

# Mechanische Eigenschaften und die Optimierung von orthopädischen Schuheinlagen

Fakultät Life Sciences  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

## Abschlussarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science

Vorgelegt von

**Prianka Pulendran**



im Februar 2022

- 1. Gutachter: Prof. Nicholas Bishop
- 2. Gutachter: Prof. Dr. med. Claus Heinrich Siemsen

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Abschlussarbeit selbstständig ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche einzeln kenntlich gemacht.

Diese Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden und auch nicht veröffentlicht worden.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

---

Ort, Datum, Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung .....	I
Inhaltsverzeichnis .....	II
Tabellenverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	V
1 Einleitung .....	1
2 Theoretische Grundlagen .....	3
2.1 Medizinischer und Physiologischer Hintergrund.....	3
2.2 Stützende Einlagen.....	4
2.3 Material .....	4
2.4 Verbundwerkstoffe .....	5
2.4.1. Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe (CFK).....	6
2.4.2 Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK).....	6
2.5 Mechanischer Hintergrund.....	6
2.5.1 Elastizitätsmodul .....	7
2.5.2 Hysterese .....	8
2.5.3 Steifigkeit .....	9
2.6 Randbedingungen .....	10
2.6.1 Kraftbelastung auf einem Balken.....	10
2.6.2 Druckbelastung auf Balken .....	12
2.7 3-Punkt Biegeversuch .....	15
3 Material und Methoden .....	17
3.1 Experiment Einlagen.....	17
3.1.1 Materialien .....	17
3.1.2 Versuchsaufbau Experiment Einlagen .....	23
3.1.3 Testdurchlauf der Methode .....	24
3.2 Sollwert-Berechnung .....	26
3.3 Modell Aufstellung .....	27
3.3.1 Bestimmung Materialeigenschaften: 3-Punkt Biegeversuch .....	27
3.3.2 Verwendung des Modells .....	30
3.4 Beziehungsaufbau <b>Pu</b> .....	31
4 Ergebnisse .....	33
4.1 Experiment Einlagen.....	33
4.1.1 Experimentdurchführung .....	33
4.1.2 Steifigkeitsbestimmung.....	39
4.1.3 Sollwert-Berechnung.....	42
4.2 Das Modell.....	44

---

4.2.1	Bestimmung Materialeigenschaften: 3-Punkt Biegeversuch .....	44
4.2.2	Verwendung des Modells .....	47
4.3	Validierung des Modells .....	48
4.4	Beziehungsaufbau <b>Pu</b> .....	53
5	Diskussion .....	56
5.1	Experiment Einlagen.....	56
5.2	Sollwert-Berechnung .....	58
5.3	Modell.....	59
5.3.1	Bestimmung Materialeigenschaften: 3-Punkt Biegeversuch .....	59
5.3.2	Validierung des Modells .....	62
5.4	Beziehungsaufbau <b>Pu</b> .....	63
5.5	Bewertung des Modells.....	63
6	Fazit und Ausblick.....	65
Anhang	.....	67
A	Skizze Adapter Prüfsystem .....	67
B	Experiment Einlagen.....	68
C	Sollwert Berechnung.....	73
D	Werkstoffprüfung mit 3 - Punkt Biegeversuch.....	75
Literaturverzeichnis	.....	79

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Liste der getesteten Einlagen .....	18
Tabelle 2 Liste Werkstoffprüfung .....	28
Tabelle 3 Experiment Einlagen Diagrammübersicht.....	34
Tabelle 4. Graphische Bestimmung der Steifigkeit von Probe3, N7R und N7L.....	41
Tabelle 5 Graphische Bestimmung Gesamt- und Anfangssteigung für Einlagen $n > 1$ ...	41
Tabelle 6 Graphische Bestimmung Gesamt- und Anfangssteigung für Einlagen $n = 1$ ...	42
Tabelle 7 Graphische Bestimmung $F/u$ und $F_{max}$ (exemplarisch an N2L) .....	45
Tabelle 8 Berechnung E-Modul und Festigkeit (exemplarisch an N2L).....	46
Tabelle 9 Bestimmung der Werkstoffkenngrößen für die gesamte Materialprobe .....	46
Tabelle 10 Steifigkeit von den Einlagen berechnet durch das Model .....	48
Tabelle 11 Maximale Kraft berechnet für Einlage N2L durch das Model.....	48
Tabelle 12 Validierung Steifigkeiten Modelwerte gegen Messwerte .....	49
Tabelle 13 Validierung maximale Kraft Modelwert gegen Messwert an Einlage N2L .	49
Tabelle 14 Eingangsgrößen Model Beziehung $P/u$ .....	54
Tabelle 15 Berechnete Dicke von Einlagen für $u = 1$ .....	54
Tabelle 16 Berechnete Dicke von Einlagen für $u = 10$ .....	55
Tabelle 17 Berechneter maximale Druck von Einlagen von N2L.....	55

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Baustahl-Stab in einem Zugversuch (schematisch) (EnArgus, n.d.b).....	7
Abbildung 2: Randbedingung 1 - Zweifach gelagerter Balken mit Einzellast in der Mitte (eigene Darstellung).....	10
Abbildung 3: Randbedingung 1 - Freikörperbild zweifach gelagerter Balken (eigene Darstellung).....	10
Abbildung 4. Randbedingung 2 - Von beiden Seiten fest eingespannter Balken mit Einzellast in der Mitte (eigene Darstellung) .....	11
Abbildung 5. Randbedingung 2 - Freikörperbild zweifach eingespannter Balken (eigene Darstellung).....	12
Abbildung 6. Randbedingung 1 – Zweifach gelagerter Balken mit Druckbelastung (eigene Darstellung).....	13
Abbildung 7. Randbedingung 1 – Freikörperbild zweifach gelagerter Balken mit Druckbelastung (eigene Darstellung).....	13
Abbildung 8. Randbedingung 2 – Von zwei Seiten fest eingespannter Balken mit Druckbelastung (eigene Darstellung).....	14
Abbildung 9. Schematische Darstellung eines 3-Punkt-Biegeversuchs (Frick & Stern, 2017) .....	15
Abbildung 10. Probe 3 - CFK - Draufsicht .....	19
Abbildung 11. Probe 3 - CFK - Seitenansicht .....	19
Abbildung 12. Universalprüfmaschine Instron 5967 .....	20
Abbildung 13. Darstellung Bereich Verfahrenweg -5mm bis -25mm .....	22
Abbildung 14 Messvorrichtung-Einspannung - Darstellung Position der Einlage und Belastungsbereich .....	24
Abbildung 15 Versuchsaufbau Experiment Einlagen Testung.....	25
Abbildung 16 Materialzuschnitte 3 Punkt Biegung .....	27
Abbildung 17 Versuchsaufbau 3 - Punkt Biegung für E-Modul-Bestimmung .....	29
Abbildung 18 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N8L .....	34
Abbildung 19 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe5 .....	34
Abbildung 20 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe6 .....	35
Abbildung 21 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N8R .....	35
Abbildung 22 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N7R .....	35
Abbildung 23 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N7L .....	35
Abbildung 24 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe4 .....	36
Abbildung 25 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe3 .....	36
Abbildung 26 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N3L_2 .....	36
Abbildung 27 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N5L .....	36
Abbildung 28 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N3L_1 .....	37
Abbildung 29 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe7 .....	37

---

Abbildung 30 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N6R .....	37
Abbildung 31 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N4L .....	37
Abbildung 32 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe8 .....	38
Abbildung 33 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N2L .....	38
Abbildung 34 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe6,N8L,N8R Vergleich...	39
Abbildung 35 Graphische Bestimmung der Gesamt- und Anfangssteigung (Probe3)...	40
Abbildung 36 Graphische Gesamt- und Anfangssteigung (N7L) .....	40
Abbildung 37. Graphische Bestimmung der Gesamt- und Anfangssteigung (N7R) .....	41
Abbildung 38 Soll-Wert Bestimmung P/u (exemplarisch an Probe6_N8RL) .....	43
Abbildung 39 Soll-Wert-Bestimmung P/u N2L.....	43
Abbildung 40 Graphische Bestimmung für E-Modul und Festigkeit (exemplarisch an N2L).....	44
Abbildung 41 Graphische Bestimmung fürs E-Modul- Detailansicht (exemplarisch an N2L).....	45
Abbildung 42 Graphische Darstellung des E-Moduls für die gesamten Materialproben .....	47
Abbildung 43 Fehlerdarstellung 2 Modelsteifigkeiten gegen 2 Experimentsteifigkeiten .....	50
Abbildung 44 Fehlerdarstellung Modelsteifigkeit Randbedingung 1 gegen 2 Experimentsteifigkeiten .....	51
Abbildung 45 Graphische Darstellung Steifigkeiten nach Model und Experimentsteifigkeiten .....	52
Abbildung 46 Fehlerdarstellung 2 Modelkräfte gegen 2 Experimentkräfte.....	52
Abbildung 47 Elastizitätsmodul für Werkstoffe (Michael F. Ashby, 2013) .....	59
Abbildung 48 Festigkeit für Werkstoffe (Michael F. Ashby, 2013) .....	60

# 1 Einleitung

Ein menschlicher Körper wird von seinen Füßen getragen, sodass der physiologische und biomechanische Zusammenhang das Fundament seiner Statik bildet. Der anatomische Aufbau des Fußes ist mit seinen aktiven und passiven Strukturen und seiner nervalen Versorgung als komplex zu definieren und somit anfällig für Dysfunktion. (Grifka, 2021) Rund 70% der Erwachsenen leiden unter Fußbeschwerden, wobei die statischen Fußdeformitäten und damit die Ursachen variieren. (eurocom e.V., 2019)

Der erworbene Knick-Senk-Fuß, ist mit 46% die häufigste diagnostizierte Fußfehlstellung, die durch das Abflachen des medialen Längsgewölbe und dem Einknicken des Rückfußes ausgelöst wird. (eurocom e.V., 2020). Verursacht wird das Abflachen durch ein Defizit der aktiven Stabilisatoren, was wiederum zu einer Überlastung der passiven Strukturen führt. (Emmerich et al., 2003)

Eine stabile Aufrechterhaltung des Fußgewölbes ist damit für eine Schmerzfreiheit und für die Lebensqualität zu gewährleisten.

Um dies zu erreichen werden orthopädische Schuheinlagen als konservative Therapie eingesetzt, die stützende, entlastende und führende Eigenschaften aufweisen, um Patient\*innen, je nach Indikation, zu versorgen. Für die oben aufgeführte Deformität dient eine stützende Einlage dazu das Abflachen des Fußgewölbes und die damit verbundenen Schmerzen zu verhindern. Hierfür werden verschiedene Werkstoffkombinationen unter anderem aus Kunststoff, Kork und Leder verwendet um Patient\*innen individuell eine Therapiemöglichkeit zu bieten. Diese Form der Fußversorgung dient der Schmerzlinderung. (eurocom e.V., 2019)

Herr Prof. Dr. Siemsen beschäftigt sich als Orthopäde seit Jahrzehnten mit der Behandlung von Fußfehlstellungen und Fußbeschwerden. Mit dem Wunsch, den Fuß in seiner Anatomie zu stärken bzw. den physiologischen Erfordernissen Rechnung zu tragen, hatte Herr Prof. Dr. Siemsen die Idee kohlenstoffverstärkten Kunststoff (CFK) als Material zu wählen um die Eignung zur Activeinlage zu prüfen. Mit seinem geringen Gewicht und den vorteilhaften mechanischen Eigenschaften (hohe Steifigkeit und hoher Elastizitätsmodul), wie sie im Leichtbau und im Flugzeugbau erforderlich sind, würde es in der Patient\*innen Versorgung bspw. dazu beitragen, eine dünne Einlage herzustellen, die dem Fußverhalten folgen kann.



Um einen Zusammenhang zwischen den physiologischen Notwendigkeiten und den mechanischen Eigenschaften herstellen zu können, bedarf es klinische Bezugswerte, die nicht gegeben sind. So definiert sich diese Arbeit darin, diese Grundlage zu schaffen und beschäftigt sich mit den mechanischen Eigenschaften, die im Zusammenhang stehen mit der Werkstoffwahl. Es stellt sich die Frage, welche geometrischen und material-spezifischen Größen klinisch notwendig sind um Patient\*innen bei Beschwerden im Fußgewölbe zu versorgen. Da diese Werte nicht vorliegen, findet im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine Modellerstellung statt, mit dem ein analytisches Werkzeug geboten wird, das die Steifigkeit, also den Druck pro Verformung, des Einlage-Bogens in Bezug auf das Material und die Geometrie voraussagen kann.

Für die Modelausarbeitung wird in Bezug auf die Praxis die Druck pro Verformungs-Größe benötigt. Mit der erhaltenen Messvorrichtung war es experimentell nicht möglich die zu Verfügung gestellten Einlagen mit einem Druck zu belasten. So fand eine Model-Validierung hinsichtlich einer Punktlast statt. Es wurde experimentell die Steifigkeit  $\frac{F}{u}$ , also Kraft pro Verformung bestimmt. Unter Berücksichtigung von zwei Randbedingungen, wurden die Modelwerte durch die Messwerte validiert. Hiernach kann mit der Annahme, dass die logische Herleitung von  $\frac{F}{u}$  die Gleiche ist wie die von der Steifigkeit  $\frac{P}{u}$ , eine Beziehung zu der gewünschten Größe hergestellt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich damit das Zusammenspiel der mechanischen Parameter mit den klinischen Notwendigkeiten einer orthopädischen Einlage zum Ausdruck zu bringen.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Medizinischer und Physiologischer Hintergrund

Der Einsatz von orthopädischen Einlagen für die Behandlung von Fußbeschwerden ist vielseitig. So werden Kinder als auch Erwachsene mit ihnen versorgt, sei es um ausgelöste Schmerzen zu lindern oder einer Fehlstellung des Fußes entgegenzuwirken, um eine Korrektur dieser zu ermöglichen. Diese Fehlstellungen können aus verschiedenen Gründen verursacht werden, unter anderem durch die Fehlbelastung des Fußes, die Wahl von falschem Schuhwerk bis hin zu Erkrankungen, die neurologisch als auch physiologisch bedingt sein können. Orthopädische Einlagen als Mittel der konservativen Therapie haben die Funktion den Fuß zu stützen, zu korrigieren oder zu betten, je nach Ausprägung des Beschwerdegrads und dem Krankheitsbild der betroffenen Person. Die Wahl der Versorgung hängt somit von diversen Faktoren ab und wird für jeden Patienten individuell festgelegt. (eurocom e.V., 2019)

Je nach Bedürfnis und Indikation, ob eine stützende, bettende oder korrigierende Einlage erforderlich ist, werden verschiedene Werkstoffe wie z.B. thermoplastische Kunststoffe, Leder, Faserverbundstoffe kombiniert verwendet, um eine Einlage zu fertigen. (Schuh & Windhager, 2016)

Für diese Arbeit wurden Einlagen-Rohlinge aus Verbundwerkstoffen (kohlenstoffverstärkter- und glasfaserverstärkter Kunststoff) zum Testen zur Verfügung gestellt, die stützende Eigenschaften haben sollen. Darauf basierend wird im folgenden Kapitel ausschließlich auf die stützende Versorgungsart eingegangen unter Berücksichtigung einer möglichen Indikation, für die diese gewählt werden.

#### ***Knick-Senk-Fuß***

Das Zusammenspiel der aktiven (Muskeln, Bänder) und passiven Stabilisatoren (Knochen) sind für die schmerzfreie Aufrechterhaltung des menschlichen Fußes von großer Bedeutung. Getragen wird der Fuß vom vorderen Quer- und dem medialen Längsgewölbe. Die Erschlaffung der umgebenden Muskulatur und der Insuffizienz der Bänder, kann dazu führen, dass das Längsgewölbe absinkt. Ursache hierfür kann unter anderem das Tragen von falschem Schuhwerk sein, wobei der Fuß in seiner notwendigen Bewegungsfreiheit eingeschränkt wird und so die Muskelstrukturen nicht weiter ausgebildet

werden können. Das Absinken des Längsgewölbes kann dazu führen, dass das Fersenbein lateral wegknickt und so den inneren Rand des Fußes stärker belastet als den äußeren. In diesem Fall handelt es sich um einen sog. Knick-Senk Fuß. (Grifka, 2021)

Der zeitweilige Ausfall der aktiven Stabilisatoren führt ebenfalls zu einer Überlastung der passiven Strukturen, die ebenso die Absenkung des Längsgewölbes zur Folge hat. (Emmerich et al., 2003)

Um eine totale Abflachung zu verhindern, werden orthopädische Einlagen eingesetzt, um dem Längsgewölbe als Stütze zu dienen. So kann präventiv einem Plattfuß vorgebeugt werden. (eurocom e.V., 2019)

## **2.2 Stützende Einlagen**

Die orthopädische Schuhversorgung ist für die Behandlung bei Fußfehlstellungen und Gelenkbeschwerden von großer Wichtigkeit, um eine frühzeitige Entgegenwirkung einzuleiten und weitere Schäden vorzubeugen. Diese Therapieform ist Teil der passiven Behandlung, d.h. dass sie primär für die Schmerzbefreiung eingesetzt wird und keine korrigierende Wirkung hat. (eurocom e.V., 2019)

Die Verordnung von stützenden Einlagen kommt bei flexiblen Deformitäten oder degenerativen Auffälligkeiten in Frage. Das Ziel ist es die Strukturen im Mittelfuß-Bereich so abzustützen, dass eine physiologische Druckverteilung angenähert werden kann. (Schuh & Windhager, 2016)

Die durch das Absinken verursachten Beschwerden sollen mithilfe dieser orthopädischen Einlagen gemindert werden. Diese sollen den Gewölbestrukturen auch bei Belastung als Stütze dienen und diese Strukturen entlasten. (eurocom e.V., 2019)

## **2.3 Material**

Parameter, die die Werkstoffwahl einer orthopädischen Einlage beeinflussen, richten sich nach den Bedürfnissen des Patienten. Die therapeutische Vorgehensweise wird je nach Indikation differenziert, so auch die Festlegung der Materialkombination. Einlagen aus einem elastischen, weichbettenden Trägermaterial, werden – wie der Name verrät – zum Betten des Fußes verwendet. Stützende Einlagen werden hingegen vor allem ein-

gesetzt, um die Aufrechterhaltung der Fußform zu gewährleisten. Hier bedarf es einem rigideren Werkstoff als Kernmaterial, welches selbsttragende, formstabile, aber auch anpassbare Eigenschaften aufweisen sollte. (eurocom e.V., 2019)

Für die Herstellung der maßgefertigten Einlagen, kann auf organische Werkstoffe und Kunststoffe zurückgegriffen werden. Unter organischen Werkstoffen versteht man die Verwendung von Leder, Kork, Filz und Gummi, die wärme- und kälteisolierend sind. Zusätzlich sind orthopädische Einlagen mit solchen organischen Werkstoffen mit ihren verformbaren und weichelastischen Eigenschaftsmerkmalen gut für den Tragekomfort in der Schuhversorgung geeignet. Allerdings ist ein schneller Verschleiß dieser Materialien zu erwarten, sodass diese nur selten als alleiniges Material ihren Einsatz finden. Stattdessen werden sie in Verbindung mit anderem Trägermaterial eingesetzt. Hierfür stehen unter anderem thermoplastische Kunststoffe, Faserverbundstoffe (CFK, GFK) darunter stabilisierende Werkstoffe wie Gießharz-Karbon-Faser-Lamine zur Verfügung. (Stinus & Weber, 2005)

## **2.4 Verbundwerkstoffe**

Verbundwerkstoffe sind – wie der Name verrät – Werkstoffe, die aus der Kombination verschiedener Materialien resultieren. Das bedeutet, dass nicht nur eine einzelne Komponente einer Werkstoffhauptgruppe mit seinen Eigenschaften genutzt werden kann, sondern durch die Verbindung verschiedener Materialien, technisch vorteilhafte Eigenschaften erzielt werden können.

So werden beispielsweise Gläser, Polymere und Kohlenstofffasern als Ausgangsstoffe verwendet, um Faserverbundwerkstoffe oder Schichtverbundwerkstoffe herzustellen. Im ersten Fall handelt es sich um die Einarbeitung in den Ausgangsstoff, beim letzteren werden mehrere Schichten übereinander gelegt. Der Nutzen dieser Kombinationsmöglichkeiten ist vielseitig und reicht vom Flammenschutz bis hin zum Erreichen von gewünschten mechanischen Eigenschaften.

Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe sind eines der bekanntesten Verbundwerkstoffe. (EnArgus, n.d.d)

### 2.4.1. Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe (CFK)

Um einen Verbundwerkstoff mit Kohlenstofffaser in Verbindung zu bringen, werden diese mit verschiedenen Webstrukturen in eine Kunststoffmatrix eingearbeitet. Die Kohlenstofffasern sind durch ihre vorteilhaften mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Mit ihrer hohen Steifigkeit in Verbindung mit dem geringen Gewicht und der guten thermischen Leitfähigkeit, werden sie beispielweise im Leichtbau eingesetzt. (EnArgus, n.d.c)

Die Vorteile von Kohlenstofffasern sind vielfältig. Mit diesen konnten sie sich bereits in verschiedenen Bereichen, wie im Flugzeugbau, beweisen. Die Steifigkeit ist höher als die von den bisher bekannten Polymeren. Dabei ist die Festigkeit mit der von Stahl vergleichbar. Daraus lässt sich ableiten, dass der E-Modul hoch ist. (Lengsfeld et al., 2019)

### 2.4.2 Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)

Als GFK wird ein Verbundstoff bezeichnet, der sich durch eine hohe mechanische Festigkeit auszeichnet. Seine Festigkeit erhält der GFK durch die Ordnung eines Glasfasergerüsts, welches in eine Kunststoffmatrix eingebettet ist. Generell ist diese Ordnung, wie z.B. bei Geweben, vorgegeben oder wird während der Verarbeitung erzeugt. Durch die Tränkung mit einem Reaktionsharz erfolgt die Fixierung des Fasergerüsts.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Hinsichtlich der Einsatzbedingungen von GFK reagieren Gläser mit hinreichender Genauigkeit in Übereinstimmung mit dem Modell des ideal-elastischen Körpers. Der Zusammenhang zwischen einer Belastung und die daraus resultierende Verformung kann entsprechend mit dem Hooke'schen Gesetz beschrieben werden. (Thiebing & Enderle, n.d.)

## 2.5 Mechanischer Hintergrund

Im Folgenden werden die notwendigen Größen der Mechanik und der Festigkeitslehre erläutert, die für die auf Weiteres für diese Arbeit verwendet werden. So wird das Modell unter Berücksichtigung von zwei Randbedingungen an einem Balken vorgestellt. Es

geht dabei hervor, dass materialspezifische Kenngrößen erforderlich sind, die mit einem Versuch ermittelt werden konnten.

### 2.5.1 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul  $E$  beschreibt das Verhältnis zwischen der Spannung  $\sigma$  und der Dehnung  $\varepsilon$  eines Körpers, die daraus resultiert. Festgehalten werden kann dies durch die folgende Formel:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Der Elastizitätsmodul, auch E-Modul genannt, beschreibt einen Materialkennwert, welcher mit der Einheit  $\frac{N}{mm^2}$  bzw.  $MPa$  angegeben wird.

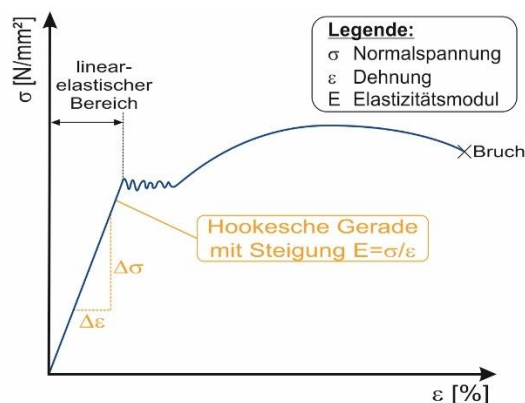


Abbildung 1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Baustahl-Stab in einem Zugversuch (schematisch)  
(EnArgus, n.d.b)

Der Abbildung 1 ist ein schematisches Spannungsdiagramm eines Zugversuchs an einem aus Baustahl bestehenden Stabes zu erkennen. Die y-Achse beschreibt die Spannung, die erforderlich, um eine prozentuale Dehnung bzw. Verformung des Werkstoffes zu verursachen, die auf der x-Achse abzulesen ist. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen, kann mithilfe der Steigung im linearen Bereich, dem elastischen Bereich, bestimmt werden. So ist eine graphische Ermittlung des E-Moduls  $E$  möglich.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

Mit der Formel für die Spannung und der Formel für die Dehnung wird folgender Zusammenhang gestellt:  $\sigma = \frac{F}{A}$  und  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ .

So erhalten wir durch das Einsetzen in die Formel des E-Moduls und dem Umstellen, eine Funktion für die Bestimmung für die durch die Zugkraft verursachte Längenänderung, die der Stab erfährt.

$$\Delta l = \frac{F \cdot l_0}{E \cdot A} \quad (4)$$

$F$  ist hierbei die Kraft, die auf einen Stab einwirkt, während  $A$  die Querschnittsfläche des Stabes beschreibt.  $l_0$  ist die Länge des Stabes in Ruhelage und  $\Delta l$  beschreibt eben die Längenänderung des Stabes, die mit der Kraft einhergeht.

Der E-Modul ist der Materialkennwert von Werkstoffen. Dieser wird als Quotient der Normalspannung zugehörig zur jeweiligen Dehnung bei der Verformung eines bestimmten Materials definiert. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Verformung im linear-elastischen Werkstoffbereich stattfindet, was bedeutet, dass in diesem die Verformung rückgängig ist. Bei Entlastung eines jeweiligen Werkstoffes, kann diese Verformung wieder abgebaut werden. Die Ermittlung des E-Moduls ist vom Werkstoff abhängig. Die Widerstandsfähigkeit eines Materials ist gegenüber der Verformung umso größer, je größer der E-Modul eines Werkstoffes ist. (EnArgus, n.d.b)

### 2.5.2 Hysterese

Wenn bei der Verformung eines Stoffes, dass je nach Belastungsart (Zug oder Druck, kurz- oder lang, wiederholt oder einmalig), auffällt, dass eine Differenz zwischen der Be- und Entlastungskurve vorliegt, dann wird in der Mechanik von einer elastischen Hysterese gesprochen. Mit anderen Worten wird ein nicht-lineares Verhalten zwischen den beiden Kurven gelesen und liegt die Entlastungskurve unterhalb der Belastungskurve, so liegt ein bspw. relativer Kraft-Verlust vor. Die Ursachen der Differenzen können variieren, so kann bei einer Druckprüfung beispielsweise die Reibung zwischen Prüfprobe und Messvorrichtung ein Grund für einen Hysterese-Effekt sein. (Meschede, 2015)

### 2.5.3 Steifigkeit

Die Steifigkeit ist eine Größe aus der technischen Mechanik und beschreibt den Widerstand, den ein Körper gegen eine elastische Verformung durch eine von außen wirkende Kraft oder einen Drehmoment leisten kann. Die Steifigkeit hängt von Faktoren wie der Geometrie des Körpers und von den Materialeigenschaften ab. Je höher der Elastizitätsmodul ist, desto höher ist auch die Steifigkeit.

Hierbei ist, je nach Belastungsart, zwischen unterschiedlichen Formen der Steifigkeit zu unterscheiden, z.B. die Dehn-, Torsions- und Biegesteifigkeit. (Dlubal, 2021)

Die durch die Beanspruchung resultierende Verformung  $u$  [mm] hängt unter anderem von der Belastungsart ab. So ist es z.B. relevant, ob die Belastung eine Punktlast  $F$  [N] oder eine in Form eines Drucks  $P$   $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$  vorliegt. Auch die Lagerbedingungen beeinflussen die aus der Belastung resultierende Verformung. (Budynas & Sadegh, 2020)

Die Lager- bzw. Randbedingungen, die für diese Arbeit von Wichtigkeit sind, werden im Folgenden weiter erläutert.

Die Parameter, die ausschließlich der Geometrie des Körpers unterliegen, werden für beide Randbedingungen eingesetzt. Für einen Prisma-Prüfkörper gelten für das axiale Flächenträgheitsmoment  $I$  [mm<sup>4</sup>] und das Widerstandsmoment  $W$  folgende Gleichungen:

$$W = \frac{2 \cdot I}{t} = \frac{\hat{M}}{\hat{\sigma}} \quad (5)$$

$$W = \frac{2 \cdot I}{t} = \frac{\hat{M}}{\hat{\sigma}} \quad (6)$$

Hierbei sind  $d$  die Breite und  $t$  die Dicke des zu prüfenden Körpers. Hinzu kommt das Verhältnis des maximalen Drehmoments  $\hat{M}$  zur maximalen Spannung  $\hat{\sigma}$ , das für die darauffolgenden Rechnungen essenziell ist. (Frick & Stern, 2017)



## 2.6 Randbedingungen

### 2.6.1 Kraftbelastung auf einem Balken

Folgende Szenarien beschreiben die Krafteinwirkungen (Punktlast) auf den Balken bei verschiedenen Einspannbedingungen und die daraus resultierenden Formeln zur Bestimmung der Verformung des Balkens.

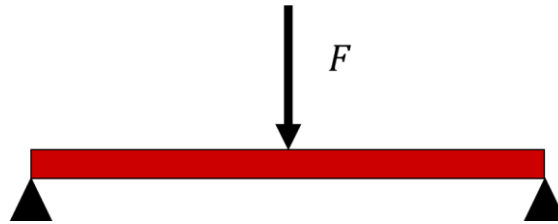


Abbildung 2: Randbedingung 1 - Zweifach gelagerter Balken mit Einzellast in der Mitte (eigene Darstellung)

In Abbildung 2 wird in der Mitte eines zweifach gelagerten Balkens eine Einzellast  $F$  ausgeübt. Die Randbedingung 1 definiert sich durch einen frei aufliegenden Körper. Die relevanten Größen sind aus dem Freikörperbild der Abbildung 3 zu entnehmen.

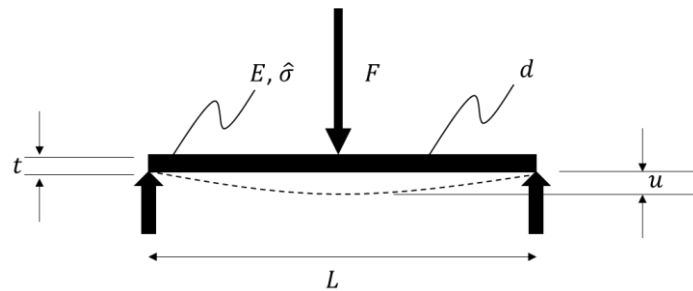


Abbildung 3: Randbedingung 1 - Freikörperbild zweifach gelagerter Balken (eigene Darstellung)

Die maximale Durchbiegung  $u$  wird für diese Fallbetrachtung folgendermaßen berechnet:

$$u = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (7)$$

Parameter  $L$  ist dabei der Auflageabstand und  $E$  beschreibt die Materialkenngröße des Elastizitätsmoduls.

Setzt man die auf den Balken einwirkende Kraft  $F$  und die Verformung  $u$  ins Verhältnis und die o.g. Formel für das Flächenträgheitsmoment  $I$  in die Gleichung ein, so erhält man für die Steifigkeit:

$$\frac{F}{u} = \frac{4 \cdot E \cdot d \cdot t^3}{L^3} \quad (8)$$

Größe  $d$  beschreibt dabei die Breite des Balkens.

Die maximale Kraft  $\hat{F}$  gilt im Zusammenhang mit dem maximalen Drehmoment  $\hat{M}$ :

$$\hat{M} = \frac{\hat{F} \cdot L}{4} \quad (9)$$

Setzt man die o.g. Formel für den maximalen Drehmoment  $\hat{M}$  in diese ein und stellt nach  $\hat{F}$  um, erhält man für die maximale Kraft:

$$\hat{F} = \frac{2 \cdot d \cdot t^2 \cdot \hat{\sigma}}{3 \cdot L} \quad (10)$$

In der zweiten Randbedingung ist der Balken, wie in Abbildung 4 dargestellt, an beiden Seiten fest eingespannt.

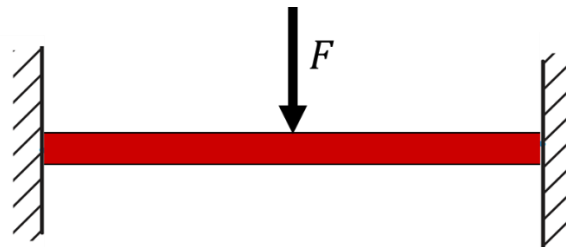


Abbildung 4. Randbedingung 2 - Von beiden Seiten fest eingespannter Balken mit Einzellast in der Mitte (eigene Darstellung)

Das dazugehörige Freikörperbild dieser Fallbetrachtung ist der Abbildung 5 zu entnehmen.

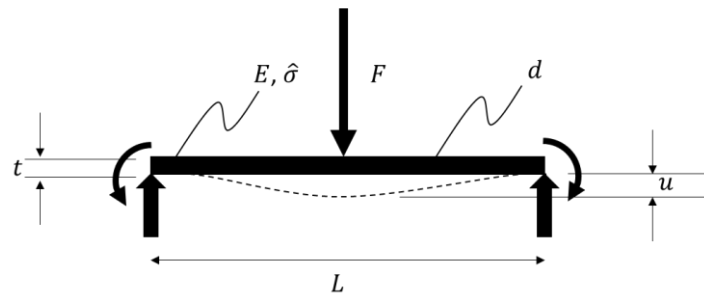


Abbildung 5. Randbedingung 2 - Freikörperbild zweifach eingespannter Balken (eigene Darstellung)

In diesem Fall erfolgt die Krafteinwirkung ebenfalls in der Mitte des Balkens. Die maximale Durchbiegung und die Steifigkeit bestimmen sich nun durch:

$$u = \frac{F \cdot L^3}{192 \cdot E \cdot I} \quad (11)$$

$$\frac{F}{u} = \frac{16 \cdot E \cdot d \cdot t^3}{L^3} \quad (12)$$

Und das Drehmoment sowie die maximale Kraft durch:

$$\hat{M} = \frac{\hat{F} \cdot L}{8} \quad (13)$$

$$\hat{F} = \frac{4 \cdot d \cdot t^2 \cdot \hat{\sigma}}{3 \cdot L} \quad (14)$$

### 2.6.2 Druckbelastung auf Balken

Handelt es sich bei der Belastung des Balkens um eine Einwirkung von Druck, spricht man von einer Flächenbelastung.

Die Steifigkeit beschreibt also das Verhältnis von Druck  $P$  und Verbiegung  $u$ .

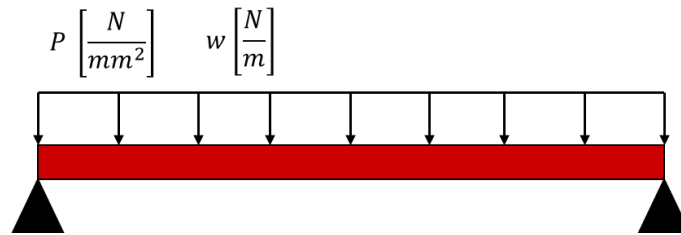


Abbildung 6. Randbedingung 1 – Zweifach gelagerter Balken mit Druckbelastung (eigene Darstellung)

In Abbildung 6 ist die Randbedingung 1 dargestellt, in der ein zweifach gelagerter Balken einer Flächenbelastung unterliegt. Hierbei ist  $w$  die Belastung pro Längeneinheit, die in mit dem Druck  $P$  folgendermaßen in Relation steht:

$$P = \frac{w}{d} \quad (15)$$

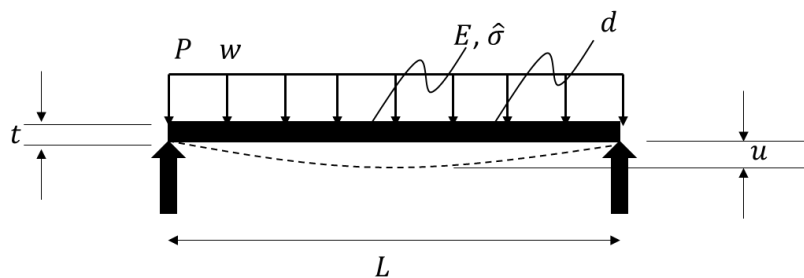


Abbildung 7. Randbedingung 1 – Freikörperbild zweifach gelagerter Balken mit Druckbelastung (eigene Darstellung)

Das zugehörige Freikörperbild aus Abbildung 7 zeigt wie eine über die Fläche einwirkende Kraft eine maximale Verformung  $u$  zur Folge hat, die wie folgt bestimmt werden kann:

$$u = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (16)$$

Durch das Einsetzen und der Vorgehensweise, die zuvor beschrieben wurde, erhalten wir letztlich:

$$u = \frac{5 \cdot P \cdot L^4}{32 \cdot E \cdot t^3} \quad (17)$$

So erhält man folgenden Zusammenhang für die Steifigkeit:

$$\frac{P}{u} = \frac{32 \cdot E \cdot t^3}{5 \cdot L^4} \quad (18)$$

Der maximale Druck  $\hat{P}$  kann mithilfe der Gleichung des maximalen Drehmoments  $\hat{M}$  bestimmt werden:

$$\hat{M} = \frac{\hat{w} \cdot L^2}{8} \quad (19)$$

$$\hat{P} = \frac{4 \cdot \hat{\sigma} \cdot t^2}{3 \cdot L^2} \quad (20)$$

Im Falle einer flächenbelastenden Einwirkung auf einen beidseitig fest eingespannten Balken ergibt sich der in Abbildung 8 dargestellte Sachverhalt.

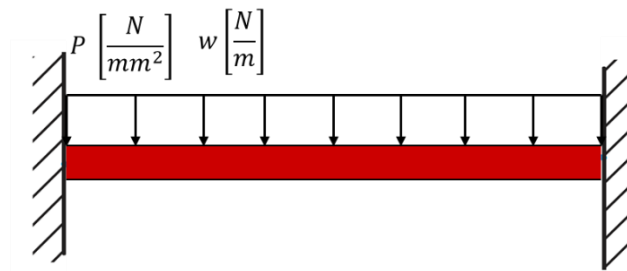


Abbildung 8. Randbedingung 2 – Von zwei Seiten fest eingespannter Balken mit Druckbelastung (eigene Darstellung)

Die maximale Durchbiegung  $u$  und die Steifigkeit bestimmen sich nun durch:

$$u = \frac{w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (21)$$

$$\frac{P}{u} = \frac{32 \cdot E \cdot t^3}{L^4} \quad (22)$$

Mit dem maximalen Drehmoment  $\hat{M}$  lässt sich der maximale Druck  $\hat{P}$  berechnen:

$$\hat{M} = \frac{\hat{w} \cdot L^2}{12} \quad (23)$$

$$\hat{P} = \frac{2 \cdot \hat{\sigma} \cdot t^2}{L^2} \quad (24)$$

(Budynas & Sadegh, 2020; Frick & Stern, 2017).

## 2.7 3-Punkt Biegeversuch

Um die mechanische Größe der Festigkeit und die Formänderungseigenschaften eines Kunststoffes bestimmen zu können, eignet sich der 3-Punkt Biegeversuch nach DIN EN ISO 178. Dabei wird eine Probe beispielsweise mit einem rechteckigen Querschnitt auf zwei parallel zueinanderstehenden Auflagern gelegt und mit einem Biegestempel in der Probemitte belastet. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2020)

Mit der Festigkeit wird die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes im Zusammenhang einer Druckbelastung angegeben. Um die Druckfestigkeit bestimmen zu können, wird das Verhältnis der Bruchlast pro Querschnittsfläche gebildet. Zu dem Zeitpunkt, bei dem diese Festigkeit überstiegen wird, wird ein lokales Versagen des Probeteils registriert. (EnArgus, n.d.a)

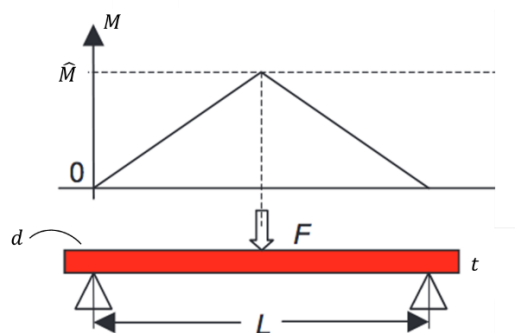


Abbildung 9. Schematische Darstellung eines 3-Punkt-Biegeversuchs (Frick & Stern, 2017)

Der Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegung wird in Abbildung 9 am Beispiel eines prismatischen Prüfkörpers dargestellt. Dabei ist  $F$  die Biegekraft, die an dem Punkt des

maximalen Biegemoments  $\hat{M}$  belastet. Parameter  $L$  ist der Auflagerabstand,  $t$  beschreibt die Dicke der Probe und  $d$  die Breite.

Unter der Berücksichtigung des maximalen Biegemoments  $\hat{M} = \frac{F \cdot L}{4}$  und dem Widerstandsmoment  $W = \frac{2 \cdot I}{t}$ , wobei  $I = \frac{d \cdot t^3}{12}$  das axiale Flächenträgheitsmoment für prisma-tische Körper ist, erhalten wir für die maximale Biegespannung  $\hat{\sigma}$  die folgende Gleichung:

$$\hat{\sigma} = \frac{\hat{M}}{W} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot d \cdot t^2} \quad (25)$$

Für das Errechnen der dimensionslose Randfaserdehnung  $\varepsilon$  gilt im Zusammenhang mit der gemessenen Durchbiegung  $u$  und den bereits bekannten Parametern  $L$  und  $t$  folgende Gleichung:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot u \cdot t}{L^2} \quad (26)$$

Setzt man die maximale Biegespannung  $\hat{\sigma}$  nun ins Verhältnis mit der Dehnung  $\varepsilon$ , so erhalten wir - wie bereits oben definiert - den Biegemodul. (Frick & Stern, 2017)

$$E = \frac{\hat{\sigma}}{\varepsilon} \quad (27)$$

$$E = \left(\frac{F}{u}\right) \cdot \frac{L^3}{4 \cdot d \cdot t^3} \quad (28)$$

Mithilfe dieser Beziehung kann die bedeutende Werkstoffkenngröße des Elastizitätsmoduls  $E$  berechnet werden. Diese wird im folgenden Kapitel erläutert.

## 3 Material und Methoden

Eine Einlage wird in der Praxis während ihres Einsatzes mit einer vom Fuß ausgehenden Druck- bzw. Flächenlast beansprucht. Mit den erhaltenen Utensilien war es nicht möglich eine experimentelle Testung über die gesamte Einlagen-Fläche durchzuführen. Sie wurden mit einer auf den Einlagen-Bogen wirkenden Punktlast getestet.

Das folgende Kapitel beschreibt die Umsetzung, um das adressierte Ziel zu erreichen. Hierfür wurde ein Experiment an den zu Verfügung gestellten Einlagen durchgeführt. Die hieraus gewonnene mechanische Größe wurde für die Validierung der Modelle verwendet.

Für die Anwendung des Models bedarf es experimentellen Größen, dem Elastizitätsmodul und die Festigkeit, die auf Grundlage der o.g. Theorie zu bestimmen sind.

So wird die aus dem Einlagen-Experiment bestimmte Größe mit dem aus dem Model für die Validierung in Relation gebracht.

In diesem Kapitel wird eine chronologische Vorgehensweise beschrieben, um eine Beziehung zwischen den Größen herzustellen, welches das Ziel widerspiegelt. Nämlich die der Steifigkeit  $\frac{F}{u}$ , die sich auf eine Punktlast bezieht, und die in der Praxis verwendeten Steifigkeit  $\frac{P}{u}$ , die eine Flächenlast pro Verformung beschreibt.

### 3.1 Experiment Einlagen

#### 3.1.1 Materialien

##### *Einlagen*

Um die Werkstoffprüfung der Materialien durchführen zu können, wurden die Gerätschaften des Biomechanik Labors der Hochschule für Angewandte Wissenschaften verwendet.

Für die Testdurchführungen wurden von Herrn Prof. Dr. Siemsen die zu prüfenden Einlagen zur Verfügung gestellt. Diese wurden von Herrn Günter Zierke, Meister für Or-



thopädie – Schuh-Technik, in der Spezialwerkstatt für neuzeitliche Orthopädie-Schuh-Technik hergestellt. Bestellt wurden die getesteten Materialien von der Perpedes GmbH, die sowohl orthopädische Einlagen als auch das für die Herstellung notwendige Rohmaterial anbieten. Eine Liste der geprüften Einlagen mit Information über Material, Kennnummer und Beschreibung bzw. Namensgebung, ist Tabelle 1 Liste der getesteten Einlagen zu entnehmen.

Tabelle 1 Liste der getesteten Einlagen

Nr.	Bezeichnung	Farbe	Material	Materialkennnummer nach Hersteller	Webstruktur	Seite	Dicke [mm]
a	Probe3	schwarz	CFK	8012463- 70C801	längs	links	0,96
b	Probe4	schwarz	CFK	8012463- 70C801	quer	rechts	0,93
c	Probe5	schwarz	CFK	8012464- 70C901	quer	links	0,53
d	Probe6	schwarz	CFK	8012464- 70C901	längs	rechts	0,58
e	Probe7	blau	CFK	8012459-70C202	längs	rechts	1,64
f	Probe8	blau	CFK	8012459-70C202	quer	links	1,77
g	N2L	schwarz	CFK	8012462	längs	links	1,93
h	N3L_1	blau	GFK	8012468	längs	links	1,3
i	N3L_2	blau	GFK	8012468	längs	links	1,16
j	N4L	schwarz	GFK	8012478	längs	links	1,68
k	N5L	weiß	GFK	8012474	längs	links	1,18
l	N6R	blau	GFK	1790431 B	längs	rechts	1,66
m	N7L	schwarz	CFK	8012463- 70C801	längs	links	0,86
n	N7R	schwarz	CFK	8012463- 70C801	längs	rechts	0,83
o	N8L	schwarz	CFK	8012464- 70C901	längs	links	0,47
p	N8R	schwarz	CFK	8012464- 70C901	längs	rechts	0,58

Insgesamt wurden 16 orthopädische Einlagen getestet, die sich in geometrischen und mechanischen Eigenschaften unterschieden. So variierten diese in ihrer Größe, der Dicke, der Ausrichtung der Webstruktur und der Wahl des Materials (CFK und GFK).

Die zu testenden Rohlinge waren keine fertigen Einlagen. Sie besaßen also weder Deck- noch Untermaterial, sondern waren Prototypen, die den Kern einer orthopädischen Einlage wiedergeben sollten.



Abbildung 10. Probe 3 - CFK - Draufsicht



Abbildung 11. Probe 3 - CFK - Seitenansicht

In den Tabelle 10 Steifigkeit von den Einlagen berechnet durch das Model ist Probe 3 zu Veranschaulichungszwecken von der Drauf- bzw. Seitensicht zu sehen. Die Seitensicht zeigt die für die Testdurchführung bedeutende Probe, da die Höhe sich für jede der Einlagen-Proben unterscheidet. Weitere Abbildungen sind dem Ergebnis-Kapitel zu entnehmen.

Die primär getesteten CFK Einlagen a bis f aus Tabelle 1 bildeten zusammen drei Paare, die sich in ihrer Dicke und der Materialzusammensetzung differenzierten. Jedes Paar bestand aus einer rechts bzw. links ausgerichteten Einlage, die sich wiederum in der Webstruktur unterschieden.

Die am zweiten Messtag vollzogenen Testungen wurden auf Wunsch von Herrn Prof. Dr. Siemsen nachträglich durchgeführt. Hierfür wurden weitere Einlagen-Rohlinge aus verschiedenen Materialien zu Vergleichszwecken zugeschickt (Tabelle 1).

Probe N7R und N7L, wurden als Wiederholung aus dem gleichen Material wie Probe 3 hergestellt, mit gleicher Geometrie und Webausrichtung mitgegeben.

Probe N8R und N8L sind aus dem gleichen Werkstoff, mit gleicher Dicke und Webstruktur wie Probe 6 und wurden auch zu Wiederholungs- und Vergleichszwecken bereitgestellt.

Auch die neu zugestellten Einlagen wiesen Unterschiede in ihrer Materialzusammensetzung und der Dicke auf. Allerdings zeigte sich ihre Gemeinsamkeit in der Ausrichtung der Webstruktur, da sie alle in Längsrichtung angefertigt wurden. Für die Gegenüberstellung wurden Rohlinge aus GFK Material hergestellt (Tabelle 1).

Um die vorliegenden Einlagen in ihren mechanischen Eigenschaften vergleichen zu können, wurden Testungen und Methoden ausgearbeitet.

### ***Das Gerät***

Für die Testdurchführung an allen Einlagen, wurde eine Instron 5967 Universalprüfmaschine verwendet, die Abbildung 12 dargestellt wird. Dieses Gerät eignet sich unter anderem dafür Zug-, Druck-, Torsions- und andere mechanische Prüfungen auszuführen.



Abbildung 12. Universalprüfmaschine Instron  
5967

Für die Experimente an den Einlagen war die Funktion der Kraftbelastung von Relevanz. Die Prüfmaschine hat eine Kraftmesszelle von 25 kN und misst mit einer Genauigkeit von 0,5%. (Instron, n.d.)

Das für die Experimente verwendete Prüfsystem Instron 5967 wurde unter Sicherheitsvorschriften im Biomechanik Labor der HAW Hamburg bedient. Innerhalb des Prüfsystems gab es an den Seiten Sicherheits-Stopper, die händisch vorweg eingestellt wurden, um beispielsweise bei fehlerhafter Ausführung einer Methode keine Gefahr hervorzurufen. Die Sicherheitsvorkehrungen waren vor jeder Ausführung zu berücksichtigen. Das Prüfsystem war mit einem Computer verbunden, über welchen die Einstellungen vorgenommen werden konnten. Mittels geräteeigener Software, die Bluehill Universal heißt, wurde eine Prüfmethode für die Experimente programmiert.

### ***Software und Methode – Experiment Einlage***

Die für das Prüfsystem zuständige Software Bluehill Universal stellt verschiedene Methoden-Möglichkeiten für diverse mechanische Prüfungen zur Verfügung. Für die Testung der Einlagen war eine Kraftmessung erforderlich. Mit der Software ist es möglich voreingestellte Methoden zu verwenden, aber auch eigene zu erstellen, sodass sowohl die Eingangs- als auch die Ausgangsgrößen individuell eingestellt werden können.

Im Zusammenhang mit dem Ziel, wurde manuell eine Methode erstellt. Mit der Überlegung, dass für jede Einlage eine Methode verwendet wird, um eine Wiederholbarkeit zu erreichen und die Bedingungen für alle Einlagen gleich sind, wurden mehrere Versuche und Pretests gestartet, um den Einfluss der verschiedenen Parameter zu berücksichtigen. Mithilfe der Pre-Tests wurde die Eingangsgröße als Kraft so bestimmt, dass jede Probe am höchsten Punkt des Bogens vom Stahlstift mit einer Geschwindigkeit von 6mm/s belastet wird. Die Methode wurde folgendermaßen definiert: M0\_Zyklus10. Der Stift ist mit einer Geschwindigkeit von 6mm/s ab- und aufwärts gefahren. Der zurückgelegte Weg des Stiftes wurde von -5mm bis -25mm eingestellt, wobei -5mm den Punkt beschreibt, der 5mm oberhalb der Platte der Messvorrichtung liegt. Abbildung 13

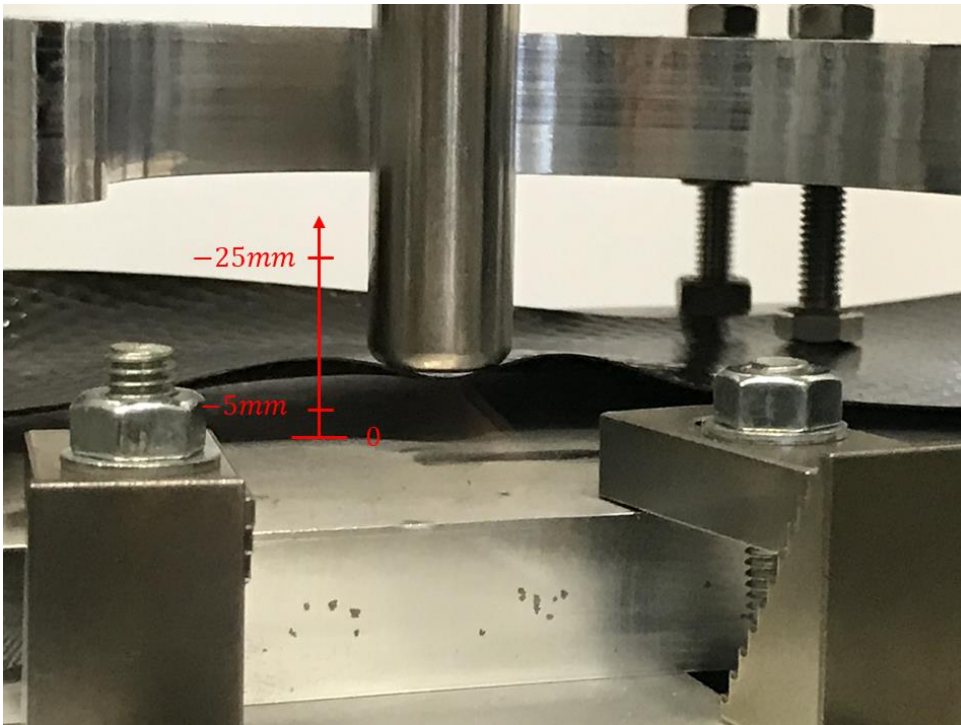


Abbildung 13. Darstellung Bereich Verfahrweg -5mm bis -25mm

Der Bezugspunkt von 5mm oberhalb der Stahlplatte spiegelte den Sicherheitsabstand wieder. So konnte ausgeschlossen werden, dass der Stift auf die Platte trifft. Der tatsächliche Verfahrweg lag somit bei 20mm. Die obere Grenze und somit der höchste Punkt der Methode, lag 25mm oberhalb der Messvorrichtung siehe Abbildung 13. Dieser Wert wurde ausgewählt, da die maximale Höhe des Bogens der Einlagen, der die Krafteinwirkung erfährt, unterhalb dieser Grenze lag. Diese Methode wurde mit zehn Zyklen definiert, sodass die eingespannte Probe pro Durchlauf für zehn Wiederholungen be- bzw. entlastet wurde.

Für die Datenerfassung wurde die Methode so definiert, dass alle 0,02 Sekunden ein Messwert dokumentiert wurde. Als Eingangsgröße, die im Anschluss für die Auswertung verwendet wurde, wurde die Kraft in N und diese im Zusammenhang mit der Ausgangsgröße dem zurückgelegten Weg in mm eingestellt.

### 3.1.2 Versuchsaufbau Experiment Einlagen

Bevor die Messungen stattfinden konnten, musste eine geeignete Messvorrichtung erstellt werden, sodass die Einlagen unter den gleichen Voraussetzungen wiederholt eingespannt werden konnten.

Mit der Intention, dass die Einlagen in einem bestimmten Bereich mit einer voreingestellten Geschwindigkeit punktuell belastet werden, wurde von Herrn Prof. Dr. Siemsen ein Stahlstift zur Verfügung gestellt, der diese Krafteinwirkung durchführte. Damit dieser Stift mit der Prüfmaschine verwendet werden konnte, wurde ein Adapter aus Stahl gebaut. (A Skizze Adapter Prüfsystem)

Hierfür wurde eine Skizze angefertigt, die mit ihren geometrischen Eigenschaften, der Werkstatt überreicht wurde, sodass der Adapter angefertigt werden konnte.

Das Gegenstück, auf dem die Einlage später eingespannt wurde, war eine Messvorrichtung, die von Herrn Prof. Dr. Siemsen zur Verfügung gestellt wurde. Diese Messvorrichtung bestand aus zwei Stahlplatten, die mittels Schrauben in Abstand gehalten wurden (siehe Abbildung 13). Die obere Stahlplatte ist an den Seiten zugeschnitten worden, sodass in dem ausgesparten Bereich die Belastung mittels Stahlstift stattfinden konnte. Die Stahlplatte wurde mit Schrauben versehen und sollte den Abstand zwischen den Platten gewährleisten, in dem sich die Einlage für das Experiment befand.

Drei Schrauben in der Mitte der Messvorrichtung dienten dazu, die Einlagen zwischen den Platten ein- bzw. auszuspannen, wie es in Abbildung 14 gezeigt ist.

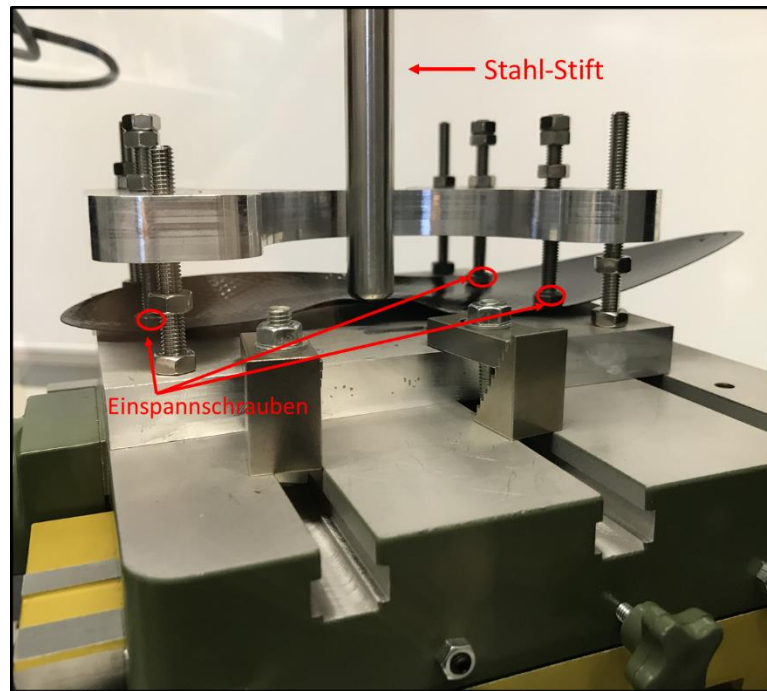


Abbildung 14 Messvorrichtung-Einspannung - Darstellung Position der Einlage und Belastungsbereich

Für die korrekte Positionierung der Messvorrichtung unterhalb des Stiftes, wurde diese auf ein in x- bzw. y-Richtung variierbaren Tisch (xy-Tisch) mittels Stufenspannpratzen befestigt. Damit dieser Tisch samt Messvorrichtung für die Experimente mit dem Universalprüfsystem verwendet werden konnte, musste für die Montage ein Adapter konzipiert und gebaut werden. Es wurde hierfür eine Skizze eines aus Stahl bestehenden Adapters erstellt, damit mit diesem eine Verbindung zu dem xy-Tisch hergestellt werden konnte. Diese Skizze ist dem Anhang zu entnehmen (siehe Anhang A Skizze Adapter Prüfsystem)

### 3.1.3 Testdurchlauf der Methode

Bevor die Rohlinge eingesetzt wurden, musste der Verfahrensweg kalibriert werden. Der Nullpunkt, der auf der Stahlplatte der Messvorrichtung liegt, musste vorher manuell eingestellt und definiert werden, da dieser als Bezugspunkt verwendet wurde, sodass ausgehend von dem die Methode mit dem Verfahrensweg zwischen -5mm und -25mm oberhalb des 0-Punktes fahren konnte (Abbildung 14/Abbildung 15). Mit Vorsicht wurde der Bedienknopf und der Feinregler verwendet, um den Stahlstift nach unten zu fahren bis vom Gerät ein Widerstand in Form von Kraft registriert wurde. In dem Moment

wurde der Verfahrenweg auf null gesetzt und die Messungen konnten durchgeführt werden.

Die Einlage wurde zwischen den beiden Stahlplatten mit den drei Schrauben von oben in die Messvorrichtung eingespannt (siehe Abbildung 14). Je nachdem, ob eine linke bzw. rechte Einlage getestet wurde, musste die Vorrichtung um 180° gedreht werden, die mit den Stufenspannpratzen an den x-y Tisch befestigt wurde. Die Schrauben wurden handfest auf die Probe gedreht.

Jede Einlage wurde drei Mal hintereinander mit der o.g. Methode ausgewertet. Zwischen den Durchläufen wurde eine zehn minütige Pause eingehalten, in der die Einlage abmontiert, auf äußerlich sichtbare Änderungen inspiziert und anschließend wieder in die Messeinrichtung gespannt wurde (siehe Abbildung 15).



Abbildung 15 Versuchsaufbau Experiment Einlagen Testung

Die Messdaten für jede Einlage mit  $n = 3$  Durchläufen wurden für die anschließende Auswertung in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel überführt und in einem Kraft-Verformungs-Diagramm ausgegeben.

Für jede Einlage wurde ein Kraft-Weg Diagramm erstellt. Über die Steigung dieser Kurven, konnte die Steifigkeit  $\frac{F}{u}$  abgelesen werden. Hier wurde zunächst die erste Belastungskurve betrachtet. Mithilfe von zwei Geraden wurde die Gesamtsteigung und die Anfangssteigung bestimmt. Zu Vergleichszwecken wurden zwei Steigungswerte abgelesen.



### 3.2 Sollwert-Berechnung

Die aus dem Einlagen-Experiment bestimmten Werte wurden mit dem folgenden gegebenen Ansatz in Verbindung gesetzt: Es soll ein gewünschter Druck von  $P = 10 \frac{N}{cm^2} = 0,1 \frac{N}{mm^2}$  herrschen, mit einer Verformung von  $u = \frac{1}{2} \cdot \text{Höhe des Bogens}$ . (C.H. Siemsen, persönliche Kommunikation, 17.02.22). Mit diesem Ansatz konnte ein Bereich für jede Einlage gezeigt werden, in dem die Einlage sich befinden sollte. Mit der Annahme, dass die zu belastende Fläche die Geometrie von:  $L = 80mm$  und  $d = 20mm$  hatte, konnte mit dem gegebenen Maßstab und der Formel für den Druck:

$$P = \frac{F}{L \cdot d} \quad (29)$$

die gewünschte Beziehung zwischen dem Druck  $P$  und der Verformung  $u$  hergestellt werden. So konnte ein Druck-Weg Diagramm erstellt werden.

Die Kraft  $F$  war der aus dem Einlagen Experiment ausgegebene Messwert.

Hierbei konnte eine horizontale Linie am gewünschten Druck  $P = 0,1 \frac{N}{mm^2}$  angezeigt werden. Eine vertikale Linie wurde an der Stelle eingefügt, wo die Verformung

$u = \frac{1}{2} \cdot \text{Höhe des Bogens}$  war. Die Höhe des Bogens jeder Einlage konnte aus dem Druck-Verformungs-Diagramm abgelesen werden. Diejenige Stelle, die die erste Kraft registrierte, beschrieb die Höhe. An dieser Stelle traf der Stahlstift nämlich auf die Einlage, sodass diese den höchsten Punkt darstellte und somit für die Höhe des Bogens verwendet werden konnte. Diese Höhe konnte nach dem Wunsch der Verformung durch 2 geteilt werden, sodass eine vertikale Verformungslinie für die gewünschte Verformung eingezeichnet werden konnte. Dieser Maßstab zeigte den Soll-Bereich an mit dem der Ist-Wert verglichen wurde. Diese Maßstabs-Berechnung wurde für jede Einlage durchgeführt. Wenn  $n > 1$  war (sprich, dass mehrere Ausführungen einer Einlage (z.B. Nr. a, m n, Tabelle 1) vorhanden waren), wurden die Mittelwerte dieser Messungen verwendet und anschließend in ein Druck-Verformungs-Diagramm überführt.

### 3.3 Modell Aufstellung

Um das Model unter Berücksichtigung der beiden Randbedingungen gegen die in den Testungen aufgenommenen Werte validieren und anwenden zu können, wurde die Größe der Steifigkeit  $\frac{F}{u}$  (s. Kapitel 2.5.2 Hysterese und 2.5.3 Steifigkeit).

Voraussetzung dafür war die Kenntnis über gewisse Materialkenngrößen. Diese waren, wie in den theoretischen Grundlagen beschrieben, über den 3-Punkt Biegeversuch zu bestimmen.

#### 3.3.1 Bestimmung Materialeigenschaften: 3-Punkt Biegeversuch

Der Elastizitätsmodul und die Festigkeit der Einlagen-Werkstoffe kann mit der in Kapitel (2.7 3-Punkt Biegeversuch) erläuterten Vorgehensweise bestimmt werden. Hierfür wurde das unbehandelte Plattenmaterial in 20mm x 100mm große Proben ( Abbildung 16) mit einer Handsäge zugeschnitten und die Dicke  $t$  mit einem Messschieber bestimmt. Dies war jedoch nicht für jedes Rohmaterial möglich, da hierfür die Reste verwendet wurden, nachdem die Einlagen Rohlinge aus den DIN A4 großen Platten geschnitten wurden. Aus dem übrig gebliebenen Werkstoff wurden – sofern möglich – drei 20mm x 100mm Proben ausgeschnitten, damit  $n = 3$  Testungen durchgeführt werden konnten um sie hinsichtlich der Reproduzierbarkeit vergleichen zu können.



Abbildung 16 Materialzuschnitte 3 Punkt Biegung

Tabelle 2 Liste Werkstoffprüfung

Bezeichnung	Webstruktur	Farbe	Materialkennnummer nach Hersteller	Material	Dicke <sub>Material</sub> [mm]	Anzahl <sub>Materialproben</sub>
WSP_Probe3_N7RL	längs	schwarz	8012463- 70C801	CFK	0,89	n=3
WSP_Probe6_N8RL	längs	schwarz	8012464- 70C901	CFK	0,54	n=3
WSP_Probe7	längs	blau	8012459-70C202	CFK	1,65	n=3
WSP_N2L	längs	schwarz	8012462-70C206	CFK	1,93	n=3
WSP_N3L	längs	blau	8012468-G421	GFK	1,01	n=1
WSP_N4L	längs	schwarz	8012478- BF7001	GFK	1,57	n=3
WSP_N5L	längs	weiss	8012474- GH701	GFK	1,07	n=6
WSP_N6R	längs	blau	1790431 B-G431	GFK	1,62	n=3
WSP_Probe4	quer	schwarz	8012463- 70C801	CFK	0,89	n=3
WSP_Probe5	quer	schwarz	8012464- 70C901	CFK	0,54	n=3
WSP_Probe8	quer	blau	8012459-70C202	CFK	1,62	n=3
WSP_N3L	quer	blau	8012468-G421	GFK	1,04	n=1

Für die Einlagen, die aus dem gleichen Material, der gleichen Geometrie und Webstruktur gemacht waren, wurde eine gemeinsame Werkstoffprüfung erstellt bzw. in einer zusammengefasst. Dies betraf folgende Materialien: WSP\_Probe3\_N7RL und WSP\_Probe6\_N8RL (Tabelle 2). Aus dem Material WSPN3L konnten lediglich zwei Proben der gewünschten Größe entnommen werden, dafür einmal mit längs- und einmal mit querausgerichteten Webstruktur. Aus der GFK-Materialprobe WSPN5L wurden zur Veranschaulichung und zu Vergleichszwecken  $n = 6$  Proben ausgeschnitten.

So wie die Einlagen mit der gleichen Methode getestet, wurde für die Materialprüfung eine neue Methode über die vom Prüfsystem verwendende Software eingestellt. Der Name dieser Methode war: Test1\_WSP. Hierbei wurde die Probe mit der Eingangsgröße der Kraft mit Geschwindigkeit von 1mm/s über einen Verformungsweg von 10mm einmal belastet und dann entlastet.

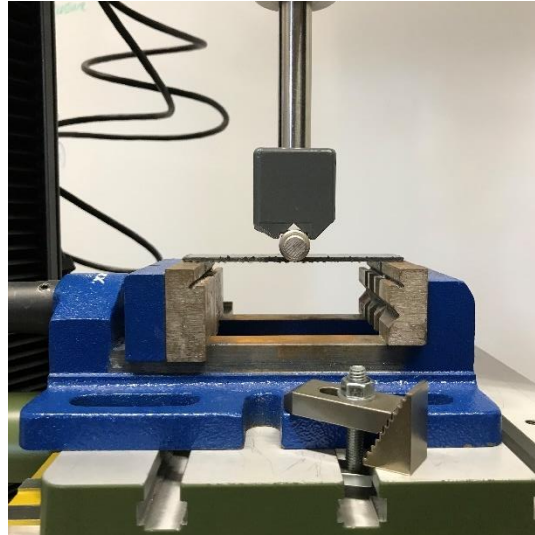


Abbildung 17 Versuchsaufbau 3 - Punkt Biegung für E-Modul-Bestimmung

Für die Datenbearbeitung wurde eine Messwerterfassung von 0,02s eingestellt. Als Ausgangsgröße wurde der Weg als Verformung ausgegeben, es wurde die Kraft über den zurückgelegten Weg aufgenommen, sodass eine Belastungs- und Entlastungskurve ausgegeben wurde.

Für den Versuchsaufbau wurde ein Schraubstock zentriert, unterhalb des Stahlstiftes mit der Betätigung des x-y Tisches positioniert und mit den Stufenspannpratzen an ihm befestigt. Der Abstand zwischen den Schraubbacken wurde auf  $L = 80\text{mm}$  eingestellt, sodass die Probe mit ihrer Länge von 100mm auf den Schraubstock gelegt wurde. Für den Belastungsvorgang wurde der Stift, wie aus Abbildung 17 zu entnehmen ist, so ausgerichtet, dass der Probenausschnitt in seiner Mitte be- und entlastet wurde.

Bevor die Methode Test1\_WSP ausgeführt wurde, musste ein Nullpunkt für den Verfahrweg kalibriert werden, sodass sichergestellt werden konnte, dass jeder Probenausschnitt die gleiche Verformung von 100mm erfährt. Ähnlich wie bei der Einlagentestung, wurde der Berührungspunkt zwischen Stift und Probe näherungsweise bestimmt, bis ein positiver Wert für den Kraftwert registriert wurde, indem der Abstand mit dem Knopf der Bedienung und dem Feinregler minimiert wurde. Sobald eine Änderung für die Kraft erkannt wurde, konnte diese Position als Bezugs- und somit als Startpunkt für die Messausführung genommen werden. Das Neueinstellen bzw. Kalibrieren des Nullpunktes war für jedes Material und jede der drei Testungen innerhalb einer Prüfung erforderlich.

Die erfassten Daten wurden für die Weiterverarbeitung und Auswertung in Microsoft Excel überführt. Die Messwerte der Testungen eines Materials wurden in ein Kraft-Weg-Diagramm überführt. Im linearen-elastischen Bereich konnte die Steigung bestimmt werden, mit der dann der jeweilige E-Modul  $E$  ermittelt wurde. Hierfür wurde die Trendlinien-Funktion verwendet, um eine graphische Bestimmung der Steigung zu ermöglichen. Wenn das Material versagte, ist ein Bruch im Diagramm zu erkennen: An dieser Stelle wurde die maximale Kraft  $\hat{F}$  für das Material abgelesen, sodass damit die Festigkeit  $\hat{\sigma}$  berechnet werden konnte. (Formel aus 2.7 3-Punkt Biegeversuch)

$$E = \left(\frac{F}{u}\right) \cdot \frac{L^3}{4 \cdot d \cdot t^3} \quad (30)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{3 \cdot \hat{F} \cdot L}{2 \cdot d \cdot t^2} \quad (31)$$

Wenn eine Materialprobe  $n > 1$  Testungen hatte, d.h. sofern es mehr als eine zugeschnittene Probe gab, wurde der Mittelwert des Elastizitätsmoduls bzw. der Festigkeit gebildet und für den folgenden Einsatz verwendet.

### 3.3.2 Verwendung des Modells

Der Elastizitätsmodul und die Festigkeit wurden somit für die Verwendung des Modells ermittelt. Diese Werkstoffkennwerte wurden dann in das Model eingefügt, um für die beiden in Kapitel 2.6.1 (Kraftbelastung auf einem Balken) beschriebenen Randbedingungen die jeweilige Steifigkeit  $\frac{F}{u}$  und wenn möglich, die maximale Kraft  $\hat{F}$  bis die Einlage versagte, zu bestimmen. Diese Werte sollten letztlich mit den aus dem Einlagen Experiment ermittelten Werten verglichen werden.

Für die geometrischen Größen des Belastungsbereichs der Einlage, wurden folgende Werte für den Auflageabstand  $L$  und die Breite  $d$  gewählt (s. Kapitel 2.6 Randbedingungen). Folglich wurden für  $L = 80mm$  und für  $d = 30mm$  eingesetzt. Die Dicke  $t$  wurde für jede Einlage mit einem Messschieber gemessen und verwendet.

So konnte für jede Einlage mit ihrem jeweiligen E-Modul, die Steifigkeit nach Randbedingung 1 für einen zweifach gelagerten eingespannten Balken

$$\frac{F}{u_{\text{Randbedingung1}}} = \frac{4 \cdot E \cdot d \cdot t^3}{L^3} \quad (32)$$

und für einen beidseitig fest eingespannten Balken (Randbedingung 2)

$$\frac{F}{u_{\text{Randbedingung2}}} = \frac{16 \cdot E \cdot d \cdot t^3}{L^3} \quad (33)$$

bestimmt werden.

Dies galt analog für die Festigkeit: Sofern das Material gebrochen war, konnte unter Berücksichtigung der Randbedingung die jeweilige maximale Kraft  $\hat{F}$ , bei der die Einlage nachgab, bestimmt werden.

Für Randbedingung 1:

$$\hat{F}_{\text{Randbedingung1}} = \frac{2 \cdot d \cdot t^2 \cdot \hat{\sigma}}{3 \cdot L} \quad (34)$$

Für Randbedingung 2:

$$\hat{F}_{\text{Randbedingung2}} = \frac{4 \cdot d \cdot t^2 \cdot \hat{\sigma}}{3 \cdot L} \quad (35)$$

### 3.4 Beziehungsaufbau $\frac{P}{u}$

Auf Grundlage der zuvor bestimmten Größen, konnte das Model für die Beziehung von  $\frac{P}{u}$  aufgestellt werden. So wurden die aus dem 3-PunktBiegeversuch ermittelten E-Module als Materialkenngröße für das Model verwendet. Die geometrischen Werte für den Auflageabstand  $L$  und der Breite  $d$  wurden gleich der obigen Vorgehensweise gewählt. Der Druck  $P$  wurde nach dem Sollwert von Druck  $P = 10 \frac{N}{cm^2}$  eingesetzt. Die Verformung  $u$  wurde basierend auf dem Mittelwert der Hälfte der Bogenhöhe bestimmt und eingesetzt. Mit diesem Ansatz war es möglich einen Zusammenhang mit den gewünschten Größen herzustellen. Mit der Verwendung der in Kapitel Theorie erwähnten Formeln für die Steifigkeit  $\frac{P}{u}$  und  $\hat{P}$ , konnte eine Vorhersage der notwendigen Größen hinsichtlich der Randbedingungen gemacht werden. Mit den oben bestimmten Werten konnte also mit bekannter Geometrie und Materialkenngröße eine Vorhersage über eine

notwendige Dicke gemacht werden. Hierfür wurden die Formeln (18 u. 22) für beide Randbedingungen nach der Größe  $t$  umgestellt.

$$t_{\text{Randbedingung1}} = \sqrt[3]{\frac{P \cdot 5 \cdot L^4}{u \cdot 32 \cdot E}} \quad (36)$$

$$t_{\text{Randbedingung2}} = \sqrt[3]{\frac{P \cdot L^4}{u \cdot 32 \cdot E}} \quad (37)$$

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die oben beschriebene Methodik ausgewertet wiedergespiegelt. Es wird zum Ausdruck gebracht, was während der einzelnen Messungen beobachtet und protokolliert wurde. Dieses Kapitel ist in drei Abschnitte gegliedert. Zuerst werden die Ergebnisse des Einlagen Experimentes mit der zugehörigen Maßstabsberechnung gezeigt. Folglich werden die Ergebnisse aus dem 3-Punkt Biegeversuch wiedergegeben, die Angaben über die Werkstoffeigenschaften. Am Ende des Kapitels werden dann im Zusammenschluss mit den Werkstoffkenngrößen, die Model-Ergebnisse präsentiert.

Basierend auf diesem Ansatz, werden die Model-Ergebnisse denen des Experimentes gegenübergestellt, verglichen und damit das Model validiert. Das Ziel, eine Beziehung zum Druck pro Verformung-Kontext herzustellen, wird mit der Validierung adressiert.

### 4.1 Experiment Einlagen

#### 4.1.1 Experimentdurchführung

In den Abbildungen Abbildung 18 bis Abbildung 33 werden die Kraft-Verformungs-Diagramme mit denselben Achsenskalierungen gezeigt, um einen Vergleich ermöglichen zu können. Die x-Achse beschreibt den Verfahrweg von -25mm bis 0, wie es in der Methode definiert wurde. Aus der y-Achse ist der gemessene Kraftwert in N abzulesen. Für jedes Diagramm gilt, dass die blaue Kurve den ersten Testdurchlauf mit zehn Zyklen widerspiegelt, die orangene den zweiten und die grüne Kurve den dritten Testdurchlauf.

Eine Ausnahme für die Skalierung betrifft die Messung, die in Abbildung 33. dargestellt wird. Diese Probe zeigte mit Abstand die höchste Kraft mit einem Maximalwert von ungefähr 424N. Es gab Einlagen, die ihr Maximum bei 14N hatten, sodass eine Darstellung auf eine Skalierung bis 424N für die Erkennbarkeit nicht geeignet ist. Zu Veranschaulichungszwecken wurde diese Ausnahme mit einer eigenen Kraftskalierung dargestellt. Anliegend zu den Diagrammen sind Bilder der zugehörigen Einlagen zu Darstellungszwecken angeführt Abbildungen Abbildung 18 bis Abbildung 33. Für die Nachvollziehbarkeit, wurde eine Übersicht der Namensgebung in Tabelle 3. bereitgestellt,



mit Information über das Material der Einlage, ihrer Dicke und der Webstruktur. Die Tabelle 3 dient ausschließlich der Orientierung über folgende Diagramme.

Tabelle 3 Experiment Einlagen Diagrammübersicht

Bezeichnung	Farbe	Material	Webstruktur	Seite	Dicke [mm]
N8L	schwarz	CFK	längs	links	0,47
Probe5	schwarz	CFK	quer	links	0,53
Probe6	schwarz	CFK	längs	rechts	0,58
N8R	schwarz	CFK	längs	rechts	0,58
N7R	schwarz	CFK	längs	rechts	0,83
N7L	schwarz	CFK	längs	links	0,86
Probe4	schwarz	CFK	quer	rechts	0,93
Probe3	schwarz	CFK	längs	links	0,96
N3L_2	blau	GFK	längs	links	1,16
N5L	weiß	GFK	längs	links	1,18
N3L_1	blau	GFK	längs	links	1,3
Probe7	blau	CFK	längs	rechts	1,64
N6R	blau	GFK	längs	rechts	1,66
N4L	schwarz	GFK	längs	links	1,68
Probe8	blau	CFK	quer	links	1,77
N2L	schwarz	CFK	längs	links	1,93

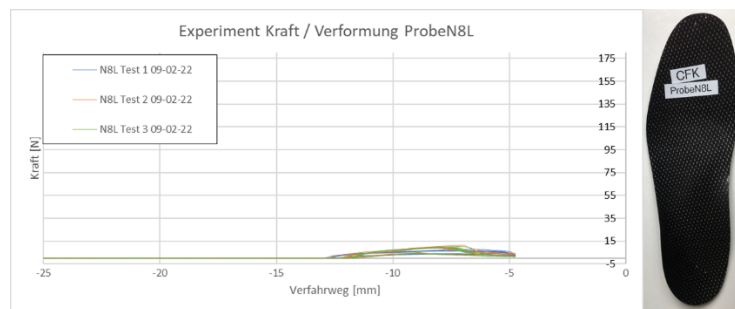


Abbildung 18 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N8L

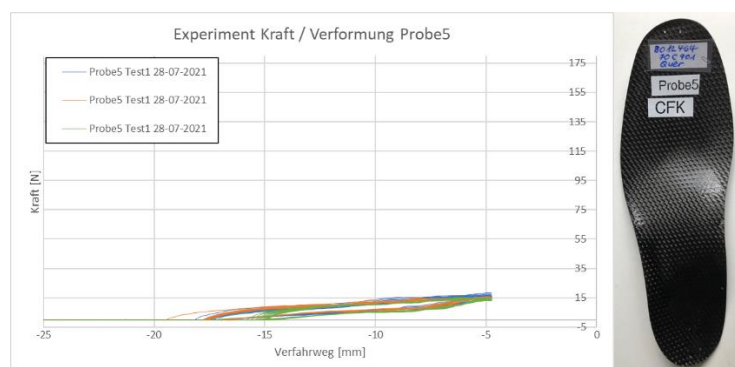


Abbildung 19 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe5

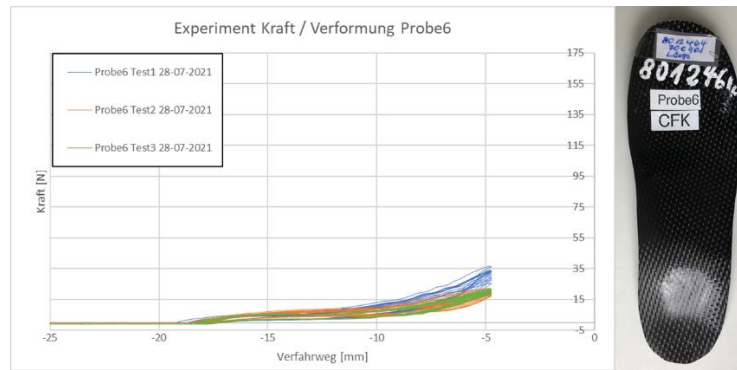


Abbildung 20 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe6

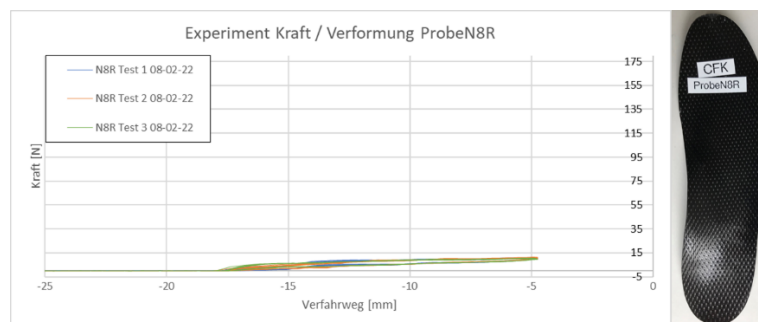


Abbildung 21 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N8R

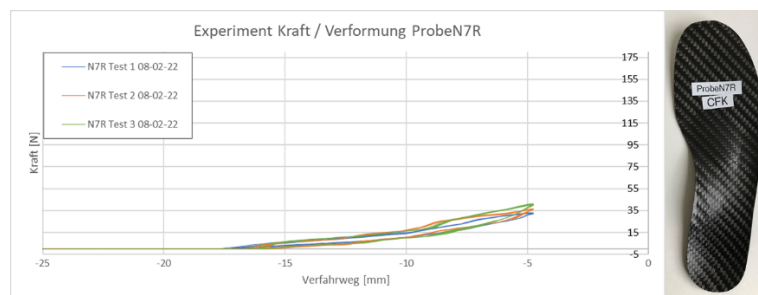


Abbildung 22 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N7R

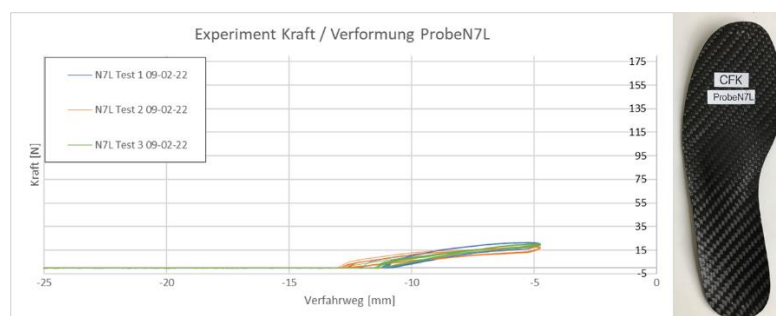


Abbildung 23 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N7L

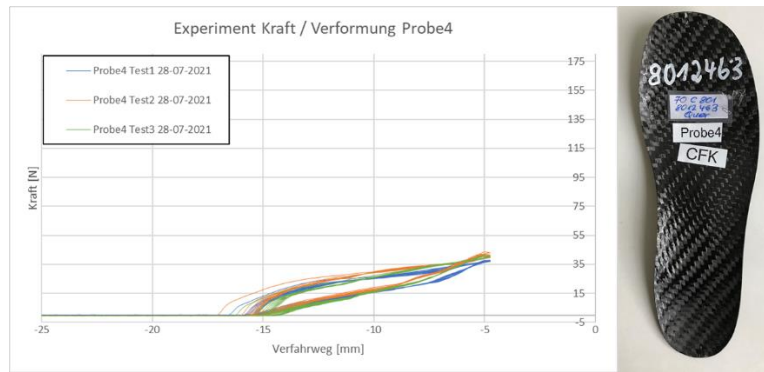


Abbildung 24 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe4

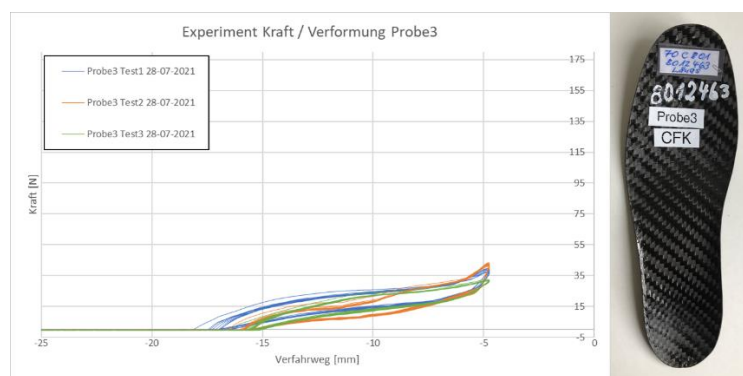


Abbildung 25 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe3

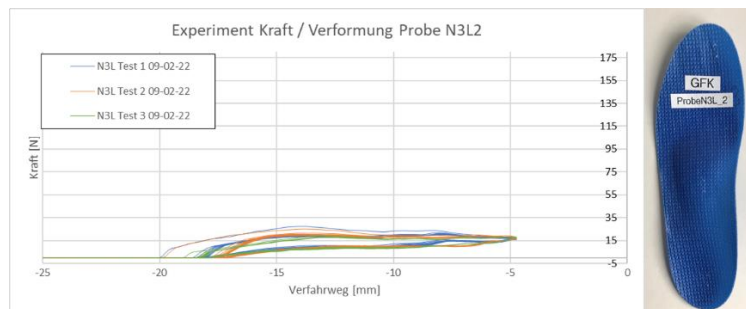


Abbildung 26 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N3L\_2

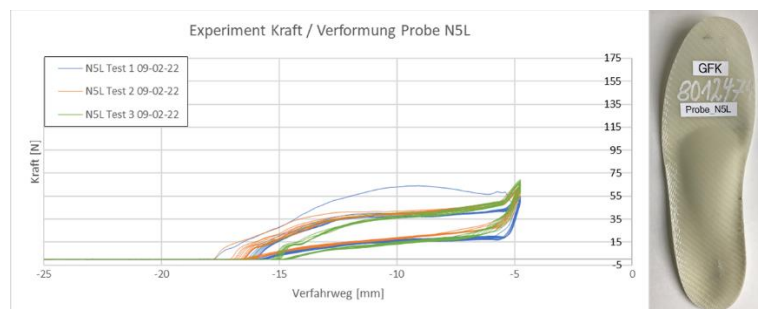


Abbildung 27 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N5L

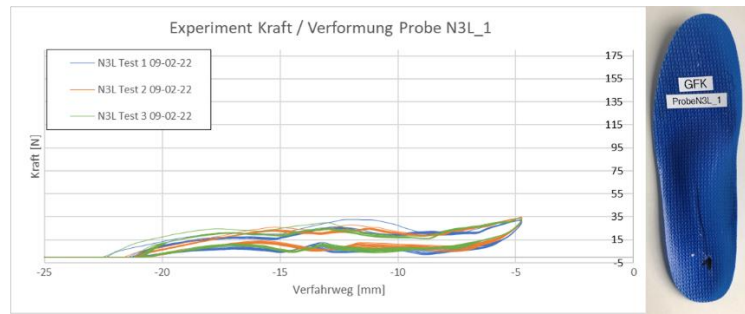


Abbildung 28 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N3L\_1

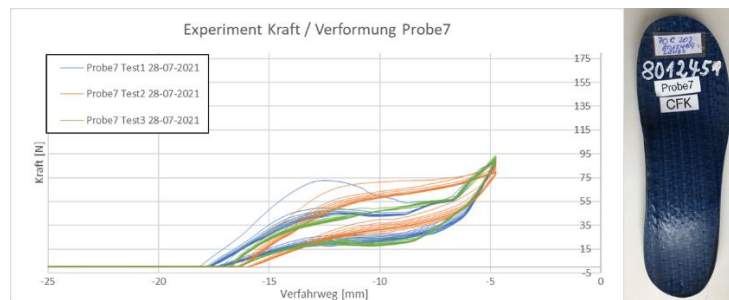


Abbildung 29 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe7

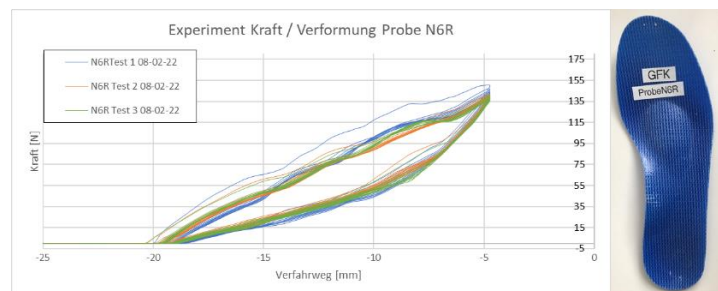


Abbildung 30 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N6R

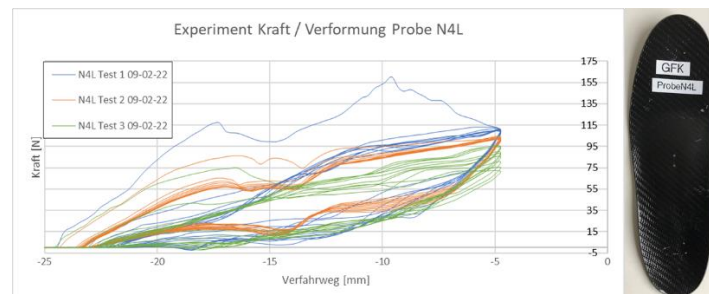


Abbildung 31 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N4L

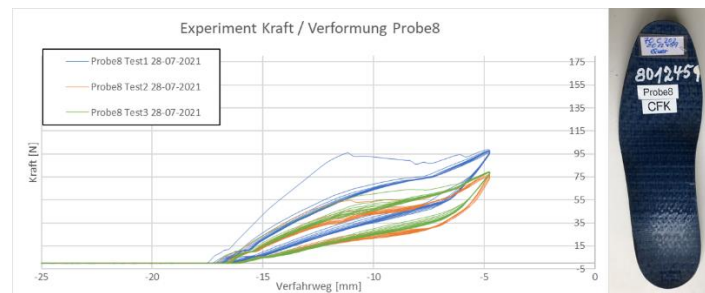


Abbildung 32 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe8

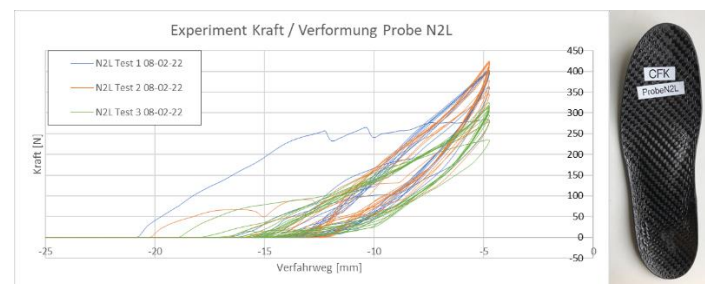


Abbildung 33 Experiment Einlagen Kraft-Verformung N2L

Sortiert wurden die Diagramme - von oben nach unten- nach der gemessenen Dicke der Einlage. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Zusammenhang mit dieser vorliegt: Je dicker das Material war, desto höher war die gemessene Kraft. Anhand der x-Achse ist zu erkennen, wie hoch der Bogen der jeweiligen Einlage war. Sobald im Diagramm ein Anstieg der Kraft  $F$  erkennbar ist, beschreibt diejenige Stelle den ersten Kontakt des Stahl-Stiftes mit dem Einlagen-Bogen. So ist zu erkennen, dass Probe N8L (Abbildung 18) und N7L (Abbildung 23) im Vergleich zu den übrigen Einlagen eine niedrigere Bogenhöhe aufwiesen, die  $> 15\text{mm}$  hoch waren. Hinzu kommt, dass sich die Graphen für die jeweilige Probe innerhalb der drei Testungen während des Be- bzw. Entlastungsprozess ähneln.

Es konnte beobachtet werden, dass drei Einlagen während der Messungen bei der erstmaligen Belastung gebrochen waren. Dazu gehörten die Proben N2L (Abbildung 33), N4L (Abbildung 31) und Probe 8 (Abbildung 32). Für alle diese Einlagen konnten trotz Bruch bei den nachfolgenden Kraftmessungen (Test 2 und Test 3), Messwerte im ähnlichen Bereich entnommen werden.

Die maximale Kraft  $\hat{F}_{Experiment}$  beim Bruch der Probe N2L kann in Abbildung 33 abgelesen werden. Diese lag bei ca. 256N.

Die Einlagen Probe6, N8R und N8L waren aus dem gleichen Material und hatten gemäß Hersteller die gleiche Geometrie. Die Graphen der drei Einlagen werden mit ihrer eigenen Skalierung in Abbildung 34 gezeigt. Ein Graph spiegelt einen Durchlauf bzw. Test 2 á zehn Zyklen wieder.

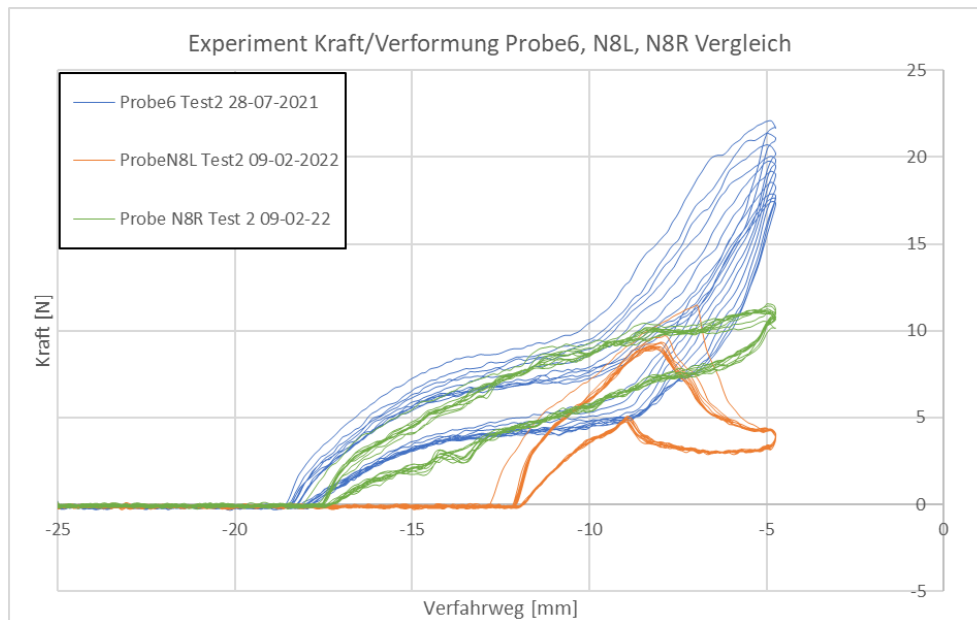


Abbildung 34 Experiment Einlagen Kraft-Verformung Probe6,N8L,N8R Vergleich

Diese drei Einlagen waren die Einlagen mit dem dünnsten Material. Hier wurden lediglich maximale Kräfte gemessen, die nicht größer als 25N waren. In diesem Graphen sind jedoch Differenzen zu erkennen. Während Probe6 und N8R einen ähnlichen Verlauf im Be- und Entlastungsprozess zeigten, nahm der Graph von N8L steil zu und nach ca. 4mm wieder ab. Hinzu kommt, dass N8L eine Bogenhöhe von 12mm hatte, wobei die der anderen zwei Einlagen eine Bogenhöhe von 18mm hatten.

#### 4.1.2 Steifigkeitsbestimmung

Die in der Methodik (Kapitel 2.5.3 Steifigkeit) erklärte Bestimmung der Steifigkeit  $\frac{F}{u}$  der Einlagen Experimente, wurden für jede Einlage graphisch aus den Diagrammen ermittelt. Exemplarisch wird in den Abbildung 35- Abbildung 36Abbildung 37 gezeigt, wie mithilfe von zwei Geraden zunächst die Gesamtsteigung und die Anfangssteigung von Probe3, N7R und N7L, bestimmt wurden. Wenn eine  $n > 1$  Anzahl an gleichen Einlagen vorlag, wurde – wie im folgenden Beispiel – der Mittelwert für die Steifigkeit mit

ihrer Standardabweichung bestimmt Tabelle 4. Graphische Bestimmung der Steifigkeit von Probe3, N7R und N7L

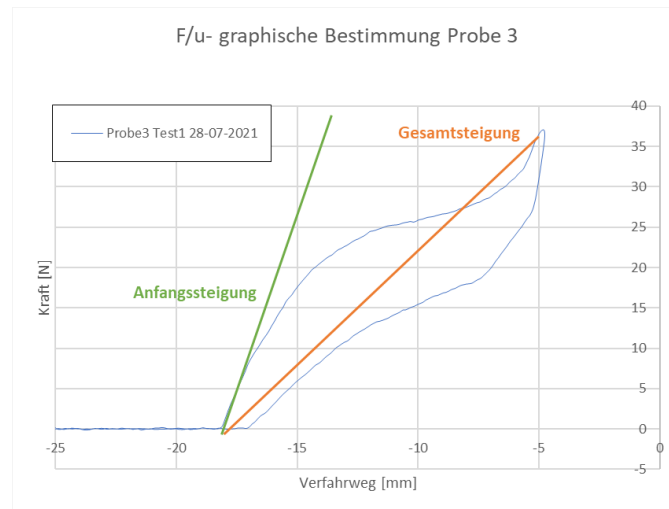


Abbildung 35 Graphische Bestimmung der Gesamt- und Anfangssteigung (Probe3)

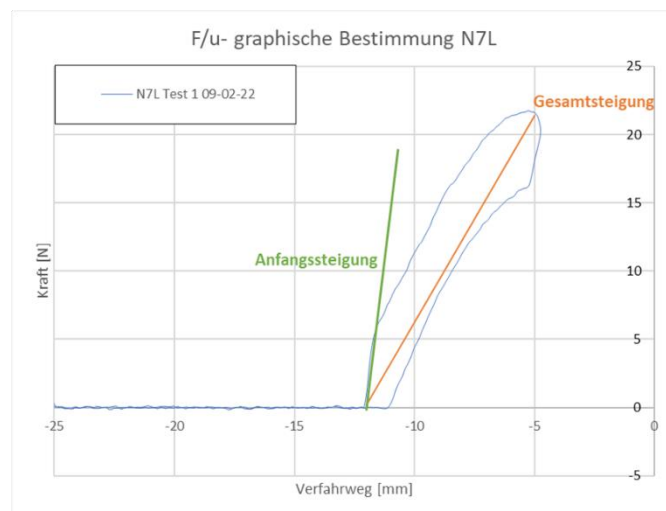


Abbildung 36 Graphische Gesamt- und Anfangssteigung (N7L)

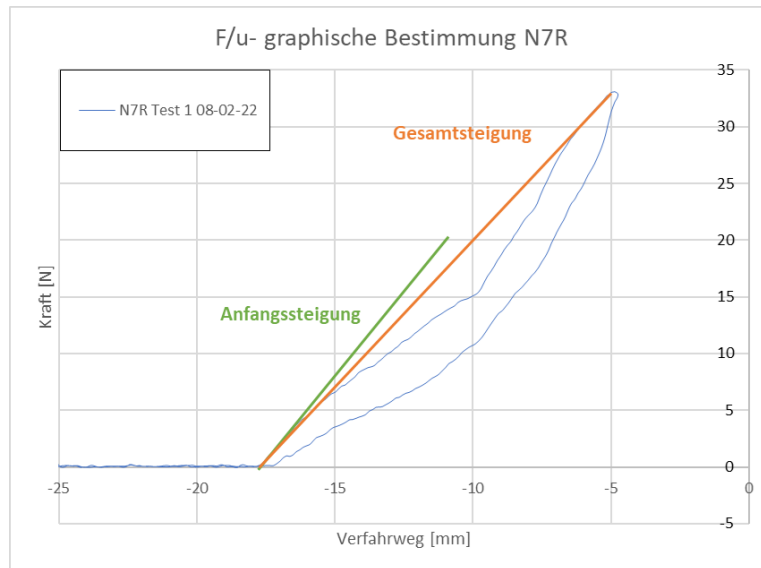


Abbildung 37. Graphische Bestimmung der Gesamt- und Anfangssteigung (N7R)

Tabelle 4. Graphische Bestimmung der Steifigkeit von Probe3, N7R und N7L

	N7R	N7L	Probe3	Mittelwert	Standardabweichung
<b>F/u Gesamtsteigung [N/mm]</b>	2,50	2,99	3,00	2,83	0,29
<b>F/u Anfangssteigung [N/mm]</b>	2,86	12,50	6,97	7,44	4,84

Diese Verfahren wurde für jede Einlage wiederholt. Die Ergebnisse für die Anfangs- bzw. Gesamtsteigung, sind den Tabelle 5 und Tabelle 6 zu entnehmen.

Wenn  $n > 1$  war (d.h., dass mehrere Ausführungen einer Einlage vorhanden waren), wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen bestimmt. (Tabelle 5)

Tabelle 5 Graphische Bestimmung Gesamt- und Anfangssteigung für Einlagen  $n > 1$ 

Bezeichnung	n	F/u Gesamtsteigung	StandAbw. Gesamtsteigung	F/u Anfangssteigung	StandAbw. Anfangssteigung
[-]	[-]	[ N/mm]	[ N/mm]	[ N/mm]	[ N/mm]
Probe3_N7RL	3	2,83	0,29	7,44	4,84
Probe6_N8RL	3	1,33	0,23	3,32	0,78
N3L_1_2	2	3,9	0,93	14,7	5,08

Für die restlichen Einlagen, die zur Verfügung gestellt wurden mit  $n=1$ , sind die aus den Messwerten bestimmten Steifigkeiten in Tabelle 6 Graphische Bestimmung Gesamt- und Anfangssteigung für Einlagen  $n=1$  gelistet.



Tabelle 6 Graphische Bestimmung Gesamt- und Anfangssteigung für Einlagen n=1

Bezeichnung [-]	F/u Gesamtsteigung [ N/mm]	F/u Anfangssteigung [ N/mm]
Probe7	12,07	15,46
N2L	29,66	58,13
N4L	16,31	59,32
N5L	7,49	10,00
N6R	9,70	20,00
Probe4	3,19	10,70
Probe5	1,37	5,26
Probe8	14,99	18,18

Aus den Tabellen Tabelle 5 Tabelle 6 ist zu entnehmen, dass die Anfangssteigung für kleinere Verformungen immer größer war als die Gesamtsteigung, die den Bereich für größere Verformungen beschrieb. Mit Ausnahme von Probe 7, N5L und Probe4, ist zu erkennen, dass die Anfangssteigung mindestens den doppelten Wert der Gesamtsteigung hatte.

#### 4.1.3 Sollwert-Berechnung

Mit den gegebenen Sollwerten für den Druck  $P = 10 \frac{N}{cm^2} = 0,1 \frac{N}{mm^2}$  und der Verformung  $u = \frac{1}{2} \cdot \text{Höhe des Bogens}$  (C.H. Siemsen, persönliche Kommunikation, 17.02.22), wurde für jede Einlage ein Maßstab in das überführte Druck-Verformungs-Diagramm angegeben. Zwei dieser werden in den Abbildungen Abbildung 38 und Abbildung 39 exemplarisch dargestellt. Wenn  $n > 1$  ist (d.h., dass mehrere Ausführungen einer Einlage, mit gleicher Geometrie, Materialwahl und Webstruktur vorhanden war), wurden die Mittelwerte dieser Messungen verwendet und anschließend in ein Druck-Verformungs-Diagramm überführt. Das gilt für Probe3, N7R, N7L, Probe6 mit N8R und N8L sowie für die zwei GFK Einlagen N3L\_1 und N3L\_2. (Anhang C Sollwert Berechnung). Exemplarisch werden in Abbildung 38 für Probe6, N8L und N8R die Soll-Werte für die Be- bzw. Entlastung im Diagramm gekennzeichnet. Auch die Ist-Werte für die Be- und Entlastung bei einer gemittelten Verformung  $u = -7,99mm$  sind den Abbildungen zu entnehmen.

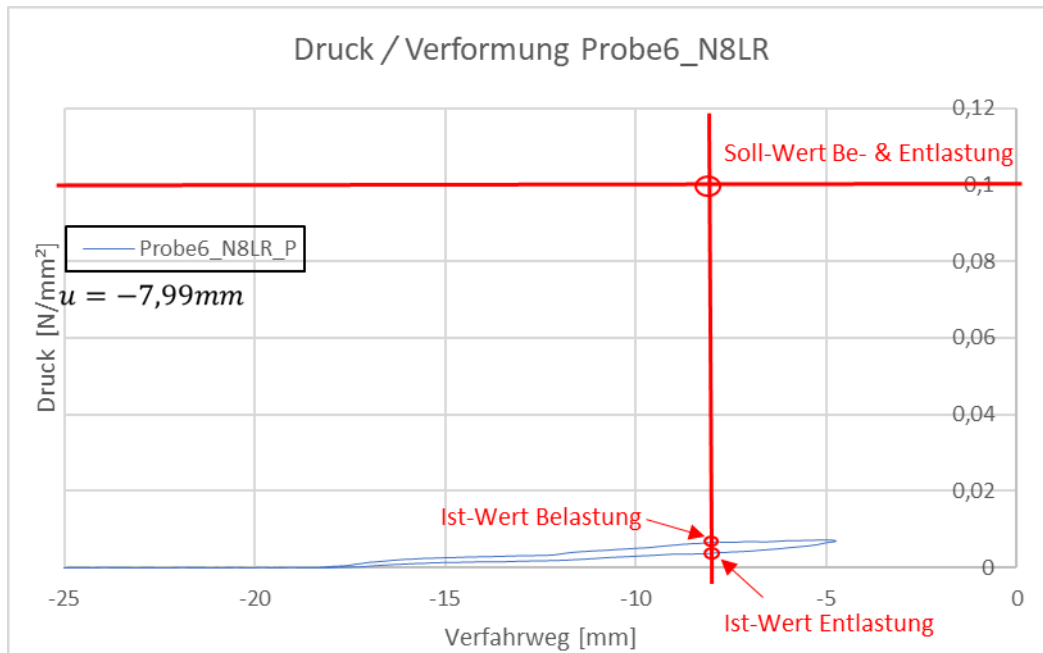


Abbildung 38 Soll-Wert Bestimmung P/u (exemplarisch an Probe6\_N8RL)

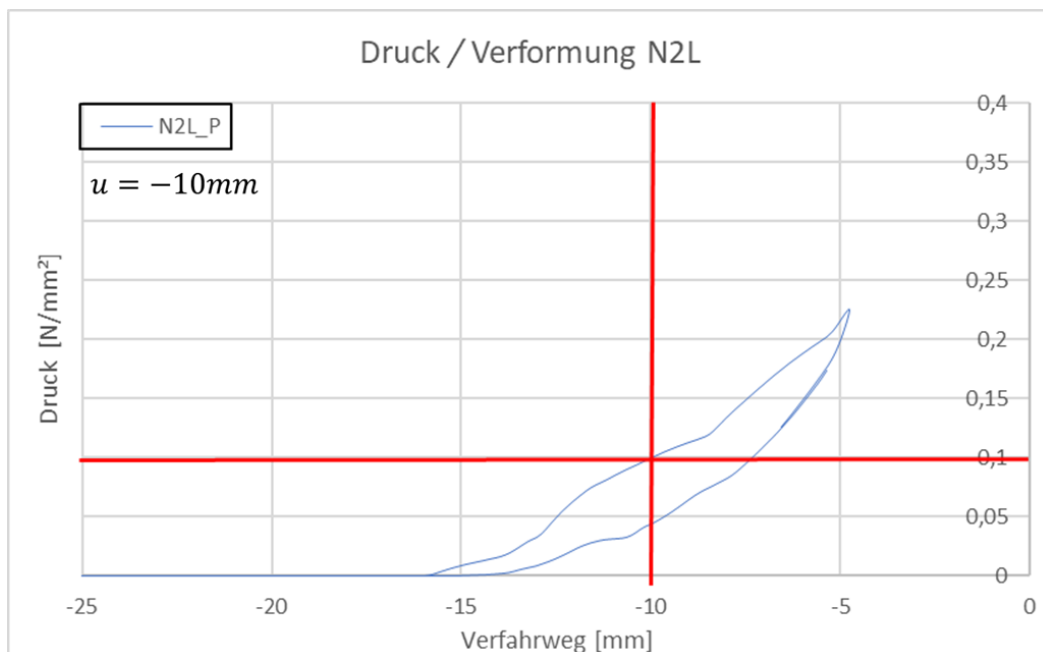


Abbildung 39 Soll-Wert-Bestimmung P/u N2L

Es war wieder ein Zusammenhang mit der Dicke zu erkennen. Die bestimmte Verformung  $u$ , welche die Hälfte der Bogenhöhe beschreibt, ist dem Diagramm zu entnehmen. Diese befand sich für die aufgeführten Einlagen in einem Bereich von 8mm bis 11mm.

Es ist aus der Abbildung 39 eine Ausnahme zu entnehmen, da sich die Druck-Verformungskurve sonst immer unterhalb des Sollwertes befand. Für diese Ausnahme wurde eine eigene Skalierung gewählt, da das Hochskalieren der y-Achse mit den Druckwerten als Folge hätte, die übrigen Ergebnisse nicht vernünftig erkennen zu können. Aus diesem Grund wurde N2L wieder mit einer anderen Skalierung gezeigt. So ist zu erkennen, dass N2L die einzige Einlage ist, die durch den gewünschten Sollwert führte.

## 4.2 Das Modell

### 4.2.1 Bestimmung Materialeigenschaften: 3-Punkt Biegeversuch

Die mit dem 3-Punkt Biegeversuch gemessenen Größen wurden in ein Kraft-Verformungs-Diagramm überführt. Mit dem in Kapitel 3.3.1 Bestimmung Materialeigenschaften: 3-Punkt Biegeversuch beschriebenen Verfahren können die notwendigen Werkstoffkonstanten erschlossen werden.

Die Abbildung 40 dient der beispielhaften Darstellung der Vorgehensweise für die graphische Ermittlung der gesuchten Werkstoffeigenschaften. Als Exempel wurde die Auswertung der Probe N2L gewählt, da dieses Material das einzige war, welches einen Bruch nachweisen konnte. Wie in Kapitel 3.3.1 Bestimmung Materialeigenschaften: 3-Punkt Biegeversuch erläutert, konnte so die Größe der Festigkeit bestimmt werden.

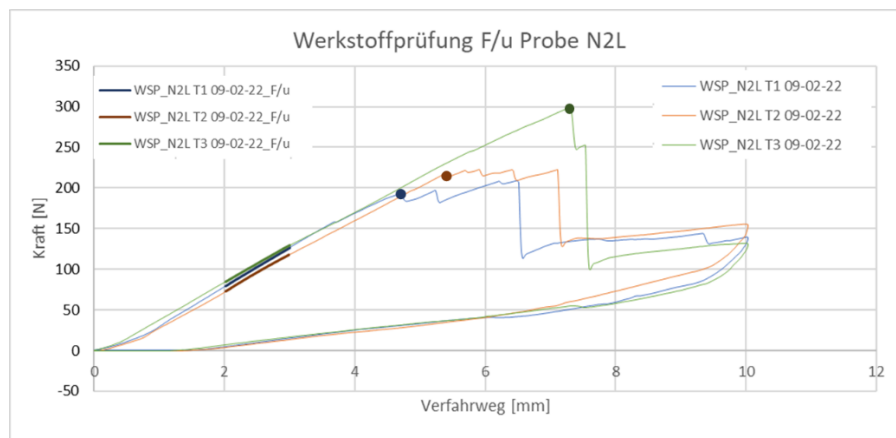


Abbildung 40 Graphische Bestimmung für E-Modul und Festigkeit (exemplarisch an N2L)

Im Intervall von 2mm bis 3mm des Verfahrenweges, wurde ein Bereich gewählt, der einen linearen Verlauf aufwies. Damit die Berechnung der Festigkeit nach Formel (25) durchgeführt werden kann, wurde die Größe der maximalen Kraft für jeden Test abgelesen, wie in Abbildung 40 gekennzeichnet und in Tabelle 7 festgehalten.

Das Intervall wurde in Abbildung 41 zur Veranschaulichung in einer näheren Darstellung gezeigt. Dies dient der Nachvollziehbarkeit und dem Arbeiten mit den einzusetzenden Trendlinien.

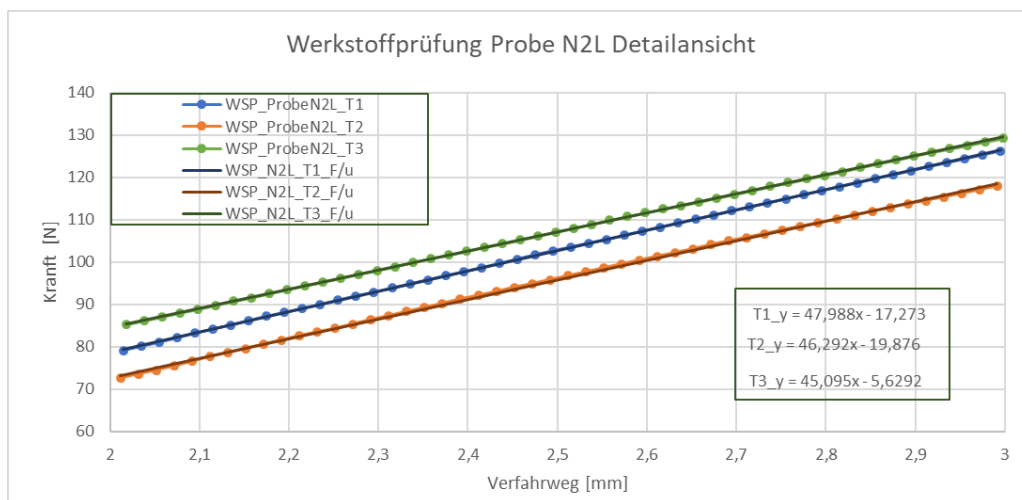


Abbildung 41 Graphische Bestimmung fürs E-Modul- Detailansicht (exemplarisch an N2L)

Tabelle 7 Graphische Bestimmung F/u und Fmax (exemplarisch an N2L)

Bezeichnung	F/u <sub>Material</sub>	F <sub>max</sub>
[-]	[N/mm]	[N]
WSP_N2L_T1	47,988	193,00
WSP_N2L_T2	46,292	218,54
WSP_N2L_T3	45,095	297,40

Die Geometrie der einzelnen Material-Zuschnitte setzt sich zusammen aus  $L = 80\text{mm}$ ,  $d = 20\text{mm}$  und  $t = 1,93\text{mm}$ , die gemessene Dicke, die für jede Probe variiert. Mit diesen Werten kann der E-Modul bzw. die Festigkeit wie in Tabelle 7 bestimmt werden.

$$E = \left(\frac{F}{u}\right)_{\text{Material}} \cdot \frac{L^3}{4 \cdot d \cdot t^3}$$

$$\hat{\sigma}_{\text{Material}} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot d \cdot t^2}$$

Für die  $n = 3$  Material-Zuschneide, wurden in Tabelle 8 die Mittelwerte und die Standardabweichungen der E-Module und der Festigkeit bestimmt und für folgende Berechnungen verwendet.

Tabelle 8 Berechnung E-Modul und Festigkeit (exemplarisch an N2L)

<b>Bezeichnung</b>	<b>E</b>	<b><math>\sigma_{\max}</math></b>
<b>[-]</b>	<b>[GPa]</b>	<b>[N/mm<sup>2</sup>]</b>
WSP_N2L_T1	42,72	310,88
WSP_N2L_T2	41,21	352,03
WSP_N2L_T3	40,15	479,04
<b>Mittelwert</b>	<b>41,36</b>	<b>380,65</b>
<b>StandAbw.</b>	<b>1,29</b>	<b>87,66</b>

Nach diesem Vorgehen wurden die Elastizitätsmodule für jede Einlage bestimmt. Die Festigkeit konnte lediglich für die obige Probe N2L bestimmt werden, da außer dieser keine weitere gebrochen ist und somit die Bestimmung der Festigkeit nicht möglich war. In der Tabelle 9 sind die E-Module aufgezeigt. Als graphische Darstellung werden die in Tabelle gelisteten Informationen in ein Diagramm Abbildung 42 zu Vergleichszwecken gezeigt.

Tabelle 9 Bestimmung der Werkstoffkenngrößen für die gesamte Materialprobe

<b>Bezeichnung</b>	<b>Material</b>	<b>Dicke WSP</b>	<b>Webstruktur</b>	<b>E</b>	<b>StandAbw.<sub>E</sub></b>	<b><math>\sigma_{\max}</math></b>	<b>n</b>
<b>[-]</b>	<b>[-]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[-]</b>	<b>[GPa]</b>	<b>[GPa]</b>	<b>[N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>[-]</b>
WSP_N3L	GFK	1,04	quer	2,16			1
WSP_N3L	GFK	1,01	längs	5,65			1
WSP_Probe8	CFK	1,62	quer	5,95	0,26		3
WSP_Probe7	CFK	1,65	längs	6,87	1,27		3
WSP_Probe4	CFK	0,89	quer	10,18	1,77		3
WSP_N6R	GFK	1,62	längs	11,75	0,22		3
WSP_Probe3_N7RL	CFK	0,89	längs	12,25	0,76		3
WSP_Probe5	CFK	0,54	quer	13,32	2,23		3
WSP_N5L	GFK	1,07	längs	13,54	2,22		3
WSP_Probe6_N8RL	CFK	0,54	längs	14,72	1,48		3
WSP_N4L	GFK	1,57	längs	19,48	1,41		3
WSP_N2L	CFK	1,93	längs	41,36	1,29	380,65	3

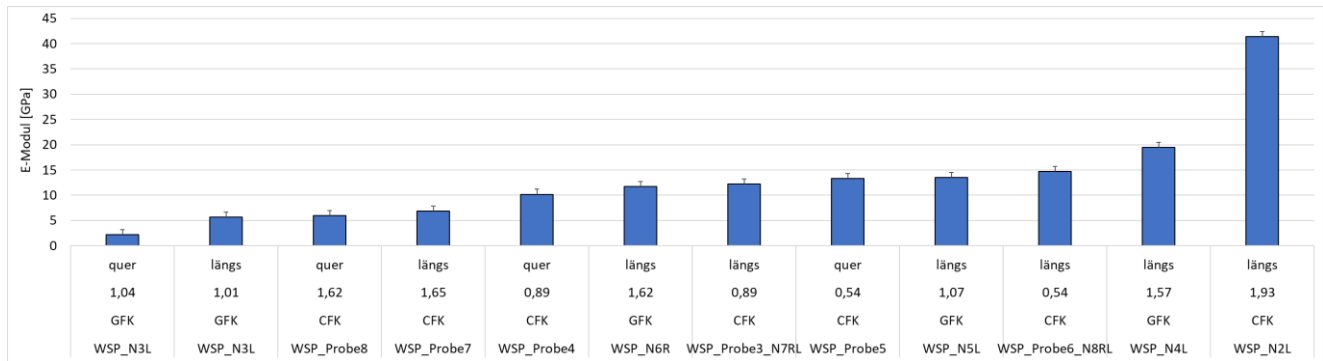


Abbildung 42 Graphische Darstellung des E-Moduls für die gesamten Materialproben

Der Tabelle 9 bzw. dem Diagramm aus Abbildung 42 zu entnehmen, dass die Materialkenngrößen der E-Module variierten. Diese befanden sie sich in einem Bereich von ca. 2GPa bis hin zu 41GPa. Aus dem Diagramm können die Informationen über das Material entnommen werden. Für  $n > 1$  Anzahl an getesteten Materialproben, wurde die Standardabweichung aufgeführt, die nicht größer als 2GPa war.

#### 4.2.2 Verwendung des Models

Mit den Werkstoffkennwerten, die aus dem 3-Punkt Biegeversuch bestimmt werden konnten, wird nun das erstellte Model verwendet, indem die Steifigkeit bzw. maximale Kraft gemäß der beiden Randbedingungen bestimmt wird (Formel 8 und 12).. So ergibt sich für das Model die Tabelle 10 als Übersicht für die ermittelten Steifigkeiten unter Berücksichtigung der Randbedingungen

Tabelle 10 Steifigkeit von den Einlagen berechnet durch das Model

Bezeichnung	E	t	L	d	F/u Randbedingung 1	F/u Randbedingung 2
[-]	[GPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[N/mm]	[N/mm]
Probe3_und_N7RL	12,25	0,90	80,00	30,00	2,09	8,37
Probe6_und_N8RL	14,72	0,54	80,00	30,00	0,54	2,17
Probe7	6,87	1,64	80,00	30,00	7,10	28,41
N2L	41,36	1,93	80,00	30,00	69,69	278,76
N3L_1_2	5,65	1,23	80,00	30,00	2,46	9,86
N4L	19,48	1,68	80,00	30,00	21,65	86,59
N5L	13,54	1,18	80,00	30,00	5,21	20,86
N6R	11,75	1,66	80,00	30,00	12,60	50,39
Probe4	10,18	0,93	80,00	30,00	1,92	7,68
Probe5	13,32	0,53	80,00	30,00	0,46	1,86
Probe8	5,95	1,77	80,00	30,00	7,73	30,93

Der Tabelle 10 ist zu entnehmen, dass N2L die höchste Steifigkeit für beide Randbedingungen hatte. Probe 5 und Probe6\_N8RL, die aus dem gleichen Material hergestellt wurden, zeigten mit ihren geringen Dicken  $t$  die geringsten Steifigkeiten.

Für die Berechnung der maximalen Kräfte  $\hat{F}_{Randbedingung1}$  und  $\hat{F}_{Randbedingung2}$  wurde die aus dem 3-Punkt Biegeversuch ermittelte Festigkeit verwendet. Dies war nur für N2L möglich, da im Versuch keine weitere Materialproben gebrochen sind, um die Festigkeit bestimmen zu können Tabelle 11.(Formel 10 und 14)

Tabelle 11 Maximale Kraft berechnet für Einlage N2L durch das Model

Bezeichnung	$\hat{\sigma}$	t	L	d	$\hat{F}_{Randbedingung 1}$	$\hat{F}_{Randbedingung 2}$
[-]	[MPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]
N2L	380,65	1,93	80,00	30,00	354,47	708,94

### 4.3 Validierung des Modells

Für die Validierung des Modells wurden die ermittelten Werte des Modells gegen die des Einlagen Experiments validiert. Hierfür werden in Tabelle 12 die gegenüberzustellenden Werte der Steifigkeit  $\frac{F}{u}$  gelistet und mit der Fehlerberechnung in % erweitert. Die Validierung der maximalen Kraft ist der Tabelle 13 zu entnehmen. Da im 3-Punkt Biegeversuch die Festigkeit nur für N2L bestimmt werden konnte, konnte das Model nur

für diese Einlage mit den aus dem Experiment gemessenen maximalen Kräften validiert werden. Es ist nur ein Bruch registriert wurden, daher entspricht der erste Bruch dem maximalen Bruch. Die ausgegeben Fehler werden im Diagrammen (Abbildung 43) wiedergegeben.

Bezeichnung	Messwerte		Modelwerte		Fehlerberechnung für F/u Gesamtsteigung		Fehlerberechnung für F/u Anfangssteigung	
	F/u Gesamtsteigung [N/mm]	F/u Anfangssteigung [N/mm]	F/u Randbedingung 1 [N/mm]	F/u Randbedingung 2 [N/mm]	F/u Randbedingung 1 [ % ]	F/u Randbedingung 2 [ % ]	F/u Randbedingung 1 [ % ]	F/u Randbedingung 2 [ % ]
Probe3_und_N7RL	2,83	7,44	2,09	8,37	-25,99	196,04	-71,88	12,50
Probe6_und_N8RL	1,33	3,32	0,54	2,17	-59,15	63,38	-83,64	-34,55
Probe7	12,07	15,46	7,10	28,41	-41,14	135,45	-54,05	83,82
N2L	29,66	58,13	69,69	278,76	134,96	839,84	19,88	379,54
N3L_1_2	3,90	14,70	2,46	9,86	-36,82	152,74	-83,24	-32,95
N4L	16,31	59,32	21,65	86,59	32,73	430,93	-63,51	45,98
N5L	7,49	10,00	5,21	20,86	-30,39	178,45	-47,86	108,56
N6R	9,70	20,00	12,60	50,39	29,87	419,47	-37,01	151,94
Probe4	3,19	10,70	1,92	7,68	-39,84	140,65	-82,06	-28,26
Probe5	1,37	5,26	0,46	1,86	-65,95	36,20	-91,16	-64,66
Probe8	14,99	18,18	7,73	30,93	-48,41	106,35	-57,46	70,14

Tabelle 12 Validierung Steifigkeiten Modelwerte gegen Messwerte

Bezeichnung	Messwerte		Modelwerte		Fehlerberechnung für $\hat{F}_{\text{erster Bruch}}$		Fehlerberechnung für $\hat{F}_{\text{max.Bruch}}$	
	$\hat{F}_{\text{erster Bruch}}$ [N]	$\hat{F}_{\text{max.Bruch}}$ [N]	$\hat{F}_{\text{Randbedingung 1}}$ [N]	$\hat{F}_{\text{Randbedingung 2}}$ [N]	$\hat{F}_{\text{Randbedingung 1}}$ [ % ]	$\hat{F}_{\text{Randbedingung 2}}$ [ % ]	$\hat{F}_{\text{Randbedingung 1}}$ [ % ]	$\hat{F}_{\text{Randbedingung 2}}$ [ % ]
N2L	256	256	354,47	708,94	38,47	176,93	38,47	176,93

Tabelle 13 Validierung maximale Kraft Modelwert gegen Messwert an Einlage N2L

Das Model wurde gegen das Experiment validiert. Dafür wurden die über die Gesamt- bzw. Anfangssteigungen bestimmten Steifigkeiten unter Berücksichtigung der beiden Randbedingungen denen des Models gegenübergestellt. Mit der Fehlerberechnung wurde die prozentuale Abweichung zu den Experiment-Werten bestimmt. So wurde  $\frac{F}{u}$  nach Randbedingung 1 gegen die Messwerte validiert und die nach Randbedingung 2 bestimmte Steifigkeit. So ergaben sich Balken pro Einlage, die in der Abbildung 43 gezeigt werden.

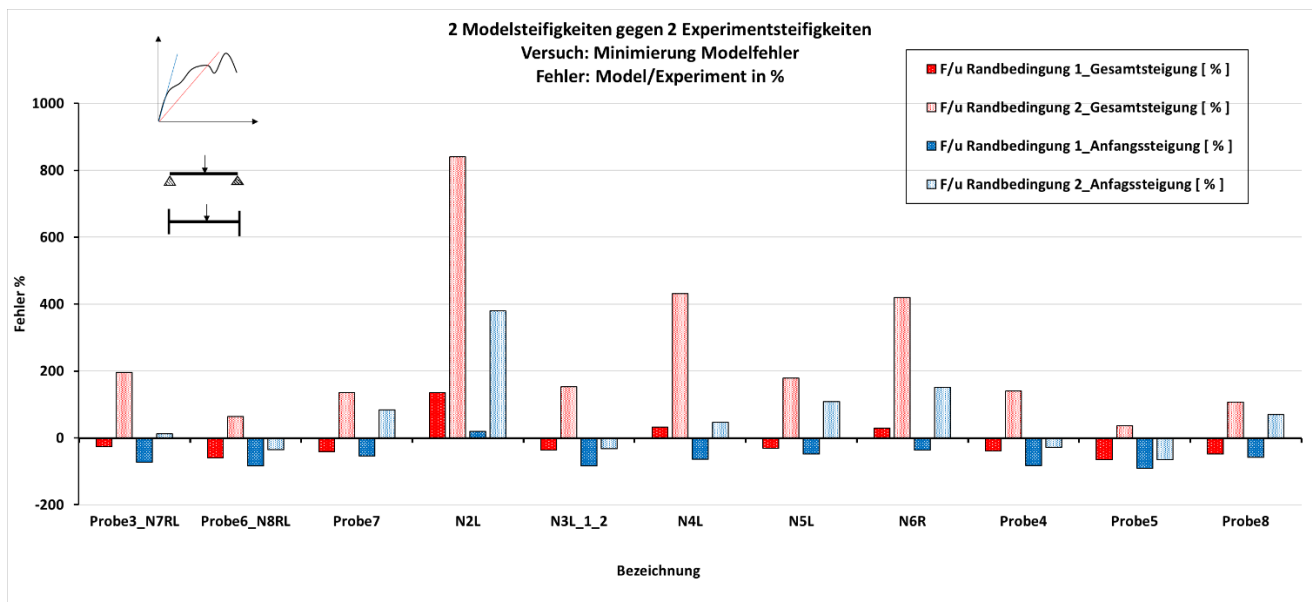
Negative Fehler, die nach unten gerichteten Balken, zeigen dass der Modelwert kleiner ist als der im Bezug stehende Messwert. So gilt das analog für die nach oben gerichteten



Fehler, dass der Modelwert dann größer ist als der Messwert. So fällt auf, dass jeder Modelwert der Steifigkeit nach Randbedingung 2 in Bezug auf die Gesamtsteigung größer ist.

Die Fehler für Einlage N2L, N4L und N6R waren in Bezug auf Randbedingung 2 und auf die Gesamtsteigung auffällig groß. Mit Werten von über 400%, entspricht dies dem mindestens Vierfachen des gemessenen Wertes. Hinsichtlich der Randbedingungen waren alle Fehler, die größer als 150%, also das 1,5-fache in Bezug zum Messwert waren, auf die Randbedingung 2 zurückzuführen.

Der maximale Fehler nach Randbedingung 1, lag für die Einlage N2L mit ca. 135% im Zusammenhang mit der Gesamtsteigung vor. Die übrigen nach Randbedingung 1 ermit-



telten Fehler lagen unter 100% und zeigten die kleinsten Abweichungen.

Abbildung 43 Fehlerdarstellung 2 Modelsteifigkeiten gegen 2 Experimentsteifigkeiten

In dem unten geführten Diagramm Abbildung 44 sind vier Werte im positiven Fehlerbereich, drei von diesen beziehen sich auf die Gesamtsteigung und ein Balken auf die Anfangssteigung. Die Fehler für Einlage N2L sind wieder auffällig größer als die anderen. So sind die Modelwerte nach Randbedingung 1 im Bezug zur Gesamtsteigung für

die drei Einlagen größer. Für die restlichen Einlagen ist ein negativer Fehler für beide Randbedingungen zu verstehen. Mit anderen Worten, drücken die Balken aus, dass die Modelwerte beider Randbedingungen kleiner sind als die Messwerte, ob Gesamt- oder Anfangssteifigkeit.

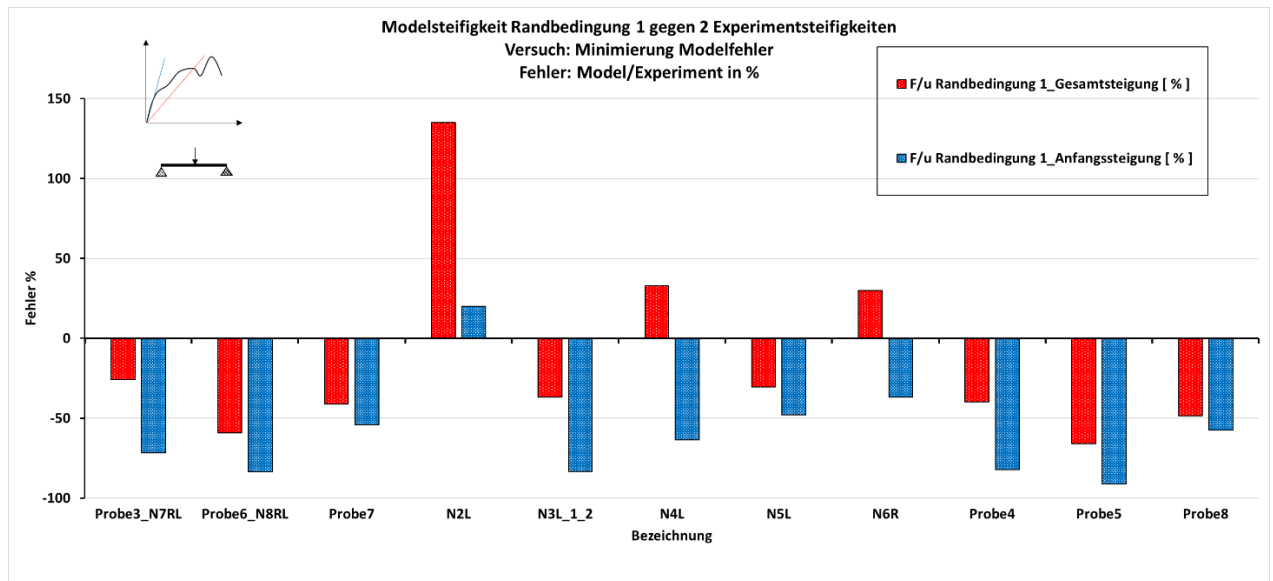


Abbildung 44 Fehlerdarstellung Modelsteifigkeit Randbedingung 1 gegen 2 Experimentsteifigkeiten

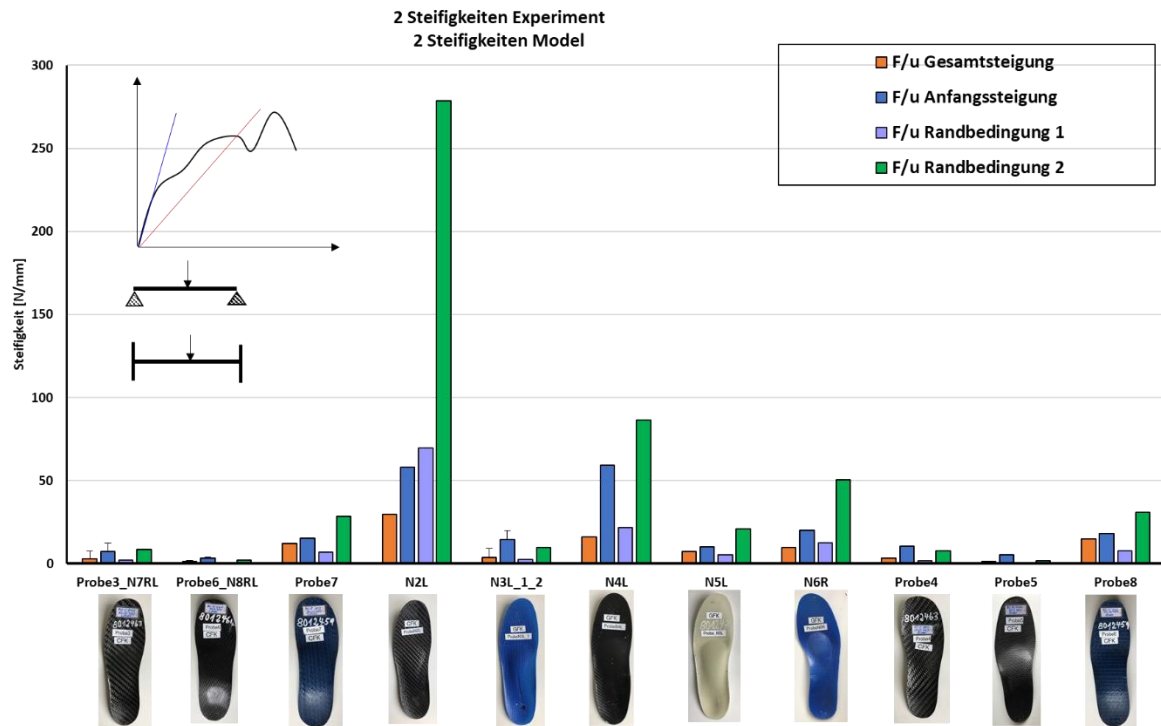


Abbildung 45 Graphische Darstellung Steifigkeiten nach Model und Experimentsteifigkeiten

Mit diesem Diagramm werden die Steifigkeiten mit ihren Werten für jede Einlage gegenübergestellt. Die größte Auffälligkeit liegt in dem nach Randbedingung 2 bestimmten Modelwert für Einlage N2L. Mit den 280N/mm ist die Steifigkeit drei Mal so groß wie die der Einlage N4L, die nach Hersteller die gleichen Dicken haben und sich lediglich im Material unterscheiden.

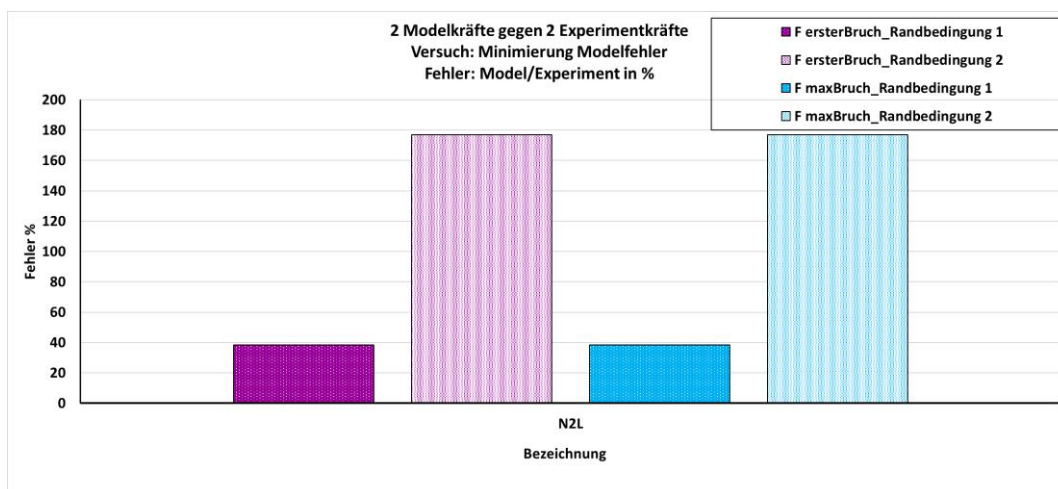


Abbildung 46 Fehlerdarstellung 2 Modelkräfte gegen 2 Experimentkräfte

Aus der Abbildung 46 geht hervor, dass der Fehler nach Randbedingung 1 im Bezug zur maximalen Kraft kleiner ist als die der zweiten Randbedingung. Der Modelwert nach Randbedingung 1 ist 40% größer als der gemessene Wert.

#### 4.4 Beziehungsaufbau $\frac{P}{u}$

So wie in Kapitel 3.4 Beziehungsaufbau  $\frac{P}{u}$  beschrieben, konnten nun die bestimmten Werte und die verwendeten Größen der Geometrie eingesetzt werden, um das Model vorzustellen.

Jede Einlage wurde mit ihrer bestimmten Materialkenngröße des E-Moduls gelistet. Aus der Tabelle 14 sind die Eingangsgrößen zu entnehmen, darunter die Geometrie und die Sollwerte nach Herrn Prof. Dr. Siemsen. Für die Verformung  $u$  wurden zwei Fälle betrachtet, einmal für eine kleine Verformung mit  $u = 1mm$ , welches in

Tabelle 15 gezeigt wird. Basierend auf den Experimenten, wurde ein Mittelwert der Höhen bestimmt, der für den gegebenen Maßstab  $u = \frac{1}{2} \cdot \text{Höhe des Bogens}$  eingesetzt wurde. Hieraus folgte der zweite Fall mit der Verformung  $u = 10mm$ . Da aus den Experimenten lediglich die Festigkeit von einem Material bestimmt werden konnte, konnte der maximale Druck für die jeweilige Randbedingung nur für N2L bestimmt werden (siehe Tabelle 17). Die Gleichungen zur Bestimmung der in

Tabelle 15 und Tabelle 17 aufgeführten Werte, wurden auf Basis der Theorie verwendet. (Formel 20, 24, 36, 37)

Durch das Umstellen der oben aufgeführten Gleichungen nach der gewünschten Größe, konnte für die Dicke  $t$  (Formel 36 und 37) der folgende Zusammenhang ermittelt werden, welche in Tabelle 15 für  $u = 1\text{mm}$  und in Tabelle 16 für eine Verformung  $u = 10\text{mm}$  gezeigt werden.

Tabelle 14 Eingangsgrößen Model Beziehung P/u

Eingangsgrößen	Werte	
L	80	[mm]
d	30	[mm]
Randbedingung	1 oder 2	[-]
P	10	[N/cm <sup>2</sup> ]
u	variabel	[mm]

Tabelle 15 Berechnete Dicke von Einlagen für  $u = 1$

Bezeichnung	E	$t_{\text{Randbedingung 1}}$	$t_{\text{Randbedingung 2}}$
[-]	[GPa]	[mm]	[mm]
Probe3_und_N7RL	12,25	3,74	2,19
Probe6_und_N8RL	14,72	3,52	2,06
Probe7	6,87	4,53	2,65
N2L	41,36	2,49	1,46
N3L_1_2	5,65	4,84	2,83
N4L	19,48	3,20	1,87
N5L	13,54	3,62	2,11
N6R	11,75	3,79	2,22
Probe4	10,18	3,98	2,33
Probe5	13,32	3,64	2,13
Probe8	5,95	4,76	2,78

Tabelle 16 Berechnete Dicke von Einlagen für  $u=10$ 

Bezeichnung	E	$t_{\text{Randbedingung 1}}$	$t_{\text{Randbedingung 2}}$
[-]	[GPa]	[mm]	[mm]
Probe3_und_N7RL	12,25	1,74	1,01
Probe6_und_N8RL	14,72	1,63	0,95
Probe7	6,87	2,10	1,23
N2L	41,36	1,16	0,68
N3L_1_2	5,65	2,25	1,31
N4L	19,48	1,49	0,87
N5L	13,54	1,68	0,98
N6R	11,75	1,76	1,03
Probe4	10,18	1,85	1,08
Probe5	13,32	1,69	0,99
Probe8	5,95	2,21	1,29

Für eine Verformung  $u = 1\text{mm}$  waren bei einem gegebenen Druck von  $P = 10 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$  die notwendigen Dicken größer als für eine Verformung von  $u = 10\text{mm}$ . Die Dicke war bei der kleineren Verformung für jede Einlage mindestens doppelt so groß wie der Wert einer größeren Verformung. Hinzu kommt, dass die Dicke für Randbedingung 2 in jedem Fall kleiner war als die der Randbedingung 1. Folglich lag ein Zusammenhang mit der Materialkonstanten des E-Moduls vor: Je größer dieser war, desto geringer war die Dicke.

Tabelle 17 Berechneter maximale Druck von Einlagen von N2L

Bezeichnung	u	$\sigma_{\text{max}}$	$\hat{P}_{\text{Randbedingung 1}}$	$\hat{P}_{\text{Randbedingung 2}}$
[-]	[mm]	[MPa]	[N/cm <sup>2</sup> ]	[N/cm <sup>2</sup> ]
N2L	1	380,65	81,35	41,73
	10	380,65	17,53	8,99

Es liegt wie in Tabelle 17 zu sehen ist, ein Zusammenhang mit der Verformung vor. Je größer die Verformung  $u$  ist, desto kleiner ist der maximal mögliche Druck.

## 5 Diskussion

Mit dieser Arbeit sollen die Abhängigkeiten der geometrischen und mechanischen Eigenschaften bei der Werkstoffwahl für orthopädische Einlagen diskutiert werden. Die Überlegung, dass eine orthopädische Einlage bei Beschwerden für das Längsgewölbe eingesetzt wird, soll hinsichtlich der mechanischen Parameter, der Verformung und des Drucks, diskutiert werden. So wird von der Einlage bei Belastung ein Druck auf das mediale Längsgewölbe ausgeübt, welcher durch die Verformung erzeugt wird. Für Patient\*innen wird individuell aus einer Auswahl an Materialien entschieden, welche Einlage am besten geeignet ist. So stellt sich in Bezug auf die mechanischen Größen die Frage, wie viel Druck notwendig ist und was für eine Verformung gewünscht ist.

Mit der Messvorrichtung wurde experimentell ein Kontext zwischen Kraft und Verformung hergestellt, der als Grundlage für die Validierung dient. Gesucht ist jedoch die Größe des Drucks. Hierfür wird ein Model erstellt, das zwei Randbedingungen berücksichtigt und die Größe  $\frac{F}{u}$  gegen das Experiment validiert, sodass letztlich nach Beurteilung des Models eine Übertragung auf die eigentlich gewünschte Größe möglich ist. So definiert sich das Ziel dieser Arbeit eben diese Beziehung zu untersuchen und eine Vorhersage hinsichtlich der notwendigen Parameter zu ermöglichen. Das Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, wie das erstellte Model um diese Beziehung herzustellen, mit der klinischen Situation übereinstimmt.

### 5.1 Experiment Einlagen

Die Experimente an den Einlagen dienten dazu den Zusammenhang mit den verschiedenen Parametern wie Werkstoffwahl und Geometrie zu verstehen. Vorweg war zu erkennen, dass die  $n = 3$  Testdurchläufe der Einlagen zeigten, dass sich die Belastungskurve nicht signifikant von der Entlastungskurve unterschied. Ein linearer Verlauf war in beiden Fällen nicht aus den Diagrammen zu entnehmen. Die Hysterese, die beobachtet wurde, wird von der Reibung verursacht, dies ist in den Graphen sowohl für die Be- bzw. Entlastungskurve zu beobachten. Die Reibung wirkt in gegensätzliche Richtung für beide Kurven.

Mit der Annahme, dass eine relative Bewegung vorliegt, haben wir eine Reibkraft, die proportional zur Normalkraft ist. Mit steigendem Druck nimmt die Normalkraft zu, dadurch kann eine größerer Reibkraft ausgehalten werden. Die Reibkraft wirkt der tendenziellen Bewegungsrichtung entgegen. Betrachtet man den Verlauf der Belastungskurve, so wirkt die Reibkraft zur Mitte des Bogens das bedeutet, dass das System steifer wird. In der Entlastungskurve ist zu Beginn ein steilerer Abfall zu sehen, da die Reibkraft nun dem Bogen mit anderen Worten die Kraft abnimmt.

Da sich die Entlastungskurve unterhalb der Belastungskurve befindet, liegt eine kleine Kraft für die gleiche Position vor.

Innerhalb der drei Tests sind keine signifikanten Differenzen erkannt wurden, so waren sie reproduzierbar. Die drei Testwiederholungen repräsentieren aber keine Aussagekraft über die Lebensdauer der Einlagen.

Die 16 Einlagen sollten hinsichtlich ihrer Dicke, der Webstruktur und der Materialwahl verglichen und beurteilt werden. Wird die Gesamtheit der Diagramme betrachtet, kann angenommen werden, dass die Dicke eine ausschlaggebende Rolle für die aufzubringende Kraft spielt, um eine Verformung zu verursachen. So wurde für die Einlagen mit einer Dicke von  $> 0,6\text{mm}$  (Probe6, N8R, N8L und Probe5) lediglich eine Kraft von höchstens 20N gemessen, die so in der Praxis keinen Einsatz finden wird. Probe6 wurde in dreifacher Ausführung getestet (N8R und N8L), um einen Vergleich zu ermöglichen, da diese das gleiche Material, die gleiche Webstruktur und die gleiche Dicke hatten. Es waren jedoch Unterschiede zwischen den Einlagen aufgefallen, darunter vor allem der Verlauf von N8L. Es ist während des Tests ein Knick aufgefallen: Ein weiterer Grund, dass die Dicke von  $< 0,6\text{mm}$  nicht geeignet ist, da dieses Ereignis bei keiner anderen Einlage vorgefallen war. Der Aspekt, ob ein Messfehler vorlag, ist für diesen Vergleich erstmal zweitrangig. Da die Messungen der verschiedenen Ausführungen so unterschiedlich waren, werden die Einlagen erstrangig nach visuellen Auffälligkeiten inspiziert, ob die Einlagen gleich waren oder ob ein Fertigungsproblem vorlag.

Die Einlagen mit den größten Dicken wiesen eine Gemeinsamkeit auf. Unter der Belastung sind die Einlagen mit einer Dicke von  $>1,8\text{mm}$  gebrochen.

Betrachtet werden diese Einlagen hinsichtlich des Bruchs, sodass erkannt wurde, dass keine irreversiblen Verformungen vorlagen. So befanden sich die Graphen im nichtlinearen elastischen Bereich, die Verformung des Bogens war also noch reversibel. Sie



werden aufgrund ihrer Steifigkeit für den Einsatz als stützende Einlage als ungeeignet eingeschätzt.

In Bezug auf die Materialwahl konnten in den Auswertungen keine signifikanten Differenzen zwischen den glasfaserverstärkten und kohlenstoffverstärkten Kunststoffe entnommen werden. Hinzu kommt, dass die Materialien unterschiedlich zusammengesetzt waren. Da hier Verbundwerkstoffe vorlagen, kann davon ausgegangen werden, dass verschiedene Verfahren für die Verbindung der Materialien angewandt wurden. So bestehen laut Hersteller die aufgeführten Materialien mit einer Dicke von <1mm aus einer einlagigen Materialkombination. Die restlichen Materialien haben bis zu fünf Lagen.

Aus den Ergebnissen der graphischen Ermittlung der Steifigkeiten war für die Einlagen eine weitere Gemeinsamkeit hervorgetreten. Jede Anfangssteigung war höher als die gesamte Steigung. Mit den in Kapitel 4.1.2 Steifigkeitsbestimmungen erwähnten Ausnahmen, waren die Werte der Anfangssteigung sogar mindestens um ein Zweifaches größer als die Gesamtsteigung. Hiermit lässt sich begründen, dass es keinen linearen Verlauf im Kraft-Verformungs-Diagramm gab und ein relativer Kraftverlust in der Belastungskurve zu verstehen ist. Die Anfangssteigung beschreibt somit die Steifigkeit für kleine Verformungen und die Gesamtsteigung die der größeren Verformungen.

## 5.2 Sollwert-Berechnung

Die in Kapitel 4.1.3 Sollwert-Berechnung aufgeführten Diagramme mit dem eingezeichneten Maßstab für den gewünschten Druck und der Verformung, zeigten eine Gemeinsamkeit: Der Sollwert lag für jede Einlage über dem Graphen. Gemäß des Maßstabes sollte die Messung durch diesen gehen. Zu den Messdaten unterhalb des Bereichs kann gesagt werden, dass das Material mehr Kraft bzw. Druck aufbringen müsste. Das Material war in diesen Fällen zu weich bzw. nicht steif genug. Die Ausnahme zeigte die N2L-Einlage: Der Graph dieser Einlage führte durch den ermittelten Soll-Wert. Im Verlauf dieser Arbeit wurde bezüglich der N2L Einlage vermutet, dass sie aufgrund der hohen Steifigkeit und der Messwerte und Festigkeit in Kombination mit der großen Dicke als orthopädische Einlage eher ungeeignet ist. So wurde erwartet, dass diese Einlage sich oberhalb des Sollwertes befindet, da sie als zu steif empfunden wurde. Mit dem gegebenen Maßstab sollte die Einlage wohl den physiologisch notwendigen Druck für die erforderliche Verformung nachweisen, wobei dies in Frage gestellt werden muss.

Dieser Maßstab bezieht sich auf eine Einschätzung, da nicht mit tatsächlichen Werten gerechnet wurde. So könnte das Problem darin bestehen, dass durch die Annahme der Geometrie die zu belastende Fläche überschätzt wurde. Durch diese Auffälligkeit sollten die Größen für den Zusammenhang überarbeitet werden: So könnte die Länge bzw. Breite beispielweise angepasst werden. Das Halbieren der Fläche würde die Verdoppelung des Drucks als Folge haben. Aufgrund des Nichtvorhandenseins von tatsächlichen Werten für die Druckverteilung, ist mit der Anpassung der Größen lediglich eine Annäherung bzw. relative Differenzierung möglich.

## 5.3 Modell

### 5.3.1 Bestimmung Materialeigenschaften: 3-Punkt Biegeversuch

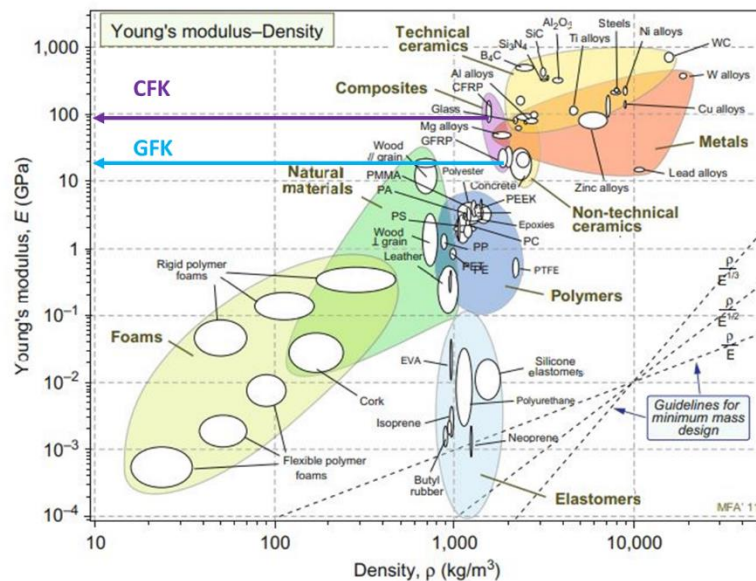


Abbildung 47 Elastizitätsmodul für Werkstoffe (Michael F. Ashby, 2013)

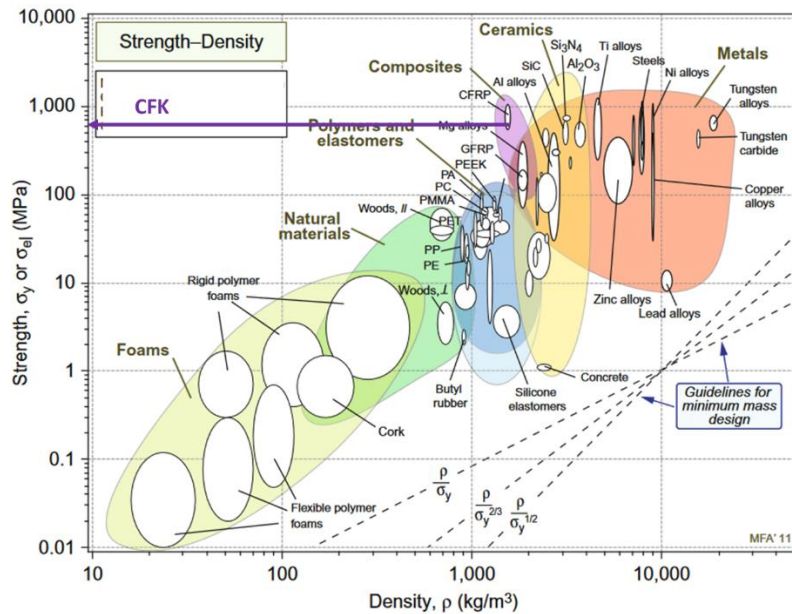


Abbildung 48 Festigkeit für Werkstoffe (Michael F. Ashby, 2013)

Mit der graphischen Gegenüberstellung der Materialkenngröße, ist zu erkennen, dass es keine gleichen E-Modul Werte gab. Abbildung 47 Diagramm Ergebnis. Für den Großteil der Einlagen konnte ein linearer Verlauf im Kraft-Verformungs-Diagramm erkannt werden, sodass hiermit eine gute Bestimmung der Steigung möglich war. Mit dem 3 Punkt Biegeversuch ist während der Materialprüfung aufgefallen, dass ein nahezu linearer Verlauf der Belastung- und Entlastungskurve vorliegt mit geringem Kraftverlust (Anhang D Werkstoffprüfung mit 3 - Punkt Biegeversuch). So kann begründet werden, dass die Hysterese in den Kraft-Verformungsdiagrammen nicht verursacht wird von dem Material, das bedeutet, dass es keinen Kraftverlust ausgehend vom Material gibt. Es ist nicht möglich mit den Messwerten auszusagen, dass der Elastizitätsmodul von CFK größer als der des GFK Materials ist, so wie es nach (Abbildung 47) gekennzeichnet ist. So lagen Werte von 2GPa bis 41GPa (Tabelle 9) für die getesteten Einlagen vor, wobei kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Materialien zu erkennen war. Für die dünnen Materialien wurden während des 3-Punkt Biegeversuches Kräfte gemessen, die vergleichsweise gering waren  $<5\text{N}$  (Anhang D Werkstoffprüfung mit 3 - Punkt Biegeversuch :WSP\_Probe6\_N8RL und Probe5). Diesem Diagramm ist ein Rauschen zu entnehmen, welches die Ursache hatte, dass eine geringe Kraft in Bezug auf die Kapazität gemessen wurde. Mit anderen Worten: Das Prüfsystem wurde für Messungen bis zu 25kN mit einer Genauigkeit von 0,5% kalibriert (Instron, n.d.). Das verursachte Rauschen war bei den geringen Werten zu erwarten. Wenn Kräfte dieser

Größenordnung zu messen sind, ist es empfehlenswert, ein dementsprechend kalibriertes Messsystem zu wählen.

Aufgefallen ist, dass die N2L Einlage im Gegensatz zu den anderen Prüfungen einen weitaus größeren E-Modul Wert zeigte, sodass dieser am ehesten im zu erwartenden Bereich nach Abbildung 47 liegen würde.

Einige Werte des getesteten GFK Materials können gemäß der Abbildung 47 dem Bereich der Verbundwerkstoffe zugeordnet werden. Für CFK soll der Wert des E-Moduls im Bereich von ca. 70-120 GPa liegen ((Michael F. Ashby, 2013). Es wurden CFK und GFK Materialien getestet, die eine unterschiedliche Anzahl an Lagen, verschiedene Dicken und Webstruktur-Ausrichtungen hatten. Da der Elastizitätsmodul eine Materialkenngröße ist, hat die Veränderung der Geometrie keinen Einfluss auf diesen Wert. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 42 zu erkennen, da die Dicke, die der x-Achse entnommen ist, keine Auswirkung auf die ermittelten E-Module hat. Hinzu kommt, dass es keinen auffälligen Unterschied bezüglich der Webstruktur der Einlagen gibt. Zu erwähnen ist, dass bei der Verbindung von Kohlenstofffaser in eine Acrylmatrix andere Flechtmuster vorliegen als bei GFK. Die Lagen werden versetzt aufeinander gelegt, d.h. dass Längsfasern auf Querfasern gelegt werden, um so Lücken in der Struktur zu vermeiden. Damit sind die kleinen Differenzen der CFK Einlagen innerhalb der längs bzw. quer ausgerichteten Webstruktur zu begründen.

Der Vergleich der GFK Einlagen hinsichtlich der Webstruktur konnte nicht hergestellt werden, da keine Einlagen in Querrichtung vorlag. Es konnte jedoch ein Unterschied während des 3-Punkt Biegeversuchs in der Ermittlung des E-Moduls festgestellt werden (siehe Anhang D Werkstoffprüfung mit 3 - Punkt Biegeversuch). So war der E-Modul der Materialprobe für die Quer-Ausrichtung bei 2,16GPa und die der Längs-Struktur bei 5,65GPa. Es ist zu erkennen, dass die GFK Materialprobe mit quer ausgerichteter Webstruktur weicher war als die längs ausgerichtete Webstruktur. Von Interesse wäre eine Prüfung von Einlagen aus GFK mit einer Quer-Struktur, um einen Vergleich herzustellen.

Aus diesem Grund muss die Werkstoffeigenschaft die Ursache für die Differenzen sein. Durch die zu erkennende Variabilität in den Messwerten, wird angenommen, dass die Zusammensetzung der Materialien für die Einlagen unterschiedlich waren. Es ist davon auszugehen, dass die mehrlagige Einarbeitung verschiedener Werkstoffe und die Beschichtung mit Acryl-bzw. Epoxidharzen einen Einfluss auf die Materialkenngröße ha-

ben. Das Vorhandensein eines Verbundwerkstoffes ohne genaue Information über die Materialzusammensetzung begründet unter anderem die vorliegenden Differenzen.

Die Festigkeit, die für Einlage N2L bestimmt werden konnte, liegt mit ihrem Wert von  $\sigma_{max} = 380,65 MPa$  nah am Bereich der Literatur, gemäß Abbildung 48.

Es war mit dem 3-Punkt Biegeversuch nicht möglich weitere Festigkeiten zu bestimmen, sodass mit diesem Wert nur ein Exemple geboten wird. Die Messvorrichtung war für die Bestimmung der Festigkeit an den restlichen Materialproben ungeeignet, da eine größere Verformung notwendig gewesen wäre, was nicht im Rahmen des Möglichen war. Mit dieser Vorgehensweise könnte mit der richtigen Messvorrichtung eine wichtige Größe für den Werkstoff bestimmt werden.

### 5.3.2 Validierung des Modells

Wie aus dem Diagramm der Ergebnisse zu entnehmen ist, zeigt das Modell nach Randbedingung 1 die kleinsten Fehler auf (Abbildung 44). Randbedingung 1 beschreibt den Zusammenhang eines frei gelagerten Balkens, so wie in den theoretischen Grundlagen (2.6 Randbedingungen) beschrieben. Wird dies auf diese Arbeit mit Einlagen angewandt, so zeigt sich, dass das Modell für eine Einlage, die nicht fest eingespannt ist – wie es die Randbedingung 2 definiert – eher geeignet ist.

Randbedingung 2 würde nämlich beschreiben, dass ein Biegemoment übertragen werden kann, sodass eine höhere Steifigkeit erwartet wird, wie es aus Abbildung 45 hervorgeht. Mit den daraus folgenden Fehlern und Abweichungen zu den Messwerten, kann beurteilt werden, dass diese nicht den Anforderungen genügen und als ungeeignet eingestuft wird.

Unterstützt werden kann dies mit der Validierung für die maximale Kraft  $\hat{F}$ . Hier liegt für Randbedingung 1 wieder ein kleinerer Fehler vor. Hier liegt nur ein Wert vor, sodass kein Vergleich mit anderen Einlagen möglich ist, hierfür ist es zu empfehlen die Größe der Festigkeit für das Material zu bestimmen. Die Einlage N2L ist mit den Auswertungen als zu steif einzuschätzen und nicht geeignet für die Verwendung stützende Einlage.

## 5.4 Beziehungsaufbau $\frac{P}{u}$

Das Modell wurde mit Druck pro Verformung in Relation gebracht und exemplarisch mit den vorherbestimmten Eingangsgrößen wurde die Dicke  $t$  bestimmt. Für die Verformung von 1mm wurden Werte für  $t$  ausgegeben, die  $>1,5$ mm waren. Die Steifigkeit, die daraus resultiert ist nicht geeignet und mit der Dicke für eine Einlage eher unrealistisch. Die Werte für die Dicke gehen bis zu 5mm, wenn man bedenkt, dass die Einlage lediglich das Kernmaterial beschreibt und noch mit einem Deck- bzw. Untermaterial verarbeitet werden, würde die Einlage nicht in den Schuh einsetzbar sein.

Wird die Tabelle mit der Verformung von 10mm betrachtet werden die notwendigen Dicken kleiner, jedoch sind sie noch zu groß, vor allem für Randbedingung 1. Das kann daran liegen, dass die Länge von 80mm geschätzt wurde und mit dem Exponenten von 4 einen großen Einfluss für die Berechnung hat. So kann daraus geschlossen werden, dass eine Überschätzung der Länge des Bogens vorliegt.

Der maximale Druck konnte für eine Einlage mit der Festigkeit bestimmt werden. Wenn der hier ermittelte Druck größer ist, als die  $10\text{N/cm}^2$ , dann führt es zu einem Bruch, was nach Randbedingung 1 der Fall ist. So kann weiter begründet werden, dass diese Einlage nicht den Anforderungen einer orthopädischen Einlage entspricht.

## 5.5 Bewertung des Modells

Mit den Ergebnissen, die die Validierung bereitstellt, stellt sich heraus, dass die Randbedingung 1 mit den geringen Fehlern eher geeignet ist, sowohl für große als auch für kleine Verformungen.

Randbedingung 1 beschreibt im Zusammenhang mit der Praxis ein Modell, dass der Einlage die Möglichkeit bietet sich zu bewegen.

So wird auf Grundlage der Validierung der Modellwerte gegen die Messwerte die gewünschte Beziehung zwischen  $\frac{F}{u}$  und  $\frac{P}{u}$  hergestellt. Dass mit der Validierung eben dieser Zusammenhang hergestellt werden kann, geht aus der Theorie hervor, wie in Kapitel 2.6 Randbedingungen erläutert, dass die Herleitung der Größen übereinstimmen.

Das Modell basiert darauf mit gegebenen Eingangsvariablen, wiedergespiegelt in Geometrie und Werkstoffeigenschaften, Vorhersagen zu ermöglichen. So kann für die Randbedingung 1 folgender Druck-Verformungs-Zusammenhang wieder aufgegriffen werden (Formel 18):

$$\frac{P}{u_{\text{Randbedingung 1}}} = \frac{32 \cdot E \cdot t^3}{5 \cdot L^4}$$

Aus dieser Gleichung geht hervor, welche Abhängigkeiten der Parameter vorliegen. Es versteht sich damit, dass die Steifigkeit  $\frac{P}{u}$  stark abhängig ist von der Dicke  $t$ , da dieser mit einem Exponenten von drei berücksichtigt wird. Wird die Dicke  $t$  beispielweise verdoppelt, so nimmt die Steifigkeit mit einem Faktor 8 zu, bzw. nimmt der Druck achtfach zu, bei einer gegebenen Verformung  $u$ . Aus dem Zusammenhang der Formel tritt die Wichtigkeit für die Länge des Einlage-Bogens  $L$  hervor. Je länger der Bogen ist, desto weicher.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beim Vorhandensein von klinischen Werten für die notwendige Druckverteilung mit diesem Modell ein Werkzeug geboten wird, dass ausgeben kann, welche geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften erforderlich sind.

Auf der anderen Seite kann dieses Modell für klinische Studien verwendet werden, da sie in diesem Kontext eine große Wichtigkeit darstellen. So kann beispielweise eine Studie durchgeführt werden mit Proband\*innen, dessen Zufriedenheit als Ausgangsgröße definiert wird und als Eingangsgröße werden die oben aufgeführten Parameter verwendet. Sodass nunmehr CFK mit einem bekannten E-Modul zum Einsatz kommen kann für eine stützende Einlage, um das Absenken des medialen Längsgewölbes zu verhindern. Patient\*innen individuell kann dann die Geometrie gewählt werden. So können die gewählten Parameter dokumentiert werden und letztlich unter den Proband\*innen, also der Ausgangsgröße, verglichen werden. Hiermit können Rückschlüsse gezogen werden, warum etwas klinisch passiert, da die Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen nachverfolgbar bzw. variierbar sind. Es kann so daraus geschlossen werden, welche Parameterkombinationen als gut empfunden werden, um so einen klinisch Wert für den Druck-Verformungs-Zusammenhang zu ermitteln.

## 6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit konnte ein zukünftig vielseitig anwendbares Model erstellt werden, um ein Verständnis der Abhängigkeiten zwischen den Parametern zu zeigen. Es konnte mithilfe des Experimentes die gewünschte Beziehung zu der klinisch notwendigen Größe hergestellt werden. Das Ziel der Model-Erstellung konnte mit dieser Bachelorarbeit somit mit der Validierung erreicht werden.

Zukünftig kann das Model in der Orthopädie als Werkzeug dienen, sodass Patient\*innen-individuell eine Parameter Einstellung erfolgen kann. Hiermit ermöglicht das Model eine geeignete Einlage unter der Berücksichtigung der Geometrie und der Materialeigenschaften auch Indikation übergreifend eingesetzt zu werden.

Der Wunsch eine dünne Einlage herzustellen ohne ein Kompromiss in der Steifigkeit eingehen zu müssen kann somit durch die Anpassung der Parameter erfüllt werden.

Die Komplexität, die mit der individuellen Versorgung einhergeht, kann mit diesem Grundgerüst weiter ausgearbeitet werden. So ist es möglich mit einer Limitierung der Parameter sowohl für die Geometrie als für die Werkstoffeigenschaften ein etwas konkreteres Model darzubieten. Bezogen auf den Einsatz in der orthopädischen Schuhversorgung gibt es Grenzwerte für die Länge, die Dicke und auch für die Materialkenngrößen. So kann die Einlage nicht beliebig groß, dick und nicht jedes Material eignet sich für den Einsatz. Diese Limitierung wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, aber mit der Kenntnis und diesem Grundbaustein, kann das Model weiter ausgeführt werden und beispielsweise mit einer Finite Elemente Analyse verfeinert und realistischer dargestellt werden. Hinzukommt, dass lediglich die Festigkeit für eines der Materialien bestimmt werden konnte, die von Wichtigkeit ist um daraus die maximal mögliche Belastung bestimmen zu können. Das Prüfsystem mit einer Kraftmesszelle von 25kN eignet sich nicht gut für Messungen dieser Größenordnung aus diesem Grund sollte ein hierfür kalibriertes Messsystem verwendet werden um schließlich die Biegefestigkeit bestimmen zu können, unter Berücksichtigung der nichtlinearen Fehler.

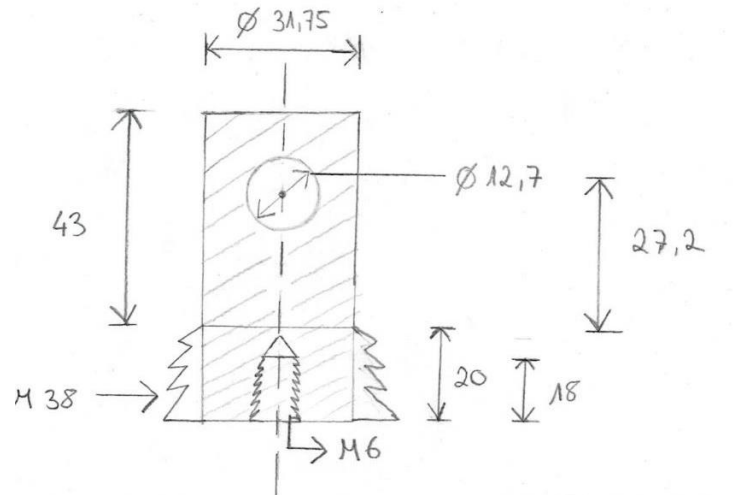
In Bezug auf die Entlastungskurve, die die Wiederaufrichtung der Einlage beschreibt, kann keine Beurteilung gemacht werden, ob der Bogen bei der totalen Entlastung wieder in seine ursprüngliche Position gelangt, hierfür bedarf es einer tatsächlichen Flä-



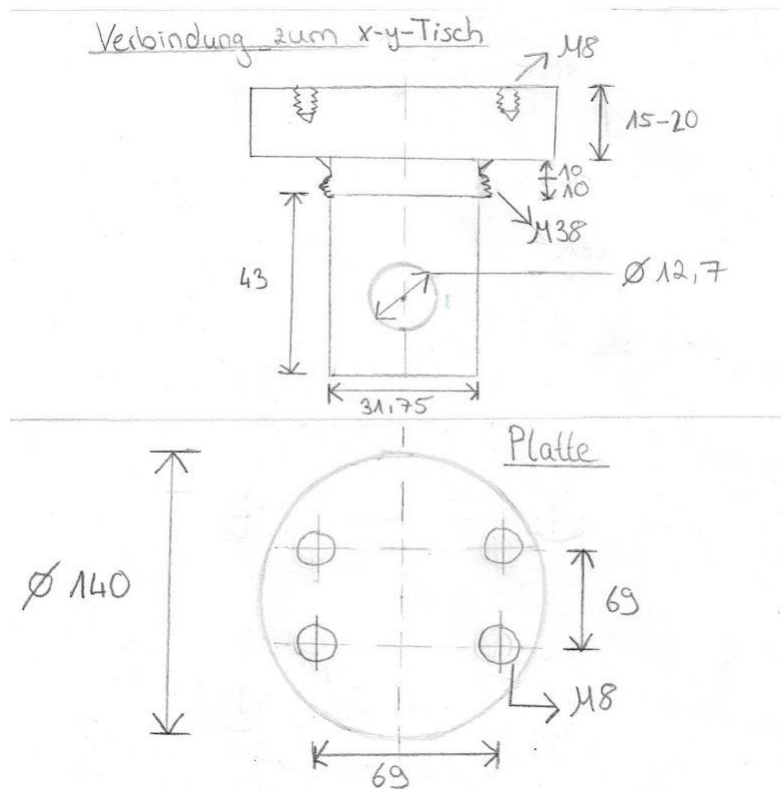
chenbelastung mit einem Fuß. Dass der Bogen in seine Ausgangsposition zurückkehren kann, liegt nach Ausarbeitung dieser Arbeit im Zusammenhang mit der Reibung zwischen Schuh und Einlage. Wenn dem Hysterese Effekt entgegenwirkt werden soll, muss die Reibung minimiert werden, also der Reibkoeffizient soll so klein wie möglich sein. Die Überlegung wäre, die Unterfläche der Einlage zu polieren. Dies wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht modelliert und wäre somit eine Überlegung für weitere Ausarbeitungen. Die Intention dieser Überlegung liegt darin, dass während der Abrollphase ein Druck auf das Längsgewölbe ausgeübt wird.

# Anhang

## A Skizze Adapter Prüfsystem



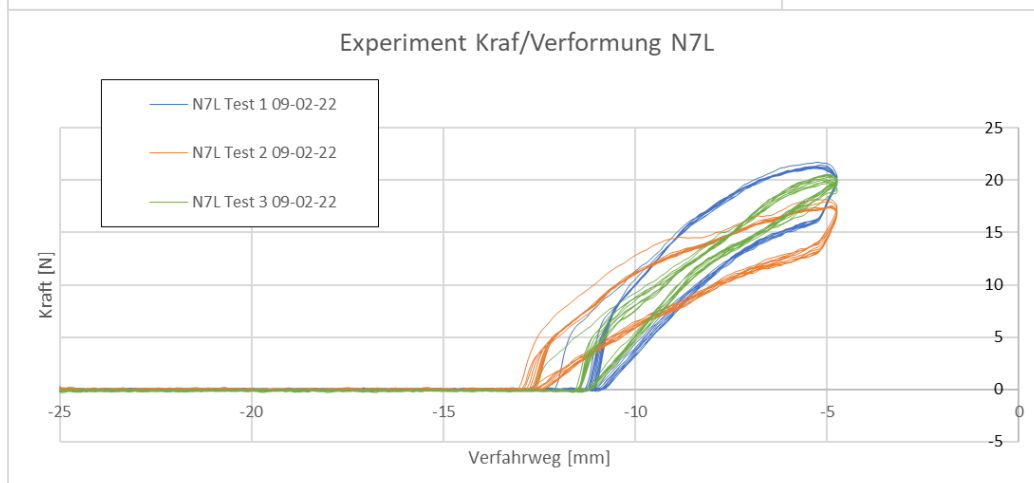
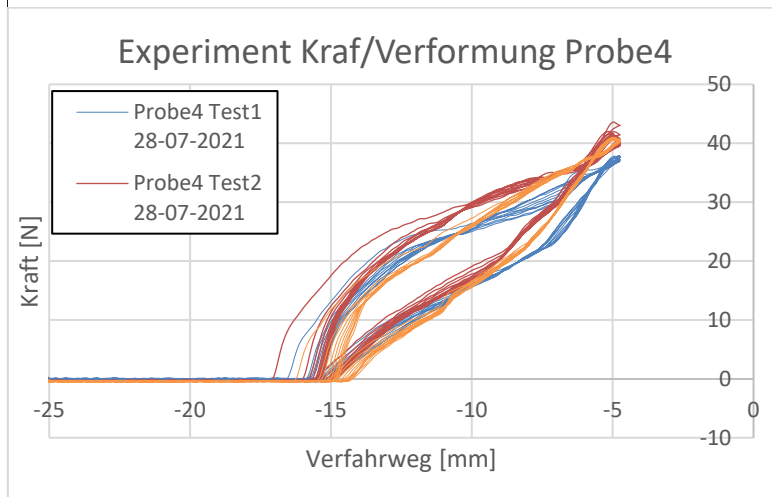
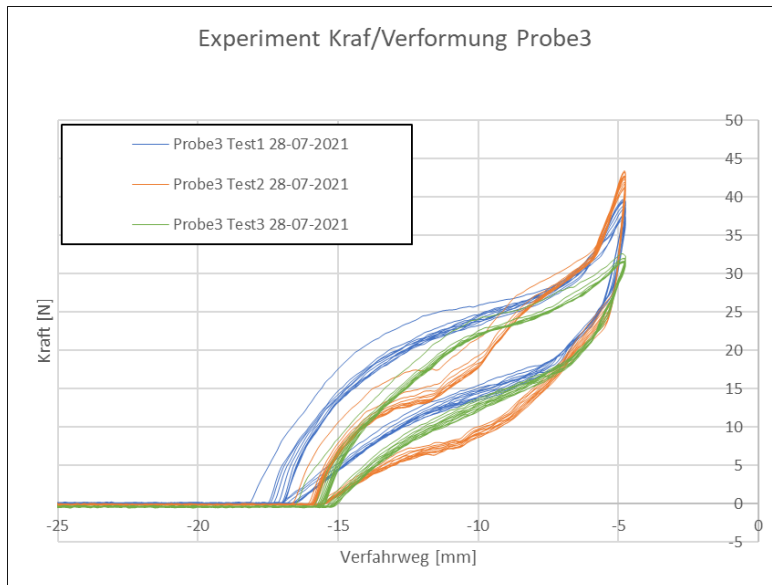
A 1 : Adapter Stift

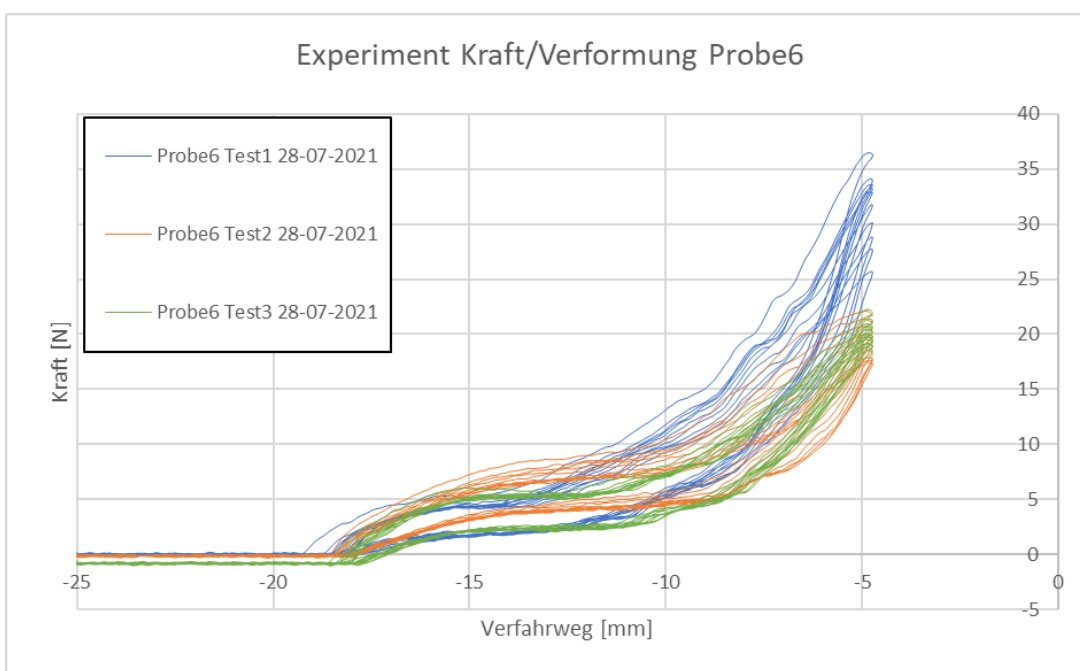
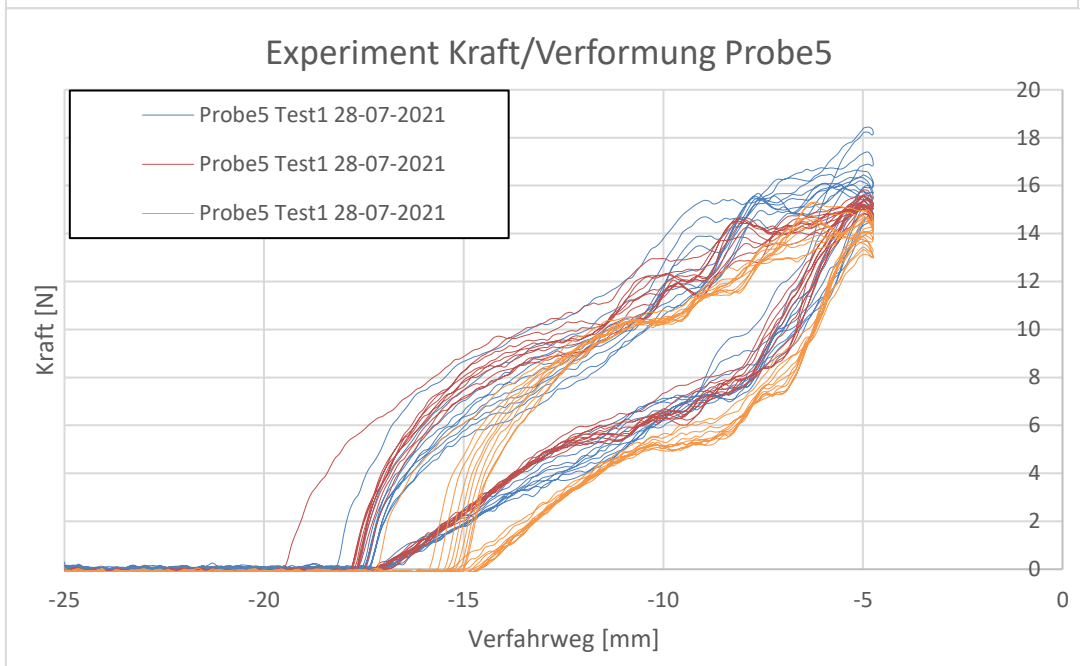
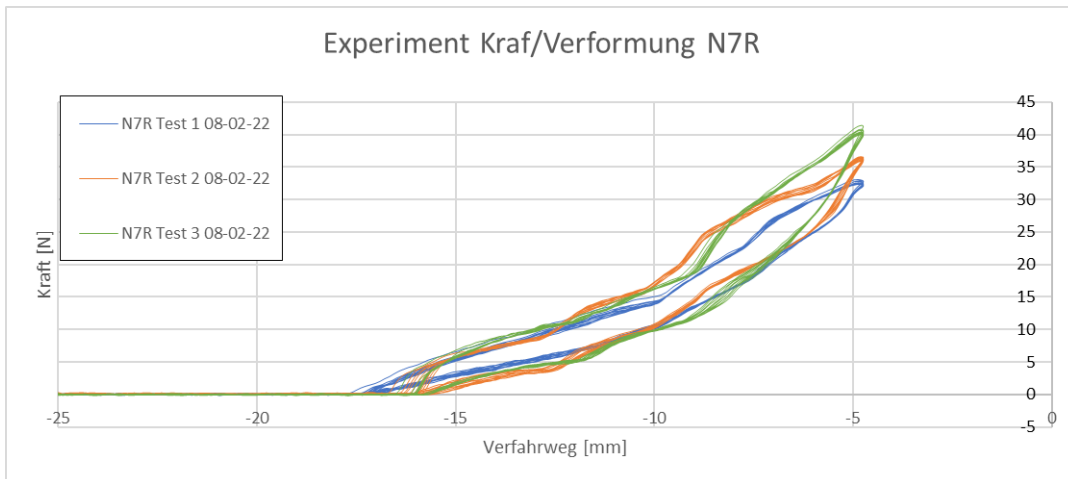


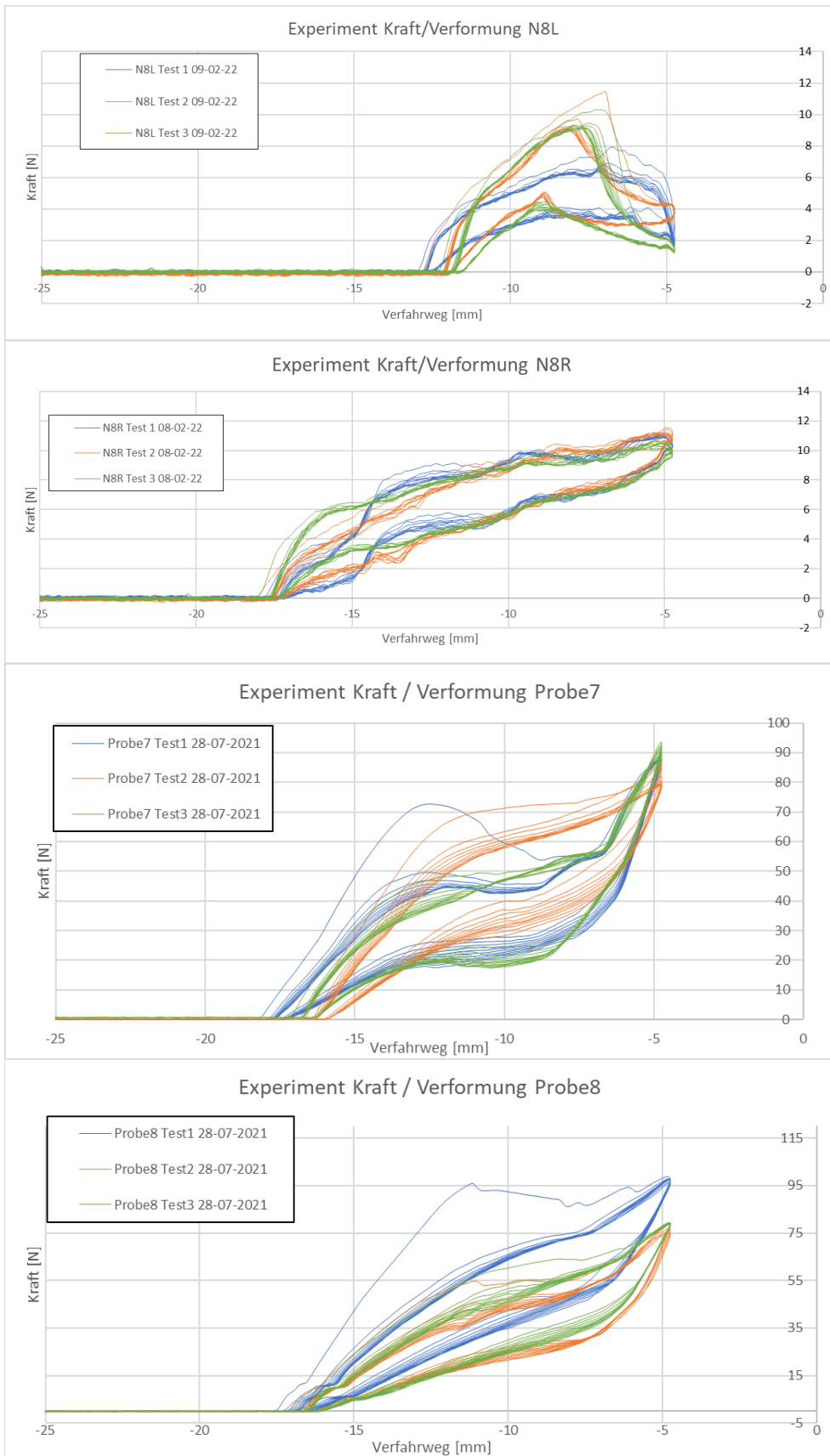
A 2: Adapter Messvorrichtung

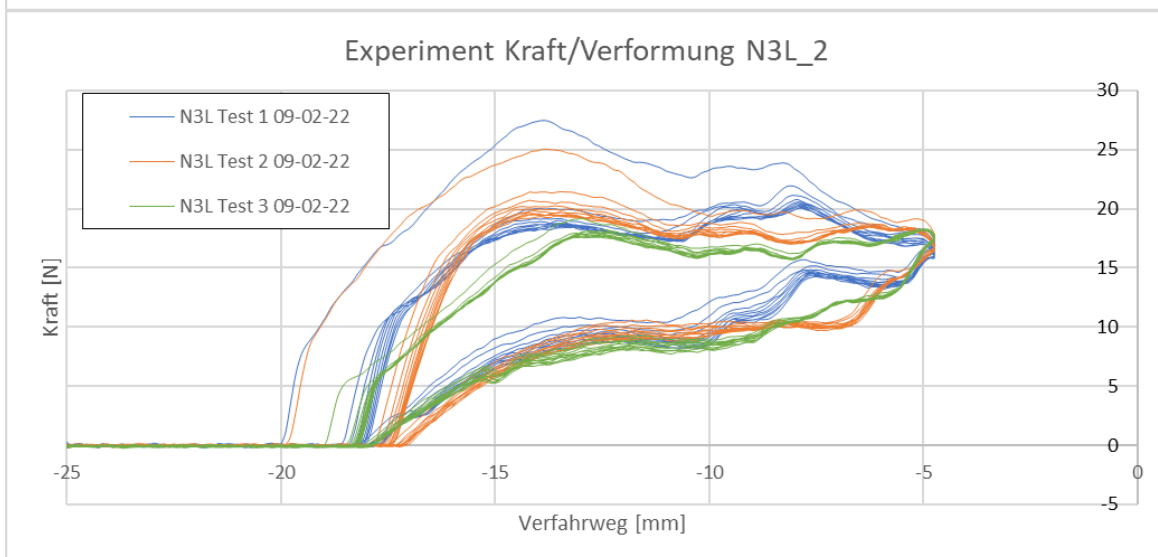
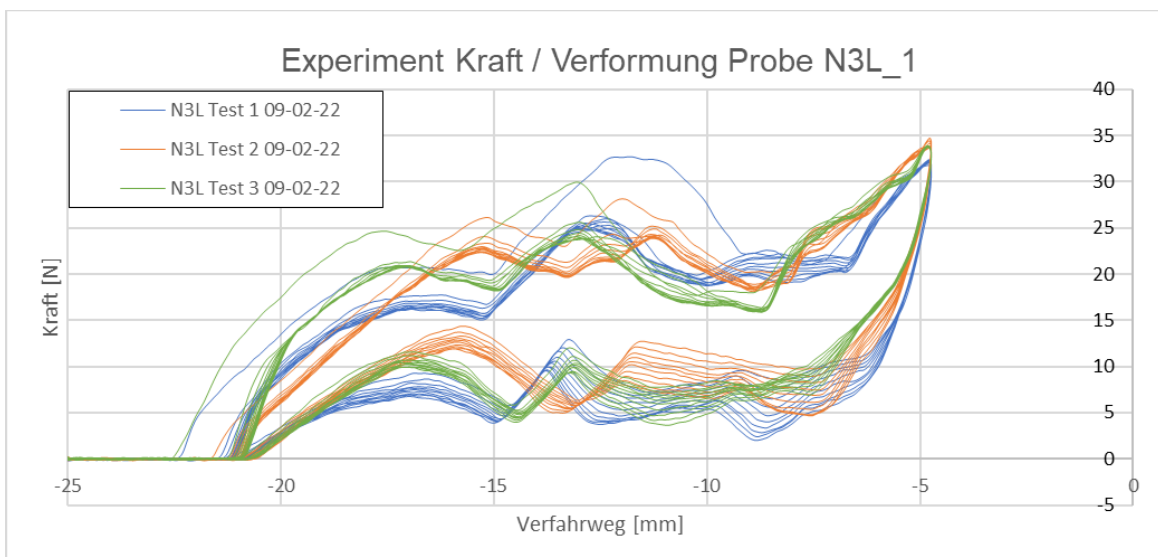
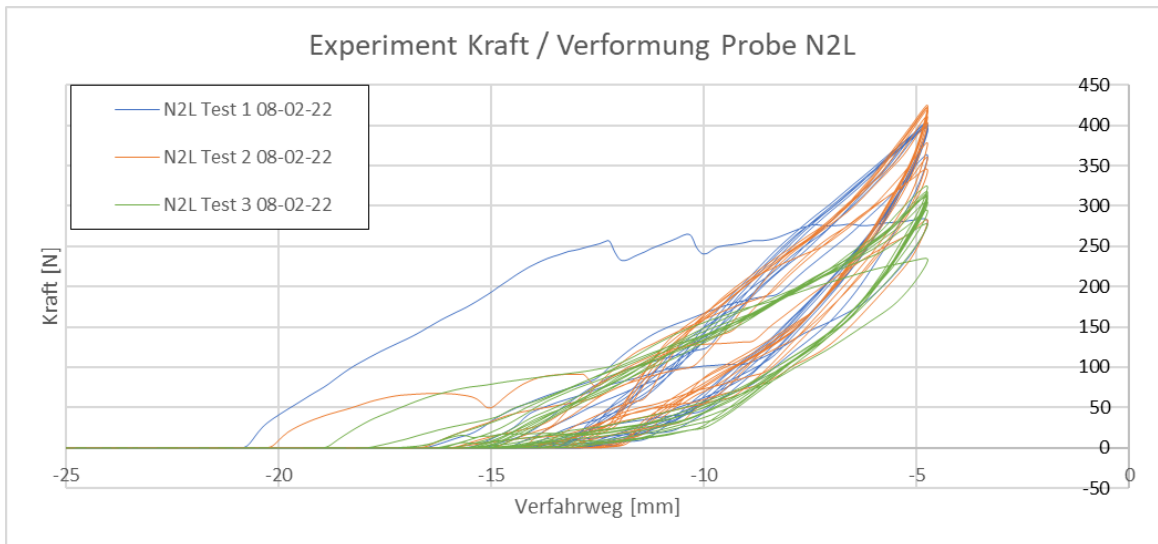
## B Experiment Einlagen

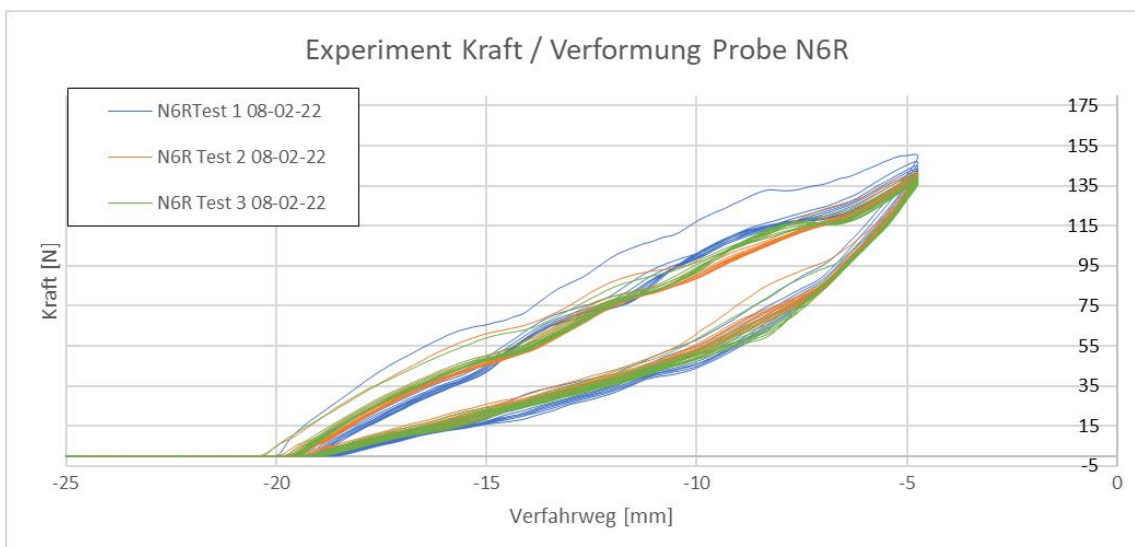
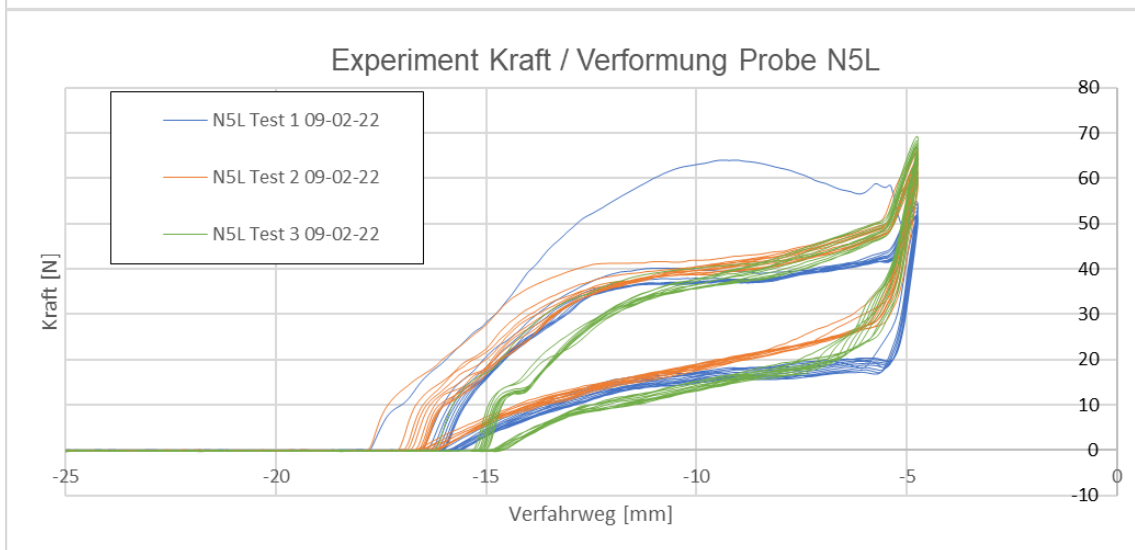
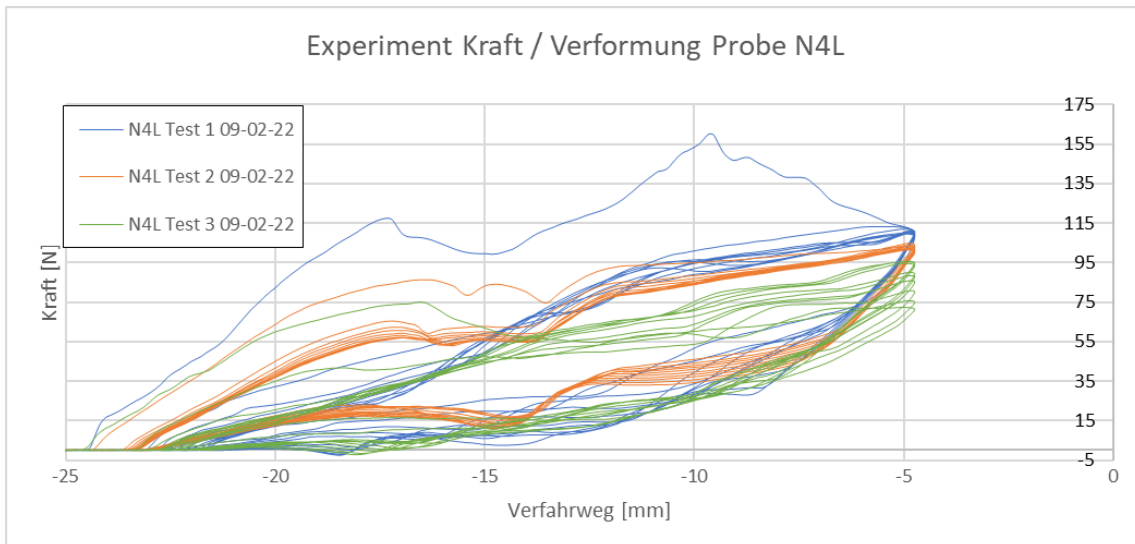
Die Beschriftung entspricht dem Diagrammtitel.





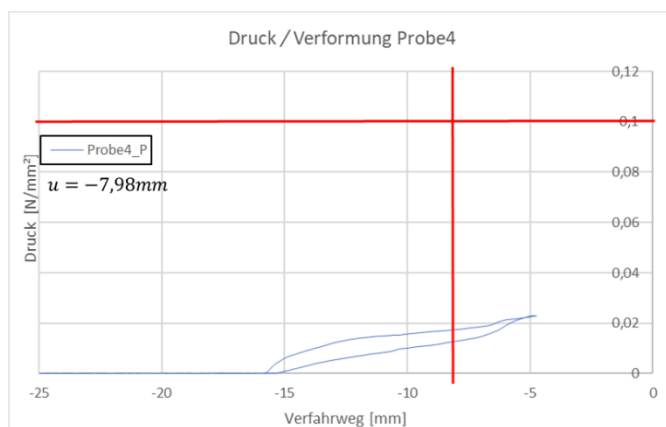
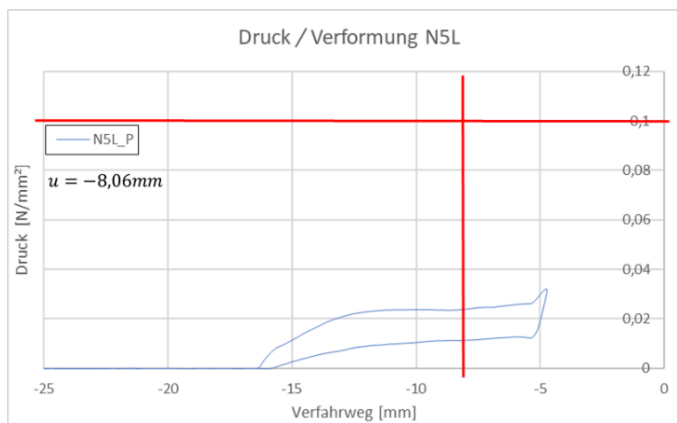
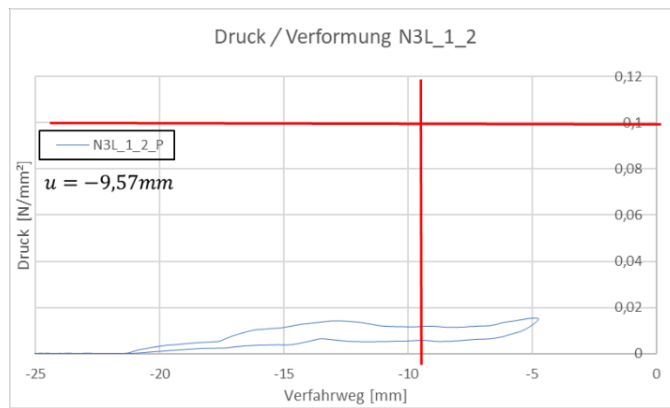
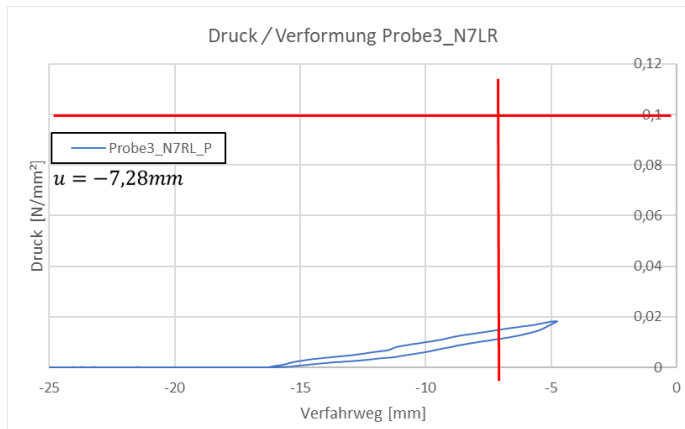




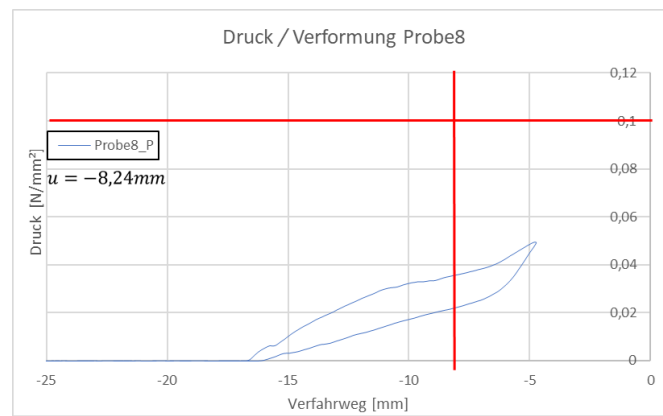
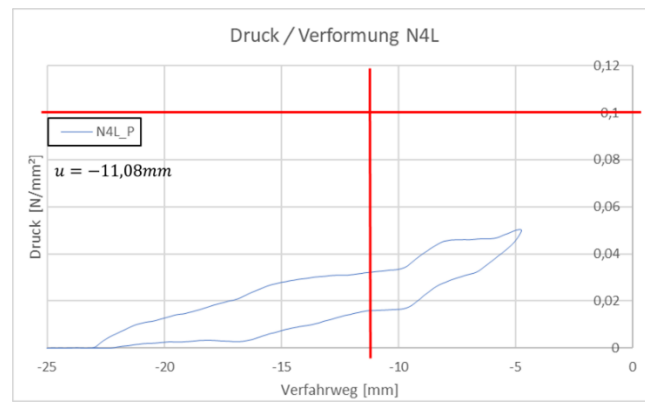
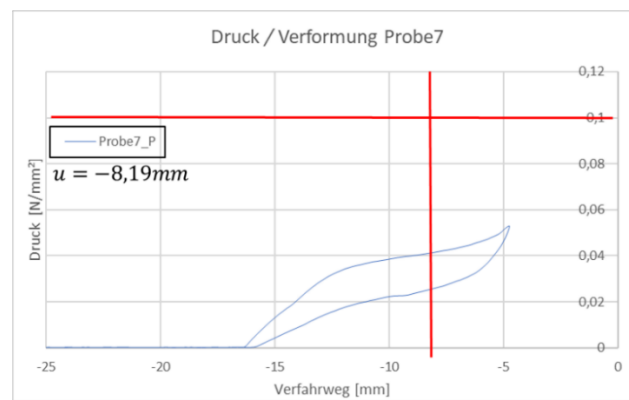
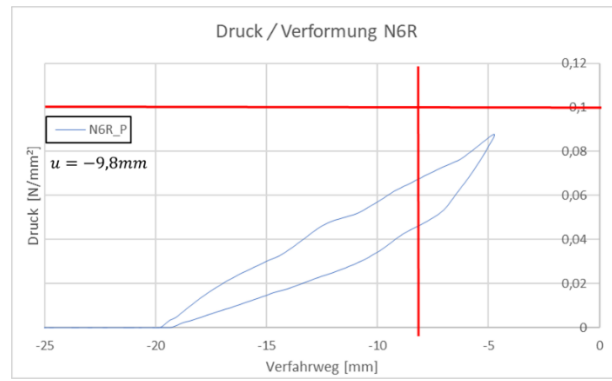


## C Sollwert Berechnung

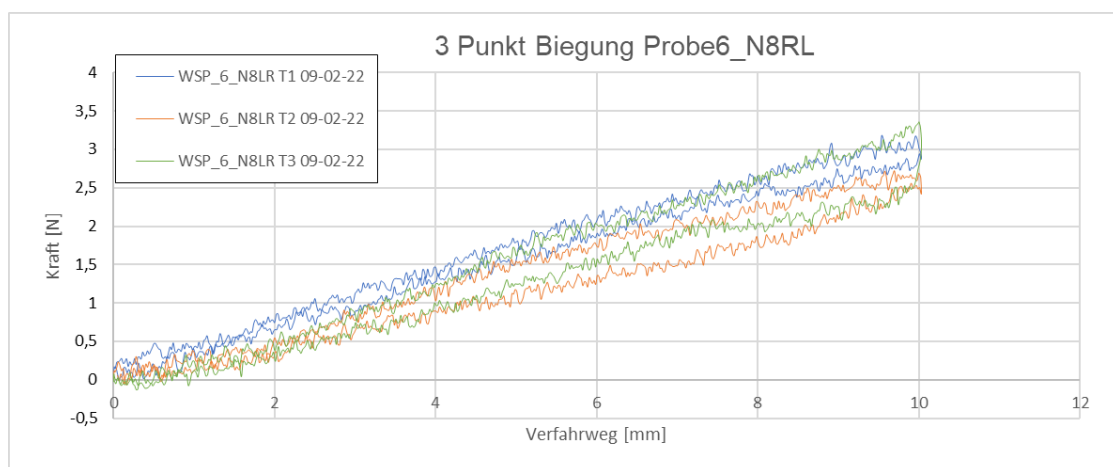
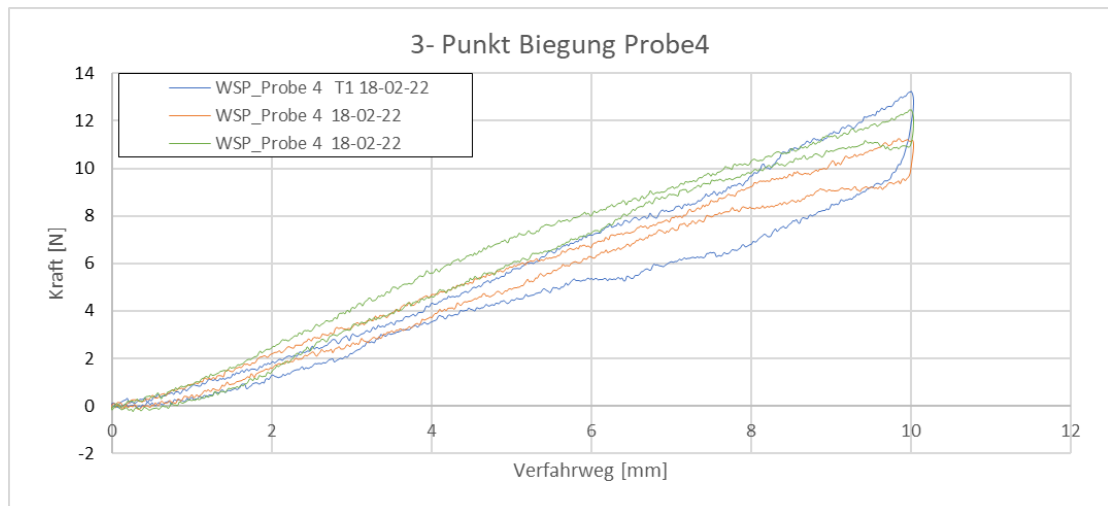
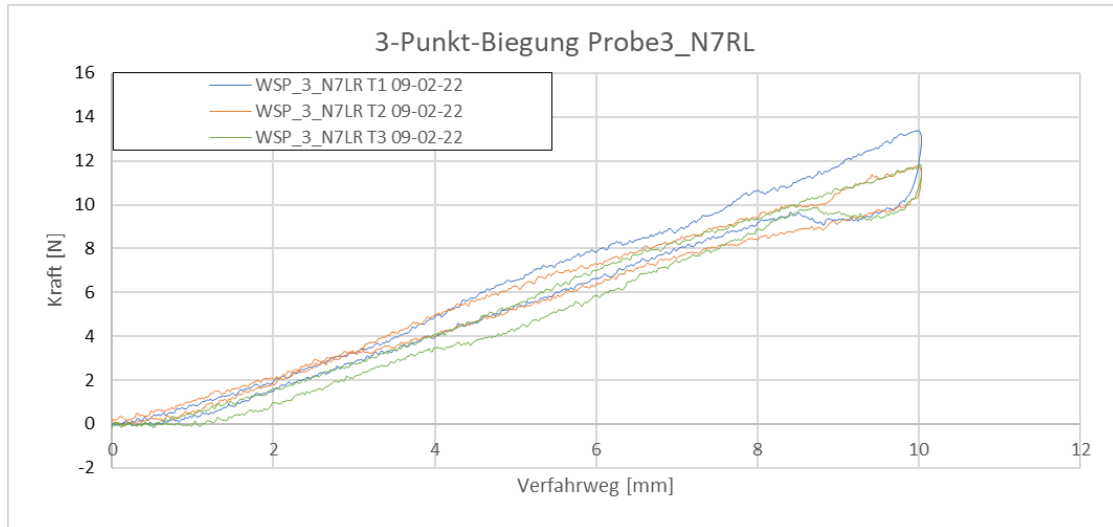
Die Beschriftung entspricht dem Diagrammtitel.

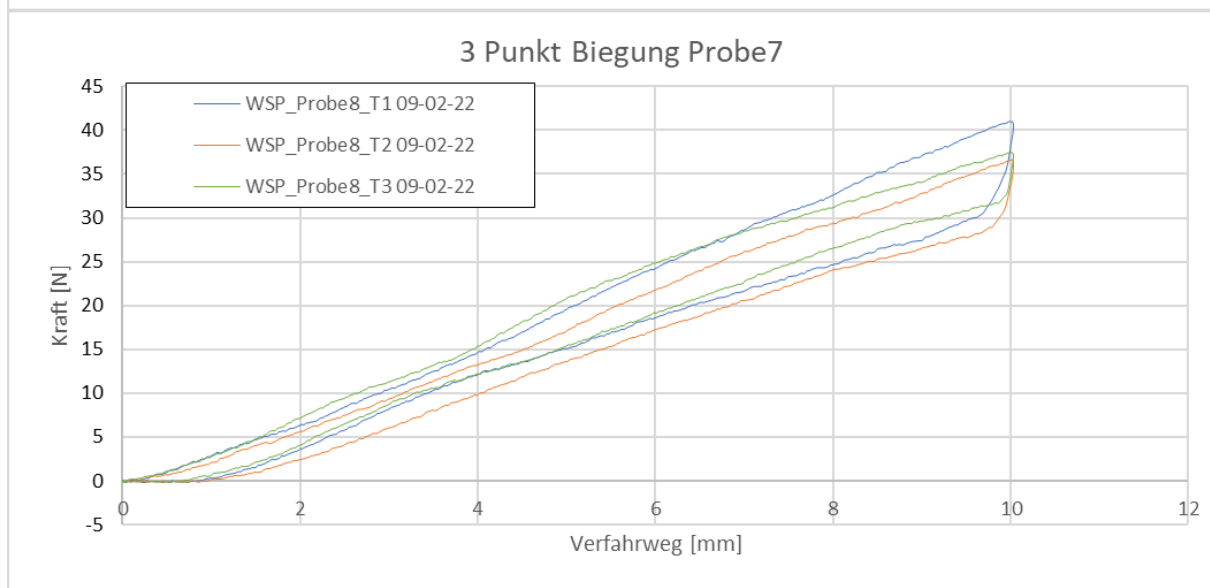
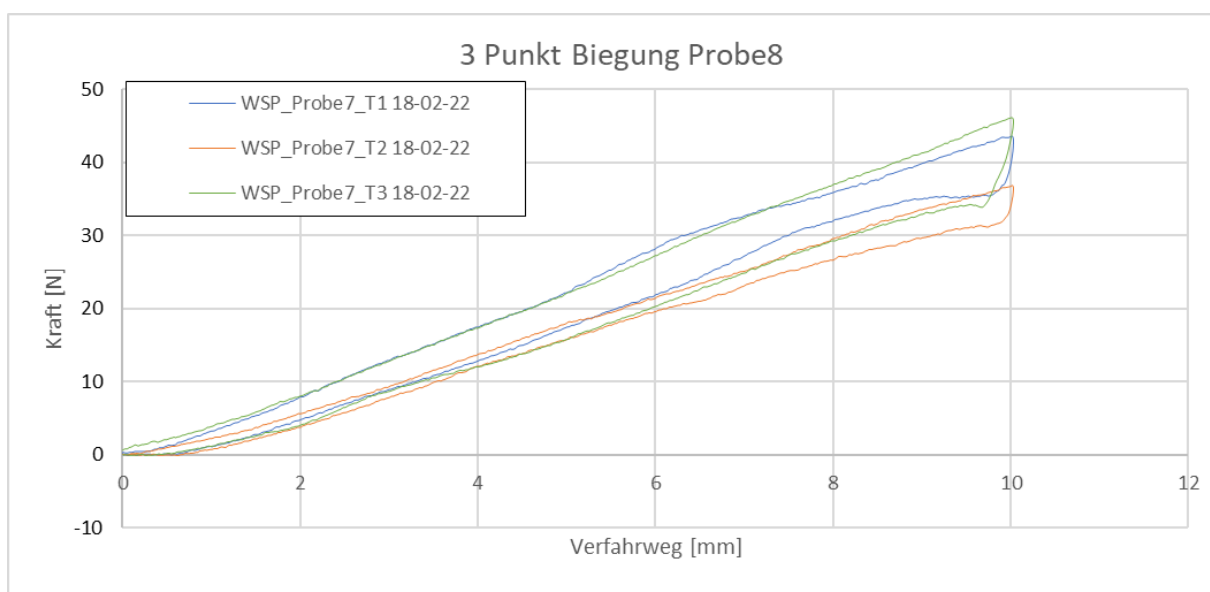
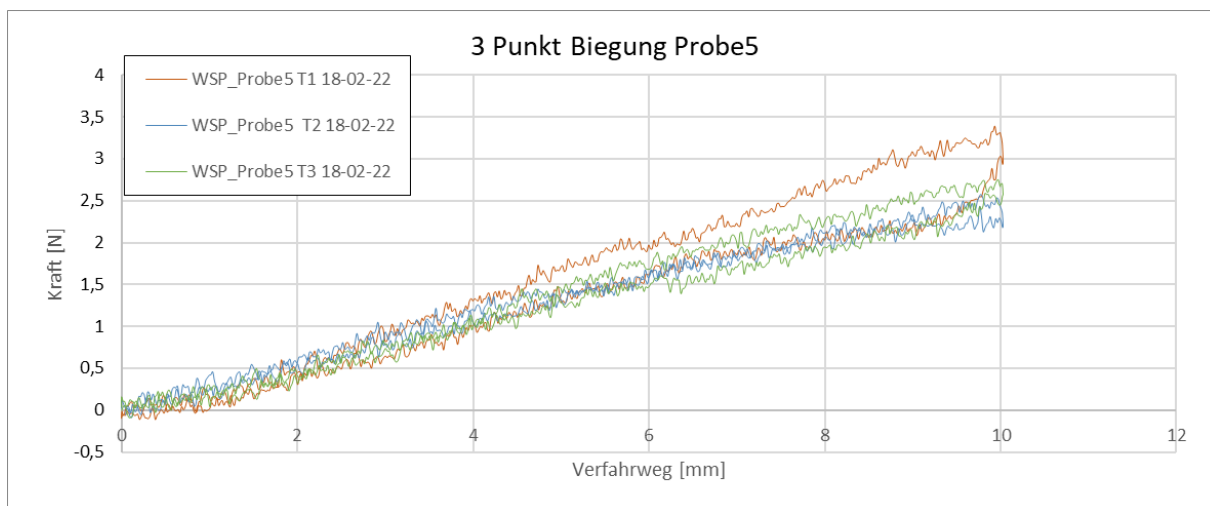


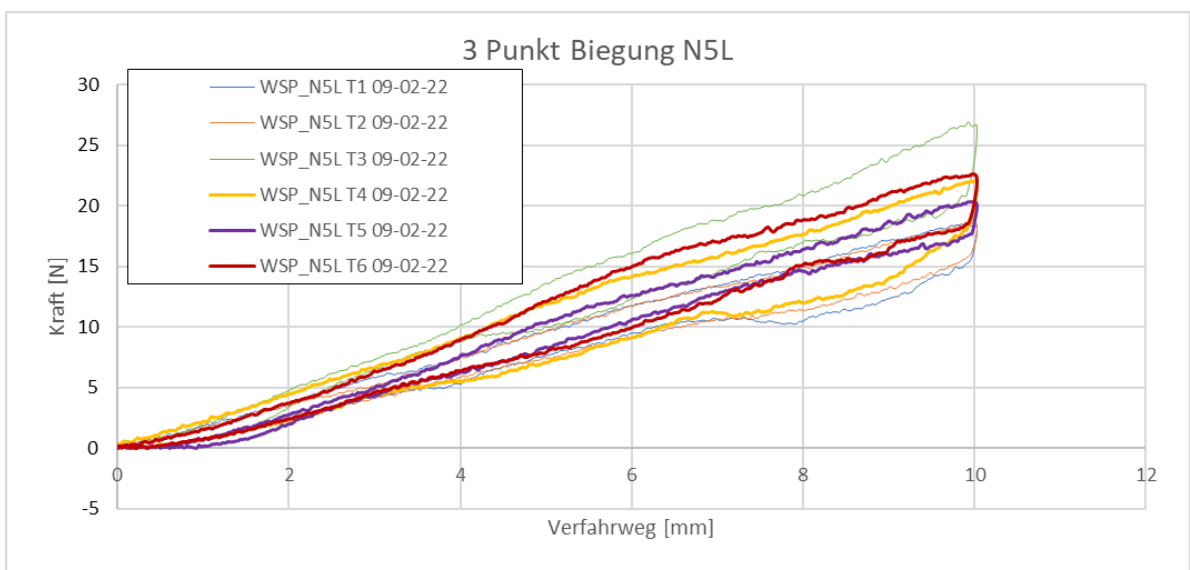
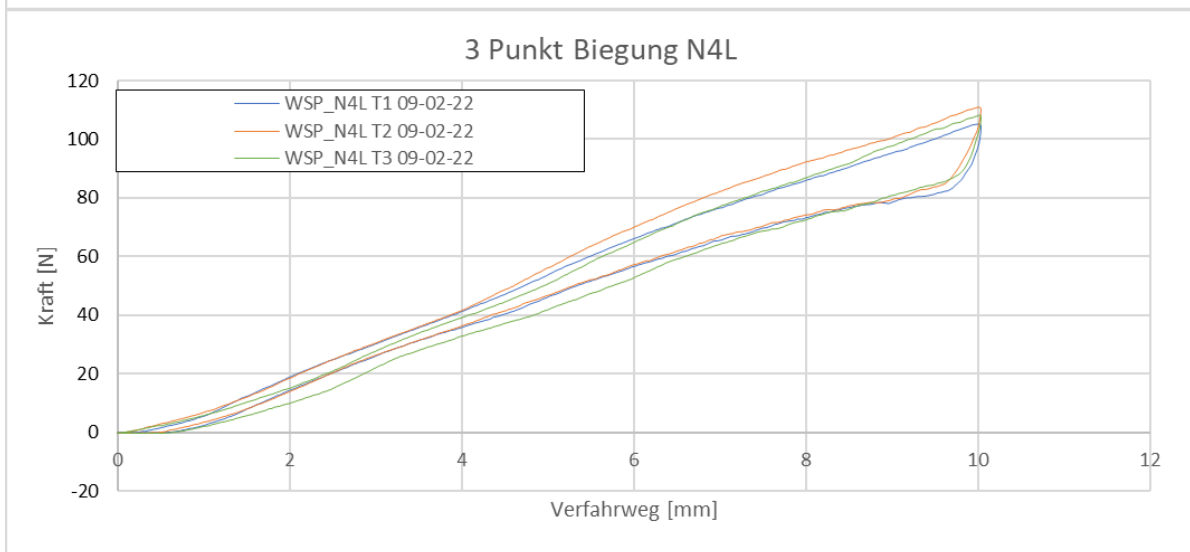
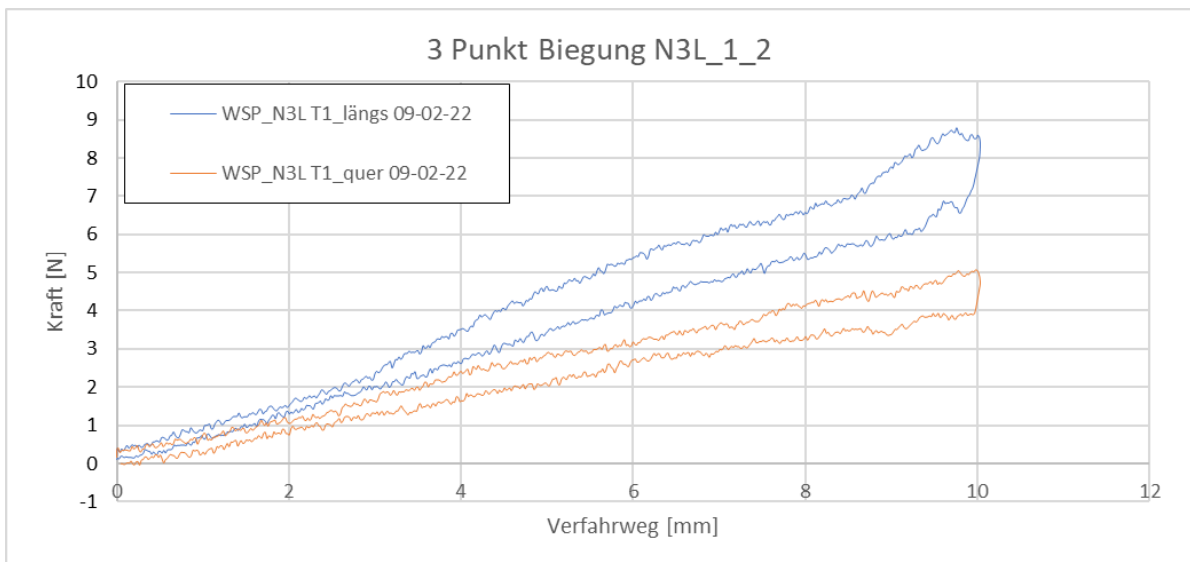


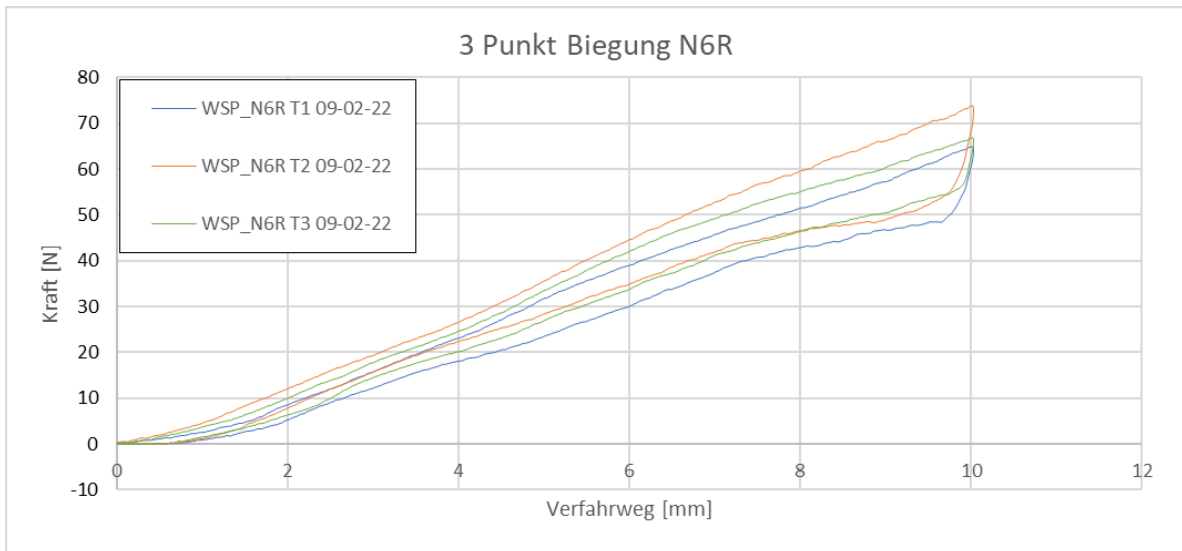


## D Werkstoffprüfung mit 3 - Punkt Biegeversuch









## Literaturverzeichnis

- Budynas, R. G. & Sadegh, A. M. (2020) *Roark's formulas for stress and strain*, 9. Aufl. Deutsches Institut für Normung e.V. (2020) 178 (2020-3): *Kunststoffe-Bestimmung der Biegeeigenschaften*.
- Dlupal (2021) „Steifigkeit“, *Dlupal Software*, 22. Februar [Online]. Verfügbar unter <https://www.dlupal.com/de/loesungen/online-dienste/glossar/000247> (Abgerufen am 21 Februar 2022).
- Emmerich, J., Wülker, N. & Hurschler, C. (2003) „Influence of the posterior tibial tendon on the medial arch of the foot: an in vitro kinetic and kinematic study“, *Bio-medizinische Technik. Biomedical engineering*, Vol. 48, No. 4, S. 97–105.
- EnArgus (n.d.a) *Druckfestigkeit* [Online].
- EnArgus (n.d.b) *Elastizitätsmodul* [Online].
- EnArgus (n.d.c) *Kohlenstofffaser* [Online].
- EnArgus (n.d.d) *Verbundwerkstoffe* [Online].
- eurocom e.V. (2019) *Orthopädische Einlagen: Produktarten, Indikationen, Verordnungen, Versorgung*.
- eurocom e.V. (2020) *Nutzen und Wirksamkeit orthopädischer Einlagen: Steigende Lebensqualität durch weniger Schmerz und mehr Mobilität*.
- Frick, A. & Stern, C. (2017) *Einführung in die Kunststoffprüfung: Prüfmethode und Anwendungen*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Grifka, J (Hg.) (2021) *Orthopädie Unfallchirurgie*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Lengsfeld, H., Mainka, H. & Altstädt, V. (2019) *Carbonfasern*, München, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- (n.d.) *LOAD CELLS FOR DYNAMIC SYSTEMS*.
- Meschede, D. (2015) *Gerthsen Physik* [Online], 25. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. Verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1492631>.
- Michael F. Ashby (2013) *Materials and the Environment*, Elsevier.
- Schuh, R. & Windhager, R. (2016) „Orthopädische Schuhversorgung: Einlagen“, *Der Orthopäde*, Vol. 45, No. 3, 269-76; quiz 277-8.
- Stinus, H. & Weber, F. (2005) „Einlagen bei Vorfussdeformitäten“, *Der Orthopäde*, Vol. 34, No. 8, 776-8, 780-1.
- Thiebing, U. & Enderle, W. (n.d.) *Bemessungsfibel für tragende Kunststoffteile*.