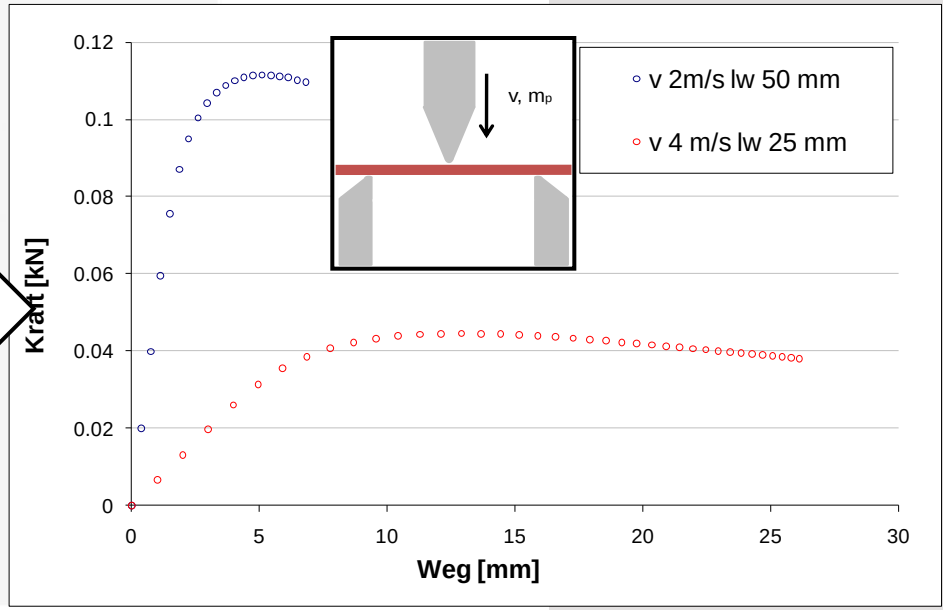
Reverse Engineering – Verifikation

Es gibt keinen direkten mathematischen Beweis, dass Reverse Engineering funktioniert und zu einer eindeutigen Lösung führt. Viele Beispiele zeigen jedoch, dass es im technischen Umfeld sinnvoll ist, mittels Reverse Engineering Modelle anzupassen und damit Zusammenhänge abzubilden. Um die Methode zu verifizieren wird von einem bekannten und postulierten Materialmodell ausgegangen und darauf basierend virtuelle Versuche durchgeführt. Diese virtuellen Versuche bilden die Basis für das Reverse Engineering.

→ Es wird untersucht in wie weit das vorgegebene Materialverhalten reproduziert werden kann.



Postuliertes Materialverhalten



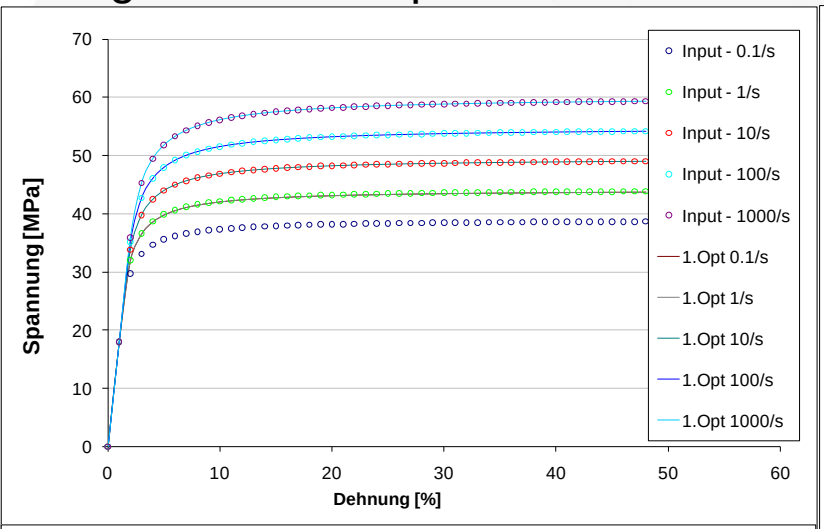
Virtuelle Versuche

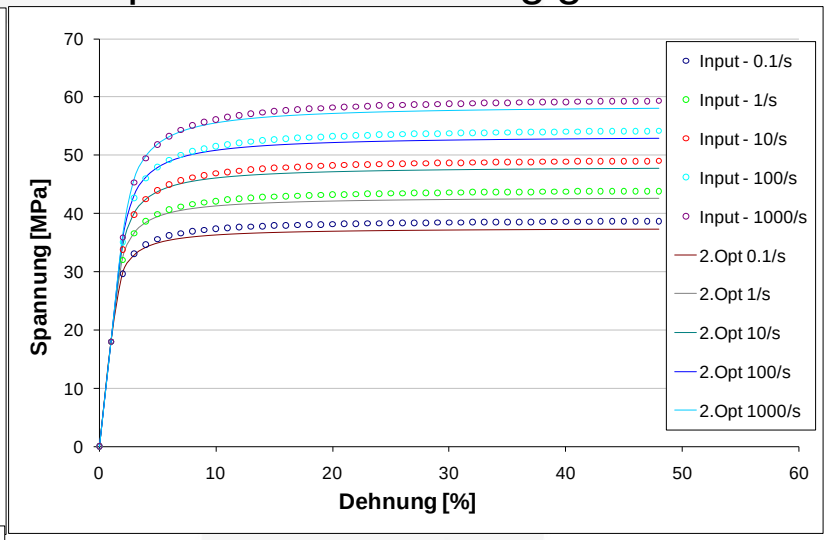
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

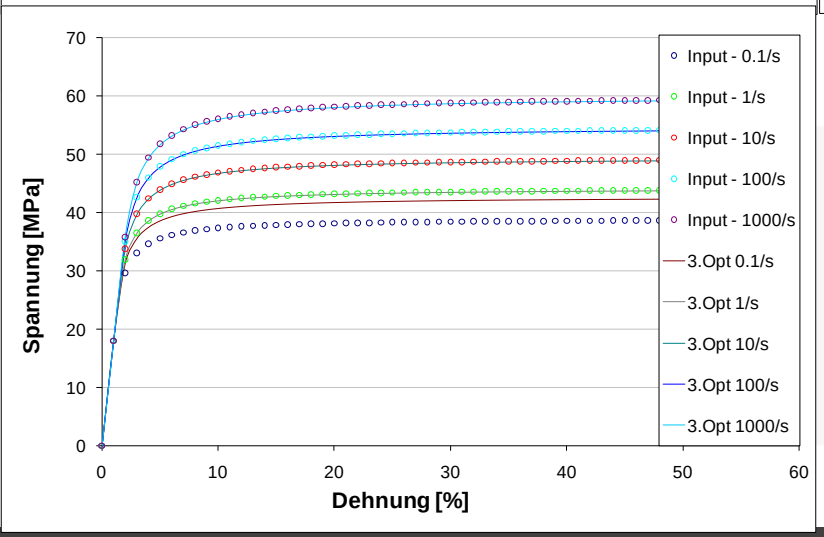
4a Impetus

Reverse Engineering – Verifikation

Unterschiedliche Ausgangssituationen führen im untersuchten Bereich zum selben Ergebnis. Lediglich die Extrapolation ist von den Startparametern abhängig.







Startwerte

	Opt 1.	Opt 2.	Opt 3.
1	2000	1000	10000
2	50	100	1
3	25	5	10
4	25	1	50
5	0.1	1	0.001

Ergebnisse

DV	Input	Opt 1.	Opt 2.	Opt 3.
1	1801	1815	1821	1815
2	22	24.92	22.3	23.99
3	17	19.26	14.34	18.8
4	17	19.14	16.05	18.7
5	0.1	1	0.0651	0.5142

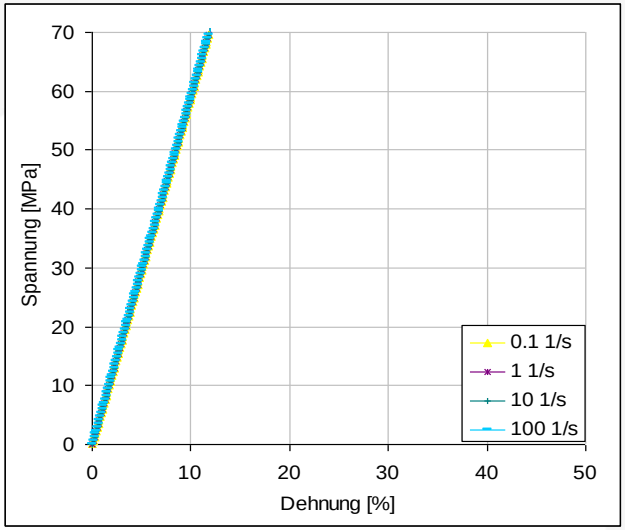
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

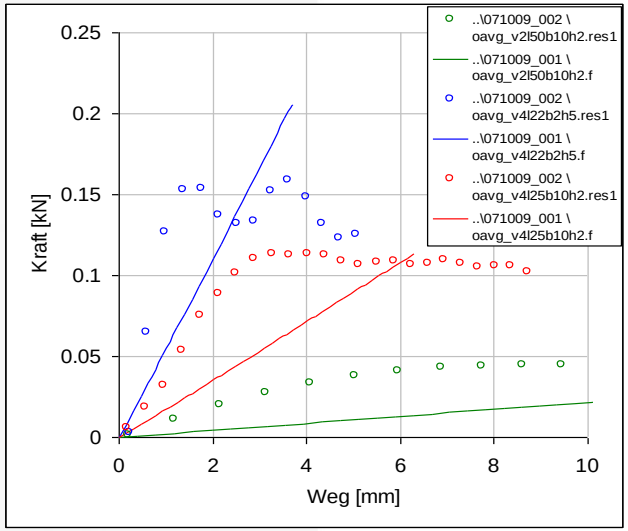
Reverse Engineering – Einfluss Ansatz

Materialfunktion

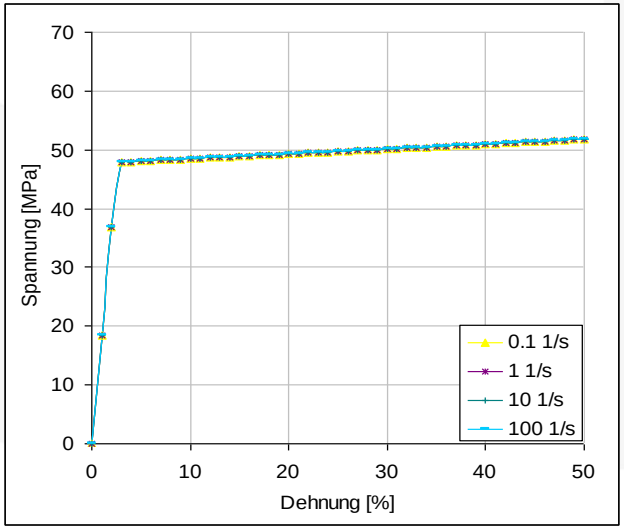
Biegeversuche

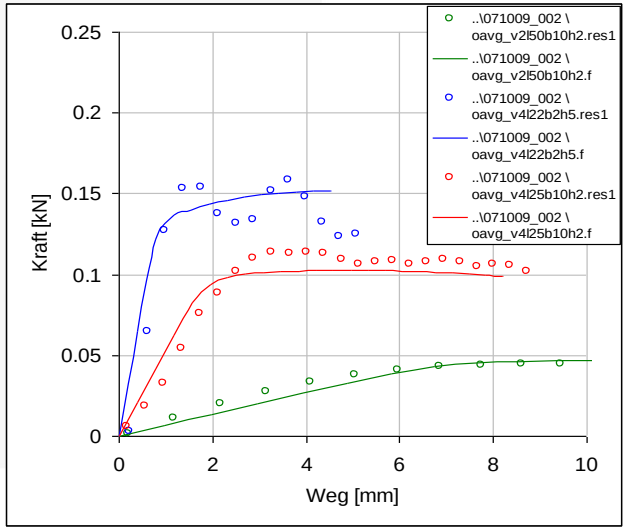
- **Elastisch**





- **Bilinear**
- **Plastisch**





© 4a engineering GmbH, all rights reserved

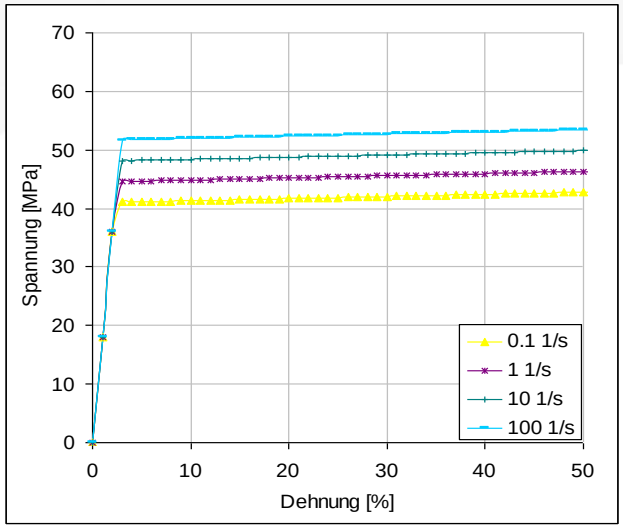
4a Impetus

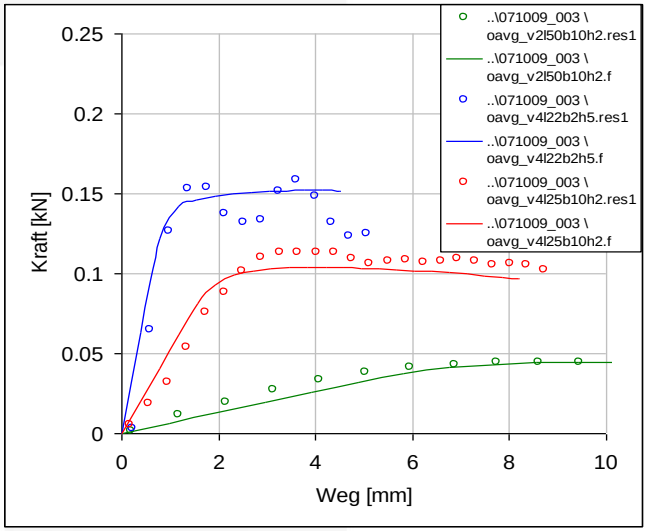
Reverse Engineering – Einfluss Ansatz

Materialfunktion

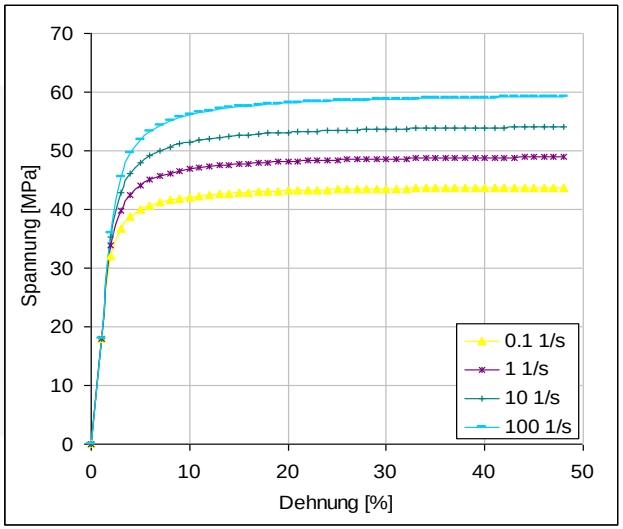
Biegeversuche

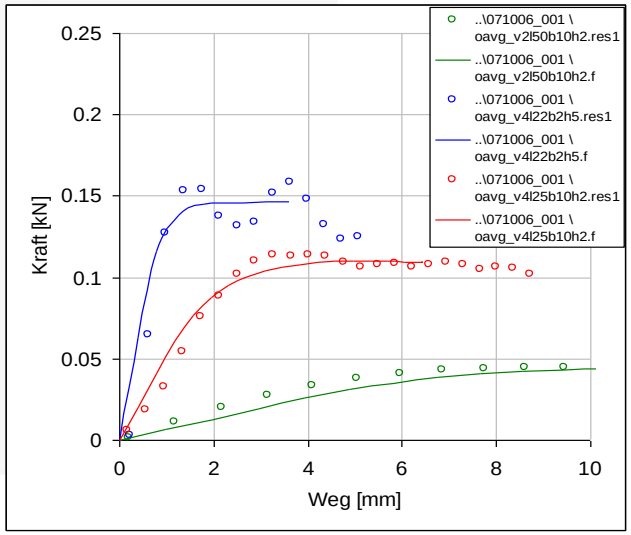
- **Bilinear**
- **Visko-plastisch**





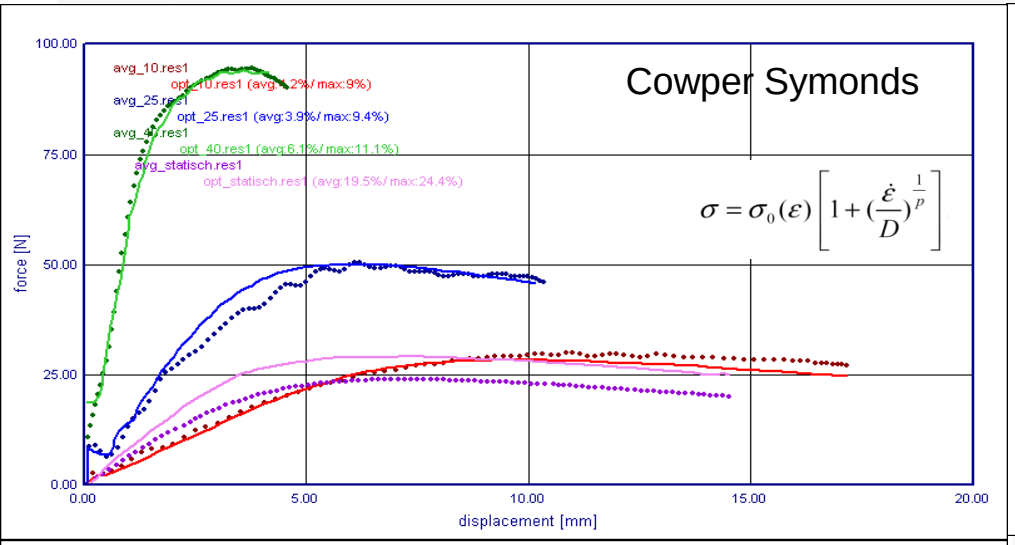
- **3 – Para.**
- **Visko-plastisch**

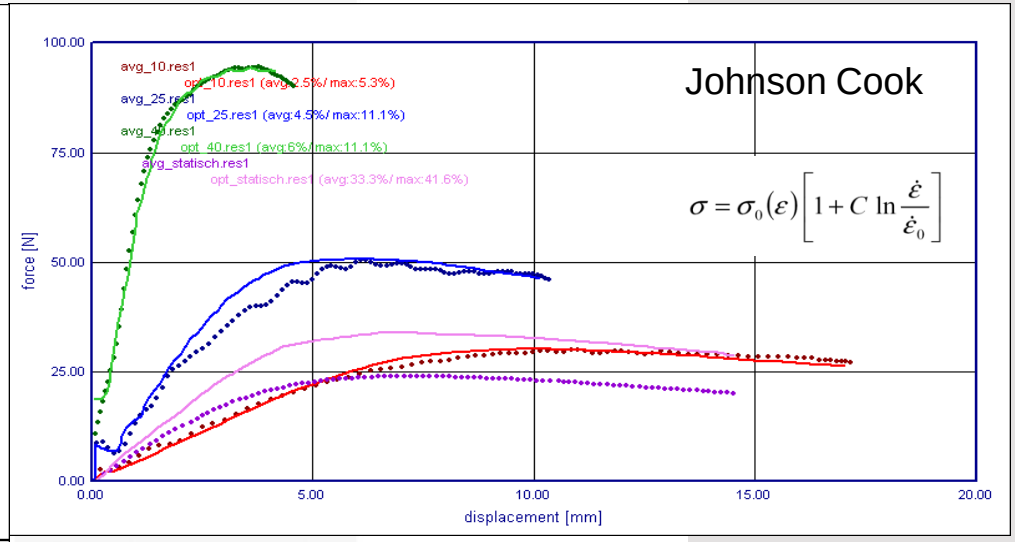


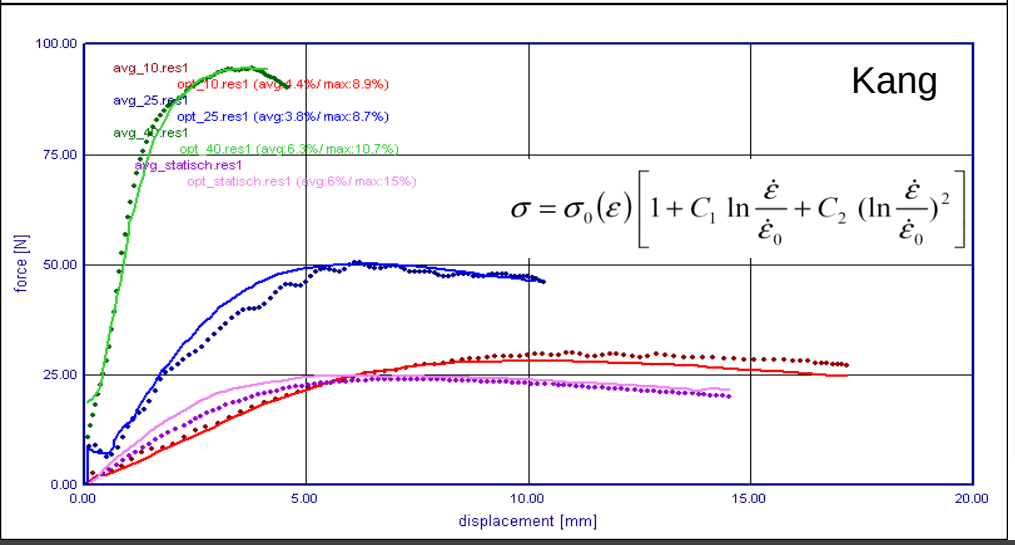


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Unterschiedliche Ansatzfunktion hinsichtlich der Dehnrate



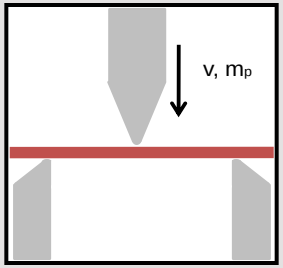




v m/s	l_w mm	$m_{pendulum}$ g
4	25	510
2.5	40	510
1	60	1300
0.001	50	

···· averaged test curves

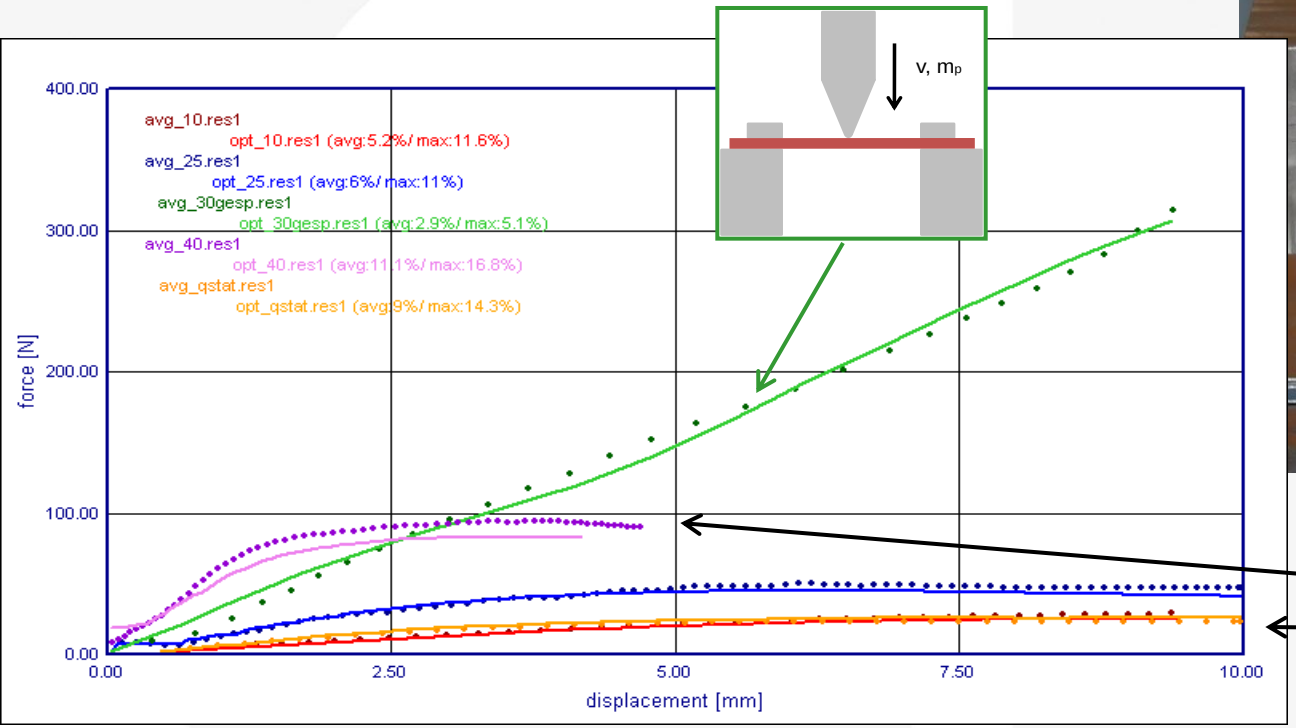
— result of simulation

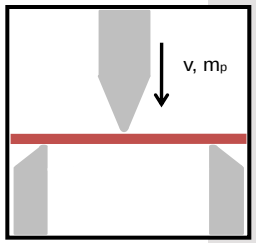


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Fallbeispiel für Materialkarten mit unterschiedlichem Zug/Druck Verhalten

MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION or MAT_SAMP-1





···· averaged test curves

— result of simulation

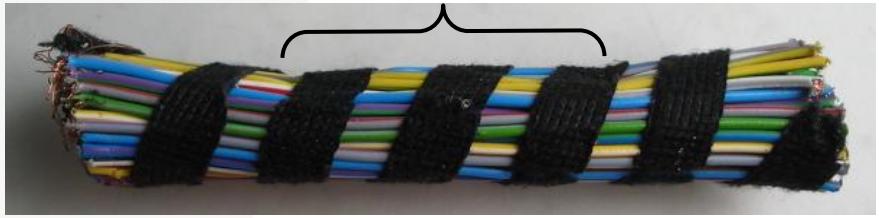
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Anwendungsbeispiel

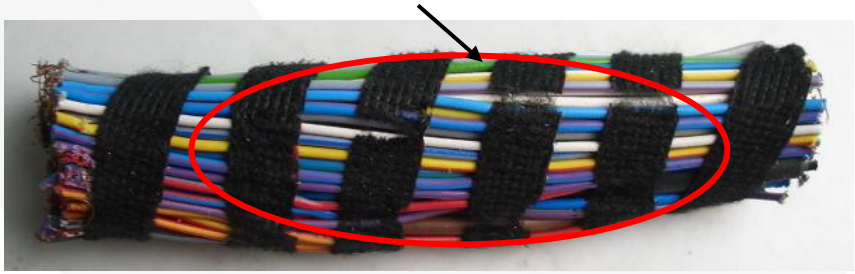
Komponententests / Kabelbaum

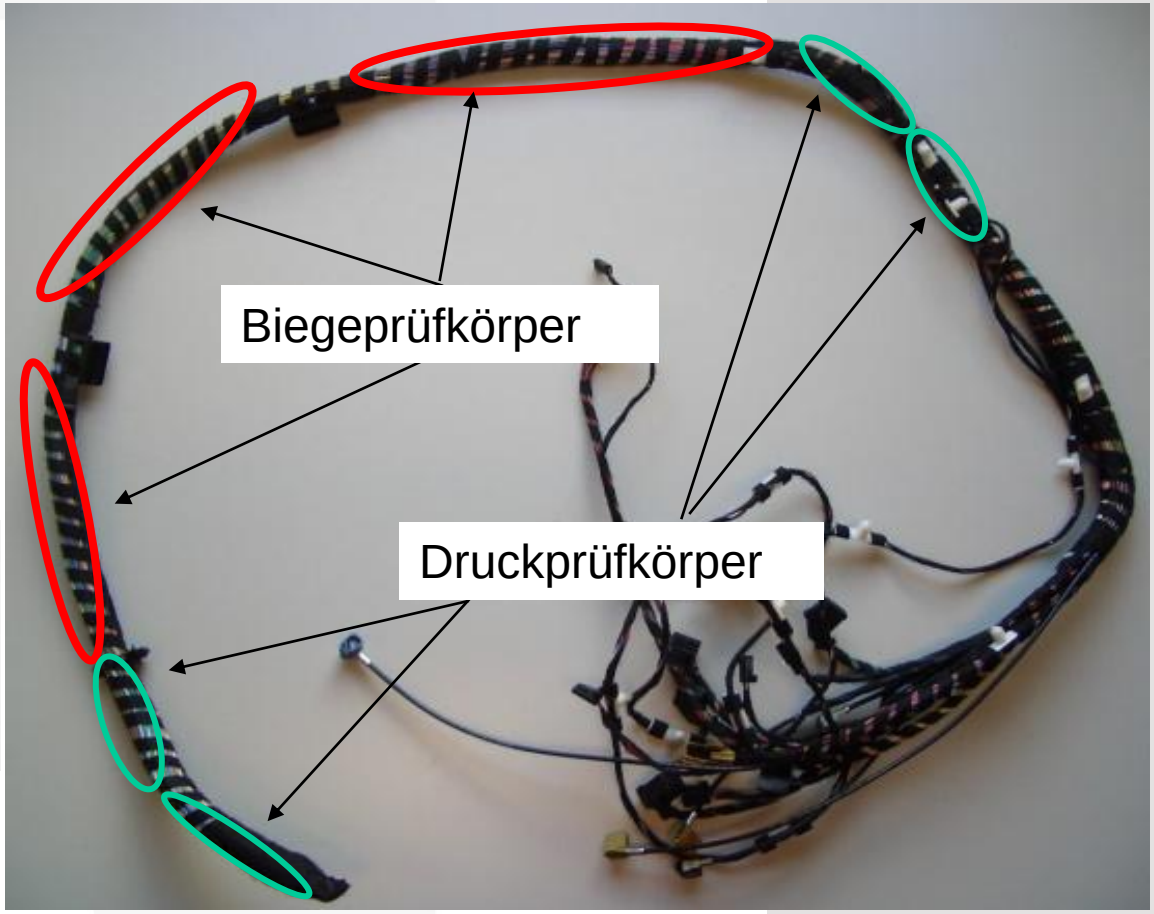
- **Abbildung des Crashverhaltens eines Kabelbaums**

Bereich der Druckfinne



Rückseite am Widerlagerbalken



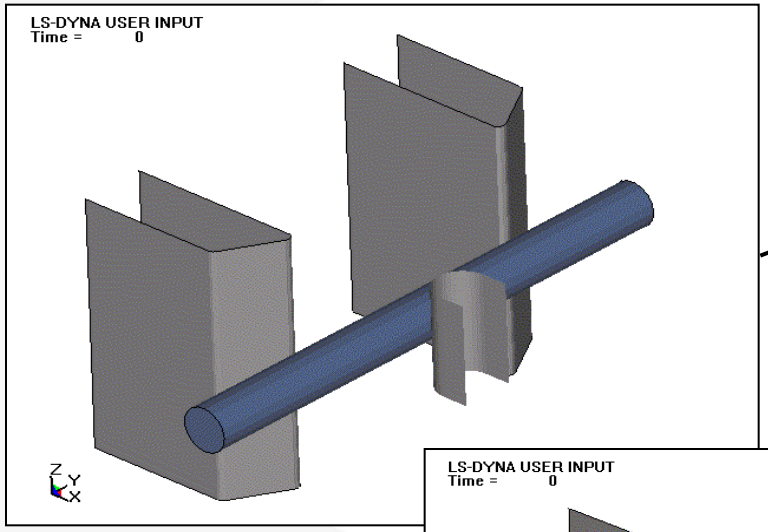


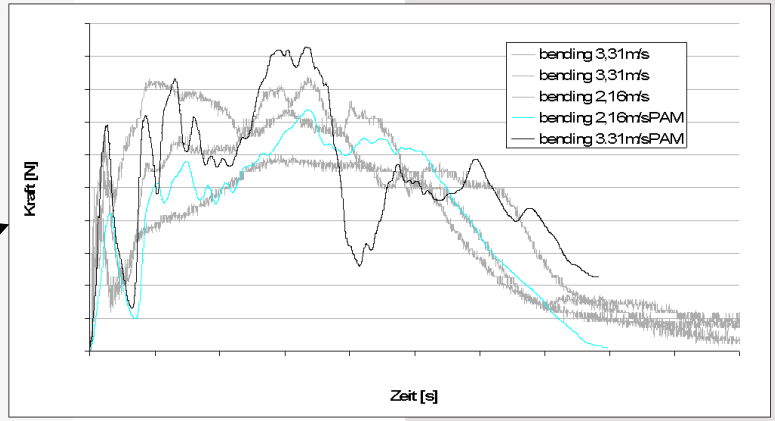
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

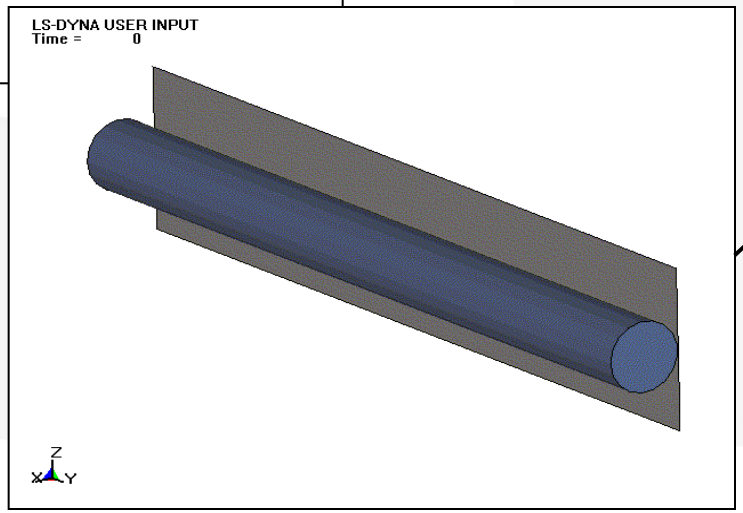
Anwendungsbeispiel

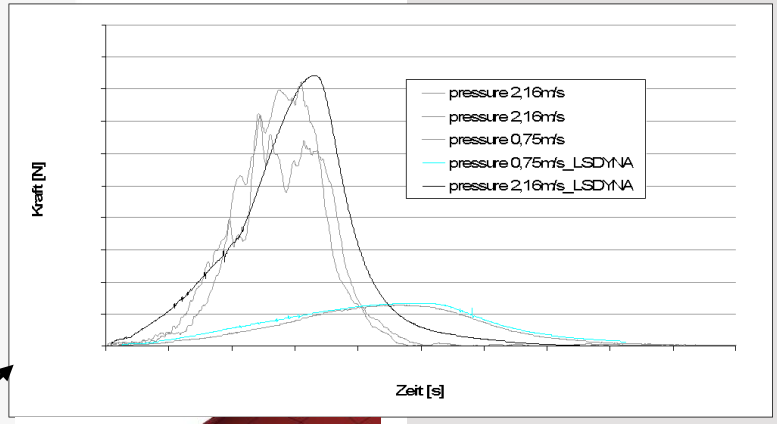
Komponententests / Kabelbaum

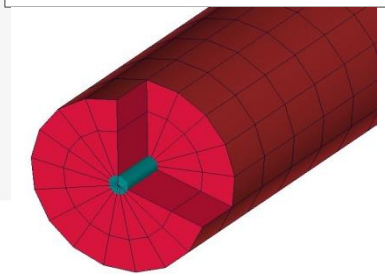
- **Abbildung ist mit einem Material nicht möglich**
- **Es wurden unterschiedliche Ansätze untersucht**











© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Zusammenfassung

- 4a Impetus bietet umfangreiche Prüfmöglichkeiten
- Reverse Engineering ist erforderlich, um sinnvolle Materialmodelle für die Simulation zu generieren.
- Reverse Engineering bietet die Möglichkeit effizient dynamische Materialmodell zu erhalten.
- Sehr rasch zu validierten Materialdaten

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Anhang

Literatur

[1] **Werkstoffprüfung der Kunststoffe - V**
R. W. Lang, Vorlesungsbehelf IWKP 2002

[2] **Characterization of Dynamic Behavior of Engineering Polymers**
Z. Major, M. Reiter, 4a –VDI Technologietag 2008

[3] **Material data for CAE simulation. The approach of Basell Polyolefins**
M. *Nutini, 4a –VDI Technologietag 2008*

[4] **Mechanik der Kunststoffe**
W. Retting, Hanser Verlag 1991

[5] **Charaktersierung und Modellierung unverstärkter thermoplastischer Kunststoffe zur numerischen Simulation von Crashvorgängen**
M. Junginger, Frauenhofer EMI Bericht 15/02

[6] **Characterization of Polyolefines for Design Under Impact: from True Stress / Local Strain Measurements to the F.E. simulation with LS-DYNA Mat. Samp-1**
M. Nutini, M. Vitali, 7th GERMAN LS-DYNA Forum, Bamberg 2008

[7] **Simulation and Verfication of the Drop Test of 3C Products**
H. Wang, S.-C. Chen, L.-T. Huang, Y.-C. Wang, 8th International Users Conference

© 4a engineering GmbH, all rights reserved