

Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Fachbereich Maschinenbau



Bachelor-Thesis

**Durchführung von Zugversuchen gemäß ISO 37 und der Einfluss der
Probengeometrie**

von

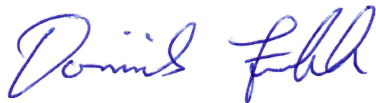
Dominik Fröhlich

30.06.2017

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Nasdala
Zweitgutachten: Prof. Dr. rer. nat. Johannes Vinke

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass die vorliegende Bachelor-Thesis von mir selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt worden ist; insbesondere, dass ich alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich dem Gedanken nach aus Veröffentlichungen, unveröffentlichten Unterlagen und Gespräche entnommen worden sind, als solche an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit durch Zitate kenntlich gemacht habe, wobei in den Zitaten jeweils der Umfang der entnommenen Originalzitate kenntlich gemacht wurde. Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Versicherung rechtlich Folgen haben wird.



Gernsbach, den 30.06.2017

Sperrvermerk

**Diese Bachelor-Thesis ist urheberrechtlich geschützt, unbeschadet dessen wird
folgenden Rechtsübertragungen zugestimmt:**

- **der Übertragung des Rechts zur Vervielfältigung der Bachelor-Thesis für
Lehrzwecke an der Hochschule Offenburg (§ 16 UrhG),**
- **der Übertragung des Vortrags-, Aufführungs- und Vorführungsrechts für
Lehrzwecke durch Professoren der Hochschule Offenburg (§ 19 UrhG),**
- **der Übertragung des Rechts auf Wiedergabe durch Bild- oder Tonträger an
die Hochschule Offenburg (§ 21 UrhG).**

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
1. Einleitung	1
2. Grundlagen zur Versuchsdurchführung	2
2.1. Norm.....	2
2.2. Maschine und Handbuch	2
2.3. Der Regelkreis.....	3
3. Einfluss der Versuchs- und Regelparameter	6
3.1. Erste Versuche	6
3.2. Statische Versuche.....	9
3.3. Zyklische Versuche	15
3.4. Optimierte Parameter und Erfahrungen.....	16
4. Optische Dehnungsmessung	23
4.1. Kamera und Objektive	23
4.2. Kalibrierung und Koordinatensystem.....	25
4.3. Probenmarkierung und Kamerasoftware	26
5. Fazit und Ausblick.....	29
Literaturverzeichnis	30
Anhang.....	31
Anhang 1: Python Skript	31
Anhang 2: Gnuplot Skript.....	32

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messlänge 1 des Probenkörpers [1].....	2
Abbildung 2: Blockschaltbild eines Standartregelkreises	3
Abbildung 3: Regelparameter in der Kreiskonfiguration	4
Abbildung 4: Regelparameter in DION7 _{FPI}	4
Abbildung 5: Auswirkung des I-Anteils	7
Abbildung 6: Auswirkung des P-Anteils.....	7
Abbildung 7: Vorläufige Referenzparameter für eine Kraftregelung	8
Abbildung 8: Auswirkungen der unterschiedlichen Federsteifigkeiten.....	11
Abbildung 9: Krafteinfluss auf die Regelung bei dynamischen Parametern	11
Abbildung 10: Krafteinfluss auf die Regelung bei angepassten Parametern.....	11
Abbildung 11: „Sprunghaftes“ Anfahren mit Elastomerproben aus NR / SBR	12
Abbildung 12: Das Verhalten von unterschiedlichen Probendicken	13
Abbildung 13: Beginn eines Kriechversuchs	14
Abbildung 14: Spannungs-Dehnungs-Diagramme zyklischer Zugversuche.....	16
Abbildung 15: Empfehlung für die Einstellung des P-Anteils.....	17
Abbildung 16: Empfehlung für die Einstellung des I-Anteils	17
Abbildung 17: Auswirkung der Parameter bei einer Wegregelung	18
Abbildung 18: Referenzparameter für eine Wegregelung	18
Abbildung 19: Auswirkung der Parameter bei einer Dehnungsregelung	19
Abbildung 20: Speicherrate	19
Abbildung 21: Verkippung der Spannbacken	20
Abbildung 22: Setzverhalten der Spannbacken.....	20
Abbildung 23: Oszillationen in der Kraftmessung	22
Abbildung 24: Schematische Darstellung des Strahlengangs durch eine Linse	24
Abbildung 25: Kalibrierungsplatte.....	25
Abbildung 26: Schematische Darstellung zur Bestimmung des Offsets	26
Abbildung 27: Einstellungen des Koordinatensystems.....	26
Abbildung 28: Wichtige Einstellungen der Kamerasoftware	27
Abbildung 29: Probenmarkierung.....	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maße des Probenkörpertyps 1A	2
Tabelle 2: Versuchsparameter zur Ermittlung der Abhängigkeit der Regelparameter... ..	10
Tabelle 3: Einstellungen mehrerer Generatorfunktionen	14
Tabelle 4: Empfehlung des P-Anteils bei einer Kraftregelung	16
Tabelle 5: Empfehlung des I-Anteils bei einer Kraftregelung.....	17
Tabelle 6: Empfehlungen für die Speicherrate	19
Tabelle 7: Parameter zur Ermittlung der Messgenauigkeit.....	21
Tabelle 8: Kamera Produktinformationen [4]	23
Tabelle 9: Produktinformationen der Objektive.....	23

1. Einleitung

Für die Werkstoffprüfung werden heutzutage viele verschiedene Maschinen und Methoden angeboten. Dennoch ist die Durchführung von Zugversuchen eine der gängigsten Prüfmethode. Neben den klassischen einachsigen Zugprüfmaschinen, bieten auch immer mehr Hersteller zweiachsige Prüfmaschinen an. Die biaxiale Zugprüfmaschine der Walter + Bai AG wurde in Absprache mit mehreren Professoren eigens für die Bedürfnisse der Hochschule Offenburg konfiguriert. Bevor jedoch zweiachsige Zugversuche gestartet werden, sollen einachsige Versuche Erfahrungen und Erkenntnisse mit der Maschine sammeln. Deshalb beschäftigt sich die vorliegende Bachelorthesis mit der Durchführung von einachsigen Zugversuchen gemäß ISO 37 und dem Einfluss der Probengeometrie. Eine zentrale Frage der Arbeit ist, wie sich die Änderungen der Probengeometrien, in Abhängigkeit der Versuchs- und Regelparameter, auf die Messergebnisse auswirken. Ziel ist es, Referenzlösungen für eine optimale und reproduzierbare Versuchsdurchführung zu erstellen. Gegebenenfalls muss dabei von der Norm abgewichen werden. Des Weiteren wird die optische Dehnungsmessung untersucht und auf die Versuche angepasst.

2. Grundlagen zur Versuchsdurchführung

2.1. Norm

Die Durchführungen von Zugversuchen mit Elastomerproben ist in der Norm ISO 37 standardisiert. Die Norm beschreibt die Bestimmung der Zugfestigkeitseigenschaften von Elastomeren oder thermoplastischen Elastomeren. Die Probe (siehe Abbildung 1) wird hantelförmig ausgestanzt und steht in 5 verschiedenen Dimensionen zur Auswahl. Am Beispiel des Probenkörpertyps 1A sind in Tabelle 1 wichtige Maße dargestellt. Um ein Durchhängen der Messlänge nach dem Einspannen zu vermeiden, kann die Probe mit 0,1 MPa vorgespannt werden. Die Prüfgeschwindigkeit soll 500 mm/min betragen [1].

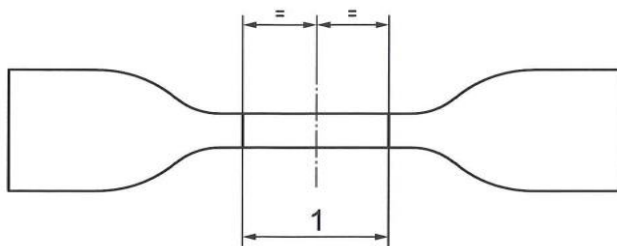


Abbildung 1: Messlänge 1 des Probenkörpers [1]

Tabelle 1: Maße des Probenkörpertyps 1A

Probenkörpertyp	1A
Gesamtlänge [mm]	≥ 100
Messlänge 1 [mm]	$20 \pm 0,5$
Probendicke [mm]	$2 \pm 0,2$
Breite des engen Teils [mm]	$5 \pm 0,1$

2.2. Maschine und Handbuch

Die elektromechanische biaxiale Zugprüfmaschine Typ *LFM-BIAX* der Walter + Bai AG steht am Bildungscampus Gengenbach der Hochschule Offenburg. Zu den Leistungsmerkmalen der Maschine gehören eine Traversengeschwindigkeit von 5000 mm/min und eine maximale Prüfkraft der Kraftmessdosen von 25 kN. Jeder Prüfzylinder wird über einen Regler des Typs *PCS8000* geregelt. Das Regelsystem kann pro Regler und Regelkreis bis zu 13 beliebige Messkanäle regeln, beispielsweise Kraft, Weg oder Dehnung. Die Datenerfassungsrate beträgt 8000 Hz [2]. Mit dem Video Extensometer Typ *VEX-50-MER* und der Software *MercuryRT x64 2.4.2* werden die Messlängen erfasst und aufgezeichnet.

Die Bedienung der Maschine erfolgt über die modular aufgebaute Prüfsoftware *DION7*. Die Hochschule Offenburg besitzt die Lizenzen für *DION7_{EASY}* und *DION7_{FPI}*. Für zyklische Bauteilprüfung mit einer einfachen Benutzeroberfläche eignet sich *DION7_{EASY}*. In *DION7_{FPI}* können eigene komplexe Versuchsabläufe auf einer grafischen Benutzeroberfläche programmiert werden. Für das *Freely Programmable Interface* werden keine besonderen Programmierkenntnisse benötigt. Außerdem gibt es einen manuellen Betrieb, in dem man die Vorversuche mit verschiedenen Proben und Regelparameter durchführen kann [3].

2.3. Der Regelkreis

Für das bessere Verständnis der Regelung, ist in Abbildung 2 das Blockschaltbild eines einfachen Standardregelkreises dargestellt. Gibt der Anwender beispielsweise in der Prüfsoftware *DION7* bei einer Kraftregelung eine Prüfkraft von 1000 N an, so entspricht diese Prüfkraft dem Sollwert. Die Differenz zwischen Sollwert und Istwert ist die Regelabweichung. Die Regelabweichung wird von dem Regler verarbeitet und als Stellgröße an die Regelstrecke weitergegeben. Die Regelstrecke entspricht zum Beispiel dem Servomotor, der die passende Leistung abgibt, um den Sollwert von 1000 N zu erreichen. Nach der Regelstrecke erhält man den Istwert, der über ein Messglied erfasst und zurückgeführt wird. Eine mögliche Störgröße kann das Verrutschen der Probe in der Einspannung sein.

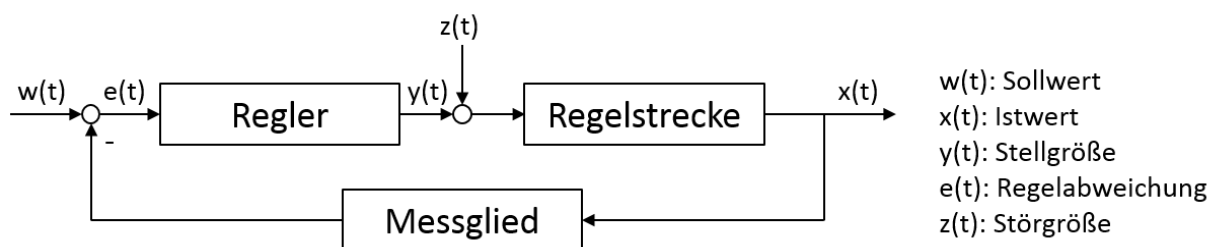


Abbildung 2: Blockschaltbild eines Standardregelkreises

Je nach Typ und Einstellung des Reglers, wird der Sollwert unterschiedlich schnell erreicht. Die PCS8000-Regler sind auf den Reglertyp PIDT voreingestellt. Die Regelparameter des PIDT-Reglers können in verschiedenen Menüpunkten in der Materialprüfsoftware *DION7* eingestellt werden. Der Menüpunkt Kreiskonfiguration beinhaltet unter anderem Reglerstrukturen und Reglerkonfigurationen, die

üblicherweise nicht geändert werden müssen (siehe Abbildung 3). Deshalb empfiehlt es sich, alle Parameter der verschiedenen Versuche in *DION7_{FPI}* zu programmieren. Dort werden die Regelparameter in der Generatorfunktion eingestellt (siehe Abbildung 4) und den Parametern in den Kreiskonfigurationen vorgezogen.

Kreis einstellungen (Kreis 1)

- Regelstrukturen
- Kanalinformationen
- Toggelparameter
- Aktualisiere Reglerkonfiguration
- Zylinder Richtung
- Externe Kanäle
- Probenschutz Einstellungen
- Wave Datei Verwaltung
- Verschiedene Optionen

Kanal	Typ	Editieren	Parameters
Kraft1	Physikalisch	Editieren	[PIDT] P=0.03, I=0.2, D=0, T=0.000125
Weg1	Physikalisch	Editieren	[PIDT] P=1.2, I=0.1, D=0, T=0.000125
VEX1	Virtuell	Editieren	[PIDT] P=0.1, I=1, D=0, T=0.000125
VEX2	Virtuell	Editieren	[PIDT] P=0.1, I=0.5, D=0, T=0.000125
VEX3	Virtuell	Editieren	[PIDT] P=0.1, I=1, D=0, T=0.000125

Abbildung 3: Regelparameter in der Kreiskonfiguration

Kanal Parameters

Kanal: Kraft1

Ist Aktiviert:

Reglertyp: PIDT

P	0.6
I	10
D	0
T	0.000125
unipolar	Nein

Laden Sichern als Ok Abbruch

Abbildung 4: Regelparameter in DION7_{FPI}

Folgende Auswirkungen haben die verschiedenen Anteile eines PIDT-Reglers in der Theorie:

- Die Regelabweichung wird durch den P-Anteil proportional verstärkt oder gesenkt. Ist der P-Anteil zu klein, wird der Sollwert nie erreicht. Ein zu hoher P-Anteil verursacht ein Überschwingen.
- Durch den I-Anteil wird über die Regelabweichung integriert und mit einem Verstärkungsfaktor multipliziert. Der Sollwert wird immer erreicht, jedoch arbeitet ein I-Regler sehr langsam.
- Der D-Anteil berechnet die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung. Er reagiert sehr schnell, kann aber dadurch auch zu starker Unruhe im Regelkreis führen.
- Der T-Anteil ist der zeitliche Filter für den D-Anteil. Er kann bis zu dem maximalen Regeltakt von 0,000125 s erhöht werden, muss aber unter dem D-Anteil liegen.

3. Einfluss der Versuchs- und Regelparameter

3.1. Erste Versuche

Um erste Erfahrungen mit den Regelparametern zu erhalten, wurden zu Beginn einfache statische Versuche mit einer Kraftregelung durchgeführt. Dafür soll die Kraft per Rampe mit einer Geschwindigkeit von 1000 kN/s auf die Endlage von 1 kN gebracht werden. Die Endlage von 1 kN soll durch die hohe Geschwindigkeit sprunghaft erreicht werden, um die Auswirkungen der Regelparameter deutlich zu erkennen. Für die Versuche ist ein Elastomer aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR) mit einer Probenbreite $b = 35$ mm, Probendicke $d = 10$ mm und einer Messlänge $L_0 = 80$ mm verwendet worden. Als Referenz dienten die voreingestellten Regelparameter aus der Kreiskonfiguration. Eine Berechnung der optimalen Regelparameter ist nicht möglich, da die Regelstrecke im Regelkreis der Maschine nicht bekannt ist. Durch eine zusätzliche unbekannte interne Regelung der Servomotoren kann die Regelstrecke auch nicht berechnet werden.

Abbildung 5 zeigt den Versuch mit den voreingestellten Referenzparametern und die Auswirkung des I-Anteils, wenn nur dieser geändert wird, und P- und D-Anteil unverändert bleiben. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei hohem I-Anteil der Sollwert von 1 kN nur langsam und mit Überschwingen erreicht wird. Bei kleinem I-Anteil wird der Sollwert sehr schnell erreicht, dabei verstärkt sich aber auch das Überschwingen.

In Abbildung 6 ist der Versuch mit den gleichen Referenzparametern dargestellt, allerdings wurde diesmal nur der P-Anteil verändert. Ist der P-Anteil hoch, wird der Sollwert mit geringem Überschwingen und schnell erreicht. Ist der P-Anteil klein, sinkt die Geschwindigkeit und das Überschwingen verstärkt sich.

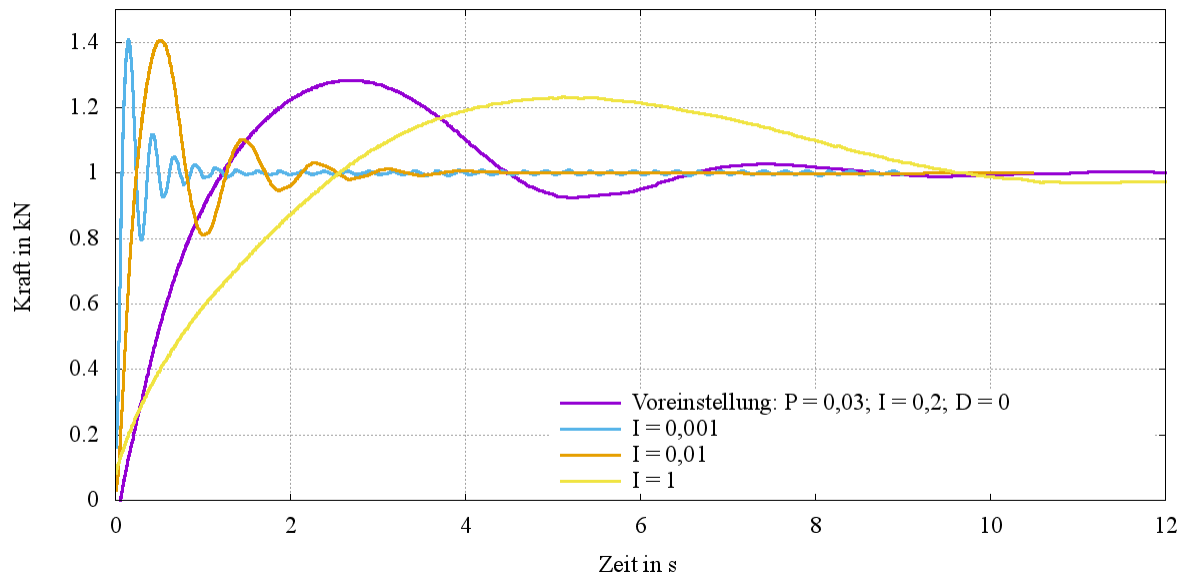


Abbildung 5: Auswirkung des I-Anteils

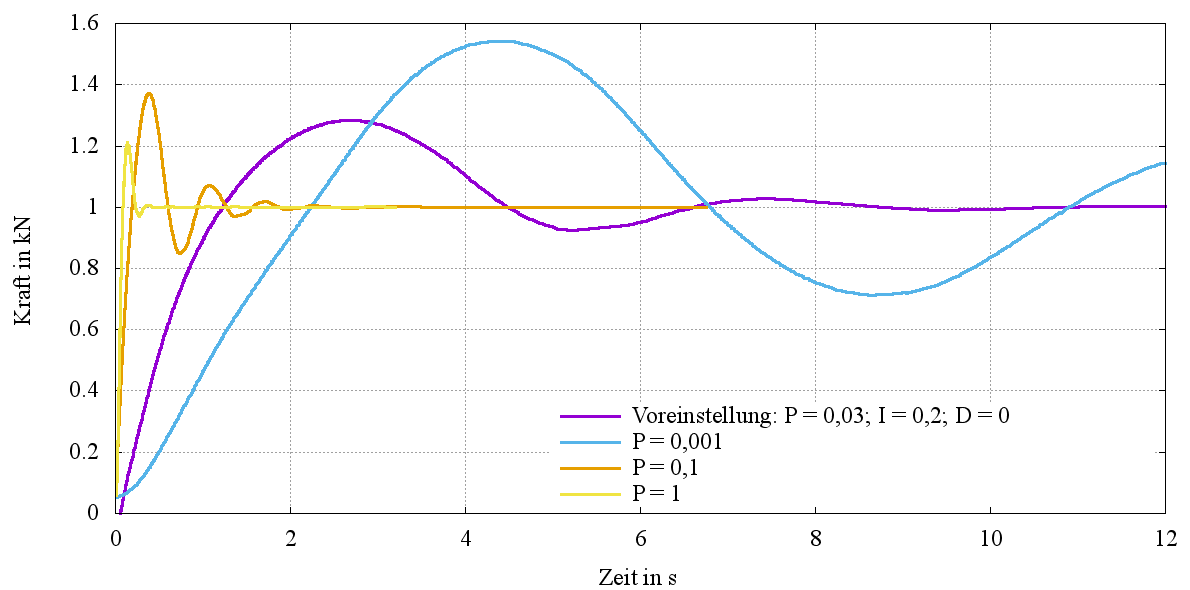


Abbildung 6: Auswirkung des P-Anteils

Diese ersten Versuche belegen die Notwendigkeit einer Parameterstudie. Vorläufig dient der Parametersatz in Abbildung 7 als neue Referenz für eine Kraftregelung. Außerdem ergaben die Versuche folgende Erkenntnisse:

- Es muss mindestens ein P- und ein I-Anteil angegeben werden.
- P- und I-Anteil dürfen sich in ihrer Zehnerpotenz nicht zu stark unterscheiden, da sonst Oszillationen auftreten.
- Überschreitet der P-Anteil einen Wert von 1,2 entstehen immer Oszillationen.
- Der D-Anteil zeigt bei einem Wert von ca. 0,001 nur eine minimale Auswirkung. Eine Erhöhung führt sofort zu starken Oszillationen. Daher wird der D-Anteil auf 0 belassen.
- Die Wegregelung erweist sich als unproblematisch, da diese nicht von einem externen Messwert, z.B. der Kraft, abhängt.
- Vorläufige Referenzparameter für eine Kraftregelung: $P = 0,8$; $I = 10$; $D = 0$
- Vorläufige Referenzparameter für eine Wegregelung: $P = 0,4$; $I = 10$; $D = 0$.

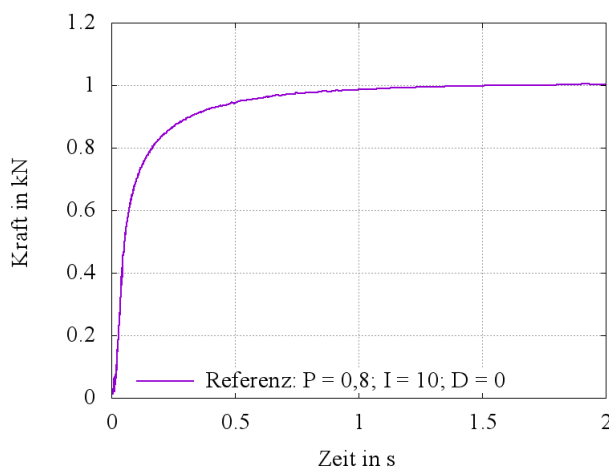


Abbildung 7: Vorläufige Referenzparameter für eine Kraftregelung

Die Messdiagramme werden bereits in *DION7* übersichtlich dargestellt und können nach Belieben angepasst werden. Um die Messdiagramme nachträglich zu ändern oder um Messdaten umzurechnen, z.B. Kraft in Spannung, sind externe Programme nötig. Mit der Programmiersprache Python lassen sich die Auswertungen der Messdaten einfach und schnell automatisieren (siehe Anhang 1: Python Skript). Die aufbereiteten Messdaten

werden mit dem Programm Gnuplot grafisch dargestellt (siehe Anhang 2: Gnuplot Skript).

3.2. Statische Versuche

Bei statischen Versuchen wird die Prüfkraft, der Weg oder die Dehnung auf einen festgelegten Sollwert, mit einer festgelegten Geschwindigkeit geregelt und über einen Zeitraum konstant beibehalten. Nachfolgend werden die Einflüsse auf die Messergebnisse, durch verschiedene Probenabmessungen, Versuchs- und Regelparameter, untersucht. Der Fokus liegt dabei auf dem sprunghaften Erreichen des Sollwerts, wie es beispielsweise bei einem Kriechversuch nötig ist. Neben den Elastomerproben, wurden auch Aluminium- und Stahlproben verwendet, um die Einflüsse von Elastizitätsmodul (E-Modul), Dehnsteifigkeit und Federsteifigkeit umfangreicher untersuchen zu können. Die Dehnsteifigkeit ist das Produkt aus dem E-Modul E und der Querschnittsfläche A . Dividiert man die Dehnsteifigkeit durch die Mess- bzw. Einspannlänge L_0 erhält man die Federsteifigkeit c (siehe Gleichung (1)).

$$c = \frac{E \times A}{L_0} \quad (1)$$

Es stellt sich die grundlegende Frage nach den Einflussgrößen auf die Regelparameter. Der E-Modul kann keinen direkten Einfluss auf die Parameter haben, da die Probengeometrie in ihm nicht berücksichtigt ist. Um zu Überprüfung, ob die Regelparameter von der Dehnsteifigkeit oder der Federsteifigkeit abhängen, wurden Versuche mit den in Tabelle 2 aufgeführten Parametern durchgeführt. Die Regelparameter, die Kraft F und die Traversengeschwindigkeit v sind bei allen Versuchen gleich. Die Versuche Nr. 1 und Nr. 2 haben die gleiche Fläche und dadurch auch die gleiche Dehnsteifigkeit. Die Einspannlängen sind unterschiedlich, um andere Federsteifigkeiten zu erhalten. Zeigen die Versuche Nr. 1 und Nr. 2 identische Messergebnisse, ist die Dehnsteifigkeit die Haupteinflussgröße auf die Regelparameter. Bei unterschiedlichen Messergebnissen ist die Federsteifigkeit die Haupteinflussgröße. Um das Ergebnis zu Bestätigen sind bei den Versuchen Nr. 3 und Nr. 4 die Federsteifigkeiten gleich, jedoch die Dehnsteifigkeiten unterschiedlich.

Tabelle 2: Versuchsparameter zur Ermittlung der Abhängigkeit der Regelparameter

Nr.	P	I	D	T	F [kN]	v [kN/s]	Fläche A [mm ²]	Länge L ₀ [mm]	E-Modul [N/mm ²]	EA [N]	EA / L ₀ [N/mm]
1	0,6	10	0	0,000125	1	1000	7,5	75	70000	525000	7000
2	0,6	10	0	0,000125	1	1000	7,5	150	70000	525000	3500
3	0,6	10	0	0,000125	1	1000	7,5	75	70000	525000	7000
4	0,6	10	0	0,000125	1	1000	15	150	70000	1050000	7000

Abbildung 8 zeigt die in Tabelle 2 gelisteten Versuche Nr. 1 und Nr. 2. Durch die höhere Federsteifigkeit bei Versuch Nr. 1 entsteht ein deutlich höheres Überschwingen des Sollwerts. Durch eine Senkung der Federsteifigkeit bei Versuch Nr. 2 ist das Überschwingen geringer. Die Versuche Nr. 3 und Nr. 4 verhalten sich identisch zu Versuch Nr. 1 und bestätigen das Ergebnis. Deshalb wurde die Federsteifigkeit als Haupteinflussgröße auf die Regelparameter für weitergehende Studien festgelegt. Die Größe der Kraft F kann als weitere Einflussgröße vernachlässigt werden, da diese nur bei sehr dynamischen Parametern und hohen Federsteifigkeiten eine Auswirkung zeigt (siehe Abbildung 9). Durch eine leichte Anpassung der Parameter (siehe Abbildung 10), verliert die Größe der Kraft nahezu ihren Einfluss. Um zu bestätigen, dass die Größe der Kraft einen vernachlässigbaren Einfluss hat, wurden Proben aus Stahl mit Kräften von 2 kN bis 12 kN sprunghaft belastet. Auch bei diesen Versuchen besitzt die Kraft bei angepassten Parametern keinen Einfluss. Außerdem wird der Sollwert bei hohen Federsteifigkeiten durch eine geringe Nachgiebigkeit der Probe sehr schnell erreicht, sodass eine Senkung der Parameter kaum eine zeitliche Auswirkung hat.

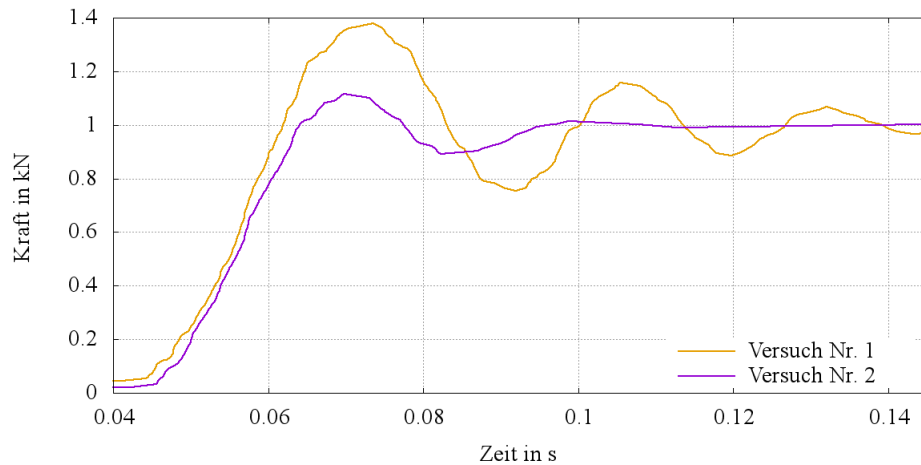


Abbildung 8: Auswirkungen der unterschiedlichen Federsteifigkeiten

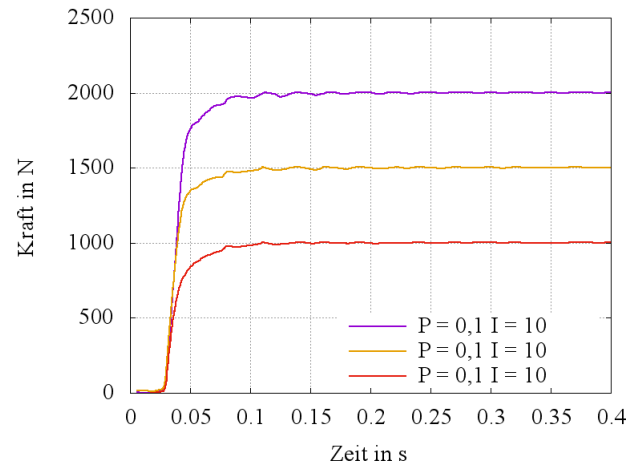
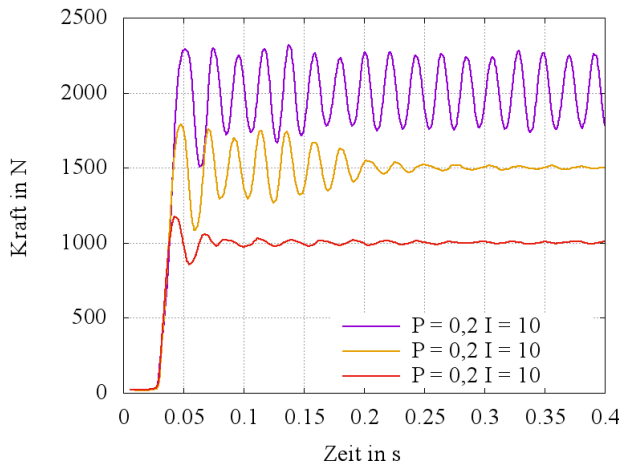


Abbildung 9: Krafteinfluss auf die Regelung bei dynamischen Parametern

Abbildung 10: Krafteinfluss auf die Regelung bei angepassten Parametern

Bei Elastomerproben wird der Sollwert mit einer Kraftregelung nur sehr langsam erreicht. Grund dafür ist die hohe Elastizität, bzw. die geringe Federsteifigkeit. Ein Kompromiss zwischen Schnelligkeit und Genauigkeit der Regelung ist nötig, um ein optimales Messergebnis zu erzielen. Will man den Sollwert exakt erreichen, dürfen die Parameter nicht zu dynamisch eingestellt sein, da der Sollwert folglich überschritten wird. Bei der sprunghaften Belastung der Probe bis zum Bruch, können die Parameter dynamischer gewählt werden, da die Kraft keinen bestimmten Wert erreicht soll. Besonders deutlich ist das träge Verhalten an Elastomeren aus NR (Natur-Kautschuk) / SBR (Styrol-Butadien-Kautschuk) in Abbildung 11 zu sehen. Die Proben besitzen eine

Breite $b = 35$ mm, eine Dicke $d = 2$ mm und eine Messlänge $L_0 = 80$ mm. Die maximale mögliche Traversengeschwindigkeit der Maschine erreicht man in Versuch Nr. 1 mit Parameter $P = 1$ und $I = 1$ bei einer Belastung bis zum Bruch. Dennoch wird der Bruch bei einer Kraft von 400 N erst nach langsamen 2,8 Sekunden erreicht. Da die Grenze des Parameters P bei 1,2 liegt, wurden zur weiteren Regelung nur die I -Anteile verändert. Die Belastung bis zum Bruch bei Versuch Nr. 2 verzögert sich durch einen höheren I -Anteil deutlich. Bei den Versuchen Nr. 3 und Nr. 4 soll eine Kraft von 200 N erreicht werden. Alleine durch die Vorgabe des Sollwerts verzögert sich die Regelung enorm. Ein exaktes Erreichen der Kraft von 200 N ist erst in Versuch Nr. 4 mit Parameter $P = 1$ und $I = 100$ nach ca. 30 Sekunden möglich. Außerdem sind bei allen Versuchen Oszillationen in der Kraftmessung zu erkennen.

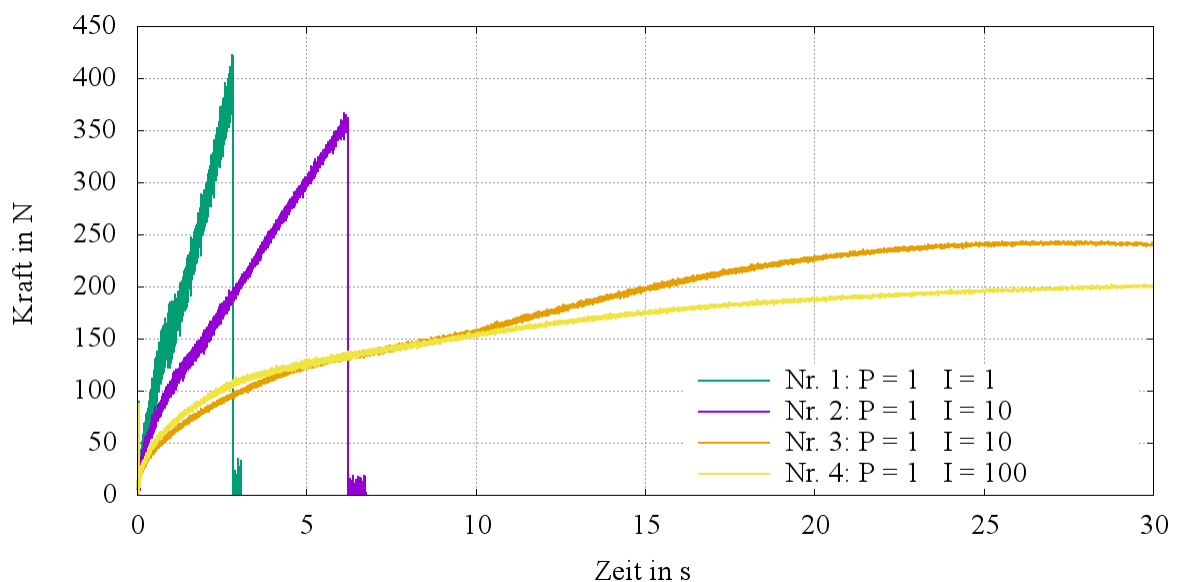


Abbildung 11: „Sprunghaftes“ Anfahren mit Elastomerproben aus NR / SBR

Höherwertige Elastomerproben aus Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR) erreichen ihren Sollwert durch ihre höhere Federsteifigkeit schneller als Proben aus NR / SBR. Halbiert man die Probendicke und somit auch die Federsteifigkeit, wird der Sollwert ebenfalls langsamer erreicht (siehe Abbildung 12). Bei den Versuchen waren die Regelparameter $P = 1$ und $I = 10$ eingestellt. Im Vergleich zu den Proben aus NR / SBR, sind die Oszillationen der Kraftmessungen trotz gleicher Regelparameter geringer. Deshalb wird die These aufgestellt, dass eine höhere Federsteifigkeit zu geringeren Oszillationen in der Kraftmessung führt, angepasste Regelparameter vorausgesetzt. Die Oszillationen können jedoch nur soweit reduziert werden, bis die

absolute Messgenauigkeit der Maschine erreicht ist. Weitere Ergebnisse, die während der fortlaufenden Versuche zur Genauigkeit der Kraftmessung erlangt werden, sind in Abschnitt 3.4 beschrieben.

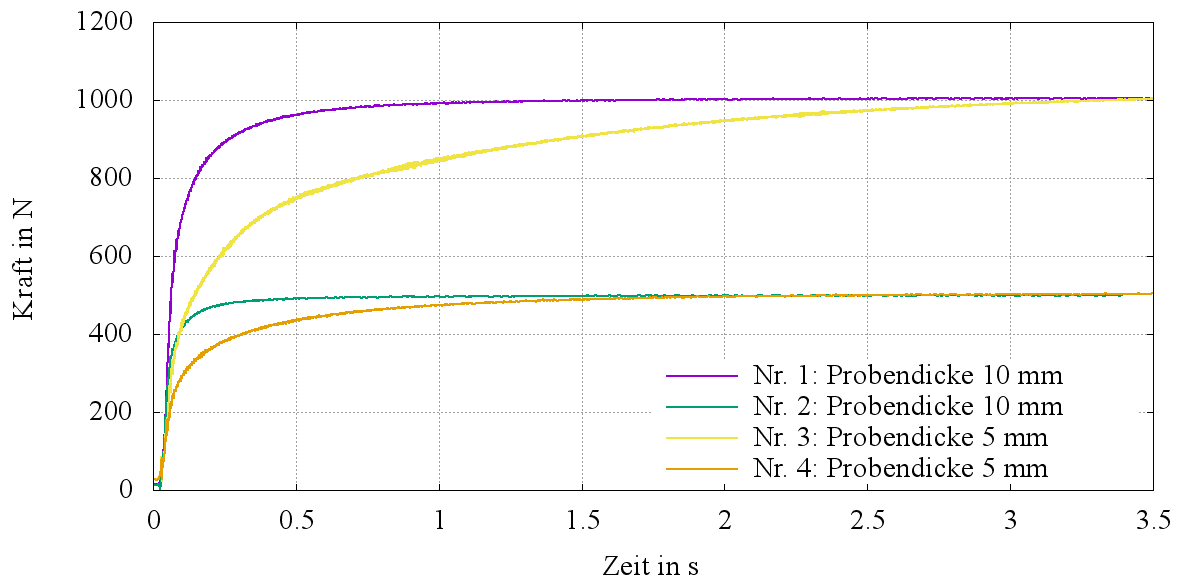


Abbildung 12: Das Verhalten von unterschiedlichen Probendicken

Bei Kriechversuchen muss der Sollwert schnell erreicht und über eine lange Zeit hinweg genau gehalten werden. Da die Kraftregelung den Sollwert bei Elastomerproben, selbst mit dynamischen Regelparametern, nicht schnell genug erreicht, muss dieser Vorgang für die Kriechversuche optimiert werden. Außerdem ist ein Nachteil von dynamischen Regelparametern, dass diese auch im weiteren Verlauf des Versuchs dynamisch regeln, obwohl der Sollwert bereits erreicht ist und nur noch gehalten werden muss. Dadurch können Oszillationen in der Regelung und Kraftmessung entstehen. Der Versuch kann verbessert werden, wenn mehrerer Generatorfunktionen in *DION7_{FPI}* programmiert werden. Eine Möglichkeit ist, die Kraft zu Beginn eines Kriechversuchs mit einer schnellen Wegregelung zu erreichen. Anschließend kann eine weitere Generatorfunktion mit der Kraftregelung die Aufgabe übernehmen, den Sollwert zu halten. Dies ist vor allem bei Elastomerproben aus NR / SBR nützlich, da die Kraftregelung den Sollwert dort besonders langsam erreicht. Bei Proben aus NBR besteht außerdem die Möglichkeit, zwei Generatorfunktionen mit einer Kraftregelung zu programmieren, jedoch mit verschiedenen Regelparametern. Zu Beginn sollen dynamische Parameter die Kraft schnell erreichen und danach regeln angepasste Parameter die Kraft. Tabelle 3 zeigt wie mehrere Generatorfunktionen eingestellt sein

können. Der Versuch mit den Parametern aus der Tabelle, ist im Vergleich zu einer reinen Kraftregelung in Abbildung 13 dargestellt. Das Überschwingen bei der Weg- und Kraftregelung ist der Massenträgheit geschuldet und wird nicht durch die Regelparameter der Wegregelung beeinflusst. Eine Optimierung der Wegregelung ist nur durch die Anpassung der Geschwindigkeit möglich. Die nachfolgende Kraftregelung wird über die Regelparameter optimiert. Bei Bedarf kann eine dritte Generatorfunktion programmiert werden, in der die Regelparameter der Kraftregelung weniger dynamisch regeln, um die Kraft exakt zu halten.

Tabelle 3: Einstellungen mehrerer Generatorfunktionen

Generatorfunktion	Regelkanal	Geschwindigkeit	Endlage	P-Anteil	I-Anteil	Abbruchkriterium
1	Weg 1	75 mm/s	250 mm	0,3	10	1,05 kN
2	Kraft 1	1000 kN/s	1,05 kN	1	100	250 mm
Probe	Material	vorgegebene Spannung	Messlänge	Breite	Dicke	
	NBR	3 MPa	80 mm	35 mm	10 mm	

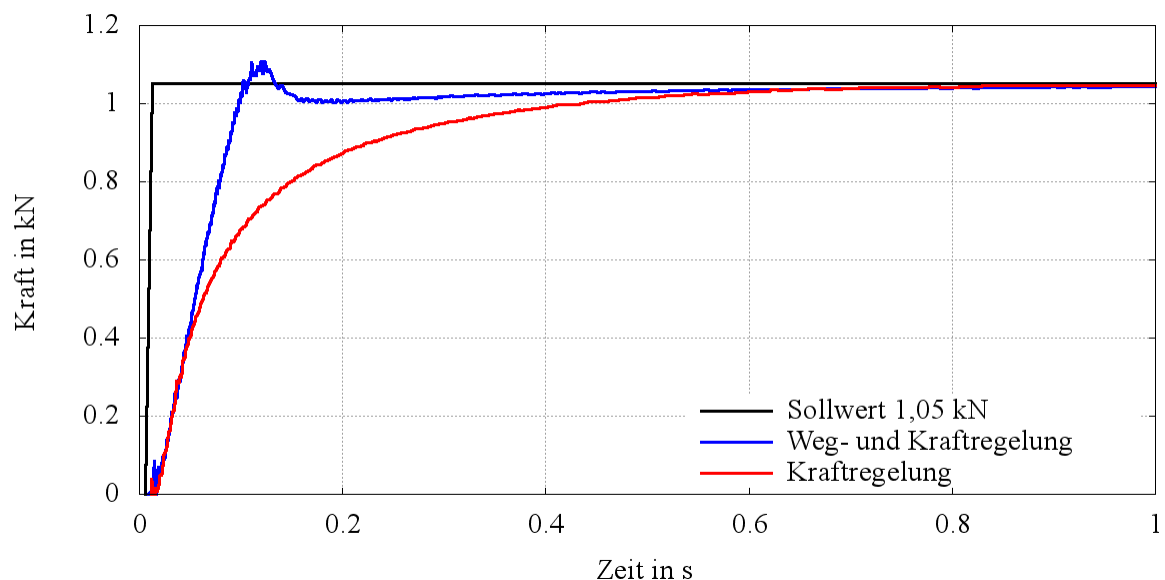


Abbildung 13: Beginn eines Kriechversuchs

3.3. Zyklische Versuche

Für die Ermittlung von Werkstoffeigenschaften eignet sich ebenfalls ein zyklischer Zugversuch, bei dem die Dehnung geregelt wird. Dabei wird die Probe mit 10 %, 20 %, 30 %, 40 % und 50 % jeweils 10-mal gedehnt. Bei Bedarf kann der Rückweg, von 50 % zurück auf 10 %, hinzugefügt werden. Für die nachfolgenden Versuche wurde die Anzahl der Zyklen von zehn auf drei reduziert. Verwendet wurden Elastomerproben aus NR / SBR, mit einer Probenbreite $b = 35$ mm, Probendicke $d = 2$ mm und einer Messlänge $L_0 = 80$ mm. Die Geschwindigkeit des Versuchs wird nicht über die Traversengeschwindigkeit v , sondern über die Dehnrates $\dot{\epsilon}$ angegeben. Diese berechnet sich aus der Traversengeschwindigkeit v und der Messlänge L_0 (siehe Gleichung (2)).

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{L_0} \quad (2)$$

Die Referenzversuche sollen mit einer Traversengeschwindigkeit $v = 50$ mm/min und einer Messlänge $L_0 = 50$ mm. Daraus ergibt sich die Dehnrates $\dot{\epsilon} = 0,0166$ 1/s. Allerdings würde der Versuch bei dieser Dehnrates ungefähr 16 Stunden dauern. Um für die Parameterstudien die Ergebnisse schneller zu erhalten, wurde die Dehnrates $\dot{\epsilon} = 1$ 1/s festgelegt. Die Darstellung der Messdaten erfolgt in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Es entsteht eine Hysteresekurve. Wie schon bei den statischen Versuchen, ist auch in Abbildung 14 die Unruhe in der Messgenauigkeit, durch die geringe Federsteifigkeit, zu erkennen. Erhöht man die Federsteifigkeit, z.B. durch eine größere Probendicke, wird das Messergebnis genauer. Führt man diese Versuche mit der Normprobe aus ISO 37 durch, sind die Messdaten unbrauchbar. Die Kraftmessdosen der Maschine sind für diese geringen Belastungen nicht ausgelegt.

Bei den Elastomerproben aus NR / SBR und NBR erreicht man mit einer Dehnrates $\dot{\epsilon} = 1$ 1/s gut Messergebnisse. Der Unterschied zwischen kleinen Dehnrates, wie z.B. $\dot{\epsilon} = 0,0166$ 1/s und $\dot{\epsilon} = 1$ 1/s, ist sehr gering. Ein Maximum von $\dot{\epsilon} = 5$ 1/s sollte nicht überschritten werden, da der Versuch sehr unruhig wird und die Messergebnisse zu stark oszillieren.

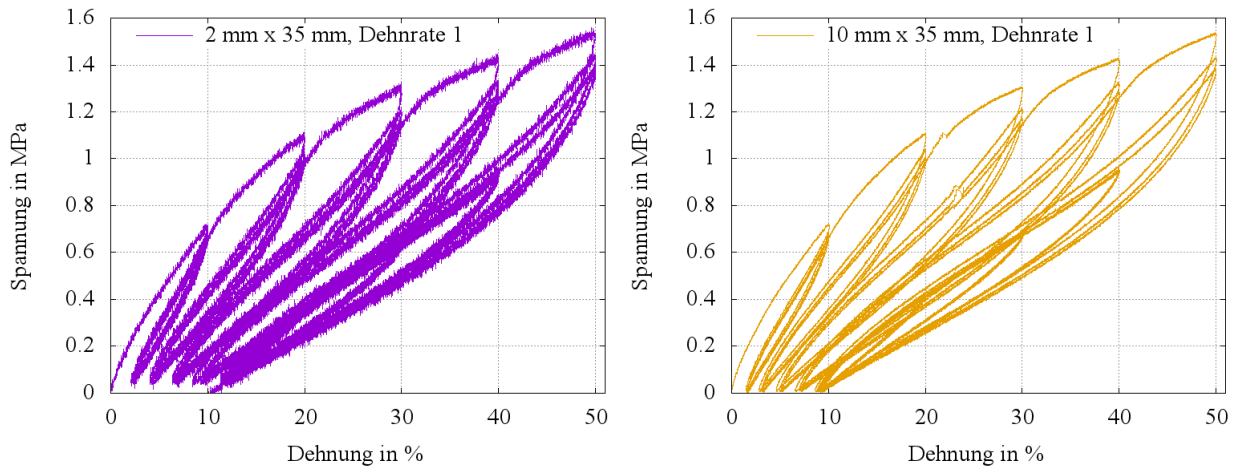


Abbildung 14: Spannungs-Dehnungs-Diagramme zyklischer Zugversuche

3.4. Optimierte Parameter und Erfahrungen

Kraftregelung

Aus den Versuchen mit verschiedenen Probengeometrien und Parametern ergeben sich die in Tabelle 4 und Tabelle 5 aufgelisteten Empfehlungen zur Einstellung der Regelparameter bei einer Kraftregelung, die ihren Sollwert schnell aber dennoch genau erreichen soll. Abbildung 15 und Abbildung 16 stellen die Werte aus den Tabellen grafisch dar. Der Haupteinflussfaktor des P-Anteils ist die Federsteifigkeit c . Je höher der P-Anteil, desto dynamischer reagiert die Regelung. Deshalb muss der P-Anteil mit zunehmender Federsteifigkeit gesenkt werden, da die Regelung andernfalls instabil wird. Der I-Anteil gleicht das dynamische Verhalten des P-Anteils aus, damit eine schnelle, dennoch stabile Regelung erreicht wird. Bei einem niedrigen P-Anteil, sollte auch der I-Anteil geringer sein, um die Regelung nicht zu sehr zu verlangsamen.

Tabelle 4: Empfehlung des P-Anteils bei einer Kraftregelung

P-Anteil	Federsteifigkeit c [N/mm]	P-Anteil	Federsteifigkeit c [N/mm]	P-Anteil	Federsteifigkeit c [N/mm]
1,20	1	0,50	750	0,07	20000
1,10	5	0,40	1000	0,06	25000
1,00	10	0,30	2500	0,05	30000
0,90	50	0,20	7500	0,04	50000
0,80	100	0,10	12500	0,03	75000
0,70	200	0,09	15000	0,02	175000
0,60	500	0,08	17500	0,01	250000

Tabelle 5: Empfehlung des I-Anteils bei einer Kraftregelung

P-Anteil	I-Anteil
1,20	100
0,60	50
0,10	10
0,01	10

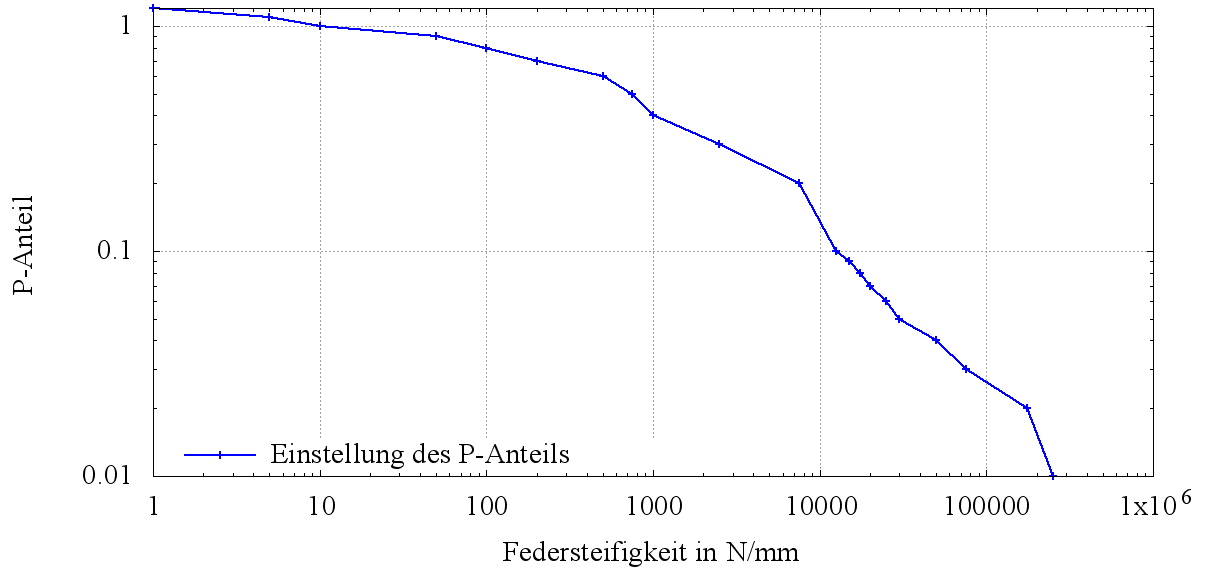


Abbildung 15: Empfehlung für die Einstellung des P-Anteils

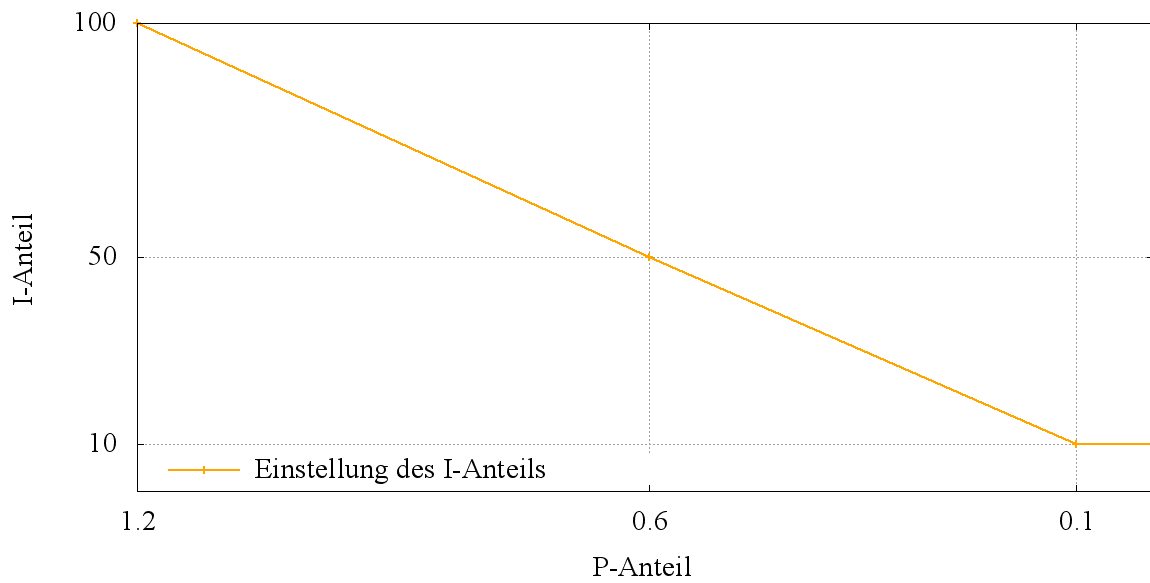


Abbildung 16: Empfehlung für die Einstellung des I-Anteils

Wegregelung

Die Wegregelung ist unabhängig von externen Messwerten, wie z.B. der Kraft oder der Dehnung. Daher können die Regelparameter besonders schnell und einfach ermittelt werden. Abbildung 17 zeigt verschiedene Regelparameter und ihre Auswirkungen. Bei den Versuchen wurde die maximal mögliche Traversengeschwindigkeit $v = 5000 \text{ mm/min}$ gewählt. Die besten Parameter aus Abbildung 17 wurden als Referenz festgelegt und an verschiedenen Endlagen überprüft (siehe Abbildung 18).

- Referenzparameter für eine Wegregelung: $P = 0,3$ und $I = 10$.

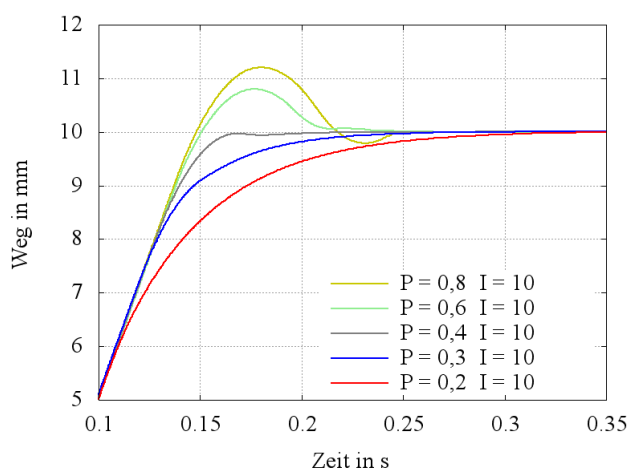


Abbildung 17: Auswirkung der Parameter bei einer Wegregelung

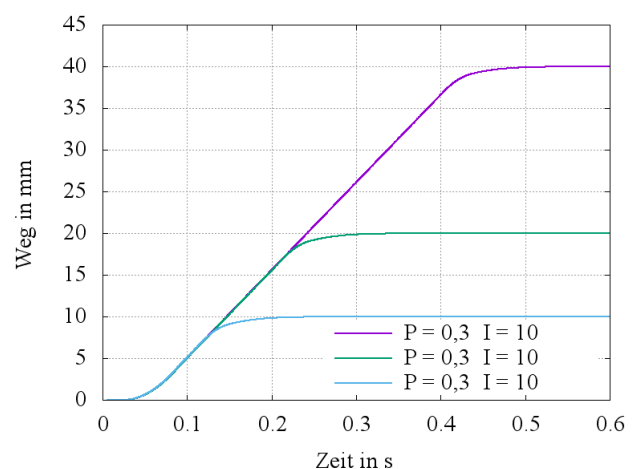


Abbildung 18: Referenzparameter für eine Wegregelung

Dehnungsregelung

Bei den dehnungsgeregelten zyklischen Zugversuchen ist, besonders bei hohen Dehnraten, eine schnelle aber dennoch exakte Regelung wichtig. Der P-Anteil reagiert besonders sensibel auf Veränderungen und sollte daher auf $P = 0,1$ belassen werden. Die Auswirkung des I-Anteils ist in Abbildung 19 dargestellt und zeigt bei $I = 10$ das beste Ergebnis. Der Versatz der drei Kurven ist durch das Verwenden von bereits vorbelasteten Proben zu erklären. Die Messungenauigkeiten (Treppeneffekte) entstehen durch die hohe Dehnrates $\dot{\epsilon} = 5 \text{ 1/s}$ und zu geringen Bildern pro Sekunde, die von der Kamera an die Maschine gesendet werden.

- Referenzparameter für eine Dehnungsregelung: $P = 0,1$ und $I = 10$.

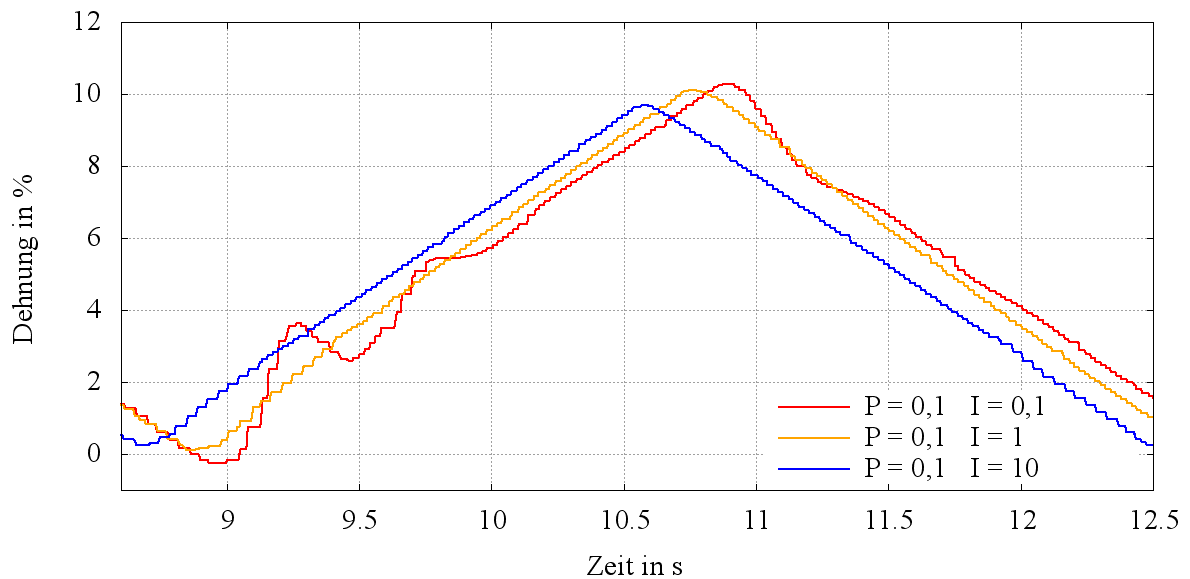


Abbildung 19: Auswirkung der Parameter bei einer Dehnungsregelung

Speicherrate

Die optimale Speicherrate hängt von der Art des Versuchs ab. Sie wird als Datenspeicherrate oder als Deltakriterium angegeben (siehe Abbildung 20).

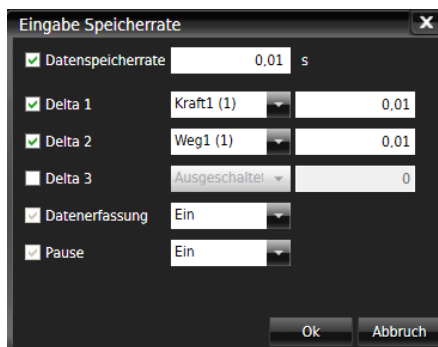


Abbildung 20: Speicherrate

Langzeitversuche, z.B. Kriechversuche, benötigen zu Beginn eine hohe Speicherrate. Gegen Ende des Versuches ändert sich die Probe nur noch sehr gering, dadurch werden weniger Speicherpunkte nötig. Bei kurzen Versuchen sind über die gesamte Versuchsdauer viele Speicherpunkte sinnvoll. Empfehlungen für die Speicherraten stehen in Tabelle 6.

Tabelle 6: Empfehlungen für die Speicherrate

Versuch	Datenspeicherrate	Delta 1 (Kraft)	Delta 2 (Weg)
Langzeitversuch	3600 s	0,05 kN	0,01 mm
Kurzzeitversuch	0,01 s	0,01 kN	0,01 mm

Spannbacken

Beim Einspannen der Probe entsteht an den Spannbacken ein Effekt der Verkippung von ungefähr einem Grad. Dadurch verdrehen sich dünne Proben und es kommt zu einer Wölbung (siehe Abbildung 21). Der Effekt kann gemindert werden, indem die Probe nur mit einer geringen Spannkraft eingespannt wird. Durch die konische Führung der Spannbacken, wird die Probe beim Aufbringen der Prüfkraft automatisch gespannt. Elastomerproben müssen dennoch fester eingespannt werden, da sie durch ihre hohe Dehnung leichter aus den Spannbacken rutschen können. Des Weiteren tritt bei der Versuchsdurchführung ein Setzverhalten der Spannbacken auf. Je öfter man einen Versuch startet, ohne die Probe dabei auszuspannen, desto fester ziehen sich die Spannbacken. Der Effekt ist in Abbildung 22 veranschaulicht. Alle vier Versuche wurden mit den gleichen Parametern gestartet. Doch nach jedem Versuch wird die Kraftübertragung direkter, d.h. die Steifigkeit des Systems erhöht sich. Während bei Versuch 1 die Regelparameter gut funktionieren, sind sie bei den anderen Versuchen zu dynamisch. Demnach waren die Regelparameter auch bei Versuch 1 zu dynamisch eingestellt. Durch angepasste Regelparameter wird das Setzverhalten nicht mehr sichtbar und mehrmalige Versuche funktionieren gleichbleibend gut.

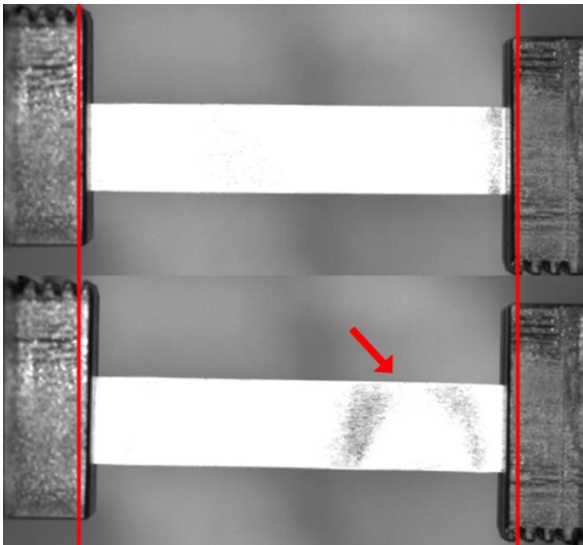


Abbildung 21: Verkippung der Spannbacken

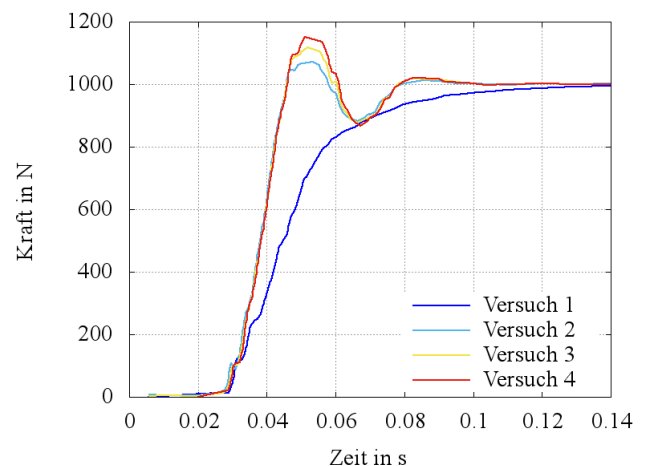


Abbildung 22: Setzverhalten der Spannbacken

Genauigkeit der Kraftmessdosen

Um die These zu überprüfen, dass höhere Federsteifigkeiten zu geringeren Oszillationen in den Kraftmessungen führen, wurden drei Versuche mit den Parametern aus Tabelle 7 durchgeführt. Die Versuche Nr. 1 und Nr. 2 besitzen die gleichen Regelparameter, jedoch unterschiedliche Federsteifigkeiten, die sich aus den verschiedenen Materialien und Geometrien ergeben. Bei Versuch Nr. 3 ist die Federsteifigkeit durch eine Probe aus Aluminium nochmals deutlich erhöht. Die Regelparameter müssen deshalb angepasst werden. In Abbildung 23 sind die Diagramme der drei Versuche mit jeweils gleichem Zeitraum von 0,2 s dargestellt. Die Speicherrate ist ebenfalls bei allen Versuchen gleich.

Vergleicht man die drei Versuche miteinander, bestätigt sich die These nur teilweise. Bei Elastomeren sinken die Oszillationen bei höheren Federsteifigkeiten, trotz gleicher Regelparameter. Die Oszillationen können jedoch nur bis auf die bestmögliche Messgenauigkeit der Kraftmessdosen reduziert werden. Deshalb zeigt Versuch Nr. 3 keine Verbesserung zu Versuch Nr. 2. Haupteinflussgrößen auf die Messgenauigkeit sind nach wie vor die Regelparameter. Bei dynamischen Parametern entstehen zwangsläufig Oszillationen, jedoch können mit angepassten Regelparametern Messgenauigkeiten von ca. 2-3 N erreicht werden. Weitere Versuche haben gezeigt, dass die Größe der Kraft keinen Einfluss auf die Genauigkeit hat.

Wie schon in Abschnitt 3.3 festgestellt wurde, sind die Oszillationen bei der Normprobe zu groß, um die Messergebnisse auswerten zu können. Empfohlen wird mindestens eine Dimensionierung der Elastomerproben von $b = 35$ mm, $d = 2$ mm und $L_0 = 80$ mm.

Tabelle 7: Parameter zur Ermittlung der Messgenauigkeit

Nr.	Probenmaterial	Breite	Dicke	Messlänge	P-Anteil	I-Anteil
1	NR / SBR	35 mm	2 mm	80 mm	1	100
2	NBR	35 mm	10 mm	80 mm	1	100
3	Aluminium	15 mm	0,5 mm	80 mm	0,1	10

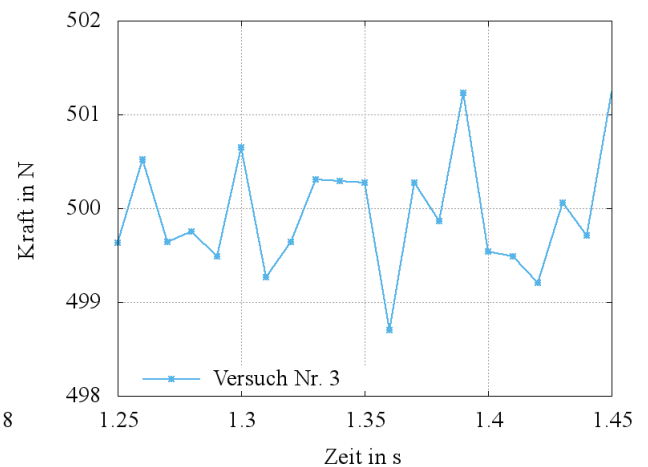
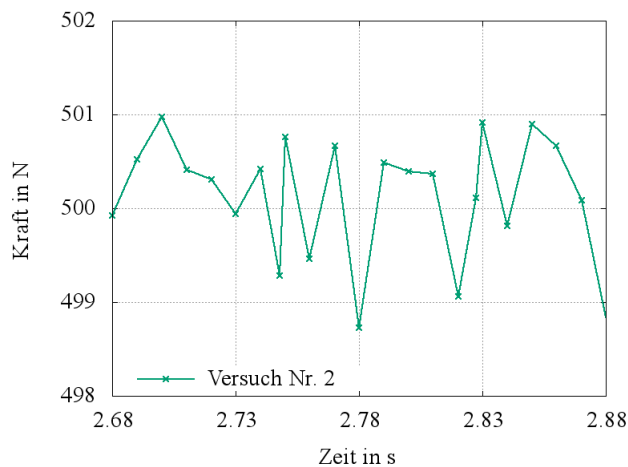
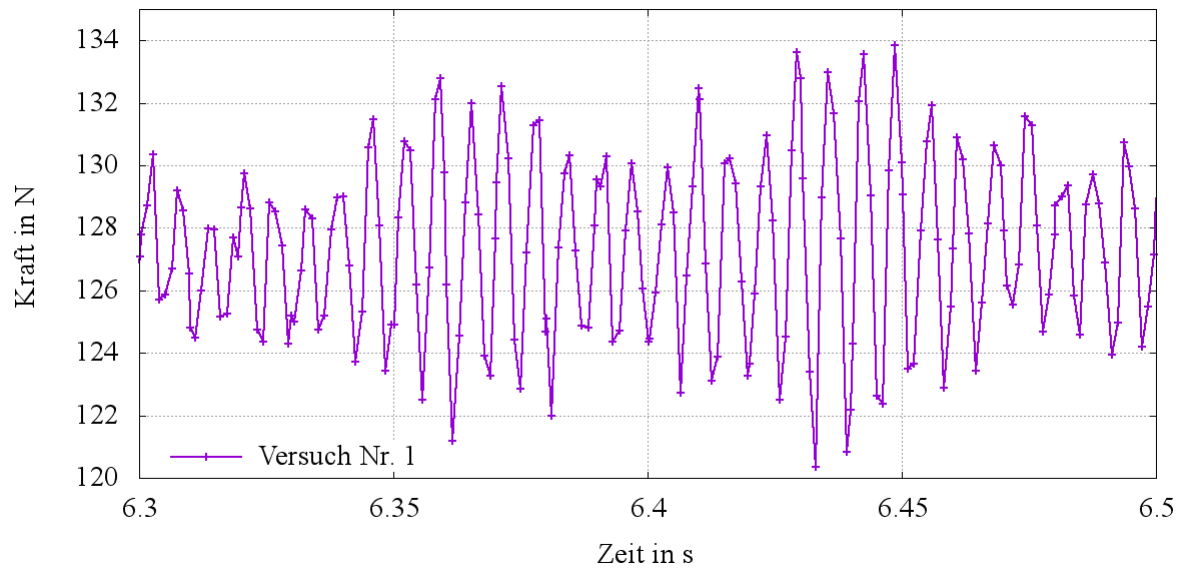


Abbildung 23: Oszillationen in der Kraftmessung

Versuchsvorbereitung

Zu Beginn eines Versuches, sollte folgendermaßen vorgegangen werden:

- Probenschutz überprüfen / einschalten.
- Kräfte zurücksetzen, um die absolute Messkraft anzuzeigen.
- Abbruchkriterien / Endkriterien festlegen.
- Regelparameter überprüfen / anpassen.
- Speicherbedingungen überprüfen (Speicherkanäle, Speicherrate, Speicherort).
- Weg / Kraft bei Bedarf nullen und Schleppzeiger löschen.
- Nachdem die Kamera läuft, kann der Versuch gestartet werden.

4. Optische Dehnungsmessung

4.1. Kamera und Objektive

Die optische Dehnungsmessung erfolgt über das Video Extensometer Typ *VEX-50-MER*. Es setzt sich zusammen aus der Kamera der Basler AG Typ *acA2040-90um* (siehe Tabelle 8) und dem Teleobjektiv von MercuryRT. Alternativ kann das Weitwinkelobjektiv von Kowa Typ *LM35HC* verwendet werden (siehe Tabelle 9). Die Bedienung der Kamera erfolgt über die Software *MercuryRT x64 2.4.2*.

Tabelle 8: Kamera Produktinformationen [4]

Kamera	Sensor	Bildkreis	Sensorgröße	Auflösung
Basler acA2040-90um	CMV4000	1"	11,3 mm x 11,3 mm	4 Megapixel (2048 px x 2048 px)
	Pixelgröße	Bildrate	Objektivanschluss	Schnittstelle
	5,5 µm x 5,5 µm	90 fps	C-Mount	USB 3.0

Tabelle 9: Produktinformationen der Objektive

Objektiv	Brennweite	Bildkreis	Blendenbereich	Auflösung	Messbereich
Mercury RT	75 mm	2/3"	F2.0 - 22	1 Megapixel	80 mm x 80 mm
Kowa <i>LM35HC</i>	35 mm	1"	F1.4 - 16	5 Megapixel	190 mm x 190 mm

Die Wahl des Objektivs hängt zum Großteil von der Probengröße bzw. der gewünschten Messlänge ab. Abbildung 24 stellt den Strahlengang durch eine Linse schematisch dar. Der Messbereich der Objektive kann über die Winkelfunktion und der sich daraus ergebenden Gleichung (3) ermittelt werden. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass der Arbeitsabstand a durch unterschiedliche Objektivhöhen variiert. Außerdem liefert das Objektiv von Mercury RT einen kleineren Bildkreis, als der Bildkreis, der durch den Sensor der Kamera aufgenommen werden kann. Deshalb dient Gleichung (3) in erster Linie als Orientierungshilfe, zur Wahl eines neuen Objektivs.

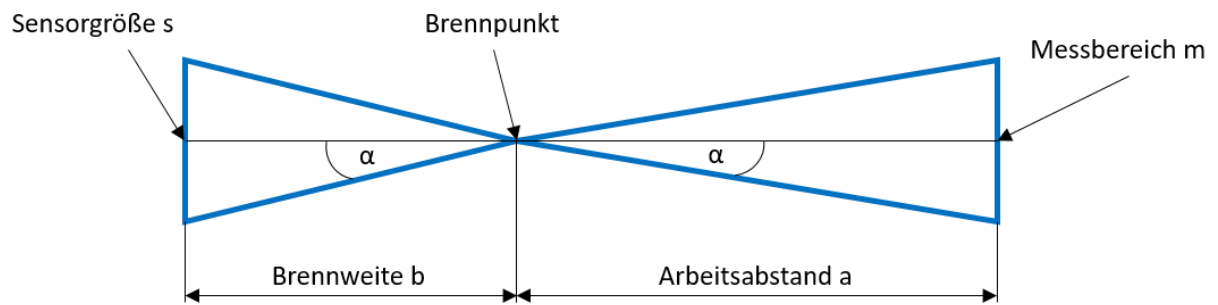


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Strahlengangs durch eine Linse

$$m = 2 \times a \times \frac{s}{2 \times b} \quad (3)$$

Die genaue Bestimmung des Messbereichs ist nach der Kalibrierung und nach eingerichtetem Koordinatensystem möglich, da das Koordinatensystem die Größe eines Pixels angibt. Die Größe des Messbereichs kann berechnet werden, indem die Auflösung der Kamera mit der Pixelgröße multipliziert wird. Ein Pixel entspricht bei dem Objektiv von Mercury RT 0,039 mm und bei dem Objektiv von Kowa 0,093 mm. Diese Werte entsprechen dabei ebenfalls der Genauigkeit der Objektive. Grundsätzlich wäre das Objektiv von Kowa besser für die Kamera geeignet, weil Bildkreis und Auflösung besser aufeinander abgestimmt sind. Allerdings ist die Genauigkeit des Objektivs durch den größeren Messbereich geringer. Durch das Weitwinkelobjektiv entstehen zusätzlich größere Verzerrungen am Bildrand. Obwohl die Verzerrungen bei der Kalibrierung von der Software berücksichtigt werden, eignet sich für kleine Messbereiche das Teleobjektiv von Mercury RT besser.

4.2. Kalibrierung und Koordinatensystem

Jedes Objektiv muss vor der ersten Anwendung kalibriert werden, damit die Verzerrung der Linse das Messergebnis nicht verfälscht. Die Kalibrierung wird mit Hilfe einer Kalibrierungsplatte (siehe Abbildung 25) durchgeführt. Dabei wird die Kalibrierungsplatte in verschiedenen Winkeln von der Kamera fotografiert. Anschließend berechnet die Software den Pixelfehler jedes aufgenommenen Bildes und bildet einen Mittelwert. Besonders hohe Pixelfehler können nachträglich manuell aussortiert werden. Der durchschnittliche Pixelfehler sollte unter 0,3 Pixel liegen [5]. Nachdem die Kalibrierung abgeschlossen ist, wird das Ergebnis in einer XML-Datei gespeichert. Diese Datei kann beim Anlegen eines neuen Projektes oder beim Wechseln des Objektivs direkt eingelesen werden, um die Kalibrierung nicht erneut durchführen zu müssen.

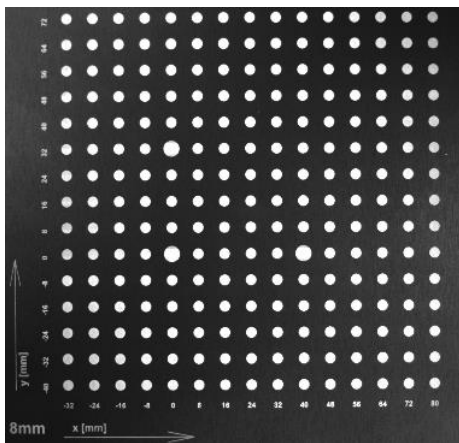


Abbildung 25: Kalibrierungsplatte

Die Kalibrierungsplatte eignet sich ebenfalls zum automatischen Erstellen eines Koordinatensystems, da die Software den Abstand der Punkte exakt erkennt. Wichtig ist dabei die Einstellung eines Offsets zur Messebene. Abbildung 26 stellt die Kalibrierungsebene (rot) gegenüber der Messebene (blau) dar. Da sich die Lage der Messebene bei unterschiedlichen Probendicken ändert, wird ein erstes Referenz-Koordinatensystem gespeichert. Dabei bezieht sich die Nulllage auf die Mittellinie (grün). Besitzt die Kalibrierungsplatte eine Dicke von

3 mm und die darunterliegende Probe eine Dicke von 4 mm, so wird der Offset zur Mittellinie auf - 5 mm eingestellt. Das Koordinatensystem wird in einer CSV-Datei gespeichert und kann für die verschiedenen Projekte als Referenz geladen werden. Dadurch muss der Benutzer auf verschiedene Probendicken nur noch mit einem positiven Offset reagieren. Ist die Probendicke zum Beispiel 2 mm, muss nach geladenem Referenz-Koordinatensystem ein Offset von + 1 mm eingegeben werden.

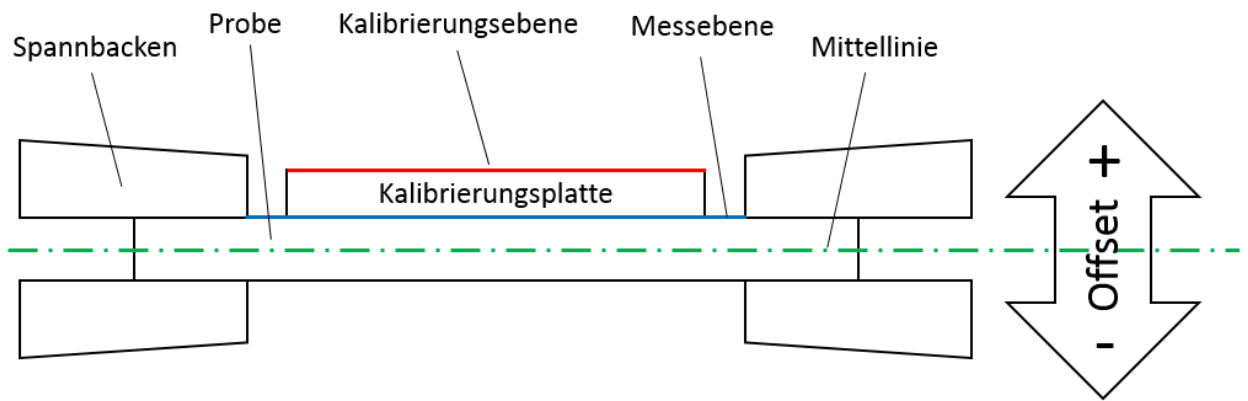


Abbildung 26: Schematische Darstellung zur Bestimmung des Offsets

Der aktuelle Offset wird in dem Eingabefeld *Ebene Offset* angezeigt (siehe Abbildung 27). Wechselt der Benutzer zwischen verschiedenen Projekten, bleibt der eingestellte Offset erhalten. Kehrt man zum ursprünglichen Projekt zurück, wird der Offset mit dem Wert 0,00 angezeigt, obwohl der vorherige Wert noch immer aktiv ist. Damit es aufgrund dieses Fehlers nicht zu einem Aufsummieren des Offsets kommt, sollte das Referenz-Koordinatensystem nach jedem Projektwechsel erneut geladen werden.

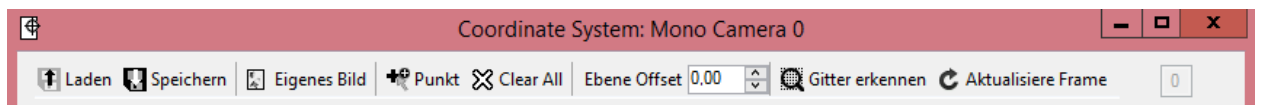


Abbildung 27: Einstellungen des Koordinatensystems

4.3. Probenmarkierung und Kamerasoftware

Die Markierungen der Messlängen bzw. der Messbereiche geschieht in der Kamerasoftware. Die meist genutzte Markierung ist ein sogenannter Linien Sensor. Durch einen Rechtsklick auf die Markierung können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden (siehe Abbildung 28, Position 1). Zur Übermittlung an *DION7* sollte immer die Dehnung gewählt werden. Wichtige Einstellungen zur Erkennung der Probenmarkierung sind in Position 2 zu sehen. Die voreingestellten Parameter funktionieren bereits gut, deshalb wird nachfolgend nur auf wichtige Änderungen eingegangen. Die „Subset Größe“ gibt an, wie viele Pixel als Schablone um den Messpunkt herum zur Beobachtung gebildet werden, zu erkennen an dem roten Quadrat. Größere Schablonen können leichter erkannt werden, jedoch werden lokale Verformungen durch kleinere Schablonen besser erkannt. Die Farbe des Quadrats

zeigt, wie gut die Umgebung erfasst werden kann. Diese Funktion muss allerdings zuerst in den Optionen aktiviert werden, da die Schablonen in den Voreinstellungen schwarz sind. Die Einstellungen der „Korrelationsgeschwindigkeit“ und des „Transformations Type“ geben die Geschwindigkeit und die erwartete Veränderung der Probenmarkierung an. Die schnellste Suche, durchsucht nur eine kleine Umgebung um die Probenmarkierung herum, während eine langsame Suche bei Bedarf den gesamten Bildausschnitt absucht. Die erwarteten Veränderungen können z.B. Verschiebung, Rotation, Scherung und Größenänderung sein. Zu beachten sind Übersetzungsfehler in der Kamerasoftware.

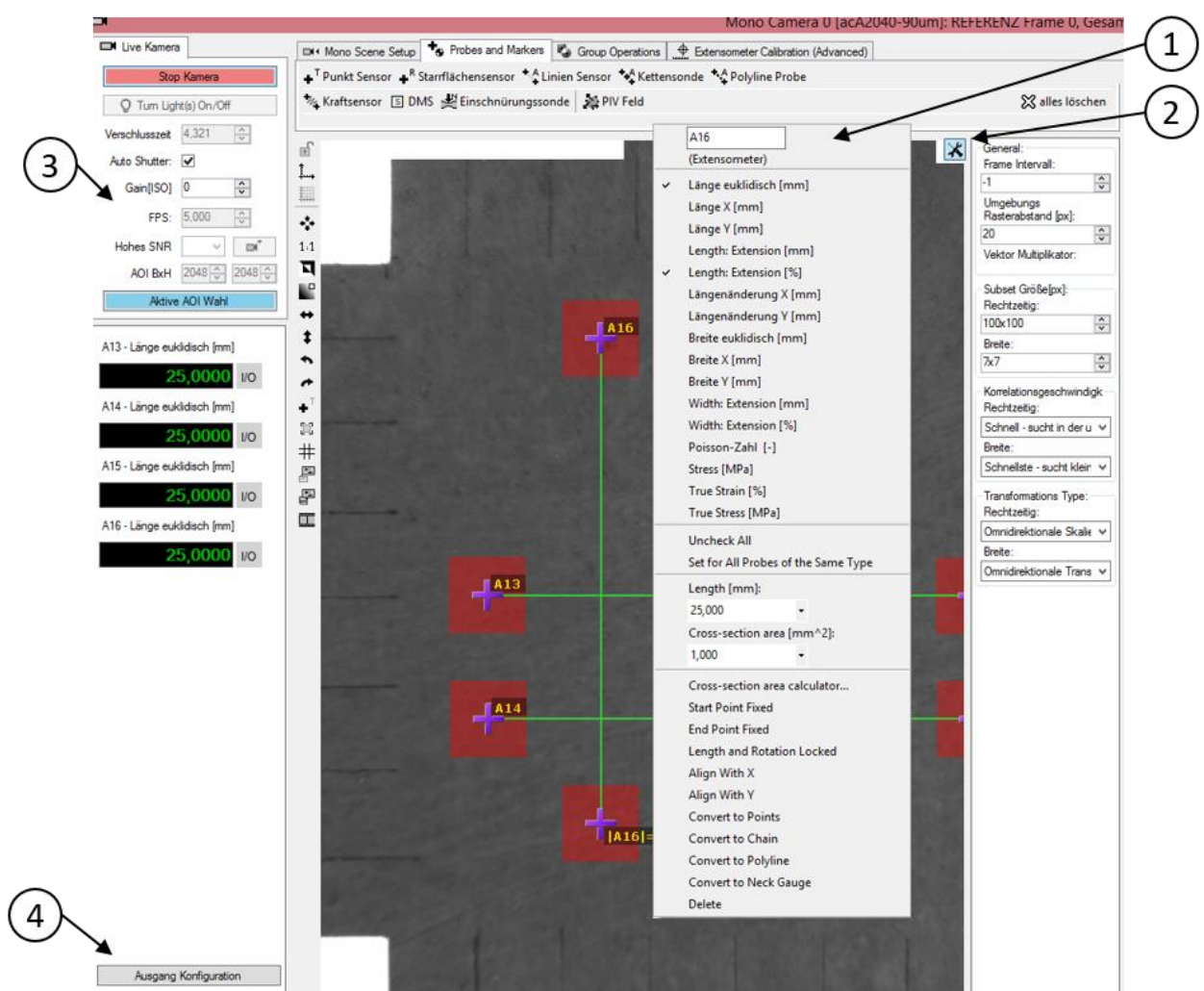


Abbildung 28: Wichtige Einstellungen der Kamerasoftware

Position 3 in Abbildung 28 zeigt die wichtigsten Einstellungen für die Kamera an. Die Verschlusszeit kann am einfachsten durch die Option „Auto Shutter“ geregelt werden. Deshalb kann der ISO-Wert (Lichtempfindlichkeit des Bildsensors) auf 0 belassen werden. Die Einstellung der „FPS“ (Frames Per Second) gibt an, wie viele Bilder pro

Sekunde von der Kamera aufgenommen und an *DION7* gesendet werden. Bei langsamen bzw. Langzeitversuchen genügen weniger Bilder pro Sekunde, z.B. 10 FPS, während bei schnellen und kurzen Versuchen mehr Bilder pro Sekunden nützlich bzw. notwendig sind. Ist die Rechenleistung des Computers während eines Versuchs zu stark ausgelastet, werden die Bilder pro Sekunde automatisch gesenkt. Durch Auswählen der „Aktive AIO Wahl“ kann der Bildausschnitt auf die Probe zugeschnitten werden.

Die zu übermittelnden Probenmarkierungen werden über „Ausgang Konfiguration“ ausgewählt (siehe Position 4).



Abbildung 29: Probenmarkierung

Durch Markierungen auf der Probe selbst, kann die Erkennung der virtuellen Probenmarkierungen verbessert werden. Beispielsweise bewirken wenige Punkte auf der Probe eine Verbesserung, sodass die Schablone die Farbe von rot auf grün ändert (siehe Abbildung 29). Es gilt, je kleiner die Punkte, desto besser ist die Erkennung.

Versuchsvorbereitung

Folgende Kameraeinstellungen sind vor dem Versuchsstart zu überprüfen:

- Neues Projekt erstellen oder vorhandenes Projekt laden.
- Kalibrierung und Koordinatensystem zum verwendeten Objektiv laden und Offset zur Messebene einstellen.
- „Auto Shutter“ aktivieren und Bilder pro Sekunde (FPS) festlegen.
- *Area Of Interest* (AOI) auf die Probe zuschneiden.
- Probenmarkierungen erstellen und als Dehnungswert an *DION7* übermitteln.
- Aufnahme über „Run“ starten. Bei Bedarf „Frames Saved“ aktivieren, um die Bilder des Versuchs zu speichern und anschließend in einem Video zu exportieren.

Anmerkung: Ist „Frames Saved“ aktiviert, sollten nicht mehr als 10 Bilder pro Sekunde eingestellt sein, da sonst Ruckler in der Dehnungsmessung entstehen. Bei Langzeitversuchen sollte die Aufnahme per „Run without recording“ gestartet werden, da die Kamerasoftware bei längeren Aufnahmen abstürzt, wenn die Bilder gespeichert werden.

5. Fazit und Ausblick

Die Erfahrungen mit einer Maschine können selten durch Handbücher oder Fachpersonal übermittelt werden. Besonders dann nicht, wenn es sich, wie bei der biaxialen Zugprüfmaschine der Walter + Bai AG, um eine speziell für die Hochschule Offenburg konfigurierte Maschine handelt. Durch verschiedene Parameterstudien liefert die vorliegende Arbeit Aufschluss über das Verhalten der Maschine bei unterschiedlichen Probengeometrien.

Eine der Haupteinflussgrößen auf die statischen und zyklischen Versuche ist die Federsteifigkeit der Probe. Diese wirkt sich besonders bei einer Kraftregelung auf die Regelparameter aus. Der P-Anteil eines PIDT-Reglers muss bei höher werdenden Federsteifigkeiten gesenkt werden, da die Regelung sonst instabil wird. Um möglichst unterschiedliche Federsteifigkeiten zu testen, wurden neben den Elastomerproben auch Aluminium- und Stahlproben verwendet. Bei der Weg- und Dehnungsregelung sind bisher keine Abhängigkeiten von der Federsteifigkeit oder anderen Einflussgrößen entdeckt worden. Bei angepassten Regelparametern kann eine Messgenauigkeit von ca. 2-3 N erreicht werden. Ist die Federsteifigkeit der Probe zu klein, können Oszillationen in der Kraftmessung, selbst mit angepassten Regelparametern, nicht vermieden werden. Die Federsteifigkeit sollte einen Wert von ca. 5 N/mm nicht unterschreiten. Demnach muss bei der Probendimensionierung von der Norm ISO 37 abgewichen werden.

Die optische Dehnungsmessung funktioniert auch mit den Voreinstellungen der Kamerasoftware gut, konnte aber durch kleine Anpassungen optimiert werden. Eine wichtige Erkenntnis ist das richtige Vorgehen beim Kalibrieren des Objektivs und Einstellen des Koordinatensystems.

Durch weitergehende Parameterstudien mit mehreren Materialien, z.B. verschiedenen Kunststoffen, können die bisherigen Ergebnisse verfeinert oder angepasst werden. Auch die Kamerasoftware bietet noch Funktionen, die bisher nicht berücksichtigt wurden und noch genauer untersucht werden können.

Aufgrund vieler Versuche konnten wichtige Erfahrungen mit dem Umgang der Maschine und den Parametern gesammelt werden. Dadurch sind nun optimale Versuchsdurchführungen, einachsig und zweiachsig, möglich.

Literaturverzeichnis

1. **ISO37:2011(E)**. *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tensile stress-strain properties.*
2. **Walter + Bai AG**. *Handbuch - Software für die Materialprüfung DION7*. Version 2.1.0. 2016.
3. **Walter + Bai AG**. Serie PCS8000. [Online]
https://www.walterbai.com/Werkstoffpruefung/Digitalregler/Mehrkanalregelsystem_PCS8000.html abgerufen am 01.06.2017
4. **Basler AG**. acA2040-90um - Basler ace. [Online]
<https://www.baslerweb.com/de/produkte/kameras/flaechenkameras/ace/aca2040-90um/> abgerufen am 01.06.2017
5. **Walter + Bai AG**. *Handbook - Video Extensometer Type VEX-MER*. 2016.

Anhang

Anhang 1: Python Skript

```
from os import system

b = 35.
d = 2.

Datei_ein = open("Versuch1.lia","r")
Datei_aus = open("Versuch1.dat","w")

Zeilen = Datei_ein.readlines()
Variablen = Zeilen[0].split(";")
i_Zeile = Variablen.index("S/No")
i_Zeit = Variablen.index("C_1_Zeit[s]")
i_Kraft1 = Variablen.index("C_1_Kraft1[kN]")
i_VEX1 = Variablen.index("C_1_VEX1[%]")

Datei_aus.write(" Zeile   Zeit in s   Dehnung1   Spannung in MPa\n")
for Zeile in Zeilen[1:]:
    Liste = Zeile.split(";")
    i = int(Liste[i_Zeile])
    zeit = float(Liste[i_Zeit].replace(",","."))
    sigma = float(Liste[i_Kraft1].replace(",","."))*1000/(b*d)
    dehnung = (float(Liste[i_VEX1].replace(",",".")))

Datei_aus.write("%6i"%i+"%12.4f"%zeit+"%12.6f"%dehnung+"%12.6f"%sigma+
"\n")

Datei_ein.close()
Datei_aus.close()

print("Umrechnung erfolgt!")
system("Auswertung_Gnuplot.plt")
print("Ende")
```

Anhang 2: Gnuplot Skript

```
set key right bottom Left reverse
set grid
set origin 0.0,0.0

set xlabel "Dehnung in %"
set ylabel "Spannung in MPa"

plot [::] \
    "Versuch1.dat" using 3:4 t "Versuch1" w l lt 1 lw 1

set term png enhanced font times 18 size 800, 600
set output "Spannungs-Dehnungs-Diagramm.png"
replot

set term windows
pause -1 "Taste betaetigen 1"

exit gnuplot
```