

Untersuchung der Bruchlast
von Polyamidschrauben in
Abhängigkeit der Belastungs-
anstiegsgeschwindigkeit

F-05-1901

Untersuchung der Bruchlast von
Polyamidschrauben in Abhängigkeit der
Belastungsanstiegsgeschwindigkeit

Bachelorarbeit

von

Tobias Johannes König

Hochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und
Arbeitsmedizin

Mannheim, September 2019

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Mannheim, 24. September 2019

(Tobias König)

Vorwort

Diese Bachelorarbeit wurde bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA) im Zentrallabor der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gaststätten (BGN) erstellt. Ziel dieser Arbeit, welche im Rahmen des Projektes F-05-1901 durchgeführt wurde, ist die Untersuchung des Bruchverhalten von Polyamidschrauben, die beim Verschluss von Explosionsschutzklappen Verwendung finden.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen, die mich während meines Studiums und dieser Bachelorarbeit unterstützten, recht herzlich bedanken.

Prof. Dr. Bernd Schinke danke ich für die Bereitschaft, die Betreuung der Arbeit seitens der Hochschule Mannheim zu übernehmen.

Ganz besonderer Dank geht an Dirk Lorenz für die vorbildliche, herzliche sowie fachlich sehr kompetente Unterstützung, die Vermittlung der benötigten Grundkenntnisse und das entgegengebrachte Vertrauen. Er hat die Arbeit für die BGN/FSA betreut und ermöglichte das wissenschaftliche Arbeiten in hervorragender Arbeitsatmosphäre.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Sebastian Nissle für das eingebrachte Wissen in der Thematik der Kunststofftechnik, für die Hilfe bei der Versuchsplanung, für die Korrektur der schriftlichen Arbeit, sowie generell für die ausgesprochen große Hilfsbereitschaft auf hohem Niveau.

Weiterhin möchte ich mich bei Pavlo Chupin, Dr. Jan-Niklas Tödt, Hermann Schiebler und dem restlichen Team des Zentrallabor der BGN/FSA in Mannheim bedanken, die mir immer mit kompetentem Wissen tatkräftig zur Seite standen und für eine freundliche und angenehme Arbeitsatmosphäre sorgten.

Außerdem danke ich Peter Schepp und dem Team des Zentrallabors der BGN/FSA auf dem Versuchsgelände in Kappelrodeck für die Unterstützung und große Hilfsbereitschaft jeglicher Art.

Die Arbeit der vergangenen Monate in der guten Arbeitsatmosphäre hat mir große Freude bereitet. Ich konnte mir viel neues Wissen aneignen und spannende Aufgabstellungen bearbeiten. Das aus dem Studium mitgebrachte Grundwissen ließ sich gut anwenden und vertiefen. Für die angenehme Zeit bei der BGN/FSA Mannheim danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern recht herzlich.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	IV
Glossar	VII
Zusammenfassung	1
1 Einleitung	2
1.1 Allgemeines	2
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Vorgehensweise	4
2 Grundlagen	6
2.1 Dimensionierung von Explosionsklappen	6
2.2 Eigenschaften von Thermoplasten	8
2.2.1 Amorpher Zustand bei Thermoplasten	8
2.2.2 Teilkristalliner Zustand bei Thermoplasten	8
2.3 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten	11
2.4 Einflussfaktoren auf die Werkstoffeigenschaften von Thermoplasten . .	13
2.4.1 Belastungsanstiegsgeschwindigkeit	13
2.4.2 Materialtemperatur	14
2.4.3 Materialfeuchte	15
2.4.4 Zusammenfassung und Relevanz für Explosionsklappen	15
3 Experimenteller Teil	17
3.1 Versuchsaufbau, Versuchsablauf und Datenauswertung	17
3.1.1 Versuchsaufbau und Funktionsprinzip	17
3.1.2 Versuchsablauf	20
3.1.3 Datenauswertung	20

3.2	Einfluss der Belastungsanstiegsform auf das Bruchverhalten	24
3.2.1	Bandbreite auftretender Schraubenbelastungen	24
3.2.2	Realisierung eines nichtlinearen Belastungs-Zeit-Verlaufs	27
3.2.3	Realisierung eines linearen Belastungs-Zeit-Verlaufs	30
3.2.4	Versuchsdurchführung	32
3.2.5	Messergebnisse und Auswertung	33
3.3	Einfluss der Materialfeuchte auf das Bruchverhalten	36
3.3.1	Konditionierung der Schrauben	36
3.3.2	Versuchsdurchführung	36
3.3.3	Messergebnisse und Auswertung	38
3.3.4	Diskussion	42
3.4	Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf das Bruchverhalten	44
3.4.1	Versuchsdurchführung	45
3.4.2	Messergebnisse und Auswertung	46
3.4.3	Diskussion	50
4	Entwicklung einer Versuchsapparatur	52
4.1	Spezifikationsphase	52
4.1.1	Anforderung Belastungsdauer	53
4.1.2	Anforderung verschiedene Schrauben	53
4.1.3	Anforderung Schwingungsfreiheit	54
4.1.4	Anforderung Messtechnik	54
4.1.5	Anforderung Sicherheit	54
4.1.6	sonstige Anforderungen	54
4.2	Konzeptphase	54
4.2.1	Einteilung in Funktionseinheiten	54
4.2.2	Konzeptionierung des Antriebs	55
4.2.3	Konzeptionierung der Prüfvorrichtung	57
4.2.4	Konzeptionierung der Messtechnik	59
4.2.5	Gesamtkonzept	60
4.3	Gestaltungsphase	60
4.3.1	Auslegung des Antriebs	61
4.3.2	Auslegung der Prüfvorrichtung	66
4.3.3	Auslegung der Messtechnik	67
4.4	Ausarbeitungsphase	67

5 Diskussion und Ausblick	68
5.1 Diskussion der Ergebnisse	68
5.2 Ausblick	69
Abbildungsverzeichnis	74
Tabellenverzeichnis	78
A Zeichnungen	79
B Tabellen und Messergebnisse	86
C Datenblätter	91
C.1 Datenblatt Polyamid	91
C.2 Datenblatt Elektromotor	94
C.3 Datenblatt Kupplung	96

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Querschnittsfläche
A_E	m^2	Entlastungsfläche
A_w	m^2	wahre Querschnittsfläche
b	m	Seitenlänge einer quadratischen Explosionsklappe
c	mm	Material- bzw. Plattenstärke
D	m	Durchmesser
D_K	m	Kerndurchmesser einer Schraube
$D_{K,M6}$	m	Kerndurchmesser einer M6-Polyamidschraube
$D_{K,M10}$	m	Kerndurchmesser einer M10-Polyamidschraube
\vec{D}_S, D_S	Nm	klappenöffnend wirkendes Drehmoment
dF/dt	N/s	Belastungsanstiegsgeschwindigkeit
$(dp/dt)_{\text{red,max}}$	bar/s	reduzierte maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit
\vec{e}	m	Einheitsvektor
E_f	$\%$	Entlastungsfähigkeit einer Explosionsklappe
E	MPa	Elastizitätsmodul
f	-	Faktor
F	$\text{N}, \%$	Kraft
\vec{F}_1, F_1	N	Belastung auf Klappenverschlusschraube 1
$F_{B,n}$	N	Bruchlast der n-ten Schraube laut Datenblatt
F_B	N	Bruchlast
\bar{F}_B	N	mittlere Bruchlast
$F_{B,\text{max}}$	N	gemessene maximale Bruchlast
$F_{B,\text{max},M6}$	N	gemessene maximale Bruchlast einer M6-Polyamidschraube
$F_{B,\text{max},M10}$	N	berechnete maximale Bruchlast einer M10-Polyamidschraube
\vec{F}_S, F_S	N	klappenöffnend wirkende Kraft am Schwerpunkt
F_x	N	Rückstellkraft
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
G	$1/\text{mm}$	Gewindesteigung
h	m	Fallhöhe; Abstand zwischen der Klappenscharnierachse und dem Mittelpunkt einer runden oder rechteckigen Entlastungsöffnung
H	m	Höhe

h_n	m	Abstand zwischen der Klappenscharnierachse und dem Zentrum des n -ten Schraubenloches in der Klappe
K	-	Sicherheitsfaktor
k_F	N/mm ²	Federkonstante
K_{St}	bar·m/s	staubspezifische Kenngröße
l	m	Länge der Gewindespindel
L	m	Abstand zwischen Zündort und Mitte der Entlastungsfläche
L_0	m	Anfangslänge
m	kg	Masse
M_A	Nm	Antriebsmoment
m_K	kg	Masse einer Explosionsklappe
m_S	g	Masse einer Polyamidschraube
n	-	Anzahl an Schrauben oder Explosionsklappen; Einzelversuchsanzahl
p	bar, Pa	Druck
p_{stat}	bar	statischer Ansprechdruck
p_{dyn}	bar	dynamischer Ansprechdruck
p_{max}	bar	maximaler Explosionsdruck
p_{red}	bar	reduzierter Explosionsdruck
$p_{red,max}$	bar	reduzierter maximaler Explosionsdruck
\vec{r}_1, r_1	m	Ortsvektor einer Klappenverschlussschraube
\vec{r}_S, r_S	m	Ortsvektor des Klappenschwerpunktes
R_S	m	Streckgrenze
s	mm	Dehnungsweg
S	-	Schwerpunkt
t	s	Zeit
t_B	s	Belastungsdauer
\bar{t}_B	s	mittlere Belastungsdauer
$t_{F,max}$	s	Auftrittszeitpunkt der Bruchlast
u	diverse	Messunsicherheit $u = 3\delta/\sqrt{n}$
u_r	%	relative Messunsicherheit u/\bar{x}
V	m ³	Volumen
v	m/s	Dehnungsgeschwindigkeit
v_A	m/s	Aufprallgeschwindigkeit einer fallenden Masse auf einen Dämpfer
v_S	m/s	Schlittengeschwindigkeit
W	\$	Materialfeuchte
\bar{W}	%	mittlere Materialfeuchte
x	mm	Weg in x -Richtung, Koordinate
\bar{x}	diverse	Mittelwert einer Messgröße
\dot{x}	m/s	Geschwindigkeit in x -Richtung
\ddot{x}	m/s ²	Beschleunigung in x -Richtung
y	mm	Koordinate
ΔL_0	m	Längenänderung

σ	MPa	mechanische Spannung
σ_B	MPa	Bruchspannung
$\sigma_{B,max}$	MPa	gemessene maximale Bruchspannung
σ_w	MPa	wahre mechanische Spannung
δ	diverse	Standardabweichung
$\bar{\delta}$	%	relative Standardabweichung
ε	%	Dehnung
ε_B	%	Bruchdehnung
$\bar{\varepsilon}_B$	%	mittlere Bruchdehnung
ε_w	%	wahre Dehnung
ν	1/s	Motordrehzahl
$\bar{\nu}$	1/s	mittlere Motordrehzahl

Glossar

Begriff	Definition
Belastungsdauer	Zeitspanne von Beginn der Schraubenbelastung bis zum Abriss der Schraube.
Bruchlast	Die bei einem Schraubenreißversuch beobachtete maximale Belastung.
Druckentlastungseinrichtung	Einrichtung zum Schutz eines Behälters oder eines anderweitig umschlossenen Volumens durch Entlastung des Explosionsdruckes [7].
dynamischer Ansprechdruck	Differenzdruck, bei dem sich der Verschluss einer Explosionsklappe öffnet, wobei die Druckanstiegs geschwindigkeit größer als 1 bar/s ist [18].
Entlastungsfähigkeit	Prozentualer Anteil der Druckentlastungsfläche einer Explosionsklappe, welcher der äquivalenten Druckentlastungsfläche einer trägheitslosen Entlastungseinrichtung entspricht [18].
EU-Baumusterprüfung	Teil einer Konformitätsbewertung, bei der eine notifizierte Stelle den technischen Entwurf eines Produktes untersucht, prüft und bescheinigt, dass er die für das Produkt geltenden Anforderungen der Richtlinie 2014/34/EU erfüllt [9].
Gewindesteigung	Die Gewindesteigung ist der von einer auf der Gewindespindel sitzenden Mutter zurückgelegte Weg bei einer vollständigen Umdrehung.
Hauptkette	Aneinandergereihte Kohlenstoffatome, die eine Kohlenstoffkette bilden.
Konformitätsbewertung	Verfahren zur Bewertung, ob die wesentlichen Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen der Richtlinie 2014/34/EU an ein Produkt erfüllt worden sind [9].

K_{St} -Wert	staubspezifische Kenngröße zur Charakterisierung der Druckanstiegsgeschwindigkeit in Behältern und Räumen bei Staubexplosionen [2, 18]
maximaler Explosionsdruck	maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im geschlossenen Behälter bei optimaler Staubkonzentration [2, 18]
notifizierte Stelle	Staatlich benannte private Organisation, die nachweislich die in der Richtlinie 2014/34/EU genannten Aufgaben einer Konformitätsbewertung bewältigen kann [18].
reduzierter Explosionsdruck	maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im druckentlasteten Behälter [2, 18]
reduzierte maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit	Synonym für den reduzierten maximalen zeitlichen Druckanstieg, welcher in [2] als maximaler zeitlicher Druckanstieg bei einer Staubexplosion im druckentlasteten Behälter bei optimaler Staubkonzentration definiert ist [18].
reduzierter maximaler Explosionsdruck	maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im druckentlasteten Behälter bei optimaler Staubkonzentration [2, 18]
Shore A	Maßeinheit für die Härte von Elastomeren, wobei der Buchstabe A das Prüfverfahren kennzeichnet.
Seitenkette	Ein Substituent (Rest), der von einer Kohlenstoffkette oder einem Kohlenstoffring abzweigt.
SIMEK	Akronym für <u>S</u> imulationsrechnung zur <u>M</u> echanik von <u>E</u> xplosions <u>k</u> lappen [18].
statischer Ansprechdruck	Differenzdruck, bei dem sich der Verschluss einer Explosionsklappe öffnet, wobei die Druckanstiegsgeschwindigkeit kleiner als 1 bar/min ist [18].

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Beantwortung der Frage, ob Polyamidschrauben zum Verschließen von Explosionsklappen geeignet sind. Das Bruchverhalten von Polyamidschrauben in Abhängigkeit der Form des Belastungsverlaufes, der Schraubematerialfeuchte und der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit wird deshalb untersucht. Ein dafür geeigneter experimenteller Aufbau wird konzipiert und mit dessen Aufbau begonnen. Parallel dazu wird eine bereits vorhandene Versuchsanlage soweit wie möglich an die Erfordernisse angepasst und Versuche während der Aufbauphase des geplanten experimentellen Aufbaus durchgeführt.

Ein Einfluss der Form der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit (linear, 3. Potenz) auf die Schraubenbruchlast kann im Rahmen der verwendeten Variationsbreite nicht nachgewiesen werden.

Es wird gezeigt, dass die *Bruchlast*¹ F_B sowie die Bruchdehnung ε_B von der Feuchte des Schraubematerials abhängig sind. Die Bruchlast steigt mit abnehmender Feuchte um bis zu 32 %. Die Bruchdehnung ε_B nimmt mit steigender Feuchte um bis zu 1.867 % zu. Aus einer Abschätzung des E -Modul wird erkennbar, dass dieser mit zunehmender Feuchte sinkt. Das Schraubematerial ist im feuchten Zustand elastisch. Trockene Polyamidschrauben sind dagegen spröde.

Es wird beobachtet, dass Polyamidschrauben, unabhängig vom Lieferanten, zahlreiche, unregelmäßige Fehlstellen zeigen, welche die Schrauben erheblich schwächen können.

Die Auswirkung der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf das Bruchverhalten von Polyamidschrauben kann mit der verwendeten Versuchsanlage nicht in vollständiger Breite untersucht werden. Es wird jedoch die Tendenz beobachtet, dass die Bruchlast mit steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit wächst. Dieses Ergebnis kann allerdings nicht als statistisch abgesichert angesehen werden.

Bedingt durch die Bauweise der Versuchsanlage steigt die Belastung der Polyamidschrauben bei Zugversuchen nicht stetig, sondern wellenförmig an. Aufgrund dieser Wellenform entspricht die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit der Polyamidschrauben in der Versuchsanlage nicht der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit wie sie an Explosionsklappen im Entlastungsfall auftritt. Deshalb und aus oben genanntem Grund ist eine abschließende Bewertung des Einflusses der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf die Bruchlast von Polyamidschrauben hier nicht möglich. Dies muss einer weiterführenden Untersuchung mit der im Rahmen dieser Arbeit konzipierten Versuchsanlage vorbehalten bleiben.

¹ *Kursiv* gestellte Begriffe sind im Glossar erläutert.

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeines

Überall dort wo brennbare Stäube erzeugt oder verarbeitet werden, sieht man sich mit der potentiellen Gefahr von Staubexplosionen konfrontiert. Staubexplosionen können verheerende Folgen haben. Zum Schutz industrieller Anlagen vor Staubexplosionen ist deshalb die Anwendung und stetige Verbesserung von Explosionsschutzsystemen bis heute ein aktuelles Thema.

Damit eine Staubexplosion entsteht, müssen folgende Voraussetzungen in räumlicher und zeitlicher Koinzidenz erfüllt sein:

- Brennbarer Staub muss in aufgewirbelter Form und im explosionsfähigen Konzentrationsbereich vorliegen.
- Ein Oxidationsmittel (meist Sauerstoff) muss in hinreichender Konzentration vorhanden sein.
- Eine Zündquelle muss eine Energiemenge oberhalb der Mindestzündenergie des Staubes in ausreichend kurzer Zeit freisetzen.

Um die Entstehung von Staubexplosionen zu verhindern (vorbeugender Explosionsschutz), muss mindestens eine der drei Bedingungen ausgeschlossen werden. Mögliche Ansätze hierfür sind beispielsweise das Vermeiden von zündfähigen Atmosphären durch Inertisierung oder das Verhindern der Bildung von Zündquellen (Funkenbildung, heiße Oberflächen, etc.) durch beispielsweise verbesserte Isolation [2, 6, 22].

Konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen sind weitere Möglichkeiten des Explosionsschutzes. Diese lassen eine Explosion zu, beschränken deren Auswirkungen aber auf ein unbedenkliches Maß. Für Silos oder Filteranlagen in unterschiedlichsten Größen werden als konstruktive Explosionsschutzmaßnahme oftmals Explosionsklappen eingesetzt. Diese sind in die Außenwand eines Behälters integriert und stellen Sollbruchstellen mit der jeweiligen Entlastungsfläche A_E dar. Bei einem Staubexplosionsereignis ermöglichen sie eine Druckentlastung des Behälters indem sie ihre Entlastungsflächen bei Erreichen eines definierten *statischen Ansprechdrucks* p_{stat} freigeben. Durch Entlassen

von unverbranntem Staub/Luft-Gemisch und Verbrennungsprodukten aus dem Behälter steigt der Druck in diesem lediglich auf den Wert des *reduzierten Explosionsrucks* p_{red} an, der unterhalb der Behälterfestigkeit liegen muss [7, 8, 20, 25].

Zur Realisierung des oben genannten statischen Ansprechdrucks p_{stat} verfügen Explosionsklappen in der Regel über Schließmechanismen. Diese zeigen beim explosionsbedingten Klappenöffnungsvorgang eine gewisse Trägheit, so dass der tatsächliche Ansprechdruck oberhalb des statischen Ansprechdrucks liegt. Dieser reale Ansprechdruck heißt *dynamischer Ansprechdruck* p_{dyn} .

Einen besonders kostengünstigen Schließmechanismus stellen die in der Praxis oftmals verwendeten Polyamidschrauben dar (Abbildung 1.1). Diese weisen laut Datenblättern der Hersteller deutlich geringere Festigkeiten auf als beispielsweise metallische Schrauben. Beim Verschließen einer Explosionsklappe mit Polyamidschrauben ergibt sich der statische Ansprechdruck aus

$$p_{\text{stat}} = \frac{\sum_n F_{B,n} h_n}{A_E h} \quad (1.1)$$

In (1.1) ist $F_{B,n}$ die Bruchkraft der n-ten Schraube laut Schraubendatenblatt. h_n bezeichnet den Abstand zwischen dem Zentrum des n-ten Schraubenloches in der Klappe und der Klappenrotationsachse. Schließlich stellt h den Abstand zwischen der Klappenrotationsachse und dem Mittelpunkt der Entlastungsöffnung dar [4]. Durch Versagen der Polyamidschrauben soll sich im Explosionsfall der mit (1.1) berechnete Ansprechdruck einstellen und so das Öffnen der Entlastungsklappen ermöglichen.

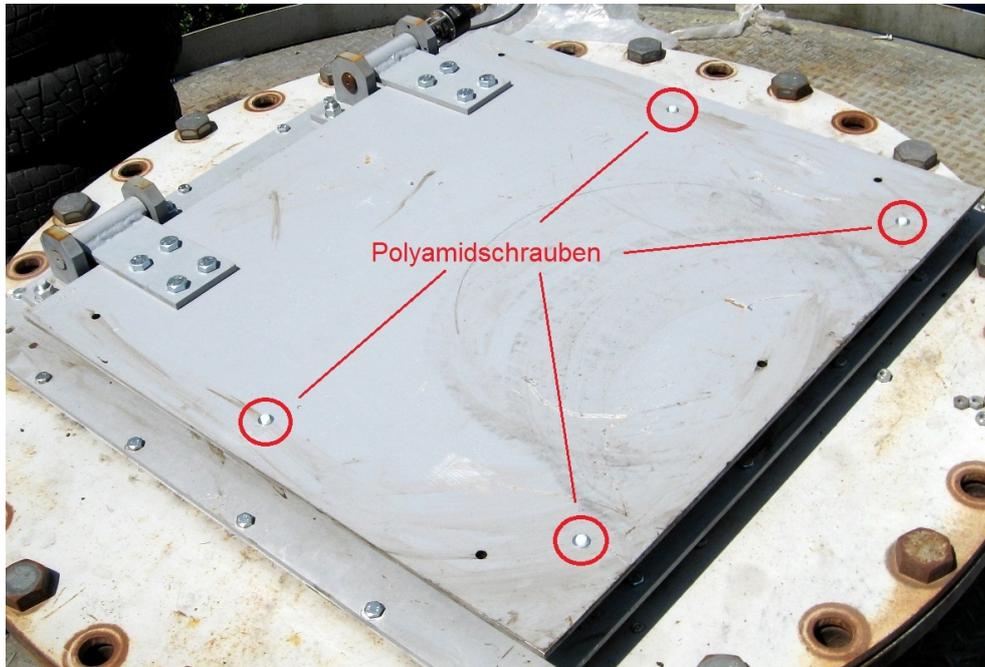


Abbildung 1.1: Eine mit Polyamidschrauben verschlossene Explosionsklappe auf einem Behälter des Testgeländes der BGN/FSA in Kappelrodeck [4].

Ergebnisse aus technischen Funktionsprüfungen von Explosionsklappen mit Polyamidschraubenverschlüssen im Rahmen von *EU-Baumusterprüfungen*¹ zeigen oftmals eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem von den Herstellern errechneten p_{stat} und dem gemessenen p_{dyn} . Folglich stimmen die in den Datenblättern der Polyamidschrauben angegebenen Bruchkräfte nicht immer mit denen überein, die im Explosionsfall an den Explosionsklappenverschlüssen auftreten. Gelegentlich werden die angestrebten p_{stat} bzw. p_{dyn} der Explosionsklappen deutlich überschritten. Weil der bei einer druckentlasteten Staubexplosion erreichte reduzierte Explosionsdruck sehr stark vom dynamischen Ansprechdruck der verwendeten Explosionsklappe abhängt, ist eine zuverlässige Funktionsweise eines solchen Schutzsystems fragwürdig wenn der statische Ansprechdruck mit Hilfe von Polyamidschrauben erzielt werden soll.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, das Bruchverhalten von Polyamidschrauben (PA 6.6) zu charakterisieren wenn diese als Verschluss von Explosionsklappen für den Staubexplosionsschutz fungieren. Im Detail sollen folgende Fragen beantwortet werden:

1. Wie hängt die Bruchlast von der Form des Belastungsanstieges ab?
2. Wie hängt die Bruchlast von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit ab?
3. Wie hängt die Bruchlast von der Materialfeuchte der Polyamidschrauben ab?

1.3 Vorgehensweise

Nach Einarbeitung in die Thematik und ausgiebiger Literaturrecherche wird nach einer Möglichkeit gesucht, mit einer bereits vorhandenen Versuchsanlage Belastungs-Zeit-Verläufe zu erzeugen, wie sie bei Staubexplosionen auftreten. Zu diesem Zweck wird die Software „*SIMEK*“ [14, 15, 16] eingesetzt, mit deren Hilfe zeitliche Druckverläufe bei Staubexplosionen in Behältern bei unterschiedlichen Randbedingungen erzeugt werden können. Zwei sehr unterschiedliche Druckverläufe werden ausgewählt und in Belastungs-Zeit-Verläufe umgerechnet. Durch bauliche Veränderungen an der Versuchsanlage und Variation der Versuchsparameter werden die mit „*SIMEK*“ abgeleiteten Belastungs-Zeit-Verläufe nachgebildet. Für die so erzeugten nichtlinearen Belastungs-Zeit-Verläufe werden die mittlere sowie die maximale Belastungsanstiegsgeschwindigkeit bestimmt. Durch Anpassung der Versuchsanlage werden anschließend lineare Belastungs-Zeit-Verläufe mit der Steigung der zuvor bestimmten mittleren und maximalen Belastungsanstiegsgeschwindigkeit erzeugt. Versuchsreihen, bei denen Polyamidschrauben mit den generierten Belastungen linearer und nichtlinearer Art beaufschlagt werden sollen zeigen, ob die Bruchlast von der Form des Kraftanstieges abhängt. Ist dies nicht der Fall, können nichtlineare Belastungs-Zeit-Verläufe bei weiterführenden Versuchen durch linearer Belastungs-Zeit-Verläufe ersetzt werden.

¹Diese wurden bei der FSA GmbH in Auftrag gegeben.

Mit Hilfe des Ergebnisses der oben beschriebenen Untersuchung wird analysiert, ob mit der vorhandenen Versuchsapparatur der Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf die Schraubenbruchlast vollständig und umfassend untersucht werden kann. Ist eine solche Untersuchung möglich, wird ein entsprechendes Versuchsprogramm aufgestellt und dieses abgearbeitet. Ist eine solche Untersuchung nicht möglich, wird eine neue Versuchsapparatur konzipiert und aufgebaut, um damit die notwendigen Versuche zur Beantwortung der in Sektion 1.2 formulierten Frage 2. zu beantworten.

Zur Untersuchung des Einflusses der Schraubenmaterialfeuchte auf die Bruchlast werden die Schrauben mit Hilfe eines Klimaschranks auf die drei Feuchtezustände trocken, unbehandelt und gesättigt konditioniert. Einschlägige Versuchsreihen werden mit diesen Schrauben durchgeführt, wobei entweder die bereits vorhandene oder die neu aufzubauende Apparatur zum Einsatz kommen.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Dimensionierung von Explosionsklappen

Um Behälter und Silos mit Hilfe von Explosionsklappen vor den schädlichen Auswirkungen von Staubexplosionen zu schützen, wird üblicherweise die Formel (2.1) aus der EN 14491 [8] verwendet.

$$A_E = \left(\left(3,264 \cdot 10^{-5} p_{\max} K_{\text{St}} p_{\text{red,max}}^{-0,569} + 0,27 (p_{\text{stat}} - 0,1) p_{\text{red,max}}^{-0,5} \right) V^{0,753} \right) \cdot \left(1 + (0,758 - 4,305 \log(p_{\text{red,max}})) \log(L/D) \right) \frac{E_f}{100} \quad (2.1)$$

Die Formel liefert die notwendige Entlastungsfläche A_E damit der im Falle einer Staubexplosion auftretende reduzierte Explosionsdruck die Behälterfestigkeit nicht übersteigt und zum Bersten des Behälters führt. Dabei wird die Behälterfestigkeit in der Regel mit dem *reduzierten maximalen Explosionsdruck* $p_{\text{red,max}}$ identifiziert.

In (2.1) sind der K_{St} -Wert und der *maximale Explosionsdruck* p_{\max} zwei explosionstechnische Kenngrößen, die in speziell dafür ausgerüsteten Labors bestimmt werden. Der K_{St} -Wert ist ein Maß für die Heftigkeit, mit der ein bestimmter Staub bei optimaler Konzentration explodiert. Er ist über das sogenannte kubische Gesetz

$$K_{\text{St}} = \sqrt[3]{V} \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{red,max}} \quad (2.2)$$

definiert. $(dp/dt)_{\text{red,max}}$ ist dabei die *reduzierte maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit* im geschlossenen Behälter bei optimaler Staubkonzentration. Der maximale Explosionsdruck p_{\max} gibt den maximalen Druck an, der bei einer Staubexplosion im geschlossenen Behälter mit optimaler Staubkonzentration entsteht.

L stellt den maximal möglichen Abstand zwischen Zündort und Mitte der Entlastungsfläche innerhalb des Behälters dar. D steht für den Durchmesser des Behälters¹, während V das Behältervolumen angibt.

¹ Im Falle von eckigen Behältern wird für D ein äquivalenter Durchmesser angesetzt, dessen Berechnung in [8] beschrieben ist.

Die *Entlastungsfähigkeit*² E_f berücksichtigt die Massenträgheit der Explosionsklappe: je größer das Trägheitsmoment der Klappe ist, desto langsamer gibt sie die Entlastungsfläche frei, weshalb diese entsprechend größer ausgelegt werden muss.

Auch der statische Ansprechdruck p_{stat} fließt über (2.1) in die Berechnung notwendiger Entlastungsflächen ein. Denn je höher der Druck ist bei dem eine Explosionsklappe öffnet, desto höher ist der resultierende reduzierte Explosionsdruck und umgekehrt. Diese Abhängigkeit ist von starker Natur, wie man Abbildung 2.1 entnimmt. Das ausgewählte Beispiel demonstriert, dass sich bei einem Anstieg des statischen Ansprechdrucks um 0,2 bar der reduzierte maximale Explosionsdruck mehr als verdreifacht. Die experimentelle Erfahrung zeigt, dass Schwankungen im dynamischen Ansprechdruck um 0,2 bar bereits durch kleine Ungenauigkeiten im Klappenverschlusssystem auftreten können. Aus diesem Grund muss der Funktionstüchtigkeit und -präzision der Explosionsklappenverschlusstechnik besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

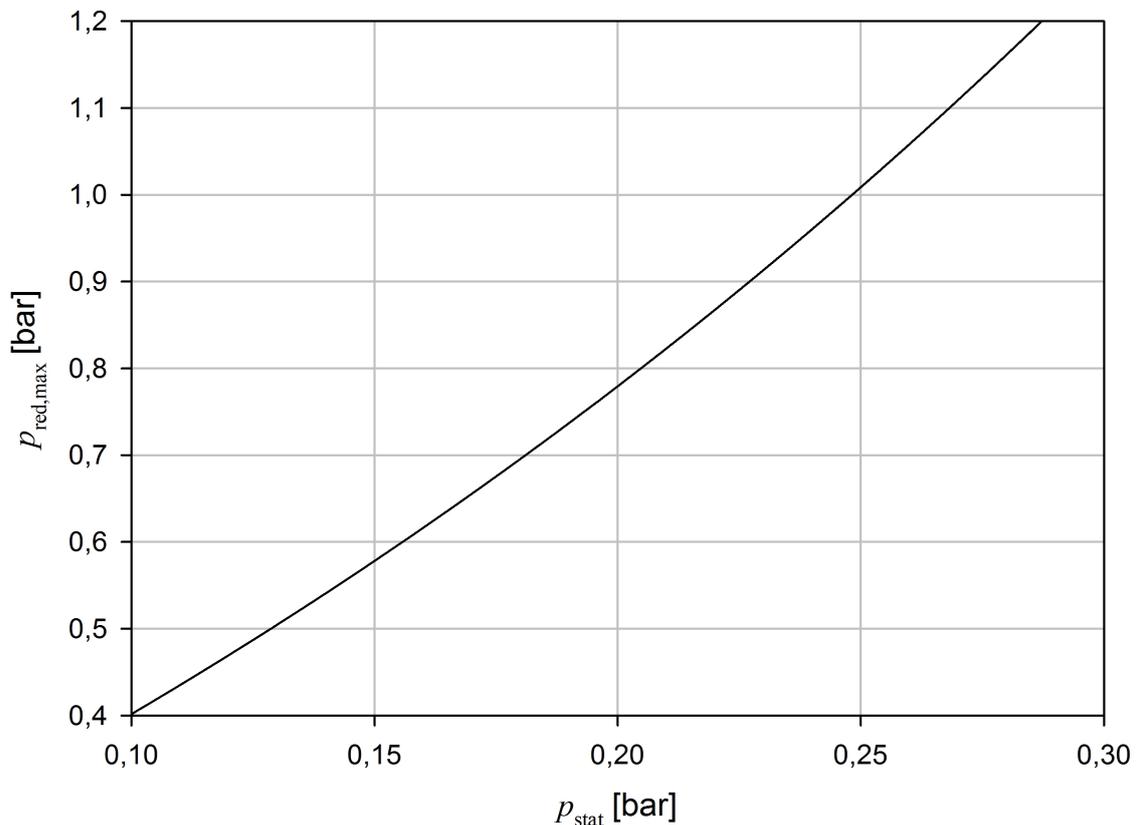


Abbildung 2.1: Abhängigkeit des reduzierten maximalen Explosionsdrucks vom statischen Ansprechdruck bei folgenden Randbedingungen: $V = 10 \text{ m}^3$, $p_{\text{max}} = 9 \text{ bar}$, $L/D = 1$, $A_E = 0,62 \text{ m}^2$, $K_{\text{St}} = 200 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ und $E_f = 65 \%$.

² Explosionsklappen sind Schutzsysteme in Sinne der Richtlinie 2014/34/EU [9] und müssen deshalb einer EU-Baumusterprüfungen unterzogen werden, in dessen Rahmen die Entlastungsfähigkeit experimentell bestimmt wird.

2.2 Eigenschaften von Thermoplasten

Kunststoffe bzw. Polymere entstehen durch chemische Aneinanderreihung von Monomeren. Durch eine große Anzahl verschiedener Monomere und deren Anordnungsform existiert eine Vielzahl verschiedener Polymere. Diese lassen sich grundsätzlich anhand ihrer Bindungsform in drei Gruppen unterteilen.

1. **Thermoplaste** sind bis zur Zersetzungstemperatur aufgrund von Verschlaufung und sekundären Bindungen der Makromoleküle (Abbildung 2.2) nicht vernetzte Kunststoffe. Werden teilkristalline Thermoplaste (Abschnitt 2.2.2) bis oberhalb der Schmelztemperatur erwärmt (Abbildung 2.4), tritt Fließen bzw. Schmelzen ein. Im Schmelzzustand kann die viskose Flüssigkeit durch beispielsweise Spritzgießen verarbeitet werden. Durch Abkühlen erreicht das Material Gestaltfestigkeit. Das Aufschmelzen und Erstarren bzw. Kristallisieren des Materials ist beliebig oft wiederholbar. Thermoplaste lassen sich nach Bild 2.3 einteilen. Polyamid (PA) ist demnach ein teilkristalliner, mehrphasiger Thermoplast [5, 21].
2. **Elastomere**: Weitmaschige Strukturen aus schwach vernetzten Makromolekülen bedingen den großen elastischen Verformungsbereich [5, 21].
3. **Duroplaste** weisen eine stark vernetzte, engmaschige Struktur auf. Durch sekundäre und primäre Bindungen der Makromoleküle sind Duroplaste nach dem Vernetzen nicht schmelzbar [5, 21].

2.2.1 Amorpher Zustand bei Thermoplasten

Im amorphen Zustand sind die Makromoleküle ohne regelmäßige Anordnung und Orientierung ohne gleichen Abstand völlig statisch angeordnet. Jegliche Art von über den nächsten Nachbarn hinausgehende Ordnung oder Orientierung fehlt. In der gültigen Modellvorstellung, dem statischen Knäuel (Abbildungen 2.2 und 2.3), liegt entropisch betrachtet der räumlich günstigste Zustand vor. Das Makromolekül nimmt stets diesen Zustand an sofern es die äußerlichen Bedingungen wie Beweglichkeit zulassen. Mit steigender Temperatur nimmt die Beweglichkeit von *Haupt-* und *Seitenketten* zu. Deren Rotation und Umlagerung findet vermehrt statt [5, 21].

2.2.2 Teilkristalliner Zustand bei Thermoplasten

Neben dem Zustand größter Unordnung (statisches Knäuel) sind insbesondere bei teilkristallinen Thermoplasten auch geordnete Zustände innerhalb eines Makromoleküls möglich. Lineare Makromoleküle ohne, oder mit nicht zu großen, regelmäßig angeordneten Seitenketten können sich in mikroskopischen Bereichen gleichmäßig ausrichten und Kristalle bilden. Kunststoffe mit kristallinen Bereichen enthalten immer auch ungeordnete Bereiche. Sie werden deshalb teilkristallin genannt [5, 21].

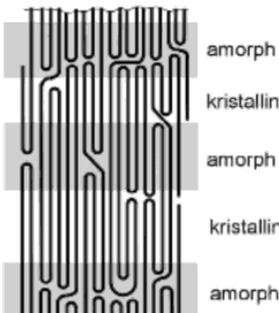
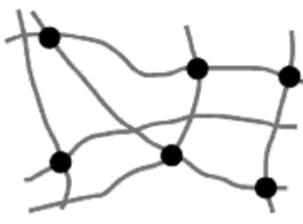
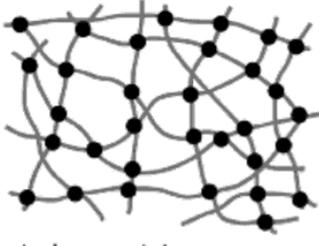
Thermoplaste; Plastomer	Elastomere; Gummi		Duroplaste; Duromer; Thermodur
<p>amorph</p>  <p>teilkristallin</p>  <p>amorph kristallin amorph kristallin amorph</p>	 <p>schwach vernetzt</p>		 <p>stark vernetzt (engmaschiges Netzwerk)</p>
Zusammenhalt			
Verschlaufung bei hoher Molmasse, sekundäre Bindungen zwischen unvernetzten Molekülketten	Verschlaufung, sekundäre Bindungen und primäre Bindungen (chemische Bindungen) = Vernetzung		
	(Vulkanisation) weitemaschig	(Härtung) engmaschig	
Eigenschaften (qualitativ)			
<p>Abgleiten der Ketten bei Belastung und insbesondere bei hohen Temperaturen</p> <p>beliebig oft erweich- und schmelzbar</p> <p>löslich</p> <p>quellbar</p> <p>geringe - mittlere Zugfestigkeit</p> <p>geringe - mittlere Steife</p> <p>geringe - mittlere Reißdehnung</p> <p style="text-align: center;">mehr oder weniger temperaturstabil</p> <p>Kriechen</p>	<p>Abgleiten der Ketten durch Vernetzung behindert</p> <p style="text-align: center;">Nach dem Vernetzen nicht mehr schmelzbar</p> <p style="text-align: center;">nicht löslich</p> <p>quellbar</p> <p>geringe Zugfestigkeit</p> <p>geringe Steife</p> <p>mittlere - große Reißdehnung verbunden mit großer Rückfederung "Gummielastizität"</p> <p>Kriechen</p>		<p>nicht löslich</p> <p>nicht quellbar</p> <p>hohe Zugfestigkeit</p> <p>hohe Steife</p> <p>hohe Reißdehnung</p> <p>Wärmebeständigkeit</p> <p>kaum Kriechen</p>

Abbildung 2.2: Struktur der Makromoleküle und deren Bindungen verschiedener Kunststoffgruppen [5].

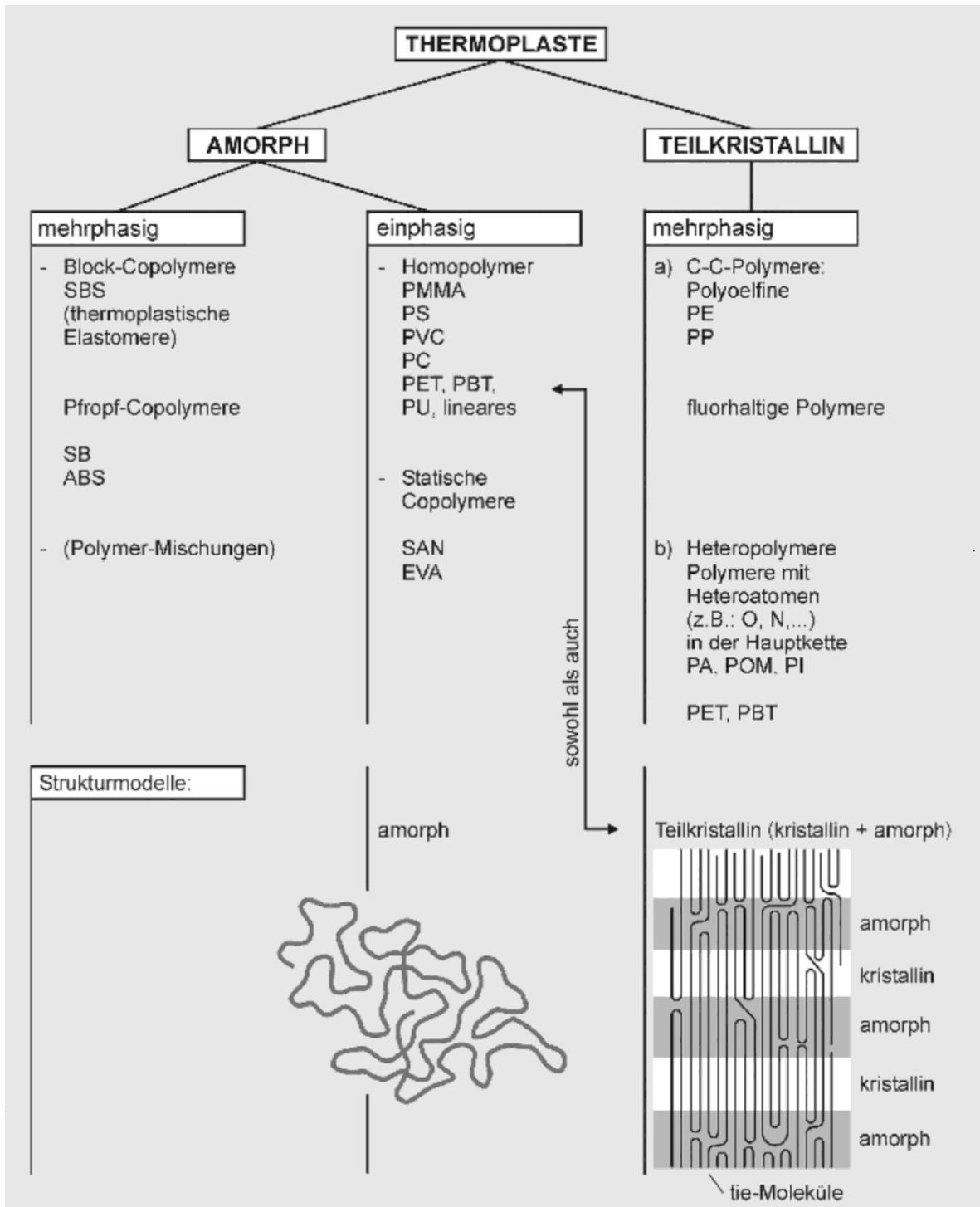


Abbildung 2.3: Unterteilung der Thermoplaste nach Strukturmerkmalen [5].

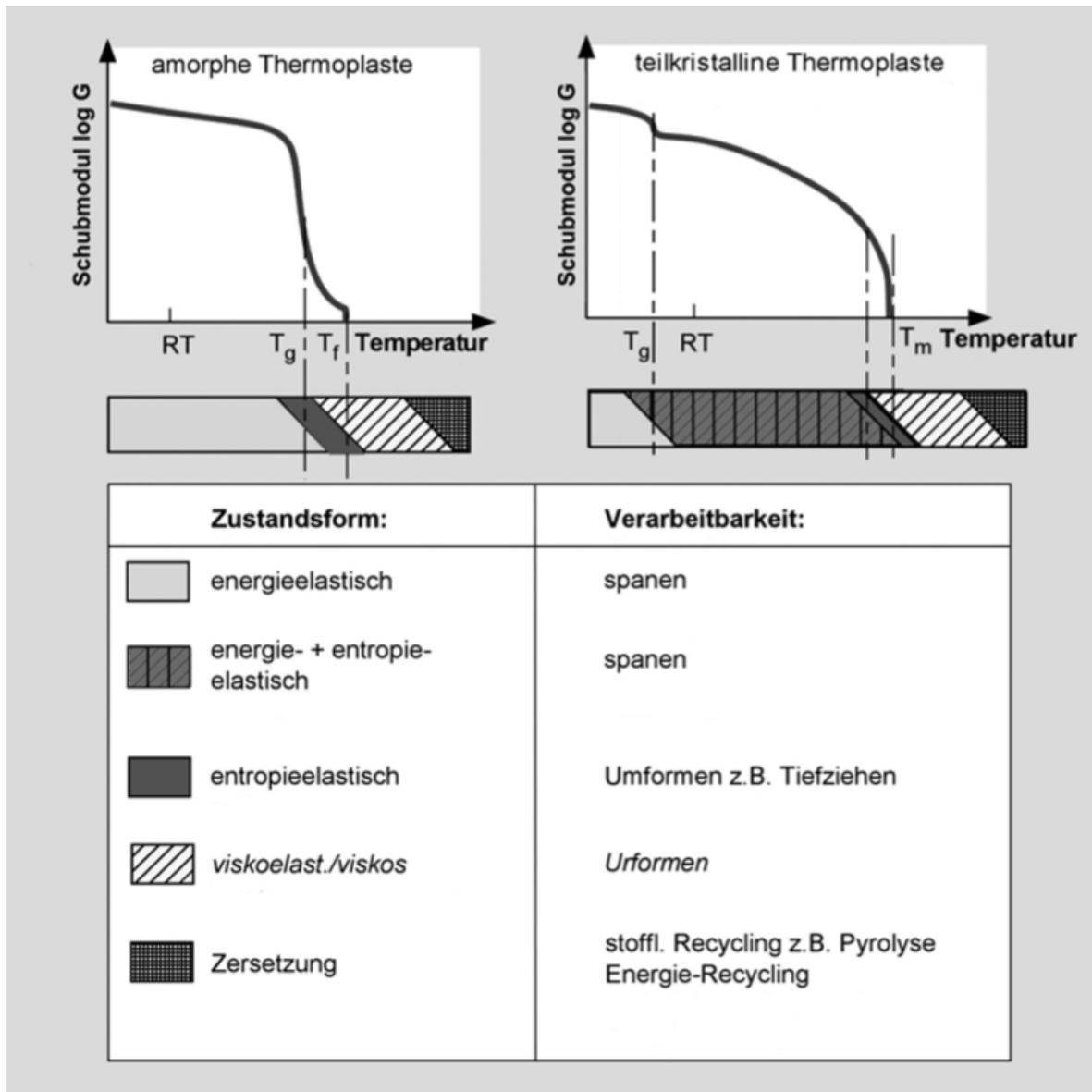


Abbildung 2.4: Zustandsform und Verarbeitbarkeit von Thermoplasten in Abhängigkeit von der Temperatur [5].

2.3 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten

Die Bestimmung von mechanischen Eigenschaften bei Kunststoffen wird, wie auch bei metallischen Werkstoffen, unter anderem mit der Zugprüfung durchgeführt. In Abbildung 2.5 ist schematisch eine Anordnung für die Zugprüfung nach DIN EN ISO 527 „Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften“ dargestellt. Über die geregelte Traverse der Maschine (oberer Bildrand) wird mittels Einspannbacken Belastung auf einen Probekörper ausgeübt. Die sich einstellende Kraft wird mittels entsprechender Mess-

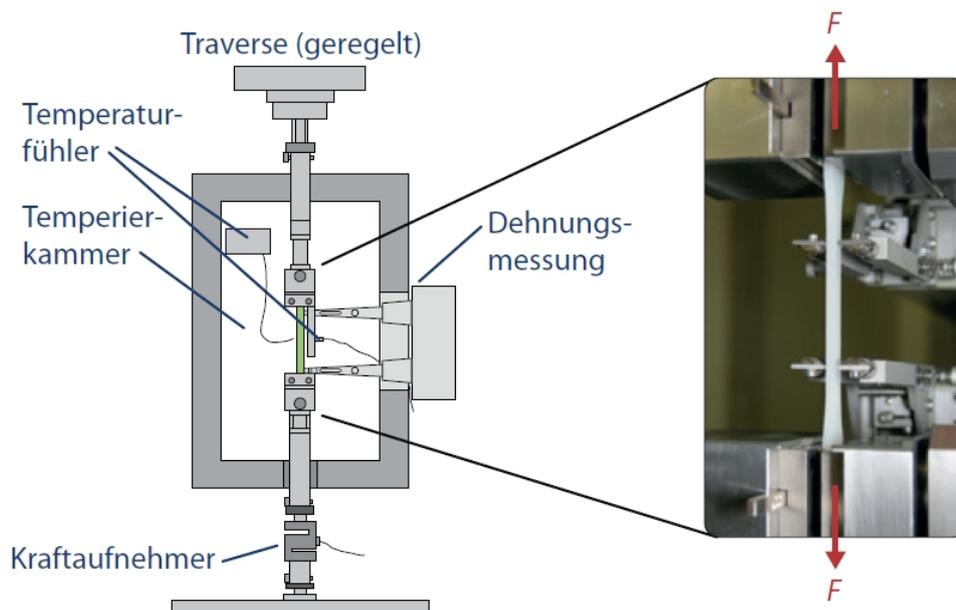


Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau einer Zugprüfung und Darstellung eines eingespannten Kunststoffprüfkörpers [3].

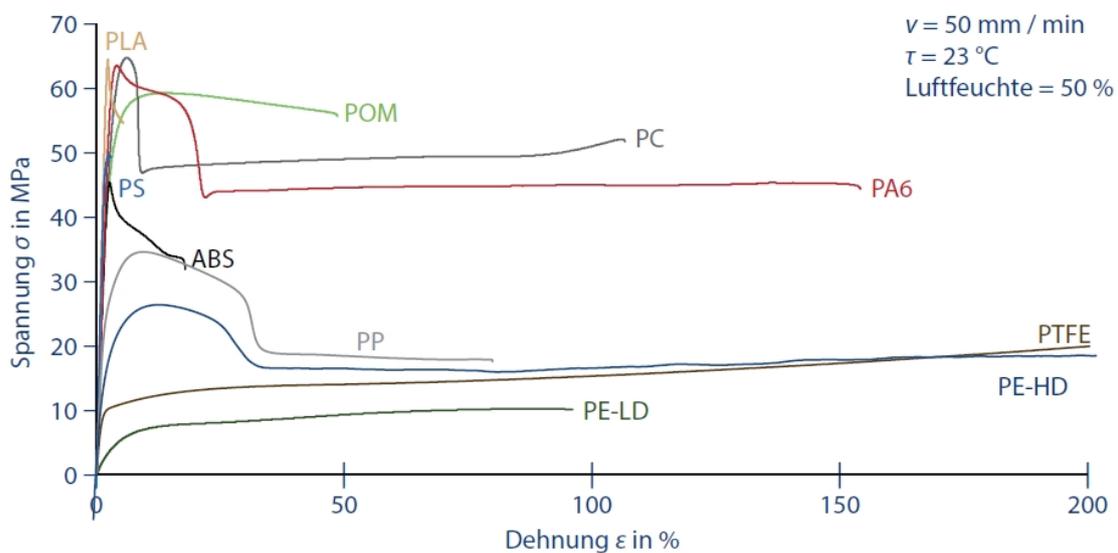


Abbildung 2.6: Typische Spannungs-Dehnungs-Kurven von verschiedenen Thermoplasten [3].

Messvorrichtung erfasst (unterer Bildbereich). Der Probekörper kann üblicherweise von einer geregelten Temperierkammer umschlossen werden, um auch Temperatureinflüsse beschreiben zu können. Die sich einstellende Dehnung wird oftmals mit sogenannten Extensometern während des Versuchsablaufs gemessen. Die Dehnung ε beschreibt dabei die Längenänderung ΔL_0 des Probekörpers bezogen auf die Anfangslänge L_0 . Dabei gilt folgender Zusammenhang:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (2.3)$$

Die Spannung σ ergibt sich aus der an dem Probekörper anliegenden Kraft F und der Querschnittsfläche A des Probekörpers.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Die wahre Spannung σ_w wird mit Hilfe der wahren Querschnittsfläche A_w bestimmt. Bei einer Verformung des Materials verkleinert sich bedingt durch ein Einschnüren des Probekörpers dessen Querschnittsfläche, wodurch sich auch die wahre Spannung entsprechend ändert. Üblicherweise wird die Spannung auf die ursprüngliche Anfangsquerschnittsfläche des Probekörpers bezogen.

Trägt man die Spannung über der Dehnung auf, ergibt sich die für Zugversuche typische Spannungs-Dehnungs-Kurve. Wie in Abbildung 2.6 zu erkennen, unterscheiden sich die Kurven für verschiedene Werkstoffe deutlich. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve gibt Informationen über das Deformationsverhalten des geprüften Werkstoffs. Im Bereich kleiner Dehnungen verhalten sich Thermoplaste linear-elastisch. Das bedeutet, dass sie sich bei geringer Dehnung nach einer Entlastung wieder auf die Ursprungslänge zurückstellen. Dieses linear-elastische Verhalten wird durch den E -Modul beschrieben. Der E -Modul beschreibt die Steigung der Geraden der Spannungs-Dehnungs-Kurve bei kleinen Dehnungen (vergleiche das lineare Anfangsverhalten der Kurven in Abbildung 2.6) und wird durch die Änderung der Spannung nach der Dehnung ausgedrückt [3]:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (2.5)$$

Wird das Material weiter gedehnt, überlagert sich ein Fließen. Hier verhält sich der Werkstoff linear-viskoelastisch. Im weiteren Dehnungsverlauf kommen irreversible plastische Verformungen hinzu. Der Werkstoff verhält sich insgesamt nichtlinear-viskoelastisch, denn er stellt sich nach Entlastung immer noch teilweise zurück. Erst nach überschreiten der Streckgrenze R_S dominieren das viskose Verhalten und die plastische Deformation, auch erkennbar an der Einschnürung des Probekörpers, mit einhergehender Querschnittsveränderung [3].

Dehnt man über die plastische Deformation hinaus, tritt der Bruch des Probekörpers ein. Die zu diesem Zeitpunkt durch den Probekörper erreichte Dehnung wird Bruchdehnung ε_B genannt. Die entsprechende Spannung im Material wird Bruchspannung σ_B genannt.

2.4 Einflussfaktoren auf die Werkstoffeigenschaften von Thermoplasten

2.4.1 Belastungsanstiegsgeschwindigkeit

In Bild 2.7 sind Spannungs-Dehnungs-Kurven eines Thermoplasten (Polyamid 6.6) bei Raumtemperatur unter Belastung mit verschiedenen Belastungsanstiegsgeschwindig-

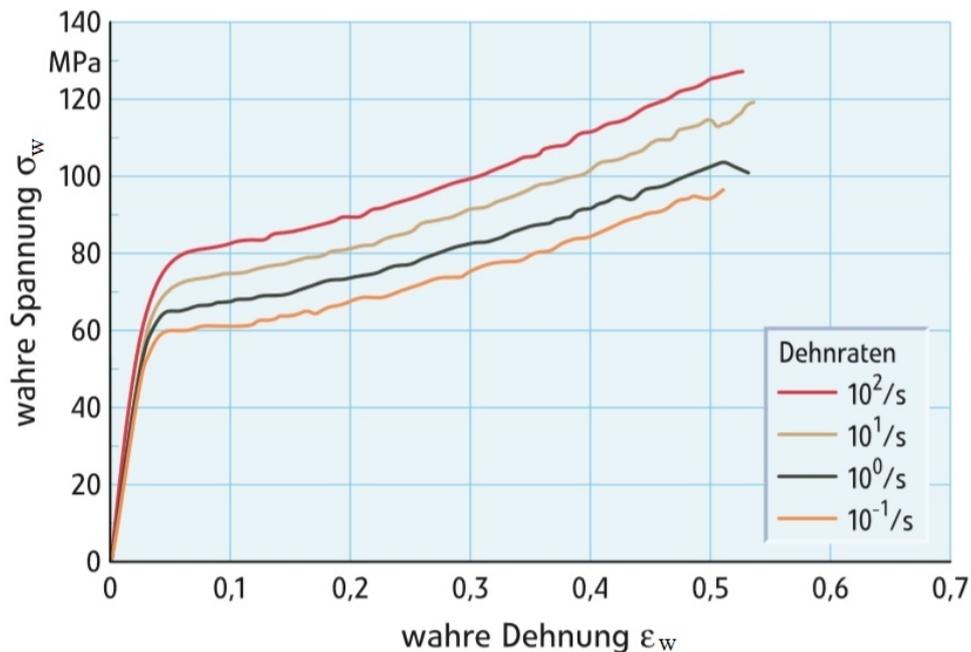


Abbildung 2.7: Spannungs-Dehnungs-Kurven von PA 6.6 bei unterschiedlichen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten unter Normbedingungen [10].

keiten dargestellt. Geringere Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten führen zu größeren Bruchdehnungen bei geringerer Festigkeit. Hohe Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten dagegen zu geringerer Bruchdehnung bei höherer Festigkeit. Molekular ist dieses Verhalten so zu erklären, dass Polymerketten, die auch bei Raumtemperatur ständig unter Brown'schen Schwingungen stehen, bei geringer Belastungsanstiegsgeschwindigkeit mehr Zeit haben, der aufgezwungenen Dehnung durch Drehungen und Entschlaufungen der Haupt- und Seitenketten nachzugeben. Hierdurch stellt sich ein geringerer Widerstand gegen Verformung (Steifigkeit) innerhalb der Probekörper ein. Dieser dehnt sich stärker bei weniger Spannungsaufbau [1].

2.4.2 Materialtemperatur

Ähnlich wie der Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf das Werkstoffverhalten kann die starke Temperaturabhängigkeit erklärt werden. In Bild 2.8 sind die Ergebnisse von Zugversuchen mit gleicher Belastungsanstiegsgeschwindigkeit aber unterschiedlichen Prüftemperaturen von Polyethylen dargestellt. Man erkennt, dass eine höhere Prüftemperatur zu einer Erhöhung der Bruchdehnung bei gleichzeitiger Reduktion von Bruchspannung und E -Modul führt. Die Brown'schen Molekularbewegungen der Polymerketten nehmen mit steigender Temperatur zu und erleichtern das Drehen und Entschlaufen von Haupt- und Seitenketten, so dass einer aufgezwungenen Verformung bei höherer Temperatur weniger Widerstand entgegengesetzt wird. Somit resultiert auch eine geringere Kraft die der Verformung entgegenwirkt [1].

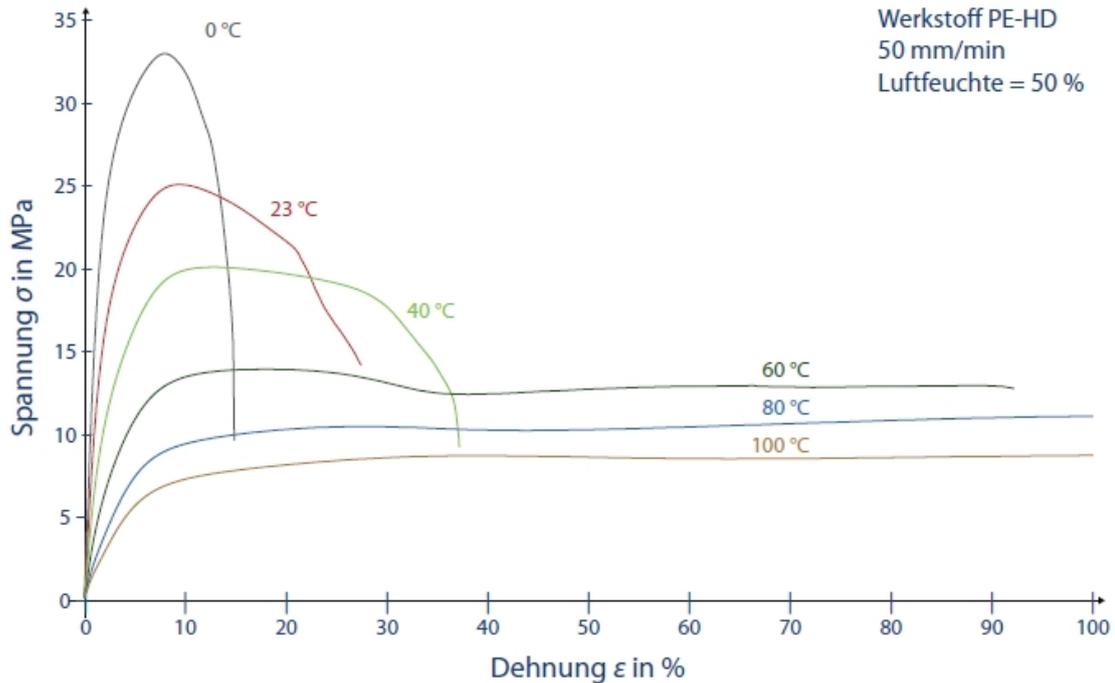


Abbildung 2.8: Spannungs-Dehnungs-Kurven von PE-HD bei unterschiedlichen Prüftemperaturen [1].

2.4.3 Materialfeuchte

Neben Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und Temperatur hat auch die Materialfeuchte einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten. Dabei können verschiedene Thermoplasten einen unterschiedlichen Massenanteil an Wasser einlagern. Die verschiedenen Polyamid-Typen können beispielsweise bis maximal 8,5 % Wasser aufnehmen (Anhang C.1). Je öfter die Amidgruppe im Kettenverband von Polyamid auftritt, desto größer sind die zwischenmolekularen Bindungskräfte und desto mehr Wasser kann vom PA aufgenommen werden. Mit steigendem Wassergehalt vergrößert sich das Energieabsorptions- und -dissipationsvermögen. Schlag- und Schockbeanspruchungen, die zu Spannungsspitzen und letztendlich zu makroskopischen Rissen führen, können von feuchtem PA deutlich stärker kompensiert werden als von trockenem PA. Infolgedessen sinkt mit zunehmender Feuchte der E -Modul und die Bruchspannung. Die Bruchdehnung steigt dagegen mit zunehmender Feuchte [1].

2.4.4 Zusammenfassung und Relevanz für Explosionsklappen

Bei der Übersicht der Einflussfaktoren auf die Werkstoffeigenschaften von Thermoplasten in Tabelle 2.1 ist eine Gewichtung der verschiedenen Einflussfaktoren aufgrund fehlender verifizierbarer Daten nicht möglich.

Mit Polyamidschrauben verschlossene Explosionsklappen kommen weltweit auf unterschiedlichsten Behältern und Silos, in denen die verschiedensten brennbaren Schüttgüter gelagert werden, als Schutzsysteme zum Einsatz. Im Entlastungsfall können deshalb Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten in einem breiten Variationsbereich auftreten. We-

Einflussfaktor	σ_B	ε_B
Zunahme Belastungsanstiegsgeschwindigkeit	↑	↓
Zunahme Materialtemperatur	↓	↑
Zunahme Materialfeuchte	↓	↑

Tabelle 2.1: Tabellarische Übersicht über den Einfluss verschiedener physikalischer Größen auf die Materialeigenschaften σ_B und ε_B von Thermoplasten.

gen unterschiedlicher Klimate und jahreszeitlicher Schwankungen an den Silo- und Behälterstandorten können die Verschlusschrauben aus Polyamid sehr unterschiedliche Materialtemperaturen und -feuchten aufweisen. Aus genannten Gründen müssen alle in Tabelle 2.1 aufgelisteten Einflussfaktoren im Hinblick auf Ihre Auswirkungen auf den dynamischen Ansprechdruck von Explosionsklappen dieses Typus untersucht werden. Wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit und wegen des experimentellen Aufwandes musste für die vorliegende Arbeit auf die Untersuchung des Einflussfaktors Materialtemperatur verzichtet werden.

Kapitel 3

Experimenteller Teil

3.1 Versuchsaufbau, Versuchsablauf und Datenauswertung

Zur Durchführung der geplanten Versuche wurde eine Versuchsanordnung genutzt, welche zu Beginn der Bachelorarbeit bereits vorhanden war. Die Kraft, welche zum Bruch der zu untersuchenden Schraube führt, wird dabei durch eine variable Masse erzeugt, die aus einstellbarer Höhe auf eine Spiralfeder fällt. Die bei der Stauchung der Feder entstehende Kraft wird in die Schraube eingeleitet und der Kraftverlauf über der Zeit mit Hilfe einer Kraftmessdose messtechnisch erfasst.

Um die Versuchsanordnung für die geplanten Untersuchungen einsetzen zu können, musste sie entsprechend angepasst werden. Es entstanden zwei Varianten, die im folgenden beschrieben sind.

3.1.1 Versuchsaufbau und Funktionsprinzip

3.1.1.1 Variante 1

Mit Hilfe eines Kettenzuges (4) wird eine Masse (2) angehoben und mittels eines elektromagnetisch abschaltbaren Permanentmagneten (3) in einer einstellbaren Höhe gehalten (Abbildung 3.1, links). Die Masse kann in 10 kg-Schritten variiert werden, wobei die maximale Masse $m = 90 \text{ kg}$ beträgt. Anschließend wird die Kette des Kettenzuges vom Gewicht gelöst (4). Mit einer Gleichspannungsquelle hoher Leistung (7) wird die Spule des Magneten bestromt, wodurch sich ein Magnetfeld aufbaut, welches das Feld des Permanentmagneten neutralisiert. Das Gewicht fällt. Beim Auftreffen auf die Prüfvorrichtung (1) wird die zuvor eingespannte Schraube auf Zug belastet. Die Prüfvorrichtung (1) besteht im Wesentlichen aus 4 Teilen (Abbildung 3.1, rechts). Der untere Teil (A) dient der Führung aller Teile. Die beiden Platten (B) und (C) in der Mitte werden zusammen mit einer Kraftmessdose (E) durch die zu untersuchende Schraube (G) und einer Mutter (F) handfest verschraubt. Der Oberteil (D) mit Dämpfer (H) wird auf die Vorrichtung aufgesetzt. Der Dämpfer (H) dient der Erzeugung eines definierten zeitlichen Belastungs-Zeit-Verlaufes.

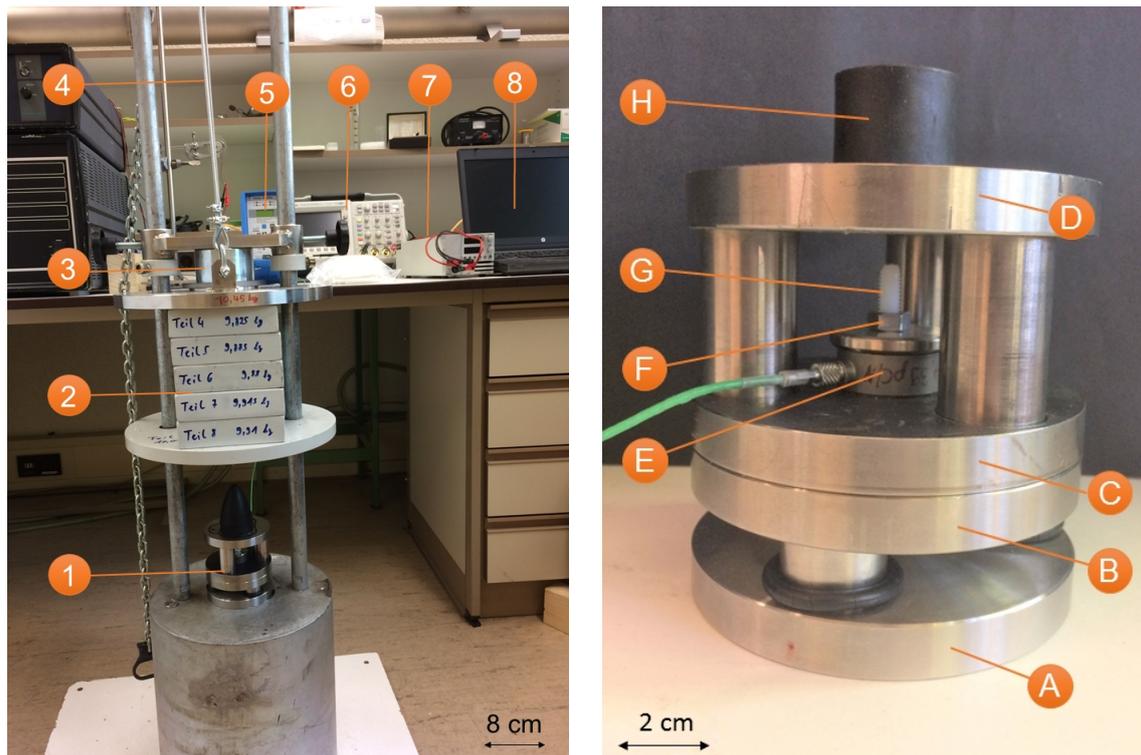


Abbildung 3.1: Links: Versuchsausrüstung Variante 1 mit verwendeter Messtechnik. Rechts: Prüfvorrichtung Variante 1 mit Dämpfer, Kraftmessdose und eingespannter Polyamidschraube.

Sobald die fallende Masse (2) den Dämpfer der Prüfvorrichtung (H) staucht, wird die dabei entstehende zeitabhängige Kraft über Teil (D) auf die Platte (B) übertragen. Die drei Säulen des Teils (D) greifen dabei durch die Platte (C) hindurch weil diese entsprechende Aussparungen aufweist. Weil Platte (C) über die zu untersuchende Schraube (G) mit Platte (B) verbunden ist, wird die Schraube (G) auf Zug belastet. Die Platte (C) behält dabei ihre Position bei weil die drei Säulen des Teils (A) durch Aussparungen in der Platte (B) hindurch greifen und Platte (C) stützen. Die an der Schraube anliegende Kraft wird mit der Kraftmessdose (E) der Firma Kistler gemessen. Diese ist an den zugehörigen Ladungsverstärker (5) angeschlossen. Das vom Ladungsverstärker (5) ausgegebene Zeit-Belastung-Spannungssignal wird mit einem Oszilloskop (6) erfasst. Abschließend werden die Messdaten auf einen Rechner (8) übertragen und dort gespeichert. Durch Variation von Fallhöhe, Masse und Gummidämpfer können diverse Belastungs-Zeit-Verläufe realisiert werden.

3.1.1.2 Variante 2

Da die erreichbare maximale Dehnung von ca. 15% mit Variante 1 zu gering war, um zuverlässig ein Versagen der feuchtigkeitsgesättigten Schrauben zu erreichen, wurde die Versuchsausrüstung so verändert, dass eine ausreichend große Dehnung generiert werden konnte. Die modifizierte Versuchsausrüstung ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Der Einsatz der Hochgeschwindigkeitskamera (11) ermöglicht die Messung des zurückgelegten Wegs

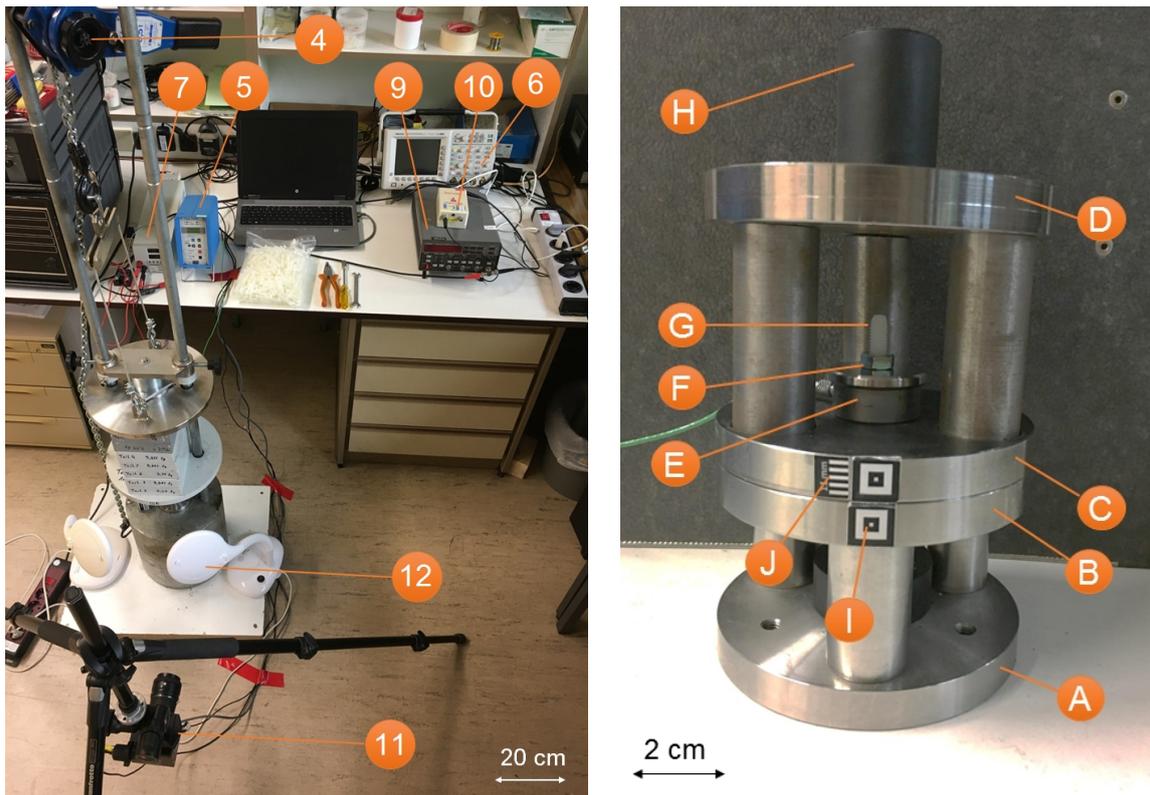


Abbildung 3.2: Links: Versuchsausrüstung Variante 2 mit Hochgeschwindigkeitskamera und verwendeter Messtechnik. Rechts: Prüfvorrichtung Variante 2 mit verlängertem Weg und Dämpfer, Kraftmessdose und eingespannter Polyamidschraube.

der unteren Platte (B), so dass direkt auf die Dehnung des belasteten Teils der Schraube geschlossen werden kann. Die Auswertung erfolgt mittels Bildverarbeitungssoftware und aufgeklebten Markierungen (I). Zur Bemaßung der Dehnung wurde eine Längenskala (J) verwendet. Das verwendete Kameraobjektiv ermöglicht im Kombination mit den eingesetzten Laborleuchten (12) eine maximale Aufnahmezeit von 2.000 Bildern pro Sekunde.

In Abbildung 3.3 ist die Messkette der Versuchsausrüstung Variante 2 schematisiert dargestellt. Das Netzgerät (7) liefert den notwendigen Strom für den abschaltbaren Permanentmagneten (3). Der Magnet (3), welcher die Masse (2) in definierter Höhe hält, ist über ein elektrisches Relais vom Netzgerät (7) getrennt. Mit Hilfe eines Signalgenerators (9) wird eine Messung durch Abgabe eines Rechteckimpulses gestartet. Der Impuls (Triggersignal) schließt das Relais und startet die Datenaufzeichnung am Oszilloskop (6) sowie die Hochgeschwindigkeitskamera (11) über den Sender (10). Durch das Schließen des Relais wird der Magnet (3) bestromt und die Masse (2) fällt auf den Dämpfer (H) der Prüfvorrichtung (1). Sowohl das Triggersignal als auch der von der Kraftmessdose (E) ausgegebene Belastungsverlauf werden im Oszilloskop (6) gespeichert, angezeigt und vom angeschlossenen Rechner (8) ausgelesen. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Schraubenbruchvorganges wird direkt auf den angeschlossenen Rechner (8) übertragen und dort gespeichert. Durch den Einsatz der Triggertechnik liegen alle Messdaten in synchronisierter Form vor.

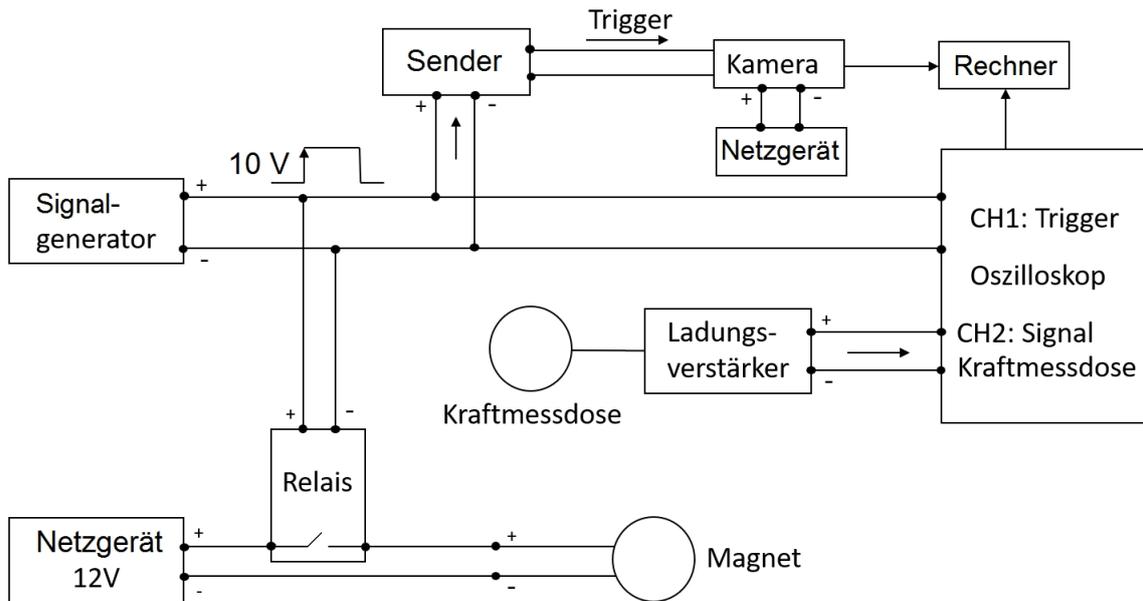


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Messkette der Versuchsapparatur Variante 2.

3.1.2 Versuchsablauf

Zunächst werden die mittleren Platten (B) und (C) der Prüfvorrichtung (1) sowie die Kraftmessdose (E) mit der zu untersuchenden Schraube (G) verbunden. Hierfür werden zwei Stahlmuttern (F) verwendet, um ein Abziehen des Kunststoffgewindes zu vermeiden. Die beiden Platten (B) und (C) werden so zueinander positioniert, dass sich die beiden Markierungen ((I) in Abbildung 3.2) übereinander befinden und dadurch eine spätere Bildverarbeitung möglich ist. Die Prüfvorrichtung (1) wird, zur Kamera (11) ausgerichtet, an dem in der Versuchsapparatur vorgesehenen Ort positioniert und die Beleuchtung (12) eingeschaltet. Die Messgeräte (Hochgeschwindigkeitskamera (11) und Oszilloskop (6)) werden in Bereitschaft versetzt. Anschließend wird der Kettenzug (4), welche die Masse (2) sichert, ausgehängt. Unmittelbar vor Messbeginn wird der Ladungsverstärker (5) aktiviert. Durch Auslösen des Triggersignals am Signalgenerator (9) wird die Messung gestartet. Nach dem Versuch werden alle Messdaten gespeichert und die Masse (2) angehoben und gesichert. Die gebrochene Schraube (G) wird visuell auf Fehlstellen untersucht.

3.1.3 Datenauswertung

Alle durchgeführten Versuche wurden gemäß der hier beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet. Bei den Versuchen mit der Versuchsapparatur Variante 1 entfällt die Auswertung der Daten der Hochgeschwindigkeitskamera. Die Datenauswertung erfolgte automatisiert mit Hilfe von selbst programmierten Excel-Makros.

3.1.3.1 Belastungsverlauf

Bei der Auswertung der gemessenen Belastungs-Zeit-Verläufe wurde die Belastungsdauer t_B mit Hilfe der beim Schraubenbruch auftretenden stark abfallenden Kurvenflanke definiert (Abbildung 3.4). Die Bruchlast F_B ist dann das Belastungsmaximum, welches kurz vor t_B auftritt. Durch die Triggertechnik ist eine gute Vergleichbarkeit einzelner Kurven möglich, ebenso das Mitteln über mehrere Kurven. Letztgenanntes ist Grundvoraussetzung für einen statistisch abgesicherten Vergleich von Messergebnissen aus Versuchsreihen mit verschiedenen Parametern.

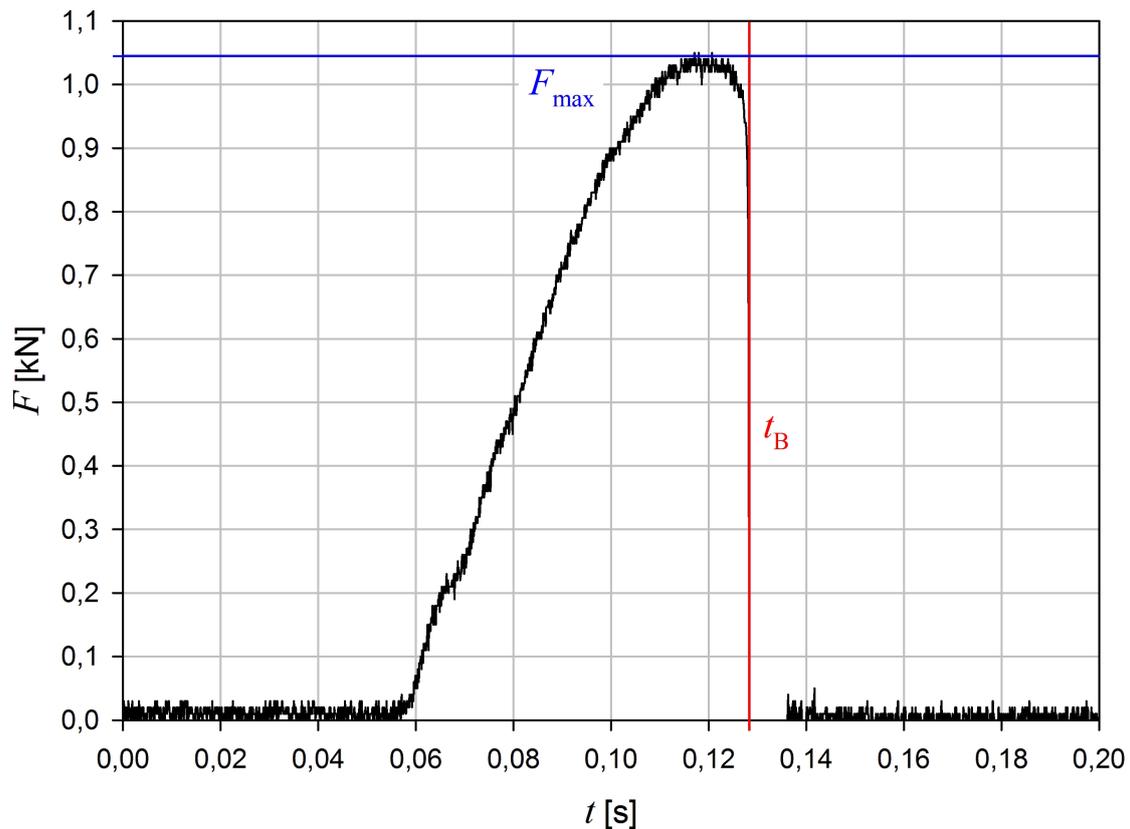


Abbildung 3.4: Exemplarischer zeitlicher Belastungs-Verlauf mit Bruch bei einer Schraube aus PA 6.6 der emico-syscomp GmbH.

3.1.3.2 Videoaufzeichnungen

Zur Auswertung einzelner Bilder aus den Videosequenzen der Hochgeschwindigkeitskamera wurde die Software „Motion Studio“ verwendet (Abbildung 3.5). Mit Hilfe des Motion Trackings können die x - und y -Koordinaten für die gesetzten Markierungen ((I) in Abbildung 3.2) automatisiert erfasst werden. Über Differenzbildung wird der zurückgelegte Weg der unteren Platte (B) und somit die Dehnung der Schraube als Funktion der Zeit ermittelt. Das aufgrund der Triggertechnik für alle Messdaten synchronisierte Zeitsignal erlaubt aus der Kenntnis

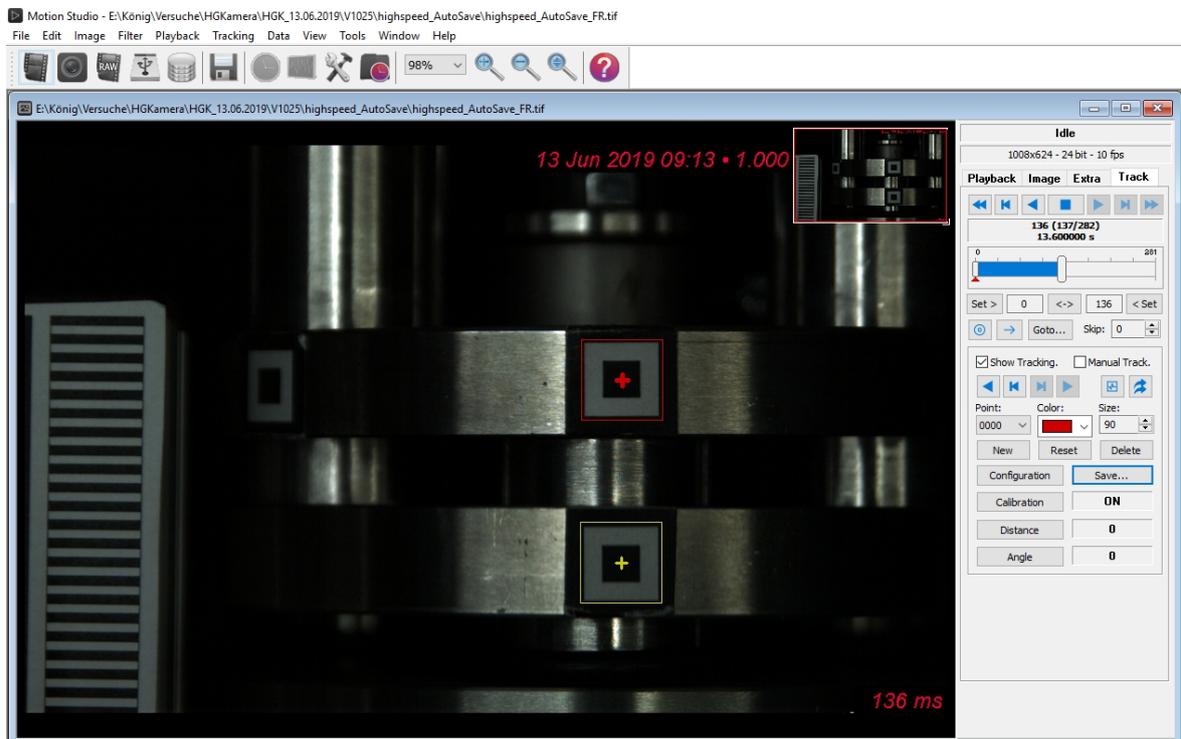
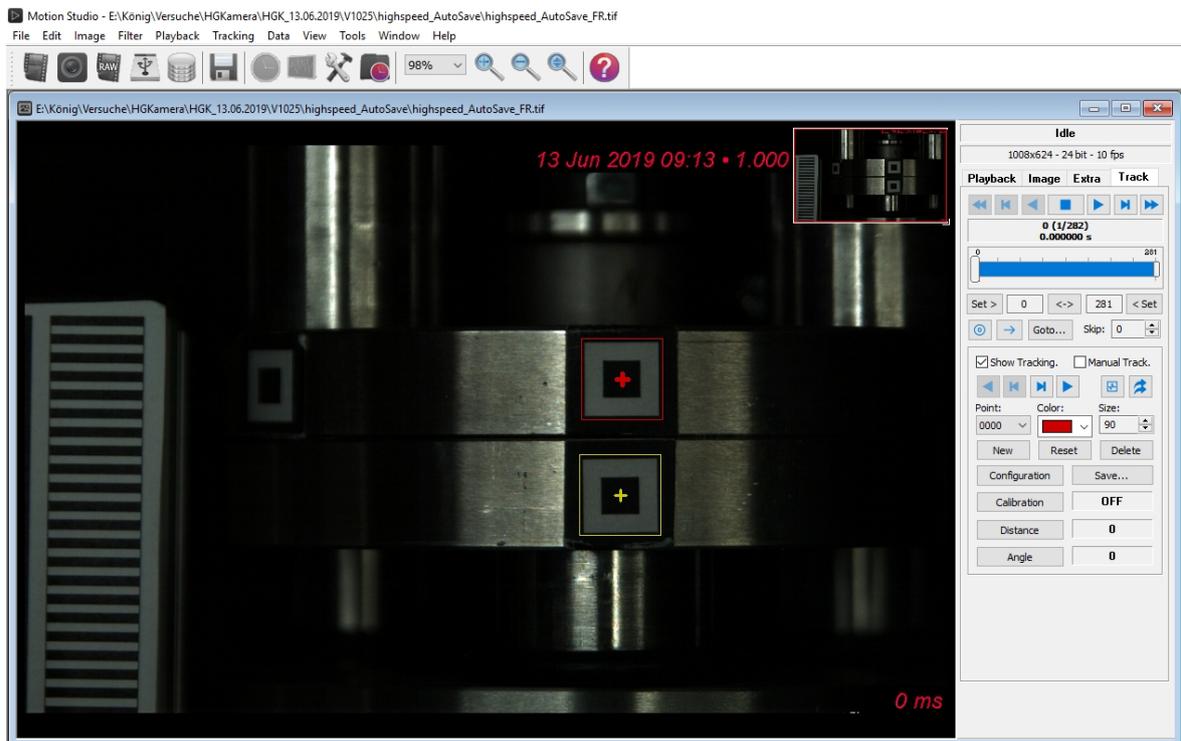


Abbildung 3.5: Screenshots des Bildverarbeitungsprogramm Motion Studio mit Tracking-Punkten. Oben: Zeitpunkt bei Versuchsbeginn. Unten Zeitpunkt während des Bruchvorganges der Schraube.

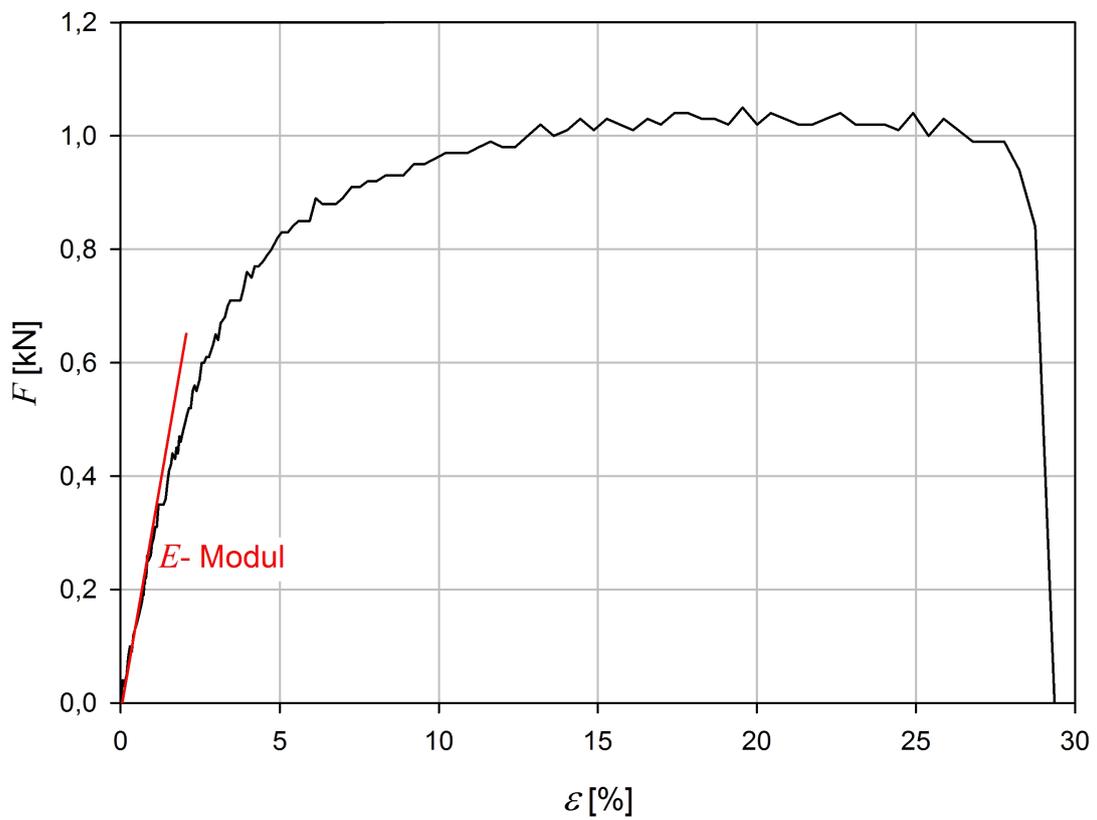
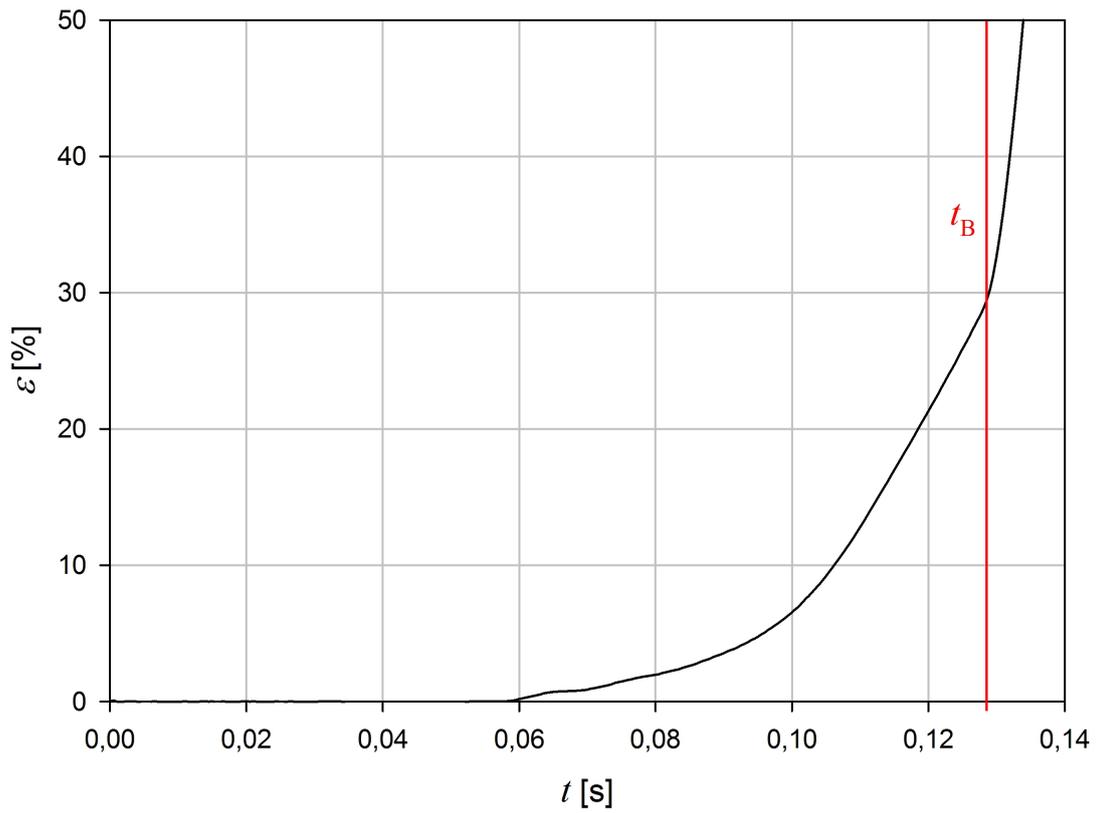


Abbildung 3.6: Exemplarischer zeitlicher Dehnungsverlauf (oben) und Dehnungs-Belastungs-Verlauf (unten) mit Bruch bei einer Schraube aus PA 6.6 der emico-syscomp GmbH.

der Belastungsdauer t_B die Ableitung der Bruchdehnung ε_B (Abbildung 3.6, oben). Durch Auftragung der gemessenen Belastung über der Dehnung kann der E -Modul bestimmt werden (Abbildung 3.6, unten). Hierzu wird mit Hilfe des Differenzenquotienten $\Delta F/\Delta\varepsilon$ die Steigung der Geraden im linear-elastischen Bereich bestimmt.

3.2 Einfluss der Belastungsanstiegsform auf das Bruchverhalten

Die Form des zeitlichen Druckverlaufes in einem druckentlasteten Behälter bis zum Erreichen des statischen Ansprechdrucks hängt im Wesentlichen vom Behältervolumen, vom K_{St} -Wert des exotherm reagierenden Staubes und vom statischen Ansprechdruck der Entlastungseinrichtung ab. Je kleiner das Volumen V und je größer der K_{St} -Wert sind, desto schneller steigt der Druck $p(t)$ im Behälter an und umgekehrt. Auch der maximale Explosionsdruck p_{max} und das L/D -Verhältnis wirken sich auf die Form des zeitlichen Druckverlaufes aus [2], wie man auch aus Formel (2.1) ersieht.

In dieser Sektion wird der in Sektion 1.2 aufgeworfenen Frage nachgegangen, ob die Form der Druck-Zeit-Historie bis zum Erreichen des statischen Ansprechdrucks einen Einfluss auf die Höhe der Bruchlast von Polyamidschrauben hat wenn solche Schrauben als Verschluss von Explosionsklappen dienen.

3.2.1 Bandbreite auftretender Schraubenbelastungen

Mit dem von der FSA entwickelten Simulationsprogramm „SIMEK“ können unter anderem Druck-Zeit-Verläufe simuliert werden, wie sie bei Staubexplosionen in realen Behältern mit Druckentlastung auftreten [14, 15, 16]. Mit diesem Werkzeug können die Höhe und die Verlaufsform der Belastung auf Explosionsklappenverschlusschrauben sowie deren Bandbreite abgeschätzt werden.

Um zu untersuchen, wie Druck-Zeit-Verläufe in Behältern und Belastungs-Zeit-Verläufe an Explosionsklappenverschlusschrauben zusammenhängen, wird eine Explosionsklappe betrachtet, die einseitig an Scharnieren geführt wird (Abbildung 3.7). Auf diese Explosionsklappe mit der Entlastungsfläche A_E wirkt bei einem zeitabhängigen Druck $p(t) = p$ im Behälter die zeitabhängige Kraft $\vec{F}_S(t) = \vec{F}_S$ am Schwerpunkt S der Klappe gemäß Gleichung 3.1.

$$\vec{F}_S = p \cdot A_E \cdot \vec{e} \quad (3.1)$$

mit \vec{e} als Einheitsvektor in vertikaler Richtung. Die Kraft \vec{F}_S erzeugt mit dem Ortsvektor des Schwerpunkts \vec{r}_S ein Drehmoment \vec{D}_S , welches das Öffnen der Explosionsklappe bewirkt. Da \vec{D}_S orthogonal zu \vec{r}_S orientiert ist, gilt:

$$|\vec{D}_S| = |\vec{F}_S \times \vec{r}_S| = F_S \cdot r_S = p \cdot A_E \cdot r_S \quad (3.2)$$

Solange die Klappe verschlossen bleibt herrscht ein Drehmomentgleichgewicht, d. h. D_S wirkt ein gleich großes Drehmoment entgegen, welches durch die Verschlusschrauben und durch die Masse der Klappe erzeugt wird. Wird angenommen, dass die Klappe mit

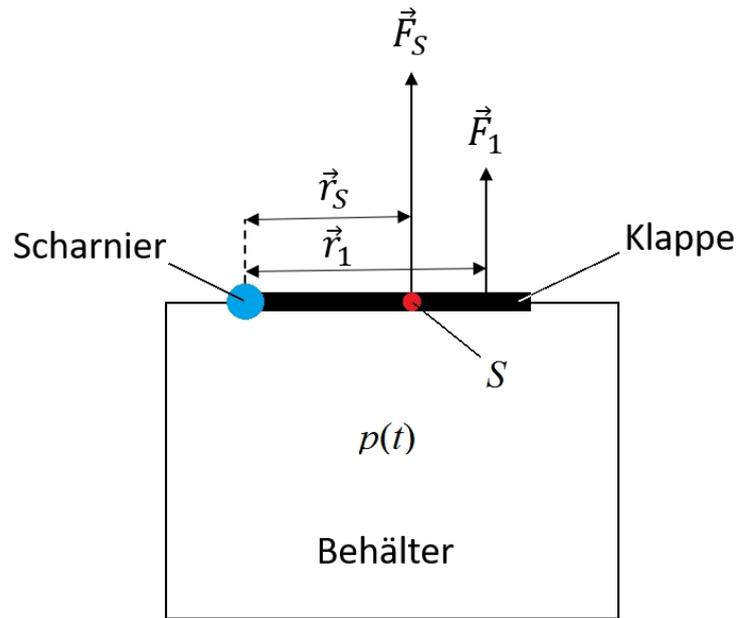


Abbildung 3.7: Skizze einer mit Schrauben verschlossenen Explosionsklappe.

n Schrauben im Abstand r_1 von der Klappenscharnierachse verschlossen ist und wird ferner die Gravitationskraft vernachlässigt, so ergibt sich für das Momentengleichgewicht:

$$D_S = n \cdot r_1 \cdot F_1 \quad (3.3)$$

Somit resultiert für die Belastung F_1 auf eine Schraube bei einer ideal starren Klappe:

$$F_1 = \frac{A_E \cdot r_S}{n \cdot r_1} \cdot p \quad (3.4)$$

Wie man (3.4) entnimmt, ist die Belastung auf eine Verschlusschraube F_1 proportional zum Behälterinnendruck p weil alle anderen Größen in (3.4) Konstanten sind. Folglich entspricht eine im Behälter gemessene Druck-Zeit-Kurve qualitativ dem auf die Verschlusschrauben wirkenden Belastungs-Zeit-Verlauf.

Betrachtet man unter diesem Aspekt zwei mit „SIMEK“ simulierte Druck-Zeit-Verläufe unter verschiedenen Bedingungen (Abbildung 3.8) wird deutlich, dass sich die Formen der Belastungs-Zeit-Verläufe der Schrauben bis zum Erreichen des statischen Ansprechdruckes p_{stat} deutlich unterscheiden. Die beiden Verläufe stellen Beispiele aus der industriellen Praxis nahe der unteren und oberen Gültigkeitsgrenzen der Richtlinie EN 14491 dar und wurden mit den Parametern aus Tabelle 3.1 berechnet.

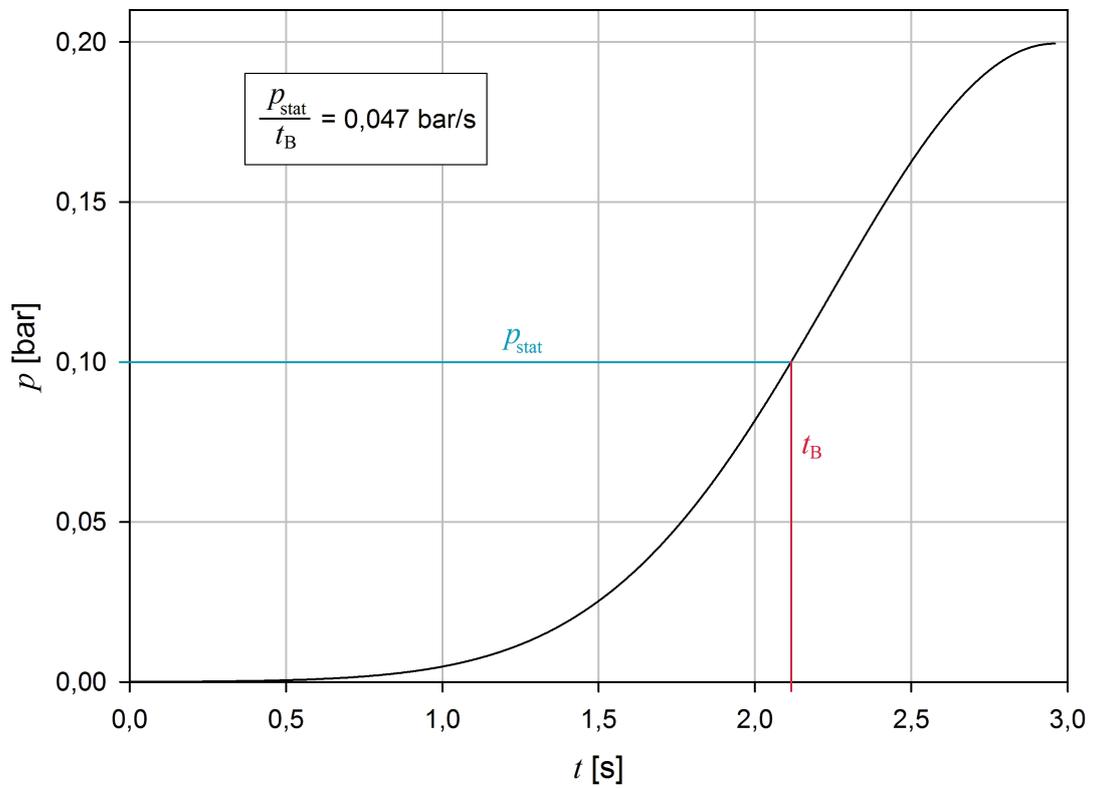
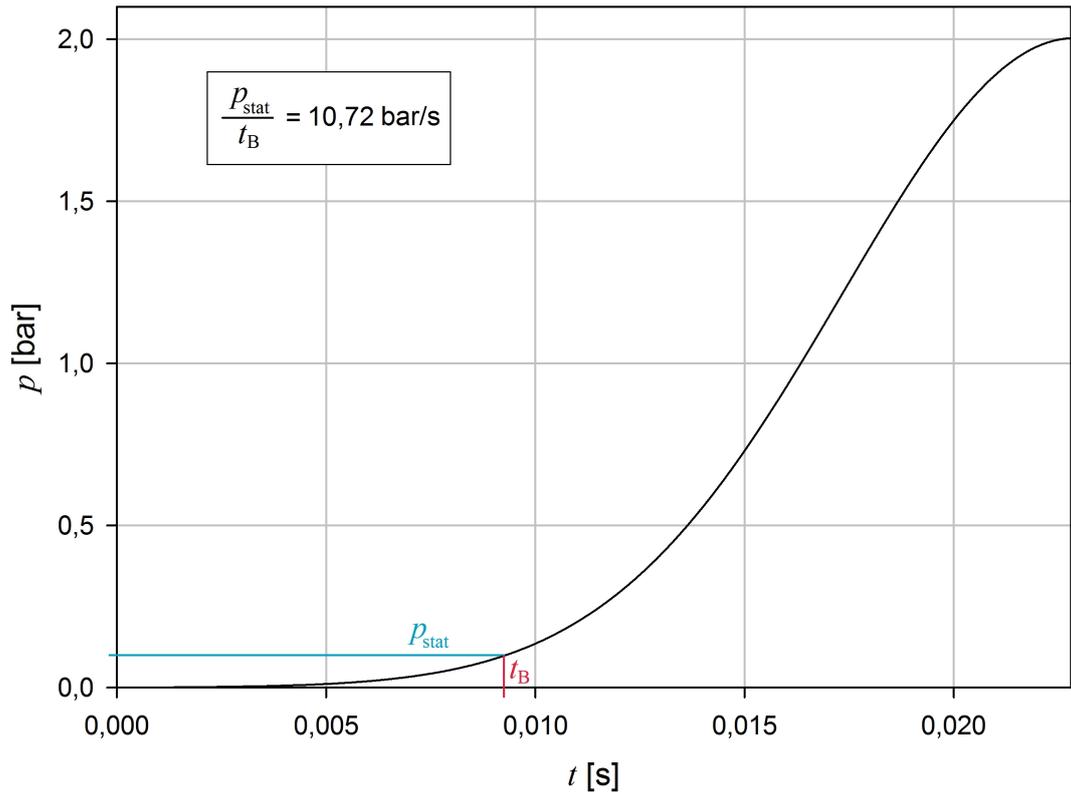


Abbildung 3.8: Vergleich des simulierten Druck-Zeit-Verlaufs zweier Staubexplosionen gemäß den Parametern in Tabelle 3.1.

Abbildung 3.8	V [m ³]	K_{St} [bar·m/s]	L/D [-]	$p_{red,max}$ [bar]	p_{max} [bar]
oben	1	800	3	2,0	12,0
unten	10.000	100	1	0,2	9,0
Abbildung 3.8	A_E [m ²]	b [m]	m_K [kg]	n [-]	E_f [%]
oben	0,9	0,47	1	4	42
unten	74,5	1	1	75	100

Tabelle 3.1: In „SIMEK“ verwendete Parameter zur Berechnung der Zeit-Druck-Kurven in Abbildung 3.8. Als statischer Ansprechdruck wurde $p_{stat} = 0,1$ bar angenommen.

Wie man Abbildung 3.8 entnimmt, ergibt sich ein umfangreiches und komplexes Feld an verschiedenen nicht-linearen Belastungs-Zeit-Verläufen, die auf Explosionsklappen-verschlusschrauben aus Polyamid wirken können. Weil nicht bekannt ist, ob die Form des zeitlichen Belastungsverlaufes einen Einfluss auf die Bruchlast von Schrauben aus Polyamid 6.6 hat, wird in dieser Sektion dieser Frage nachgegangen. Im Hinblick auf die weiteren Ziele dieser Arbeit und die daran geknüpften Versuchsreihen steht dabei auch die Frage im Fokus, ob die nicht-linearen Belastungs-Zeit-Verläufe durch lineare Belastungs-Zeit-Verläufe vereinfacht werden können.

3.2.2 Realisierung eines nichtlinearen Belastungs-Zeit-Verlaufs

Die Bewertung des Einflusses der Form des Belastungs-Zeit-Verlaufs auf die Schraubenbruchlast setzt eine möglichst gute Reproduzierbarkeit der zeitlichen Schraubenbelastung voraus. Hierfür wurde der Einsatz parabolischer Gummidämpfer als am besten geeignet identifiziert. Ein solcher parabolischer Gummidämpfer zeigt nach Herstellerangaben das in Abbildung 3.9 dargestellte Dämpfungsverhalten. Aus dem Diagramm in Abbildung 3.9, rechts wurden die Werte für die Gummihärte von 68 *Shore A* abgelesen, in Excel übertragen und mit Hilfe von Regressionsrechnungen verschiedene Funktionen an die Punkte angepasst (Abbildung 3.10). Die beste Übereinstimmung zwischen Messpunkten und Regressionsfunktion lieferte

$$F(x) = 51,85 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot x^2 \text{ mm}^2 \quad (3.5)$$

Hierbei ist x die Stauchung des Dämpfers in mm und F die dabei aufgebrachte Kraft in N. Die Analogie von (3.5) zum Hook'schen Gesetz

$$F_x = -k_F \cdot x \quad (3.6)$$

welches nicht die Druck-, sondern die Rückstellkraft einer Feder mit Hilfe ihrer Federkonstante k_F beschreibt, legt einen ähnlichen Ansatz zur Beschreibung der Rückstellkraft des parabolischen Gummidämpfers nahe:

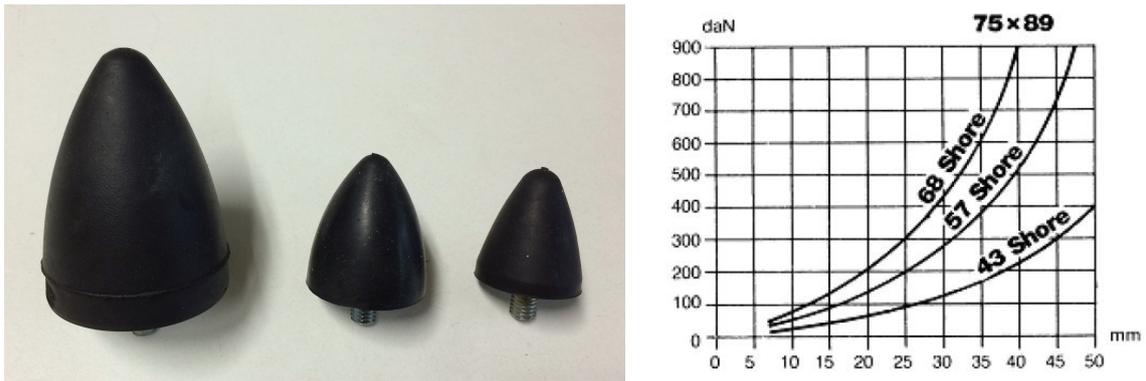


Abbildung 3.9: Parabolische Gummidämpfer (links) und Dämpfungsverhalten parabolischer Gummidämpfern der Firma Verpas B. V. (rechts) [29].

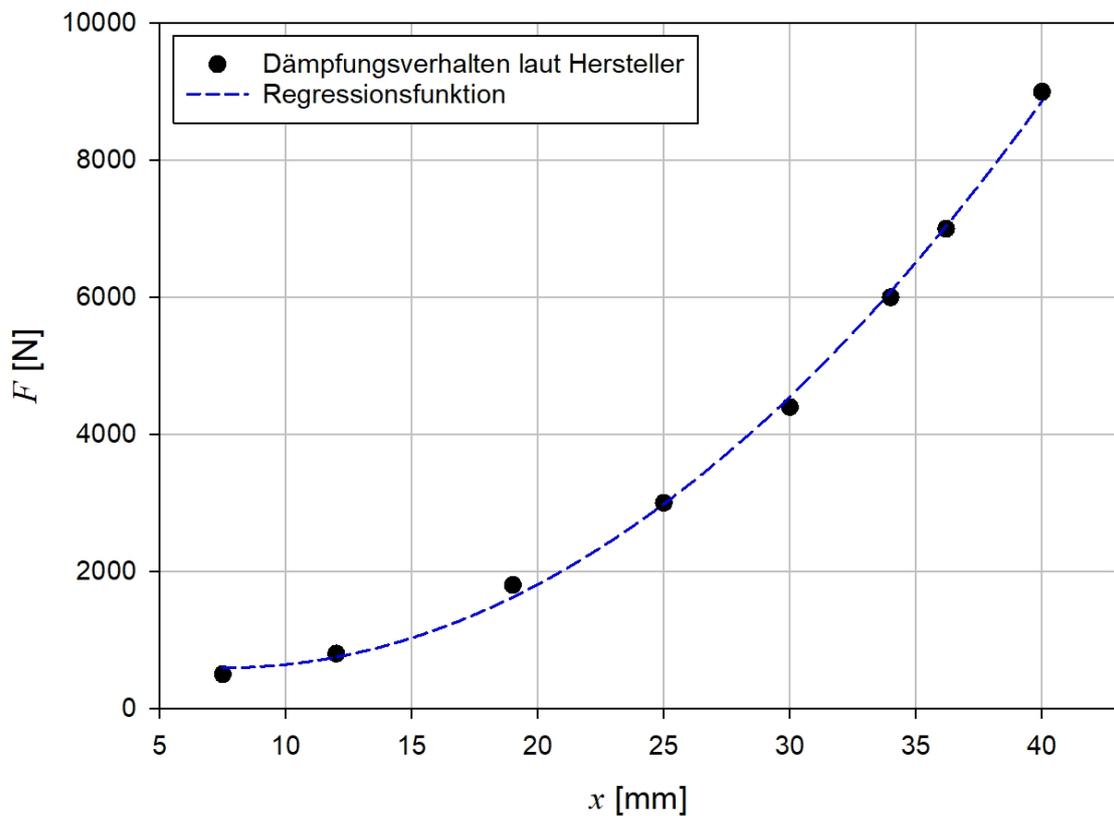


Abbildung 3.10: Vom Hersteller angegebenes Dämpfungsverhalten des parabolischen Gummidämpfers mit einer Gummihärte von 68 Shore A mit Regressionskurve.

$$F_x = -k_F \cdot x^2 \quad (3.7)$$

Daraus folgt für die Bewegungsgleichung der Masse der Versuchsapparatur Variante 1 wenn der Dämpfer gestaucht ist, die x -Koordinate senkrecht nach oben zeigt und der Nullpunkt an der Oberkante des Dämpfers definiert wird:

$$m \cdot \ddot{x} = -m \cdot g + k_F \cdot x^2 = -m \cdot g + 51,85 \cdot 10^6 \cdot x^2 \quad (3.8)$$

Berührt zu Beginn eines Versuches die Unterkante der fallenden Masse die Spitze des Dämpfers (Sektion 3.1) gelten für Gleichung (3.8) die Anfangsbedingungen $\dot{x}(0) = 0$ und $x(0) = 0$. Wegen ihres nichtlinearen Charakters ist (3.8) nicht analytisch lösbar und wurde deshalb numerisch mit Hilfe eines VBA-Programmes gelöst. Über Eingabefelder kann die Masse sowie deren Fallhöhe variiert werden. Mit diesem Tool können im Vorfeld durch den Versuchsaufbau erzeugte Belastungs-Zeit-Verläufe für bestimmte Dämpfer abgeschätzt werden. Wählt man für die Fallhöhe $h = 1$ mm ergeben sich vielversprechende Belastungs-Zeit-Verläufe, wie man Abbildung 3.11 entnimmt.

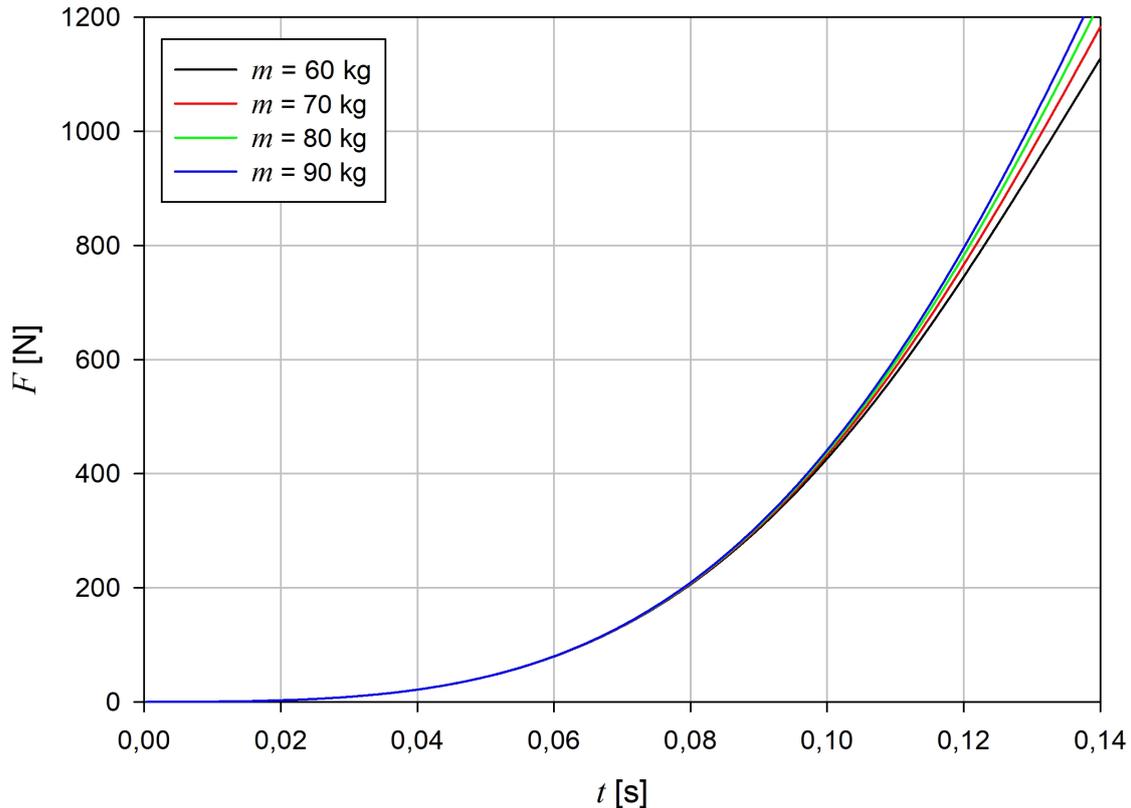


Abbildung 3.11: Simulierte Belastungs-Zeit-Verläufe für vier verschiedene Massen bei einer Fallhöhe von 1 mm und einen parabolischen Gummidämpfer mit einer Gummihärtigkeit von 68 Shore A.

Um zu prüfen, wie gut sich die mit „SIMEK“ generierten Druckverläufe mit dem Versuchsaufbau Variante 1 wiedergeben lassen, wurde ein Versuch mit einer M6-Polyamidschraube (PA 6.6) unter Verwendung des zur betrachteten parabolischen Gummidämpfers durchgeführt. Weitere Parameter waren $m = 70$ kg und $h = 1$ mm. Der dabei gemessene Belastungs-Zeit-Verlauf wurde zum Zwecke des Vergleichs zusammen mit einem mit „SIMEK“ ($V = 30$ m³, $K_{St} = 300$ bar·m/s) simulierten Druck-Zeit-Verlauf in Abbildung 3.12 aufgetragen. Die beiden Kurven sind sich qualitativ ähnlich, wie Abbildung 3.12 veranschaulicht. Die bei einer Staubexplosion auftretende Belastung auf Explosionsklappenverschlusschrauben können folglich mit der Versuchsausrüstung Variante 1 durch Einsatz eines parabolischen Gummidämpfers mit ausreichender Genauigkeit simuliert werden.

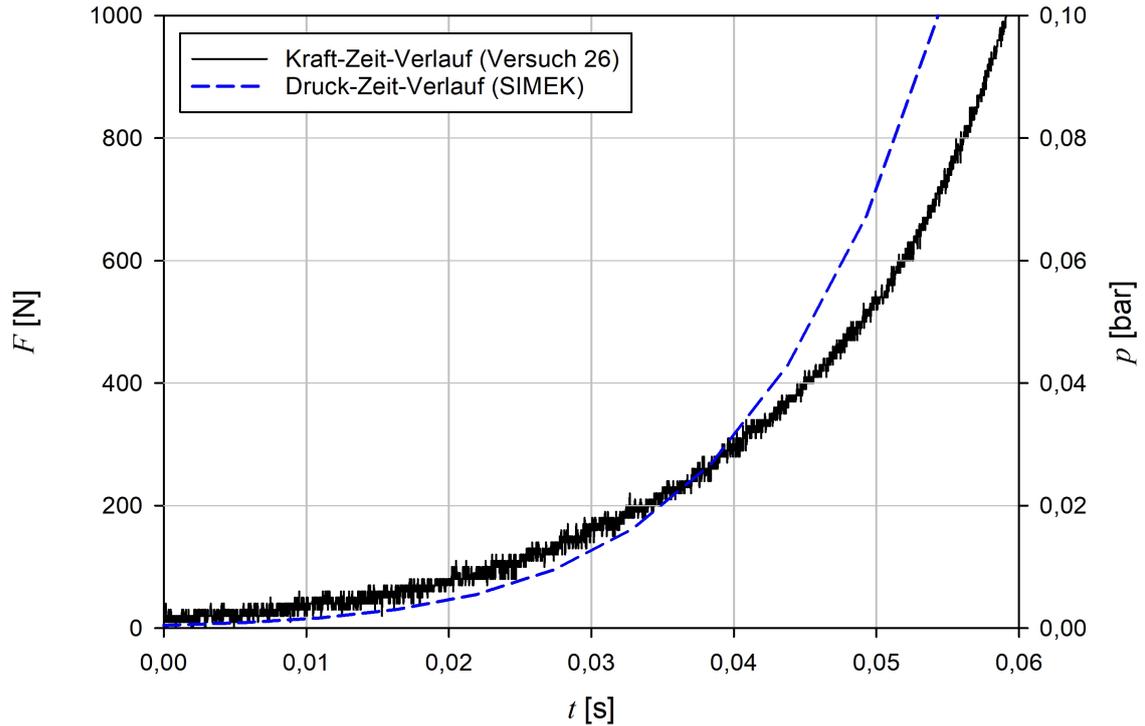


Abbildung 3.12: Vergleich zwischen einem gemessenen Schraubenbelastungsverlauf (parabolischer Dämpfer Typ 010 mit 68 Shore A, $m = 70 \text{ kg}$, $h = 1 \text{ mm}$) und einer mit „SIMEK“ erzeugten Druckkurve ($V = 30 \text{ m}^3$, $K_{\text{St}} = 300 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$).

3.2.3 Realisierung eines linearen Belastungs-Zeit-Verlaufs

Zur Realisierung eines linearen Belastungs-Zeit-Verlaufs wurde das Verhalten der Versuchsanlage Variante 1 untersucht wenn anstelle des parabolischen ein zylindrischer Gummidämpfer (Abbildung 3.13) eingesetzt wird. Laut Hersteller besitzen zylindrische Gummidämpfer, analog zu Metallfedern, eine Federkonstante k_F . Somit muss gemäß (3.6) die Rückstellkraft proportional zur Stauchung ansteigen. Bei Anwendung eines solchen Gummidämpfers in der Versuchsanlage Variante 1 ergibt sich bei Vernachlässigung der Reibung und gleicher Koordinatendefinition wie bei (3.8) die Bewegungsgleichung des ungedämpften harmonischen Oszillators

$$m \cdot \ddot{x} = -m \cdot g - k_F \cdot x \quad (3.9)$$

Zum Beispiel aus [17] entnimmt man als Lösung dieser Differentialgleichung:

$$x(t) = -\frac{m \cdot g}{k_F} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot k_F}{m \cdot g}} \cdot \sin\left(\frac{k_F \cdot t}{m}\right) - \cos\left(\frac{k_F \cdot t}{m}\right) \right) \quad (3.10)$$

Mit Formel 3.10 und 3.6 kann der zeitliche Belastungsverlauf abgeschätzt werden, wofür das im vorigen Abschnitt 3.2.2 genannte VBA-Programm verwendet wurde. Belastet man demnach einen zylindrischen Gummidämpfer unter ansonsten identischen Bedingungen wie beim parabolischen Gummidämpfer, erhält man den in Abbildung 3.14 dargestellten



Abbildung 3.13: Zylindrische Gummidämpfer.

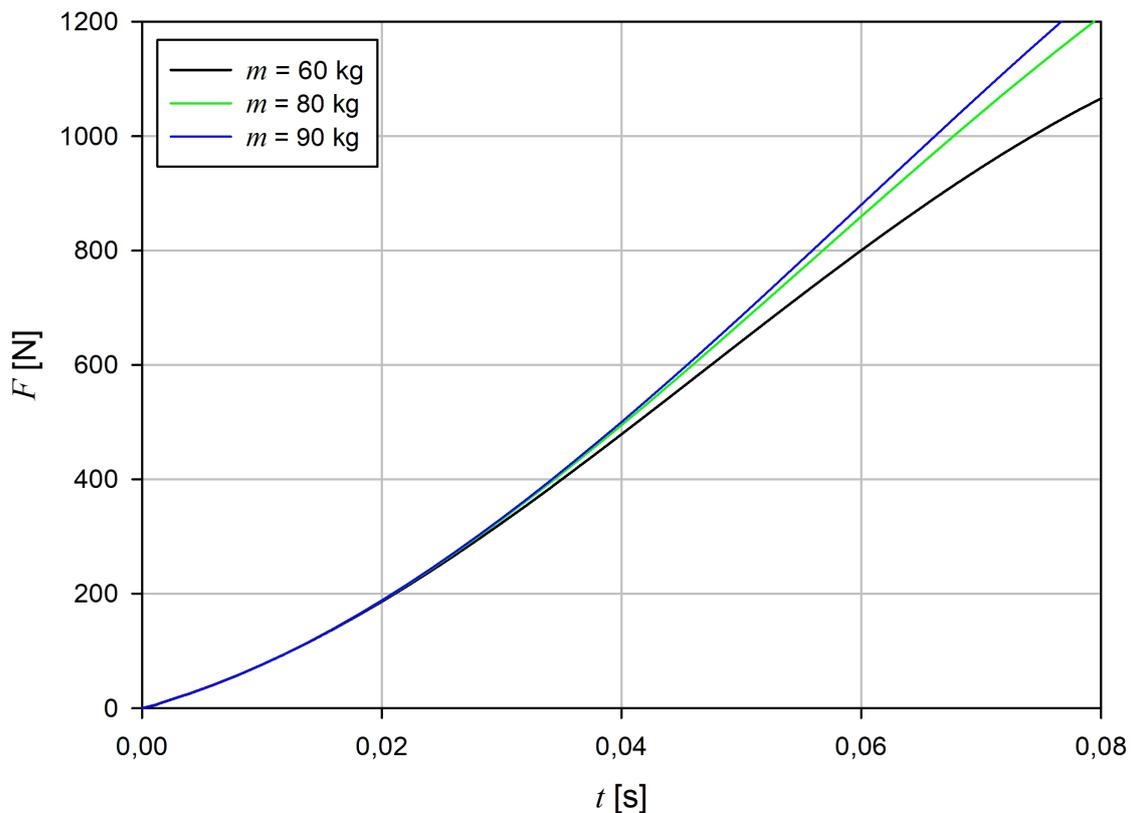


Abbildung 3.14: Simulierte Belastungs-Zeit-Verläufe für drei verschiedene Massen bei einer Fallhöhe von 1 mm und einem zylindrischen Gummidämpfer mit einer Gummihärtete von 68 Shore A.

Belastungs-Zeit-Verlauf. Das Diagramm zeigt, dass sich mit Hilfe des zylindrischen Gummidämpfers annähernd lineare Belastungs-Zeit-Verläufe erzeugen lassen müssten. Um dies experimentell zu verifizieren wurde eine M6-Polyamidschraube (PA 6.6) mit der Versuchsanordnung belastet. Ein zylindrischer Gummidämpfer sowie eine Masse von $m = 80$ kg fand Verwendung und eine Massenfallhöhe von $h = 0$ mm wurde eingestellt. Der resultierende Belastungs-Zeit-Verlauf ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Die relevante ansteigende Flanke des Kraftverlaufes kann als annähernd linear betrachtet werden, weshalb zylindrische Gummidämpfer zur Erzeugung solcher Belastungs-Zeit-Verläufe geeignet sind.

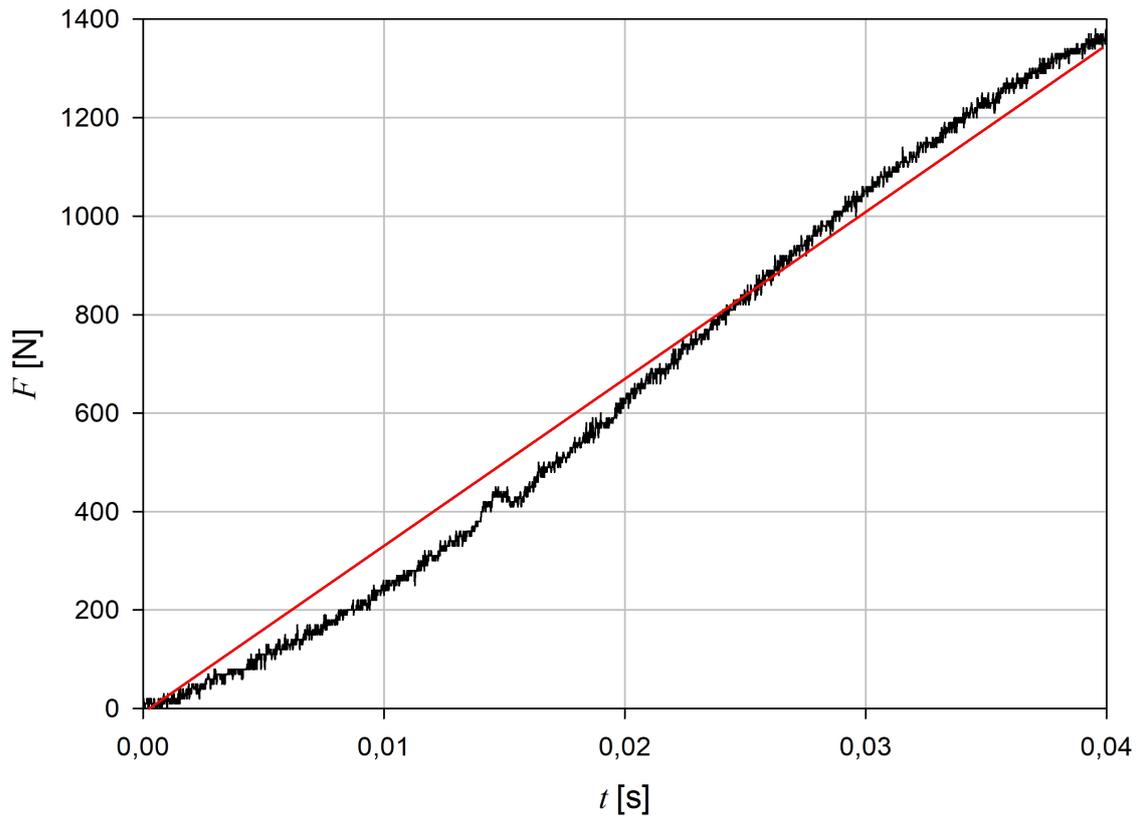


Abbildung 3.15: Gemessener Schraubenbelastungsverlauf unter Einsatz des zylindrischen Gummidämpfers Typ 040 mit Shore 68 A bei $m = 80$ kg und $h = 0$ mm.

3.2.4 Versuchsdurchführung

Um die Zahl der Versuchsparameter zu begrenzen, wurde für die Versuche eine bestimmte Schraubensorte ausgewählt, nämlich M6-Polyamidschrauben (PA 6.6) des Herstellers Kunststoffschraube.de, welche bei Raumbedingungen gelagert wurden.

Mit diesen Schrauben wurden zunächst zwei Versuchsreihen à 10 Einzelversuche mit der Versuchsapparatur Variante 1 unter Einsatz zweier verschiedener parabolischer Gummidämpfer durchgeführt. Durch die verschiedenen Federkonstanten der Dämpfer wurden zwei, sich in ihrer Dauer deutlich unterscheidenden Belastungs-Zeit-Verläufe generiert (Abbildung 3.16). Diese Verläufe entsprechen zwei verschiedenen Staubexplosionssituationen, hervorgerufen z. B. durch unterschiedliche Behältervolumina oder K_{St} -Werte.

Nach Abschluss der Versuchsreihen mit den parabolischen Gummidämpfern wurden sowohl die maximale als auch die mittlere Steigung (Abbildung 3.16) der nichtlinearen Belastungs-Zeit-Verläufe dazu herangezogen, um diese mit zylindrischen Gummidämpfern für vergleichende Versuche zu reproduzieren. Für jeden der insgesamt vier angenäherten linearen Belastungs-Zeit-Verläufen wurden je eine Versuchsreihe à 10 Einzelversuche durchgeführt. Tabelle 3.2 zeigt den Versuchsplan im Überblick.

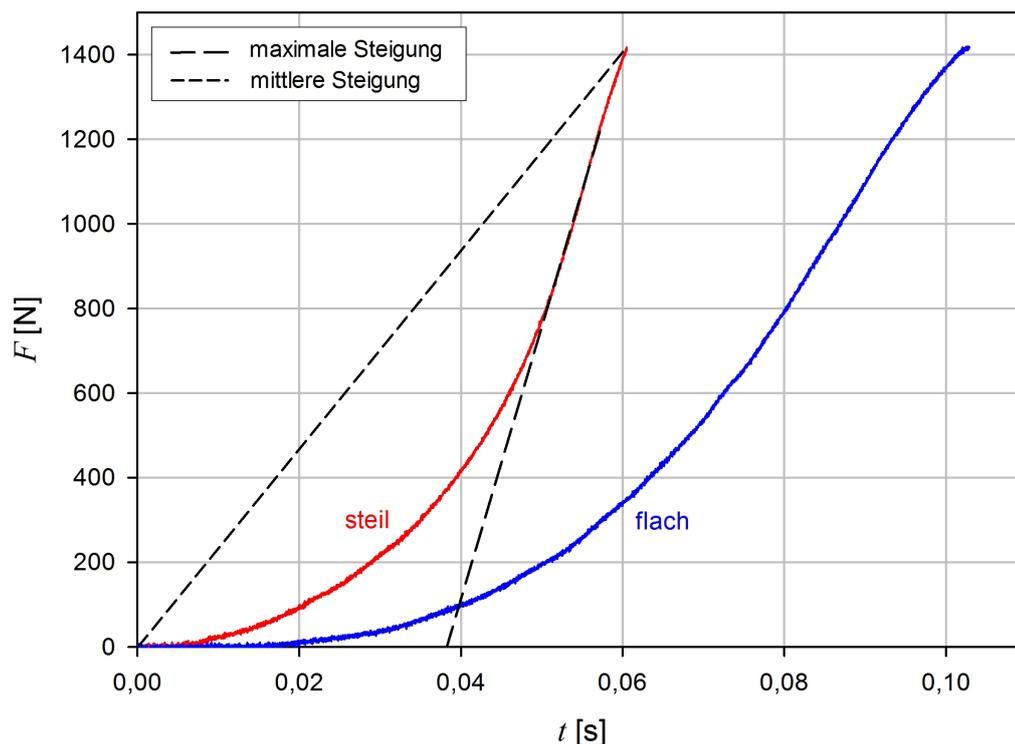


Abbildung 3.16: Nichtlineare Schraubenbelastungsverläufe erzeugt mit zwei verschiedenen parabolischen Gummidämpfern. Angedeutet ist die mittlere und maximale Steigung einer Kurve.

Belastungsanstieg	nichtlinear	linear mittel	linear maximal
steil	10 Versuche	10 Versuche	10 Versuche
flach	10 Versuche	10 Versuche	10 Versuche

Tabelle 3.2: Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses der Form des Belastungsanstiegs.

3.2.5 Messergebnisse und Auswertung

In Abbildung 3.17 sind exemplarisch drei verschiedene Belastungsverläufe dargestellt. Man erkennt, dass die linearen Belastungsanstiege in guter Näherung realisiert werden konnten.

Für jede Messkurve wurde die Bruchlast F_B und die Belastungsdauer t_B bestimmt. Mittelwertbildung über die Versuche mit gleichen Parametern und Berechnung der Messunsicherheit

$$u = \frac{3 \cdot \delta}{\sqrt{n}} \quad (3.11)$$

mit δ als Standardabweichung und n als Einzelversuchsanzahl lieferten die Werte in Tabelle 3.3. In Abbildung 3.18 sind die Werte aus Tabelle 3.3 grafisch dargestellt.

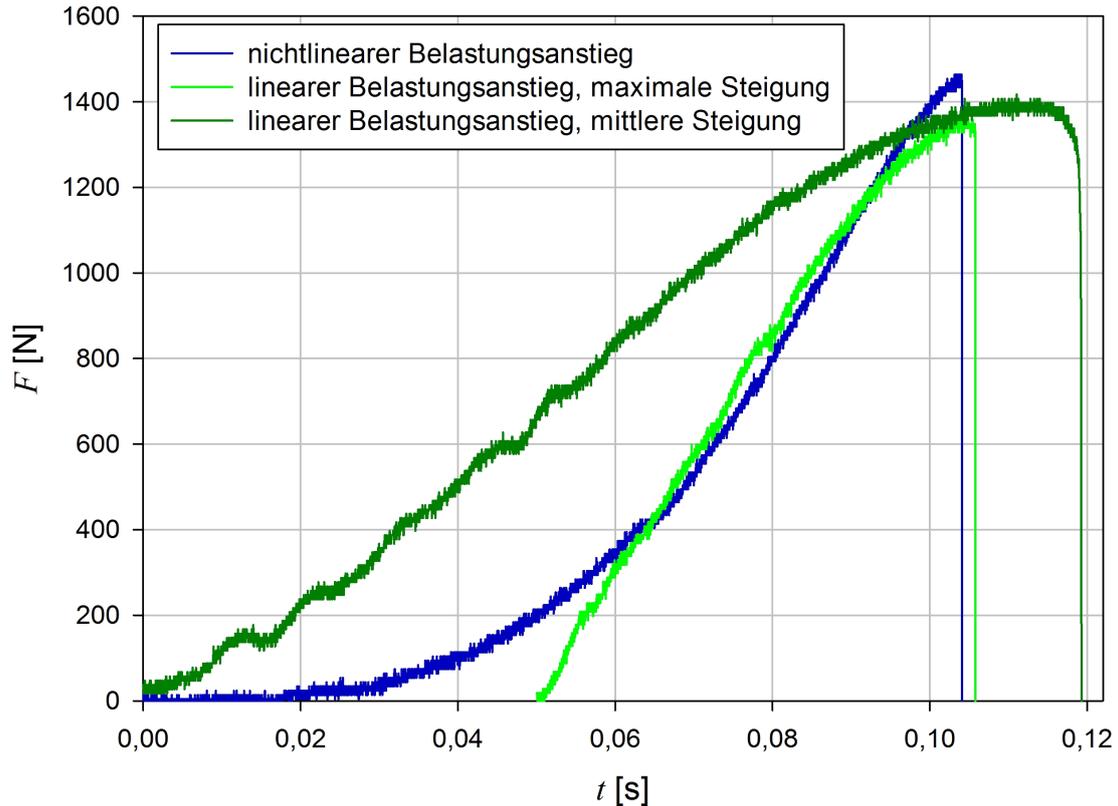


Abbildung 3.17: Belastung von M6-Polyamidschrauben mit verschiedenen Belastungsverläufen.

Belastungsanstieg	Belastungsanstieg	\bar{F}_B [N]	u [N]	\bar{t}_B [ms]	u [ms]
steil	nichtlinear	1.512,6	40,2	62,8	1,75
steil	linear mittel	1.513,4	43,3	66,2	2,68
steil	linear maximal	1.509,3	48,3	29,6	1,51
flach	nichtlinear	1.473,6	38,4	106,9	1,79
flach	linear mittel	1.408,5	59,8	105,4	9,54
flach	linear maximal	1.382,7	59,0	58,0	4,94

Tabelle 3.3: Mittelwerte der gemessenen Bruchlasten mitsamt Messunsicherheiten.

Wie man Tabelle 3.3 sowie Abbildung 3.18, oben entnimmt, ist bei den steilen linearen und nichtlinearen Belastungsanstiegen praktisch kein Unterschied in der mittleren Bruchlast \bar{F}_B festzustellen.

Bei den flachen Belastungsanstiegen weichen die mittleren Bruchlasten der linearen Belastungsanstiege um rund 4% bzw. 6% von der Bruchlast des nichtlinearen Belastungsanstieges ab. Alle Bruchlasten liegen bei Berücksichtigung der Messunsicherheit aber immer noch auf dem selben Niveau, so dass der gemessene Unterschied nicht als statistisch abgesichert angesehen werden kann.

Auf Basis dieses Ergebnisses wurden im weiteren Verlauf der Arbeit lineare Belastungs-Zeit-Verläufe, welche der mittleren Steigung der nicht-linearen Verläufe entsprechen, verwendet.

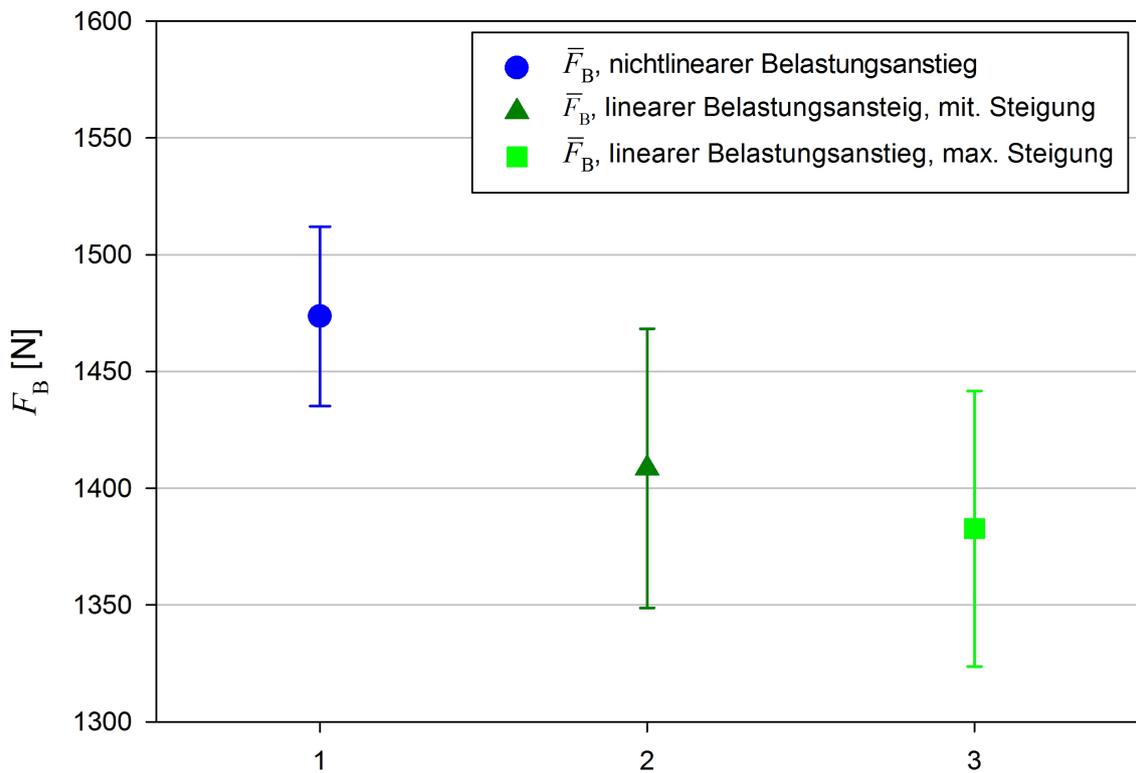
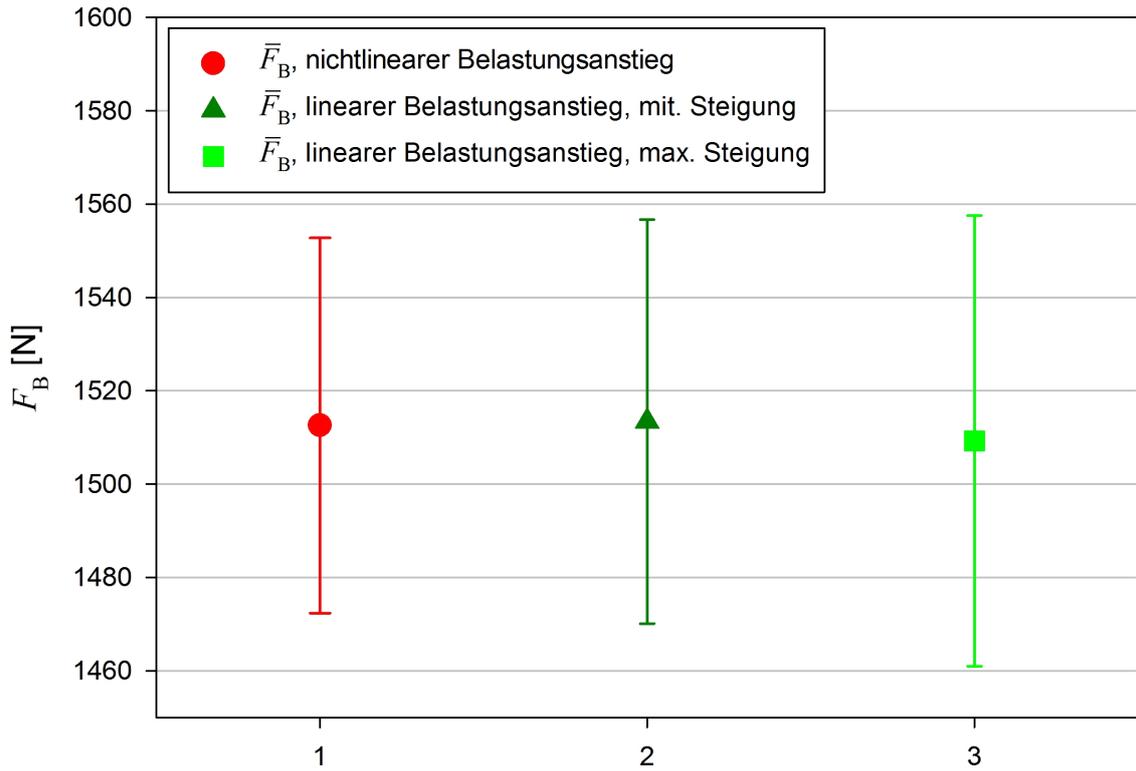


Abbildung 3.18: Mittlere Schraubenbruchlasten mit Messunsicherheit in Abhängigkeit von der Form des Belastungsanstieges. Oben: steiler Belastungsanstieg. Unten: flacher Belastungsanstieg.

3.3 Einfluss der Materialfeuchte auf das Bruchverhalten

Während der Einarbeitungsphase im Rahmen dieser Arbeit wurde deutlich, dass nicht nur die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit einen mutmaßlichen Einfluss auf die Schraubenbruchlast hat, sondern auch die Materialtemperatur und vor allem die Materialfeuchte. Letztgenanntes gilt insbesondere für Polyamid 6.6. Aufgrund dessen wurde diese Arbeit um die nun folgende Sektion erweitert, in dem die durchgeführte experimentelle Untersuchung des Einflusses der Materialfeuchte auf das Bruchverhalten von Polyamidschrauben dargelegt ist.

3.3.1 Konditionierung der Schrauben

Um den Einfluss der Materialfeuchte auf das Schraubenbruchverhalten untersuchen zu können, wurden Polyamidschrauben verschiedener Lieferanten auf die Zustände trocken, raumfeucht und feuchtigkeitsgesättigt konditioniert. Um die genannten Zustände zu erreichen, wurden die Schrauben jeweils für die Dauer von 14 Tagen in einem Trockenschrank bei einer Temperatur von 60 °C, im klimatisierten Labor bei Umgebungsbedingungen sowie in raumtemperiertem Leitungswasser gelagert. Der Zeitraum von 14 Tagen wurde mit Hilfe zweier Versuchsreihen bestimmt. Hierfür wurden je 10 M6-Polyamidschrauben des Lieferanten Kunststoffschrauben.de ausgewählt und im Trockenschrank sowie Wasserbad deponiert. In regelmäßigen Abständen wurden die Massen der Schrauben, die Mittelwerte sowie die Messunsicherheiten bestimmt. Die Mittelwerte der auf das Anfangsgewicht der Schraube normierten Masse wurde über der Zeit aufgetragen (Abbildung 3.19).

Wie man Abbildung 3.19, unten entnimmt, kann mit der gewählten Konditionierungsdauer von 14 Tagen eine vollständige Feuchtigkeitsättigung der Schrauben erzielt werden. Der obere Teil der Abbildung zeigt, dass eine vollständige Trocknung mit diesem Zeitfenster nicht vollständig aber annähernd gelingt. Hier war ein Kompromiss notwendig, um die Trocknungszeit im Rahmen zu halten.

3.3.2 Versuchsdurchführung

Mit dem Versuchsaufbau Variante 2 (Abschnitt 3.1.1.2) wurden die in Tabelle 3.4 aufgelisteten Versuche gemäß Abschnitt 3.1.2 durchgeführt und nach der in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet.

Um bewerten zu können, ob das Bruchverhalten von Polyamidschrauben auch vom Lieferanten abhängig ist, wurden jeweils 5 Versuche mit trockenen und feuchtigkeitsgesättigten Schrauben der Lieferanten Emico und Würth durchgeführt.

Jeweils 5 Bruchstücke der raumfeuchten und feuchtigkeitsgesättigten Schrauben aller Lieferanten wurden nach den Versuchen gewogen und im Trockenschrank bei 60 °C über mehrere Wochen vollständig getrocknet. Somit konnte die Feuchte der Schrauben am Versuchstag bestimmt werden.

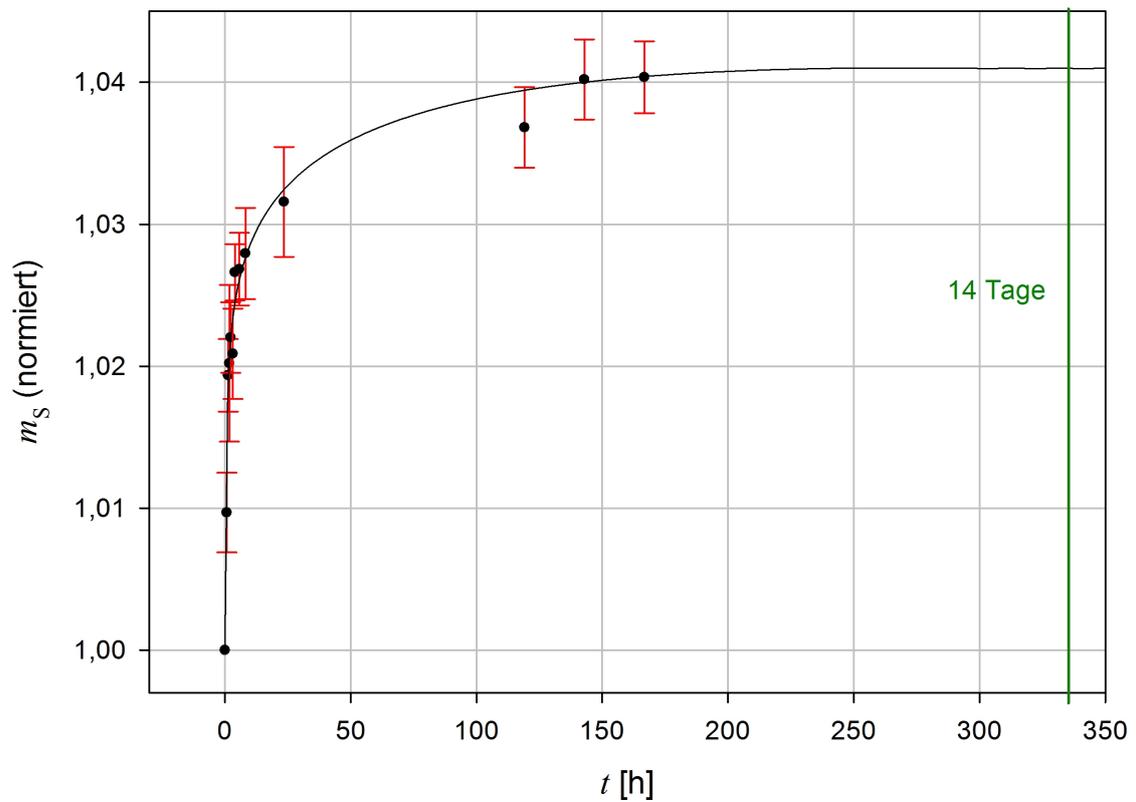
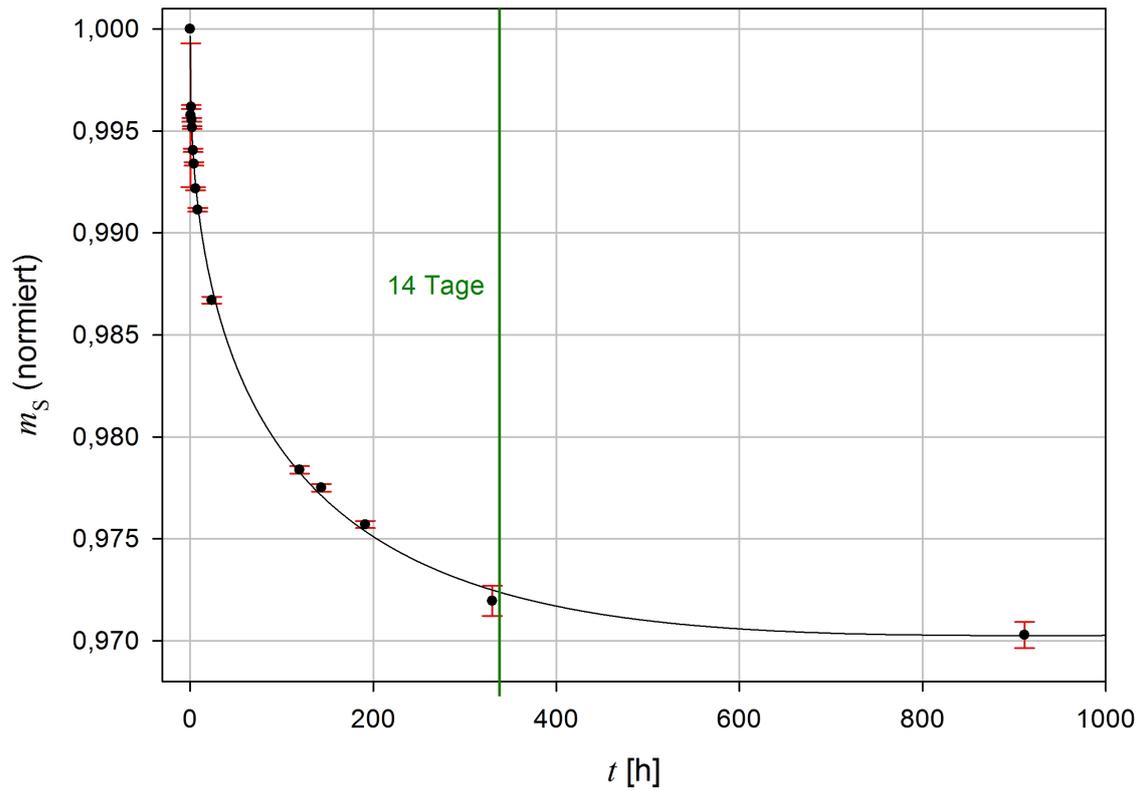


Abbildung 3.19: Oben: Mittlerer Trocknungsverlauf einer M6-Polyamidschraube PA 6.6 durch Trockenschranklagerung bei 60 °C. Unten: Mittlerer Befeuchtungsverlauf einer M6-Polyamidschraube PA 6.6 durch Wasserlagerung bei Raumtemperatur.

Die Fallhöhe der Masse ($m = 90 \text{ kg}$) der Versuchsanordnung betrug $h = 2 \text{ mm}$. Verwendet wurde der Dämpfer 100 (Tabelle B.1 im Anhang).

Konditionierung	Versuchsanzahl		
	Kunststoffschraube.de	Emico	Würth
trocken	10	5	5
raumfeucht	10	10	10
gesättigt	10	5	5

Tabelle 3.4: Übersicht über die in dieser Sektion durchgeführten Versuche.

3.3.3 Messergebnisse und Auswertung

Bei den exemplarisch dargestellten Versuchen in Abbildung 3.20 ist deutlich zu erkennen, dass die Bruchlast F_B der Schrauben im Zustand trocken (0 Vol-% Feuchte) mit $F_B = 1.620 \text{ N}$ höher ist als im Zustand raumfeucht (2,93 Vol-% Feuchte) mit $F_B = 1.460 \text{ N}$ bzw. gesättigt (7,00 Vol-% Feuchte) mit $F_B = 1.080 \text{ N}$. Die Bruchlast der trockenen Schrauben ist um 34 % höher als die Bruchlast der gesättigten Schrauben sowie um 9 % höher als die Bruchlast der raumfeuchten Schrauben. Die Bruchdehnung ist im gesättigten Zustand mit $\varepsilon_B = 21,5 \%$ am höchsten und sinkt mit abnehmender Feuchte auf die Werte $\varepsilon_B = 14,5 \%$ und $\varepsilon_B = 2,8 \%$.

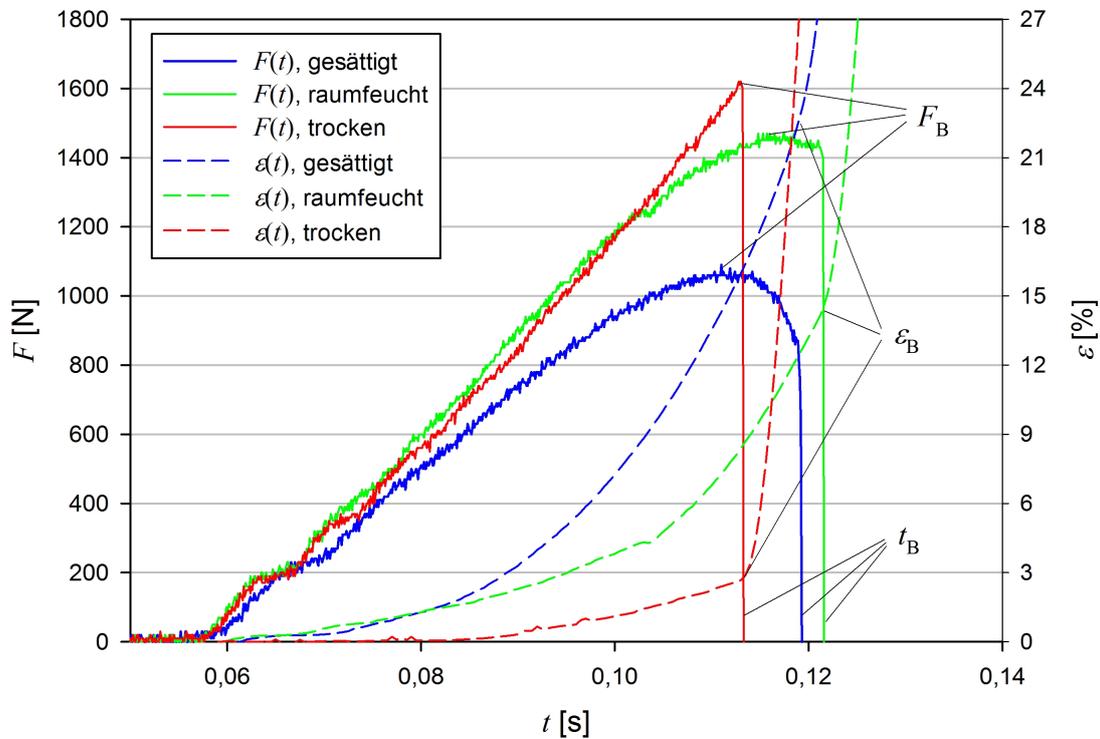


Abbildung 3.20: Kraft-Zeit-Verläufe sowie Dehnungs-Zeit-Verläufe bei drei Versuchen mit trockenen, raumfeuchten und gesättigten Polyamidschrauben. Markiert sind die Bruchlasten F_B , die Belastungsdauern t_B sowie die Bruchdehnungen ε_B .

Die Belastungsdauer t_B variiert um bis zu 8 ms. Eine signifikante Abhängigkeit von der Materialfeuchte ist diesbezüglich nicht erkennbar. Dieses Verhalten war qualitativ bei allen Versuchen zu beobachten.

Mit Hilfe des Kerndurchmessers der Schrauben von $D_K = 4,77$ mm wurden aus den Kraft-Zeit Verläufen der oben genannten Versuche die Spannungs-Zeit-Verläufe berechnet und die Spannung über der Dehnung aufgetragen (Abbildung 3.21). Aus den Kurven wurden die E -Module durch Anlegen von Tangenten an den linearen Kurvenbereich bestimmt. Aus Abbildung 3.21 ist ersichtlich, dass der Elastizitätsmodul mit zunehmender Materialfeuchte sinkt. Im Zustand trocken beträgt der E -Modul $E = 5.459$ MPa, im Zustand raumfeucht $E = 2.713$ MPa und im Zustand gesättigt $E = 1.398$ MPa. Dabei ist zu beachten, dass die Bestimmung der E -Module, speziell für den trockenen Zustand, mit relativ großen Unsicherheiten behaftet ist weil sich ein ausgeprägter linearer Kurvenbereich nicht immer zweifelsfrei definieren ließ. Des Weiteren wurde der E -Modul nicht nach Norm bestimmt bzw. fanden die Versuche nicht unter Normbedingungen statt. Deshalb sind die angegebenen Zahlen lediglich Näherungswerte.

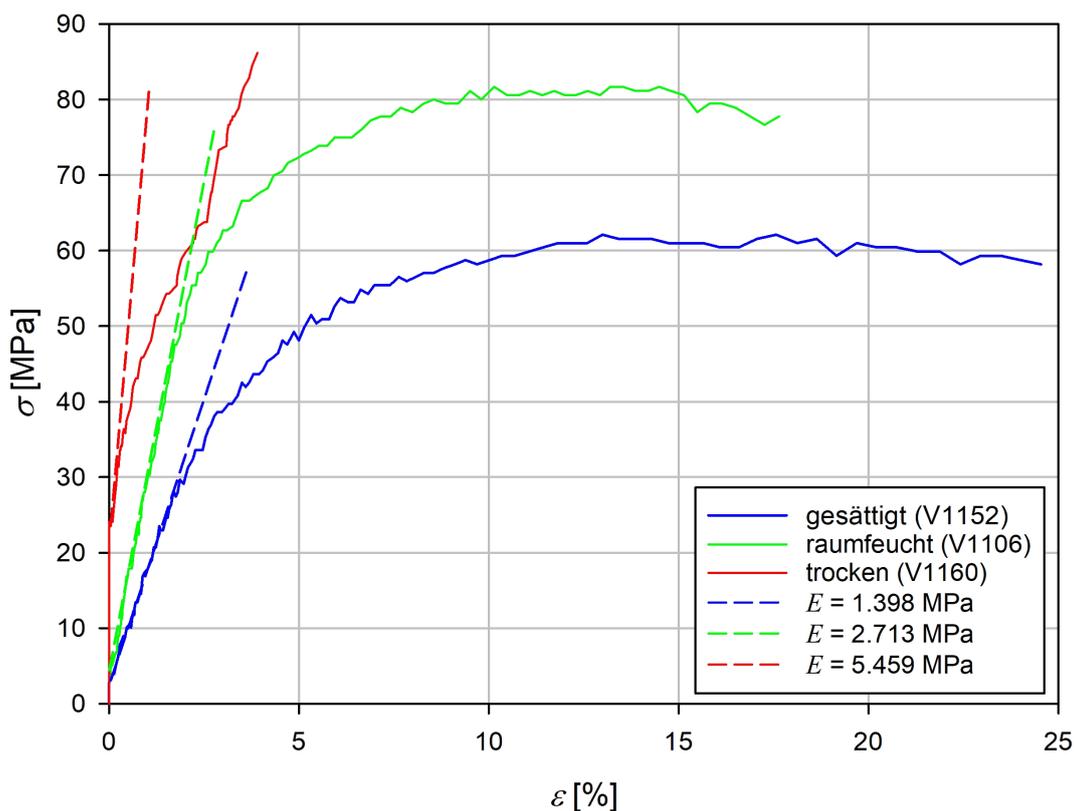


Abbildung 3.21: Spannungs-Dehnungs-Verläufe bei drei Einzelversuchen mit trockenen, raumfeuchten und gesättigten Polyamidschrauben mit abgeleiteten E -Modulen.

In Abbildung 3.22 und Tabelle 3.5, oben sind die Mittelwerte der Bruchlast, der Belastungsdauer und der Bruchdehnung aus jeweils 10 Versuchen mit M6-Polyamidschrauben des Lieferanten Kunststoffschraube.de über der Materialfeuchte

aufgetragen. Es zeigen sich die gleichen Tendenzen wie bei den zuvor beschriebenen ausgewählten Einzelversuchen:

Die mittlere Bruchlast \bar{F}_B (rote Dreiecke) sinkt mit zunehmender Materialfeuchte von $\bar{F}_B = 1.640 \text{ N}$ im Zustand trocken um ca. 32 % auf $\bar{F}_B = 1.110 \text{ N}$ im Zustand gesättigt. Die mittlere Bruchdehnung $\bar{\varepsilon}_B$ (grüne Punkte) nimmt dagegen mit zunehmender Materialfeuchte von $\bar{\varepsilon}_B = 1,28 \%$ im Zustand trocken um ca. 1.768 % auf $\bar{\varepsilon}_B = 23,91 \%$ im Zustand gesättigt zu. Die Belastungsdauer (blaue Quadrate) steigt mit zunehmender Feuchte leicht an. Wegen der Größe der Messunsicherheit ist die letztgenannte Aussage aber nicht statistisch abgesichert.

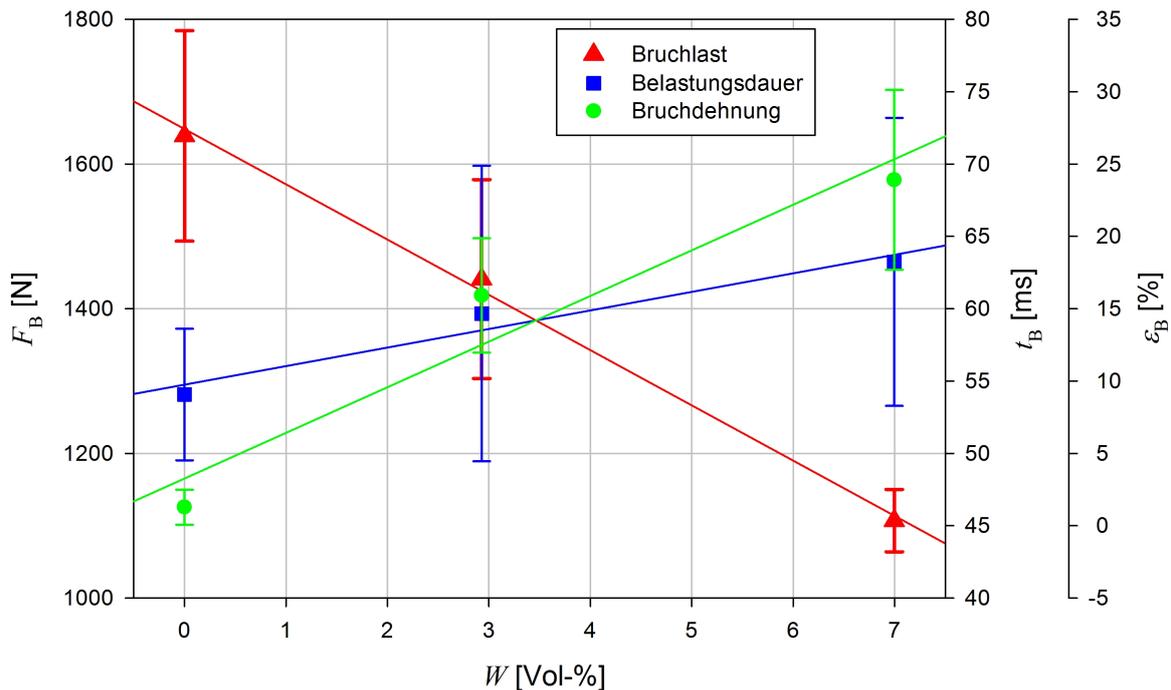


Abbildung 3.22: Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruchdehnung ε_B von der Materialfeuchte W . Schraubenlieferant: Kunststoffschraube.de.

Die oben beschriebenen Abhängigkeiten der Bruchlast, der Belastungsdauer und der Bruchdehnung von der Materialfeuchte finden sich im Wesentlichen auch bei den Polyamidschrauben der beiden anderen Lieferanten Emico und Würth wieder, wie man Tabelle 3.5 sowie den Abbildungen B.1 und B.2 im Anhang B entnimmt. Lediglich bei den Polyamidschrauben vom Lieferanten Würth liegt die mittlere Bruchlast im trockenen Zustand, entgegen der Erwartung, mit $\bar{F}_B = 1.270 \text{ N}$ um ca. 11 % unter der mittleren Bruchlast im raumfeuchten Zustand.

Die Messunsicherheit bezüglich der Schraubenbruchlast fällt mit zunehmender Materialfeuchte. Dies gilt für die Schrauben aller Lieferanten. Die Bruchlaststreuung der Schrauben von Kunststoffschraube.de und Würth ist dabei größer als bei den Schrauben von Emico.

Die Bruchdehnung sowie ihre Messunsicherheit wächst mit der Materialfeuchte. Auch diese Aussage gilt für die Schrauben aller Lieferanten.

Lieferant	Kunststoffschraube.de		
$\bar{W} \pm u$ [Vol-%]	$0,00 \pm 0,000$	$2,93 \pm 0,032$	$7,00 \pm 0,094$
$\bar{F}_B \pm u$ [N]	$1,64 \pm 0,145$	$1,44 \pm 0,138$	$1,11 \pm 0,043$
$\bar{t}_B \pm u$ [ms]	$54,07 \pm 4,550$	$59,67 \pm 10,219$	$63,24 \pm 6,959$
$\bar{\varepsilon}_B \pm u$ [%]	$4,80 \pm 1,211$	$15,92 \pm 3,953$	$23,91 \pm 6,216$
Lieferant	Emico		
$\bar{W} \pm u$ [Vol-%]	$0,00 \pm 0,000$	$2,05 \pm 0,033$	$5,62 \pm 0,063$
$\bar{F}_B \pm u$ [N]	$1,87 \pm 0,052$	$1,59 \pm 0,019$	$1,02 \pm 0,024$
$\bar{t}_B \pm u$ [ms]	$70,46 \pm 3,096$	$75,71 \pm 5,587$	$63,88 \pm 3,952$
$\bar{\varepsilon}_B \pm u$ [%]	$6,44 \pm 0,696$	$18,43 \pm 2,255$	$25,99 \pm 2,651$
Lieferant	Würth		
$\bar{W} \pm u$ [Vol-%]	$0,00 \pm 0,000$	$2,15 \pm 0,039$	$6,14 \pm 0,077$
$\bar{F}_B \pm u$ [N]	$1,27 \pm 0,111$	$1,43 \pm 0,060$	$0,93 \pm 0,037$
$\bar{t}_B \pm u$ [ms]	$46,30 \pm 3,139$	$53,23 \pm 3,295$	$57,63 \pm 5,973$
$\bar{\varepsilon}_B \pm u$ [%]	$1,64 \pm 1,006$	$6,58 \pm 1,827$	$23,41 \pm 4,917$

Tabelle 3.5: Tabellarische Übersicht über die Ergebnisse zum Einfluss der Materialfeuchte auf die Eigenschaften von Polyamidschrauben.

Für die Belastungsdauer kann im Rahmen der Messunsicherheit keine signifikante Abhängigkeit von der Materialfeuchte abgeleitet werden. Dies gilt erneut für die Schrauben aller Lieferanten.

Einige der untersuchten Polyamidschrauben wiesen starke, unregelmäßige Fehlstellen auf und zwar unabhängig vom Lieferanten (Abbildung 3.24). Sämtliche auf den Zustand trocken konditionierten Schrauben des Herstellers Würth, mit denen Versuche durchgeführt wurden, brachen direkt hinter dem Schraubenkopf ab, was auf dort lokalisierte Fehlstellen zurückzuführen ist (Abbildung 3.23). Sie stellen damit eine Ausnahme dar, da alle anderen Schrauben vor der Mutter brachen.



Abbildung 3.23: Fehlstellen in den Polyamidschrauben des Lieferanten Würth.



Abbildung 3.24: Zusammenstellung verschiedener Fehlstellen in Polyamidschrauben der Lieferanten Kunststoffschraube.de, Emico und Würth.

3.3.4 Diskussion

3.3.4.1 Interpretation und kritische Betrachtung der Messergebnisse

Die Zunahme der Dehnung mit steigender Feuchte ist laut Literatur [21] auf die molekulare Struktur der Polymerketten und deren größere Nachgiebigkeit im feuchten Zustand zurückzuführen. Da Polyamid 6.6 besonders viel Wasser einlagern kann (in den betrachteten Versuchen bis ca. 7 Vol-%) ist dieser Effekt bei diesem Werkstoff besonders stark ausgeprägt. Dies erklärt das spröde Verhalten des Materials im trockenen Zustand bzw. die starke Dehnfähigkeit im gesättigten Zustand und ebenfalls die beobachtete große Variabilität des E -Modul als Folge von Materialfeuchteschwankungen. Die berechneten E -Module der Schrauben (Abbildung 3.21) liegen in der selben Größenordnung wie Werte aus Datenblättern für Polyamid 6.6 (Anhang C), was als Beleg für die Richtigkeit der erzielten Messergebnisse gewertet wird.

Die Schrauben des Lieferanten Würth zeigten im Zustand trocken eine geringere Bruchlast (ca. 11 %) als im raumfeuchten Zustand (Tabelle 3.5 und Abbildung B.2). Sie unterscheiden sich damit vom Bruchverhalten der Polyamidschrauben der beiden ande-

ren Lieferanten. Zurückzuführen ist dieses Phänomen auf die festgestellten Fehlstellen, welche bei den Versuchen mit trockenen Schrauben des Lieferanten Würth durchweg vorhanden waren.

Die durchgeführten Versuche liefern keine tragbaren statistischen Aussagen über den Anteil fehlerhafter Schrauben und die Art und Verteilung der Fehlstellen im Schraubenkörper. Jedoch ist die Schlussfolgerung legitim, dass Fehlstellen in M6-Polyamidschrauben der genannten Lieferanten häufig auftreten und die Schrauben dadurch in ihrer Stabilität herabgesetzt sind. Die Unregelmäßigkeiten im Material führen zu schwer reproduzierbaren Ergebnissen, was unter anderem die vergleichsweise großen Messunsicherheiten erklärt.

3.3.4.2 Auswirkung auf die Explosionsdruckentlastung

Die starke Abhängigkeit der Polyamidschraubenbruchlast von ihrer Materialfeuchte hat Konsequenzen für Explosionsklappen, deren statische Ansprechdrücke mit Hilfe von Polyamidschrauben realisiert werden. Dies gilt insbesondere für Explosionsklappen, die sich im Freien befinden und der Witterung bzw. starken Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt sind.

Der statische Ansprechdruck von Explosionsklappen wird mit (1.1) bestimmt, wobei die gemäß DIN EN ISO 527 „Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften“ ermittelten Werkstoffdaten für Polyamidschrauben herangezogen werden. Letztgenannte beziehen sich auf normierte Raumbedingungen. Steigt die Materialfeuchte der Schrauben im Vergleich zum Auslegungsfall z. B. durch anhaltenden Regen, sinkt die Bruchlast der Polyamidschrauben (Abbildungen 3.22, B.1 und B.2), was zu niedrigerem p_{stat} und damit p_{red} führen sollte. Sinkt dagegen die Materialfeuchte der Schrauben im Vergleich zum Auslegungsfall z. B. durch Sonneneinstrahlung, steigt die Bruchlast der Polyamidschrauben (Abbildungen 3.22, B.1 und B.2), was zu höherem p_{stat} und damit p_{red} führt. Letztgenannter Fall kann zum Überschreiten der Behälterfestigkeit und damit zu großem Schaden bei einem Staubexplosionsereignis führen. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen:

Angenommen wird ein Behälter mit Explosionsklappe gemäß den Daten aus Tabelle 3.6. Weiterhin werden zwei M6-Polyamidschrauben des Lieferanten Emico (Zustand raumfeucht: $\bar{F}_B = 1.590 \text{ N}$) zum Verschließen der Explosionsklappe eingesetzt sowie ein Staub mit den Kenngrößen $K_{\text{St}} = 200 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ und $p_{\text{max}} = 9 \text{ bar}$.

$V \text{ [m}^3\text{]}$	$L/D \text{ [-]}$	$A_E \text{ [m}^2\text{]}$	$b \text{ [m]}$	$m_K \text{ [kg]}$	$h \text{ [m]}$	$h_n \text{ [m]}$	$n \text{ [-]}$	$F_{B,n} \text{ [N]}$
10	1,5	0,5	0,707	11,7	0,454	0,714	2	1.590

Tabelle 3.6: Daten zur Berechnung von $p_{\text{red,max}}$ mit Hilfe von „SIMEK“.

Mit (1.1) ergibt sich der statische Ansprechdruck

$$\frac{2 \cdot 1.590 \text{ N} \cdot 0,714 \text{ m}}{0,5 \text{ m}^2 \cdot 0,454 \text{ m}} = 10.000 \text{ Pa} = 0,1 \text{ bar} \quad (3.12)$$

Einsetzen dieser Werte in „SIMEK“ liefert $p_{\text{red,max}} = 0,89 \text{ bar}$.

Setzt man in (1.1) die gemessene Bruchlast für trockene Emico-Schrauben ein, folgt

$$\frac{2 \cdot 1.870 \text{ N} \cdot 0,714 \text{ m}}{0,5 \text{ m}^2 \cdot 0,454 \text{ m}} = 11.757 \text{ Pa} = 0,118 \text{ bar} \quad (3.13)$$

Einsetzen in „SIMEK“ liefert $p_{\text{red,max}} = 0,97 \text{ bar}$. Im aufgezeigten Beispiel verursacht das Trocknen der Polyamidschrauben also eine Erhöhung des reduzierten maximalen Explosionsdrucks um $0,08 \text{ bar}$ bzw. 9% . Bei den in der Praxis sehr knapp kalkulierten Entlastungsflächen kann dieser Wert zur Überschreitung der Behälterfestigkeit führen.

Wie sich die Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Materialfeuchte bei Polyamid-schrauben auf den Anwendungsfall Explosionsklappe auswirkt, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht beurteilt werden. Ob der, bedingt durch die hohe Elastizität des Werkstoffs, vergrößerte zurückgelegte Öffnungswinkel der Explosionsklappe bis zum Versagen der Schrauben zu einem erhöhten statischen Ansprechdruck führt, muss Untersuchungen an Behältern auf dem Versuchsgelände in Kappelrodeck vorbehalten bleiben.

Die bei den Versuchen beobachteten Fehlstellen in den Schraubenkörpern (Abbildungen 3.23 und 3.24) sind für die Verwendung der Schrauben als Klappenverschluss unbedenklich. Fehlstellen im Material schwächen die Schrauben, was zu geringeren Festigkeiten und damit im Explosionsfall zu einem früheren Versagen im Vergleich zum Auslegungsfall führt.

Die unregelmäßig auftretenden Fehlstellen in den Schraubenkörpern sind jedoch vor dem Hintergrund von EU-Baumusterprüfungen kritisch zu sehen. Ist die Prüfung eines Baumusters erfolgreich weil äußerlich unauffällige, jedoch fehlerhafte Verschluss-schrauben verwendet wurden, ist nicht gewährleistet, dass die geprüfte Explosionsklappe mit fehlerfreien Verschluss-schrauben im Anwendungsfall wie vorgesehen funktioniert!

3.4 Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf das Bruchverhalten

Die durch Staubexplosionen hervorgerufenen Druckanstiege in Behältern unterscheiden sich massiv in ihrer Druckanstiegsgeschwindigkeit. So erreicht die in Sektion 3.2 exemplarisch simulierte Staubexplosion in einem 1 m^3 -Behälter den statischen Ansprechdruck von $p_{\text{stat}} = 0,1 \text{ bar}$ in $9,3 \text{ ms}$ (Abbildung 3.8, oben). In einem 10.000 m^3 -Behälter wird bei den Bedingungen aus Tabelle 3.1 der statische Ansprechdruck von $p_{\text{stat}} = 0,1 \text{ bar}$ in 2.121 ms erreicht (Abbildung 3.8, unten). Die in den Abbildungen dargestellten mittleren Druckanstiegsgeschwindigkeiten bis zum Erreichen des statischen Ansprechdrucks unterschieden sich deshalb um den Faktor

$$f = \frac{10,718 \text{ bar/s}}{0,047 \text{ bar/s}} \approx 228 \quad (3.14)$$

Da nach Abschnitt 3.2.1 der Druck-Zeit-Verlauf im Behälter qualitativ dem Belastungs-Zeit-Verlauf der verwendeten Klappenverschluss-schrauben entspricht, variiert die Anstiegsgeschwindigkeit der Schraubenbelastung ebenfalls um diesen Faktor. Gemäß Abschnitt 2.4.1 hat die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf

die mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten. Dies legt die Vermutung nahe, dass sich stark unterscheidende Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten unterschiedliche Bruchlasten bei Polyamidschrauben hervorrufen. Werden solche Schrauben zur Realisierung des statischen Ansprechdrucks von Explosionsklappen eingesetzt, hätte dies veränderliche statische Ansprechdrücke und reduzierte Überdrücke zur Folge. Aus diesem Grund wird im folgenden die Abhängigkeit der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf das Bruchverhalten von Polyamidschrauben untersucht.

3.4.1 Versuchsdurchführung

Mit dem in Sektion 3.1 beschriebenen Versuchsaufbau Variante 2 sowie dem dort ebenfalls dargelegten Versuchsablauf wurden die in Tabelle 3.7 aufgelisteten Versuche mit Polyamidschrauben des Lieferanten Kunststoffschraube.de durchgeführt, wobei die Versuche mit der Aufprallgeschwindigkeit $v = 0,198 \text{ m/s}$ bereits in Sektion 3.3 beschrieben wurden.

v_A [m/s]	$\dot{\epsilon}$ [1/s]	Zustand	Versuchsanzahl	h [mm]	Sektion
0,198	4,71	trocken	10	2	3.3
0,198	4,71	raumfeucht	10	2	3.3
0,198	4,71	gesättigt	10	2	3.3
0,280	6,67	trocken	10	4	3.4
0,280	6,67	raumfeucht	10	4	3.4
0,280	6,67	gesättigt	10	4	3.4
0,396	9,43	trocken	10	8	3.4
0,396	9,43	raumfeucht	10	8	3.4
0,396	9,43	gesättigt	10	8	3.4

Tabelle 3.7: Übersicht über die in den Sektionen 3.3 und 3.4 durchgeführten Versuche mit den Polyamidschrauben des Lieferanten Kunststoffschraube.de. Die fallende Masse in der Versuchsapparatur betrug durchweg $m = 90 \text{ kg}$.

In Tabelle 3.7 beschreibt v_A die Geschwindigkeit der fallenden Masse beim Aufprall auf den Dämpfer (Abbildung 3.1). v_A lässt sich bei Vernachlässigung der Reibung aus dem Energieerhaltungssatz ableiten:

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2 \quad \Rightarrow \quad v_A = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.15)$$

Aus der Geschwindigkeit v_A beim Aufprall sowie der Anfangslänge $L_0 = 44 \text{ mm}$ der eingespannten Schraube ergibt sich die Dehnrates $\dot{\epsilon}$ aus

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_A}{L_0} \quad (3.16)$$

Gleichung (3.16) liefert lediglich die Dehnrates zu Beginn des Schraubenbelastungsprozesses. Im weiteren zeitlichen Verlauf der Schraubenbelastung sind die Dehnrates nicht

konstant. Dennoch reichen die so ermittelten und in Tabelle 3.7 aufgelisteten Dehnraten aus, um diese mit Zahlen aus der Literatur zu vergleichen: Die Dehnraten aus Tabelle 3.7 stellen relativ zu den Dehnraten aus Abbildung 2.7 lediglich einen kleinen Bereich (zwischen 4,5/s und 9,5/s) dar. Die zu erwartenden beobachtbaren Einflüsse der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf die Schraubenbruchlast waren deshalb bereits im Vorfeld als gering einzuschätzen. Aus diesem Grund wurde parallel zu den laufenden Messungen am Aufbau einer Apparatur gearbeitet, mit der die Abhängigkeit der Schraubenbruchlast von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit in dem Bereich vollständig untersucht werden kann, der bei der Anwendung als Explosionsklappenverschlusschrauben auftritt (Sektion 3.2).

3.4.2 Messergebnisse und Auswertung

In Tabelle 3.8 sind die relevanten Versuchsparameter Aufprallgeschwindigkeit v_A und mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit dF/dt sowie der Mittelwert über die Messgrößen Bruchlast \bar{F}_B , Belastungsdauer \bar{t}_B und Bruchdehnung $\bar{\varepsilon}_B$ aufgelistet. Es wurde jeweils über 10 Einzelversuche gemittelt. Die mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit konnte aus den gemessenen quasi-linearen Belastungskurven abgeleitet und der Aufprallgeschwindigkeit zugeordnet werden, da sich beide Größen als direkt proportional erwiesen. In den Abbildungen 3.25, B.3 und B.4 sind die Daten aus Tabelle 3.8 grafisch aufgearbeitet dargestellt.

v_A [m/s]	$\overline{dF/dt}$ [N/s]	W [%]	$\bar{F}_B \pm u$ [N]	$\bar{t}_B \pm u$ [ms]	$\bar{\varepsilon}_B \pm u$ [%]
0,198	33.020	0,00	1.639± 145	54,07± 4,554	4,80± 1,214
0,280	38.116	0,00	1.652± 169	42,01± 3,614	1,79± 0,892
0,396	45.324	0,00	1.677± 148	34,61± 2,912	2,64± 0,598
0,198	29.867	2,96	1.441± 138	59,67± 10,218	15,92± 3,956
0,280	34.368	2,96	1.545± 58	49,33± 3,605	8,08± 2,533
0,396	40.736	2,96	1.455± 109	38,96± 4,924	8,15± 3,263
0,198	23.051	6,11	1.107± 43	63,24± 6,963	23,91± 6,214
0,280	28.913	6,11	1.126± 54	56,71± 7,846	33,19± 9,828
0,396	37.206	6,11	1.172± 51	44,55± 5,151	27,71± 6,698

Tabelle 3.8: Übersicht über die Versuchsparameter und Mittelwerte der erzielten Messergebnisse mit Messunsicherheit.

Aus den genannten Abbildungen bzw. Diagrammen geht hervor, dass bei Berücksichtigung der Messungenauigkeit keine Abhängigkeit der Schraubenbruchlast von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit nachweisbar ist. Dies gilt für alle drei eingestellten Materialfeuchten. Einzig beim Konditionierungszustand gesättigt fällt ein minimaler Anstieg der Bruchlast mit der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf, was zum Teil dem gewählten Maßstab geschuldet ist und nicht als statistisch absichert angesehen werden kann. Im Hinblick auf die geringe Variationsbreite der mit der Versuchsapparatur einstellbaren Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten war dieses Ergebnis zu erwarten.

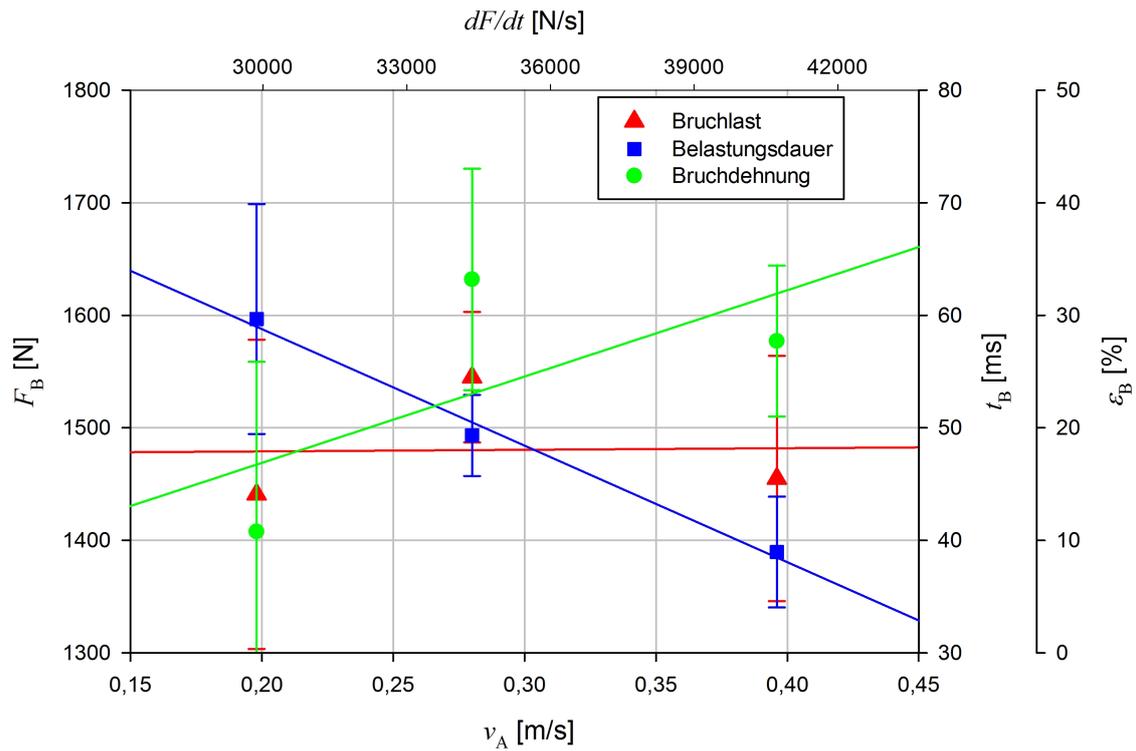


Abbildung 3.25: Abhängigkeit der Bruchlast F_B , Belastungsdauer t_B sowie Bruchdehnung ε_B von der Aufprallgeschwindigkeit v_A und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit dF/dt . Konditionierungszustand: raumfeucht. Schraubenlieferant: Kunststoffschraube.de.

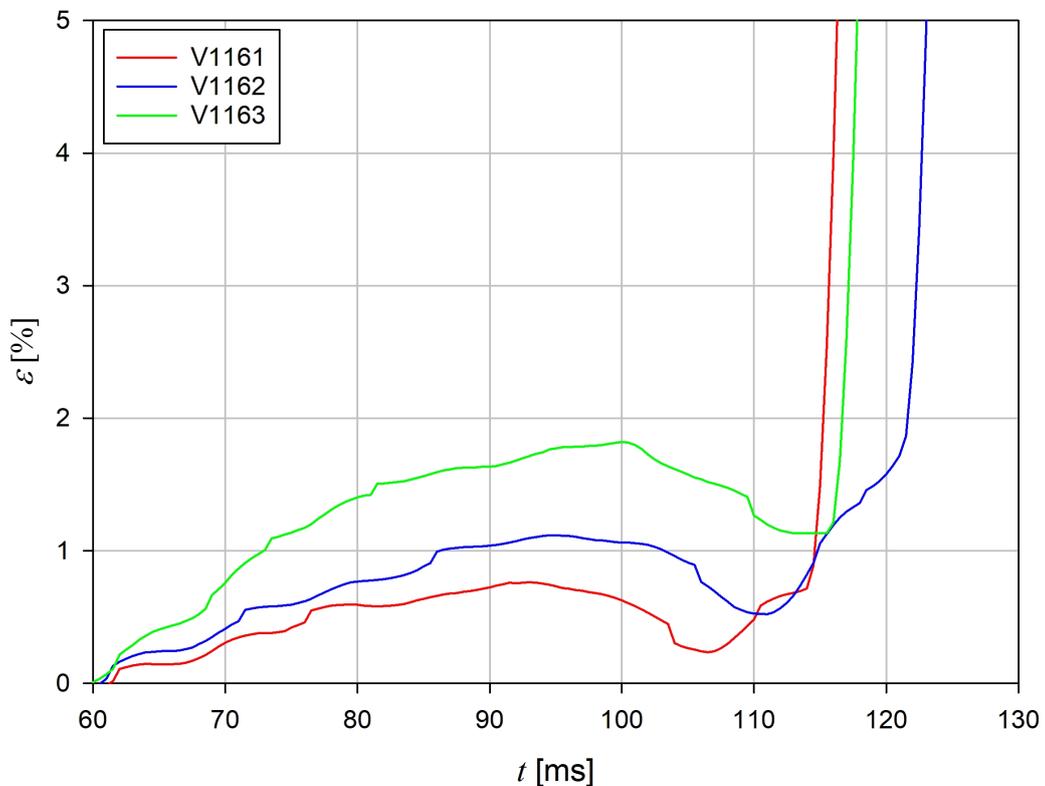


Abbildung 3.26: Dehnungs-Zeit-Verläufe für drei exemplarische Versuche an Polyamid-Schrauben im Zustand trocken.

Die Belastungsdauer nimmt erwartungsgemäß unabhängig von der Materialfeuchte mit zunehmender Aufprallgeschwindigkeit ab, wobei die Größe der Abnahme nicht mit der Materialfeuchte in Verbindung gebracht werden kann.

Bei feuchten Polyamidschrauben konnte keine überzeugende Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit beobachtet werden. Lediglich bei den getrockneten Schrauben ist eine Tendenz zu geringeren Bruchdehnungen mit wachsender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit augenscheinlich. Besonders bei diesem Konditionierungszustand ist zu beobachten, dass der Dehnungs-Zeit-Verlauf einiger Schrauben vor dem Bruch eine Abnahme der Dehnung aufweist (Abbildung 3.26). Dieses Verhalten zeigen die Schrauben aller Lieferanten. Auch im Konditionierungszustand raumfeucht ist dieses Phänomen in abgeschwächter Form zu beobachten.

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.1.3.2 beschriebenen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen konnte der Dehnungsweg s der Schrauben während des Belastungsvorganges verfolgt werden. Bildung des Differenzenquotienten liefert die Dehnungsgeschwindigkeit v :

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.17)$$

In den Abbildungen 3.27 bis 3.29 wurde exemplarisch für drei unterschiedliche Fallhöhen bzw. Aufprallgeschwindigkeiten der geglättete (über jeweils 5 Messpunkte gemittelt) Dehnungsweg s und die geglättete Dehnungsgeschwindigkeit v über der Zeit t aufgetragen.

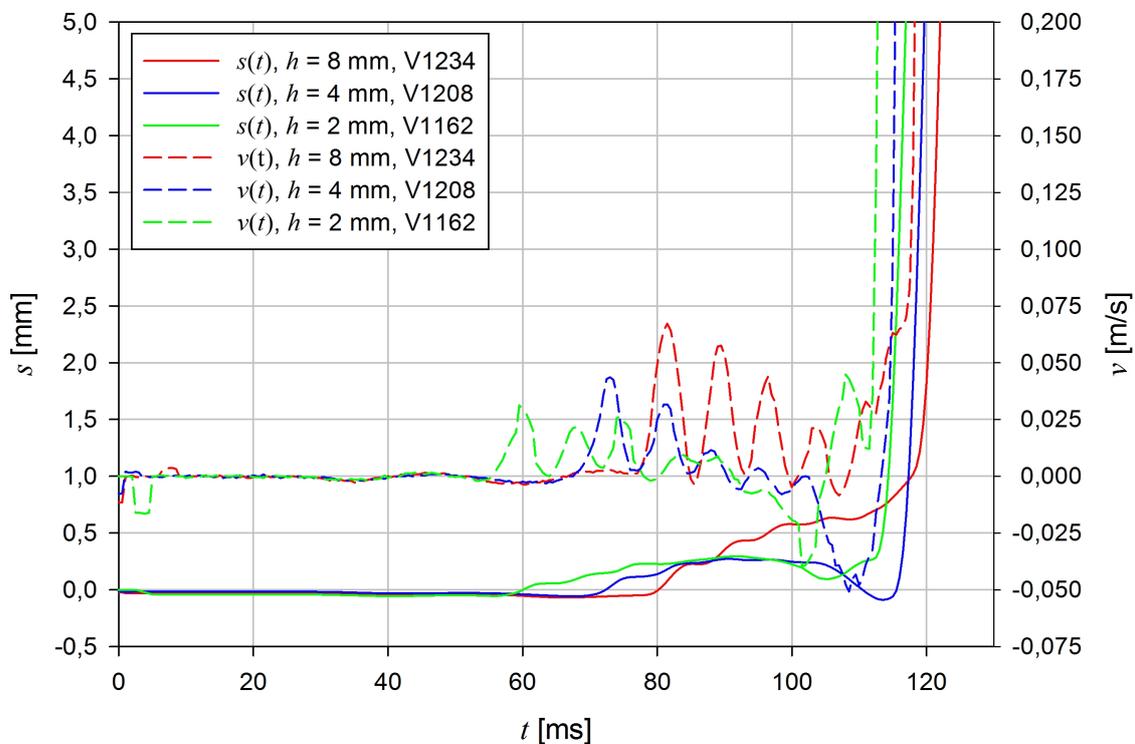


Abbildung 3.27: Dehnungsweg-Zeit- und Dehnungsgeschwindigkeit-Zeit-Verläufe für drei Versuche mit unterschiedlicher Fallhöhe. Konditionierungszustand: trocken.

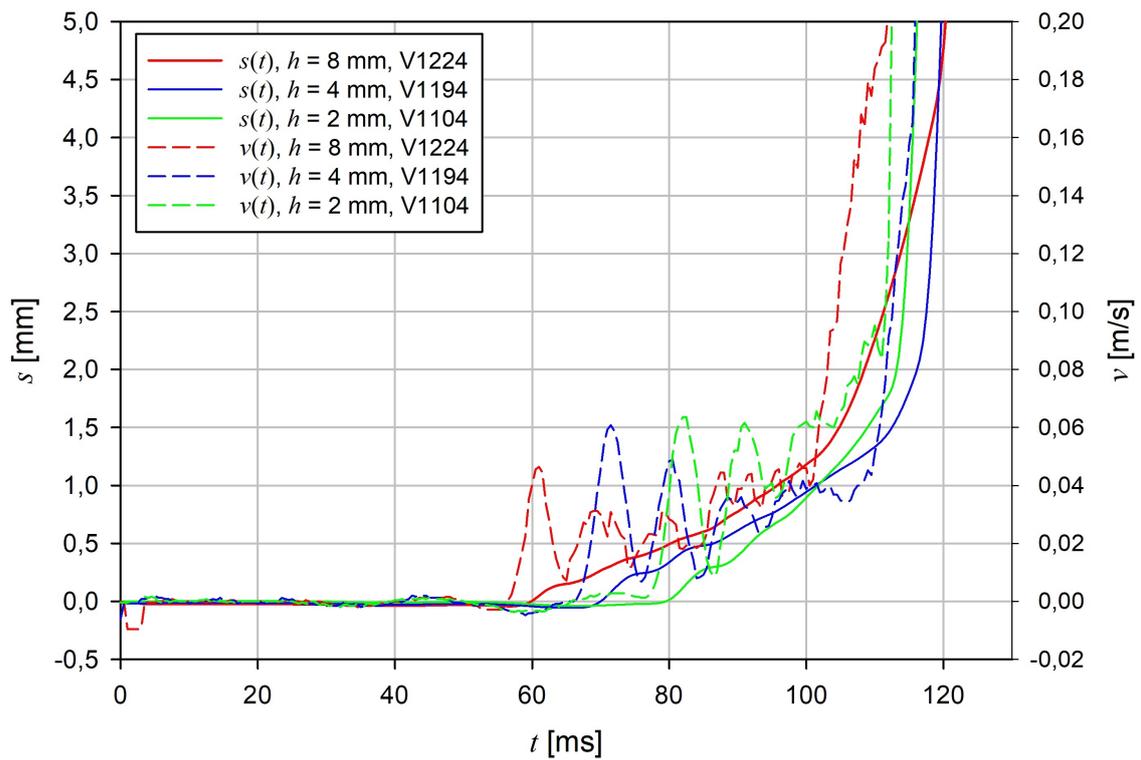


Abbildung 3.28: Dehnungsweg-Zeit- und Dehnungsgeschwindigkeit-Zeit-Verläufe für drei Versuche mit unterschiedlicher Fallhöhe. Konditionierungszustand: raumfeucht.

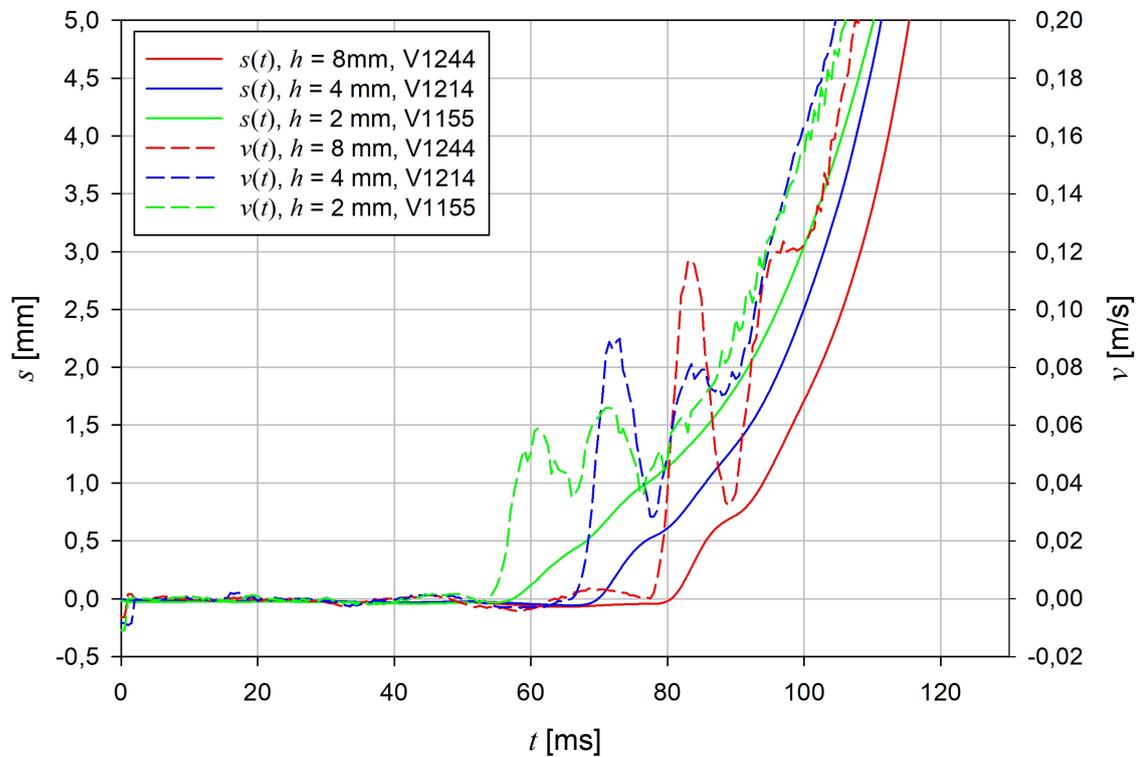


Abbildung 3.29: Dehnungsweg-Zeit- und Dehnungsgeschwindigkeit-Zeit-Verläufe für drei Versuche mit unterschiedlicher Fallhöhe. Konditionierungszustand: gesättigt.

Aus allen drei Diagrammen ist ersichtlich, dass die Dehnungsgeschwindigkeit nicht konstant ist, sondern wellenförmig bis zum Schraubenbruch verläuft. Bei feuchten Schrauben ist diesen Wellen eine monoton steigende Dehnungsgeschwindigkeit überlagert, die mit der Materialfeuchte wächst. Diese Geschwindigkeitswellen spiegeln sich auch im Dehnungsweg wieder, der eine leichte Treppenform aufweist.

Die Amplitude der Geschwindigkeitswellen wächst mit der Fallhöhe h bzw. der Aufprallgeschwindigkeit v_A und ist im zeitlichen Verlauf gedämpft. Der Dämpfungsgrad wächst mit der Materialfeuchte. Die Frequenz fällt mit der Materialfeuchte.

Das Auftreten der Schwingungen in v setzt Schwingungen in der Schraubenbelastung voraus. Letztgenannte sind in den gemessenen Zeit-Belastungsverläufen auch zu erkennen, jedoch nicht in dieser Deutlichkeit. Obendrein sind sie mit Störsignalen der Kraftmessdose überlagert.

3.4.3 Diskussion

3.4.3.1 Interpretation und kritische Betrachtung der Messergebnisse

Konstruktionsbedingt ist bei der verwendeten Versuchsanordnung die Belastung der Polyamidschrauben mit einem sauber definierten Kraftverlauf nicht möglich. Die Bewegungsenergie der herabfallenden Masse wird über einen sich stauchenden Gummidämpfer auf die eingespannte Polyamidschraube übertragen, die selbst elastisch ist und nachgibt. Gummidämpfer und Polyamidschraube stellen während der elastischen Verformung der Schraube näherungsweise zwei gekoppelte Federn dar, die unterschiedlichen Kraft-Weg-Gesetzen gehorchen. Das System aus Masse, Gummidämpfer, Prüfvorrichtung und Schraube wird deshalb während des Schraubenbelastungsvorganges in Schwingungen versetzt, weshalb die komplizierten Dehnungsgeschwindigkeit-Zeit- bzw. Belastungs-Zeit-Verläufe aus den Abbildungen 3.27 bis 3.29 entstehen. Da die Steifigkeit des Schraubenmaterials mit zunehmender Materialfeuchte abnimmt (vergl. Abschätzung des E -Modul in Abbildung 3.21) wird folglich auch die „Federkonstante“ der Polyamidschraube kleiner. Dadurch wird die Frequenz kleiner und die Dämpfung größer bei steigender Materialfeuchte.

Bei der in Sektion 3.2 dargelegten Entwicklung linearer und nichtlinearer Belastungsverläufe wurden anstelle von Polyamidschrauben Stahlschrauben verwendet, weshalb dabei keine komplizierten Schwingungsvorgänge beobachtet wurden. Im Übrigen wurde dabei keine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt weshalb die in Sektion 3.4 erreichte hohe Messempfindlichkeit nicht zur Verfügung stand.

Die in Abschnitt 3.4.2 dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass eine konstante Belastungsanstiegsgeschwindigkeit der Schrauben mit der verwendeten Versuchsanordnung nicht generiert werden können. Die erzeugten Belastungsverläufe entsprechen nicht denjenigen, wie sie bei Staubexplosionen auf die Verschlusschrauben von Explosionsklappen wirken. Bei einer Staubexplosion steigt durch die im entsprechenden Zeitfenster stattfindende kontinuierliche Verbrennung der Überdruck und damit die Schraubenbelastung monoton an. Wie sich dieses unterschiedliche Belastungsverhalten auf die Materialeigenschaften der Schrauben auswirkt, ist mit der verwendeten Versuchsanordnung nicht untersuchbar.

Die in dieser Sektion untersuchten Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten decken, bedingt durch die apparativen Grenzen der Versuchsanlage, nur einen kleinen Teil der Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten ab, die bei Staubexplosionen auftreten können. Für den untersuchten Bereich wurde kein Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf das Bruchverhalten von Polyamidschrauben festgestellt. Eine generalisierte Aussage, ob die Bruchlast von Polyamidschrauben von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit abhängt, kann folglich nicht getroffen werden.

3.4.3.2 Konsequenz

Da aufgrund von Schwingungen im System der Belastungs-Zeit-Verlauf auf Polyamidschrauben nicht dem Belastungs-Zeit-Verlauf entspricht, wie er auftritt wenn Polyamidschrauben zum Verschließen von Explosionsklappen eingesetzt werden, ist die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Versuchsanlage für die Erreichung der gesetzten Ziele nicht geeignet. Darüber hinaus kann mit dieser Versuchsanlage nur ein kleiner Teil des real auftretenden Belastungsanstiegsintervalls untersucht werden.

Die genannten Schwierigkeiten lassen sich nur durch den Aufbau einer neuartigen bzw. verbesserten Versuchsanlage beseitigen. Im folgenden Kapitel 4 wird dieser Aufbau erläutert.

Kapitel 4

Entwicklung einer Versuchsapparatur

In der VDI-Richtlinie 2221 [24] wird ein generalisiertes Vorgehen zur Lösung von Konstruktionsaufgaben dargelegt. Dieses teilt den beschriebenen Lösungsprozess in vier Phasen ein.

1. Spezifikationsphase
2. Konzeptphase
3. Gestaltungsphase
4. Ausarbeitungsphase

In der *Spezifikationsphase* wird die Aufgabenstellung formuliert, vervollständigt und präzisiert. Das Ergebnis der Spezifikationsphase ist das Pflichtenheft, das die technische Spezifikation der Aufgabenstellung enthält [26, 24].

In der *Konzeptphase* werden verschiedene Lösungswege für die spezifizierte Aufgabenstellung erarbeitet. Die gefundenen Lösungen werden anhand von aus der Spezifikation resultierenden Kriterien bewertet und miteinander verglichen. Abschließend wird die Entscheidung getroffen, welche der Lösungsansätze im weiteren Vorgehen verfolgt werden [26, 24].

In der *Gestaltungsphase* wird das Ergebnis der Konzeptphase konkretisiert. Es werden technische Lösungen für die Umsetzung des Konzepts erarbeitet. In dieser Phase findet die Dimensionierung und konstruktive Gestaltung der Bauteile statt [26, 24].

In der *Ausarbeitungsphase* wird das gesamte System installiert und in Betrieb genommen. Es werden die technischen Unterlagen zu Inbetriebnahme und Betrieb des entworfenen Systems bereitgestellt [26, 24].

Der Aufbau dieses Kapitels orientiert sich an dem beschriebenen strukturellen Vorgehen nach VDI 2221.

4.1 Spezifikationsphase

Ziel ist es, eine Versuchsapparatur zu realisieren, die es ermöglicht, Polyamidschrauben mit Einhaltung der im Folgenden aufgezeigte Anforderungen zu untersuchen. Eine Übersicht über alle Anforderungen bietet die Anforderungsliste in Tabelle 4.1.

Anforderung	Konkretisierung	Gewichtung
verschiedene t_B	Realisierung von $9 \text{ ms} \leq t_B \leq 2.100 \text{ ms}$	muss
verschiedene Schrauben	Schraubengrößen M4 bis M10	muss
Schwingungsfreiheit	schwingungsfreier Belastungsanstieg	muss
Messtechnik	Kraft, Weg, Dehnung dynamisch messbar	muss
Messdatenerfassung	automatisierte Datenerfassung	muss
Sicherheit	für Anwender und Umwelt sicher	muss
Abschaltmechanismus	bei Nichtversagen der Schraube	muss
Kosten	geringe Investitionskosten	soll
Kosten	Verwendung vorhandener Komponenten	soll
Schraubenwechsel	schneller Ein- und Ausbau der Schrauben	soll
Bedienung	einfache Bedienung der Versuchsanlage	soll
Konstruktion	einfach und fertigungsgerecht	soll
Montierbarkeit	schnell und einfach	soll
Werkstoffe	verschleiß- und wartungsarm	soll
t_B -Bereich	einfache Erweiterung des t_B -Bereichs	soll
zeitnahe Realisierung	Inbetriebnahme sobald wie möglich	soll

Tabelle 4.1: Liste der Anforderungen an die zu entwickelnde Versuchsanlage.

4.1.1 Anforderung Belastungsdauer

Die Heftigkeit mit der Staubexplosionen ablaufen hängt in erster Linie von der Geometrie des Behälters und der explosionstechnischen Kenngrößen K_{St} -Wert ab. Wie bereits in den Sektionen 3.2 und 3.4 ausgeführt wurde, kann der statische Ansprechdruck einer Explosionsschutzeinrichtung bereits in rund 9 ms oder erst in ca. 2.100 ms erreicht werden. Die Zeitspanne zwischen Explosionszündung und Erreichen des statischen Ansprechdrucks entspricht der Belastungsdauer t_B . Die genannten Werte stellen gewissermaßen die äußeren Grenzen des Belastungsdauerspektrums dar, so dass auch alle Werte dazwischen auftreten können. Zur Charakterisierung des Bruchverhaltens von Polyamidschrauben soll der gesamte Bereich von Belastungsdauern untersucht werden.

4.1.2 Anforderung verschiedene Schrauben

In der Praxis werden zum Verschließen von Explosionsklappen Polyamidschrauben im Größenbereich M4 bis M10 eingesetzt. Mit der in dieser Arbeit verwendeten Versuchsanlage können nur Schrauben bis zur Größe M6 untersucht werden. Um sicherzustellen, dass die mit der aufzubauenden Versuchsanlage erzielten Erkenntnisse für alle oben genannten Schraubengrößen gelten, muss es möglich sein, Polyamidschrauben der Größen M4 bis M10 untersuchen zu können. Dabei sollen verschiedene Feuchtigkeiten der Schrauben (Zustände trocken bis gesättigt) miteinbezogen werden.

4.1.3 Anforderung Schwingungsfreiheit

Wie in Abschnitt 3.4.2 gezeigt, erzeugt die bisher verwendete Versuchsapparatur eine Belastungs-Zeit-Kurve, die mit Schwingungen überlagert ist. Weil solche Belastungs-Zeit-Kurven nicht der Situation bei Explosionsklappenverschlusschrauben entsprechen, soll eine Versuchsapparatur realisiert werden, die monoton steigende Belastungs-Zeit-Kurven generieren kann.

4.1.4 Anforderung Messtechnik

Mit der neuen Versuchsapparatur soll es möglich sein, die an der Schraube angreifende Kraft sowie den Dehnungsweg in Abhängigkeit der Zeit zu messen. Die Messdatenerfassung soll automatisiert erfolgen. Die Daten sollen mit einem Computer auf Festplatten gesichert und anschließend automatisiert ausgewertet werden können.

4.1.5 Anforderung Sicherheit

Die Versuchsapparatur soll weder für den Anwender noch für Mensch und Umwelt eine Gefährdung darstellen. Es sollen Mechanismen vorhanden sein, die bei einer unvorhergesehenen Situation ein gefahrloses Abschalten der Apparatur sicherstellen. Bei einem Nicht-Versagen der untersuchten Schraube sollen keine Schäden an der Versuchsapparatur entstehen.

4.1.6 sonstige Anforderungen

Um ein im Vorfeld festgelegtes Budget nicht zu überschreiten, soll kostenbewusst beschafft sowie nach Möglichkeit bereits vorhandene Ausrüstung in die Versuchsapparatur integriert werden.

4.2 Konzeptphase

Nach der Spezifikation der Anforderungen konnte mit der Entwicklung von Lösungskonzepten begonnen werden. Dafür wurde die Gesamtfunktionalität zunächst in Funktionseinheiten untergliedert. Für die verschiedenen Funktionseinheiten wurden anschließend Lösungskonzepte erarbeitet. Es wurden Ansätze aufgegriffen und solange verfolgt bis eine Umsetzung realistisch oder unrealistisch erschien bzw. ein besserer Ansatz gefunden wurde. Anhand der verschiedenen Konzepte für die Funktionseinheiten wurde letztendlich ein Gesamtkonzept für die Versuchsapparatur erstellt [26].

4.2.1 Einteilung in Funktionseinheiten

Das Gesamtkonzept wurde in folgende Funktionseinheiten unterteilt:

1. Der **Antrieb** liefert die für die Deformation der Schraube notwendige Kraft bzw. Belastung. Letztere muss möglichst stetig sein. Der Antrieb muss die geforderten Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten, die sich aus den Belastungsdauern in Tabelle 4.1 ergeben, generieren können.
2. Die **Prüfvorrichtung** soll die Schraube spielfrei und mit einstellbarer Vorspannung fixieren und dabei eine geführte Einleitung der Kraft in die Schraube ermöglichen. Es soll ausreichend Platz für Messtechnik und Sensoren zur Verfügung stehen und gleichzeitig ein unkomplizierter Ein- und Ausbau der Schraube möglich sein.
3. Die **Messtechnik** soll die an der Schraube anliegende Belastung sowie die Dehnung der Schraube im zeitlichen Verlauf erfassen.

4.2.2 Konzeptionierung des Antriebs

Zur Konzeptionierung des Antriebs wurde eine umfangreiche Recherche durchgeführt. Dabei wurden auch fertige Apparaturen ausfindig gemacht, mit denen die geplanten Versuche prinzipiell durchgeführt werden könnten. Die Beschaffung dieser Apparaturen sprengt aber das vorgegebene Budget bei Weitem. Die aufgefundenen Apparaturen werden im folgenden mit Blick auf ihr Antriebssystem gemeinsam mit einem eigenen Konzept vorgestellt.

4.2.2.1 Servo-hydraulische Schnellzerreißmaschine

Die zu untersuchende Schraube wird an der einen Seite an einem fest montierten Spannkopf mit integrierter DMS-Kraftmessdose und an der anderen Seite an der Kolbenstange des Antriebskolbens befestigt (Abbildung 4.1). Vor dem Antriebskolben befindet

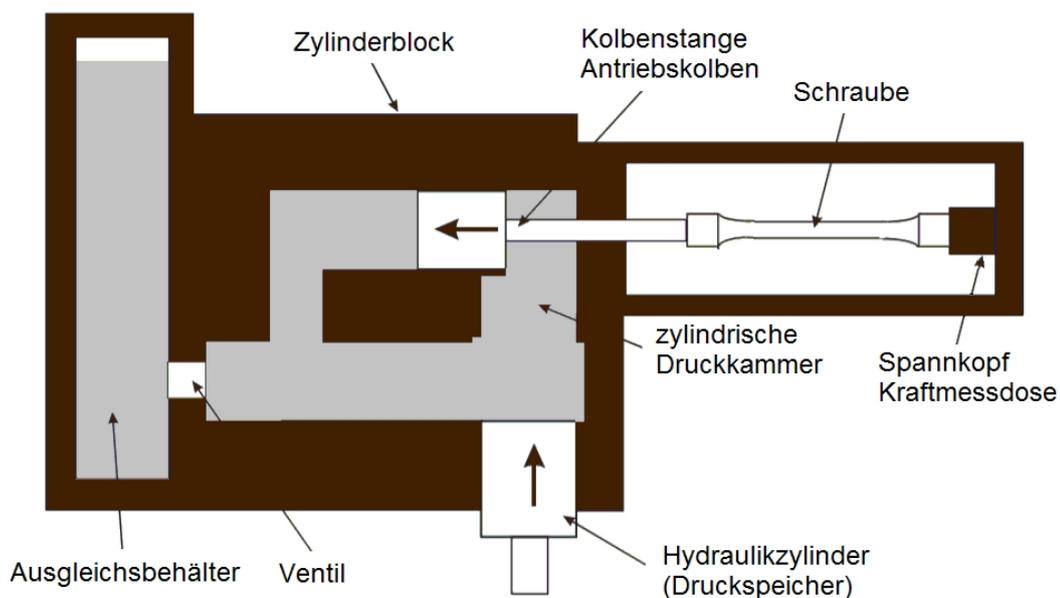


Abbildung 4.1: Prinzipskizze der hydraulischen Schnellzerreißmaschine [12].

sich eine Druckkammer, in deren Verlängerung ein Hydraulikzylinder liegt. Wird ein externer Druckspeicher geöffnet, so wird der Kolben des Hydraulikzylinders beschleunigt, dringt in die Druckkammer ein und versperrt diese. Das dadurch verdrängte Öl treibt den Antriebskolben an, dabei wird der Schraubenkörper belastet [12].

4.2.2.2 Servo-hydraulische Prüfmaschine

Servo-hydraulische Zugprüfmaschinen sind gebräuchlich für das Prüfen von Kunststoffen bei hohen Zuggeschwindigkeiten. Für die Versuche wird ein Spannwerkzeug verwendet, das eine Vorbeschleunigung des Kolbens ermöglicht. Am Ende der Beschleunigung koppelt das Spannwerkzeug in ein Widerlager ein. Die Schraube wird mit möglichst konstanter Geschwindigkeit belastet. Die Kraftmessung erfolgt oftmals mit Hilfe von piezo-elektrischen Kraftaufnehmern wie z. B. Kraftmessdosen. Für die Dehnungsmessung ist der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera oder die Verwendung eines optischen Extensometers üblich [11, 12].

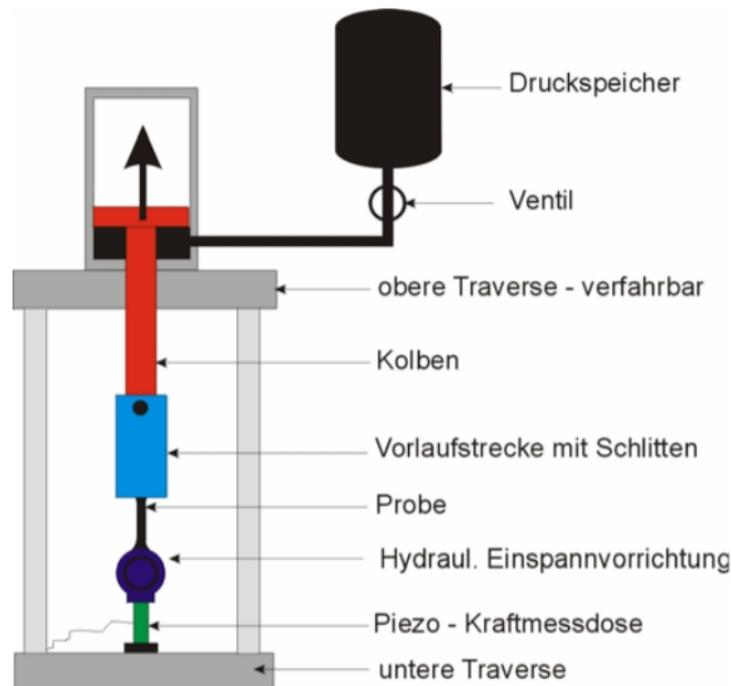


Abbildung 4.2: Schematisierter Aufbau einer servo-hydraulischen Prüfmaschine [12].

4.2.2.3 Elektromechanischer Antrieb

Mit einem Elektromotor mit Frequenzumrichter wird eine Gewindespindel angetrieben (Abbildung 4.3). Auf der Gewindespindel läuft ein Schlitten, der durch Schienen geführt wird. Beim Versuchsstart wird der Schlitten durch die Drehung der Spindel vorgetrieben. Über eine spezielle Prüfvorrichtung wird die zu untersuchende Schraube belastet. Abhängig von der Drehrichtung des Motors bzw. der Spindel und der Bauweise der Prüfvorrichtung wird die Schraube auf Druck oder Zug belastet. Die

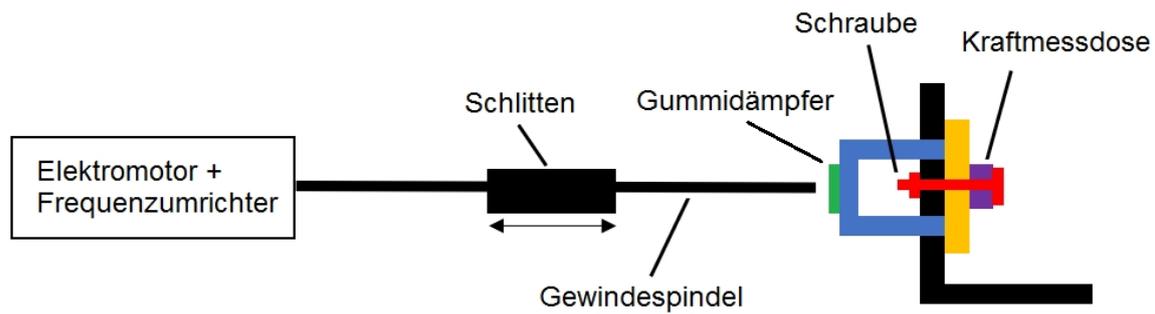


Abbildung 4.3: Schematisierter Aufbau einer elektromechanisch angetriebenen Versuchsanordnung.

Kraftmessung kann beispielsweise mit einer piezo-elektrischen Kraftmessdose erfolgen. Für die Dehnungsmessung können z. B. kapazitive Sensoren, Laser-Sensoren oder eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet werden.

4.2.2.4 Konzeptauswahl

Aufgrund der vergleichsweise einfachen konstruktiven Umsetzbarkeit, der möglichen Verwendung von vorhandenen Ressourcen sowie der bestehenden Budgetlimitierung wurde der elektromechanische Antrieb als umzusetzendes Konzept gewählt.

4.2.3 Konzeptionierung der Prüfvorrichtung

Da im Anwendungsfall Explosionsklappenverschluss Schrauben stets auf Zug belastet sind, wurde die Bewegungsrichtung des Schlittens (Abbildung 4.3) so gewählt, dass die in der Prüfvorrichtung untergebrachte Schraube ebenfalls auf Zug belastet wird. Das hat zur Folge, dass der in der Abbildung schematisch dargestellte Schlitten sich während eines Versuches nach rechts bewegt. Ein weiterer Vorteil dieser Bewegungsrichtung ist, dass eine Kollision zwischen Schlitten und Motor verhindert wird.

4.2.3.1 Einfach geführte Prüfvorrichtung

Ein spezielles Bauteil, im folgenden Kraftübertragung genannt, besteht aus drei Säulen, die mit ihren Stirnseiten fest auf einer Platte sitzen (Abbildung 4.4). Auf der anderen Seite der Platte ist ein Gummidämpfer fixiert. Die Säulen greifen gleitgelagert durch dafür vorgesehene Bohrungen in einem Haltebock hindurch. Der Haltebock wird nachfolgend als Führung bezeichnet. Die Kraftübertragung, welche die Kraft vom angetriebenen Schlitten auf eine bewegliche Platte und damit auf die Schraube überträgt, ist durch die Führung einfach geführt, was bedeutet, dass alle drei Säulendurchgriffe in einer Ebene liegen. Die zu untersuchende Schraube mit Stahlmutter, eine horizontal bewegliche Stahlplatte sowie eine Kraftmessdose bilden die Einspannvorrichtung. Diese ist mit der Führung spielfrei verbunden wenn eine zu untersuchende Schraube eingebaut ist. Trifft der Schlitten auf die Kraftübertragung wird dadurch die Schraube auf Zug belastet.

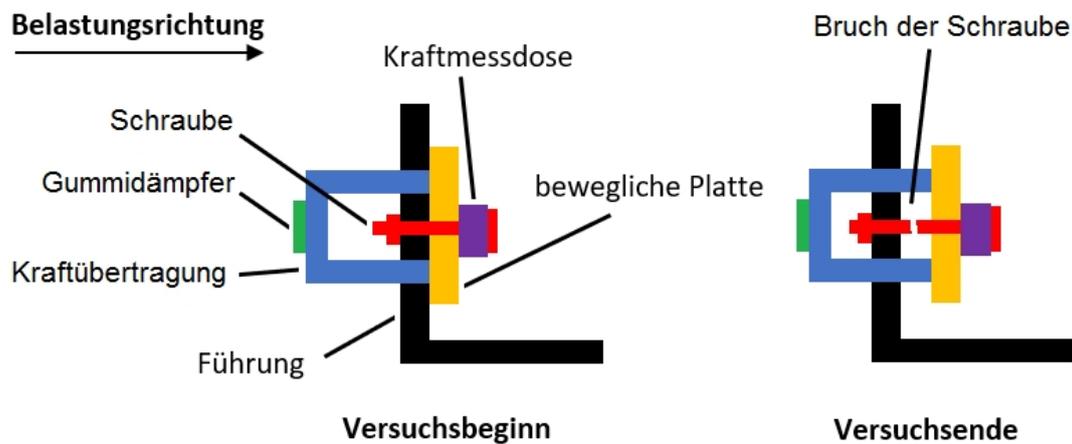


Abbildung 4.4: Prinzipskizze der Prüfvorrichtung mit einfacher Führung.

4.2.3.2 Zweifach geführte Prüfvorrichtung

Die Anordnung der Komponenten ist identisch zu Abschnitt 4.2.3.1. Die Führung der Prüfvorrichtung ist jedoch zweifach vorhanden. Das führt zu einer besseren Stabilität der gesamten Anordnung sowie zu einer verbesserten Führung des Systems. Die Säulen der Kraftübertragung sind dadurch im Vergleich zur Variante aus Abschnitt 4.2.3.1 länger.

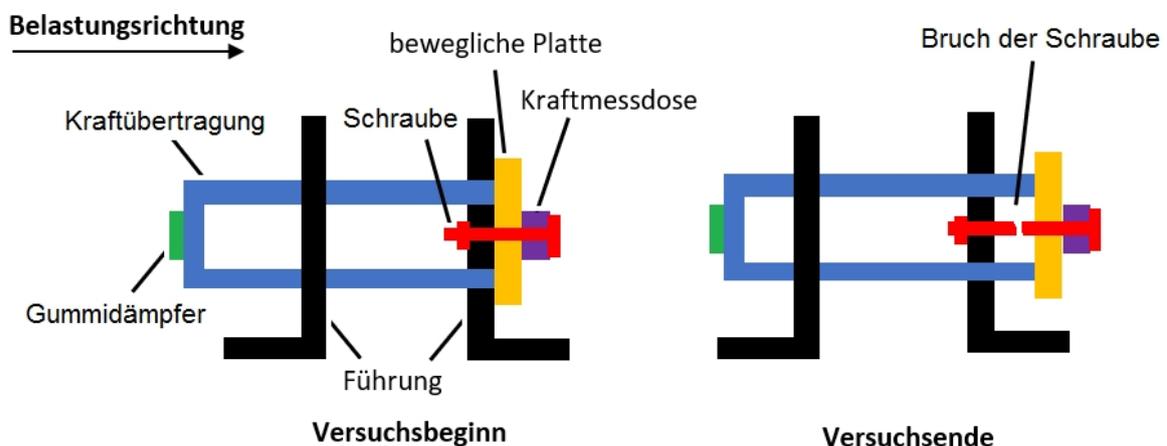


Abbildung 4.5: Prinzipskizze der Prüfvorrichtung mit zweifacher Führung.

4.2.3.3 Konzeptauswahl

Die doppelte Führung in Abschnitt 4.2.3.2 verhindert eine Verkantung der Kraftübertragung bei Belastung durch den Schlitten. Das Gewicht der Prüfvorrichtung ist gleichmäßig auf zwei Halterungen verteilt. Die doppelte Führung sorgt für eine hohe Stabilität der gesamten Anordnung. Aus diesen Gründen wurde das Konzept der zweifach geführten Prüfvorrichtung gewählt.

4.2.4 Konzeptionierung der Messtechnik

4.2.4.1 Kraftmessung mit einer Piezo-Kraftmessdose

Zur Messung der an der Schraube anliegenden Kraft bzw. Belastung bietet sich eine Kraftmessdose mit Ladungsverstärker an. Alternativ könnten zur Messung auch DMS-Streifen oder Federkörper verwendet werden. Da eine geeignete Kraftmessdose mit Peripherie bereits vorhanden ist, deren Handhabung im Vergleich zu anderen Messmethoden einfach und bereits bekannt ist, wird diese in die Versuchsanordnung integriert (Abbildungen 4.3 bis 4.5).

4.2.4.2 Dehnungsmessung

4.2.4.2.1 Dehnungsmessung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera

Zur Messung des Dehnungsweges der Schraube kann eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet werden. Wie bereits bei der Versuchsanordnung Variante 2 (Abschnitt 3.1.3.2) wird dabei auf die Führung und die bewegliche Platte jeweils eine Markierung aufgebracht. Mit einem Bildverarbeitungsprogramm kann der zurückgelegte Weg der beweglichen Platte bestimmt werden. Aus diesen Daten wird die Dehnung der Schraube berechnet.

4.2.4.2.2 Dehnungsmessung mit einem induktiven Positionssensor

An der Prüfvorrichtung wird ein induktiver Positionssensor angebracht der den zurückgelegten Weg der beweglichen Platte misst. Mit einem Ladungsverstärker und Oszilloskop wird das Signal ausgelesen und in den entsprechenden Weg umgerechnet.

4.2.4.2.3 Dehnungsmessung mit Lasersensor

Die Bewegung der beweglichen Platte wird mit einem entsprechend montierten Lasersensor gemessen. Das erhaltene Spannungssignal wird in einen Weg umgerechnet.

4.2.4.2.4 Konzeptauswahl

Aufgrund des vergleichsweise großen Aufwandes der Bildverarbeitung, des hohen Speicherbedarfs für erzeugte Videodateien und des apparativen Aufwandes wurde das Konzept der Dehnungsmessung mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera zunächst verworfen. Obwohl eine Hochgeschwindigkeitskamera bereits vorhanden ist, steht diese nur selten zur Verfügung weil die Kamera sehr häufig auf dem Versuchsgelände in Kappelrodeck benötigt wird. Die Beschaffung einer zweiten Hochgeschwindigkeitskamera ist wegen des limitierten Budgets nicht möglich. Aus genannten Gründen wird deshalb das Konzept mit Positionssensor weiter verfolgt.

4.2.5 Gesamtkonzept

Zur Übersicht über alle Lösungsansätze wurde ein morphologischer Kasten erstellt. Die gewählten Lösungen sind durch grau hinterlegte Zellen gekennzeichnet (Tabelle 4.2). Aus den gewählten Einzelkomponenten der jeweiligen Funktionseinheiten wurde ein Gesamtkonzept für die geplante Versuchsapparatur erstellt. Dieses beschreibt den strukturellen Aufbau der Versuchsapparatur und ist in Abbildung 4.6 als Skizze dargestellt.

Funktionseinheit	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3
Antrieb	servo-hydraulisch 1	servo-hydraulisch 2	elektromechanisch
Prüfvorrichtung	einfach geführt	zweifach geführt	–
Messtechnik	KMD + Kamera	KMD + Positonsen.	KMD + Lasersen.

Tabelle 4.2: Morphologischer Kasten nach [24]. Die Abkürzung KMD steht für Kraftmessdose.

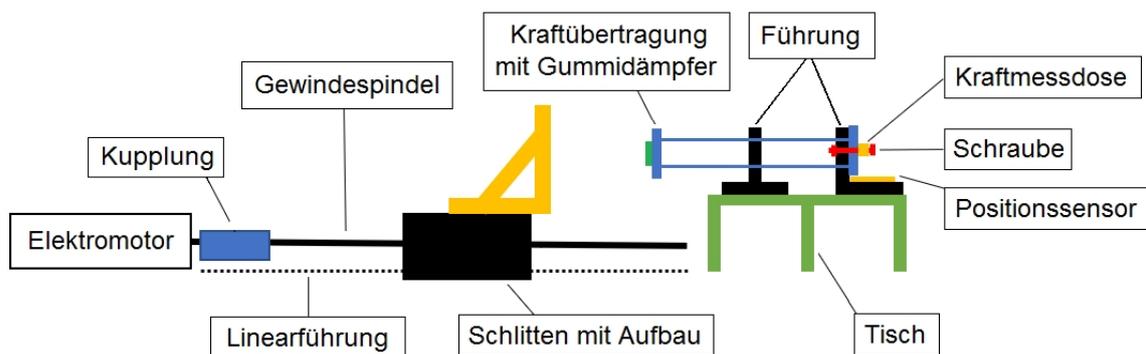


Abbildung 4.6: Skizze des Gesamtkonzepts.

4.3 Gestaltungsphase

In der Gestaltungsphase wird das Gesamtkonzept konkretisiert. Hierzu gehören die Auslegung und konstruktive Umsetzung von Bauteilen sowie die Auswahl und Beschaffung nicht vorhandener Komponenten. Die Bearbeitungsreihenfolge orientiert sich am Aufbau der Versuchsapparatur. Die tatsächliche Auslegung der Komponenten konnte oft nicht getrennt voneinander bearbeitet werden, da gegenseitige Abhängigkeiten vorhanden sind. Die Gestaltung einiger Komponenten erfolgte parallel.

Um einen sicheren Betrieb der Versuchsapparatur zu gewährleisten, wurden bei der Auslegung der Komponenten Sicherheitsfaktoren einbezogen. Diese sollen Ungenauigkeiten bei der Belastung und Abweichungen vom Berechnungsmodell ausgleichen. Sicherheitsfaktoren werden individuell nach Art der Belastung festgelegt. Für Neukonstruktionen gilt als Sicherheitsfaktor $K \geq 1,5$. Im Rahmen dieser Arbeit wird hauptsächlich mit dem praxisüblichen Sicherheitsfaktor $K = 2,0$ gearbeitet [24, 26].

4.3.1 Auslegung des Antriebs

Der Antrieb ist ein System aus Elektromotor, Gewindespindel und Schlitten mit Führung. Die Auslegung des Elektromotors hat stets Auswirkungen auf die Eigenschaften der Gewindespindel.

4.3.1.1 Auslegung des Elektromotors

Zur Auslegung des Elektromotors wird auf die Ergebnisse der Sektion 3.2 zurückgegriffen. Dort wurde erarbeitet, dass lineare Belastungsanstiege bzw. konstante Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten für die Schraubenbelastung verwendet werden können. Darüber hinaus wurde die Bandbreite der auftretenden Druckanstiegsgeschwindigkeiten bis zum Erreichen des statischen Ansprechdrucks ermittelt. Aus diesen Ergebnissen wird im folgenden die notwendige Motorspezifikation herausgearbeitet:

Die zeitliche Ableitung von Gleichung 3.4

$$\frac{dF}{dt} = \frac{A_E \cdot r_S}{n \cdot r_1} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (4.1)$$

stellt einen Zusammenhang zwischen Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und Druckanstiegsgeschwindigkeit her. Unter der Annahme einer einzigen ($n = 1$), unelastischen Explosionsklappenverschlusschraube (worst case) liefern die Daten aus Tabelle 3.1 und Abbildung 3.8, eingesetzt in (4.1), eine Bandbreite der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit von

$$2.334 \text{ N/s} \leq \frac{dF}{dt} \leq 754.920 \text{ N/s} \quad (4.2)$$

Berücksichtigt man zusätzlich einen Sicherheitsfaktor $K = 2$, so folgt aus (4.2)

$$1.167 \text{ N/s} \leq \frac{dF}{dt} \leq 1.509.840 \text{ N/s} \quad (4.3)$$

Diese Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten müssen mit der aufzubauenden Versuchsanlage mindestens erreicht werden.

Belastet der Schlitten die Kraftübertragung über einen zylindrischen Gummidämpfer, hängen die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und die Schlittengeschwindigkeit v_S über

$$\frac{dF}{dt} = k_F \cdot v_S \quad (4.4)$$

zusammen wenn k_F wieder für die Federkonstante des Gummidämpfers steht. Folglich kann über die beiden Parameter k_F und v_S eine gewünschte Belastungsanstiegsgeschwindigkeit erzeugt werden. In Tabelle 4.3 sind Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten aufgelistet, die mit Federkonstanten handelsüblicher zylindrische Gummidämpfer und verschiedenen, angenommenen Schlittengeschwindigkeiten mit Hilfe von (4.4) berechnet wurden. Der Vergleich der Zahlen aus der Tabelle mit (4.3) zeigt, dass eine Schlittengeschwindigkeit im Bereich von

$$0,01 \text{ m/s} < v_S < 2,0 \text{ m/s} \quad (4.5)$$

k_F [N/m] \ v_S [m/s]	0,01	0,1	1,0	2,0	3,0
35.000	350	3.500	35.000	70.000	$1,05 \cdot 10^5$
$1,0 \cdot 10^5$	1.000	10.000	$1,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^5$
$2,5 \cdot 10^5$	2.500	25.000	$2,5 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^5$
$5,0 \cdot 10^5$	5.000	50.000	$5,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$
$7,5 \cdot 10^5$	7.500	75.000	$7,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^6$	$2,25 \cdot 10^6$
$1,0 \cdot 10^6$	10.000	$1,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^6$
$1,318 \cdot 10^6$	13.180	$1,318 \cdot 10^5$	$1,318 \cdot 10^6$	$2,636 \cdot 10^6$	$3,954 \cdot 10^6$

Tabelle 4.3: Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten dF/dt in N/s als Funktion der Federkonstante und der Schlittengeschwindigkeit.

ausreichend ist. Mit Hilfe der *Gewindesteigung* G der Gewindespindel und der Schlittengeschwindigkeit v_S kann die benötigte Motordrehzahl ν schließlich aus

$$\nu = \frac{v_S}{G} \quad (4.6)$$

berechnet werden. Die Gewindesteigung wurde dabei mit $G = 0,04$ m angesetzt (Abschnitt 4.3.1.2). Daraus ergibt sich, dass ein Drehzahlbereich von

$$20 \text{ U/min} \leq \nu \leq 2.500 \text{ U/min} \quad (4.7)$$

ausreicht, um die in (4.3) geforderten Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten zu generieren. Durch die Wahlmöglichkeit verschiedener Gummidämpfer ist darüber hinaus noch Kapazität zu höheren Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten hin gegeben.

Das für den Antrieb der Versuchsapparatur aufzubringende Motordrehmoment von $M_A = 29$ Nm resultiert aus der Auslegung der Gewindespindel. Dessen Herleitung wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Das genannte Drehmoment muss für den berechneten Drehzahlbereich stets zu 100 % aufgebracht werden. Das Beschleunigungsverhalten des Motors bestimmt die Länge der Gewindespindel und der Führungsschienen. Um die Versuchsapparatur möglichst kompakt zu halten wird deshalb ein Erreichen der Maximaldrehzahl in weniger als 1 s. gefordert. Weiterhin muss nach dem Bruch der Schraube die komplette Versuchsapparatur schnell und automatisiert zum Stillstand kommen. Dies soll durch eine an den Motor angebrachte Bremse realisiert werden.

Aus einem anderen Projekt war ein Elektromotor, Frequenzumrichter und Computer mit Steuersoftware der Firma Siemens vorhanden. Bis auf den Elektromotor kann diese Ausrüstung verwendet werden wenn wieder ein Motor der Firma Siemens beschafft wird. Deshalb wurde bei Siemens ein Elektromotor mit entsprechender Spezifizierung angefragt. Siemens bot daraufhin zwei Varianten eines geeigneten Elektromotors mit integrierter Bremse an. Ausgewählt wurde auf Grund des geringeren Gewichtes und Preises das Modell „Simotics Motor Type: 1CV3132B“ (Anhang C.2).

4.3.1.2 Auslegung der Gewindespindel und Kupplung

Da mit der Versuchsapparatur Schrauben bis zu einer Größe von M10 untersucht werden sollen, muss der Motor über ein hinreichend großes Drehmoment M_A verfügen. Das benötigte Drehmoment wird über die Bruchlast der Schraube F_B berechnet:

Die Messergebnisse aus Kapitel 3 lieferten als maximale Bruchlast einer M6-Polyamidschraube $F_{B,\max} = 1.900 \text{ N}$. Bezieht man die daraus resultierende Spannung in der Schraube auf den Querschnitt ihres Kerndurchmessers ($D_K = 4,772 \text{ mm}$), gilt:

$$\sigma_{B,\max} = \frac{4 \cdot F_{B,\max}}{\pi \cdot D_K^2} \quad (4.8)$$

Wird diese maximale Bruchspannung als unabhängig von der Schraubengröße angenommen, folgt:

$$\frac{4 \cdot F_{B,\max,M6}}{\pi \cdot D_{K,M6}^2} = \frac{4 \cdot F_{B,\max,M10}}{\pi \cdot D_{K,M10}^2} \quad (4.9)$$

Auflösen nach $F_{B,\max,M10}$ und Einsetzen der Zahlen liefert

$$F_{B,\max,M10} = F_{B,\max,M6} \cdot \frac{D_{K,M10}^2}{D_{K,M6}^2} = 1.900 \text{ N} \cdot \frac{(8,160 \text{ mm})^2}{(4,772 \text{ mm})^2} = 5.556 \text{ N} \quad (4.10)$$

Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors $K = 2$ folgt:

$$F_{B,\max,M10} = 2 \cdot 5.556 = 11.112 \text{ N} \quad (4.11)$$

Um diese Belastung auf die zu untersuchende Schraube ausüben zu können, benötigt die Gewindespindel ein hinreichend großes Drehmoment. Dieses Drehmoment ist abhängig von Gewindesteigung, Spindeldurchmesser, Schmierung, Lastfall, Werkstoffen und Toleranzen [19]. Die Auslegung der Gewindespindel wurde nach Vorgabe von Seiten der FSA vom Lieferanten Dr. Tretter Maschinenelemente durchgeführt. Der Lieferant gab das benötigte Drehmoment mit $M_A = 29 \text{ Nm}$ und die Gewindesteigung mit $G = 0,04 \text{ m}$ an.

Bei dem ausgewählten Konzept sind die Motorwelle und Gewindespindel über eine Kupplung starr miteinander verbunden. Dies hat zur Folge, dass der Schlitten bereits in der Anlaufphase des Motors fortbewegt wird (Abbildung 4.6). Folglich muss bei der Auslegung der Versuchsapparatur genügend Weg einkalkuliert werden, damit der Elektromotor auf die geforderte Drehzahl beschleunigen kann, ohne dass die Schraube bereits belastet wird. Wird eine Beschleunigung auf $\nu = 2.500 \text{ U/min}$ in 1 Sekunde angestrebt und eine lineare Beschleunigung angenommen, ergibt sich mit der daraus resultierenden mittleren Motordrehzahl $\bar{\nu} = 1.250 \text{ U/min}$ für den zurückgelegten Schlittenweg

$$s = \bar{\nu} \cdot t \cdot G = 20,833 \text{ U/s} \cdot 1 \text{ s} \cdot 0,04 \text{ m/U} = 0,833 \text{ m} \quad (4.12)$$

Um ausreichend Sicherheit bei der Beschleunigungsstrecke zu gewährleisten, wird die Gewindelänge auf $l = 1,4 \text{ m}$ festgelegt.

Nach dem Bruch der zu untersuchenden Schraube müssen Motor, Gewindespindel und Schlitten schnell und automatisiert zum Stillstand gebracht werden. Zu diesem Zweck

wird bei einer definierten Position der beweglichen Platte der Prüfvorrichtung (gelb in Abbildung 4.5) mittels des Signals eines Näherungssensors die Stromzufuhr des Motors unterbrochen und die Motorbremse ausgelöst. Um eine Kollision zwischen Schlitten und Prüfvorrichtung bei Versagen der Motorbremse sicher ausschließen zu können, wird die Gewindespindel bis ca. 30 cm vor der Lagerung auf den Kerndurchmesser abgedreht. Die Mutter, welche den Schlitten antreibt, rutscht bei Erreichen dieser Position vom Gewinde der Spindel und verliert den Vortrieb. Wie bereits oben geschildert, wird die Gewindespindel von der Firma Dr. Tretter Maschinenelemente gefertigt. Genannte Firma wählte darüber hinaus eine geeignete Fest-Loslagerkombination („Fest-Stehlagereinheit WBT20-01“ und „Los-Stehlagereinheit WBT20S01“) zur Lagerung der Spindel aus.

Nachdem der Motor sowie die Maße der Gewindespindel festgelegt waren, wurde die Kupplung zur Verbindung beider Komponenten dimensioniert. Sie muss an beide Komponenten passen und in der Lage sein, das vom Motor aufgebraachte Drehmoment verlustfrei zu übertragen. Diese Aufgabe erfüllt die Kupplung „KB4/150-102-N38-N25“ der Firma KBK Antriebstechnik GmbH (Anhang C.3).

4.3.1.3 Auslegung der Führung und des Schlittens

Der Schlitten wird über eine zur Gewindespindel passende Mutter (Abbildung 4.7) angetrieben. Zum Verbinden von Bauteilen mit der Mutter ((3) in Abbildung 4.9) wurde ein Gehäuse (2) konstruiert (Abbildung A.1), in das die Mutter eingeführt wird. Gehäuse und Mutter werden miteinander verschraubt. Auf das Gehäuse wird eine Platte (4) montiert werden, die das Gehäuse mit zwei Führungswagen ((1) und Abbildung 4.8) verbindet. Die Führungswagen bewegen sich jeweils auf einer Schiene (Abbildung 4.8). Die beiden Führungswagen und die Schienen sind Standardteile der Firma Dr. Tretter Maschinenelemente. Die Berechnung der statischen und dynamischen Festigkeiten von Schienen und Wagen wurde von Mitarbeitern der Firma Dr. Tretter Maschinenelemente durchgeführt. Für die Versuchsanordnung wurde das Modell „langer Standardwagen CSLa35H1“ ausgewählt. Die Platte, welche die drei Komponenten (Flanschgehäuse und



Abbildung 4.7: Gewindespindel mit Mutter der Firma Dr. Tretter Maschinenelemente [28].

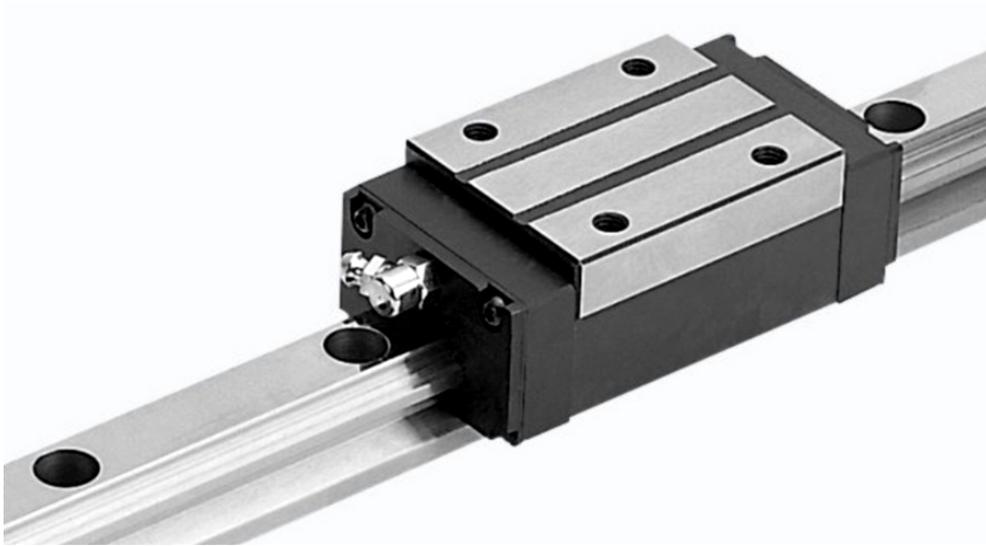


Abbildung 4.8: Langer Standardwagen CSLa35H1 und Schiene der Firma Dr. Tretter Maschinenelemente [28].

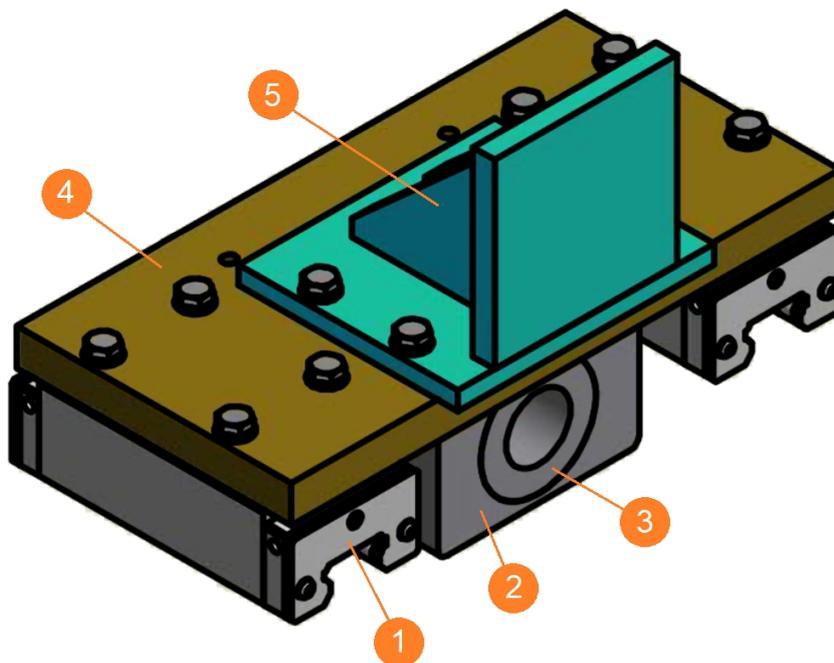


Abbildung 4.9: CAD-Zusammenbau des gesamten Schlittens.

2 Schlitten) verbindet, wurde zu den Bohrungen der Schlitten passend konstruiert (Abbildungen 4.9 und A.2). Darüber hinaus wurde der Aufbau (5) konstruiert (Abbildungen 4.9 und A.3), der auf der Verbindungsplatte montiert werden soll. Dieser Aufbau sorgt für den Kontakt zwischen Schlitten und Prüfvorrichtung. Aus Erfahrungswerten wurde die Materialstärke der Komponenten für den Aufbau zu $c = 12\text{ mm}$ gewählt. Die einzelnen Komponenten des Aufbaus sind miteinander verschweißt.

4.3.2 Auslegung der Prüfvorrichtung

Bei der Konstruktion der Prüfvorrichtung wurde das Funktionsprinzip der bereits vorhandenen Versuchsapparatur (Abschnitt 3.1.1) genutzt und in die horizontale Ebene übertragen. Dabei wird über die Kraftübertragung ((A), (7) und (B) in Abbildung 4.10 und Abbildung A.4) die Belastung auf die untersuchende Schraube übertragen. Die Kraftübertragung besteht aus drei Säulen (7), an deren Enden die zwei Platten (A) und (B) fixiert sind. Auf ein Ende der Säulen sind Gewindebolzen gedreht, die in die vordere Platte (A) eingedreht werden. Im gegenüberliegenden Ende der Säulen befindet sich je ein Gewinde, mit dem die hintere Platte (B) mit Hilfe von Senkkopfschrauben befestigt wird. Die Säulen sind mittels Gleitlagern in der vorderen (8) und hinteren Führung (3) befestigt und so in der Horizontalen in einer definierten Richtung frei beweglich. An der vorderen Platte (A) können verschiedene Gummidämpfer (9) zur Erzeugung unterschiedlicher Belastungsverläufe und Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten montiert werden. Eine Dämpfungsmatte (6) ist obligatorisch und kann hinzugefügt werden, um die Kraftübertragung nach dem Bruch der zu untersuchenden Schraube zusätzlich abzubremsen. Die hintere der beiden Führungen (3) ist mit Versteifungen (C) versehen, um die auf die zu untersuchende Schraube gebrachte Belastung aufzunehmen. Die einzelnen Komponenten der Führungen sind miteinander verschweißt. Die beiden Führungen werden auf eine Grundplatte (2) geschraubt, die wiederum durch Standfüße (1) (Abbildungen 4.10 und A.5) auf einem massiven Tisch befestigt werden. Die Höhe der Standfüße ist so gewählt, dass die Prüfvorrichtung über dem Festlager positioniert ist.

Die Fertigung der Bauteile wurde bei einer Fachwerkstatt in Auftrag gegeben. Als Werkstoff für die Prüfvorrichtung wurde rostfreier Stahl festgelegt.

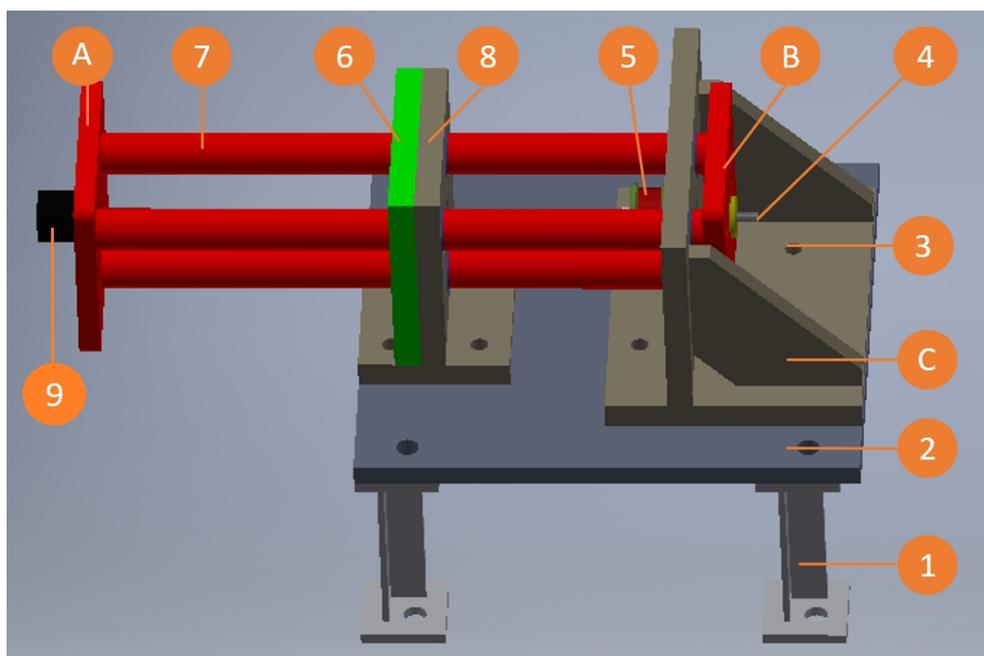


Abbildung 4.10: CAD-Zusammenbau der Prüfvorrichtung [28].

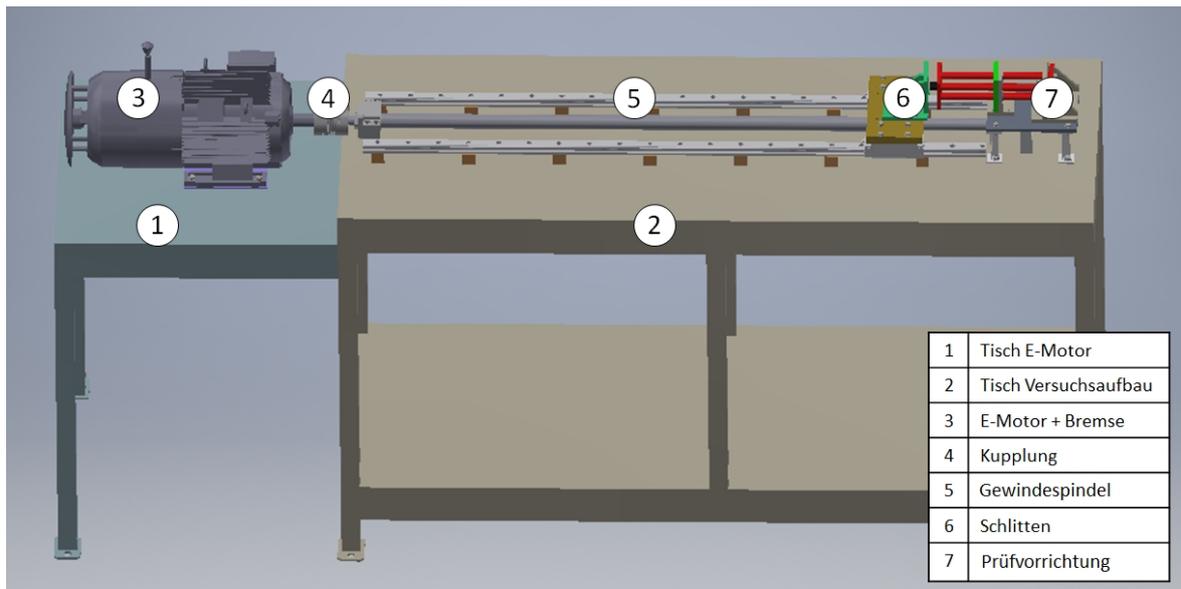


Abbildung 4.11: CAD-Zeichnung des kompletten mechanischen Teils der Versuchsapparatur.

Auf dem Fuß der hinteren Führung (3) wird ein Näherungssensor in definiertem Abstand zur hinteren Platte (B) der Kraftübertragung angebracht. Erreicht die genannte Platte eine vorgegebene Position, gibt der Näherungssensor ein Signal an die Motorsteuerung aus. Daraufhin wird die Stromzufuhr des Motors unterbrochen und die Bremse ausgelöst. Dadurch kommt die gesamte Versuchsapparatur zum Stillstand. Der mechanische Teil der Versuchsapparatur ist in Abbildung 4.11 in Gänze zu sehen.

4.3.3 Auslegung der Messtechnik

Für die Messdatenerfassung wird weitestgehend bereits vorhandene Messtechnik verwendet. Die Messung der Kraft erfolgt mit einer Kraftmessdose. Das Signal wird mit einem Ladungsverstärker der Firma Kistler verstärkt und schließlich mit einem Oszilloskop ausgelesen. Für die Datenerfassung des Positionssensors wird analog vorgegangen.

4.4 Ausarbeitungsphase

Für alle in Sektion 4.3 beschriebenen Bauteile wurden Vergleichsangebote eingeholt und der Lieferant nach den Kriterien bester Preis und kürzeste Lieferzeit ausgewählt. Die Fertigung selbst konstruierter Teile wurde bei der Firma Klaus Rausch Dreherei und Apparatebau in Auftrag gegeben. Die Lieferzeit dieser Bauteile betrug ab Bestelleingang 12 Wochen. Die genannten 12 Wochen verlängerten sich später wegen des Ausfalls der firmeneigenen Fräsmaschine. Aktuell kann von Seiten der Firma Klaus Rausch Dreherei und Apparatebau kein Liefertermin verbindlich genannt werden. Eine Montage und Inbetriebnahme der kompletten Versuchsapparatur konnte deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

Kapitel 5

Diskussion und Ausblick

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Form des Belastungsanstieges, der Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und der Einfluss der Materialfeuchte auf das Bruchverhalten von M6-Polyamidschrauben, die zum Verschließen von Explosionsklappen verwendet werden, untersucht. Hintergrund der Untersuchung ist die Frage, ob mit Polyamidschrauben verschlossene Explosionsklappen tatsächlich reproduzierbare statische bzw. dynamische Ansprechdrücke aufweisen, wie von Anwendern dieser Methode postuliert wird.

Die experimentelle Untersuchung ergab, dass die Form des Belastungsanstieges im Bereich der verwendeten Versuchsparameter keinen statistisch gesicherten Einfluss auf die Bruchlast von Polyamidschrauben hat (Sektion 3.2). Basierend auf diesen Ergebnissen wurden für die weiteren Versuche lineare Belastungsanstiege verwendet, obwohl Polyamidschrauben, die als Verschluss von Explosionsklappen eingesetzt werden, nicht-linearen Belastungsanstiegen ausgesetzt sind.

In Sektion 3.3 wurde herausgearbeitet, dass die Bruchlast und andere Eigenschaften von Polyamidschrauben stark von ihrer Materialfeuchte abhängen. Trockene M6-Polyamidschrauben weisen bei den verwendeten Versuchsparametern im Vergleich zu feuchtigkeitsgesättigten Polyamidschrauben eine um bis zu 34 % höhere Bruchlast und im Vergleich zu raumfeuchten Schrauben eine um bis zu 9 % höhere Bruchlast auf. Die Bruchdehnung dieser Schrauben ist im gesättigten Zustand mit 21,5 % am höchsten und sinkt mit abnehmender Materialfeuchte auf $\varepsilon_B = 14,5\%$ und $\varepsilon_B = 2,8\%$ in den Zuständen raumfeucht und trocken. Der E -Modul der Schrauben sinkt mit abnehmender Materialfeuchte von $E = 5.459$ MPa im Zustand gesättigt über $E = 2.713$ MPa auf $E = 1.398$ Mpa im trockenen Zustand. Polyamidschrauben werden demnach mit abnehmender Materialfeuchte spröder aber belastbarer.

Die in Sektion 3.4 beschriebene Untersuchung zeigte, dass die mit der vorhandenen Versuchsapparatur realisierbare Bandbreite an Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten keine statistisch abgesicherte Auswirkung auf die Bruchlast oder die Bruchdehnung der M6-Polyamidschrauben hat. Da mit der vorhandenen Versuchsapparatur nur ein kleiner

Bereich der in Frage kommenden Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten untersucht werden konnte, war die Beantwortung der Frage nach dem Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf die Schraubenbruchlast nicht abschließend möglich.

Aus genanntem Grund wurde eine Versuchsanlage entwickelt, die eine umfassende Untersuchung des Einflusses der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf die Materialeigenschaften von Polyamidschrauben ermöglicht (Kapitel 4).

Während der experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass ein erheblicher Teil der Polyamidschrauben – unabhängig vom Lieferanten – diverse Fehlstellen im Schraubenkörper aufweist. Diese Fehlstellen schwächen die Schrauben auf unvorhersehbare Weise.

Die genannten Fehlstellen und die nachgewiesene starke Abhängigkeit des Bruchverhaltens von Polyamidschrauben von ihrer Materialfeuchte zeigen, dass die Verwendung von Polyamidschrauben zum Verschließen von Explosionsklappen, um damit einen definierten und reproduzierten statischen bzw. dynamischen Ansprechdruck zu erzielen, negativ zu bewerten ist. Denn wurden bei der obligatorischen EU-Baumusterprüfung einer Explosionsklappe durch Fehlstellen geschwächte Polyamidschrauben verwendet oder waren die Schrauben vor und während der Prüfung Nässe ausgesetzt, brechen die Schrauben bei zu geringem Ansprechdruck. Die Folge ist, dass der Explosionsklappe eine zu hohe Entlastungsfähigkeit bescheinigt wird oder zu viele Polyamidschrauben zum Verschließen der Klappe eingesetzt werden. Werden beim späteren Einsatz der Explosionsklappe als Schutzsystem fehlerfreie und/oder trockene Schrauben verwendet, kann der auftretende reduzierte Explosionsdruck zu hoch ausfallen und die zu schützende Anlage zum Bersten bringen.

Trotz dieses wichtigen Ergebnisses wurden die in Sektion 1.2 definierten Ziele nicht vollständig erreicht. Die Abhängigkeiten der Schraubenbruchlast von der Belastungsanstiegsform und der Materialfeuchte konnten im vorgegebenen Zeitrahmen erfolgreich untersucht werden. Aufgrund der apparativen Grenzen der vorhandenen Versuchsanlage war eine erschöpfende Untersuchung des Einflusses der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf die Schraubenbruchlast nicht möglich.

5.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Versuchsanlage wird montiert und in Betrieb genommen. Nachdem die Funktionalität der Anlage sichergestellt ist, wird die geplante Untersuchung des Bruchverhaltens von Polyamidschrauben in Abhängigkeit von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit durchgeführt.

Darüber hinaus wird mit der neuen Versuchsanlage überprüft, ob in dieser Arbeit erzielte Erkenntnisse reproduziert werden können. Dabei soll auch das in dieser Arbeit aufgestellte Postulat der Unabhängigkeit der Bruchspannung von der Schraubengröße experimentell verifiziert oder widerlegt werden.

Um statistische Aussagen über die Häufigkeit von Fehlstellen in Polyamidschrauben zu erhalten, sollen aussagekräftige Mengen an Proben beschafft und untersucht werden.

Der Einfluss der Temperatur auf die Schraubenbruchlast konnte in dieser Arbeit aufgrund der baulichen Gegebenheiten der Versuchsanlage und dem vorgegebenen Zeit- und Finanzrahmen nicht untersucht werden. Da jedoch zu erwarten ist, dass dieser Einfluss erheblich ist (Abschnitt 2.4.2), sollte nach einer Möglichkeit gesucht werden, auch diesen Parameter mit einzubeziehen.

Da die Polyamidschrauben im Anwendungsfall in den allermeisten Fällen der Witterung ausgesetzt sind, muss auch der Einfluss von UV-Strahlung auf die Schraubenbruchlast untersucht werden. Die Schraubenhersteller geben an, dass UV-Strahlung zum Verspröden des Materials führt. Wenn Verspröden durch UV-Strahlung bedeutet, dass die Bruchlast der Schrauben wächst (wie in Sektion 3.3 beschrieben), wäre dies ein weiteres Argument, das gegen den Einsatz von Polyamidschrauben als Explosionsklappenverschluss spricht.

Dem Einfluss der Feuchtigkeit auf den E -Modul könnte mit Hilfe raster-elektronenmikroskopischer Untersuchungen der Schraubenbruchstellen nachgegangen werden. Aufgrund der Bruchstellencharakteristika sollte es möglich sein, das Bruchverhalten einzuordnen (Spröbruch, duktiler Bruch, Mischbruch, etc.).

Polyamid 6.6 ist ein Thermoplast der vergleichsweise viel Wasser einlagern kann. Da die Feuchtigkeit die Materialeigenschaften von Polyamid deutlich beeinflusst (Sektion 3.3), ist es sinnvoll, Schrauben aus einem Kunststoff zu untersuchen, der eine ähnliche Bruchspannung wie Polyamid 6.6 besitzt, aber deutlich weniger Wasser einlagert.

Um bewerten zu können, ob die starke Dehnfähigkeit feuchtigkeitsgesättigter Polyamidschrauben Auswirkungen auf den statischen bzw. dynamischen Ansprechdruck von Explosionsklappen hat, sollten Versuche an realen Anlagen durchgeführt werden. Letzgenanntes gilt generell, um die im Rahmen dieses Projektes erzielten Erkenntnisse abschließend zu überprüfen.

Für die in Sektion 3.4 beobachteten Schwingungen liegt bislang noch keine exakte mathematisch-physikalische Erklärung vor. Dieser Erklärung könnte vermutlich mit Hilfe der Software „Simulink“ durch die Modellierung eines, aus zwei Federn bestehenden, gekoppelten Schwingungssystems geliefert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] BARGEL, H., SCHULZE, G.: *Werkstoffkunde*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- [2] BARTKNECHT, W.: *Explosionsschutz*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [3] BONTEN, C.: *Bonten – Einführung und Grundlagen*, Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [4] CHUPIN, P.: *Experimentelle Verifizierung von Baumusterprüfungen im Modellmaßstab*, Masterarbeit, Hochschule Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2009.
- [5] DOMININGHAUS, H., ELSNER, P., EYERER, P., HIRTH, T.: *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [6] ECKHOFF, R. K.: *Dust Explosions in the Process Industrie*, Butterworth Heine-
mann, Oxford, 1997.
- [7] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN 14797: Einrichtungen zur
Explosionsdruckentlastung*, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [8] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN 14491: Schutzsysteme zur
Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [9] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und
des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der
Mitgliedsstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Ver-
wendung in explosionsgefährdeten Bereichen*, Amtsblatt der Europäischen Union
L96/309, 57. Jahrgang, EUR-Lex (Internet), 2014.
- [10] GLASER, S., WÜST, A.: *Crashbelastete Bauteile virtuell entwickeln*, Artikel,
Kunststoffe 9/2006 Seite 168 bis 172, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [11] JUNGINGER, M.: *Charakterisierung und Modellierung unverstärkter thermoplas-
tischer Kunststoffe zur numerischen Simulation von Crashvorgängen*, Dissertation,
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr,
2002.

- [12] KEUERLEBER, M.: *Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Kunststoffen bei hohen Dehnraten am Beispiel von PP*, Dissertation, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart, 2006.
- [13] LORENZ, D., OTT, H., SEITHEL, M.: *Untersuchung zur Mechanik von Explosionsklappen und -deckeln beim Entlastungsvorgang*, Abschlussbericht zum Projekt Nr. F-05-9304 der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 1996.
- [14] LORENZ, D.: *ExProtect - A Software Response to Important Questions on Safety in Dust and Gas Explosions*, Proceedings of the 3rd Worldwide Seminar on the Explosion Phenomenon and on the Application of Explosion Protection Techniques in Practice, Ghent, Belgium, 1999.
- [15] LORENZ, D., SCHIEBLER H.: *ExProtect - Ein Programm zur Beantwortung wichtiger Fragen zum angewandten Explosionsschutz*, VDI-Berichte 1601, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [16] LORENZ, D., SCHIEBLER, H.: *ExProtect - Ein Programm zur Beantwortung sicherheitstechnisch relevanter Fragen bei Gas- und Staubexplosionen*, Technische Überwachung, 3, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [17] LORENZ, D., SCHIEBLER, H., SEITHEL, M.: *Entwicklung einer Explosionsklappe ohne Silodeckenaufbauten*, Abschlussbericht zum Projekt Nr. F-05-0301 der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2013.
- [18] LORENZ, D.: *Modellgestützte Optimierung des Schutzsystems Explosionsklappe zur kontrollierten Druckentlastung verfahrenstechnischer Apparate bei Staubexplosionen*, Dissertation in Vorbereitung, Wuppertal, 2019.
- [19] MÜNZINGER, T.: *Auslegung von Kugelgewindetrieben bei oszillierenden Bewegungen und dynamischer Belastung*, Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, 2017.
- [20] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION: *NFPA 68: Guide for Venting of Deflagrations*, Quincy, 2002.
- [21] SCHWARZ, O., RICHTER, F., EBLING, F.: *Kunststoffkunde*, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2016
- [22] STEEN, H.: *Handbuch des Explosionsschutzes*, Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [23] TIPLER, P., MOSCA, G.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2015
- [24] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, Beuth Verlag, Berlin, 1993.

- [25] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [26] WNUK, M.: *Diplomarbeit: Konzeptionierung, Entwicklung und Aufbau eines automatisierten Versuchsstandes zur widerstandsbasierten Regelung von Formgedächtnisaktoren*, Diplomarbeit, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2017.
- [27] TMK ZERSpanungSTECHNIK GMBH: *Datenblatt Polyamid 6 Guss (PA 6 G)*, Produktdatenblatt, URL: <https://www.tmk-zerspanungstechnik.de>, (abgerufen am 12.8.2019).
- [28] DR. ERICH TRETTER GMBH:, Homepage, URL: <https://www.tretter.de>, (abgerufen am 15.08.2019.)
- [29] VERPAS, B. V.,: *Technische Information T-4872-17*, Produktdatenblatt, URL: https://www.verpas.de/_clientfiles/productpdf/TechnischeInfo/T-4872-17.pdf, (abgerufen am 5.07.2019).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Eine mit Polyamidschrauben verschlossene Explosionsklappe auf einem Behälter des Testgeländes der BGN/FSA in Kappelrodeck [4].	3
2.1	Abhängigkeit des reduzierten maximalen Explosionsdrucks vom statischen Ansprechdruck bei folgenden Randbedingungen: $V = 10 \text{ m}^3$, $p_{\text{max}} = 9 \text{ bar}$, $L/D = 1$, $A_E = 0,62 \text{ m}^2$, $K_{\text{St}} = 200 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ und $E_f = 65 \%$. 7	7
2.2	Struktur der Makromoleküle und deren Bindungen verschiedener Kunststoffgruppen [5].	9
2.3	Unterteilung der Thermoplaste nach Strukturmerkmalen [5].	10
2.4	Zustandsform und Verarbeitbarkeit von Thermoplasten in Abhängigkeit von der Temperatur [5].	11
2.5	Schematischer Aufbau einer Zugprüfung und Darstellung eines eingespannten Kunststoffprüfkörpers [3].	12
2.6	Typische Spannungs-Dehnungs-Kurven von verschiedenen Thermoplasten [3].	12
2.7	Spannungs-Dehnungs-Kurven von PA 6.6 bei unterschiedlichen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten unter Normbedingungen [10].	14
2.8	Spannungs-Dehnungs-Kurven von PE-HD bei unterschiedlichen Prüftemperaturen [1].	15
3.1	Links: Versuchsanlage Variante 1 mit verwendeter Messtechnik. Rechts: Prüfvorrichtung Variante 1 mit Dämpfer, Kraftmessdose und eingespannter Polyamidschraube.	18
3.2	Links: Versuchsanlage Variante 2 mit Hochgeschwindigkeitskamera und verwendeter Messtechnik. Rechts: Prüfvorrichtung Variante 2 mit verlängertem Weg und Dämpfer, Kraftmessdose und eingespannter Polyamidschraube.	19
3.3	Schematische Darstellung der Messkette der Versuchsanlage Variante 2.	20
3.4	Exemplarischer zeitlicher Belastungs-Verlauf mit Bruch bei einer Schraube aus PA 6.6 der emico-syscomp GmbH.	21

3.5	Screenshots des Bildverarbeitungsprogramm Motion Studio mit Tracking-Punkten. Oben: Zeitpunkt bei Versuchsbeginn. Unten Zeitpunkt während des Bruchvorganges der Schraube.	22
3.6	Exemplarischer zeitlicher Dehnungsverlauf (oben) und Dehnungs-Belastungs-Verlauf (unten) mit Bruch bei einer Schraube aus PA 6.6 der emico-syscomp GmbH.	23
3.7	Skizze einer mit Schrauben verschlossenen Explosionsklappe.	25
3.8	Vergleich des simulierten Druck-Zeit-Verlaufs zweier Staubexplosionen gemäß den Parametern in Tabelle 3.1.	26
3.9	Parabolische Gummidämpfer (links) und Dämpfungsverhalten parabolischer Gummidämpfern der Firma Verpas B. V. (rechts) [29].	28
3.10	Vom Hersteller angegebenes Dämpfungsverhalten des parabolischen Gummidämpfers mit einer Gummihärte von 68 Shore A mit Regressionskurve.	28
3.11	Simulierte Belastungs-Zeit-Verläufe für vier verschiedene Massen bei einer Fallhöhe von 1 mm und einen parabolischen Gummidämpfer mit einer Gummihärte von 68 Shore A.	29
3.12	Vergleich zwischen einem gemessenen Schraubenbelastungsverlauf (parabolischer Dämpfer Typ 010 mit 68 Shore A, $m = 70$ kg, $h = 1$ mm) und einer mit „SIMEK“ erzeugten Druckkurve ($V = 30$ m ³ , $K_{St} = 300$ bar·m/s).	30
3.13	Zylindrische Gummidämpfer.	31
3.14	Simulierte Belastungs-Zeit-Verläufe für drei verschiedene Massen bei einer Fallhöhe von 1 mm und einem zylindrischen Gummidämpfer mit einer Gummihärte von 68 Shore A.	31
3.15	Gemessener Schraubenbelastungsverlauf unter Einsatz des zylindrischen Gummidämpfers Typ 040 mit Shore 68 A bei $m = 80$ kg und $h = 0$ mm.	32
3.16	Nichtlineare Schraubenbelastungsverläufe erzeugt mit zwei verschiedenen parabolischen Gummidämpfern. Angedeutet ist die mittlere und maximale Steigung einer Kurve.	33
3.17	Belastung von M6-Polyamidschrauben mit verschiedenen Belastungsverläufen.	34
3.18	Mittlere Schraubenbruchlasten mit Messunsicherheit in Abhängigkeit von der Form des Belastungsanstieges. Oben: steiler Belastungsanstieg. Unten: flacher Belastungsanstieg.	35
3.19	Oben: Mittlerer Trocknungsverlauf einer M6-Polyamidschraube PA 6.6 durch Trockenschranklagerung bei 60 °C. Unten: Mittlerer Befeuchtungsverlauf einer M6-Polyamidschraube PA 6.6 durch Wasserlagerung bei Raumtemperatur.	37

3.20	Kraft-Zeit-Verläufe sowie Dehnungs-Zeit-Verläufe bei drei Versuchen mit trockenen, raumfeuchten und gesättigten Polyamidschrauben. Markiert sind die Bruchlasten F_B , die Belastungsdauern t_B sowie die Bruchdehnungen ε_B	38
3.21	Spannungs-Dehnungs-Verläufe bei drei Einzelversuchen mit trockenen, raumfeuchten und gesättigten Polyamidschrauben mit abgeleiteten E -Modulen.	39
3.22	Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruchdehnung ε_B von der Materialfeuchte W . Schraubenlieferant: Kunststoffschraube.de.	40
3.23	Fehlstellen in den Polyamidschrauben des Lieferanten Würth.	41
3.24	Zusammenstellung verschiedener Fehlstellen in Polyamidschrauben der Lieferanten Kunststoffschraube.de, Emico und Würth.	42
3.25	Abhängigkeit der Bruchlast F_B , Belastungsdauer t_B sowie Bruchdehnung ε_B von der Aufprallgeschwindigkeit v_A und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit dF/dt . Konditionierungszustand: raumfeucht. Schraubenlieferant: Kunststoffschraube.de.	47
3.26	Dehnungs-Zeit-Verläufe für drei exemplarische Versuche an Polyamidschrauben im Zustand trocken.	47
3.27	Dehnungsweg-Zeit- und Dehnungsgeschwindigkeit-Zeit-Verläufe für drei Versuche mit unterschiedlicher Fallhöhe. Konditionierungszustand: trocken.	48
3.28	Dehnungsweg-Zeit- und Dehnungsgeschwindigkeit-Zeit-Verläufe für drei Versuche mit unterschiedlicher Fallhöhe. Konditionierungszustand: raumfeucht.	49
3.29	Dehnungsweg-Zeit- und Dehnungsgeschwindigkeit-Zeit-Verläufe für drei Versuche mit unterschiedlicher Fallhöhe. Konditionierungszustand: gesättigt.	49
4.1	Prinzipskizze der hydraulischen Schnellzerreißmaschine [12].	55
4.2	Schematisierter Aufbau einer servo-hydraulischen Prüfmaschine [12].	56
4.3	Schematisierter Aufbau einer elektromechanisch angetriebenen Versuchsanlage.	57
4.4	Prinzipskizze der Prüfvorrichtung mit einfacher Führung.	58
4.5	Prinzipskizze der Prüfvorrichtung mit zweifacher Führung.	58
4.6	Skizze des Gesamtkonzepts.	60
4.7	Gewindespindel mit Mutter der Firma Dr. Tretter Maschinenelemente [28].	64
4.8	Langer Standardwagen CSLa35H1 und Schiene der Firma Dr. Tretter Maschinenelemente [28].	65

4.9	CAD-Zusammenbau des gesamten Schlittens.	65
4.10	CAD-Zusammenbau der Prüfvorrichtung [28].	66
4.11	CAD-Zeichnung des kompletten mechanischen Teils der Versuchsa- pparatur.	67
A.1	Zeichnung des Flanschgehäuses.	80
A.2	Zeichnung der Platte auf dem Schlitten.	81
A.3	Zeichnung des Aufbaus auf dem Schlitten.	82
A.4	Zeichnung der Kraftübertragung.	83
A.5	Zeichnung eines Standfußes.	84
A.6	Zeichnung des mechanischen Teils der Versuchsa- pparatur.	85
B.1	Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruch- dehnung ε_B von der Materialfeuchte W . Schraubenlieferant: Emico. . .	88
B.2	Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruch- dehnung ε_B von der Materialfeuchte W . Schraubenlieferant: Würth. . .	88
B.3	Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruch- dehnung ε_B von der Aufprallgeschwindigkeit v_A sowie der Belastungsan- stiegsgeschwindigkeit dF/dt . Konditionierungszustand: trocken. Schrau- benlieferant: Kunststoffschraube.de.	89
B.4	Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruchdehnung ε_B von der Aufprallgeschwindigkeit v_A sowie der Be- lastungsanstiegsgeschwindigkeit dF/dt . Konditionierungszustand: gesät- tigt. Schraubenlieferant: Kunststoffschraube.de.	90
C.1	Datenblatt Polyamid [27].	92

Tabellenverzeichnis

2.1	Tabellarische Übersicht über den Einfluss verschiedener physikalischer Größen auf die Materialeigenschaften σ_B und ε_B von Thermoplasten. . .	16
3.1	In „SIMEK“ verwendete Parameter zur Berechnung der Zeit-Druck-Kurven in Abbildung 3.8. Als statischer Ansprechdruck wurde $p_{\text{stat}} = 0,1$ bar angenommen.	27
3.2	Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses der Form des Belastungsanstiegs.	33
3.3	Mittelwerte der gemessenen Bruchlasten mitsamt Messunsicherheiten. . .	34
3.4	Übersicht über die in dieser Sektion durchgeführten Versuche.	38
3.5	Tabellarische Übersicht über die Ergebnisse zum Einfluss der Materialfeuchte auf die Eigenschaften von Polyamidschrauben.	41
3.6	Daten zur Berechnung von $p_{\text{red,max}}$ mit Hilfe von „SIMEK“.	43
3.7	Übersicht über die in den Sektionen 3.3 und 3.4 durchgeführten Versuche mit den Polyamidschrauben des Lieferanten Kunststoffschraube.de. Die fallende Masse in der Versuchsanlage betrug durchweg $m = 90$ kg. . .	45
3.8	Übersicht über die Versuchsparameter und Mittelwerte der erzielten Messergebnisse mit Messunsicherheit.	46
4.1	Liste der Anforderungen an die zu entwickelnde Versuchsanlage.	53
4.2	Morphologischer Kasten nach [24]. Die Abkürzung KMD steht für Kraftmessdose.	60
4.3	Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten dF/dt in N/s als Funktion der Federkonstante und der Schlittengeschwindigkeit.	62
B.1	Übersicht über die verwendeten Dämpfer von Heinrich Kippwerk KG. . .	86
B.2	Versuchsplan: Übersicht über alle durchgeführten Versuche.	86
B.3	Nummerierung und Charakterisierung aller durchgeführter Versuche. Bei allen Versuchen betrug die fallende Masse $m = 90$ kg.	87

Anhang A

Zeichnungen

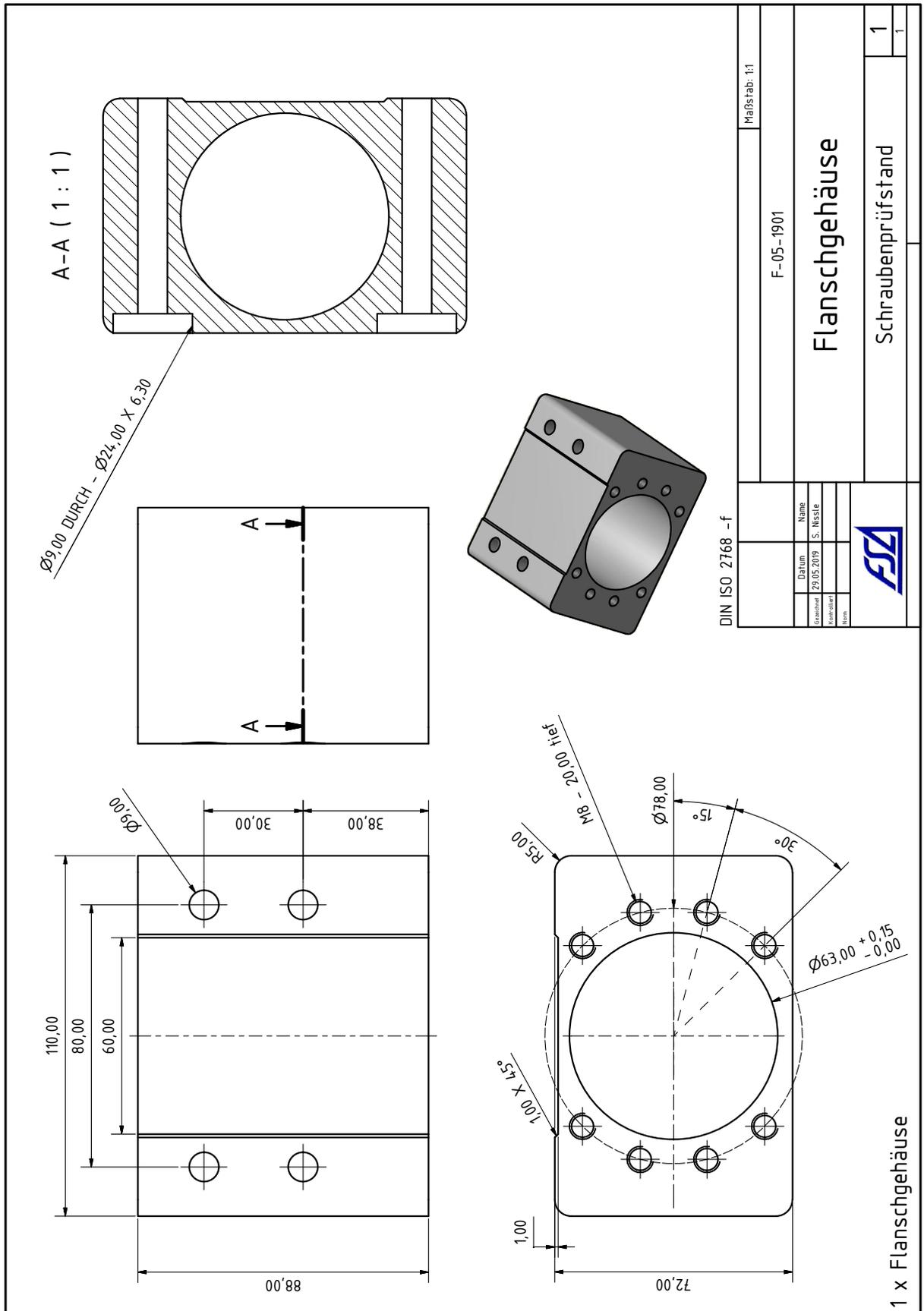


Abbildung A.1: Zeichnung des Flanschgehäuses.

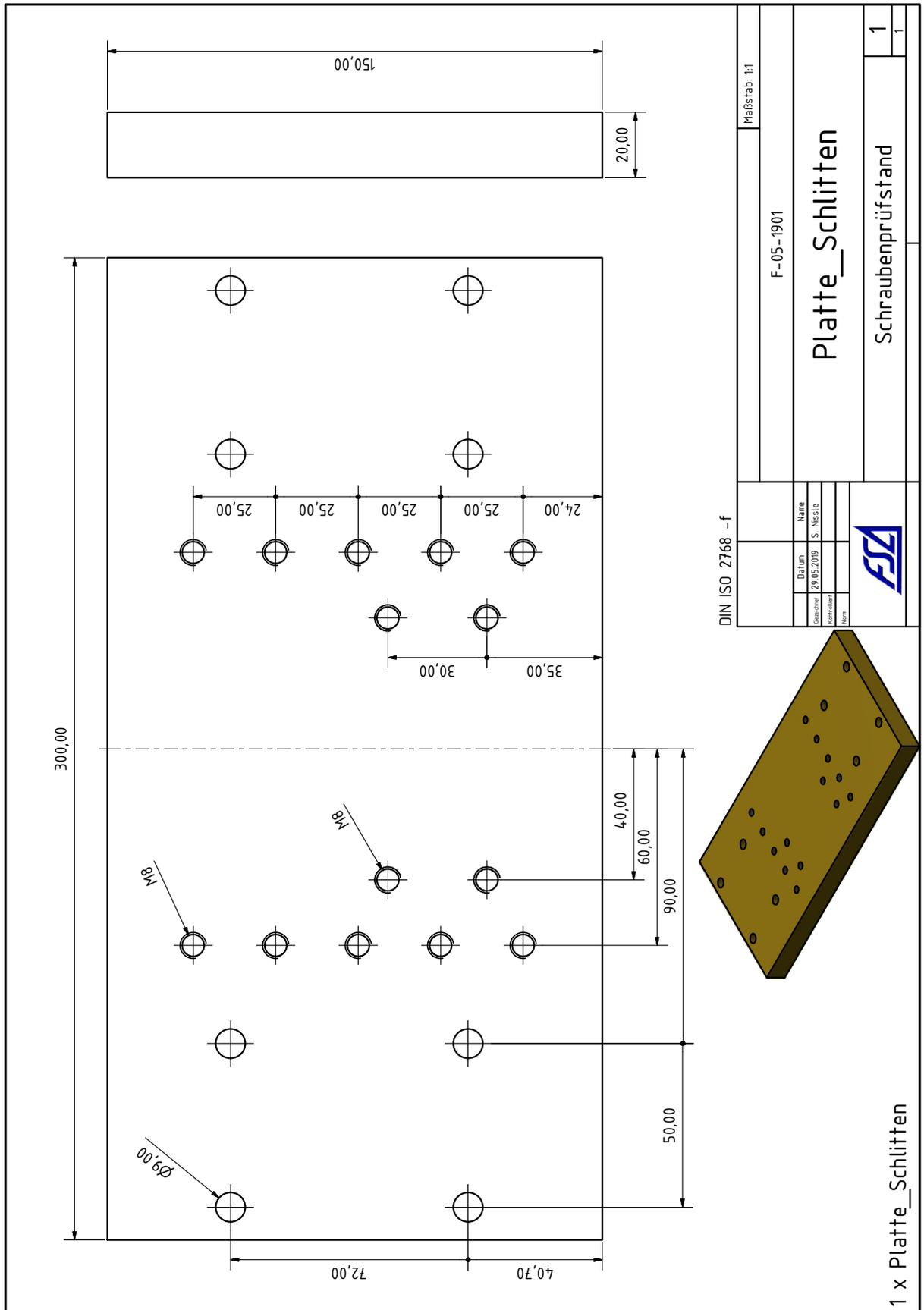


Abbildung A.2: Zeichnung der Platte auf dem Schlitten.

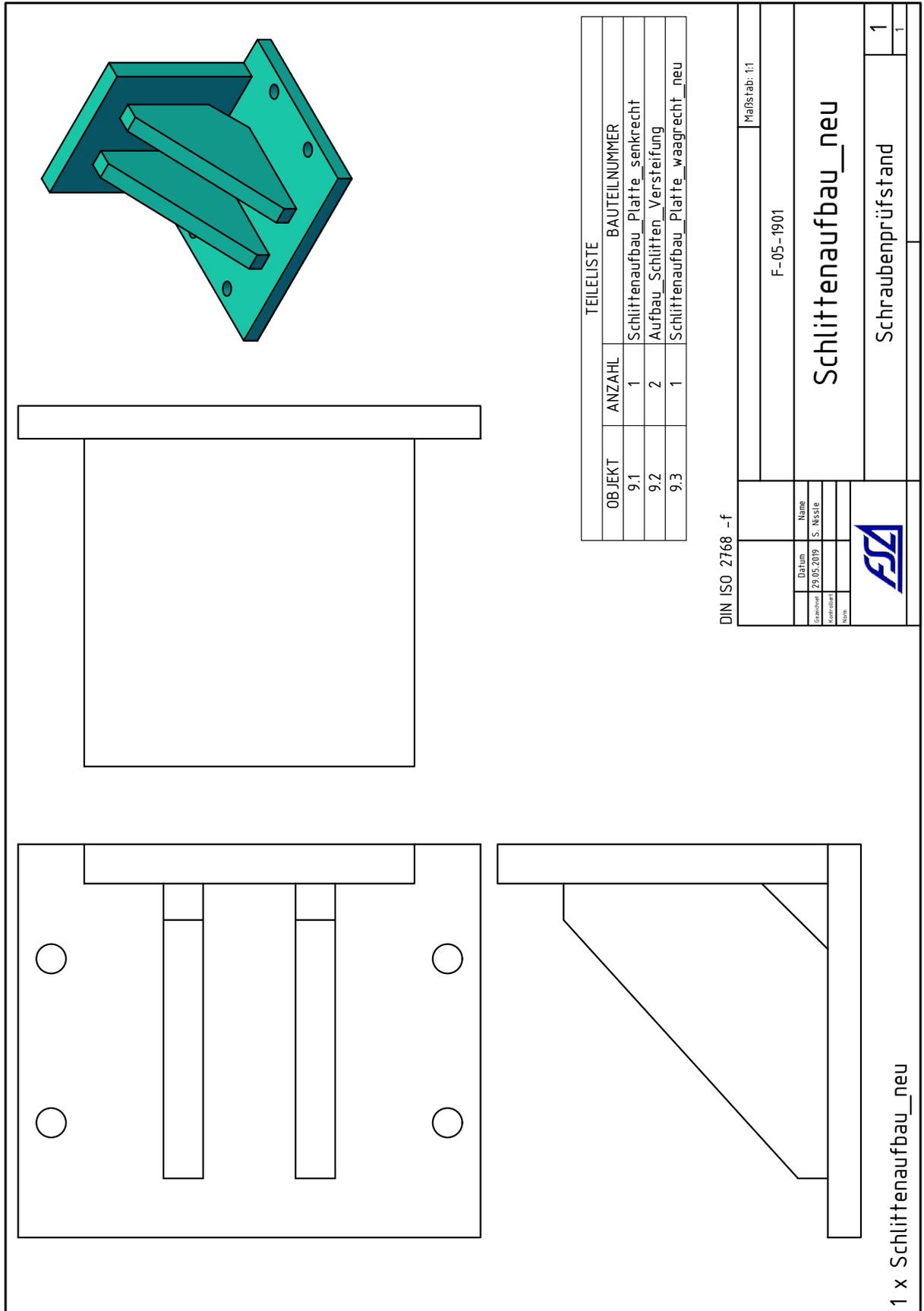
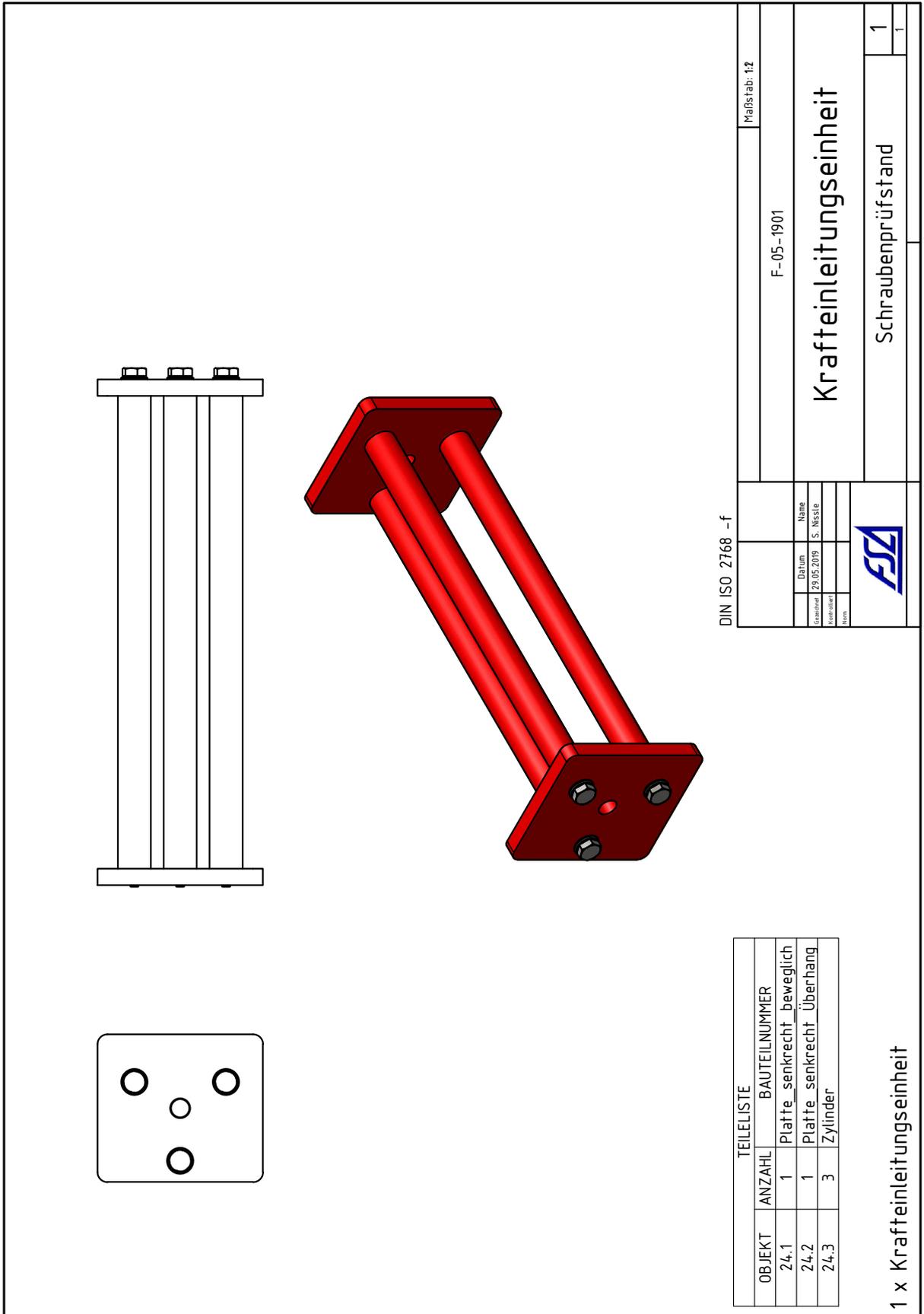


Abbildung A.3: Zeichnung des Aufbaus auf dem Schlitten.



DIN ISO 2768 - f

Maßstab: 1:2	
F-05-1901	
Krafteinleitungseinheit	
Schraubenprüfstand	
1	
1	

TEILELISTE		
OBJEKT	ANZAHL	BAUTEILNUMMER
24.1	1	Platte_senkrecht_beweglich
24.2	1	Platte_senkrecht_Überhang
24.3	3	Zylinder

1 x Krafteinleitungseinheit

Abbildung A.4: Zeichnung der Kraftübertragung.

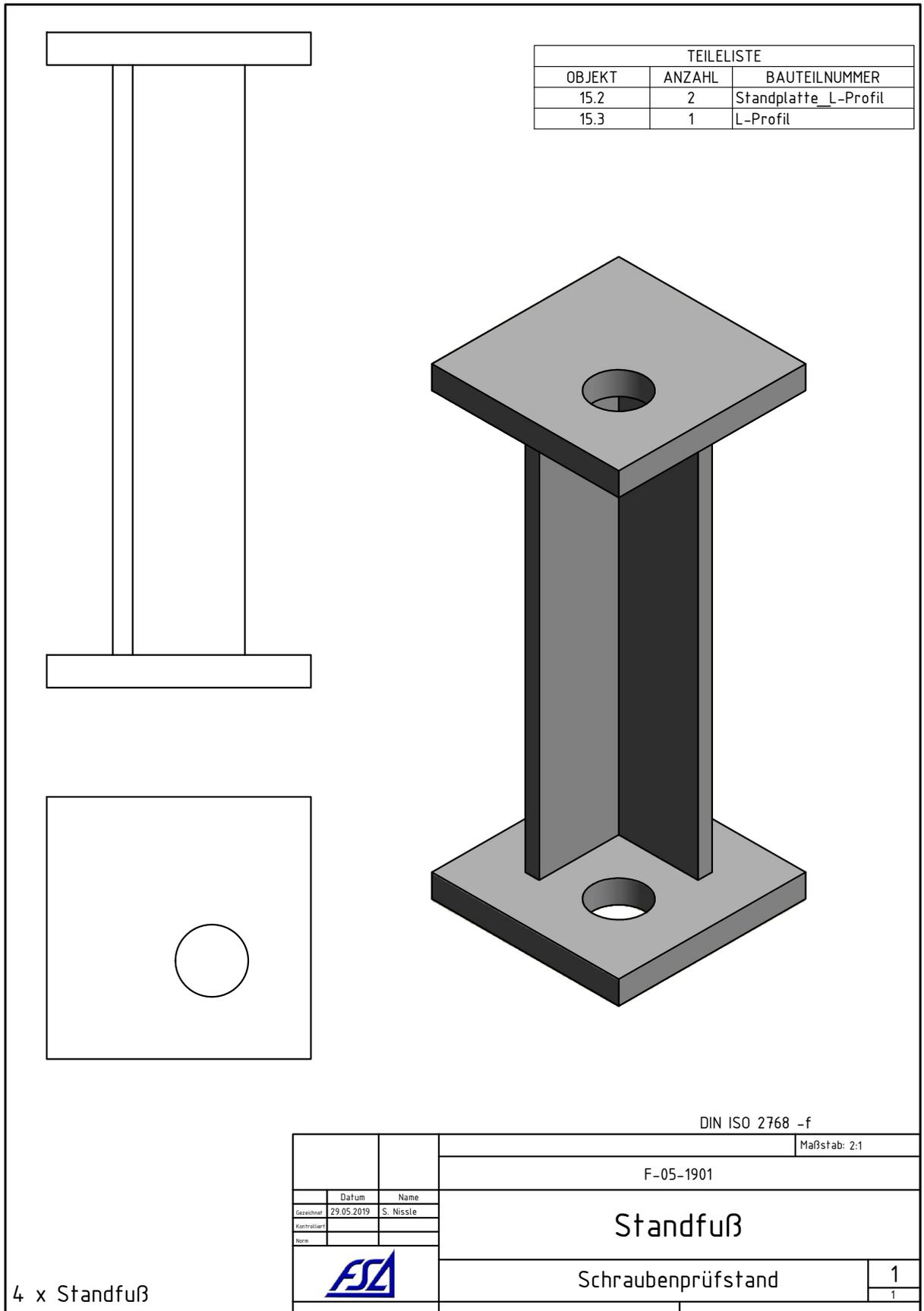


Abbildung A.5: Zeichnung eines Standfußes.

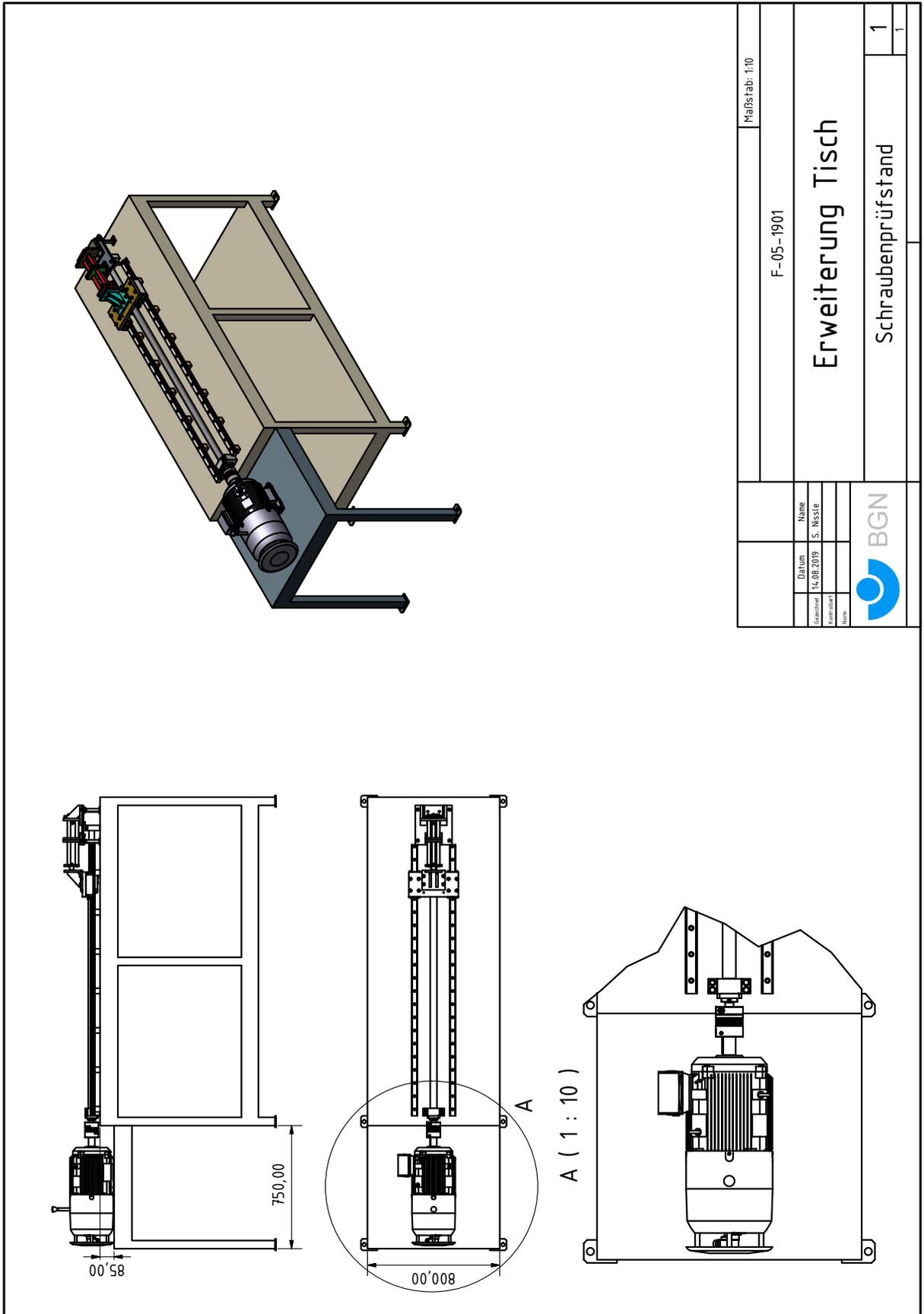


Abbildung A.6: Zeichnung des mechanischen Teils der Versuchsanordnung.

Anhang B

Tabellen und Messergebnisse

Nr.	Bezeichnung	k_F [N/mm]	Härte
10	parabolisch, $H = 36$		
20	parabolisch, $H = 40$		
30	parabolisch, $H = 67$		
40	zylindrisch, $D = 40, H = 28$		55 Shore A
50	zylindrisch, $D = 30, H = 15$	270	55 Shore A
60	zylindrisch, $D = 30, H = 25$	153	55 Shore A
70	zylindrisch, $D = 30, H = 40$	88	55 Shore A
80	zylindrisch, $D = 40, H = 15$	710	55 Shore A
90	zylindrisch, $D = 40, H = 20$	365	55 Shore A
100	zylindrisch, $D = 40, H = 40$	143	55 Shore A

Tabelle B.1: Übersicht über die verwendeten Dämpfer von Heinrich Kippwerk KG.

v_A [m/s]	Zustand	Versuchszahl		
		Würth	Emico	Kunststoffschraube.de
0,198	trocken	10 Versuche	10 Versuche	10 Versuche
0,198	raumfeucht	10 Versuche	10 Versuche	10 Versuche
0,198	gesättigt	10 Versuche	10 Versuche	10 Versuche
0,280	trocken	5 Versuche	5 Versuche	10 Versuche
0,280	raumfeucht	5 Versuche	5 Versuche	10 Versuche
0,280	gesättigt	5 Versuche	5 Versuche	10 Versuche
0,396	trocken	-	-	10 Versuche
0,396	raumfeucht	-	-	10 Versuche
0,396	gesättigt	-	-	10 Versuche

Tabelle B.2: Versuchsplan: Übersicht über alle durchgeführten Versuche.

Versuche	Nr.	h [mm]	Lieferant	Zustand	Datum
V173-V184	10	3	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	20.05.2019
V186-V198	60	4	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	20.05.2019
V199-V217	70	4	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	21.05.2019
V218-V233	Feder	0	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	21.05.2019
V1007-V1019	70	1	Kunststoffschraube.de	gesättigt	12.06.2018
V1021-V1039	70	1	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	13.06.2019
V1040-V1054	70	1	Kunststoffschraube.de	trocken	14.06.2019
V1060-V1063	70	2	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	01.07.2019
V1071-V1073	70	2	Emico	raumfeucht	01.07.2019
V1082-V1084	70	2	Würth	raumfeucht	01.07.2019
V1100-V11009	70	2	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	02.07.2019
V1120-V1129	70	2	Emico	raumfeucht	02.07.2019
V1140-V1149	70	2	Würth	raumfeucht	02.07.2019
V1150-V1159	70	2	Kunststoffschraube.de	gesättigt	03.07.2019
V1160-V1169	70	2	Kunststoffschraube.de	trocken	03.07.2019
V1170-V1174	70	2	Emico	gesättigt	03.07.2019
V1175-V1179	70	2	Würth	gesättigt	03.07.2019
V1180-V1184	70	2	Emico	trocken	03.07.2019
V1185-V1189	70	2	Würth	trocken	03.07.2019
V1190-V1199	70	4	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	04.07.2019
V1200-V1209	70	4	Kunststoffschraube.de	trocken	04.07.2019
V1210-V1219	70	4	Kunststoffschraube.de	gesättigt	04.07.2019
V1220-V1229	70	8	Kunststoffschraube.de	raumfeucht	04.07.2019
V1230-V1239	70	8	Kunststoffschraube.de	trocken	04.07.2019
V1240-V1249	70	8	Kunststoffschraube.de	gesättigt	05.07.2019

Tabelle B.3: Nummerierung und Charakterisierung aller durchgeführter Versuche. Bei allen Versuchen betrug die fallende Masse $m = 90$ kg.

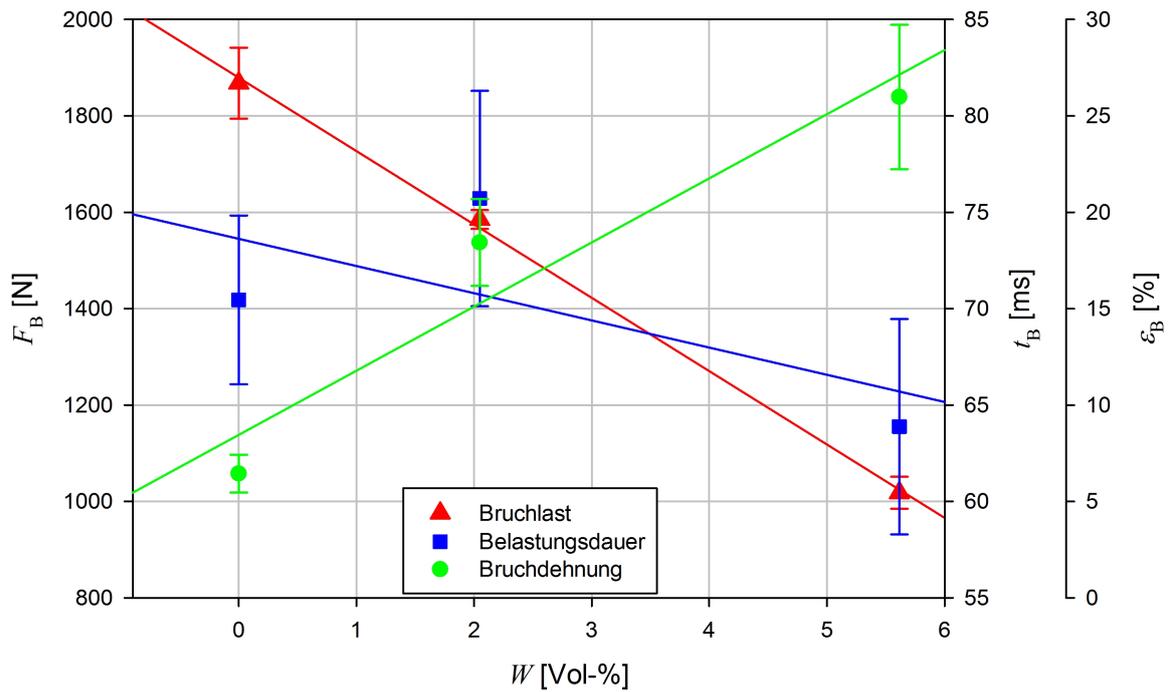


Abbildung B.1: Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruchdehnung ϵ_B von der Materialfeuchte W . Schraubenlieferant: Emico.

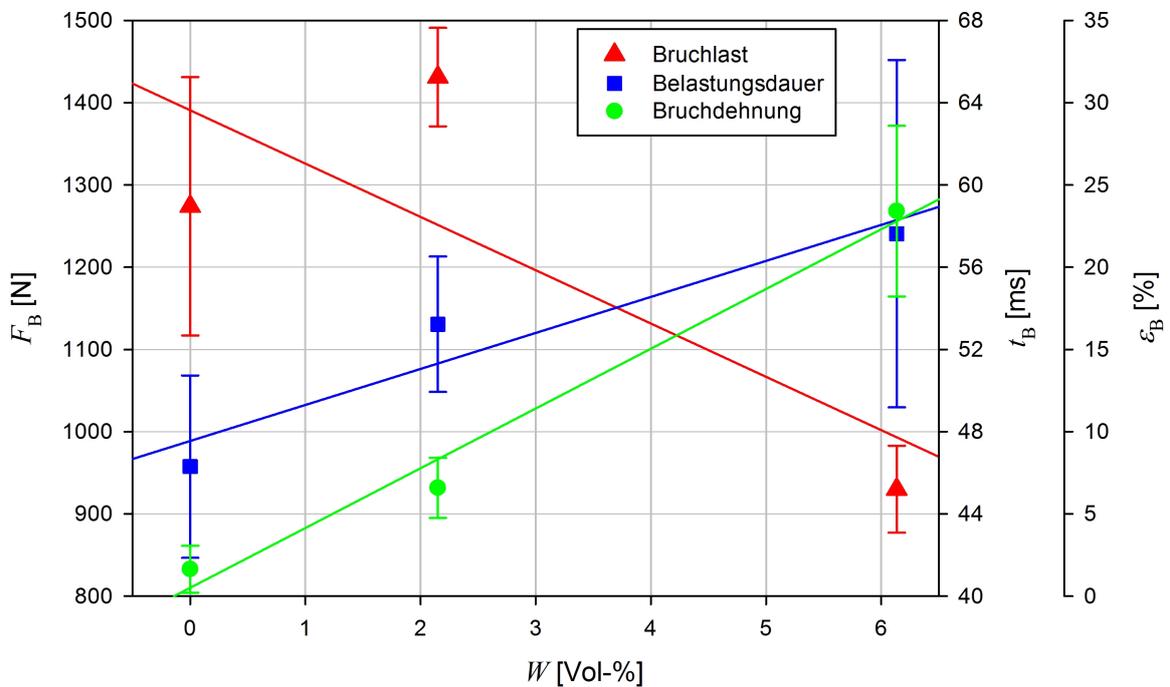


Abbildung B.2: Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruchdehnung ϵ_B von der Materialfeuchte W . Schraubenlieferant: Würth.

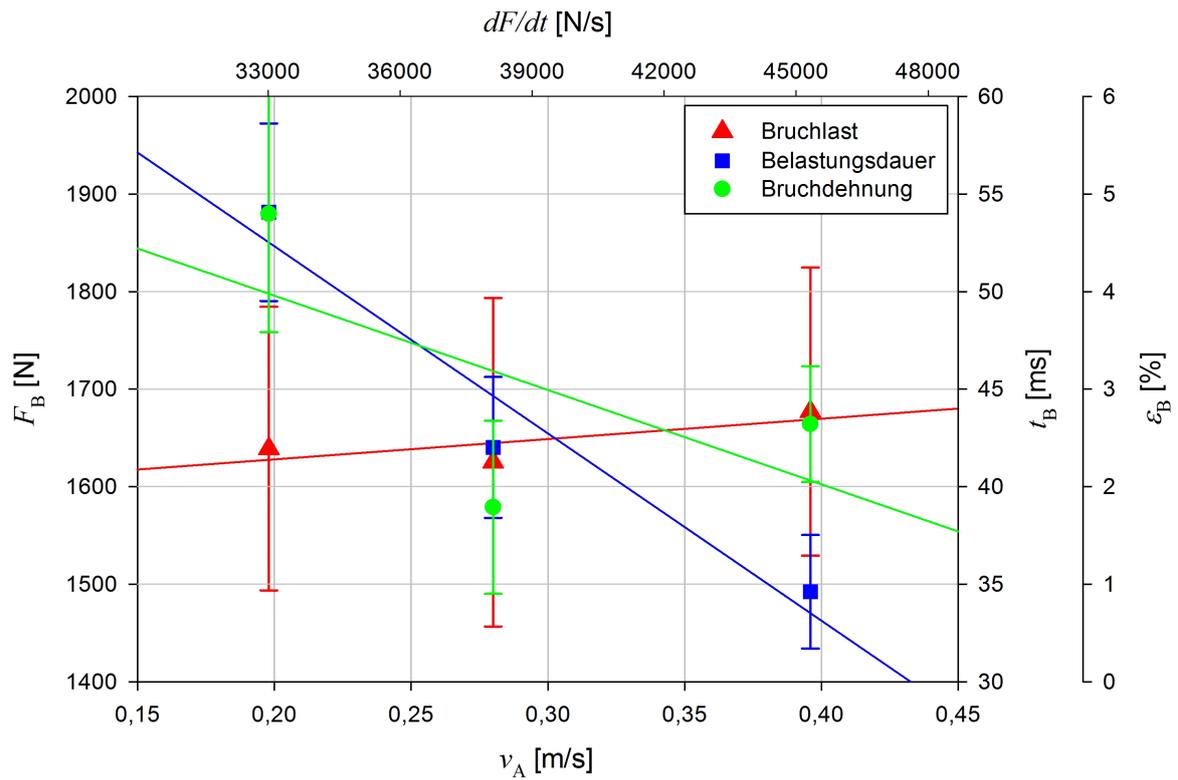


Abbildung B.3: Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruchdehnung ϵ_B von der Aufprallgeschwindigkeit v_A sowie der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit dF/dt . Konditionierungszustand: trocken. Schraubenlieferant: Kunststoffschraube.de.

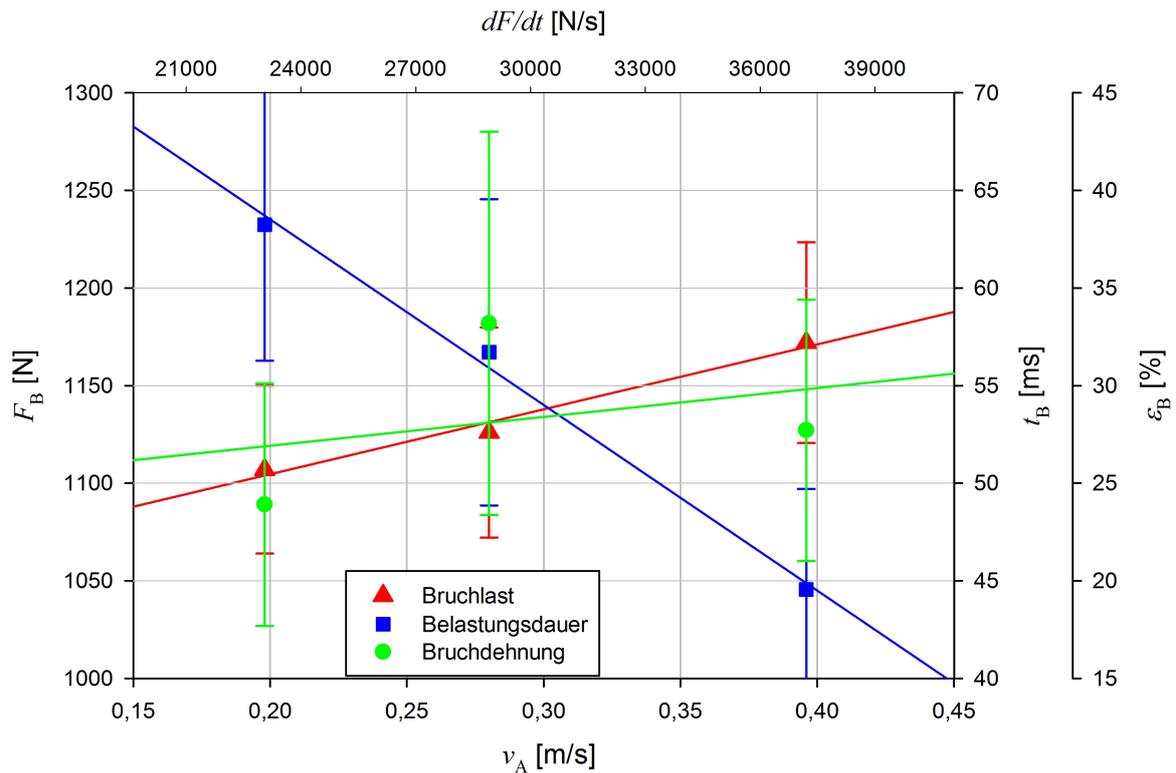


Abbildung B.4: Abhängigkeit der Bruchlast F_B , der Belastungsdauer t_B und der Bruchdehnung ε_B von der Aufprallgeschwindigkeit v_A sowie der Belastungsanstiegs- geschwindigkeit dF/dt . Konditionierungszustand: gesättigt. Schraubenlieferant: Kunst- stoffschraube.de.

Anhang C

Datenblätter

C.1 Datenblatt Polyamid

Polyamid 66 (PA 66)

Werkstoffnummer		1142	
Dichte	ISO 1183	1,14	g/cm ³
Probekörperzustand		trocken/luffeucht	

Mechanische Eigenschaften

Streckspannung	ISO 527	85/60	MPa
Reißdehnung	ISO 527	40/150	%
Zug-E-Modul	ISO 527	3200/1600	MPa
Kugeldruckhärte	ISO 2039-1	160/100	MPa
Norm für Kugeldruckhärte		H358/30	
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	ISO 868, ISO 2039-2	D84/D74	-
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 180/1A	5,5/NB	KJ/m ²
Charpy-Kerbschlagzähigkeit bei 23 °C	ISO 179/1eA	7,0/25	KJ/m ²

Elektrische Eigenschaften

Dielektrizitätszahl bei 50 Hz	IEC 60250	3,8/-	-
Dielektrizitätszahl bei 1 MHz	IEC 60250	3,2/5,0	-
Dielektrischer Verlustfaktor bei 50 Hz	IEC 60250	50/-	1E-4
Dielektrischer Verlustfaktor bei 1 MHz	IEC 60250	250/2000	1E-4
Durchschlagfestigkeit	IEC 60243-1	120/80	kV/mm
Dicke für Durchschlagfestigkeit		0,6	mm
Spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 60093	10 ¹³ /10 ¹⁰	Ohm · m
Oberflächenwiderstand	IEC 60093	10 ¹³ /10 ¹⁰	Ohm
Kriechstromfestigkeit CTI	IEC 60112	600	-

Thermische Eigenschaften

Wärmeleitfähigkeit	DIN 52 612	0,23	W/K m
Längenausdehnung längs quer zur Fließrichtung	ISO 11359	70 100	10 ⁻⁶ /K

Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur	ISO 11357	260	°C
Wärmeformbeständigkeit A	ISO 75 HDT/A (1.8 MPa)	75	°C
Wärmeformbeständigkeit B	ISO 75 HDT/B (0,45 MPa)	220	°C
max. Temperatur kurzzeitig		200	°C
max. Temperatur dauernd		100 ⁴⁾	°C
min. Anwendungstemperatur		-40	°C

Sonstige Eigenschaften

Wasseraufnahme bei Normalklima	ISO 62	2,8	%
Wasseraufnahme bei Wasserlagerung	ISO 62	8,5	%
Brennverhalten nach UL 94	IEC 60695-11-10	V-2	-
Dicke für UL 94		0,41	mm
Transparenz (opak/transluzent/klarsichtig)		opak	
Rohstoff		Ultramid A3K (BASF)	

C.2 Datenblatt Elektromotor



MLFB-Bestelldaten: 1LE1603-1CB29-0AB5-Z
F01+F12+F50+G11+L20+M3A

Motor Typ: 1CV3132B

Kunden-Auftrags-Nr.:

Item-Nr.:

Siemens-Auftrags-Nr.:

Komm.-Nr.:

Angebots-Nr.:

Projekt:

Bemerkung:

U [V]	Δ / Y	f [Hz]	P		I [A]	n [1/min]	M [Nm]	NOM. EFF at ... load [%]			Power factor at ... load			I_A/I_N I/I_N	M_A/M_N T_r/T_N	M_K/M_N T_B/T_N	IE-CL
			[kW]	[hp]				4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4				
400	Δ	87	13,00	- / -	24,84	2575	48,0	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -
IM B3 / IM 1001			FS 132 M		80 kg	IP55	IEC/EN 60034			IEC, DIN, ISO, VDE, EN							

Mechanische Daten			Anschlusskasten	
Schalldruckpegel (LpFA) 50Hz/60Hz (Last)	64 dB(A) ¹⁾	68 dB(A) ¹⁾	Klemmenkastenlage	rechts
Trägheitsmoment	0,046 kg m ²		Klemmenkastenmaterial	Grauguss
Lager AS BS	6308 2Z C3	6308 2Z C3	Klemmenkastentyp	TB1 H01
Lagerlebensdauer	40000 h		Gewinde Kontaktschraube	M4
Schmiermittel	Unirex N3		Max. Leiterquerschnitt	6,0 mm ²
Nachschmiereinrichtung	Nein		Kabeldurchmesser von ... bis ...	11,0 mm - 21,0 mm
Schmiernippel	- / -		Kabeleinführung	2xM32x1,5-1xM16x1,5
Art der Lagerung	Festlager DE (AS)		Kabelverschraubung	3 Stopfen
Kondenswasserlöcher	Ja (Standard)		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Sonderausführung (6) F01 Anbau Bremse F12 Bremsenanschlussspannung AC 400 V, 50/60 Hz F50 Mechanische Handlüftung der Bremse mit Betätigungshebel (nicht arretierbar) G11 Inkrementalgeber Kübler Sendix 5020 (HTL) L20 Festlager DE (AS) M3A 400 VD; 87Hz, 87Hz-Leistung </div>	
Äußere Erdungsklemme				
Schwinggrößenstufe	A			
Isolation	155(F) nach 130(B)			
Betriebsart	S1			
Drehrichtung	bidirektional			
Gehäusematerial	Grauguss			
Daten Stillstandsheizung	- / -			
Endanstrich	Sonderanstrich C3			
Farbe, Farbton	RAL7030			
Motorschutz	(B) 3 Kaltleiter PTC - für Abschaltung (Standard) (2 Klemmen)			
Kühlart	IC411 - Eigenbelüftet Oberflächengekühlt			

Umgebungsbedingungen	
Umgebungstemperatur	-20 °C - +40 °C
Höhe über Meeresspiegel	1000 m

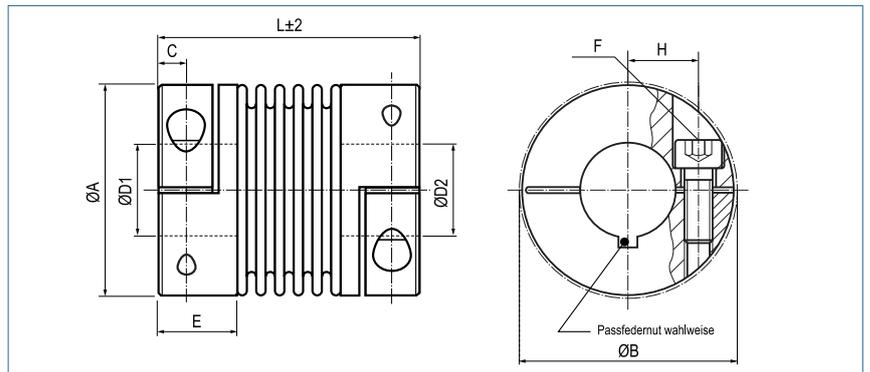
Notes	
I_A/I_N = locked rotor current / current nominal	M_K/M_N = break down torque / nominal torque
M_A/M_N = locked rotor torque / torque nominal	1) Value is valid only for DOL operation with motor design IC411

C.3 Datenblatt Kupplung

Metallbalgkupplung

mit Klemmnabe

optional
lasergeschweißt
optional komplett
in Edelstahl



Bestellbeispiel

KB4 / 60 - 89 - 12 - 32 - (S)

Typ / Größe Länge L ØD1 (H7) ØD2 (H7) Optionen

Größe	Drehmoment TKN (Nm)	Abmessungen (mm)								Technische Daten								
		L Länge	Ø A Außen-durchmesser	D1/D2 Bohrungen (H7) von-bis	H	C	E	B Stör Ø	F Schraube (ISO4762) TA (Nm)	Masse (kg)	Massen-trägheitsmoment J (g m²)	Federsteifigkeit			Versatz			max Drehzahl min-1
											Torsion CT 10³ (Nm/rad)	radial CR (N/mm)	axial CA (N/mm)	radial ΔKr (mm)	axial ΔKa (mm)	Winkel ΔKw (°)		
18	18	63	45	10-25.4	17	5.5	19.5	47.4	M5	0.1	0.04	20	205	50	0.2	0.5	1.5	12800
		71							8	0.15	0.05	15	82	36	0.25	0.5	2	12800
30	30	65	56	10-32	20	7.5	24.5	56.4	M6	0.3	0.15	38	720	50	0.15	0.6	1.5	10300
		73		15					0.32	0.16	28	225	28	0.25	1	2	10300	
60	60	79	66	12-35	23	10	29	66	M8	0.5	0.33	75	1150	90	0.15	0.6	1.5	8700
		89							40	0.6	0.36	50	340	50	0.25	1	2	8700
80	80	91	82	14-44	28	11	33.5	82.9	M10	2.3	2.3	128	1200	80	0.2	0.5	1.5	6900
		102							84	2.4	2.4	75	400	50	0.25	0.8	2	6900
150	150	91	82	19-44	28	11	33.5	82.9	M10	2.3	2.5	155	2020	145	0.2	0.5	1.5	6900
		102							84	2.4	2.6	105	595	85	0.25	0.8	2	6900
200	200	101	90	22-47	31	13	38	90.8	M12	2.6	3.3	175	2500	145	0.2	0.5	1.5	6400
		113							125	2.7	3.5	120	460	82	0.25	0.8	2	6400
300	300	105	110	30-60	40	13	38	110	M12	4.3	7.6	502	6300	280	0.2	0.5	1.5	6000
		116							145	4.4	7.8	285	1400	145	0.25	0.8	2	6000
500	500	112	122	35-70	42	15	42	122	M12	5.5	13.5	690	7790	100	0.2	0.5	1.5	5000
		123							145	5.6	13.7	320	970	85	0.25	1	2	5000
800	800	168	157	40-80	55	22.5	55	170.3	2xM20 400	14.3	56.9	1270	700	275	0.2	0.8	1.8	5000
1400	1400	168	157	50-80	55	22.5	55	170.3	2xM20 470	14.8	57.7	1270	700	275	0.2	0.8	1.8	5000

Material	Balg - Edelstahl Nabe - Größe 18 - 60: Aluminium Nabe - ab Größe 80: Stahl
Nabe	Bohrungstoleranz: H7
Temperaturbereich	-30 °C ~ 120 °C Größe 800/1400: -30 °C ~ 250 °C
Passfedernut	wahlweise nach DIN 6885 größtmögliche Bohrung mit # gekennzeichnet