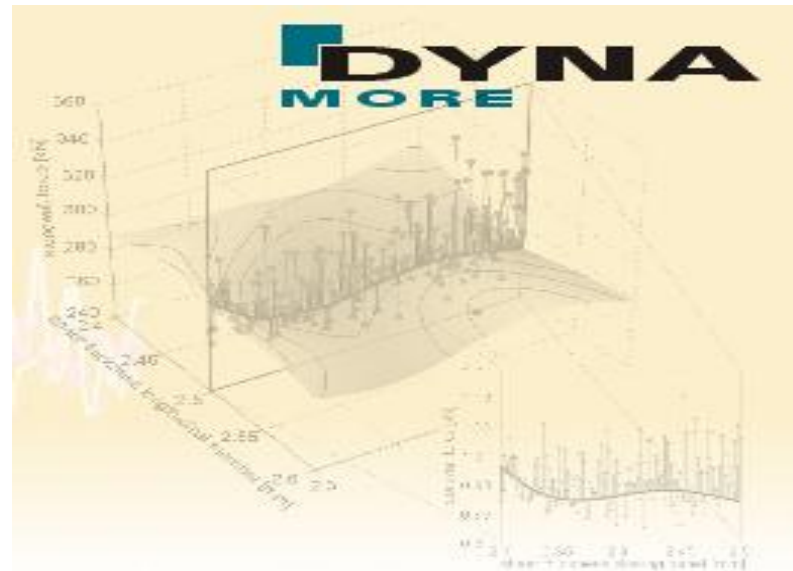


Anpassung von Werkstoffmodellen für Polymere mittels dynamischer Pendelversuche

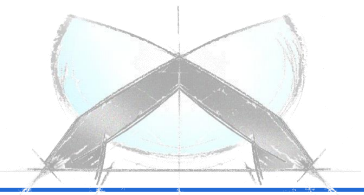
A. Förderer (DYNAmore GmbH)



Workshop Kunststoffe, Filderstadt
24. September 2013

DYNAmore GmbH
Industriestraße 2
70565 Stuttgart
<http://www.dynamore.de>

- Problemstellung
- 4a impetus
 - Materialcharakterisierung / Reverse Engineering
 - Prüfprogramm planen
 - Probekörperherstellung
 - 3-Punkt-Biegeversuche
 - Reverse Engineering - Parameteridentifikation mit LS-OPT
 - Ansatzfunktionen für das Materialmodell
- Zusammenfassung



Problemstellung

- Erstellung einer Materialkarte für Hostacom PP
- Erzeugen der Versuchsdaten mit 4a impetus
- Materialmodell *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (Mat24)

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY

```

$# mid ro e pr sigy etan fail tdel
1000000 [redacted] [redacted] 0.3 0
$# c p lcss lcsr vp
0.000 0.000 1000000 0 1
$# eps1 eps2 eps3 eps4 eps5 eps6 eps7 eps8
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$# es1 es2 es3 es4 es5 es6 es7 es8
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
  
```

- Dehnratenabhängiges Material

*DEFINE_TABLE

```

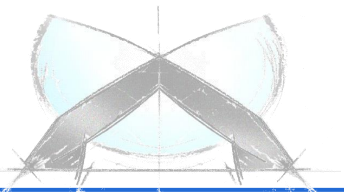
$# tbid
1000000
$# value lcid
[redacted] 1000001
[redacted] 1000002
[redacted] 1000003
  
```

*DEFINE_CURVE

```

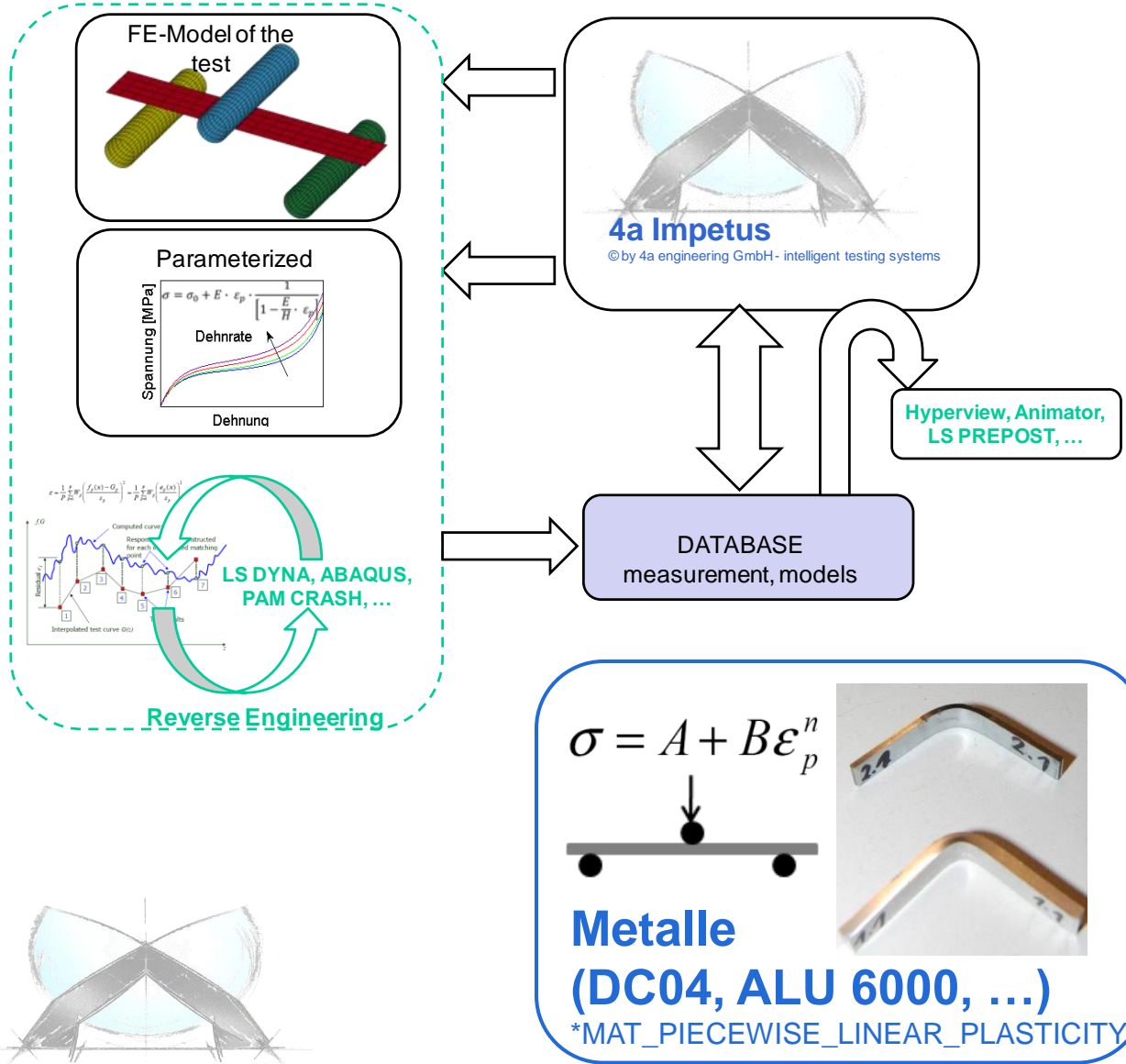
$# lcid sidr sfa sfo offa offo dattyp
1000001 0 1.000000 1.0
$# [redacted] [redacted]
  
```

- Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Kurven mit LS-OPT



4a impetus

Beispiele Materialcharakterisierung / Reverse Engineering



$$\sigma = \sigma_0 + E \cdot \epsilon_p \cdot \frac{1}{1 - \frac{E}{H} \cdot \epsilon_p}$$

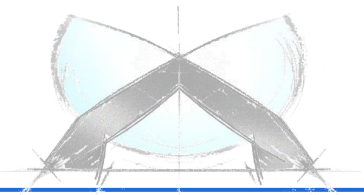
unv. Thermoplaste
(PA6, PBT, PE, PP, PC, ABS ...)
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY

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

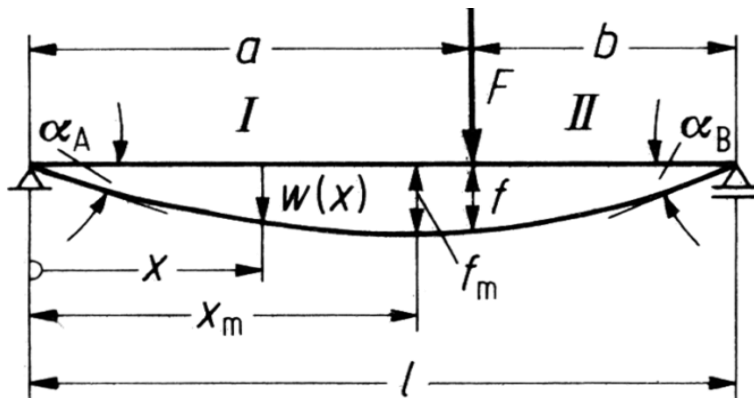
Metalle
(DC04, ALU 6000, ...)
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY

➤ 1. Schritt: Prüfplan erstellen

- Für einen aussagekräftigen Prüfplan sind prinzipielle mathematische Grundlagen zur Biegetheorie zu beachten.
 - Abschätzung, welche Energie für einen Bruch der Probekörper notwendig ist
 - und welche Prüfgeschwindigkeiten und Auflagerabstände eingestellt werden sollten, um einen weiten Bereich der auftretenden Dehnraten abzudecken.



- Beispiel - Erstellen eines Prüfplans
 - 3-Punkt-Biegung – Biegebalkentheorie
 - b ... Probenbreite
 - h ... Probenhöhe
 - l ... Auflagerabstand



Gleichung der Biegelinie für $0 \leq x \leq a$:

$$w_I(x) = \frac{Fab^2}{6EI_y} \left[\left(1 + \frac{l}{b}\right) \frac{x}{l} - \frac{x^3}{abl} \right]$$

Gleichung der Biegelinie für $a = b = x = \frac{l}{2}$:

$$w_I(x = \frac{l}{2}) = \frac{Fl^3}{48E \cdot I_y}$$

und mit $I_y = \frac{bh^3}{12}$:

$$w_I(x = \frac{l}{2}) = \frac{Fl^3}{4Ebh^3}$$

Quelle: Beitz, W.; Küttner, K.-H.: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, Springer Verlag, Seite C20

4a impetus

Prüfprogramm planen

➤ Beispiel - Erstellen eines Prüfplans

➤ 3-Punkt-Biegung – Biegebalkentheorie

Für die Randfaser Spannung gilt :

$$\sigma_b(z) = \frac{M}{I_y} z$$

mit $z = \frac{h}{2}$, $I_y = \frac{bh^3}{12}$ und $M = \frac{Fl}{4}$:

$$\sigma_b(z = \frac{h}{2}) = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

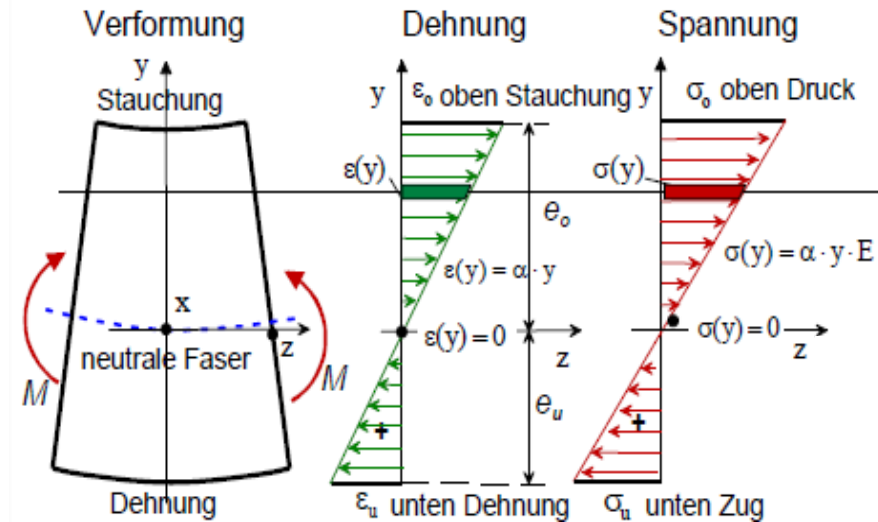
Bei linear-elastischen Verhältnissen ergibt sich die Randfaserdehnung mit:

$$\frac{Fl}{bh^2} = \frac{4w_I(x)Eh}{l^2}$$

$$\sigma_b = \frac{3Fl}{2bh^2} = \frac{6w_I(x)hE}{l^2}$$

zu:

$$\varepsilon = \frac{6w_I(x)h}{l^2}$$



Quelle: Universität Paderborn Vorlesungsunterlagen

Über $t = \frac{s}{v}$ erhält man für die Dehnrates $\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$:

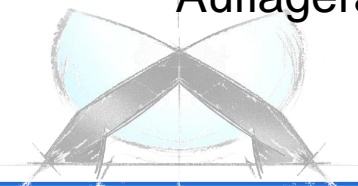
$$\dot{\varepsilon} = \frac{6w(t)h}{l^2}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{6h}{l^2} \frac{\partial w(t)}{\partial t} = \frac{6h}{l^2} v$$

- Die folgende Tabelle zeigt den verwendeten Prüfplan, der unter Berücksichtigung der vorher gezeigten Berechnungen erstellt wurde.

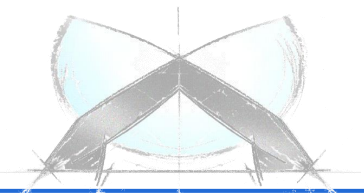
v_0 [m/s]	l_w [mm]	m_{Pendular} [g]	b [mm]	t [mm]	l [mm]	$\dot{\varepsilon}$ [–]	E_{kin} [J]
4	30	500	5	2.4	40	64	4.0
2.5	40	500	5	2.4	50	23	1.6
1	50	500	5	2.4	60	6	0.3
0.00003	30		5	2.4	40	0.0005	0.0

- Der dargestellte Prüfplan weicht vom aktuellen Standard ab:
 - Es werden Proben der Breite **10 mm** verwendet
 - Für die jeweilige Geschwindigkeiten **4**, **2.5**, **1** und **0.001** m/s wird als Auflagerabstand **30**, **40**, **50** bzw. **50** mm verwendet.



- **2. Schritt: Probekörperherstellung**
- Prüfkörper wurden aus Platten herausgeschnitten
- Die Herstellung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen
 - Tischkreissäge
 - Wasserstrahlschneiden
 - CNC Fräsen

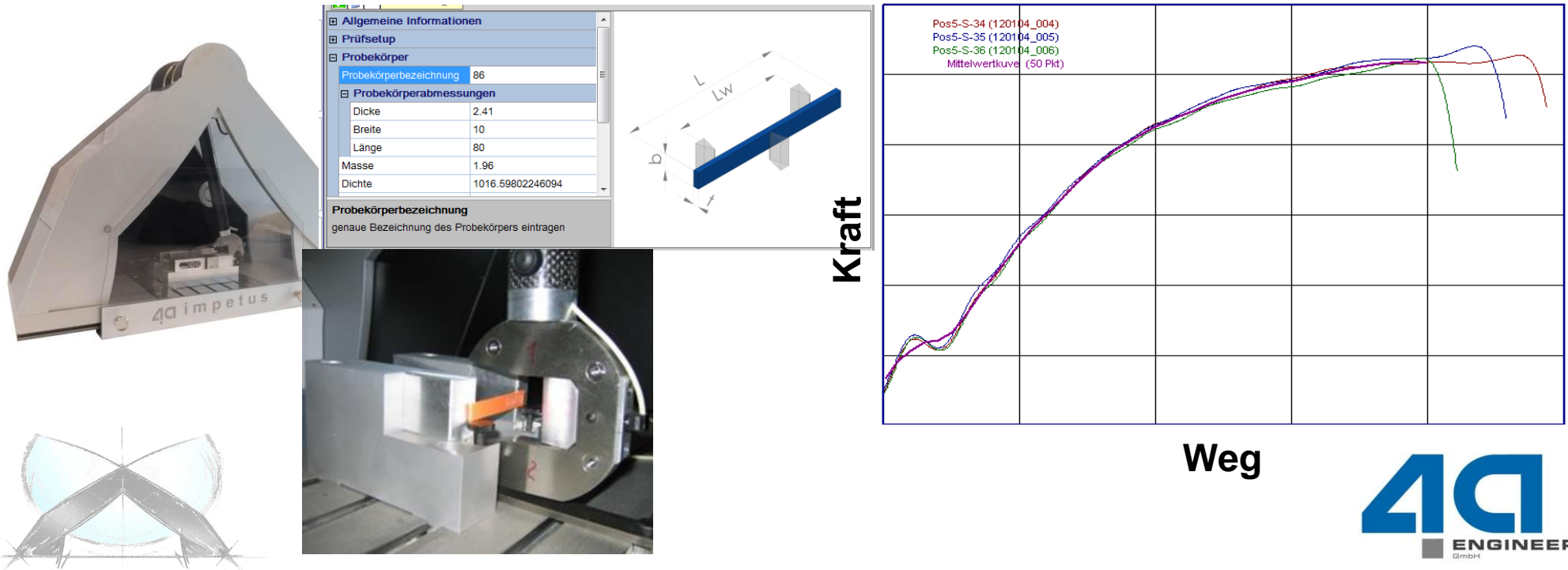
Je nach Material hat die Probenentnahme vor allem Einfluss auf die erreichten Bruchdehnungen (Chemikalienbeständigkeit, Kerbempfindlichkeit, ...)



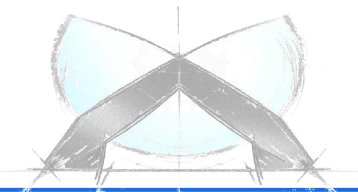
4a impetus

3-Punkt-Biegeversuche

- **3. Schritt: Prüfungen mit 4a impetus**
- 3-Punkt-Biegeversuche mit 4a impetus (Einzelpendel)
- Belastungsgeschwindigkeiten zwischen 1.0 und 4.0 m/s und Auflagerabstand zwischen 26 und 46 mm → Variation der Dehnrates
- mindestens 3 Versuche pro Versuchsaufbau



- **4. Schritt: Materialcharakterisierung - Parameteridentifikation mit LS-OPT**
- Typische Vorgehensweise:
 - Ermittlung des E-Moduls
 - Ermittlung der plastischen Kenndaten (Auswahl der entsprechenden Ansatzfunktion)
 - Ermittlung der Dehnratenabhängigkeit (Auswahl der entsprechenden Ansatzfunktion)
 - Validierung der Ergebnisse an weiteren Versuchen



➤ 4. Schritt: Materialcharakterisierung - Parameteridentifikation mit LS-OPT

E-Modul



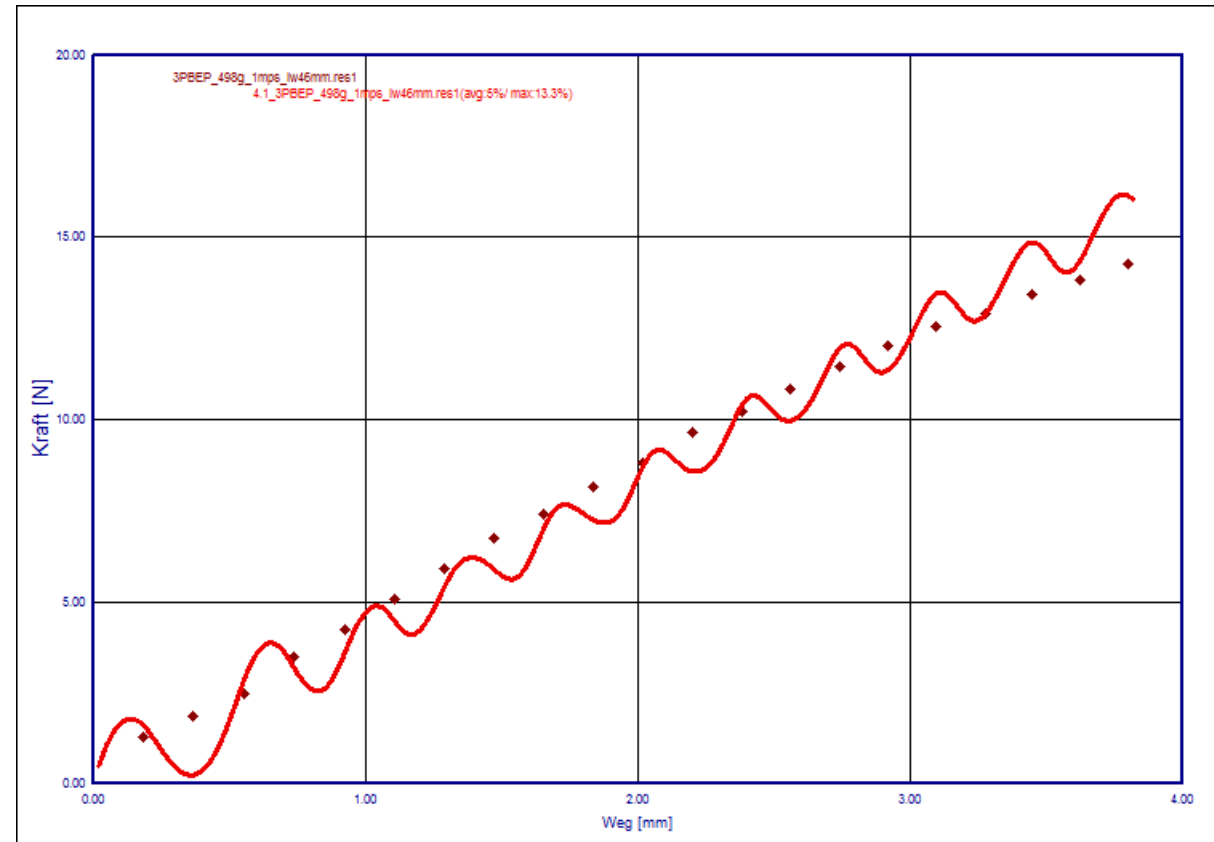
plastischen Kenndaten



Dehnratenabhängigkeit



Validierung



➤ 4. Schritt: Materialcharakterisierung - Parameteridentifikation mit LS-OPT

E-Modul



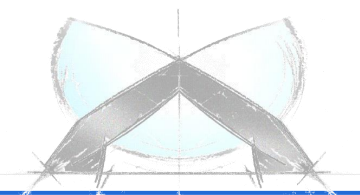
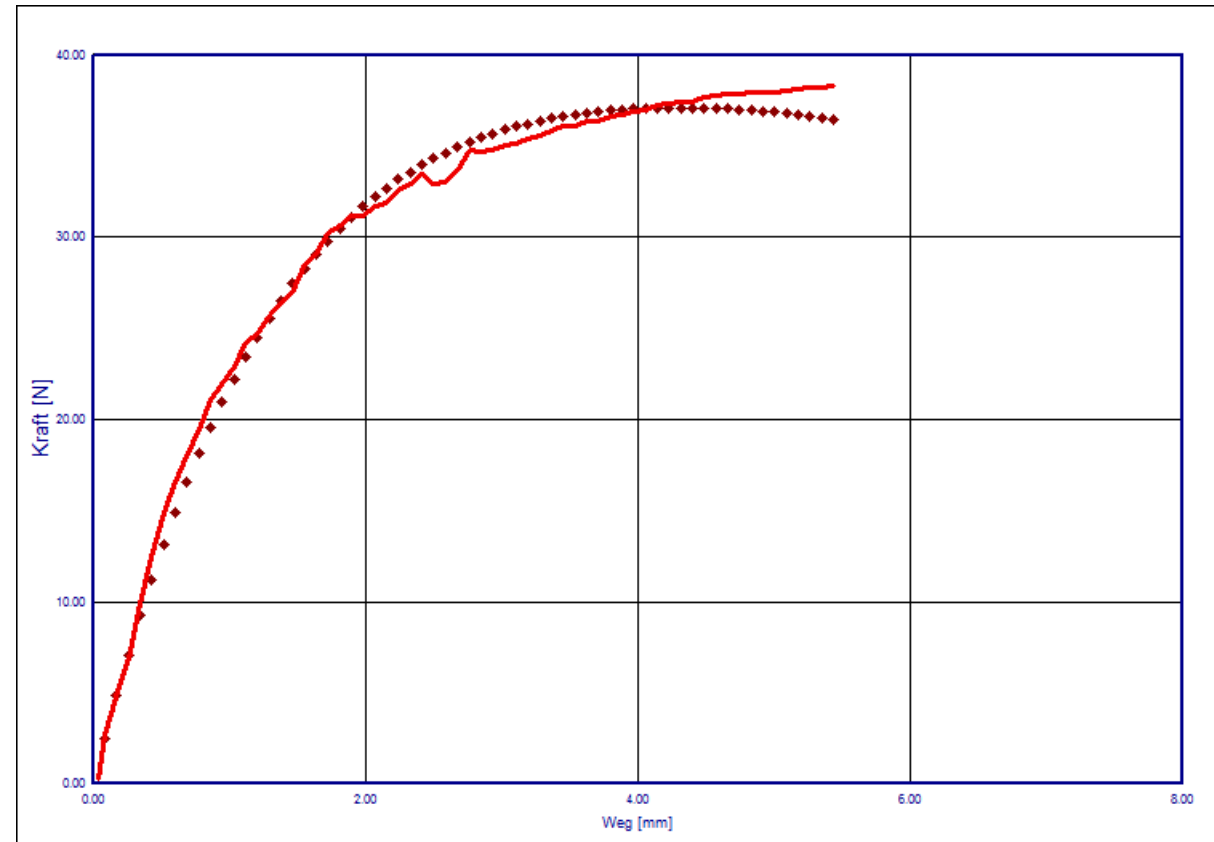
plastischen Kenndaten



Dehnratenabhängigkeit

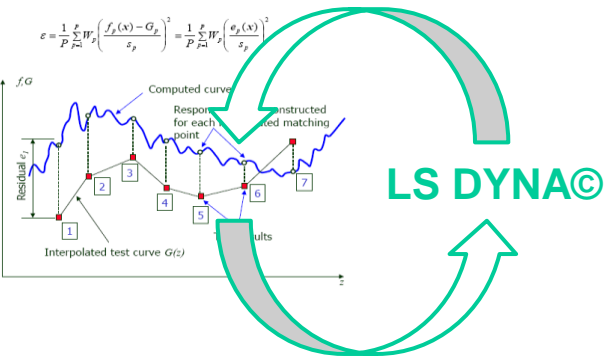
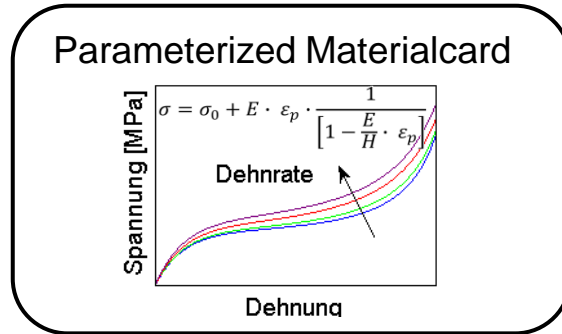
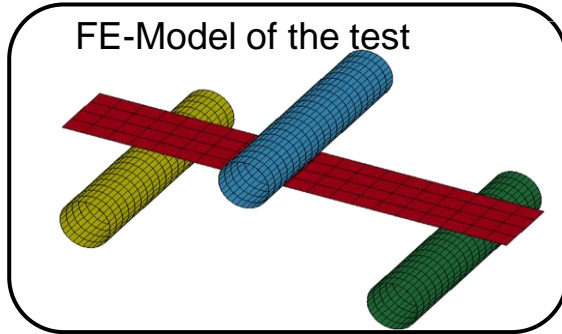


Validierung

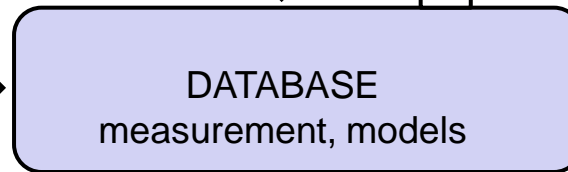
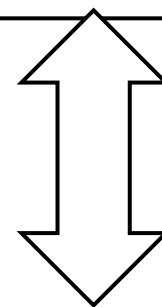
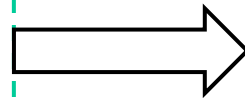
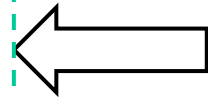
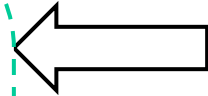
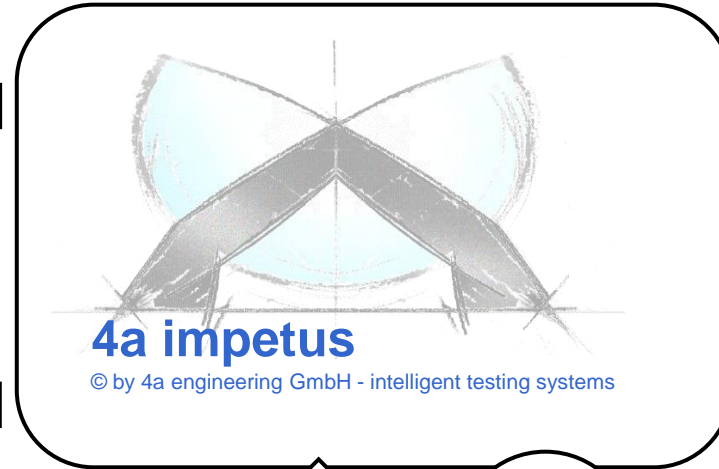


4a impetus

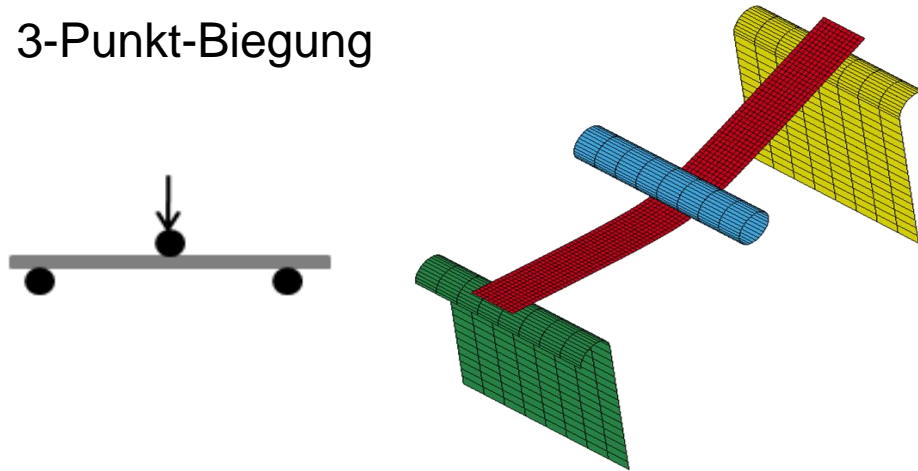
Reverse Engineering - Ablaufdiagramm



Reverse Engineering

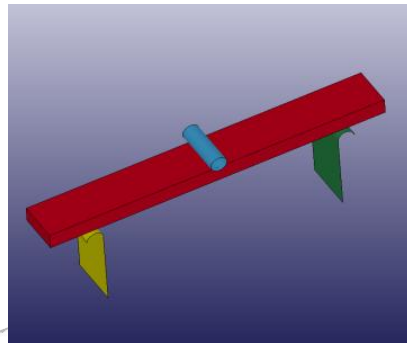


➤ 3-Punkt-Biegung

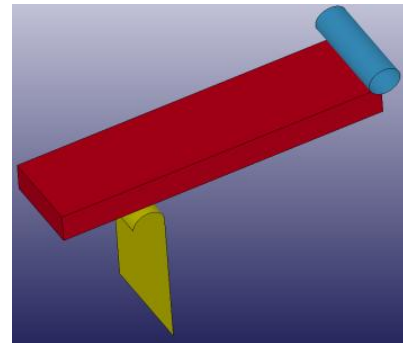


➤ Ausnutzung von Symmetrien

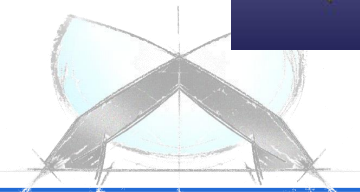
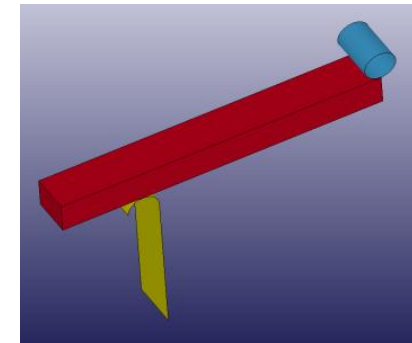
➤ Vollmodell



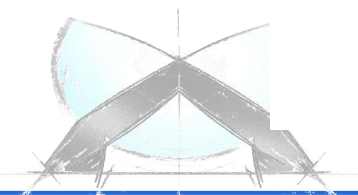
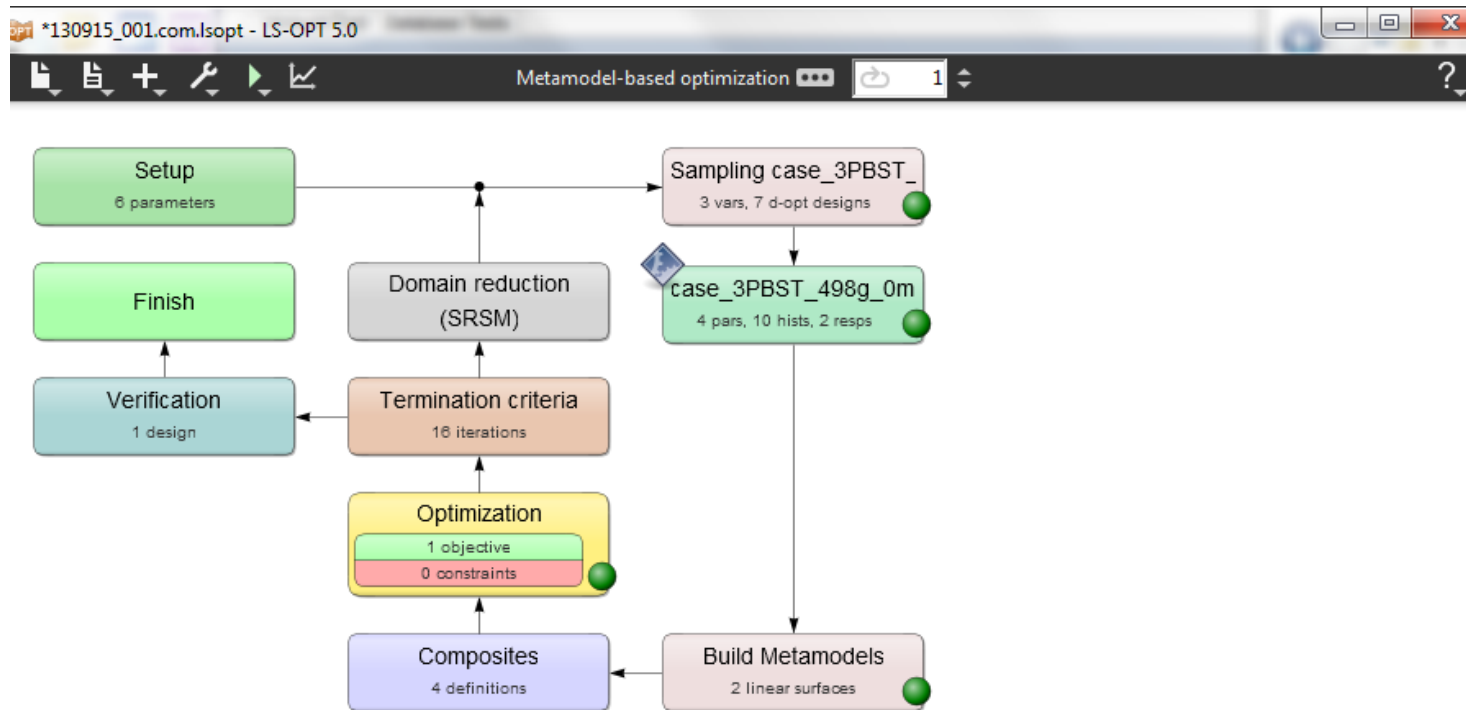
➤ Halbmodell



➤ Viertelmodell

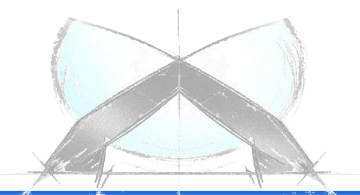
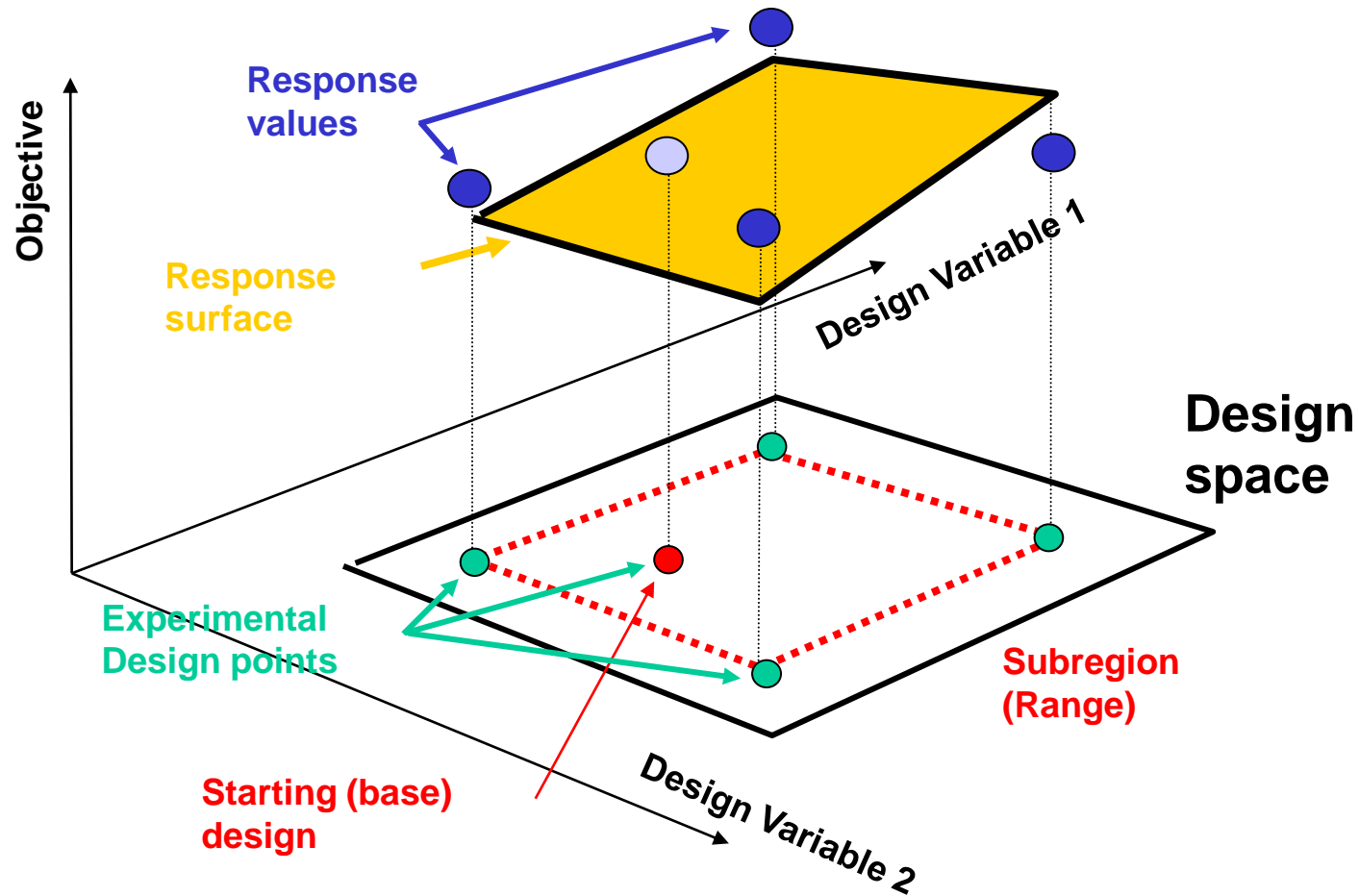


➤ Optimierung mit LS-OPT

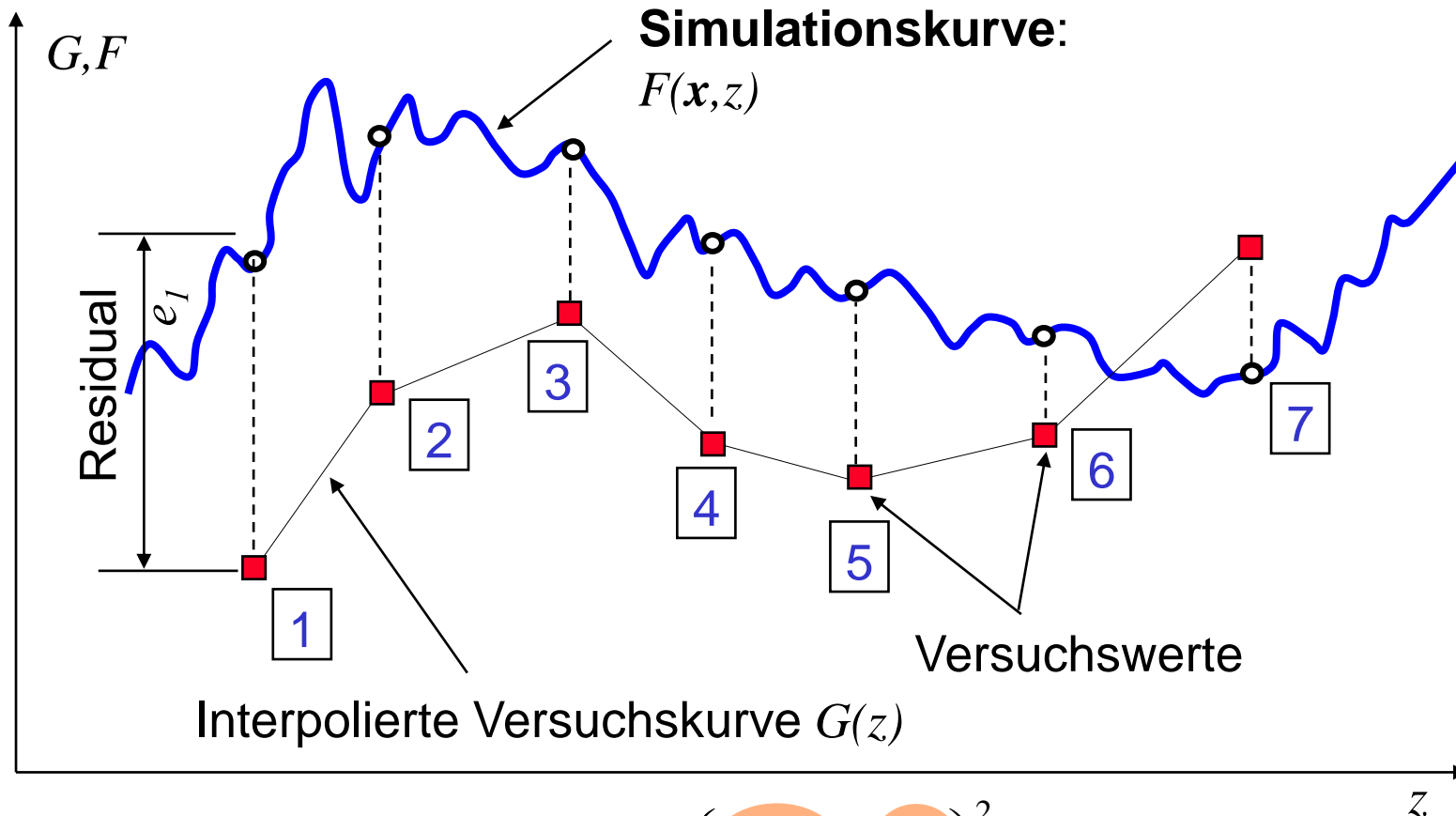


Optimization Problem
D:\4a Impetus Schulung\13021301 Schulung\Ticoms\model\130915_001\130915_001.com.Isopt

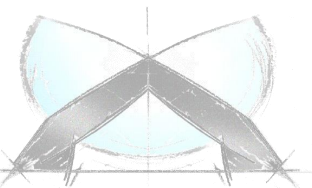
➤ Sequential Response Surface Methode



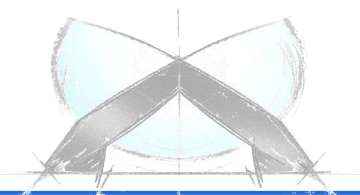
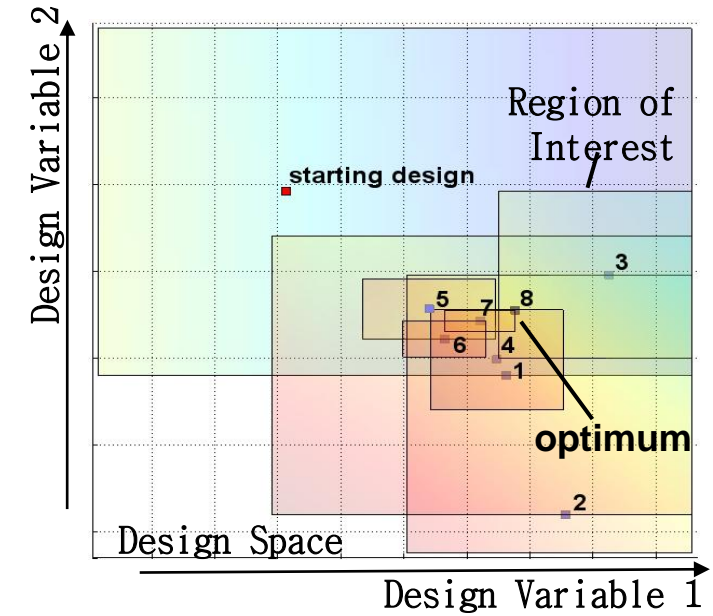
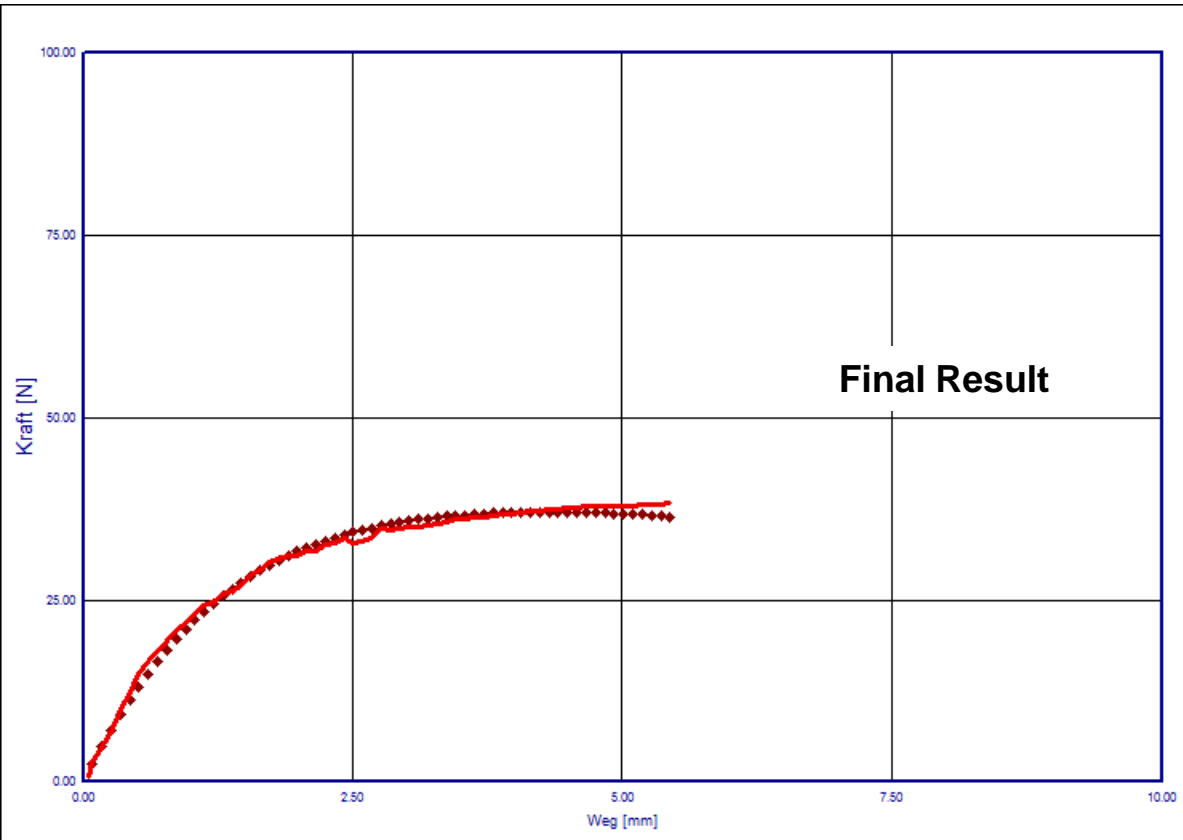
- Mean Squared Error (ordinaten-basiertes Fehlermaß)



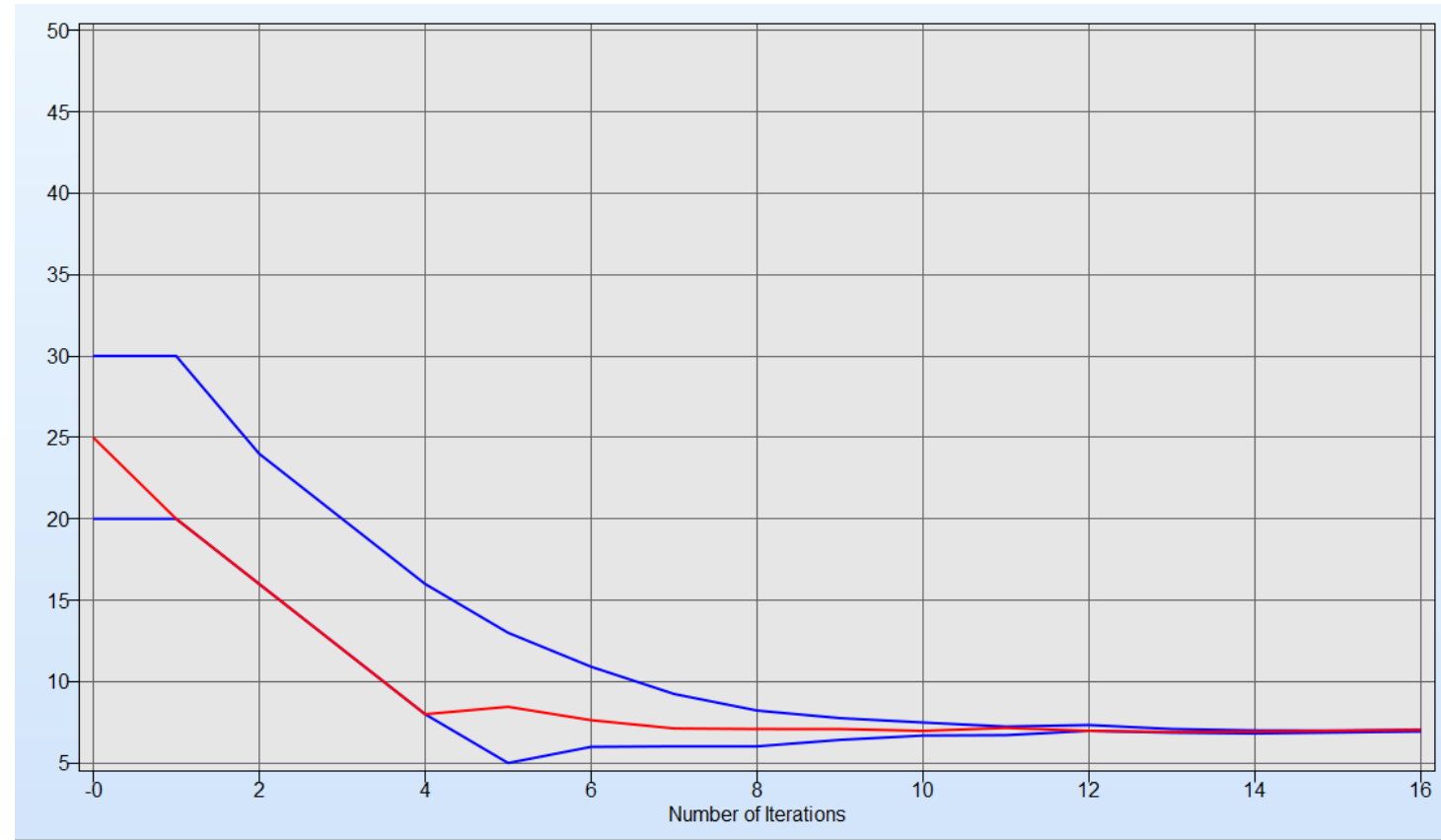
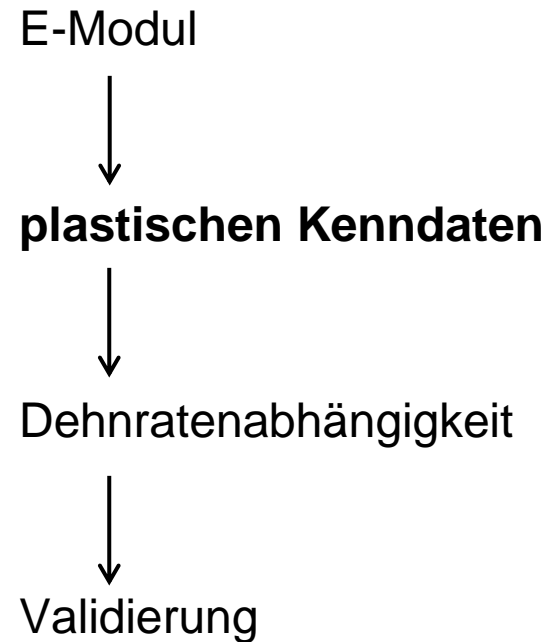
$$MSE(\mathbf{x}) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P W_i \left(\frac{F_i(\mathbf{x}) - G_i}{s_i} \right)^2 \rightarrow \min$$



➤ Sequential Response Surface Methode



➤ 4. Schritt: Materialcharakterisierung - Parameteridentifikation mit LS-OPT



Entwicklung der Designvariablen
Beispiel: σ_y



➤ 4. Schritt: Materialcharakterisierung - Parameteridentifikation mit LS-OPT

E-Modul



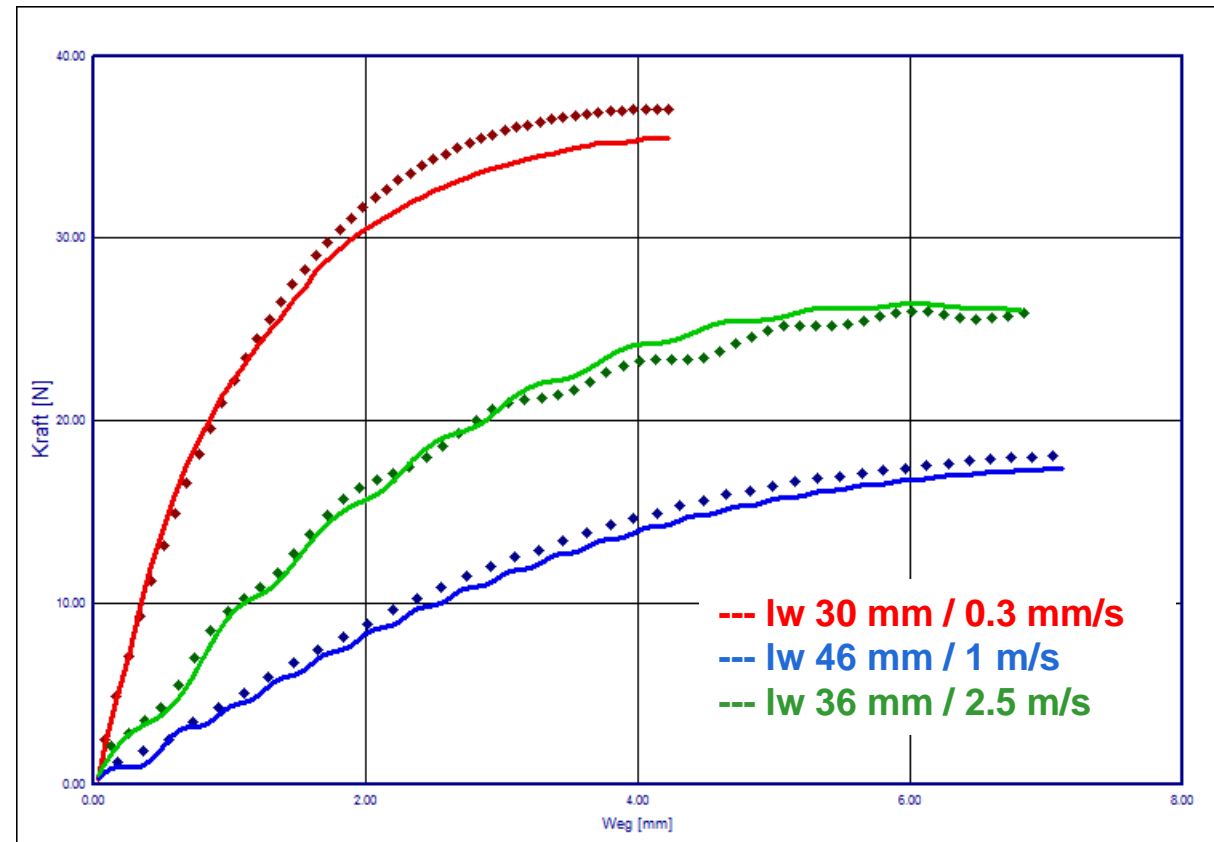
plastischen Kenndaten



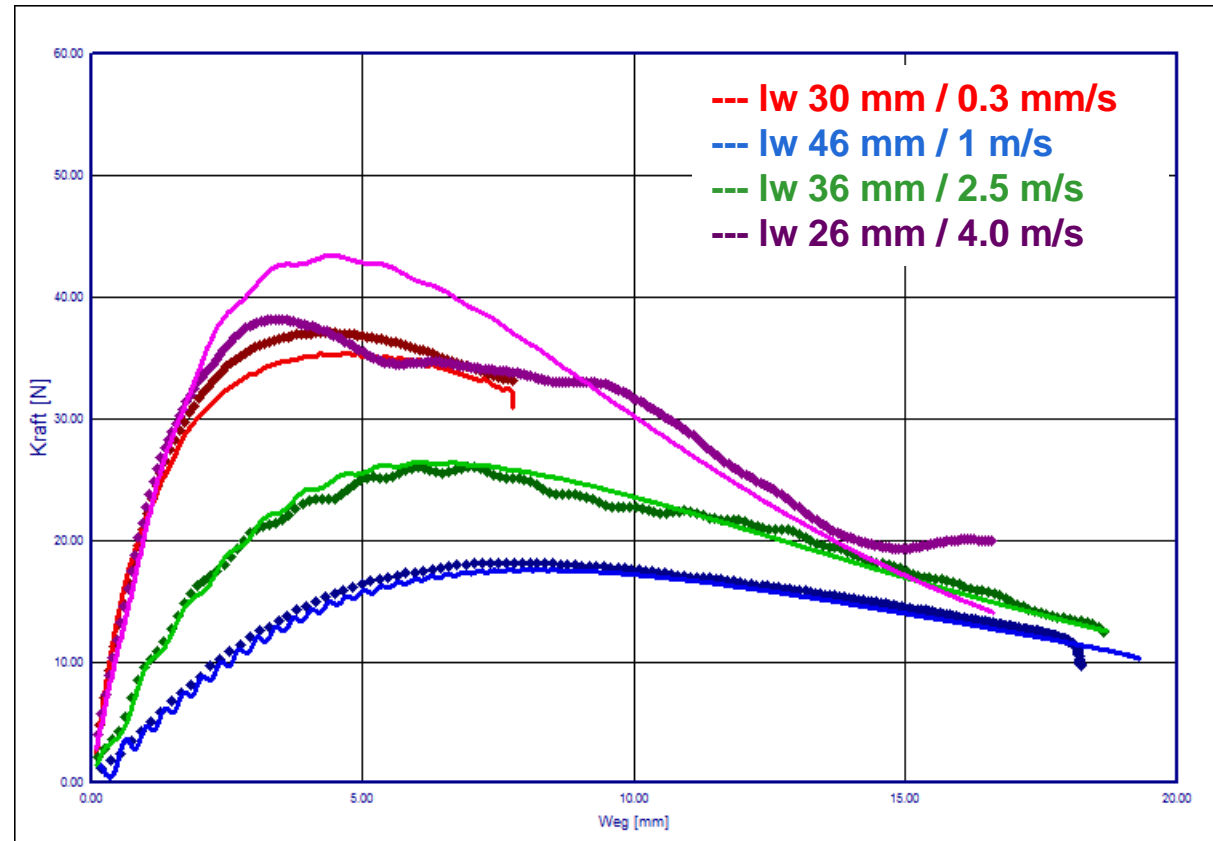
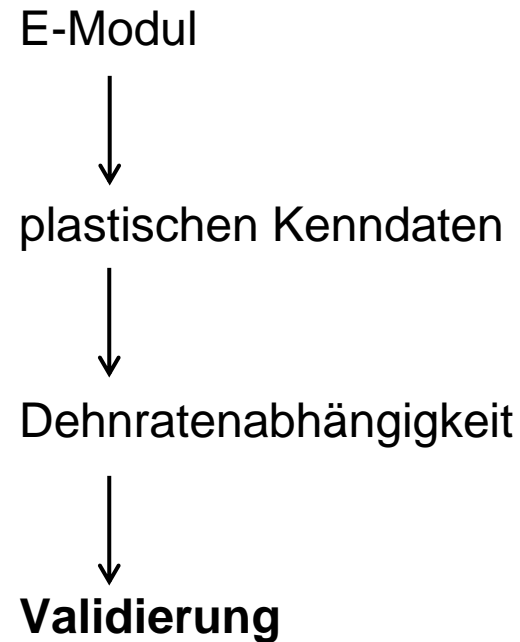
Dehnratenabhängigkeit



Validierung



➤ 4. Schritt: Materialcharakterisierung - Parameteridentifikation mit LS-OPT



- Im Property-Grid *Material* sind unterschiedliche Ansätze für die Elastizität, Plastizität und die Dehnratenabhängigkeit auswählbar.
- Dadurch werden die Designvariablen aktualisiert und angepasst.
- Beispiel für eine linear-elastisch-plastische Auswahl und deren Designvariablen. Die Schranken der einzelnen Designvariablen werden wiederum von der Materialklasse vorgegeben.

Materialverhalten	
Materialquelle	implementiert
Dichte	-1
Querkontraktion	0.3
Reibkoeffizient	0.1
Bruchdehnung	0
Elastizität	linear elastisch
Plastizität	vonMises
Kurve 1	4a Modell A
Dehnratenabhängigkeit	keine
Dehnungsbereich bis	Bilinear
Stützstellen	Trilinear
Stützstellenweite	Spline
Biasfaktor	G'Sell
Materialkarte	Ludwik
Idealisierung	Bergström
Fälle	4a Modell A
Ergebnisse	4a Modell B

DV	Start	von	bis	Var.	const	Randbedingung
e_E	1000	100	10000	500	<input type="checkbox"/>	
s_y	90	5	150	50	<input type="checkbox"/>	
s_ET	50	0	100	(NULL)	<input type="checkbox"/>	<e_E
s_h	90	5	150	(NULL)	<input type="checkbox"/>	
v_p	20	1	500	(NULL)	<input type="checkbox"/>	
v_epsp	0.01	0.001	1	(NULL)	<input checked="" type="checkbox"/>	



Ansatzfunktionen für die Plastizität

- Bilinear

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

- Ludwik

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

- Bergström

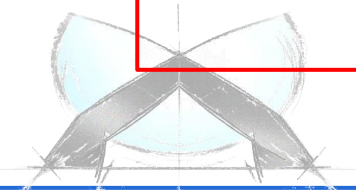
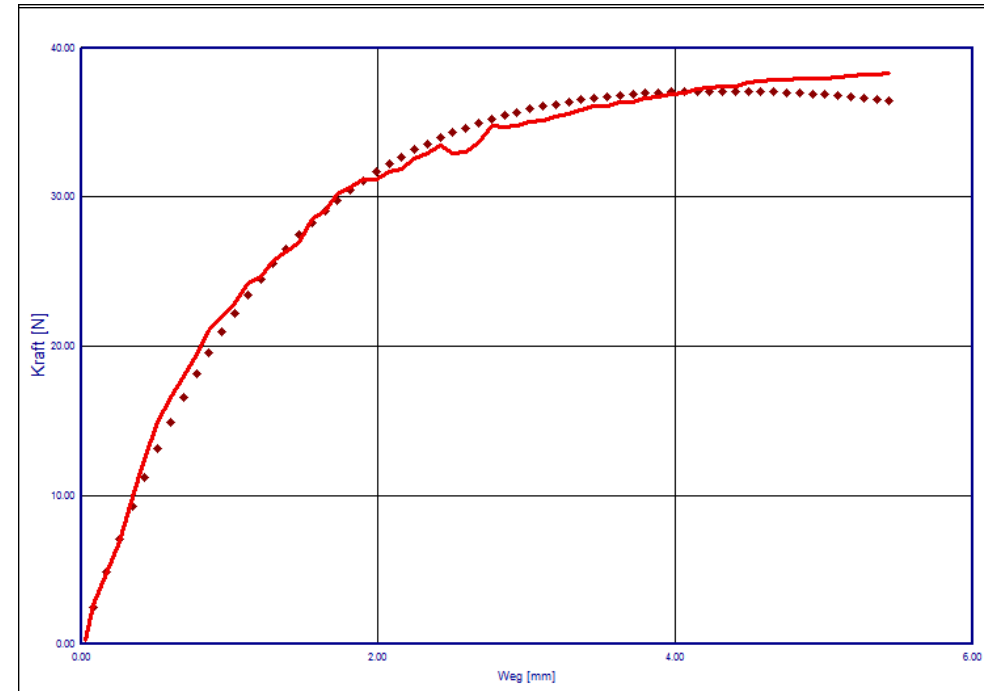
$$\sigma = A + k\sqrt{1 - \exp(-0.5 \varepsilon_p)}$$

- G'sell Jonas

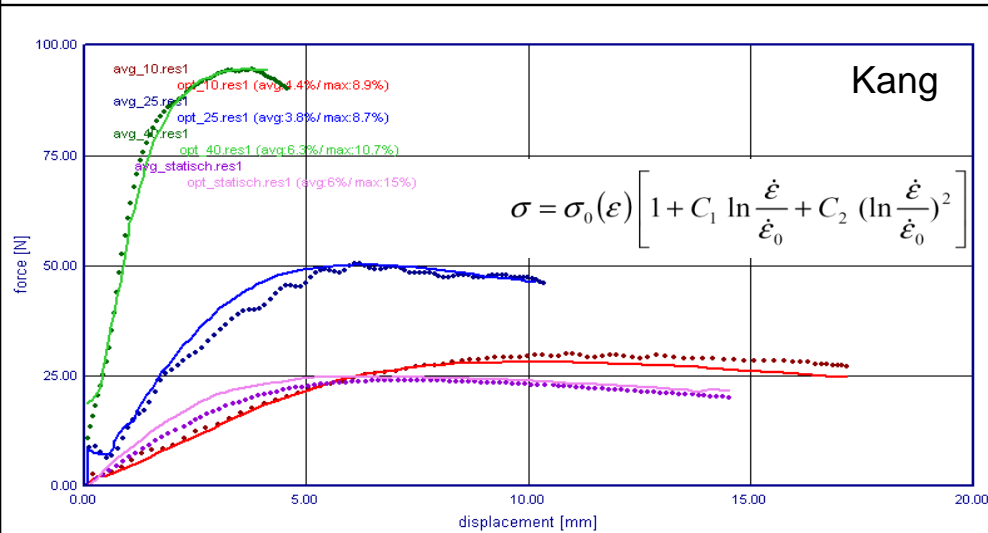
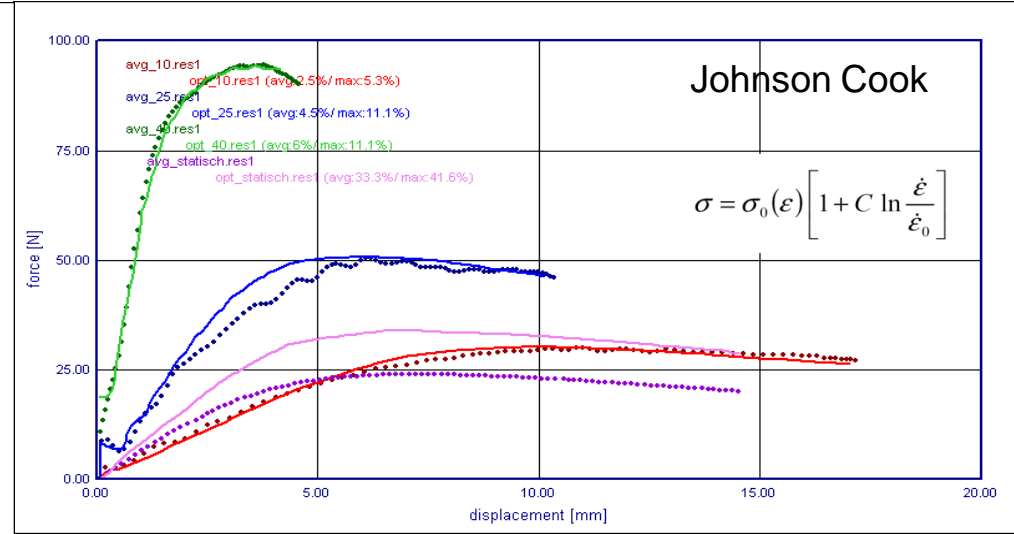
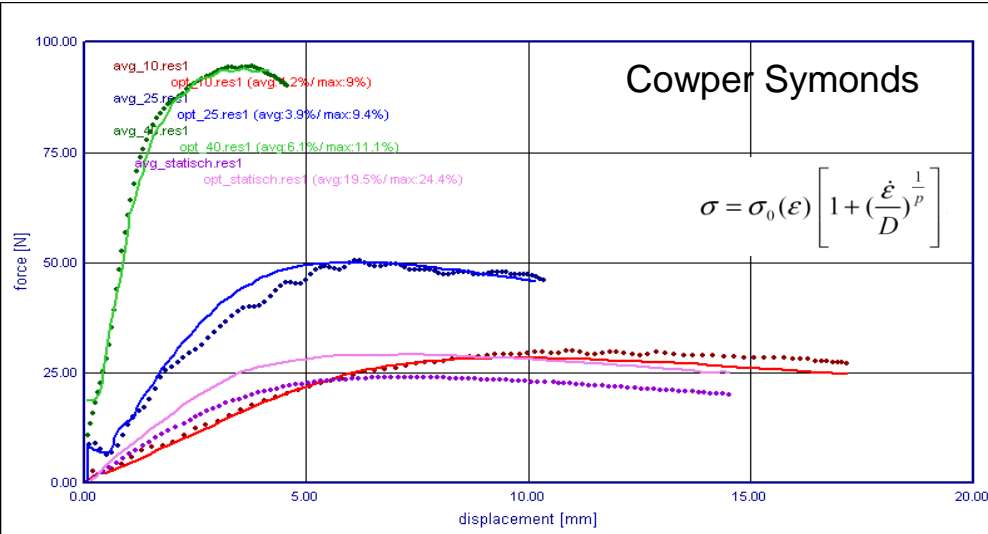
$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot (1 - e^{-w \cdot \varepsilon_p}) \cdot e^{h \cdot \varepsilon_p^n}$$

- 4a three parameter law

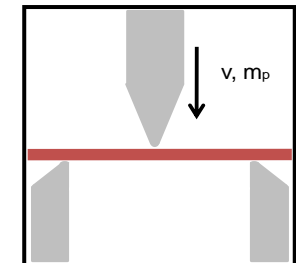
$$\sigma = \sigma_0 + E \cdot \varepsilon_p \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{E}{H} \cdot \varepsilon_p\right]}$$



Ansatzfunktionen für die Dehnrage



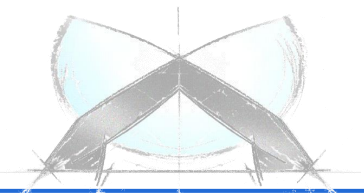
v	l _w	m _{pendulum}
m/s	mm	g
4	25	510
2.5	40	510
1	60	1300
0.001	50	



.... Messkurven
 — Simulation



- 4a impetus bietet einen geschlossenen Weg von der Materialprüfung bis hin zur validierten Materialkarte.
- Für die Charakterisierung des Kunststoffes wurden 3-Punkt-Biegeversuche mit 4a impetus bei verschiedenen Versuchsaufbauten durchgeführt.
- Materialcharakterisierung mittels Reverse Engineering
- Mit geeigneten Ansatzfunktionen für die Plastizität und die Dehnratenabhängigkeit und Parameteridentifikation in LS-OPT konnte das Kunststoffmaterial sehr gut abgebildet werden.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

