



Eckerstorfer Dominik, BSc

Ermittlung von Materialkennwerten für Umformverfahren

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.- Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Christof Sommitsch

Dipl. Ing. Christian Hoflehner

Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik

Dipl. Ing Florian Hausmann (Betreuung Industriepartner)

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand als Abschlussarbeit im Zuge meines Masterstudiums Maschinenbau an der TU Graz. Schon früh in meiner Jugend wusste ich, dass meine berufliche Zukunft im Bereich der Technik liegt. Nach der HTL für Automatisierungstechnik wollte ich meine technische Ausbildung weiter vertiefen. Aus diesem Grund habe ich mich für das Maschinenbaustudium an der TU Graz entschieden.

Der Bereich der Umformtechnik umfasst komplexe, sehr interessante, mechanische und werkstofftechnische Gebiete. Deshalb war es mir wichtig meine Abschlussarbeit in diesem Bereich zu schreiben. Die vielfältigen Aufgabengebiete dieses Projekts haben mich besonders angesprochen. Angefangen von konstruktiven Herausforderungen, über werkstofftechnische Eigenschaften und Programmierung hat das Projekt dazu beigetragen mein Wissen in all diesen Bereichen zu vertiefen.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer DI Christian Hoflehner vom Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik, der mich bei der Erstellung der Arbeit begleitet hat und mich mit hilfreichen Tipps und Vorschlägen unterstützt hat.

Des Weiteren möchte ich die Gelegenheit nutzen um mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch zu bedanken für die Möglichkeit die Arbeit an dem Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik zu schreiben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn DI Florian Hausmann für die Betreuung des Projektes seitens des Industriepartners. Danke für das entgegengebrachte Vertrauen, die tatkräftige Unterstützung und die guten Vorschläge und Anregungen während des gesamten Zeitraums der Arbeit. Danke auch an Herrn DI Gerhard Angerer für den Praktikumsplatz und an alle Kollegen für das tolle Arbeitsklima und die wertvollen Tipps.

Kurzfassung

Fließkurven definieren das Verhalten von Werkstoffen bei plastischer Verformung und sind ein essentieller Bereich der Werkstoffkunde. Es gibt eine Reihe von Verfahren für die Aufnahme von Fließkurven. Aufgrund der Anisotropie der meisten Werkstoffe (richtungsabhängige Eigenschaften) ist es von Vorteil für das jeweilige Umformverfahren auch realitätsnahe Prüfverfahren zur Aufnahme von Fließkurven zu verwenden.

Aus vorhandenen Biegeversuchen und FE-Simulationen geht hervor, dass sich einerseits die Biegekräfte zwischen Realversuch und Simulation unterscheiden und andererseits die tatsächlichen und simulierten Schenkellängen und Biegewinkel teils deutlich differieren. Diesen Phänomen möchte ich in der vorliegenden Arbeit auf den Grund gehen und die Genauigkeit der Biegesimulationen erhöhen.

Das Ziel der Arbeit besteht darin einen Prüfstand zu konstruieren mit dem für verschiedene Blechproben Momenten- Krümmungsverläufe aufgezeichnet werden. Mit Hilfe des Berechnungsansatzes von Nadai kann unter bestimmten Voraussetzungen aus dem Momentenverlauf eine Biegefließkurve generiert werden.

Aus den Materialien S235JR bzw. DC01, X5CrNi1810, AlMg3 wird ein Blechprobenkatalog definiert der festlegt, mit welchen Blechdicken die einzelnen Versuche durchgeführt werden.

Die vorhandenen Materialdaten aus der Biegefließkurve werden als Eingangsparameter für die Biegesimulationen verwendet und ersetzen die Daten der Zugfließkurve. Dies soll schlussendlich dazu dienen, die Differenzen der Prozessparameter aus Versuch und Simulation zu minimieren und somit die Qualität der Simulationsergebnisse erhöhen.

Abstract

Flow curves describe the behavior of materials during plastically deformation and defines an important part of the material science. In general there are a lot of different methods to record flow curves. Because of the anisotropy behaviour of most technological materials (directional properties) it has an advantage to use test methods which are near the real forming situation.

Existing FE- simulations and bending processes show that the bending forces in the simulations are mostly underrated. Furthermore the tested and simulated blade length and the bending angle can rather differ. In this project I want to investigate this phenomenons and improve the accuracy of its bending simulations.

The goal of this project is to design a test bench to record moment- curvature curve of different metal sheets.

With the help of the calculation approach of Nadai bending flow curves can be generated out of the moment- curvature relationship.

Technological important materials like S235JR respectively DC01, X5CrNi1810, AlMg3 tested at different sheet thicknesses to create a sheet sample catalog.

The existing material data of the bending flow curves are used to define the input parameters of the process simulations and replace the data of the yield stress under tensile load. This should finally help to minimize the difference of the process parameters between simulation and experiment and should improve the accuracy of the simulation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Ziele und Nicht- Ziele	2
1.3	Arbeitsschritte	2
2	Literatur	3
2.1	Elastizität – Plastizitätstheorie allgemein.....	3
2.1.1	Plastisches Fließen.....	4
2.2	Vergleichsspannungshypothesen.....	5
2.2.1	Von Mises Vergleichsspannungshypothese.....	5
2.2.2	Tresca Schubspannungshypothese	5
2.3	Blechumformung/Blechbiegen	6
2.3.1	Verkürzung.....	7
2.3.2	Werkstoffverhalten	8
2.3.3	Elementare Biegetheorie	8
2.3.4	Erweiterte Berechnungsansätze	11
2.3.5	Biegefließkurve	14
3	Konstruktive Auslegung des Prüfstandes	15
3.1	Anforderungen	15
3.2	Klemmung der Blechprobe.....	16
3.2.1	Klemmung mittels Schraubenverbindung.....	17
3.2.2	Klemmung mittels Keil	18
3.2.3	Schlussfolgerung	20
3.3	Momenteneinleitung.....	20
3.3.1	Momenteneinleitung über Drehmomentmesswelle	21
3.3.2	Momenteneinleitung über Hebel.....	22
3.3.3	Schlussfolgerung	24
3.4	Lagerung des Prüfstandes	24
3.4.1	Symmetrische Lagerung	24
3.4.2	Fliegende Lagerung	25
3.4.3	Schlussfolgerung	25
3.5	Funktionsprinzip/ Gesamtaufbau des Prüfstandes	26
4	Messtechnik	28

4.1	Auswahl Messtechnik/Sensoren am Prüfstand.....	29
4.1.1	Kraftmessung.....	29
4.1.2	Radiusmessung	34
4.1.3	Winkelmessung.....	35
4.1.4	Wegmessung	36
4.2	LabView	37
4.2.1	Signalauswertung und Datenaufzeichnung	37
4.2.2	Programmoberfläche	38
5	Berechnung der Biege­fließ­kurve über die Momenten- Krümmungs­beziehung	41
5.1	Berechnungsansatz nach Nadai	41
5.2	Berechnungsansatz nach der elementaren Biegetheorie	45
5.2.1	Werkstoffmodelle	45
6	Bestimmung der Biege­fließ­kurve in Matlab.....	48
6.1	Aufbau des Programmcodes.....	48
6.1.1	Skript Biege­fließ­kurve	49
6.1.2	Skripten Sensordaten_gesamt und Simple Convert TDMS	49
6.1.3	Skript Radiusberechnung_aus_TDMS	49
6.1.4	Skript test_circle.....	50
6.2	Berechnung der Momenten- Krümmungs­beziehung	51
6.2.1	Moment aufgrund des Eigengewichts der Klemm­konstruktion	52
6.2.2	Bestimmung der Randdehnung für kleine Biege­winkel.....	56
6.3	Auswertung nach Nadai	62
6.3.1	Beschreibung des Momenten­ver­laufs durch „gefittete“ Funktionen	62
6.3.2	Beschreibung des Momenten­ver­laufs durch kubische Splines	64
6.3.3	Glätten der Messwerte und anschließende Differentiation.....	66
6.4	Auswertung nach der elementaren Biegetheorie.....	67
6.4.1	Hook'sches Gesetz als Werkstoffmodell:	68
6.4.2	Bestimmung des E-Modul aus der Biege­linie.....	68
6.4.3	Fazit	69
6.5	Schluss­fol­ge­rung	69
7	Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	70
7.1	Versuchsdurchführung und Versuchsmaterial.....	70
7.1.1	Versuchsmaterial	70
7.2	Versuchsergebnisse	72



7.2.1	Ergebnisse der X5CrNi1810 Proben	72
7.2.2	Ergebnisse der S235JR bzw. DC01 Proben	75
7.2.3	Ergebnisse der AlMg3 Proben.....	77
8	Diskussion der Ergebnisse	82
9	Zusammenfassung	84
10	Ausblick.....	85
11	Abbildungsverzeichnis.....	86
12	Tabellenverzeichnis.....	88
13	Literatur	89
14	Anhang A (Zusammenbauzeichnung & Stückliste).....	91
15	Anhang B (Datenblätter Messtechnik).....	96
15.1	Kraftsensor 9135B	96
15.2	Ladungsverstärker DACU	98
15.3	Drehgeber ROP520	100
15.4	ScanControl 2900-25	101
16	Anang C (Bedienanleitung).....	102

Abkürzungsverzeichnis

FE	Finite Elemente Methode
bzw.	beziehungsweise
σ_R	Randspannung
ϵ_R	Randdehnung
σ_V	Vergleichsspannung
φ_V	Vergleichsumformgrad
s	Blechdicke
b	Blechbreite
k_{f0}, φ_C, n	Swiftparameter
h	vertikaler Abstand der Blechprobe im gebogenen Zustand
M	Moment
l_0	Einspannlänge der Blechprobe
Δl	axialer Weg des beweglichen Lagerbocks während der Biegung
r_m	mittlerer Radius der Blechprobe
r_A	Außenradius der Blechprobe

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Betrachtet man den Sektor der Blechbearbeitung zeigt sich ein Trend Richtung kleinerer Losgrößen. Um dabei eine hohe Produktivität zu gewährleisten und den Ausschuss der Biegeteile auf ein Minimum zu reduzieren ist eine gute Vorhersagbarkeit der Prozessparameter notwendig. Eine Möglichkeit bietet die Finite Elemente- Simulation der Biegevorgänge. Um genaue und aussagekräftige Simulationen durchführen zu können, ist ein präzises Materialmodell von entscheidender Bedeutung. Dabei tritt zunehmend das Problem auf, dass die in der Finite Elemente simulierte Prozesskraft meist deutlich unter der durch Versuche ermittelten Prozesskraft liegt. Abbildung 1 zeigt, dass sich Simulation und Praxis um 20% unterscheiden können. Des Weiteren können die realen und simulierten Schenkellängen und Biegewinkel teils deutlich voneinander abweichen.

Eine mögliche Ursache liegt darin, dass bisher Zugfließkurven als Grundlage für die Simulationen verwendet werden. Mit Hilfe von Vergleichsspannungshypothesen (von Mises) wird der vorhandene mehrachsige Spannungszustand auf einen einachsigen Spannungszustand reduziert, wie er beim Zugversuch vorhanden ist. Die Zugfließkurve und die reale Biegefließkurve können jedoch deutlich voneinander abweichen, was zu Fehlern in der Simulation führt.

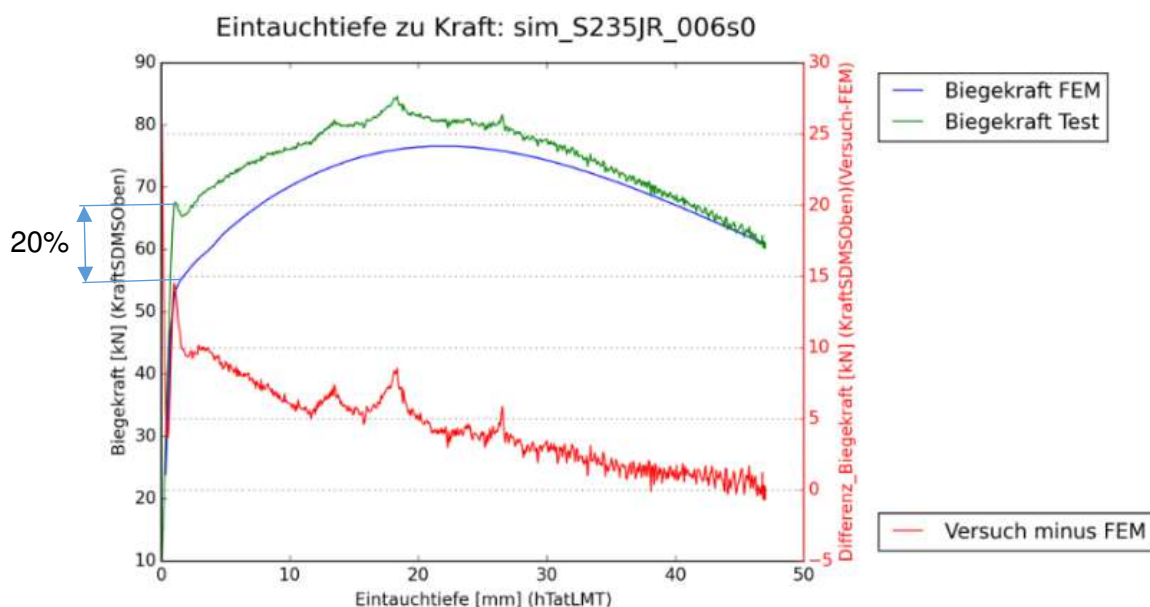


Abbildung 1: Prozesskraft über Weg (FEM & Versuch)

1.2 Ziele und Nicht- Ziele

Ziel der Arbeit ist es einen Prüfstand zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Momenten-Krümmungsabhängigkeit verschiedener Blechproben bestimmt werden kann. Zusätzlich soll über einen Auswertalgorithmus aus den vorhandenen Messdaten, sprich der Momenten-Krümmungskurve die Biegefließkurve berechnet werden.

Dabei sollen für die Werkstoffe S235JR bzw. DC01, X5CrNi1810 und AlMg3, bei verschiedenen Blechdicken, die Biegefließkurven bestimmt werden.

Die generierten Materialparameter sollen in zukünftigen Simulation die Parameter der Zugfließkurve ersetzen und die Genauigkeit der Simulationen erhöhen.

Bei dem Prüfstand soll es sich um einen Prototypen handeln, der mit Hilfe eines möglichst einfachen und kostengünstigen Aufbaus die theoretischen Überlegungen bestätigt oder widerlegt.

Es besteht nicht die Absicht einen seriennahen Prüfstand mit voll automatisierter Datenauswertung zu entwickeln.

1.3 Arbeitsschritte

Die Hauptaufgaben der Arbeit können wie folgt definiert werden:

- Einschlägige Literaturrecherche
- Konstruktive Auslegung des Prüfstandes unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen
- Wahl der Sensorik zur Auswertung des Biegeversuchs
 - Messung des Krümmungsradius
 - Momenten und Kräfte erfassung
 - Winkelmessung, Wegmessung
- Einlesen und Aufzeichnen der Messdaten mittels LabView
- Auswertalgorithmus zur Ermittlung der geforderten Materialdaten aus den Messwerten (Matlab)
- Ermittlung der Biegefließkurven für das vorhandene Blechdickenspektrum und den in Kapitel 1.2 bestimmten Werkstoffen

2 Literatur

2.1 Elastizität – Plastizitätstheorie allgemein

Im Gegensatz zur Elastizitätstheorie beschäftigt sich die Plastizitätstheorie mit der bleibenden Formänderung von Werkstoffen das heißt mit Spannungs- Dehnungszuständen im Fließbereich.

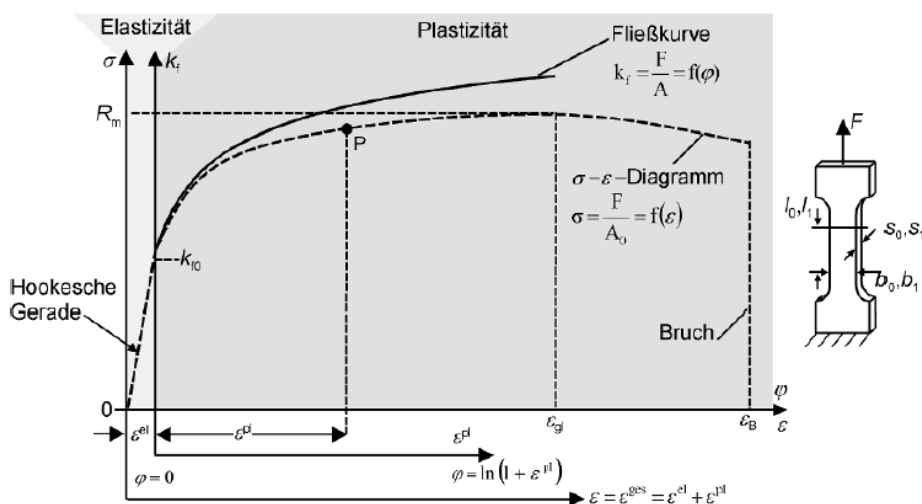


Abbildung 2: Spannungs- Dehnungsdiagramm einer Flachzugprobe [1]

In Abbildung 2 sind einige grundlegende Begriffe und Größen für die elastische und plastische Betrachtung des Werkstoffverhaltens dargestellt.

Elastizität:

Im elastischen Bereich geht der Werkstoff nach Verformung wieder in den Ausgangszustand zurück. Beschrieben wird er durch die Hookesche Gerade ($\sigma = E \cdot \epsilon$).

Das Ende dieser Geraden und damit das Ende des elastischen Bereichs ist durch die Streckgrenze R_e gegeben bzw. durch die Ausgangsfließspannung k_{f0} .

Plastizität:

Im Bereich der Plastizität beginnt die bleibende Formänderung des Werkstoffes. Der in Abbildung 2 strichliert dargestellte Kurvenverlauf definiert die Spannung bezogen auf den Ausgangsquerschnitt. Am Ende der Gleichmaßdehnung (ϵ_{gl}) ist der Verlauf durch die Zugfestigkeit R_m bestimmt. Bis zu diesem Bereich verformt sich die Probe gleichmäßig über die Länge, nach der Gleichmaßdehnung kommt es zu einer lokalen Einschnürung und die Spannung bezogen auf den Anfangsquerschnitt sinkt.

2.1.1 Plastisches Fließen

Unter Fließen versteht man Vorgänge im Werkstoff die durch Krafteinwirkung zu einer bleibenden, plastischen Formänderung führen [2].

Damit ein Werkstoff überhaupt fließen kann sind Schubspannungen notwendig, denn die plastische Verformung setzt ein Abgleiten im Kristall voraus. Das Abgleiten zweier Halbkristalle erfolgt auf Gleitebenen unter der Wirkung von Schubspannungen [3].

Während der Umformung des Materials, wandern 1 dimensionale Gitterfehler, sogenannte Stufenversetzungen, durch das Material. Die Versetzungsbewegung erfolgt entlang von Gleitebenen.

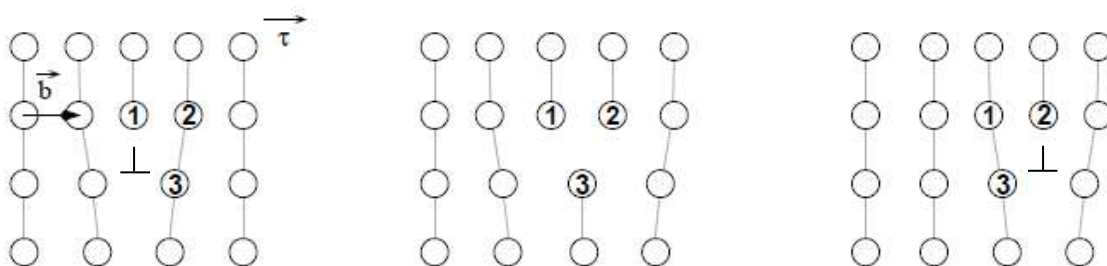


Abbildung 3: Wandern von Stufenversetzungen [4]

In Abbildung 3 ist ersichtlich wie die Bewegung der Stufenversetzung im Material vonstatten geht. Zu Beginn ist die Versetzung beim Atom 1. Durch das Scheren wird der Abstand zwischen 1 und 3 kleiner und das Atom 3 entfernt sich immer weiter von 2 bis der Abstand zwischen 1 und 3 sowie zwischen 2 und 3 gleich ist. Weitere Scherung führt dazu dass eine atomare Verbindung zwischen 1 und 3 entsteht [4].

Bei Stufenversetzungen handelt es sich um eindimensionale Gitterfehler. Wie in Abbildung 3 dargestellt sind Stufenversetzungen eingeschobene Halbebenen. Sie sind in jedem Material bzw. Kristall vorhanden und entstehen bei der Erstarrung aus der Schmelze [28]. Versetzungen bilden die Grundlage damit ein Werkstoff verformt werden kann.

2.1.1.1 Fließspannung

Die Fließspannung ist jene Spannung die notwendig ist um einen bestimmten plastischen Zustand zu erreichen oder diesen aufrecht zu erhalten. [13]

Sie entspricht jener Spannung, die bei einem einachsigen Zugversuch zur plastischen Verformung aufgewendet werden muss. Die Fließspannung ist definiert als Verhältnis der einachsigen Zugkraft F zum Momentanquerschnitt A ($\sigma_F = F/A$) und ist von mehreren Größen abhängig: [13]

- Logarithmische Formänderung bzw. Umformgrad ϕ
- Logarithmische Formänderungsgeschwindigkeit ($d\phi/dt$)

- Umformtemperatur (je höher die Umformtemperatur desto geringer die Fließspannung)

2.2 Vergleichsspannungshypothesen

Wie bereits in Kapitel 2.1.1.1 erwähnt bezieht sich die Fließspannung auf den einachsigen Spannungszustand. Des Weiteren erfolgt die Bestimmung wichtiger Materialparameter, wie der E-Modul oder der Zugfestigkeit aus dem Zugversuch, das heißt aus dem einachsigen Spannungszustand.

In der Praxis tritt jedoch kein einachsiger, sondern ein mehrachsiger Spannungs- und Formänderungszustand auf. Aus diesem Grund sind Vergleichsspannungshypothesen notwendig um vom mehrachsigen auf den einachsigen Zustand schließen zu können. Dafür gibt es mehrere Ansätze, wobei die zwei Wichtigsten kurz erläutert werden.

2.2.1 Von Mises Vergleichsspannungshypothese

Auch bekannt unter Gestaltänderungshypothese. Voraussetzung für die Anwendung dieser Hypothese ist ein zäher Werkstoff und die Isotropie des Materials [30]. Darunter versteht man, dass die Materialeigenschaften in alle Raumrichtungen gleich sind.

Bei der Verformung eines Materials treten 2 Energieanteile auf: [29]

- Kompressionsenergie
- Gestaltänderungsenergie, jener Teil der den Hauptanteil am Versagen eines Bauteils trägt

Im allgemeinen Spannungszustand: [30]

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x * \sigma_y - \sigma_x * \sigma_z - \sigma_y * \sigma_z + 3 * (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (1)$$

Im Hauptachsensystem: [30]

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

2.2.2 Tresca Schubspannungshypothese

Wie auch die Gestaltänderungshypothese nach von Mises wird diese Vergleichsspannungshypothese ebenfalls für zähe Werkstoffe angewendet.

Man geht davon aus, dass das Versagen eines Werkstoffes durch die größte auftretende Schubspannung geschieht [9].

- α Biegewinkel
- β Scheitelwinkel ($\alpha + \beta = 180^\circ$)
- s_0 ursprüngliche Blechdicke
- l_1, l_2 ... Schenkellängen
- r_a Radius an der Außenkante des Biegebogens
- r_i Radius an der Innenkante des Biegebogens
- r_m mittlerer Radius, definiert den Radius der ungelängten beziehungsweise neutralen Faser

2.3.1 Verkürzung

Ein gebogenes Blech behält entlang der neutralen Faser die ursprüngliche Länge. An der Außenkante wird das Blech während der Biegung gestreckt. Damit die Schenkel des gebogenen Bauteils am Ende die gewünschten Maße erreichen, ist es notwendig den Zuschnitt zu verkürzen. Diese Verkürzung ist von der Materialart, der Blechdicke, dem Innenradius und dem Biegewinkel abhängig. [33]

Die Länge der Abwicklung berechnet sich aus den Schenkellängen und der Verkürzung.

$$L_0 = l_1 + l_2 + v \quad (5)$$

L_0 Länge der Abwicklung

l_1, l_2 ... Schenkellängen

v Verkürzung (entspricht l_{bogen} in Abbildung 6)

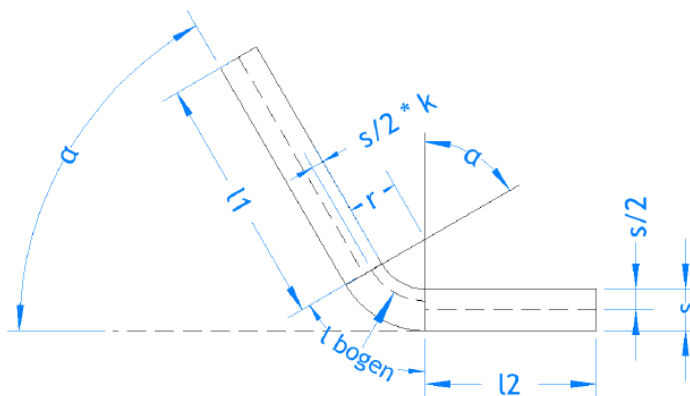


Abbildung 6: Biegever kürzung [34]

Die Verkürzung berechnet sich folgendermaßen: [34]

$$v = \left(r + \frac{s}{2} * k \right) * \pi * \frac{\alpha}{180} \quad (6)$$

- s Blechdicke
- r Biegeradius (Innenradius)
- α Biegewinkel
- k Korrekturfaktor, ist ein Wert dafür, wie weit die ursprüngliche und die korrigierte „imagi­näre“ neutrale Faser auseinander liegen [34]

2.3.2 Werkstoffverhalten

Liegt ein dreiachsiger Spannungs- und Dehnungszustand vor, wird für dessen Berechnung das σ - ϵ Verhalten eines einachsigen Zustandes, wie er aus dem Zugversuch gewonnen wird zugrunde gelegt. Die erhaltene Fließkurve aus dem Zugversuch ist nur für kleine Umform­grade (bis zur Gleichmaßdehnung) gültig, ab dort liegt kein einachsiger Spannungszustand mehr vor [7]. Mit den in Abbildung 7 dargestellten Werkstoff­modellen erfolgt eine rechnerische Beschreibung des tatsächlichen Verlaufs auch über die Gleichmaßdehnung hinaus.

Werkstoffmodell	Einfache Biegung		Mehrfache Biegung	Überlagerte Biegung
	ein-achsig	mehr-achsig		
starr-idealplastisch 	Hill [6.3]			Lippmann [6.19] Hill [6.3]
starr mit Verfestigung 	Ludwik [6.2] Proksa [6.4]			
elastisch-idealplastisch 	Prager [6.5] de Boer [6.10] Bruhns [6.11]		Witte [6.14]	Roberts [6.20]
elastisch-plastische Verfestigung 	Nadai [6.6] Züñkler [6.7] Walter [6.8] Poóczya [6.9]	Bruhns [6.12] Deh [6.13]	Guericke [6.15] Lücke [6.16] Hartig [6.17] Noe [6.18]	

Abbildung 7: Werkstoffmodelle und zugehörige Berechnungsansätze [7]

2.3.3 Elementare Biegetheorie

Diese Theorie geht auf Herrn Ludwik Paul zurück und bildet die Grundlage für viele weitere darauf aufbauende Theorien (Wolter, Schwark, etc.).

Ludwiks Theorie [8] basiert auf einer Reihe von Annahmen: [10]

- Das Blechbiegen erfolgt quer­kraft­frei, das heißt es handelt sich um reines Mo­men­ten­biegen
- Der Werkstoff ist homogen und isotrop
- Das Verhältnis zwischen Blechbreite/Blechdicke ist sehr groß, sodass ein ebener Formänderungszustand herrscht
- Die Blechdicke ändert sich während des Biegevorgangs nicht
- Erfüllung der Bernoulli Hypothese
 - Ebene Querschnitte bleiben eben und senkrecht zur Oberfläche

Der ebene Formänderungszustand führt auf einen dreiachsigen Spannungszustand. Aus den oben genannten Vereinfachungen über die Formänderung folgt, dass die Achsen des in Ab­bil­dung 5 dargestellten Koordinatensystems die Hauptachsen sind, das heißt σ_r , σ_z und σ_ψ Hauptspannungen sind [7].

$$\begin{matrix} \sigma_r & 0 & 0 & \rightarrow & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\psi & 0 & & 0 & \sigma_\psi & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z & & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (7)$$

Ludwik besagt in seiner Theorie, dass die Spannungen in Dicken (z)- und Radial (r)- Rich­tung bei Biegevorgängen mit kleinen bis mittleren Krümmungen vernachlässigt werden kön­nen und nur die tangentielle Spannung σ_ψ Einfluss hat. [7]

Dadurch bleibt ein einachsiger Spannungszustand übrig der direkt mit den Ergebnissen ei­nes einachsigen Zugversuchs verglichen werden kann. Da die Dehnungen symmetrisch zur Blechmitte sind bedeutet das für die neutrale Faser, dass sie zugleich die ungelängte Faser ist.

Ab einem bestimmten Biegewinkel, bei dem die Fließspannung k_f erreicht wird, breitet sich vom Rand her ein zunehmend plastischer Anteil aus, der dafür sorgt, dass die Spannungs-Dehnungsverteilung nicht mehr rein linear ist (siehe Abbildung 8) [10].

Bei einer elastisch-plastischen Biegung sind mehrere Ansätze möglich um das Verhalten im Inneren des Materials zu beschreiben.

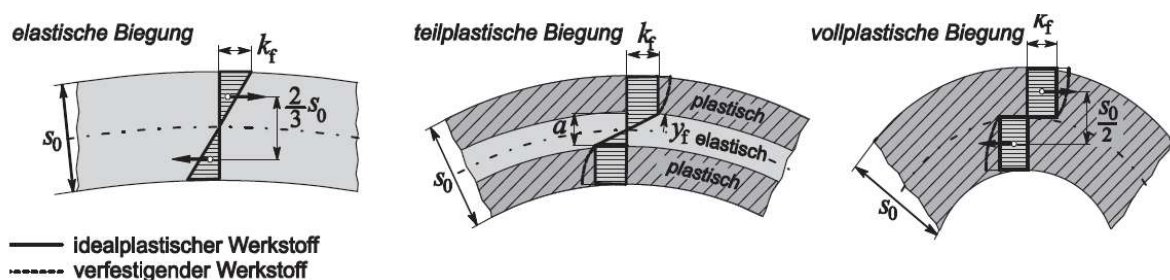


Abbildung 8: Spannungen im Blech [10]

In Abbildung 8 auf der linken Seite ist die lineare Verteilung der Spannung über dem Querschnitt bei rein elastischer Biegung dargestellt.

Im mittleren Abbild, der teilplastischen Biegung sind 2 unterschiedliche Verläufe zu erkennen, die sich im plastischen Bereich unterscheiden. Der durch gerade Linien gekennzeichnete Verlauf definiert das idealplastische Werkstoffverhalten und der gekrümmte Kurvenverlauf berücksichtigt die Verfestigung des Materials.

Bei der vollplastischen Biegung, wie im rechten Bild der Abbildung 8 ersichtlich, wird überhaupt kein elastischer Anteil berücksichtigt. In der Theorie bedeutet das einen Krümmungsradius von 0. In der Praxis ist der Radius jedoch begrenzt durch die halbe Blechdicke.

2.3.3.1 Verfestigung

Ein Werkstoff erfährt durch plastische Verformung eine Steigerung der Streckgrenze und Zugfestigkeit. Mit zunehmender Verformung werden Versetzungen gebildet die sich gegenseitig behindern. Dies führt zur erwähnten Festigkeitssteigerung.

Grundsätzlich werden 2 Hauptarten von Verfestigung unterschieden: [31]

- Isotrope Verfestigung
- Kinematische Verfestigung

Isotrope Verfestigung:

Gleichmäßige Vergrößerung der ursprünglichen Fließfläche während der Belastung. Dabei erfolgt keine Translation und auch die Form der Fließfläche wird nicht verändert (siehe Abbildung 9). [31]

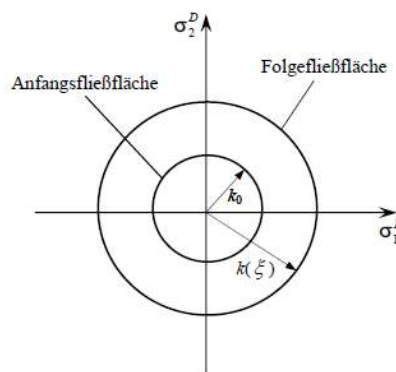


Abbildung 9: Isotropes Verfestigungsverhalten [11]

Kinematische Verfestigung:

Auch bekannt als Bauschinger Effekt [32]. Dieser Effekt berücksichtigt die sinkende Fließspannung bei der Belastungsumkehr. Da im Bereich der neutralen Faser die einzelnen Fasern zuerst auf Druck und mit zunehmender Umformung auf Zug beansprucht werden muss dieser Effekt beim Blechbiegen berücksichtigt werden.

Während der plastischen Verformung kommt es zu einer Verschiebung der Fließortfläche. [31]

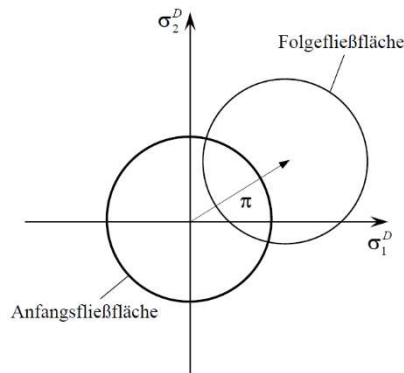


Abbildung 10: kinematische Verfestigung [12]

2.3.4 Erweiterte Berechnungsansätze

Die elementare Biegetheorie nach Ludwik beschreibt, wie oben bereits erwähnt, die Grundlage für weitere Theorien. Die von Ludwik getroffenen Annahmen sind teils starke Vereinfachungen die in manchen Fällen nur teilweise zutreffen. Zum Beispiel bleibt die Blechdicke während des Biegevorgangs nicht konstant und auch die Lage der neutralen Faser ändert sich während des Biegevorgangs und befindet sich nicht in der Mitte der Blechprobe. Des Weiteren herrscht im Blech kein einachsiger Spannungszustand, sondern ein mehrachsiger Spannung- und Formänderungszustand. [17]

Abbildung 11 verdeutlicht den Verlauf der Fasern in einer gebogenen Blechprobe.

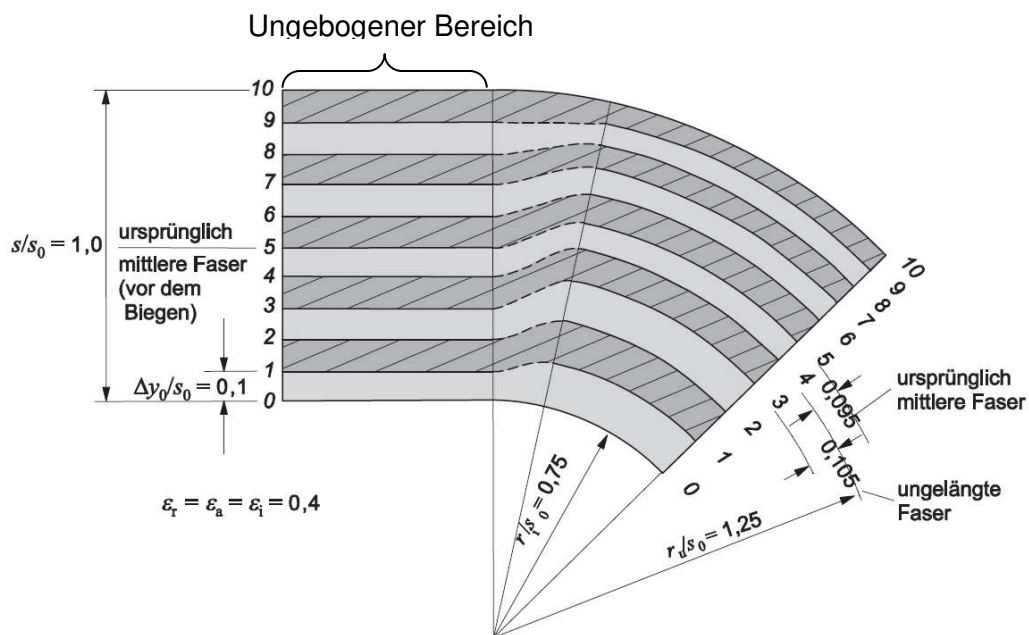


Abbildung 11: Faserlagen in einer gebogenen Blechprobe [17]

Im linken Bereich der Abbildung sind die Faserverläufe einer ungebogenen Blechprobe ersichtlich. Der Abstand der Fasern ist gleich groß und die neutrale Faser liegt in der Mitte der Blechprobe.

Mit zunehmender Biegung wandern die Fasern weiter nach außen in Richtung des Zugbereichs. Der Grund dafür liegt in der Volumenkonstanz der Bereiche zwischen den Fasern. Die ursprünglich ungelängte Faser 5 (siehe Abbildung 11) wandert mit zunehmender Biegung in den Zugbereich und die am Beginn noch im Druckbereich befindliche Faser 4 ist im abgebildeten Biegezustand die ungelängte Faser. [17] In Abbildung 12 ist der Verlauf der einzelnen Fasern über der Randdehnung ersichtlich.

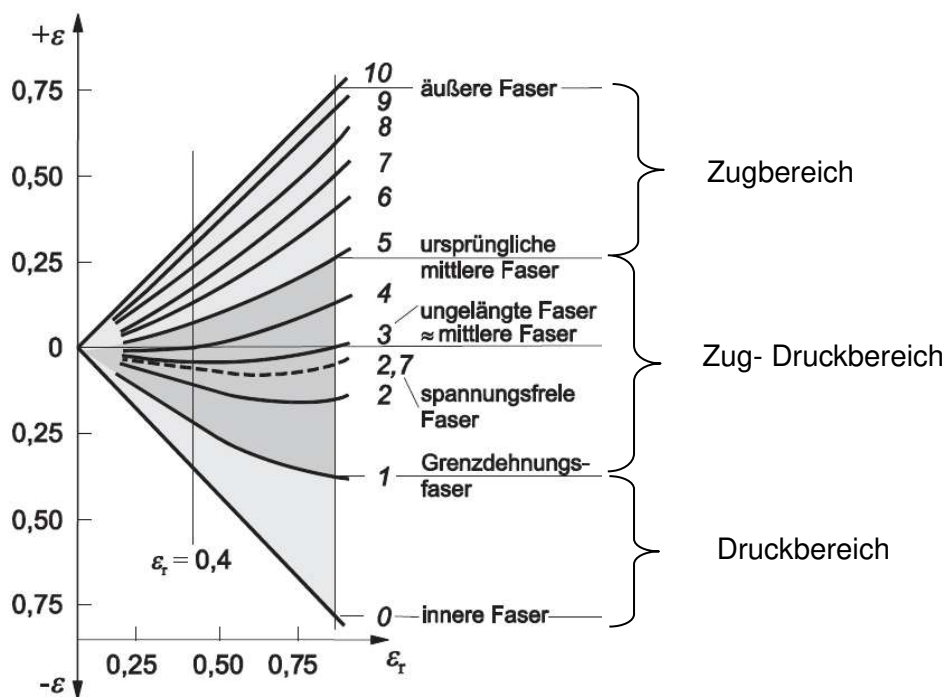


Abbildung 12: Verlauf der Fasern über der Randdehnung [18]

Aus dem Verlauf der Fasern in Abbildung 12 bilden sich 3 charakteristische Bereiche aus [18]:

- Zugbereich: alle Fasern in diesem Bereich (5-10) erfahren reine Zugbelastung
- Druckbereich: alle Fasern in diesem Bereich (0-1) erfahren reine Druckbelastung
- Zug- Druckbereich: In diesem Bereich erfahren die Fasern (1-5) sowohl eine Druck als auch eine Zugbelastung

Aufgrund der Tatsache, dass die Fasern in der Nähe der ursprünglichen neutralen Faser mit zunehmender Dehnung vom Druckbereich in den Zugbereich wandern, ist eine Berücksichti-

gung des Bauschinger Effekts notwendig (siehe Abschnitt 2.3.3.1, kinematische Verfestigung).

2.3.4.1 Mehrachsige Berechnungsansätze

Um die in Abschnitt 2.3.4 erwähnten Eigenschaften der Biegetheorie zu berücksichtigen sind mehrachsige Berechnungsansätze notwendig. Aufgrund des in Realität auftretenden mehrachsigen Spannungs- und Formänderungszustand ergeben sich 15 unbekannte Größen die berechnet werden müssen [18]:

- 6 Größen aus dem symmetrischen Spannungstensor

$$\begin{matrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{matrix} \rightarrow \tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yx} = \tau_{xy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$$

- 6 Größen aus dem symmetrischen Formänderungstensors

$$\begin{matrix} \epsilon_x & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_y & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_z \end{matrix} \rightarrow \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}, \epsilon_{yx} = \epsilon_{xy}, \epsilon_{zx} = \epsilon_{xz}$$

- 3 Größen für die Verschiebungen (u_x, u_y, u_z)

Es gibt eine Reihe dieser mehrachsigen Berechnungsansätze, wobei die Arbeit von Hill [19] den Grundstein bildet.

Hill erweiterte die elementare Biegetheorie bei großen Umformgraden indem er einen 3 dimensionalen Spannungszustand bei ebenen Formänderungszustand berücksichtigt, weil die Radialkräfte bei kleinen Biegeradien nicht vernachlässigt werden können. Aufgrund der Verwendung eines starr, idealplastischen Werkstoffmodells konnte er die Blechdickenänderung nicht berücksichtigen.[18]

Eine Erweiterung der Theorie von Hill stammt von Proksa [20]. Er berücksichtigte zusätzlich die Werkstoffverfestigung. Als Werkstoffmodell verwendet Proksa einen starr plastischen Ansatz mit linearer Verfestigung. Dadurch konnte eine numerisch lösbare Differentialgleichung für die Blechdickenänderung aufgestellt werden [18].

Es gibt noch eine Reihe weiterer mehrachsiger Berechnungsansätze (Nicklas, Pooza, Deh, etc.) auf die jedoch in dieser Arbeit nicht mehr näher eingegangen wird.

2.3.5 Biegefließkurve

Im Gegensatz zur Zugfließkurve beschreibt die Biegefließkurve das Materialverhalten unter reiner Biegebelastung [13]

Im Fließkurvenatlas nach Doege [13] wird der querkräftfreie Biegeversuch als Prüfverfahren vorgeschlagen.

Wie in Abbildung 13 ersichtlich gibt es eine Reihe verschiedener Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven obwohl mit Hilfe der Fließspannungshypothesen auf den einachsigen Zustand geschlossen werden kann. Das Problem dabei ist, dass in den Hypothesen die Anisotropie (Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften) die bei den meisten technologischen Werkstoffen vorhanden ist, nicht berücksichtigt wird. Aus diesem Grund wird je nach Umformverfahren ein Prüfverfahren vorgeschlagen, welches die realen Verhältnisse am besten nachbildet. [13]

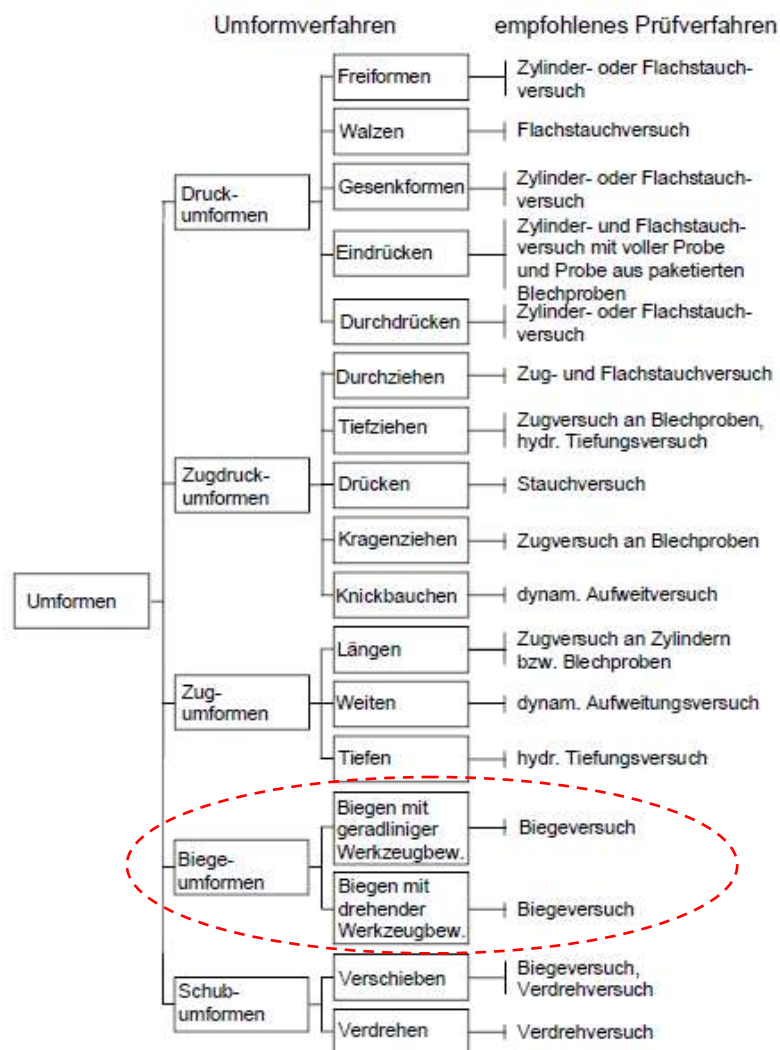


Abbildung 13: Umformverfahren und empfohlene Prüfverfahren [13]

3 Konstruktive Auslegung des Prüfstandes

3.1 Anforderungen

Für den Prüfstand ergeben sich eine Reihe von Anforderungen, die eingehalten werden müssen um die erforderlichen Ergebnisse zu erhalten.

- Der Prüfstand muss für Blechdicken von 1-6 mm ausgelegt werden
- Umformgrade von 0,2 sollen erreicht werden
- Der Prüfstand muss Biegemomente bis zu 300 Nm übertragen können (ergibt sich aus der Simulation für ein 6mm dickes Blech mit 60mm Breite)
- In der Literatur ist festgelegt, dass zur Bestimmung der Biegefließkurve aus der Momenten- Krümmungsbeziehung reines Momentenbiegen vorausgesetzt wird. Das bedeutet, dass keinerlei Querkräfte in den Biegeprozess eingeleitet werden dürfen. Dieser Aspekt muss bei der konstruktiven Auslegung des Prüfstandes besonders beachtet werden.

Die Berücksichtigung von Querkräften erfordern sehr komplizierte Rechenansätze und sind in dieser Arbeit vorerst nicht relevant.

Auf Basis der oben gestellten Anforderungen und der in Kapitel 2 durchgeführten Literaturrecherche erfolgt die konstruktive Auslegung des Prüfstandes.

Dabei ergeben sich zentrale Fragen deren Beantwortung den Aufbau des Prüfstandes definieren.

- 1) Wie wird die Blechprobe geklemmt?**
- 2) Wie wird das Moment eingeleitet?**
- 3) Wie wird die Lagerung des Prüfstandes ausgeführt?**

In Abbildung 14 ist eine Prinzipskizze des Prüfstandes dargestellt, die die wichtigsten Funktionen beinhaltet. Dabei kennzeichnet das obere Bild die Ausgangsstellung bei ungebogenem Blech und die untere Skizze den gebogenen Zustand bei Momenteinleitung. Die Zahlen beziehen sich auf die oben fett dargestellten Fragen, d.h. 1 definiert die Klemmung des Bleches, 2 die Momenteinleitung und 3 die Lagerung der Blechprobe.

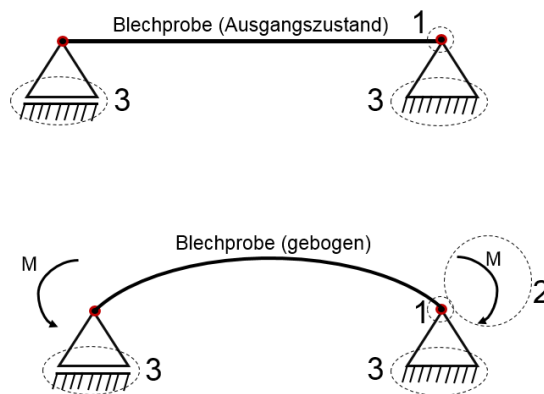


Abbildung 14: Prinzipskizze des Biegeprüfstandes

3.2 Klemmung der Blechprobe

Bei der Klemmung der Blechprobe ist zu berücksichtigen, dass die Verbindung möglichst steif ausgeführt werden muss, damit bei Übertragung des Momentes die Klemmung nicht locker wird und die Blechprobe von der Einspannstelle abhebt. Bei Blechprobendicken von 6mm werden Momente von bis zu 300 Nm übertragen. Bei gleichzeitig geringem Platzbedarf stellt dies enorme Herausforderungen an die konstruktive Gestaltung.

Die Blechproben haben unabhängig von der Blechdicke eine Breite von 60 mm und eine Einspannlänge von 20 mm, Abbildung 15. Diese einheitliche Breite und Einspannlänge erleichtert die konstruktive Auslegung der Klemmbacke. Um auch für Blechdicken von 6mm eine ausreichende Klemmlänge (ca. 3xBlechdicke) zu erreichen wurde diese mit 20mm definiert.

Die Blechprobe muss immer, egal welche Blechdicke, an der Oberseite einen fixen Anschlag haben, der genau auf derselben Höhe liegt wie der Drehpunkt. Dies ermöglicht es die Verschiebung des beweglichen Lagerbocks während des Biegevorgangs möglichst gering zu halten und somit die Verluste durch Reibung auf ein Minimum zu reduzieren.

Für die bestmögliche Klemmung werden im Folgenden mehrere Varianten vorgestellt und diskutiert.

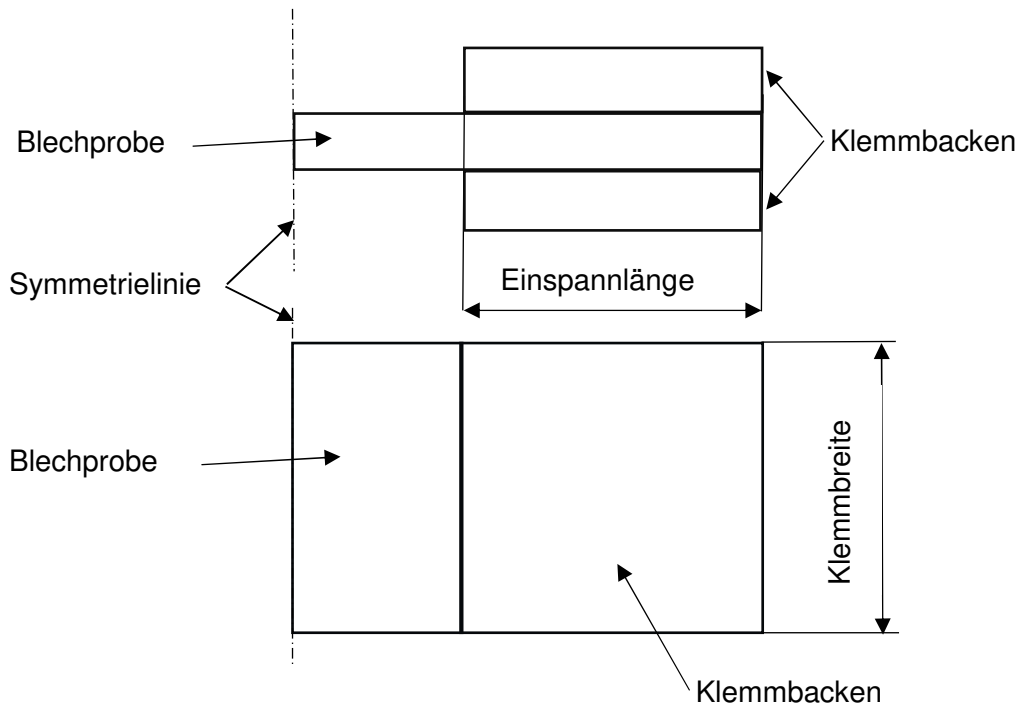


Abbildung 15: Darstellung der Klemmlänge und Klemmbreite

3.2.1 Klemmung mittels Schraubenverbindung

Bei dieser Einspannung wird die Blechprobe mit Hilfe zweier Schrauben verspannt.

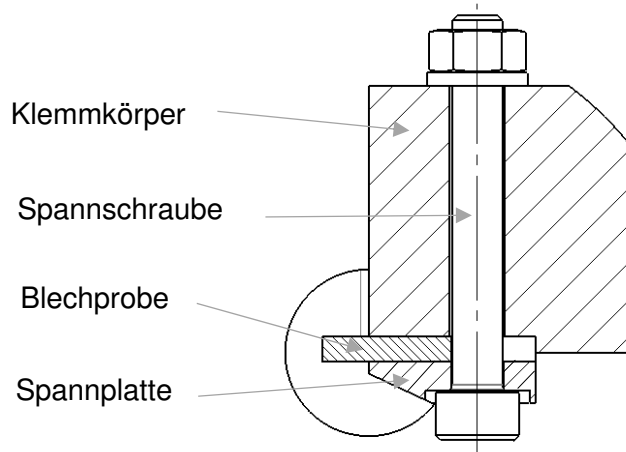


Abbildung 16: Klemmkonzept mittels Schraubenverbindung

Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 16 übersichtlich dargestellt. Über die Spannplatte und den Klemmkörper erfolgt die Befestigung der Blechprobe. Die Aufbringung der Klemmkraft erfolgt über 2 Innensechskantschrauben.

Vorteile:

- Es kann für mehrere Blechdicken dieselbe Spannbacke verwendet werden, ohne dass Distanzplatten dazwischen gelegt werden müssen.
- Der Klemmkörper ist einfach zu fertigen

Nachteile:

- Eine überschlägige Nachrechnung der Schraubenverbindung hat gezeigt, dass für die Spannung eines 6mm Blechs Schrauben von mindestens M8 benötigt werden
- Die Zugänglichkeit zu den Schraubenköpfen ist im gebogenem Zustand schwierig
- Das Entfernen der Blechprobe im gebogenen Zustand ist schwierig
- Es müssen sehr lange Schrauben verwendet werden (Durchsteckverbindung notwendig) was zu hohen Dehnungen und geringer Steifigkeit der Klemmverbindung führt
- Die Blechproben müssen bearbeitet werden (Bohrungen bzw. Einfräsungen notwendig)

3.2.2 Klemmung mittels Keil

Diese Art von Klemmung funktioniert über eine Keilverbindung. Um den zur Klemmung der Blechprobe notwendigen Hub von 0,5mm durch die Keilverbindung zu erreichen wurde ein Keilwinkel von 10 ° gewählt. Der Aufbau der Klemmverbindung ist in Abbildung 17 ersichtlich. Zu beachten bei Klemmwinkel dieser Größe ist die eintretende Selbsthemmung des Keils nach dem Spannen der Blechprobe.

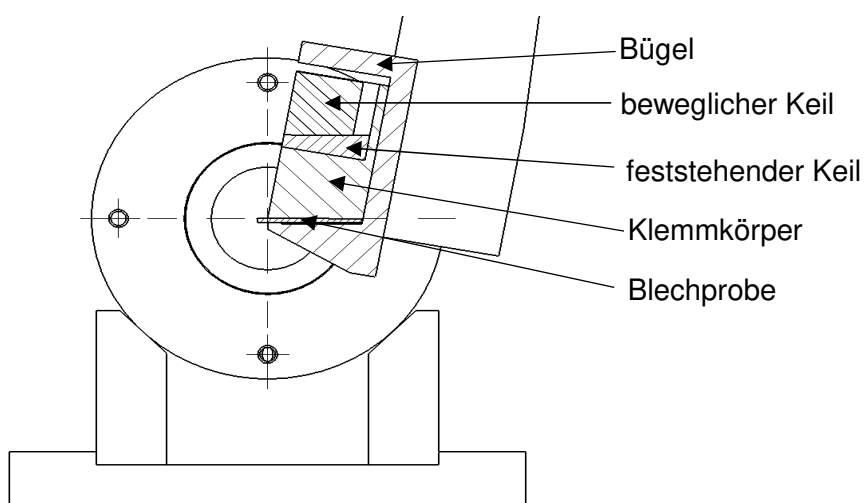


Abbildung 17: Prinzipskizze Klemmkonzept Keilverbindung

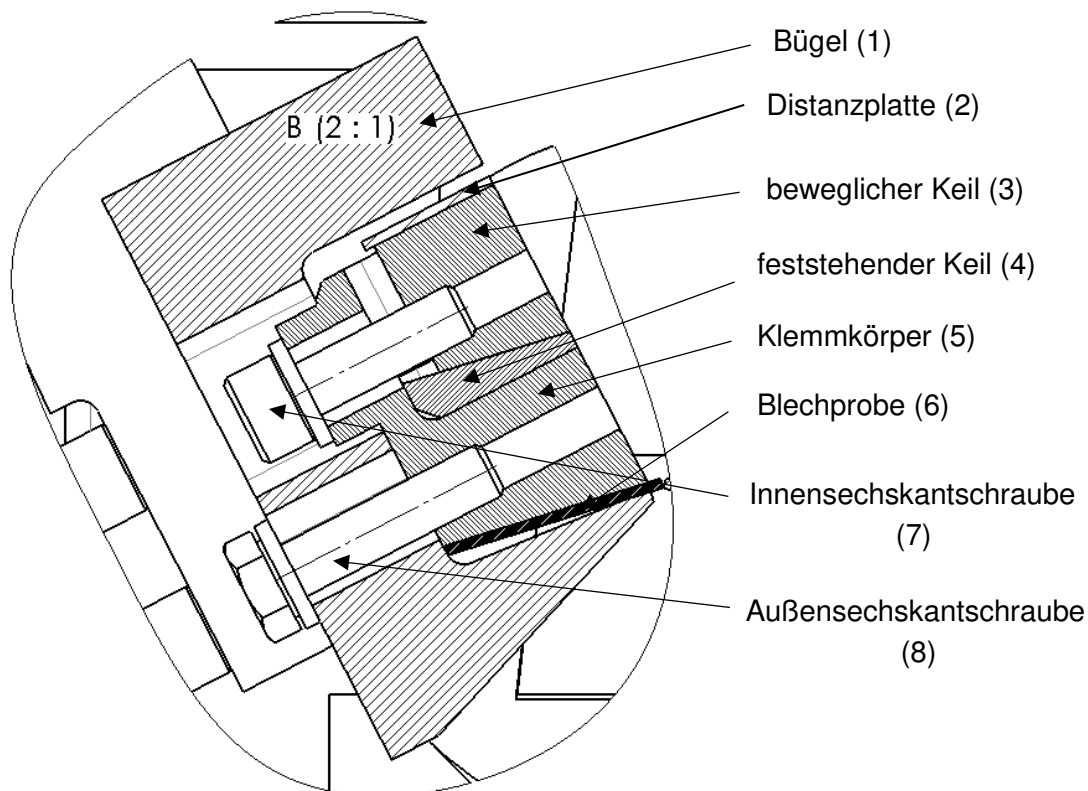


Abbildung 18: Detailsicht Klemmkonzept Keilverbindung

Das genaue Funktionsprinzip der Keilverbindung ist in Abbildung 17 und Abbildung 18 ersichtlich.

Der zentrale Körper ist der Klemmkörper (5), an dem ein Wellenabsatz angebracht ist und die Drehbewegung für den Biegeumformprozess ausführt. Über den Bügel (1) und den beweglichen Keil (3) wird die Blechprobe (6) gegen den Klemmkörper (5) gedrückt und verspannt. Den Bügel gibt es in 2 Größenordnungen. Diese decken in Bezug auf die Baugröße und die auftretenden Kräfte bzw. Spannungen das geforderte Blechdickenspektrum ab. Da der vertikale Hub des Keils begrenzt ist müssen bei unterschiedlichen Blechproben Distanzplättchen (2) verwendet werden, um die Probe für jede Blechstärke prozesssicher klemmen zu können.

Aufgrund der beim Biegeprozess auftretenden hohen Kräfte (besonders bei 6mm Blechstärken) kommt es vor allem beim Bügel zu hohen Spannungen und Verformungen. Um zu hohe Deformationen zu verhindern und ausreichende Klemmung zu gewährleisten wird der Bügel über Außensechskantschrauben (8) gesichert.

Vorteile:

- Gleichmäßige Klemmung des Blechstreifens über die gesamte Breite
- Bei kleinem Bauraum können hohe Klemmkräfte erreicht werden

- Die Blechprobe muss nicht bearbeitet werden (keine Bohrungen oder Langlöcher)
- Im gebogenen Zustand kann die Blechprobe einfach von der Biegevorrichtung entfernt werden
- Sehr steifes Gesamtkonstrukt

Nachteile:

- Konstruktiv und fertigungstechnisch etwas aufwendiger als einfache Schraubenverbindungen
 - Fertigen von Keilen
 - Oberflächenbearbeitung bestimmter Keilflächen (z.B. härten)
- Der Kostenfaktor ist höher als bei der Klemmung mittels Schraubenverbindung
- Bei einem Keilwinkel von 10° kann es zu einer Selbsthemmung des Keils kommen und muss mechanisch gelöst werden

3.2.3 Schlussfolgerung

Eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile beider Klemmkonzepte (Schraubenklemmung und Keilklemmung) hat gezeigt, dass für die vorhandenen Bedingungen das Klemmkonzept mittels Keilverbindung besser geeignet ist. Die ausschlaggebenden Gründe sind die höhere und gleichmäßigere Klemmkraft, die mit Hilfe eines Keils aufgebracht werden kann und der kompaktere Bauraum.

3.3 Momenteneinleitung

Ein entscheidender Aspekt für die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse ist eine saubere, möglichst verlustfreie Momenteneinleitung mit zugehöriger Messeinrichtung. Dabei ist zu beachten, dass bei der Einleitung des Moments möglichst wenig Energie in Reibungsenergie fließt, was mit Verlust behaftet ist und so die messtechnische Aufnahme des Moments verfälscht. Für die Genauigkeit der Ergebnisse ist auch zu beachten dass der Biegeprozess möglichst querkräftfrei erfolgen muss, dafür spielt die auftretende Reibung eine große Rolle. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Steifigkeit für die Momentenübertragung möglichst hoch ist.

Für die Momenteneinleitung stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Dabei ist abzuwägen welche Methode im Hinblick auf die Eigenschaften bzw. die Anwendung des Prüfstandes am besten geeignet ist.

3.3.1 Momenteneinleitung über Drehmomentmesswelle

Bei dieser Art der Einleitung wird über einen äußeren Wellenabsatz das Moment mit Hilfe eines Elektromotors eingebracht und über eine Drehmomentmesswelle erfasst. Der grundsätzliche Aufbau ist in nachfolgender Abbildung ersichtlich.

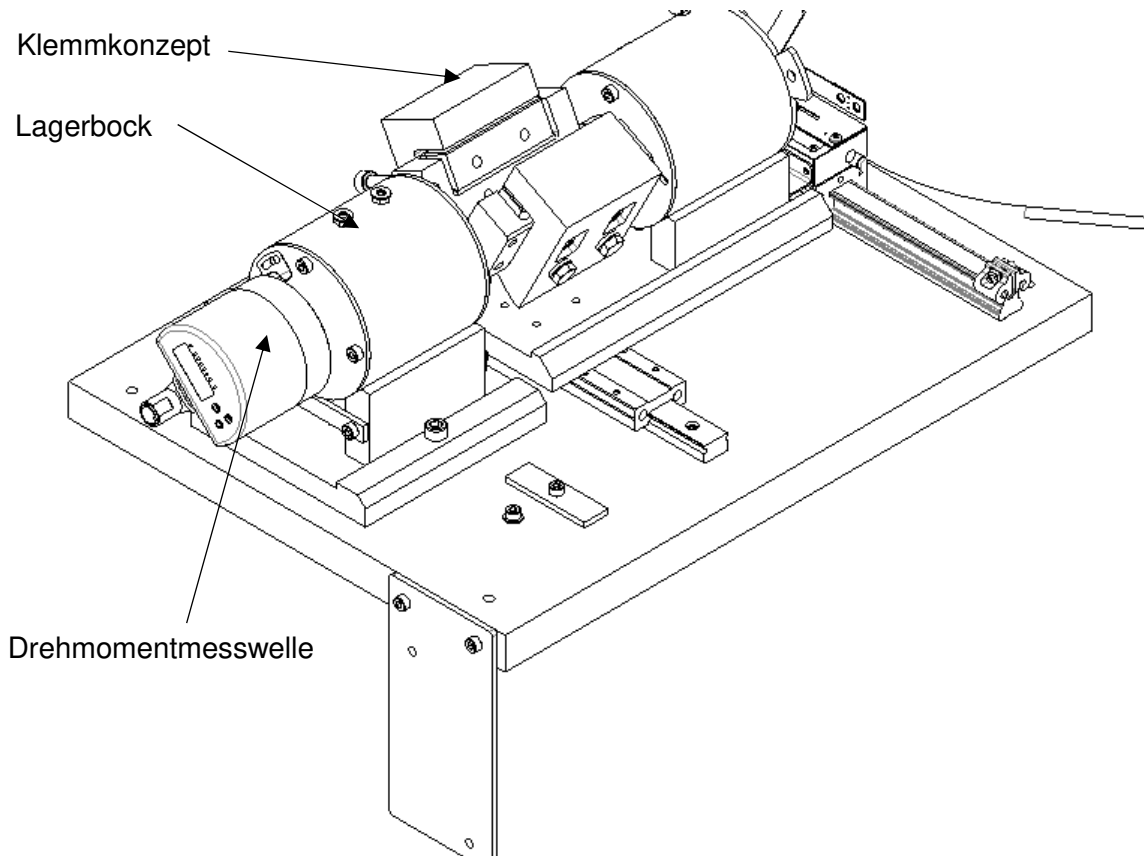


Abbildung 19: Prinzipskizze Momenteneinleitung über Drehmomentmesswelle

In der in Abbildung 19 dargestellten Prinzipskizze ist zu beachten, dass die Drehmomentmesswelle sehr klein dargestellt und nur idealisiert eingezeichnet ist. In Realität weist eine Drehmomentmesswelle, mit zugehörigem Antrieb zur Einbringung von Momenten, bis 300Nm, eine Baugröße auf, die den Rest des sehr kompakten Prüfstandes deutlich überragt.

Vorteile:

- Hohe Genauigkeit der Messwerte
- Möglichkeit der direkten Messung des Drehmomentes

Nachteile:

- Hohe Anschaffungskosten
- Sehr große Baugröße für den notwendigen Messbereich

- Größere Dimensionierung der Wellen erforderlich

3.3.2 Momenteneinleitung über Hebel

Bei dieser Möglichkeit wird über Hebel am Klemmkörper und einer vertikalen Kräfteinleitung das Moment an die Blechprobe übertragen, siehe dazu Abbildung 20. Dabei sollen zwei einfache Kugellager (sind in dieser Prinzipskizze nicht dargestellt) helfen die Kraft möglichst reibungsarm einzuleiten. Die Lager sind in Abbildung 23 ersichtlich.

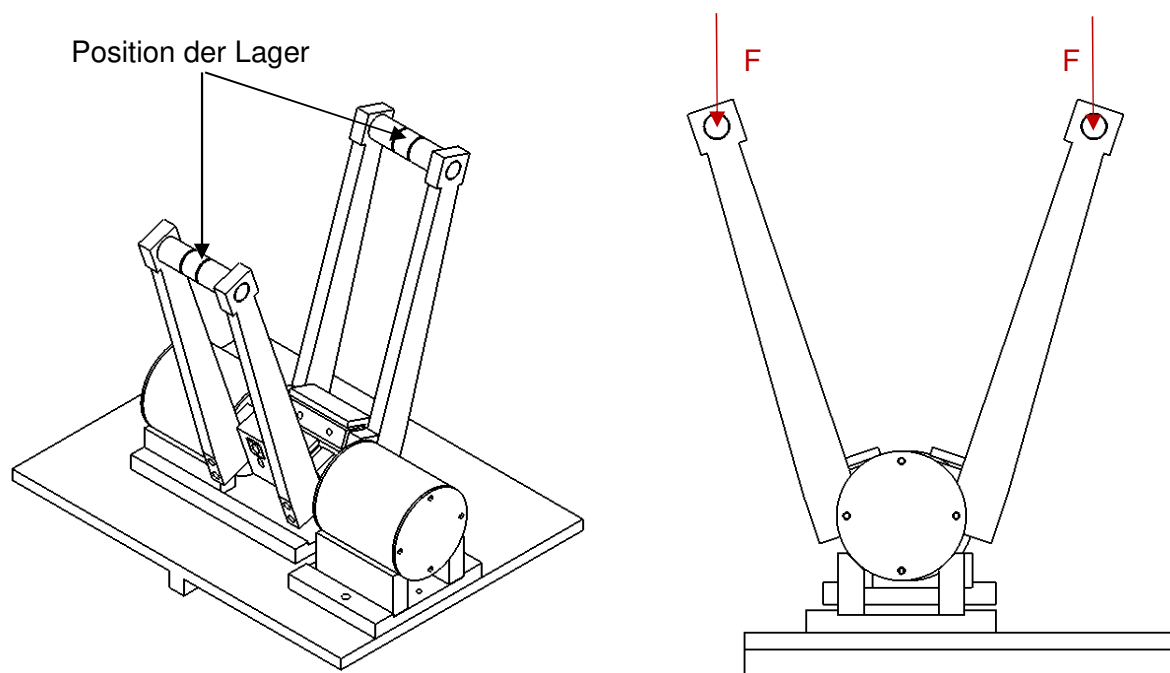


Abbildung 20: Prinzipskizze zur Momenteneinleitung über Hebel

Die Kraft wird entweder mit Hilfe einer klassischen Zug/Druck- Prüfmaschine aufgebracht, oder jeder anderen Maschine die eine Kraft in vertikaler Richtung ausüben kann. Dabei wird der Biegeprüfstand an der jeweiligen Maschine fixiert und die Kraft über ein Druckwerk eingebracht.

Um von der Kraft auf das benötigte Moment schließen zu können sind unterschiedliche Ansätze möglich:

Möglichkeit 1:

Das Moment berechnet sich aus der Vertikalkraft die durch das Druckwerk eingeleitet wird und dem Normalabstand zum Drehpunkt des Klemmkörpers.

$$M = F * l * \sin(\varphi)$$

l...genau definierte Länge zwischen Kraftangriffspunkt und Drehpunkt
 φ ...Drehwinkel der Blechprobe der sich während des Biegevorgangs stetig verändert

Die Hebellänge l richtet sich nach der Dicke der zu prüfenden Blechprobe. Für Blechdicken von 1-2 mm wird ein Hebel mit der Länge von 80mm verwendet und für Blechdicken von 3-6mm eine Länge von 250mm. Bei der Wahl der Hebellängen wurde darauf Bedacht genommen, dass die Vertikalkräfte nicht zu groß werden, da diese zu hohen Lagerkräften und hoher Reibung führen und der Biegeprüfstand das maximale Einbaumaß nicht überschreitet. Für geringe Blechdicken wurde ein kürzerer Hebel verwendet, weil die Kräfte und Momente deutlich geringer sind und somit ein längerer Hebel zu ungenaueren Ergebnissen führt. Durch die längeren Hebel verringert sich die gemessene Biegekraft deutlich wodurch der Einfluss des Drifts der Kraftsensoren einen größeren Einfluss hat und somit die Genauigkeit der Ergebnisse verringert.

Möglichkeit 2:

Bei diesem Ansatz erfolgt die Berechnung des Momentes über ein Leistungsgleichgewicht. Die eingebrachte Leistung über Kraft und Vertikalgeschwindigkeit ist gleich der ans Blech übertragenen Leistung aus Moment und Winkelgeschwindigkeit.

$$M * \omega = F * v$$

ω ...Winkelgeschwindigkeit, das heißt die Ableitung des Drehwinkels nach der Zeit. Durch die genau festgelegte Abtastrate bei der Datenaufzeichnung kann die Winkelgeschwindigkeit definiert werden.

v ...Vertikalgeschwindigkeit mit der sich das Druckwerk nach unten bewegt und die Blechprobe verformt. Ist auch definiert durch die Abtastrate und den Vertikalweg des Druckwerks.

Vorteile

- Geringe Kosten, da die Krafteinleitung über Maschinen erfolgt die beim Auftraggeber vorhanden sind. Des Weiteren sind auch die notwendigen Piezoelemente für die Kraftmessung vorhanden.
- Geringer konstruktiver Aufwand

Nachteile:

- Drehmomentmessung ist nicht direkt möglich, was dazu führt das die Genauigkeit geringer ist.

3.3.3 Schlussfolgerung

Für den Prüfstand wurde eine Einleitung des Moments über eine Hebelkonstruktion verwirklicht, da diese deutlich günstiger ist als eine Drehmomentmesswelle und die Kraft sehr gut mit Hilfe der Werkzeugmaschine eingebracht werden kann. Zusätzlich spielt der geringere Platzbedarf der Hebelkonstruktion eine wesentliche Rolle.

3.4 Lagerung des Prüfstandes

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt ist eine querkraftfreie Ermittlung des Momentenverlaufs ein entscheidender Aspekt zur Bestimmung der Biegefließkurve. Das bedeutet, dass zumindest eine Klemmstelle des Bleches beweglich gelagert werden muss (Fest- und Loslagerung). Dafür gibt es unterschiedliche Ansätze, die im folgenden Kapitel dargestellt und beurteilt werden.

3.4.1 Symmetrische Lagerung

Diese Art der Lagerung ist gekennzeichnet durch eine fest verschraubte Lagerseite und eine auf zwei Führungsschienen linear verschiebbare Klemmseite. Während des Biegevorgangs bewegt sich der Schlitten in Richtung der fest verschraubten Lagerseite. Eine schematische Skizze ist in Abbildung 21 ersichtlich.

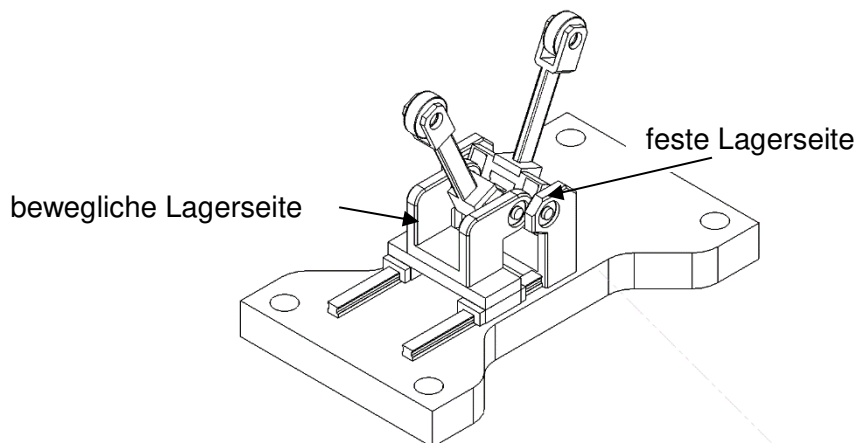


Abbildung 21: Symmetrische Lagerung der Blechprobe

Vorteile:

- Symmetrische Krafteinleitung
- Höhere Steifigkeit bei gleicher Baugröße

Nachteile:

- Komplizierte Fertigungsteile aufgrund der „Verschachtelung“ der Lagerseiten im gebogenen Zustand
- Schlechtere Zugänglichkeit

3.4.2 Fliegende Lagerung

Wie auch die symmetrische Lagerung beinhaltet diese Art eine fest verschraubte Klemmseite und eine bewegliche Lagerseite. Der Unterschied ist in der schematischen Skizze in Abbildung 22 ersichtlich. Die Lagerung ist fliegend ausgerichtet, das heißt die Kraft- bzw. Momenteinleitung erfolgt nicht zwischen den Lagern sondern außerhalb. Dies hat einen positiven Einfluss auf die Gestaltung der Bauteile, da sich die Lagerseiten nicht ineinander bewegen und so eine bessere Zugänglichkeit zur Klemmung möglich ist.

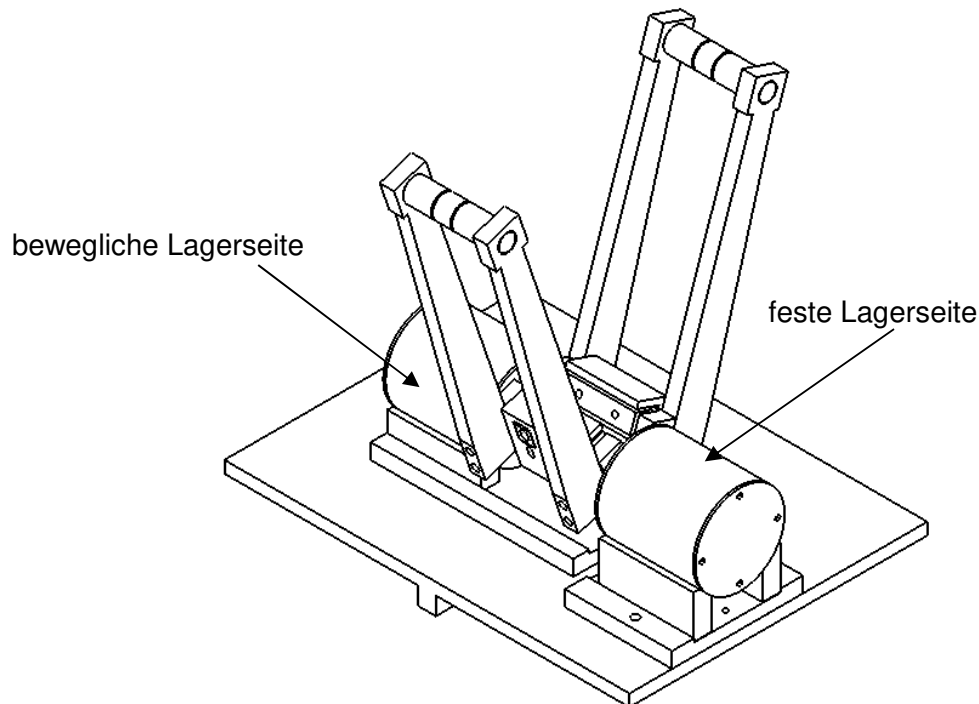


Abbildung 22: fliegende Lagerung der Blechprobe

Vorteile:

- Bessere Zugänglichkeit bei kleinem Platzbedarf
- Symmetrisch verwendbare, einfachere Bauteile

Nachteile:

- Geringere Steifigkeit bei gleicher Baugröße

3.4.3 Schlussfolgerung

Eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile beider Lagerkonzepte zeigt, dass die fliegende Lagerung besser geeignet ist. Im Bereich der Klemmung sind die Platzverhältnisse sehr eng und dadurch wird eine bessere Zugänglichkeit erreicht. Der geringeren Steifigkeit kann durch entsprechende Dimensionierung entgegengewirkt werden.

3.5 Funktionsprinzip/ Gesamtaufbau des Prüfstandes

In diesem Kapitel wird, nochmals ein kurzer Überblick über den mechanischen Gesamtaufbau und das Funktionsprinzip des Prüfstandes gegeben.

In Abbildung 23 ist ein Gesamtaufbau des Prüfstandes dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass im Großteil nur die im Kapitel 3 angesprochenen mechanischen Komponenten dargestellt sind, die Blechprobenklemmung, die Momenteneinleitung und die Lagerung des Prüfstandes. Hierbei handelt es sich nicht um eine normgerechte Zusammenbauzeichnung, sondern um eine Skizze, die das Funktionsprinzip anschaulich darstellen soll. Komponenten für die Messtechnik sind zum Großteil nicht eingezeichnet und werden in Abschnitt 4 genauer behandelt.

Funktionsprinzip:

Nachdem die Blechprobe eingespannt und mittels Keil geklemmt wurde, wird das Biegemoment über die Hebel eingebracht. Um zu gewährleisten, dass die Biegung querkräftfrei erfolgt ist ein Lagerbock auf einer Linearführung angebracht. Die Führung besitzt keine Vorspannung um den Reibungsverlust so klein wie möglich zu halten. Am Ende des Versuchs werden die Hebel entlastet und die Blechprobe kann entnommen werden.

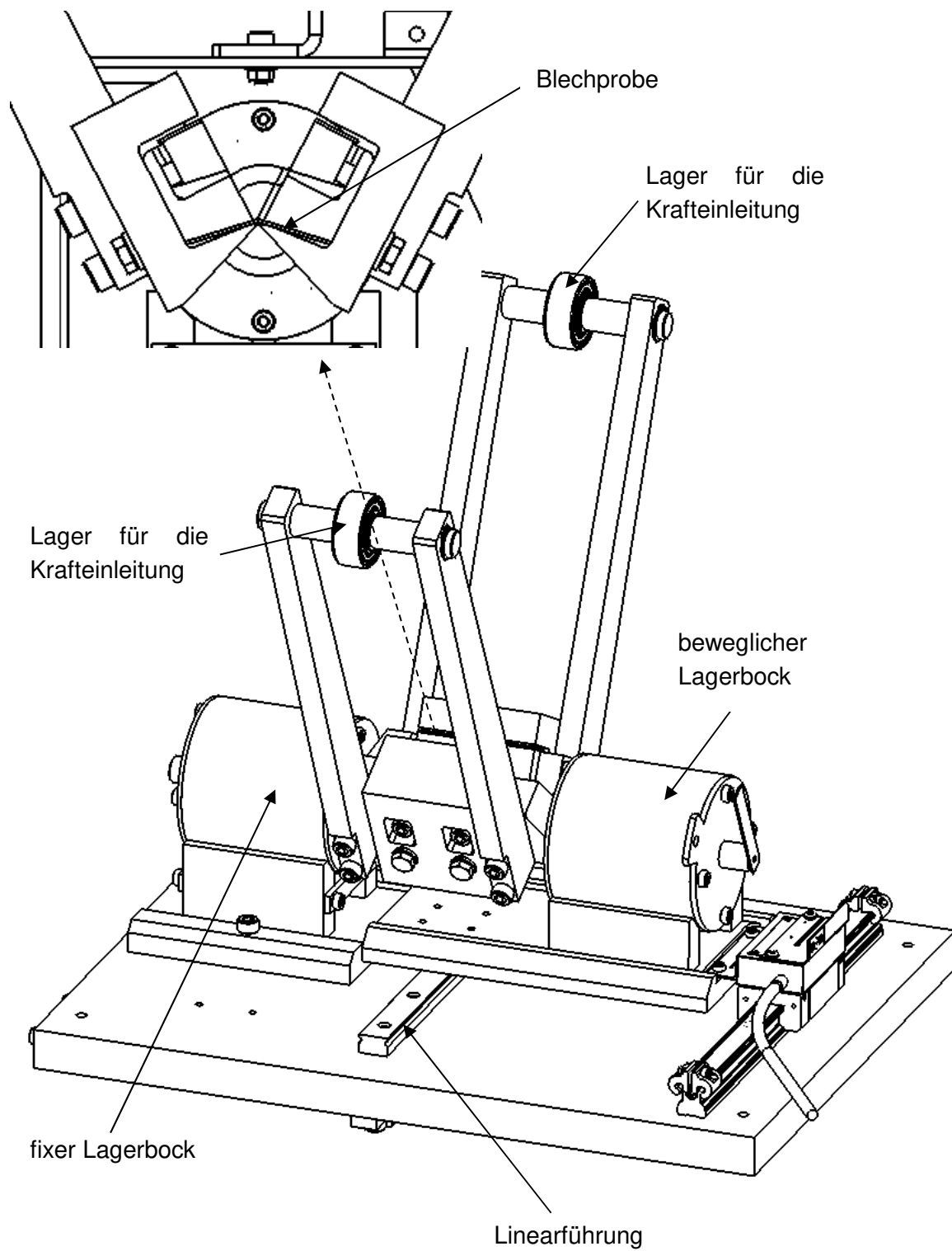


Abbildung 23: Funktionsprinzip und Aufbau des Biegeprüfstandes

4 Messtechnik

Die Messtechnik stellt einen entscheidenden Einfluss für die Genauigkeit und Aussagekraft der erhaltenen Ergebnisse dar. Aus diesem Grund spielt die Auswahl der richtigen Sensoren eine wichtige Rolle. Weitere Aspekte sind die Verarbeitung der Sensorsignale und die Aufzeichnung der Messdaten.

Um schlussendlich auf das gewünschte Ergebnis einer Biegefließkurve zu kommen muss zuerst der Momenten- Krümmungsverlauf bestimmt werden. Dafür sind mehrere Messgrößen notwendig die erfasst werden müssen. Einige dieser Größen wurden in vorhergehenden Abschnitten bereits kurz erwähnt.

- Radius der gebogenen Blechprobe (1)
- Kraft (zur Bestimmung des Moments) (2)
- Drehwinkel (Zur Bestimmung des Momentes) (3)
- Vertikale Verschiebung des Druckbalkens (einerseits zur Bestimmung des Moments über Leistungsgleichung und andererseits zur Kontrolle der Durchbiegung des Hebels bei der Übertragung des Moments) (4)
- Horizontale Verschiebung des beweglichen Lagerbocks (zur rechnerischen Kontrolle des Radius der Blechprobe) (5)

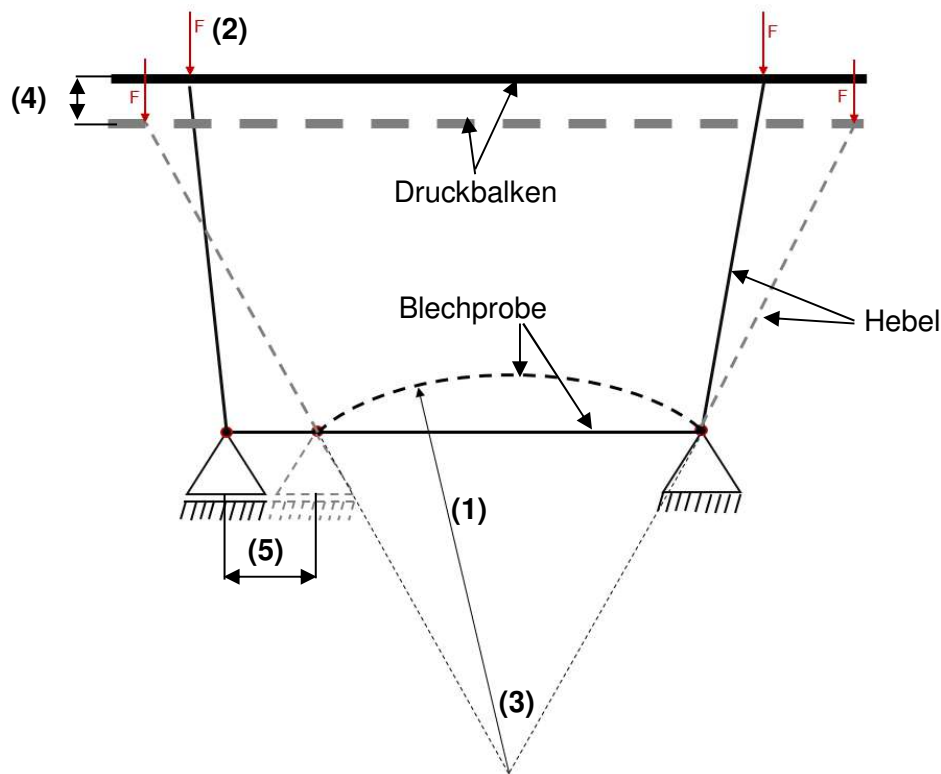


Abbildung 24: notwendige Messgrößen

4.1 Auswahl Messtechnik/Sensoren am Prüfstand

Bei der Auswahl der Sensoren muss darauf geachtet werden, dass die Einbindung in den Prüfstand mit möglichst geringem konstruktivem Aufwand erfolgt und die Funktion der Vorrichtung nicht beeinträchtigt wird. Des Weiteren müssen die Spezifikation genau bedacht werden, unter anderem Messbereich, Genauigkeit, etc..

4.1.1 Kraftmessung

Die Messung der Kraft erfolgt über Piezosensoren der Firma Kistler (genauere Informationen siehe Seite 96). Mechanischer Druck bzw. eine Kraft auf einen Piezokristall verändert die Ladung im Kristall und kann mit Hilfe eines Ladungsverstärkers zur Kraftmessung verwendet werden. Piezoelemente haben eine extrem hohe Empfindlichkeit von einigen pC/N (3,8 pC/N). Ein Ladungsverstärker sorgt dafür, dass das Signal verstärkt wird und wandelt es zusätzlich in eine Spannung um. Bei der Verwendung von Piezoelementen ist zu beachten, dass der auftretende Drift des Signals das Messergebnis verfälschen kann.

4.1.1.1 Kraftmessung unter fixer Lagerseite

Die Piezoelemente (3 Stück) liegen dreiecksförmig angeordnet zwischen der Einspannplatte und der Grundplatte des fixen Lagerbockes (siehe Abbildung 25) und sind mit M6 Schrauben vorgespannt.

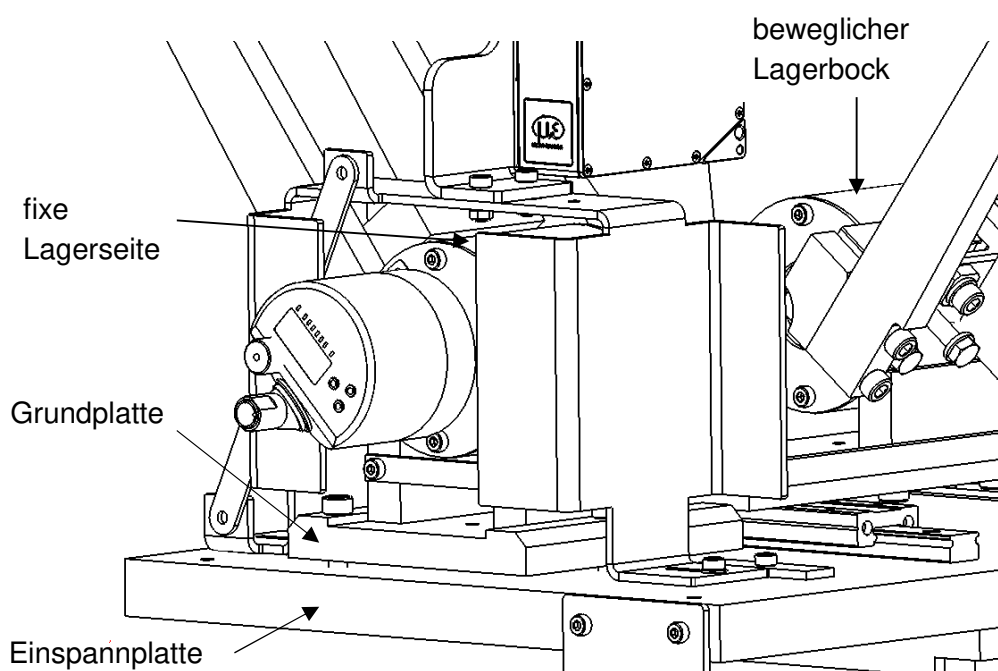


Abbildung 25: Anordnung der Piezoelemente

Die ersten Versuche haben gezeigt, dass die Kraft die größte „Unbekannte“ in der Messkette darstellt und eine genaue Kalibrierung der Messsensoren notwendig ist um hohe Messgenauigkeiten gewährleisten zu können.

4.1.1.1.1 Kalibrierung:

Die Kalibrierung der Kraftsensoren erfolgt mittels einer geeichten Kraftmessdose (siehe Abbildung 29) und einer Kalibrierelektronik von Kistler.

Über die Kraftmessdose wird an unterschiedlichen Positionen des Klemmkörpers eine definierte Kraft eingebracht und mit den Piezosensoren über LabView erfasst.

Jede Messung wird mehrere Male wiederholt. Aus den gesammelten Messpunkten wird eine Kalibrierkurve abgeleitet.

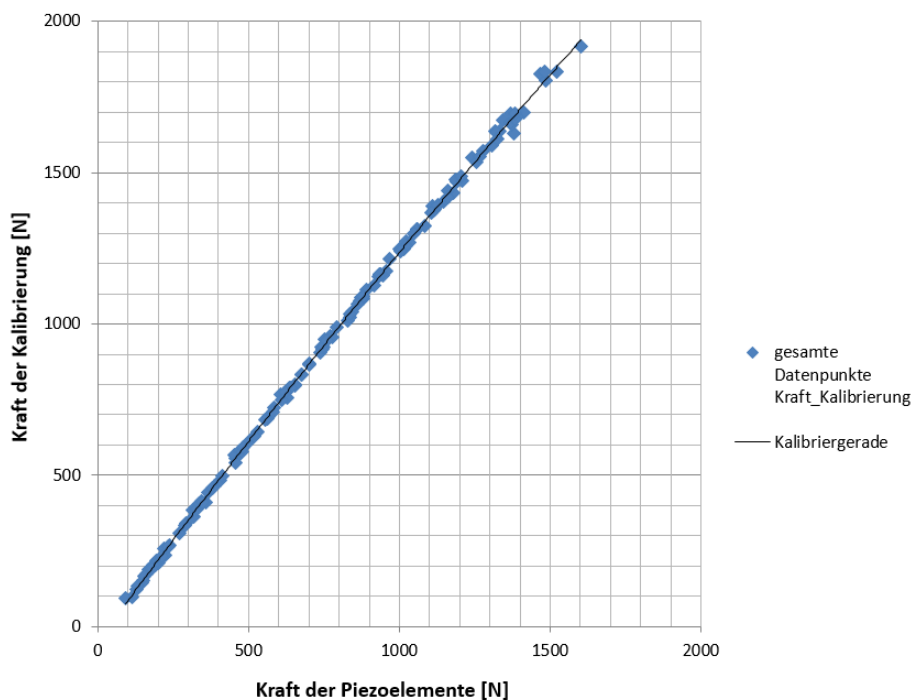


Abbildung 26: Kalibrierkurve für die Piezosensoren die unter dem fixen Lagerbock angeordnet sind

4.1.1.1.2 Erkenntnis

Bei der Durchführung mehrerer Versuche mit gleichen Eingangsparametern (DC01, Blechdicke 2mm, Blechbreite 60mm, Einspannlänge 5mm) hat sich gezeigt, dass im Kraftverlauf deutliche Unterschiede auftreten obwohl idente Blechproben verwendet wurden, siehe Abbildung 27.

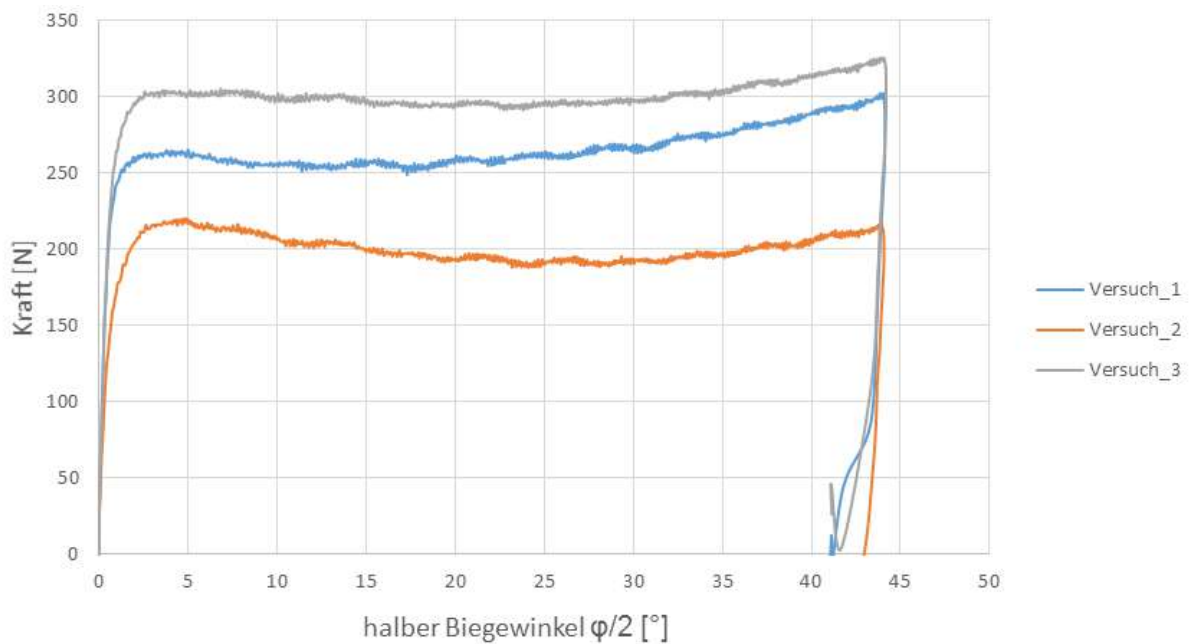


Abbildung 27: Unterschiede im Kraftverlauf bei identen Blechproben

Es können daher aus diesen Daten keine reproduzierbaren Fließkurven und damit keine aussagekräftigen Ergebnisse getroffen werden.

Trotz der Unterschiede in der Höhe der Kraft ergibt sich für die einzelnen Proben ein ähnlicher Verlauf. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass sich die Kraft nicht gleichmäßig auf die beiden Lagerseiten aufteilt und so der Offset im Kraftverlauf entsteht.

4.1.1.1.3 Messung der Gesamtkraft

Aus den zuvor genannten Gründen ist es von Vorteil nicht nur die Kraft auf einer Seite der Lagerung zu messen, sondern die gesamte, in den Prüfstand eingebrachte, Last. Eine robuste Alternative wäre eine Kraftmessung unterhalb der Einspannplatte.

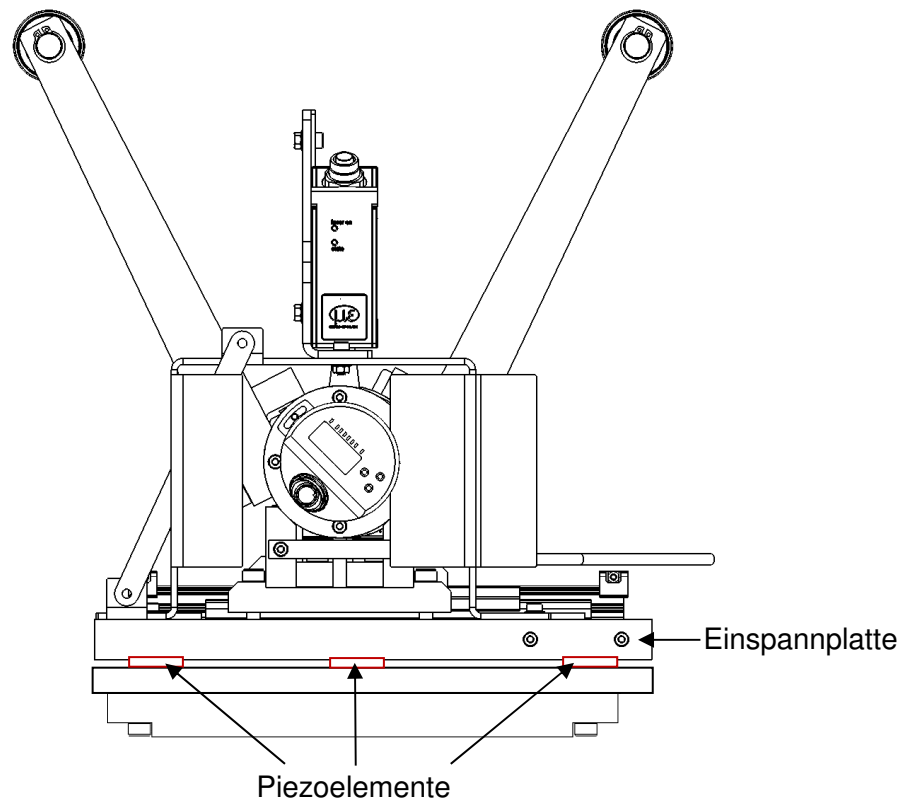


Abbildung 28: Kraftmessung unterhalb der Einspannplatte

Aufbau:

Diese Art der Kraftmessung ist in Abbildung 28 ersichtlich. Dabei werden zwischen der Einspannplatte und einer zusätzlichen Platte 3 Piezosensoren in einer Linie so verschraubt, dass sie genau zentral unter der Blechprobe angeordnet sind.

4.1.1.1.4 Kalibrierung:

Die Kalibrierung erfolgt über den in Abbildung 29 dargestellten Aufbau.

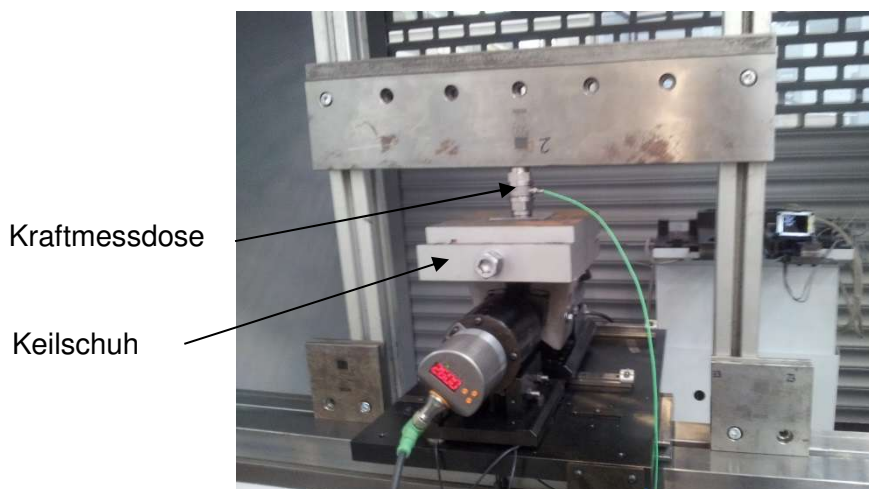


Abbildung 29: Kalibrier­aufbau der Kraftmessung für Piezosensoren in der Unt­werkzeugkonstruktion

Mit einem Keilschuh wird stückweise eine Prüfkraft eingebracht welche mit einer kalibrierten Kraftmessdose und zugehöriger Auswerteeinheit (nicht in der Abbildung ersichtlich) erfasst wird. Der eingebrachten Kalibrierkraft wird der Wert des Piezosensoren zugeordnet. Aus der erhaltenen Punktelcke wird die Kalibrierkurve generiert.

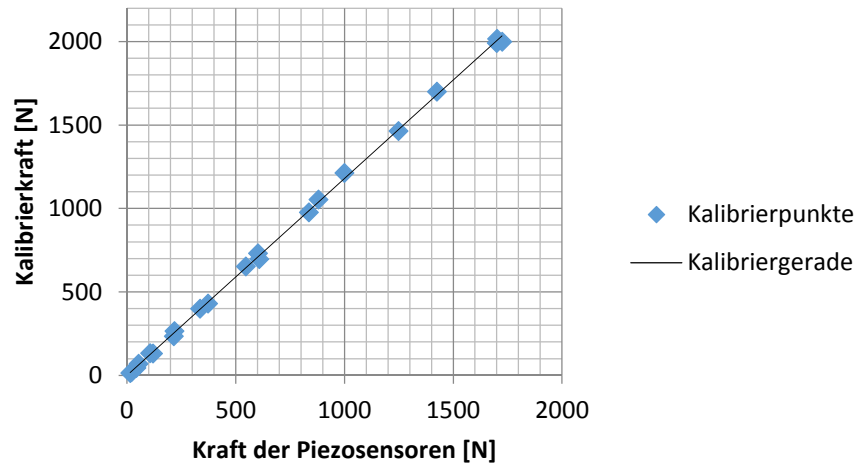


Abbildung 30: Kalibrierung der Kraftsensoren in der Unterwerkzeugkonstruktion

4.1.1.1.5 Erkenntnisse

Versuche haben gezeigt, dass sich die Kraftverläufe bei dieser Anordnung der Kraftsensoren sehr gut reproduzieren lassen, siehe Abbildung 31 und somit eine effektive Möglichkeit bietet exakte Kraftverläufe für die Biegefließkurvenermittlung zu generieren.

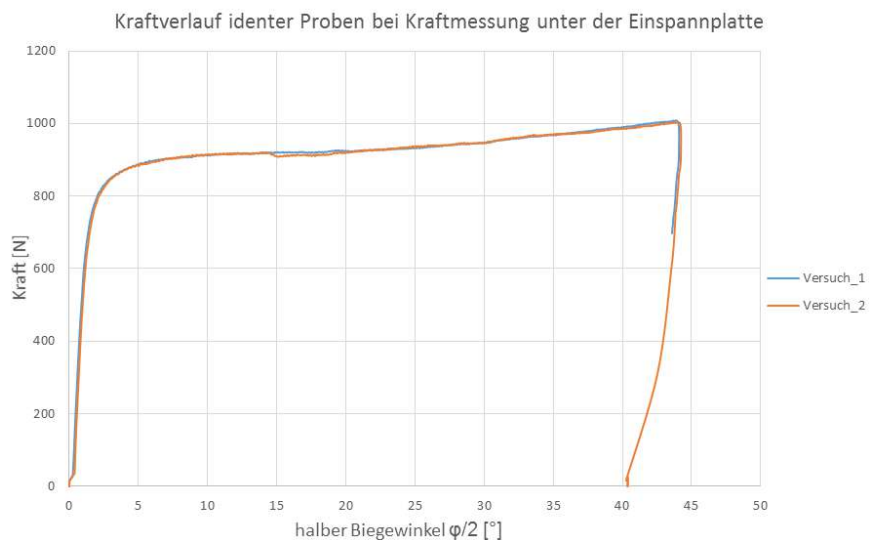


Abbildung 31: Unterschied im Kraftverlauf bei identen Blechproben (Kraftmessung unter der Einspannplatte)

4.1.2 Radiusmessung

Die Bestimmung des aktuellen Radius der Blechprobe während des Biegevorgangs erfolgt mit Hilfe eines optischen Sensors (Laserscanner) der Firma MicroEpsilon. Genauere Angaben und Spezifikationen des Sensors sind auf Seite 102 nachzulesen. Der Sensor und das Prinzip der Radiusbestimmung ist in Abbildung 32 ersichtlich. Das vom Scanner ausgesandte Laserlicht wird von der Blechprobe reflektiert, von einer Kamera erfasst und verarbeitet.

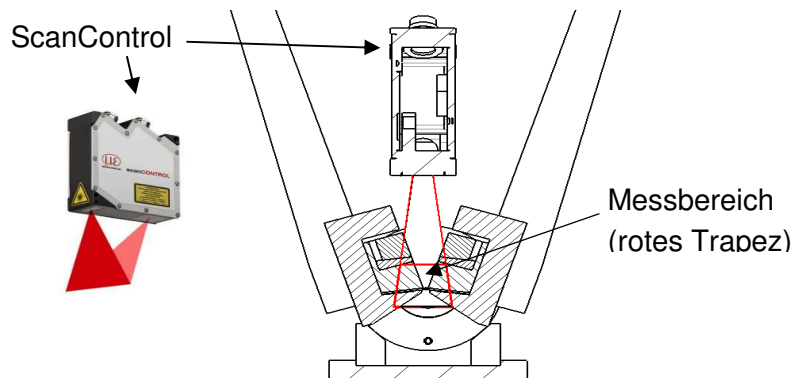


Abbildung 32: Darstellung des Sensors und Messprinzip

Bei der Integration des Sensors am Prüfstand ist darauf zu achten, dass dieser exakt ausgerichtet ist um keinen verzerrten Radius aufzunehmen.

Durch den kleinen Messbereich, der in Abbildung 32 durch das rote Trapez gekennzeichnet ist, ist darauf Bedacht zu nehmen, dass während des gesamten Biegevorgangs die Blechprobe im Messbereich bleibt. Da sich bei unterschiedlichen Blechdicken die Einspannlänge und der Biegeradius verändern ist eine vertikale und horizontale Verschiebung des Sensors notwendig, siehe dazu Abbildung 33. Über Langlöcher in der Befestigungsvorrichtung erfolgt die Einpassung des Sensors an die jeweiligen Gegebenheiten.

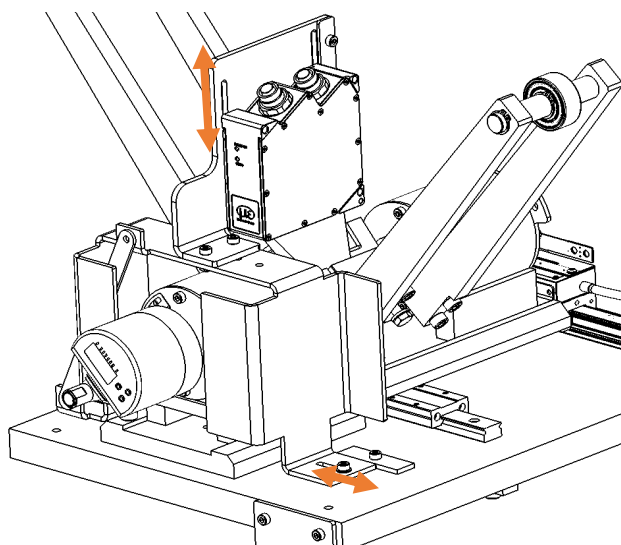


Abbildung 33: Integration des ScanControl im Prüfstand

4.1.2.1 Bestimmung des Radius aus den Messdaten

Die von der Blechprobe reflektierte und vom Sensor wieder aufgenommene Laserlinie wird verarbeitet. Das Signal besteht aus einzelnen Datenpunkten (bis zu 1280 Punkte im Messbereich). Aus diesen Punkten wird über einen Algorithmus ein Radius eingepasst, siehe Abbildung 34.

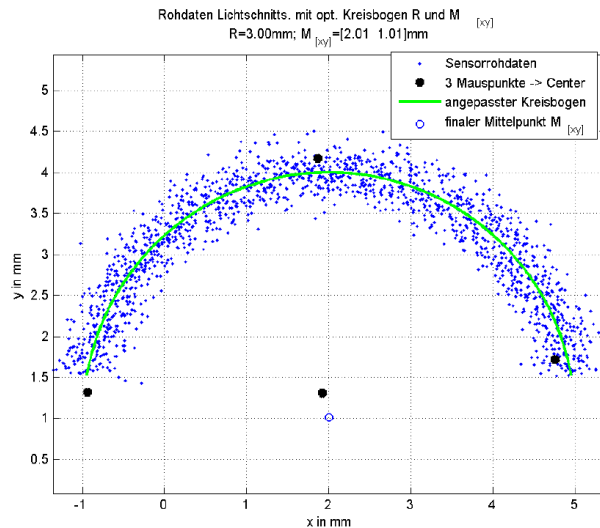


Abbildung 34: Radius „fitten“ aus Rohdaten

4.1.3 Winkelmessung

Die Erfassung des Drehwinkels ist wie bereits in obigen Abschnitt kurz erläutert, aus mehreren Gründen notwendig.

- Zur Bestimmung des Biegemoments
- Zur Ermittlung des Biegewinkels
- Zur rechnerischen Kontrolle des vom Laserscanner aufgenommenen und ausgewerteten Radius

Die Winkelmessung erfolgt mit einem Inkrementalgeber der Firma ifm und ermöglicht Messgenauigkeiten von $<0,1^\circ$. Genauere Informationen sind auf Seite 100 ersichtlich.

Der Drehgeber wird an das freie Wellenende des Klemmkörpers angeflanscht und erfasst so den Drehwinkel.

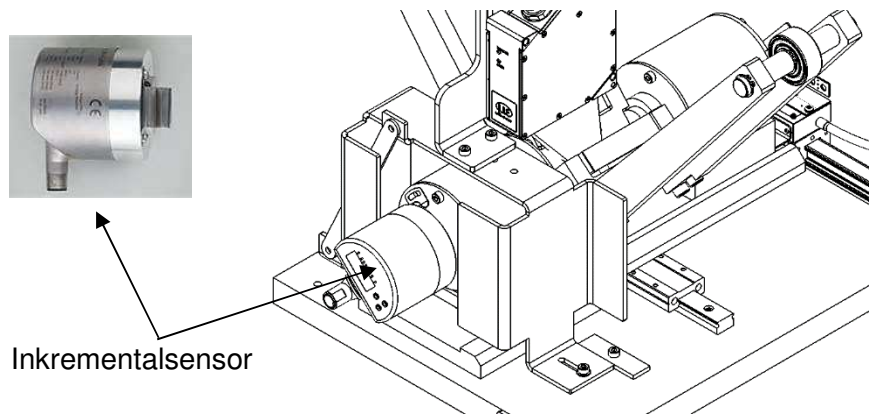


Abbildung 35: Drehgeber zur Winkelerfassung

4.1.4 Wegmessung

Die Messung des vertikalen und horizontalen Weges erfolgt über inkrementale Längmessgeräte der Firma Heidenhain.

Vertikale Wegmessung:

Die vertikalen Messlineale sind in der Werkzeugmaschine integriert und erfassen die Verschiebung des Druckbalkens. Dieser Wert soll zur Kontrolle der Momentenberechnung dienen. Bei dem Ansatz über das Produkt aus Kraft und Hebelarm ist die genaue Kenntnis des Normalabstands notwendig, der durch etwaige Durchbiegungen bzw. Verformungen des Hebels verfälscht werden kann. Durch den Messwert der vertikalen Verschiebung kann auf die Durchbiegung des Hebels und somit auf die Genauigkeit der Momentenberechnung geschlossen werden.

Horizontale Wegmessung:

Hier wird der horizontale Weg gemessen, den der bewegliche Lagerbock während des Biegevorgangs ausführt, siehe Abbildung 36.

Dieser Messwert ist notwendig um eine mathematische Kontrolle des vom Laserscanner ermittelten Radius durchzuführen.

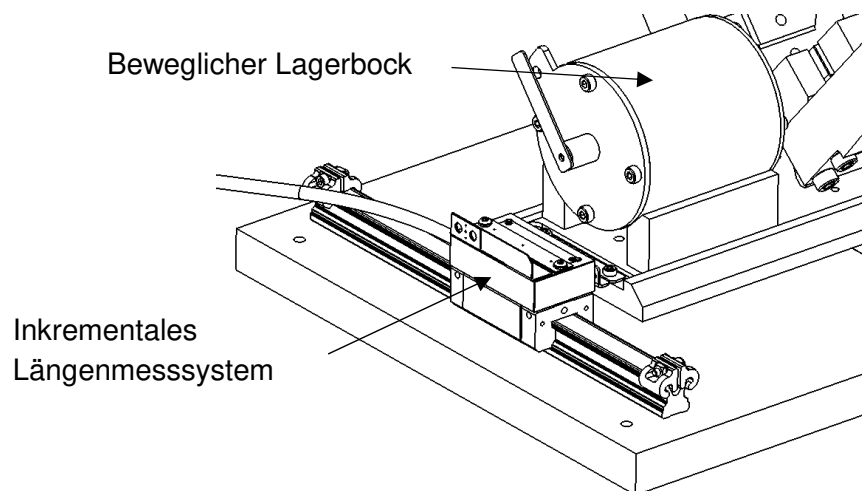


Abbildung 36: horizontale Längenmessung

4.2 LabView

Für die Datenanalyse und Signalverarbeitung wird LabView [26] verwendet, das aufgrund seiner grafischen Programmiersprache und zugehöriger Hardwarestrukturen eine bedienerfreundliche Oberfläche zur Auswertung und Aufzeichnung der Messdaten schafft.

4.2.1 Signalauswertung und Datenaufzeichnung

Die Sensorsignale der Kraft-, Winkel- und Wegmessung werden mit Hilfe eines PXI Systems von National Instruments in Echtzeit erfasst.

Die Daten des Laserscanners werden über eine Ethernet Schnittstelle an den PC übertragen. Da alle Messdaten synchron erfasst werden müssen, definiert die Datenverarbeitungsrate des langsamsten Messsystems, in diesem Fall des Laserscanners, die Geschwindigkeit des gesamten Systems.

Datenaufzeichnung:

Die Daten der Sensoren werden in sogenannte ‚tdms‘ Dateien gespeichert. Dabei handelt es sich um ein eigens von LabView entwickeltes Dateiformat, welches mit hoher Geschwindigkeit erstellt und beschrieben werden kann.

Pro Schleifendurchlauf mit festgelegter Taktzeit wird einerseits eine Datei erstellt in dem die aktuellen Messwerte von Kraft, Winkel und Weg erfasst werden und andererseits eine Datei in der alle aktuellen Datenpunkte des ScanControls gespeichert werden.

Die Taktzeit, ohne dass Daten des Laserscanners verloren gehen liegt bei 20ms.

4.2.2 Programmoberfläche

Das Messprogramm zur Durchführung der Versuche besteht aus 3 Oberflächen.

1. Programmoberfläche, Echtzeitsystem:

Diese Oberfläche ist der Grundstein des gesamten Programms (siehe Abbildung 37). Hier wird das Echtzeitsystem aktiviert und alle Echtzeitvariablen erstellt.

Vor jeder Messung ist ein Reset des Kraftsensors notwendig, der durch einen Button auf dieser Programmoberfläche ausgeführt wird.

Die Graphen für Verzögerung und $\sin(x)$ definieren die Funktionsfähigkeit des Echtzeitsystems und haben auf die Messdatenaufzeichnung und auf die Auswertung keinen Einfluss.

Im Array werden, nach der Beendigung der Messdatenaufzeichnung, die Messwerte für Kraft, Weg und Winkel angezeigt. Des Weiteren werden auch die Zykluszeit (Zeit für einen Schleifendurchlauf) und der Schleifenindex dargestellt.

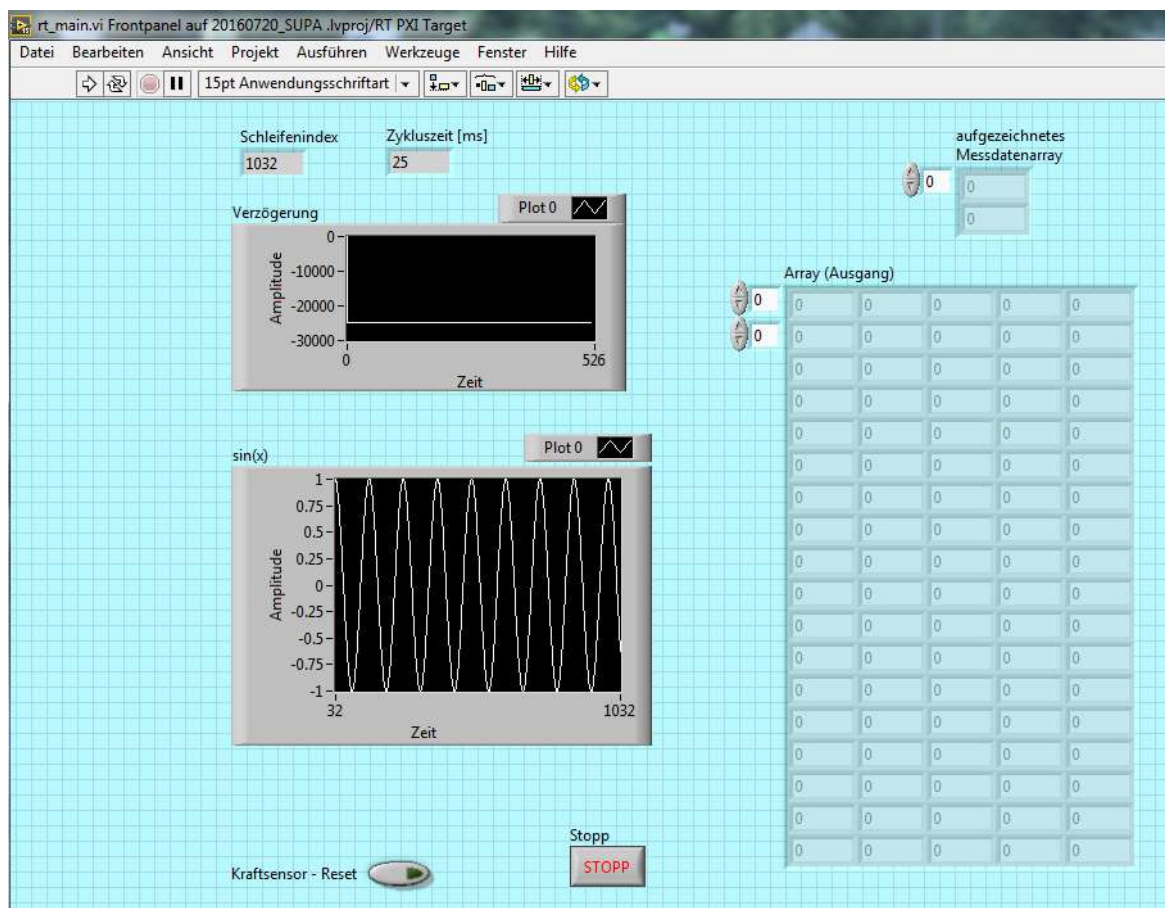


Abbildung 37: Programmoberfläche rt_main

2. Programmoberfläche, Netzwerkoberfläche:

Auf dieser Programmoberfläche werden aus den Echtzeitvariablen Netzwerkvariablen gebildet und der grafische Verlauf von Kraft, Weg und Winkel angezeigt.

Die Anzeige erfolgt über die in Abbildung 38 dargestellten Diagramme. Bei der Kraftmessung ist das Rauschen der Piezosensoren ersichtlich.

Die Sensordaten werden, wie oben erklärt, in tdms Dateien geschrieben und am PC gespeichert. Des Weiteren ist auf der Programmoberfläche eine Auswahl des Trigger Modus möglich, wobei die Standardeinstellung auf „Nur während Messdaten aufzeichnen“ liegt. Das Sinussignal stellt dem Bediener die richtige Kommunikation zwischen Realtime und Netzwerk dar.

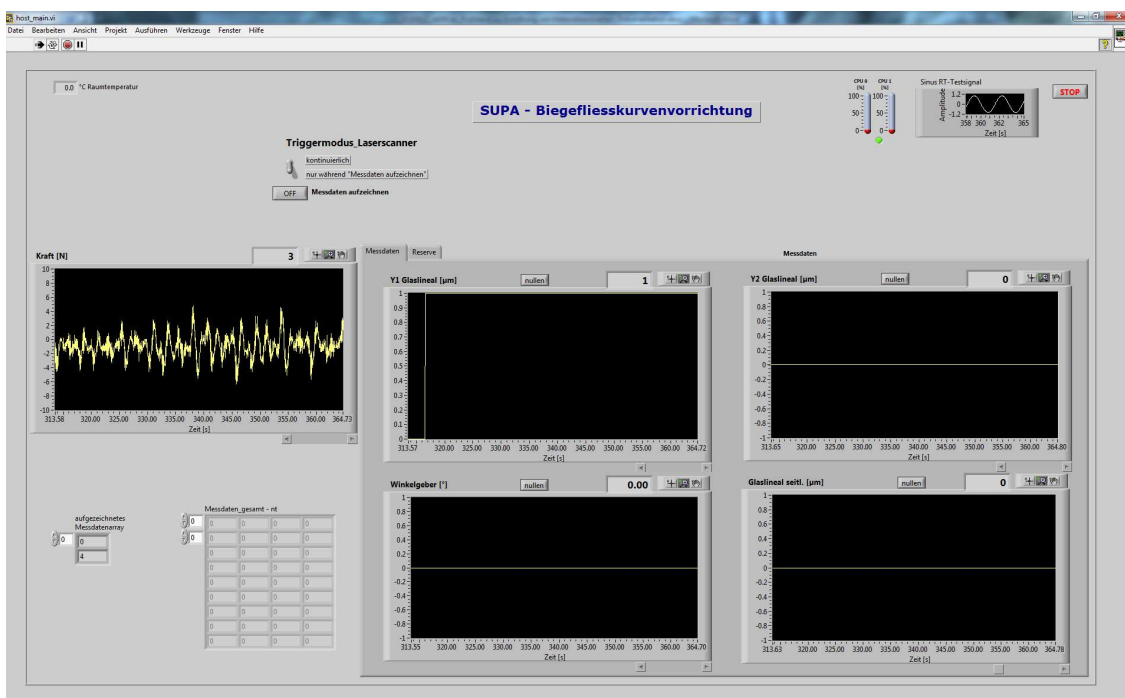


Abbildung 38: Programmoberfläche host_main

3. Programmoberfläche, Laserscanner Oberfläche:

Bei dieser Oberfläche/Darstellung handelt es sich um die Messoberfläche des Laserscanners mit diversen Einstellungsmöglichkeiten wie Messbereich, Belichtungszeit, Anzahl der aufgenommenen Profile etc. Die Einstellungen werden einmal vorgenommen und müssen in der Regel nicht mehr verändert werden. Bei großen Blechdicken, wo der Radius und die Einspannlänge groß sind, kann es sein, dass der Messbereich verändert werden muss. Dies geschieht über Profile → Measuring field und ist für den jeweiligen Fall in der Betriebsanleitung des ScanControl ersichtlich.

Im Diagramm wird der Radius während der Messung abgebildet

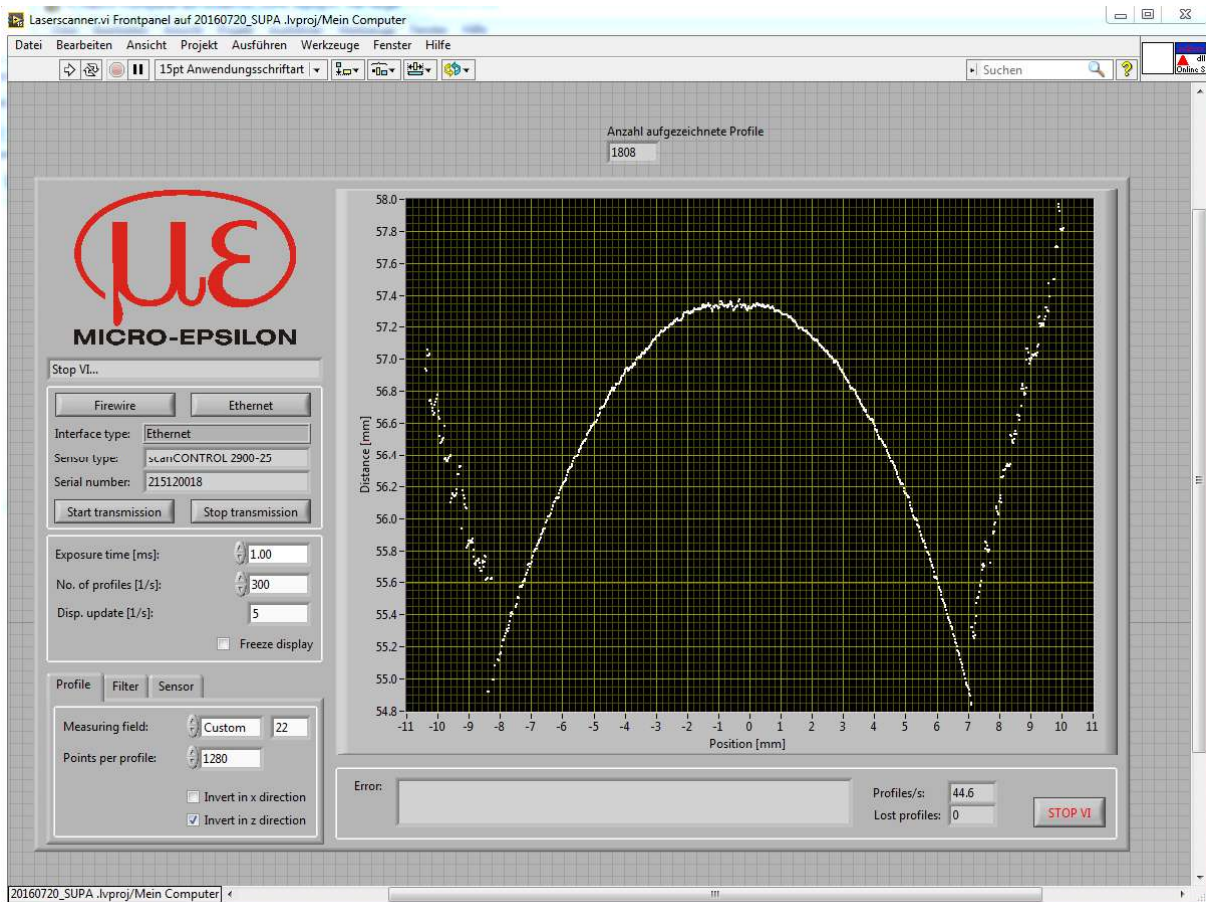


Abbildung 39: Programmoberfläche Laserscanner

5 Berechnung der Biegefließkurve über die Momenten- Krümmungsbeziehung

Aus den von LabView erfassten Messdaten erhält man die notwendige Momenten-Krümmungsbeziehung. Für den Übergang auf eine Biegefließkurve sind unterschiedliche Ansätze zielführend:

- Berechnungsansatz nach Nadai
- Berechnungsansatz nach der elementaren Biegetheorie

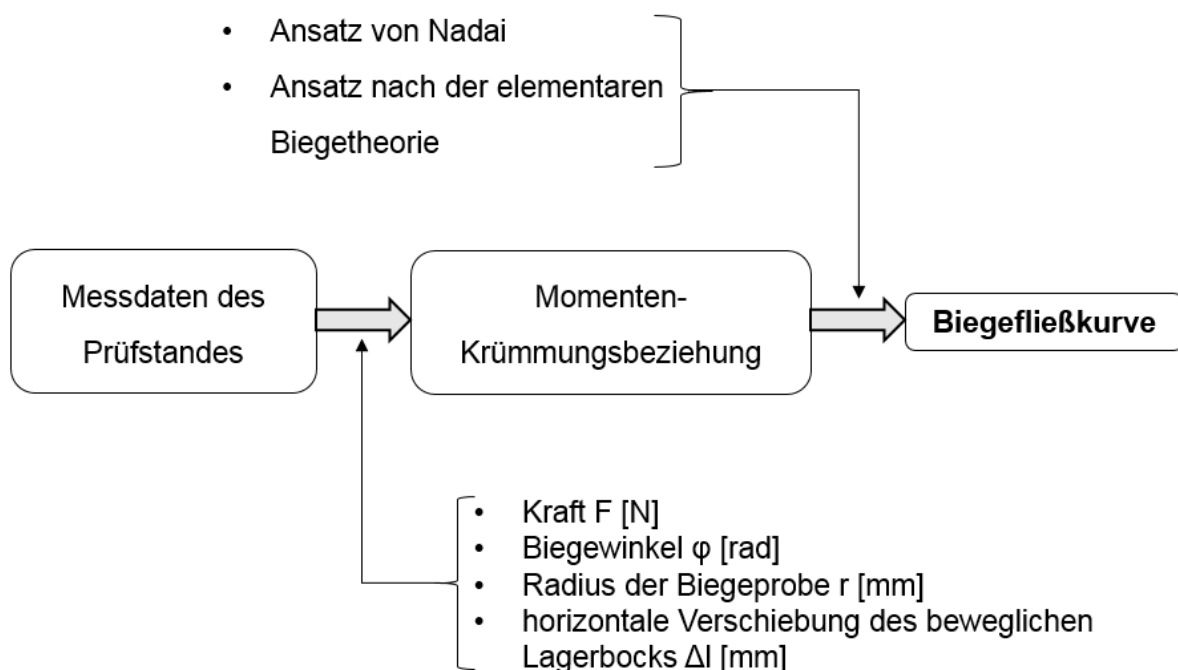


Abbildung 40: Flussdiagramm zu Ermittlung der Biegefließkurve

5.1 Berechnungsansatz nach Nadai

Nach Apard Nadai [14] kann unter folgenden Voraussetzungen bzw. Annahmen die Biegefließkurve aus der Momenten- Krümmungsbeziehung abgeleitet werden.

Annahmen: [15]

- Reines Momentenbiegen, keine Querkräfte im Biegevorgang
- Lineare Verteilung der Dehnung über dem Querschnitt
- Einachsiger Spannungszustand
- Zugspannung am äußeren Rand stimmt mit der Druckspannung am inneren Rand überein, d.h. die neutrale Faser ist gleich der spannungsfreien Faser und liegt in der Mitte des Querschnitts

Die getroffenen Annahmen stimmten nur zum Teil, da kein einachsiger Spannungszustand vorliegt sondern ein 3-achsiger.

Man kann aber davon ausgehen, dass das äußere Moment gleich dem Moment im Inneren der Blechprobe ist [15].

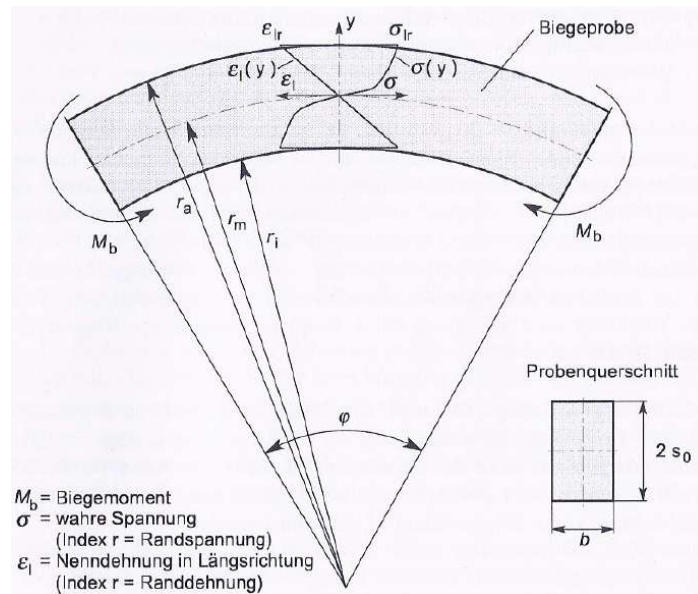


Abbildung 41: Dehnungs- und Spannungsgrößen an einer Biegeprobe [15]

Gleichgewicht aus äußerem und innerem Moment:

$$M_{b_au\ddot{a}}\text{u}\ddot{a}en = M_{b_innen} \tag{8}$$

$$M_{b_innen} = 2 * \int_0^{\frac{s_0}{2}} \sigma(y) * b * y * dy \tag{9}$$

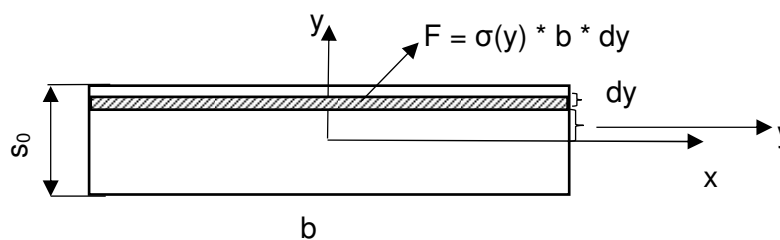


Abbildung 42: Moment aus der Spannung im Inneren des Bauteils

Aufgrund der Annahme, dass die Spannung im Zug- und im Druckbereich gleich ist können die Grenzen des Integrals von 0 (Mitte der Blechprobe) bis zur halben Blechdicke angenommen werden und das Integral mit dem Faktor 2 multipliziert werden.

Die Unbekannte, nicht messbare, Größe y muss durch eine bekannte Größe ausgedrückt werden. Aufgrund der Annahme einer linearen Dehnungsverteilung über dem Querschnitt, kann nach der Beziehung ähnlicher Dreiecke y durch die Dehnung ϵ ersetzt werden. Die Randdehnung ϵ_R kann durch eine einfache Beziehung aus dem äußeren Biegeradius r_a des Laserscanners berechnet werden ($\epsilon_R = s_0/2 * 1/r_m$). [15]

$$\frac{y}{\epsilon} = \frac{\frac{s_0}{2}}{\epsilon_R} \rightarrow y = \epsilon * \frac{s_0}{2 * \epsilon_R} \quad (10)$$

Um dy durch $d\epsilon$ zu ersetzen muss Gleichung (10) differenziert werden

$$\frac{dy}{d\epsilon} = \frac{s_0}{2 * \epsilon_R} \rightarrow dy = d\epsilon * \frac{s_0}{2 * \epsilon_R} \quad (11)$$

Für die obere Grenze ergibt sich durch Ersetzen von y durch ϵ folgende Gleichung:

$$\epsilon(y) = \frac{y * 2}{s_0} * \epsilon_R \rightarrow \epsilon\left(\frac{s_0}{2}\right) = \frac{2 * s_0}{s_0 * 2} * \epsilon_R \rightarrow \epsilon\left(\frac{s_0}{2}\right) = \epsilon_R \quad (12)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (10), (11) und (12) in Gleichung (9) erhält man folgenden Ansatz.

$$M_b(\epsilon) = 2 * \int_0^{\epsilon_R} \sigma(\epsilon) * b * \epsilon * \frac{s_0}{2 * \epsilon_R} * \frac{s_0}{2 * \epsilon_R} * d\epsilon \quad (13)$$

Kürzen einiger Terme und Vereinfachungen ermöglichen es Gleichung (13) in folgender Weise zu schreiben.

$$M_b(\epsilon) = \frac{b * s_0^2}{2 * \epsilon_R^2} \int_0^{\epsilon_R} \sigma(\epsilon) * \epsilon * d\epsilon \quad (14)$$

Aufgrund der Abhängigkeit von σ von der Integrationsvariablen ϵ lässt sich Gleichung (14) nicht ohne weiteres integrieren. Abhilfe schafft eine Differentiation nach der oberen Grenze ϵ_R [15]. Die Differentiation muss dabei nach der Produktregel erfolgen, da sowohl im Term außerhalb des Integrals und das Integral selbst von der Randdehnung abhängig sind.

$$\frac{dM_b}{d\epsilon_R} = \frac{b * s_0^2}{2 * \epsilon_R^2} * \sigma_R * \epsilon_R - 2 * \frac{b * s_0^2}{2 * \epsilon_R^3} * \int_0^{\epsilon_R} \sigma(\epsilon) * \epsilon * d\epsilon \quad (15)$$

Betrachtet man den rechten Teil von Gleichung (15) ist ersichtlich, dass dieser durch Einsetzen von (14) ersetzt werden kann und man erhält folgende Gleichung [15]

$$\frac{dM_b}{d\epsilon_R} = \frac{b * s_0^2}{2 * \epsilon_R^2} * \sigma_R * \epsilon_R - \frac{2}{\epsilon_R} * M_b(\epsilon) \quad (16)$$

Daraus kann dann die Randspannung σ_R berechnet werden welche nur mehr von bekannten Größen abhängig ist.

$$\sigma_R = \frac{2 * \epsilon_R}{b * s_0^2} * \left(\frac{dM}{d\epsilon_R} + \frac{2}{\epsilon_R} * M \right) = \frac{2}{b * s_0^2} * (2 * M + \epsilon_R * \frac{dM}{d\epsilon_R}) \quad (17)$$

Die Randspannung entspricht der Tangentialspannung am äußeren Rand der Biegeprobe. Für hochkant gebogene Biegeproben bzw. für Profile, wie sie Chatti [15] in seiner Arbeit untersucht hat, ist die Spannung in Breitenrichtung zu vernachlässigen. Daraus ergibt sich ein einachsiger Spannungszustand und die Randspannung σ_R und die Randdehnung ϵ_R der Biegeprobe entsprechen der Spannung und Dehnung des einachsigen Zugversuchs.

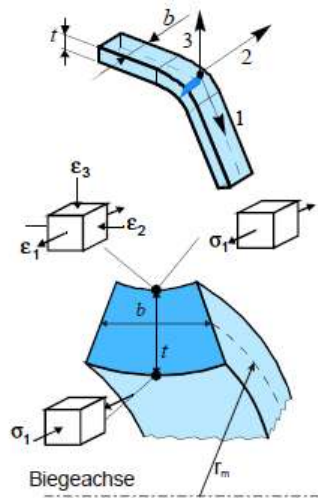


Abbildung 43: Spannungs- und Dehnungszustand einer hochkant gebogenen Biegeprobe [16]

Bei den, in dieser Arbeit, untersuchten Biegeproben handelt es sich ausschließlich um Blechteile, bei denen die Breite sehr viel größer ist als die Höhe der Probe. Für solche Blechteile sieht der Spannungs- und Dehnungszustand etwas anders aus.

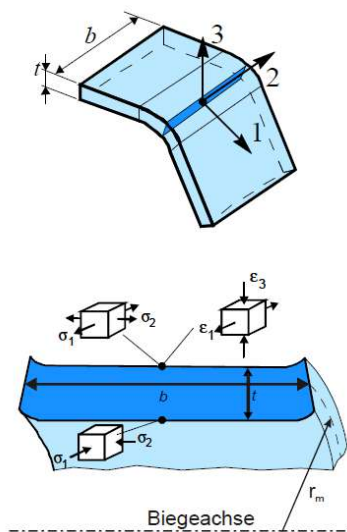


Abbildung 44: Spannungs- und Dehnungszustand einer Blechprobe [16]

Es handelt sich dabei um einen ebenen Formänderungszustand. Aufgrund der großen Breite ist die Dehnung in Richtung 2 $\rightarrow \epsilon_2$ gleich 0. Über die Volumenkonstanz ergibt sich das $\epsilon_3 = -\epsilon_1$ ist. [16]

Für die Spannungen ergibt sich folgender Zusammenhang [16]:

$$\sigma_3 = 0, \quad \sigma_1 = \sigma_R, \quad \sigma_2 = \frac{1}{2} * \sigma_1 \tag{18}$$

Die Spannung in radialer Richtung ($\sigma_3=0$) ist am äußeren Rand der Probe 0. Aus der Fließregel ergibt sich, dass die Spannung in Koordinatenrichtung 2 gleich die halbe Randspannung ist ($\sigma_2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \rightarrow \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}$). [16]

Mit Hilfe der von Mises Fließspannungshypothese wird der mehrachsige Spannungs- und Formänderungszustand auf einen einachsigen Zustand „reduziert“ und die Fließspannung berechnet.

Durch Einsetzen von Gleichung (18) in Gleichung (2) ergibt sich folgende Vergleichsspannung:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \frac{\sqrt{3}}{2} * \sigma_R \tag{19}$$

Für den Vergleichsumformgrad ergibt sich

$$\varphi_v = \frac{2}{\sqrt{3}} * \varphi_R = \frac{2}{\sqrt{3}} * \varphi_1 \tag{20}$$

5.2 Berechnungsansatz nach der elementaren Biegetheorie

Die Theorie hinter der elementaren Biegetheorie wurde bereits in Kapitel 2.3.3 erläutert und wird deshalb in diesem Abschnitt nicht mehr genauer behandelt.

Bei diesem Berechnungsansatz wird über eine Momentengleichung und ein Werkstoffmodell zur Beschreibung des Spannungsverlaufs die Fließspannung berechnet.

5.2.1 Werkstoffmodelle

Die grundsätzlichen Werkstoffmodelle wurden bereits in Kapitel 2.3.2 erläutert.

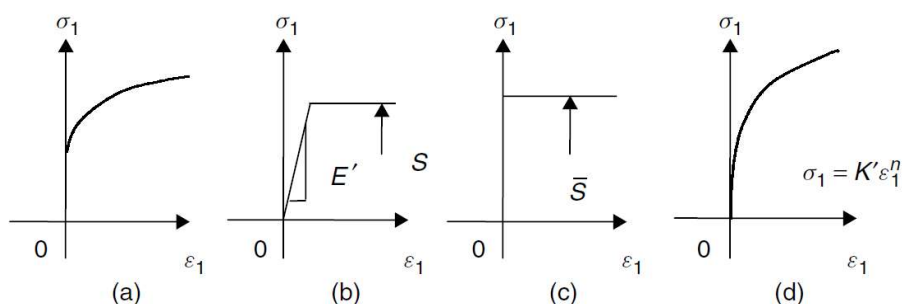


Abbildung 45: Werkstoffmodelle [21]

In Abbildung 45 a) ist der reale Verlauf der Spannung über der Dehnung aufgetragen. b) kennzeichnet ein elastisch, perfekt plastisches Werkstoffverhalten mit konstanter Fließspannung. c) kennzeichnet ein starres, perfekt plastisches Werkstoffverhalten. Dieses Modell kann bei kleinen Radien angewendet werden, bedeutet jedoch einen hohen Grad an Vereinfachung [21].

In Abbildung 45 d) ist ein plastisches Modell dargestellt, welche die Kaltverfestigung berücksichtigt. Man geht dabei von einer plastischen Verformung im gesamten Bereich der Probe aus und beschreibt den Verlauf über eine Potenzfunktion.

Abbildung 46 zeigt den Verlauf der Spannung über dem Querschnitt der Probe.

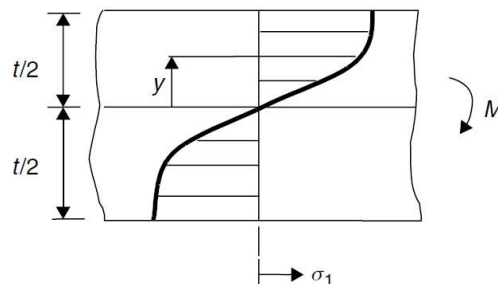


Abbildung 46: plastisches Werkstoffmodell mit Verfestigung [22]

Für große Umformgrade weist dieses Modell eine hohe Genauigkeit auf.

Problematisch ist die Darstellung des elastischen Bereichs und des Übergangs zwischen elastischen und plastischen Bereich, da im Elastischen der Spannungsverlauf einer Geraden folgt. [22]

Die beschreibende Potenzfunktion hat folgende Form.

$$\sigma = a * \epsilon^n \tag{21}$$

a...Werkstoffkonstante

n...Verfestigungsexponent

Dabei ist zu beachten, dass dieser Verlauf nur für nicht vorverfestigte, unlegierte und niedrig legierte Stähle sowie Aluminium Legierungen gilt [23].

Wie beim Rechnungsansatz nach Nadai kann auch hier das Moment über die Spannung im Bauteil ausgedrückt werden.

$$M_b = 2 * \int_0^{\frac{s_0}{2}} \sigma(y) * b * y * dy \tag{22}$$

In Abbildung 42 ist ersichtlich wie Gleichung (22) hergeleitet werden kann.

Über den Krümmungsradius r_m kann y durch die Dehnung ausgedrückt werden

$$\epsilon(y) = \frac{l}{l_0} = \frac{(r_m + y) * \varphi - r_m * \varphi}{r_m * \varphi} = \frac{y}{r_m} \tag{23}$$

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{y}) * \mathbf{r}_m \rightarrow \mathbf{d}\mathbf{y} = \mathbf{r}_m * \mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (24)$$

r_m ...Krümmungsradius

φ ...Biegewinkel

Einsetzen von Gleichung (24) in (22)

$$\mathbf{M}_b = 2 * \int_0^{\frac{s_0}{2 * r_m}} \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon}) * \mathbf{b} * \boldsymbol{\varepsilon} * \mathbf{r}_m^2 * \mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (25)$$

Werkstoffmodells in Formel (25) einsetzen

$$\mathbf{M}_b = 2 * \int_0^{\frac{s_0}{2 * r_m}} \mathbf{a} * \mathbf{b} * \boldsymbol{\varepsilon}^2 * \mathbf{r}_m^2 * \mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (26)$$

Nach Integration und Einsetzen der Grenzen ergibt sich

$$\mathbf{M}_b = \frac{2^{-n-1} * \mathbf{r}_m^{-n} * \mathbf{a} * \mathbf{s}_0^{n+2}}{2^{n+2}} \quad (27)$$

Um die Koeffizienten a und n aus Gleichung (27) und dem Werkstoffmodell berechnen zu können ist eine Anfangs- bzw. Randbedingung notwendig. Am Übergang zwischen elastischen und plastischen Bereich sind die Dehnung und die Spannung bekannt und kann als Bedingung herangezogen werden [23].

Das Werkstoffmodell beschreibt den Verlauf der Spannung in der Blechprobe für jeden Punkt der Momenten- Krümmungsbeziehung.

Mit Hilfe von Gleichung (27) und dem Verlauf der Spannung, gegeben durch das Werkstoffmodell können die Koeffizienten a und n berechnet werden. Das bedeutet man bekommt für jeden Punkt der Momenten- Krümmungsbeziehung bzw. der Momenten- Randdehnungsbeziehung eine Konstante a_i und n_i . [23]

Mit diesen Konstanten wird für jedem Punkt, durch Einsetzen in das Werkstoffmodell die Randspannung berechnet.

$$\boldsymbol{\sigma}_{Ri} = \mathbf{a}_i * \boldsymbol{\varepsilon}_{Ri}^{n_i} \quad (28)$$

Wie bereits in Kapitel 5.1. erläutert muss die Randspannung, aufgrund eines ebenen Formänderungszustandes mit Hilfe einer Fließspannungshypothese auf eine Vergleichsspannung umgerechnet werden.

6 Bestimmung der Biegefließkurve in Matlab

In diesem Kapitel soll überblicksmäßig der Aufbau des Programmcodes erläutert werden und auf die Eigenschaften der Auswertung eingegangen werden.

Die Bestimmung der Biegefließkurve aus den in LabView erfassten Daten erfolgt mit Hilfe von Matlab. Am Beginn werden die verschiedenen .tdms Dateien der Messdaten geladen und daraus von Matlab bearbeitbare Dateien generiert.

Wie bereits beschrieben kann die Auswertung der Biegefließkurven auf 2 Arten erfolgen. Einerseits über den Ansatz von Nadai und andererseits über die elementare Biegetheorie.

Das Einlesen der Messdateien, die Umwandlung der Messdaten in .mat Dateien, das Fitten des Radius und die Bestimmung des Moments erfolgt für beide Auswertealgorithmen auf die gleiche Weise, erst bei der Verarbeitung des Momentes ergeben sich Unterschiede.

6.1 Aufbau des Programmcodes

Der Programmcode besteht aus mehreren Skripts und Funktionen.

- Biegefließkurve (nach Nadai oder nach der elementaren Biegetheorie)
 - Sensordaten_gesamt
 - Simple Convert TDMS
 - Radiusberechnung_aus_TDMS
 - test_circle

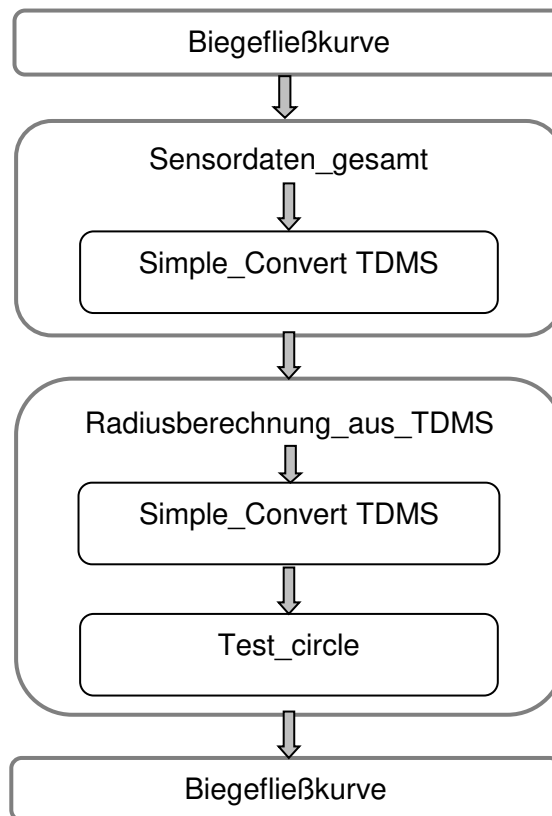


Abbildung 47: Aufbau des Programmcodes

6.1.1 Skript Biegefließkurve

Bei dem Skript Biegefließkurve handelt es sich um das Basisskript von dem alle anderen Skripts bzw. Funktionen aufgerufen werden. Je nach Art der gewünschten Auswertung wird das Skript Biegefließkurve_Nadai bzw. Biegefließkurve_elementare Biegetheorie ausgeführt. Nachdem alle Messdaten verarbeitet und eingelesen wurden muss der Bediener die Blechstärke eingeben und definieren ob der Versuch mit den kurzen oder langen Hebeln durchgeführt wurde.

Anschließend erfolgt die Berechnung des Momentes und der Krümmung bzw. der Randdehnung. Diese Berechnungen sind für beide Auswertelgorithmen ident. Erst die nachfolgenden Auswerteschritte die zur Erlangung der Biegefließkurve notwendig sind unterscheiden sich.

Nach Beendigung aller Berechnungsschritte wird die Biegefließkurve als .PDF und als .JPEG in einem vom Benutzer ausgewählten Verzeichnis gespeichert.

6.1.2 Skripten Sensordaten_gesamt und Simple Convert TDMS

Die Datei Sensordaten_gesamt wird im Basisskript aufgerufen. Am Beginn erhält der Benutzer eine Aufforderung die .tdms Datei der Sensordaten auszuwählen (Beachte: die Dateien des Laserscanners sind hier noch nicht mitinbegriffen). Um ein für Matlab verarbeitbares Format der Messdaten zu erhalten wird die Funktion SimpleConvert TDMS aufgerufen. Dabei handelt es sich um eine fertige Funktion von Mathworks bzw. LabView die online erhältlich ist und die .tdms Dateien in .mat Dateien konvertiert.

Am Ende dieses Skripts wird das Skript Radiusberechnung_ aus_ TDMS aufgerufen.

6.1.3 Skript Radiusberechnung_ aus_ TDMS

Am Beginn muss der Benutzer den Pfad bzw. den Ordner angeben in dem sich die Messdateien des Laserscanners befinden. Genau wie bei den übrigen Sensordaten erfolgt auch hier eine Umwandlung des Formats durch die Funktion SimpleConvertTDMS.

Im nächsten Schritt werden all jene Punkte ausgewählt die zum Biegeradius gehören, alle anderen werden verworfen (siehe Abbildung 48).

Wenn alle Punkte richtig ausgewählt sind, wird die Funktion test_circle ausgeführt.

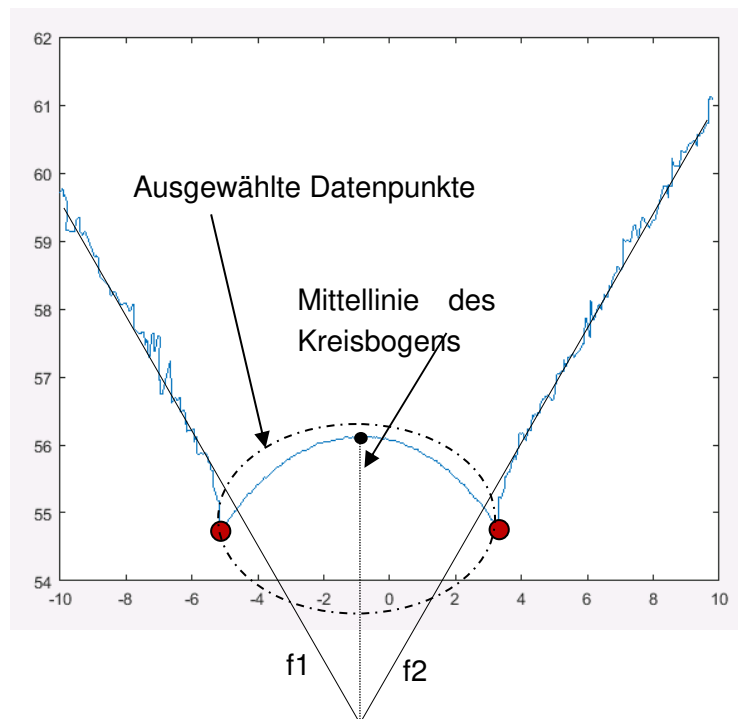


Abbildung 48: Datenpunkte für das Einpassen des Radius

6.1.3.1 Auswahl der Datenpunkte

Der Vorgang zur Auswahl der Datenpunkte ist in Abbildung 48 ersichtlich. Aus den ersten und letzten 100 aufgezeichneten Messpunkten werden zwei lineare Regressionsfunktionen gebildet (f_1 und f_2). Der Schnittpunkt dieser beiden Linien definiert in etwa die Mittellinie des Kreisbogens. Ausgehend von diesem Schnittpunkt werden auf beiden Seiten die Minima gesucht und man erhält die in Abbildung 48 dargestellten roten Punkte. Für das Fitten des Radius werden alle Datenpunkte ausgewählt die sich zwischen den beiden roten Markierungen befinden.

6.1.4 Skript test_circle

Die ausgewählten Messpunkte, siehe Abbildung 48 werden an die Funktion `test_circle` übergeben und der Radius eingepasst.

Als Anfangspunkte werden 3 beliebige Punkte festgelegt die einen Kreis definieren. Auf Basis dieser erfolgt die schrittweise Anpassung an die gegebenen Messpunkte.

Diese Anpassung erfolgt in Matlab mittels der Optimierungsfunktion „`fminsearch`“.

Die Funktion „`fminsearch`“ sucht das Minimum einer angegebenen Funktion durch Variation der Funktionsparameter. In diesem Fall handelt es sich bei der Zielfunktion um die quadratische Summe der Differenz eines Kreisbogens und der y-Koordinaten verschiedener Datenpunkte, zur Erläuterung siehe Abbildung 49.

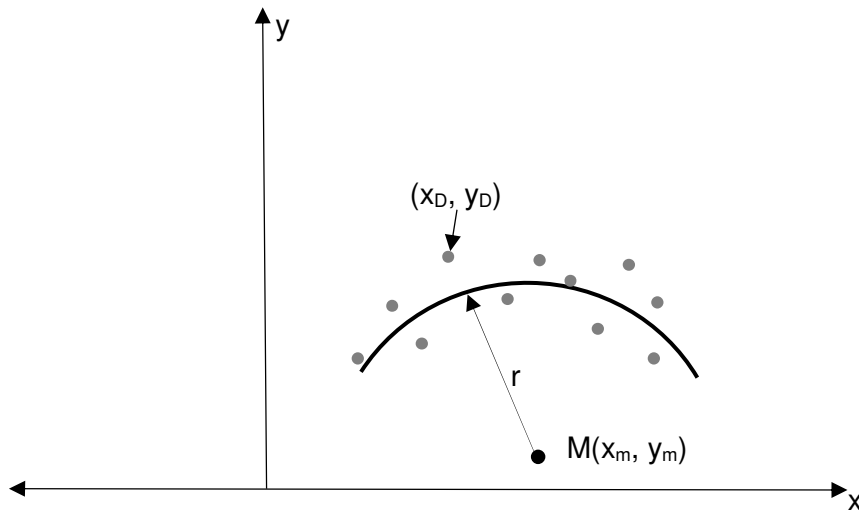


Abbildung 49: Bestimmung des Radius der Blechprobe

x_D, y_D Koordinaten der Datenpunkte
 x_m, y_m Mittelpunkt des Kreisbogens
 r Radius des Kreisbogens

$$f_{Ziel} = \sum_{i=1}^{i=n} (y_{Kreis} - y_{Di}) = \sum_{i=1}^{i=n} (\sqrt{r^2 - (x_i - x_m)^2} + y_m) - y_{Di} \quad (29)$$

Die gesuchten Parameter in der Zielfunktion sind r, x_m, y_m . Diese werden durch die „fminsearch“ Funktion solange variiert bis die Zielfunktion ein Minimum erreicht. Als Ergebnis erhält man einen gefitteten Kreis aus den Datenpunkten. Dieser gibt den Radius der Blechprobe wieder.

6.2 Berechnung der Momenten- Krümmungsbeziehung

Nach Beendigung aller Unterfunktionen erfolgt im Hauptskript die Bestimmung des Biegemoments in Abhängigkeit der Randdehnung. Die Momentenberechnung kann nach Kapitel 3.3.2 auf 2 Arten erfolgen, in Matlab wurde Möglichkeit 1 implementiert (Seite 22). Das Gesamtmoment für die Umformung setzt sich aus 2 Teilen zusammen.

Teil 1:

Bevor die Krafteinleitung in die Hebel beginnt, werden die Kraftsensoren genullt. Sie erfassen somit nur den Teil der Kraft bzw. des Moments der rein durch den Druckbalken eingebracht wird. Dieser Anteil des Moments berechnet sich aus den Messdaten der Kraftsensoren, der Winkeldaten des Inkrementalsensors und dem Abstand vom Kraftangriffspunkt zum Drehpunkt.

$$M_1 = F * l * \sin(\varphi) \quad (30)$$

Teil 2:

Zusätzlich entsteht aber auch ein Momentanteil durch das Eigengewicht der Klemmkonstruktion, welcher in der Berechnung berücksichtigt werden muss, siehe Kapitel 6.2.1.

$$M_2 = m * g * x(\varphi) \tag{31}$$

6.2.1 Moment aufgrund des Eigengewichts der Klemmkonstruktion

Gerade bei kleinen Blechproben spielt das Moment, das durch das Eigengewicht der Klemmkonstruktion hervorgerufen wird, eine nicht unwesentliche Rolle.

Das Gewicht der Klemmkonstruktion kann aus dem CAD ermittelt werden, wobei zu beachten ist welche Hebel zur Momenteneinleitung verwendet werden:

- Klemmkonstruktion mit kurze Hebel: für Blechproben von 1-3mm
 - Eigengewicht: 1,95 kg
- Klemmkonstruktion mit lange Hebel: für Blechproben von 3-6mm
 - Eigengewicht: 3,28 kg

Des Weiteren können auch die Koordinaten des Schwerpunktes für verschiedene Biegewinkel aus dem CAD ermittelt werden.

In der Ausgangsstellung, das heißt im Falle des noch ungebogenen Bleches, ist die Klemmkonstruktion um 10° relativ zur Blechprobe geneigt. Der Grund dafür liegt in der besseren optischen Zugänglichkeit des Laserscanners.

6.2.1.1 Klemmkonstruktion mit kurze Hebel:

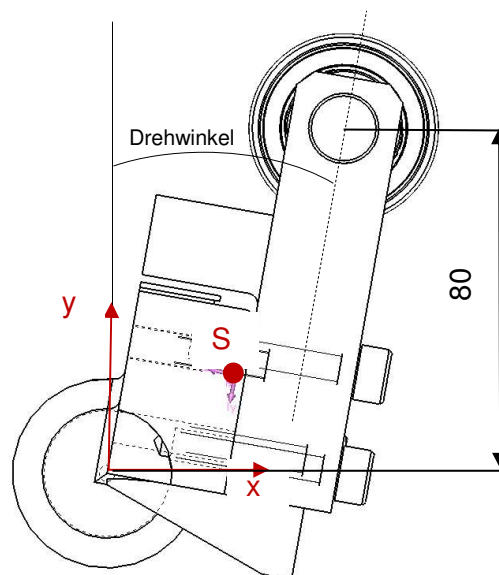


Abbildung 50: Koordinaten des Schwerpunktes bei Klemmkonstruktion mit kurzen Hebeln

Da sich der Schwerpunkt der Klemmung mit zunehmenden Biege Winkel ändert wächst auch das Moment mit zunehmenden Winkel. Entscheidend für die Höhe des Moments ist die x-Koordinate des Schwerpunktes.

Tabelle 1: Koordinaten des Schwerpunktes über dem Drehwinkel

Drehwinkel	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Ausgangsstellung	21,07	18,84	22,77
5 °	22,63	16,94	22,77
10°	24,02	14,9	22,77
15°	25,53	12,75	22,77
20°	26,25	10,5	22,77
25°	27,06	8,17	22,77
30°	27,67	5,78	22,77
35°	28,07	3,35	22,77
40°	28,25	0,89	22,77
45°	28,22	-1,57	22,77

$$M_{\text{Eigengewicht}} = m * g * x(\varphi) \tag{32}$$

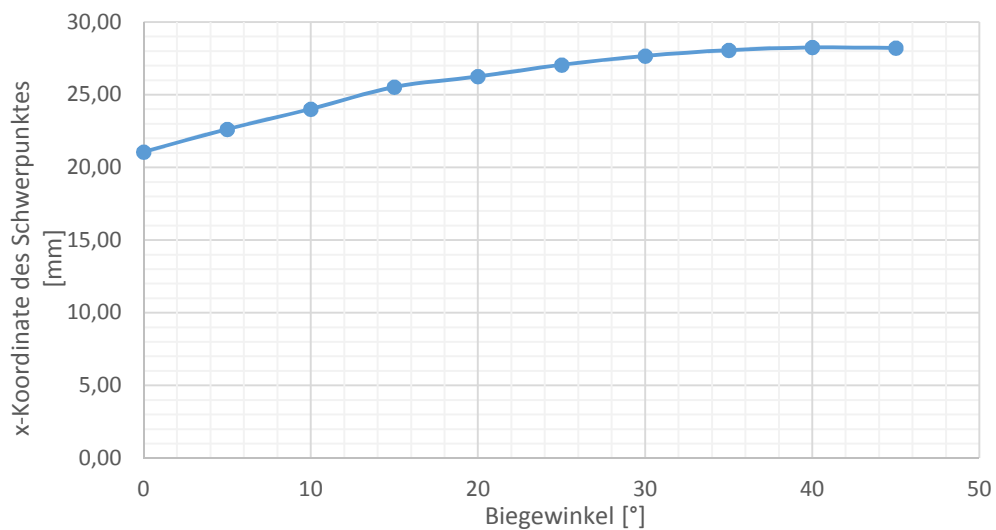


Abbildung 51: Verlauf der x-Koordinate des Schwerpunktes über dem Drehwinkel/ Biege Winkel (kurze Hebel)

6.2.1.2 Klemmkonstruktion mit lange Hebel:

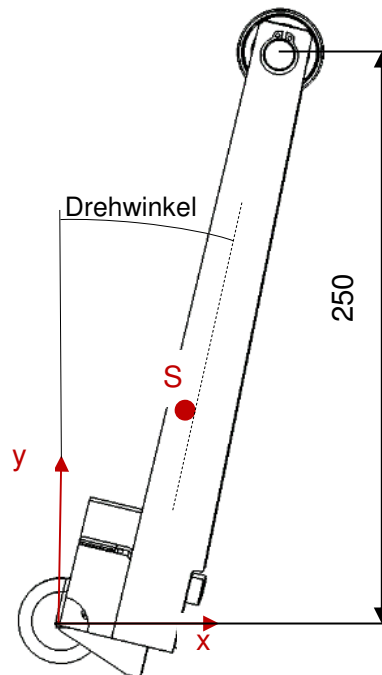


Abbildung 52: Koordinaten des Schwerpunktes bei Klemmkonstruktion mit langen Hebeln

Die Klemmkonstruktion mit langen Hebeln ist der mit den kurzen Hebeln sehr ähnlich, nur die Koordinaten des Schwerpunktes unterscheiden sich. Das Moment, verursacht durch die Gewichtskraft der Klemmkonstruktion, kann nach Gleichung (32) berechnet werden.

Tabelle 2: Koordinaten des Schwerpunkts über dem Drehwinkel

Drehwinkel	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Ausgangsstellung	35,52	60,91	29,75
5 °	40,69	57,58	29,75
10°	45,55	53,82	29,75
15°	50,06	49,65	29,75
20°	54,2	45,11	29,75
25°	-57,92	40,22	29,75
30°	-61,21	35,02	29,75
35°	-64,02	29,56	29,75
40°	-66,36	23,87	29,75
45°	-68,19	18	29,75

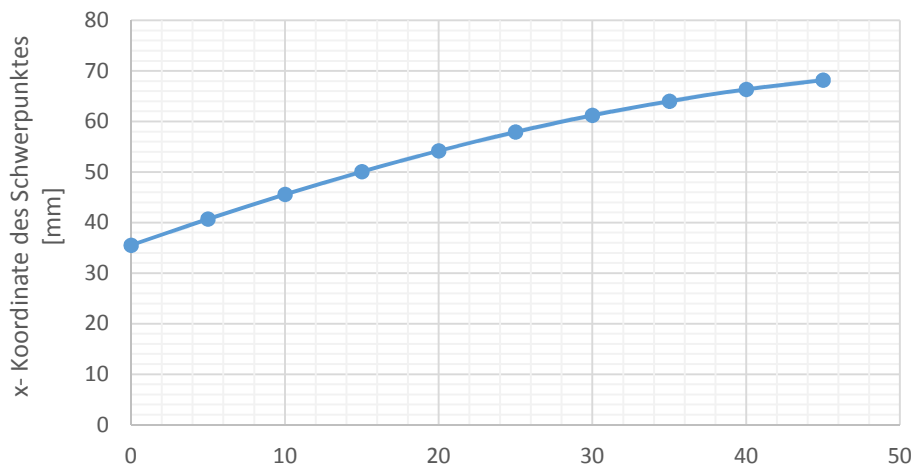


Abbildung 53: Verlauf der x-Koordinate des Schwerpunktes über dem Drehwinkel/ Biege- winkel (lange He- bel)

Nach der Berücksichtigung der Gewichtskraft kann aus den Messdaten (Kraft und Winkel) das auf die Blechprobe wirkende Moment und die Randdehnung berechnet und in einem entsprechenden Diagramm dargestellt werden.

$$M_{\text{gesamt}} = F * l * \sin(\varphi) + m * g * x(\varphi) \tag{33}$$

Ein Beispiel eines solchen Momentenverlaufs über der Randdehnung ist in Abbildung 54 für eine DC01 Blechprobe ersichtlich. Es wird für alle Proben ein ähnlicher Verlauf erwartet, nur die Höhe des Momentes wird je nach Werkstoff und Blechdicke variieren.

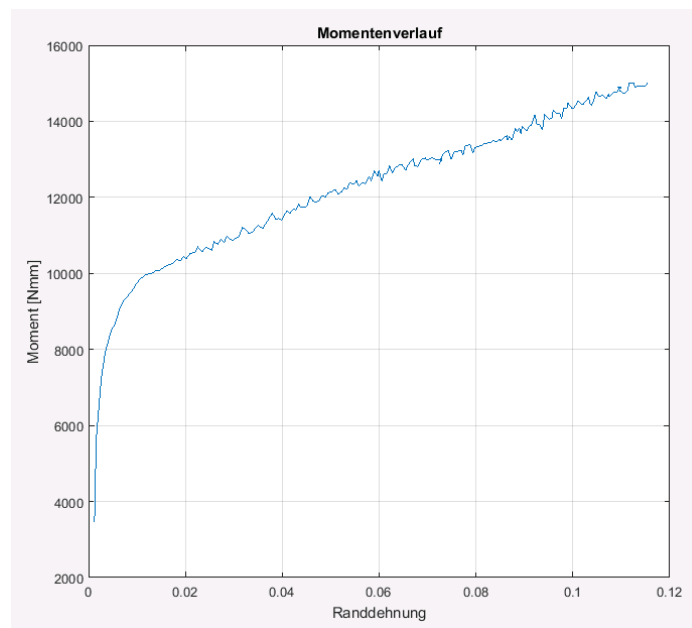


Abbildung 54: Momentenverlauf über der Randdehnung

Alle Schritte bis zum Momentenverlauf sind sowohl für den Berechnungsansatz nach Nadai, als auch für die elementare Biegetheorie identisch. Erst die weiteren Berechnungen zur Ermittlung der Fließkurve unterscheiden sich.

6.2.2 Bestimmung der Randdehnung für kleine Biegewinkel

Aufgrund der Tatsache, dass die Umformung nur bis zu sehr kleinen Biegewinkeln elastisch ist ergeben sich große Herausforderungen an die Bestimmung von Datenpunkten in diesem Bereich. Um den elastischen Verlauf der Fließkurve modellieren zu können sind mehrere Messpunkte nötig. Es hat sich gezeigt, dass die Bestimmung dieser extrem großen Radien mit den, uns vorhandenen Messdaten, sehr schwierig ist. Es wurden unterschiedliche Ansätze und Möglichkeiten untersucht um auf das gewünschte Ergebnis zu kommen.

Betrachtet man Abbildung 55, ist ersichtlich, dass das Fitten eines Kreises bei sehr kleinen Biegewinkeln für die vorhandenen Messpunkte des Laserscanners sehr schwierig und nur mit großer Ungenauigkeit möglich ist. Einerseits ist das Signal des optischen Sensors mit einem Rauschen versehen und andererseits erfasst der Sensor auch die Oberflächenrauigkeit der Blechprobe. Dies führt zu einem Messverlauf wie er in Abbildung 55 dargestellt ist.

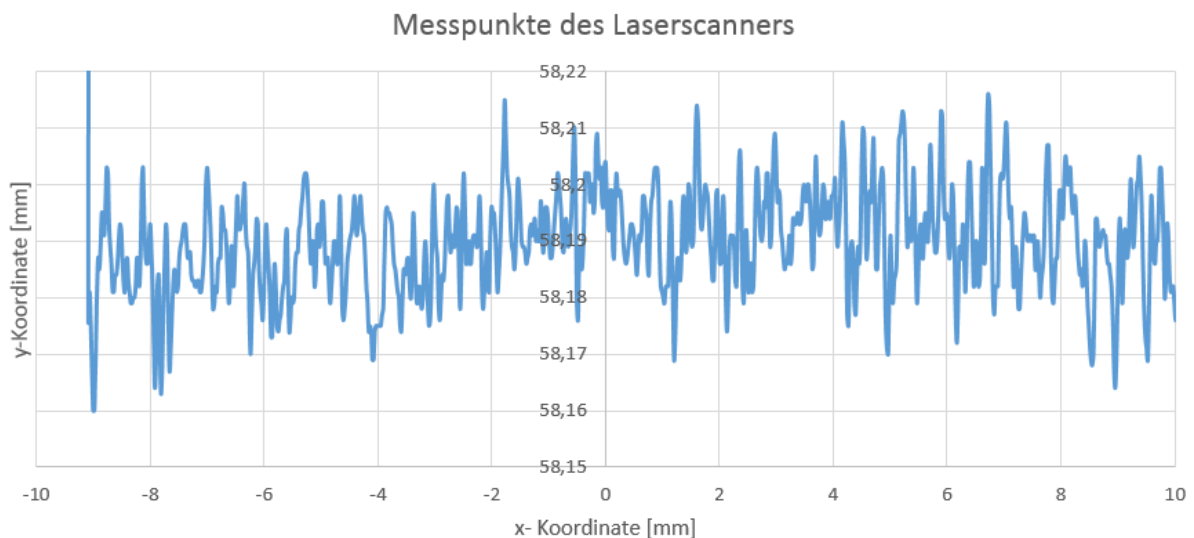


Abbildung 55: Messpunkte des Laserscanners zum Fitten des Radius

Aus diesem Grund werden die Radiuswerte für sehr kleine Biegewinkel aus anderen vorhandenen Messdaten berechnet. Die Messwerte für den Drehwinkel φ , den horizontalen Weg Δl den der bewegliche Lagerbock während des Biegevorgangs ausübt und den vertikalen Weg h den die Blechprobe während des Biegevorgangs ausführt, werden direkt von den Sensoren geliefert (siehe Abbildung 57). Die Einspannlänge muss manuell gemessen werden. Dabei wird einmal der Abstand zwischen den Klemmkörpern mittels Endmaßen genau eingestellt und der in Abbildung 56 dargestellte Abstand l mittels Tiefenlehre zugeordnet. Das hat den Vorteil, dass für zukünftige Versuche nur mehr der Abstand l mittels Tiefenlehre gemessen werden muss und dadurch direkt auf die Einspannlänge l_0 umgerechnet werden kann.

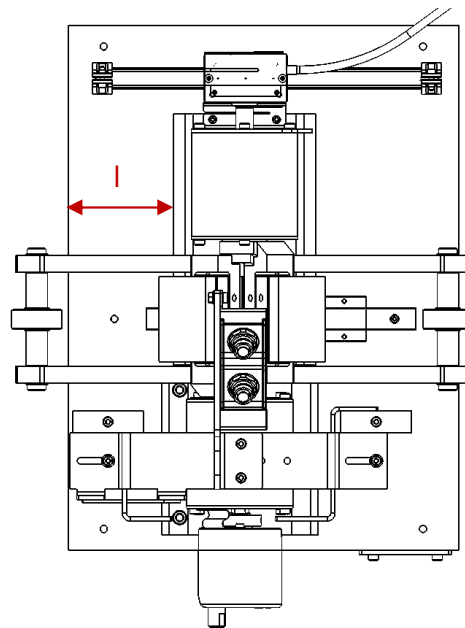


Abbildung 56: Bestimmung von l_0

6.2.2.1 Rechnerische Bestimmung des Radius aus den vorhandenen Messdaten

Für die rechnerische Ermittlung des Radius bei sehr kleinen Biegewinkel gibt es mehrere Möglichkeiten (siehe Abbildung 57):

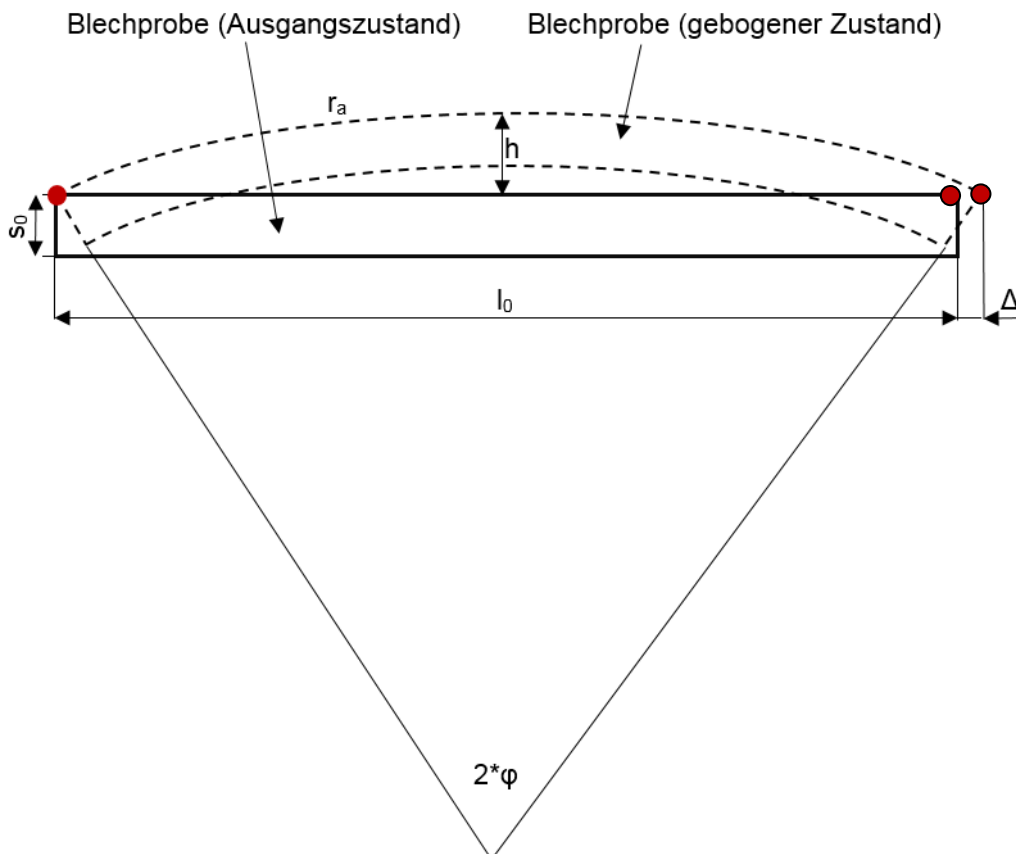


Abbildung 57: Größen zur Radiusberechnung bei kleinen Biegewinkeln

l_0 Einspannlänge

h Vertikaler Weg der Blechprobe bei der Durchbiegung

Δl Horizontaler Weg den der bewegliche Lagerbock während der Umformung ausführt

●....Drehpunkte der Lagerung der Blechprobe

Da die Blechprobe an den rot gekennzeichneten, äußeren Punkten, der Blechprobe gelagert wird verschiebt sich der Drehpunkt Δl für kleine Biegewinkel zuerst in die in Abbildung 57 dargestellte Richtung. Bei größeren Krümmungen verschiebt sich der bewegliche Drehpunkt dann zunehmend in die entgegengesetzte Richtung. Würden die Drehpunkte der Blechprobe in der neutralen Faser liegen bzw. weiter in Richtung Innenseite dann verschiebt sich Δl von Beginn an in die entgegen der in Abbildung 57 eingezeichnete Richtung.

Möglichkeiten zur Radiusbestimmung:

- Aus der Einspannlänge der Probe und dem Biegewinkel

$$l_0 = r_m * 2 * \varphi \rightarrow r_m = \frac{l_0}{2 * \varphi} \quad (34)$$

Da sich ein konstanter Radius einstellt kann über die Länge des Kreisbogens der Biegeradius berechnet werden

- Aus dem vertikalen Weg der Blechprobe während der Umformung und dem Biege-
winkel

$$h = r - r * \cos \varphi \rightarrow r = \frac{h}{1 - \cos \varphi} \quad (35)$$

- Aus dem vertikalen Weg der Blechprobe während der Umformung und aus der hori-
zontalen Verschiebung des beweglichen Lagerbocks

$$l_0 + \Delta l = 2 * r * \sin \varphi \quad (36)$$

Aus dem pythagoreischen Lehrsatz folgt

$$r * \sin \varphi = \sqrt{r^2 - (r - h)^2} \quad (37)$$

Nach Einsetzen von (37) in Gleichung (36) ergibt sich

$$(l_0 + \Delta l)^2 = 4 * (2 * r * h - h^2) \quad (38)$$

Durch Umformgen erhält man schlussendlich den Radius in Abhängigkeit von h und Δl

$$r = \frac{(l_0 + \Delta l)^2}{8 * h} + \frac{h}{2} \tag{39}$$

Zur Kontrolle der Plausibilität der einzelnen Radiusberechnungen wurde ein Vergleich mit dem Laserscanner bei großen Winkeln durchgeführt, für die der Scanner sehr genaue Ergebnisse liefert. Des Weiteren wurden die Berechnungsergebnisse im Endzustand einer Blechprobe mit Hilfe einer Radiuslehre kontrolliert.

Die Werte der einzelnen Berechnungsmöglichkeiten weisen besonders bei kleinen Biege- winkel Unterschiede auf. Durch den Vergleich mit dem Scanner bzw. Radiuslehre hat sich gezeigt, dass die Berechnungsmöglichkeiten, die eine Abhängigkeit vom Biege- winkel besitzen, zu ungenaue Werte liefern.

Ein möglicher Grund liegt darin, dass der Winkel den der Inkrementalsensor ausgibt nicht gleich dem Winkel ist, der tatsächlich an der Biegeprobe ankommt. Dies kann durch Verfor- mungen oder minimales Aufklaffen der Einspannung geschehen.

Die zusätzliche Messung des vertikalen Weges der Blechprobe während des Biegevorgangs mit Hilfe eines Messtasters ermöglicht eine rechnerische Radiusbestimmung ohne Abhän- gigkeit des Biege- winkels (siehe Gleichung (39)). Die Plausibilitätskontrolle hat gezeigt, dass diese Möglichkeit für große Einspannlängen und geringe Biegekräfte genaue Werte liefert und der Radius auch bei sehr kleinen Biege- winkeln ($<2^\circ$) mit ausreichender Genauigkeit be- stimmt werden kann. Erst bei sehr kleinen Biege- winkeln unterscheiden sich die berechneten Radien und die Radien des Laserscanners deutlich. Dies ermöglicht es den ungenauen Ra- dius der Biegeprobe des Laserscanners durch einen genaueren berechneten Wert zu erset- zen

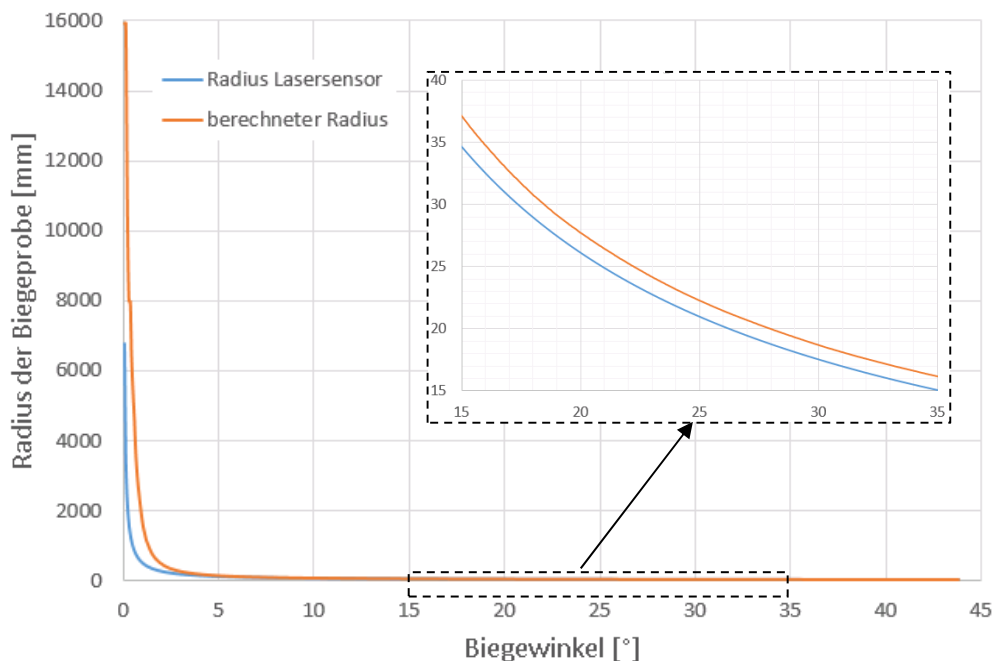


Abbildung 58: Vergleich berechneter Radius mit dem Radius des Laserscanners

Bei kleinen Einspannlängen ergeben sich größere Biegekräfte, was dazu führt, dass die elastische Stauchung des Gesamtkonstrukts größer wird und der Messtaster diese mit misst. Durch den zusätzlichen Aspekt des kleiner werdenden Abstandes h bei sinkender Einspannlänge ergeben sich Messwerte von h die für die Berechnung nicht brauchbar sind.

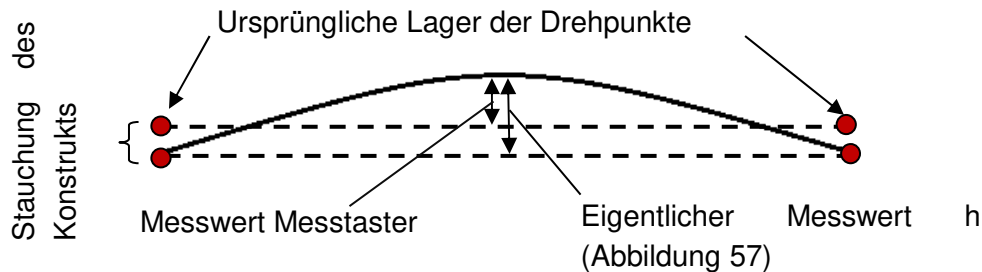


Abbildung 59: Fehler bei der Radiusbestimmung mittels Messtaster

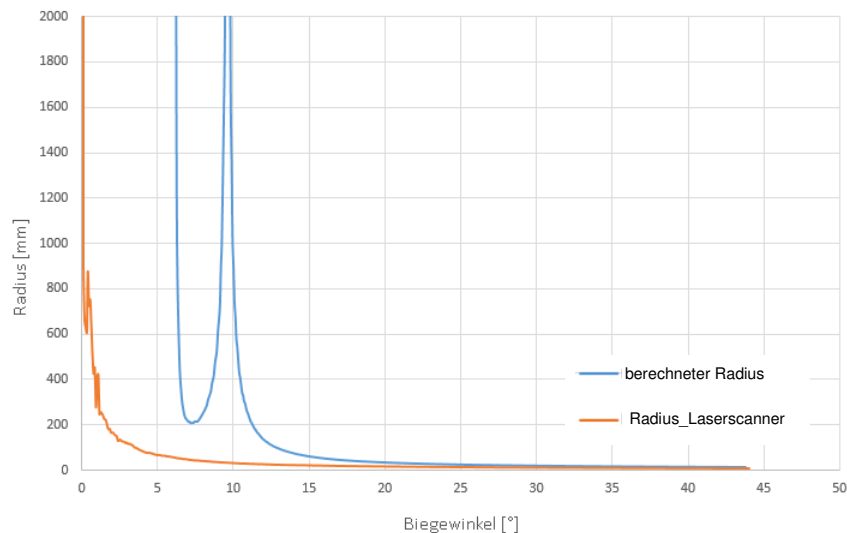


Abbildung 60: Vergleich der Radien berechnet und Laserscanner bei kleinen Einspannlängen

Betrachtet man Abbildung 60 ist ersichtlich, dass bei kleinen Einspannlängen und dickeren Blechproben (>2 mm) der Ansatz nach dem berechneten Radien nicht zielführend ist. Aufgrund der Stauchung des Gesamtkonstrukts detektiert der Messtaster viel zu kleine Werte für h , wodurch sich bei kleineren Biegewinkel falsche Radien ergeben.

Kennt man die Steifigkeit des Konstrukts kann die Stauchung bei der Berechnung berücksichtigt werden. Die genaue Bestimmung der Steifigkeit kann mit Hilfe der FEM Berechnung ermittelt werden. Dies erfordert jedoch hohen zeitlichen Aufwand, da die Lagersteifigkeiten nicht bekannt sind und diese großen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit des Systems haben.

6.2.2.2 Radiusbestimmung durch Extrapolation

Nachdem weder die Messwerte des Laserscanners bei sehr kleinen Biegewinkeln, noch die rechnerische Bestimmung aus den vorhandenen Messwerten zum gewünschten Ziel führen, müssen andere Wege gefunden werden um den notwendigen Radius bestimmen zu können.

Eine Möglichkeit ist die Extrapolation der genauen, vorhandenen Messwerte. Da wie bereits erwähnt der Laserscanner bei größeren Biege­winkeln bzw. Krümmungen genaue Werte liefert, können die Radien bei kleinen Krümmungen durch eine Potenzfunktion extrapoliert werden.

Betrachtet man Abbildung 61, so sieht man den Verlauf der Radien (vom Laserscanner) über einem Winkel von etwa 3° bis zum maximalen Biege­winkel der Blechprobe als blaue Kennlinie dargestellt. Die Daten können mit Hilfe einer Potenzfunktion extrapoliert werden. Die Funktion hat dabei folgende Form.

$$r = a * \varphi^b \tag{40}$$

a,b.....Konstanten der Potenzfunktion

φhalber Biege­winkel

Die Koeffizienten a und b werden in Matlab mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Dabei werden die Koeffizienten a und b solange variiert bis der quadratische Fehler zwischen Messdaten und Potenzfunktion ein Minimum ergibt. Die eingepasste Funktion ist in Abbildung 61 als rote Kennlinie dargestellt.

Durch die Anwendung bei verschiedensten Blechproben hat sich gezeigt, dass der Verlauf der Messwerte über dem Biege­winkel immer mit guter Genauigkeit durch eine Potenzfunktion beschrieben werden kann.

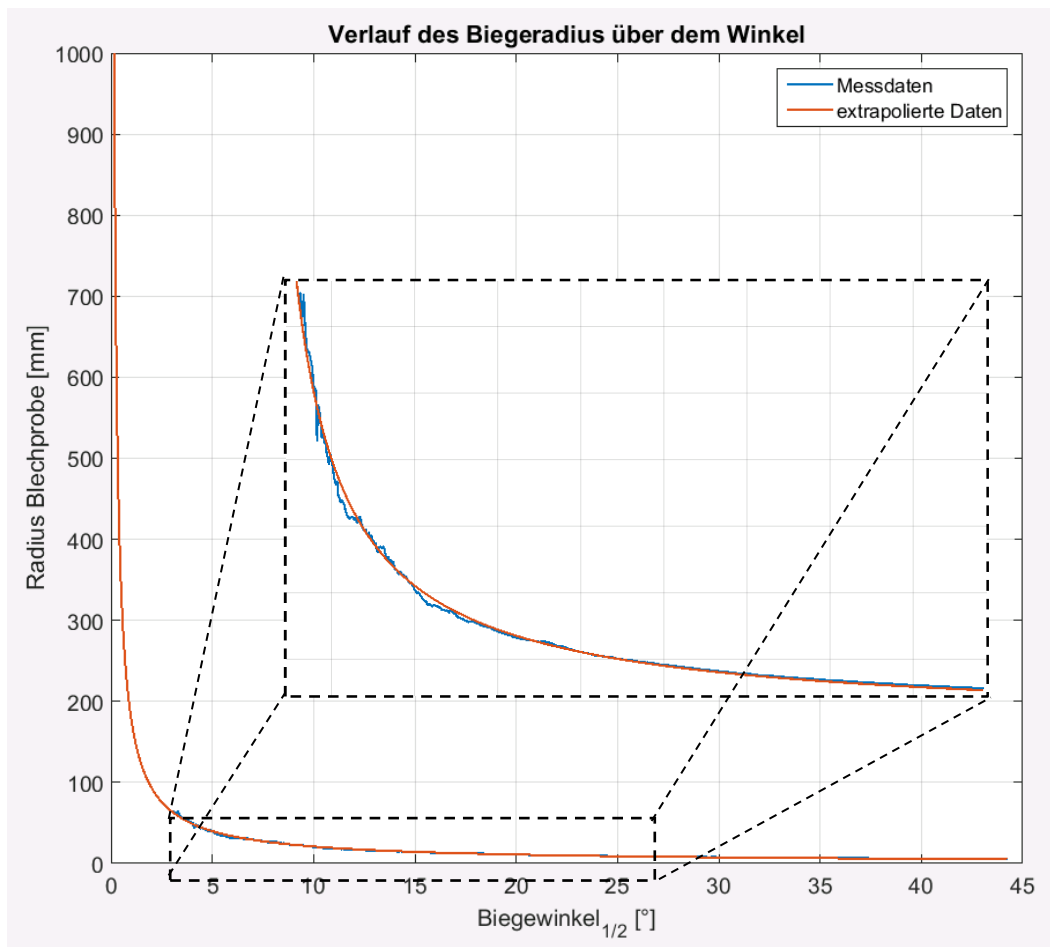


Abbildung 61: Extrapolation des Radius

6.2.2.3 Schlussfolgerung

Die Radiusbestimmung nach Kapitel 6.2.2.2 zeigt für alle Varianten von Proben gute Ergebnisse. Deshalb wird auch diese Art der Radiusberechnung bei der Bestimmung der Biegefließkurve für den in Kapitel 7 definierten Blechprobenkatalog verwendet.

6.3 Auswertung nach Nadai

Nachdem alle, in den vorigen Kapiteln beschriebenen, allgemein gültigen Berechnungsschritte durchgeführt wurden bezieht sich dieser Abschnitt auf die spezifischen Rechenschritte der Auswertung nach Nadai.

Wie bereits in Kapitel 5.1 erläutert, ist zur Bestimmung der Randspannung bzw. der Fließspannung die Ableitung des Moments nach der Randdehnung erforderlich. Aufgrund des Rauschens der Messwerte ist eine Bearbeitung des Momentenverlaufs notwendig um eine aussagekräftige Ableitung dieser erhalten zu können.

Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten:

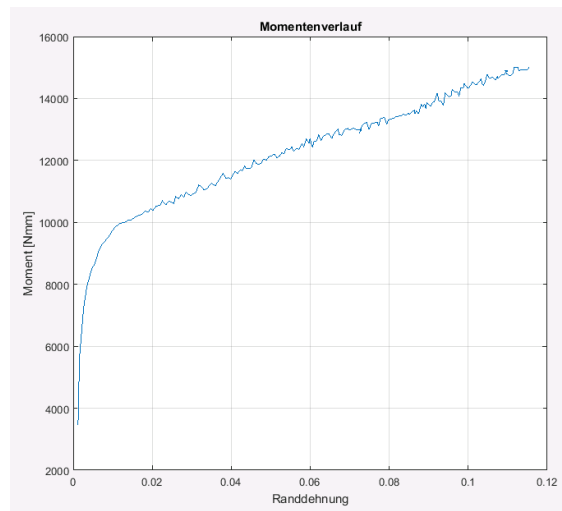


Abbildung 62: Momentenverlauf über der Randdehnung

- Beschreibung des Momentenverlaufs durch „gefittete“ Funktionen
- Beschreibung des Momentenverlaufs durch kubische Splines
- Glätten der Messwerte des Moments und anschließende numerische Differentiation

Diese Punkte sollen im folgenden Teil diskutiert werden:

6.3.1 Beschreibung des Momentenverlaufs durch „gefittete“ Funktionen

Die Schwierigkeit besteht darin, dass der Verlauf des Moments nicht ausreichend genau durch eine einzige Funktion abgebildet werden kann, weder mit Polynomfunktionen noch mit Potenzfunktionen.

Aus diesem Grund muss der ursprüngliche Verlauf, in Abbildung 63 blau dargestellt, aus mehreren Funktionen nachgebildet werden.

In dieser Arbeit wurden die ersten Messpunkte, die den elastischen Bereich definieren, durch eine Gerade abgebildet und der plastische Bereich durch eine Polynomfunktion 2. Grades.

Der Übergangsbereich elastisch-plastisch muss so abgebildet werden, dass ein stetiger Übergang zwischen der Geraden und der Polynomfunktion 2. Grades entsteht. Dies ist insofern wichtig da für die Bestimmung der Biegefließkurve die Ableitung des Moments nach der Randdehnung notwendig ist. Realisiert wird der Übergang durch eine Bezierkurve 2. Grades.

In der numerischen Mathematik ist die Bezierkurve eine parametrische modellierte Kurve und wird durch Kontrollpunkte definiert [27].

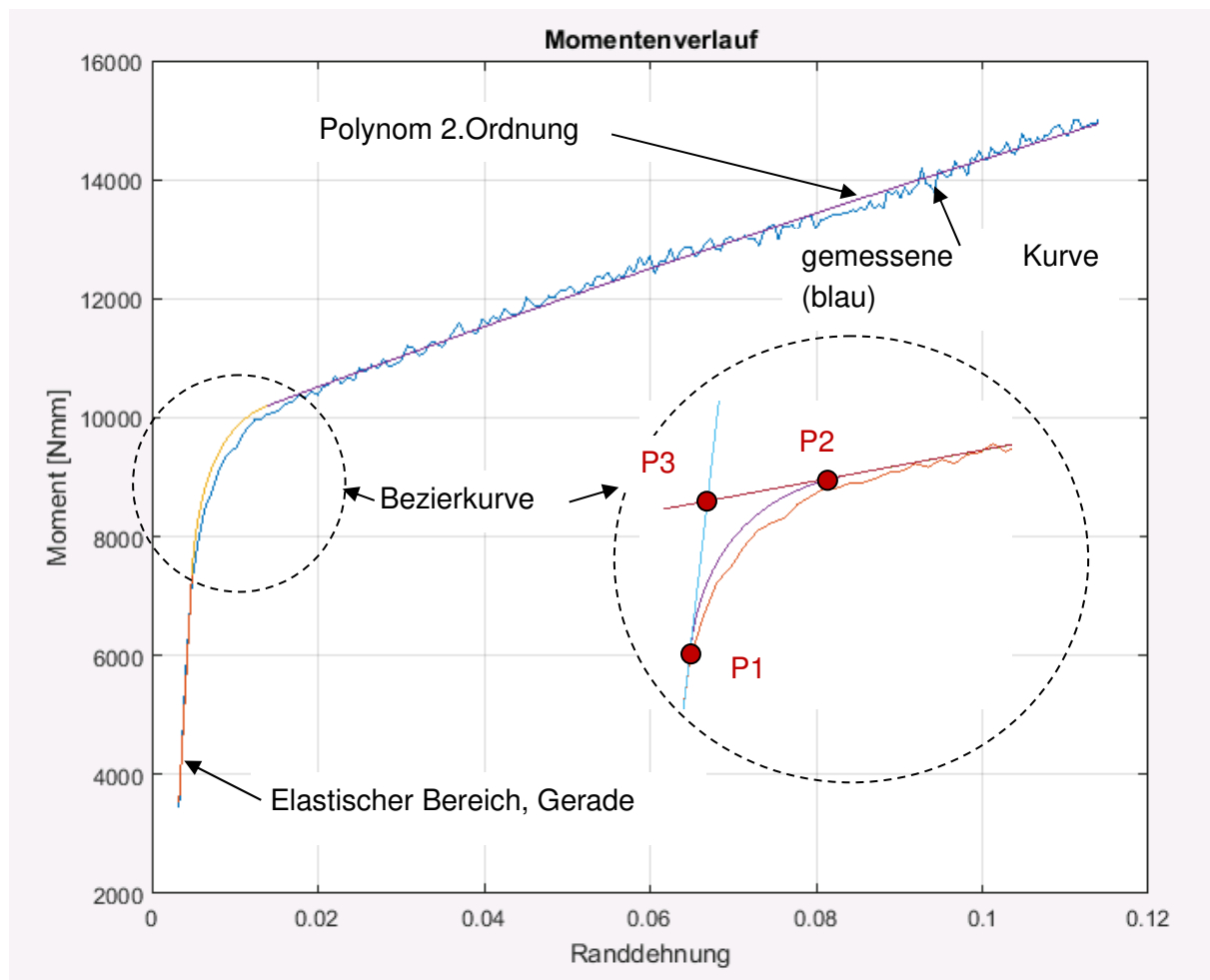


Abbildung 63: Beschreibung des Momentenverlaufs durch „gefittete“ Funktionen

Die in Abbildung 63 ersichtlichen Punkte P1, P2, P3 definieren den Verlauf der Bezierkurve 2. Ordnung. Punkt P3 ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Tangenten in den Punkten P1 und P2. Damit wird ein stetiger Übergang zwischen den Funktionen gewährleistet.

Die Gleichung für eine quadratische Bezierkurve, lässt sich folgendermaßen ausdrücken.

$$C(t) = \sum_{i=0}^2 \binom{2}{i} * t^i * (1-t)^{2-i} * P_i \quad t = [0, 1] \quad (41)$$

Verwendet man den durch Funktionen eingepassten Momentenverlauf für die Differentiation ergibt sich eine, in Abbildung 64 dargestellte charakteristische Biegefließkurve die je nach Werkstoff und Blechdicke für alle Proben einen ähnlichen Verlauf annimmt.

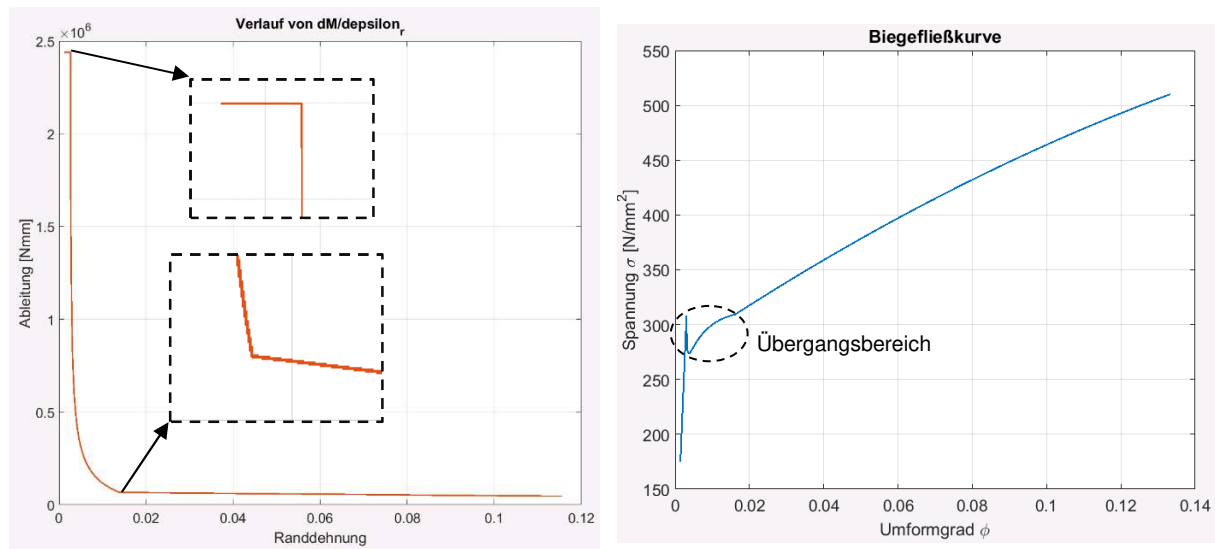


Abbildung 64: Biegefließkurve bei gefitteten Moment (rechts) und Verlauf der Ableitung nach der Randdehnung (links)

Im Verlauf der Biegefließkurve (Abbildung 64 rechts blaue Kennlinie) ist ersichtlich, dass die Kennlinie, vor allem im Übergangsbereich vom elastischen in den plastischen Bereich nicht richtig dargestellt wird. Der Grund dafür liegt in der Ableitung des Momentes nach der Randdehnung. Der Verlauf der roten Kennlinie in Abbildung 64 zeigt zwei Knicke, welche sich genau an den Übergangsstellen bzw. an den Schnittpunkten der gekoppelten Funktionen befinden. Die beiden Knicke bedeuten, dass die Funktion nicht weiter differenzierbar ist und sich dadurch der in Abbildung 64 dargestellte Verlauf der Biegefließkurve ergibt.

Auch durch eine Variation der Funktionsansätze konnte dieses Problem nicht gelöst werden. Aus diesem Grund eignet sich dieser Ansatz nur bedingt für die Auswertung der Biegefließkurve.

6.3.2 Beschreibung des Momentenverlaufs durch kubische Splines

Eine Möglichkeit zur Vermeidung der Knicke im Verlauf der Ableitung ist die Beschreibung des Momentenverlaufs über Splines, siehe Abbildung 65, bei denen an jeder Stelle eine Ableitung 2. Ordnung gebildet werden kann. In diesem Fall entstehen jedoch wieder andere Schwierigkeiten, auf die nachstehend noch kurz eingegangen wird.

Beim Einsatz kubischer Splines wird der Bereich der Datenpunkte mit Hilfe von Stützstellen in mehrere Bereiche ($h_1 \dots h_{n-1}$) unterteilt zwischen denen die Splines definiert werden. Bei kubischen Splines handelt es sich um Polynome 3. Grades.

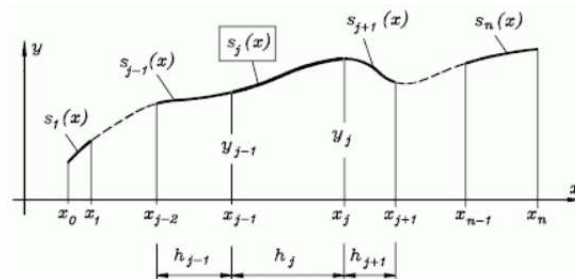


Abbildung 65: Kubische Splines [25]

Die besondere Eigenschaft dieser Splines ist die zweimalige stetige Differenzierbarkeit an den Stützstellen. Das bedeutet, dass sich im Verlauf der Ableitung des Moments nach der Randdehnung keine Unstetigkeitsstellen befinden.

Als Beispiel ist in Abbildung 66 (für eine DC01 Probe) der gemessene Momenten Verlauf (blau) durch den mit kubischen Splines beschriebenen Verlauf (rot) dargestellt.

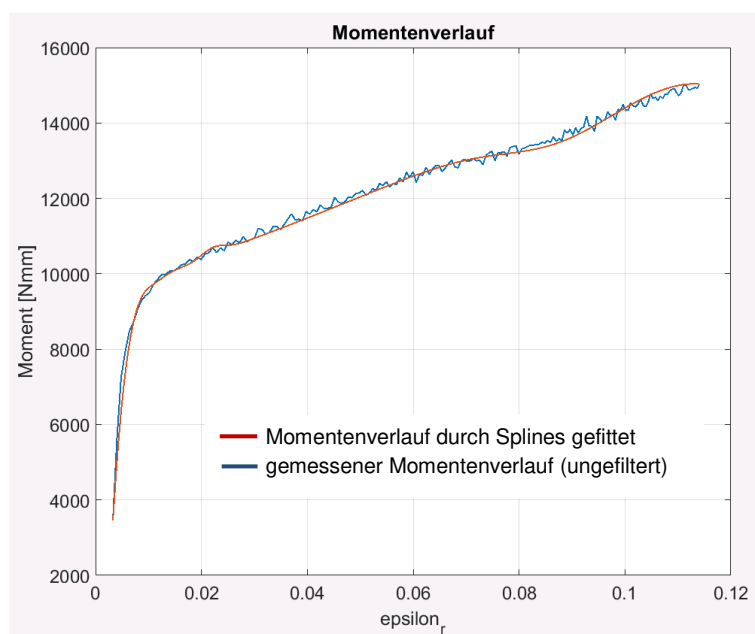


Abbildung 66: Momentenverlauf durch Splines

Verwendet man den Verlauf der Splines als Basis für die Differentiation erhält man zwar keine Unstetigkeitsstellen, jedoch durch die Verwendung der kubischen Funktion Schwankungen/Krümmungswechsel im Verlauf der Ableitung (linker Graph in Abbildung 67) und im weiteren Verlauf, wegen dem großen Einfluss der Momentenableitung auf die Biegefließkurve, eine starke Schwankung dieser (rechter Graph in Abbildung 67)

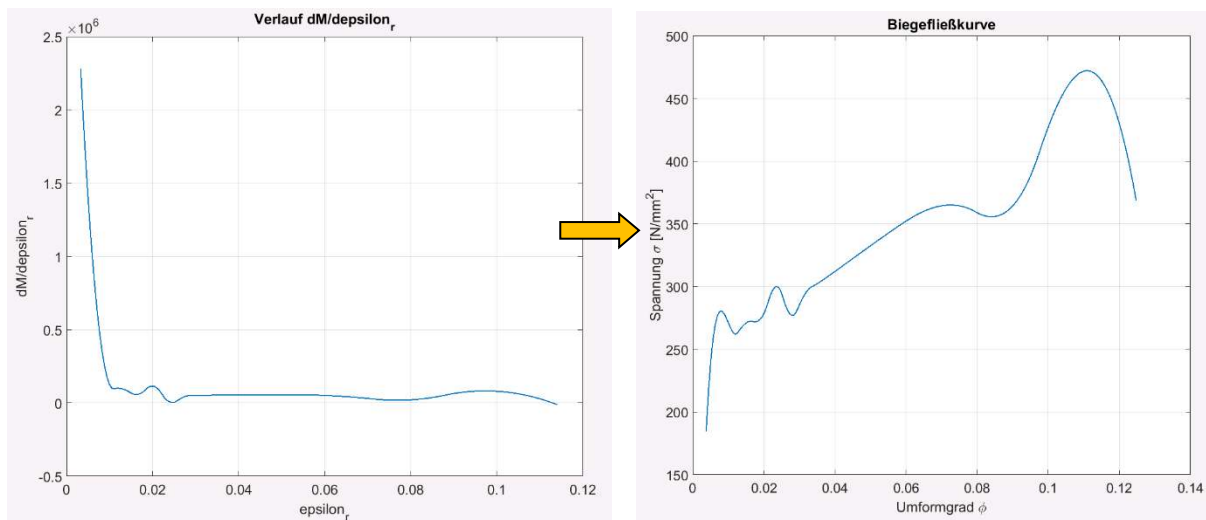


Abbildung 67: Verlauf der Ableitung des Momentes nach der Randdehnung und Biegefließkurve bei einem Momentenverlauf durch Splines

könnte den Verlauf der Biegefließkurve wieder durch Funktionen beschreiben, jedoch wird der Fehler durch die Einpassung so groß, dass keine aussagekräftigen Schlüsse gezogen werden können.

6.3.3 Glätten der Messwerte und anschließende Differentiation

Damit eine sinnvolle numerische Differentiation der Messwerte durchgeführt werden kann, müssen die Messwerte geglättet werden. Dies kann beispielsweise über einen gleitenden Durchschnitt (3. Ordnung, 5.Ordnung, etc.) oder eine exponentielle Glättung durchgeführt werden. Gleichung (42) beispielsweise definiert einen gleitenden Durchschnitt 3.Ordnung.

$$y_{\text{geglättet}_i} = \frac{y_{i-1} + y_i + y_{i+1}}{3} \tag{42}$$

Zur numerischen Differentiation des Moments wurde der Ansatz des zentralen Differenzenquotienten gewählt.

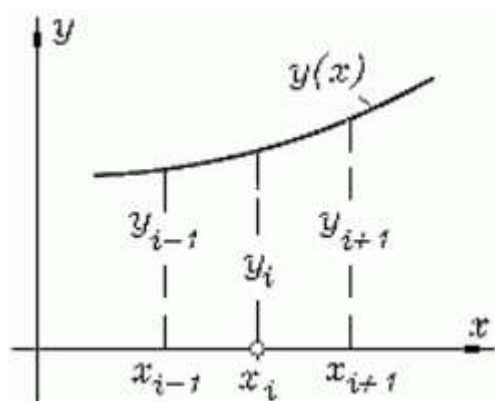


Abbildung 68: Zentraler Differenzenquotient [24]

$$y'_i(x_i) \approx \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{(x_{i+1} - x_i) + (x_i - x_{i-1})} \quad (43)$$

Nach der Glättung des Moments und der numerischen Differenzierung des Moments nach der Randdehnung ergibt sich folgender Verlauf der Fließspannung über dem Vergleichsumformgrad (blau gekennzeichnete Verlauf in Abbildung 69).

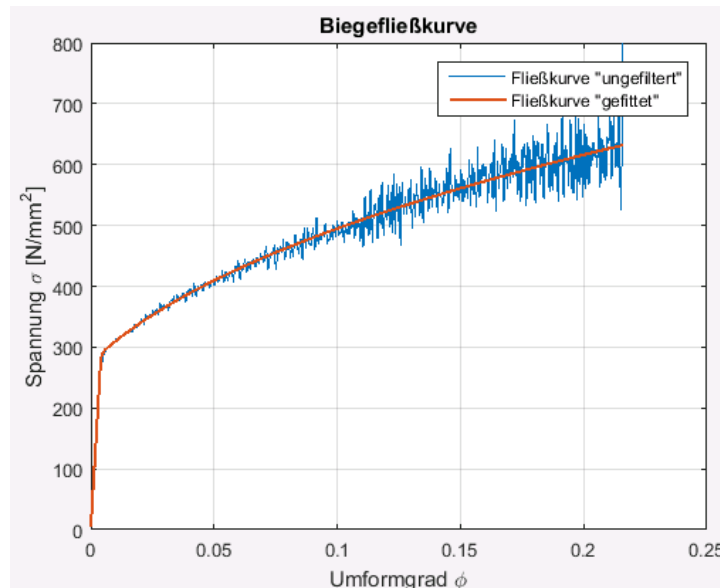


Abbildung 69: Biege­fließ­kurve nach numerischer Differentiation und gefittete Fließ­kurve

Die Glättung der Messwerte sorgt für eine Reduktion der Schwankungen im Momenten­Verlauf. Man erhält keinen stetigen, streng monotonen Momenten­verlauf wie er gewünscht wäre um einen streng monotonen Verlauf der Ableitungen und in weiterer Folge der Fließ­spannungen zu generieren. Aus diesem Grund muss der sich ergebende Verlauf der Fließ­spannung durch Funktionen „gefittet“ werden. Wie bereits beim „Fitten“ des Momenten­verlaufs in Abschnitt 6.3.1 gibt es keine einzelne Funktion die den Verlauf mit genügender Genauigkeit nachbilden kann. Deshalb werden mehrere Funktionen definiert, die den Verlauf der Fließ­spannung wiedergeben. Im plastischen Bereich wird eine Swift-Potenzfunktion als Ansatz verwendet. Dabei werden die Messpunkte von der $R_{p0,2}$ Dehngrenze bis zum letzten gemessenen Wert verwendet. Der elastische Bereich wird wieder durch eine lineare Funktion beschrieben und der Übergangsbereich durch eine Bezierkurve 2.Ordnung. Im Gegensatz zur Biege­fließ­kurve in Abschnitt 6.3.2 lässt sich ein Verlauf dieser Art mit geringerem Fehler beschreiben. Aus diesem Grund wird auch diese Form der Biege­fließ­kurvenbestimmung aus der Momenten- Krümmungs­beziehung als Basis für alle weiteren Versuche verwendet.

6.4 Auswertung nach der elementaren Biegetheorie

Wie bereits in Abschnitt 5.2 erläutert, ist zur Berechnung der Fließ­spannung eine Anfangs- bzw. Randbedingung notwendig um die Werkstoffkonstante und den Verfestigungsexponenten für jeden Punkt der Momenten- Krümmungs­beziehung zu ermitteln.

Die Spannung und Dehnung im Übergangsbereich zwischen elastischen und plastischen Bereich als Randbedingung kann jedoch nicht einfach aus dem Zugversuch ermittelt werden, sondern muss mit den zur Verfügung stehenden Messdaten bestimmt werden. Dafür wurden unterschiedliche Ansätze getestet.

6.4.1 Hook'sches Gesetz als Werkstoffmodell:

Da für den elastischen Bereich das Werkstoffmodell aus Abschnitt 5.2.1 nicht optimal ist wird zur Bestimmung der Biege­fließ­kurve im elastischen Bereich das Hook'sche Gesetz ($\sigma = E \cdot \epsilon$) verwendet. Auf Basis von Formel (25) wird für jeden Punkt des Momenten- Randdehnungs- ver­laufs ein E-Modul bestimmt.

$$M_b - 2 \cdot \int_0^{\epsilon_R} E \cdot \epsilon \cdot b \cdot \epsilon \cdot r_m^2 \cdot d\epsilon = 0 \rightarrow E \tag{44}$$

In weiterer Folge kann dann mit Hilfe des linearen Werkstoffgesetzes die Randspannung für jeden Punkt berechnet werden.

$$\sigma_R = E \cdot \epsilon \tag{45}$$

Aus der ermittelten Randspannung wird die Fließkurve bestimmt. Bei Annahme einer plasti­chen Dehnung von 0,2% und der Steigung der Biege­fließ­kurve im elastischen Bereich kann die gewünschte Fließspannung σ_F und Randdehnung ϵ_F für weitere Berechnungen ermittelt werden.

Das Ergebnis hat gezeigt, dass dieser Rechenansatz nicht zu den gewünschten Erfolg führt. Der E-Modul der einzelnen Punkte im elastischen Bereich unterscheidet sich teils beträchtlich und auch die Größenordnung ist für Stahl viel zu hoch.

6.4.2 Bestimmung des E-Modul aus der Biegelinie

Auf Basis der Gleichung für die Biegelinie erfolgt die Berechnung des E-Moduls.

$$w'' = \frac{-M(x)}{E \cdot I} \tag{46}$$

- w''....2.Ableitung der Durchbiegung
- E.....E-Modul
- I.....Flächenträgheitsmoment [mm⁴]
- M(x)..Moment an der Stelle x [Nmm]

Durch einmalige Integration erhält man den Winkel des Bleches

$$w' = \frac{-M(x)}{E * I} * x + C \quad (47)$$

Als Anfangsbedingung gilt $w'(l/2) = 0$, daraus ergibt sich

$$C = \frac{M * \frac{l}{2}}{E * I} = \frac{M * r * \sin(\varphi)}{E * I} \quad (48)$$

Unter Berücksichtigung der Bedingung $w'(0) = \tan(\varphi)$ erhält man aus Gleichung (48) den E-Modul für einen bestimmten Punkt der Momenten- Randdehnungsbeziehung.

$$E = \frac{M * r_m * \sin \varphi}{I * \tan \varphi} = \frac{12 * M * r_m * \sin \varphi}{b * s_0^3 * I * \tan \varphi} \quad (49)$$

Das Ergebnis dieser Berechnung hat gezeigt, dass der E-Modul nicht mit genügender Genauigkeit bestimmt werden kann und deshalb ist dieser Ansatz nicht geeignet ist für die Bestimmung der Spannung und Dehnung im elastisch-plastischen Übergangsbereich.

6.4.3 Fazit

Die Berechnungen auf Basis der elementaren Biegetheorie haben gezeigt, dass dieser Ansatz zur Berechnung der Biege­fließ­kurve für uns nicht zielführend ist. Das Problem dabei ist, wie schon in Abschnitt 6.4.1 und 6.4.2 kurz erläutert die Bestimmung der Spannung und des Umform­grades für den elastisch- plastischen Übergangsbereich. Es ist nicht zielführend die Werte des Zugversuches (Streckgrenze/ Rp02 Dehngrenze) als Eingangsbedingung zu verwenden. Aus diesem Grund wird auch der Ansatz der elementaren Biegetheorie zur Auswertung der Versuche nicht mehr weiter verfolgt.

6.5 Schlussfolgerung

Die in Kapitel 6.3 und 6.4 durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Biege­fließ­kurvenauswertung nach der elementaren Biegetheorie einige Schwierigkeiten bringt und keine plausiblen Biege­fließ­kurven generiert werden können. Der Grund liegt in der Bestimmung der Fließspannung σ_F und der Randdehnung ϵ_F im Übergangsbereich vom elastischen auf dem plastischen Bereich. Diese Größen sind als Randbedingung notwendig zur Bestimmung der Biege­fließ­kurve.

Der Ansatz nach Nadai greift hingegen nicht auf diese Randbedingungen zurück. Jedoch ist hier eine Ableitung des Momentenverlaufs nach der Randdehnung notwendig, was einige Schwierigkeiten mit sich bringt. Nach Glätten der Messwerte für den Momentenverlauf und anschließende numerische Differentiation können eindeutige, plausible Biege­fließ­kurven generiert werden. Dies ist auch der Grund warum für alle durchgeführten Versuche die Auswertung nach dem Ansatz von Nadai durchgeführt wurde.

7 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

7.1 Versuchsdurchführung und Versuchsmaterial

Nachfolgend werden die wesentlichen Schritte zur erfolgreichen Durchführung eines Versuchs aufgelistet. Eine genaue Betriebsanleitung ist auf Seite 103 ersichtlich

- 1) Prüfstand in die Werkzeugmaschine einspannen, welche für die erforderliche Krafteinbringung sorgt
- 2) Blechprobe einspannen und Messsystem aktivieren
- 3) Signalaufzeichnung starten
- 4) Kraft aufbringen und wieder entlasten
- 5) Signalaufzeichnung stoppen
- 6) Messdaten speichern
- 7) Blechprobe entfernen
- 8) Auswertung der Messdaten und Bestimmung der Biegefließkurve



Abbildung 70: Versuchsaufbau

7.1.1 Versuchsmaterial

Gemeinsam mit dem Auftraggeber wurde ein Blechprobenkatalog definiert der die zu testenden Werkstoffe und die Blechdicken beinhaltet.

- *DC01*: Blechdicken (1 mm, 2 mm, 3 mm)
- *X5CrNi1810*: Blechdicken (1 mm, 2 mm)
- *AlMg3*: Blechdicken (1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm)

DC01:

DC01 bzw. nach alter Bezeichnung St12 ist ein Stahl der in der Blechfertigung für einfache Abkantteile verwendet wird und damit weit verbreitete Anwendung findet. In der Regel wird dieser Werkstoff für Blechdicken bis 3mm hergestellt. [37]

X5CrNi1810:

Dieser austenitische Stahl ist der am häufigsten eingesetzte Stahl im Bereich der rostfreien Stähle. Er bietet sehr vielfältige Verwendungsmöglichkeiten, von der Nahrungsmittelindustrie (aufgrund seiner Beständigkeit gegenüber Wasser, Wasserdampf, Säuren, etc.), über Maschinen- und Apparatebau bis hin zur Pharmaindustrie. Das macht ihn zu einem technologisch sehr wichtigen Material. [36]

AlMg3:

Diese Aluminiumlegierung (Aluminium mit 3% Magnesium) findet aufgrund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit und guten Umformbarkeit breite Verwendung im Maschinen-, Behälter- und Apparatebau sowie in der Chemie- und Verpackungsindustrie.

Um aussagekräftige Erkenntnisse zu erhalten muss beachtet werden, dass die Zugproben, die Biegeproben für den Prüfstand und die Testbleche für den „Realversuch“ vom selben Zuschnitt stammen. Dies ist insofern wichtig da aufgrund der Walzrichtung der Bleche, der Toleranzen in den Blechdicken und den Toleranzen in den Legierungselementen deutliche Streuungen im Kraftverlauf und in weiterer Folge im Fließkurvenverlauf auftreten können. Zur Verdeutlichung der Streuungen sind in Abbildung 71 Kraftverläufe zweier X5CrNi1810 Biegeproben (Blechdicke 2mm, Blechbreite 60mm) aus unterschiedlichem Zuschnitt dargestellt. Allein dieser Einfluss bewirkt eine Streuung von 5% im Kraftverlauf und damit im Endergebnis der Fließkurve.

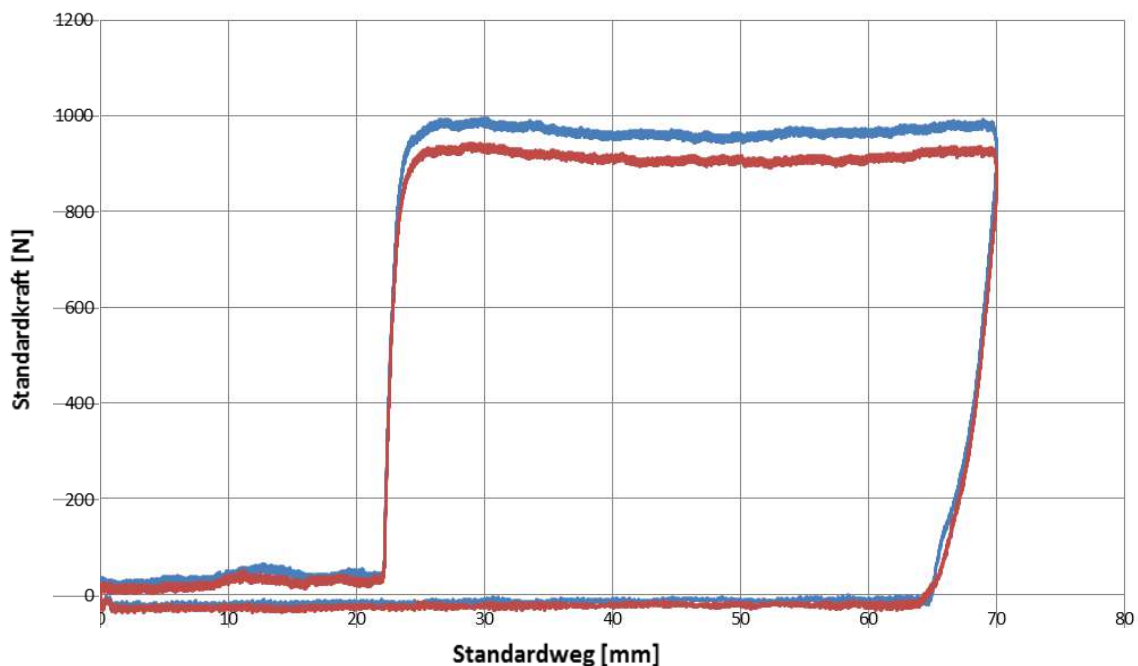


Abbildung 71: Kraftverlauf 2er X5CrNi1810 Biegeproben mit s=2mm und b=60mm

7.2 Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt und analysiert.

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen helfen das weitere Vorgehen im Bereich Fließkurvenermittlung zu planen.

Um die Qualität der vorhandenen Untersuchungen bewerten zu können müssen die Simulationen des Biegevorgangs auf Basis der Zugfließkurve und der ermittelten Biegefließkurve durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Simulationen werden mit den Daten von realen Biegeversuchen an der Werkzeugmaschine hinsichtlich des Biegewinkels, der Verkürzung und der Biegekraft beurteilt.

Der plastische Bereich der Biegefließkurve wird mit Hilfe einer Swift Approximation angenähert. Die Parameter der Approximation werden als Eingangsparemeter für die FE Simulationen verwendet.

Die Fließkurvenapproximation nach Swift sieht folgendermaßen aus.

$$k_f = k_{f0} * (\varphi_c + \varphi_v)^n \quad (50)$$

k_{f0}, φ_c, n ... zu bestimmende Swift-Parameter

k_f Fließspannung

φ_v Vergleichsumformgrad

7.2.1 Ergebnisse der X5CrNi1810 Proben

In dieser Werkstoffgruppe liegen die Ergebnisse folgender Biegeproben vor:

- X5CrNi1810 Probe mit Blechdicke 1mm
- X5CrNi1810 Probe mit Blechdicke 2mm

Blechdicke 1mm (s=1)

In Abbildung 72 ist der Vergleich einer Zugfließkurve mit, aus dem Biegeversuch, aufgenommenen Biegefließkurven dargestellt. Zur Vergleichbarkeit wurden die 1mm dicke Flachzugprobe und die 1mm dicken Blechproben aus derselben Blechcharge zugeschnitten. Die Erwartung, Biegefließkurven zu generieren die deutlich über den Zugfließkurven liegen ist nicht ersichtlich. Um konkrete Aussagen zu treffen sind die FE-Simulationen mit den Swift Parametern der Biegefließkurve durchzuführen. Das Ergebnis ist in Abbildung 73 ersichtlich.

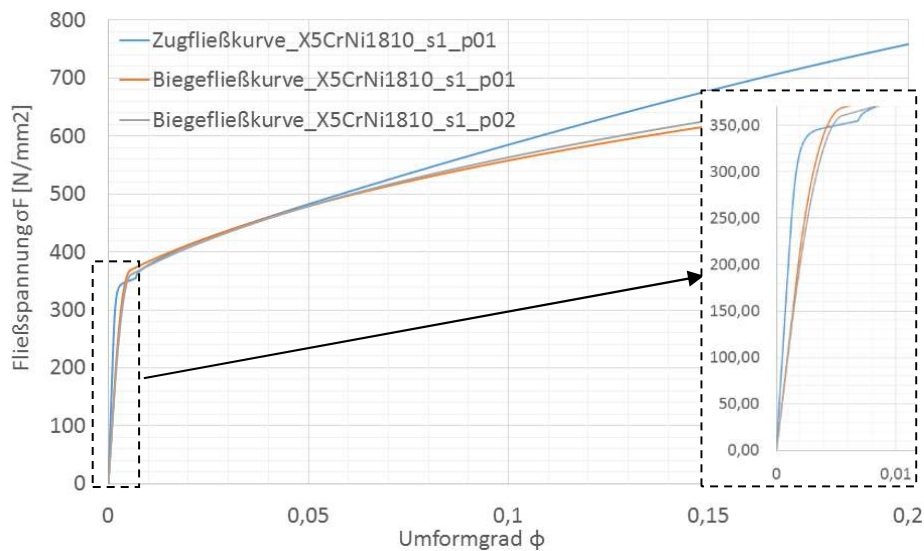


Abbildung 72: Biegefließkurve einer X5CrNi1810 Probe s=1mm b=60mm

Betrachtet man den elastischen Bereich in Abbildung 72 ist ein Unterschied in der Steigung der Geraden ersichtlich, das heißt die E-Module aus dem Zugversuch und Biegeversuch unterscheiden sich deutlich.

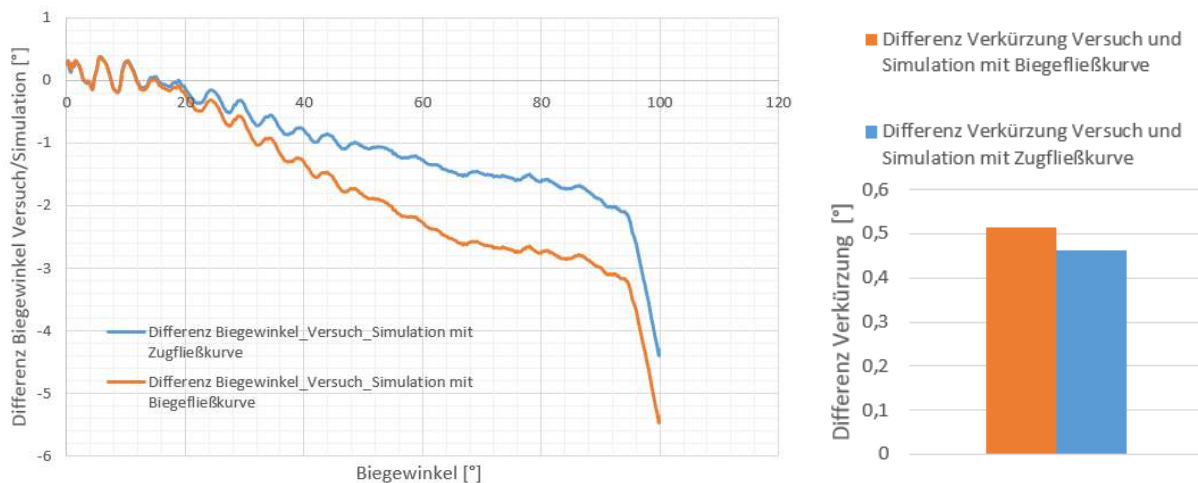


Abbildung 73: Differenz des Biegewinkels (links) und der Verkürzung (rechts) zwischen Versuch und Simulation X5CrNi1810 s=1

In Abbildung 73 links sieht man den Verlauf der Differenz des Biegewinkels zwischen Realversuch und Simulation mit der Biegefließkurve (orange dargestellt) und mit der Zugfließkurve (blau dargestellt). Die Verwendung der Biegefließkurve bringt für diesen Versuch keine Verbesserungen. Das gleiche gilt für die Verkürzung, auch hier kann kein Vorteil aus der Simulation mit der Biegefließkurve generiert werden.

Blechdicke 2mm (s=2)

Ein Vergleich der Biegefließkurven mit der Zugfließkurve ist in Abbildung 74 dargestellt. Bei diesen Proben nehmen die Fließspannungen der Zug- und Biegeproben ähnliche Verläufe an, mit Biegefließkurven die etwas unter der Zugfließkurve liegen. Vergleicht man die $R_{p0,2}$

Dehngrenze der Zug- und Biegeproben erkennt man einen Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich der in einer vergleichbaren Größenordnung liegt.

Wie auch bei der vorigen Probe lassen sich zwischen Zug- und Biegeprobe deutliche Unterschiede im E-Modul feststellen

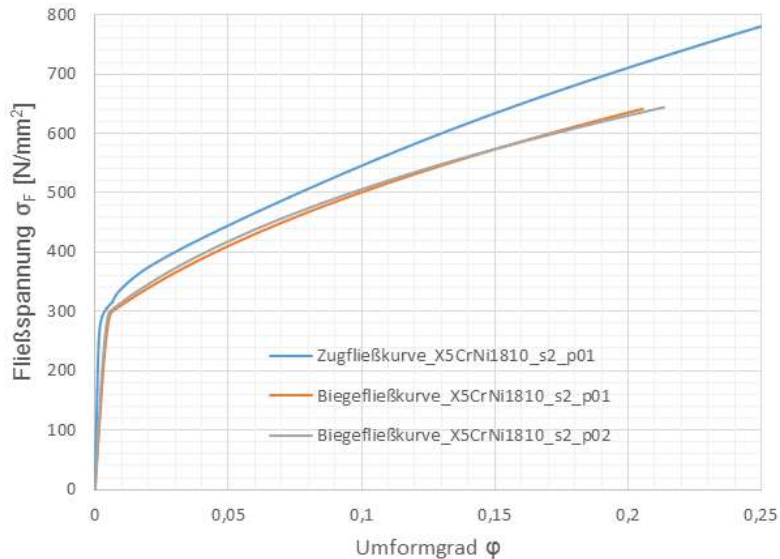


Abbildung 74: Vergleich von Zug- und Biegefließkurve von X5CrNi1810 Proben mit s=2mm

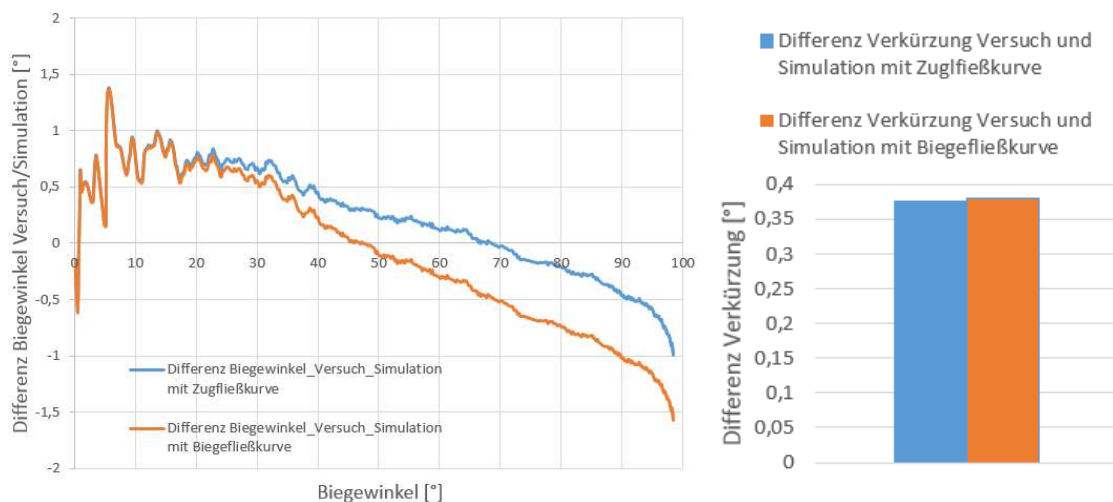


Abbildung 75: Differenz des Biegewinkels (links) und der Verkürzung (rechts) zwischen Versuch und Simulation X5CrNi1810 s=2

Abbildung 75 (links) zeigt die Differenz des Biegewinkels zwischen Versuch und Simulation mit der Biegefließkurve (orange dargestellt) und mit der Zugfließkurve (blau dargestellt). Bis zu Biegewinkeln von ca. 55 ° zeigen sich kleine Verbesserungen in der Simulation. Bei größeren Biegewinkeln hingegen ist die Simulation mittels Zugfließkurve genauer. Auch bei der Verkürzung sind keine Verbesserungen ersichtlich.

Bei diesen austenitischen Stahl tritt somit der gewünschte Effekt, die Simulationsgenauigkeit zu verbessern nicht auf. Zumindest erlangt man bei kleinen Blechdicken (1-2mm) diese Erkenntnis. In den nächsten Schritten muss somit abgeklärt warum keine Verbesserung er-

reicht werden konnte. Um hier konkrete Aussagen treffen zu können muss zusätzlich das Verhalten bei größeren Blechdicken erforscht werden.

7.2.2 Ergebnisse der S235JR bzw. DC01 Proben

In dieser Werkstoffgruppe liegen die Ergebnisse folgender Biegeproben vor:

- DC01 Probe mit Blechdicke 1mm
- DC01 Probe mit Blechdicke 2mm
- DC01 Probe mit Blechdicke 3mm

Blechdicke 1mm (s=1)

Abbildung 76 zeigt den Vergleich der Zugfließkurve eines einachsigen Zugversuchs einer Flachzugprobe mit 1mm Dicke und die Biegefließkurven zweier Biegeproben mit Blechstärke 1mm. Die Fließkurve der Biegeversuche ist deutlich höher als die des Zugversuchs. Welche konkreten Auswirkungen dies auf die Genauigkeit der Simulation hat ist in Abbildung 77 ersichtlich.

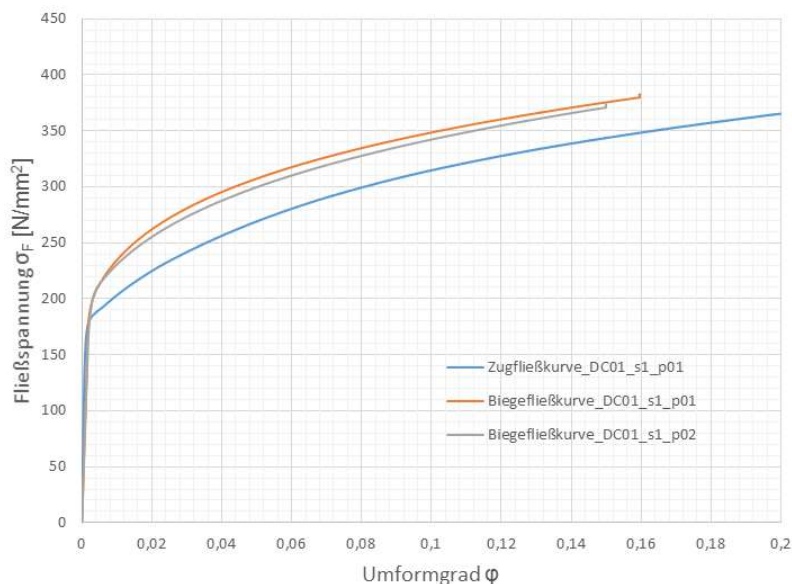


Abbildung 76: Vergleich der Zug- und Biegefließkurven für DC01 s=1 Proben

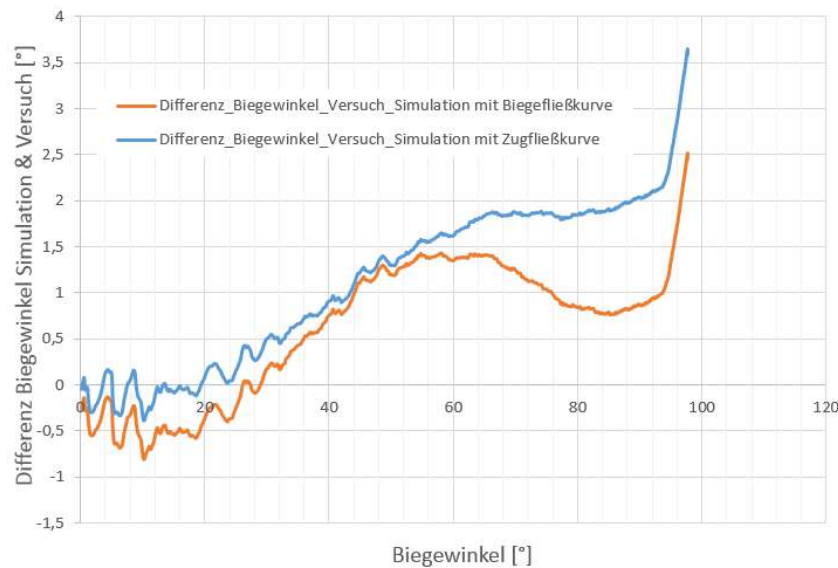


Abbildung 77: Differenz des Biegewinkels zwischen Versuch und Simulation DC s=1

Abbildung 77 zeigt die Differenz des Biegewinkels zwischen den Realversuchen und den Simulationen mit der Biegefließkurve (orange dargestellt) und mit der Zugfließkurve (blau dargestellt). Ab Biegewinkel von 25° zeigen sich durch die Verwendung der Biegefließkurve Vorteile welche bei Winkeln ab ca. 60° sehr deutlich ausfallen. Hier können die Differenzen zwischen Versuch und Simulation um bis zu 50 % verringert werden.

Blechdicke 2mm (s=2)

Abbildung 78 zeigt den Vergleich der Zugfließkurve einer DC01 Flachzugprobe (s=2mm) zu Biegefließkurven von DC01 Blechproben mit Blechstärke 2mm (s=2mm). Die sehr gut reproduzierbaren Biegefließkurven liegen etwas über der Zugfließkurve. Die beiden Kurvenverläufe sind fast ident. Wie bei allen anderen Versuchen auch liegt der aus dem Biegeversuch ermittelte E-Modul unter dem E-Modul aus der Zugfließkurve.

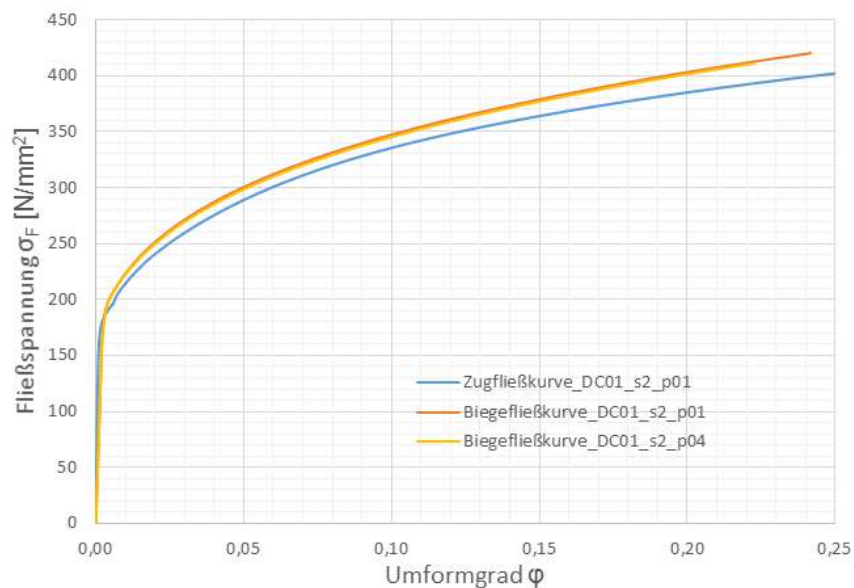


Abbildung 78: Vergleich der Zug- und Biegefließkurven für DC01 s=2

Blechdicke 3mm (s=3)

In Abbildung 79 ist der Vergleich einer Zugfließkurve (blau) und einer gemittelten Biegefließkurve (orange) für DC01 mit Blechstärke 3mm dargestellt. Um einen übersichtlichen Vergleich zwischen Zugfließkurve und Biegefließkurve zu gewährleisten wurde aus den zahlreichen Biegeversuchen eine gemittelte Biegefließkurve dargestellt

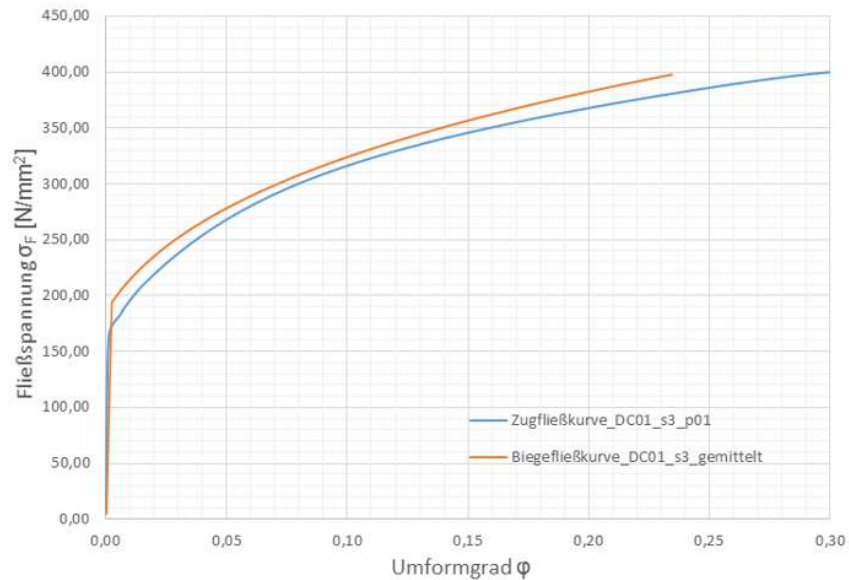


Abbildung 79: Vergleich der Zug- und Biegefließkurven für DC01 s=3

7.2.3 Ergebnisse der AlMg3 Proben

In dieser Werkstoffgruppe liegen die Ergebnisse folgender Biegeproben vor:

- AlMg3 Probe mit Blechdicke 1mm
- AlMg3 Probe mit Blechdicke 2mm
- AlMg3 Probe mit Blechdicke 3mm
- AlMg3 Probe mit Blechdicke 4mm

Anders als bei DC01 und X5CrNi1810, wurden bisher bei den AlMg3 Simulationen die Biegekräfte eher überschätzt. Das bedeutet in diesem Fall als Ziel Biegefließkurven zu generieren, die eher unterhalb der Zugfließkurve liegen.

Zusätzlich ist bei diesen Proben zu erwähnen, dass in den nachfolgenden Diagrammen, bei der Gegenüberstellung zwischen Zug- und Biegefließkurven, teilweise der elastische Anteil bei den Biegeversuchen nicht dargestellt wird. Der Grund dafür ist die glänzende Oberfläche, die es dem optischen Sensor sehr schwierig macht Biegeradien bei kleinen Krümmungen zu ermitteln. Deshalb kann auch teilweise kein plausibler elastischer Bereich erzeugt werden. Der plastische Bereich, kann jedoch genügend genau ermittelt werden, da die Krümmungen in diesem Bereich größer sind.

Blechdicke 1mm (s=1)

Bei 1mm dicken Blechproben ist die Streuung der Biege­fließkurven relativ groß, siehe Ab­bildung 80. Der Grund ist ein geringer Kraftaufwand zur Verformung (liegt bei etwa 150 N) wodurch sich die Streuung der Messwerte und der Drift der Piezosensoren stärker auswirkt. Der Einfluss der Biege­fließkurve auf die Genauigkeit der Simulation ist in Ab­bildung 81 er­sichtlich.

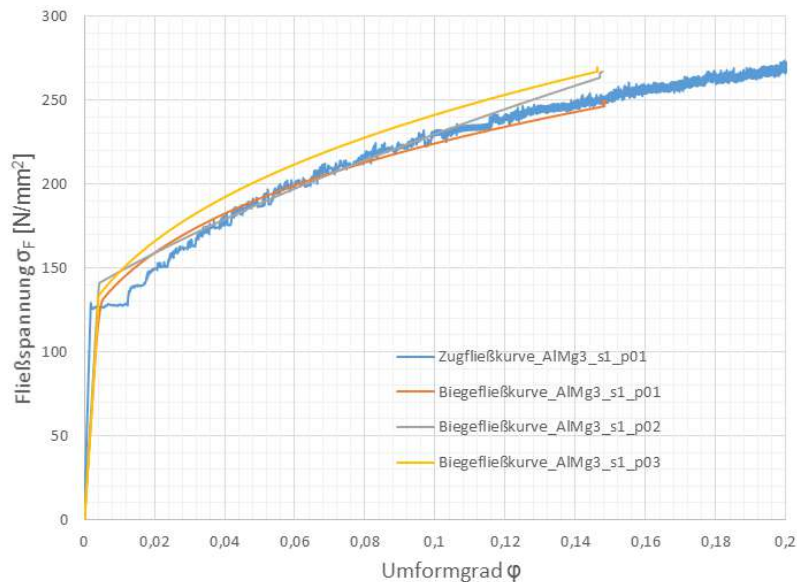


Abbildung 80: Vergleich der Zug­fließkurve und Biege­fließkurven von AlMg3 s=1 Proben

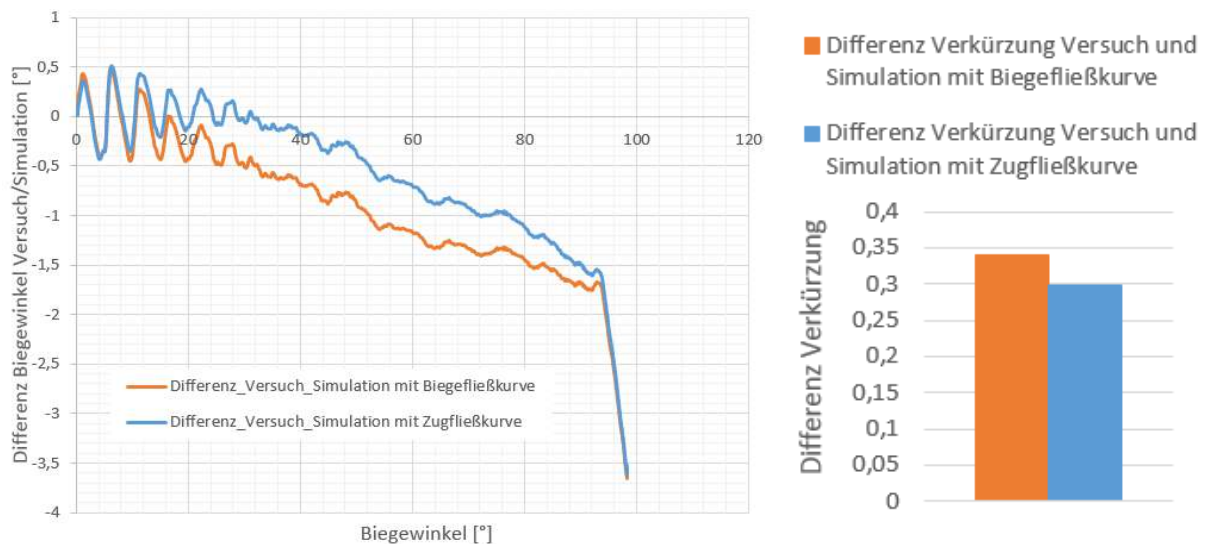


Abbildung 81: Differenz des Biege­winkels (links) und der Verkürzung (rechts) zwischen Versuch und Simulation AlMg3 s=1

Der blau dargestellte Verlauf in Ab­bildung 81 links kennzeichnet die Differenz des Biege­winkels zwischen dem Realversuch und der Simulation mit der Zug­fließkurve als Eingangsparameter. Der orange Verlauf stellt die Differenz des Biege­winkels zwischen Realversuch und Simulation mit der Biege­fließkurve dar. Entgegen den Ergebnissen bei größeren Blechdicken lassen sich bei AlMg3 Proben mit 1mm Dicke keine Vorteile ableiten. Auch die Verkürzung (Ab­bildung 83 rechts) zeigt keine Verbesserungen durch die Simulation mit Biege­fließkurven.

Der Grund dafür liegt in dem großen Streubereich der Biege­fließ­kurven und in der ungenauen Messwertbestimmung. Deshalb können auch aus diesem Versuch nur begrenzt Aussagen getroffen werden. Ab Blechdicken von 2mm können gut reproduzierbare Fließ­kurven erzeugt werden und dadurch auch aussagekräftigere Erkenntnisse gewonnen werden.

Blechdicke 2mm (s=2)

Aufgrund der höheren auftretenden Biege­kräfte sind die Streuungen zwischen den Biege­fließ­kurven deutlich geringer als bei Blechdicken von 1mm, siehe Abbildung 82.

Deutlich zu erkennen ist die relativ große Abweichung zwischen der Zug­fließ­kurve und den generierten Biege­fließ­kurven. Wie sich dieser Einfluss konkret auf die Simulation auswirkt ist in Abbildung 83 zu sehen.

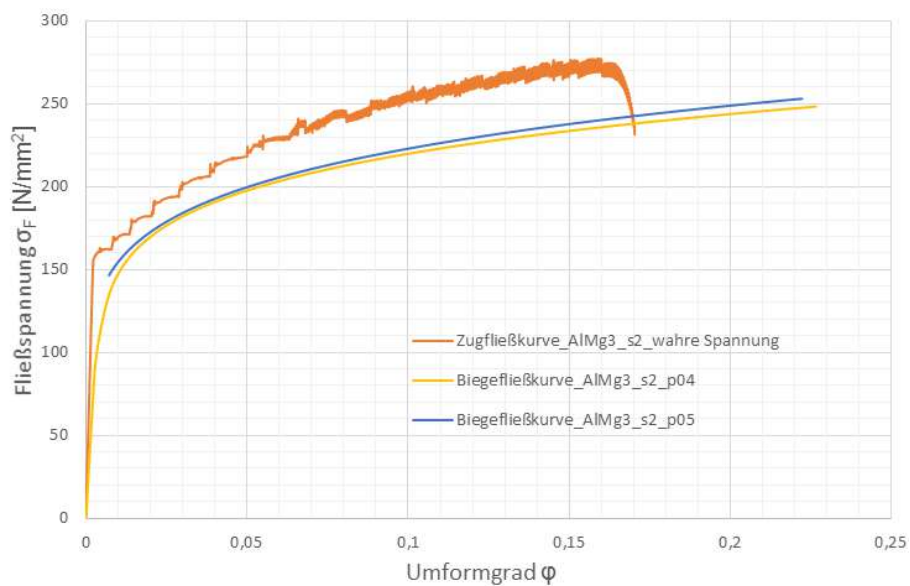


Abbildung 82: Vergleich der Zug­fließ­kurve und Biege­fließ­kurven von AlMg3 s=2mm Proben

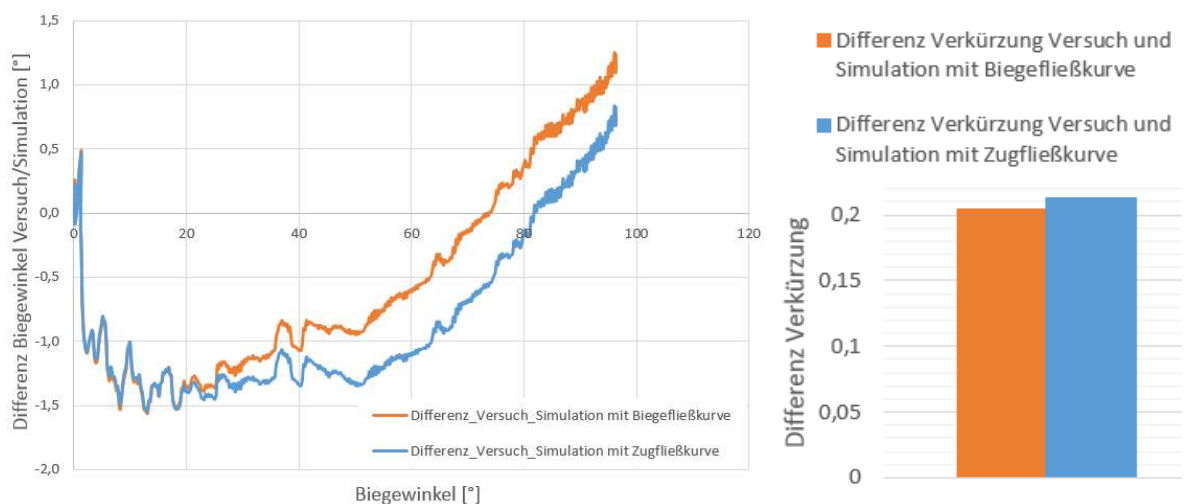


Abbildung 83: Differenz des Biege­winkels und der Verkürzung zwischen Versuch und Simulation AlMg3 S=2 mm

Abbildung 83 links zeigt die Differenz des Biege- winkels zwischen dem Realversuch und der Simulation mit der Biege- fließkurve als Eingangsparameter (orange dargestellt) und der Zug- fließkurve (blau dargestellt). Biege- winkel von 20° bis etwa 75° zeigen durch die Verwendung der Biege- fließkurvenparameter deutliche Verbesserungen in den Abweichungen zwischen Realität und Simulation.

Auch die Verkürzung (Abbildung 83 rechts) zeigt leichte Verbesserungen durch die Simu- lation mit der Biege- fließkurve, da die Differenz der Verkürzungswerte zwischen Versuch und Simulation verringert werden konnten.

Blechdicke 3mm (s=3)

Wie bereits bei Blechdicken von 2mm lassen sich auch für Bleche von 3 mm Biege- fließkurven erzeugen die sehr gut reproduzierbar sind, siehe Abbildung 84. Auch hier liegen die Biege- fließkurven deutlich unter der Zug- fließkurve. Der Einfluss auf die Simulationsgenauigkeit wird hier nicht mehr explizit dargestellt. Er liegt größenordnungs- mäßig bei denen der 2 mm Proben

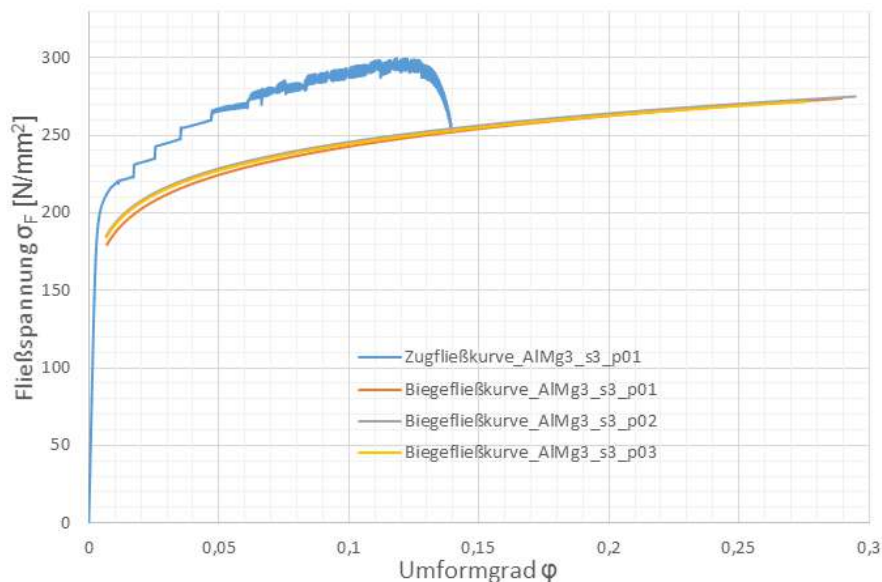


Abbildung 84: Vergleich der Zugfließkurve und Biegefließkurven von AlMg3 s=3 Proben

Blechdicke 4mm (s=4)

Die gut reproduzierbaren Biegefließkurven weichen deutlich von der Zugfließkurve ab.

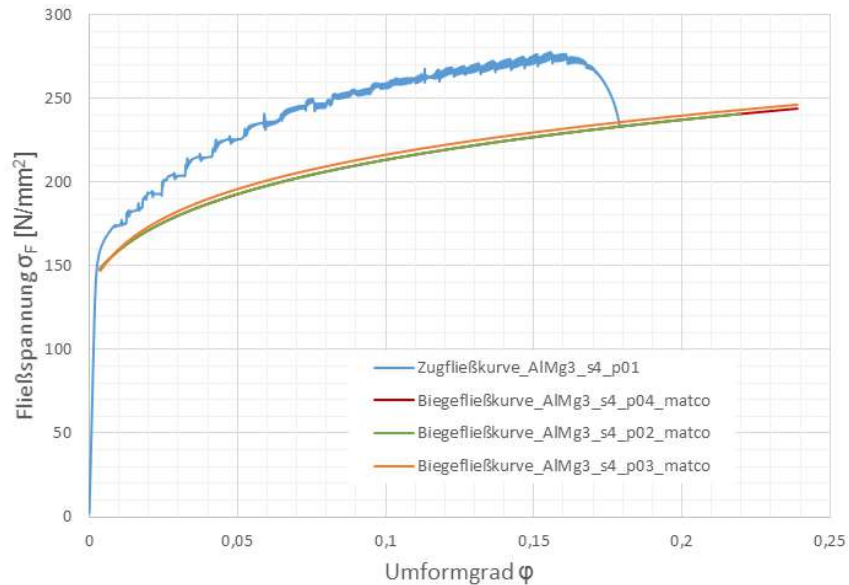


Abbildung 85: Vergleich der Zugfließkurve und Biegefließkurven von AlMg3 s=4 Proben

Aus dem Vergleich der Zug- und Biegefließkurven bei Aluminiumlegierungen geht hervor, dass die erreichbaren Umformgrade aus dem Biegeversuch deutlich höher sind als aus dem Zugversuch. Aufgrund der Sprödigkeit der AlMg3 Legierung sind die erreichbaren Dehnungen/Umformgrade beim Zugversuch gering.

Für spröde Bauteile wird der Werkstoffkennwert Biegefestigkeit σ_{bF} eingeführt, der wie folgt definiert ist. [38]

$$\sigma_{bF} = \frac{M_b}{W_b} \tag{51}$$

Die Biegefestigkeit ist dabei höher als die Zugfestigkeit, was auf die Zug- Druck Anisotropie zurückzuführen ist [38]. Es ergeben sich höhere Biegemomente und dadurch auch höhere Umformgrade.

8 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche haben gezeigt, dass durch die Verwendung der Biegefließkurve als Eingangsparameter für die Simulation Verbesserungen, hinsichtlich des Biegewinkels und der Verkürzung, für DC01 und AlMg3 vorhanden sind. Die Ergebnisse haben aber auch gezeigt, dass es noch Herausforderungen gibt die analysiert und diskutiert werden müssen. Aus den durchgeführten Versuchen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- AlMg3 zeigt die besten Ergebnisse (ausgenommen 1mm Proben). Der Grund dafür wurde in Kapitel 7.2.3 kurz erläutert. Die geringen erreichbaren Umformgrade beim Zugversuch führen zu einer ungenaueren Swift- Fließkurvenapproximation. Durch die höheren Umformgrade des Biegeversuchs können die Swiftparameter der Biegefließkurve genauer bestimmt werden. Des Weiteren ist, wie bereits erwähnt, die Biegefestigkeit bei spröderen Materialien höher als die Zugfestigkeit. Diese Aspekte führen zu genaueren Simulationsergebnissen
- Hochlegierte X5CrNi1810 Stähle zeigen keine Verbesserung durch die Verwendung von Biegefließkurven. Die genauen Gründe sind aus den bisherigen Erkenntnissen nicht ersichtlich und müssen für das weitere Vorgehen noch erforscht werden. Dafür sind weitere Versuche erforderlich, auch mit größeren Blechdicken, um zusätzlich das Verhalten in Abhängigkeit der Blechdicke zu analysieren.

Der Berechnungsansatz von Nadai besitzt eine begrenzte Genauigkeit bzw. Gültigkeit für Werkstoffe mit mikroskopischen oder makroskopischen Eigenspannungen als Folge der Kaltumformung. Der Grund liegt im Bauschinger Effekt [39].

Daraus lässt sich vermuten, dass die auftretenden Eigenspannungen bei dem austenitischen Stahl X5CrNi1810 höher sind als bei S235 und AlMg3 und somit der Rechenansatz von Nadai ungenaue Ergebnisse liefert.

- Die Genauigkeit des elastischen Bereichs, aus dem Biegeversuch, ist aus mehreren Gründen begrenzt. Einerseits führt die Bestimmung des E-Moduls aus dem Biegeversuch, aufgrund der Gesamtsteifigkeit des Prüfstandes, zu einem geringeren E-Modul als im Zugversuch. Der E-Modul müsste direkt am Bauteil ermittelt bzw. gemessen werden um exakte Werte zu generieren. Andererseits spielt die Genauigkeit des optischen Sensors eine Rolle, welcher nicht in der Lage ist die sehr großen Radien bei kleinen Krümmungen genau zu messen. Aus diesen Gründen zeigen sich im E-Modul deutliche Unterschiede zwischen dem Zugversuch und dem Biegeversuch. Durch die Bearbeitung der Blechproben, beispielsweise durch spezielle Sprays, die die Reflexionen der Proben verringern, kann die Genauigkeit des optischen Sensors bei sehr kleinen Biegewinkeln für zukünftige Versuche erhöht werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre, ein neues Messsystem zur Bestimmung des Biegeradius bei sehr kleinen Krümmungen. Beispielsweise könnten über 3 hochpräzise Messtaster die Krümmung/ der Radius der Blechprobe ermittelt werden, unabhängig von der Steifigkeit des Prüfstandes. Zu bedenken ist jedoch, dass dafür eine größere Einspannlänge der Blechprobe notwendig ist, was dazu führt das die erreichbaren Umformgrade sinken.

- Dickere Blechproben zeigen Umformgrade bis etwa 0,25. Bei entsprechender Bearbeitung des Zuschnitts zukünftiger Proben können noch höhere Umformgrade erzielt wer-



den. Der Umformgrad der Blechproben mit 1mm Blechstärke liegt etwas unter 0,2. Der Grund dafür liegt darin, dass die Blechproben den falschen Zuschnitt hatten. Bei zukünftigen Versuchen, mit entsprechender Einspannlänge der Probe, können auch Umformgrade erzielt werden die $\geq 0,2$ sind.

9 Zusammenfassung

Ziel dieses Projekts war es die Simulationsgenauigkeit von Biegevorgängen zu erhöhen und damit eine Vorausberechnung der Materialparameter für den Biegevorgang zu ermöglichen. Das spart den Kunden Zeit und Kosten, vor allem bei kleinen Losgrößen, da die Bauteile bereits bei der ersten Biegung das gewünschte Maß erreichen.

Zur Erhöhung der Genauigkeit müssen neue Eingangsparameter für die Simulation generiert werden. Dies geschieht mit Hilfe von Momenten- Krümmungsverläufen und Biegefließkurven von verschiedensten Materialien und Blechdicken. Zur Ermittlung dieser Materialparameter musste ein Prüfstand entwickelt werden.

Vor der Konstruktion und Entwicklung war es notwendig eine eingängige Literaturrecherche durchzuführen um die Voraussetzungen und Randbedingungen zu erhalten.

Neben dem mechanischen Aufbau des Prüfstandes musste auch die notwendige Messtechnik und Sensorik ausgewählt und entsprechend am Prüfstand integriert werden.

Für die Messdatenaufzeichnung standen die Möglichkeiten mittels LabView oder mittels einer Software von Bernecker und Rainer zur Verfügung. Aufgrund der einfacheren grafischen Programmierung von LabView haben wir uns für diese Art der Auswertung entschieden.

Eine große Herausforderung bei der Messdatenaufzeichnung stellte die Kraftmessung dar. Die anfängliche Positionierung der Kraftsensoren, unterhalb der Grundplatte des fixen Lagerbocks, stellte sich bei der Durchführung der Versuche als ungünstig heraus. Es war nicht möglich reproduzierbare Kraftverläufe zu generieren. Daraufhin wurden die Kraftsensoren neu angeordnet zwischen der Einspannplatte und einer zusätzlichen Platte (siehe Abbildung 28). Danach war es möglich plausible, reproduzierbare Kraftmessungen durchzuführen.

Die Auswertung der Messdaten und Berechnung der Biegefließkurve erfolgt mit Matlab. Sowohl der Ansatz nach Nadai als auch der Ansatz nach der elementaren Biegetheorie wurden implementiert. Wobei sich hier gezeigt hat (wie bereits in Kapitel 6.5 erläutert), dass die Berechnung nach Nadai zielführender ist.

Zur Reproduzierbarkeit der Versuche wurden für jede im Blechprobenkatalog definierte Blechprobe mindestens 3 Tests durchgeführt und die Biegefließkurven ermittelt.

10 Ausblick

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Abweichung zwischen Simulation und Realität aufgrund der verwendeten Biegefließkurven bei bestimmten Werkstoffen verringert werden konnten. Vor allem bei AlMg3 und auch bei DC01 sind bezüglich der Abweichung des Winkels zwischen Versuch und Simulation Verbesserungen ersichtlich. Aufgrund der positiven Ergebnisse kann im weiteren Vorgehen das Blechdickenspektrum noch ausgeweitet werden und die Anzahl der Versuche für die Reproduzierbarkeit erhöht werden. Zusätzlich ist eine höhere Automatisierung des Prüfstandes denkbar. Das bedeutet einerseits die Arbeitsschritte zur Auswertung der Ergebnisse zu verringern und andererseits den Prüfstand so zu konzipieren, dass er ohne zusätzliche Werkzeugmaschine zur Krafteinleitung betrieben werden kann.

Im nächsten Schritt muss jedoch erstmal abgeklärt werden warum bei hochlegierten Stählen, im Speziellen den untersuchten Werkstoff X5CrNi1810, die Qualität der Simulationen nicht verbessert werden konnte.

Da für den Kunden in erster Linie der Biegewinkel und die Verkürzung der Bauteile entscheidend für die Genauigkeit sind, wurden in der vorliegenden Arbeit zuerst die Simulations- und Realversuchsdaten bezüglich Biegewinkel und Verkürzung verglichen. Einen nicht vernachlässigbaren Einfluss zur Gesamtbeurteilung des Rechenansatzes zeigt aber auch der Vergleich der Biegekraft zwischen Simulation und Realversuch. Eine Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich der Biegekraft stellt somit einen wichtigen Aspekt im weiteren Vorgehen des Projekts dar.

Des Weiteren ist es wichtig für zukünftige Versuche eine Messmethode zu finden mit der der E-Modul genügend genau bestimmt werden kann.

Zusätzlich bestünde die Möglichkeit den Berechnungsansatz zu erweitern und Methoden zu finden mit der auch Querkräfte im Biegevorgang berücksichtigt werden können.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozesskraft über Weg (FEM & Versuch).....	1
Abbildung 2: Spannungs- Dehnungsdiagramm einer Flachzugprobe [1].....	3
Abbildung 3: Wandern von Stufenversetzungen [4]	4
Abbildung 4: Mohr Spannungskreise [5].....	6
Abbildung 5: Größen am Biegeteil [6]	6
Abbildung 6: Biegeverkürzung [34]	7
Abbildung 7: Werkstoffmodelle und zugehörige Berechnungsansätze [7].....	8
Abbildung 8: Spannungen im Blech [10]	9
Abbildung 9: Isotropes Verfestigungsverhalten [11].....	10
Abbildung 10: kinematische Verfestigung [12]	11
Abbildung 11: Faserlagen in einer gebogenen Blechprobe [17]	11
Abbildung 12: Verlauf der Fasern über der Randdehnung [18]	12
Abbildung 13: Umformverfahren und empfohlene Prüfverfahren [13]	14
Abbildung 14: Prinzipskizze des Biegeprüfstandes	16
Abbildung 15: Darstellung der Klemmlänge und Klemmbreite	17
Abbildung 16: Klemmkonzept mittels Schraubenverbindung	17
Abbildung 17: Prinzipskizze Klemmkonzept Keilverbindung.....	18
Abbildung 18: Detailansicht Klemmkonzept Keilverbindung.....	19
Abbildung 19: Prinzipskizze Momenteneinleitung über Drehmomentmesswelle.....	21
Abbildung 20: Prinzipskizze zur Momenteneinleitung über Hebel	22
Abbildung 21: Symmetrische Lagerung der Blechprobe	24
Abbildung 22: fliegende Lagerung der Blechprobe.....	25
Abbildung 23: Funktionsprinzip und Aufbau des Biegeprüfstandes	27
Abbildung 24: notwendige Messgrößen	28
Abbildung 25: Anordnung der Piezoelemente	29
Abbildung 26: Kalibrierkurve für die Piezosensoren die unter dem fixen Lagerbock angeordnet sind.....	30
Abbildung 27: Unterschiede im Kraftverlauf bei identen Blechproben	31
Abbildung 28: Kraftmessung unterhalb der Einspannplatte.....	32
Abbildung 29: Kalibrieraufbau der Kraftmessung für Piezosensoren in der Untwerkzeugkonstruktion.....	32
Abbildung 30: Kalibrierung der Kraftsensoren in der Unterwerkzeugkonstruktion	33
Abbildung 31: Unterschied im Kraftverlauf bei identen Blechproben (Kraftmessung unter der Einspannplatte).....	33
Abbildung 32: Darstellung des Sensors und Messprinzip	34
Abbildung 33: Integration des ScanControl im Prüfstand.....	34
Abbildung 34: Radius „fitten“ aus Rohdaten	35
Abbildung 35: Drehgeber zur Winkelerfassung	36

Abbildung 36: horizontale Längenmessung	37
Abbildung 37: Programmoberfläche rt_main	38
Abbildung 38: Programmoberfläche host_main	39
Abbildung 39: Programmoberfläche Laserscanner	40
Abbildung 40: Flussdiagramm zu Ermittlung der Biegefließkurve	41
Abbildung 41: Dehnungs- und Spannungsgrößen an einer Biegeprobe [15]	42
Abbildung 42: Moment aus der Spannung im Inneren des Bauteils	42
Abbildung 43: Spannungs- und Dehnungszustand einer hochkant gebogenen Biegeprobe [16]	44
Abbildung 44: Spannungs- und Dehnungszustand einer Blechprobe [16]	44
Abbildung 45: Werkstoffmodelle [21]	45
Abbildung 46: plastisches Werkstoffmodell mit Verfestigung [22]	46
Abbildung 47: Aufbau des Programmcodes	48
Abbildung 48: Datenpunkte für das Einpassen des Radius	50
Abbildung 49: Bestimmung des Radius der Blechprobe	51
Abbildung 50: Koordinaten des Schwerpunktes bei Klemmkonstruktion mit kurzen Hebeln	52
Abbildung 51: Verlauf der x-Koordinate des Schwerpunkts über dem Drehwinkel/ Biegewinkel (kurze Hebel) .	53
Abbildung 52: Koordinaten des Schwerpunktes bei Klemmkonstruktion mit langen Hebeln	54
Abbildung 53: Verlauf der x-Koordinate des Schwerpunkts über dem Drehwinkel/ Biegewinkel (lange Hebel) .	55
Abbildung 54: Momentenverlauf über der Randdehnung	55
Abbildung 55: Messpunkte des Laserscanners zum Fitten des Radius	56
Abbildung 56: Bestimmung von l_0	57
Abbildung 57: Größen zur Radiusberechnung bei kleinen Biegewinkeln	57
Abbildung 58: Vergleich berechneter Radius mit dem Radius des Laserscanners	59
Abbildung 59: Fehler bei der Radiusbestimmung mittels Messtaster	60
Abbildung 60: Vergleich der Radien berechnet und Laserscanner bei kleinen Einspannlängen	60
Abbildung 61: Extrapolation des Radius	61
Abbildung 62: Momentenverlauf über der Randdehnung	62
Abbildung 63: Beschreibung des Momentenverlaufs durch „gefittete“ Funktionen	63
Abbildung 64: Biegefließkurve bei gefitteten Moment (rechts) und Verlauf der Ableitung nach der Randdehnung (links)	64
Abbildung 65: Kubische Splines [25]	65
Abbildung 66: Momentenverlauf durch Splines	65
Abbildung 67: Verlauf der Ableitung des Momentes nach der Randdehnung und Biegefließkurve bei einem Momentenverlauf durch Splines	66
Abbildung 68: Zentraler Differenzenquotient [24]	66
Abbildung 69: Biegefließkurve nach numerischer Differentiation und gefittete Fließkurve	67
Abbildung 70: Versuchsaufbau	70



Abbildung 71: Kraftverlauf 2er X5CrNi1810 Biegeproben mit $s=2\text{mm}$ und $b=60\text{mm}$	71
Abbildung 72: Biegefließkurve einer X5CrNi1810 Probe $s=1\text{mm}$ $b=60\text{mm}$	73
Abbildung 73: Differenz des Biegewinkels (links) und der Verkürzung (rechts) zwischen Versuch und Simulation X5CrNi1810 $s=1$	73
Abbildung 74: Vergleich von Zug- und Biegefließkurve von X5CrNi1810 Proben mit $s=2\text{mm}$	74
Abbildung 75: Differenz des Biegewinkels (links) und der Verkürzung (rechts) zwischen Versuch und Simulation X5CrNi1810 $s=2$	74
Abbildung 76: Vergleich der Zug- und Biegefließkurven für DC01 $s=1$ Proben.....	75
Abbildung 77: Differenz des Biegewinkels zwischen Versuch und Simulation DC $s=1$	76
Abbildung 78: Vergleich der Zug- und Biegefließkurven für DC01 $s=2$	76
Abbildung 79: Vergleich der Zug- und Biegefließkurven für DC01 $s=3$	77
Abbildung 80: Vergleich der Zugfließkurve und Biegefließkurven von AlMg3 $s=1$ Proben.....	78
Abbildung 81: Differenz des Biegewinkels (links) und der Verkürzung (rechts) zwischen Versuch und Simulation AlMg3 $s=1$	78
Abbildung 82: Vergleich der Zugfließkurve und Biegefließkurven von AlMg3 $s=2\text{mm}$ Proben	79
Abbildung 83: Differenz des Biegewinkels und der Verkürzung zwischen Versuch und Simulation AlMg3 $S=2\text{ mm}$	79
Abbildung 84: Vergleich der Zugfließkurve und Biegefließkurven von AlMg3 $s=3$ Proben.....	80
Abbildung 85: Vergleich der Zugfließkurve und Biegefließkurven von AlMg3 $s=4$ Proben.....	81

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Koordinaten des Schwerpunktes über dem Drehwinkel	53
Tabelle 2: Koordinaten des Schwerpunkts über dem Drehwinkel	54

13 Literatur

- [1] Eckart Doege, *Handbuch der Umformtechnik*, Springer, 2. Auflage, 2010, S.15
- [2] Arndt Birkert, Stefan Haage, Markus Straub, *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile*, Springer Vieweg, 2013, S.122
- [3] *Das Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe*, https://hps.hs-regensburg.de/heh39273/aufsaeetze/o_versetzung.pdf , S.2, 07.01.2017
- [4] *Kristallbaufehler*, https://www.ifw-dresden.de/userfiles/groups/imw_folder/lectures/Physikalische_Werkstoffeigenschaften/c11-kribafe.pdf, 07.01.2017
- [5] Jan Morthorst, *Schubspannungshypothese*, <https://www.ingenieurkurse.de/maschinenelemente-1/berechnungsgrundlagen/hypothesen/schubspannungshypothese.html>, 07.01.2017
- [6] Siegert Klaus, *Blechumformung_Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*, Springer Vieweg, 2015, S.144
- [7] K. Lange, *Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft*, Band 3 Blechbearbeitung, Springer Verlag, 1990
- [8] Ludwik P., *Technologische Studie über Blechbiegen*, Tech. Blätter, 1903
- [9] Prof. Dr. Wandinger, *Festigkeitsypothesen*, http://wandinger.userweb.mwn.de/LA_TMET/v2_3.pdf, 07.01.2017
- [10] Siegert Klaus, *Blechumformung_Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*, Springer Vieweg, 2015, S.145-148
- [11] Said Mouhtamid, *Anwendung direkter Methoden zur industriellen Berechnung von Grenzlasten mechanischer Komponenten*, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Hochschule Aachen, 2007, S.21
- [12] Said Mouhtamid, *Anwendung direkter Methoden zur industriellen Berechnung von Grenzlasten mechanischer Komponenten*, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Hochschule Aachen, 2007, S.22
- [13] Eckart Doege, *Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe*, 1986
- [14] Nadai A., *Theory of flow and fracture of solids*, New York, 1950
- [15] Sami Chatti, *Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen*, Dissertation TU Dortmund, Shaker Verlag, 1997, S.51-52
- [16] A. Brosius, *Werkzeuge der Blechbearbeitung*, Technische Universität Dresden, 2013
- [17] Siegert Klaus, *Blechumformung_Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*, Springer Vieweg, 2015, S.153-154
- [18] Siegert Klaus, *Blechumformung_Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*, Springer Vieweg, 2015, S.155-156
- [19] R. Hill, *The mathematical theory of Plasticity*, Oxford: Clarendon Press, 1983
- [20] Proksa F., *Zur Theorie des plastischen Blechbiegens bei großen Formänderungen*, Dr. Ing. Dissertation, TH Hannover, 1958
- [21] Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth Heinemann, 2002, S.85

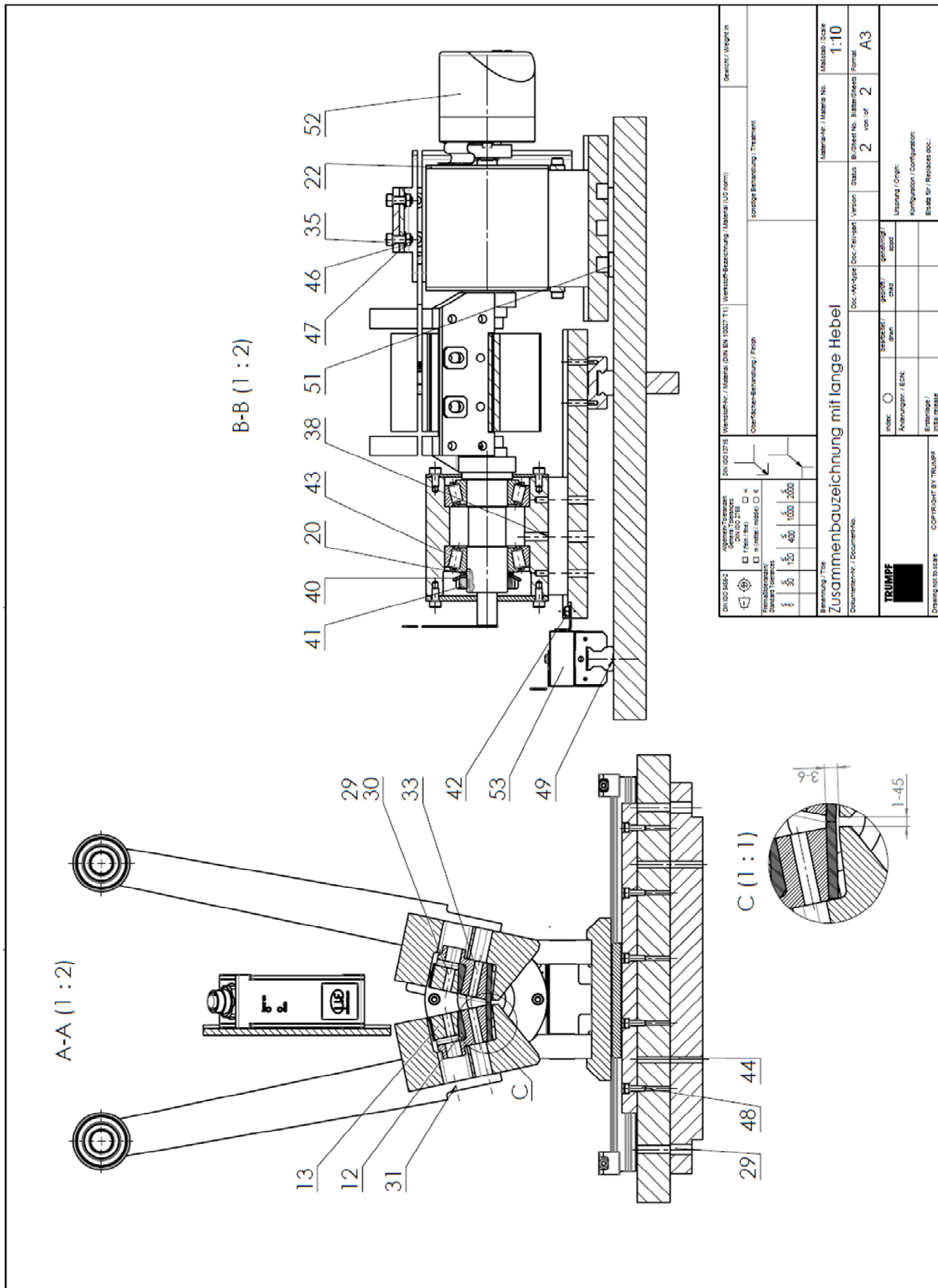
- [22] Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth Heinemann, 2002, S.90-91
- [23] Sami Chatti, *Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen*, Dissertation TU Dortmund, Shaker Verlag, 1997, S.56-57
- [24] *Numerisches Differenzieren*, <http://www.tm-mathe.de/Themen/html/funnumdiff.html>, 07.01.2017
- [25] *Natürliche Splines*, <http://www.tm-mathe.de/Themen/html/funnatsplines.html>, 07.01.2017
- [26] National Instruments, *LabView*, Austin, Texas, USA
- [27] *Bezierkurven*, <http://www.mathepedia.de/Bezierkurven.aspx>, 07.01.2017
- [28] *Das Verformungsverhalten mechanischer Werkstoffe*, https://hps.hs-regensburg.de/heh39273/aufsaeetze/o_versetzung.pdf, S.4, 07.01.2017
- [29] *Festigkeitshypothesen*, http://www.academia.edu/16325089/Ab_festigkeitshypothesen, 07.01.2017
- [30] *Gestaltänderungshypothesen (GEH)*, <http://vergleichsspannung.de/vergleichsspannungen/gestaltanderungshypothese-geh/>, 07.01.2017
- [31] *Modellierung elastoplastischer Materialien mit isotroper und kinematischer Verfestigung*, CES Seminar, Aachen Wintersemester 2012/13
- [32] Bauschinger J: *Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchung*, Mitt. Mech. - Techn.Lab. K. Techn. Hochsch. München 13, 1886
- [33] Trumpf, *Faszination-Blech, Kapitel_06_Biegen, 2010*
- [34] *Biegeverkürzung*, <http://evolutiontec-engineering.de/Biegeverkuerzung%20Wiki.pdf>, 07.01.2017
- [35] Jessica Scholz, *Mohrscher Spannungskreis*, <https://www.ingenieurkurse.de/technische-mechanik-elastostatik/mehrsachsige-spannungszustaende/mohrscher-spannungskreis.html>, 06.01.2017
- [36] *Edelstähle*, <https://de.wikipedia.org/wiki/Edelstahl>, 06.01.2017
- [37] voest alpine, *Kaltgewalztes Stahlband, tlb_KaltgewStb_29032012*, https://www.voestalpine.com/division_stahl/content/.../tlb_KaltgewStb_29032012.pdf, 07.01.2012
- [38] Volker Läßle, *Einführung in die Festigkeitslehre*, 2008
- [39] Kochendörfer A., Hagedorn K. E., Krieger D., *Die Auswertung von Biegeversuchen zur Ermittlung der Zug- Fließkurve aus der Biegefließkurve*, Max- Planck- Institut für Eisenforschung, 1969

14 Anhang A (Zusammenbauzeichnung & Stückliste)

Stückliste des Biegeprüfstand

Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer/ Norm-Kurzbezeichnung	Werkstoff
53	1	Stk	Messlineal	Heidenhain	
52	1	Stk	Inkrementalgeber	lfm ROP520	
51	3	Stk	Piezoelemente	Kistler 9132b	
50	1	Stk.	Optischer Lasersensor	ScanControl 2925	
49	6	Stk.	Schraube M3x16	ISO4762-M3x16-St-12.9	
48	5	Stk.	Schraube M3x10	ISO4762-M3x10-St-12.9	
47	2	Stk.	Mutter	ISO4032-M4-St-10	
46	4	Stk.	Scheibe	ISO7089-4-St	
45	6	Stk.	Schraube M4x10	DIN4762-M4x10-St-12.9	
44	2	Stk.	Zylinderstifte	DIN6325-4x28	
43	4	Stk.	Kegelrollenlager	30205-A	
42	5	Stk.	Schraube Mx6	ISO4762-M3x6-St-12.9	
41	2	Stk.	Mutter	DIN 981-M25x1,5-St	
40	2	Stk.	Sicherungsblech	DIN5406 MB5	
39	20	Stk.	Schraube M4x8	ISO4762-M4x8-St-12.9	
38	2	Stk.	Schraube M6x45	ISO4762-M6x45-St-12.9	
37	4	Stk.	Schraube M6x14	ISO4762-M6x14-St-12.9	
36	4	Stk.	Sicherungsring	DIN471-13x1 Fdst	
35	4	Stk.	Schraube M4x16	ISO4762-M4x16-St-12.9	
34	2	Stk.	Rillenkugellager	62202-2RSR	
33	4	Stk.	Schraube M6x30	ISO4017-M6x30-St-10.9	
32	11	Stk.	Schraube M6x30	ISO4762-M6x30-St-10.9	
31	9	Stk.	Schraube M6x35	ISO4762-M6x35-St-10.9	
30	4	Stk.	Scheibe	ISO7089-6-300 HV-St	
29	6	Stk.	Schraube M6x20	ISO4762-M6x20-St-10.9.	

28	8	Stk.	Schraube M6x25	ISO4017-M6x25-St-10.9.	
27	1	Stk.	Versteifungsblech für Bügel der Sensorhalterung	1602.11	S235JRG2
26	1	Stk.	Anschlagleiste_optischer Sensor	1602.10	S235JRG2
25	1	Stk.	Betätigungshebel_Endschalter	1602.09	S235JRG2
24	2	Stk.	Versteifungsblech_Auflage Lagergehäuse	1602.08	S235JRG2
23	1	Stk.	Lagerdeckel für Berobefestigung	1602.07	S235JRG2
22	1	Stk.	Lagerdeckel für Drehgeberbefestigung	1602.06	S235JRG2
21	2	Stk.	Lagerdeckel_großer Wellendurchmesser	1602.05	S235JRG2
20	2	Stk.	Distanzscheibe_Lagersicherung	1602.04	S235JRG2
19	2	Stk.	Blechplatte für axiale Verschiebung von optischen Sensor	1602.03	S235JRG2
18	1	Stk.	Befestigungsplatte_optischer Sensor	1602.02	S235JRG2
17	1	Stk.	Befestigungsbügel_optischer Sensor	1602.01	S235JRG2
16	1	Stk.	Einspannleiste_B35	1601.16	S235JRG2
15	2	Stk.	Welle zur Verbindung der Hebel	1601.15	E355
14	4	Stk.	Hebel_3-6mm Blechstärke	1601.14	S355JR
13	4	Stk.	Hebel_1-3mm Blechstärke	1601.13	S355JR
12	2	Stk.	feststehender Keil	1601.12	C45 E
11	2	Stk.	beweglicher Keil	1601.11	C45 E
10	2	Stk.	Bügel_3-6mm Blechstärke	1601.10	42CrMo4
9	2	Stk.	Bügel_1-3mm Blechstärke	1601.09	42CrMo4
8	2	Stk.	Auflage Lagergehäuse_fixe Lagerseite	1601.08	S235JRG2
7	2	Stk.	Auflage Lagergehäuse_bewegliche Lagerseite	1601.07	S235JRG2
6	2	Stk.	Lagergehäuse	1601.06	C45 E
5	1	Stk.	Fahrwalze_mit kurzem Wellenende	1601.05	42CrMo4
4	1	Stk.	Fahrwalze	1601.04	42CrMo4
3	1	Stk.	Grundplatte_fix	1601.03	S355J0
2	1	Stk.	Grundplatte_beweglich	1601.02	S355J0
1	1	Stk.	Einspannplatte	1601.01	S355J0
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer/ Norm-Kurzbezeichnung	Werkstoff



15 Anhang B (Datenblätter Messtechnik)

15.1 Kraftsensor 9135B

Kraft



SlimLine Sensoren (SLS)

Messen von dynamischen und quasistatischen Druckkräften, 0 ... 3 kN bis 0 ... 80 kN

Quarzkristall-Kraftsensor mit extrem flacher Bauform, vorgesehen zur Messung dynamischer und quasistatischer Kräfte. Hohes Auflösungsvermögen, hohe Steifheit und extrem kleine Abmessungen charakterisieren diesen Sensor. Durch seine Eigenschaften ist er ideal geeignet zum Einbau in mechanische Strukturen. Das Gehäuse ist hermetisch dicht und hat ein spritzwasserdicht integriertes Anschlusskabel mit Stecker.

Die SlimLine Sensoren werden **unkalibriert** geliefert und müssen für Absolutmessungen im eingebauten Zustand kalibriert werden.

- Extrem kleine Bauform bei grossem Messbereich
- Flexibler Einbau im Kraftnebenschluss
- Vorgespannt auch für Zugkräfte geeignet
- Misst praktisch weglos, verschleiss- und ermüdungsfrei
- Misst auch kleine Kräfte mit hoher Auflösung
- Dichtes Gehäuse (IP65)
- Integriertes, nicht lösbares Kabel mit Viton®-Mantel

Beschreibung

Die zu messende Kraft F wirkt über die Vorspann- bzw. Einbaustruktur auf den Sensor und erzeugt eine der Kraft direkt proportionale Ladung. Diese wird durch eine Elektrode abgenommen und über das integrierte Kabel zum Ladungsverstärker geführt.

Anwendung

SlimLine Sensoren eignen sich, dank ihrer grossen Steifheit, speziell für die Messung von rasch ändernden Kräften. Doch auch zyklische und quasistatische Messungen über mehrere Minuten sind möglich. Der Sensor ist speziell für die Messung von Kräften im Nebenschluss geeignet (Bild 5). Das bedeutet, dass der Sensor in einer Struktur eingebettet und vorgespannt wird, wodurch er nur mit einem Teil der Prozesskraft belastet wird. Die besonders kleine Bauform ist optimal geeignet für den Einbau in Konstruktionen wie Kraftmessplatten, -leisten und Werkzeugen. Eingesetzt wird der Sensor in industriellen Produktionsprozessen, bei denen Kräfte überwacht oder gemessen werden. In Verbindung mit einem ControlMonitor ist der Sensor ideal für die Qualitätskontrolle und Überwachung in der industriellen Serienfertigung geeignet.

Anwendungsbeispiele

- Überwachung von Einpresskräften, Stanzkräften, etc.
- Werkzeugüberwachung
- Messen von grossen Kräften im Kraftnebenschluss
- Einbau in Dynamometer mit kleinen Abmessungen

Typ 9130B... bis 9137B...



Technische Daten

Typ	Messbereich	Oberlast	Empfindlichkeit	Steifheit
	F_z [kN]			
9130B...	0 ... 3	3,5	$\approx -3,5$	$\approx 1,0$
9131B...	0 ... 2,5	3	$\approx -4,0$	$\approx 0,7$
9132B...	0 ... 7	8	$\approx -3,8$	$\approx 1,8$
9133B...	0 ... 14	17	$\approx -3,8$	$\approx 2,5$
9134B...	0 ... 26	30	$\approx -3,8$	$\approx 5,6$
9135B...	0 ... 36	42	$\approx -3,8$	$\approx 7,0$
9136B...	0 ... 62	72	$\approx -3,8$	$\approx 8,0$
9137B...	0 ... 80	96	$\approx -3,8$	$\approx 16,0$

Lineartät (vorgespannt)	%/FSO	$\leq \pm 1,0$
Hysterese (vorgespannt)	%/FSO	$\leq 1,0$
Ansprechschwelle	N	$< 0,01$
Betriebstemperaturbereich	°C	-20 ... 120
Vorspannkraft (empfohlen)	F_v	
Hauptschluss ¹⁾	%/FS	≈ 50
Nebenschluss	%/FS	≈ 20
Schutzart ²⁾	EN60529	IP65

¹⁾ Die Vorspannkraft ist dem gewünschten Zug-/Druckkraftbereich und den Hinweisen auf Seite 3 betreffs Biegemoment entsprechend zu wählen.

²⁾ Die IP-Schutzart nach EN60529 wird mit Wasser ermittelt. Öle, Emulsionen, Kühlschmiermittel etc. haben meist ein besseres Benetzungs- und Penetrationsvermögen. Die Schutzart in Kontakt mit solchen Flüssigkeiten ist entsprechend geringer einzustufen.

SlimLine Sensoren (SLS) – Messen von dynamischen und quasistatischen Druckkräften,
 0 ... 3 kN bis 0 ... 80 kN, Typ 9130B... bis 9137B...

KISTLER
 measure. analyze. innovate.

Abmessungen

Typ	D [mm]	d [mm]	H [mm]	Gewicht (ohne Kabel) m [g]
9130B...	8,0	2,7	3,0	1
9131B... [*]	7,0	–	3,0	1
9132B...	12,0	4,1	3,0	2
9133B...	16,0	6,1	3,5	3
9134B...	20,0	8,1	3,5	5
9135B...	24,0	10,1	3,5	7
9136B...	30,0	12,1	4,0	14
9137B...	36,0	14,1	5,0	27

^{*} Typ 9131B... ohne Bohrung [d]

Sensormontage

SlimLine Sensoren sollen grundsätzlich nur vorgespannt in einer Einbaustruktur verwendet werden, entweder direkt im Kraftfluss eines aufgetrennten Bauteils oder im Kraftnebenschluss, eingebettet in einer Maschinenstruktur. Während bei direkter Kraftmessung der grösste Teil der Prozesskraft durch den Sensor fließt, wird er bei Kraftnebenschlussmessungen nur mit einem geringen Teil der Prozesskraft belastet. SlimLine Sensoren werden unkalibriert geliefert, da sie für Absolutmessungen in jedem Fall vor Ort in der Einbaustruktur kalibriert werden müssen.

Direkte Messung im Kraftfluss

Bei direkter Kraftmessung fließt nahezu die ganze Prozesskraft durch den Sensor. Der Messbereich muss daher so gewählt werden, dass die Summe von Vorspannkraft F_v und maximal auftretender Prozesskraft F_z innerhalb des Messbereichs des Sensors liegt. Die Montageflächen müssen eben, steif und geschliffen sein (Bild 3). Der Vorspannbolzen bewirkt einen Kraftnebenschluss von $\approx 7 \dots 10 \%$ und eine entsprechend reduzierte Empfindlichkeit. Generell wird eine Vorspannkraft von mindestens 20 % des Messbereichs empfohlen, bei Zugkräften entsprechend mehr. Wenn von der Prozesskraft her möglich, soll mit 50 % des Messbereichs vorgespannt werden, da so die Toleranz gegenüber Biegemomenten am grössten ist, siehe Seite 3.



Bild 1: Direkte Kraftmessung

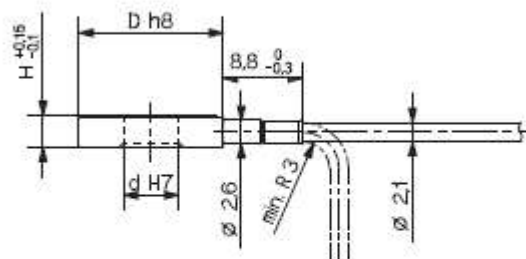


Bild 2: Abmessungen SlimLine Sensor

Einbaumasse

Einbaumasse Typ	Gewinde	Bohrungsdurchmesser d1 [mm]	Plattendicke ¹⁾ A [mm]
9130B...	M2,5	2,9	8,0
9132B...	M4	4,3	8,0
9133B...	M6	6,4	12,0
9134B...	M8	8,4	16,0
9135B...	M10	10,5	20,0
9136B...	M12	13,0	24,0
9137B...	M14	15,0	27,0

¹⁾ empfohlene Mindest-Plattendicke

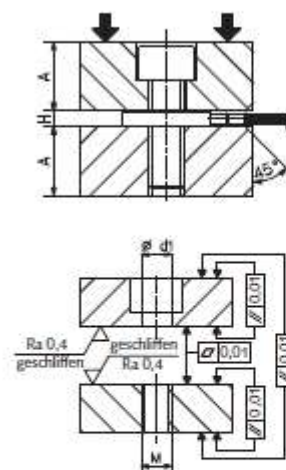


Bild 3: Einbaumasse bei direkter Kraftmessung

Die Informationen entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Kistler behält sich technische Änderungen vor. Die Haftung für Folgeschäden aus der Anwendung von Kistler-Produkten ist ausgeschlossen.

©2009, Kistler Gruppe, Eulachstr. 22, 8408 Winterthur, Schweiz
 Tel +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

15.2 Ladungsverstärker DACU

Merkmale

- Mehrbereichsverstärker für den industriellen Einsatz mit zwei Analogausgängen
- 4 wählbare Bereiche Kanal 1
3 fixe Bereiche von 100'000 pC - 500'000 pC
1 einstellbarer Bereich von 100'000 pC - 500'000 pC
- 4 fixe Bereiche Kanal 2
4 fixe Bereiche von 2'000 pC - 20'000 pC
- Einstellbare Grenzwerte mit Schaltausgängen
- Spitzenwertspeicher und Testfunktion
- Serielle Schnittstelle RS 232



Elektrische Daten

Spannungsversorgung	10...40 VDC
Leistungsaufnahme	< 1,5 W ⁽¹⁾
Messbereich Kanal 1	±100'000...500'000 pC
Messbereich Kanal 2	±2'000...20'000 pC
Ausgangssignal	±10 V
Kennlinienabweichung	< 1% v.E.
Linearität	< 0.02% v.E.
Ausgangsoffset	< ±5 mV
Störspannung	< 5 mVpp (0,1 Hz...100 kHz) ⁽²⁾
Ausgangswiderstand	10 Ω
Reset Operate Sprung	< ±10 mV
Drift	< 0,03 pC/s ⁽³⁾
Frequenzgang (-3 dB)	0...20 kHz ⁽⁴⁾
Steuereingänge	±5 V...±45 V, galv. getrennt
Schaltausgänge	max. 45 V, max. 100 mA, galv. getrennt

⁽¹⁾ < 55 mA bei 24 V

⁽²⁾ < 20mVpp im 2000 pC Bereich

⁽³⁾ DACU für mind. 30 Min. an Betriebsspannung angeschlossen, Ladungseingang offen und abgeschirmt

⁽⁴⁾ @ 2'000 pC...100'000 pC; > 2 kHz @ 500'000 pC

Alle Spezifikationen bei Raumtemperatur (23°C ±2°C)

Mechanische Daten

Anschluss Steuerung	25-Pol D-Sub
Anschluss Sensor	BNC male
Gehäusematerial	Aluminium Druckguss

Umgebungsbedingungen

Betriebstemp.-bereich	-5...+60 °C
Lagertemperaturbereich	-20...+80 °C
Schutzart	IP 40
EMV	EN 61000-6-2 Immunität EN 61000-6-4 Emission

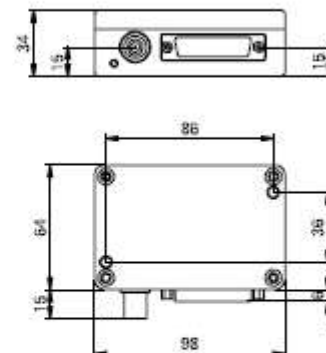
Bestellbezeichnung

DACU 820-2.0-500BS

Lieferumfang

- Montageschrauben 2 Stk. M4 x 16

Abmessungen



DACU 820



Elektrische Anschlüsse D-Sub 25

Pin	Funktion
1	Signal out CH1
2	Peak out
3	Level 1 (In or Out)
4	Level 0 (In or Out)
5	Range B1 (CH2)
6	Range B0 (CH2)
7	Range A1 (CH1)
8	Range A0 (CH1)
9	Supply GND
10	+Supply
11	Code 2
12	Code 0
13	Code Supply +
14	Signal GND
15	Alarm 1 (CH1)
16	Alarm 0 (CH1)
17	RX
18	TX
19	Com Logic Input
20	Operate
21	80% Test
22	Supply GND
23	Signal out CH2
24	Code 1
25	Com Logic Output (Alarm)

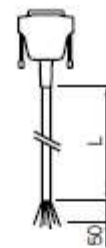
Wahl der Messbereiche

Range CH1		Messbereich
A1	A0	pC/10V
0	0	500'000
0	1	200'000
1	0	100'000
1	1	100'000...500'000

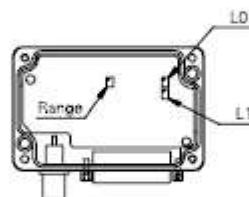
Range CH2		Messbereich
B1	B0	
0	0	20'000
0	1	10'000
1	0	5'000
1	1	2'000

Zubehör

Anschlusskabel mit offenem Ende



Bedienelemente



Range	Einstellung des variablen Bereichs
L0	Einstellung Grenzwert 1. Die Schwellspannung kann mit dem Poti eingestellt und an Pin 4 gemessen werden. Alternativ kann auch eine Spannung eingespeist werden.
L1	Einstellung Grenzwert 2. dito, nur Pin 3

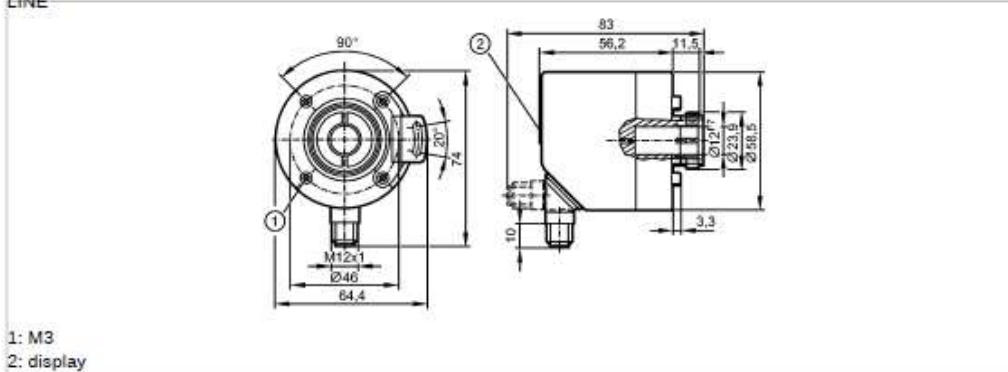
Länge (L)	Bestellbezeichnung
5 m	DZCS 05/DACU 8

15.3 Drehgeber ROP520

efector 400



ROP520
INCREMENTAL ENCODER PERFORMANCE
LINE



1: M3
2: display

CE IO-Link

Product characteristics

Hollow shaft encoder open to one side
HTL, TTL 50 mA
Connector
display
Magnetic detection system
Resolution 1...9999

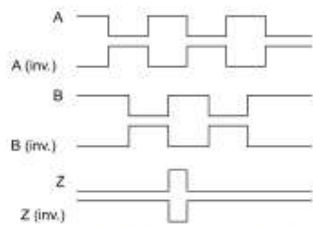
Application

Application	encoder - speed monitor - counter function
-------------	--

Electrical data

Operating voltage [V]	4.5...30 DC
Current consumption [mA]	< 350
Max. permissible rpm / elec. [1/min]	12000
Phase difference A und B [°]	90
Switching frequency [kHz]	1000
Reverse polarity protection	yes
Short-circuit protection	yes
Protection class	III

Pulse diagram



Direction of rotation clockwise (looking at the shaft)

Outputs

Output function	HTL, TTL 50 mA
-----------------	----------------

Measuring / setting range

Encoders	
Resolution	programmable, factory setting 1024

efector 400[®]



Encoders

ROP520

INCREMENTAL ENCODER PERFORMANCE LINE

Speed monitor

Set point, SP	-9994...9999 [1/min]	-166.6...166.7 [Hz]
Reset point, rP	-9999...(SP-5) [1/min]	-166.7...(SP-0.1) [Hz]

Counter

Preset point	1...9999
--------------	----------

Accuracy / deviations

Accuracy	< 0.1°
----------	--------

Software / programming

Programming options	encoder: Resolution, rotational direction, HTL, TTL; Speed monitor; Resolution
---------------------	--

Interfaces

IO-Link Device	
Transfer type	COM 2
IO-Link revision	V1.1
SIO mode	yes
Min. process cycle time [ms]	2.3

Mechanical data

Max. permissible rpm / mech. [1/min]	12000
Starting torque [Ncm]	< 2 (20 °C)
Shaft, material [mm]	hollow shaft open to one side Ø 12, stainless steel
Installation depth/shaft [mm]	27
Max. axial shaft alignment [mm]	0.5
Vibration resistance	30 g
Shock resistance	200 g
Housing materials	flange: aluminium; housing: stainless steel 444/1.4521; connector: stainless steel 316/1.4401; display window: PEI
Weight [kg]	0.475

Environment

Max. relative air humidity [%]	95, Condensation not permissible
Ambient temperature [°C]	-40...85
Storage temperature [°C]	-40...85
Protection	IP 65; IP 67 (housing); IP 64 (shaft)

Tests / approvals

MTTF [Years]	218.3
--------------	-------

Displays / operating elements

Display	4-digit 10-segment display red/green programmable 2 LEDs yellow 6 LEDs green (5 active)
---------	---

Electrical connection

Connection	M12 connector; radial, can also be used axially; 8 pole
Max. cable length [m]	100

Wiring

IO-Link:		preset counter:	
1:	L+	1:	UB
2:	not to be used	2:	IN1
3:	L-	3:	GND



15.4 ScanControl 2900-25

3.2 Technische Daten

Typ	scanCONTROL		
	29xx-25	29xx-50	29xx-100
Messbereich Z-Achse	25 mm	50 mm	100 mm
Messbereichsanfang	53,5 mm	70 mm	190 mm
Messbereichsende	78,5 mm	120 mm	290 mm
Messbereichsanfang, erweitert, ca.	53 mm	65 mm	125 mm
Messbereichsende, erweitert, ca.	79 mm	125 mm	390 mm
Linienlänge MBM (X-Achse)	25 mm	50 mm	100 mm
Linearität ¹	± 0,16 % d.M. (3 σ)		
Auflösung X-Achse	1280 Punkte/Profil		
Profilmfrequenz (abhängig vom Sensortyp)	300 - 2000 Hz		
Lichtquelle Laser	Halbleiterlaser ca. 658 nm, 20 °... 25 ° Öffnungswinkel, Laserklasse 2M: Leistung 8 mW, reduziert 2 mW Halbleiterlaser ca. 658 nm, 20 °... 25 ° Öffnungswinkel, Laserklasse 3B: Leistung 20 mW, reduziert 8 mW		
Schutzgrad (DIN EN 60529)	IP 65		
Betriebstemperatur	0 °C bis +45 °C		
Lagertemperatur	-20 °C bis 70 °C		
Ausgänge/Eingänge	Ethernet, Laser on/off (optional), 1x RS422 programmierbar (halbduplex), 3 Schalteingänge programmierbar HTL/TTL,		
Typ	scanCONTROL		
	29xx-25	29xx-50	29xx-100
Versorgung	11 ... 30 VDC, 500 mA IEEE 802.3af Power over Ethernet, Class 2		

d. M. = des Messbereichs | MBM = Messbereichsmitte

1) MICRO-EPSILON Optronic Standardtarget, Metall matt

3.3 LED-Anzeigen

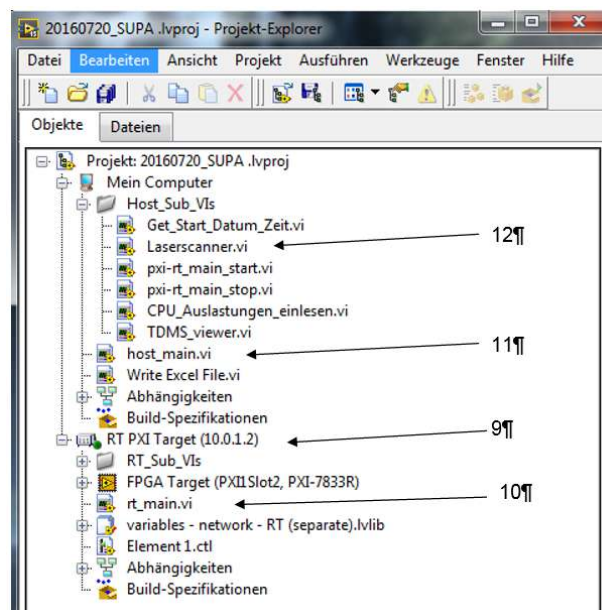
	LED „laser on“	Grün: Laser an
	LED „state“: Zweifarbige LED (rot / grün)	Grün: Messen Grün Blinken: Datenübertragung Rot Blinken: Fehlercode, siehe Kap. 11.

Bemerkung:

Die LED „state“ blinkt grün, lange während einer aktiven Datenübertragung und kurz für Steuerungszugriffe.

16 Anang C (Bedienanleitung)

- 1) Einspannen des Prüfstandes in die Werkzeugmaschine
- 2) Laden des Biegeprogramms auf der Werkzeugmaschine
- 3) Auswahl der gewünschten Blechprobe
- 4) Anbringen der richtigen Hebel am Prüfstand ($s_0 \geq 3\text{mm}$ → lange Hebel)
- 5) Einspannen der Blechprobe
- 6) Richtige Positionierung des Laserscanners je nach Probenart
- 7) Abmessen der Einspannlänge mittels Tiefenlehre (siehe Abschnitt 6.2.2)
- 8) Starten des Programms 20160720_SUPA (C:\Projekte\561ec\SUPA)



- 9) Verbinden mit der PXI Steuerung durch Rechtsklick auf RT PXI Target (10.0.1.2) und verbinden
- 10) Öffnen des Programms rt_main, dies entspricht der ersten Programmoberfläche siehe Abschnitt 4.2.2
- 11) Öffnen des Programms host_main, dies entspricht der zweiten Programmoberfläche siehe Abschnitt 4.2.2
- 12) Öffnen des Sub VIs Laserscanner, welches sich im Ordner Host_Sub_VIs befindet, dies entspricht der dritten Programmoberfläche siehe Abschnitt 4.2.2
- 13) Als erstes wird das Programm rt_main gestartet
- 14) Starten von host_main
- 15) Starten des Programms Laserscanner
 - a. Schnittstelle Ethernet auswählen
 - b. Start transmission drücken
- 16) Kraftsensor- Reset auf der rt_main Oberfläche betätigen. Die Betätigung des Buttons ist notwendig damit LabView Kraftänderungen wahrnehmen kann

- 17) Nullen aller Sensoren auf der Oberfläche host_main
- 18) Kraftsensor- Offset auf der rt_main Oberfläche betätigen, um den Offset am Beginn der Messung auf 0 zu setzen
- 19) Durch Drücken des Buttons „Messwerte aufzeichnen“ auf der Oberfläche host_main beginnt die Datenaufzeichnung
- 20) Durch Betätigung des Fußtasters der Werkzeugmaschine läuft das Biegeprogramm ab. Dabei muss der Taster solange gedrückt bleiben bis der Druckbalken wieder zurück in seine Grundstellung geht.
- 21) Nachdem der Pressbalken wieder in der Grundstellung ist muss durch erneutes Drücken auf den Button „Messwerte aufzeichnen“ die Datenaufzeichnung gestoppt werden
- 22) Die Messdaten wurden unter folgenden Pfad und unter folgendem Namen abgelegt
 - a. Messdaten der Sensoren für Kraft, Weg, Winkel in C:\Projekte\561ec\SUPA unter dem Namen Sensoren.tdms
 - b. Messdaten des Laserscanners im Ordner I:\Messdaten_Lasersanner
- 23) Anlegen eines gewünschten Ordners in dem die Messdaten gespeichert werden sollen (z.B. S235JR_2s0_60wo_21l02_kurz_p001)
 - a. Erstellen eines Unterordners ScanControl in den alle Messdaten des Laserscanners kopiert werden
 - b. Sensordaten.tdms müssen direkt in den Hauptordner (S235JR_....) kopiert werden
- 24) Entfernen der Blechprobe

Beginn der Auswertung:

- 25) Starten des Programms Biegefließkurve_Nadai in Matlab (dabei ist zu beachten, dass das richtige Working directory ausgewählt wurde)
- 26) Es erscheint ein Fenster in dem der Ordner des gewünschten Versuchs ausgewählt werden muss

Falls der jeweilige Versuch schon mal ausgeführt wurde, sind die ausgewerteten Messdaten „Messdaten.mat“ und „Sensoren.mat“ bereits im Versuchsordner vorhanden und müssen nicht wieder zeitaufwendig berechnet werden.

- 27) Nachdem die „.mat“ Dateien geladen oder erstellt wurden erscheint im Command Window von matlab eine Aufforderung die Blechdicke einzugeben.

- 28) Im Command Window erscheint die Aufforderung: „Geben Sie an welche Hebel für den Versuch verwendet wurden (kurz oder lang)“

Je nachdem welche Art der Hebel verwendet werden, wird „kurz“ oder „lang“ geschrieben und mit Return bestätigt

- 29) Nach Berechnung aller für die Biegefließkurve notwendigen Größen erscheint ein Fenster in dem der Speicherort und der Name für die Fließkurve angegeben werden. Die Biegefließkurve wird als .pdf und als .jpg Datei gespeichert.
- 30) Am Ende des Versuchs werden im ausgewählten Versuchsordner automatisch noch zusätzlich verschiedene files gespeichert
- „Daten_Biegefließkurve.xlsx“ file in dem die Werte der Randdehnung, des Moments, des Umformgrads und der Fließspannung gespeichert sind
 - „Sensordaten.xlsx“ file in dem alle Messgrößen gespeichert sind (horizontaler und vertikaler Weg, Drehwinkel, Kraft, Radius der Blechprobe und Mittelpunkt des Blechbogens)
 - „Messprotokoll.txt“ file zur Übersicht der wichtigsten Eingangsgrößen des Versuchs (Einspannlänge, Blechbreite, Blechdicke, etc.)