

1

# In-situ-Biegeversuche

PRÄSENTATION IM RAHMEN DER BACHELORARBEIT VON  
FLORIAN BAGSIK

## **Problem:**

Die Modelle für das Werkstoffversagen durch Dehnung sind zu konservativ ausgelegt. D.h. die Werkstoffe werden nicht optimal ausgenutzt.

## **Lösungsansatz:**

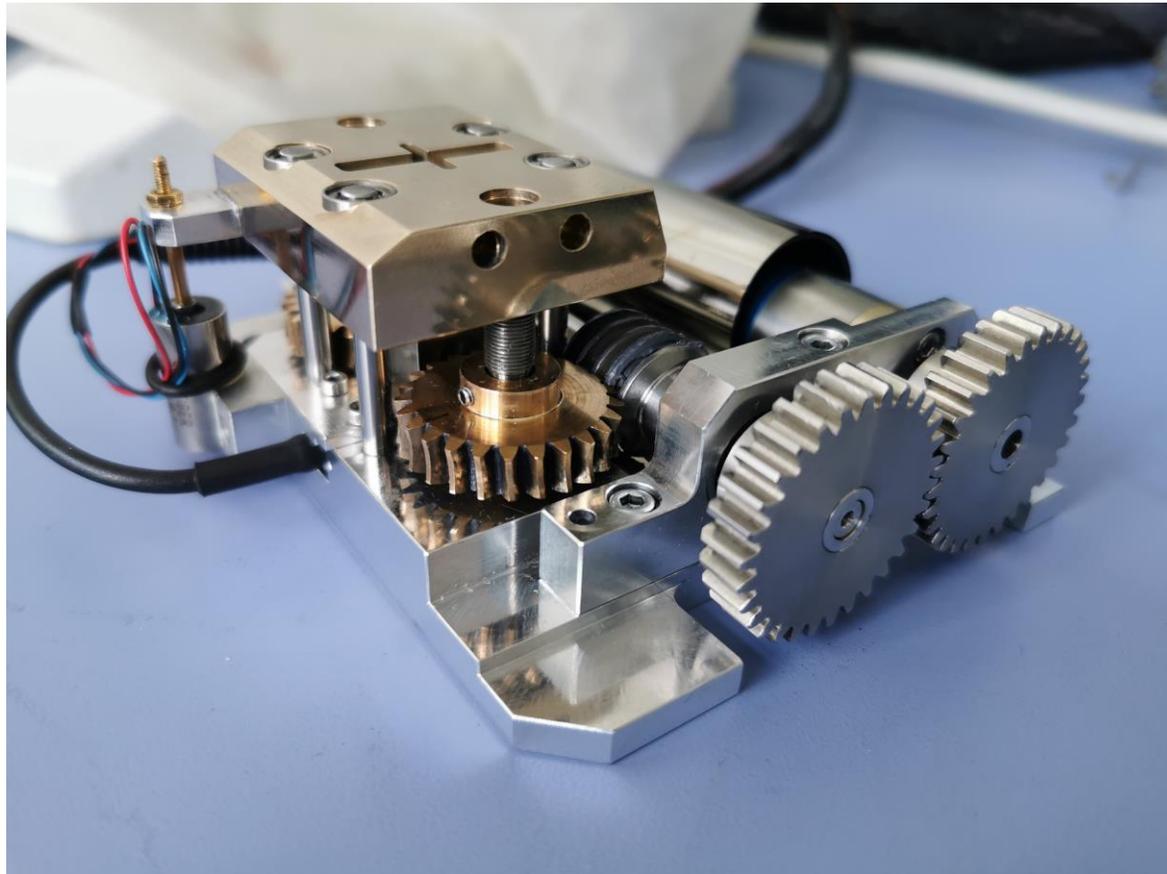
Dehnungen von verschiedenen Werkstoffen unter Biegebeanspruchung in-situ im REM messen, um Kennwerte für ein mögliches Werkstoffversagen entwickeln zu können.

## **Was fehlt noch?**

- ▶ Eine ergonomische, Steuerung für die Biegemaschine
- ▶ Ein mathematisches Modell für die Wegmessung und den erreichten Biegewinkel
- ▶ Eine Kompensationsberechnung zur Erhöhung der Messgenauigkeit.
- ▶ Ein Messverfahren zur Dehnungsbestimmung

# Inhalt:

- ▶ Korrektur und Modellierung der Wegmessung
- ▶ Entwicklung der Biegemaschinensteuerung
  - ▶ Vergleich des Funktionsumfangs „alt“ gegen „neu“
  - ▶ Ergonomische Gestaltung der Steuerung
- ▶ Mathematische Modellierung des Biegevorgangs
  - ▶ Berechnung des Biegewinkels
  - ▶ Kompensationsberechnung durch die Beanspruchung des Biegestempels
- ▶ In-situ-Biegeversuche
  - ▶ Auswahl des Detektors
  - ▶ Versuchsauswertung über GOM Correlate (digitale Bildkorrelation)
  - ▶ Versuchsauswertung über ImageJ (manuelle Dehnungsmessung)
- ▶ Fazit



Korrektur und  
Modellierung  
der Weg-  
messung

# Korrektur und Modellierung der Wegmessung

- ▶ Die Position des Biegekopfes ist bei der Überwachung der Biegemaschine und des Biegeversuchs die zentrale Messgröße.
- ▶ Die Position wird über einen induktiven Wegaufnehmer seitlich vom Biegekopf bestimmt

## **Problem:**

Der ursprüngliche Wegaufnehmer lieferte falsche Werte.

# Korrektur und Modellierung der Wegmessung

## Ursache für die falschen Messwerte:

- ▶ Ausgabespannung des Wegmessers lag außerhalb der zulässigen Eingangsspannung des A/D-Wandlers von  $\pm 5V$
- ▶ Zusammenhang zwischen Spannung und Weg falsch dargestellt

## Lösung:

- Verstärkung der Messelektronik neu justiert
- Modellierung des Zusammenhangs von Spannung und Weg

# Modellierung der Wegmessung

Mit dem Messschieber ermittelte Messwerte:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
U <sub>i</sub> [V]	4,94	4,32	3,7	3,23	2,44	1,81	1,14	0,54	-0,04	-0,71	-1,24	-1,96	-2,6	-3,19	-3,85	-4,42	-4,98
Y <sub>i</sub> [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8

Berechnung der Regressionsgerade gemäß der Summe der kleinsten Quadrate:

$$f(U) = b * U + a \quad b = \frac{\sum_i^n U_i * Y_i - n * \bar{U} * \bar{Y}}{\sum_i^n U_i^2 - n * \bar{U}^2} \quad a = \bar{Y} - b * \bar{U} \quad \bar{U} = \frac{\sum_i^n U_i}{n} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_i^n Y_i}{n}$$

# Modellierung der Wegmessung

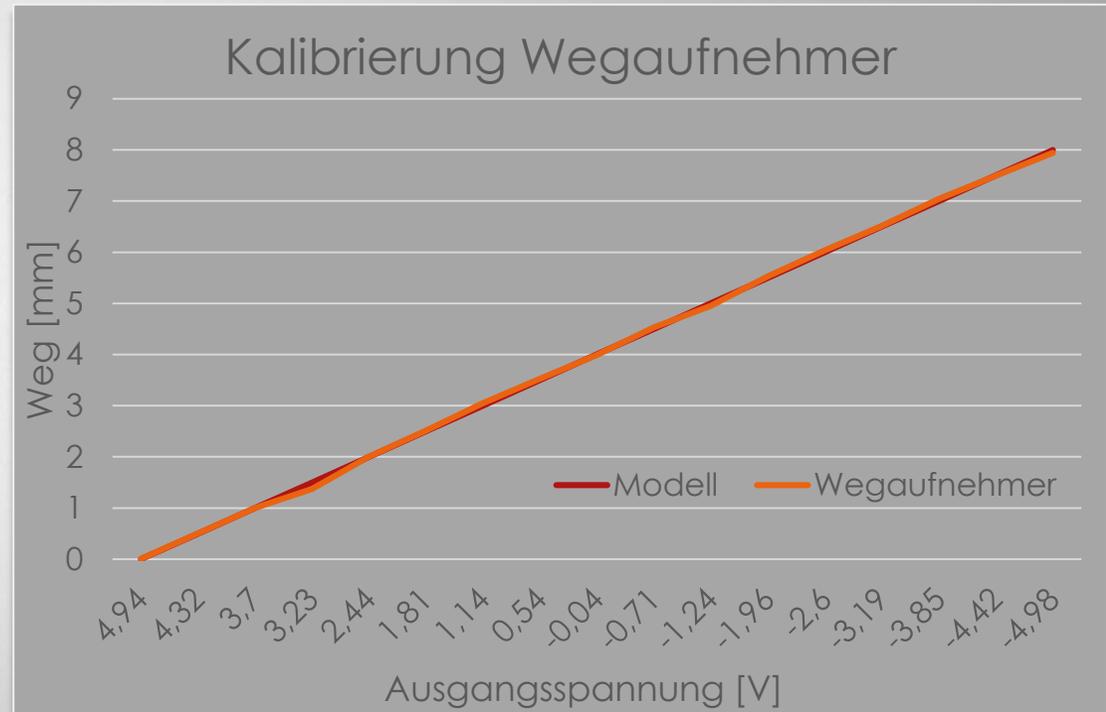
Berechnung der Regressionsgerade gemäß der Summe der kleinsten Quadrate:

$$\bar{U} = \frac{\sum_i^n U_i}{n} = -1,780098 \text{ V} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_i^n Y_i}{n} = 4 \text{ mm}$$

$$b = \frac{\sum_i^n U_i * Y_i - n * \bar{U} * \bar{Y}}{\sum_i^n U_i^2 - n * \bar{U}^2} = -0.7984591 \frac{\text{mm}}{\text{V}} \approx -0,80 \frac{\text{mm}}{\text{V}}$$

$$a = \bar{Y} - b * \bar{U} = 3,95913768 \text{ mm} \approx 3,96 \text{ mm}$$

$$f(U) = -0.8 \frac{\text{mm}}{\text{V}} * U + 3,96 \text{ mm}$$



**Manuelle Steuerung**

hoch Motor Ein  
runter Motor Aus  
Geschwindigkeit  
Fahrtrichtung

**0,0000 N** Kraft Biegestempel  
**4,0000 mm** "Ist"-Weg  
**0,0000 V** Spannung Wegaufnehmer  
**0,0000 mm** "Soll"-Weg  
**00:00:00** Laufzeit des Versuchs  
**-3,40364 mm** Regeldifferenz  
**3,8000 V** Motorspannung  
**2,99305 mm** "Ist"-Weg des Schritts

**Position anfahren**  
absolut/inkrementell  
Höhe nullen  
Position in mm  
Position anfahren

**Prüfkraft anfahren**  
Prüfkraft in wählen in N  
Prüfkraft anfahren

**Automatikmodus**  
Geschwindigkeit in  $\mu\text{m/s}$   
Start Messung  
Pause Weiter

**Schrittmodus**  
Startposition nullen  
Schrittzähler  
Schrittweite in mm  
Nächster Schritt

**"Soll / Ist"-Weg Diagramm**

**"Kraft / Weg" Diagramm**

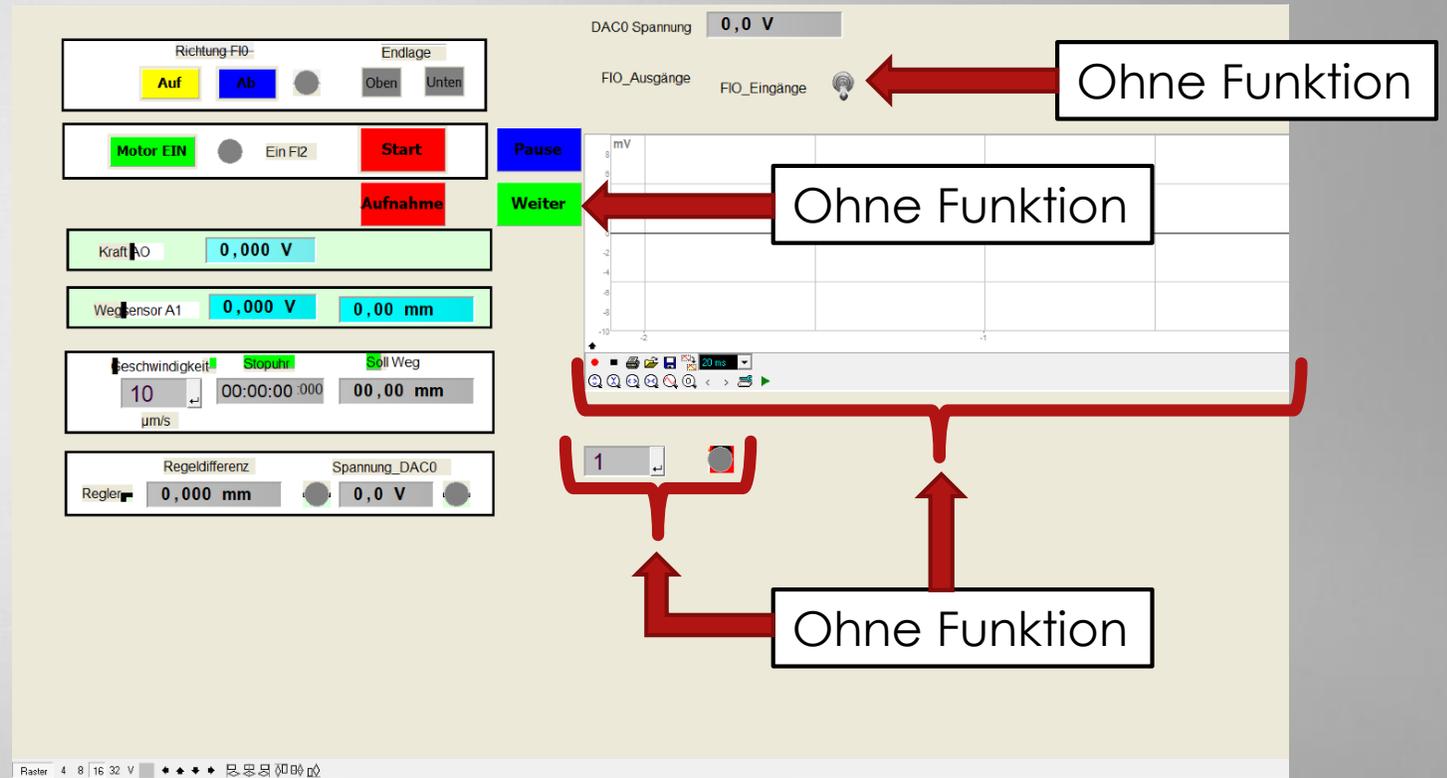


# Entwicklung der Biege- maschinen- steuerung

# Vergleich des Funktionsumfangs

## Alte Steuerung

- ▶ Manuelle Steuerung
- ▶ Senken des Biegekopfs mit geregelter, einstellbarer Geschwindigkeit.
- ▶ Kontinuierliche Protokollierung der von Kraft Motorspannung, Zeit und Position bis zum Beenden der Software



# Vergleich des Funktionsumfangs

11

## Neue Steuerung

The screenshot displays a control interface with several panels:

- Manuelle Steuerung:** Includes buttons for 'hoch' (up), 'Motor Ein', 'runter' (down), 'Motor Aus', and a 'Geschwindigkeit' (speed) slider.
- Parameter Display:** Shows values for 'Kraft Biegelempel' (0,00000 N), 'Ist-Weg' (4,00000 mm), 'Spannung Wegaufnehmer' (0,00000 V), 'Soll-Weg' (0,00000 mm), 'Laufzeit des Versuchs' (00:00:00,000), 'Regeldifferenz' (-3,40364 mm), 'Motorspannung' (3,80000 V), and 'Ist-Weg des Schritts' (2,99305 mm).
- Position anfahren:** Features 'absolut/inkrementell' (absolute/incremental) and 'Höhe nullen' (zero height) options, with a 'Position in mm' input field.
- Prüfkraft anfahren:** Includes a 'Prüfkraft in wählen in N' (test force in N) input field.
- Automatikmodus:** Shows 'Geschwindigkeit in  $\mu\text{m/s}$ ' (5) and 'Start Messung' (start measurement) buttons.
- Schrittmodus:** Shows 'Startposition rufen' (call start position), 'Schrittzähler' (step counter) at 0000, 'Schrittwerte in mm' (0,08), and 'Nächster Schritt' (next step) buttons.
- Diagrams:** Two graphs are shown: '"Soll / Ist"-Weg Diagramm' (planned/actual path) and '"Kraft / Weg" Diagramm' (force/path).
- Emergency Stop:** A prominent red 'NOT HALT' button is visible.

- ▶ Manuelle Steuerung mit einstellbarer Geschwindigkeit
- ▶ Automatisches Anfahren und Stoppen beliebiger Positionen
- ▶ Automatisches Anfahren und Stoppen beliebiger Prüfkräfte
- ▶ Geregeltetes Senken des Biegekopfs mit einstellbarer Geschwindigkeit
- ▶ Pausieren und Wiederaufnahme des geregelten Senkens

# Vergleich des Funktionsumfangs

12

## Neue Steuerung

The screenshot displays a control interface for a testing machine, organized into several functional areas:

- Manuelle Steuerung (Manual Control):** Includes a power switch (OFF), directional buttons (hoch, Motor Ein, runter, Motor Aus), a speed control slider (Geschwindigkeit), and a direction selector (Fahrtrichtung).
- Parameter Table:** A table displaying real-time data:

Kraft Biegetempel	0,00000 N	"Ist"-Weg	4,00000 mm
Spannung Wegaufnehmer	0,00000 V	"Soll"-Weg	0,00000 mm
Laufzeit des Versuchs	00:00:00,000	Regeldifferenz	-3,40364 mm
Motorspannung	3,80000 V	"Ist"-Weg des Schritts	2,99305 mm
- Position and Force Control:** Features buttons for "Position anfahren" (with absolute/incremental options) and "Prüfkraft anfahren" (with a force selection field).
- Emergency Stop:** A prominent red "NOT HALT" button.
- Automatikmodus (Automatic Mode):** Includes a speed selector (5 µm/s), a start button (Start Messung), and a stop button (Nächster Schritt).
- Schrittmodus (Step Mode):** Shows step position (0,08 mm) and step counter (0000).
- Diagrams:** Two plot areas: "Soll / Ist"-Weg Diagramm (planned vs. actual path) and "Kraft / Weg" Diagramm (force vs. path).

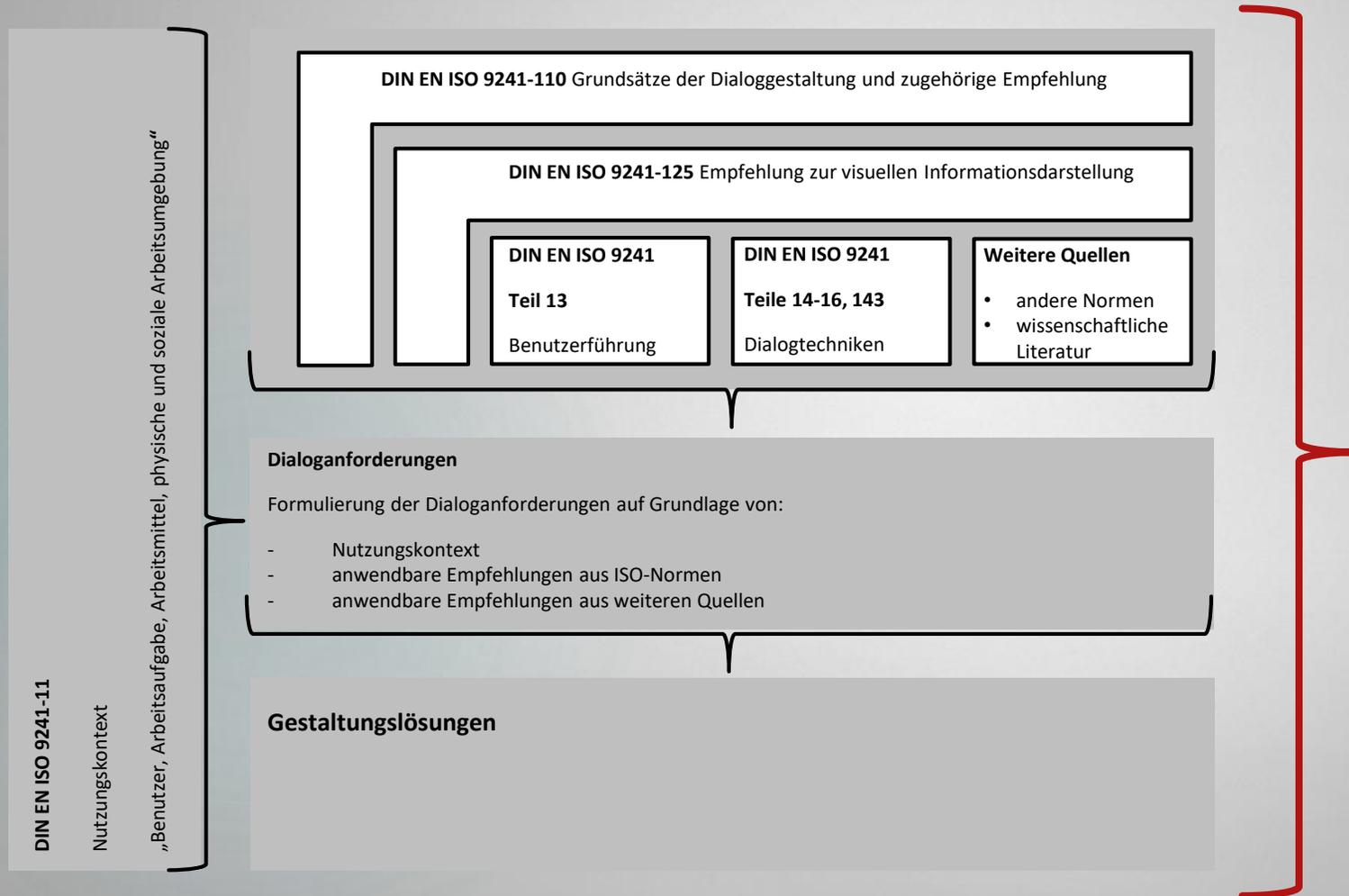
- ▶ Senken des Biegekopfes mit beliebiger Schrittweite
- ▶ Protokollierung von Kraft, Motorspannung, Zeit, Position und Schrittweite bis zum Stopp des Antriebs und Ende des Versuchs.
- ▶ Not-Aus
- ▶ Diagrammplotter zur Versuchsüberwachung

The image displays a control interface for a motor system, organized into several horizontal panels:

- Direction and End Position:** "Richtung F10" with buttons "Auf" (yellow) and "Ab" (blue), and a grey circle. "Endlage" with buttons "Oben" and "Unten".
- Motor and Start:** "Motor EIN" (green button), a grey circle, "Ein F12", and a red "Start" button.
- Aufnahme:** A red button labeled "Aufnahme".
- Force:** "Kraft A0" with a value of "0,000 V" in a cyan box.
- Position:** "Wegsensor A1" with a value of "0,000 V" in a cyan box and "0,00 mm" in a cyan box.
- Speed and Stop:** "Geschwindigkeit" with a value of "10" in a grey box and "µm/s" below it. "Stopuhr" with a value of "00:00:00 :000" in a grey box. "Soll Weg" with a value of "00,00 mm" in a grey box.
- Control Parameters:** "Regeldifferenz" with a value of "0,000 mm" in a grey box and a "Regler" button. "Spannung\_DAC0" with a value of "0,0 V" in a grey box and two grey circles.

# Ergonomische Gestaltung der Steuerung

# Ergonomische Softwaregestaltung



Grundlage für die Entwicklung einer ergonomischen Benutzeroberfläche gemäß DIN EN ISO 9241-110

# Eindeutigkeit der Bedienelemente

15

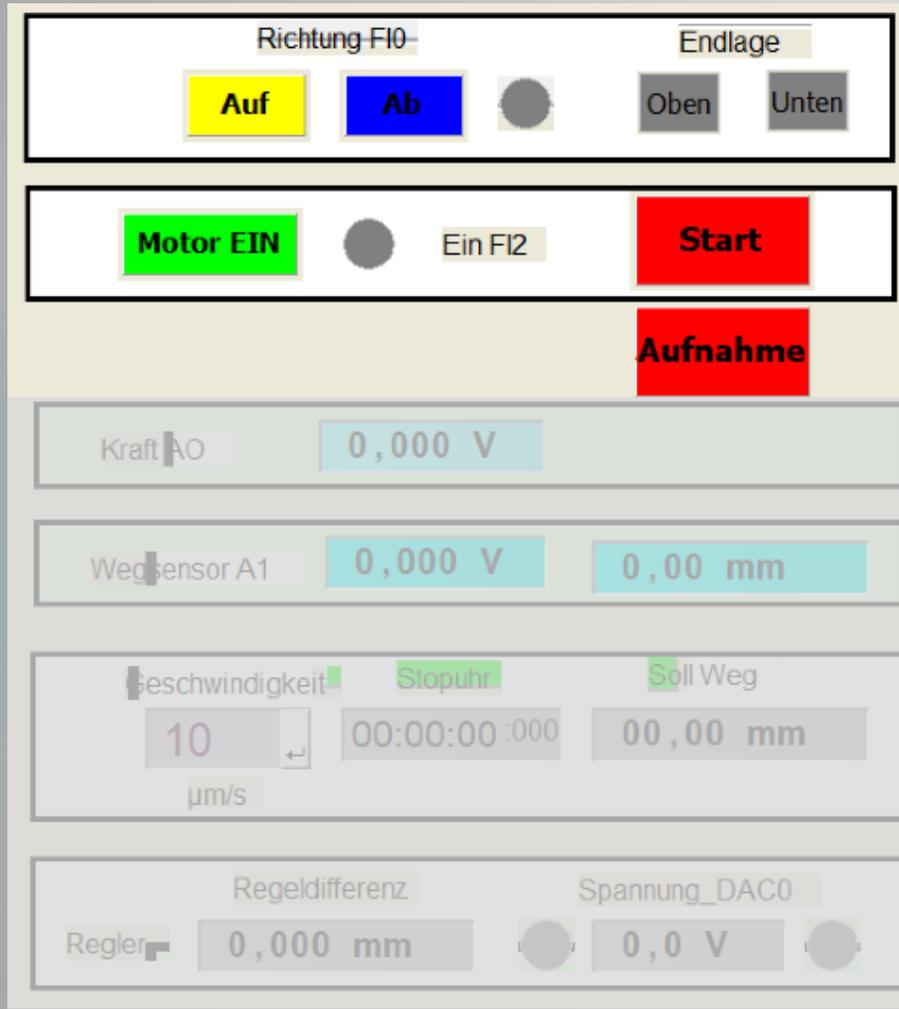
The screenshot displays a control interface with several sections:

- Direction and End Position:** A section titled "Richtung-F10" contains buttons "Auf" (yellow) and "Ab" (blue), and a grey circle. To the right, under "Endlage", are buttons "Oben" and "Unten".
- Motor and Start:** A section with a green "Motor EIN" button, a grey circle, and "Ein F12". To the right is a red "Start" button.
- Aufnahme:** A red button labeled "Aufnahme" is positioned below the "Start" button.
- Force Display:** A light green bar with "Kraft AO" on the left and a cyan display showing "0,000 V".
- Position Sensor Display:** A light green bar with "Wegsensor A1" on the left, a cyan display showing "0,000 V", and another cyan display showing "0,00 mm".
- Speed and Stopwatch:** A grey bar with "Geschwindigkeit" (displaying "10" and "µm/s"), "Stopuhr" (displaying "00:00:00 :000"), and "Soll Weg" (displaying "00,00 mm").
- Control Parameters:** A grey bar with "Regeldifferenz" (displaying "0,000 mm") and "Spannung\_DAC0" (displaying "0,0 V").

- Beschriftung der Anzeigen und Bedienelemente erfolgt ohne feste Regel

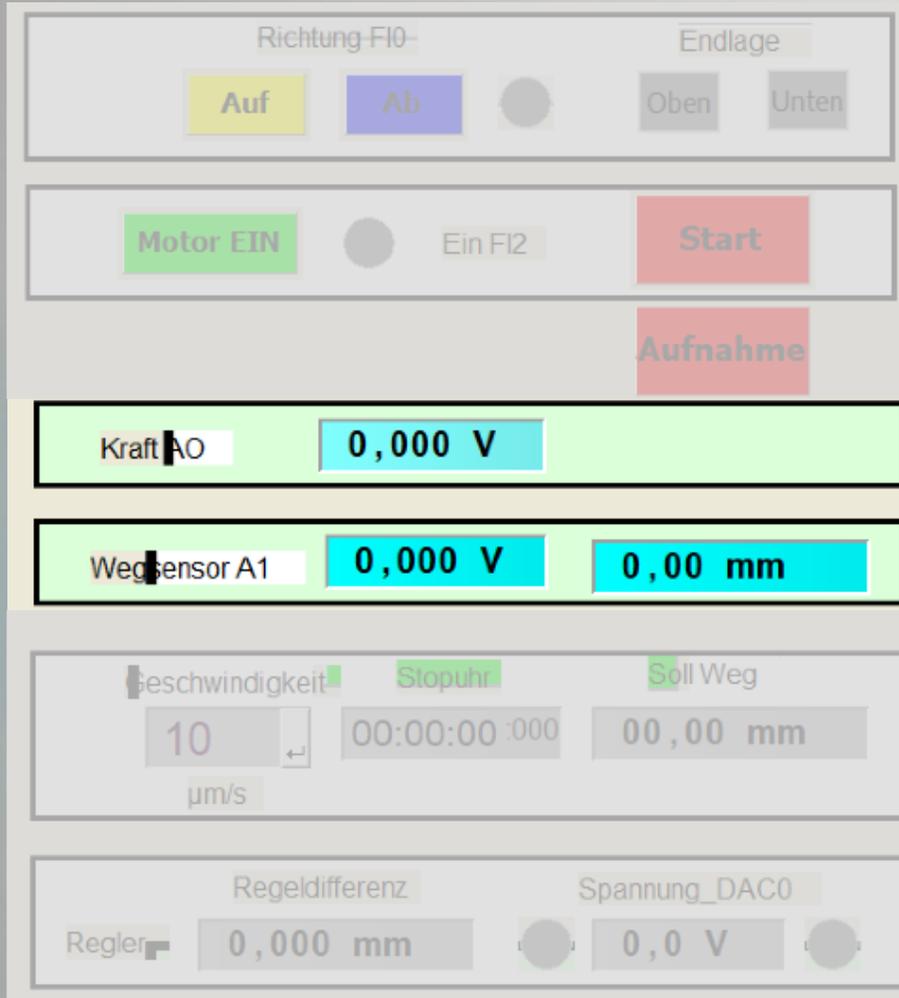
# Eindeutigkeit der Bedienelemente

16



- Gruppierung der Elemente ohne inhaltlichen und funktionellen Zusammenhang.
- Bedienelemente und Anzeigen sind nicht eindeutig zu unterscheiden.

# Eindeutigkeit der Bedienelemente

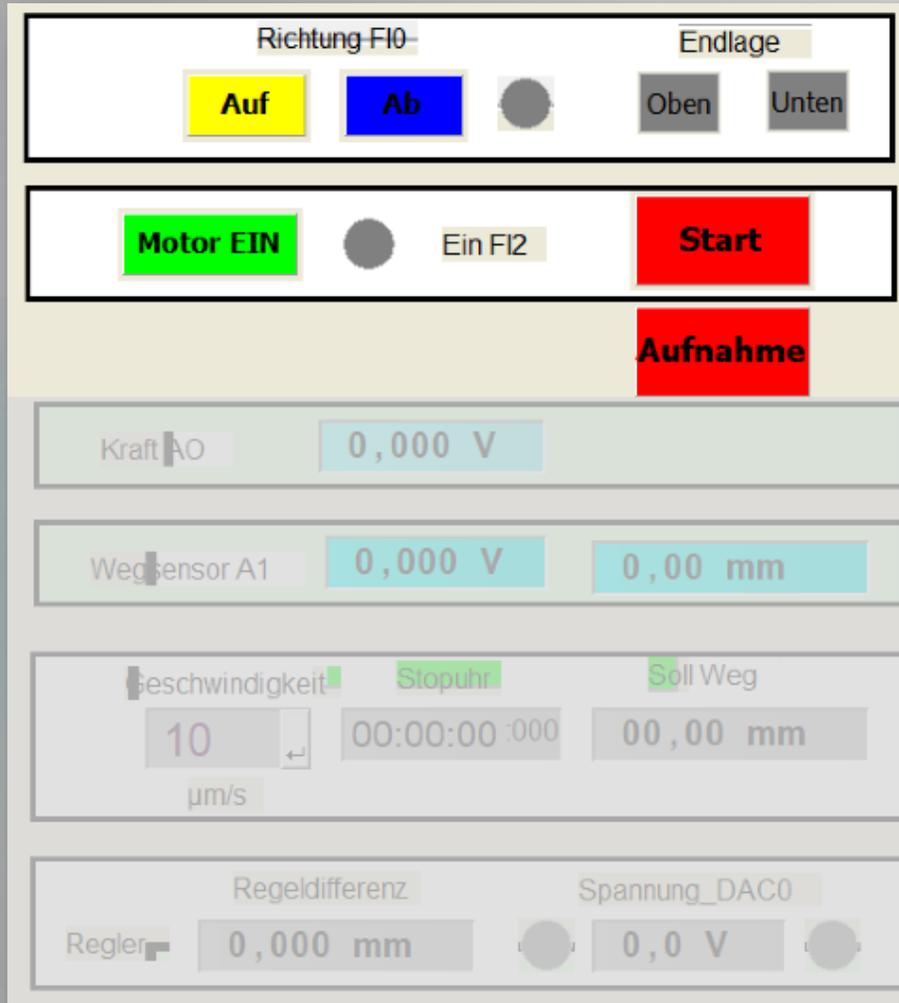


Messwerte werden nicht zweckmäßig dargestellt.

Volt statt Newton für die auf den Biegestempel wirkende Kraft

# Eindeutigkeit der Bedienelemente

18



- Anzeigen nicht beschriftet
- Zufällige Farbschema ohne Berücksichtigung deren Bedeutung.

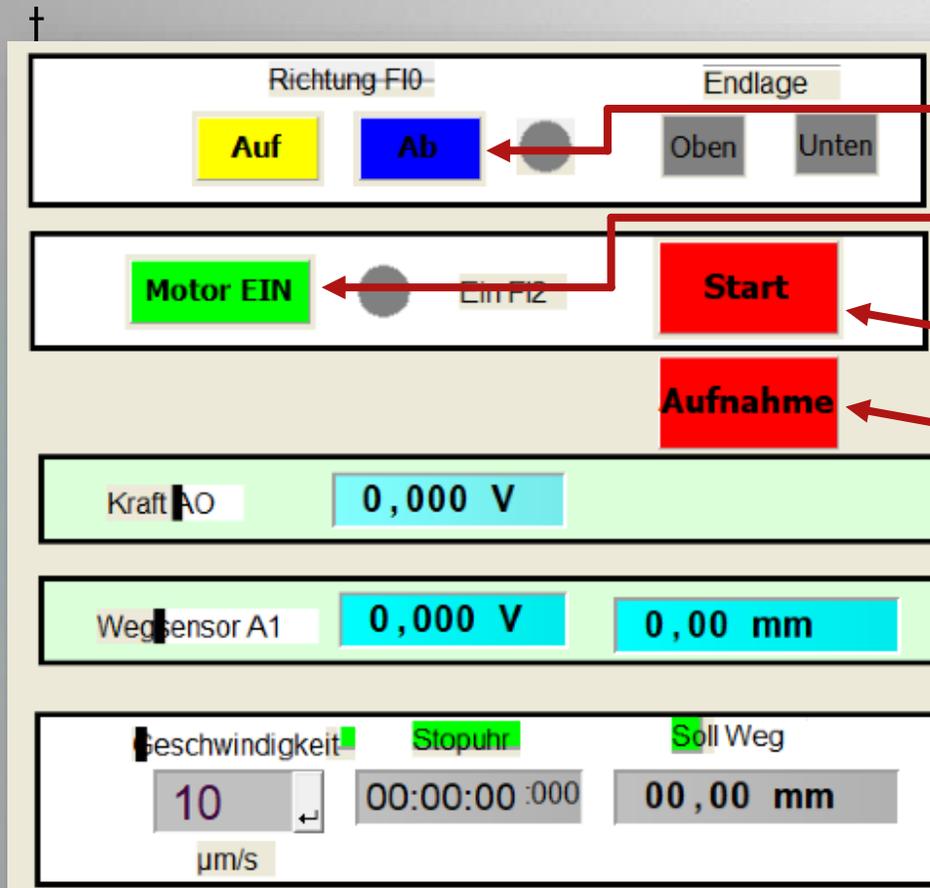
**Rot = Gefahr**

**Gelb = Achtung**

**Grün = Los, keine Gefahr**

# Vergleich des Bedienaufwand

19



Bedienaufwand zum Starten eines Versuchs

- 1 Fahrtrichtung
- 2 Antrieb einschalten
- 3 Geschwindigkeitsregelung aktivieren
- 4 Protokollierung der Messwerte

**Fazit: Mehrere Eingaben in kurzer Reihenfolge mit hohem Fehlerpotenzial notwendig**

# Biegemaschinensteuerung

20

The original control interface is a light-colored desktop application. It features several control panels on the left: 'Richtung F10-' with 'Auf' (yellow) and 'Ab' (blue) buttons; 'Endlage' with 'Oben' and 'Unten' buttons; 'Motor EIN' (green) and 'Start' (red) buttons; 'Kraft' (0,000 V) and 'Weg Sensor A1' (0,000 V, 0,00 mm) displays; 'Geschwindigkeit' (10 µm/s) and 'Soll Weg' (00,00 mm) displays; and 'Regeldifferenz' (0,000 mm) and 'Spannung\_DAC0' (0,0 V) displays. A central plot shows 'mV' on the y-axis. A red arrow points from this interface to the redesigned one.

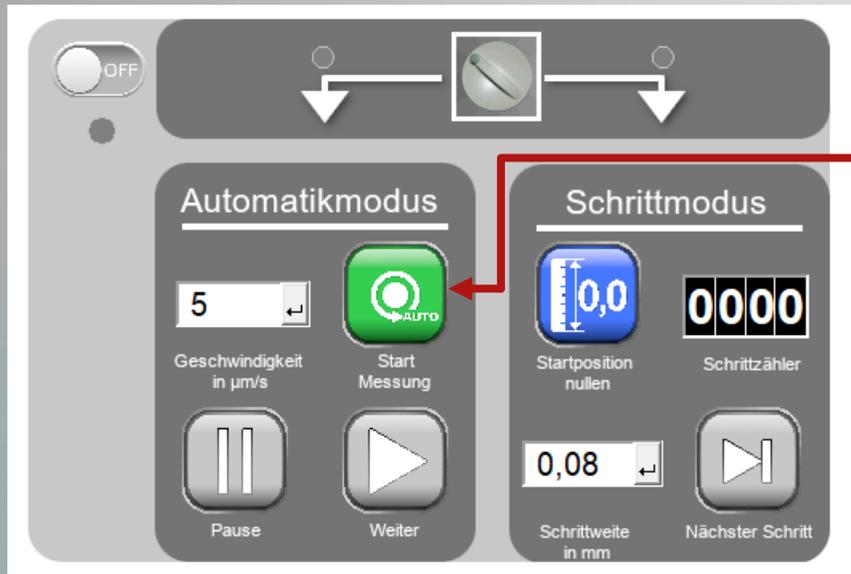
Steuerung bei Übernahme des Projekts

The redesigned control interface is a dark-themed, modern UI. It is organized into several functional blocks: 'Manuelle Steuerung' (Manual Control) with directional buttons and 'Motor Ein/Aus'; 'Antriebskontrolle' (Drive Control) with gear icons and numerical displays for force (0,00000 N), displacement (4,00000 mm), voltage (0,00000 V), and speed (3,80000 V); 'Position anfahren' (Move Position) and 'Prüfkraft anfahren' (Move Test Force) with input fields and buttons; 'Automatikmodus' (Automatic Mode) with speed and start buttons; 'Schrittmodus' (Step Mode) with step size and next step buttons; and two graphs: '"Soll / Ist"-Weg Diagramm' (Target/Actual Displacement) and '"Kraft / Weg" Diagramm' (Force/Displacement). A prominent red 'NOT HALT' emergency stop button is also visible.

Neugestaltung der Steuerung

# Vergleich des Bedienaufwand

21



Bedienaufwand zum Starten eines Versuchs

Fahrtrichtung

Antrieb einschalten

Geschwindigkeitsregelung aktivieren

Protokollierung der Messwerte

**Fazit: Ein Tastendruck erfüllt alle notwendigen Befehlen und die Messung startet automatisch**

# Vorstellung der Steuerung

22



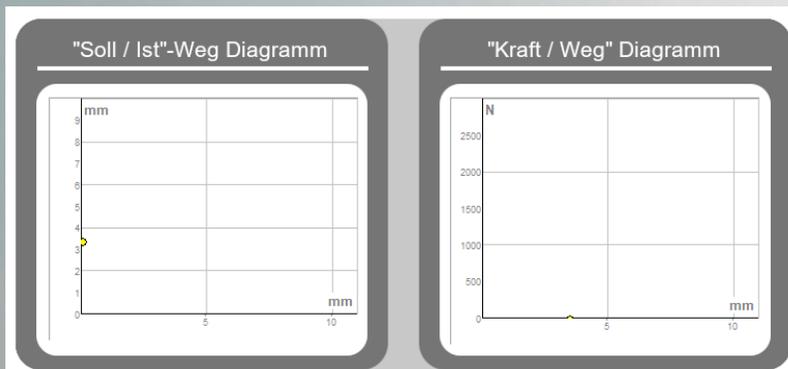
- ▶ Funktionen werden in Gruppen zusammengefasst.
- ▶ Beschriftung gleichbleibend unter dem Bedienelement oder der Anzeige.
- ▶ Einheitliches Farbschema.
  - Rot = Stopp**
  - Blau = aktiv, Funktion startet**  
**Motor wird nicht.**
  - Gelb = Achtung**
  - Grau = neutral, optional**
  - Grün = Motor startet**
- ▶ Unterscheidbare Bedienelemente mit eindeutiger Funktion.

# Vorstellung der Steuerung

23



- ▶ Informationen eindeutig, gebündelt und immer am selben Ort.
- ▶ Diagramme zur Überwachung des Versuchs.



- ▶ Not-Aus in Signalfarben, um im Gefahrfall schnell reagieren zu können.

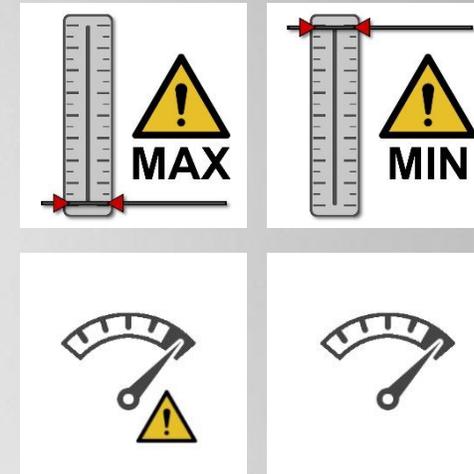


# Entwicklung der Piktogramme

## Ziele:

- ▶ Unterscheidbarkeit
- ▶ Wenn möglich aus dem Alltag bekannt
- ▶ Im Kontext der Steuerung eindeutig in ihrer Funktion und notwendigen Interaktion
- ▶ Und auch ohne Sprachkenntnis selbsterklärend



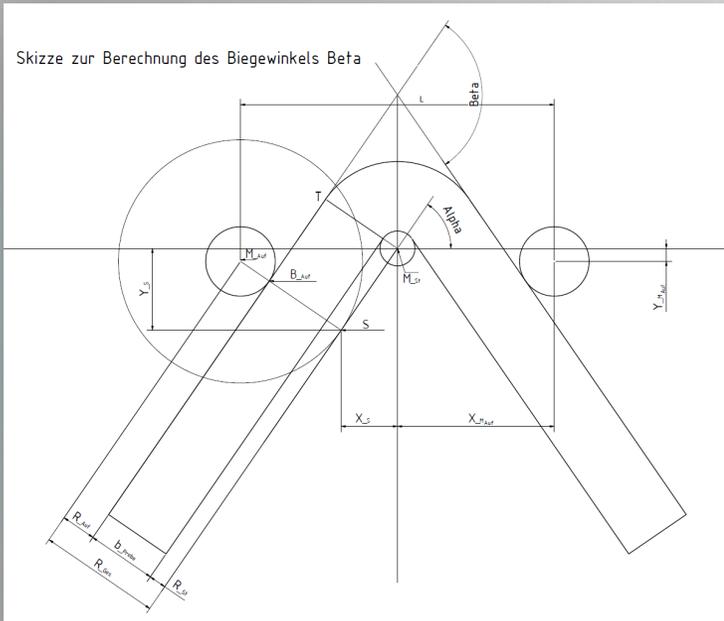


- ▶ Die dargestellten Informationen sind auf ein notwendiges Minimum reduziert.
- ▶ Nicht benötigte Informationen werden im Rahmen der Möglichkeiten der Software ausgeblendet.



# Berechnung des Biegewinkels Beta

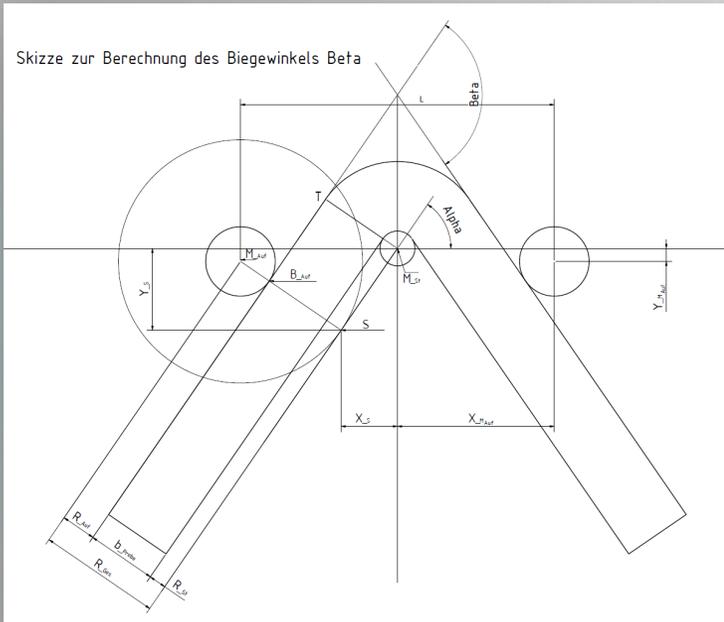
27



1. Die Schenkel der Biegeprobe bleiben starr.
2. Die Dicke der Probe bleibt während des Versuchs konstant.
3. Die Probe berührt die Auflager in Form eines Linienkontakts.
4. Die Probe schmiegt sich während des Biegeumformens exakt der Stempelkontur an.

# Berechnung des Biegewinkels Beta

28



5. Die Auflager, sowie der Bogen des Biegestempels sind perfekt rund mit bekannten Radien und nicht elastisch.
6. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Bogenmittelpunkt des Biegestempels.
7. Die beiden Auflager besitzen nur einen Freiheitsgrad und können sich nur parallel zur y-Achse bewegen.
8. Die Position des Biegestempels bleibt konstant.

# Berechnung des Biegewinkels Beta

29

**Koordinaten des Berührungspunkts des linken Auflagers mit der Probe**

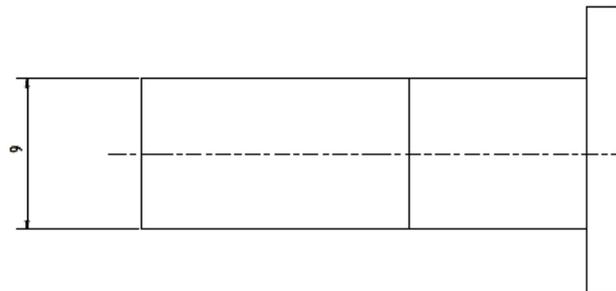
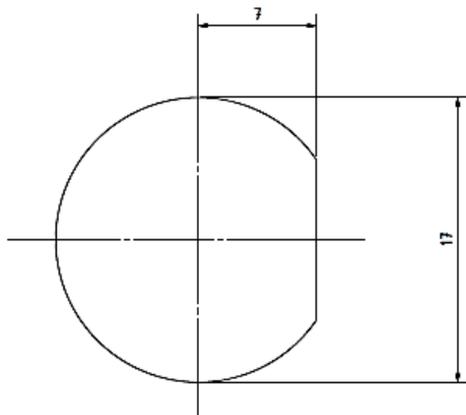
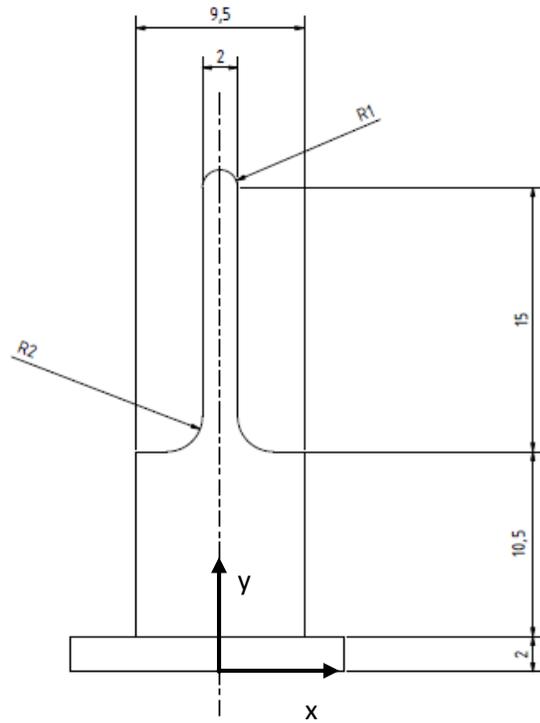
$$Y_{S_{1;2}} = -\frac{1}{2} \frac{(-2Y_{M_{Auf}}^3 + 2Y_{M_{Auf}} R_{Ges}^2 - 2Y_{M_{Auf}} X_{M_{Auf}}^2)}{(Y_{M_{Auf}}^2 + X_{M_{Auf}}^2)} \mp \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{(-2Y_{M_{Auf}}^3 + 2Y_{M_{Auf}} R_{Ges}^2 - 2Y_{M_{Auf}} X_{M_{Auf}}^2)}{(Y_{M_{Auf}}^2 + X_{M_{Auf}}^2)}\right)^2 - \frac{Y_{M_{Auf}}^4 - 2Y_{M_{Auf}}^2 R_{Ges}^2 + R_{Ges}^4 - R_{Ges}^2 X_{M_{Auf}}^2 + Y_{M_{Auf}}^2 X_{M_{Auf}}^2}{(Y_{M_{Auf}}^2 + X_{M_{Auf}}^2)}}$$

$$X_{S_{1;2}} = \sqrt{R_{Ges}^2 - (Y_{S_{1;2}} - Y_{M_{Auf}})^2} + X_{M_{Auf}}$$

**Biegewinkel in Abhängigkeit des Berührungspunktes:**

$$\alpha = \arctan \frac{\sqrt{(Y_{S_{1;2}})^2}}{\sqrt{(X_{S_{1;2}})^2}}$$

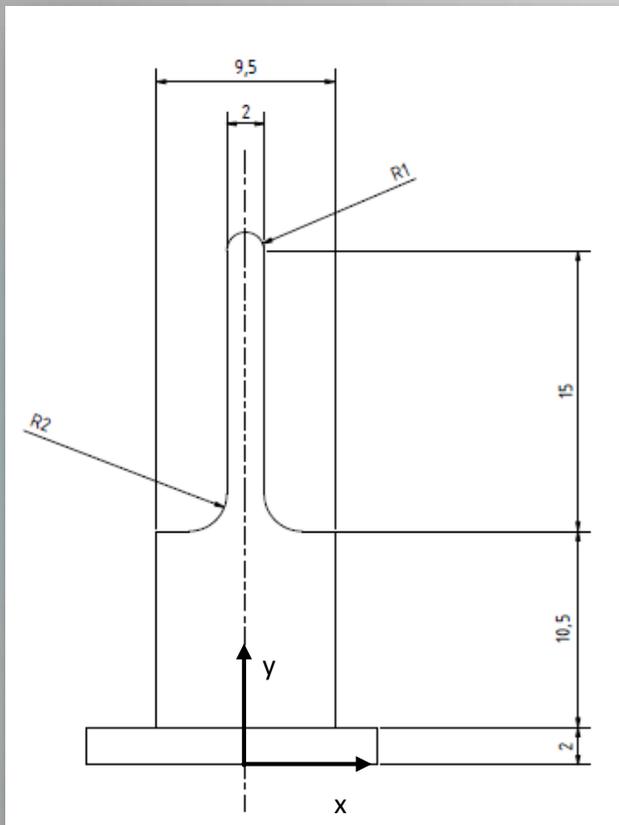
$$\beta = 2\alpha = 2\arctan \frac{\sqrt{(Y_{S_{1;2}})^2}}{\sqrt{(X_{S_{1;2}})^2}}$$



Kompensation  
der Stauchung  
des Biege-  
stempels

# Kompensation der Stauchung des Biegestempels

31

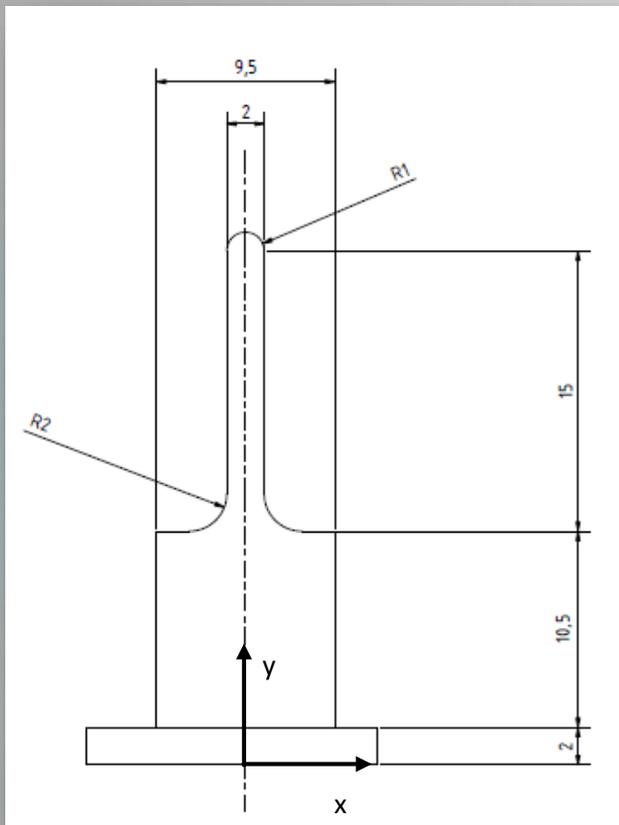


## Problem:

Die Druckbeanspruchung des Biegestempels führt zu dessen elastischer Stauchung. Die seitlich gemessene Position des Biegekopfes lässt sich daher nur eingeschränkt auf den Biegewinkel der Probe übertragen.

**Lösung:** Kraftabhängige Kompensationsfunktion der Biegekopfposition

# Kompensation der Stauchung des Biegestempels



Stauchung in Abhängigkeit der Kraft

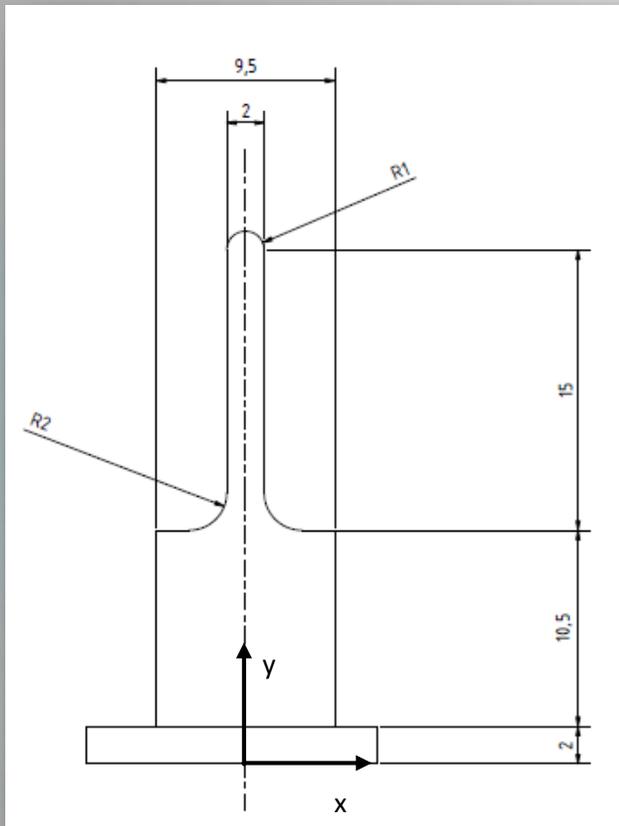
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A \cdot E} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta l = l \cdot \varepsilon$$

Die Querschnittsfläche  $A$  ist abhängig von der Höhe  $y$ .

→ Unterteilung des Biegestempels in fünf Teilabschnitte

$$\Delta l_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^5 \Delta l_i = \sum_{i=1}^5 \varepsilon_i \cdot l_i$$

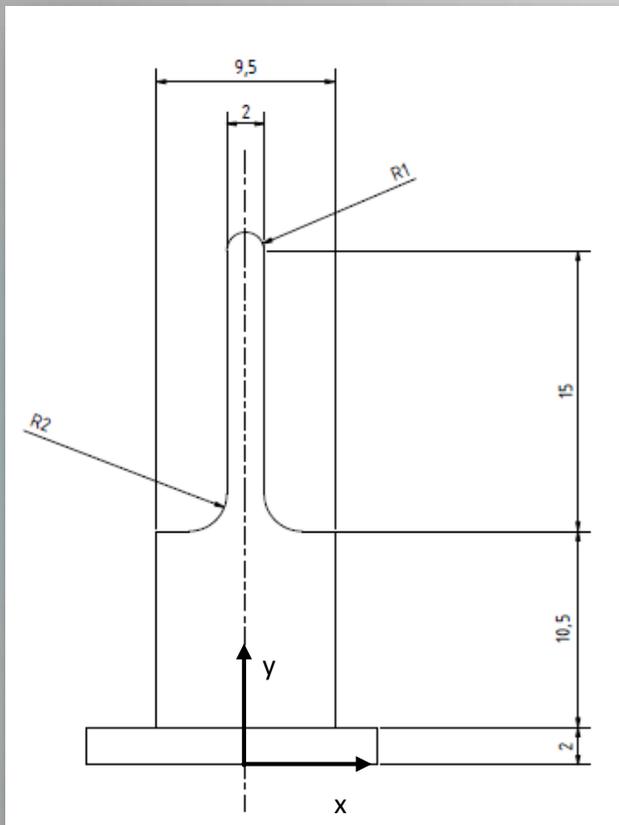
# Kompensation der Stauchung des Biegestempels



Aufteilung der Längenänderungen in geometrische Grundkörper:

- ▶  $\Delta l_1 = \varepsilon_1 * l_1 = \frac{\sigma(y_1) * l_1}{E} = \frac{F * l_1}{A(y_1) * E}$  für  $0 \leq y_1 \leq 1$
- ▶  $\Delta l_2 = \varepsilon_2 * l_2 = \frac{\sigma(y_2) * l_2}{E} = \frac{F * l_2}{A(y_2) * E}$  für  $0 \leq y_2 \leq 13$
- ▶  $\Delta l_3 = \varepsilon_3 * l_3 = \frac{\sigma(y_3) * l_3}{E} = \frac{F * l_3}{A(y_3) * E}$  für  $0 \leq y_3 \leq 2$
- ▶  $\Delta l_4 = \varepsilon_4 * l_4 = \frac{\sigma(y_4) * l_4}{E} = \frac{F * l_4}{A(y_4) * E}$  für  $0 \leq y_4 \leq 10,5$
- ▶  $\Delta l_5 = \varepsilon_5 * l_5 = \frac{\sigma(y_5) * l_5}{E} = \frac{F * l_5}{A(y_5) * E}$  für  $0 \leq y_5 \leq 2$

# Kompensation der Stauchung des Biegestempels



- ▶  $\Delta l_1 = \varepsilon_1 * l_1 = \frac{F * l_1}{A(y_1) * E} = \int_0^1 \frac{F * l_1}{A(y_1) * E} dy_1 = \frac{F * l_1}{2 * z * E} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{r_1^2 - y_1^2}} dy_1$
- ▶  $\Delta l_2 = \frac{F * l_2}{2 * x_2 * z * E} = \frac{F * l_2}{2 * z * 1 \text{ mm} * E}$
- ▶  $\Delta l_3 = \frac{F * l_3}{2 * z * E} \int_0^2 \frac{1}{3 - \sqrt{r_2^2 - y_3^2}} dy_3$
- ▶  $\Delta l_4 = \frac{F * l_4}{2 * x_4 * z * E} = \frac{F * l_4}{2 * 4,75 \text{ mm} * z * E}$
- ▶  $\Delta l_5 = \frac{F * l_5}{r_3^2 \arccos\left(1 - \frac{r_3 - 7}{r_3}\right) - (r_3 - (r_3 - 7)) * \sqrt{2 * r_3 (r_3 - 7) - (r_3 - 7)^2} * E}$

# Kompensation der Stauchung des Biegestempels

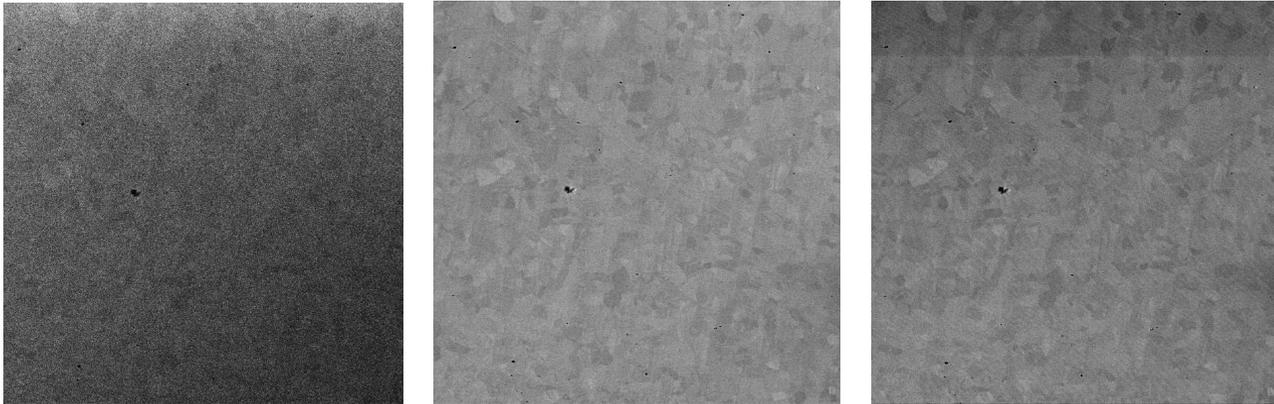
**Zwischenergebnis:**

$$\Delta l_{ges}(F) = \frac{F}{E} * \left( \left( \frac{1}{2 * z} \right) * \left( l_1 \frac{\pi}{2} + l_2 + l_3 * 1.5156804791 + l_4 * \frac{4}{19} \right) + l_5 * 0,00040597 \text{ mm}^{-2} \right)$$

$E_{Stahl} = 200000 \frac{N}{mm^2}$	$l_1 = 1 \text{ mm}$
$l_2 = 13 \text{ mm}$	$l_3 = 2 \text{ mm}$
$l_4 = 10,5 \text{ mm}$	$l_5 = 2 \text{ mm}$
	$z = 9 \text{ mm}$

**Stauchung des Biegestempels in Abhängigkeit von der Belastung:**

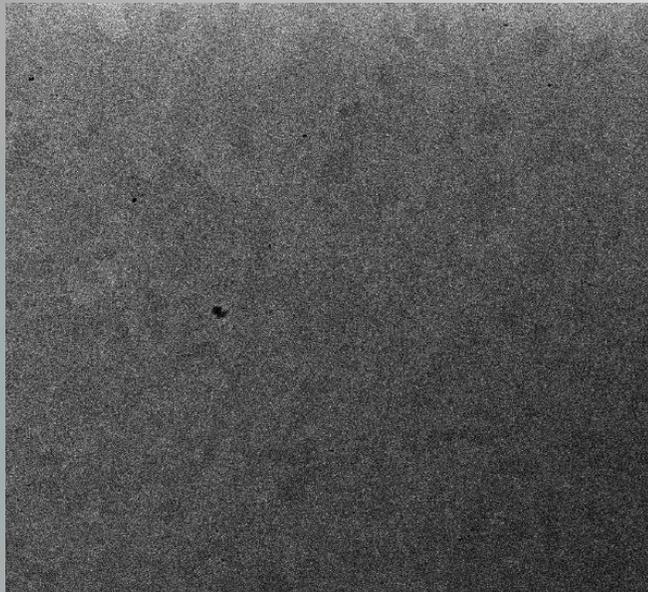
$$\Delta l_{ges}(F) = F * 5,507582932 * 10^{-6} \frac{mm}{N}$$



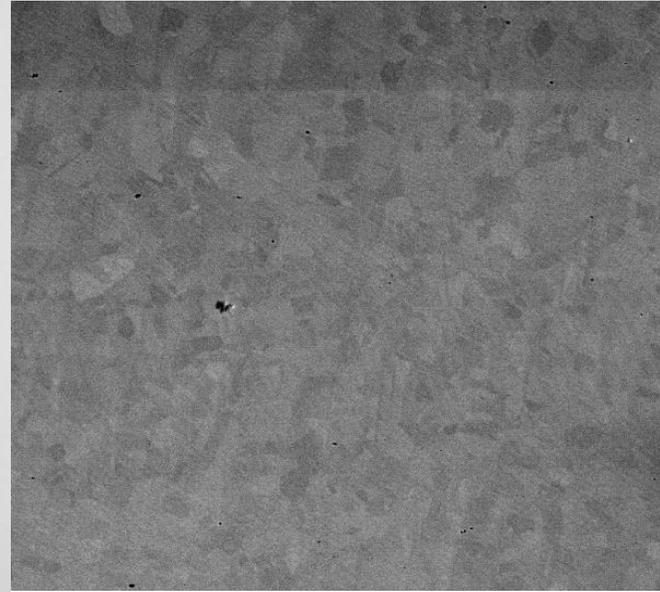
## Auswahl des Detektors

# Auswahl des Detektors

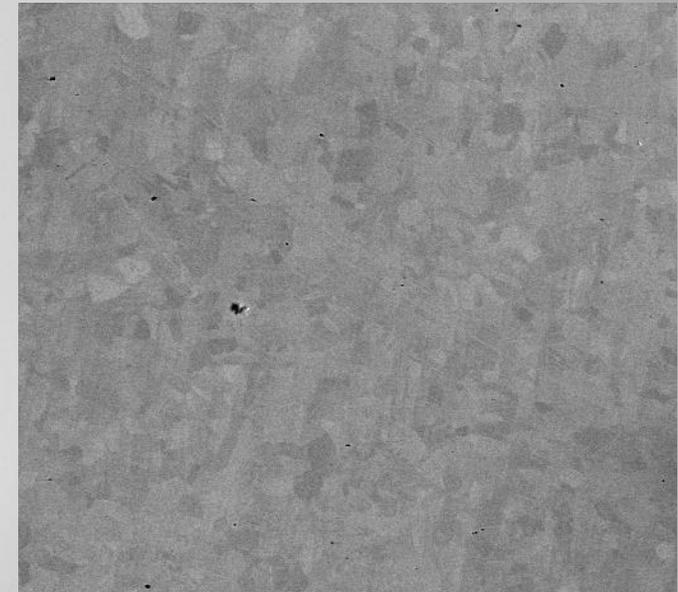
Vergleich der Abbildungsqualität in Abhängigkeit des Detektors und der Bildparameter



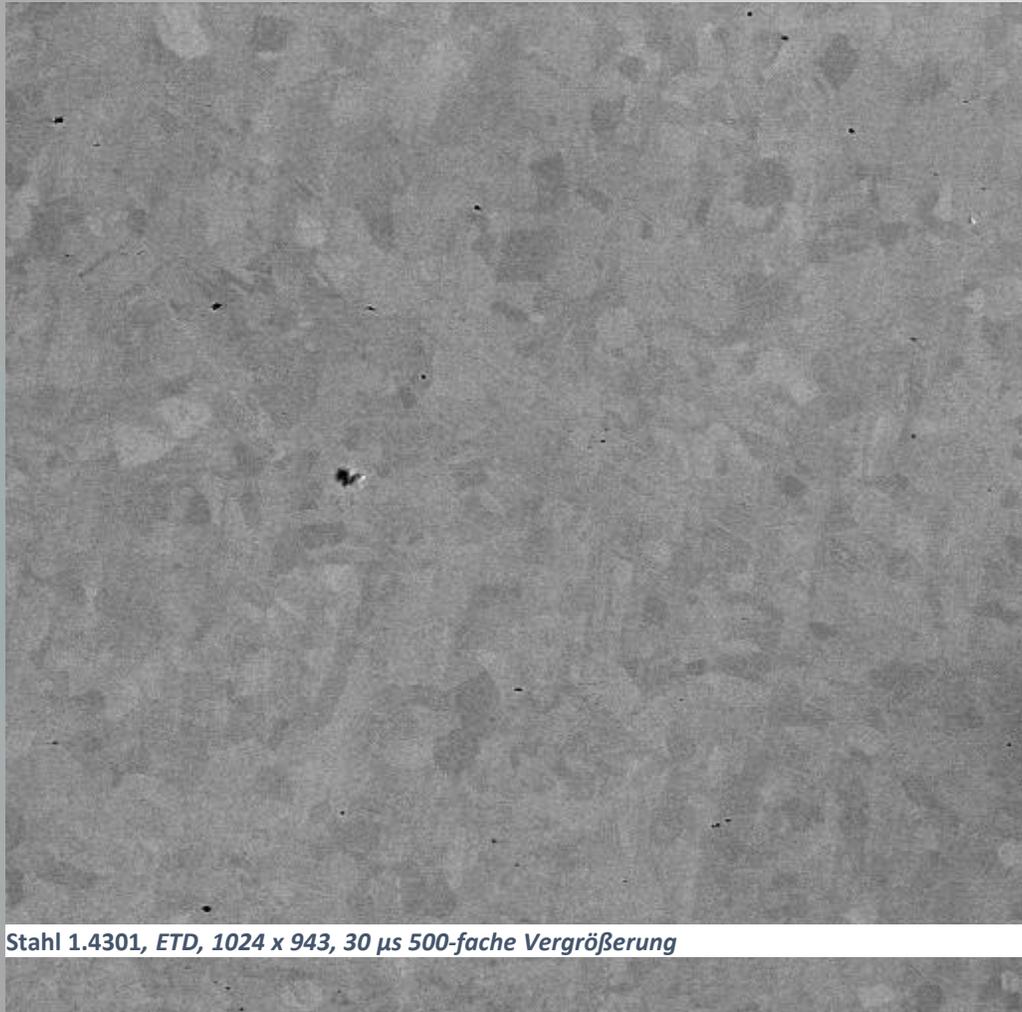
Stahl 1.4301, TLD, 2048 x 1886, 10  $\mu$ s, 500-fache Vergrößerung



Stahl 1.4301, ETD, 2048 x 1886, 10  $\mu$ s, 500-fache Vergrößerung



Stahl 1.4301, ETD, 1024 x 943, 30  $\mu$ s, 500-fache Vergrößerung



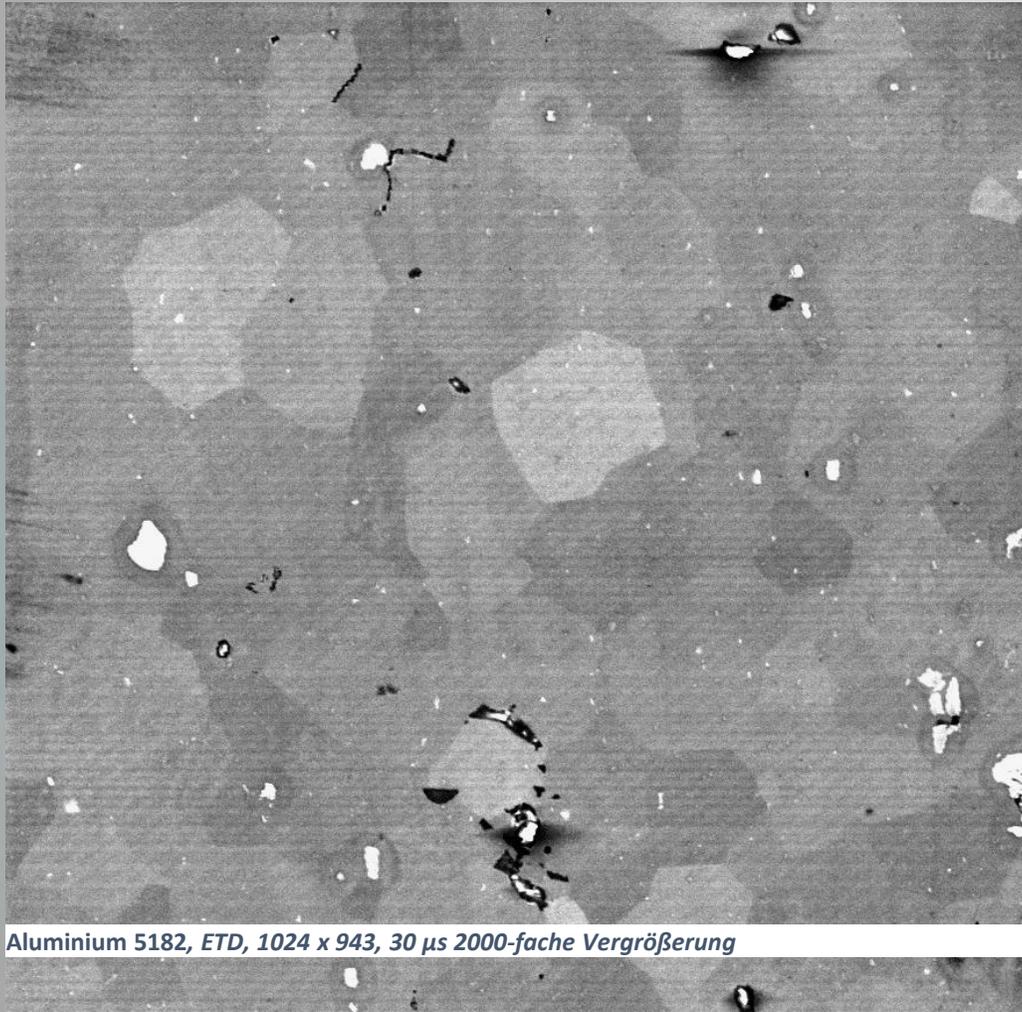
## Fazit:

ET Detektor mit folgenden Parametern ist der beste Kompromiss zwischen Abbildungsqualität und Erzeugungsdauer

## Detektorparameter:

<b>Detektor:</b>	ET
<b>Strahlenstrom:</b>	22 nA
<b>Beschleunigungsspannung:</b>	30 kV besser 5 kV
<b>Bildauflösung:</b>	1024 x 943 Pixel
<b>Abtastgeschwindigkeit:</b>	30 $\mu$ s

# Auswahl des Detektors



## Fazit:

ET Detektor mit folgenden Parametern ist der beste Kompromiss zwischen Abbildungsqualität und Erzeugungsdauer

## Detektorparameter:

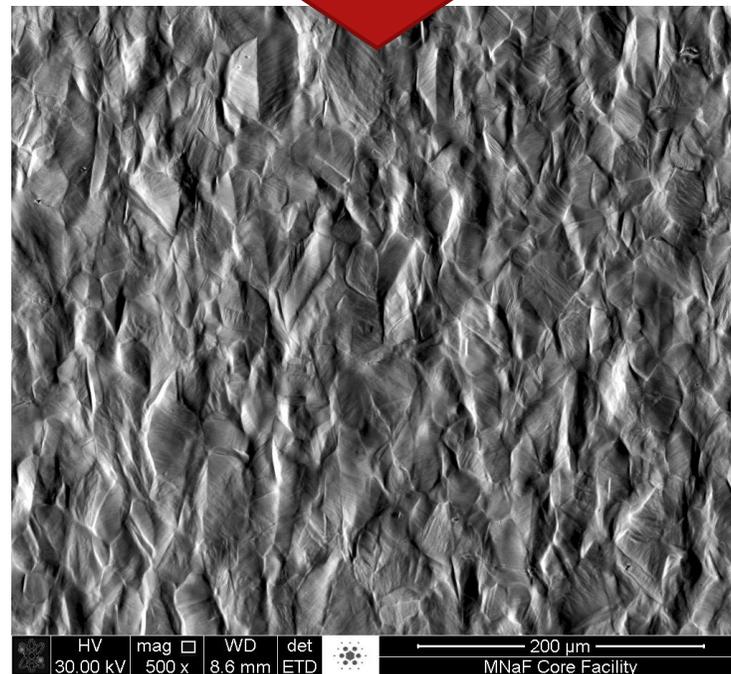
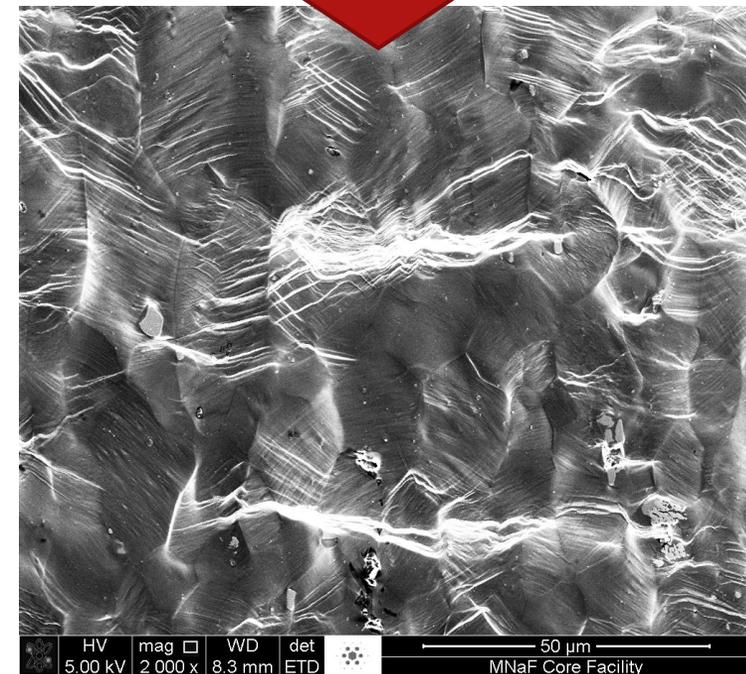
<b>Detektor:</b>	ET
<b>Strahlenstrom:</b>	22 nA
<b>Beschleunigungsspannung:</b>	5 kV
<b>Bildauflösung:</b>	1024 x 943 Pixel
<b>Abtastgeschwindigkeit:</b>	30 $\mu$ s

Aluminium 5182, ETD, 1024 x 943, 30  $\mu$ s 2000-fache Vergrößerung

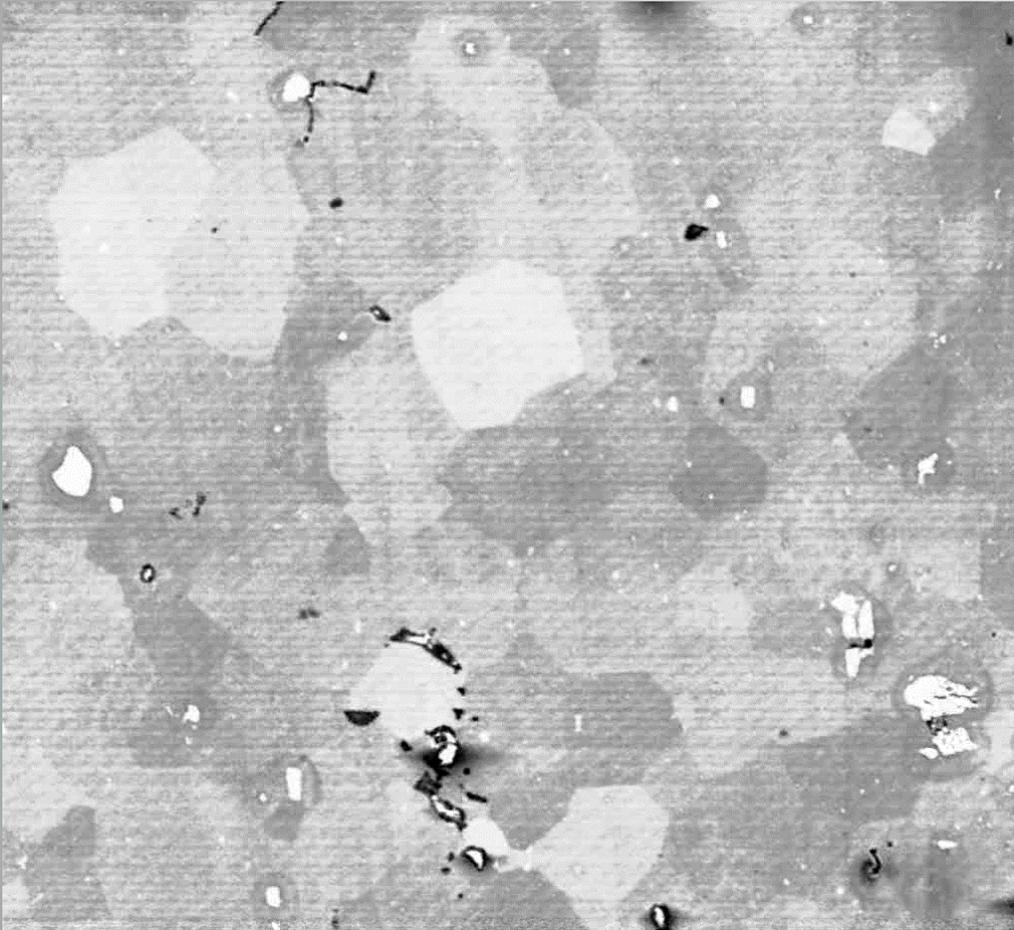
# Biegeversuche mit Stahl und Aluminium

Aluminium 5182

Stahl 1.4301



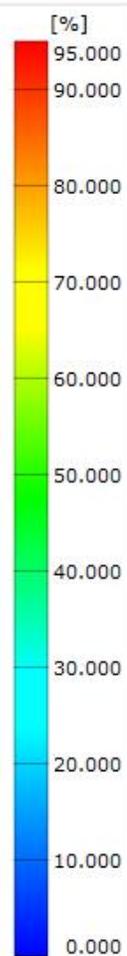
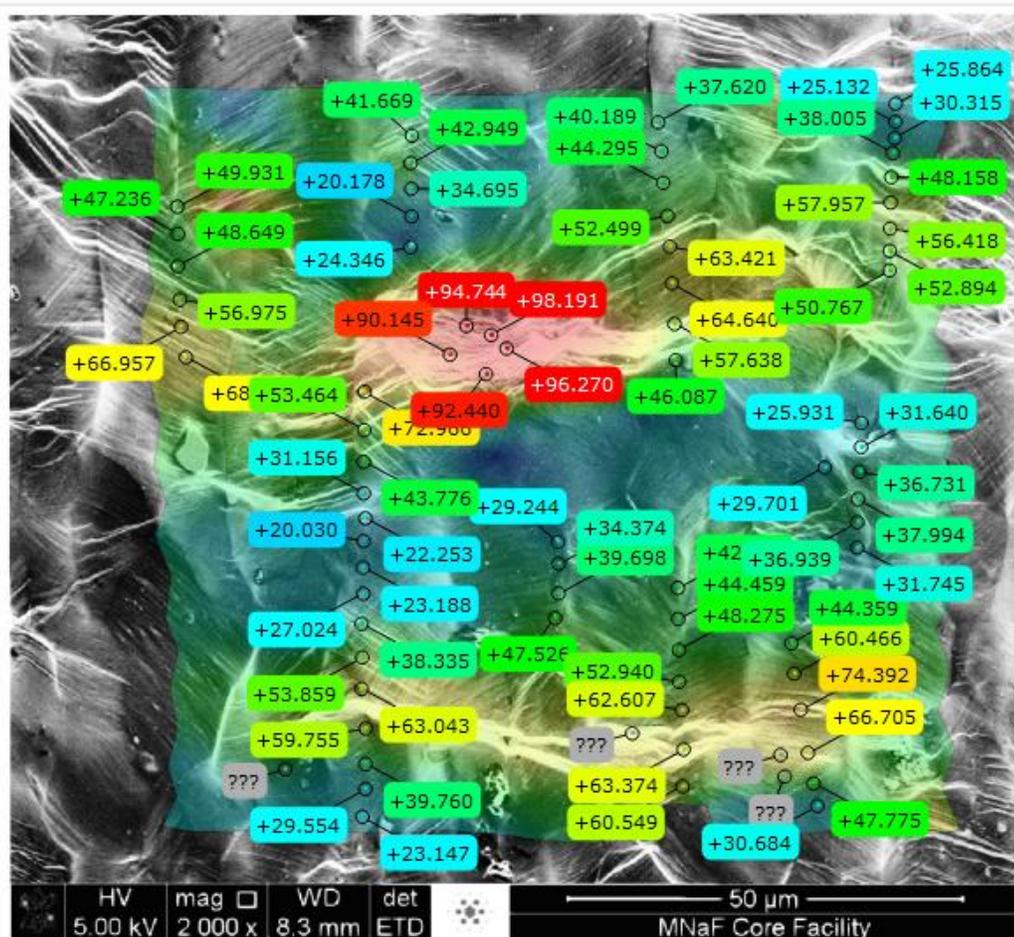
# Biegeversuche



Aluminium 5182 (2000 x)



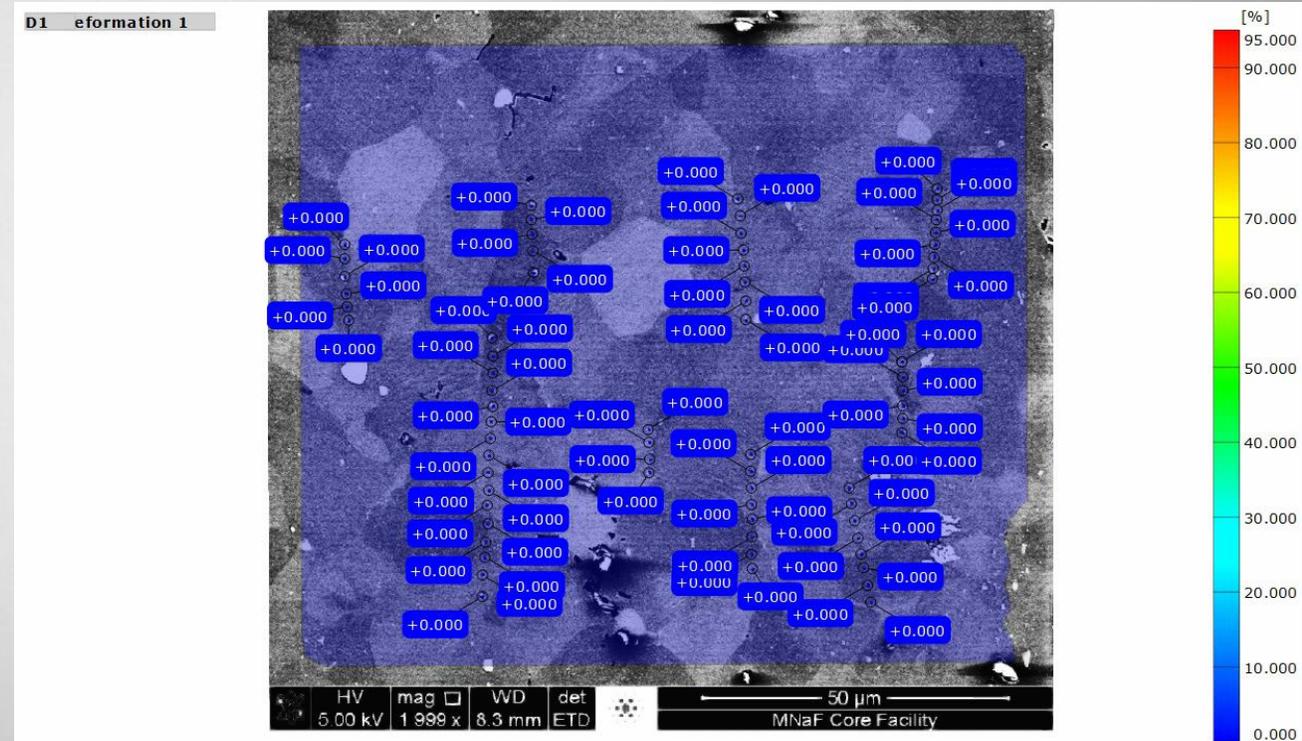
Stahl 1.4301 (500 x)



Dehnungs-  
bestimmung  
mit GOM  
Correlate

# Dehnungsbestimmung von Aluminium mit GOM Correlate

- Technische Dehnung (vertikal)
- Analyse von Bild 10 bis 148.
- Variable Schrittweite
- Fähnchen dienen zur Auswertung und Vergleich mit ImageJ

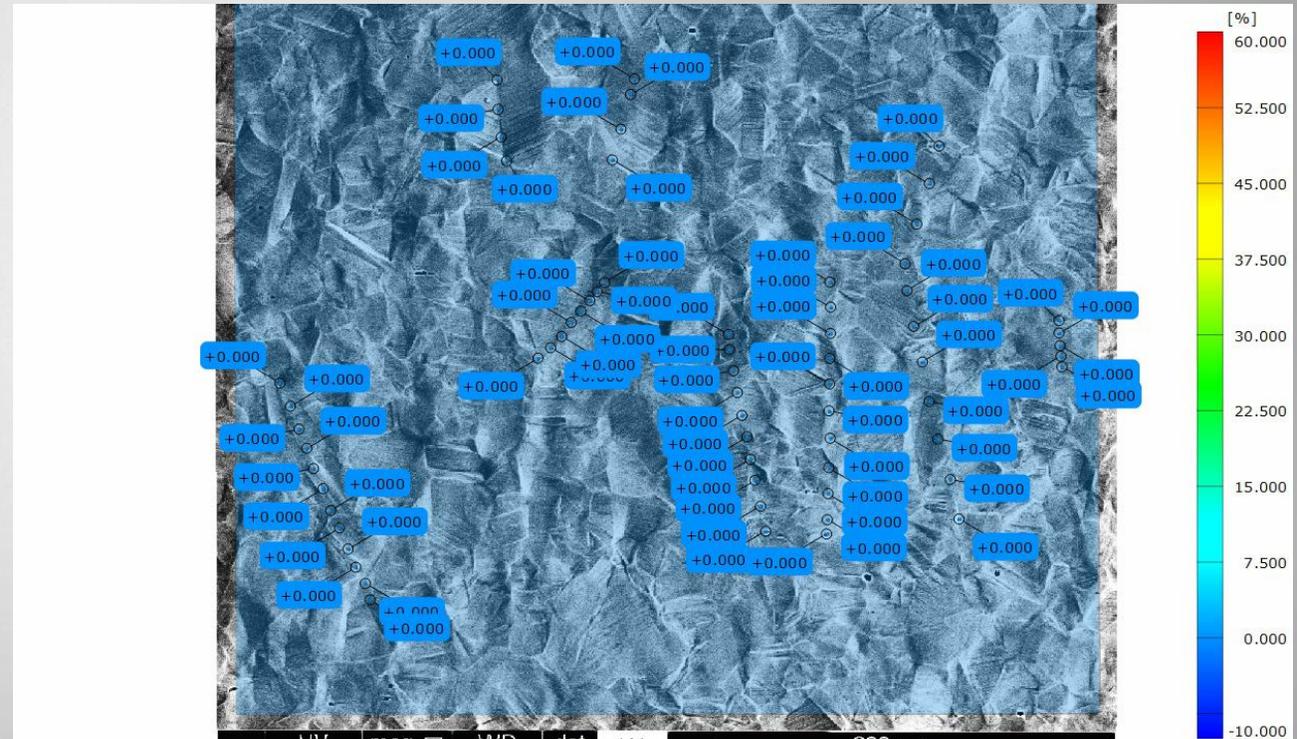




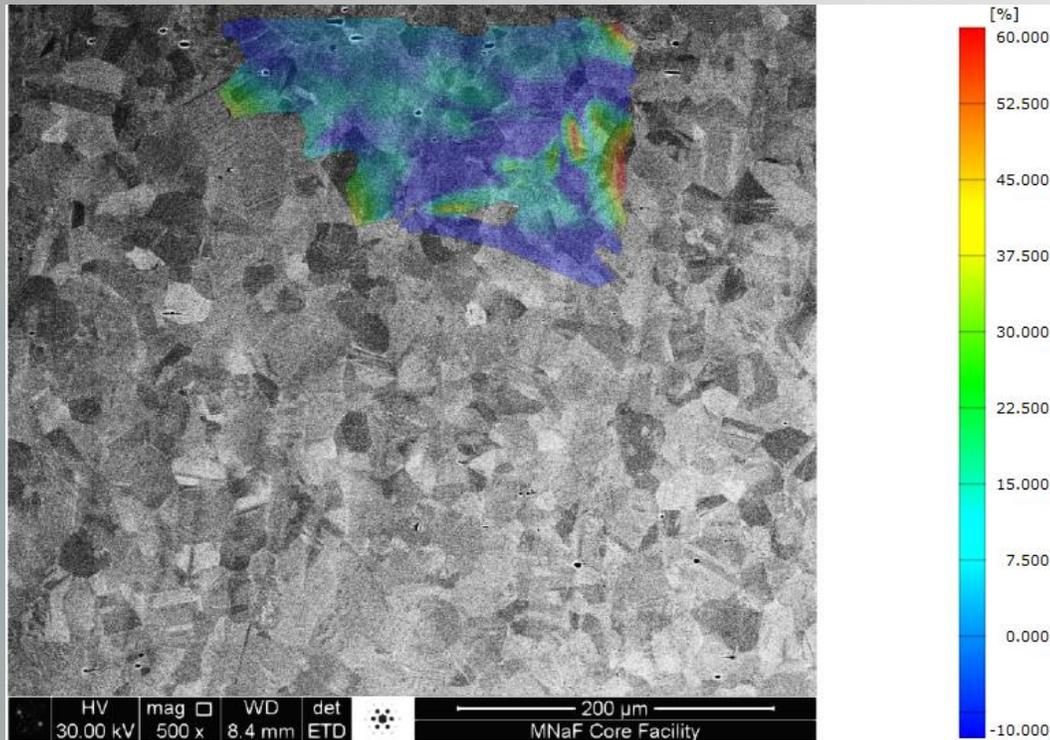
# Dehnungsbestimmung von Stahl mit GOM Correlate

45

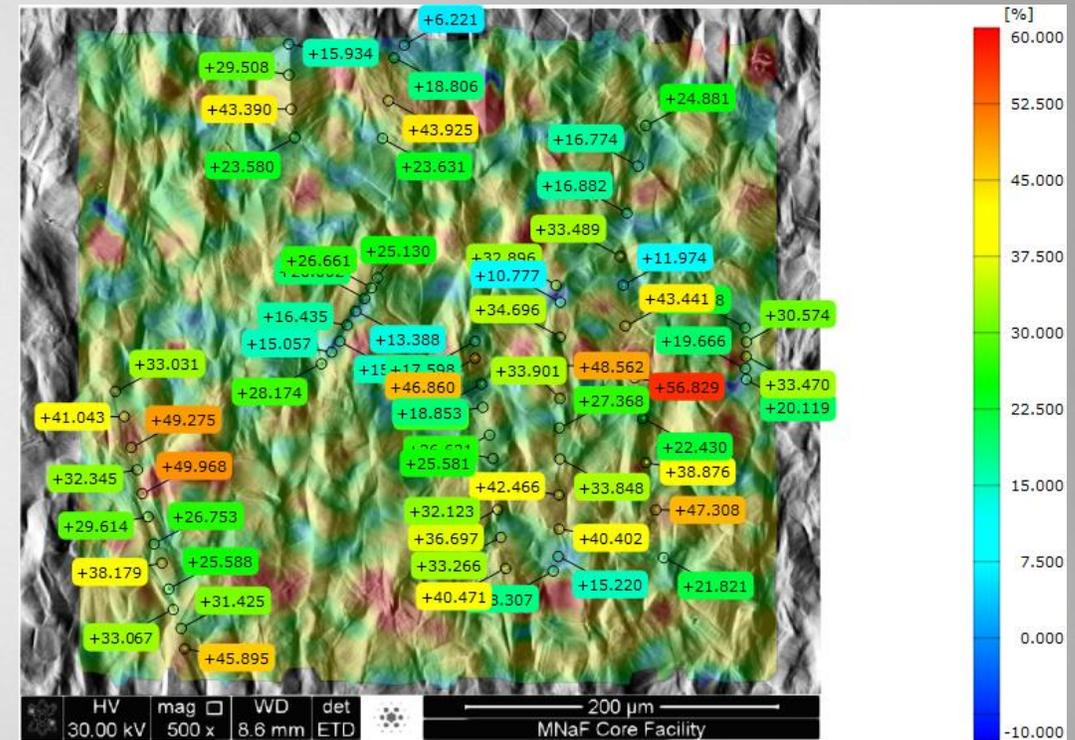
- Technische Dehnung (vertikal)
- Analyse von Bild 10 bis 96
- Aquidistante Schrittweite 0,08 mm
- Fähnchen dienen zur Auswertung und Vergleich mit ImageJ



# Vergleich der Dehnung bei Stahl in Abhängigkeit des Referenzbildes



Dehnung Stahl in Bild 2 ab Stufe 1

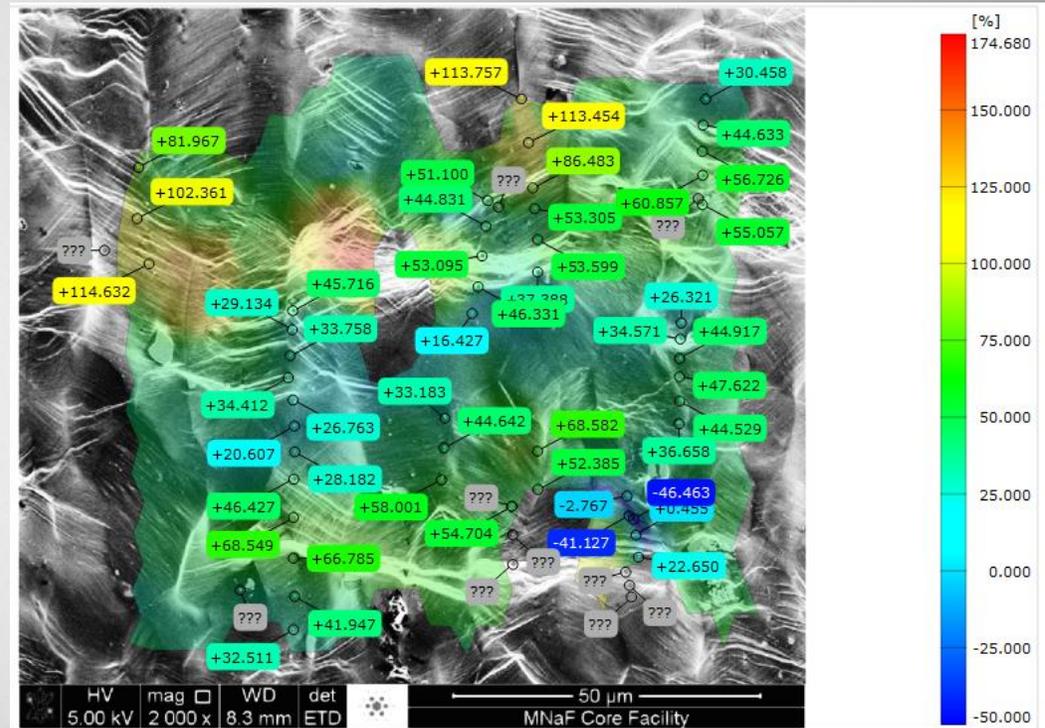


Dehnung Stahl in Bild 96 ab Stufe 10

# Fazit: Dehnungsbestimmung mit GOM Correlate (1)

## Dehnungsbestimmung **ab Bild 1**

- ▶ Löcher mit fehlenden Informationen entstehen bei der Aluminiumprobe
- ▶ Die Stahlprobe lässt ab Bild 2 keine Analyse mehr zu
- ▶ Positionen der Messfährchen springen
- ▶ Messwerte zum Teil unplausibel (Bereiche mit starker Stauchung)

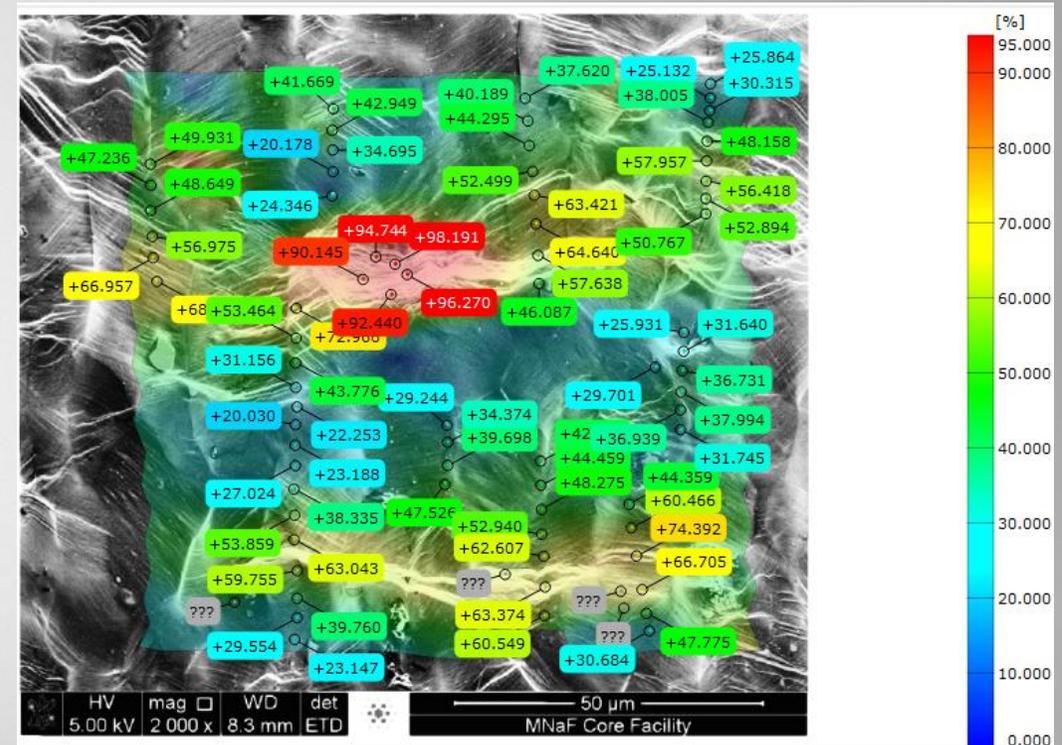


Dehnung Alu in Bild 1 48 ab Stufe 1

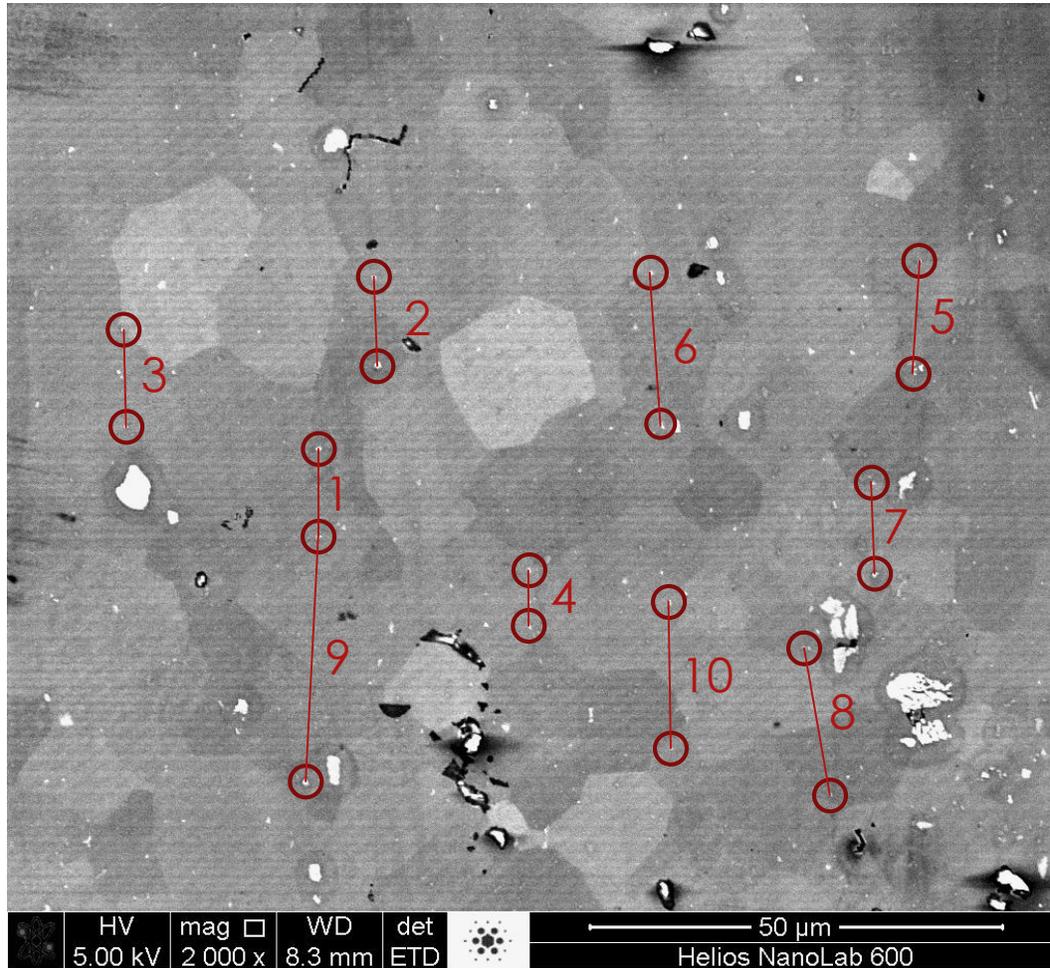
# Fazit: Dehnungsbestimmung mit GOM Correlate (2)

## Dehnungsbestimmung **ab Bild 10**

- ▶ Durchgehende Analyse bei Stahl und Aluminium möglich. Keine Löcher
- ▶ Positionen der Messfährchen bleibt größtenteils erhalten
- ▶ Plausible Dehnungsdarstellung und Messwerte



Dehnung Alu in Bild 148 ab Stufe 10

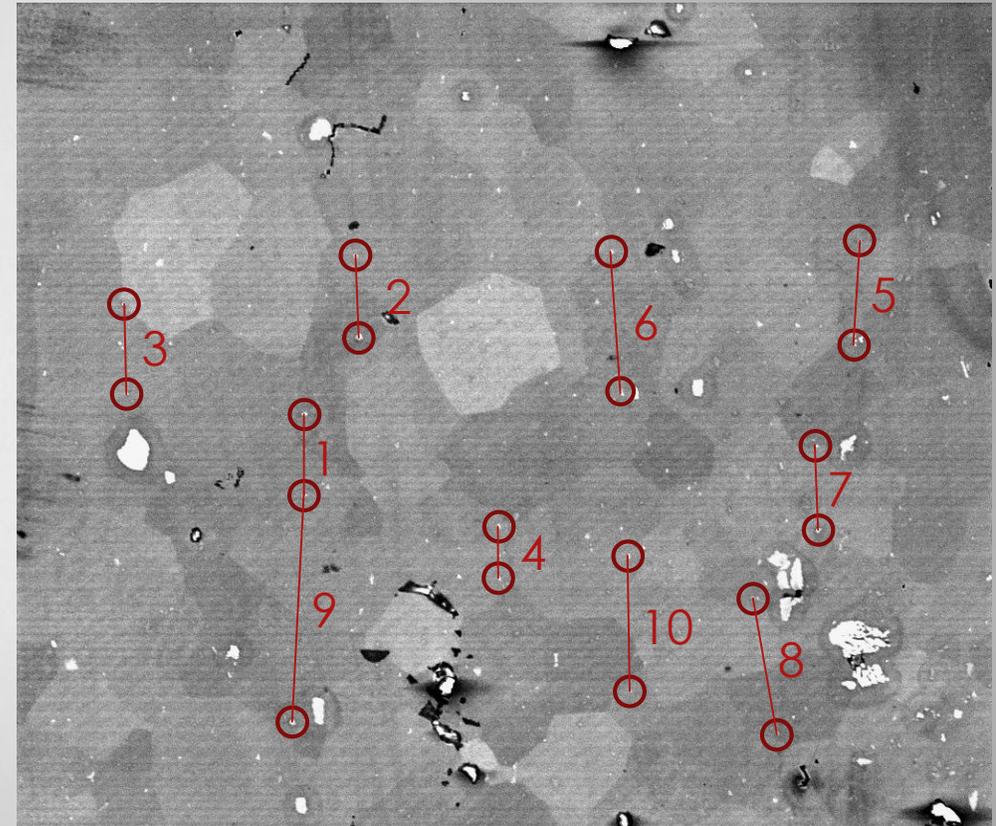


Dehnungs-  
bestimmung  
mit ImageJ

# Manuelle Dehnungsberechnung mit ImageJ

50

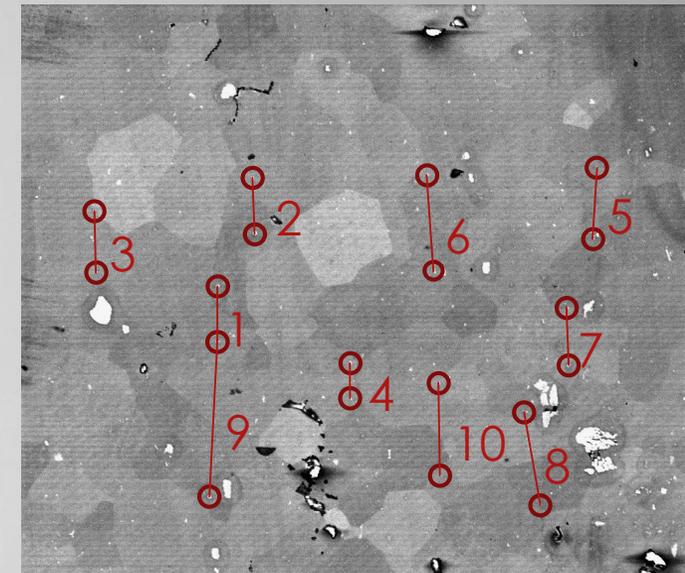
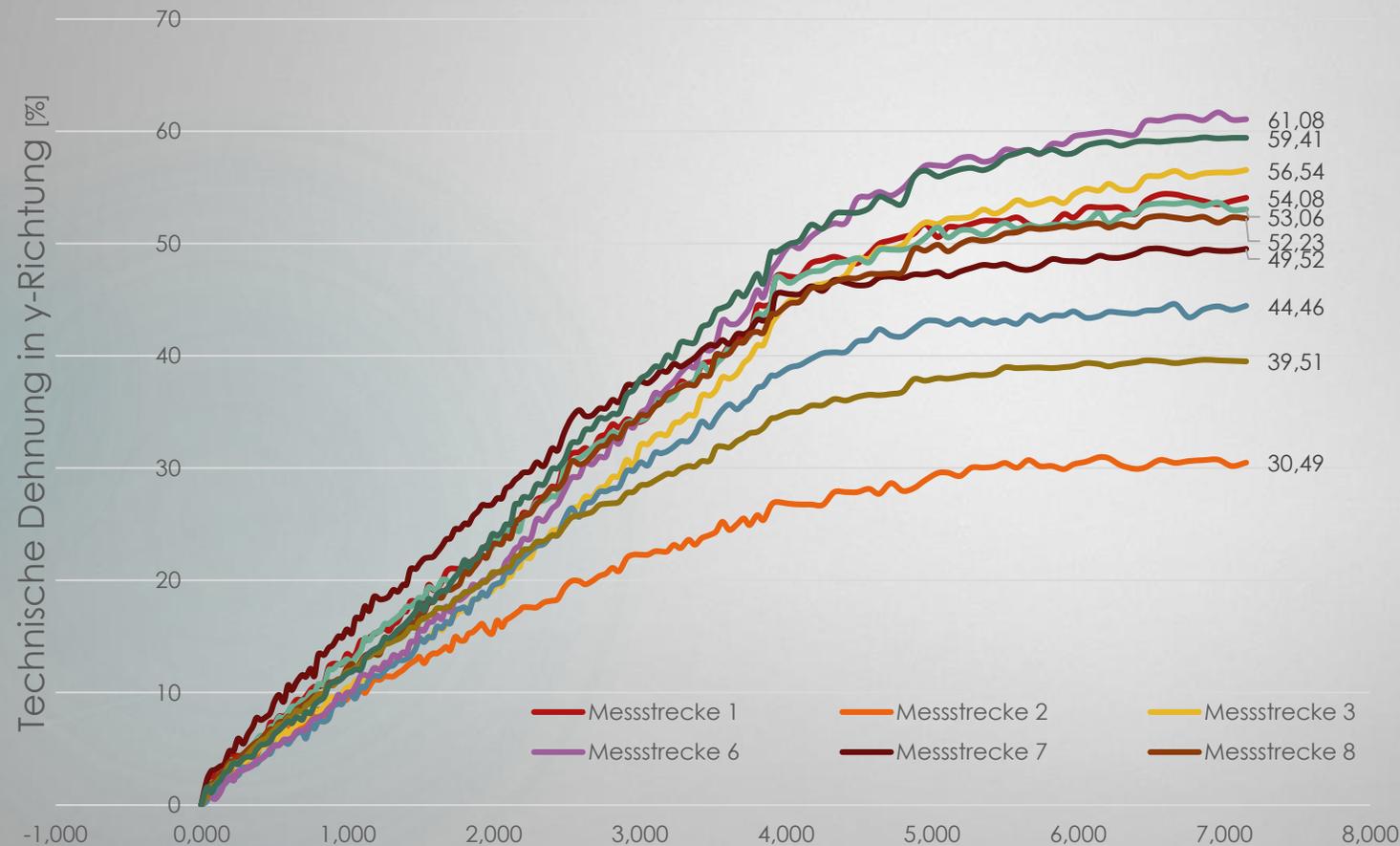
- ▶ 9-10 Punktpaare pro Versuch
- ▶ Verteilt auf die gesamte Bildfläche
- ▶ Abstände zwischen zwei markanten Punkten auf jedem Bild gemessen
- ▶ 864 Messungen für die Stahlprobe
- ▶ 1480 Messungen für die Aluminiumprobe



Messpunkte Aluminium Bild 1

# Bestimmung der Dehnungen von Alu (ImageJ)

Technische Dehnung in y-Richtung in Abhängigkeit der Biegekopfposition



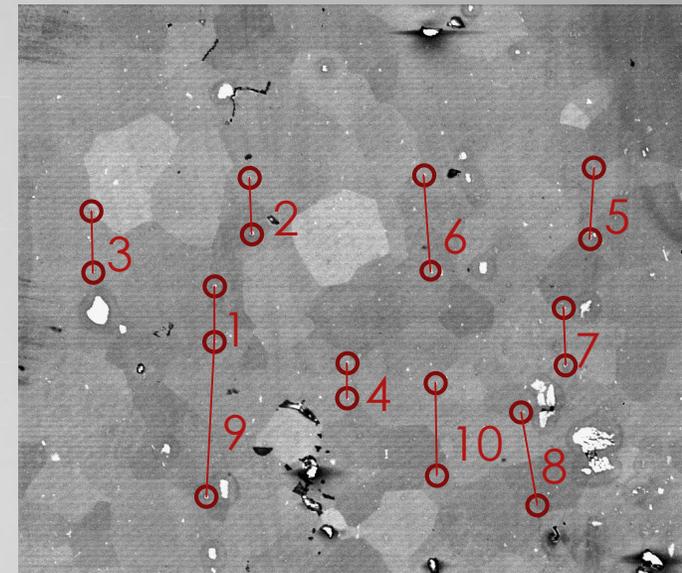
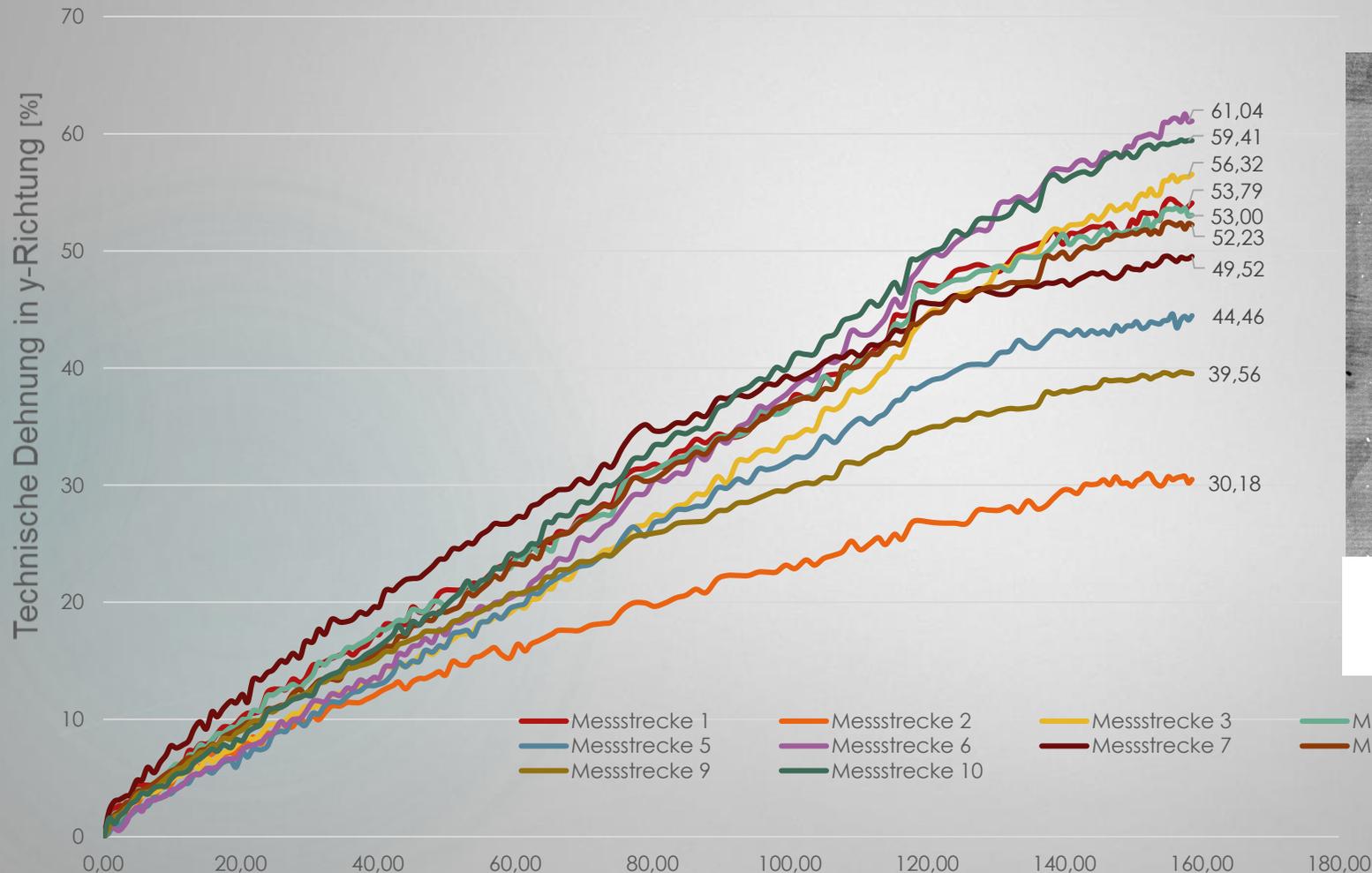
Messpunkte Aluminium  
Bild 1

- Messstrecke 4
- Messstrecke 5
- Messstrecke 9
- Messstrecke 10

Position des Biegekopfes [mm]

# Bestimmung der Dehnungen von Alu(ImageJ)

## Technische Dehnung in y-Richtung in Abhängigkeit des Biegewinkels



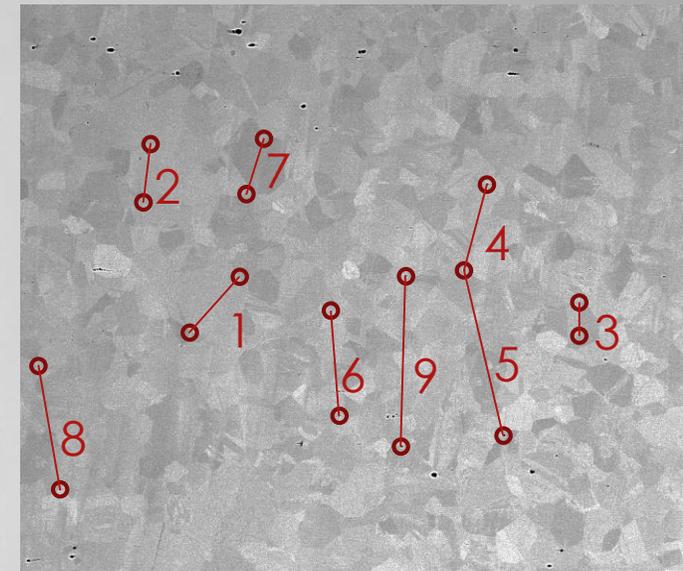
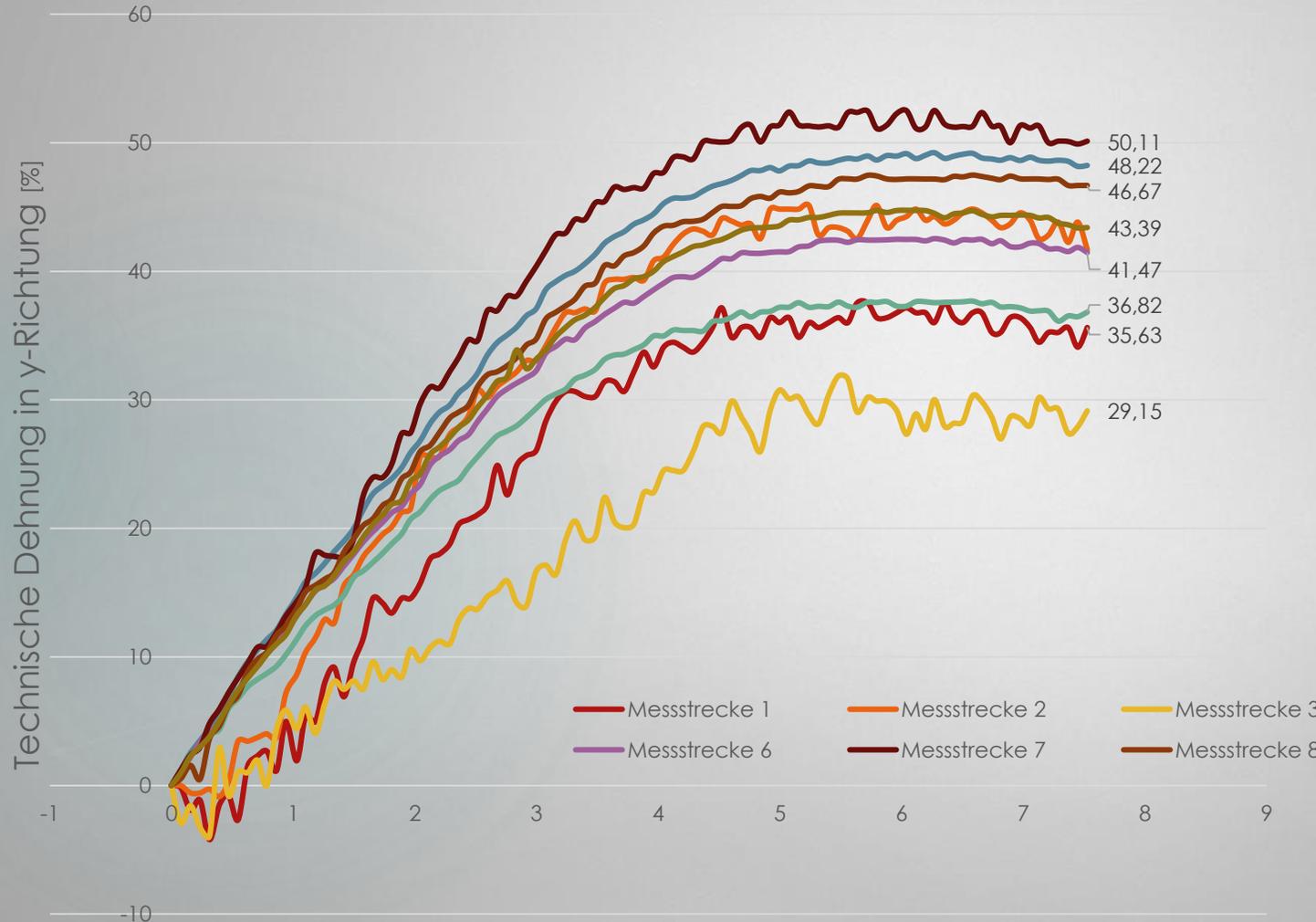
Messpunkte Aluminium  
Bild 1

Biegewinkel in Grad

# Bestimmung der Dehnungen von Stahl (ImageJ)

53

Technische Dehnung in y-Richtung in Abhängigkeit der Biegekopfposition

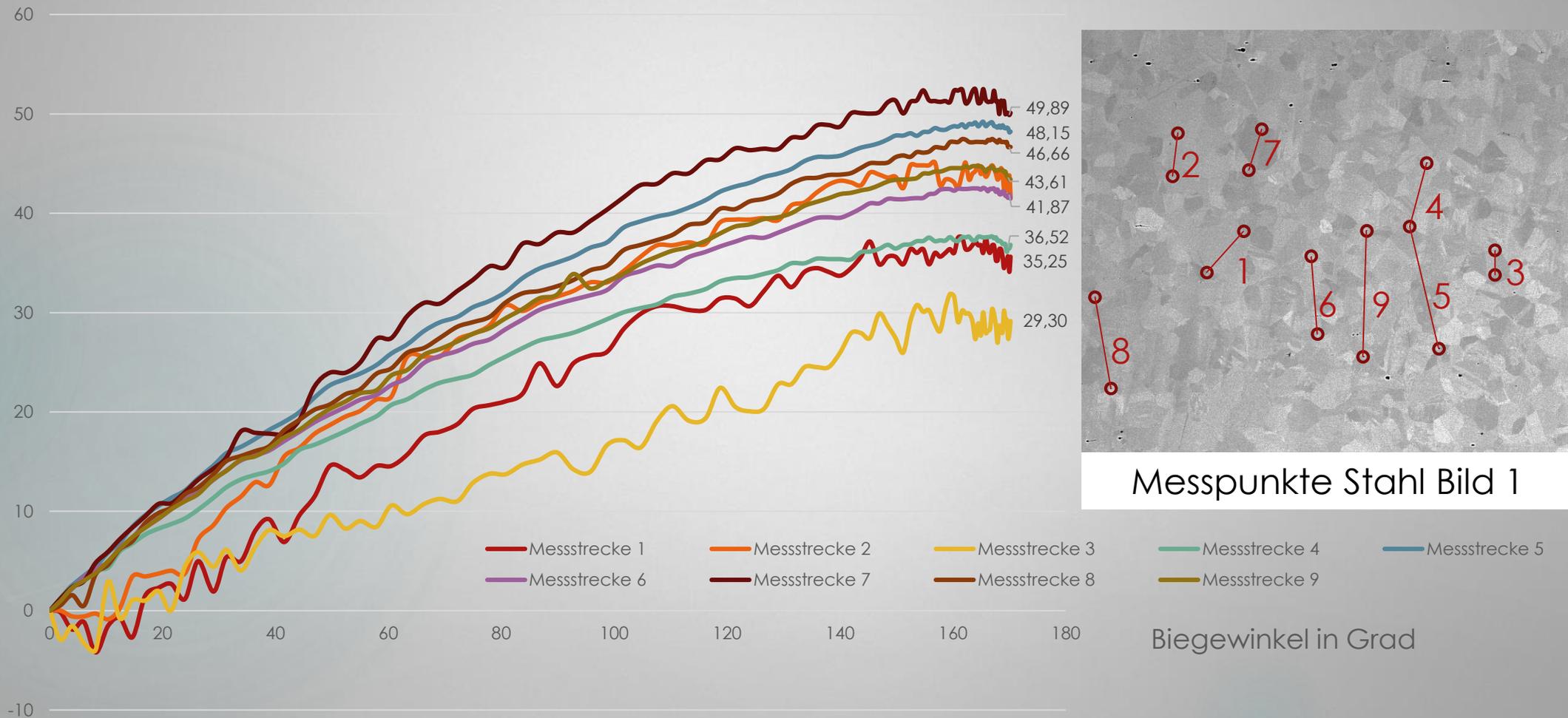


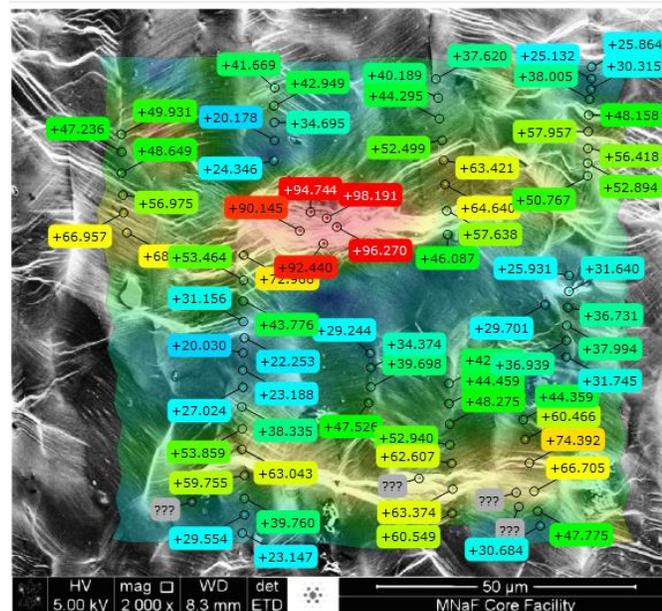
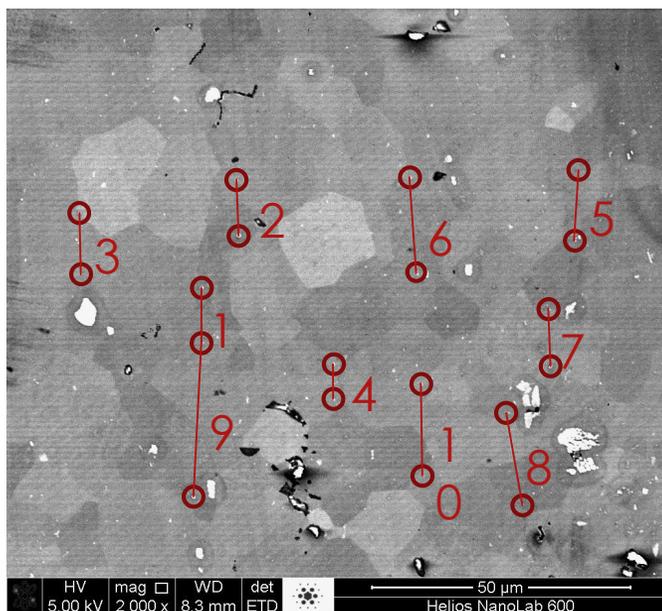
Messpunkte Stahl Bild 1

Position des Biegekopfes [mm]

# Bestimmung der Dehnungen von Stahl (ImageJ)

Technische Dehnung in y-Richtung in Abhängigkeit des Biegewinkels

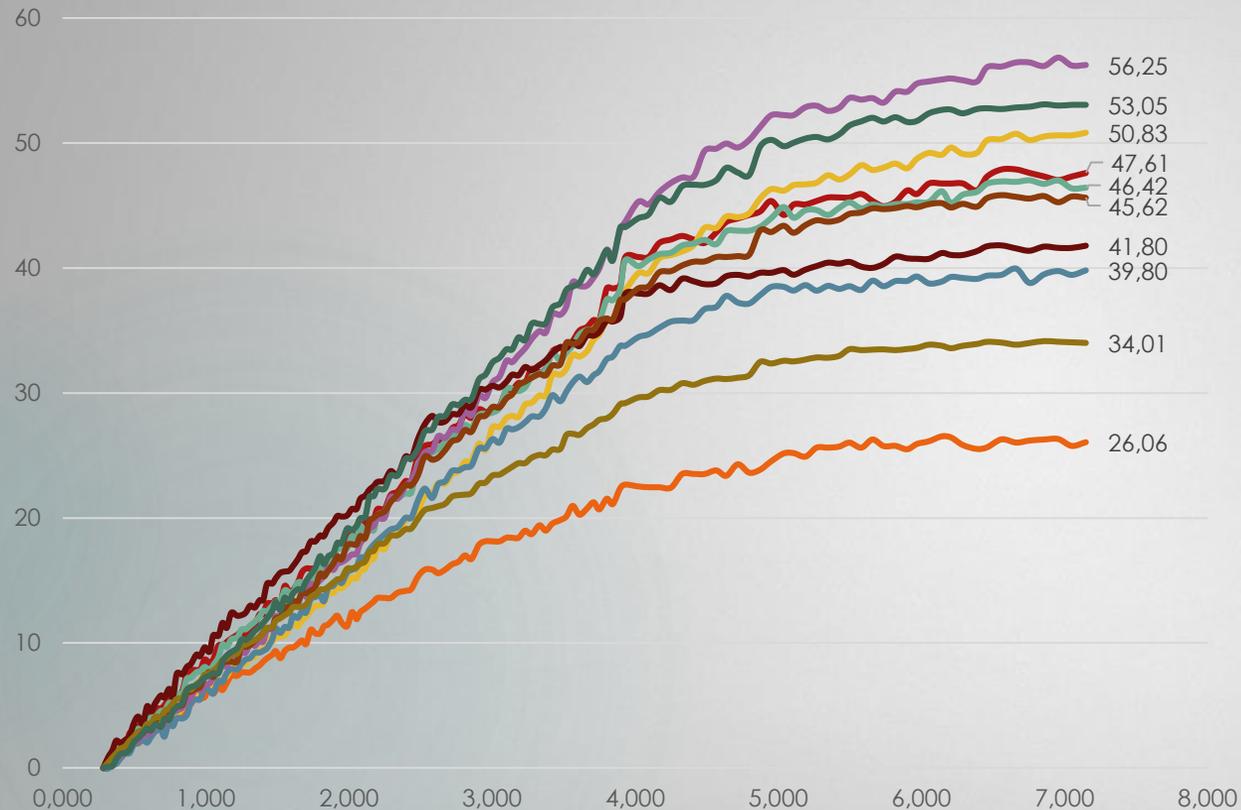




# Vergleich GOM Correlate und Imagej

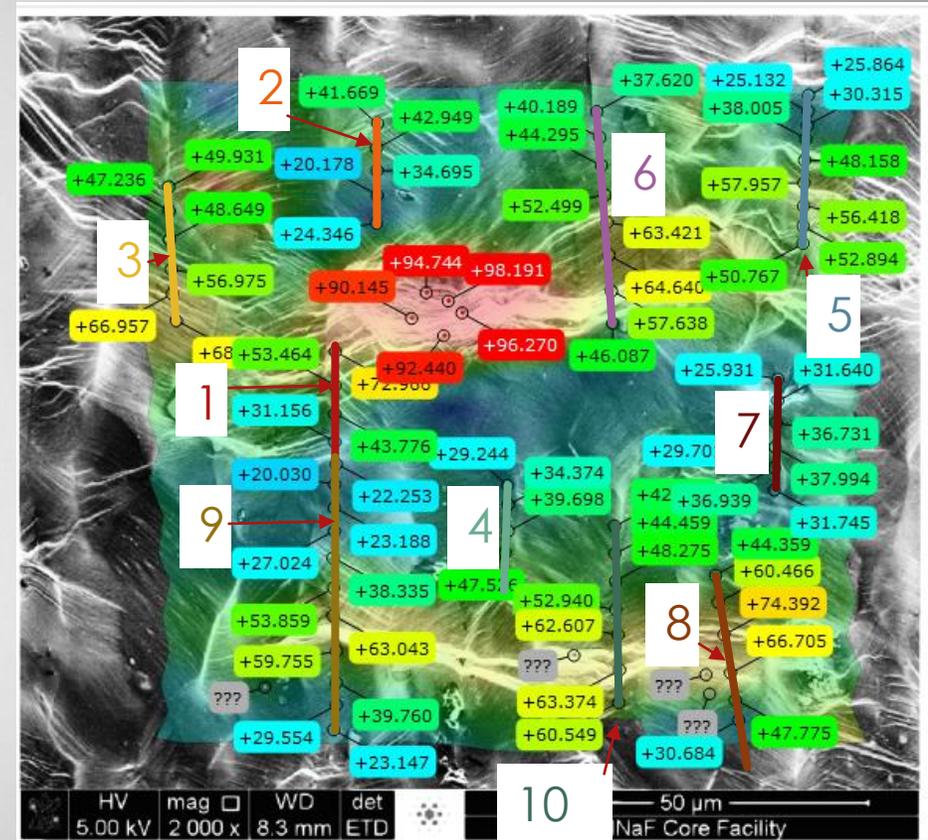
# Vergleich der Dehnungen GOM Correlate und ImageJ Aluminium

Technische Dehnung in y-Richtung bezogen auf die Stufe 10



Position des Biegekopfes [mm]

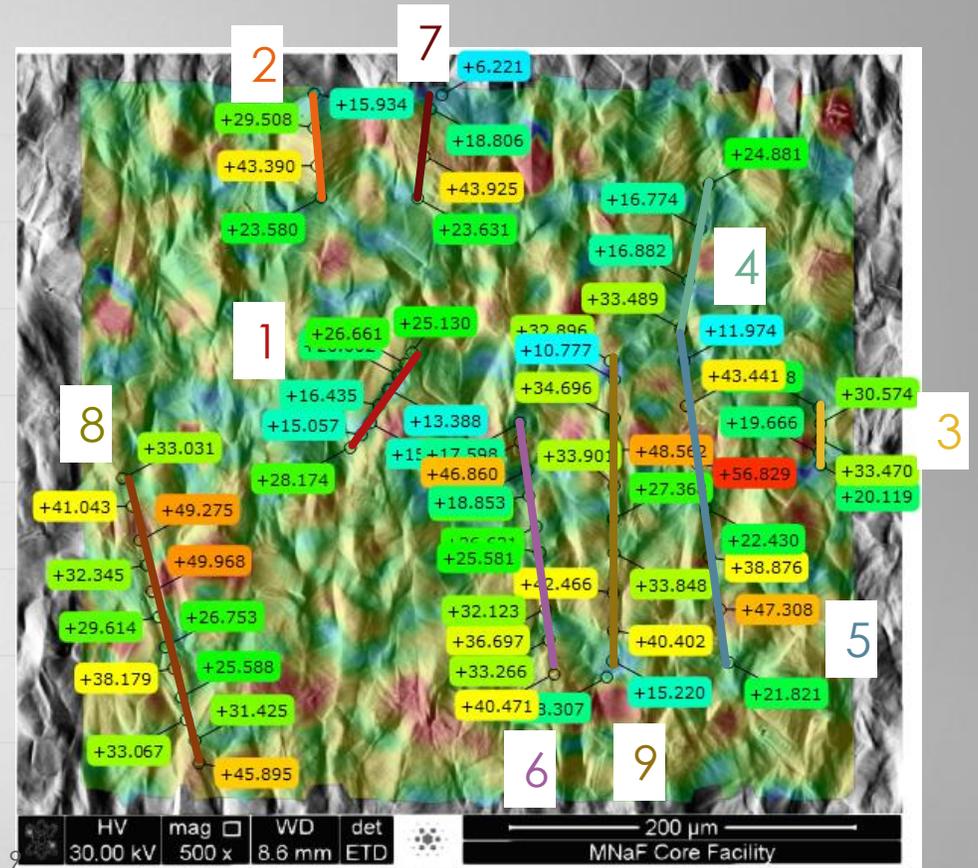
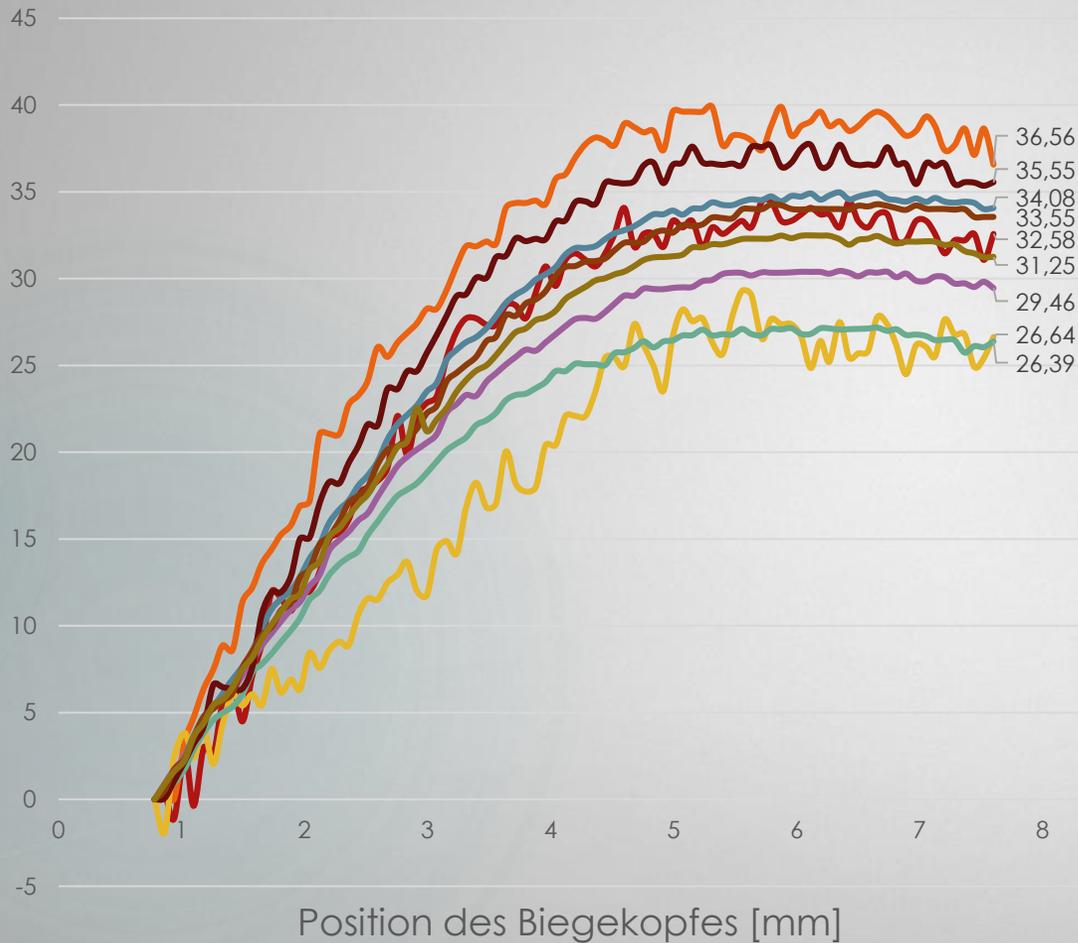
- Messstrecke 1
- Messstrecke 2
- Messstrecke 3
- Messstrecke 4
- Messstrecke 5
- Messstrecke 6
- Messstrecke 7
- Messstrecke 8
- Messstrecke 9
- Messstrecke 10



Dehnung Alu in Bild 148 ab Stufe 10

# Bestimmung der Dehnungen von Stahl (ImageJ)

Technische Dehnung in y-Richtung bezogen auf die Stufe 10



Dehnung Stahl in Bild 96 ab Stufe 10

- |   |   |  |   |  |
|---|---|--|---|--|
| <span style="color: red;">—</span> Messstrecke 1    | <span style="color: orange;">—</span> Messstrecke 2 | <span style="color: yellow;">—</span> Messstrecke 3  | <span style="color: lightgreen;">—</span> Messstrecke 4 | <span style="color: blue;">—</span> Messstrecke 5  |
| <span style="color: purple;">—</span> Messstrecke 6 | <span style="color: brown;">—</span> Messstrecke 7  | <span style="color: darkred;">—</span> Messstrecke 8 | <span style="color: olive;">—</span> Messstrecke 9      | <span style="color: teal;">—</span> Messstrecke 10 |

## **Dehnungsbestimmung mit Imagej:**

- ▶ Sehr aufwendiges Verfahren
- ▶ Die Auswertung bei Stahl schwieriger als Aluminium.
- ▶ Nur an markanten Punkten möglich.
- ▶ Orientierung an Korngrenzen führt zu großen Schwankungen
- ▶ Hilfreich könnten Markierungen durch Markerpartikel sein.

## **Dehnungsbestimmung mit GOM Correlate:**

- ▶ Eine schlechte Aufnahmen Qualität und großer Veränderungen zwischen den einzelnen Bildern können nicht ausgewertet werden.
- ▶ Messpunkte bleiben mit wenigen Ausnahmen auf einer Geraden.
- ▶ Zonen großer Dehnungen werden als solche dargestellt.
- ▶ Einschätzungen bezüglich der Genauigkeit nicht möglich.
- ▶ Hilfreich könnten Markierungen durch Markerpartikel sein.

## **Ergebnisse der Dehnungsbestimmung:**

- ▶ Es war kein Werkstoffversagen erkennbar.
- ▶ Aluminium zeigt wesentlich inhomogeneres Dehnungsverhalten als Stahl
- ▶ 30,5 bis 61 % technische Dehnung (ImageJ) bei Aluminium 5182. Laut GOM Corrolate über 98 % in stark gedehnten Bereichen
- ▶ 29,3 bis 50 % technische Dehnung (ImageJ) bei Stahl 1.4301 Laut GOM Corrolate über 57 % in stark gedehnten Bereichen.

Vielen Dank für die  
Aufmerksamkeit!

Dankeschön für die Unterstützung und Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Benjamin Butz, Dr. Julian Müller, Dr. Yilmaz Sikalli, Dr. Rainer Steinheimer, Sebastian Weitz und dem gesamten Team des LMN Siegen.