



**Th. Hambrecht, A. Strating**  
Audi AG  
N/EK-L12  
74148 Neckarsulm  
Deutschland

**P. Reithofer, M. Rollant, A. Dietrich**  
4a engineering GmbH  
Industriepark 1  
8772 Traboch  
Österreich



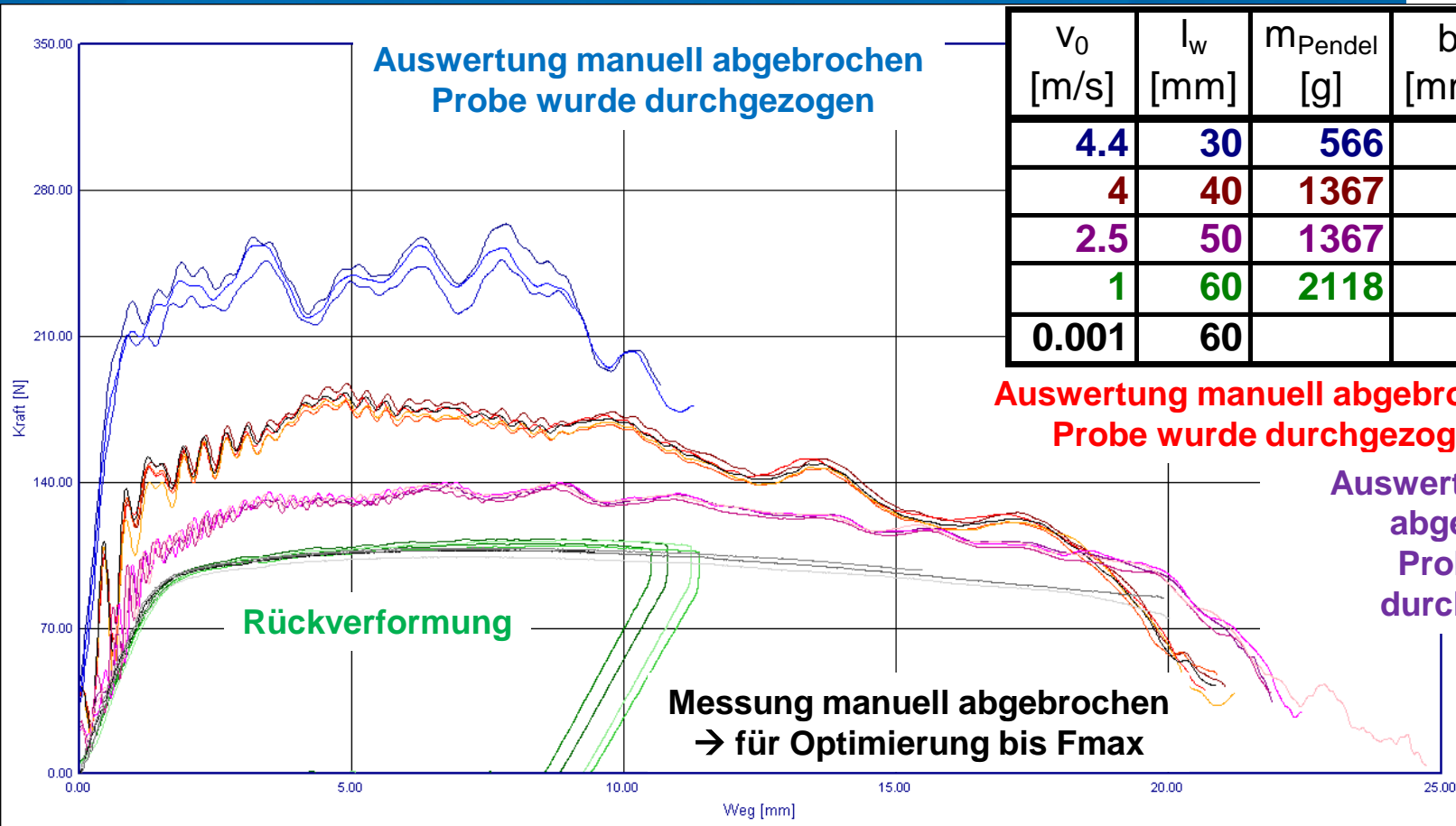
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- Werkstoff: Aluminium C20T6, C24T6
- Verwendung: Profilwerkstoff
- Materialdicke: 2,2 mm
  
- Werkstoff: Stahl DC04
- Verwendung: Tiefziehwerkstoff
- Materialdicke: 1mm



# Versuche Aluminium C20T6

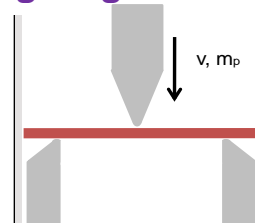
## Messergebnis Kraft-Weg-Verlauf



$v_0$ [m/s]	$l_w$ [mm]	$m_{\text{Pendel}}$ [g]	$b$ [mm]	$t$ [mm]	$l$ [mm]
4.4	30	566	5	2.3	50
4	40	1367	5	2.3	50
2.5	50	1367	5	2.3	60
1	60	2118	5	2.3	70
0.001	60		5	2.3	70

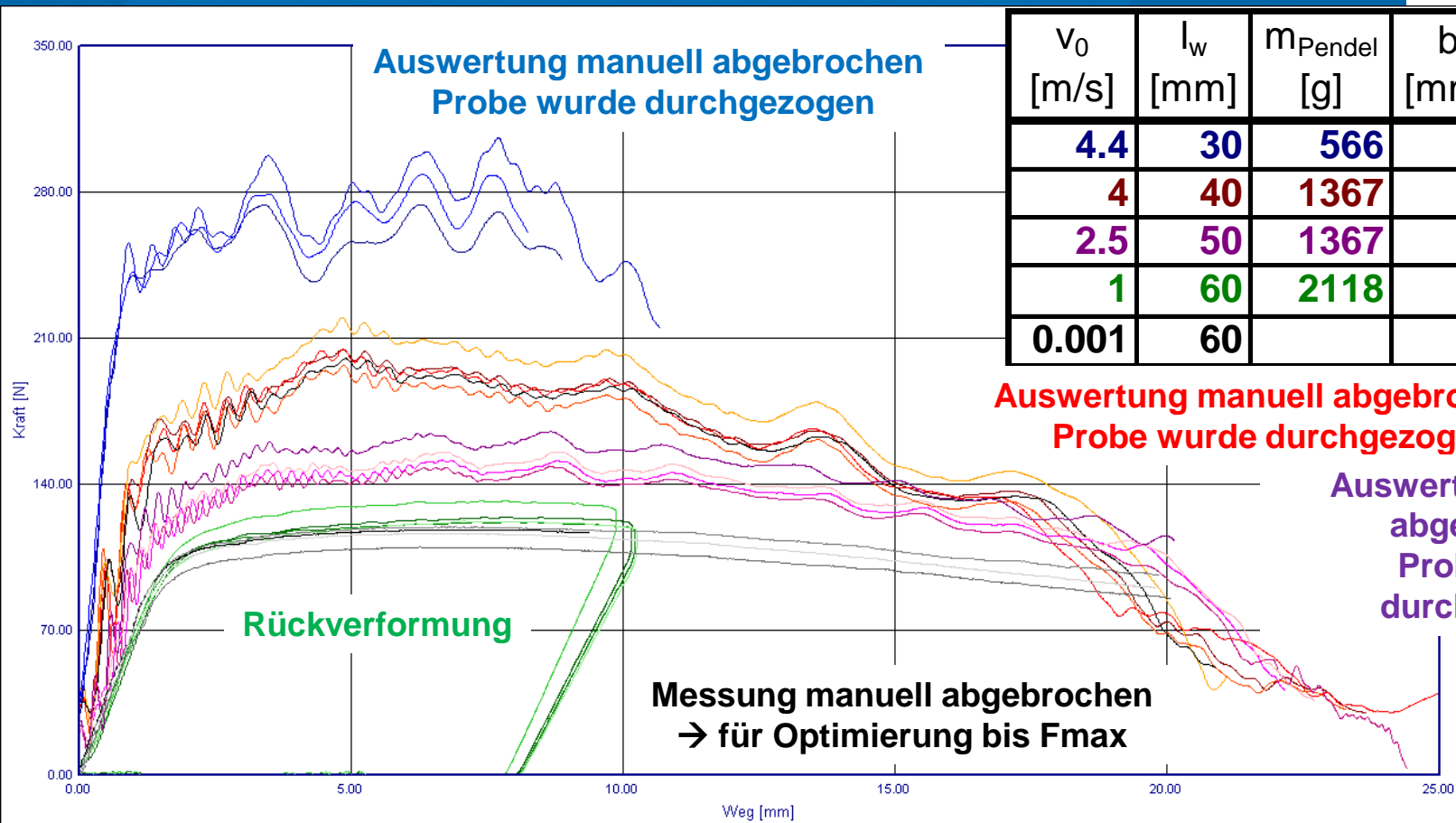
Auswertung manuell abgebrochen  
Probe wurde durchgezogen

Auswertung manuell abgebrochen  
Probe wurde durchgezogen



# Versuche Aluminium C24T6

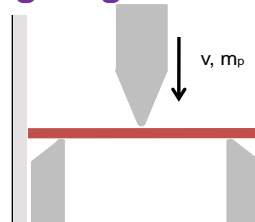
## Messergebnis Kraft-Weg-Verlauf



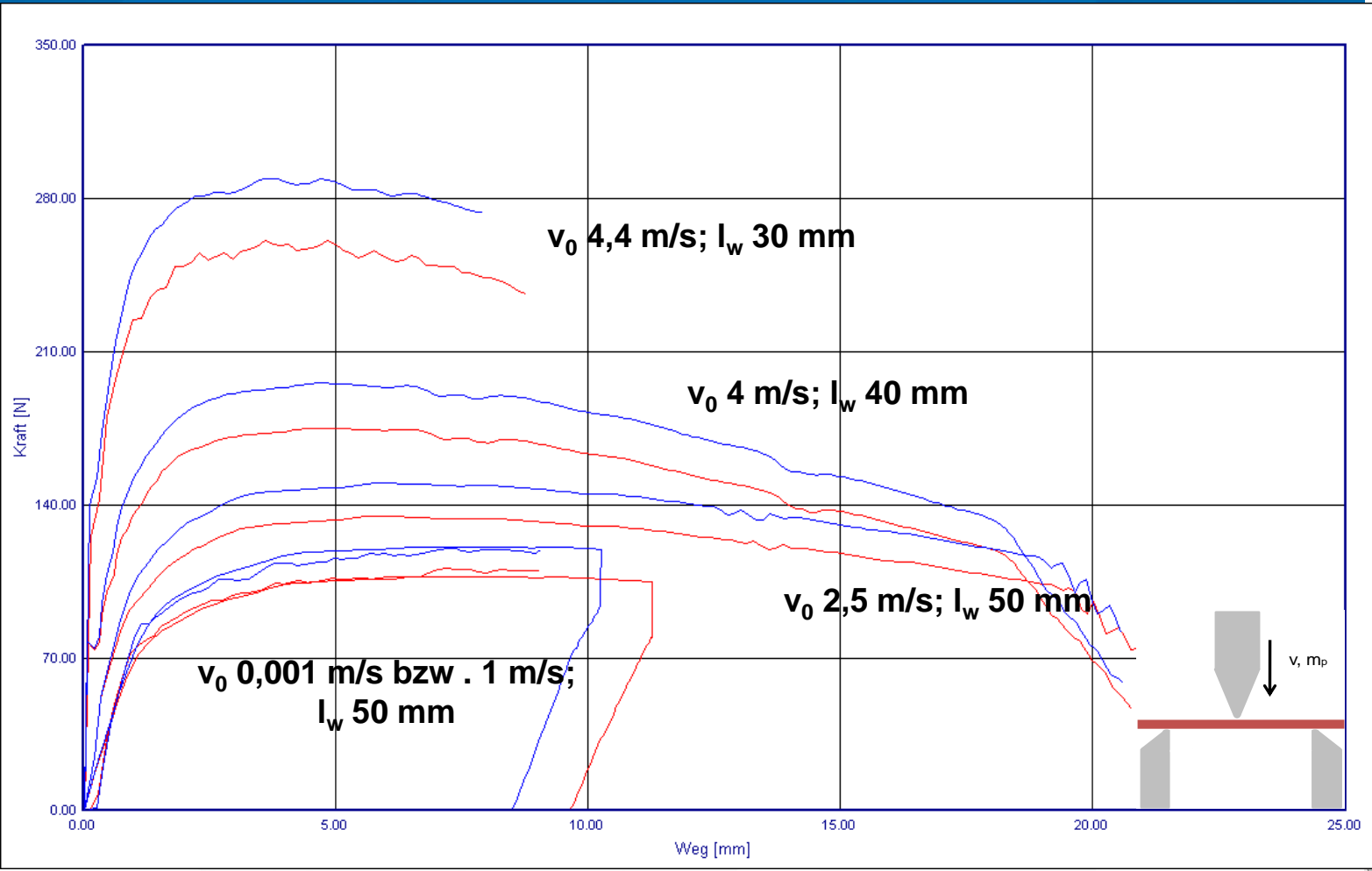
$v_0$ [m/s]	$l_w$ [mm]	$m_{\text{Pendel}}$ [g]	$b$ [mm]	$t$ [mm]	$l$ [mm]
4.4	30	566	5	2.3	50
4	40	1367	5	2.3	50
2.5	50	1367	5	2.3	60
1	60	2118	5	2.3	70
0.001	60		5	2.3	70

Auswertung manuell abgebrochen  
Probe wurde durchgezogen

Auswertung manuell abgebrochen  
Probe wurde durchgezogen



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

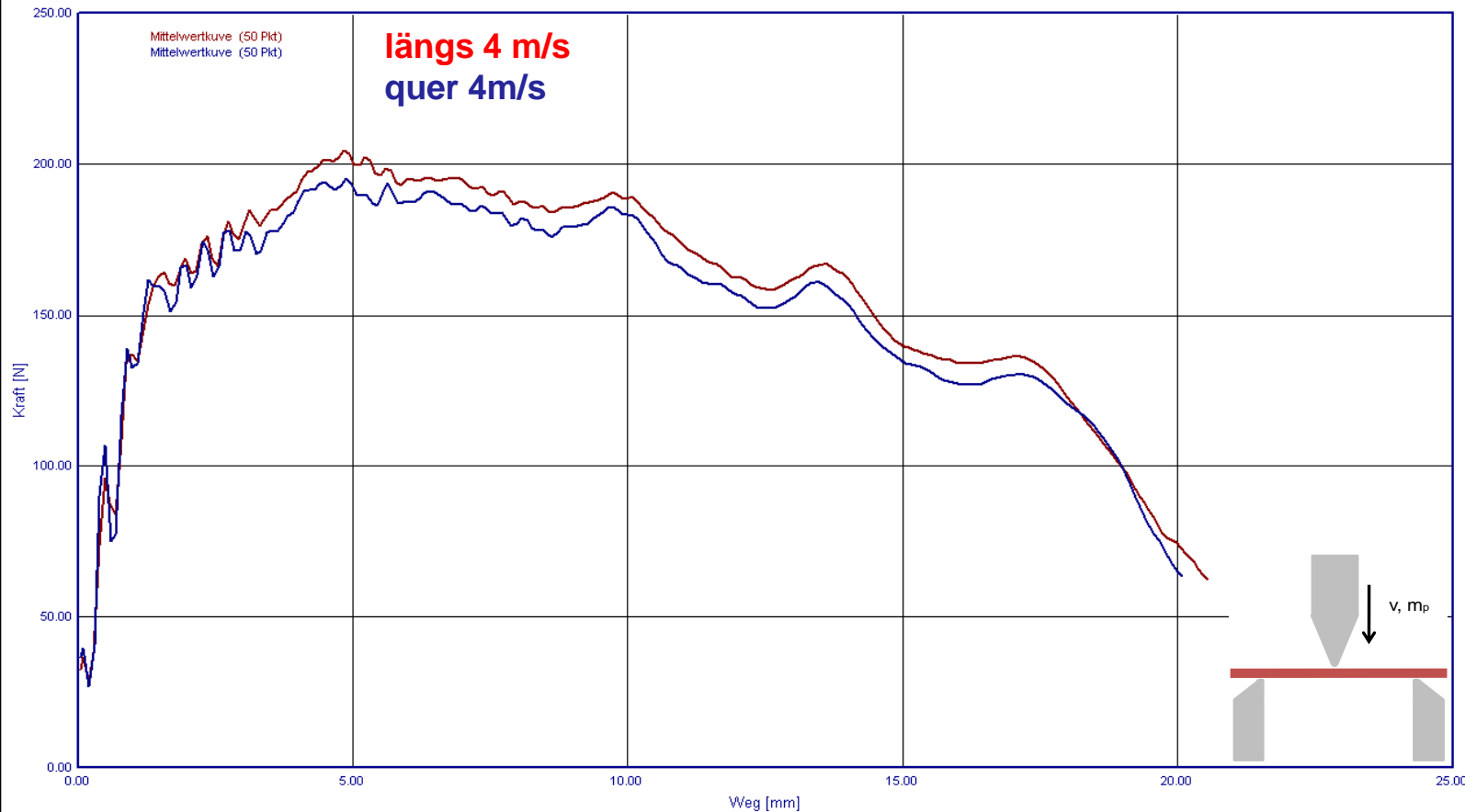


- C20T6 Aluminium
- C24T6 Aluminium



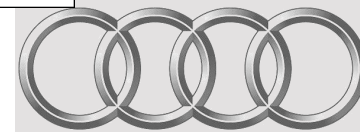
# Versuche Aluminium C20T6

## Mittelwertkurven Kraft-Weg-Verlauf



Probekörper in Profilrichtung längs vs quer

- Ein minimaler Unterschied im Kraft Niveau von ca. 5% ist erkennbar.

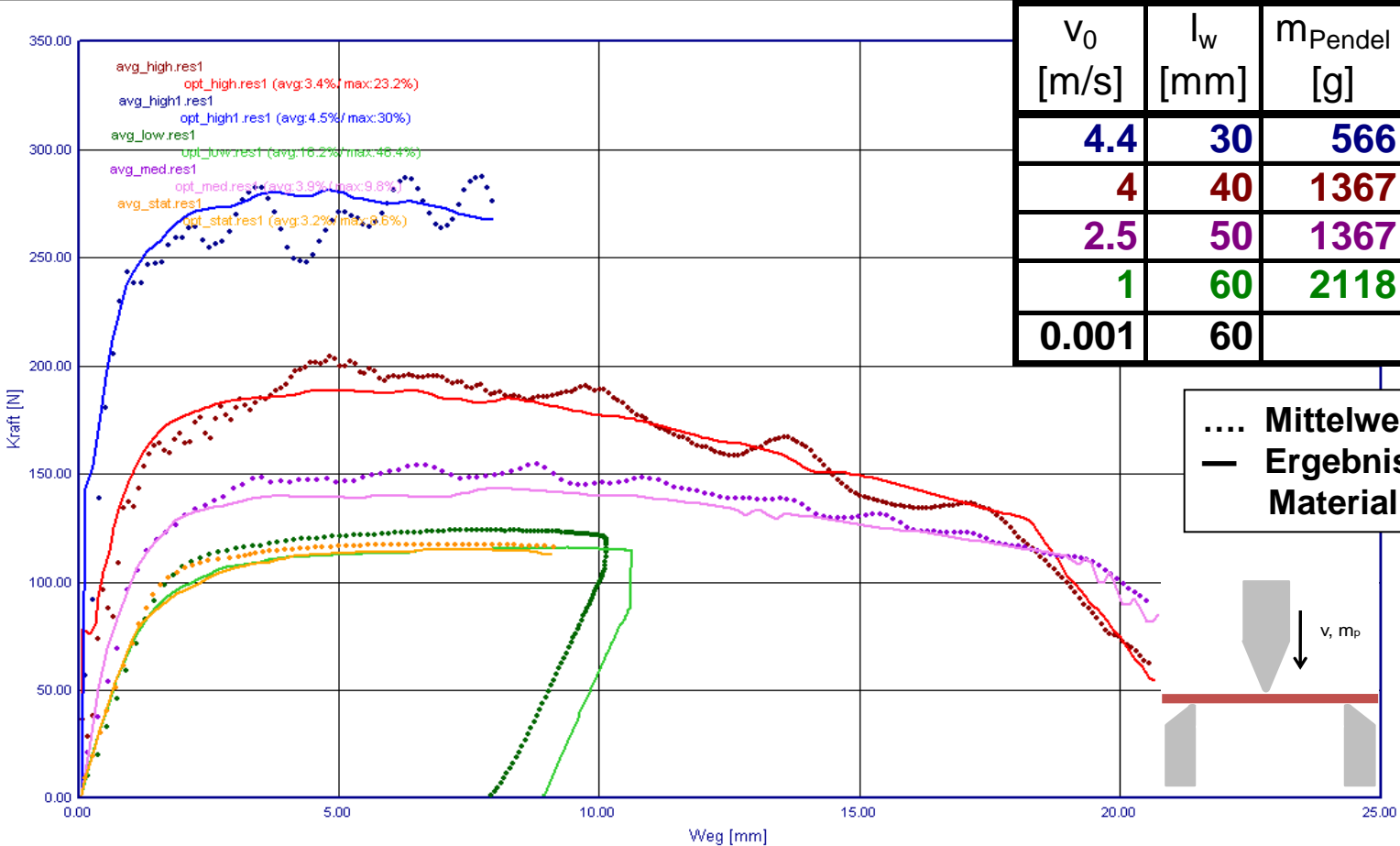


**Audi**

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

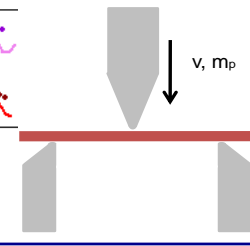
# Reverse Engineering Erste Ergebnisse

## Aluminium C24T6 Optimierungsergebnis Kraft-Weg Verlauf



$v_0$ [m/s]	$l_w$ [mm]	$m_{\text{Pendel}}$ [g]	$b$ [mm]	$t$ [mm]	$l$ [mm]
4.4	30	566	5	2.3	50
4	40	1367	5	2.3	50
2.5	50	1367	5	2.3	60
1	60	2118	5	2.3	70
0.001	60		5	2.3	70

.... Mittelwertkurven Versuche  
 — Ergebnisse Simulation  
 Materialkarten IMPETUS



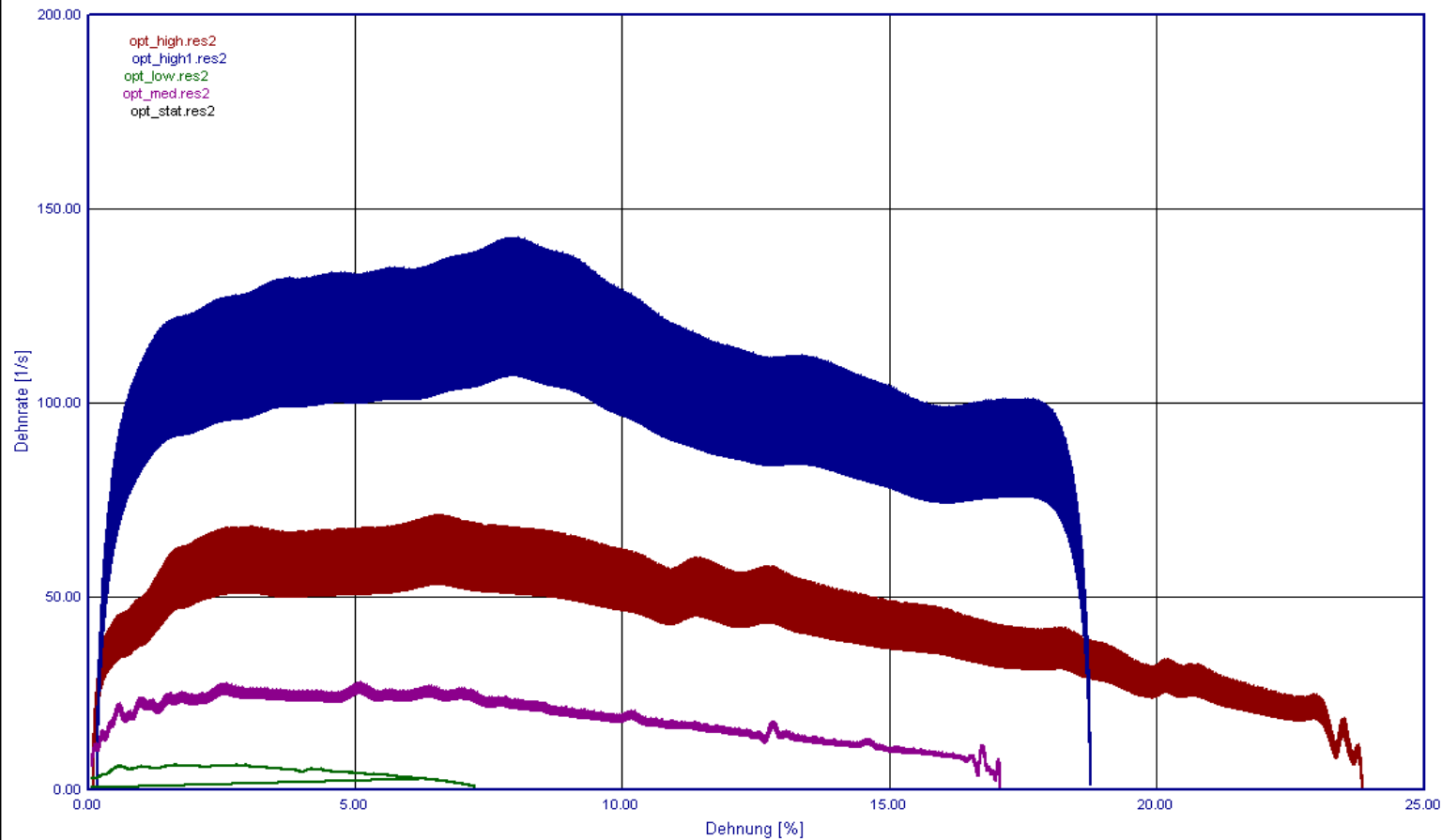
- LS-DYNA Solver mit elastisch-viskoplastischem Ansatz (Mat 24)
- Ansatzfunktion Schmachtenberg
- Reibkoeffizient Stahl/Alu Paarung Annahme 0,3



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

# Reverse Engineering Erste Ergebnisse

## Aluminium C24T6 untersuchte Dehnratenbereiche



- Ergebnisse aus den Simulationen ergeben  
Randfaserdehnraten von bis zu 125 1/s und  
Randfaserdehnungen von bis zu 24 %



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

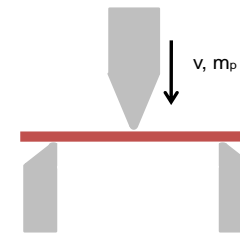
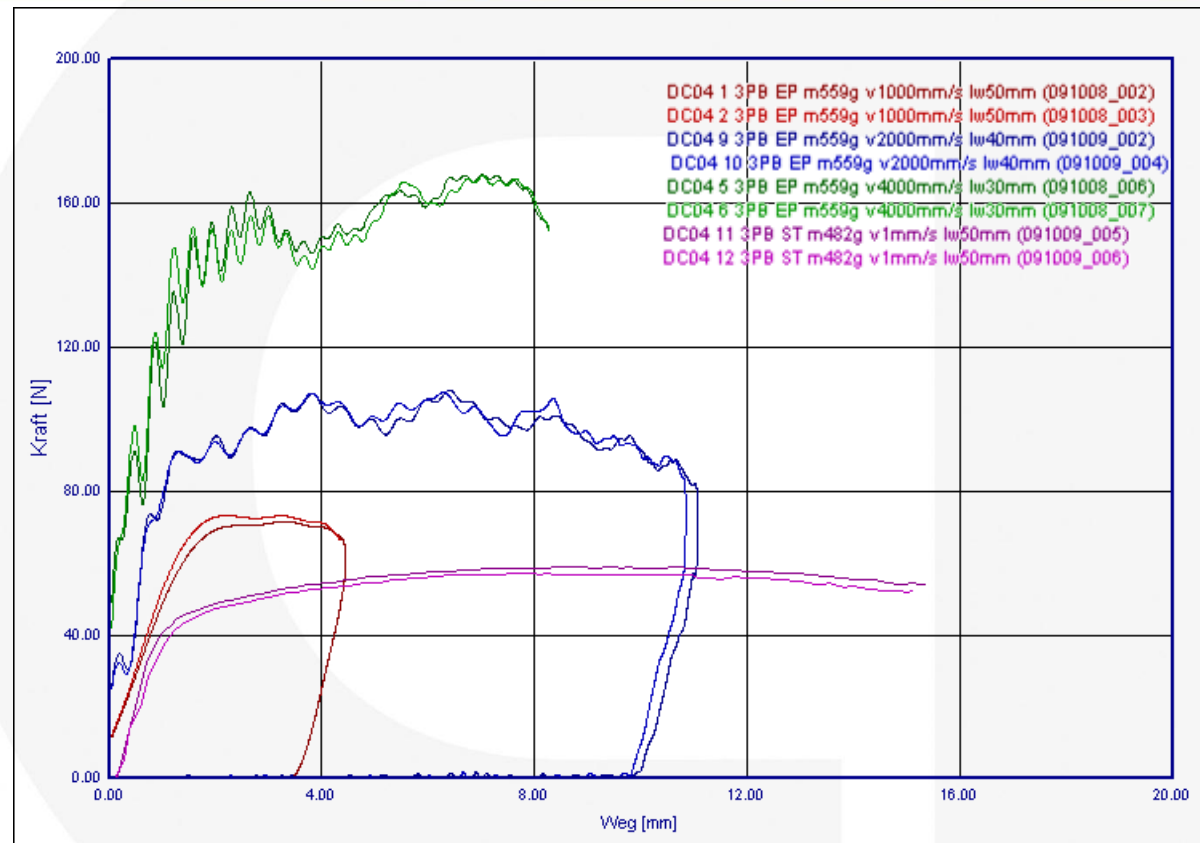


- Die Messergebnisse belegen das zu erwartende unterschiedliche mechanische Verhalten der zwei Aluminiumlegierungen C20T6 und C24T6.
- Zwischen dem mechanischen Verhalten von C20T6 Probekörper in Längs- und in Querrichtung des Profils konnte ein geringer Unterschied von ~5% im Kraft/Weg Verlauf festgestellt werden.
- Ein Einfluss der Probengeometrie (Probenbreite) auf das messbare mechanische Verhalten der C20T6 Type konnte nicht festgestellt werden.
- Alle ermittelten Materialkarten zeigen eine sehr kleine vernachlässigbare Dehnratenabhängigkeit.



# Messergebnisse

## Kraft/Weg Kurven DC04 kaltgewalzter unlegierter Stahl



Die Differenz zwischen den dynamischen Messungen bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s und den statischen Messungen, lassen aufgrund von gleichen Auflagerabständen auf eine Dehnratenabhängigkeit schließen. Die Versuche zeigen ein verstärktes Schwingverhalten mit steigender Belastungsgeschwindigkeit.



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- Interne Nummerierung

4a Impetus - Mat 381

- Dehnratenabhängigkeit basierend auf Johnson Cook

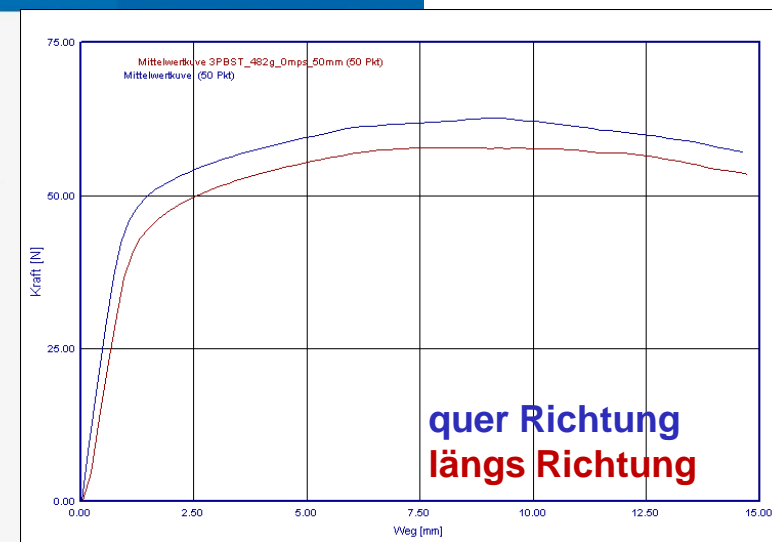
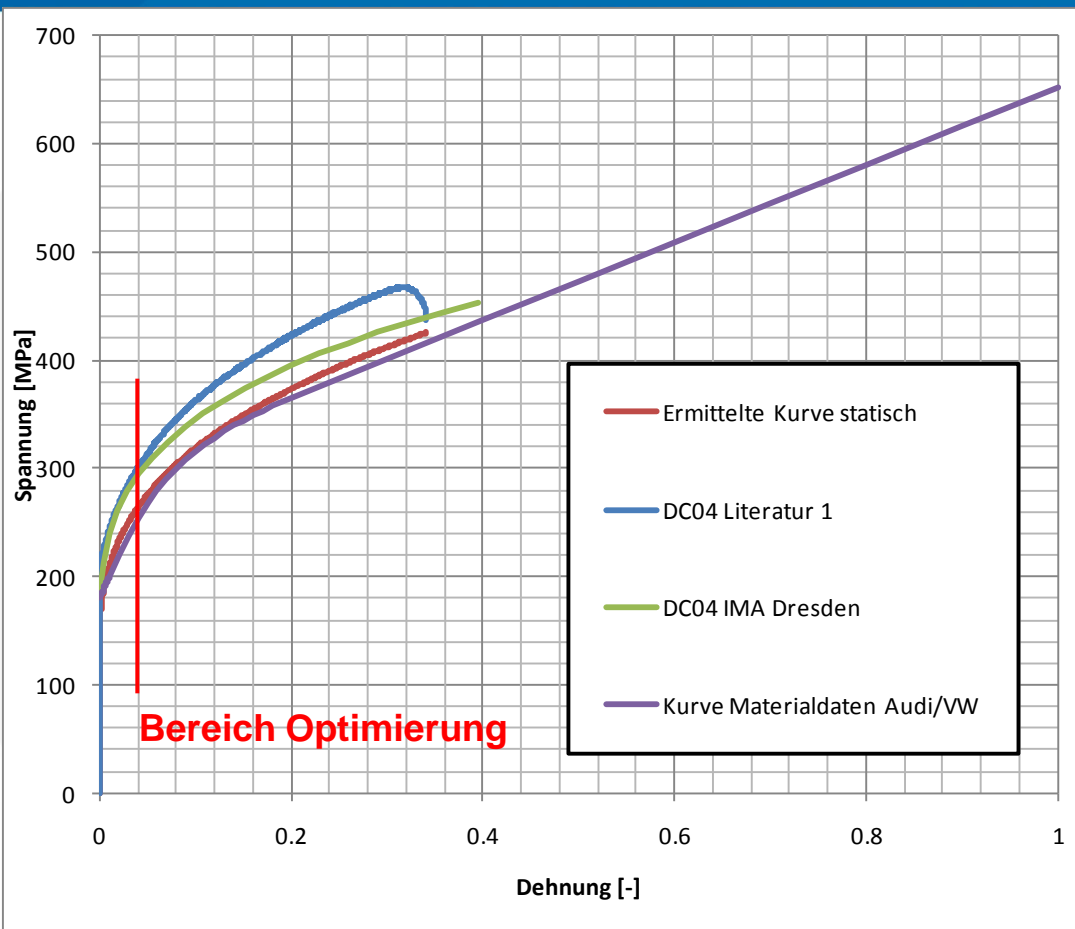
$$1 + \frac{\text{LN}\left(\frac{\max(\text{eps}_{\text{pkt}}, \text{DV7})}{\text{DV7}}\right)}{\text{DV6}}$$

- Plastisches Verhalten wird mit folgendem Ansatz beschrieben

$$\text{DV2} + \text{DV3} \cdot (\text{DV4} + \text{epp})^{\text{DV5}}$$



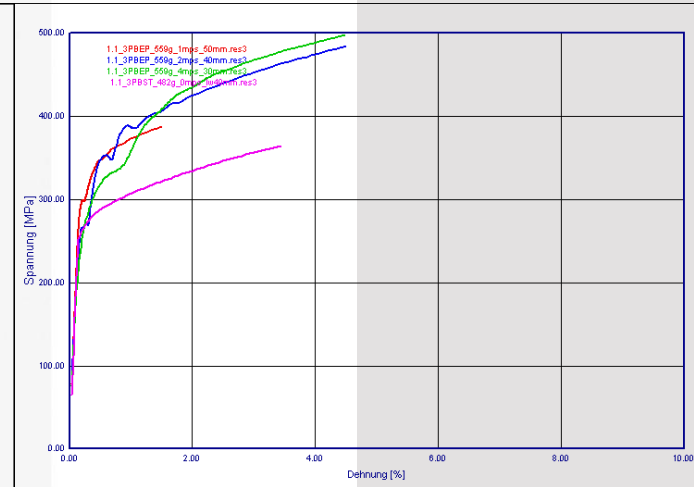
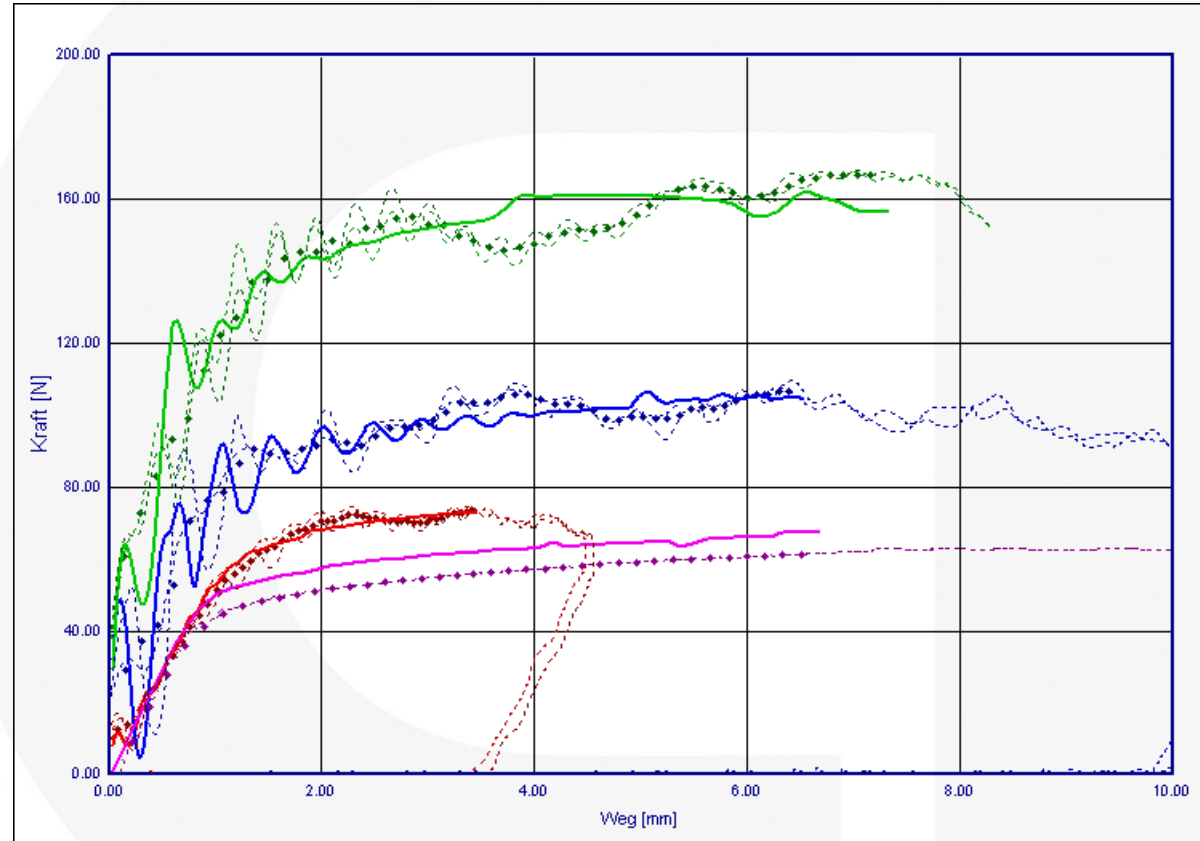
© 4a engineering GmbH, all rights reserved



Die statisch ermittelte Fließkurve liegt unter dem Verlauf der Literaturdaten und weicht kaum von den Daten aus der Materialkarte von Audi/VW ab.

Der Grund für die Unterschiede könnte in der Entnahmerichtung der Proben liegen, daher wurden für die Quer-Richtung noch Messungen durchgeführt. Diese zeigen ebenfalls den erwarteten Unterschied



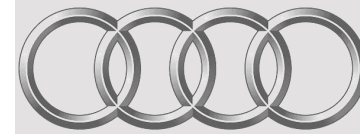


### Modell 100329\_001

(Solver: LSDYNA Shell, Metamodell: IMA GLG1 + JC Law, Elementgröße: 1mm)

Annahmen: Querk. 0.3, Reibk. 0.2, E-Modul 175000 MPa, VP=0

Dargestellt ist die Validierung mit 1 m/s der Optimierung des Modells 100325\_005 ohne 1m/s



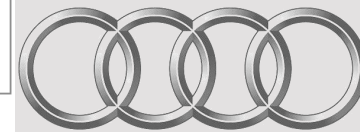
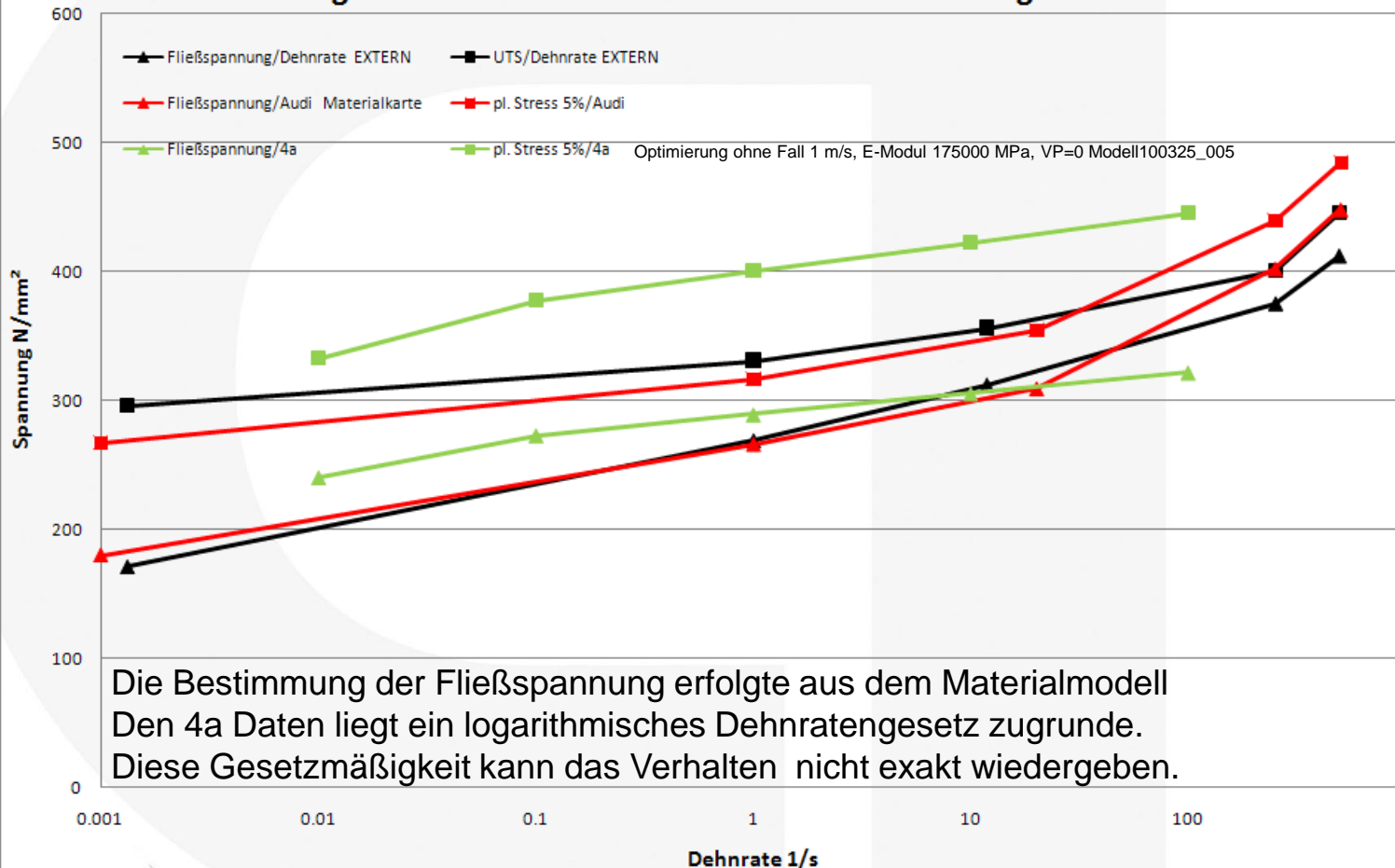
# Audi

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

# Vergleich mit externen Materialdaten

## Fließspannung/Dehnrage - DC04 kaltgewalzter unlegierter Stahl

### Vergleich zwischen Internen und Externen Messergebnissen



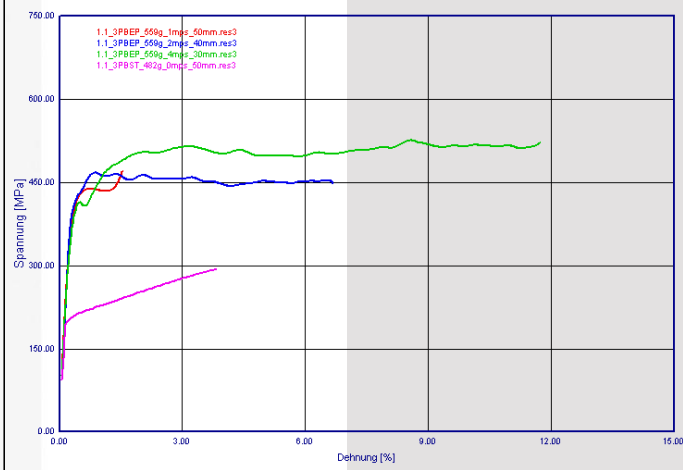
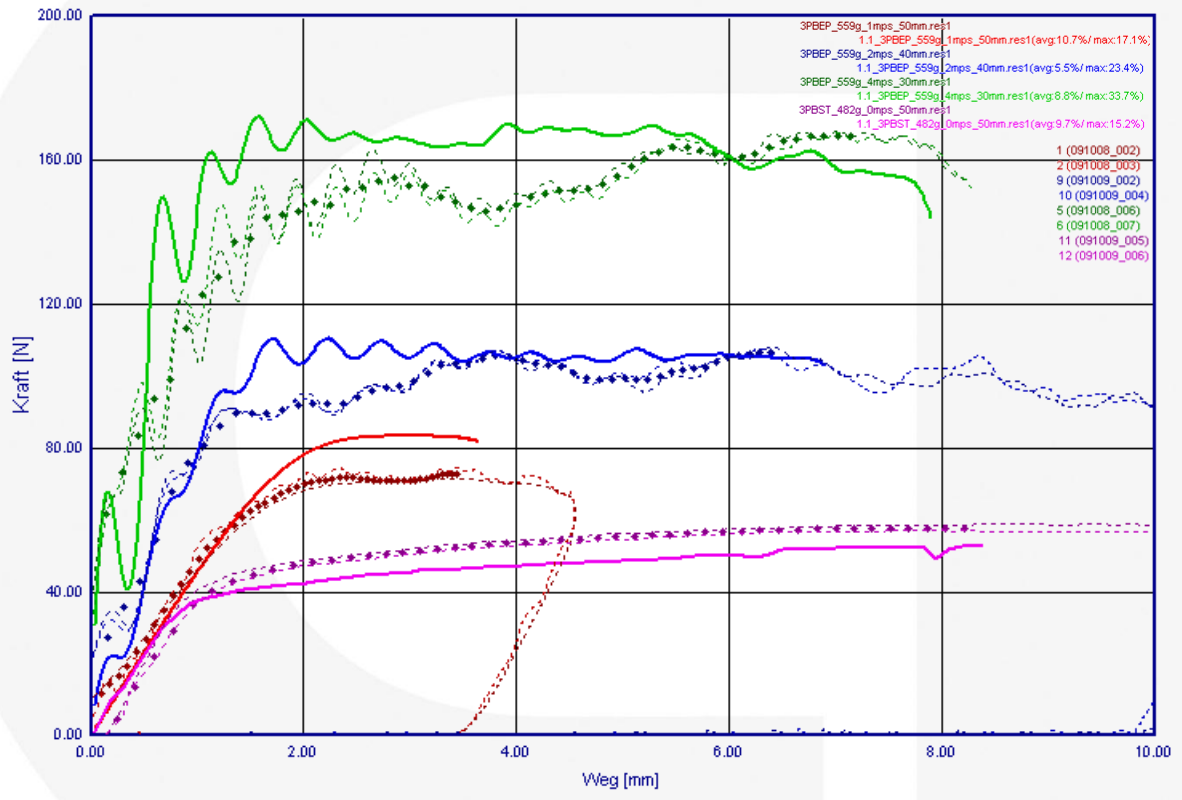
**Audi**

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

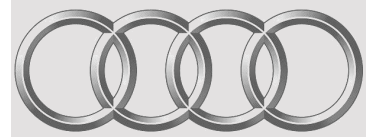
Die Optimierung mit konstantem E-Modul und Anpassung des Dehnrageparameters, der Fließspannung und der Fließverfestigung liefert eine bessere Übereinstimmung mit den externen Daten.

# Validierung Kundendaten

## VW/AUDI DC04 kaltgewalzter unlegierter Stahl



**Modell 100223\_001**  
 (Solver: LSDYNA Shell, Metamodell: IMA GLG1 + JC Law, Elementgröße: 1mm)  
 Annahmen: Querk. 0.3, Reibk. 0.3, E-Modul 138000 MPa, VP=0

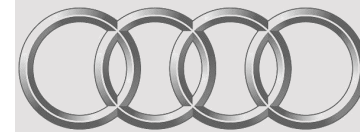


Materialdaten von VW/Audi des kaltgewalzten unlegierten Stahls(alte Bezeichnung ST14 oder FEP04)  
 Norm: DIN EN 10152/10131: Rp0.2:0.14-0.22 Rm:0.27-0.35 r90: 1.6-1.9



© 4a engineering GmbH, all rights reserved

- Das untersuchte Material DC04 weist bei den durchgeführten Biegeversuchen eine geringe Streuung hinsichtlich Kraft- und Wegmaximum auf.
- Das ermittelte Materialmodelle wurde in einem
  - Dehnungsbereich von 0 bis 10% und
  - Dehnratenbereich von 0.01 bis 100 1/s bestimmt.
- Die Messungen ergeben eine Dehnratenabhängigkeit im untersuchten Bereich.
- Die mit Reverse Engineering ermittelte Materialkarte kann für das untersuchte Material die vorgegebenen Versuche gut wiedergeben.
- Im Vergleich der Fließspannung und Spannung bei 5% Dehnung über der Dehnraten zeigt die Charakterisierung mit 4a Impetus im Mittel eine gute Übereinstimmung zu den vorhandenen externen Daten.



**Audi**

© 4a engineering GmbH, all rights reserved