

---

# MASTERARBEIT

---

Herr B. Eng.  
**Uwe Martin Wagner**

**Entwicklung eines wirkstel-  
lennahen Inline-Messsystems  
zur Überwachung von Um-  
formkräften in Pressen**

Mittweida, 2020



# **MASTERARBEIT**

---

## **Entwicklung eines wirkstel- lennahen Inline-Messsystems zur Überwachung von Um- formkräften in Pressen**

Autor:

**Herr B. Eng.**

**Uwe Martin Wagner**

Studiengang:

**Maschinenbau**

Seminargruppe:

**MB18wK-M**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Uwe Mahn**

Zweitprüfer:

**M. Sc. Robin Kurth**

Einreichung:

**Mittweida, 30.10.2020**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2020**

**MASTER THESIS**

---

**Development of an inline  
measuring system for moni-  
toring forming forces in presses  
close to  
the working area**

author:

**Mr. B. Eng.**

**Uwe Martin Wagner**

course of studies:

**Mechanical Engineering**

seminar group:

**MB18wK-M**

first examiner:

**Prof. Dr.-Ing. Uwe Mahn**

second examiner:

**M. Sc. Robin Kurth**

submission:

**Mittweida, 30.10.2020**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2020**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Wagner, Uwe Martin:

Entwicklung eines wirkstellennahen Inline-Messsystems zur Überwachung von Umformkräften in Pressen . - 2020. - 8, 65, 28 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Masterarbeit, 2020

## **Referat:**

Innerhalb der Masterarbeit wird simulationsgestützt ein Dehnungsaufnehmer konzipiert und entworfen, welcher als wirkstellennahe Inline-Kraftmesseinrichtung an der Werkzeugschnittstelle von Tiefziehpressen eingesetzt werden kann. Anknüpfend wird der Dehnungsaufnehmer innerhalb der Masterarbeit experimentell analysiert, sodass das Funktionskonzept nachgewiesen werden kann. Das Ziel der Arbeit besteht im Funktionsnachweis der Prozesskrafterfassung auf Grundlage der Nutflankenverschiebung.



# Inhalt

Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	VI
Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis .....	VII
1 Einleitung .....	9
1.1 <i>Aufgabenstellung</i> .....	9
1.2 <i>Motivation</i> .....	10
1.3 <i>Zielsetzung und Vorgehensweise</i> .....	11
2 Stand der Technik.....	13
2.1 <i>Die Presse als Umformmaschine</i> .....	13
2.1.1 Einordnung .....	13
2.1.2 Bauarten von Pressen .....	14
2.1.3 Bauformen und Verhalten unter Last.....	15
2.1.4 Kenngrößen von Umformmaschinen .....	16
2.2 <i>Anteile der Baugruppen an der Maschinengenauigkeit</i> .....	17
2.3 <i>Offline Messverfahren</i> .....	18
2.3.1 Bestimmung der Verlagerung und Kippung.....	18
2.3.2 Bestimmung der Tischdurchbiegung .....	20
2.3.3 Bestimmung der Verlagerung, Kippung und Tischdurchbiegung.....	21
2.3.4 Bestimmung dynamischer Maschineneigenschaften.....	22
2.4 <i>Inline Messverfahren</i> .....	24
2.4.1 Prozesskraftbestimmung .....	24
2.4.2 Bestimmung der Verlagerung zwischen Spannfläche und Werkzeug .....	27
3 Präzisierung der Aufgabenstellung.....	29
4 Simulative Betrachtung der T-Nut Deformation .....	31
4.1 <i>Modellaufbau</i> .....	31
4.2 <i>Analyse der Nutflankenverschiebung am Pressentisch</i> .....	33
4.3 <i>Korrelation zwischen Nutflankenverschiebung – Tischdurchbiegung</i> .....	36

---

5	Entwurf des Dehnungsaufnehmers .....	39
5.1	<i>Anforderungsliste</i> .....	39
5.2	<i>Funktionsstruktur</i> .....	40
5.3	<i>Variantenvergleich</i> .....	41
5.4	<i>Vorzugsvariante</i> .....	42
6	Simulative Analyse des Dehnungsaufnehmers .....	45
6.1	<i>Modellaufbau</i> .....	45
6.2	<i>Vergleichsspannung und Bauteilwechselfestigkeit</i> .....	47
6.3	<i>Dehnung</i> .....	49
6.4	<i>Kontaktstatus und Druckspannungen</i> .....	51
6.5	<i>Reaktionskräfte</i> .....	52
6.6	<i>Rückwirkung</i> .....	54
6.7	<i>Fehlerbetrachtung</i> .....	55
7	Experimentelle Erprobung .....	57
7.1	<i>Messaufbau Einmessvorgang</i> .....	57
7.2	<i>Nullpunktverschiebung und Linearitätsabweichung</i> .....	58
7.3	<i>Einflüsse durch nicht Parallelitäten der Nutflanken</i> .....	59
7.4	<i>Messaufbau Umformpresse</i> .....	61
7.5	<i>Wiederholpräzision</i> .....	62
7.6	<i>Analogie Prozesskraft und Dehnung / Weg</i> .....	64
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	67
8.1	<i>Zusammenfassung</i> .....	67
8.2	<i>Ausblick</i> .....	68
Literatur	.....	69
Anlagen	.....	74



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einflussfaktoren auf die Qualität von Blechbauteilen nach [1, 2] .....	10
Abbildung 2: Nutflankenverschiebung durch senkrechte Krafteinwirkung .....	11
Abbildung 3: Schematische Einordnung des Umformens als Fertigungsverfahren .....	13
Abbildung 4: Gestellbauformen von Kurbel- und Exzenterpressen [48] .....	15
Abbildung 5: Bauformabhängige Verformung von Pressengestellen nach [41, 48] .....	16
Abbildung 6: wesentliche Kenngrößen von Umformmaschinen nach [18] .....	17
Abbildung 7: Anteile der Baugruppen an der Maschinengenauigkeit bei der vertikalen Ausfederung nach [16] .....	18
Abbildung 8: Messung der Verlagerung (links), Messung der Kippung (rechts) nach [11]	19
Abbildung 9: Anteile der Verlagerung und Kippung nach [16] .....	20
Abbildung 10: inkrementelle Erfassung der Tischdurchbiegung [47] .....	20
Abbildung 11: Tracking-Interferometer Messaufbau nach [44] .....	22
Abbildung 12: Aufbau des Fingerabdruckwerkzeugs [50] .....	23
Abbildung 13: Messvorrichtung zur Bestimmung der Werkzeugkräfte mittels Kraftmesskoppelplatte geöffnet (links), eingebaut (rechts) nach [41] .....	24
Abbildung 14: Elektromagnetischer Werkzeugspanner für Umformpressen nach [36] .....	25
Abbildung 15: unidor Messquader [45] .....	26
Abbildung 16: Durchbiegungsmessung mittels Wirbelstromsensor [41] .....	28
Abbildung 17: Funktionsprinzip Messsystem .....	29
Abbildung 18: Modellaufbau der, für die Simulation verwendeten, Presse und Benennung der dafür verwendeten Pfade .....	32

---

Abbildung 19: Modellaufbau des für die Simulation untersuchten Lastfalls.....	33
Abbildung 20: Simulationsergebnis der Tischverschiebung entlang der z-Achse bei einer Kräfteinwirkung von 100 kN .....	34
Abbildung 21: Nutflankenverschiebung der T-Nuten entlang der definierten Pfade in Abhängigkeit der y-Position .....	35
Abbildung 22: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Tischdurchbiegung und Nutflankenverschiebung in Abhängigkeit der Nutposition.....	36
Abbildung 23: Allgemeine Funktionsstruktur eines wirkstellennahen Inline Messsystems für Messungen auf der Grundlage der elastischen T-Nutflankendeformation.....	40
Abbildung 24: technische Zeichnung der Vorzugsvariante mit allen wesentlichen Maßen, sowie Darstellung der DMS Position (rot).....	43
Abbildung 25: Montage des Nutensteines mithilfe einer Montagehilfe, Darstellung mit benötigtem Sechskantschlüssel zum Vorspannen des Messsystems .....	44
Abbildung 26: Randbedingungen bei der Simulation des Dehnungsaufnehmers.....	45
Abbildung 27: Vergleichsspannungen des Dehnungsaufnehmer bei einer Nutflankenverschiebung $\Delta x$ von 60 $\mu\text{m}$ .....	48
Abbildung 28: Dehnung im Bereich des DMS bei einer Nutflankenverschiebung $\Delta x$ um 60 $\mu\text{m}$ .....	49
Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Nutflankenverschiebung und Dehnung (Mittelwerte über die DMS Fläche) .....	50
Abbildung 30: Druckspannungen der Kontaktstellen des Dehnungsaufnehmers innerhalb der entsprechenden Lastschritte.....	51
Abbildung 31: Systembestimmenden Reaktionskräfte des Dehnungsaufnehmers bei einer Nutflankenverschiebung (Darstellung der Reaktionskräfte nur für die Kontaktstelle mit $R = 226\text{mm}$ ).....	52
Abbildung 32: Verlauf der Reaktionskräfte des Dehnungsaufnehmer innerhalb den entsprechenden Lastschritten.....	53

---

Abbildung 33: Modellaufbau der Simulation zur Beurteilung der Rückwirkung zwischen Messsystem und Messstelle .....	54
Abbildung 34: Kennlinie der Vergleichsdehnung des Messsystems über der Simulationskraft, in Abhängigkeit der Variation der DMS Exzentrizität und der Vorspannkraft.....	55
Abbildung 35: Versuchsaufbau des Einmessvorgangs.....	57
Abbildung 36: Gegenüberstellung der Kraft-Dehnungs-Kurve des Einmessvorgangs bzw. der Simulation .....	59
Abbildung 37: Einmessvorrichtung mit Koordinatensystem, rot: Position des Nutzensteins in der Vorrichtung.....	60
Abbildung 38: Einfluss der Kippung auf die Brückenverstimmung in Abhängigkeit der wirkenden Gewichtskraft der Einmessvorrichtung .....	60
Abbildung 39: Messaufbau der Versuche innerhalb einer Umformpresse.....	61
Abbildung 40: Bestimmung der Wiederholpräzision des Messsystems.....	62
Abbildung 41: Zusammenhang zwischen der Zylinderkraft und der Tischdurchbiegung / Dehnung .....	65

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung von Umformmaschinen [16, 31, 35] .....	14
Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten zwischen Nutflankenverschiebung und Tischdurchbiegung.....	37
Tabelle 3: Vergleich möglicher Bauformen eines Deformationsaufnehmers .....	41
Tabelle 4: Lastschritte.....	46
Tabelle 5: Dehnung und Vergleichsspannung in den einzelnen Lastschritten der Simulation .....	50
Tabelle 6: Kennlinie für variierte Einflussgrößen .....	56
Tabelle 7: Beispiel Auswertung der Wiederholpräzision des Messsystems (Nutenstein 2; 2 Nm Vorspannmoment) bei 57% der Nennkraft .....	63

# Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

Abk.	Bezeichnung
DMS	Dehnungsmesstreifen
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FKM	Rechnerischer Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$\mu'$	-	Haftreibungszahl
$\mu_G$	-	Reibzahl des Gewindes
$\mu_K$	-	Reibzahl der Kopfauflagefläche
$A_S$	mm <sup>2</sup>	Schraubenspannungsquerschnitt
$A_k$	mm <sup>2</sup>	wirksame Kolbenfläche
$F_1$	N	Reaktionskraft an Radius R 56,5 mm
$F_2$	N	Reaktionskraft an Radius R 226 mm
$F_M$	N	Montagevorspannkraft
$F'_{Rmax}$	-	Haftreibungskraft
$F_f$	-	Schätzwert für die Kerbwirkungszahl
$K_R$	-	Rauhigkeitsfaktor
$K_{WK,\sigma}$	-	Konstruktionsfaktor
$L_S$	mm	Schraubenlänge
$M_A$	Nm	erforderliches Anziehmoment
$R_{m,min}$	MPa	minimaler Normwert der Werkstoffgruppe Stahl
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Streckgrenze
$R_z$	-	typische Rauhigkeit
$U_D$	V	Spannungsänderung
$U_S$	V	Speisespannung
$c_1$	MPa	werkstoffgruppenabhängige Variable
$c_S$	N/mm	Schraubensteifigkeit
$d_2$	mm	Flankendurchmesser
$f_{W,\sigma}$	-	Umrechnungsfaktor
$n_\sigma$	-	Stützzahl
$p_h$	bar	gemessener Druck Handpumpe
$r_m$	mm	mittlerer Auflageradius des Schraubenkopfes
$v_{gesX}$	mm	Verlagerung senkrecht zur Arbeitsrichtung X
$v_{gesY}$	mm	Verlagerung senkrecht zur Arbeitsrichtung Y
$\bar{x}$	mm	Mittelwert der x-Verschiebung
$x_i$	mm	i-te x-Verschiebung
$\bar{y}$	mm	Mittelwert der y-Verschiebung
$y_i$	mm	i-te y-Verschiebung
$\alpha_R$	-	werkstoffgruppenabhängige Variable

$\sigma_W$	MPa	Wechselfestigkeit
$\sigma_{WK}$	MPa	Bauteilwechselfestigkeit
$F_z$	N	Zylinderkraft
$n$	-	Summe der Messpunkte / Messwerte
$W$	Ws	Umformarbeit
$E$	MPa	E-Modul
$F$	N	Prozesskraft
$P$	mm	Steigung
$R$	mm	Radius
$S$	-	Sicherheit
$m$	-	werkstoffgruppenabhängige Variable
$s$	-	Standardabweichung
$t$	-	Zahlenfaktor zur Ermittlung des Vertrauensbereichs
$\rho$	mm	Kerbradius
$\sigma$	MPa	maximal auftretende Vergleichsspannung

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit sind Leitgedanken welche, bedingt durch die Gesellschaft, die wirtschaftliche Ausrichtung der Industrie maßgeblich beeinflussen. Einhergehend mit verkürzten Innovationszyklen, stellen sich daher für die Umformtechnik besondere Herausforderungen. Im Bereich der Karosserieteilefertigung sind Werkzeugein- und der effektive Betrieb der Maschinen wesentliche Handlungsfelder zur Reduktion eingesetzter Ressourcen. Die Kenntnis über das elastische Deformationsverhalten der Umformmaschinen im Betrieb kann genutzt werden, um Prozessinformationen (bspw. wirkstellennahe Prozesskraftverläufe) zu sammeln und zu bewerten. Dafür können insbesondere einfach zu integrierende Messsysteme genutzt werden, um dezentral Deformationsinformationen aufzunehmen.

Innerhalb der Masterarbeit ist simulationsgestützt ein Dehnungsaufnehmer zu konzipieren und zu entwerfen, welcher als wirkstellennahe Inline-Kraftmeseinrichtung an der Werkzeugschnittstelle von Tiefziehpressen eingesetzt werden kann. Anknüpfend ist der Dehnungsaufnehmer innerhalb der Masterarbeit experimentell zu analysieren, sodass das Funktionskonzept nachgewiesen werden kann.

### Schwerpunkte der Arbeit:

- Erarbeitung des Standes der Technik und Forschung zur Messung und Modellierung des elastomechanischen Betriebsverhaltens der Tischbaugruppe von Umformmaschinen
- Simulative Untersuchung zur Auswirkung der Prozesskräfte auf die elastische Tischdurchbiegung an der Werkzeugschnittstelle
- Simulationsgestützte Entwicklung des Dehnungsaufnehmers zur Erfassung von Prozesskräften an der Werkzeugschnittstelle des Pressentisches
- Experimentelle Analyse des entwickelten Dehnungsaufnehmers zur Bestätigung Funktionskonzeptes

Die Schwerpunkte können in Absprache mit dem Betreuer an den Arbeitsstand bzw. an die notwendigen Schritte individuell angepasst werden.

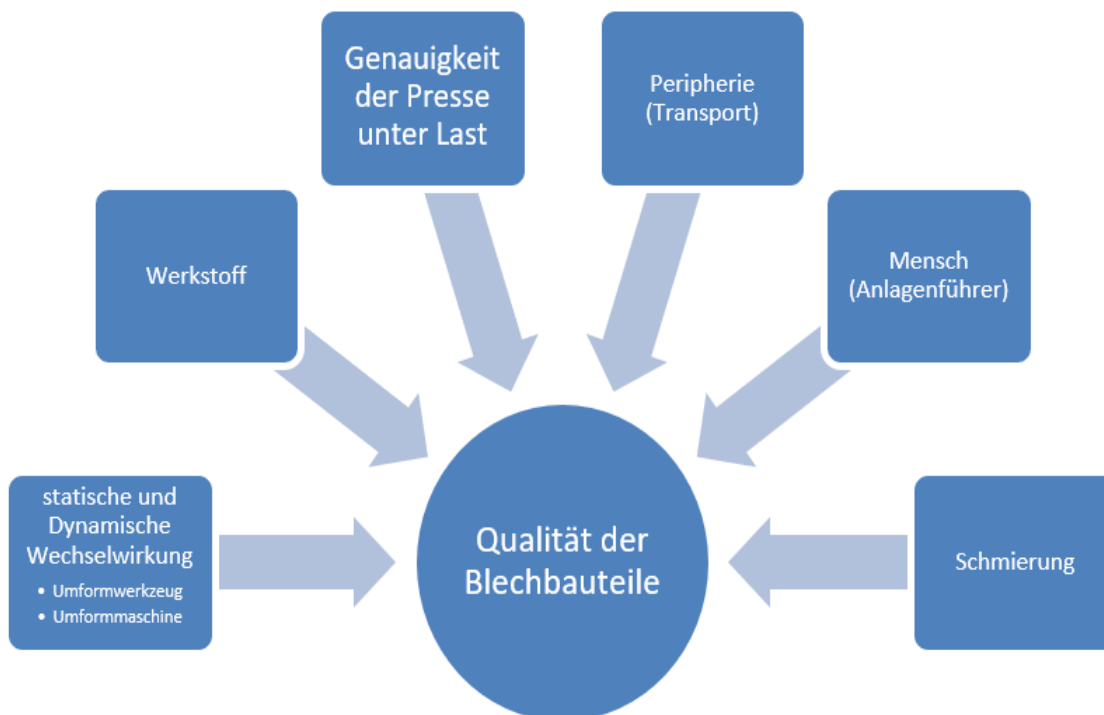
### Betreuer:

Robin Kurth, M. Sc. (Fraunhofer IWU)

Uwe Mahn, Prof. Dr.-Ing. (Hochschule Mittweida)

## 1.2 Motivation

Die Einflussarten, siehe Abbildung 1, und deren Größe auf die Bauteilqualität sind unter anderem Abhängig von der Bauform und Bauart der eingesetzten Presse. Beispielsweise haben Fluchtungsfehler bei Pressen in C-Gestellbauform einen größeren Einfluss, als dies bei einem O-Gestell der Fall wäre. Die Ursache dafür liegt unter anderem am unterschiedlichen Verformungsverhalten der Gestellbauformen. Aber auch andere Einflussarten z. B. der Einfluss durch den Maschinebediener auf die Bauteilqualität, ist abhängig von diversen Rahmenbedingungen, hier wäre z. B. der Automatisierungsgrad der Umformmaschine zu nennen.



**Abbildung 1: Einflussfaktoren auf die Qualität von Blechbauteilen nach [1, 2]**

Die dargestellten Einflussfaktoren wirken sich allerdings nicht im gleichen Maße auf die Qualität der gefertigten Bauteile aus. So wird dem Pressenverhalten unter Last und hier im Speziellen der Genauigkeit der Presse unter Last, beschrieben durch [11], eine große Bedeutung zugeordnet. Bauteile, welche nicht den geometrischen Anforderungen entsprechen, müssen im Laufe der Fertigung meist aufwendig identifiziert, nachgearbeitet oder ausgesondert werden.

Maschinenseitige Fehler lassen sich dabei durch regelmäßige Tests identifizieren und quantifizieren, was aber bisher meist Stillstandzeiten bzw. Maschinenstörzeiten zur Folge hat [17]. Zur Vermeidung von Maschinenstörzeiten und der Vorhersage von Gutteilen können geeignete werkstellennahe Messsysteme zur Datenerfassung beitragen [42].

Durch den hohen Automatisierungsgrad moderner Umformprozessen, ist es von Bedeutung geeignete Messsysteme zur Prozessüberwachung einzusetzen, um einen sicheren



Ablauf des Umformprozesses sicherstellen zu können. Mit Hilfe ebendieser ist es möglich eine gleichbleibend hohe Werkstückqualität zu erzielen, sowie eine Senkung der Fertigungskosten zu erreichen, durch eine Verringerung von Ausschuss, Senkung der Stillstandzeiten oder Erhöhung der Betriebszeiten [29].

Anhand des im Folgenden beschriebenen Messsystems lassen sich Rückschlüsse auf die wirkenden Umformkräfte ziehen, worüber eine Prozessüberwachung ermöglicht wird. Durch Abweichungen in der Größe und Position dieser Kräfte vom Sollzustand, ist darüber hinaus eine Beurteilung des Wartungszustandes der Umformpresse, sowie des Werkzeuges denkbar.

### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung, Konstruktion und Erprobung eines inline Messsystems für den Einsatz in Umformmaschinen. Das System dient der Prozesskraftüberwachung, aufbauend auf der Annahme der elastischen Deformation der Nuten, aufgrund einer Krafteinwirkung  $F$ , siehe Abbildung 2.

Durch eine Krafteinwirkung  $F$ , wird der Pressentisch um den Betrag  $\Delta u$  elastisch deformiert, diese Deformation wird im Folgenden als Durchbiegung bezeichnet. Diese Durchbiegung hat eine Verschiebung der Nutflanken um den Betrag  $\Delta x_1$  bzw.  $\Delta x_2$  zur Folge, welche über des hier beschriebene Messsystem detektiert werden kann.

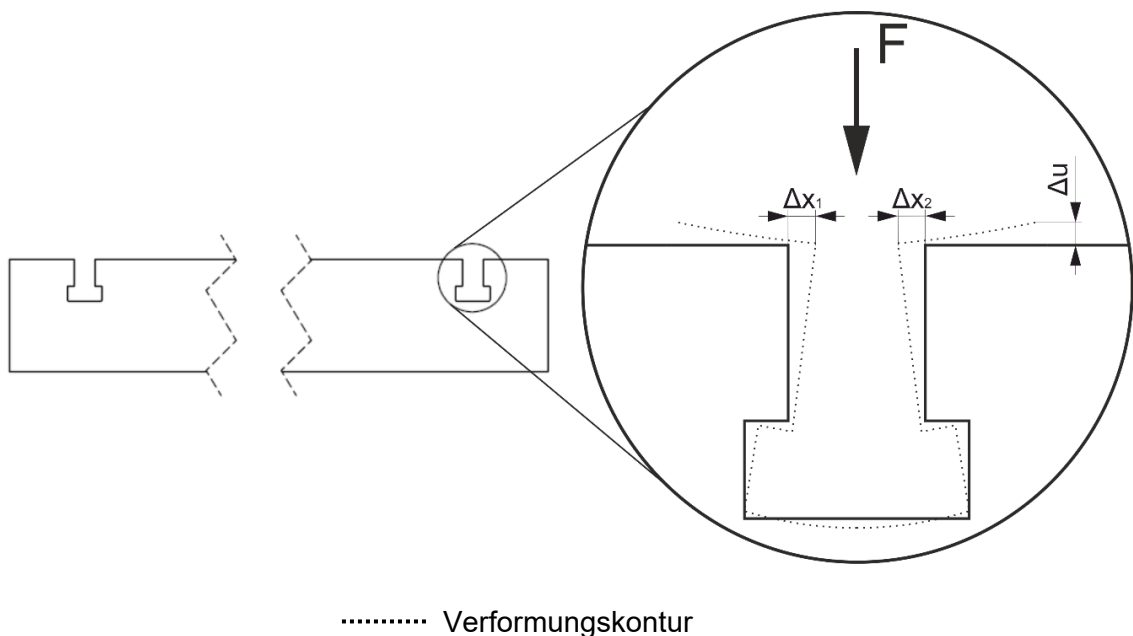


Abbildung 2: Nutflankenverschiebung durch senkrechte Krafteinwirkung

Zur Umsetzung der dieser Ziele gliedert sich diese Arbeit in folgende Bereiche:

- Analyse der Funktionsweise und Nachteile vorhandener Messsysteme
- Simulationsgestützte Bestimmung der Tischdeformation der Versuchspresse
- Konstruktion eines geeigneten Dehnungsaufnehmers zur Aufnahme eines Dehnungsmessstreifens
- Bestimmung aller relevanten Kenngrößen des Dehnungsaufnehmers
- Experimentelle Erprobung des Messsystems zur Verifizierung des Funktionsprinzips

Innerhalb aller Arbeitsschritte soll eine kritische Betrachtung der Ergebnisse, hinsichtlich möglicher Fehlerquellen, erfolgen. Als Grundlage für diese Betrachtung werden überwiegend Vergleiche zwischen den simulativen und den experimentellen Ergebnissen genutzt. Auf Grundlage der Betrachtung von Imperfektionen innerhalb der Simulation ist hierüber eine Abschätzung dieser möglich.

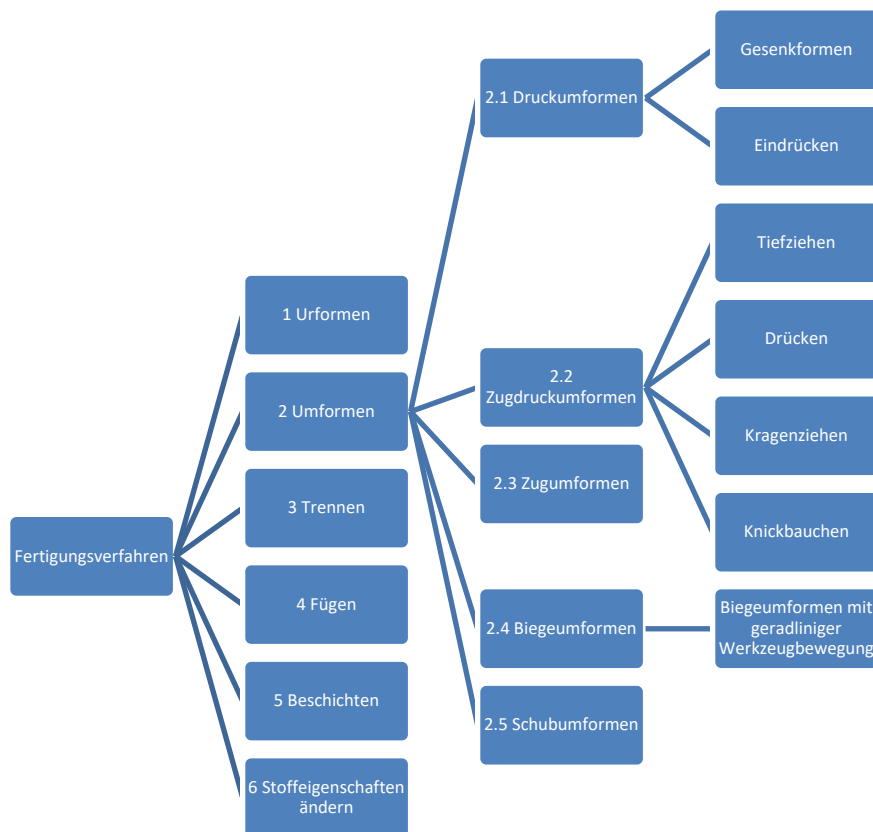
## 2 Stand der Technik

### 2.1 Die Presse als Umformmaschine

#### 2.1.1 Einordnung

Das Umformen, als zweite von insgesamt sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren, ist nach DIN 8580 genormt. Der Charakter des Umformens liegt in der plastischen Formänderung unter Beibehaltung des Stoffzusammenhalts, sowie der Masse [13].

Zur Einordnung des Umformens, soll im Folgenden ein Überblick der in DIN 8580 festgelegten Charakteristika des Umformens gegeben werden. Dabei wurden insbesondere Untergruppen benannt, welche durch den Einsatz eines Inline-Messsystems auf der Grundlage der Detektion der Verschiebung der Nutenflanken profitieren können.



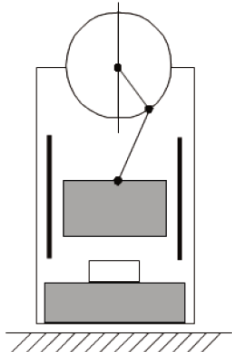
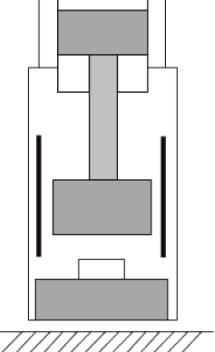
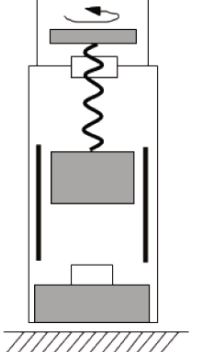
**Abbildung 3: Schematische Einordnung des Umformens als Fertigungsverfahren**

Darüber hinaus sind weitere Einteilungsmöglichkeiten gebräuchlich, z. B. nach der Abhängigkeit von der Beherrschung der Geometrie, vom eingesetzten Halbzeug oder nach der Umformtemperatur [16].

## 2.1.2 Bauarten von Pressen

Bei den Arten der Umformmaschinen wird grundlegend in drei unterschiedliche Typen unterschieden, welche in Tabelle 1 beschrieben werden.

**Tabelle 1: Einteilung von Umformmaschinen [16, 31, 35]**

Typ	Weggebundene Umformmaschinen	Kraftgebundene Umformmaschinen	Energiegebundene Umformmaschinen
<b>Bestimmendes Kriterium</b>	Stößelhub $H$	Größtkraft $F_{\max}$	Energieabgabe $AE$
<b>Beispiel</b>	Mechanische Kurbel- und Exzenterpressen	Hydraulische Pressen, servomotorisch getriebene Pressen ohne Schwungmasse	Hämmer und Spindelpressen
<b>Abbildung</b>			

Kombinationen aus den drei oben genannten Grundfunktionsprinzipien sind darüber hinaus möglich.

Weggebundene Umformmaschinen sind durch einen mechanischen Antrieb charakterisiert. Über Koppel- und/oder Zahnradgetriebe wird die Antriebsbewegung auf den Stößel übertragen. Durch unterschiedliche Bauweisen lassen sich bei dieser Art von Umformmaschinen sehr unterschiedliche Kinematiken des Stößels realisieren. Nachteilig ist, dass die während der Konstruktion festgelegte Stößelkinematik sich nur über die Hubzahl variieren lässt, sowie dass die Nennkraft lediglich im Bereich des unteren Totpunktes zur Verfügung steht. Weggebundene Pressen sind überall im Bereich der Umformmaschinen anzutreffen, wo hohe Anforderungen an die Ausbringung und an die Bauteilgenauigkeit gestellt werden [16].

Zu den kraftgebundenen Umformmaschinen zählen alle hydraulischen Pressen. Das kennzeichnende Merkmal ist, dass während des gesamten Hubs die Kraft eingestellt werden kann. Von Vorteil ist bei dieser Art der Pressen, dass die Stößelkinematik sehr flexibel ist. Nachteilig ist dagegen die geringe zu erreichende Taktzeit, im Vergleich zu weggebundenen Umformmaschinen.

Energiegebundene Umformmaschinen sind zum Anfang des Umformprozesses durch die gespeicherte Energie, in Art und Höhe, gekennzeichnet. Vorteil dieser Bauart ist der nicht festgelegte untere Umkehrpunkt, bei z.B. Hämmern. Energiegebundene Umformmaschinen werden hauptsächlich zum Schmieden (Hammer) oder zum Prägen von Bauteilen (Spindelpresse) eingesetzt [16].

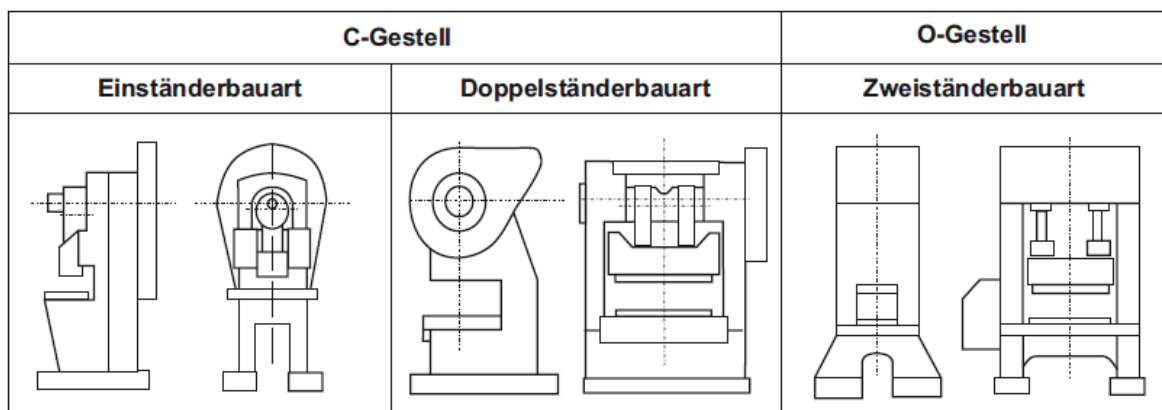
Darüber hinaus bestehen alle drei genannten Bauarten aus folgenden Grundelementen [35]:

- Grundgestell mit Führung
- Stößel oder Bär mit Werkzeughalterung
- Antrieb
- Ausrüstung
- Steuerung

### 2.1.3 Bauformen und Verhalten unter Last

Bei den Bauformen wird hauptsächlich zwischen zwei Arten unterschieden, dem C-Gestell und dem O-Gestell. Beim C-Gestell muss darüber hinaus zwischen der Einständer- und der Doppelständerbauform unterschieden werden, siehe Abbildung 4. Bei O-Gestellen wird zwischen der Zweiständerbauart und der Säulenbauart unterschieden.

C-Gestelle finden häufig Anwendung bei kleinen bis mittleren Prozesskräften, da sich diese unter Last aufbiegen und aufgrund von Fluchtungsfehlern und den damit verbundenen Kräften zu einem erhöhten Werkzeugverschleiß führen. O-Gestelle werden dagegen überwiegend beim Auftreten von großen Prozesskräften verwendet oder wenn besonders hohe Genauigkeiten gefordert sind [48].

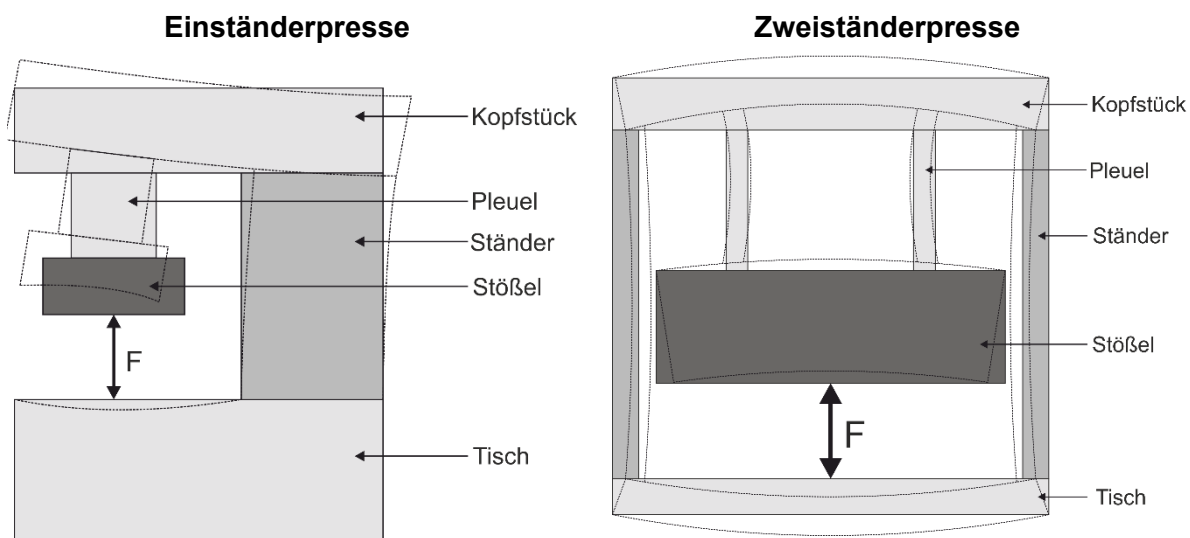


**Abbildung 4: Gestellbauformen von Kurbel- und Exzenterpressen [48]**

In Abhängigkeit von der Bauform unterscheiden sich die Einsatzfelder, sowie die Maschinengröße, da die Bauform einen Rückschluss auf die Steifigkeit der Maschine zulässt.

Das Verhalten unter Last wird grundlegend durch die Gestellbauform charakterisiert. Maschinen mit C-Gestell neigen zum aufbiegen unter Krafteinwirkung, im Bereich des Ständers. Dies ist bedingt durch den außermittig wirkenden Kraftfluss. Charakterisiert ist dies durch eine Kippung und Verlagerung zwischen Stößel und Tisch, siehe Abbildung 5. Eine Durchbiegung von Tisch und Stößel tritt hier weniger stark auf, als bei Zweiständerpressen.

Zweiständerpressen zeigen typischer Weise eine Ausbauchung an den Strukturbauteilen, wie Kopfstück, Tisch und Stößel. Bei Einständerpressen kommt es hier zu Kippung und Verlagerung aufgrund der außermittigen Krafteinwirkung. Zusätzlich tritt am Tisch und Stößel eine Durchbiegung auf, welche großen Einfluss auf die Bauteilqualität hat, siehe Abbildung 5.

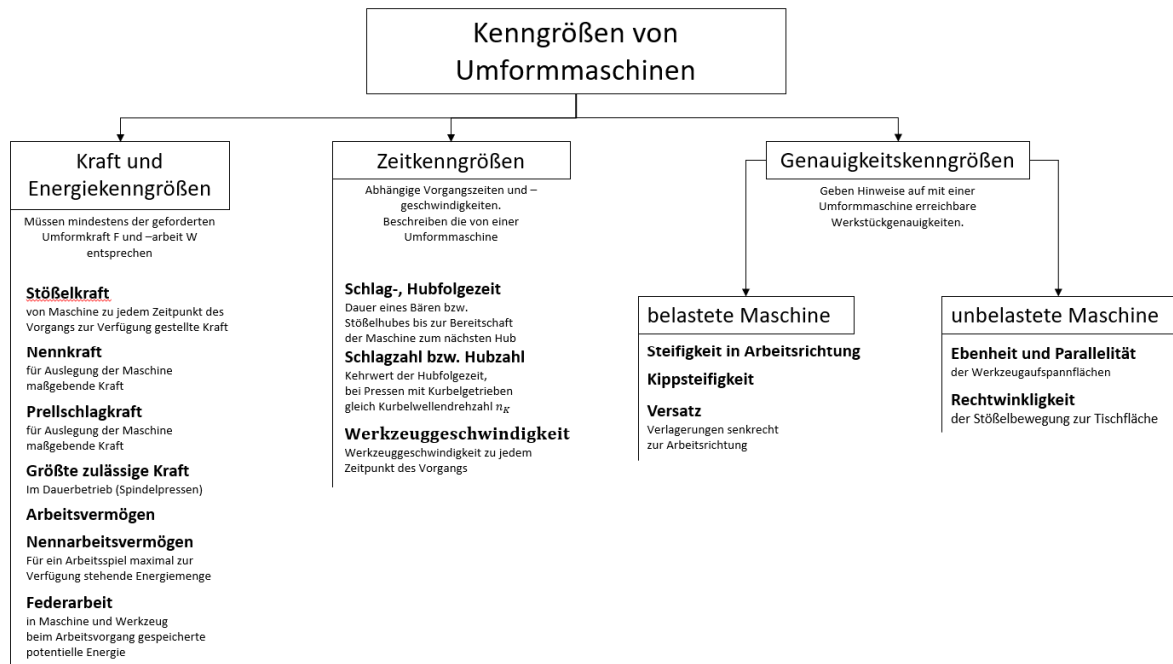


Verformungskontur .....

**Abbildung 5: Bauformabhängige Verformung von Pressengestellen nach [41, 48]**

### 2.1.4 Kenngrößen von Umformmaschinen

Kenngrößen beschreiben die Eigenschaften von Umformmaschinen. Durch den Abgleich der Kenngrößen mit den Anforderungen an den Umformvorgang lassen sich so geeignete Maschinen für den jeweiligen Prozess bestimmen. Alle wesentlichen Kenngrößen, sowie deren kennzeichnenden Eigenschaften wurden zur Übersicht in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6: wesentliche Kenngrößen von Umformmaschinen nach [18]**

Die Kraft- und Energiekenngrößen dienen als Grundlage zur Bestimmung der Brauchbarkeit einer Maschine für einen bestimmten Umformprozess. Die Anforderung besteht darin, dass die Maschine mindestens in der geforderten Umformkraft  $F$  und Umformarbeit  $W$  dem gewählten Prozess entspricht [18].

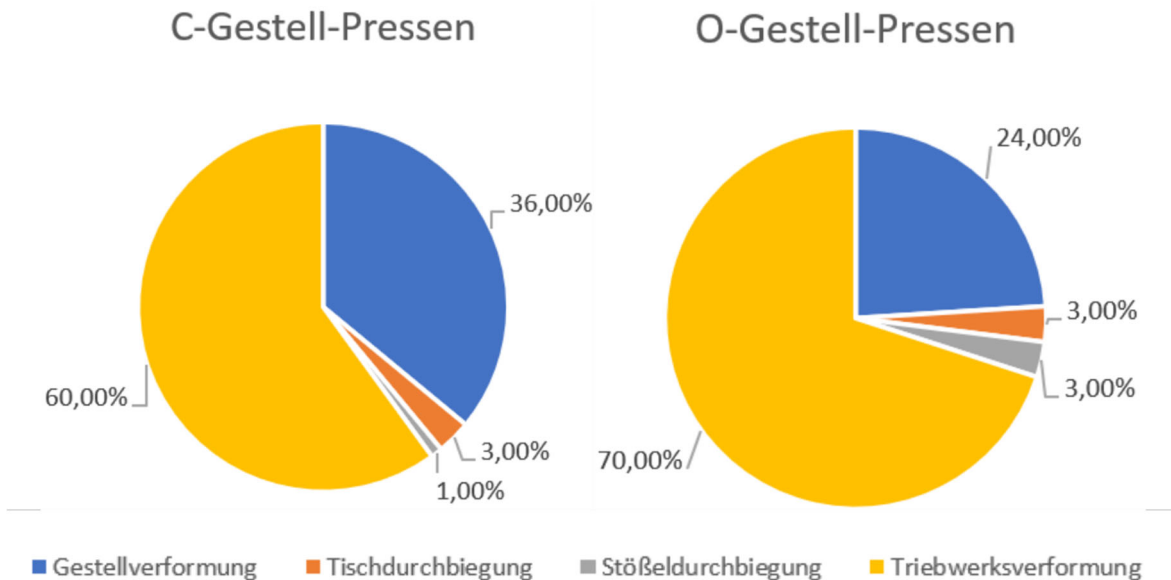
Die Zeitkenngrößen einer Umformmaschine beschreiben die Vorgangszeiten und Vorgangsgeschwindigkeiten. Diese sind abhängig von der Bauart der Maschine, siehe Kapitel 2.1.2. Die Zeitkenngrößen haben neben den Standzeiten der Werkzeuge, Rüstzeiten der Maschine und Verfügbarkeit der Anlage einen erheblichen Anteil an der Wirtschaftlichkeit einer Umformmaschine [22].

Die Genauigkeitskenngrößen einer Umformmaschine unterteilen sich in die Genauigkeitskenngrößen der belasteten Maschine, welche unter anderem durch die Steifigkeit, Kippung und den Versatz beschrieben werden, sowie der Genauigkeitskenngrößen der unbelasteten Maschine, welche unter anderem durch die Ebenheit und Parallelität der Werkzeugaufspannflächen und Rechtwinkligkeit der Stößelbewegung zur Tischfläche repräsentiert wird.

## 2.2 Anteile der Baugruppen an der Maschinengenauigkeit

In Abhängigkeit von der Bauform der Umformmaschine haben die Baugruppen, siehe Kapitel 2.1.2 bzw. Kapitel 2.1.3, einen unterschiedlich hohen Einfluss auf die Maschinengenauigkeit wie Kippung und Verlagerung. In Abbildung 7 sind die Anteile der Baugruppen an der Maschinengenauigkeit, für eine vertikale Ausfederung, dargestellt. Zu sehen

ist, dass die Stößeldurchbiegung bei C-Gestell-Pressen, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, einen geringeren Anteil an der Maschinengenauigkeit als bei O-Gestell-Pressen besitzt. Die Ursache ist in der Steifigkeit des Pressengestells zu finden. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass die Summe der Anteile für die Tisch- und Stößeldurchbiegung bei 4% bis 6% liegt. Eine Kompensation dieser Anteile erfolgt bisher überwiegend durch eine Anpassung der Werkzeuggeometrie, anhand von Erfahrungswerten für die jeweilige Maschine [5].



**Abbildung 7: Anteile der Baugruppen an der Maschinengenauigkeit bei der vertikalen Ausfederung nach [16]**

## 2.3 Offline Messverfahren

Unter dem Begriff offline Messverfahren werden im Folgenden alle Messverfahren verstanden, welche ein Abrüsten der Umformpresse während des Messvorganges erfordern, um die benötigten Messdaten in ihrer vollen Gänze erfassen zu können.

### 2.3.1 Bestimmung der Verlagerung und Kippung

Das Verhalten unter Last wird, wie unter „2.1.4 Kenngrößen von Umformmaschinen“ beschrieben, durch die Steifigkeit in Arbeitsrichtung, der Kippsteifigkeit und dem Versatz (Verlagerung) charakterisiert. Zur Bestimmung der Verlagerung und Kippung wird DIN 55189, welche 2015 zurückgezogen wurde, bis heute überwiegend verwendet. Diese Norm beschreibt die Verfahren zur Messung der Verlagerung und Kippung zwischen Stößel und Tisch an Pressen der Blechverarbeitung unter statischen Bedingungen [11].

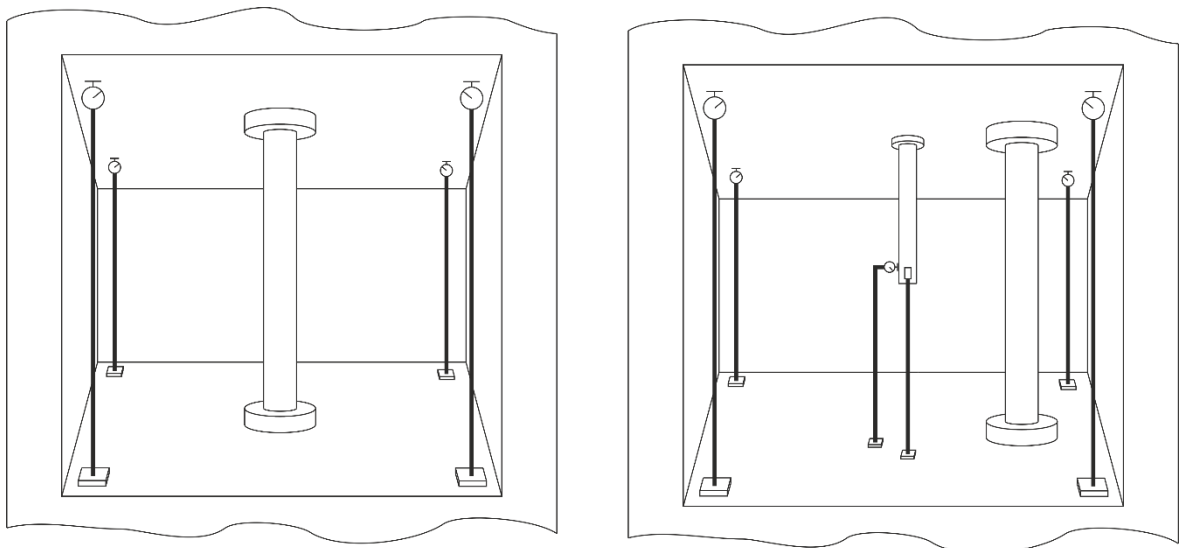
Das Vorgehen nach DIN 55189 beschränkt sich auf die Baumstermessung, d. h., es wird nur eine Presse jeder Baugröße gemessen. Für eine dauerhafte oder regelmäßige Über-



wachung einer Maschine ist die Norm nicht optimiert, da eine Messung nur bei gestoppter Produktion erfolgen kann und jede Messung einen hohen Montageaufwand bedeutet [6].

Die Norm sieht zur Ermittlung der Verlagerung eine mittige Krafteinleitung vor. Mittels Belastungssäule mit integrierter Hydraulik wird in 5 Stufen eine Kraft in Höhe von 50% der Nennkraft der Presse erzeugt. Für Kräfte oberhalb der halben Nennkraft kann der Versatz durch Extrapolation angenähert werden. Die Verlagerung wird durch Messuhren in den Ecken von Tisch und Stößel gemessen, siehe Abbildung 8 (links). Die Belastungseinrichtung wird im Verlauf der Messung um 10% in  $l_x$  bzw.  $l_y$  (Nutzbare Stößelbreite) verschoben um die Verlagerung in x- bzw. y-Richtung zu ermitteln.

Die Kippung des Stößels gegenüber dem Tisch wird durch eine außermittige Krafteinleitung erzeugt. Eine mittige Krafteinleitung entfällt hierbei. Die Anordnung der Messuhren erfolgt wie im vorherigen Absatz beschrieben. Hinzu kommen zwei weitere Messuhren, welche in halber Höhe zwischen Tisch und Stößel, symmetrisch zur Mitte, die Kippung messen, siehe Abbildung 8 (rechts).



**Abbildung 8: Messung der Verlagerung (links), Messung der Kippung (rechts) nach [11]**

Die horizontale Gesamtverlagerung setzt sich durch die Einzelanteile der horizontalen Verlagerung in der Stößelebene und einem kippungsbedingten Anteil zusammen, siehe Abbildung 9. Daher ist es von Bedeutung den kippungsbedingten Anteil in einer definierten Einbauhöhe zu ermitteln. Zu beachten ist, dass bei der Verlagerungsmessung ohne Werkzeug der Informationsgehalt über das Umformergebnis gering ist. Während des Umformprozesses erfolgt eine starke Beeinflussung durch die Werkzeugführungen, aufgrund dessen kann es hier zu Abweichung bis zum Faktor 14 kommen [16]. Die Kippung dagegen ist im Wesentlichen abhängig von der Umformmaschine, da durch sehr kurze Werkzeugführungen eine geringe Beeinflussung erfolgt.

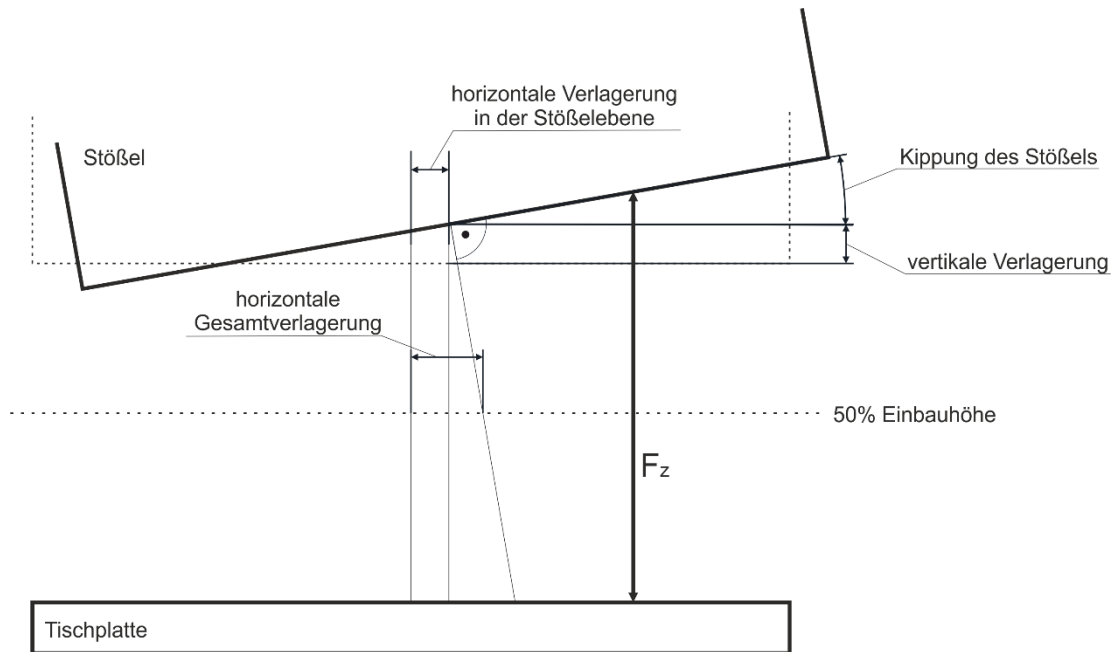


Abbildung 9: Anteile der Verlagerung und Kippung nach [16]

### 2.3.2 Bestimmung der Tischdurchbiegung

Der Einsatz inkrementeller Wegmessgeber zur Erfassung der Pressentisch- bzw. Pressenstößeldeformation wird unter anderem in [41], [37], und [47] beschrieben. Das Messprinzip beruht auf der Erfassung der vertikalen Deformation von Pressentisch oder / und Pressenstößel mittels inkrementeller Wegmessgeber. Dazu wird ein Messsystem auf dem Pressentisch oder Pressenstößel fixiert, welches jeweils an den End- oder Eckpunkten gelagert wird, siehe Abbildung 10. Zwischen den Lagerpunkten werden in definierten Abständen Wegmessgeber positioniert, welche die vertikale Deformation im unbelasteten Zustand vom belasteten Zustand subtrahieren und somit eine positions- und kraftabhängige Deformation detektieren.

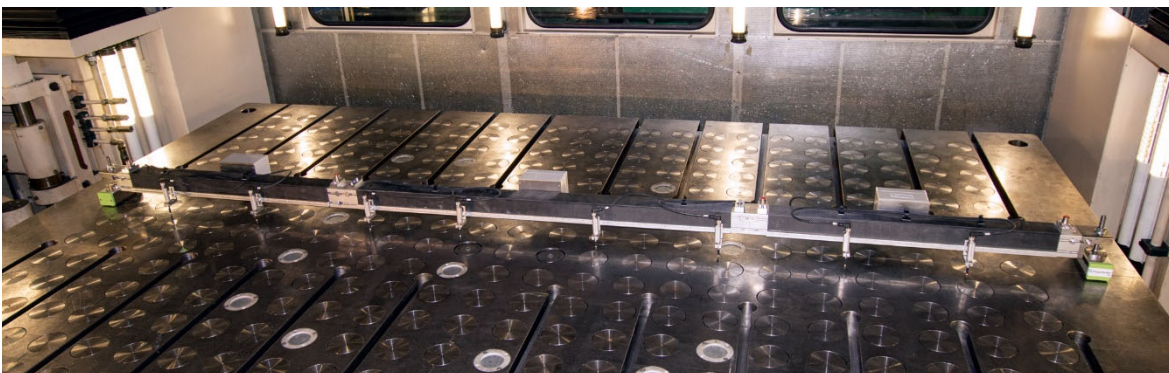


Abbildung 10: inkrementelle Erfassung der Tischdurchbiegung [47]

Zur Zustandsüberwachung der Pressenparameter muss die Messung in definierten Abständen wiederholt werden. Zu diesem Zweck muss das Werkzeug der Umformpresse

abgerüstet und ein vorher definierter Belastungszustand hergestellt werden, um eine möglichst große Aussagefähigkeit beim Vergleich der Messung zu erreichen.

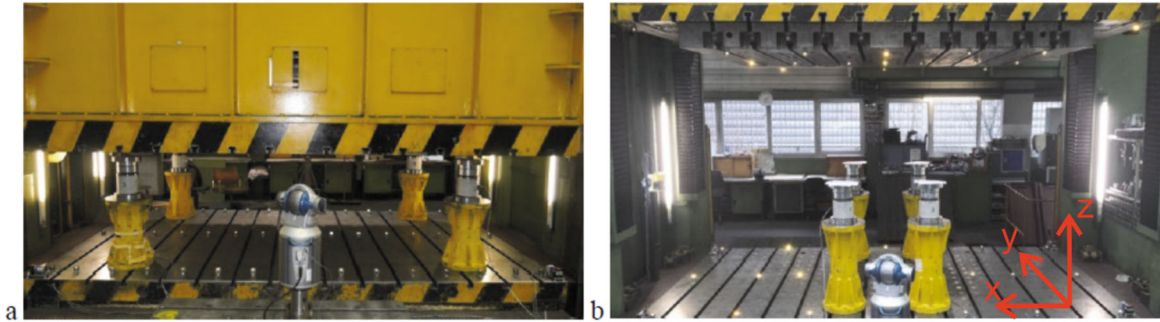
### **2.3.3 Bestimmung der Verlagerung, Kippung und Tischdurchbiegung**

#### **Optische Messung mittels Interferometrie:**

Der Einsatz von Laser-Interferometern oder Tracking-Interferometern zur Ermittlung der Maschineneigenschaften von Umformpressen und Werkzeugmaschinen ist eine verbreitete Methode [21, 44]. Laserinterferometer zählen zu den Präzisionsmesseinrichtungen auf Basis des inkrementellen Messprinzips, es lassen sich Auflösungen von bis zu 325 nm realisieren [34]. Aufgrund der Messgenauigkeit und der geringen Messunsicherheit auch über größere Strecken bietet sich dieses Messverfahren für Großmaschinen an [49]. Der Vorteil eines Tracking-Interferometers im Vergleich zum Laser-Interferometer liegt in der freien Führbarkeit des Laserstrahles im Raum. Erreicht wird dies durch den Einsatz von zwei motorisch angetriebenen Drehachsen. Eine Positionsänderung der Tripelspiegel wird durch das Tracking-Interferometer erkannt und die beiden Drehachsen werden automatisch nachgeführt. Über die Abstandsinformation des Interferometers und den Winkelinformationen durch die Drehgeber der Drehachsen wird die aktuelle Position der Tripelspiegel im Raum ermittelt [27].

Für die Ermittlung der Eigenschaften von Umformpressen besteht das Vorgehen aus zwei Phasen. In der ersten Phase werden die vorher festgelegten Punkte im unbelasteten Zustand der Maschine erfasst (Abbildung 11 b). In der zweiten Phase werden die Punkte im belasteten Zustand erfasst (Abbildung 11 a). Aus der Differenz der Koordinaten ergibt sich die Auslenkung als Funktion einer bestimmten Last [43].

In Abbildung 11 ist ein typischer Messaufbau beim Einsatz eines Tracking-Interferometers dargestellt. Für die Messung werden mehrere Tripelspiegel an den zu untersuchenden Stellen, im Sichtbereich des Tracking-Interferometers, am Pressentisch und -stößel platziert. Im zweiten Schritt wird der Stößel auf die Belastungssäulen, deren Positionierung sich weitestgehend wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben orientiert, gefahren und eine definierte Nennkraft wird aufgebaut. Die Nennkraft muss für die Dauer der Messung gehalten werden.



**Abbildung 11: Tracking-Interferometer Messaufbau nach [44]**

Für Umformmaschinen, welche die Nennkraft nicht über die gesamte Dauer der Messung aufrechterhalten können, muss der Belastungszustand in einem erneuten Hub reproduziert werden. Dies erfordert einen reproduzierbaren Pressenhub und einen stabilen Belastungszustand. Es ist bei der Platzierung der Tripelspiegel darauf zu achten, dass diese zu keinem Zeitpunkt der Messung verdeckt werden, da nur Punkte erfasst werden können, die im Sichtbereich des Tracking-Interferometers liegen. Ein Umsetzen des Tracking-Interferometers ist theoretisch durchführbar, wird praktisch aber vermieden. Durch ein Umsetzen des Interferometers ist ein erneutes Einrichten des Referenzkoordinatensystems nötig, im Anschluss muss das Koordinatensystem der ersten Messung und der zweiten Messung zueinander ausgerichtet werden, um so ein gemeinsames Koordinatensystem schaffen zu können.

#### **Optische Messung mittels optischen Bildkorrelation:**

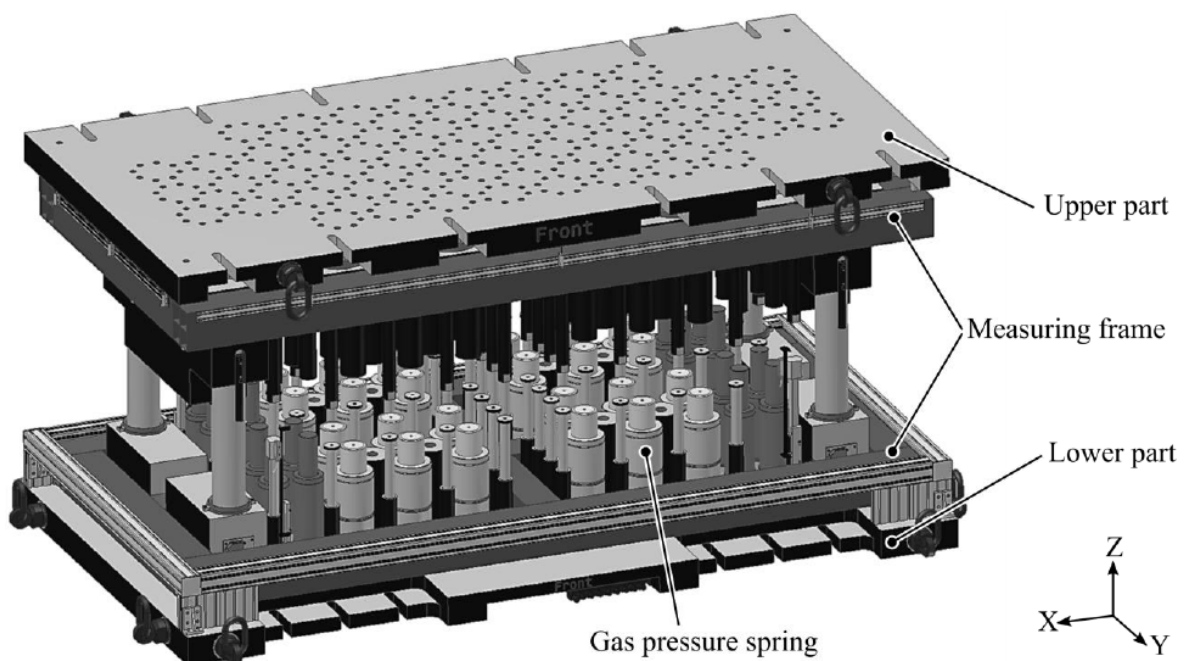
Der Einsatz der optischen Bildkorrelation zur gesamtheitlichen Betrachtung des Verhaltens einer Umformpresse wird durch [6] beschrieben. Hierbei werden an definierten Punkten der Maschine stochastische Muster aufgebracht. Die Muster werden im unbelasteten Zustand, als Referenz erfasst. Im Anschluss wird die Umformpresse belastet, hierbei werden durch das Kamerasystem bis zu 1000 Bilder pro Sekunde des Messaufbaues erfasst. In der anschließenden Auswertung, ist es möglich zu jedem Zeitpunkt das Auffederungs-, Kipp- und Versatzverhalten zu betrachten. Als nachteilig an diesem Messsystem hat sich die physikalisch begrenzte Auflösung des Kamerasystems erwiesen und die aufwendige Auswertung der Messdaten. Da es sich um ein optisches Erfassungssystem handelt, muss ähnlich wie unter 2.3.2 beschrieben zu jedem Zeitpunkt eine uneingeschränkte Sicht auf die Messmarken möglich sein.

#### **2.3.4 Bestimmung dynamischer Maschineneigenschaften**

In [25] wird ein Prüfwerkzeug zur Ermittlung bzw. Erfassung der dynamischen Eigenschaften von Umformpresse beschrieben, siehe Abbildung 12. Das System findet vorzugsweise Anwendung bei Tiefzieh- oder Schneidpressen. Dieses Pressenfingerabdruckwerkzeug besteht auf einem Werkzeugoberteil (upper part), welches am Stößel fixiert wird und einem Werkzeugunterteil (lower part), welches am Tisch fixiert wird. Die Erfassung der dy-

namischen Eigenschaften erfolgt während eines Messhubes, bei welchem das Werkzeugoberteil relativ zum Werkzeugunterteil bewegt wird (evtl. auch invers). Während des Messhubes (ohne Werkzeug und Werkstück) simulieren mehrere Gasdruckfedern die unter Realumformbedingungen auftretenden Kräfte und mehrere Messsensoren erfassen die dynamischen Eigenschaften der Umformpresse [25].

Das System kann durch einen Rahmen, welcher umlaufend an der Außenseite des Prüfwerkzeuges verläuft ausgestattet werden, dieser ist in Abbildung 12 als measuring frame bezeichnet. Dieser Rahmen dient als Aufnahme für Wegmesssensoren, welche nach oben und nach unten gerichtet werden können. Diese Sensoren dienen der Erfassung der Verschiebung zwischen den beiden Grundplatten des Werkzeugoberteils und / oder der Abstandänderung zwischen dem Rahmen und der Grundplatte [25].



**Abbildung 12: Aufbau des Fingerabdruckwerkzeugs [50]**

Die gewonnenen Messergebnisse werden bereits zur Kategorisierung von Umformpressen hinsichtlich ihrer Durchbiegung verwendet. Dadurch kann das dynamische Verhalten der Produktionspressen auf Trayoutpressen übertragen werden und so die Werkzeugeinarbeitungszeit verkürzt werden. Die Messdaten dienen darüber hinaus als Grundlage für die Digitalisierung der Maschineneigenschaften und somit zur Ersatzmodellbildung für die FEA. Durch eine regelmäßige Maschinenvermessung mithilfe des Prüfwerkzeuges kann der Maschinenverschleiß quantifiziert werden, wodurch eine Optimierung der Wartungsintervalle möglich ist [50].

Für eine kontinuierliche Überwachung der Maschineneigenschaften ist das System Pressenfingerabdruckwerkzeug nicht konzipiert. Als problematisch gestaltet sich die Verwendung der Prüfwerkzeuge für Umformpressen unterschiedlicher Baugrößen. Für die

Vermessung unterschiedlich großer Bauformen und Tisch- bzw. Stößelabmaße muss ein entsprechendes Prüfwerkzeug bereitstehen.

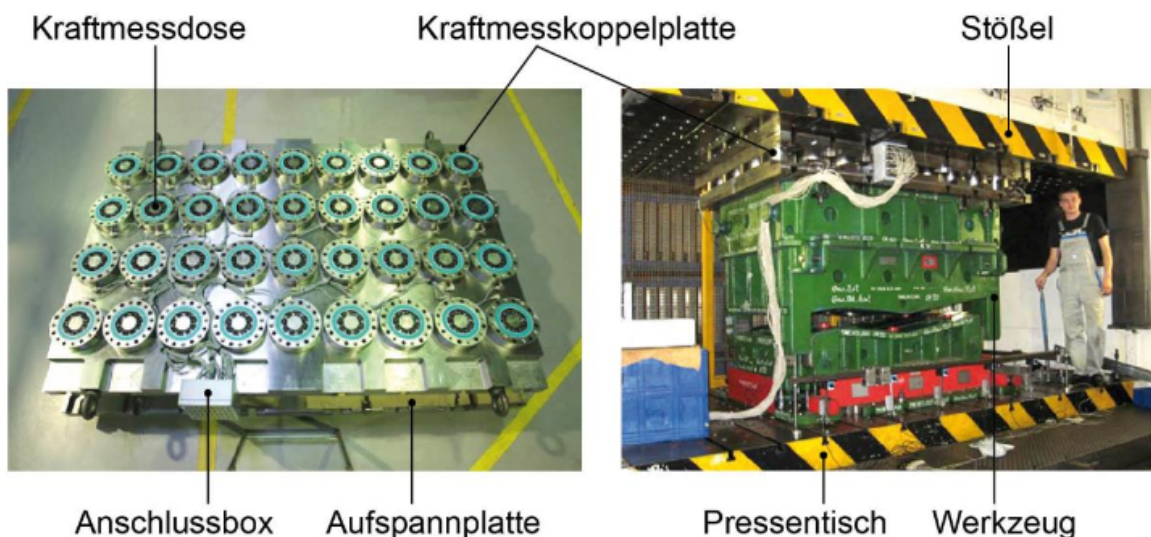
## 2.4 Inline Messverfahren

Als inline Messverfahren werden im Folgenden alle Messverfahren verstanden, welche kein Abrüsten während des Messvorganges erfordern, um die Messdaten in ihrer vollen Gänze erfassen zu können. Dies bedingt nicht, dass ein Ab- und Aufrüsten erforderlich sein kann, um das Messsystem innerhalb des Pressenraumes montieren zu können.

### 2.4.1 Prozesskraftbestimmung

#### Messung der flächigen Kraftverteilung:

Die Verwendung einer Kraftmesskoppelplatte wird nach [41] beschrieben. Diese ermöglicht die Erfassung der Prozesskräfte und deren Position. Der Aufbau besteht aus 36 Zug- / Druckkraftaufnehmern, welche zwischen zwei Stahlplatten montiert werden, siehe Abbildung 13. Dieser Aufbau wird im direkten Kraftfluss zwischen Stößel und Oberwerkzeug montiert. Die Einsatzfähigkeit dieses Systems ist durch die horizontalen Abmessungen werkzeugseitig und pressenseitig begrenzt. Für bestimmte Kombinationen aus weggebundenen Pressen und Werkzeug ist dieses System aufgrund seiner Höhe nicht nutzbar. Als weiterer Negativpunkt ergibt sich die Beeinflussung der Pressenkenngößen durch das Messsystem. Hier ist die Beeinflussung der Steifigkeit der Maschine, durch die weichen Zug- bzw. Druckaufnehmer, zu nennen.



**Abbildung 13: Messvorrichtung zur Bestimmung der Werkzeugkräfte mittels Kraftmesskoppelplatte geöffnet (links), eingebaut (rechts) nach [41]**

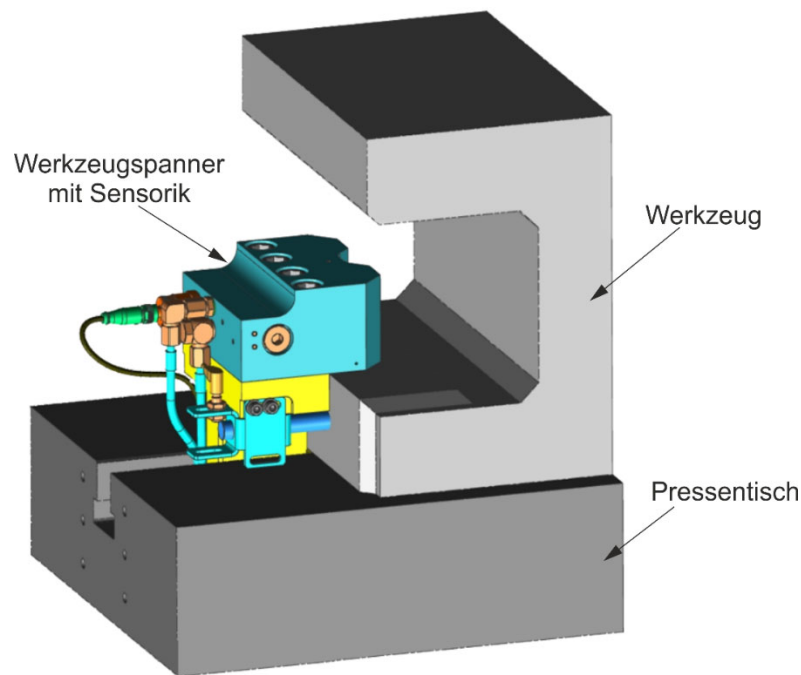
Eine Erfassung der Verlagerung, Kippung oder Tisch- bzw. Stößeldurchbiegung mit diesem Messsystem ist nicht vorgesehen. Bei der Werkzeugauslegung zeigt dieses System



Nachteile, für eine optimierte Werkzeugauslegung ist es von Bedeutung die angreifenden Kräfte an den einzelnen Werkzeugkomponenten zu kennen. Es ist daher notwendig die Stempelkraft, die der Gesamtumformkraft entspricht, zu ermitteln. Um die Krafteinwirkung des Blechhalters von der Gesamtkraft subtrahieren zu können, werden zusätzlich Hübe ohne Bauteil durchgeführt. Die Differenz der beiden Werte entspricht, unbeachtet von geringen Reibungsverlusten, der wirkenden Stempelkraft [9].

### Messung punktueller Werkzeugspannkräfte:

Die Hauptaufgabe von Werkzeugspannern in der Umformtechnik betrifft in erster Linie die Fixierung der Werkzeuge an Pressentisch- und stößel. Hierbei werden bereits häufig automatisierte und digitalisierte Werkzeugspanner eingesetzt, um Rüstzeiten zu verkürzen und durch einen reproduzierbaren Spannvorgang die Prozessfähigkeit zu steigern, siehe Abbildung 14. Durch die Integration entsprechender Sensorik in Schnittstellen des Werkzeugspanners und somit in die Schnittstelle zwischen Werkzeug und Umformpresse ist bereits eine kontinuierliche Erfassung von Spannkräften möglich wie durch [3, 36] beschrieben. Im Bereich der Prozessüberwachung mittels Werkzeugspanner in der Umformtechnik erfolgt dies über die Detektion von ungewöhnlichen Aufreißkräften und der Überwachung der Prozesskräfte an der Spannstelle.



**Abbildung 14: Elektromagnetischer Werkzeugspanner für Umformpressen nach [36]**

Nachteile bei der Erfassung von Prozessgrößen über die Werkzeugspanner ist die allgemeine Positionierung. Die Werkzeugspanner befinden sich im Randbereich des Werkzeuges und des Pressentisches und -stößels, Messwerte können somit ebenfalls nur in diesen Bereichen erfasst werden oder müssen mittels mathematischer Modelle für andere Bereiche entsprechend bestimmt werden. Die Erfassung der Tisch- und Stößeldurchbiegung ist bisher Stand der Forschung.

### **Punktuelle Bestimmung der Prozesskräfte außerhalb der Wirkstelle:**

Durch [45] wird der Einsatz des, Messquader genannten, Messsystems beschrieben, siehe Abbildung 15. Hierbei wird das Messsystem mittels Verschraubung oberhalb der Nuten im Pressentisch vorgespannt. Zur Erfassung der Messdaten werden Piezosensoren verwendet. Der Nachteil piezoelektrischer Wandler ist, dass diese ihre Ladung nicht beliebig lang aufrechterhalten können, statische Messungen (den Vorspannprozess eingeschlossen) über einen Zeitraum mehrerer Minuten sind mit üblichen Piezomaterialien nicht möglich. Daher eignen sich piezoelektrische Sensoren am besten für schnelle dynamische Vorgänge. Aufgrund dessen eignet sich das Messsystem Messquader hauptsächlich zur Butzenüberwachung, Stempelbruchkontrolle und der Prozesskraftüberwachung.



**Abbildung 15: unidor Messquader [45]**

Nachteilig bei diesem System ist, dass eine Positionierung nur außerhalb des Wirkungsbereiches des Werkzeuges möglich ist. Dies bedingt, dass eine Prozessüberwachung hinsichtlich der Position der Umformkraft innerhalb des Pressenraumes nicht möglich ist. Weiterhin ist eine Positionierung des Messsystems nur in Nuten möglich, in welchem keine Werkzeugspanner zum Einsatz kommen.

Darüber hinaus sind weitere aufschraubbare Bauformen in unterschiedlichen Bauformen üblich, siehe [24, 38]. Als häufigste Formen sind hier die die Ring- und Quaderbauform zu nennen.

Eine weitere Möglichkeit der Prozesskrafterfassung betrifft den Einsatz selbstklebender Dehnungsmessstreife, welche z. B. am Gestell, Pressentisch und -stößel fixiert werden [8]. Nachteilig bei selbstklebenden Dehnungsmessstreifen ist die Empfindlichkeit gegen äußere Krafteinwirkung. So ist die Fixierung von DMS an Pressentischen, welche verfahrbar sind, aufgrund der Klebung problematisch. Die Positionierung der Dehnungsmessstreifen erfolgt daher überwiegend an Positionen, welche nicht im direkten Arbeitsraum liegen, bzw. an Baugruppen, welche keine Relativbewegungen ausführen. Überwiegend werden DMS daher extern z. B. am Zuganker oder Rahmenkonstruktionen angebracht [32, 39].



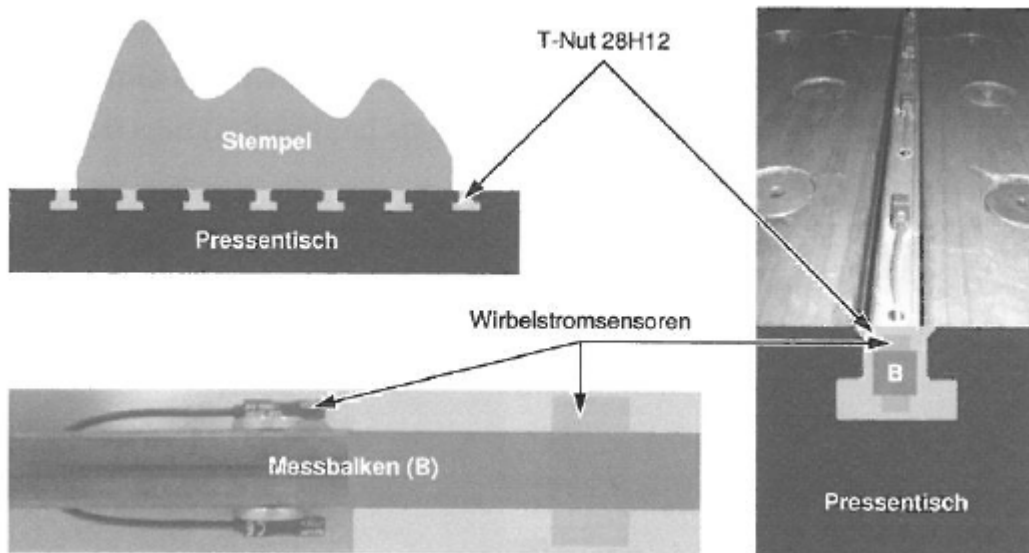
Schraubensensoren bieten eine weitere Möglichkeit der Prozesskrafterfassung. Hierbei handelt es sich um Schrauben mit integrierten Dehnungsmessstreifen oder Piezoelementen, siehe [7, 10, 30, 38, 40]. In der Regel werden hierbei vorhandene Schrauben an kraftflussrelevanten Stellen durch Sensorschrauben ersetzt. Vorteilhaft hierbei ist, dass die bestehende Struktur nicht durch Bohrungen oder Verkleben beeinflusst wird. Nachteilig für den Einsatz zur Prozesskrafterfassung innerhalb des Pressentisches ist, dass hierbei, ähnlich dem Messsystem Messquader, die Prozesskrafterfassung nur an Bereichen erfolgen kann, welche nicht vom Werkzeug verdeckt, oder durch Spannelemente belegt sind.

In [7, 23] wird die Verwendung von piezoelektrischen Kraftaufnehmern in Dübelbauform, zur Detektion von Gutteilen, Fehlern, Leerhüben und Schadensfällen, beschrieben. Ausgangspunkt hierfür ist die Integration der Dübel in gefährdeten Maschinen- und Werkzeugbereichen. Die sich hieraus ergebenden Nachteile entsprechen weitestgehend denen der Schraubensensoren.

#### **2.4.2 Bestimmung der Verlagerung zwischen Spannfläche und Werkzeug**

Durch [41] wurde die Verwendung von Wirbelstromsensoren zur Wegmessung beschrieben. Ausgangspunkt für die Durchbiegungsmessung zwischen Pressentisch und Werkzeug für Maschinen mit gerüstetem Werkzeug, ist die Nutzung der freien Nuten. Die Wirbelstromsensoren sind in ein T-Nuten-Förmiges Profil integriert und werden über die gesamte Nuttiefe eingeführt, siehe Abbildung 16. Die Lagerung erfolgt jeweils am Nutanfang bzw. Nutende. Die Verschiebung der Lagerstellen, relativ zum Messgestell, wird jeweils über Wegmessgeber gemessen.

Die Wirbelstromsensoren ermöglichen eine Wegmessung zwischen dem Messsystem und der Aufspannplatte bzw. dem Werkzeug, darüber hinaus lassen sich evtl. unter Last entstehende Spalten detektieren.

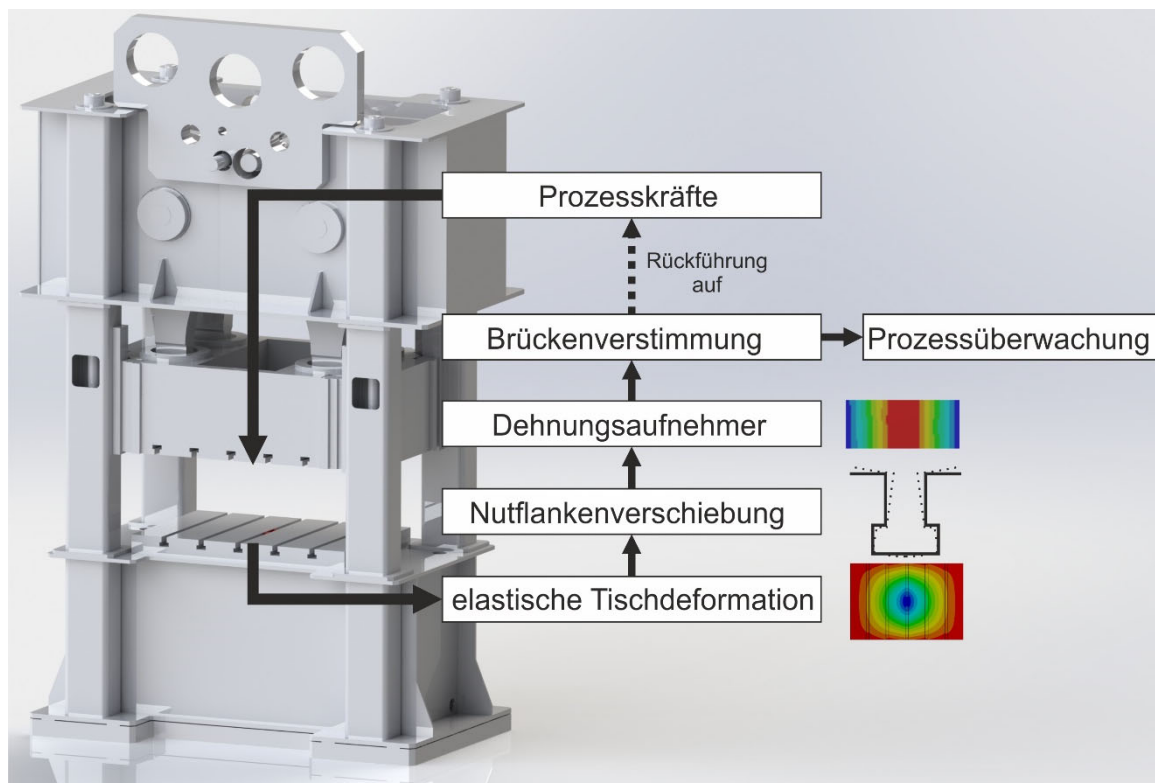


**Abbildung 16: Durchbiegungsmessung mittels Wirbelstromsensor [41]**

Nachteilig ist, dass die gesamte Nut mit dem Messsystem belegt ist. Es kann daher nur in Nuten gemessen werden, in welchen keine Spannmittel vorhanden sind. Eine direkte Messung der Tischdurchbiegung ist mit diesem Messsystem nicht möglich. Wirbelstromsensoren reagieren darüber hinaus auf alle metallischen Gegenstände und Partikel im Messbereich. Für eine exakte Messung muss daher die Messstelle frei von metallischen Verunreinigungen sein.

### 3 Präzisierung der Aufgabenstellung

Die Verwendung eines wirkstellennahen Inline Messsystems hat, gegenüber dem in Kapitel 2 beschriebenen Stand der Technik, unter anderem den Vorteil, dass eine kontinuierliche Prozesskrafterfassung im Tisch- und Stößelbereich möglich ist, sowie eine Minimierung der Rückwirkungen zwischen Messsystem und Presse. Darüber hinaus ist das hier beschriebene Messsystem in Pressen beliebiger Bauart und Bauform einsetzbar, da hier als Randbedingung lediglich eine Mindestnutbreite eingehalten werden muss. Das allgemeine Funktionsprinzip ist in Abbildung 17 dargestellt. Hierbei führt die elastomechanische Tischdeformation zu einer elastischen Deformation der Nutflanken (Nutflankenverschiebung). Diese Verschiebung wird durch die Dehnung des Dehnungsaufnehmers und der damit verbundenen Dehnung der Dehnungsmessstreifens quantifiziert.



**Abbildung 17: Funktionsprinzip Messsystem**

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Inline Messsystems, zur Erfassung von Prozesskräften innerhalb von Karosseriepessen. Das Messprinzip beruht auf dem elastischen Deformationsverhalten von Pressentisch und T-Nuten, vgl. Kapitel 1.3.

Innerhalb dieser Arbeit soll das theoretische Funktionsprinzip eines Messsystems, welches Prozesskräfte über die Nutdeformation erfasst, nachgewiesen werden. Dazu wird im ersten Schritt das Deformationsverhalten des Pressentisches untersucht, welcher im spä-

teren Verlauf für experimentelle Versuche genutzt werden soll. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Simulation wird im Anschluss ein entsprechender Dehnungsaufnehmer konstruiert. Die wesentlichen Eigenschaften, z. B. Vergleichsspannung, Dehnung und Rückwirkung des Dehnungsaufnehmers werden anhand einer simulativen Untersuchung bestimmt. Im letzten Schritt erfolgt die experimentelle Erprobung, zur Validierung der Simulationen und zum Nachweis des Funktionsprinzips unter Realbedingungen. Anschließend soll anhand dieser empirischen Beobachtung eine mathematische Beschreibung, mittels linearer Regression, der Zusammenhänge zwischen Dehnung und Prozesskraft bzw. Tischdurchbiegung und Prozesskraft erfolgen.

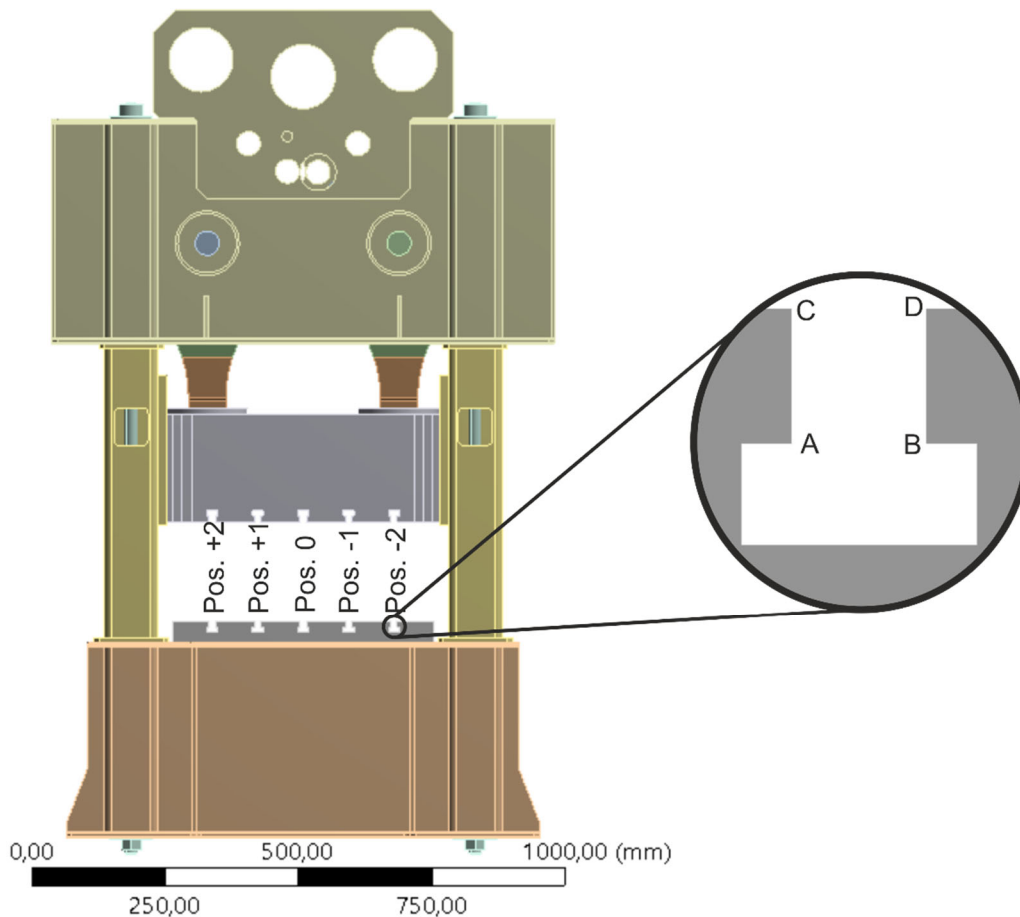
## 4 Simulative Betrachtung der T-Nut Deformation

### 4.1 Modellaufbau

Für die Analyse des Inline Messsystems Nutzenstein ist es nötig, die Größe der Verschiebung der Nutzenflanken quantitativ zu bestimmen. Anhand dieser Verschiebung ist es im Folgenden möglich einen geeigneten Dehnungsaufnehmer als Sensorträger für den Dehnmessstreifen (DMS) zu konstruieren.

Als Grundlage für das Ersatzmodell wurde eine weggebundene Presse in O-Ständer Bauform gewählt. Die verwendete Presse befindet sich im Versuchsstand des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik in Chemnitz.

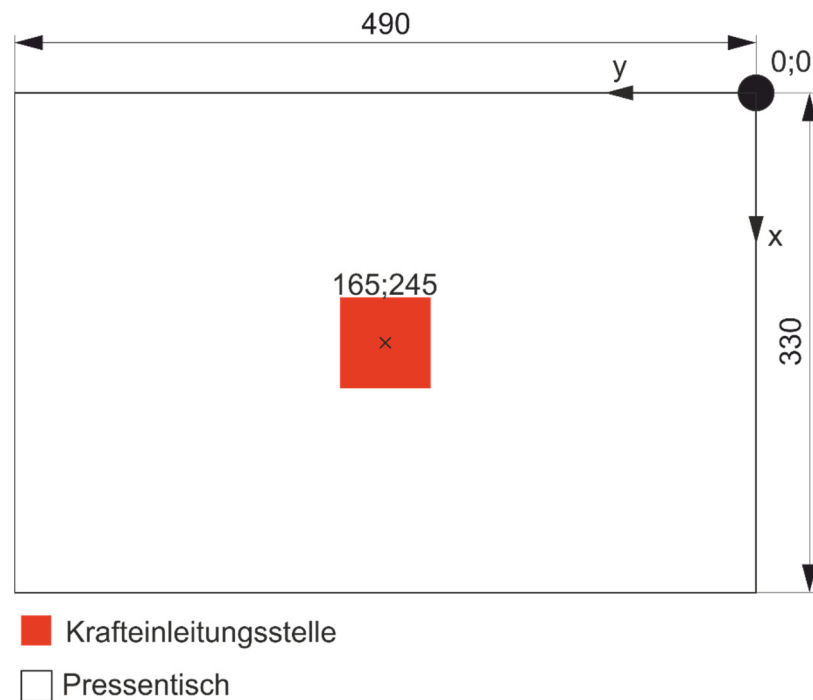
Die Benennung der auszuwertenden Punkte erfolgt wie in Abbildung 18 dargestellt. Durch den symmetrischen Aufbau der Presse wurden ausgehend von der Mitte (Nut Mitte) in z-Richtung die Nutzen mit einer Laufnummer versehen. Zur Auswertung der Nutzen werden 4 Pfade (A bis D) über die gesamte Tischtiefe definiert. Die Pfade A und B bzw. C und D werden im Anschluss in der y- und z-Verschiebung ausgewertet und so die Verjüngung der Nutzenflanken beschrieben.



**Abbildung 18: Modellaufbau der, für die Simulation verwendeten, Presse und Benennung der dafür verwendeten Pfade**

Der zu untersuchende Lastfall ist an DIN 55189 angelegt, siehe Kapitel 2.3.1. Dieser Lastfall wurde gewählt um eine Vergleichbarkeit der bisherigen Messmethode, zur hier beschriebenen neuen Messmethode zu ermöglichen, siehe Abbildung 19.

Für die Simulation der Tischdurchbiegung und der daraus resultierenden Nutflankenverschiebung wurde das Modell der Presse, siehe Abbildung 18, vereinfacht. Hierbei wurden alle Baugruppen, welche keinen oder lediglich einen sekundären Einfluss auf die Tischdeformation haben, entfernt. Im Wesentlichen betrifft dies die Baugruppen: Kopfstück, Stößel und Seitenständer, welche in der Simulation nicht betrachtet wurden.



**Abbildung 19: Modellaufbau des für die Simulation untersuchten Lastfalls**

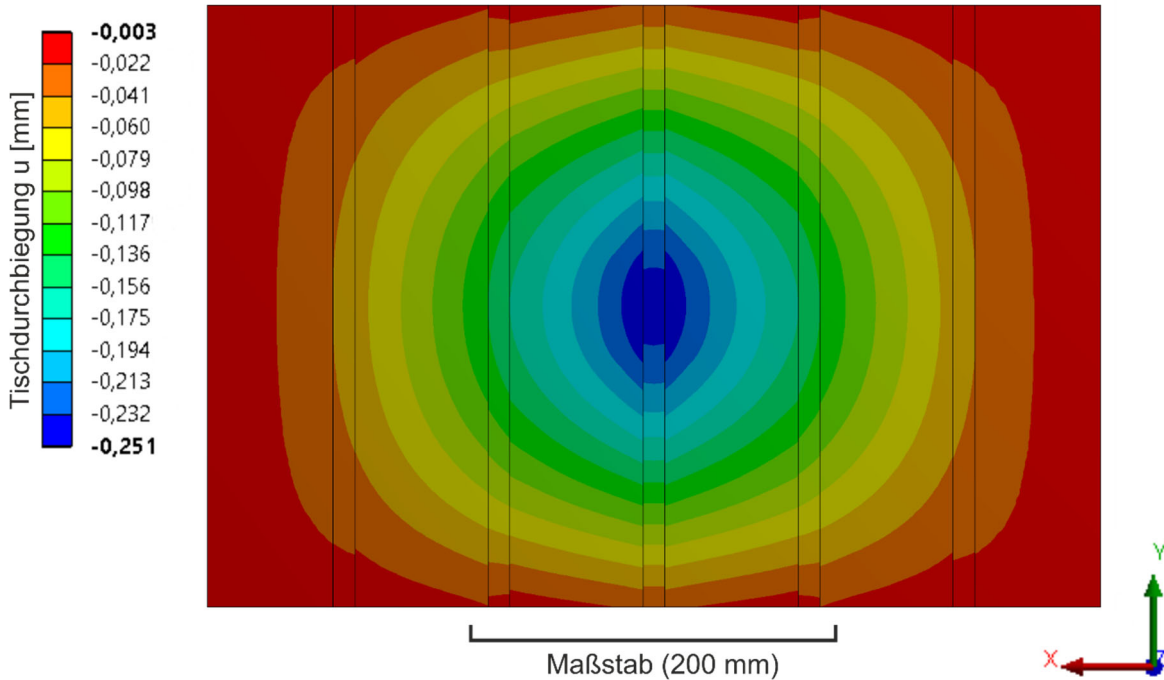
Bei den Nuten der Presse handelt es sich um T-Nuten DIN 650 – 12H8. Der Tisch besitzt eine rechteckige Spannfläche mit den Maßen 490x330x40 mm.

Die Krafteinleitung erfolgt mittig auf den Pressentisch an Position  $x = 165\text{mm}$  und  $y = 245\text{mm}$ , die Kraft wird in mehreren Stufen bis 100kN aufgebracht. Die Kraft wirkt auf eine Fläche von 60x60 mm. Die Verbindung zwischen Pressentisch und Unterbau wurde so definiert, dass ein Abheben der Bauteile voneinander verhindert wird.

## 4.2 Analyse der Nutflankenverschiebung am Pressentisch

Bei der Analyse der Nutflankendeformation wird die Verschiebung in der horizontalen und in der vertikalen Ebene ausgewertet. Die Nutflankendeformation bildet im Folgenden die Grundlage zum Entwurf eines geeigneten Dehnungsaufnehmers und dient als Grundlage für anschließende Simulationen. Für die Analyse werden Pfade entlang der in Kapitel 4.1 beschriebenen Positionen A bis D definiert. Der Verlauf der Pfade erstreckt sich über die gesamte Tischtiefe von 330 mm und enthält 101 Messpunkte.

In Abbildung 20 ist die Verschiebungskomponente in z-Richtung für den Tisch dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Deformation ein Maximum im Bereich der Tischmitte besitzt und mittelpunktsymmetrisch ist. Die Verschiebungen in der Tischmitte liegt bei -0,25 mm.



**Abbildung 20: Simulationsergebnis der Tischverschiebung entlang der z-Achse bei einer Kräfteinwirkung von 100 kN**

In Abbildung 21 ist zu sehen, dass die Nutenflanken der mittleren Nut an Position B und D durch ein positives Vorzeichen gekennzeichnet sind. Diese Tatsache ist auf die symmetrische Verschiebung der Spannfläche zurückzuführen. Alle horizontalen Verschiebungen verlaufen in Richtung der größten Tischdurchbiegung, weshalb alle Nutenflanken links dieser Stelle durch ein negatives Vorzeichen gekennzeichnet sind, alle Nutenflanken rechts davon durch ein positives Vorzeichen.

Die maximale Differenz der Nutflankenverschiebung tritt erwartungsgemäß an der Stelle der größten z-Verschiebung auf. Im Bereich des Pressentisches liegt dieser Punkt in der mittleren Nut, bei der y-Position 165 mm. Hier beträgt die Differenz zwischen Positionen C und D (Nutflankenverschiebung) 80  $\mu\text{m}$ . Der Verlauf der Nutflankenverschiebung über die Tischtiefe ist in Abbildung 21 dargestellt.



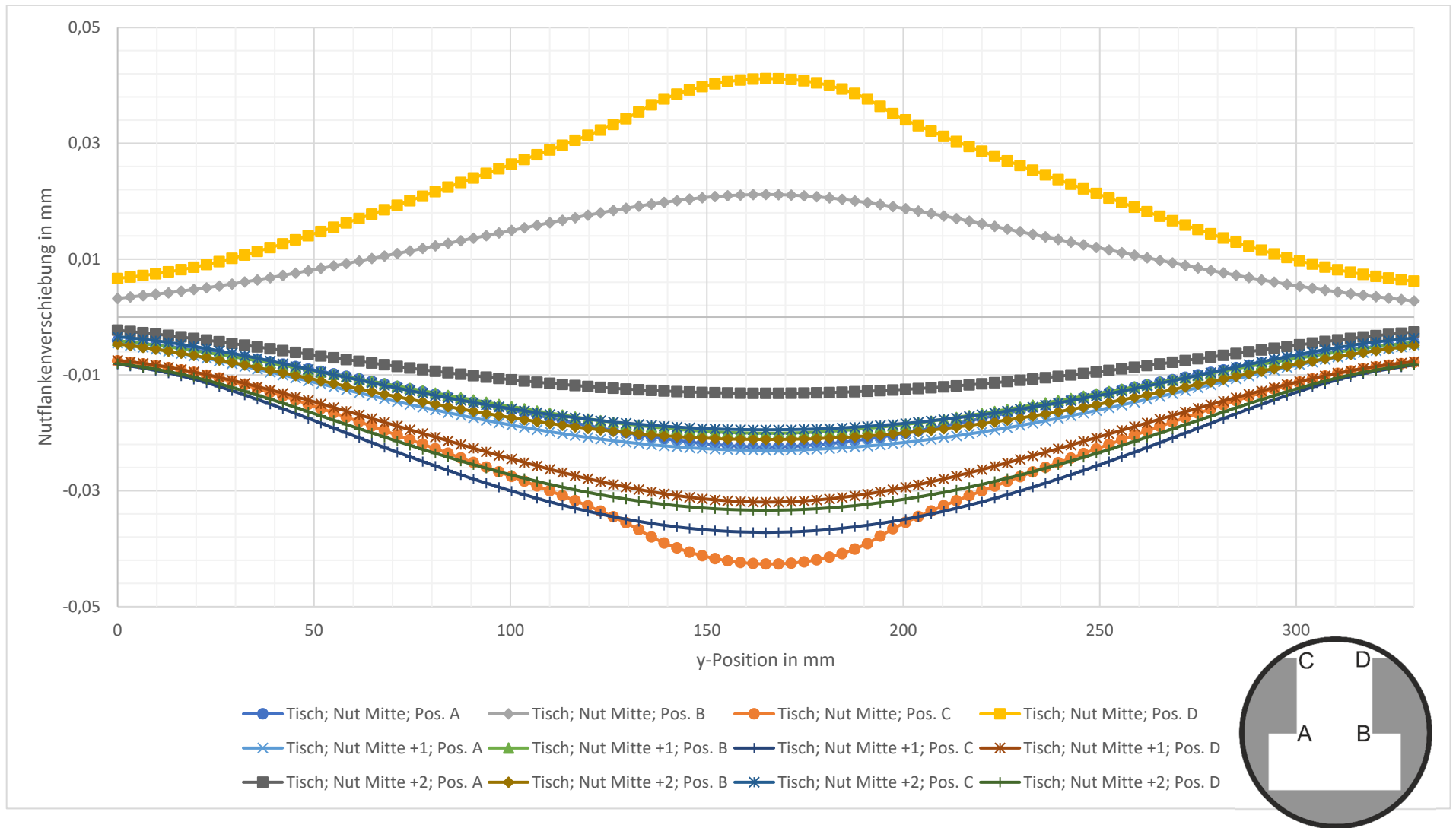
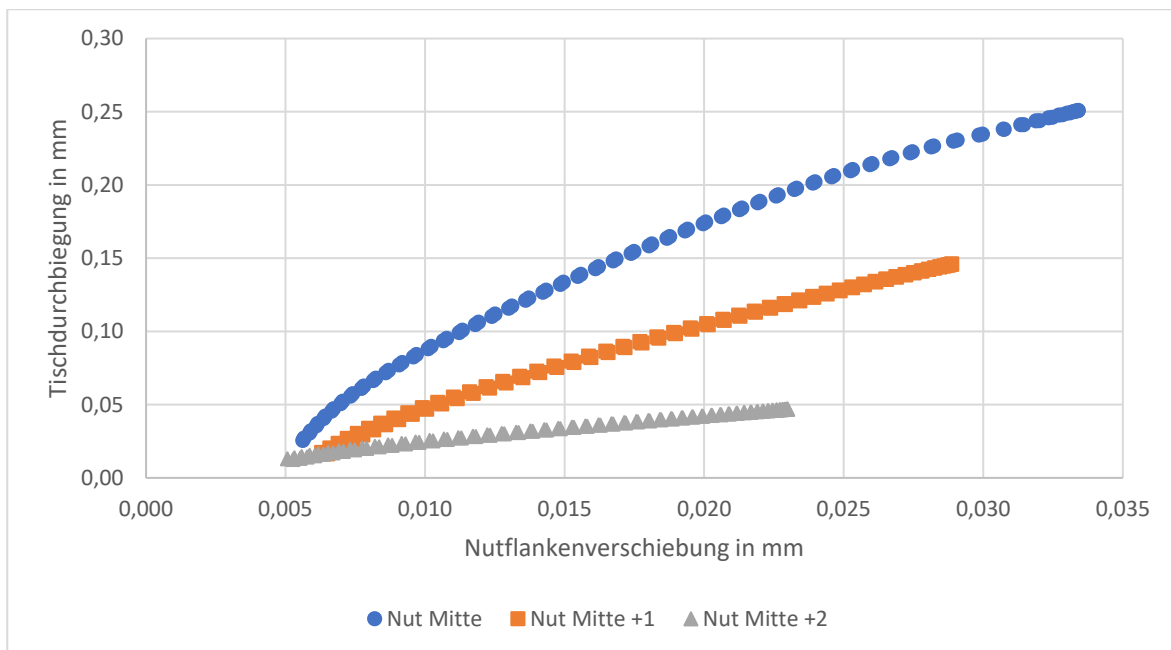


Abbildung 21: Nutflankenverschiebung der T-Nuten entlang der definierten Pfade in Abhängigkeit der y-Position

### 4.3 Korrelation zwischen Nutflankenverschiebung – Tischdurchbiegung

Untersucht wird, ob ein linearer Zusammenhang zwischen Tischdurchbiegung und Nutflankenverschiebung besteht. Für eine grafische Überprüfung wurde die z-Verschiebung über der y-Verschiebung in einem Streudiagramm (siehe Abbildung 22) für den Tisch dargestellt. Für die Analyse wurden jeweils die quadratischen Mittelwerte (Effektivwerte) über alle 4 Pfade der Nut gebildet.

Die geringen Nichtlinearitäten im Streudiagramm, siehe Abbildung 22, sind auf Struktur-nichtlinearitäten durch die Kontakttrandbedingungen zurückzuführen.



**Abbildung 22: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Tischdurchbiegung und Nutflankenverschiebung in Abhängigkeit der Nutposition**

Mit den Messwerten wird der lineare Korrelationskoeffizient mithilfe von Formel 1 bestimmt [33]. Der Korrelationskoeffizient ergibt sich aus den Mittelwerten der x-Verschiebung  $\bar{x}$ , z-Verschiebung  $\bar{z}$  und der Anzahl der Messpunkte  $n$ , sowie den  $i$ -ten Einzelmesswerten der x-Verschiebung  $x_i$  und der z-Verschiebung  $z_i$ .

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * z_i - n * \bar{x} * \bar{z}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n * \bar{x}^2) * (\sum_{i=1}^n z_i^2 - n * \bar{z}^2)}} \quad (1)$$

Der lineare Korrelationskoeffizient  $r$  dient als Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs. Werte für  $r$  nahe +1 bzw. -1 deuten auf einen sehr starken positiven bzw. negati-

ven linearen Zusammenhang hin. Werte welche gegen 0 gehen bedeuten, dass nur ein geringer oder kein linearer Zusammenhang besteht [4].

Die Ergebnisse der linearen Korrelation sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Korrelation bezieht sich auf den quadratischen Mittelwert der gesamten Nut (Pfad A bis D). Der quadratische Mittelwert wurde gewählt, um die unterschiedlichen Vorzeichen der mittleren Nuten, siehe Abbildung 21 bzw. Kapitel 4.2, zu kompensieren.

**Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten zwischen Nutflankenverschiebung und Tischdurchbiegung**

Position	Korrelationskoeffizient r	Bemerkung
0	0,989	sehr starke Korrelation
+1	0,996	sehr starke Korrelation
+2	0,997	sehr starke Korrelation

Anhand von Tabelle 2 wird ersichtlich, dass zwischen der lokalen Tischdurchbiegung und der Nutflankenverschiebung am Tisch und Stößel ein starker linearer Zusammenhang besteht. Dieser Zusammenhang besteht auch in Bereichen sehr geringer Tischdeformation.

Zur Vereinfachung wird in Messsystemen häufig eine lineare Kennlinie, auch ideale Kennlinie genannt, verwendet. Diese ideale Kennlinie zeichnet sich dadurch aus, dass diese über den gesamten Messbereich eine gleichhohe Steigung besitzt und somit der Korrelationskoeffizient den Wert +1 oder -1 besitzt. Da in der Realität die Kennlinie im Allgemeinen meist nichtlinear ist, entsteht somit ein Fehler bei der Verwendung der idealen Kennlinie, gegenüber der realen Kennlinie. Um diesen Fehler zu kompensieren, unter der Bedingung eine möglichst triviale Auswertung durchführen zu können, ist es von Bedeutung, dass der Zusammenhang zwischen Tischdurchbiegung und Nutflankenverschiebung weitestgehend linear beschreibbar ist. Durch die Simulation kann diese Bedingung in guter Näherung als erfüllt betrachtet werden.



## 5 Entwurf des Dehnungsaufnehmers

### 5.1 Anforderungsliste

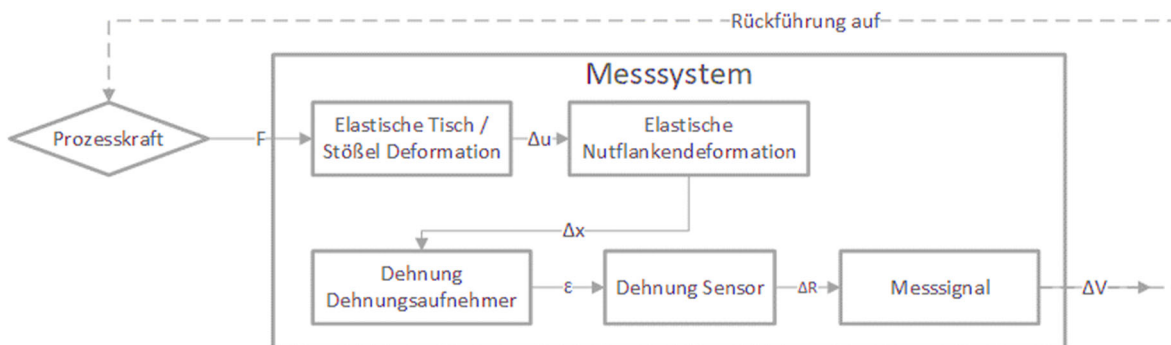
In Absprache mit dem Auftraggeber wurde die folgende Anforderungsliste aufgestellt. Anhand dieser Anforderungsliste soll eine geeignete Geometrie des Dehnungsaufnehmers gefunden werden. Änderungen, der hier vorliegenden Anforderungsliste, im Laufe der Konstruktion, sind in Absprache mit dem Auftraggeber möglich.

F – Festforderung M – Mindestforderung W – Wunsch	<b>Anforderungsliste für „modulares Messsystem“</b>	Ausgabe: 2 Datum: 06.07.2020
<b>Hauptmerkmal: Geometrie</b>		
F/M/W	Anforderung	
F	Das Messsystem muss entsprechend DIN 650 für 12 mm Nuten passend ausgelegt werden.	
W	Das Messsystem ist unempfindlich gegenüber organischen und metallischen Verschmutzungen.	
W	Das Messsystem ist unempfindlich gegen äußere Einflüsse durch den Bediener, bei der Montage und Demontage der Umformwerkzeuge.	
<b>Hauptmerkmal: Kinematik</b>		
W	Die Rückwirkung zwischen Pressentisch und Messsystem ist zu minimieren.	
W	Die Kennlinie des Messsystems beschreibt einen linearen Verlauf.	
<b>Hauptmerkmal: Kräfte</b>		
F	Das Messsystem ist in der Lage die wirkenden Spannungen dauerhaft zu ertragen.	
<b>Hauptmerkmal: Energie</b>		
W	Des Messsystem benötigt keine zusätzliche Energieversorgung (neben den Messleitungen).	
<b>Hauptmerkmal: Fertigung</b>		
M	Das Messsystem ist aus Standardkomponenten aufgebaut.	
W	Das Messsystem besteht aus nicht mehr als 3 Bauteilen.	
W	Für die Fertigung sind keine Spezialwerkzeuge, Vorrichtungen oder Maschinen nötig.	
<b>Hauptmerkmal: Montage</b>		
W	Die Montage des Messsystems nimmt nicht mehr als 3 Minuten in Anspruch.	
M	Das Messsystem benötigt zur Montage keine Spezialwerkzeuge oder Vorrichtungen.	
F	Das Messsystem lässt sich am Pressentisch, sowie am Pressenstößel mon-	

	tieren.
F	Das Messsystem lässt sich an beliebigen, freien Positionen innerhalb des Pressentisches montieren.
<b>Hauptmerkmal: Instandhaltung</b>	
W	Verschleißteile sind demontierbar zu gestalten.
W	Die Dauer der Instandhaltung pro Messsystem dauert nicht länger als 20 Minuten.
<b>Hauptmerkmal: Kosten</b>	
W	Die Anschaffungskosten des Systems liegen unter denen des aktuell im Einsatz befindlichen Systems.

## 5.2 Funktionsstruktur

In Abbildung 23 ist die grundlegende Funktionsstruktur des Messsystems dargestellt. Hierbei führen die wirkenden Prozesskräfte zu einer elastischen Deformation des Pressentisches, welche wiederum zu einer Nutflankenverschiebung führt. Diese Verschiebung wird über die Dehnungen im Messsystem und dem hiermit verbundenen Dehnungsmessstreifen erfasst. Innerhalb des Dehnungsmessstreifens führt diese Dehnung zu einer Widerstandsänderung  $\Delta R$ , welche eine Brückenverstimmung  $\Delta V$  zur Folge hat. Über diese Messgröße ist es möglich Rückschlüsse auf die wirkenden Prozesskräfte, bei einem spezifischen Lastfall, zu ziehen.



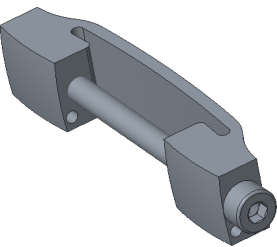
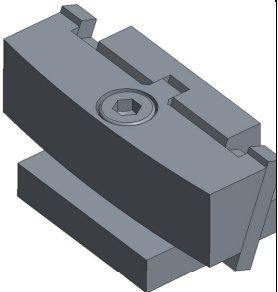
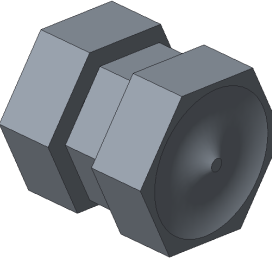
**Abbildung 23: Allgemeine Funktionsstruktur eines wirkstellennahen Inline Messsystems für Messungen auf der Grundlage der elastischen T-Nutflankendeformation**

Darüber hinaus ist, anhand der Abweichung der Brückenverstimmung vom Sollwert, ein Rückschluss auf andere Parameter, wie dem Wartungszustand oder Schäden an Strukturelementen denkbar.

## 5.3 Variantenvergleich

Im Vorfeld wurden bereits drei mögliche Varianten eines Dehnungsaufnehmers entwickelt und analysiert. Diese unterscheiden sich anhand ihres Aufbaues, Anzahl der Bauteile und Umhausung.

**Tabelle 3: Vergleich möglicher Bauformen eines Deformationsaufnehmers**

<b>Merkmal/Version</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>
<b>Darstellung</b>			
<b>Umhausung</b>	teillumhaust	teillumhaust	vollumhaust
<b>Komponentenanzahl</b>	2	8	3
<b>Montageaufwand</b>	gering	hoch	gering
<b>max. Vergleichsspannung</b>	404 MPa	200 MPa	1106 MPa
<b>Fertigung</b>	Drahterodieren	Frästeil	Frästeil
<b>Instandhaltung</b>	simpel	komplex	simpel
<b>Instandhaltung</b>	Austausch des gesamten Deformationsaufnehmers	Austausch der DMS Träger	Austausch der DMS Träger
<b>Dehnung</b>	eindimensional (linienförmig)	eindimensional (linienförmig)	zweidimensional (kreisförmig)

Variante 3 ist eine vollumhauste Version, welche aus 3 Komponenten besteht. Die Dehnungsmessstreifen werden bei dieser Variante in den Druckaufnehmern, welche als Kappen ausgeführt sind, positioniert. Diese Kappen werden im Anschluss auf ein Zwischenstück aufgeschraubt. Das System wird in den Nuten des Pressentisches durch eine Schraubenvorspannkraft gehalten, welche durch die schraubbaren Kappen aufgebracht wird. Die Vorteile dieser Variante liegen in der robusten Ausführung, durch die Vollumhausung und dem sehr gleichmäßigen Dehnungsbild der Kappen. Nachteilig haben sich die sehr hohen Spannungen erwiesen, welche sich aus dem Vorspannprozess und den Kräften der Nutflankendeformation ergeben. Aufgrund dieser sehr hohen Spannungen, ist die Variante 3 in dieser Konfiguration, für die gegebene Nutbreite, nicht nutzbar.

Die Variante 2 ist eine teilumhauste Version, welche aus 8 Komponenten besteht. Die Dehnungsmessstreifen werden bei dieser Variante auf der Rückseite der Druckplatten fixiert. Die Dehnung wird über die Krafteinleitungsseite (linke Seite) durch Druckplatten

zur Kraftausleitungsseite geleitet. Die Vorspannung des Messsystems erfolgt über eine Schraube, mit welcher die Kraffteinleitungsseite vertikal gegen die Druckplatte verschoben wird und diese durch die winklige Anordnung vorspannt. Durch diesen Aufbau, bei welchem lediglich die weichen Druckplatten deformiert werden, ergeben sich geringe Spannungen und eine sehr kostengünstige Instandhaltung, da hier jeweils nur die Druckplatten getauscht werden müssen. Der Hauptnachteil dieser Variante besteht in dem komplexen Aufbau und der Vielzahl an Komponenten. Aufgrund dieser Komplexität und der sehr kleinteiligen Ausführung bei einer Nutbreite von 12 mm wurde diese Variante für die Versuche innerhalb dieser Arbeit nicht als bevorzugte Variante gewählt.

Die Variante 1 wurde für diese Arbeit als Vorzugsvariante gewählt. Durch den sehr einfachen Aufbau, bestehend aus 2 Komponenten ist eine kostengünstige Fertigung möglich. Die Vergleichsspannungen dieser Version unterhalb der der Version 3 aber oberhalb der Version 2. Eine Instandhaltung dieser Version erfolgt über den Austausch des gesamten Messsystems. Nachteilig bei dieser Version ist, dass nur eine Teilumhausung vorliegt, und das System so empfindlich auf äußere Einflüsse reagiert. Darüber hinaus bietet sich die Verwendung dieser Version als Vorzugsvariante an, da durch den einfachen Aufbau die Anzahl der Variablen, bei der simulativen und experimentellen Untersuchung, begrenzt wird. Die einfache Fertigung senkt die Fertigungskosten, im Vergleich zu Version 2 und 3. Außerdem ist durch den einfachen Aufbau die Verwendung bei einer Nut-Größe von 12 mm als unproblematisch anzusehen.

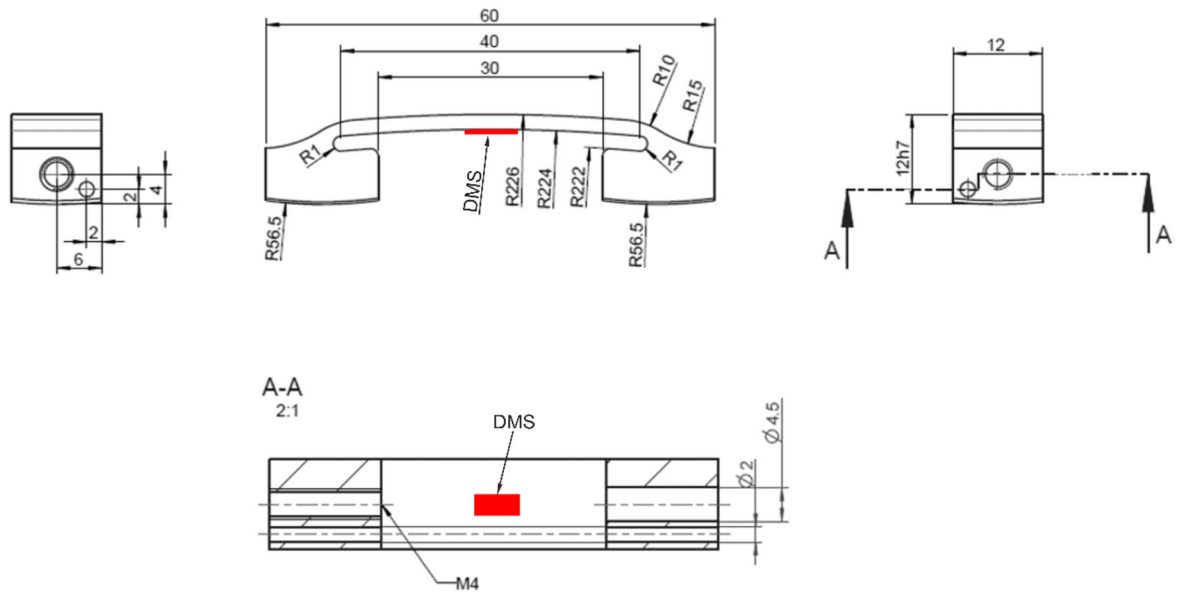
## 5.4 Vorzugsvariante

Der Dehnungsaufnehmer dient als Träger für den Dehnungsmessstreifen (DMS). Dieser wird vor dem Messeinsatz kalibriert. Somit ist es im späteren Messeinsatz möglich anhand des Messsignals auf eine Nutflankenverschiebung und der zugehörigen Prozesskraft, zu schließen.

Als DMS wird auf Wunsch des Auftragsgebers wird ein Dehnungsmessstreifen mit einer maximalen Dehnung von 50000  $\mu\text{m}/\text{m}$  und einem Erfahrungsgemäßen Ansprechverhalten von 0,1  $\mu\text{m}/\text{m}$  verwendet. Der Arbeitsbereich der Dehnung sollte im Bereich  $<1000 \mu\text{m}/\text{m}$  liegen [34].

In Abbildung 24 ist der Dehnungsaufnehmer dargestellt. Dieser ist 60mm breit, 12 mm hoch und 12 mm tief mit einer Passung h7 (+0; -0.018 mm). Die Kontaktfläche auf der Oberseite besitzt einen Radius von 226 mm, somit wird hier ein Linienkontakt in der Nut erreicht. Auf der gegenüberliegenden Seite besitzen die beiden Kontaktflächen einen Radius R von 56,5 mm.





**Abbildung 24: technische Zeichnung der Vorzugsvariante mit allen wesentlichen Maßen, sowie Darstellung der DMS Position (rot)**

Der Dehnungsaufnehmer besitzt eine Bohrung  $\varnothing 4,5$  mm und eine Bohrung M4 auf der gegenüberliegenden Seite. Über diese Gewinde / Bohrungskombination wird der Dehnungsaufnehmer in seiner Einbaulage über eine Schraube DIN 912 M4x55 vorgespannt. Somit wird sichergestellt, dass bei der Nutöffnung und Nutverjüngung der Dehnungsaufnehmer sicher in seiner Position fixiert bleibt. Die Bohrung mit dem  $\varnothing 2$  mm wird, durch Einkleben der durchgeführten Kabel, zur Kabelführung genutzt und dient als Zugentlastung.

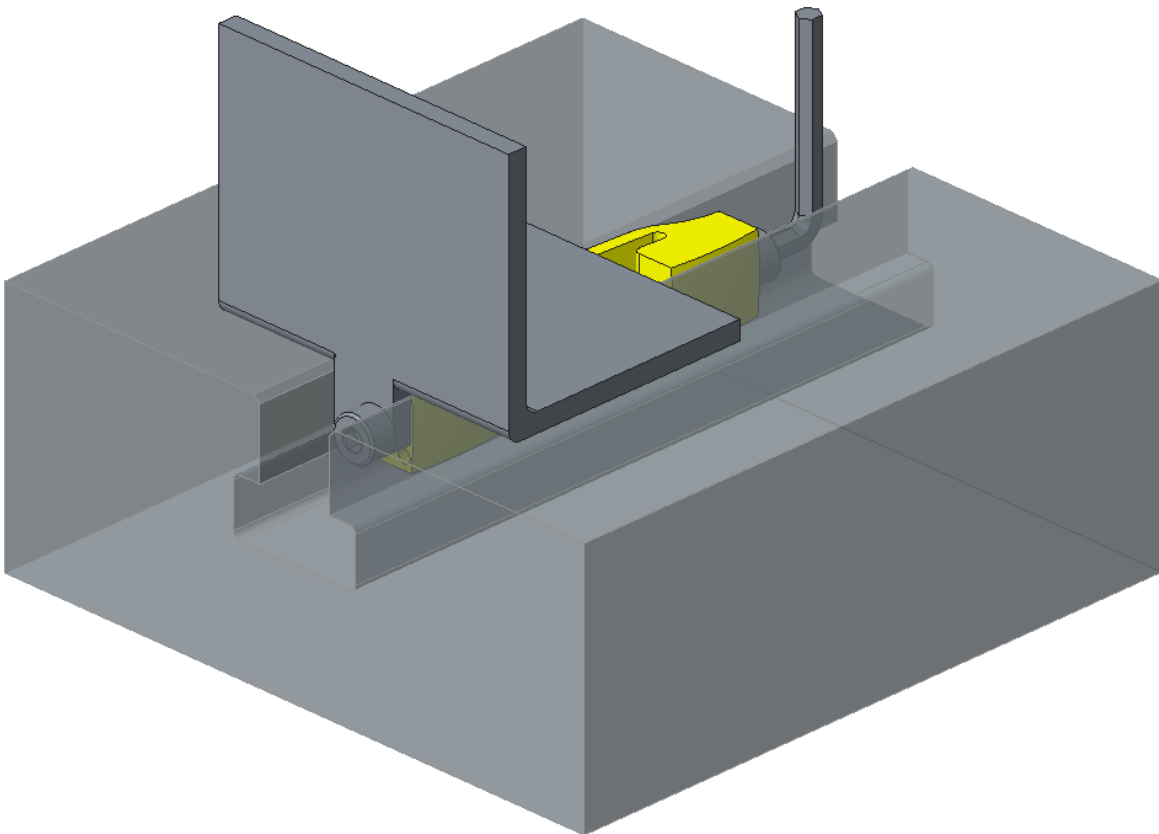
Durch die Klebung des DMS mittig auf der Fläche mit dem Radius 224 mm ist hier der Anspruch an gleichmäßige Dehnung gegeben. Durch die Radien R226, R224 und R222 wird eine möglichst gleichmäßige Dehnung in diesem Bereich sichergestellt. Zusätzlich wird durch die Radien sichergestellt, dass die Vergleichsspannungen innerhalb der Radien niedrig sind und eine plastische Verformung, in der vorgesehenen Größenordnung der Nutflankenverschiebung, ausgeschlossen werden kann.

Die Tolerierung der technischen Zeichnung erfolgt Anhand der Allgmeintoleranzen nach DIM ISO 2768 m, bis auf das Maß 12h7. Durch den benötigten Einmessvorgang des Messsystems, siehe Kapitel 7.1, werden fertigungsbedingte Abweichungen im zulässigen Bereich kompensiert.

Für die Montage des Nutensteins in der Umformpresse ist der Einsatz einer Montagehilfe vorgesehen, siehe Abbildung 25. Diese Montagehilfe dient dazu einen definierten Einbauzustand bei allen verwendeten Nutensteinen zu erreichen. Im Wesentlichen besteht die Montagehilfe aus einem Winkelprofil L 40x40 mm und der Länge 50 mm. An der Winkelbildenden Seite wird ein vertikaler Steg, mit einer Bohrung  $\varnothing 4,5$  mm angebracht. Die Bohrung liegt in der Höhe, in welcher der Nutenstein später installiert werden soll. Durch die Bohrung kann am freien Ende des Nutensteins eine Schraube M4x5 in die Restlänge des

Gewindes M4 des Nutensteins geschraubt werden. Im Anschluss wird die Montagehilfe mit fixiertem Nutenstein in die Einbauposition gelegt, der Nutenstein wird im nächsten Schritt vorgespannt und die Verschraubung M4x5 kann gelöst und die Montagehilfe entfernt werden.

Der Vorteil bei der Verwendung einer Montagehilfe ist, dass ein Verkappen beim Einbau effektiv verhindert wird, sowie die vertikale Position bei allen Nutensteinen identisch ist und die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung des DMS, durch den Montagevorgang, verringert wird.



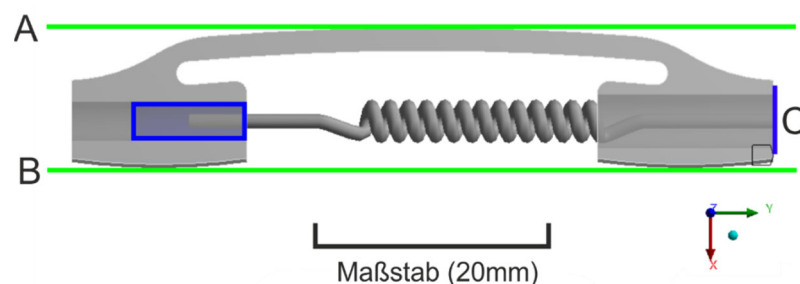
**Abbildung 25: Montage des Nutensteines mithilfe einer Montagehilfe, Darstellung mit benötigtem Sechskantschlüssel zum Vorspannen des Messsystems**

## 6 Simulative Analyse des Dehnungsaufnehmers

Die Simulation dient der Quantifizierung der Dehnungen, welche im Bereich der Innenseite der Deformationsfläche auftreten. Diese sollten im Bereich, wie in Kapitel 5 beschrieben, liegen. Des Weiteren sollen die Vergleichsspannungen bestimmt werden, um eine plastische Verformung des Dehnungsaufnehmers ausschließen zu können.

### 6.1 Modellaufbau

Zwischen Oberfläche A und dem Dehnungsaufnehmer besteht ein reibungsbehafteter Kontakt mit einem Reibungskoeffizienten von 0,12. Zwischen der Oberfläche B und dem Dehnungsaufnehmer besteht ein reibungsbehafteter Kontakt mit einem Reibungskoeffizienten von 0,12. Die Vorspannkraft, welche in der Praxis durch eine DIN 912 M2x55 Schraube aufgebracht wird, wird im Modell durch ein Federelement erzeugt. Der blau markierte Bereich C markiert den Bereich zwischen welchen das Federelement gespannt wird.



**Abbildung 26: Randbedingungen bei der Simulation des Dehnungsaufnehmers**

Das Federelement, welches die Eigenschaften der Schraubenverbindung modellhaft charakterisiert, wird durch die Federsteifigkeit und die Federlänge beschrieben. Diese Eigenschaften sollten dem zu ersetzenden Element entsprechen. Die Federsteifigkeit wird durch das E-Modul  $E$ , dem Spannungsquerschnitt  $A_s$  und der Federlänge  $L_s$  anhand folgender Gleichung beschrieben.

$$c_s = \frac{E * A_s}{L_s} = \frac{210000 \frac{N}{mm^2} * 8,78mm^2}{55mm} = 33523,63 \frac{N}{mm} \quad (2)$$

Das erforderliche Schraubenanziehmoment wird im folgenden Arbeitsschritt bestimmt. Um plastische Verformungen zu vermeiden, sollte dieses beim Einsatz des Messsystems nicht überschritten werden. Das erforderliche Schraubenanziehmoment ist abhängig von

der gewählten Montagevorspannkraft  $F_M$ , welche die zulässige Schraubenvorspannkraft, abhängig von der Festigkeitsklasse, nicht übersteigen darf. Für die Schraubenverbindung des Messsystems wurde eine Vorspannkraft von 1800N gewählt, dies entspricht ca. 50% der zulässigen Schraubenvorspannkraft einer Schraube mit der Festigkeitsklasse 8.8. Erste überschlägige Berechnungen ergaben, dass diese Vorspannkraft im Folgenden den besten Kompromiss zwischen einer sicheren Fixierung in der Nut und möglichst geringen Spannungen im Dehnungsaufnehmer bietet. Darüber hinaus werden die Werte für die Steigung  $P$ , der Reibzahl des Gewindes  $\mu_G$  und der Kopfauflagefläche  $\mu_K$ , der Flankendurchmesser des Gewindes  $d_2$  und der mittlere Auflageradius  $r_m$  für die Berechnung mittel Formel (3) benötigt.

$$M_A \approx F_M * (0,16 * P + 0,58 * \mu_G * d_2 + \mu_K * r_m) \quad (3)$$

$$M_A \approx 1800N * (0,16 * 0,7mm + 0,58 * 0,1 * 3,55mm + 0,12 * 2,75mm) \approx 1,2Nm$$

Das empfohlene Schraubenanzugsmoment für das beschriebene Messsystem beträgt somit 1,2 Nm.

Die Operationen in den Lastschritten sind in Tabelle 4 aufgeführt. Im Lastschritt 1 wird ein Vorspannen des Messsystems simuliert, im Lastschritt 2 wird anschließend eine Verschiebung auf den Dehnungsaufnehmer aufgebracht, welche die Tischdurchbiegung simuliert. Im 3. Lastschritt erfolgt eine Nutflankenöffnung. Diese erfolgt, um sicherstellen zu können, dass der Dehnungsaufnehmer in der Nut fixiert bleibt und ein Verschieben durch das Eigengewicht des Messsystems ausgeschlossen werden kann.

**Tabelle 4: Lastschritte**

<b>Lastschritt</b>	<b>Bemerkung</b>
1	<b>Feder (Ersatzschraubenelement) vorspannen (C)</b> Federsteifigkeit: 33524N/mm Vorspannkraft: 1,8kN (erforderliches Schraubenanzugsmoment: 1,2Nm)

	<b>Linienkontakt R 226 mm</b> Reibungskoeffizient: 0,12 <b>Linienkontakte R 56,5 mm</b> Reibungskoeffizient: 0,12
2	<b>Oberfläche A – externe Verschiebung</b> X-Komponente: 0 mm Y-Komponente: 0 mm Z-Komponente: 0 mm X-Rotation: 0° Y-Rotation: 0° Z-Rotation: 0° <b>Oberfläche B – externe Verschiebung</b> X-Komponente: -0,064 mm Y-Komponente: 0 mm Z-Komponente: 0 mm X-Rotation: 0° Y-Rotation: 0° Z-Rotation: 0°
3	<b>Oberfläche A – externe Verschiebung</b> X-Komponente: 0 mm Y-Komponente: 0 mm Z-Komponente: 0 mm X-Rotation: 0° Y-Rotation: 0° Z-Rotation: 0° <b>Oberfläche B – externe Verschiebung</b> X-Komponente: 0,040 mm Y-Komponente: 0 mm Z-Komponente: 0 mm X-Rotation: 0° Y-Rotation: 0° Z-Rotation: 0°

## 6.2 Vergleichsspannung und Bauteilwechselfestigkeit

Die Vergleichsspannungen werden in den folgenden Betrachtungen für die Auswahl eines geeigneten Werkstoffes und dessen Wärmebehandlungszustandes herangezogen. Die Vergleichsspannung sollte hierbei nicht die Bauteilwechselfestigkeit überschreiten. Zur Berechnung dieser nach Formel (4), wird die Wechselfestigkeit  $\sigma_W$  nach der Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen“ (FKM-Richtlinie) wie folgt aus der Zugfestigkeit  $R_m$  und dem Umrechnungsfaktor  $f_{W,\sigma}$  ermittelt [19]:

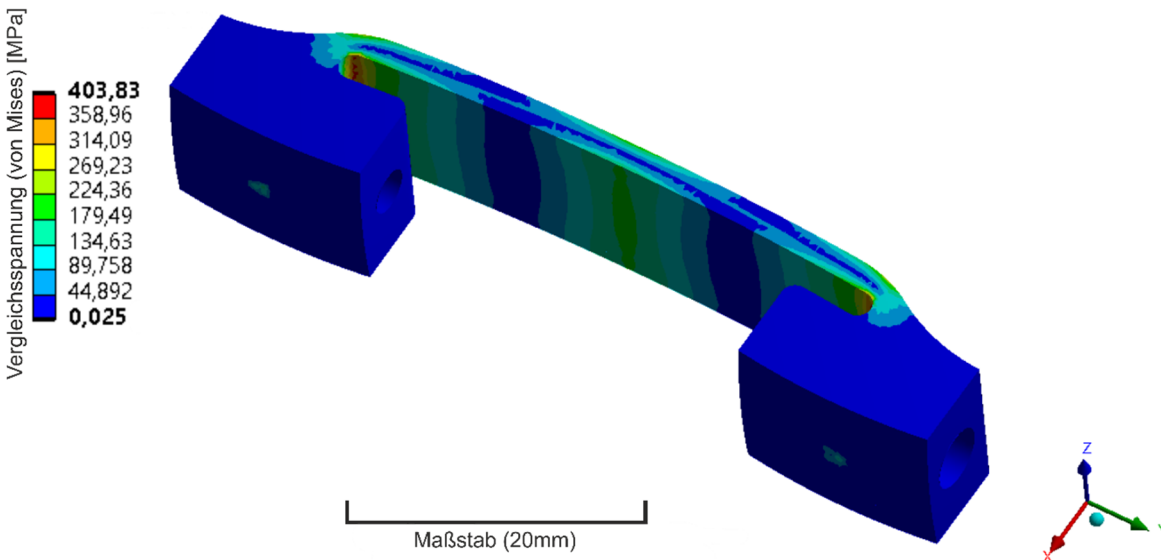
$$\sigma_W = f_{W,\sigma} * R_m \quad (4)$$

Für den Werkstoff C45 ergibt sich somit folgende Wechselfestigkeit (Größeneinfluss bereits in der Zugfestigkeit  $R_m$  berücksichtigt):

$$\sigma_W = 0,45 * 850 \text{ MPa} = 382 \text{ MPa}$$

Die Bauteilwechselfestigkeit  $\sigma_{WK}$  ermittelt nach FKM-Richtlinie beträgt 460 MPa, ausführliche Rechnung siehe Anlagen. Die Bauteilwechselfestigkeit gibt Auskunft darüber, welche Belastung dauerhaft vom Bauteil ertragbar ist. Somit ergibt sich bei,  $\sigma < \sigma_W$  (403 MPa < 460 MPa), dass das Bauteil als Dauerfest gilt.

Die Vergleichsspannung erreicht im Lastschritt 2 im Radius R1 ein Maximum von 403 MPa. Im Bereich der Linienkontakte mit dem Radius R 56,5 mm beträgt die Spannung 170 MPa, im Bereich des Linienkontaktes mit dem Radius 226 mm wird eine Spannung von 213 MPa erreicht, siehe Abbildung 27.



**Abbildung 27: Vergleichsspannungen des Dehnungsaufnehmer bei einer Nutflankenverschiebung  $\Delta x$  von 60  $\mu\text{m}$**

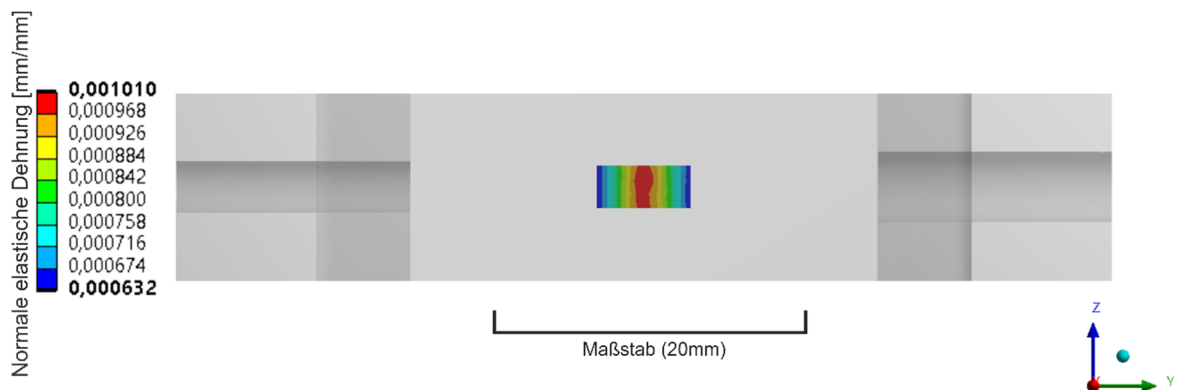
Die Sicherheit beträgt laut Formel (5), für die maximalen Vergleichsspannungen, siehe Abbildung 27,  $S = 1,14$ . Für Messgeräte ohne sicherheitsrelevante Funktion ist eine Sicherheit in dieser Größenordnung als ausreichend zu bewerten.

$$S = \frac{\sigma_{WK}}{\sigma} = \frac{460 \text{ MPa}}{403 \text{ MPa}} = 1,14 \quad (5)$$

Bei der gegebenen Vergleichsspannung, sowie der Bauteilwechselfestigkeit wird die Verwendung eines C45 (1.0503) empfohlen, welcher als Berechnungsgrundlage für die Bauteilwechselfestigkeit herangezogen wurde. Dieser entspricht den Anforderungen der Betriebsfestigkeit und denen als Messmittel. Durch eine geeignete Wärmebehandlung kann dementsprechend eine verschleißfeste Oberfläche geschaffen werden, welche unerwünschten Effekten durch wiederholte Ein- und Ausbauvorgänge entgegenwirkt.

### 6.3 Dehnung

Die maximale Dehnung sollte den maximal zulässigen Wert des verwendeten Metallfolien-DMS in keinem Lastschritt und an keiner Position überschreiten. Die maximal zulässige Dehnung des verwendeten DMS beträgt  $50000 \mu\text{m}/\text{m}$ , siehe Kapitel 5. Die maximale mittlere Dehnung der Deformationsfläche beträgt  $742 \mu\text{m}/\text{m}$  im Lastschritt 2. Die minimale mittlere auftretende Dehnung tritt im Lastschritt 3 auf und beträgt  $119 \mu\text{m}/\text{m}$ .



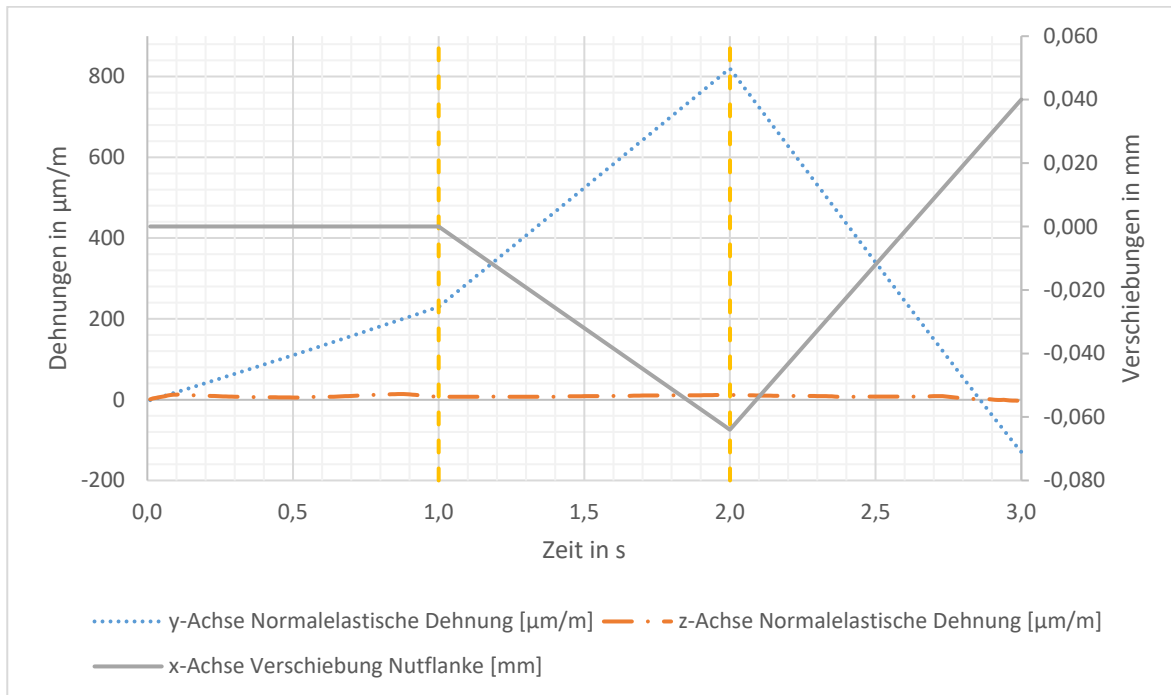
**Abbildung 28: Dehnung im Bereich des DMS bei einer Nutflankenverschiebung  $\Delta x$  um  $60 \mu\text{m}$**

Von besonderem Interesse, neben den Maximalwerten, ist der Verlauf der Dehnung und Verschiebungen in Abhängigkeit der Lastschritte (LS). In Abbildung 29 ist die Normalelastische Dehnung in y-Richtung und x-Richtung (im Folgenden als Querdehnung bezeichnet), im Klebebereich des DMS, dargestellt. Darüber hinaus wurde der Verlauf der Nutflankenverschiebung (sekundäre Ordinate) abgebildet. Die einzelnen Abschnitte der Lastschritte wurden durch vertikale Linien (gelb) gekennzeichnet.

Gut zu erkennen ist, dass die Normalelastische Dehnung der y-Achse den gewünschten linearen Verlauf besitzt. Ein linearer Verlauf hat den Vorteil, dass durch den Dehnungsaufnehmer keine oder nur sehr geringe Linearitätsabweichungen zu erwarten sind.

Die Betrachtung der normalelastischen Dehnung in z-Richtung bzw. Querdehnung ist von Bedeutung, da diese unter der Querempfindlichkeit des verwendeten DMS liegen muss. Die Querdehnung beeinflusst den Widerstand des DMS und verfälscht die Messwerte der Längsdehnung, daher sollte dieser Wert möglichst gering sein [28].

Der Bereich zwischen 0 und 1 s entspricht dem Lastschritt 1, welcher das Vorspannen des Messsystems beschreibt. Der Bereich zwischen 1 und 2 s entspricht dem Lastschritt 2, bei welchem die Nutenflanke um  $-80\ \mu\text{m}$  verschoben wird, dies entspricht einer Verjüngung der Nutbreite. Der Bereich zwischen 2 und 3 s entspricht dem Lastschritt 3, bei welchem die Nutflanke, im Vergleich zum Lastschritt 1, um  $+40\ \mu\text{m}$  geöffnet wird.



**Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Nutflankenverschiebung und Dehnung (Mittelwerte über die DMS Fläche)**

Weiterhin ist in Abbildung 29 sehr gut zu erkennen, dass der lineare Verlauf auch bei einem Lastwechsel (Nutschließung zu Nutöffnung) keine Abweichung der Linearität zeigt.

Die Dehnung in y-Richtung schwankt zwischen  $229,55\ \mu\text{m/m}$  am Ende des ersten Lastschrittes bzw. nach dem Vorspannen des Messsystems. Im zweiten Lastschritt nimmt die Dehnung Werte bis zu  $819,93\ \mu\text{m/m}$  an. Hier beträgt der Messbereich somit  $590,38\ \mu\text{m/m}$ , welcher im Bereich des zulässigen Messbereichs des verwendeten DMS liegt.

**Tabelle 5: Dehnung und Vergleichsspannung in den einzelnen Lastschritten der Simulation**

	<b>Lastschritt</b>	<b>Wert</b>
Dehnung	min. LS 1	$-1,07\ \mu\text{m/m}$
	max. LS 1	$229,55\ \mu\text{m/m}$
	min. LS 2	$235,44\ \mu\text{m/m}$
	max. LS 2	$819,93\ \mu\text{m/m}$
	min. LS 3	$-129,52\ \mu\text{m/m}$



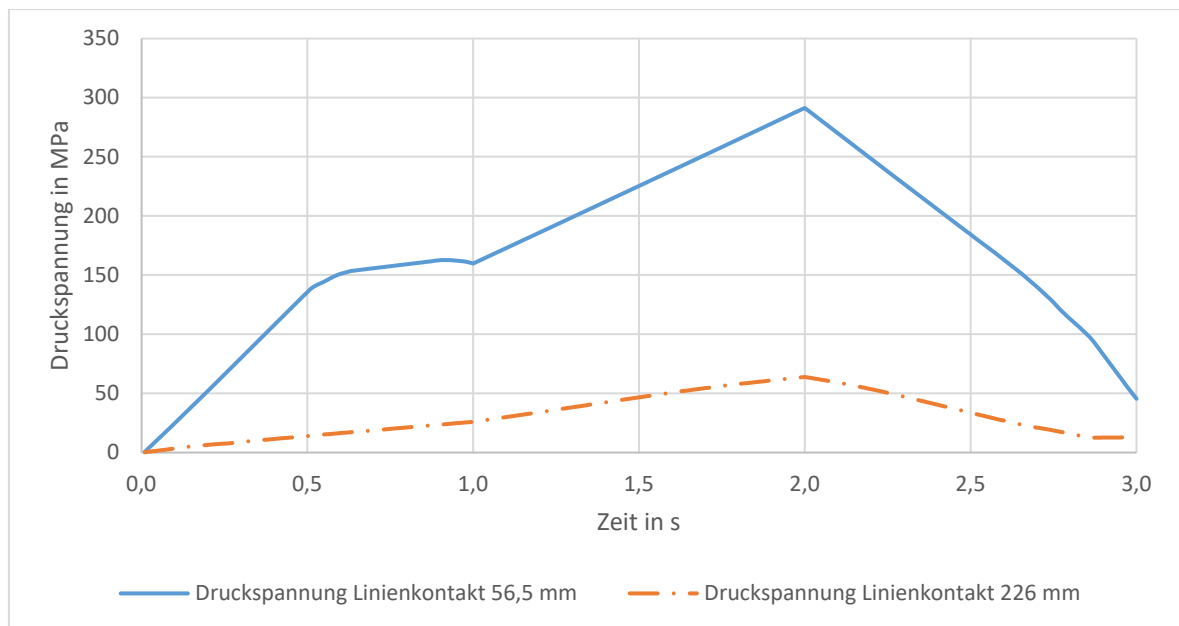
	max. LS 3	810,31 $\mu\text{m/m}$
Vergleichsspannung	max. LS 1	207,61 MPa
	max. LS 2	403,78 MPa
	max. LS3	88,69 MPa

Wie in Tabelle 5 dargestellt, wird zu keinem Zeitpunkt die zulässige Spannung von 460 MPa überschritten, siehe Kapitel 6.2.

### 6.4 Kontaktstatus und Druckspannungen

Der Kontakt zwischen Messsystem und Nutenflanken muss während des gesamten Messvorganges bestehen bleiben. Im Fall der Nutverjüngung wird diese Bedingung durch die Nutflankenverschiebung erfüllt. Im Fall der Nutöffnung muss diese Bedingung durch die Vorspannung der Messsystems erfüllt werden. Eine Betrachtung des Zusammenhanges zwischen der Nutdeformation und dem Kontaktdruck ist daher nötig.

Sollte sich der Kontaktstatus von kontaktiert zu nicht kontaktiert bzw. gelöst ändern, wäre ein Zeichen, dass die Druckspannung den Wert 0 MPa annimmt. In Abbildung 30 wurde der Druckspannungsverlauf für die Kontakte über die Zeit dargestellt.



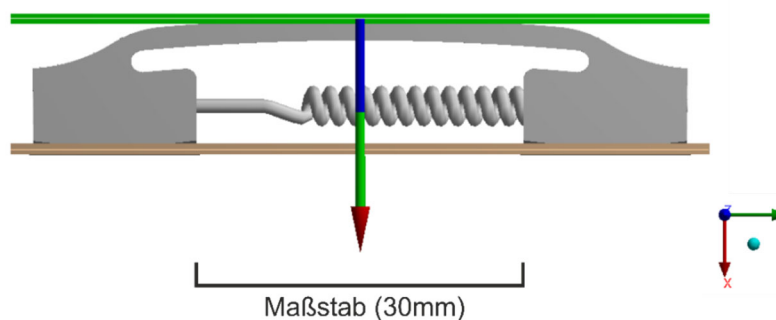
**Abbildung 30: Druckspannungen der Kontaktstellen des Dehnungsaufnehmers innerhalb der entsprechenden Lastschritte**

Zu erkennen ist, dass die Druckspannung beim Öffnen der Nut (Sekunde 2 bis 3) sinkt, aber nicht den Wert Null annimmt. Eine Öffnung der Nutflanken um mehr als 40  $\mu\text{m}$  ist aber als kritisch anzusehen, da hier die Druckspannungen Werte nahe 0 MPa annehmen.

Die Werte der Druckspannung liegen im Bereich zwischen  $> 0$  MPa und 291,21 MPa. Druckspannungen größer als die Streckgrenze des verwendeten Materials sind ebenfalls als kritisch zu bewerten, da es hierbei zur plastischen Verformung der Kontaktstellen kommen kann. Dies hat auf kurze Sicht Messabweichungen in unbekannter Höhe zur Folge, auf lange Sicht wird durch plastische Verformungen das Messsystem zerstört. Es wird daher empfohlen eine verschleißfeste Oberfläche durch geeignete Wärmebehandlungsmaßnahmen herzustellen, z. B. durch Härten oder Nitrieren. Neben der Verringerung der Gefahr von plastischen Verformungen an den Kontaktstellen wird hiermit auch die Wiederverwendbarkeit, durch wiederholte Ein- und Ausbautvorgänge verbessert, da somit der Verschleiß der Oberflächen reduziert werden kann.

## 6.5 Reaktionskräfte

Während der Messung muss ausgeschlossen werden, dass es zu einer Rückwirkung zwischen Messsystem und Messstelle kommt. Zu einer Beeinflussung der Nutenflankenverschiebung kann durch die Steifigkeit des Messsystems, welche durch die Höhe der Reaktionskräfte beschrieben wird, kommen. Im Folgenden wird daher die Höhe der Kraftreaktion für die Kontaktflächen während des Messvorganges ermittelt. Da die Reaktionskräfte des Linienkontaktes betragsmäßig die gleiche Größe wie die beiden Linienkontakte, mit dem Radius 56,5 mm, annehmen muss, erfolgt eine Auswertung nur für den Linienkontakt mit dem Radius 226 mm [20]. Besonderes Augenmerk gilt den, für das Messsystem, bestimmenden Reaktionskräften in X-Richtung, siehe Abbildung 31.



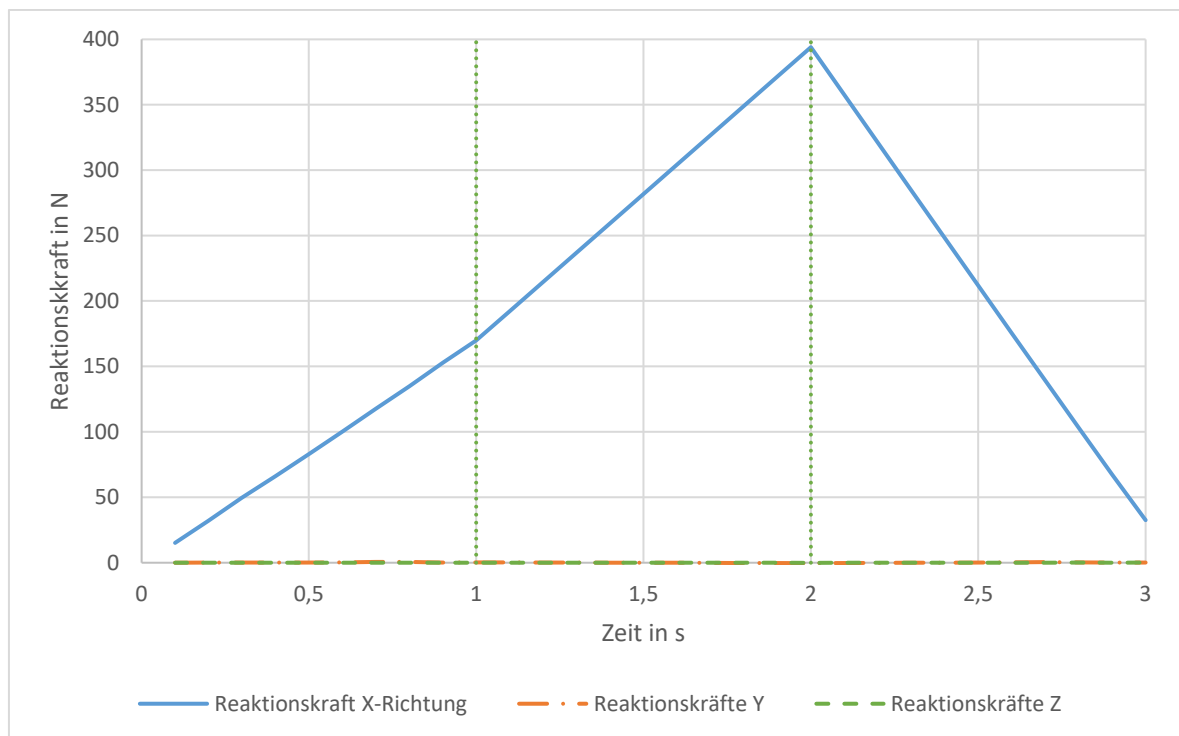
**Abbildung 31: Systembestimmenden Reaktionskräfte des Dehnungsaufnehmers bei einer Nutflankenverschiebung (Darstellung der Reaktionskräfte nur für die Kontaktstelle mit  $R = 226\text{mm}$ )**

Prinzipiell gilt, dass die Reaktionskräfte möglichst gering sein sollten. Ein Mindestmaß, welches das Messsystem gegen Verschieben sichert, darf trotzdem nicht unterschritten werden. Die Haftreibungskraft  $F'_{Rmax}$  ist das Produkt aus der Haftreibungszahl  $\mu'$  und der Normalkraft  $F_N$ . Die Höhe der Haftreibungszahl wird wie in der Simulation auf 0,12 geschätzt, das Gewicht des Nutensteins beläuft sich auf rund 26,4 Gramm. Die kritische Kraft, ab welcher eine Verschiebung durch das Eigengewicht des Nutensteines erfolgen könnte, lässt sich wie in Formel (6) beschrieben berechnen [15]:

$$F'_{Rmax} = \mu' * F_N = 0,12 * 0,00264 = 0,0003168N \quad (6)$$

Unterschreitet die Reaktionskraft aus der Simulation die Haftreibungskraft von  $3,2 * 10^{-4}N$  ist ein sicherer Halt des Nutzensteins nicht mehr gegeben.

In Abbildung 32 ist der Verlauf der Reaktionskraft des Linienkontaktes dargestellt, durch vertikale Linien bei Sekunde 1 und 2 wurden die Lastschritte gekennzeichnet. Zu erkennen ist, dass die Reaktionskräfte in Y- und Z-Richtung im Bereich um 0 N liegen, diese somit keinen nennenswerten Anteil an den resultierenden Kräften haben. Die Reaktionskraft in X-Richtung liegt in Höhe von 15N, im Bereich des Vorspannens des Messsystems und 32N im Bereich des 3. Lastschrittes, welcher die Nutöffnung darstellt. Zu keinem Zeitpunkt nimmt die Reaktionskraft in X-Richtung einen Wert kleiner als die kritische Haftkraft an. Während des gesamten Messvorganges ist somit ein Verschieben des Nutzensteines, aufgrund des Eigengewichts, ausgeschlossen. Zu beachten ist, dass äußere Einflüsse auf den Nutzenstein, in Form von Kräften, zu vermeiden sind. Durch die geringe Vorspannkraft des Messsystems würde dieses schon ab einer Kraft  $F_N$  von 125 N verrutschen. Im Idealfall ist die Einbaustelle des Nutzensteins durch Abdecken zu schützen oder anderweitig kenntlich zu machen, um ein versehentliches Verschieben des Nutzensteins zu verhindern.



**Abbildung 32: Verlauf der Reaktionskräfte des Dehnungsaufnehmer innerhalb den entsprechenden Lastschritten**

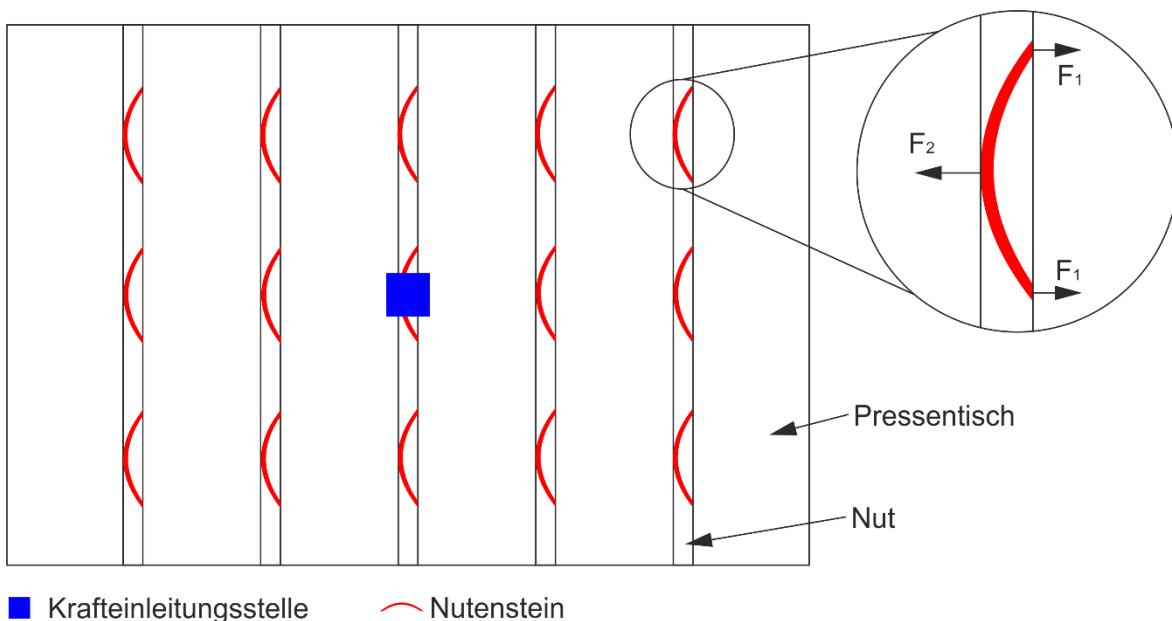
Der Betrag der Reaktionskräfte bei der Nutverjüngung um  $64 \mu m$  liegt im Bereich um 394 N.

## 6.6 Rückwirkung

Das System dessen Eigenschaften man bestimmen will, kann durch das Messsystem beeinflusst werden, dieser Effekt wird als Rückwirkung bezeichnet [34]. In diesem Fall misst man nicht die Eigenschaften des Systems, sondern die Eigenschaften des Systems mit Messvorrichtung. Diese Beeinflussung muss möglichst klein sein oder die Messwerte müssen im Anschluss korrigiert werden. Die Größe der Rückwirkung ist im Wesentlichen abhängig von der Steifigkeit, welche zusätzlich durch die Messvorrichtung in das Messobjekt eingebracht wird. Allgemein gilt, dass der Einfluss der Rückwirkung umso größer wird, desto größer die vom Messsystem aufgezehrte Formänderungsarbeit an der Messstelle ist, im Vergleich zur gesamten Formänderungsarbeit am Messobjekt [28].

Wie in Kapitel 6.5 festgestellt ergeben sich pro Nutenstein Reaktionskräfte von maximal 400 N pro Messstelle. In der hier beschriebenen Simulation wurde als Grundlage das Modell, wie in Kapitel 4 beschrieben, verwendet. Das Modell wurde um eine 3x5 Matrix aus den Reaktionskräften des Messsystems erweitert, siehe Abbildung 33. Die Reaktionskräfte bestehen aus der Kraft  $F_1$  in Höhe von 200N und der Kraft  $F_2$  in Höhe von 400N.

Sollte diese Kraft zu keiner signifikanten Beeinflussung der Tischdeformation führen ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Nutensteine auf das Messsystem klein genug ist und somit nur die Eigenschaften des Systems gemessen werden.



**Abbildung 33: Modellaufbau der Simulation zur Beurteilung der Rückwirkung zwischen Messsystem und Messstelle**

In der Auswertung ergibt sich qualitativ die gleiche Verschiebungskontur wie in Kapitel 4.2. Die Abweichung der Messwerte zwischen dem Pressentisch ohne Nutenstein und mit Nutensteinen liegt im Bereich der größten Verschiebung in der Tischmitte bei 0,08% (ohne Nutenstein: -0,2512 mm; mit Nutenstein -0,2510 mm; Differenz:  $2,0 \cdot 10^{-4}$  mm). Durch die äußerst geringen Abweichungen, welche deutlich unter  $1 \mu\text{m}$  liegen, ist davon auszu-

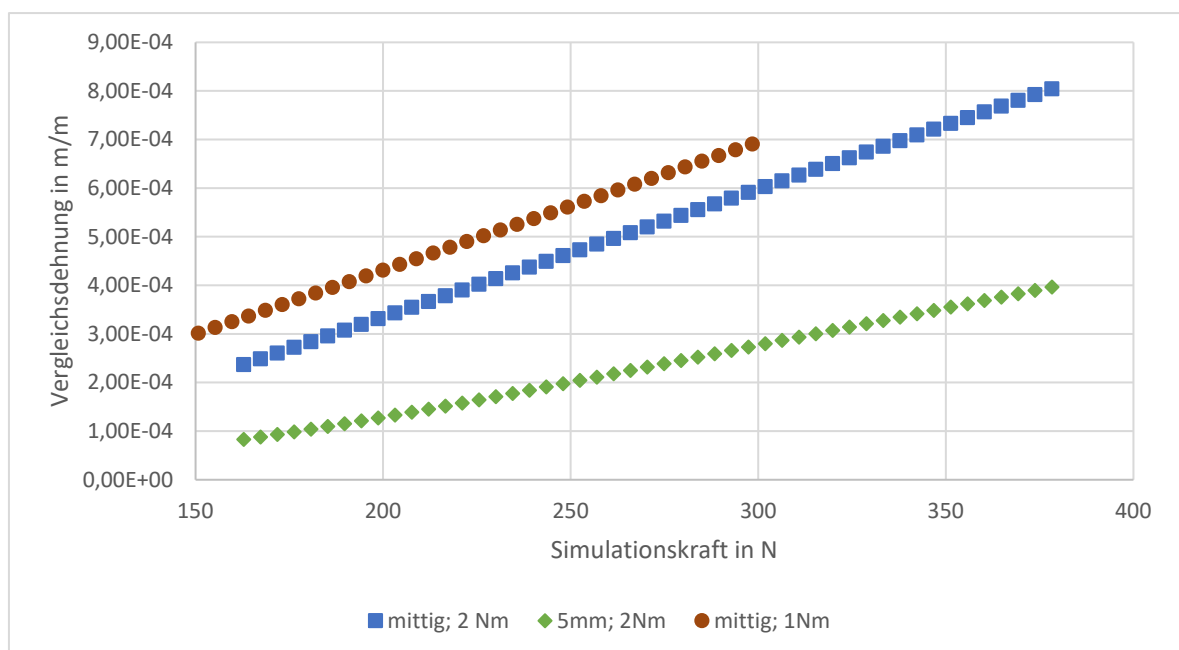
gehen, dass keine signifikante Rückwirkung durch das Messsystem erfolgt. Das System kann somit ohne Notwendigkeit einer Korrektur für diesen Lastfall verwendet werden.

## 6.7 Fehlerbetrachtung

Zur Fehlerbetrachtung, aufgrund der Positioniergenauigkeit der Dehnungsmessstreifen im Dehnungsaufnehmer und zum Einfluss der Schraubenvorspannung soll im Folgenden die Simulation um diese Größen variiert werden. Da eine Positionierung der Dehnungsmessstreifen per Hand erfolgt, kann es hierbei zu erheblichen Unterschieden in der Positionierung kommen. Die Simulation erfolgte bisher immer mit mittig positioniertem DMS, im Folgenden wird die Position in 1 mm Schritten bis zu einer Exzentrizität bis 5 mm variiert.

Als zweite Einflussgröße beim Einsatz des Messsystems, kann die Schraubenvorspannung Einfluss auf die Messwerte nehmen. Im Folgenden soll daher die Kennlinie simulativ für unterschiedliche Schraubenvorspannungen ermittelt werden.

In Abbildung 34 ist zu erkennen, dass die Steigung durch eine Variation des Schraubenvorspannmomentes nicht wesentlich beeinflusst wird, erkennbar ist aber eine Nullpunktverschiebung (Offset). Eine Positioniergenauigkeit des DMS beeinflusst hingegen die Steigung und der Offset gleichermaßen. Eine Variation der Steigung, durch unterschiedliche Klebpositionen des DMS, machen eine Kalibrierung oder ein Einmessen des Messsystems Nutzenstein nötig, um quantitative Rückschlüsse auf die Kraft bzw. die Verschiebung ziehen zu können. Der Einfluss der Nullpunktverschiebung kann durch einen Nullpunktgleich in der Messsoftware nach dem Vorspannen des Nutzensteines minimiert werden.



**Abbildung 34: Kennlinie der Vergleichsdehnung des Messsystems über der Simulationskraft, in Abhängigkeit der Variation der DMS Exzentrizität und der Vorspannkraft**

Die Erkenntnisse aus Abbildung 34 werden durch die Daten der Simulation in Tabelle 6 bestätigt. Die Steigung variiert durch eine Änderung des Vorspannmomentes um maximal 0,1% im Bereich von 1 Nm Vorspannmomentvarianz, die Nullpunktverschiebung um maximal 58%. Der Einfluss auf die Kennlinie durch die Exzentrizität des DMS liegt im Bereich der Steigung von maximal 44% und im Bereich der Nullpunktverschiebung von maximal 15%.

**Tabelle 6: Kennlinie für variierte Einflussgrößen**

[mm] DMS Exzentrizität	[Nm] Vorspannmoment	[m/m] Steigung	[µm/m] Nullpunktverschiebung
0	1	2,6377 (100,1%)	-302,58 (157,5%)
0	1,5	2,6356 (100,1%)	-143,76 (74,8%)
0	2,5	2,6342 (100%)	-240,28 (125,1%)
<b>0</b>	<b>2</b>	<b>2,6340 (100%)</b>	<b>-192,10 (100%)</b>
1	2	2,5791 (97,9%)	-192,04 (99,9%)
2	2	2,4051 (91,3%)	-190,45 (99,1%)
3	2	2,1268 (80,7%)	-187,02 (97,3%)
4	2	1,8109 (68,8%)	-181,42 (94,4%)
5	2	1,4700 (55,8%)	-163,22 (85,0%)

Es ergeben sich anhand der Erkenntnisse aus Tabelle 6 folgende, für den untersuchten Lastfall, gültige Erkenntnisse:

- Auswirkungen der DMS Exzentrizität
  - Starker Einfluss auf die Steigung
  - Geringer Einfluss auf die Nullpunktverschiebung
- Auswirkungen der Änderungen der Vorspannung
  - Starker Einfluss auf die Nullpunktverschiebung
  - Sehr geringer Einfluss auf die Steigung

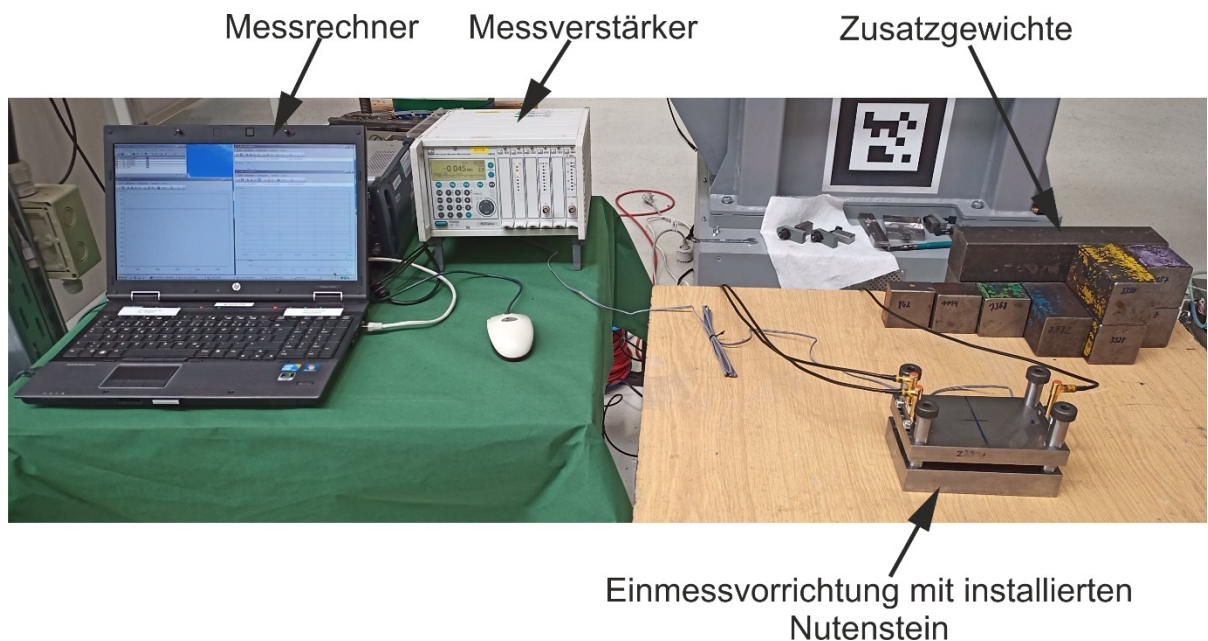
Anhand dieser Daten wird ersichtlich, dass eine Positionierung des DMS von Hand im Messsystem zwangsweise eine Kalibrierung nötig macht. Bereits geringe Exzentrizitätsabweichungen von 3 mm bedingen eine Verringerung der Steigung der Kennlinie um 19,3%. Eine Abweichung des Schraubenvorspannmomentes von dem empfohlenen Schraubenvorspannmoment von 2 Nm hat einen sehr geringen Einfluss auf die Steigung der Kennlinie des Messsystems. Die Nullpunktverschiebung, aufgrund des Vorspannmoments von 57,5%, hat keine praktische Relevanz. Durch einen Nullpunktgleich des vorgespannten Systems kann dieser systematische Fehler kompensiert werden.

## 7 Experimentelle Erprobung

Im Feldversuch sollen Erkenntnisse zum allgemeinen Verhalten des Messsystems unter Realbedingungen gewonnen werden. Dazu wurden 3 Nutensteine gefertigt mit welchen der quantitative und qualitative Verlauf der Messkurven betrachtet werden und mit den in Kapitel 6 ermittelten Messwerten verglichen werden soll. Als Ergebnis ist die Brauchbarkeit des Messsystems zu identifizieren.

### 7.1 Messaufbau Einmessvorgang

Zur Validierung der in der Simulation getroffenen Erkenntnisse, wurden die bisher gefertigten Nutensteine einem Einmessvorgang unterzogen. Hierzu wurde eine Vorrichtung konstruiert, welche die Verhältnisse der Nutensteine innerhalb der Nuten im Pressentisch simuliert. Hierzu wird jeder Nutenstein in der Messvorrichtung positioniert. Im Anschluss wird die Vorrichtung mit einer definierten Kraft belastet, wobei hier zeitgleich die Brückenverstimmung der in den Nutenstein befindlichen DMS ausgelesen wird, sowie die Verschiebung in X-Richtung über Feinzeiger erfasst wird. Der Aufbau des Einmessvorgangs erfolgt wie in Abbildung 35 dargestellt.



**Abbildung 35: Versuchsaufbau des Einmessvorgangs**

Der Einmessvorgang sieht vor, dass ein Nutenstein in der Einmessvorrichtung installiert wird. Im Anschluss wird der Nutenstein durch ein definiertes Drehmoment über die Vorspannschraube vorgespannt, üblicherweise beträgt das Vorspannmoment 2 Nm. Nach-

dem die Einrichtung abgeschlossen ist erfolgen die Messungen, für welche die Einmessvorrichtung mithilfe der Zusatzgewichte bis auf 50%, der in Kapitel 6.5 ermittelten Reaktionskräfte, belastet wird. Werte oberhalb der 50% Marke können wie in [11] beschrieben extrapoliert werden. Da die Nutenflankenverschiebung auf der Tischdurchbiegung beruht, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, kann für elastische Deformationen, wie in diesem Lastfall die Nutflankenverschiebung, extrapoliert werden.

Anhand der drei bekannten Messgrößen (Brückenverstimmung, Kraft und Verschiebung) lassen sich Verschiebung-Dehnungskurven, Kraft-Dehnungskurven bzw. Verschiebung-Kraftkurven darstellen. Diese Kurven sollen im Anschluss mit den simulativen Ergebnissen verglichen werden.

## 7.2 Nullpunktverschiebung und Linearitätsabweichung

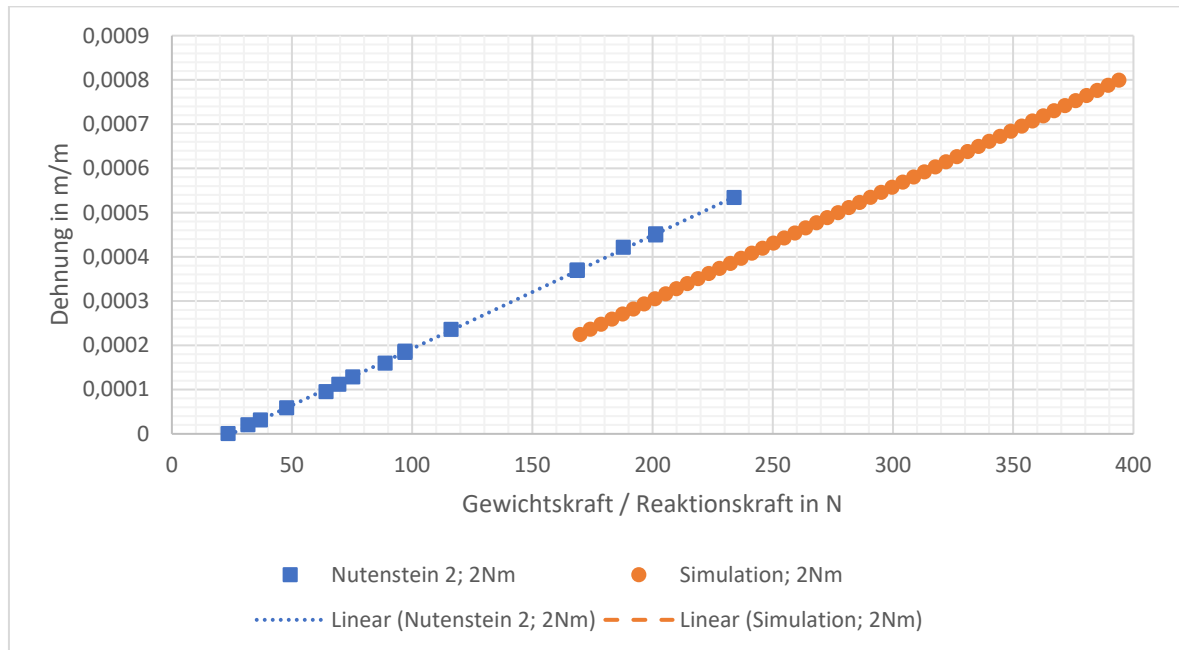
Die Nullpunktverschiebung und Linearitätsabweichungen beruhen maßgeblich auf bekannten systematischen Fehlern, siehe Kapitel 6.7. Bekannte systematische Fehler zeichnen sich dadurch aus, dass diese auf festen Ursachen beruhen und somit korrigierbar sind.

Für die Glättung der Messreihen wurde mittels Filter der gleitende Mittelwert bestimmt. Die Filterung erfolgt hierbei durch Entfernen erhöhter Frequenzanteile, entspricht also einem Tiefpassfilter. Durch diese Filterung lassen sich vor allem periodische Störungen effektiv filtern, welche z. B. durch äußere Einflüsse wie Schwingungen auftreten können.

Im Folgenden sollen exemplarisch die Ergebnisse des Einmessvorgangs für den Nutenstein 2 dargestellt werden. Die im Einmessvorgang ermittelten realen Werte werden mit den theoretisch simulativ ermittelten Werten verglichen, siehe Abbildung 36. Die simulativen Ergebnisse repräsentieren den Mittelwert der Dehnung der in Kapitel 6.3 dargestellten Fläche, die Kraft stellt die Reaktionskraft in x-Richtung wie in Kapitel 6.5 ermittelt dar. In Abbildung 36 ist zu erkennen, dass zwischen der theoretischen Kurve und der realen Kurve ein deutlicher Offsetfehler besteht. Der Offsetfehler liegt für die Simulation im Bereich von  $-210 \mu\text{m/m}$ , für die reale Kurve im Bereich von  $-63 \mu\text{m/m}$ . Der Offsetfehler kann bei den Messungen und der Simulation auf den Vorspannvorgang des Messsystems zurückgeführt werden, siehe Kapitel 6.7.

Die horizontale Verschiebung der Messwerte kann auf den Vorspannprozess innerhalb der Simulation zurückgeführt werden. Hier werden bereits im Vorspannprozess Reaktionskräfte bis 170 N erreicht. Innerhalb der experimentellen Versuche kann dieser Vorspannprozess nur unzureichend nachgestellt werden. Durch die rein elastische Deformation des Dehnungsaufnehmers, siehe Kapitel 6.2, ist es möglich, die eingezeichnete Regressionsgerade bis auf Werte von 400 N zu extrapolieren.



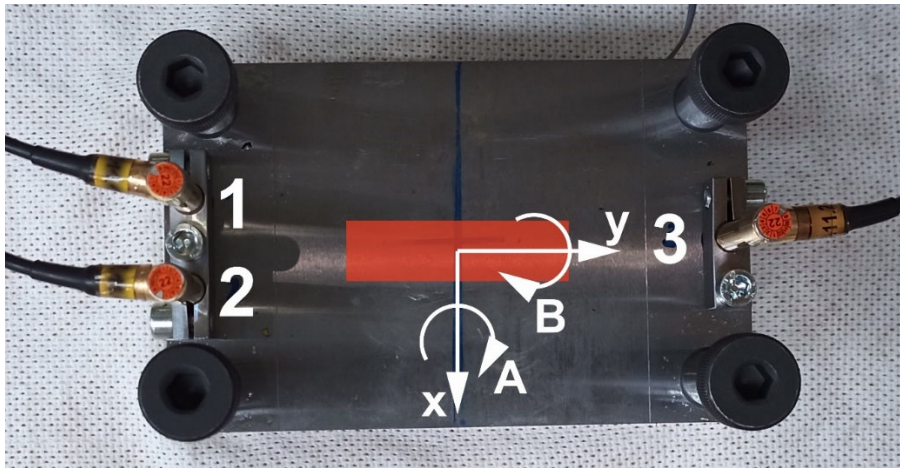


**Abbildung 36: Gegenüberstellung der Kraft-Dehnungs-Kurve des Einmessvorgangs bzw. der Simulation**

Die maximale relative Linearitätsabweichung der realen Kurve liegt bei rund 6 % im Bereich geringer Gewichtskräfte (bis 36 N). Die Linearitätsabweichung im Bereich über 36 N liegt bei rund 3 %. Die Steigung der realen Messkurve liegt bei  $2,55527 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m \cdot N}$ , die Steigung der simulativ ermittelten Kurve liegt bei  $2,56104 \cdot 10^{-6} \frac{m}{m \cdot N}$ . Die relative Differenz beträgt somit 2,3%, Differenzen dieser Größenordnung lassen sich anhand der Vorüberlegungen in Kapitel 6.7 auf Ungenauigkeiten bei der DMS Klebung innerhalb des Dehnungsaufnehmers zurückzuführen. Die Messwerte und Kennzahlen der übrigen Nutensteine liegen im gleichen Bereich, wie die hier beschriebenen Daten von Nutenstein 2.

### 7.3 Fehlerbetrachtung lokale Verformungsunterschiede

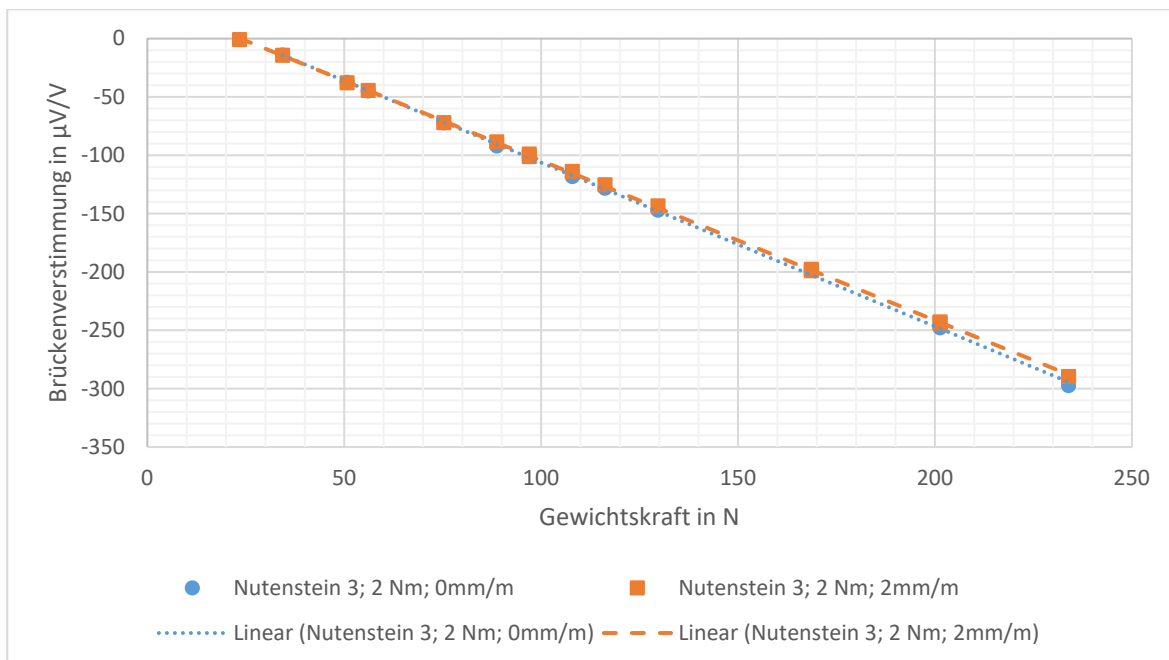
Im Folgenden soll auf die Einflüsse durch eine mögliche nicht Parallelität der Nutflanken, hier als Kippung bezeichnet, eingegangen werden. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden im Einmessvorgang, wie unter 7.1 beschrieben, ermittelt. Zu Kippungen des Messsystems kommt es naturgemäß durch die unterschiedlich große Schließung der Nutflanken, siehe Kapitel 1.2. Hierbei erfolgt die Kippung über die kurze Seite des Nutenstein (Drehachse B), siehe Abbildung 37. Die Einmessvorrichtung besitzt in der Kopfplatte eine plane Seite, sowie eine Seite mit einer Schräge von 2 mm/m. Die 2mm/m entsprechen der zu erwartenden Kippung, welche innerhalb der Presse auftreten wird. Bei der Messung wurde die Kopfplatte mit einer Schräge von 2 mm/m verwendet, was einer Kippung von  $0,2^\circ$  entspricht.



**Abbildung 37: Einmessvorrichtung mit Koordinatensystem, rot: Position des Nutensteins in der Vorrichtung**

In Abbildung 38 wurde die Kippung von 2 mm/m im Vergleich zur planen Fläche dargestellt. Zu erkennen ist, dass es praktisch keine Nullpunktverschiebung bzw. Unterschiede im Offset gibt, zwischen den beiden Kennlinien. Bei der Berechnung für die Schräge ergibt sich ein Offset von 34,4  $\mu\text{V/V}$  bzw. 32,5  $\mu\text{V/V}$  für die plane Seite. Diese Werte liegen innerhalb der Wiederholgenauigkeit, siehe Kapitel 7.5. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die hier verwendete Kippung keinen Einfluss auf die Nullpunktverschiebung hat.

Die Steigung variiert um rund 2,5% ( $-1,40 \frac{\mu\text{V}}{\text{V} \cdot \text{N}}$  bei 2 mm/m, bzw.  $-1,37 \frac{\mu\text{V}}{\text{V} \cdot \text{N}}$  bei 0 mm/m) und liegt somit ebenfalls im Toleranzbereich der experimentellen Versuche.

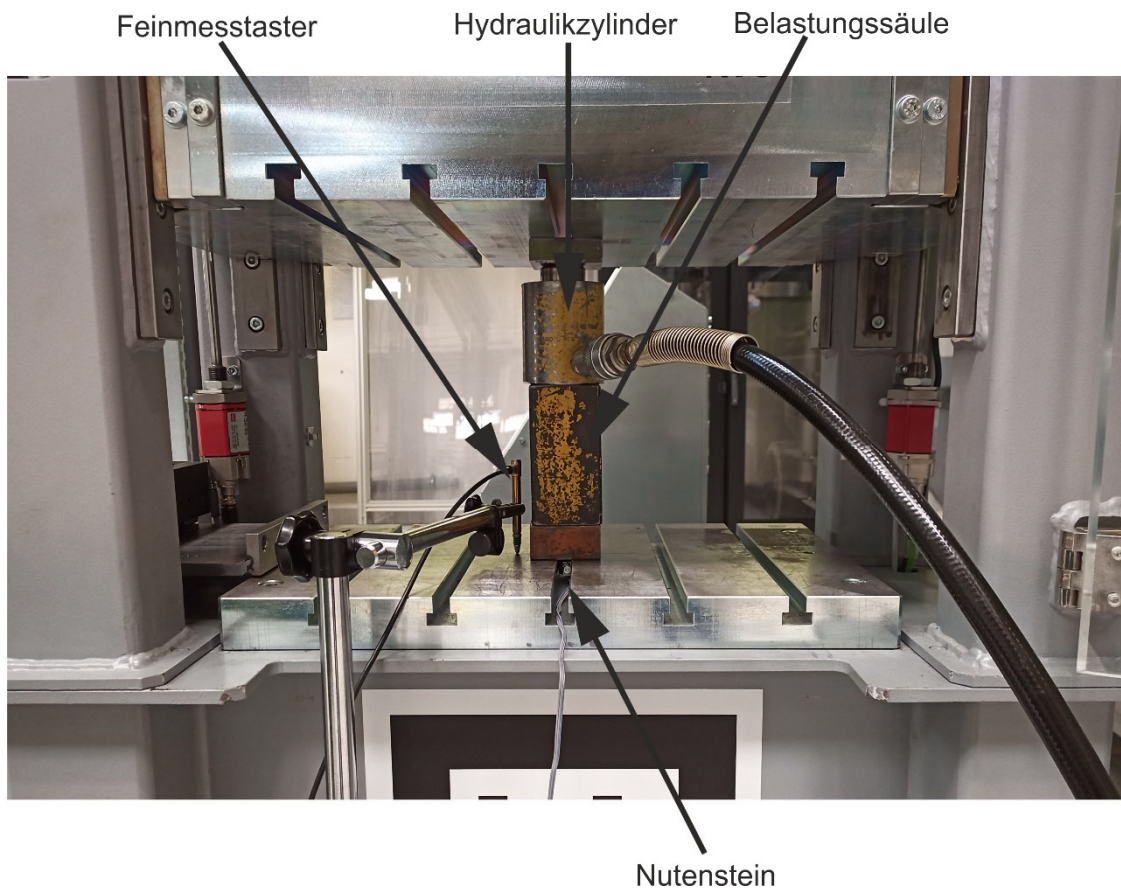


**Abbildung 38: Einfluss der Kippung auf die Brückenverformung in Abhängigkeit der wirkenden Gewichtskraft der Einmessvorrichtung**

Ausgehend von den Messdaten kann darauf geschlossen werden, dass eine Kippung bis 2mm/m, welche den simulativ ermittelten Werten zwischen Nutunterkante und Nutoberkante entspricht, keinen nennenswerten Einfluss auf die Brückenverformung des DMS hat. Eine weitere Betrachtung oder Korrektur der Messwerte, für Versuche innerhalb der Presse sind somit nicht nötig.

## 7.4 Messaufbau Umformpresse

Die im Einmessvorgang gewonnen Erkenntnisse sollen durch weitere Versuche, mithilfe der oben beschriebenen Umformpresse, verifiziert werden. Der Messaufbau sieht, an DIN 55189 angelehnt, vor dass eine zentrische Belastung des Pressentisches mit einer definierten Kraft erfolgt. Die Kraft zwischen Pressentisch und Pressenstößel wird mittels einer Handpumpe und eines Hydraulikzylinders, siehe Abbildung 39, aufgebracht. Der Zieldruck beträgt ca. 600 bar, was einer Kraft von 86,73 kN gleichkommt. Diese Kraft entspricht 55% der Nennkraft der Presse. Werte oberhalb werden durch Extrapolation ermittelt wie in [11] empfohlen.



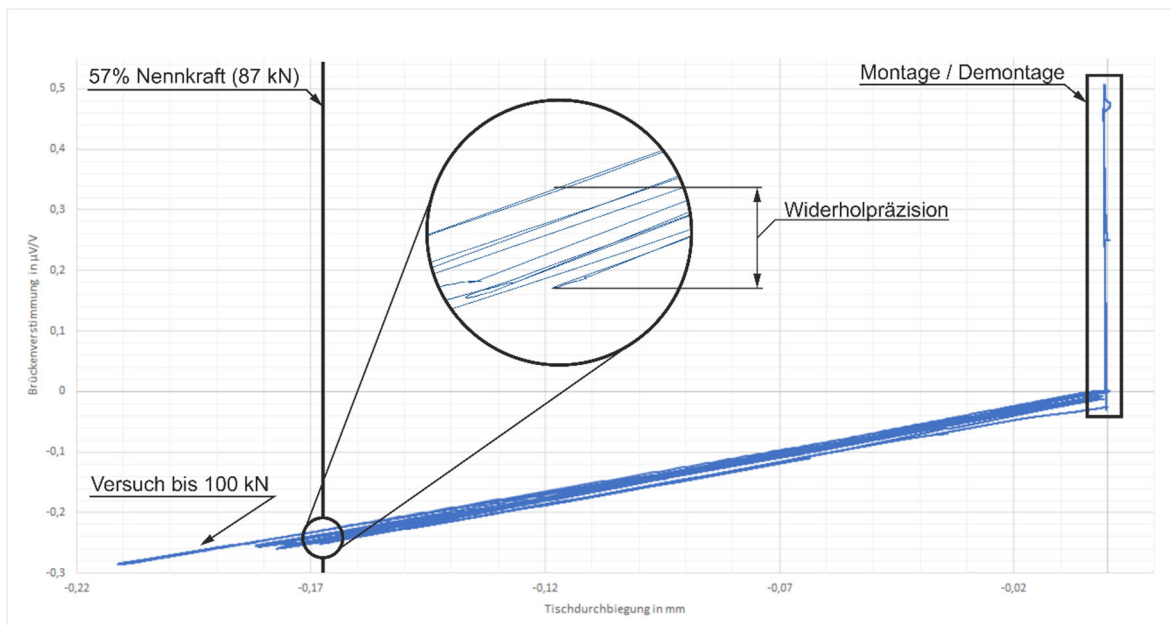
**Abbildung 39: Messaufbau der Versuche innerhalb einer Umformpresse**

Die Krafterleitung erfolgt mittig zwischen Pressentisch und -stößel, analog zur Simulation in Kapitel 4. Die Durchbiegungsmessung erfolgt auf der linken Seite an Position  $x =$

165mm und  $y = 287\text{mm}$ , neben der Belastungssäule. Der Nutenstein wurde mittig im Pressentisch montiert, zentrisch unter der Belastungssäule.

## 7.5 Wiederholpräzision

Als Wiederholpräzision (bzw. Wiederholgenauigkeit) wird die Nähe der Ergebnisse sich wiederholender Messungen, unter den gleichen Messbedingungen bezeichnet. Ein Maß für die Wiederholbarkeit ist die Standardabweichung [46]. Je kleiner die Standardwiederholabweichung ist, desto „präziser“ ist das Messsystem [12]. Die Wiederholbarkeitsbedingungen umfassen dasselbe Messverfahren, denselben Prüfer, das gleiche Messmittel unter den gleichen Messbedingungen, denselben Ort und die Wiederholung der Messungen in möglichst kurzen Zeitintervallen [26].



**Abbildung 40: Bestimmung der Wiederholpräzision des Messsystems**

Die Versuche zur Wiederholpräzision wurden innerhalb der Nuten der Presse durchgeführt. Dies bietet den Vorteil, dass auch der Ein- und Ausbau des Messsystems innerhalb eines Messzyklus betrachtet werden kann. Für die Ermittlung der Wiederholpräzision wurde der Nutenstein zunächst in der Presse montiert, im Anschluss wurde die Nullpunktverschiebung korrigiert. Im nächsten Schritt wurden 2 Belastungs- und Entlastungszyklen durchgeführt. Anschließend wurde der Nutenstein demontiert und erneut montiert, die Vorspannung betrug bei allen Versuchen konstant 2 Nm. Im Letzen Schritt wurden 4 Belastungs- und Entlastungszyklen durchgeführt. Somit ergeben sich für die Auswertung jeweils 12 Punkte (6x Belastung 6x Entlastung) welche im Folgenden ausgewertet werden können.

Zur Betrachtung wurde exemplarisch der Nutenstein 2 gewählt. Zur Auswertung werden Punkte im Bereich 57% der Nennkraft und geringer ausgewertet. Die Auswahl der Punkte

erfolgt anhand eines vorgegebenen Wegs, zu welchem die Werte der Brückenverstimmung gesucht werden. Sollte es für die Vorgaben keine exakten Abtastpunkte geben, sind diese durch Interpolation zwischen den zwei zugehörigen Messwerten auf den gesuchten Messwerten zu nutzen.

Bei der Auswertung wurde ein Datensatz gewählt, bei welchem der Nutenstein zwischen den Messungen demontiert und im Anschluss wieder montiert wurde. Die Montagearbeiten fanden zwischen Sekunde 900 und 1200 statt, siehe Tabelle 7. Die Messunsicherheit und das Konfidenzintervall werden nach [33] bestimmt. Hierbei wird das Messergebnis als Mittelwert  $\bar{x}$  der Messreihe bestimmt. Als Vertrauensgrenzen wird symmetrisch zum Messergebnis die Messunsicherheit angegeben. Die Messunsicherheit ergibt sich aus dem Zahlenfaktor  $t$  in Abhängigkeit vom Vertrauensniveau (im Folgenden 95%) multipliziert mit der Standardabweichung der Messreihe  $s$ , dividiert durch die Wurzel der Anzahl  $n$  der Messwerte. Die Vertrauensgrenzen wurden mittels Formel (7) wie folgt bestimmt:

$$\bar{x} \pm t * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Mit der Wahl des Vertrauensniveaus wird der Anteil der Fälle festgelegt, in welchen der wahre Wert eines Parameters in einer langen Reihe von wiederholten Zufallsstichproben innerhalb der Vertrauensgrenzen liegen würde [14]. Ein üblicher Wert für das Vertrauensniveau ist 95%.

**Tabelle 7: Beispiel Auswertung der Wiederholpräzision des Messsystems (Nutenstein 2; 2 Nm Vorspannmoment) bei 57% der Nennkraft**

Zeit t [s]	Tischdurchbiegung [μm]	Brückenverstimmung $\frac{U_D}{U_S}$ [μV/V]	Messunsicherheit $\Delta \frac{U_D}{U_S}$ [μV/V]	Vertrauensgrenzen (95%) [μV/V]	
				OG	UG
361.54	-168.0	-230.2	3.94	-247.7	-236.9
478.01	-168.2	-230.0			
827.02	-168.0	-246.2			
872.66	-168.1	-246.9			
1474.12	-168.0	-248.7			
1795.13	-168.0	-246.9			
2122.82	-168.0	-251.3			
2125.4	-168.0	-251.4			
2515.35	-168.0	-239.2			
2907.55	-168.2	-243.7			
3279.85	-168.0	-236.5			
3331.76	-168.0	-236.9			

Die Messunsicherheit beträgt bei 55% der Nennkraft absolut 3,94  $\mu\text{V/V}$  bzw. relativ 1,6 %. Die Messunsicherheit liegt, innerhalb der Nennkraftbereiche von 10% bis 57%, zwischen 4% und 1,6%. Dies entspricht, absolut berichtet in allen Messbereichen, einer Messunsicherheit von 3 bis 4  $\mu\text{V/V}$ .

## 7.6 Analogie Prozesskraft und Dehnung / Weg

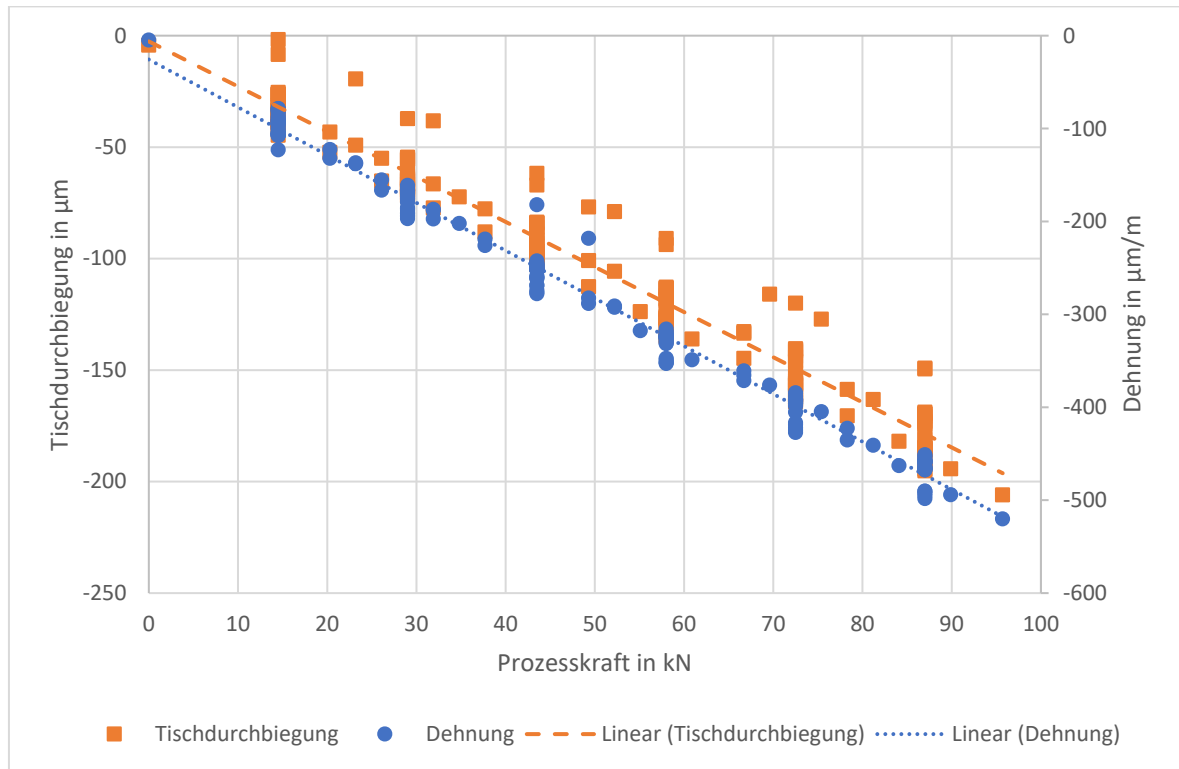
Bei der Prozessüberwachung von Umformmaschinen spielt die Prozesskraftüberwachung eine tragende Rolle. Mithilfe des hier beschriebenen Messsystems lassen sich, für bekannte Lastfälle, die wirkenden Prozesskräfte und Prozesskraftänderungen erfassen. Mithilfe mathematischer Modelle ist eine Ableitung der Prozesskräfte im Pressentisch, hin zu den wirkenden Prozesskräften im Werkzeug denkbar. Darüber hinaus ist denkbar, dass sich mithilfe des Nutzensteins und geeigneter mathematischer Modelle die Tisch- und Stößel-durchbiegung ermitteln lassen. Die Grundlage hierfür bildet die Analogie zwischen der gemessenen Prozesskraft und der daraus resultierenden Dehnung im Messsystem. Zur Ermittlung dieses Zusammenhanges wurde der experimentelle Aufbau, wie in Kapitel 7.4 beschrieben, verwendet.

Die Prozesskraft  $F$  wurde bei den Versuchen nicht direkt gemessen, stattdessen wurde diese mithilfe der Formel (8) aus dem gemessenen Druck der Handpumpe  $p_h$  des Hydraulikzylinders und der wirksamen Kolbenfläche  $A_k$  bestimmt:

$$F = p_h * A_k \quad (8)$$

In Abbildung 41 ist die Dehnung des Dehnungsaufnehmers über der Prozesskraft dargestellt bzw. die Tischdurchbiegung über der Prozesskraft. Die Auswertung erfolgt anhand von 173 Datenpunkten, welche jeweils zwischen 0 und 100kN liegen. Die dargestellten Messdaten stammen aus einer Messreihe, in welcher das Messsystem nach jeweils 5 Belastungs- und Entlastungszyklen demontiert und montiert wurde, dieser Vorgang wurde jeweils 5-mal wiederholt.

Die Abweichungen innerhalb der Messwerte in Abbildung 41 können teilweise auf Ablesefehler zurückgeführt werden. Bei dem verwendeten Manometer beträgt die kleinste Auflösung 20bar, was bei einer wirksamen Kolbenfläche von  $A_k = 14,5 \text{ cm}^2$  eine Auflösung von 2,9 kN ergibt. Darüber hinaus können Abweichungen auf die wiederholte Montage und Demontage zurückgeführt werden, welche Einlauf- und Setzungseffekte zur Folge haben kann.



**Abbildung 41: Zusammenhang zwischen der Zylinderkraft und der Tischdurchbiegung / Dehnung**

In dem dargestellten Streudiagramm wurde, mittels Methode der kleinsten Quadrate, die linearer Regressionsgerade eingezeichnet, welche durch Gleichung 9 für die Tischdurchbiegung bzw. Gleichung 10 für die Dehnung des Dehnungsaufnehmers charakterisiert wird.

$$u = -2,0239 \frac{\mu\text{m}}{\text{kN}} * F - 2,5481 \mu\text{m} \quad (9)$$

$$\epsilon = -5,1436 \frac{\mu\text{m}}{\text{m} * \text{kN}} * F - 25,603 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \quad (10)$$

Mithilfe der Formel (9) und (10) ist es möglich für beliebige Prozesskräfte, den zugehörigen Punkt für die Tischdurchbiegung bzw. Dehnung auf der Regressionsgeraden zu bestimmen.





## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es simulationsgestützt einen Dehnungsaufnehmer zu entwickeln, welcher als wirkstellennahes Inline Messsystem zur Prozesskraftbestimmung an der Schnittstelle zwischen Werkzeug und Tiefziehpresse eingesetzt werden kann. Daran anknüpfend war der Dehnungsaufnehmer experimentell zu analysieren, sodass das Funktionsprinzip nachgewiesen werden konnte.

Durch den Einsatz des hier vorgestellten Inline Messsystems wird eine kontinuierliche und wirkstellennahe Überwachung der Prozesskräfte ermöglicht. Das Messsystem zeichnet sich darüber hinaus durch die einfache Handhabbarkeit, der schnellen Montage, der einfachen Austauschbarkeit und der Minimierung der Rückwirkung zwischen Messsystem und Messstelle aus.

Hierzu wurden im ersten Schritt dieser Arbeit aktuell im Einsatz befindliche Messsysteme im Stand der Technik analysiert. Hierbei wurde jeweils auf das Funktionsprinzip und deren Nachteile eingegangen. Aufbauend auf diese Erkenntnisse wurde im Anschluss das elastomechanische Deformationsverhalten eines Pressentisches einer Umformpresse simulativ, hinsichtlich der Tischdurchbiegung und der Nutflankenverschiebung, betrachtet und ausgewertet. Mit den so gewonnenen Daten war es möglich, einen geeigneten Dehnungsaufnehmer zu konstruieren, welcher als Träger für den verwendeten Dehnungsmessstreifen dient.

Anschließend wurden die gewonnenen Daten genutzt, um das Verhalten des Dehnungsaufnehmers simulativ zu analysieren. Hierzu wurden die Erkenntnisse aus der Simulation des Pressentisches auf die Randbedingungen bei der Simulation des Deformationskörpers übertragen. Mithilfe dieser Simulation wurden unter anderem folgende Daten erfasst:

- Vergleichsspannung und Bauteilwechselfestigkeit
- Dehnungen innerhalb des Dehnungsaufnehmers
- Kontaktstatus und Druckspannungen
- Reaktionskräfte des Dehnungsaufnehmers
- Rückwirkungsbetrachtung zwischen Messsystem und Messstelle

Anhand dieser Daten war es möglich Montageanweisungen und Einflüsse auf die anschließenden experimentellen Messdaten zu formulieren, sowie die Konstruktion des Nutsteins für die Fertigung freizugeben. Daraufhin wurden 3 Prototypen für die anschließenden Versuche gefertigt. Darüber hinaus wurde, unter Beachtung der simulativ gewon-

nen Daten, ein Verfahren zum Einmessen der Nutzensteine entwickelt und eine Einmessvorrichtung konzipiert, entworfen und gefertigt.

Im letzten Schritt erfolgten experimentelle Versuche anhand derer das Funktionsprinzip nachgewiesen wurde. Dazu wurden die Prototypen zunächst einem Einmessvorgang unterzogen, anhand derer Kraft-Dehnungs-Kurven erstellt werden konnten. Darüber hinaus wurden die Nullpunktverschiebung und Linearitätsabweichungen bestimmt, sowie der Einflussbereich der Kippung auf die Messwerte ermittelt. Im Anschluss erfolgte die Bestimmung der Wiederholpräzision für den Einsatz des Nutzensteins innerhalb einer Umformpresse.

Mithilfe der experimentellen Versuche ist es möglich gewesen das simulativ bestätigte Funktionsprinzip auch experimentell zu bestätigen. Die Machbarkeit der Prozesskraftermittlung, auf Grundlage des elastischen Verhaltens des Pressentisches kann, anhand der hier getroffener Annahmen, bestätigt werden.

## 8.2 Ausblick

Mithilfe dieser Arbeit konnte das Funktionsprinzip der Inline Prozesskraftbestimmung auf Grundlage der Nutflankenverschiebung, für einen definierten Lastfall und für eine bestimmte Umformmaschine erbracht werden.

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit wären weitere Untersuchungen hinsichtlich der benötigten Anzahl und der Position, des hier beschriebenen Messsystem, innerhalb undefinierter Lastfälle lohnenswert. Dies betrifft im besonderen Maß weiterführende Versuche innerhalb einer Presse mit Werkzeug. Anhand dieser Untersuchungen wäre eine universelle und exakte Quantifizierung der lokal wirkenden Prozesskräfte denkbar. Die hierüber gewonnenen Daten könnten zur Erstellung von Prozessmodellen oder zur Beeinflussung der Kraftverteilung durch Aktoren genutzt werden.

Die Ergebnisse aus Kapitel 7 führen zu der Frage ob sich das vorgestellte Messsystem zum Condition-Monitoring eignet. Weitere Untersuchungen bezüglich der Auswirkung von Schäden an Strukturbauteilen und den evtl. damit verbundenen lokalen Änderungen der Steifigkeit oder den Einflüssen von Schwingungsänderungen auf die Messwerte scheinen vielversprechend.

Optimierungsbedarf des Messsystem besteht hinsichtlich eines Einsatzes unter Industriebedingungen. Hierbei ist es nötig die Schnittstelle zwischen DMS und Dehnungsaufnehmer entsprechend unempfindlich gegen äußere Einflüsse zu machen, z. B. durch eine Vollumhausung. Darüber hinaus sollten geeignete Kommunikationsschnittstellen zwischen Messsystem und Auswerteeinheit geschaffen werden, welche kostengünstig den Einsatz mehrerer Nutzensteine ermöglichen.

## Literatur

- [1] Behrens, B.-A. and Javadi, M. 2007. *Erweiterung der Kennwertermittlung durch eine automatische Belastungs- und Vermessungseinrichtung für Pressen der Blechverarbeitung*. EFB-Forschungsbericht 269. EFB Europäische Forschungsges. für Blechverarbeitung e.V, Hannover.
- [2] Behrens, B.-A. and Javadi, M. 2009. *Exakte und kostengünstige Qualitätskontrolle an Pressen in der Blechverarbeitungsindustrie*, Garbsen.
- [3] Berg & Co. GmbH. *Spannsysteme Umformtechnik. PSP...VLB/PSV*. <https://www.berg-spanntechnik.de/de/produktprogramm/umformtechnik/pspv/plv.php>. Accessed 24 September 2020.
- [4] Beucher, O. 2007. *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit MATLAB. Anwendungsorientierte Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [5] Birkert, A. R., Haage, S., and Straub, M. 2013. *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen*. SpringerLink. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [6] Brecher, C., Bäumlner, S., and Bakarimow, K. 2014. Ganzheitlicher Simulationsansatz zur Berücksichtigung der Presse-Werkzeug-Prozess-Interaktionen. Fachbeitrag. *SchmiedeJOURNAL*, 03, 34–37.
- [7] Brenneis, M. and Stahlmann, J. *Kraft- und Vibrationssensoren*. <https://consenses.de/produkte/sensoren/kraft-und-vibrationssensoren/>. Accessed 19 October 2020.
- [8] Brenneis, M., Stahlmann, J., and Finus, F. 2018. *Sensorik in der Presse hilft die Produktivität zu steigern*. <https://www.blechnet.com/sensorik-in-der-presse-hilft-die-produktivitaet-zu-steigern-a-693827/>. Accessed 13 October 2020.
- [9] Canti, R. 2015. *Analyse für eine belastungsgerechte Auslegung von Presswerkzeugen am Beispiel Niederhalter und Schiebersystem*. Dissertation, Technischen Universität München.
- [10] ConSenses GmbH. *PiezoBolt PB12*. <https://consenses.de/produkte/sensoren/kraft-und-vibrationssensoren/piezobolt-pb12/produkt/>. Accessed 10 October 2020.

- [11] Deutsches Institut für Normung. 1988. *Ermittlung von Kennwerten von Pressen der Blechverarbeitung bei statischer Belastung. Mechanische Pressen*. Beuth Verlag, Berlin, DIN 55189.
- [12] Deutsches Institut für Normung. 1995. *Grundlagen der Meßtechnik. Teil 1: Grundbegriffe* 17.020; 01.040.17. Beuth Verlag, Berlin 17.020; 01.040.17, DIN 1319-1:1995-01.
- [13] Deutsches Institut für Normung. 2003. *Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung* 01.040.25; 25.020. Beuth Verlag, Berlin 01.040.25; 25.020, DIN 8580:2003-09.
- [14] Deutsches Institut für Normung. 2009. *Statistik – Begriffe und Formelzeichen. Teil 1: Wahrscheinlichkeit und allgemeine statistische Begriffe* 01.040.03; 03.120.30. Beuth Verlag, Berlin 01.040.03; 03.120.30, DIN ISO 3534-1.
- [15] Dobrinski, P., Krakau, G., and Vogel, A. 2010. *Physik für Ingenieure*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- [16] Doege, E. and Behrens, B.-A. 2010. *Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen*. VDI-Buch. Springer-Verlag, s.l.
- [17] Doege, E., Dittmann, J., Hütte, H., Menz, R., Rüsck, S., and Schaprian, M. 1999. *Innovative Entwicklungen in der Umformtechnik - Maschinen- und Verfahrensvarianten zur Sicherung hoher Genauigkeit in verkürzten Prozessen*. 16. UKH 1999 „Umformtechnik an der Schwelle zum Nächsten Jahrtausend“. IFUM – Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Hannover.
- [18] Dubbel, H., Grote, K.-H., and Feldhusen, J. 2011. *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [19] Götz, S. and Eulitz, K.-G. 2020. *Betriebsfestigkeit. Bauteile sicher auslegen!* Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [20] Gross, D., Hauger, W., Schröder, J., and Wall, W. A. 2009. *Statik*. Springer-Lehrbuch Bd. 1. Springer, Berlin.
- [21] HEINRICH, S. and Bach, S. A. 2017. *Verfahren zur Maschinenvermessung. Patentschrift*, DE102010021839A1.
- [22] Hellwig, W. and Kolbe, M. 2012. *Spanlose Fertigung Stanzen. Integrierte Fertigung komplexer Präzisions-Stanzteile*. SpringerLink Bücher. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [23] Hesse, S. and Schnell, G. 2018. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Funktion - Ausführung - Anwendung*. Springer Vieweg, Wiesbaden.

- [24] Hottinger Brüel & Kjaer GmbH. *CST/300. Piezoelektrische Dehnungsaufnehmer*. <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3875.pdf>. Accessed 13 October 2020.
- [25] Hubert, W., Robert, S., Matthias, K., and Christoph, H. 2013. *Prüfwerkzeug zur Ermittlung der Eigenschaften einer Umformpresse unter Realbedingungen*. *Patentschrift*, DE102012013722.
- [26] JCGM. 2008. *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*.
- [27] Keferstein, C. P., Marxer, M., and Bach, C. 2018. *Fertigungsmesstechnik. Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [28] Keil, S. 2017. *Dehnungsmessstreifen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [29] Klocke, F. and Pritschow, G. 2004. *Autonome Produktion*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [30] Kluft, W. 2005. *Force measuring device inside a fixing screw*. EP20050101310 G01L1/16;G01L5/00 G01L1/16;G01L5/00, EP1693659 (A1).
- [31] Mahn, U. 2018. *Maschinenkonstruktion. Unterlagen zur Lehrveranstaltung*, Mittweida.
- [32] 2015. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 8/2015. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech* 46, 8, 761.
- [33] Papula, L. 2017. *Mathematische Formelsammlung. Für Ingenieure und Naturwissenschaftler : mit über 400 Abbildungen, zahlreichen Rechenbeispielen und einer ausführlichen Integraltafel*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [34] Parthier, R. 2020. *Messtechnik. Vom SI-Einheitensystem über Bewertung von Messergebnissen zu Anwendungen der elektrischen Messtechnik*.
- [35] Reichel, M. 2017. *Fertigungstechnik – Umformen. Napfrückwärtsfließpressen*. essentials. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [36] Römheld GmbH Friedrichshütte. *WZ-003 Schnellspannsysteme Flexline I 4.0*. <https://www.roemheld-gruppe.de/shop/de/wz-003-schnellspannsysteme-flexline-i-4-0.html>. Accessed 24 September 2020.

- [37] Roth, T. 2017. *Ermittlung von Pressenkennwerten für die zustandsorientierte Instandhaltung und den Werkzeugentstehungsprozess. Digitalisierung und Vernetzung in der Umformtechnik*, Dresden.
- [38] Schwer + Kopka GmbH. *Sensoren. Schraubensensor*. <https://www.schwer-kopka.de/de/produkte/prozessueberwachung/sensoren.html>. Accessed 10 October 2020.
- [39] Schwerin, M. L. von. 2008. *Entwicklung einer Methodik zur optimierten Gestaltung von Umformwerkzeugen*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2006. utg-Forschungsberichte 43. Hieronymus, München.
- [40] Stahlmann, J., Ludwig, M., and Brenneis, M. 2014. Der siebte Sinn im Maschinenbau. Forscher der TU Darmstadt entwickeln die Sensorschraube. *hoch<sup>3</sup>* 10, 22.
- [41] Struck, R. 2010. *Bestimmung der minimal notwendigen Pressenkraft zur Herstellung von Karosseriestrukturbauteilen im Automobilbau*. Berichte aus dem IFUM 2010, Bd. 03. PZH, Produktionstech. Zentrum, Garbsen.
- [42] Strunz, M. 2012. *Instandhaltung. Grundlagen - Strategien - Werkstätten*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- [43] Tehel, R., Päßler, T., and Bergmann, M. 2020. Effective FE models for simulating the elasto-mechanical characteristics of forming machines. *Int J Adv Manuf Technol* 106, 7-8, 3505–3514.
- [44] Tehel, R., Päßler, T., and Mihm, M. 2019. Modeling elastic behavior of forming machine components to reduce tool manufacturing time. *Procedia Manufacturing* 27, 177–184.
- [45] Tessari, K. 2016. *messQUADER mQ 5013.01. Der Allrounder zur Prozesskontrolle*, Pforzheim.
- [46] Testo Industrial Services GmbH. 2020. *Messunsicherheitsfibel. Praxisgerechte Bestimmung von Messunsicherheiten nach GUM (bei Kalibrierungen)*, Kirchzarten.
- [47] Wagner, U. M. 2020. *Entwicklung eines modularen Messsystems zur Erfassung des Durchbiegeverhaltens von Großpressen*, Chemnitz.
- [48] Weck, M. and Brecher, C. 2006. *Werkzeugmaschinen 2. Konstruktion und Berechnung*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [49] Weck, M. and Brecher, C. 2006. *Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- 
- [50] Zgoll, F., Götze, T., and Volk, W. 2017. Building a substitute model of a bolster based on experimentally determined deflection. *J. Phys.: Conf. Ser.* 896, 12044.

# Anlagen

## A Analoger Anhang

Thesen .....	A-I
Vergleich Stand der Technik.....	A-III
Bestimmung der Bauteilwechselfestigkeit .....	A-VII
Messprotokolle Einmessvorgang .....	A-IX
Messprotokolle Presse .....	A-XV

## B Digitaler Anhang

Auswerteroutine Famos Minium .....	B-I
Bestimmung der Werte der Wiederholgenauigkeit .....	B-III

<b>C Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>C-I</b>
--	------------



# Thesen

1. Die aktuell vorhandenen Messsysteme spiegeln nicht in geeigneter Weise das Umformverhalten von Umformpressen wider. Vorhandene Inline Messsysteme geben keinen zufriedenstellenden Aufschluss über den Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Bauteilgüte.
2. Von der Wirkstelle weit entfernte Messsysteme benötigen entsprechende komplexe mathematische Modelle, welche aufwendig an die jeweilige Umformmaschine angepasst werden müssen.
3. Vorhandene Inline Messsysteme haben, aufgrund Ihrer Steifigkeit, eine messbare Rückwirkung zur Folge und eignen sich somit nur bedingt zur Erfassung von Prozesskräften.
4. Für die Fertigungsüberwachung ist es nötig, die Wirkgrößen des Prozesses kontinuierlich zu erfassen. Bisherige Messsysteme bieten hierfür keine geeignete Grundlage, hinsichtlich der Prozessüberwachung im wirklichen Umformprozess mit Werkzeug.
5. Die bisherigen Messsysteme zur Inlineüberwachung korrelieren nicht mit den gestellten Anforderungen, hinsichtlich Positionierfreiheit innerhalb der Umformpresse, Kosten des Messsystems oder sind nicht für alle Umformpressen bezüglich der Einbaugröße geeignet.
6. Durch ein geeignetes Inline Messsystem lässt sich die Anlagenverfügbarkeit und Bauteilqualität steigern, sowie die Durchlaufzeiten optimieren und Maschinenstandzeiten verringern.



## Vergleich Stand der Technik

Messverfahren	Messsystem / Bezeichnung	wesentliche Messwert / Ma- schinenparameter	Vorteile	Nachteile
direkt	DIN 55189	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verlagerung</li> <li>• Kippung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• genormtes Messverfahren</li> <li>• Einfacher Aufbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Messaufwand / Messdauer</li> <li>• Geringe Aussagekraft über Maschinenverhal- ten mit Werkzeug</li> <li>• nur als Offline Mess- verfahren</li> </ul>
	Universalmesssystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tischdurchbiegung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfacher Messaufbau</li> <li>• kurze Messdauer</li> <li>• Erfassung beliebig vieler Punkte möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur Durchbiegungsbe- stimmung</li> <li>• nur als Offline Mess- verfahren</li> </ul>
	Pressenfingerabdruck- werkzeug	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verlagerung</li> <li>• Kippung</li> <li>• Tischdurchbiegung</li> <li>• dynamische Maschi- neneigenschaften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übertragbarkeit der Mess- werte / Belastungszustandes auf andere Maschinen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nicht universell Ein- setzbar</li> <li>• hohe Anschaffungskos- ten</li> <li>• lange Rüstdauer</li> </ul>

	Tracking-Interferometer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verlagerung</li> <li>• Kippung</li> <li>• Tischdurchbiegung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• universell Einsetzbar</li> <li>• hohe Messwertauflösung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sichtkontakt zu Messpunkten nötig</li> <li>• hohe Anschaffungskosten</li> <li>• Aufwendiger Messprozess</li> <li>• halten unter Last nötig</li> </ul>
	optische Bildkorrelation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auffederung</li> <li>• Kippung</li> <li>• Versatzverhalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• universell Einsetzbar</li> <li>• Erfassung dynamischer Werte möglich</li> <li>• Erfassung großer Flächen in Einem Messdurchgang möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sichtkontakt zu Messpunkten nötig</li> <li>• hohe Anschaffungskosten</li> <li>• begrenztes Auflösungsvermögen bestimmt maximalen Abstand zur Messstelle</li> </ul>
	Kraftmesskoppelplatte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• punktuelle Prozesskräfte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• einfache Bestimmung der Prozesskraft</li> <li>• Bestimmung Punktuell wirkender Kräfte möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Anschaffungskosten</li> <li>• nicht für alle Bauarten / Bauformen geeignet</li> </ul>
	Werkzeugspanner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Summe der Prozesskräfte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfaches Messverfahren</li> <li>• Universell Einsetzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozesskraft nur als Summe</li> </ul>

	Wirbelstromsensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verlagerung zwischen Werkzeug und Spannfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• universell einsetzbar</li> <li>• evtl. Rückschlüsse auf Prozesskraft möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nur in Nuten ohne Spannzeugen einsetzbar</li> <li>• Beeinflussung der Messwerte durch metallische Verunreinigungen</li> </ul>
indirekt	Messquader	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozesskraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfaches Messsystem</li> <li>• Einsatz für Condition-Monitoring denkbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur außerhalb des Werkzeugraumes positionierbar</li> <li>• keine Erfassung von Prozesskräften / Verschiebungen im Werkzeugraum möglich</li> </ul>
	Kraftmessschraube	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozesskraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache Integration in bestehende Maschinenstruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Erfassung von Prozesskräften / Verschiebungen im Werkzeugraum möglich</li> <li>• evtl. Modifikationen an Maschinenstruktur nötig</li> </ul>
	Kraftmessdübel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozesskraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration in bestehende Maschinenstruktur möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• evtl. Modifikationen an Maschinenstruktur nötig</li> </ul>

	selbstklebende Dehnungsmessstreifen	<ul style="list-style-type: none"><li>• Dehnung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einfache Integration in vorhandene Maschinenstruktur</li><li>• weitestgehende Positionierungsfreiheit</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Anfällig für äußere Einflüsse</li><li>•</li></ul>
--	-------------------------------------	---	---	---

## Bestimmung der Bauteilwechselfestigkeit nach FKM-Richtlinie

Berechnung	Bemerkung
$R_m = 850 \text{ Mpa}$	Zugfestigkeit
$R_{p0,2} = 490 \text{ Mpa}$	Streckgrenze
$R_{m,min} = 400 \text{ MPa}$	minimaler Normwert der Werkstoffgruppe Stahl
$\alpha_R = 0,22$	werkstoffgruppenabhängige Variable
$R_z = 3,2$	typische Rauigkeit für das Bearbeitungs- verfahren Fräsen
$\sigma_W = 0,45 * 850 \text{ MPa} = 382 \text{ MPa}$	Wechselfestigkeit
$\rho = 1 \text{ mm}$	Kerbradius
$c_1 = 127 \text{ MPa}$	werkstoffgruppenabhängige Variable (ferritischer Stahl)
$m = 1,16$	werkstoffgruppenabhängige Variable (ferritischer Stahl)
$n_\sigma = 1 + \left(\frac{c_1}{R_{p0,2}}\right)^m * \sqrt{\frac{2}{\rho}} = 1,295$	Stützzahl
$K_R = 1 - \alpha_R * \lg\left(\frac{R_z}{\mu m}\right) * \lg\left(\frac{2 * R_m}{R_{m,min}}\right) = 0,9302$	Rauhigkeitsfaktor
$K_f = 1$	Schätzwert für die Kerbwirkungszahl
$K_{WK,\sigma} = \frac{1}{n_\sigma} * \left[1 + \frac{1}{K_f} * \left(\frac{1}{K_R} - 1\right)\right] = 0,8302$	Konstruktionsfaktor
$\sigma_{WK} = \frac{\sigma_W}{K_{WK,\sigma}} = 460,7 \text{ MPa}$	Bauteilwechselfestigkeit





# Messprotokolle Einmessvorgang

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-08-24 12-43-39	<b>Nutenstein Nr.</b>	2
<b>Prüfdatum</b>	24.08.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	12:43:39	<b>Messplatte</b>	0,0 µm/m
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,2°C
<b>Beschreibung</b>			
Einmessvorgang			
<b>Anmerkungen</b>			
Weg 1 → K_001_SN160016 (siehe Abbildung 37) Weg 2 → K_002_SN160016 Weg 3 → K_003_SN160016 Brückenverstimmung → K_021_DMS			
<b>Darstellung</b>			
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <span style="color: blue;">—</span> K_001_SN160016    <span style="color: red;">—</span> K_002_SN160016  <span style="color: cyan;">—</span> K_003_SN160016    <span style="color: magenta;">—</span> K_021_DMS         </div>			
<b>Protokoll Nr.</b>	2020-08-24 14-06-03	<b>Nutenstein Nr.</b>	1

<b>Prüfdatum</b>	24.08.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	14:06:03	<b>Messplatte</b>	0,0 $\mu\text{m}/\text{m}$
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,2°C

**Beschreibung**

Einmessvorgang

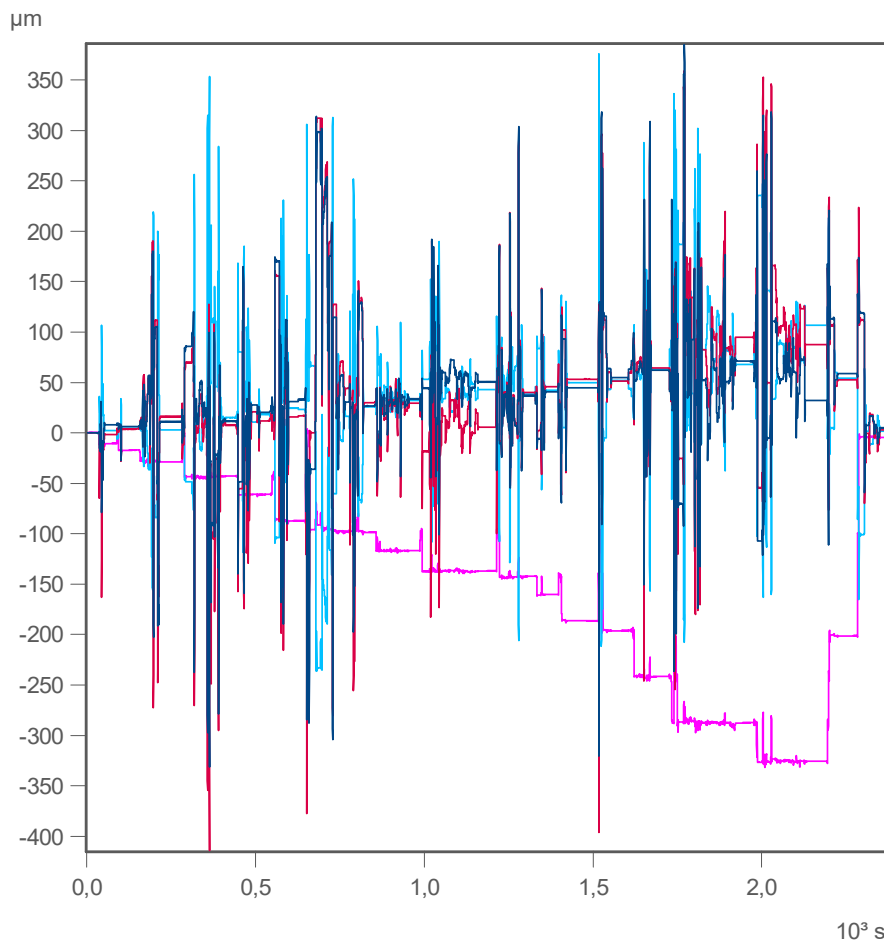
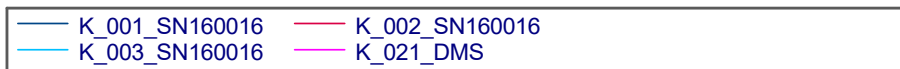
**Anmerkungen**

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 37)

Weg 2 → K\_002\_SN160016

Weg 3 → K\_003\_SN160016

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-08-25 14-12-16	<b>Nutenstein Nr.</b>	3
<b>Prüfdatum</b>	25.08.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	14:12:16	<b>Messplatte</b>	2,0 $\mu\text{m}/\text{m}$
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,4°C

**Beschreibung**

Einmessvorgang

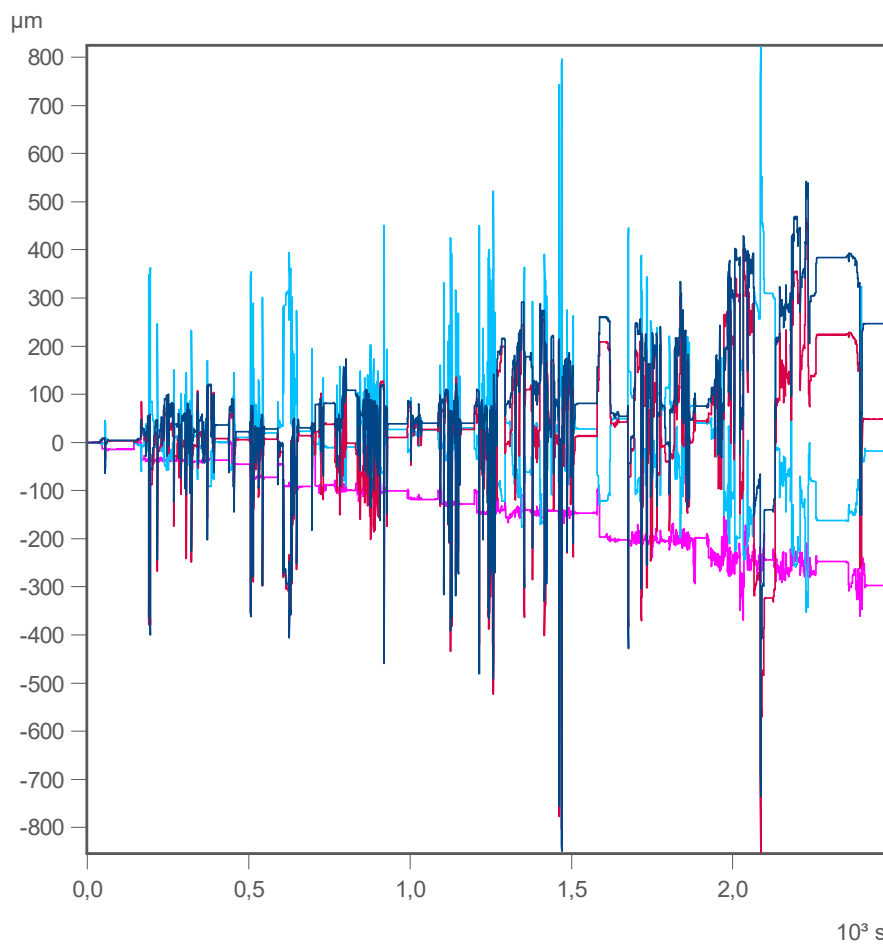
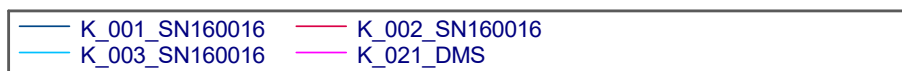
**Anmerkungen**

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 37)

Weg 2 → K\_002\_SN160016

Weg 3 → K\_003\_SN160016

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-08-25 12-51-20	<b>Nutenstein Nr.</b>	3
<b>Prüfdatum</b>	25.08.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	12:51:20	<b>Messplatte</b>	0,0 $\mu\text{m}/\text{m}$
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,3°C

**Beschreibung**

Einmessvorgang

**Anmerkungen**

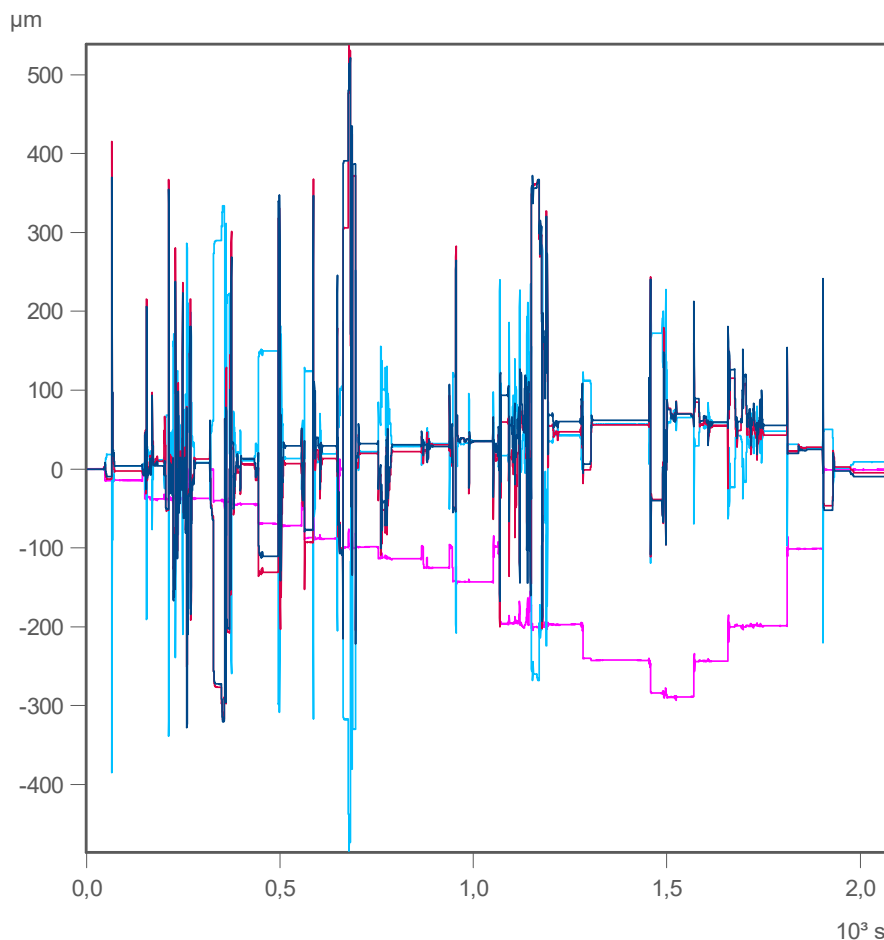
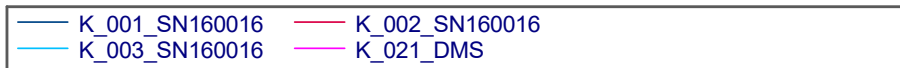
Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 37)

Weg 2 → K\_002\_SN160016

Weg 3 → K\_003\_SN160016

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

1984g → leichte Erschütterungen; 2009g → starke Erschütterungen; 2051g → leichte Erschütterungen

**Darstellung**

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-08-25 15-23-03	<b>Nutenstein Nr.</b>	1
<b>Prüfdatum</b>	25.08.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	15:23:03	<b>Messplatte</b>	2,0 $\mu\text{m/m}$
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,4°C

**Beschreibung**

Einmessvorgang

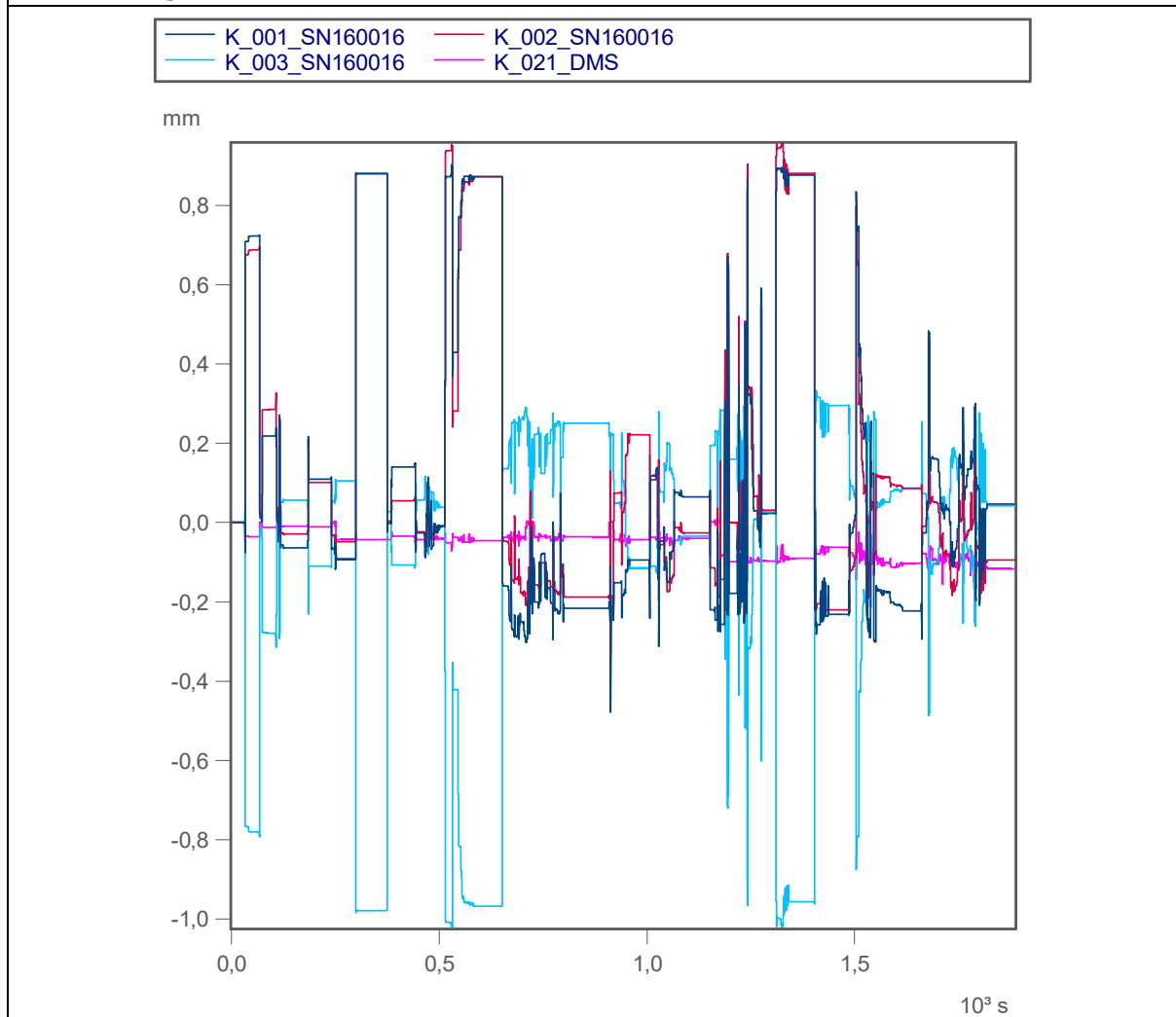
**Anmerkungen**

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 37)

Weg 2 → K\_002\_SN160016

Weg 3 → K\_003\_SN160016

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**



# Messprotokolle Pressendemonstrator

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-09-01 11-14-35	<b>Nutenstein Nr.</b>	1
<b>Prüfdatum</b>	01.09.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	11:14:35	<b>Messplatte</b>	-
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,3°C
<b>Beschreibung</b>			
experimentelle Erprobung Pressendemonstrator			
<b>Anmerkungen</b>			
Versuch 1; Serie 1 Druck: 0 bis 660 bar Weg 1 → K_001_SN160016 (siehe Abbildung 39) Brückenverstimmung → K_021_DMS			
<b>Darstellung</b>			
<p>The graph displays two data series: K_021_DMS (blue line) and K_001_SN160016 (red line). The x-axis represents time in units of <math>10^3</math> s, ranging from 0.0 to 1.2. The left y-axis represents strain in units of <math>10^{-3}</math> mV/V, ranging from 0 to -260. The right y-axis represents displacement in <math>\mu\text{m}</math>, ranging from 0 to -200. Both series show a step-wise decrease in strain over time, with the blue line (K_021_DMS) generally showing slightly higher strain values than the red line (K_001_SN160016) during the initial steps.</p>			

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-09-01 11-38-40	<b>Nutenstein Nr.</b>	1
<b>Prüfdatum</b>	01.09.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	11:38:40	<b>Messplatte</b>	-
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,3°C

**Beschreibung**

experimentelle Erprobung Pressendemonstrator

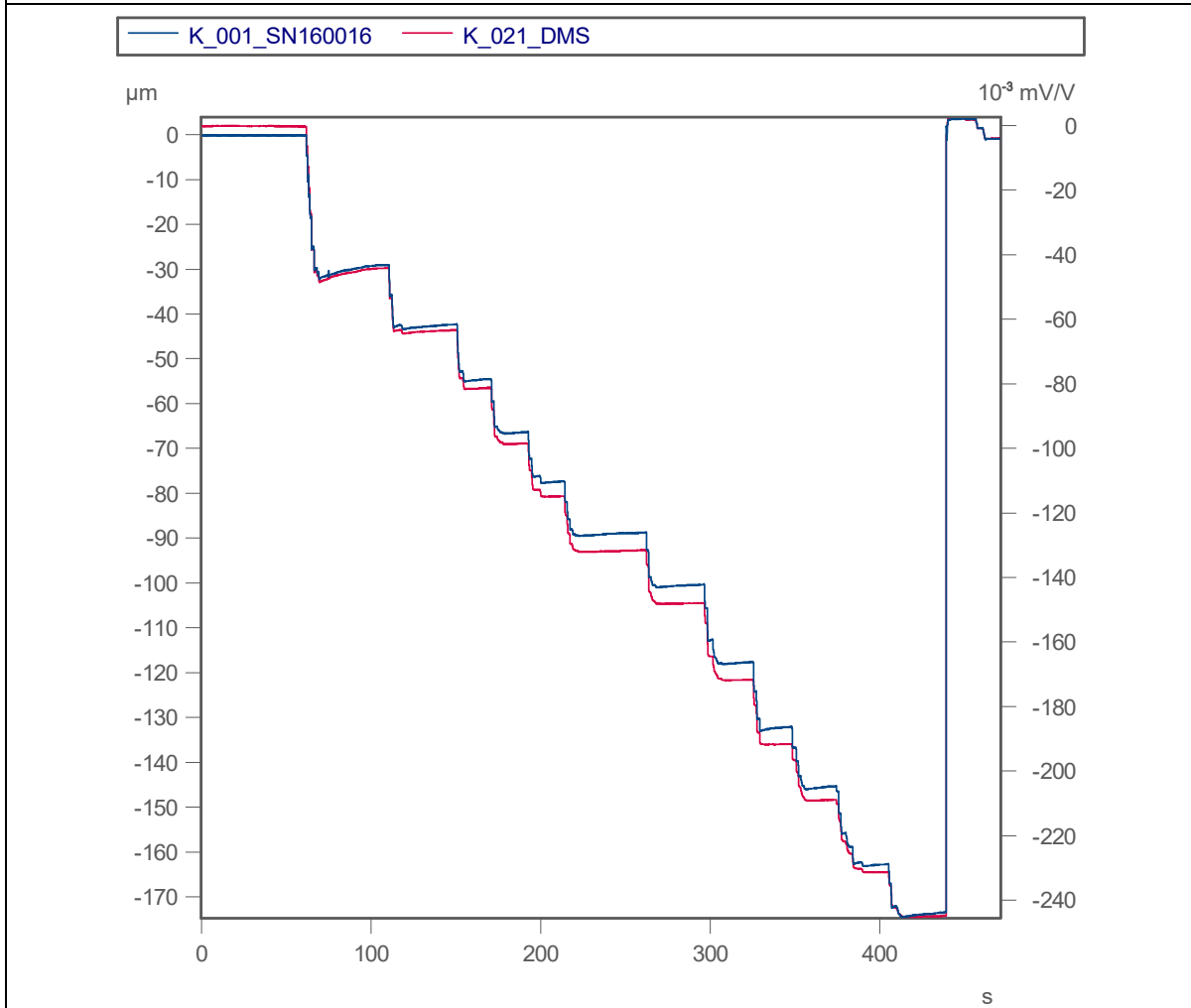
**Anmerkungen**

Versuch 2; Serie 1

Druck: 0 bis 600 bar

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 39)

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**



<b>Protokoll Nr.</b>	2020-09-01 11-47-34	<b>Nutenstein Nr.</b>	1
<b>Prüfdatum</b>	01.09.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	11:47:34	<b>Messplatte</b>	-
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,4°C

**Beschreibung**

experimentelle Erprobung Pressendemonstrator

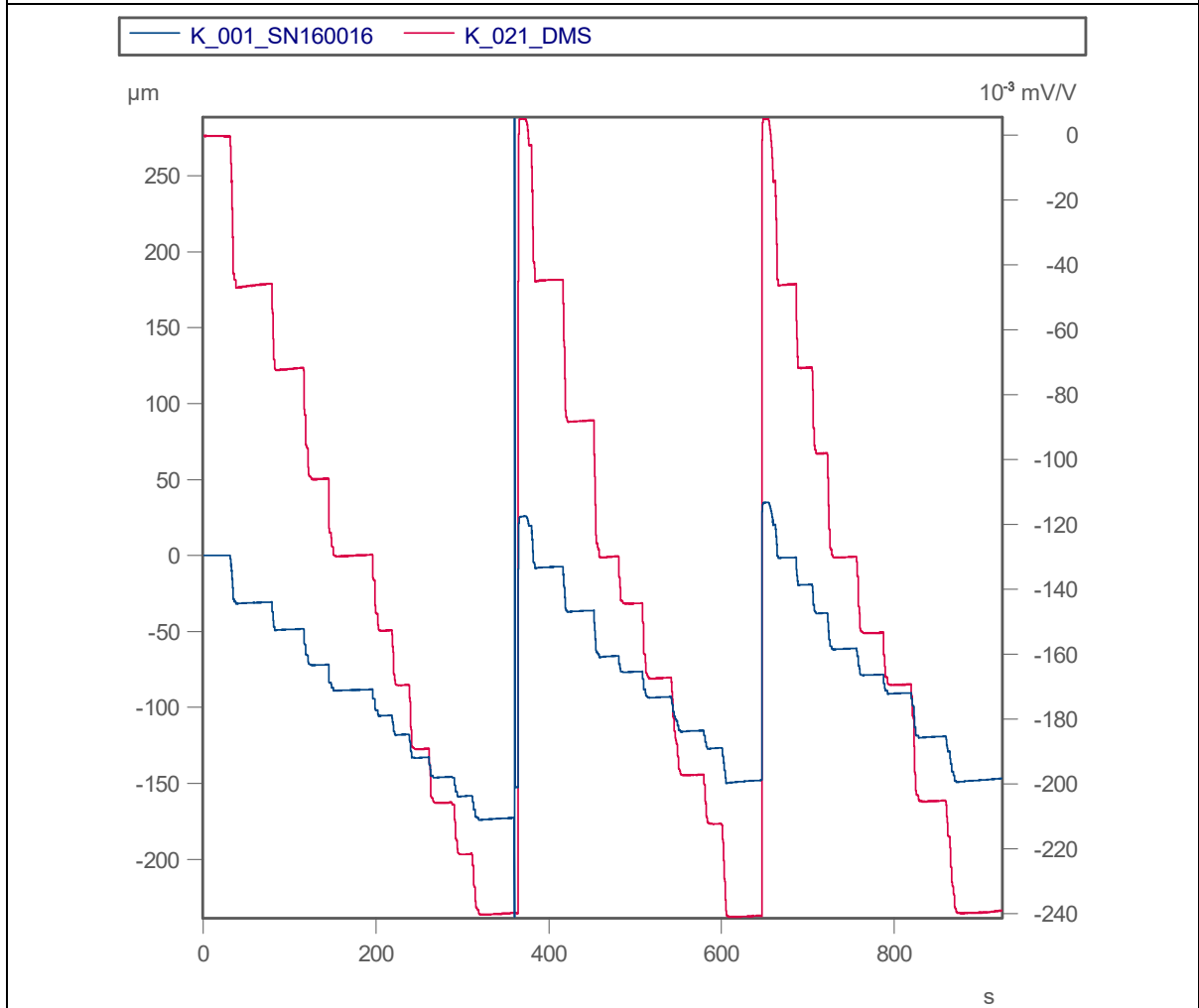
**Anmerkungen**

Versuch 3 bis 5; Serie 1

Druck 0 bis 600 bar

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 39)

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-09-01 12-14-14	<b>Nutenstein Nr.</b>	1
<b>Prüfdatum</b>	01.09.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	12:14:14	<b>Messplatte</b>	-
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,4°C

**Beschreibung**

experimentelle Erprobung Pressendemonstrator

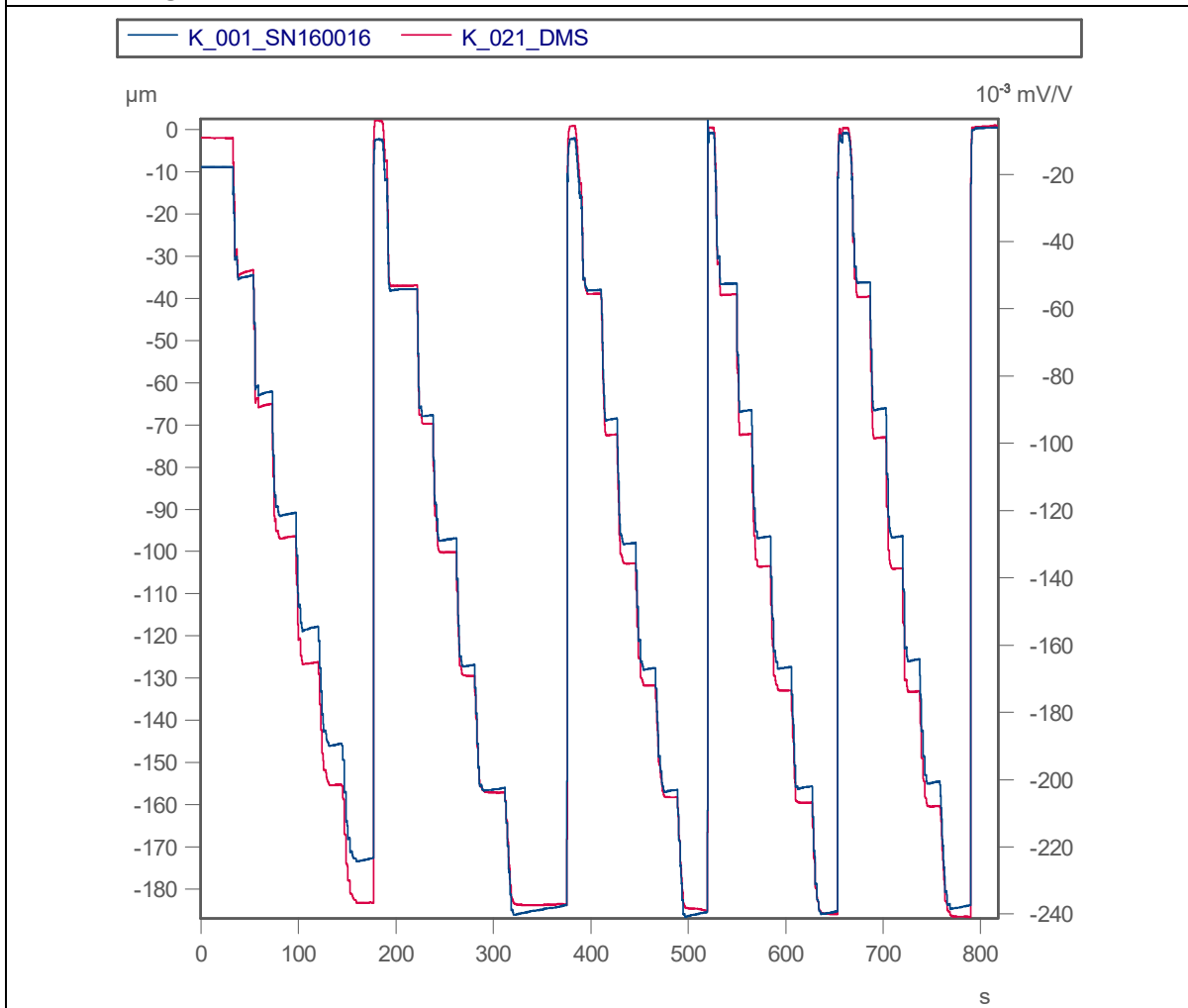
**Anmerkungen**

Versuch 1 bis 5; Serie 2

Druck 0 bis 600 bar

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 39)

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-09-01 12-53-38	<b>Nutenstein Nr.</b>	1
<b>Prüfdatum</b>	01.09.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	12:53:38	<b>Messplatte</b>	-
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,2°C

**Beschreibung**

experimentelle Erprobung Pressendemonstrator

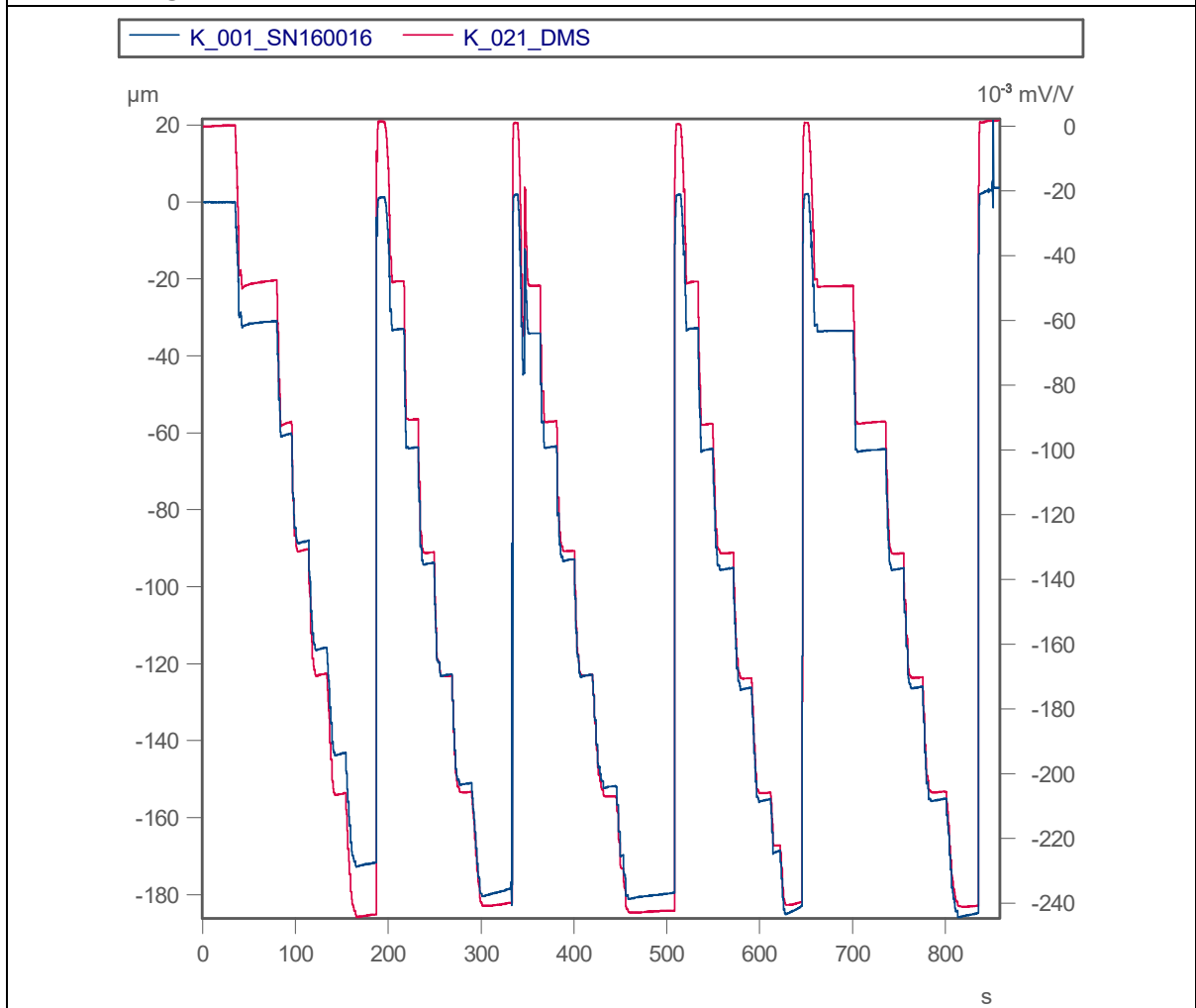
**Anmerkungen**

Versuch 1 bis 5; Serie 3

Druck 0 bis 600 bar

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 39)

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-09-01 13-14-05	<b>Nutenstein Nr.</b>	1
<b>Prüfdatum</b>	01.09.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	13:14:05	<b>Messplatte</b>	-
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,2°C

**Beschreibung**

experimentelle Erprobung Pressendemonstrator

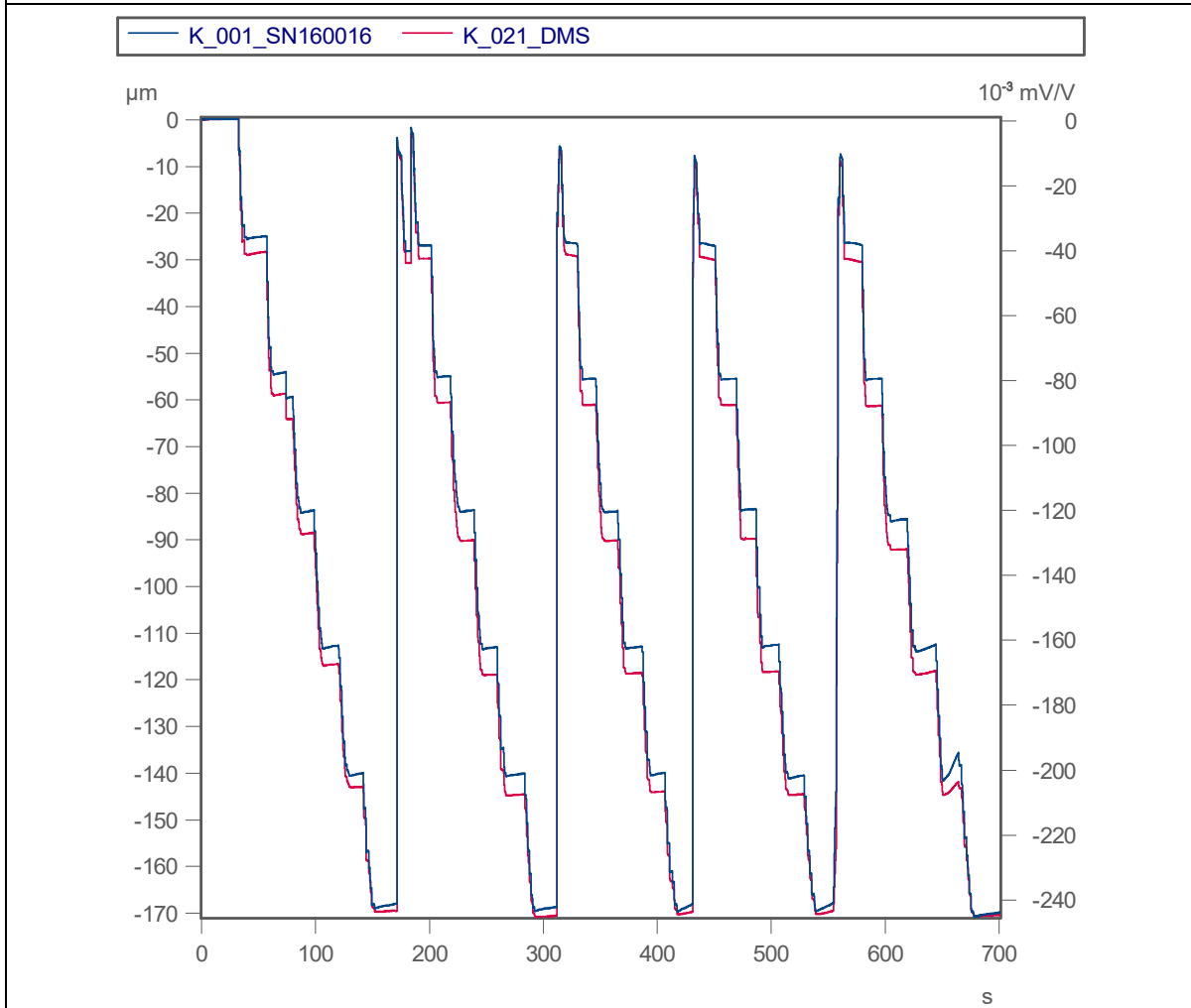
**Anmerkungen**

Versuch 1 bis 5; Serie 4

Druck 0 bis 600 bar

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 39)

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-09-01 13-28-57	<b>Nutenstein Nr.</b>	1
<b>Prüfdatum</b>	01.09.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	13:284:57	<b>Messplatte</b>	-
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,3°C

**Beschreibung**

experimentelle Erprobung Pressendemonstrator

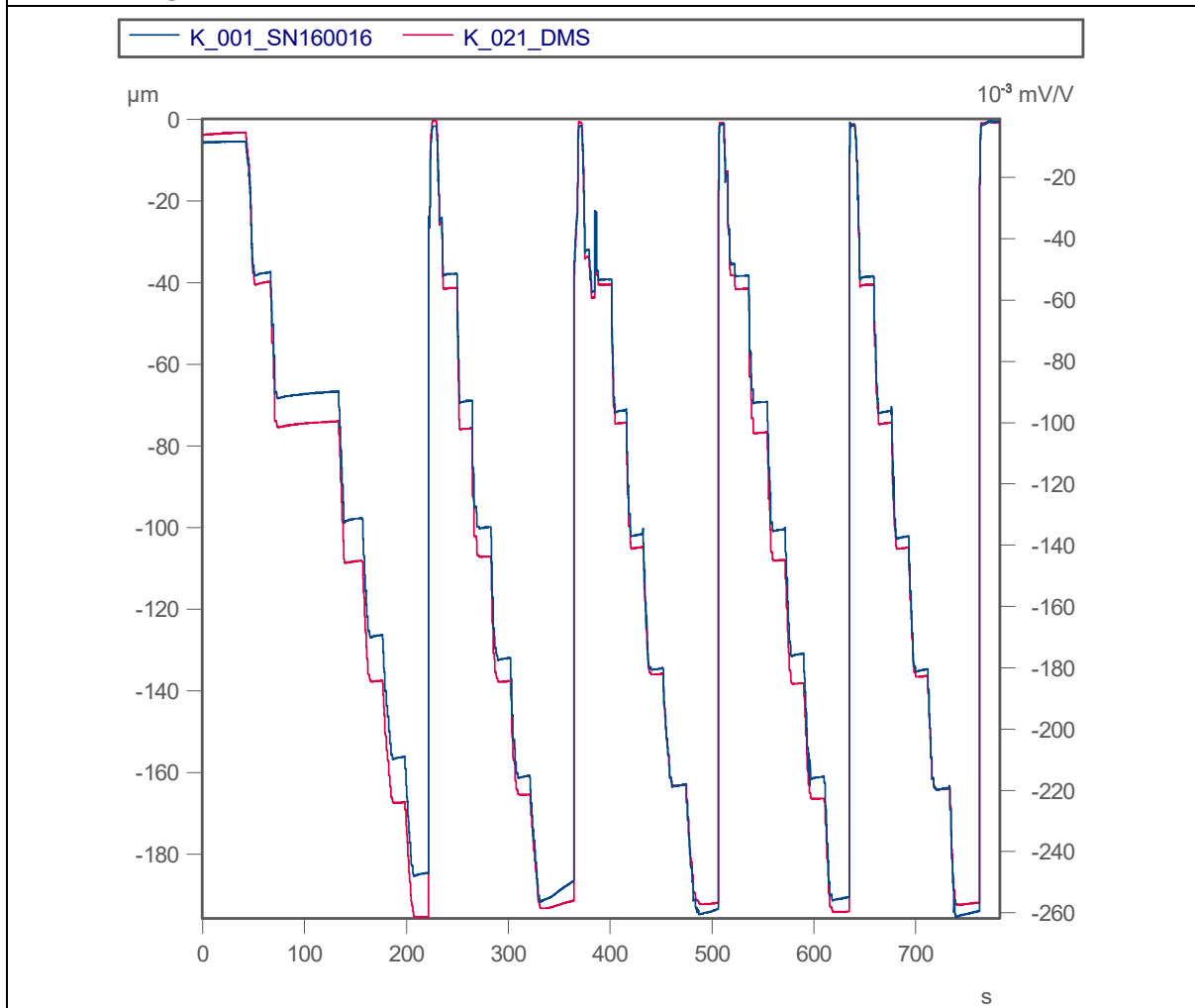
**Anmerkungen**

Versuch 1 bis 5; Serie 5

Druck 0 bis 600 bar

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 39)

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**

<b>Protokoll Nr.</b>	2020-09-02 10-46-44	<b>Nutenstein Nr.</b>	2
<b>Prüfdatum</b>	02.09.2020	<b>Vorspannmoment</b>	2 Nm
<b>Uhrzeit</b>	10:46:44	<b>Messplatte</b>	-
<b>Prüfer</b>	Martin Wagner	<b>Temperatur:</b>	20,6°C

**Beschreibung**

Bestimmung der Wiederholpräzision des Messsystems

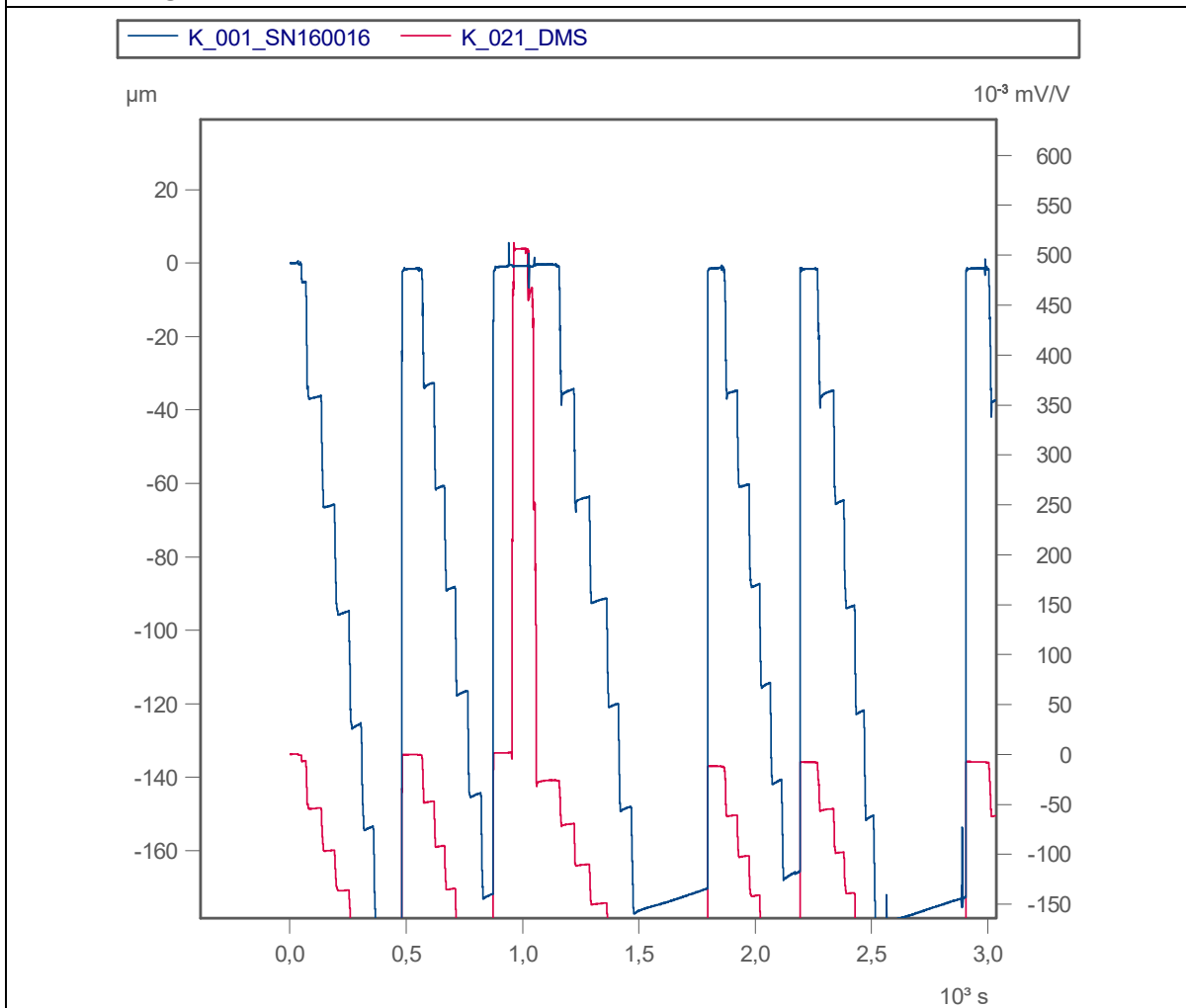
**Anmerkungen**

Versuch 1 bis 6

Druck 0 bis 700 bar

Weg 1 → K\_001\_SN160016 (siehe Abbildung 39)

Brückenverstimmung → K\_021\_DMS

**Darstellung**

# Auswerteroutine Famos Minimum

```
; Programm zur Ermittlung der DMS (Brückenverstimmung) Minima und Ermitt-
lung des dazugehörigen Weges in bestimmten Bereichen
;Version 0.1
; Breite: Empfehlung -> halbe Länge des kürzesten statischen Brückenspan-
nungswertes
; Warnung: Sollte das Minima am Rand des zu untersuchenden Bereiches lie-
gen wird eine Fehlermeldung ausgegeben, da die Wahrscheinlichkeit besteht
das
; das Minima weiter rechts oder links des zu untersuchenden Bereiches
liegt

; Daten umbenennen
Weg=K_001_SN160016
DMS=K_021_DMS

; Daten glätten
V=0.8
Weg_glatt=glatt(Weg,V)
DMS_glatt=glatt(DMS,V)

; Daten ausschneiden
Zeit=BoxWert?("Zu untersuchender Zeitpunkt",1,0)

Breite=3
DMS_glatt_min=Gren(DMS_glatt,Zeit-Breite,Zeit+Breite)

; Minimum finden und Position suchen
DMS_min=Min(DMS_glatt_min)
DMS_min_Zeit=Posi(DMS_glatt_min,DMS_min)
Weg_min=Wert2(Weg_glatt,DMS_min_Zeit,0)

; Daten umrechnen
DMS_min=DMS_min*1000
Weg_min=Weg_min*1000

BoxAusgabe("Zeit           : ", DMS_min_Zeit, "F4.4", 1)
BoxAusgabe("Weg: [µm] : ", Weg_min, "F4.4", 1)
BoxAusgabe("DMS [µV/V]: ", DMS_min, "F4.4", 1)

IF DMS_min_Zeit = Zeit+Breite
    BoxNachricht("Achtung","Randbereich als Minimum erkannt, dieses Ver-
halten deutet auf eine falsche Eingabe hin.,"!1")
ELSEIF DMS_min_Zeit = Zeit-Breite
    BoxNachricht("Achtung","Randbereich als Minimum erkannt, dieses Ver-
halten deutet auf eine falsche Eingabe hin.,"!1")
END
```





## Bestimmung der Werte der Wiederholgenauigkeit

```
;Daten Filtern mittels Median-Filter
Punktezahl = 5
Weg_f = Median(K_001_SN160016, Punktezahl)
DMS_f = Median(K_021_DMS, Punktezahl)

;Daten glätten
M = 3
Weg_m = Glatt(Weg_f, M)
DMS_m = Glatt(DMS_f, M)

;Datensätze Zeitrichtig verbinden
CwNewWindow(DMS_m, "show")
CwSelectWindow(DMS_m)
CwNewChannel_xy("append last axis", Weg_m, DMS_m, "xy")

;linear Interpolierten y-Wert (DMS Brückenverstimmung) zu x-Wert (Weg)
finden
Weg_Position=-0.028 ;in mm
DMS_Daten_Zeit=PosiEx2(Weg_m, Weg_Position, 0, 1)
DMS_Daten=Wert2(DMS_m, DMS_Daten_Zeit, 0)
Weg_Daten=Wert2(Weg_m, DMS_Daten_Zeit, 0)
```



## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Chemnitz, den 30.10.2020

Uwe Martin Wagner