



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Osman Güler

Entwurf, Aufbau und Erprobung einer Biegevorrichtung

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Osman Güler
Entwurf, Aufbau und Erprobung einer
Biegevorrichtung

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Eckart Nast
Zweitprüfer/in: Prof. Alexander Piskun

Abgabedatum: 12.10.2020

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Osman Güler

Thema der Bachelorthesis

Entwurf, Aufbau und Erprobung einer Biegevorrichtung

Stichworte

Technische Mechanik, Biegeversuch, Biegevorrichtung, Dreipunktbiegung, Vierpunktbiegung, Entwurf, WP 300

Kurzzusammenfassung

Zweck - Aufgabe dieser Arbeit ist eine neue Vierpunktbiegevorrichtung für das Mechaniklabor zu erstellen. Dazu entsteht ein technischer Entwurf, der hergestellt und aufgebaut wird. Die Erprobung erfolgt durch eine Vergleichsprüfung mit einer Dreipunktbiegevorrichtung. Verglichen wird das Elastizitätsmodul von Stahl, Messing und Aluminium.

Methodik - Die Konstruktion erfolgt mit dem CAD-System Catia V5, woraus ein Modell entsteht, welches hergestellt und erprobt wird. Die erforderlichen Parameter zum Entwurf werden anhand des vorhandenen Prüfstandes WP 300 (G.U.N.T. Hamburg) recherchiert.

Ergebnisse - Die Ergebnisse aus dem Vergleichsprüfung ergeben, dass die Vierpunktbiege-Vorrichtung gleich gute Ergebnisse wie die der Dreipunktbiege-Vorrichtung gezeigt hat.

Bedeutung für die Praxis - Für die Lehre im Mechaniklabor könnte die Vierpunktbiege-Vorrichtung für Vergleichsprüfungen verwendet werden.

Name of Student

Osman Güler

Title of the paper

Design, construction and testing of a bending device

Keywords

Technical mechanics, bending test, bending device, three-point bending, Four-point bending, design, WP 300

Abstract

Purpose – The task of this work is to create a new four-point bending device for the mechanics laboratory. For this purpose, a technical design is created, which is manufactured and assembled. The test is done by comparative test with a three-point bending device. The modulus of elasticity of steel, brass and aluminium is compared.

Method – The construction is carried out with the CAD system Catia V5, from which a model which is produced and tested. The necessary parameters for the design are researched using the existing test bench WP 300 (G.U.N.T. Hamburg)

Results – The results of the comparative test show that the four-point bending device produces just as good results as the three-point bending device.

Practical significance – The four-point bending device could be used for comparative tests within classes and teaching in the mechanics laboratory



FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
DEPARTMENT FAHRZEUGTECHNIK UND FLUGZEUGBAU
Professor Dr.-Ing. Eckart NAST

Aufgabenstellung Abschlussarbeit

Name: Osman Güler

Thema: **Entwurf, Aufbau und Erprobung einer Biegevorrichtung**

1. Einführung

Mit Unterstützung der Ditze-Stiftung, des Förderkreises Wagenbauschule sowie des Zukunftsprogramms der Fakultät TI wurden zur Verbesserung der Lehre im Bereich der Technischen Mechanik mehrere Versuchsaufbauten und mechanische Modelle im Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau konzipiert und beschafft.

Diverse Prüfstände wurden bereits aufgebaut und messtechnisch analysiert. Durch die Nutzung im Lehrbetrieb wird zunehmend deutlich, welche Veränderungen oder Ergänzungen von Versuchsaufbauten für die Lehre hilfreich wären.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll für das Mechanik-Labor des Departments Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau ein Prüfstand zur Vierpunktbiegung entworfen, aufgebaut und erprobt werden. Die Ergebnisse der Vierpunktbiegung sind mit den Daten einer vorhandenen Dreipunktbiegung zu vergleichen und entsprechend zu bewerten. Dazu ist die Erstinbetriebnahme einer neuen Prüfmaschine erforderlich.

2. Aufgabenstellung in Arbeitsschritten (als Anlage sollten Terminplan und Erläuterungen zu den Arbeitsschritten beigefügt werden).

- Einarbeitung in die Thematik und Literaturrecherche
- Einarbeitung in die Bedienung und Erstinbetriebnahme der Prüfmaschine
- Erarbeitung eines Konzeptes zur Vierpunktbiegung
- Aufbau und Erprobung der Vierpunktbiegung
- Vergleichende Messungen zur Drei- und Vierpunktbiegung
- Dokumentation zur Vierpunktbiegung und Erstellung einer Versuchsanleitung

Inhalt

	Seite
Verzeichnis der Abbildungen.....	7
Verzeichnis der Tabelle	9
Verzeichnis der Diagramme	9
Liste der Abkürzungen.....	10
Verzeichnis der Begriffe und Definitionen.....	10
1 Einleitung.....	11
1.1 Motivation.....	11
1.2 Begriffsdefinition.....	12
1.3 Ziel der Arbeit	13
1.4 Literaturübersicht.....	13
1.5 Aufbau der Arbeit	13
2 Theoretische Grundlagen.....	15
2.1 Mechanische Grundlagen	15
2.1.1 Schnittgrößen und innere Kräfte in der Statik.....	15
2.1.2 Berechnung der innere Kräfte und Spannungen	16
2.1.3 Biegemoment	16
2.1.4 Biegespannung.....	17
2.1.5 Elastizitätsmodul.....	19
2.1.6 Maschinnennachgiebigkeit	20
2.2 Prüfarten	22
2.2.1 Zweipunktbiegung.....	22
2.2.2 Dreipunktbiegung.....	22
2.2.3 Vierpunktbiegung.....	23
2.2.4 Vergleich: Dreipunktbiegung vs. Vierpunktbiegung.....	24
3 Prüfstand	26
3.1 Werkstoffprüfgerät G.U.N.T. WP 300	26
3.2 Grundaufbau.....	27
3.3 Software.....	28
3.4 Proben	32
3.4.1 Stahl	32
3.4.2 Messing	33
3.4.3 Aluminium	33
3.5 Aufbau Dreipunktbiegung.....	34

3.6	Aufbau Vierpunktbiegung	35
3.6.1	Konstruktion und Zusammenbau	35
3.6.2	Das CAD-Modell	38
3.6.3	Material und Normteile	39
4	Versuchsdurchführung	40
4.1	Versuchsvorbereitung	40
4.2	Versuchsdurchführung	42
4.3	Auswertung	42
4.4	Einflussfaktoren	46
5	Zusammenfassung und Ausblick	48
	Literaturverzeichnis	49
	Anhang A Messergebnisse	51

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1	Schnittgrößen mit Schnittufern (aus Gross 2013 , Kap. 7)	15
Abb. 2	Biegeverformung (aus Spura 2019a , Kap. 1)	16
Abb. 3	Normalspannungen infolge reiner Biegung (aus Spura 2019a , Kap. 2).....	17
Abb. 4	Spannungs-Dehnungs-Diagramm Stahl (aus MBW 2020)	19
Abb. 5	Durchbiegung 4PB mit Abständen (in Anlehnung an PSM 2020a)	20
Abb. 6	Zweipunktbiegung mit Papierprobe (aus Zwick/Roell 2020b)	22
Abb. 7	Beispiel einer Dreipunktbiegung (aus Schütz 2020).....	23
Abb. 8	Beispiel einer Vierpunktbiegung (aus Zwick/Roell 2020c).....	23
Abb. 9	Verfahren zur Vierpunktbiegung (aus DIN EN ISO 14125)	24
Abb. 10	Momenten- und Querkraftverlauf bei der Dreipunktbiegung (in Anlehnung an PSM 2020b)	24
Abb. 11	Momenten- und Querkraftverlauf bei der Vierpunktbiegung (in Anlehnung an PSM 2020b)	25
Abb. 12	Auslieferungszustand des WP 300, ohne Anbau (aus Gunt 2020)	26
Abb. 13	Gesamtansicht des WP 300 (eigene Darstellung)	27
Abb. 14	Auswahl des Biegeversuchs (Screenshot aus der Software WP3X0)	28
Abb. 15	Hauptfenster (Screenshot aus der Software WP3X0).....	29
Abb. 16	Teilabschnitt der Menüleiste (Screenshot aus der Software WP3X0).....	29
Abb. 17	Neue Messreihe (Screenshot aus der Software WP3X0)	30
Abb. 18	Einstellungen für den Biegeversuch (Screenshot aus der Software WP3X0). 31	
Abb. 19	Proben aus Aluminium, Messing und Stahl (eigene Darstellung).....	32
Abb. 20	Aufbau der Dreipunktbiegung des WP 300 (aus Gunt 2020).....	34
Abb. 21	I-Profil-Träger mit beiden Auflager und Sechskantmutter (eigene Darstellung)	34
Abb. 22	Aufbau der 3PB-Vorrichtung mit einer Stahlprobe (eigene Darstellung).....	35
Abb. 23	Konstruierte Schiene mit Zylinderschraube (eigene Darstellung).....	36

Abb. 24	Konstruierten Schlitten mit Druckpunkt (eigene Darstellung).....	36
Abb. 25	Zeichnung unterschiedlicher Positionen der Druckpunkte (eigene Darstellung)	37
Abb. 26	Seitenansicht der Schlitten, mit verschobenen Druckpunkten (eigene Darstellung)	37
Abb. 27	Teilnachbildung des WP 300 mit der konstruierten 4PB-Vorrichtung (eigene Darstellung)	38
Abb. 28	CAD-Konstruktion der Vierpunktbiegevorrichtung (eigene Darstellung).....	39
Abb. 29	Eingespannter Wegaufnehmer (eigene Darstellung).....	40
Abb. 30	Einfluss auf die Durchbiegung durch elastisch verformte Bauteile, in Rot (aus Gunt 2020)	46
Abb. 31	Spalt zwischen Probe und 3PB-Stempel (eigene Darstellung).....	46
Abb. 32	Unsymmetrische Bohrung der Auflagerbasis, Ansicht v. unten (eigene Darstellung)	46

Verzeichnis der Tabelle

Tab. 1	Elastizitätsmodule der Proben aus der Literatur (eigene Darstellung)	32
Tab. 2	Max. Prüfkraft für die Aluminiumprobe (eigene Darstellung).....	41
Tab. 3	Max. Prüfkraft für die Messingprobeprobe (eigene Darstellung)	41
Tab. 4	Max. Prüfkraft für die Stahlprobe (eigene Darstellung).....	41
Tab. 5	Ergebnisse der korrigierten Elastizitätsmodule (eigene Darstellung)	43

Verzeichnis der Diagramme

Dia. 1	Vergleich 3PB vs. 4PB - Aluminium (eigene Darstellung).....	43
Dia. 2	Vergleich 3PB vs. 4PB - Messing (eigene Darstellung)	44
Dia. 3	Vergleich 3PB vs. 4PB - Stahl (eigene Darstellung).....	45

Liste der Abkürzungen

DIN	Deutsches Institut für Normung
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
ISO	Internationale Organisation für Normung
KDD	Kraft-Durchbiegungs-Diagramm
PDF	Portable Document Format
SDD	Spannungs-Dehnungs-Diagramm
WP	Werkstoff Prüfgerät
2PB	Zweipunktbiegung
3PB	Dreipunktbiegung
4PB	Vierpunktbiegung

Verzeichnis der Begriffe und Definitionen

CAD	Computer-aided design
CATIA	Computer aided three-dimensional interactive application
TARA	Anzeige auf null stellen

1 Einleitung

1.1 Motivation

Lehren bedeutet Wissen zu vermitteln, dies kann auf viele verschiedenen Arten verrichtet werden. Die HAW Hamburg hat es sich zum Ziel gemacht „Nachhaltige Lösungen für die gesellschaftliche Herausforderungen von Gegenwart und Zukunft zu entwickeln“. Dazu wurde über die Jahre immer mehr auf praxisorientiertes Lehren gesetzt. Es sind viele Labore entstanden, um das technisch erlernte Wissen auch im praktischen Arbeiten zu vermitteln.

Das Mechaniklabor ist eines dieser über die Zeit entstandenen Labore. Hier werden mechanische Grundgesetze anhand von vielen verschiedenen Prüfständen praxisorientiert dargestellt. Es können Versuche durchgeführt werden, die es den Studierenden ermöglichen sollen, Erlerntes besser zu verstehen und Zusammenhänge im alltäglichen Leben zu begreifen. So kann die täglich überquerte Brücke mechanisch verstanden werden.

Die ständige Weiterentwicklung der Labore ist eine Grundvoraussetzung für weiteres Wachstum und besseres Verständnis. Dabei geht es nicht nur um Neuanschaffungen von Geräten, sondern auch Weiterentwicklung von Vorhandenen. So kann durch innovatives Handeln weiteres Wachstum entstehen, wodurch neues Wissen vermittelt werden kann.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde eine Vierpunktbiegevorrichtung (4PB) entwickelt, welches den Studierenden ermöglicht Materialparameter anhand einer Prüfvorrichtungen zu untersuchen, vergleichen und besser zu verstehen.

Das eigenständige sowie teamorientiertes Arbeiten im Labor eröffnet den Studierenden eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten sich einen Einblick in die Industrie zu verschaffen. Die Erkenntnisse, die aus einem Biegeversuch gewonnen werden, sind wesentliche und grundlegende Basiswerte für viele Berechnungen in der Herstellung von neuen Verbundwerkstoffen und Leichtmetallen in der Fahrzeug- und Flugzugerstellung.

1.2 Begriffsdefinition

Der Titel der Bachelorarbeit lautet „Entwurf, Aufbau und Erprobung einer Biegevorrichtung“. Im Folgenden wird jedes, der im Titel enthaltenen Begriffe, definiert.

Entwurf

Bei einem Entwurf handelt es sich um etwas, was in seinen Grundzügen entwickelt wird. Man versteht darunter im Allgemeinen:

„ein Modell für ein Projekt oder schriftliche Aufzeichnung, die ggf. noch Änderungen erfahren könnte“ (**Wortbedeutung 2020a**)

Aufbau

Nach dem Onlinewörterbuch **Duden 2020a** wird der Aufbau wie folgt definiert:

„[vorübergehend] aufstellen, errichten; (Aus Einzelteilen) zusammensetzen und aufrichten“

Für diese Arbeit bedeutet „Aufbau“, dass ein neuer Druckstempel für das Werkstoffprüfgerät hergestellt wird.

Erprobung

Nach dem Onlinewörterbuch **Wortbedeutung 2020b** wird die Erprobung wie folgt definiert:

„Test, welcher bestätigen soll, ob etwas tatsächlich so funktioniert, wie es funktionieren“ soll

Durch Kombination des Begriffs mit Biegevorrichtung wird eine Methode beschrieben, die eine Konstruktion auf seine Ausführung überprüft. Der Druckstempel wird auf seine Anwendung zum Biegen eines Balkens überprüft.

Biegevorrichtung

Nach dem Onlinewörterbuch **Duden 2020b** wird der Aufbau wie folgt definiert:

„Vorrichtung zum Biegen bestimmter Werkstücke“

Ein technisches Verfahren zur Überprüfung oder Herstellung von Werkstücken.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen neuen Prüfstand zur Vierpunktbiegung (4PB) für die Lehre aufzubauen. Dieser Prüfstand soll den Studierenden die Möglichkeit geben, in Zukunft verschiedene Materialparameter besser zu verstehen. Es sollen Zusammenhänge zwischen der Belastung eines Biegebalkens und dessen elastischer Verformung demonstriert werden.

Zudem soll überprüft werden, wie zuverlässig die Ergebnisse der Vierpunktbiegung mit der Dreipunktbiegung (3PB) übereinstimmen. Hierzu werden verschiedene Messungen am Prüfstand vorgenommen und verglichen. Für die Berechnung der Messergebnisse, werden Formeln nach **Gunt 2020**, verschiedenen Normen, Onlinequellen und der Literatur entnommen.

1.4 Literaturübersicht

Die wichtigste Quelle sind die Unterlagen der Firma **Gunt 2020**. Diese beschreiben eine detaillierte und ordnungsgemäße Nutzung des Prüfstandes WP 300. Alle wichtigen Informationen zum Aufbau und Benutzung des Prüfstandes wurden aus diesen Unterlagen entnommen. In den Unterlagen werden zudem die Formeln für den elastischen Biegeversuch hergeleitet, unter Verwendung der 3PB.

Um theoretische Grundlagen zu erhalten, wurden die Bücher **Gross 2013** und **Gross 2014** genutzt. Die Autoren D.Gross, W.Hauger, J.Schröder und W.A.Wall haben an verschiedenen Universitäten in Deutschland einen Lehrstuhl und haben weitere Publikationen in Fachzeitschriften. Die Bücher sind über die Jahre stetig aktualisiert worden und sind in der 12./13. Auflage.

Für das Konzept und den Aufbau der 4PB wurden verschiedene DIN-Normen genutzt. Aus diesen Normen konnten zuverlässige Daten gewonnen werden.

1.5 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit wird in die folgenden Abschnitte unterteilt:

- | | |
|--------------------|--|
| Abschnitt 1 | beinhaltet Grundlagen zur Bachelorarbeit |
| Abschnitt 2 | beschreibt die theoretischen Grundlagen des Biegeversuches. Zusätzlich werden die verschiedenen Prüfarten näher beschrieben. |
| Abschnitt 3 | stellt das Werkstoffprüfgerät WP 300 vor. Es wird der Grundaufbau und die Funktionsweise näher erläutert. Des Weiteren wird die Benutzung der Software und dessen Einstellungen aufgeführt. Auch die neu entstandene Biegevorrichtung zur Vierpunktbiegung wird detailliert dargestellt. |

Abschnitt 4 befasst sich mit der Versuchsdurchführung. Hierbei werden beide Verfahren an verschiedenen Werkstoffen erprobt. Die Ergebnisse werden ausgewertet und dokumentiert. Nach der Auswertung erfolgt die Diskussion der Ergebnisse.

Abschnitt 5 fasst die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammen

Anhang A beinhaltet die Ergebnisse der Messungen

2 Theoretische Grundlagen

„Das Werkstoffprüfgerät WP 300 ist zur Einführung in die zerstörende Werkstoffprüfung vorgesehen“ [Gunt 2020, Kap.1 S.1]. Genauer gesagt wurde ein elastischer Biegeversuch angewandt, um den Zusammenhang zwischen den Belastungen eines Biegebalkes und dessen elastischer Verformung zu demonstrieren. Dafür wurden bekannte Formeln und Kennwerte aus den Fächern Technische Mechanik und Werkstoffkunde genutzt. Das Grundwissen aus der Technischen Mechanik wird in dieser Arbeit nicht vollständig wiederholt werden und wird vorausgesetzt. Bei Bedarf empfehlen sich die Bücher von Gross (Gross 2013, Gross 2014) und Spura (Spura 2019a, Spura 2019b).

2.1 Mechanische Grundlagen

2.1.1 Schnittgrößen und innere Kräfte in der Statik

Wenn auf einen Körper äußere Belastungen wirken, verursachen diese Kräfte im Körper, sog. innere Kräfte. Diese inneren Kräfte sind ein Maß für die Materialbeanspruchung im Körper. Um die inneren Kräfte darstellen und berechnen zu können, schneidet man den Körper gedanklich, um die Bindungen freilegen zu können. Die daraus entstehenden Schnittgrößen auf der Querschnittfläche sind die *Normalkraft* N , die *Querkraft* Q und das *Biegemoment* M . Wegen dem Wechselwirkungsgesetz sind die Schnittgrößen an beiden Teilen jeweils entgegengesetzt gerichtet. Um die jeweiligen Schnittgrößen zu bestimmen, werden zuerst die Lagerreaktionen aus den Gleichgewichtsbedingungen für den gesamten Körper ermittelt. Danach folgen über weitere Schnitte neue Gleichgewichtsbedingungen. Die Ergebnisse der Rechnung werden in Diagrammen (Schnittkraftlinien) dargestellt. (Gross 2013, Kap. 7)

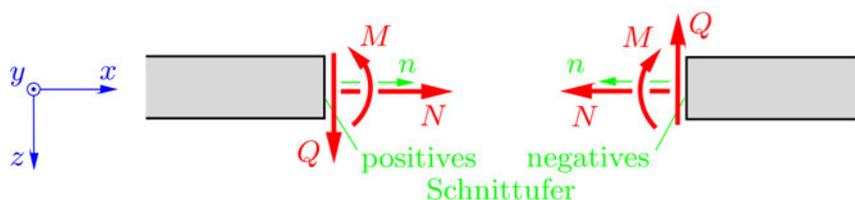


Abb. 1 Schnittgrößen mit Schnittufern (aus Gross 2013, Kap. 7)

2.1.2 Berechnung der inneren Kräfte und Spannungen

Die auf einer konstanten Querschnittsfläche $A_{(x)}$ verteilten inneren Kräfte sind Flächenkräfte und werden Spannungen σ genannt. Ihre Dimension ist Kraft pro Fläche und wird meistens in der Einheit N/mm² oder Pascal genannt. Wobei 1MPa = 1N/mm² entspricht.

Wenn diese Spannung σ senkrecht zur Schnittfläche steht, wird diese als Normalspannung $\sigma_{(x)}$ bezeichnet. Sie wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_{(x)} = \frac{N_{(x)}}{A_{(x)}} \quad (1)$$

Wobei $\sigma_{(x)}$ die konstante Normalspannung in x-Richtung, $N_{(x)}$ die Normalkraft und $A_{(x)}$ die Querschnittsfläche ist.

Wenn die Richtung der Krafteinwirkung parallel zur Schnittfläche ist, nennt man diese Querkraft. Die daraus resultierende Spannung wird Schubspannung τ genannt und wie folgt berechnet.

$$\tau_{(z)} = \frac{Q_{(z)}}{A_{(z)}} \quad (2)$$

2.1.3 Biegemoment

Eine Biegung tritt immer dann auf, wenn im Inneren eines Bauteils ein Biegemoment M wirkt. Eine Biegung kann in zwei Fälle unterschieden werden, als *gerade* (einachsige) oder *schiefe* (zweiachsige) Biegung. Im Allgemeinen entsteht ein Biegemoment, wenn äußere Kräfte oder äußere Momente auf das Bauteil wirken.

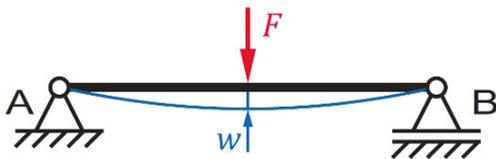


Abb. 2 Biegeverformung (aus Spura 2019a, Kap. 1)

Die Abb. 2 zeigt den Fall einer 3PB, in dem der Kraftangriffspunkt in der Mitte des Bauteils wirkt. Das dort anliegende Biegemoment M_{bmax} wird wie folgt bestimmt:

$$M_{bmax} = \frac{F \times L}{4} \quad (3)$$

Wobei M_{bmax} in Newton Millimeter [Nmm], die Kraft F in Newton [N] und L in Millimeter [mm] angegeben wird.

Der Werkstoff wird auf der Krümmungaußenseite gestreckt und auf der Krümmunginnenseite gestaucht. Dabei erfährt die Werkstoffaußenseite eine Zug- und die Innenseite eine Druckspannung. Die Spannungswerte sind aufgrund der maximalen Stauchung bzw. Dehnung in den randfasern der Probe am größten und nehmen jeweils nach Innen hin ab (s. Abb. 3). Daraus ergibt sich ein linearer Spannungsverlauf (Spura 2019a, Kap 2)

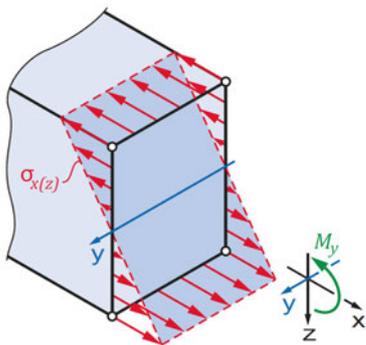


Abb. 3 Normalspannungen infolge reiner Biegung (aus Spura 2019a, Kap. 2)

Im Übergang von Zug- zu Druckspannung bleibt der Werkstoff unbeanspruch, dies ist die *neutrale Faser* oder *Nulllinie*. Sie verläuft durch den geometrischen Schwerpunkt des Werkstoffs.

2.1.4 Biegespannung

Die Zug- und Druckspannungen nehmen von der neutralen Faser bis in den Randbereich zu und sind dort am größten. Die Biegespannung ist eine Normalspannung, da sie in Balkenlängsrichtung wirkt. (Spura 2019b, Kap. 2)

Die Biegespannung setzt sich aus dem Zusammenhang zwischen dem wirkenden Biegemoment M_b und dem Abstand z zur *neutralen Faser* zusammen. Dabei wird die Geometrie über das Flächenträgheitsmoment I bestimmt.

$$\sigma = \frac{M_b}{I} \times z \quad (4)$$

Das axiale Flächenträgheitsmoment I ist ein Flächenmoment zweiter Ordnung, sie sind reine geometrische Größen und wie folgt definiert: (Gross 2014, Kap.4)

$$I_y = \int z^2 dA, \quad I_z = \int y^2 dA, \quad (5)$$

$$I_{yz} = I_{zy} = - \int yz dA, \quad (6)$$

$$I_p = \int r^2 dA = \int (z^2 + y^2) dA = I_y + I_z \quad (7)$$

I_y bzw. I_z nennt man das Axiale Flächenträgheitsmoment bzgl. der y - bzw. der z -Achse. I_{yz} ist das Deviationsmoment und I_p das polare Flächenträgheitsmoment. Sie haben die Dimension Länge⁴ und werden oft in der Einheit mm⁴ angegeben.

In dieser Versuchsreihe hat die Probe ein Rechteckquerschnitt und wird wie folgt berechnet:

$$I = \frac{B \times H^3}{12} \quad (8)$$

Die Spannung, die im Randbereich mit dem größten Abstand z_{max} auftritt, ist die dem Betrag nach die größte Spannung.

Dazu wurde das Widerstandsmoment W eingeführt. Das Widerstandsmoment für Rechteckquerschnitte wird wie folgt berechnet:

$$W = \frac{B \times H^2}{6} \quad (9)$$

mit der Einheit Kubikmillimeter [mm³].

Das Widerstandsmoment ist ein Maß dafür, welchen Widerstand ein belasteter Balken der Entstehung von innerer Spannung entgegensetzt. Somit kann die größte Biegespannung ermittelt werden:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{bmax}}{W_b} \quad (10)$$

Mit der Einheit Newton pro Quadratmillimeter N/mm² oder Pascal genannt. Wobei 1MPa = 1N/mm² entspricht.

Die maximale Durchbiegung f wird mit der Formel: (**Gross 2014**, Kap.4, Tab. 4.3)

$$f = \frac{F \times L^3}{48 \times E \times I} \quad (11)$$

berechnet.

Mit der Einheit Millimeter [mm].

Die Berechnung der maximal zulässigen Belastung F_{max} , in Kilonewton, erfolgt nach:

$$F_{max} = \frac{2 \times \sigma_{max} \times B \times H^2}{3 \times L} \quad (12)$$

2.1.5 Elastizitätsmodul

Fast jeder Werkstoff ist innerhalb einer bestimmten Grenze elastisch. Das *Elastizitätsmodul*, auch E-Modul genannt, gibt Auskunft über die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegenüber einer Verformung im elastischen Bereich. Das elastische Verhalten von Werkstoffen wird durch das Hook'sche Gesetz beschrieben, in dem das Elastizitätsmodul eine Konstante ist.

Um ein besseres Verständnis über das E-Modul und das Hook'sche Gesetz zu bekommen, ist es anhand des Zugversuches leichter zu verdeutlichen. Bei dem Zugversuch wird an einer Probe gezogen und die benötigte Kraft pro Querschnittsfläche gegen die Verlängerung aufgetragen. Die Kraft, die einer Verformung entgegengesetzt wird, ist abhängig von der Geometrie der Probe. Aus dem Zugversuch erhält man das Spannungs-Dehnungs-Diagramm (SDD). Man erkennt verschiedene Bereiche im SDD. Als Beispiel wurde in Abb. 4 das SDD von Stahl gewählt.

Die Verformung beginnt mit dem linear-elastischen Bereich auch Proportionalitätsbereich oder Hook'sche Gerade genannt. Dies ist der Bereich, in welchem die Dehnung der Spannung proportional ist und somit das Hook'sche Gesetz gilt. Welches besagt, dass die Dehnung linear von der wirkenden Kraft abhängig ist. Die lineare Steigung der Geraden ist das Elastizitätsmodul. Der zweite Bereich wird Lüdersdehnung genannt. Es ist der Bereich zwischen Einsetzen der plastischen Verformung und der Kaltverfestigung. In diesem Bereich bleibt die Spannung näherungsweise konstant, nur die Dehnung nimmt zu. Die Probe wird plastisch verformt und fängt sich einzuschnüren, bis sie bricht.

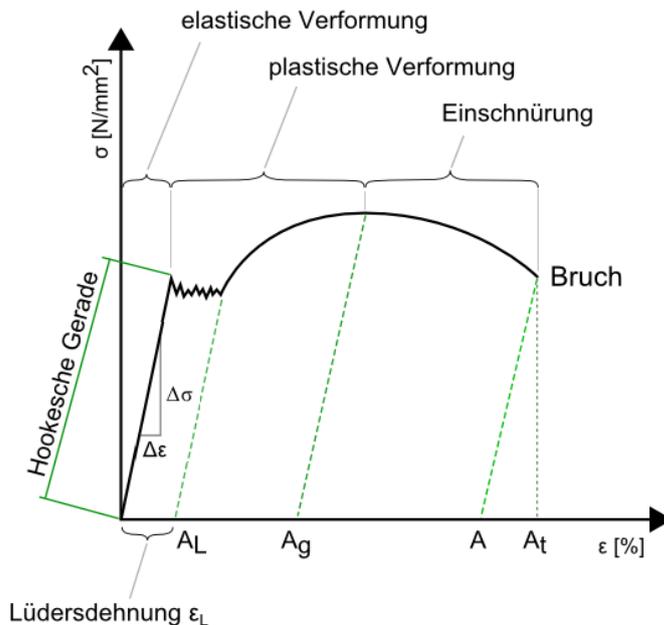


Abb. 4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm Stahl (aus MBW 2020)

Das *Elastizitätsmodul* E ist also, das Verhältnis der Längenänderung zu einer bestimmten Belastung. Je größer das *Elastizitätsmodul* ist, desto kleiner ist die Dehnung. Die Einheit des

Elastizitätsmodul ist die Spannung und wird in Newton pro Quadratmillimeter angegeben. N/mm^2 Durch Umstellen und Kombination der obigen Formeln (11 u. 8) lässt sich das *Elastizitätsmodul* wie folgt berechnen:

$$E = \frac{F \times L^3}{4 \times f \times B \times H^3} \quad (13)$$

Dieses *Elastizitätsmodul* gilt für Untersuchungen mit der 3PB-Vorrichtung. Die Berechnung der 4PB-Vorrichtung wird über die Formel (**PSM 2020**)

$$E = \frac{F \times L_A}{f \times B \times H^3} \times (3 \times L_F) + (2 \times L_A) \quad (14)$$

bestimmt.

Wobei L_A die Länge zwischen den beiden Druckpunkten in mm ist und L_F der Abstand zwischen Auflager und Druckpunkt (s. Abb. 5).

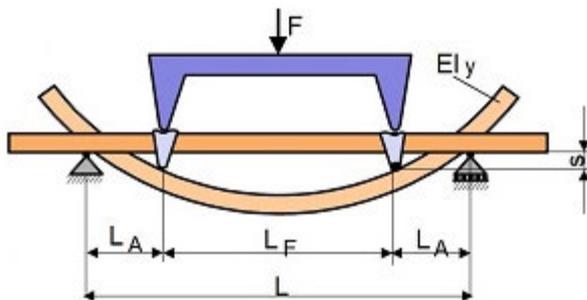


Abb. 5 Durchbiegung 4PB mit Abständen (in Anlehnung an **PSM 2020a**)

2.1.6 Maschienenachgiebigkeit

Das Werkstoffprüfgerät WP 300 ist ein speziell für den technischen Unterricht konzipiertes Gerät. Es wurde präzise und stabil hergestellt. Dennoch ist es nicht mit einem bedeutend schwerer gebauten industriellen Werkstoffprüfgerät vergleichbar. Um diesen Nachteil auszugleichen wurde der Maschienenachgiebigkeits-Faktor K_B in die Berechnungen hinzugefügt. Dazu wird in Abschnitt 4.5 nochmal genauer eingegangen. (**Gunt 2020**)

Die Maschienenachgiebigkeit K_B wird mit der Formel

$$K_B = \frac{f_e}{\Delta F} \quad (15)$$

berechnet.

Mit der Einheit Millimeter pro Kilonewton, $\frac{mm}{kN}$

Wobei f_e die Durchbiegung in mm und ΔF die Kraftspanne in kN ist.

Die Durchbiegung f_e und die Kraftspanne ΔF werden aus einem Biegeversuch mit einer sehr biegesteifen Probe entnommen. Von den drei vorhandenen Proben besitzt die Stahlprobe die größte Biegesteifigkeit. Dazu muss der Biegeversuch wiederholt werden, mit dem Unterschied, dass die Probe hochkant (senkrecht) auf den Auflagern liegt. Die Steifigkeit ist in etwa 11,1 mal so hoch wie die der flach positionierten Probe. Die berechneten Maschienennachgiebigkeit K_B kann zur Korrektur sämtlicher Messwerte der Durchbiegung beim Biegeversuch verwendet werden (**Gunt 2020**).

Die aus der hochkant gemessenen Durchbiegung f_{up} setzt sich zusammen aus der elastischen Verformung f_e der Bauteile und der elastischen Durchbiegung f_{calc} der Probe:

$$f_{up} = f_e + f_{calc} \quad (16)$$

Die elastische Durchbiegung f_{calc} wird wie Formel (11) berechnet.

Durch das Umstellen der Formel (16) kann die elastische Verformung f_e berechnet werden:

$$f_e = f_{up} - f_{calc} \quad (17)$$

Eingesetzt in die Formel (15), bekommt man die Maschienennachgiebigkeit K_B .

Mit dieser wird eine korrigierte Durchbiegung f_{cor} und ein korrigiertes Elastizitätsmodul E_{cor} berechnet.

Die korrigierte Durchbiegung f_{cor} wird mit der Formel

$$f_{cor} = f - F \times K_B \quad (18)$$

berechnet.

Eingesetzt in die Formel

$$E_{cor} = \frac{F \times L^3}{4 \times f_{cor} \times B \times H^3} \quad (19)$$

bekommt man das korrigierte Elastizitätsmodul E_{cor} .

2.2 Prüfarten

Der Biegeversuch ist Teil der zerstörenden Werkstoffprüfung. Dabei wird je nach Art der Probenlagerung und Anzahl der Lasten zwischen den verschiedenen Arten des Biegeversuchs unterschieden.

2.2.1 Zweipunktbiegung

Bei der Zweipunktbiegung (2PB) wird die Prüfprobe an einem Ende festeingespannt und auf der freiliegenden Seite mit dem Prüfstempel belastet. Die Anordnung findet sich in verschiedenen Normen, wie z.B. ISO 2493-1 oder DIN 53121. Dieses Verfahren wird oft in der Verpackungsindustrie eingesetzt.

Damit Verarbeitungsvorgänge in Verpackungs- und Konfektioniermaschinen zuverlässig und ohne Störung ablaufen, muss das Papier oder die Pappe in bestimmten Grenzen flexibel sein (Zwick/Roell 2020a). Die dafür benötigten Materialkennwerte werden aus dem 2PB-Versuch gewonnen.

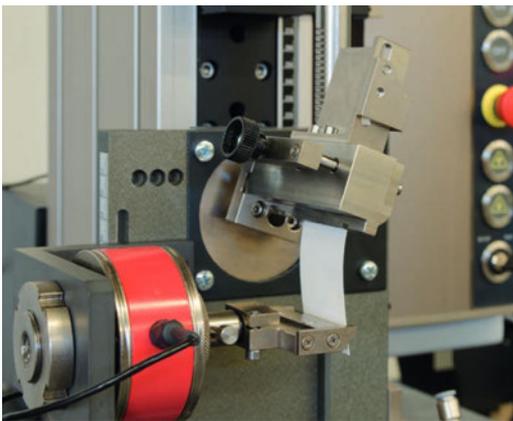


Abb. 6 Zweipunktbiegung mit Papierprobe (aus Zwick/Roell 2020b)

2.2.2 Dreipunktbiegung

Bei der 3PB wird die Prüfprobe auf zwei Auflagern positioniert und durch einen Prüfstempel belastet. Die Dreipunktbiegeanordnung ist nach verschiedenen DIN, ISO und ASTM beschrieben. Sie unterscheiden sich nur geringfügig untereinander, in Bereichen, wie z.B. dem Auflagerabstand je nachdem welcher Werkstoff geprüft wird. Die 3PB wird zur Bestimmung der Biegeeigenschaften von verschiedensten Materialien benutzt. So findet man den 3PB oft in der Kunststoffindustrie wieder.

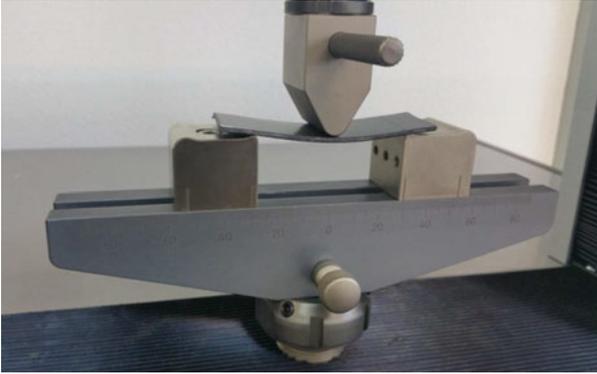


Abb. 7 Beispiel einer Dreipunktbiegung (aus **Schütz 2020**)

Bei der 3PB entsteht das maximale Biegemoment und damit die maximale Normalspannung in der Mitte des Balkens (s. Kap. 2.2.4). Die Querkraft ist konstant über den Balken verteilt und wechselt im Kraftangriffspunkt, in der Mitte des Balkens, das Vorzeichen (s. Abb. 10).

2.2.3 Vierpunktbiegung

Die 4PB wird die Prüfprobe auf zwei Auflagern positioniert und von zwei Prüfstempeln belastet.



Abb. 8 Beispiel einer Vierpunktbiegung (aus **Zwick/Roell 2020c**)

Die 4PB kommt in mehreren DIN-Normen zur Verwendung. In der *DIN EN ISO 7438:2016 Metallische Werkstoffe – Biegeversuch* wird das 4PB-Verfahren für metallische Werkstoffe beschrieben. In weiteren DIN-Normen wird die 4PB unter anderem für faserverstärkte Kunststoffe, Glas, Keramik etc. verwendet. Sie ist nicht für spezielle Werkstoffe oder Erzeugnisse, z.B. Rohrabschnitte, Schweißverbindungen, für die es andere Normen gibt. Die Abstände der Prüfstempel werden nach den DIN-Normen zu einem Drittel angeordnet (s. Abb. 9).

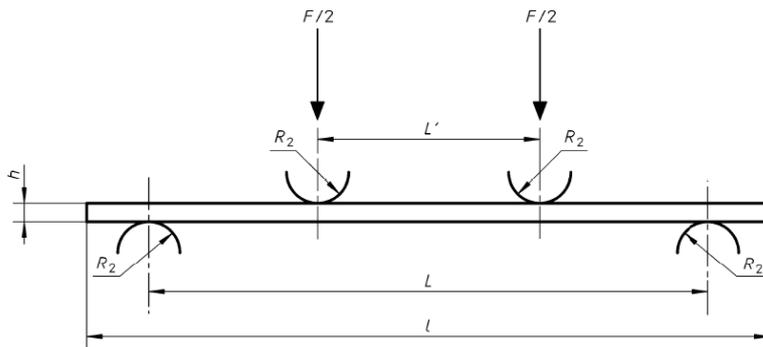


Abb. 9 Verfahren zur Vierpunktbiegung (aus **DIN EN ISO 14125**)

2.2.4 Vergleich: Dreipunktbiegung vs. Vierpunktbiegung

In den Abbildungen Abb. 10 und 11 wird der Unterschied der beiden Belastungsbedingungen besser verdeutlicht. So ist zu erkennen, dass beim 3PB das entstehende maximale Biegemoment in der Mitte des Balkens wirkt und Querkraft konstant über den Balken verteilt ist.

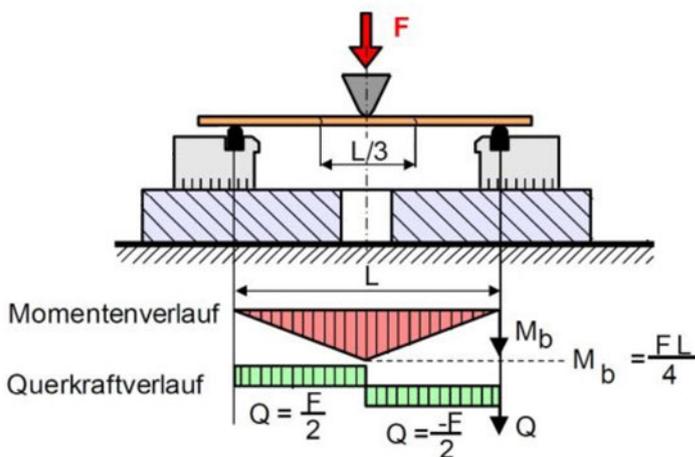


Abb. 10 Momenten- und Querkraftverlauf bei der Dreipunktbiegung (in Anlehnung an **PSM 2020b**)

Während das maximale Biegemoment bei der 4PB zwischen den beiden Kräfteinleitungspunkten konstant und die Querkraft gleich null ist.

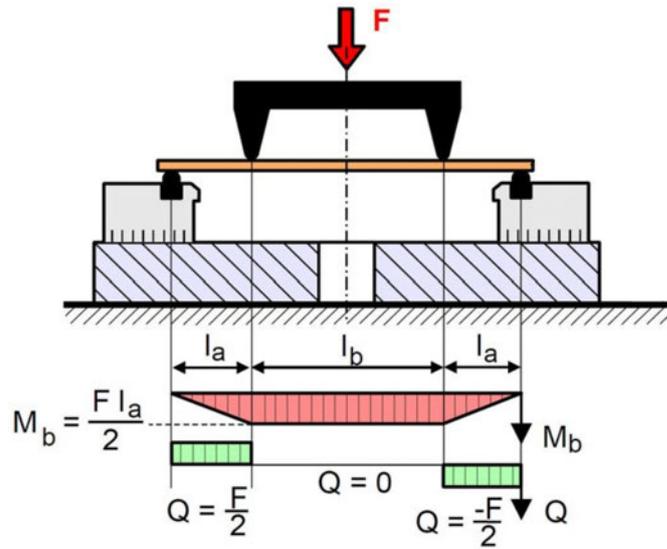


Abb. 11 Momenten- und Querkraftverlauf bei der Vierpunktbiegung (in Anlehnung an **PSM 2020b**)

3 Prüfstand

Der für diese Versuchsreihe benutzte Prüfstand ist von der Firma G.U.N.T. Hamburg. Die Firma G.U.N.T. Gerätebau GmbH wurde 1977 in Hamburg gegründet und hat sich zur Aufgabe gemacht Lernmaterial und Experimentiergeräte für den Gebrauch in Lehrinrichtungen zu entwickeln und herzustellen.

Das Werkstoffprüfgerät WP 300 ist eine neue Errungenschaft des Mechanik-Labors. Die Erstinbetriebnahme findet mit dieser Arbeit statt. In Anwesenheit des Laborleiters wurde das Gerät entpackt, entsichert und an den Rechner integriert. Es wurden weitere Einzelbauteile wie z.B. den elektronischen Wegaufnehmer angebracht. Ein erster Testlauf zur sicheren Funktionsweise wurde durchgeführt.

3.1 Werkstoffprüfgerät G.U.N.T. WP 300

Das Werkstoffprüfgerät WP 300 der Firma GUNT ist ein speziell für den technischen Unterricht konzipiertes Gerät. Durch ein paar einfache Handgriffe ist es möglich eine Vielzahl von verschiedenen Versuchen am Gerät durchzuführen. In seiner Grundausstattung benötigt das Gerät keine zusätzliche Versorgung. Die Prüfkraft wird auf hydraulischem Weg erzeugt. In dieser Bachelorarbeit wird ausschließlich der Aufbau für den elastischen Biegeversuch benutzt. (Gunt 2020, Kap 1)

Im Lieferumfang sind viele verschiedene Proben und Umbauteile für die verschiedenen Versuche enthalten. Optional wurden eine elektronischer Wegaufnehmer und die dazugehörige Einheit für Datenerfassung hinzugefügt. Für den elastischen Biegeversuch wurden weitere Metallproben bestellt. Die Abmessungen sind mit 580 mm x 400 mm x 800 mm (L/B/H) passend für ein Labortisch. Das Grundgewicht beträgt 38 Kilogramm



Abb. 12 Auslieferungszustand des WP 300, ohne Anbau (aus Gunt 2020)

3.2 Grundaufbau

Das Grundgerät besteht aus mehreren Komponenten (s. Abb. 13). Das Fundament bildet der Maschinenfuß (1), der mit vier Gummifüßen sicheren Halt bietet. An allen vier Ecken des Maschinenfußes befinden sich Transport-Handgriffe für einen leichten Transport.

Über dem Maschinenfuß befindet sich mittig der Hauptzylinder (7), dieser wird über den daneben montierten Geberzylinder und dessen Handrad (10) bedruckt. Die max. Prüfkraft beträgt 20kN.

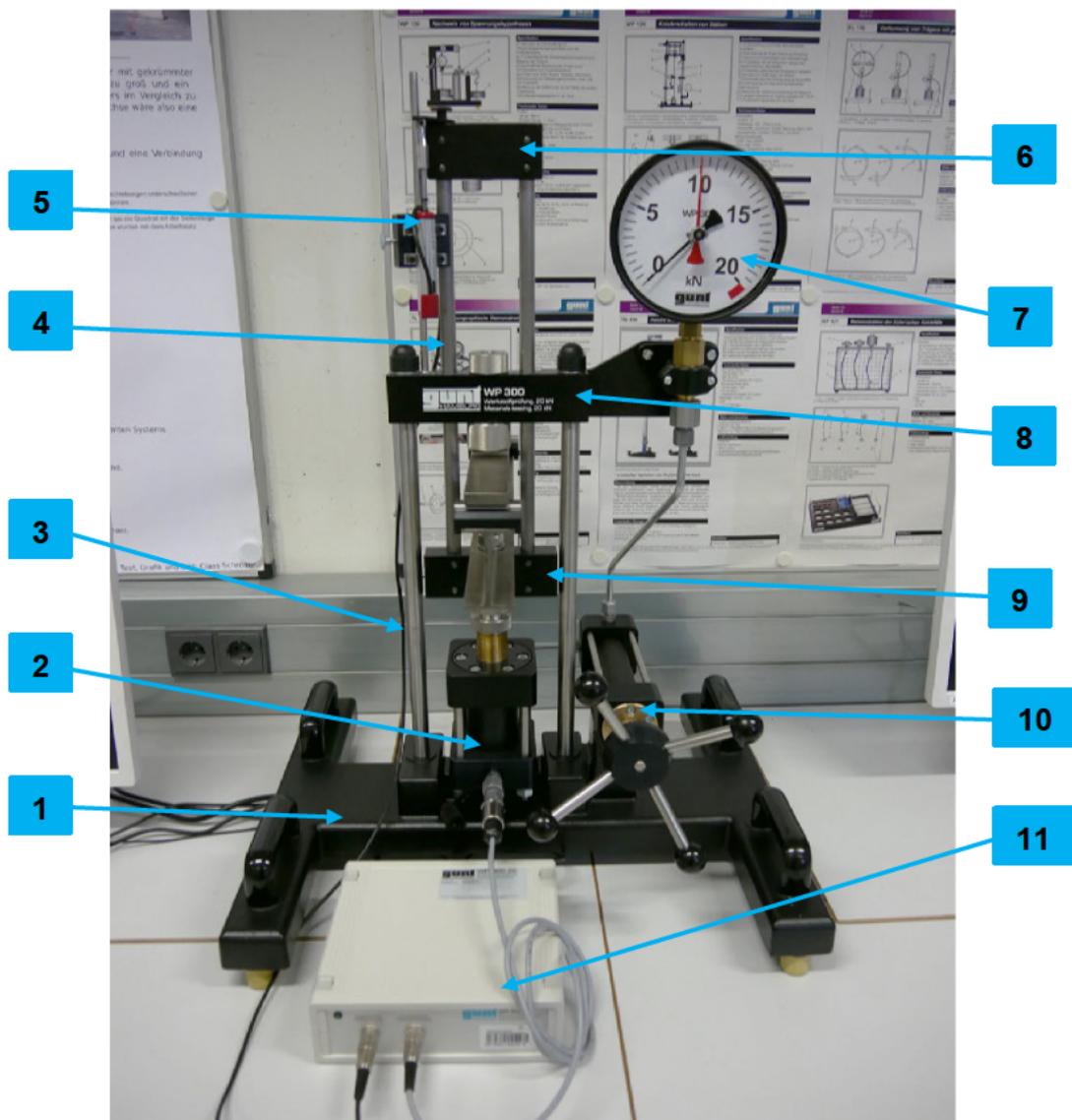


Abb. 13 Gesamtansicht des WP 300 (eigene Darstellung)

Auf dem Hauptzylinder befindet sich der Belastungsrahmen (4), dieser besteht aus Ober- (6) und Untertraverse (9) sowie den Führungsstangen. Die Prüfkraft wird vom Hauptzylinder über den Belastungsrahmen auf die Probe übertragen. Der Belastungsrahmen ist verschieblich gelagert.

Das Gegenstück zum Belastungsrahmen ist das festmontierte Gestell (3). Es besteht aus dem Querhaupt (8) und Ständersäulen. Am Querhaupt werden die verschiedenen Biegevorrichtungen befestigt.

Das Hydrauliksystem erzeugt einen hydrostatischen Druck und kann an der Kraftanzeige (7) abgelesen werden. Die Anzeige arbeitet nach dem Manometerprinzip.

Um die Durchbiegung der Probe zu Messen befindet sich eine Messuhr bzw. Wegaufnehmer (5) auf dem Querhaupt. Diese zeigt die Relativverschiebung zwischen Obertraverse und Querhaupt. Auf der analogen Messuhr (2) kann die Durchbiegung in mm abgelesen werden. Optional wurde für diesen Prüfstand ein elektronischer Wegaufnehmer installiert. Damit ist es möglich genauere digitale Werte zu bekommen. Die Daten werden über eine Datenerfassungsgerät (11) auf die Software übertragen.

3.3 Software

Die Software ist von der Firma GUNT programmiert worden und beinhaltet alle dazugehörigen Versuche, die zu dem Werkstoffprüfgerät WP 300 gehören. Die Daten werden von ein Datenerfassungsgerät, welches mit dem Hauptzylinder und dem Wegaufnehmer verbunden ist, an das Programm übertragen.

Die Programmoberfläche ist benutzerfreundlich aufgebaut und leicht verständlich. Nachdem das Programm WP 3X0 gestartet wurde, öffnet sich ein Auswahlfenster (s. Abb. 14) mit verschiedenen Versuche des WP 300.

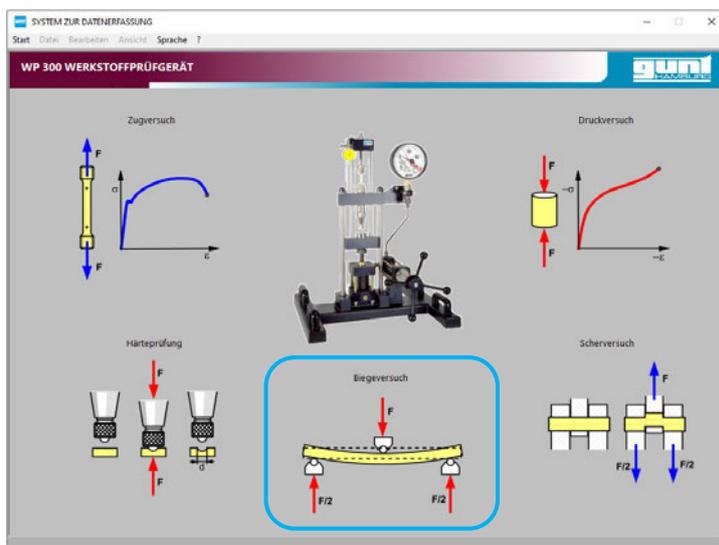


Abb. 14 Auswahl des Biegeversuchs (Screenshot aus der Software WP3X0)

Nach Auswahl des Biegeversuchs öffnet sich das Hauptfenster (s. Abb. 15). Hier werden die Grundparameter eingestellt, sowie der Biegeversuch durchgeführt.

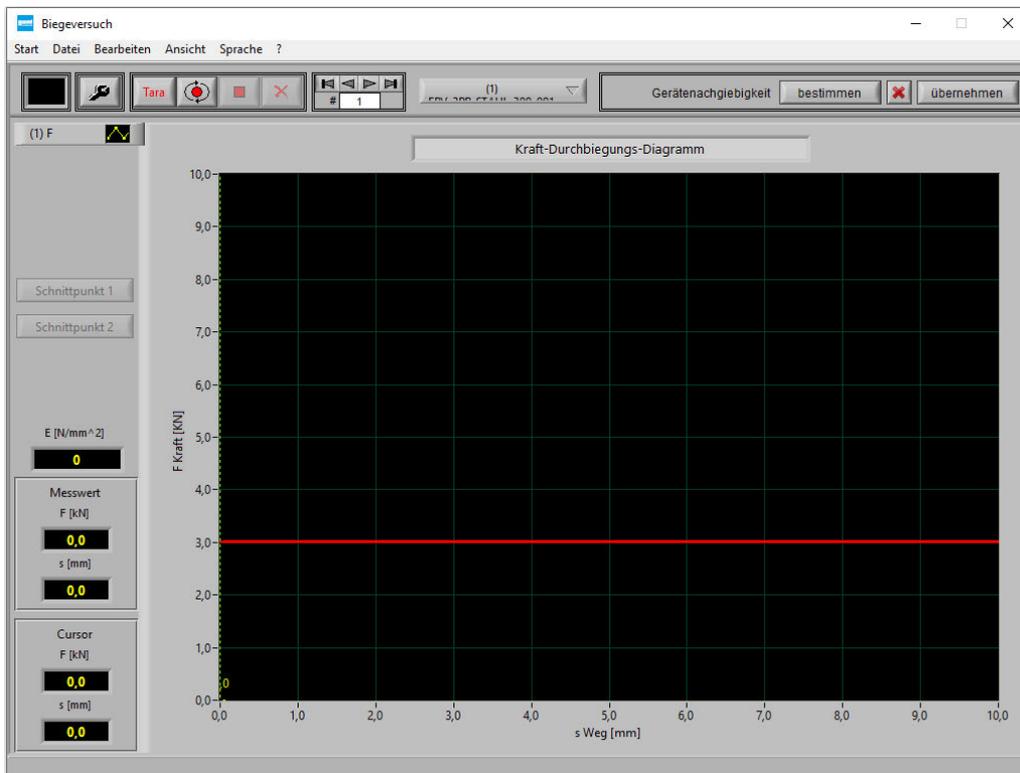


Abb. 15 Hauptfenster (Screenshot aus der Software WP3X0)

Im Hauptfenster befindet sich unter der Menüleiste eine weitere Detailleiste, in der sich verschiedene Auswahlmöglichkeiten und Information befinden. So wird in der Mitte die derzeitige Versuchsreihe angezeigt. Im rechten Bereich kann die Gerätenachgiebigkeit vom Computer bestimmt werden.

Im linken oberen Bereich (s. Abb. 16) befinden sich die Buttons für (v.l.n.r):

- „Hintergrundfarbe“
- „Einstellungen“
- „Daten kontinuierlich aufnehmen“
- „Stop kontinuierliche Datenaufnahme“
- „Datensatz löschen“



Abb. 16 Teilabschnitt der Menüleiste (Screenshot aus der Software WP3X0)

Am linken unteren Rand befinden sich die Messwerte, die vom Datenerfassungseinheit übermittelt werden. Angezeigt wird die aufgebrauchte Kraft F in kN und die Durchbiegung s in mm (s. Abb. 15).

In der Mitte ist ein Kraft-Durchbiegungs-Diagramm. Der Rote Balken wird nach Einstellung der Materialparameter angezeigt und zeigt die zulässige Kraft F_{max} an. Der Anzeigebereich der beiden Achsen kann automatisch oder manuell eingestellt werden. Durch einen Doppelklick auf eine der Achsen wird ein weiteres Fenster geöffnet, in dem Einstellungen vorgenommen werden können.

Als erstes wird ein neues Projekt über den Menüpunkt *Datei* → *Neue Messreihe* erstellt. Dazu öffnet sich ein neues Fenster im Vordergrund. Hier wird der Name der Messreihe angegeben und optional ein Kommentar vermerkt (s. Abb. 17).

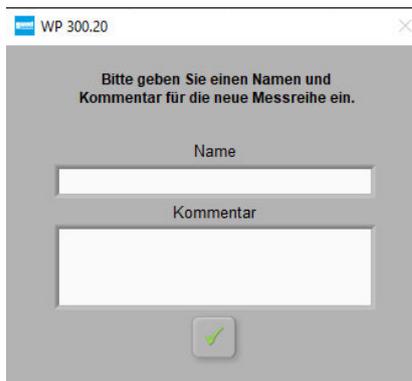


Abb. 17 Neue Messreihe (Screenshot aus der Software WP3X0)

Die Messreihen werden wie folgt benannt:

EBV_VERSUCH_MATERIAL_LÄNGE_AUSRICHTUNG_VERSUCHSNUMMER

EBV:

Zuordnung zum elastischen Biegeversuch

Versuch:

Hiermit wird zwischen der 3PB und 4PB unterschieden.

Material:

Zeigt an welche Materialprobe geprüft wird.

Länge:

Angabe der Probenlänge.

Ausrichtung:

Beschreibt die Ausrichtung der Probe, waagrecht oder senkrecht

Versuchsnummer:

Die Dateien wurden mit Versuchsnummer versehen, um die Versuchsreihen unterscheiden zu können, beginnend mit „001“.

Beispiel:

EBV_3PB_ALUMINIUM_200_W_001

Unter dem Menüpunkt *Ansicht -> Einstellungen* werden die jeweiligen Probeneinstellungen eingegeben (s. Abb. 18). Über ein Auswahlmü kann zwischen den Vorhandenen drei Proben ausgewählt werden, es ist aber auch möglich weitere Materialproben hinzuzufügen. Die Maße der Proben müssen per Hand eingegeben werden. Das Programm berechnet im Hintergrund die max. Prüfkraft F_{max} . Wenn die Einstellungen eingegeben und bestätigt worden sind, wird die max. Prüfkraft F_{max} als Roter Balken im Diagramm angezeigt (s. Abb. 15). Diese sollte nicht überschritten werden da es sonst zu einer bleibenden Verformung der Probe kommen kann.



Abb. 18 Einstellungen für den Biegeversuch (Screenshot aus der Software WP3X0)

Über den Button „*Daten kontinuierlich aufnehmen*“ kann nun die Versuchsdurchführung gestartet werden.

Nachdem der Versuch durchgeführt worden ist, besteht die Möglichkeit die gewonnenen Daten zu sichern. Unter dem Menüpunkt *Datei → Graph-, Tabelle- und Fenster drucken*, wird je eine PDF Datei erzeugt.

Die PDF Tabelle zeigt den Namen der Versuchsreihe, das Datum und Uhrzeit der Versuchsdurchführung sowie eine Tabelle mit den Messwerten Durchbiegung s in Millimeter [mm] zu Kraftaufbringung F in Kilonewton [kN]. Diese sind für die spätere Berechnung notwendig. Über den Menüpunkt *Datei → Messreihe speichern*, kann die Versuchsreihe gespeichert werden.

3.4 Proben

Es stehen drei verschiedene Metallproben zur Verfügung. Sie haben alle die gleichen Maße: 320 mm x 40 mm x 12 mm (L/B/H)

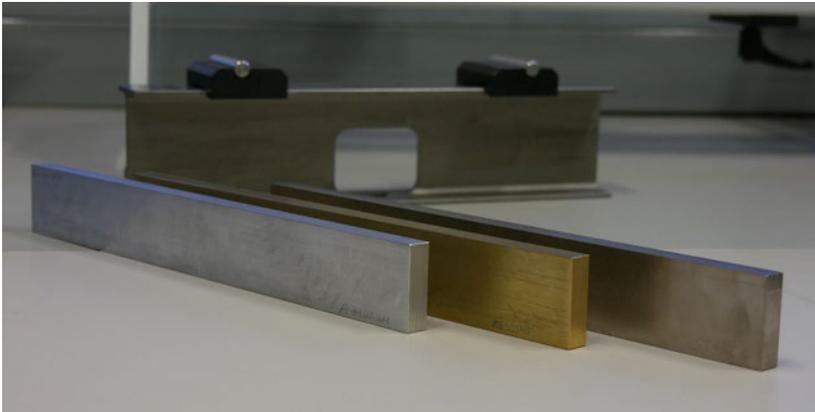


Abb. 19 Proben aus Aluminium, Messing und Stahl (eigene Darstellung)

Die Elastizitätsmodule wurde aus **Gunt 2020** entnommen und entsprechen denen aus der Literatur

Tab. 1 Elastizitätsmodule der Proben aus der Literatur (eigene Darstellung)

Elastizitätsmodul	
Material	kN/mm ²
Aluminium	69
Messing	97
Stahl	210

3.4.1 Stahl

Die Stahlprobe hat die Materialbeschreibung S235JRC +C und entspricht der DIN EN 10025-2. Es ist ein unlegierter Baustahl mit einem Kohlestoffgehalt von max. 0,17%. S235JRC ist die weltweit am häufigsten verwendete Stahlsorte und eignet sich für verschiedenste Anwendungen wie z.B. Träger, Stahlbleche oder Nägel. Mit einem Phosphor- und Schwefelgehalt unter 0,04% ist diese Stahlsorte den Qualitätsstählen zuzuordnen. Als unlegierte Variante ist der Baustahl gut kaltverformbar, magnetisier- und schweißbar (**Stahlsorten 2020**).

Die Bezeichnung S235JR+C setzt sich wie folgt zusammen:

- S gibt an, dass es sich um einen allgemeinen Baustahl handelt
- 235 bezieht sich auf ist die Mindeststreckgrenze in MPa
- JR ist die Gütegruppe
 - ❖ wobei das J für die Mindestkerbschlagarbeit von ≥ 27 Joule“ steht
 - ❖ und das R für die Prüfung der Mindestkerbschlagarbeit bei Raumtemperatur (20°C)
- Das C bedeutet, dass das Material zum Abkanten, Walzprofilieren oder Kaltziehen geeignet ist
- und +C steht für Kaltverfestigung

3.4.2 Messing

Die Messingprobe hat die Beschreibung CW614N und entspricht der DIN EN 12449. Es handelt sich um eine Kupfer-Zink-Legierung mit der Kurzbeschreibung CuZn39Pb3 und ist in Deutschland die Hauptlegierung für Zerspanung (**Hermann 2020**). Der Werkstoff kann gut warmverformt werden und hat eine gute Zerspanbarkeit.

Die Chemische Zusammensetzung ist:

- Kupfer Cu ca.57-59 %
- Blei Pb ca. 2,5-3,5%
- der restliche Anteil besteht hauptsächlich aus Zink Zn

3.4.3 Aluminium

Die Aluminiumprobe hat die Materialbeschreibung EN AW-6060, mit der Kurzbeschreibung AlMgSi0,5. Sie gehört zur Gruppe der aushärtbaren Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierungen. Häufige Anwendungsbereiche sind Fenster- und Türrahmen sowie diverse Gestelle (**Klößner 2020**)

Die Chemische Zusammensetzung ist:

- Aluminium Al ca. 99%
- Silizium Si ca. 0.3 -0.6 %
- Magnesium Mg ca. 0.35 -0,6 %
- Rest ca.0.1%

3.5 Aufbau Dreipunktbiegung

Der Dreipunktbiegeversuch wird nach der DIN EN ISO 178 zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls vorgeschrieben. In der Norm ist die Messung der Mittendurchbiegung mittels Traversenwegmessung oder eines Tastfühlers in der Probenmitte erlaubt.

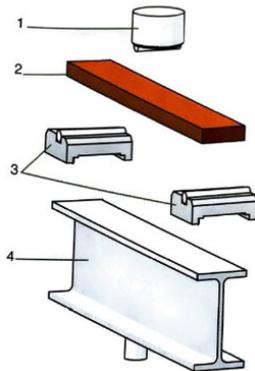


Abb. 20 Aufbau der Dreipunktbiegung des WP 300 (aus Gunt 2020)

Die Biegevorrichtung besteht aus fünf Teilen (s. Abb. 20):

- Druckstempel (1)
- Probe (2)
- Zwei Läufer mit Walzen (3)
- I-Profil-Träger (4)

Die Biegevorrichtung wird in den Druckbereich des WP 300 zwischen der Untertraverse und Querhaupt eingebaut. Der I-Profil-Träger (4) dient als Auflagerbasis und wird auf der Untertraverse mittels einer Sechskantmutter festgeschraubt. Auf ihm liegen die beiden Läufer mit Walzen, sie bilden die beiden Auflager (3). Auf deren Unterseite ist ein Schienenprofil, damit sie auf der Auflagerbasis verschoben werden zu können. Eine Skala für die Stützweite ist auf der Auflagerbasis aufgedruckt. Abgelesen wird an den inneren, zugewandten Kanten der Auflager.



Abb. 21 I-Profil-Träger mit beiden Auflager und Sechskantmutter (eigene Darstellung)

Das Druckstempel (1) wird an das Querhaupt, über eine kurze Gewindestange mit einem Gewinding, verschraubt. Dabei muss beachtet werden, dass der Druckstempel so ausgerichtet ist, dass die halbrunde Druckfinne genau rechtwinklig zur Balkenachse liegt.

Für die Versuchsdurchführung wird die Probe (2) zentriert auf den beiden Auflagern aufgelegt.



Abb. 22 Aufbau der 3PB-Vorrichtung mit einer Stahlprobe (eigene Darstellung)

3.6 Aufbau Vierpunktbiegung

Aufgabe dieser Bachelorarbeit ist es eine Vierpunktbiegevorrichtung für den Prüfstand WP 300 zu konstruieren.

3.6.1 Konstruktion und Zusammenbau

Die 4PB-Vorrichtung ist wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben aufgebaut. Wichtige Einflussfaktoren auf die Konstruktion sind die Abstände der Auflagerabstände und der Druckpunkte. Diese sollten flexibel verschiebbar sein, um Proben verschiedener Länge oder an verschiedenen Punkten prüfen zu können.

Um eine solche Flexibilität zu erreichen, mussten Druckpunkte entwickelt werden, die entlang der Probenlängsachse sowohl verschiebbar als auch feststellbar sind.

Die Grundidee war eine Schiene zu entwickeln, auf der die Druckpunkte entlang der Probenlängsachse variabel positioniert werden können. Damit der 4PB Druckstempel anstelle des 3PB Stempels eingebaut werden kann, wurden zur Entwicklung der Schiene die Höhe und Breite des vorhandenen 3PB Stempels als Vorgabe benutzt. Bei einer zu großen Konstruktion würde

der Versuch zur Bestimmung der Maschiennachgiebigkeit nicht durchführbar werden (s. Kap. 2.1.6). Dennoch sollte die Konstruktion stabil genug sein, um auch die Belastungen der verschiedenen Versuchsreihen durchführen zu können. Die nötige Stabilität der Schiene, wurde durch ein massiven Vierkant Stahlblock gewährleistet. Dieser wurde auf 19 mm Höhe gefräst, die Breite beträgt 35 mm. Um an den vorhandenen Proben einen Biegeversuch mit 4PB durchzuführen, wie in Kap. 2.2.4 beschrieben, wurde die Schiene auf eine Gesamtlänge von 180mm bemaßt. Zur Befestigung der Schiene an das Werkstoffprüfgerät wurde in der Mitte der Schiene eine Bohrung mit einer weiteren Vertiefung gefräst (s. Abb. 23). Befestigt wurde die 4PB-Vorrichtung, mit einer Zylinderschraube, am Querhaupt über den Gewinding.

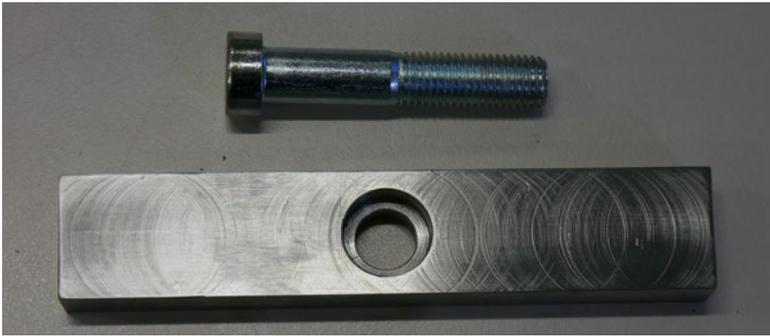


Abb. 23 Konstruierte Schiene mit Zylinderschraube (eigene Darstellung)

Auf der Schiene laufen zwei Schlitten. Es handelt sich hierbei um vorgefertigte Rechteckrohre, mit den Außenmaßen 40 mm x 25 mm. Die Wandstärke beträgt 2 mm. Auf der Oberseite der Schiene wurde mittig eine 5 mm Bohrung durchgeführt. Auf dieser Bohrung wurde eine Sechskantmutter M5 angeschweißt. Mit einer Sechskantschraube M5 kann der Schlitten auf verschiedenen Positionen festgeschraubt werden, um ein versehentliches Verschieben der Druckpunkte zu verhindern. Auf der Unterseite der der Schiene wurde ein Stahlstab mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länger von 40 mm angeschweißt. Dieser dient als Druckpunkt.



Abb. 24 Konstruierten Schlitten mit Druckpunkt (eigene Darstellung)

In Abb. 24 ist zu erkennen, dass der Druckpunkt unterhalb der Schiene nicht mittig angebracht worden ist. Dies ist auf das Prüfgerät WP 300 zurückzuführen. Das Querhaupt hat eine Tiefe von 30 mm.

Wie im Kap. 2.2.3 beschrieben, werden bei der 4PB die Abstände der Prüfstempel zu einem Drittel angeordnet. Damit die Proben auf das kleinstmöglich Maß (≈ 100 mm) überprüft werden kann, müssen die Abstände der Druckpunkt ein Drittel der Auflagerabstände haben. Bei dem kleinstmöglichen Maß von 100 mm sind die Abstände bei 33,33 mm anzuordnen. Die Abstände der beiden Druckpunkte sind von der Mitte des Prüfgeräts ausgehend nur noch die Hälfte der Länge. Die gepunkteten Linien in Abb. 25 sind die Abstände, auf der die Druckpunkte positioniert werden müssen, um die Versuche mit den Auflagerabständen 100 mm, 200 mm und 300 mm durchzuführen. Wie auf der linken Seite in Abb. 25 zu erkennen ist, konnte der Druckpunkt nicht mittig unter dem Schlitten angebracht werden, da der Schlitten durch das Querhaupt blockiert ist. Die konstruierte Lösung ist auf der rechten Seite, in Abb. 25, dargestellt.

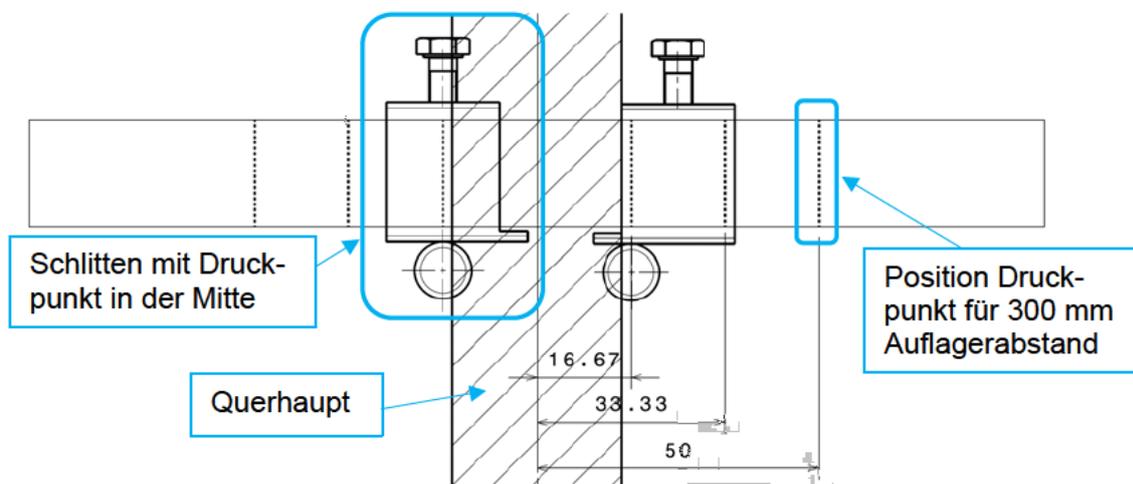


Abb. 25 Zeichnung unterschiedlicher Positionen der Druckpunkte (eigene Darstellung)

Desweiteren ist an dem Schlitten zu erkennen, dass die Unterseite geringfügig länger ist als der Rest des Körpers. Grund dafür liegt in der Herstellung, nur auf diese Art und Weise war die Befestigung der Druckpunkte möglich. Der Druckpunkt wurde mit dem Wolfram-Inertgas-Schweißverfahren (WIG-Schweißen) befestigt, dafür war ein wenig Platz für die Schweißnaht notwendig.



Abb. 26 Seitenansicht der Schlitten, mit verschobenen Druckpunkten (eigene Darstellung)

Zur Positionierung der Druckpunkte, wurde auf der Schiene eine Skala aufgezeichnet.

3.6.2 Das CAD-Modell

Alle Dateien im Modell wurden nach dem folgenden Muster benannt:

WP300_EBV_BEZEICHUNG_VERSION_DATEIENDUNG

WP300:

Identifiziert die Datei als zum WP300 Projekt zugehörig.

EBV:

Zuordnung zum Elastischen Biegeversuch.

Bezeichnung:

Hiermit wird der Inhalt der Datei beschrieben.

Version:

Dateien wurden mit einer Versionsnummer versehen, um evtl. neue Dateien von alten unterscheiden zu können, beginnend mit „001“.

Dateiendung:

Ergibt sich aus CATIA.

Beispiel:

WP300_EBV_SCHIENE_001.CATPart

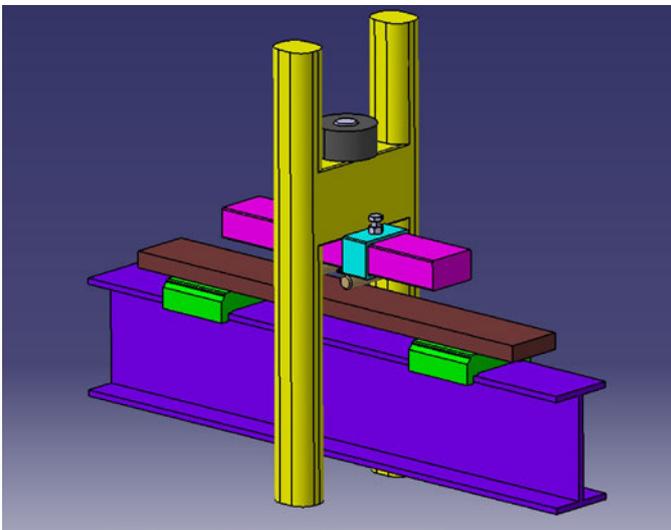


Abb. 27 Teilnachbildung des WP 300 mit der konstruierten 4PB-Vorrichtung (eigene Darstellung)

Das CAD Modell wurde mit dem Programm Catia V5R15 von *Dassault Systems* entworfen. Alle Bauteile wurden als PAD erzeugt. Die Geometrien wurden vom Werkstoffprüfgerät entnommen und in das CAD-Modell übertragen. Das ganze Modell, inkl. 3PB- und 4PB Druckstempel, wurde in einem *Product* konstruiert. Zusammengesetzt wurde alles im *Assembly Design*.

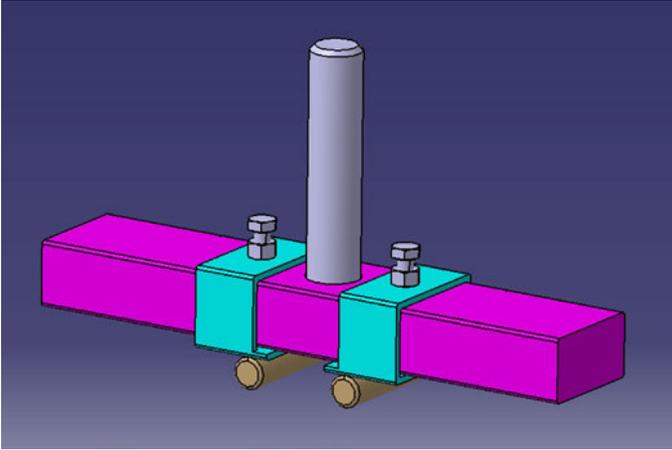


Abb. 28 CAD-Konstruktion der Vierpunktbiegevorrichtung (eigene Darstellung)

Die Abb. 28 zeigt das fertige Modell. Die verschiedenen Farben sind lediglich zur besseren Darstellung gewählt worden.

3.6.3 Material und Normteile

Die verschiedenen Bauteile bestehen aus folgenden Materialien:

- | | |
|-------------------|--|
| Schiene | Vierkantstahl, gewalzt in der Materialqualität S235 JR+AR, Toleranzen nach EN10058 / EN10025. |
| Schlitten | Rechteckstahlrohr, Längsnaht geschweißte Rechteckröhre nach EN 10219 / 10305-5, Güte S235 JRH. |
| Druckpunkt | Rundstahl, gewalzt in der Materialqualität S235 JR+AR, Toleranzen nach EN10058 / EN10025. |

Es wurden folgende Normteile verwendet:

- Sechskantschraube ISO 4017 - M5 x 10
- Zylinderschraube mit Innensechskant und niedrigem Kopf DIN 7984 - M16 x 80
- Sechskantmutter DIN 934 - M5

4 Versuchsdurchführung

4.1 Versuchsvorbereitung

Bevor die Versuche durchgeführt werden, müssen Vorbereitungen am Prüfstand vorgenommen werden.

Um die Druckstempel der 3PB oder 4PB einzubauen, müssen zuerst die Auflagerbasis demon­tiert werden. Dazu wird die Sechskantmutter abgeschraubt. Nachdem die Auflagerbasis entfernt worden ist, gibt es genug Freiraum zwischen dem Querhaupt und der Untertravers, um die gewünschte Biegevorrichtung einzubauen. Diese wird mit dem Gewinding oberhalb des Quer­hauptes befestigt. Danach werden die Auflager wieder anmontiert.

Die verschieblichen Auflager werden mit dem nach außen gerichteten, halbrunden Druckpunkt auf die Auflagerbasis gesetzt (s. Abb. 21). Die Skala auf der Auflagerbasis zeigt die Stützweite L an. Die Stützweite wird an der inneren, zugewandten Kante der Auflager abgelesen. Die Probe wird, je nach Versuch, flach (waagrechte) oder hochkant (senkrecht) auf die Auflager positioniert. Dabei ist zu beachten, dass sie zentriert aufgestellt wird. Dazu wurden mit einem wasserlöslichen Stift kleine Markierungen auf den Proben gezeichnet. Es wird überprüft, ob der Druckstempel rechtwinklig zur Probe ausgerichtet ist, falls nötig kann der Gewinding leicht gelöst werden und neu ausgerichtet werden.

Die Konterplatte des Wegaufnehmers muss eingespannt und festgeschraubt werden (s. Abb. 29).

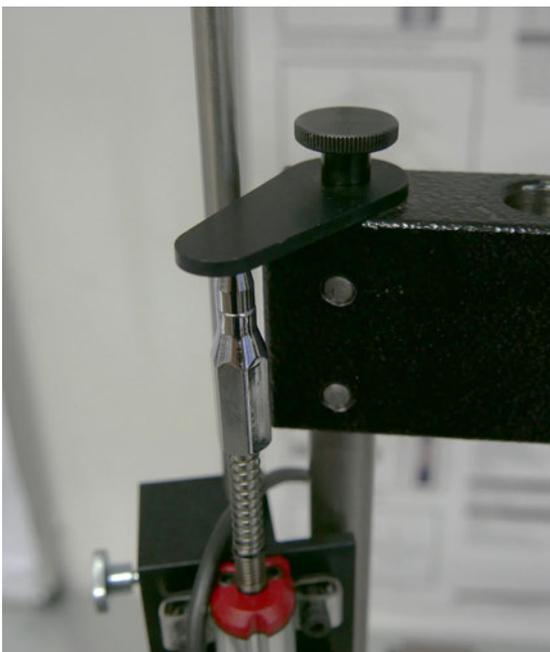


Abb. 29 Eingespannter Wegaufnehmer (eigene Darstellung)

Auf dem Rechner wird die Software WP 3X0 gestartet, die verschiedenen Parameter eingestellt und eine neue Messreihe angelegt.

Je nach welcher Versuchsdurchführung erscheint auf dem Graphen eine Rote Linie die die max. Kraft F_{max} für die ausgewählte Parameter anzeigt. Damit ist die Versuchsvorbereitung abgeschlossen.

Die max. Kraft F_{max} für die Versuchsführung kann mit den Formeln, aus dem Kap. 2.1.4, berechnet werden. Daraus ergeben sich folgende Werte:

Tab. 2 Max. Prüfkraft für die Aluminiumprobe (eigene Darstellung)

Aluminium	
Auflagerabstand [mm]	Max. Kraft [kN]
W 100	5,375
W 200	2,688
W 300	1,792

Tab. 3 Max. Prüfkraft für die Messingprobe (eigene Darstellung)

Messing	
Auflagerabstand [mm]	Max. Kraft [kN]
W 100	6,144
W 200	3,072
W 300	2,048

Tab. 4 Max. Prüfkraft für die Stahlprobe (eigene Darstellung)

Stahl	
Auflagerabstand [mm]	Max. Kraft [kN]
W 100	9,024
W 200	4,512
W 300	3,008
S 300	10,03

Zur Berechnung der Maschienennachgiebigkeit K_B muss die Probe hochkant (senkrecht) untersucht werden. Dadurch ändert sich das Flächenträgheitsmoment nach Formel (8). Die daraus berechnete max. Kraft F_{max} wird dadurch deutlich höher.

4.2 Versuchsdurchführung

Nachdem die Versuchsvorbereitung abgeschlossen ist, kann der Versuch gestartet werden. Die Probe liegt zentriert auf den beiden Auflagern auf. Über das Handrad wird die Probe dem Druckstempel genähert, bis die Probe leicht vorgespannt wird (max. 0,5kN). Über den TARA-Button wird die Software genullt. Die Datenaufnahme wird mit dem Button „*Daten kontinuierlich aufnehmen*“ gestartet. Nun wird über das Handrad eine konstante Lastaufbringung eingeleitet. Die Kraft kann über die Kraftanzeige am Prüfstand oder in der Software abgelesen werden.

Es wird solange Kraft aufgebracht bis die vorgegebene/berechnete maximale Kraft F_{max} erreicht wird. Auf dem KDD entsteht eine fast lineare Linie. Nachdem die vorgegebene Kraft erreicht ist, wird über den Button „*Stop kontinuierliche Datenaufnahme*“ die Aufnahme beendet. Die Daten werden zur Auswertung, wie in Kap. 3.3 beschrieben, gesichert. Mit dem Handrad wird die Probe wieder entlastet.

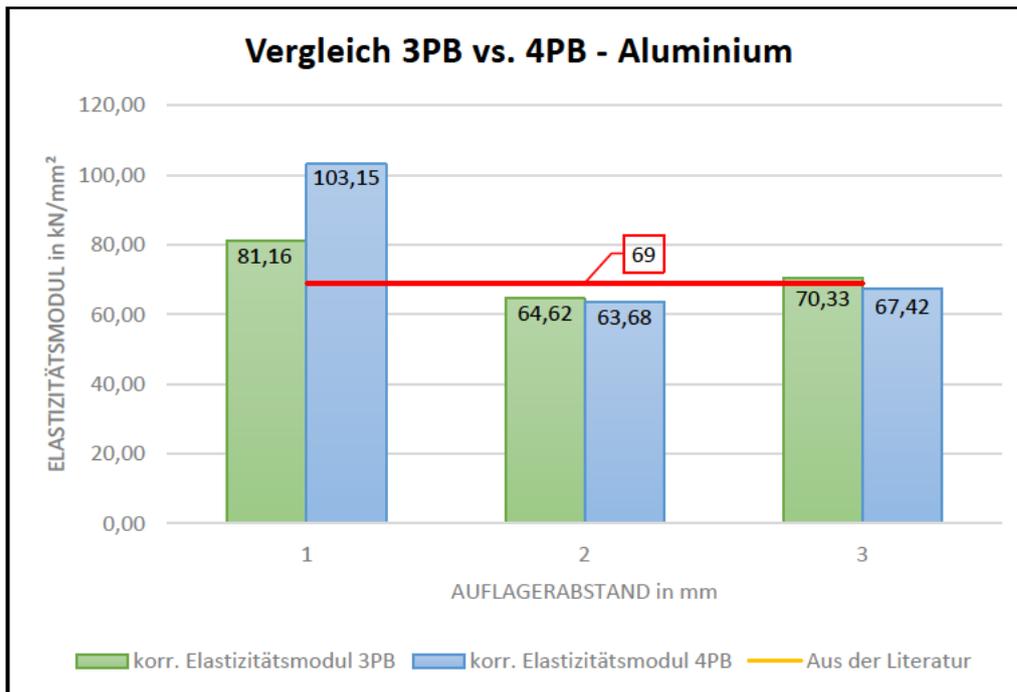
Zur Berechnung der der Maschienenachgiebigkeit K_B wird der Versuch nochmal durchgeführt, mit dem Unterschied, dass die Stahlprobe hochkant (senkrecht) gelagert wird.

Zum Vergleich der Messergebnisse wurde jede Versuchsreihe dreimal durchgeführt, um eventuelle Abweichungen oder Fehlern vorzubeugen (s. Anhang).

4.3 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse der 3PB und 4PB miteinander verglichen und bewertet. Als Maßstab dieser Bewertung werden die aus den Versuchen korrigierten Elastizitätsmodule E_{cor} verwendet. Alle korrigierten Elastizitätsmodule E_{cor} , die diff. zur Literatur und die diff. in Prozent werden in Tab. 5 zusammengefasst. Alle Teilergebnisse sowie Berechnung befinden sich im Anhang A.

Die Auswertung der Aluminiumprobe hat folgendes ergeben. Die berechneten Ergebnisse zeigen, dass die Methode der 3PB näher, an dem aus der Literatur entnommenen Elastizitätsmoduls liegt als die der 4PB (s. Dia. 1). Bei der Untersuchung, mit einem Auflagerabstand von 100 mm, sind die Abweichungen deutlich höher als die Werte der Literatur.



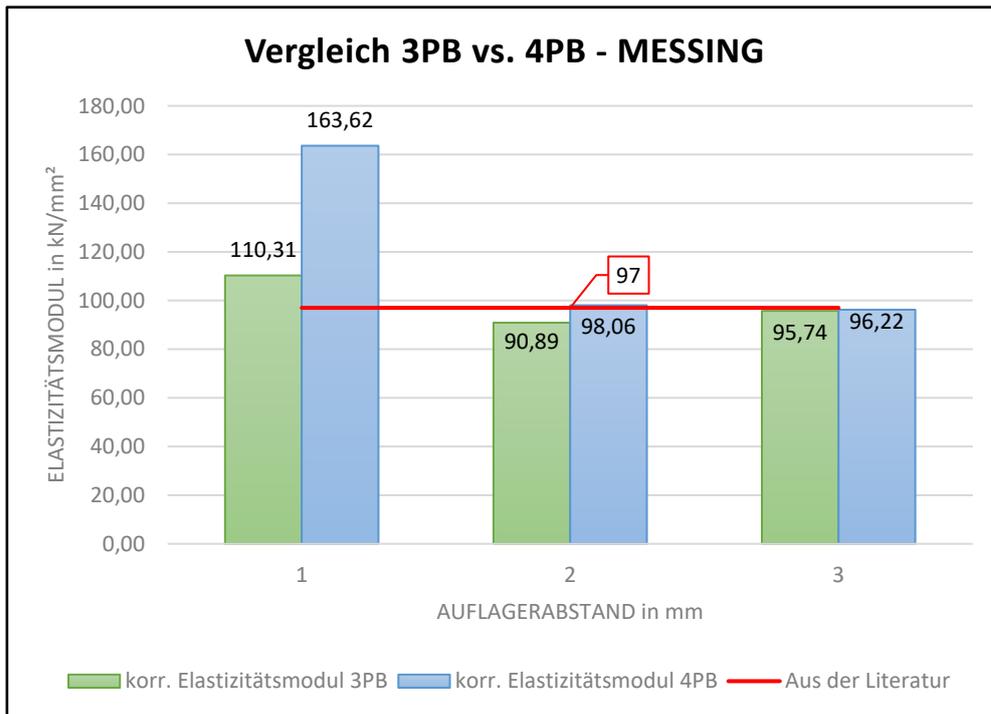
Dia. 1 Vergleich 3PB vs. 4PB - Aluminium (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse mit den Auflagerabständen 200 mm und 300 mm zeigen leichte Abweichungen untereinander. Bei der 300 mm Untersuchung liegt das korr. E-Modul bei der 3PB leicht über dem Wert aus der Literatur. Mit einer Diff. von 1,9 % (3PB) und 2,3 % (4PB), sind die Messergebnisse dennoch sehr nah zu den Literaturwerten (s. Tab. 5).

Tab. 5 Ergebnisse der korrigierten Elastizitätsmodule (eigene Darstellung)

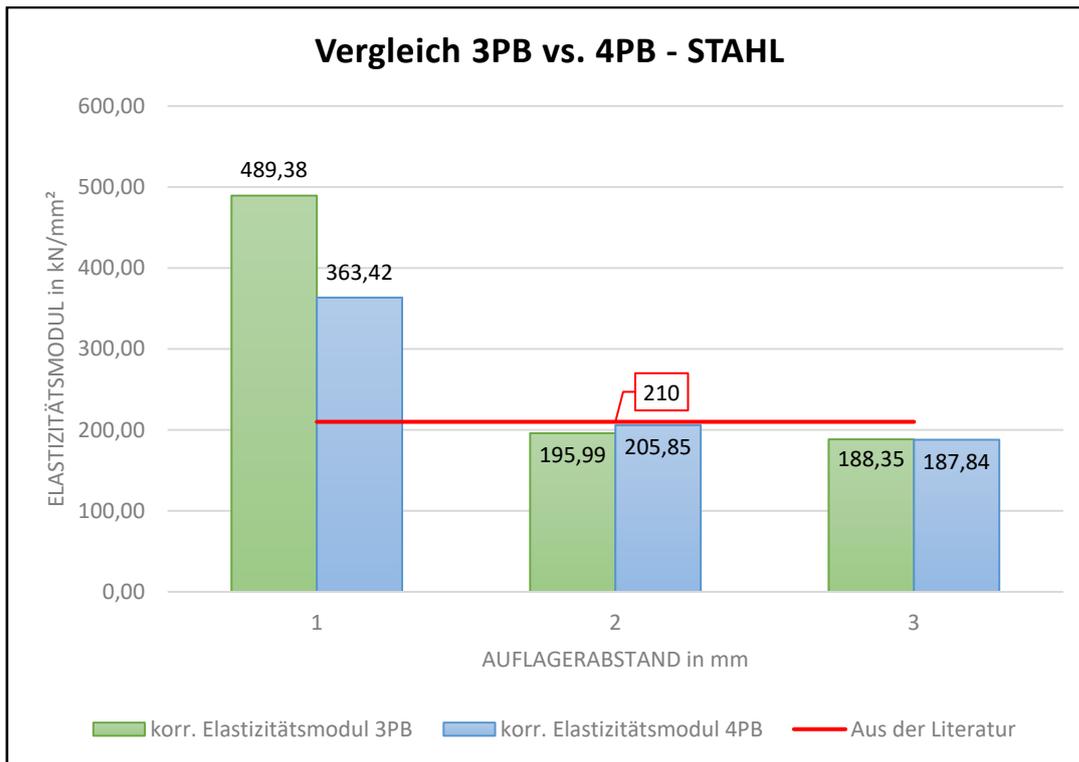
Versuch		3PB			4PB		
Auflagerabstand	mm	100	200	300	100	200	300
Aluminium E-Modul	kN/mm ²	69	69	69	69	69	69
korr. E-Modul	kN/mm ²	81,16	64,62	70,33	103,15	63,68	67,42
Diff. zur Literatur	kN/mm ²	-12,16	4,38	-1,33	-34,15	5,32	1,58
Diff. in %	%	-17,6	6,3	-1,9	-49,5	7,7	2,3
Messing E-Modul	kN/mm ²	97	97	97	97	97	97
korr. E-Modul	kN/mm ²	110,31	90,89	95,74	163,62	98,06	96,22
Diff. zur Literatur	kN/mm ²	-13,31	6,11	1,26	-66,62	-1,06	0,78
Diff. in %	%	-13,7	6,3	1,3	-68,7	-1,1	0,8
Stahl E-Modul	kN/mm ²	210	210	210	210	210	210
korr. E-Modul	kN/mm ²	489,38	195,99	188,35	363,42	205,85	187,84
Diff. zur Literatur	kN/mm ²	-279,38	14,01	21,65	-153,42	4,15	22,16
Diff. in %	%	-133,0	6,7	10,3	-73,1	2,0	10,6

Die Auswertung der Messingprobe zeigt ein ähnliches Ergebnis. Die Ergebnisse der 300 mm Messreihe nähern sich dem Literaturwert an. Die Ergebnisse der 100 mm Messreihe liegt wie schon bei der Aluminiumprobe weit über dem Vergleichswert. Die 4PB-Vorrichtung erzielte, ausgenommen von der 100 mm Versuchsreihe, gute Ergebnisse. Dabei ist zu beobachten, dass bei der 200 mm Messreihe das Ergebnis leicht über dem vorgegebenen Wert liegt.



Dia. 2 Vergleich 3PB vs. 4PB - Messing (eigene Darstellung)

Der Untersuchung der Stahlprobe zeigt, wie schon in den Beiden Messreihen zuvor, dass die Messreihe mit einem Auflagerabstand von 100 mm weit über den Sollergebnissen liegt. Auch die andern beiden Messreihen zeigen einen größeren Abstand zu den Literaturwerten. Mit Differenzen von bis zu 10,6 % (300 mm, 4PB) sind die Ergebnisse deutlich von den erreichten Werten entfernt. Eine Ausnahme bildet die 200 mm Messreihe mit nur 2 % Diff. zur Literatur.



Dia. 3 Vergleich 3PB vs. 4PB - Stahl (eigene Darstellung)

Werden die 3PB- und 4PB-Vorrichtung an alle der drei Proben miteinander verglichen, ist kein entscheidender Vorteil zwischen den beiden Biegevorrichtung zu erkennen. Je nach Material oder Auflagerabstand, war die eine oder die andere Prüfmethode geeigneter. Ausgenommen sind die Messungen mit dem Auflagerabstand von 100 mm. Die aus dieser Versuchsreihe gewonnenen Ergebnisse sind weit über denen der anderen Messreihen. Mögliche Ursachen werden im folgenden Kapitel erläutert.

4.4 Einflussfaktoren

In diesem Abschnitt werden mögliche Einflussfaktoren, die eine Auswirkung auf das Messergebnis haben, erläutert.

Wie schon im Kap. 2.1.6 erwähnt wurde handelt es sich bei der WP 300 der Firma G.U.N.T. um ein speziell für den technischen Unterricht konzipiertes Gerät. Das WP 300 ist für eine Belastung bis 20 kN ausgelegt. Eine Verformung im elastischen Bereich ist für die einwandfreie Funktionalität unkritisch, verfälscht jedoch unter Umständen das Messergebnis. Das WP 300 ist damit nicht mit schwerer gebauten, industriellen Werkstoffprüfmaschinen zu vergleichen.

In Abb. 30 sind jene Bauteile rot hervorgehoben, die durch ihre eigene elastische Verformung die Messungen beeinflussen (**Gunt 2020**). Diese Nachgiebigkeit kann, wie in Kap. 2.1.6 beschrieben, durch die Berechnung der Maschiennachgiebigkeit K_B ausgeglichen werden.

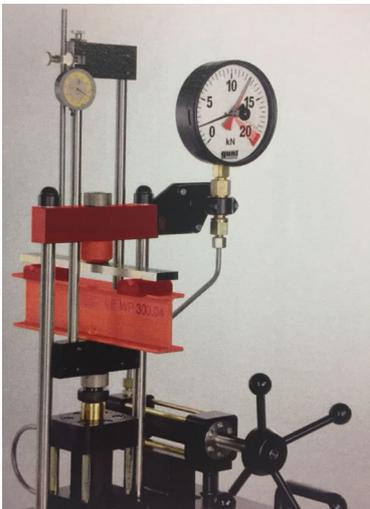


Abb. 30 Einfluss auf die Durchbiegung durch elastisch verformte Bauteile, in Rot (aus **Gunt 2020**)

Ein weiterer Einfluss auf das Messergebnis kann die Probe selbst sein. Es können Verunreinigungen oder Schwachstellen bei der Herstellung entstanden sein, die nicht sichtbar sind. Die daraus resultierenden Auswirkungen können das Messergebnis beeinflussen (**Ashby 2013**, Kap. E)

Bei der Versuchsdurchführung konnte beobachtet werden, dass der 3PB-Stempel nicht waagrecht zu den Proben lag (s. Abb. 31). Es gab einen deutlich sichtbaren Spalt. Bei der 4PB-Vorrichtung konnte aufgrund der beiden Schienen, die aus technischen Gründen der Konstruktion einen kleinen Freiraum ($\sim 1\text{mm}$) haben, kein Spalt erkannt werden.



Abb. 31 Spalt zwischen Probe und 3PB-Stempel (eigene Darstellung)

Auch das rechtwinklige Ausrichten des 3PB Stempels ist ohne Hilfsmittel nicht möglich. Es gibt keine Markierungen, die eine exakte rechtwinklige Position gewährleisten.

Das manuelle Positionieren der Auflager ist fehlerbehaftet. Die Auflagerbasis ist mit einer Skala versehen, dennoch gibt es keine Methode zur Befestigung. Dadurch ist es beim Positionieren der Probe oder bei Belastungen zu einer leichten Verschiebung möglich.

Bei der Versuchsdurchführung ist aufgefallen, dass die angezeigte max. Kraft F_{max} auf der Kraftanzeige nicht mit dem Wert in der Software übereinstimmt. In manchen Versuchsreihen konnte eine Differenz von bis zu 1kN beobachtet werden.

Beim Positionieren der Proben auf den Auflagern konnte beobachtet werden, dass die Auflagerbasis nicht symmetrisch an der Untertraverse befestigt ist. Bei genauer Betrachtung der Auflagerbasis zeigte sich, dass die Bohrung zur Befestigung an der Untertraverse nicht mittig ist (s. Abb. 32). Diese Verschiebung des Auflagers wirkte sich auf das Positionieren der Probe aus. Ob dadurch das Ergebnis beeinflusst wurde, konnte nicht geklärt werden.



Abb. 32 Unsymmetrische Bohrung der Auflagerbasis, Ansicht v. unten (eigene Darstellung)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Desweiteren konnte bei der Versuchsdurchführung beobachtet werden das ein Metallisches klingen zu hören war. Dieses Geräusch war bei Annäherung der max. kraft F_{max} zu hören. Es konnte nicht genau bestimmt werden, ob es von der Probe oder vom Prüfgerät selbst stammte. Ausgehend davon, dass das Geräusch von der Probe ausging, könnte es ein erstes Zeichen dafür sein, dass die wiederholten Belastungen das Material schwächen. Dies kann bei häufigeren Messversuchen dazu führen, dass die Abweichung der Ergebnisse steigt (**Gunt 2020**).

Die Auswertung hat gezeigt, dass die konstruierten 4PB-Vorrichtung der 3PB-Vorrichtung gleichwüdig sind. Nach Durchführung der Messreihen, waren erste Verschleißspuren an der 4PB-Vorrichtung zu erkennen. Das Material zeigte erste Druckstellen, die durch Belastungen über den Schlitten verursacht worden sind. Es sind kleine Druckstellen, diese könnten aber nach häufiger Benutzung sich stärker ausprägen.

Die Schlitten wurden aus einem Rechteckstahlrohr geschnitten. Aus konstruktionsgründen, wie in Kap. 3.6.1 beschrieben, konnten die Druckpunkte nicht mittig unter den Schlitten angebracht werden. Dies hatte zur Folge, dass der Schlitten einseitig belastet worden ist. Was zu Druckstellen auf der Schiene führte. Es kam soweit, dass sich die Schlitten in der Schiene verkeilten und nur durch ein leichtes Klopfen, am Gestell des WP 300, sich voneinander lösten.

Die Schweißnaht zeigte nach allen Untersuchungen keine Rissbildung oder Abbruch auf. Dennoch ist zu erkennen, dass beim Schweißen die Schweißnaht nicht vollständig zwischen dem Druckpunkt und dem Schlitten ausgefüllt worden ist. Bei Belastungen bis 20 kN sollte es keine direkte Auswirkung haben, aber durch eine ständige Benutzung könnte die Schweißnaht zu einer Schwachstelle in der Konstruktion werden.

Literaturverzeichnis

Alle Online-Referenzen wurden am 14.07.2020 oder später vom Internet bezogen

- Ashby 2013** ASHBY, M.F.; JONES, D.R.H.: *Werkstoffe 1: Eigenschaften, Mechanismen und Anwendungen*. 3.Auflage Fachbuch Springer Spektrum 2013
- DIN EN ISO 14125** DIN EN ISO 14125:1998 + AC:2002 + A1:2011. *Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften*
- DIN EN ISO 7438** DIN EN ISO 7438:2016. *Metallische Werkstoffe – Biegeversuch*
- DIN EN ISO 178** DIN EN ISO 178:2019. *Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften*
- Duden 2020a** URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Aufbau>
- Duden 2020b** URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Biegevorrichtung>
- Gross 2013** GROSS, D.; HAUGER, W.; SCHRÖDER, J.; WALL, W.A.: *Technische Mechanik 1 Statik*. 12.Auflage Fachbuch Springer 2013
- Gross 2014** GROSS, D.; HAUGER, W.; SCHRÖDER, J.; WALL, W.A.: *Technische Mechanik 2 Elastostatik*. 12.Auflage Fachbuch Springer 2014
- Gunt 2020** G.U.N.T. – Hamburg Gerätebau GmbH: *Versuchsanleitung, Version 1.3*
- Hermann 2020** URL: <https://www.herrmann-buntmetall.de/files/layout/downloads/werkstoffinformationen/CuZn39Pb3.pdf>
- Klöckner 2020** URL: <https://facts.kloeckner.de/werkstoffe/aluminium/3-3206/>
- MBW 2020** URL: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/25-spannungs-dehnungs-diagramm>
- Spura 2019a** SPURA, C.: *Einführung in die Balkentheorie nach Timoshenko und Euler-Bernoulli*. 1.Auflage Fachbuch Springer 2019
- Spura 2019b** SPURA, C.: *Technische Mechanik 2. Elastostatik*. 1.Auflage Fachbuch Springer 2019
- Stahlsorten 2020** URL: <https://www.weltstahl.com/werkstoff-s235jrcc-s235jrar-s235jrn/>

Schütz 2020	URL: https://www.schuetz-licht.de/anwendungen/biegeversuch/370/iso-178-biegeversuch-kunststoff/
PSM 2020a	URL: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Biegemodul
PSM 2020b	URL: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Biegeversuch
Wortbedeutung 2020a	URL: https://www.wortbedeutung.info/Entwurf/
Wortbedeutung 2020b	URL: https://www.wortbedeutung.info/Erprobung/
Zwick/Roell 2020a	URL: https://www.zwickroell.com/de-de/papier-pappe/papier/2-punkt-biegeversuch
Zwick/Roell 2020b	URL: https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_br/industry-brochures/99_290_pruefmaschinen_und_pruefsysteme_fuer_papier_pappe_und_tissues_d_de.pdf
Zwick/Roell 2020c	URL: https://www.zwickroell.com/de-de/composites/zugversuch-druckversuch-biegeversuch/biegeversuch

Anhang A Messergebnisse

4PB																	
ALUMINIUM																	
W 100			F _{max} 5,376			W 200			F _{max} 2,688			W 300			F _{max} 1,792		
			mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN	
1	0,5	5,399	0,5	5,399	1	1,2	2,599	1	1,2	2,599	1	2,7	1,842	1	2,1	1,874	1
2	0,5	5,398	0,4	5,394	2	1,3	2,603	2	1,3	2,603	2	2,5	1,74	2	1,9	1,707	2
3	0,5	5,408	0,4	5,397	3	1,3	2,791	3	1,3	2,791	3	2,7	1,869	3	2,1	1,873	3
S 100			max 17,92			S 200			max 8,96			S 300			max 5,973		
			mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN	
1					1						1			1			
2					2						2			2			
3					3						3			3			
MESSING																	
W 100			F _{max} 6,144			W 200			F _{max} 3,072			W 300			F _{max} 2,048		
			mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN	
1	0,4	6,196	0,4	6,196	1	1,2	3,197	1	1,2	3,197	1	2,1	1,966	1	1,6	1,998	1
2	0,4	5,994	0,4	5,994	2	1,1	3,001	2	1,1	3,001	2	2,1	1,959	2	1,6	1,998	2
3	0,4	6,2	0,4	6,2	3	1,1	3	3	1,1	3	3	2,1	1,954	3	1,6	1,999	3
S 100			max 20,48			S 200			max 10,24			S 300			max 6,827		
			mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN	
1					1						1			1			
2					2						2			2			
3					3						3			3			
STAHL																	
W 100			F _{max} 9,024			W 200			F _{max} 4,512			W 300			F _{max} 3,008		
			mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN	
1	0,5	8,995	0,5	9,197	1	0,9	4,597	1	0,9	4,597	1	1,7	2,997	1	1,4	2,997	1
2	0,5	8,992	0,5	8,997	2	0,9	4,598	2	0,9	4,598	2	1,7	2,997	2	1,3	2,997	2
3	0,5	8,997	0,5	8,997	3	0,9	4,596	3	0,9	4,596	3	1,7	3,001	3	1,3	2,997	3
S 100			max 30,08			S 200			max 15,04			S 300			max 10,03		
			mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN		mm	kN	
1					1						1			1			
2					2						2			2			
3					3						3			3			

ALUMINIUM		3PB			4PB		
Erste Messung W	mm	100	200	300	100	200	300
Elastizitätsmodul E	kN/mm ²	39,00	57,94	67,97	36,15	55,71	64,52
Zweite Messung S	mm	100	200	300	100	200	300
f _{calc.}	mm	x	x	x	x	x	x
f _{up}	mm	x	x	x	x	x	x
f _e	mm	x	x	x	x	x	x
K _B	mm/kN	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
f _{cor}	mm	0,24	1,17	2,42	0,14	0,87	2,01
E_{cor}	kN/mm²	81,16	64,62	70,33	103,15	63,68	67,42
Diff. zur Literatur	kN/mm ²	-12,16	4,38	-1,33	-34,15	5,32	1,58
Diff. in %	%	-17,6	6,3	-1,9	-49,5	7,7	2,3

MESSING		3PB			4PB		
Erste Messung W	mm	100	200	300	100	200	300
Elastizitätsmodul E	kN/mm ²	44,82	78,94	91,42	41,50	80,35	90,42
Zweite Messung S	mm	100	200	300	100	200	300
f _{calc.}	mm	x	x	x	x	x	x
f _{up}	mm	x	x	x	x	x	x
f _e	mm	x	x	x	x	x	x
K _B	mm/kN	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
f _{cor}	mm	0,20	0,96	2,01	0,10	0,66	1,50
E_{cor}	kN/mm²	110,31	90,89	95,74	163,62	98,06	96,22
Diff. zur Literatur	kN/mm ²	-13,31	6,11	1,26	-66,62	-1,06	0,78
Diff. in %	%	-13,7	6,3	1,3	-68,7	-1,1	0,8

STAHL		3PB			4PB		
Erste Messung W	mm	100	200	300	100	200	300
Elastizitätsmodul E	kN/mm ²	65,08	147,76	172,33	48,23	140,73	166,93
Zweite Messung S	mm	100	200	300	100	200	300
f _{calc.}	mm	x	x	0,42	x	x	0,42
f _{up}	mm	x	x	0,90	x	x	0,90
f _e	mm	x	x	0,48	x	x	0,48
K _B	mm/kN	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
f _{cor}	mm	0,07	0,68	1,56	0,07	0,48	1,16
E_{cor}	kN/mm²	489,38	195,99	188,35	363,42	205,85	187,84
Diff. zur Literatur	kN/mm ²	-279,38	14,01	21,65	-153,42	4,15	22,16
Diff. in %	%	-133,0	6,7	10,3	-73,1	2,0	10,6



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Güler

Vorname: Osman

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwurf, Aufbau und Erprobung einer Biegevorrichtung

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

12.10.2020

Datum

[Signature]
Unterschrift im Original