



Untersuchung der Zug-  
festigkeit von Polyamid-  
Schrauben in Abhängigkeit  
von der Belastungsanstiegs-  
geschwindigkeit

F-05-1901

Projekt Nr. F-05-1901

Untersuchung der Zugfestigkeit von  
Polyamid-Schrauben in Abhängigkeit von  
der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit

Dr. Sebastian Nissle  
Diplom-Ingenieur Maschinenbau

Dr. Dirk Lorenz, Dr. Jan-Niklas Tödt  
Diplom-Physiker

Paul Schupin  
Master of Science Chemieingenieurwesen  
Bachelor of Engineering Elektro- und Informationstechnik

Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe  
Geschäftsbereich Prävention, Zentrallabor

Tobias König  
Master of Science Verfahrenstechnik

Thorsten Pfeiffer  
Bachelor of Science Wirtschaftsingenieurwesen

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und  
Arbeitsmedizin e. V. und mbH

Mannheim, April 2024

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Glossar</b>	<b>V</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Motivation . . . . .	3
1.2 Zielsetzung . . . . .	5
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Sicherheitstechnische Kenngrößen . . . . .	6
2.2 Dimensionierung von Explosionsklappen . . . . .	6
2.3 Beeinflussende Faktoren auf die mechanischen Eigenschaften von Polyamid 6 . . . . .	7
2.3.1 Einfluss der Materialfeuchte und der Temperatur . . . . .	8
2.3.2 Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit . . . . .	9
<b>3 Experimentelle Untersuchung des Bruchverhaltens von Polyamid-Schrauben</b>	<b>10</b>
3.1 Aufbau einer Versuchsapparatur . . . . .	10
3.1.1 Funktionsprinzip der Versuchsapparatur . . . . .	10
3.1.2 Messdatenerfassung . . . . .	12
3.2 Versuchsdurchführung . . . . .	12
3.2.1 Versuchsablauf . . . . .	12
3.2.2 Versuchsprogramm . . . . .	13
3.2.3 Schraubenkonditionierung . . . . .	13
3.2.4 Schraubenbeschaffenheit . . . . .	14
3.3 Versuchsauswertung . . . . .	14
3.4 Versuchsergebnisse . . . . .	17
3.4.1 Versuchsergebnisse für spritzgegossene Schrauben . . . . .	17
3.4.2 Versuchsergebnisse für gedrehte Schrauben . . . . .	18
3.4.3 Vergleich zwischen spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben . . . . .	18

<b>4 Experimentelle Untersuchung des Öffnungsverhaltens von Explosionsklastungsklappen</b>	<b>20</b>
4.1 Versuchsaufbau . . . . .	20
4.2 Versuchsdurchführung . . . . .	21
4.2.1 Versuchsablauf . . . . .	21
4.2.2 Versuchsprogramm . . . . .	22
4.3 Versuchsauswertung . . . . .	23
4.4 Versuchsergebnisse . . . . .	24
<b>5 Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>28</b>
5.1 Untersuchung des Bruchverhaltens von Polyamid-Schrauben . . . . .	28
5.2 Untersuchung des Öffnungsverhaltens von Explosionsklappen . . . . .	29
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>32</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>34</b>
<b>A Grafiken</b>	<b>35</b>
<b>B Tabellen</b>	<b>37</b>

# Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
$a, b, c, d, e$	-	Koeffizienten der Funktion $f(t)$
$A_E$	$m^2$	Entlastungsfläche
$c_{St}$	$g/m^3$	Staubkonzentration
$D$	$m$	Durchmesser
$dF/dt$	$N/s$	Belastungsanstiegsgeschwindigkeit
$\overline{dF/dt}$	$N/s$	mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit
$E_f$	%	Entlastungsfähigkeit einer Explosionsklappe
$E$	$MPa$	Elastizitätsmodul
$f$	$Hz$	Frequenz
$f(t)$	-	Funktion
$f(t)'$	-	Erste Ableitung der Funktion $f(t)$
$F$	$N, \%$	Kraft
$F_B$	$N$	Bruchkraft
$F_{B,n}$	$N$	Bruchkraft der $n$ -ten Schraube
$\bar{F}_B$	$N$	mittlere Bruchkraft
$G1, G2, G3$	-	Bezeichnungen für Geraden
$h$	$m$	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
$K$	-	Faktor
$K_{St}$	$bar \cdot m/s$	sicherheitstechnische Kenngröße
$L$	$m$	Abstand zwischen Zündort und Mitte der Entlastungsfläche
$L_0, l_0$	$m$	Anfangslänge
$n$	-	Anzahl an Schrauben oder Explosionsklappen;
$n$	-	Anzahl der Versuche
$p$	$bar, Pa$	Druck
$p_{stat}$	$bar$	statischer Ansprechdruck
$p_{dyn}$	$bar$	dynamischer Ansprechdruck
$\bar{p}_{dyn}$	$bar$	mittlerer dynamischer Ansprechdruck
$p_{dyn,n}$	$bar$	dynamischer Ansprechdruck des $n$ -ten Versuchs
$p_{max}$	$bar$	maximaler Explosionsdruck
$p_{red}$	$bar$	reduzierter Explosionsdruck
$\bar{p}_{red}$	$bar$	mittlerer reduzierter Explosionsdruck

$p_{\text{red,max}}$	bar	reduzierter maximaler Explosionsdruck
$p_{\text{red,n}}$	bar	reduzierter Explosionsdruck des $n$ -ten Versuchs
$dp/dt$	bar/s	Druckanstiegsgeschwindigkeit
$(dp/dt)_{\text{max}}$	bar/s	maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit
$s$	-	Standardabweichung
$t$	s	Zeit
$t_1$	s	Zeitpunkt des Belastungsbeginns
$t_{\text{Bruch}}$	s	Bruchzeitpunkt
$t_{\text{Bruch,m}}$	s	mathematischer Bruchzeitpunkt
$t_v$	s	Zündverzögerungszeit
$t_{\text{zünd}}$	s	Zündzeitpunkt
$T$	°C	Temperatur
$T_g$	°C	Glasübergangstemperatur
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$v_{\text{Schlitten}}$	m/s	Geschwindigkeit des Schlittens des Schraubenprüfstands
$v$	-	Vertrauensbereich
$V$	m <sup>3</sup>	Behältervolumen
$x$	m	Koordinate
$y$	m	Koordinate
$W$	%	Materialfeuchte
$\bar{W}$	%	mittlere Materialfeuchte
$\delta$	diverse	Standardabweichung
$\Delta G$	kg	Massenänderung
$\Delta G/G_0$	%	relative Massenänderung durch Wasseraufnahme
$\Delta l$	m	Längenänderung
$\epsilon$	%	Dehnung
$\epsilon_B$	%	Bruchdehnung
$\bar{\epsilon}_B$	%	mittlere Bruchdehnung
$\bar{\epsilon}_{B,\text{trocken}}$	%	mittlere Bruchdehnung von trockenen Polyamid-Schrauben
$\sigma$	diverse	Messunsicherheit
$\sigma$	MPa	mechanische Spannung
$\sigma_B$	MPa	Bruchspannung
$\sigma_{B,\text{max}}$	MPa	gemessene maximale Bruchspannung
$\theta$	°	Öffnungswinkel der Entlastungsklappe
$\omega$	U/s	Drehzahl

# Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Definition</b>
Belastung	Auf eine Schraube wirkende Zugkraft $F$ .
Belastungsanstiegs- geschwindigkeit	Änderung der <i>Belastung</i> pro Zeit $dF/dt$ im linearen Bereich des Belastungsanstieges bei einem Schraubenreißversuch.
Bruchdehnung	Die bei einem Schraubenreißversuch beobachtete Dehnung beim Versagen der Schraube.
Bruchart	Charakterisierung eines Schraubenbruches gemäß seiner Neigung zu vorheriger, dauerhafter plastischer Materialverformung.
Bruchkraft	Die bei einem Schraubenreißversuch beobachtete Kraft beim Versagen der Schraube.
Drehzahl	Drehzahl von Motor und Spindel der in diesem Projekt verwendeten Versuchsapparatur in der Einheit U/s.
duktiler Bruch	Bruch, der mit einer plastischen Materialverformung einhergeht.
dynamischer Ansprechdruck	Differenzdruck, bei dem sich der Verschluss einer Explosionsklappe öffnet, wobei die Druckanstiegs- geschwindigkeit größer als 1 bar/s ist [19].
Entlastungsfähigkeit	Prozentualer Anteil der Druckentlastungsfläche einer Explosionsklappe, welcher der äquivalenten Druckentlastungsfläche einer trägheitslosen Entlastungseinrichtung entspricht [19].
Frequenz	Frequenz des Steuersignals, welches der in diesem Projekt verwendete Frequenzumrichter an den Motor der Versuchsapparatur ausgibt.
gesättigt	Feuchtegehalt von Polyamid-Schrauben nach sechzig-tägiger Lagerung in raumtemperiertem Wasser.

$K_{St}$ -Wert	Sicherheitstechnische Kenngröße zur Charakterisierung der Druckanstiegsgeschwindigkeit in Behältern und Räumen bei Staubexplosionen [2, 19].
maximaler Explosionsdruck	Maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im geschlossenen Behälter bei optimaler Staubkonzentration [2, 19].
raumfeucht	Feuchtegehalt von Polyamid-Schrauben, die im klimatisierten Labor gelagert wurden.
reduzierter Explosionsdruck	Maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im druckentlasteten Behälter [2, 19].
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 [19].
reduzierter maximaler Explosionsdruck	Maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im druckentlasteten Behälter bei optimaler Staubkonzentration [2, 19].
Sprödbruch	Bruch ohne plastische Materialverformung.
statischer Ansprechdruck	Differenzdruck, bei dem sich der Verschluss einer Explosionsklappe öffnet, wobei die Druckanstiegsgeschwindigkeit kleiner als 1 bar/min ist [19].
trocken	Feuchtegehalt von Polyamid-Schrauben nach sechzig-tägiger Lagerung im Trockenschrank bei 60°C.

# Zusammenfassung

Zunächst wird eine Versuchsanlage montiert, mit der *Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten*<sup>1</sup>, wie sie bei Staubexplosionen auf Klappenverschlusschrauben wirken, erzeugt werden können. Anschließend wird der Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und der Materialfeuchte auf das Bruchverhalten, also die *Bruchkraft* und die *Bruchdehnung* von Polyamid-Schrauben verschiedener Größen untersucht.

Es wird gezeigt, dass das Bruchverhalten, also die Bruchkraft, die Bruchdehnung, der E-Modul und die *Bruchart* von Verschlusschrauben aus Polyamid in starkem Maße von ihrer Materialfeuchte abhängig sind.

Mit zunehmender Materialfeuchte sinkt die Bruchkraft  $F_B$ , während die Bruchdehnung  $\epsilon_B$  steigt. Der E-Modul nimmt mit zunehmender Materialfeuchte ebenfalls ab. Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahmen von Bruchstellen zeigen unterschiedlich ausgeprägte Bruchflächen, die mit der Materialfeuchte korrelieren, was auf eine veränderte Bruchmechanik mit zunehmender Materialfeuchte hinweist. *Trockene* Polyamid-Schrauben sind spröde; die Bruchstelle ist typisch für einen dehnungsarmen *Sprödbbruch*. Die Bruchart von *gesättigten* Polyamid-Schrauben ist aufgrund der REM-Aufnahmen einem *duktilen Bruch* zuzuordnen. Das Materialverhalten ist zäh-elastisch.

Es wird festgestellt, dass 75 % der untersuchten (spritzgegossenen) Polyamid-Schrauben Fehlstellen aufweisen, die besonders bei hohen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten und geringer Materialfeuchte, also sprödem Materialverhalten, die Polyamid-Schrauben schwächen. Außerdem zeigt sich, dass die Fehlstellen zu einer starken Streuung der Versuchsergebnisse führen.

Die vergleichende Untersuchung von fehlerstellenfreien (gedrehten) Polyamid-Schrauben zeigt, dass bei diesen fast immer größere bzw. gleich große Bruchkräfte gemessen werden. Zudem wird die Streuung der Versuchsergebnisse deutlich geringer. Deshalb werden alle weiteren Versuche mit fehlerstellenfreien Polyamid-Schrauben durchgeführt.

Um eine abschließende Bewertung zu ermöglichen und Handlungsempfehlungen geben zu können, werden Versuche mit einer mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Explosionsklappe an einem 1m<sup>3</sup>-Behälter durchgeführt. Es wird gezeigt, dass *raumfeuchte* Schrauben zu deutlich höheren *reduzierten maximalen Explosionsdrücken* führen und dass der *dynamische Ansprechdruck* bei einer ausreichend hohen *reduzierten maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeit* konstant bleibt.

Die Verwendung von Polyamid-Schrauben als sicherheitsrelevanter Klappenverschlussmechanismus zum Erreichen eines definierten dynamischen Ansprechdruckes ist auf Basis der Versuche als kritisch zu bewerten! Bei Berücksichtigung folgender Punkte bei der Prüfung der Schutzeinrichtung kann jedoch von einem sicheren Einsatz ausgegangen werden:

---

<sup>1</sup> *Kursiv* gestellte Begriffe sind im Glossar erläutert.

1. Die Prüfung muss mit fehlerstellenfreien Schrauben (z.B. Drehteile) durchgeführt werden.
2. Die Prüfung muss mit einer Druckanstiegsgeschwindigkeit größer 15 bar/s durchgeführt werden.
3. Es müssen Schrauben mit geringer Materialfeuchte (Lagerung bei Raumbedingungen ausreichend) eingesetzt werden.

# 1 Einleitung

Brennbare Stäube stellen bei Verarbeitung, Transport oder Lagerung eine potenzielle Gefahr für Anlagen und Menschen dar, da durch sie unter bestimmten Voraussetzungen Staubexplosionen entstehen können. Mögliche Folgen sind oft verheerend, weshalb zum Schutz von industriellen Anlagen verschiedene Explosionsschutzsysteme zum Einsatz kommen. Für Silos oder Filteranlagen werden als konstruktive Explosionsschutzmanahme oftmals Explosionsklappen eingesetzt. Diese lassen zwar eine Explosion zu, beschränken deren Auswirkungen aber auf ein unbedenkliches Maß. Explosionsklappen werden in die Außenwand eines Behälters, meist auf der Oberseite, integriert. Bei einem Staubexplosionsereignis geben sie ihre Entlastungsfläche  $A_E$  bei Erreichen eines definierten *statischen Ansprechdrucks*  $p_{\text{stat}}$  frei. Durch Entlassen von unverbranntem Staub/Luft-Gemisch und Verbrennungsprodukten aus dem Behälter steigt der Druck in diesem lediglich auf den Wert des reduzierten Explosionsrucks  $p_{\text{red}}$  an. Der *reduzierte Explosionsdruck* unterschreitet dabei die Behälterfestigkeit [6, 8, 9, 12, 17, 21, 25, 27].

Zur Realisierung des statischen Ansprechdrucks  $p_{\text{stat}}$  verfügen Explosionsklappen über Schließmechanismen. Diese unterliegen beim explosionsbedingten Klappenffnungsvorgang einer gewissen Trägheit, so dass der tatsächliche Ansprechdruck oberhalb des statischen Ansprechdrucks liegt. Der tatsächliche Ansprechdruck heißt dynamischer Ansprechdruck  $p_{\text{dyn}}$ . Einen in der Praxis verwendeten und kostengünstigen Schließmechanismus stellen Polyamid-Schrauben dar (Abbildungen 1.1 und 1.2). Diese weisen laut Werkstoffdatenblattern der Hersteller geringere Festigkeiten auf als beispielsweise metallische Schrauben. Im Anwendungsfall wird der bewegliche Flügel der Explosionsklappe durch Verwendung von Polyamid-Schrauben mit dem festen Klappenrahmen verbunden (Abbildung 1.2). Im Explosionsfall sollen die Polyamid-Schrauben beim Erreichen eines definierten statischen Ansprechdrucks  $p_{\text{stat}}$  reißen und so das ffnen der Explosionsklappe ermöglichen. Der statische Ansprechdruck einer mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Explosionsklappe ergibt sich aus Gleichung

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

In (1.1) ist  $F_{B,n}$  die Bruchkraft der n-ten Schraube laut Schraubendatenblatt.  $h_n$  ist als Abstand zwischen dem n-ten Schraubenloch der Klappe und der Klappenrotationsachse definiert.  $h$  ist der Abstand zwischen der Klappenrotationsachse und dem Mittelpunkt der Entlastungsöffnung [4].

## 1.1 Motivation

Ergebnisse aus technischen Funktionsprüfungen von Explosionsklappen mit Polyamid-Schraubenverschlussen, die bei der FSA GmbH in Auftrag gegeben wurden, zeigen

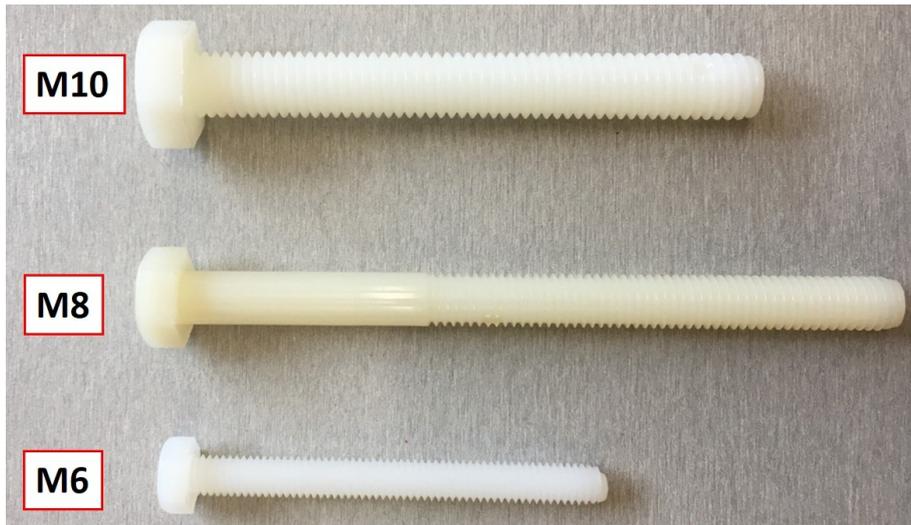


Abbildung 1.1: Polyamid-Schrauben (PA 6.6) verschiedener Größen.



Abbildung 1.2: Explosionsklappe, bestehend aus einer quadratischen Stahlplatte (Klappenflügel), die mit Hilfe von zwei Scharnieren an einem festen Rahmen montiert und mit vier Polyamid-Schrauben (rote Kreise) verschlossen ist [4].

oftmals eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem errechneten  $p_{\text{stat}}$  und dem gemessenen  $p_{\text{dyn}}$ . Teilweise werden die angestrebten  $p_{\text{dyn}}$  deutlich überschritten. Demzufolge stimmen die in den Datenblättern angegebenen Bruchkräfte nicht immer mit den im Explosionsfall auftretenden Bruchkräften überein. Deshalb ist gegenwärtig die zuverlässige Funktionsweise eines solchen Schutzsystems fragwürdig, wenn der  $p_{\text{stat}}$  durch Verwen-

derung von Polyamid-Schrauben erzielt werden soll. Da mit zunehmendem  $p_{\text{dyn}}$  auch der  $p_{\text{red}}$  stark ansteigt (siehe Abschnitt 2.1), besteht bei einer deutlichen Überschreitung des  $p_{\text{stat}}$  die Gefahr des Behälterberstens. Aus diesem Grund muss untersucht werden, wie sichergestellt werden kann, dass ein erhöhter  $p_{\text{dyn}}$  und damit ein überhöhter  $p_{\text{red}}$  im Einsatz auszuschließen ist.

Aus Literatur [20] und früheren Projekten [4, 18] ist bekannt, dass die Bruchkraft von Polyamid-Schrauben von äußeren Faktoren wie Materialfeuchte, -temperatur und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit beeinflusst wird (siehe Abschnitt 2.2).

Weil in mit Explosionsklappen geschützten Behältern und Anlagen brennbare Stäube mit verschiedenen sicherheitstechnischen Kenngrößen (siehe Abschnitt 2.1) gelagert oder verarbeitet werden, treten im Explosionsfall an den Verschlusschrauben aus Polyamid Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten in einem breiten Bereich auf. Dieser Bereich wird durch herkömmliche Zugversuche nicht abgedeckt, weshalb keine umfassenden Informationen über die Bruchkraft der Polyamid-Schrauben für diese Fälle vorliegen.

Weil mit Polyamid-Schrauben verschlossene Explosionsklappen weltweit bei unterschiedlichsten örtlichen klimatischen Bedingungen im Freien eingesetzt werden, sind die Verschlusschrauben Feuchte- und Temperaturschwankungen ausgesetzt. Wie oben und in Kapitel 2 ausgeführt, werden dadurch die Materialeigenschaften der Schrauben und damit  $p_{\text{dyn}}$  sowie  $p_{\text{red}}$  verändert. Eine Quantifizierung dieser Zusammenhänge ist auf Grund von fehlenden Informationen zu Polyamid-Schrauben aktuell nicht möglich.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieses Projekts ergibt sich aus den Ausführungen des vorigen Abschnittes 1.1, nämlich die Charakterisierung des Bruchverhaltens von Polyamid-Schrauben als Funktion von Materialfeuchte und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und daraus folgend des Öffnungsverhaltens von mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Explosionsklappen. Auf die Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Bruchverhalten wurde verzichtet, insbesondere weil im Rahmen von Prüfungen auf dem Versuchsfeld eine Berücksichtigung nahezu unmöglich ist. Jedoch lassen sich aus den Effekten für Belastungsgeschwindigkeit und Materialfeuchte auch Rückschlüsse auf das temperaturabhängige Verhalten schließen. Folgende Fragestellungen sollten beantwortet werden:

1. Wie hängen Bruchkraft und Bruchdehnung der Polyamid-Schrauben von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit ab?
2. Wie hängen Bruchkraft und Bruchdehnung von der Materialfeuchte der Polyamid-Schrauben ab?
3. Welche anderen Faktoren beeinflussen das Bruchverhalten von Polyamid-Schrauben?
4. Welchen Einfluss haben die genannten Einflussfaktoren auf das Öffnungsverhalten einer Explosionsklappe?
5. Was muss bei der Prüfung von Entlastungseinrichtungen berücksichtigt werden, um eine sichere Verwendung zu gewährleisten?

## 2 Grundlagen

### 2.1 Sicherheitstechnische Kenngrößen

Das Verbrennungsverhalten eines brennbaren Staub/Luft-Gemisches wird mit Hilfe der sogenannten sicherheitstechnischen Kenngrößen charakterisiert. Die beiden wichtigsten diesbezüglichen sicherheitstechnischen Kenngrößen sind der  $K_{St}$ -Wert und der *maximalen Explosionsdruck*  $p_{max}$ .

Der maximale Explosionsdruck  $p_{max}$  ist der Maximalwert der Druckäußerung bei der Deflagration eines Staub/Luft-Gemisches mit optimaler Staubkonzentration in einem geschlossenen Behälter. Der  $K_{St}$ -Wert beschreibt hingegen die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit  $(dp/dt)_{max}$  bei eben diesen Bedingungen. Er ist deswegen ein Maß für die Verbrennungsgeschwindigkeit bzw. für die Heftigkeit der Explosion eines Staub/Luft-Gemisches. Für den  $K_{St}$ -Wert gilt das kubische Gesetz (2.1), d. h. er ist unter Einbezug des Behältervolumens  $V$  von diesem unabhängig.

$$K_{St} = \sqrt[3]{V} \left( \frac{dp}{dt} \right)_{max} \quad (2.1)$$

Sowohl  $p_{max}$  als auch  $K_{St}$  werden in dafür ausgerüsteten Labors nach standardisierter Vorgehensweise bestimmt [10].

### 2.2 Dimensionierung von Explosionsklappen

Zur Berechnung der notwendigen Entlastungsfläche  $A_E$  von Explosionsklappen wird üblicherweise Formel 2.2 aus EN 14491 [9] verwendet. Die dabei errechnete Entlastungsfläche ist notwendig, um den im Falle einer Staubeexplosion auftretenden Explosionsdruck ausreichend zu reduzieren. Damit wird das Überschreiten der Behälterfestigkeit und ein daraus resultierendes Bersten des Behälters verhindert.

$$A_E = \left( \left( 3,264 \cdot 10^{-5} p_{max} K_{St} p_{red,max}^{-0,569} + 0,27 (p_{stat} - 0,1) p_{red,max}^{-0,5} \right) V^{0,753} \right) \cdot \left( 1 + \left( 0,758 - 4,305 \log(p_{red,max}) \right) \log(L/D) \right) \frac{E_f}{100} \quad (2.2)$$

Zur Berechnung einer ausreichend großen Entlastungsfläche wird der *reduzierte maximale Explosionsdruck*  $p_{red,max}$  aus der Behälterfestigkeit, versehen mit einem Sicherheitszuschlag, bestimmt und in Formel (2.2) eingesetzt. Die weiteren Größen in (2.2) ergeben sich aus der Behältergeometrie oder sind sicherheitstechnische Kenngrößen des verwendeten Staubes:  $L$  ist der maximal mögliche Abstand zwischen Zündort und Mitte der Entlastungsfläche innerhalb des Behälters.  $D$  stellt den Durchmesser des Behälters und  $V$  dessen Volumen dar. Die *Entlastungsfähigkeit*  $E_f$  einer Explosionsklappe

berücksichtigt deren Massenträgheit. Je größer das Trägheitsmoment einer Explosionsklappe ist, desto langsamer gibt sie die Entlastungsfläche frei, d. h. desto geringer ist die Entlastungswirkung und Entlastungsfähigkeit. Der statische Ansprechdruck  $p_{stat}$  einer Explosionsklappe, also der Druck bei dessen Erreichen die Explosionsklappe ihre Entlastungsfläche freigibt, ist für die Dimensionierung der Entlastungsfläche ebenfalls relevant. Je höher  $p_{stat}$  ist, desto höher ist der reduzierte Explosionsdruck. Da dieser Zusammenhang stark ausgeprägt ist und bereits eine geringe Erhöhung von  $p_{stat}$  zu einem deutlich höheren reduzierten Explosionsdruck führt, muss der Funktionstüchtigkeit der Explosionsklappenverschlusstechnik besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. So bewirkt z.B. eine Änderung von  $p_{stat}$  um 0,2 bar bereits eine Änderung des reduzierten maximalen Explosionsüberdruck um den Faktor  $K = 3$ . Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit von  $p_{stat}$  und  $p_{red,max}$ .

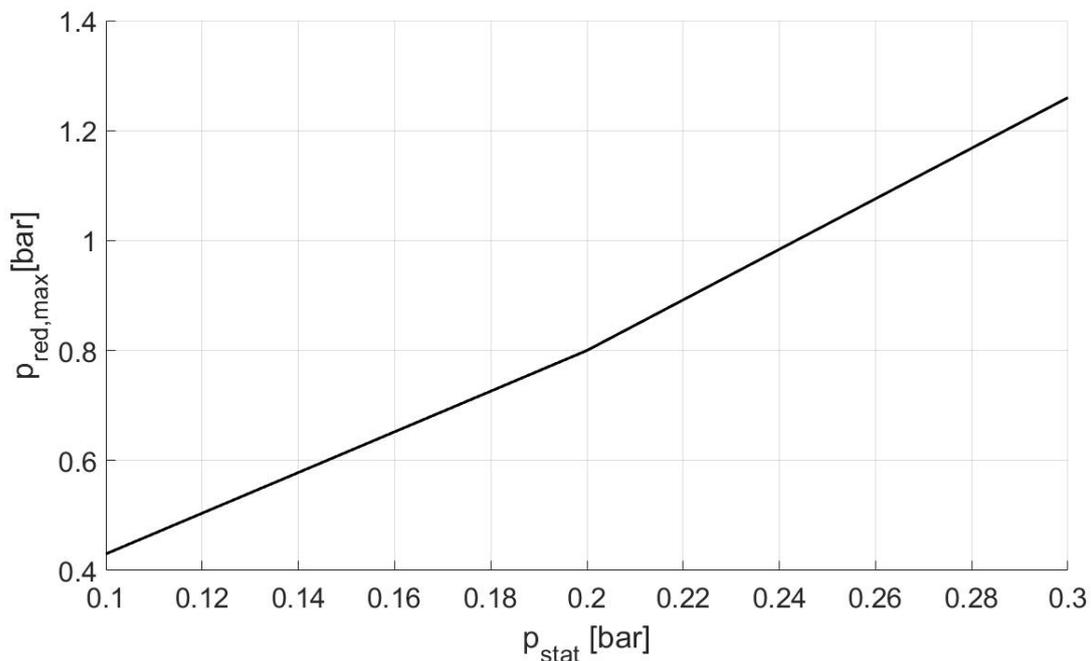


Abbildung 2.1: Abhängigkeit des reduzierten maximalen Explosionsdrucks  $p_{red,max}$  vom statischen Ansprechdruck  $p_{stat}$ . Randbedingungen:  $V = 25 \text{ m}^3$ ,  $p_{max} = 9 \text{ bar}$ ,  $L/D = 1$ ,  $A_E = 1,4 \text{ m}^2$ ,  $K_{St} = 200 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$  und  $E_f = 70 \%$ .

## 2.3 Beeinflussende Faktoren auf die mechanischen Eigenschaften von Polyamid 6

Polyamid 6 zeigt bei mechanischer Beanspruchung im Vergleich zu den meisten anderen Werkstoffen ein besonders stark ausgeprägtes viskoelastisches und viskoses Verhalten. Das hat zur Folge, dass Werkstoff-Kenngrößen wie E-Modul, Schubmodul und damit wichtige mechanische Eigenschaften wie Bruchspannung und -dehnung unter anderem von der Materialfeuchte, der Temperatur, der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und -dauer abhängen [3, 5, 20].

### 2.3.1 Einfluss der Materialfeuchte und der Temperatur

Die mechanischen Eigenschaften von Polyamid 6 sind stark abhängig vom Feuchtegehalt des Materials. Wasser wirkt im Polyamid als Weichmacher und erhöht die Bruchdehnung und die Elastizität. Die weichmachende Wirkung des Wassers führt zur Abnahme von E-Modul und Bruchspannung. Polyamid 6 kann auf Grund der hohen Anzahl an Amidgruppen im Vergleich zu anderen Kunststoffen, viel Wasser einlagern [20]. Abbildung 2.2, rechts zeigt die relative Gewichtsänderung  $\Delta G/G_0$  von Polyamid 6 im Sättigungszustand in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte bei der Konditionierung. [13]

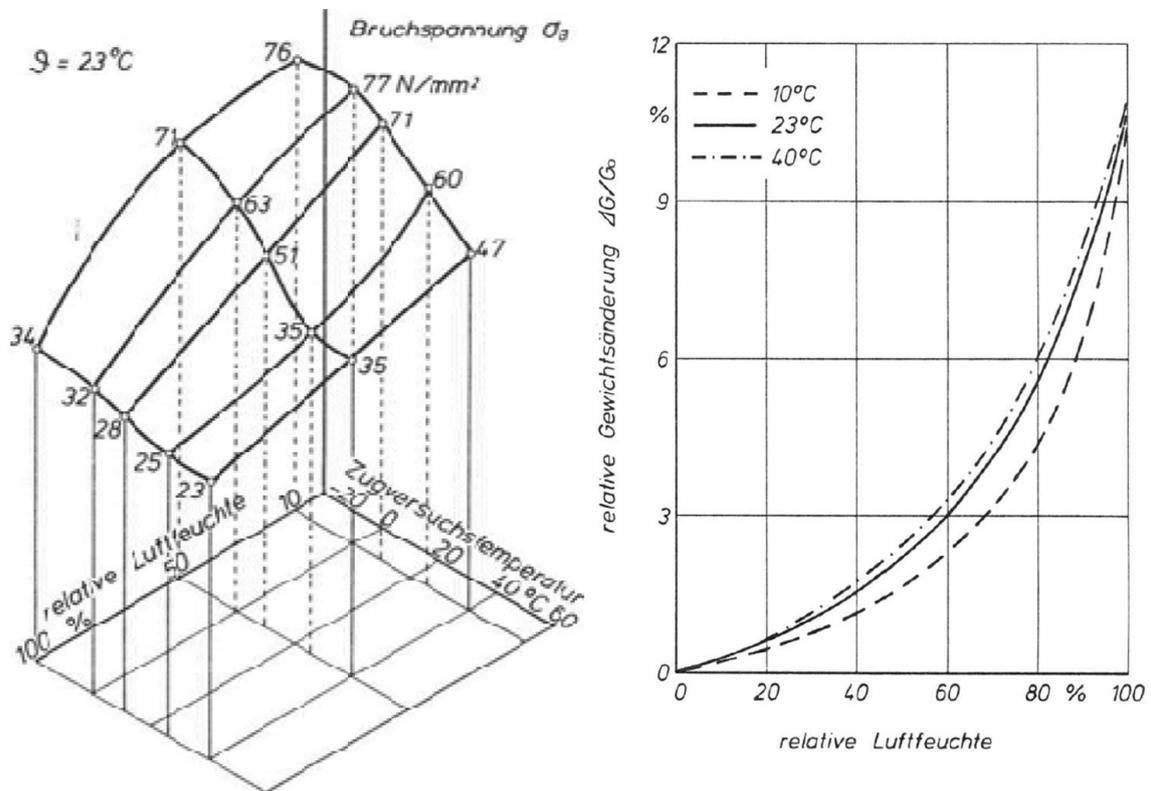


Abbildung 2.2: Links: Abhängigkeit der Bruchspannung  $\sigma_B$  von Polyamid 6 von Temperatur und Feuchte. Rechts: Materialfeuchte von Polyamid 6 in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte [20].

$\Delta G/G_0$  ist die relative Materialfeuchte in Massenprozent. Demnach erreicht Polyamid 6 eine maximale Materialfeuchte von bis zu 10% bei Lagerung in Luft mit einer relativen Luftfeuchte von 100% bei 23°C.

Wie in Abbildung 2.2, links zu sehen, ist die Abhängigkeit der Bruchspannung  $\sigma_B$  von der Materialfeuchte und der Temperatur bei Polyamid 6 sehr stark ausgeprägt. Mit zunehmender Materialfeuchte nimmt die Bruchspannung erheblich ab. Mit zunehmender Temperatur ebenfalls. Die Extremfälle stellen die Kombination beider Einflüsse dar. Bei hoher Temperatur und hoher Materialfeuchte ist die Bruchspannung am geringsten. Bei niedriger Temperatur und geringer Materialfeuchte ist die Bruchspannung am

höchsten. Zwischen diesen beiden Extremen im in Abbildung 2.2 dargestellten Bereich verändert sich die Bruchspannung um einen Faktor von ca.  $K = 3$  [20].

Die Bruchdehnung  $\epsilon_B$  von PA 6 wird von der Temperatur und der Materialfeuchte ebenfalls stark beeinflusst. Mit steigender Materialfeuchte nimmt die Bruchdehnung zu und umgekehrt. Gleiches gilt für den Parameter Temperatur. Die Bruchdehnung verhält sich unter dem Einfluss von Temperatur und Materialfeuchte qualitativ gegenläufig zur Bruchspannung [1, 20, 22, 24].

### 2.3.2 Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit

Die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit hat bei Polyamid 6 ebenfalls einen Einfluss auf dessen Materialeigenschaften [1, 14, 20, 24]. Abbildung 2.3 zeigt Spannungs-Dehnungs-Kurven bei verschiedenen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten. Der E-Modul und die Bruchspannung  $\sigma_B$  nehmen mit steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit zu. Der Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf die Materialeigenschaften von Polyamid 6 ist im Vergleich zu Materialfeuchte und Temperatur weniger stark ausgeprägt.

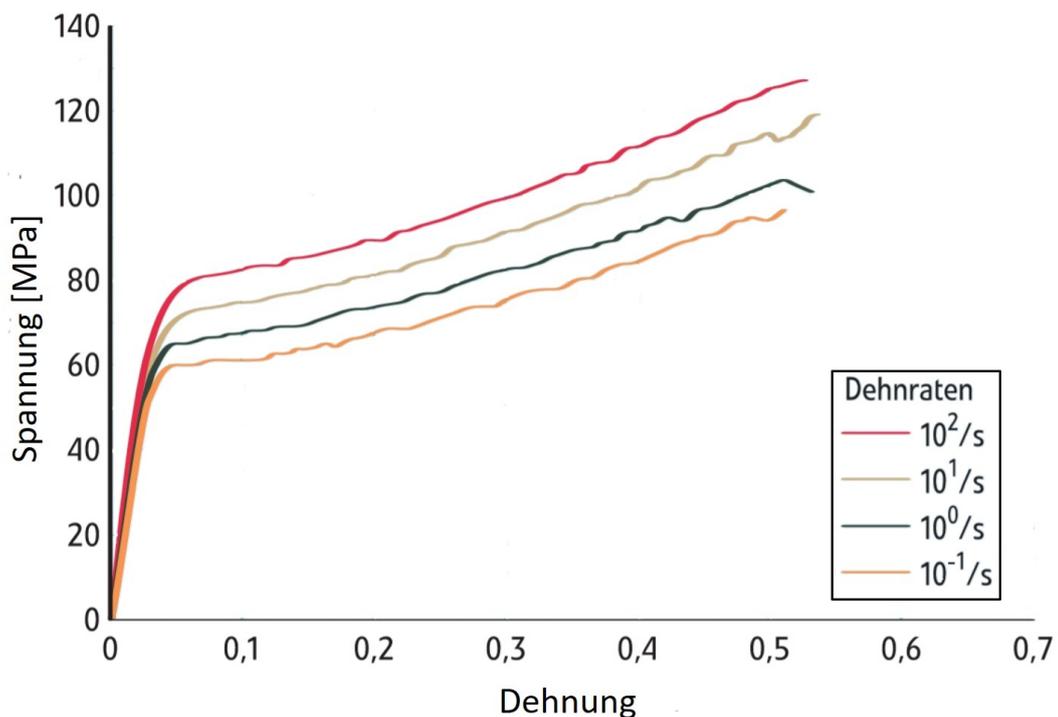


Abbildung 2.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PA 6 bei verschiedenen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten (Dehnraten) [26].

# 3 Experimentelle Untersuchung des Bruchverhaltens von Polyamid-Schrauben

## 3.1 Aufbau einer Versuchsapparatur

Zur experimentellen Untersuchung der Polyamid-Schrauben wurde die in [15, 16] beschriebene Versuchsapparatur entwickelt und aufgebaut.

### 3.1.1 Funktionsprinzip der Versuchsapparatur

Der Schraubenprüfstand (vgl. Abbildung 3.1) besteht aus einem Elektromotor (1), der über einen programmierbaren Frequenzumrichter (FU) gesteuert wird. Über eine Kupplung (2) wird eine Trapezspindel (3) angetrieben. Mit einer auf der Trapezspindel befindlichen Flanschnutter (4) wird die Rotationsbewegung in eine translatorische Bewegung des fest mit der Flanschnutter verbundenen Schlittens (5) übersetzt. Nachdem der Schlitten auf die Prüfgeschwindigkeit beschleunigt wurde, trifft dieser auf die Prüfvorrichtung (6, vgl. Abbildung 3.2). Diese besteht aus einem am Tisch fixierten Teil (7) und der Krafteinleitungseinheit (8), die durch Gleitlager geführt wird. Um eine Beschädigung des Prüfstands bei hohen Geschwindigkeiten zu vermeiden, wurde eine Dämpfungsplatte (9) zwischen dem fixierten Teil und der Krafteinleitungseinheit angebracht. Mittels Endschalter (10) wird der Motor bei Erreichen der definierten Endposition gestoppt und gleichzeitig die Bremse des Motors aktiviert, um die Schlittengeschwindigkeit zu verringern. Bei niedrigen Motordrehzahlen reicht der Bremsweg aus, um den Schlitten vollständig abzubremesen. Bei höheren Drehzahlen rutscht die Flanschnutter vom Gewinde der Spindel. Die Krafteinleitungseinheit wird kraftschlüssig durch den Schlitten translatorisch bewegt und belastet somit die eingespannte Kunststoffschraube (11) auf Zug. Zusätzlich kann zur Einstellung des Belastungsverlaufs der Schraube ein Dämpfer (12) zwischen Schlitten und Krafteinleitungseinheit montiert werden. Mit der Software “Siemens Starter“ wird der Frequenzumrichter zum Steuern des Elektromotors konfiguriert. Die Steuerung geschieht über Signale mit definierten *Frequenzen*. Frequenz  $f$ , Motor- und Spindeldrehzahl  $\omega$  sowie Schlittengeschwindigkeit  $v$  hängen dabei wie folgt zusammen:

$$\omega = 0,5 \cdot f \text{ [U/s]} \quad v = 0,04 \cdot \omega = 0,02 \cdot f \text{ [m/s]} \quad (3.1)$$

Weitere Details zum Prüfstand und der Steuerung können [16] entnommen werden.

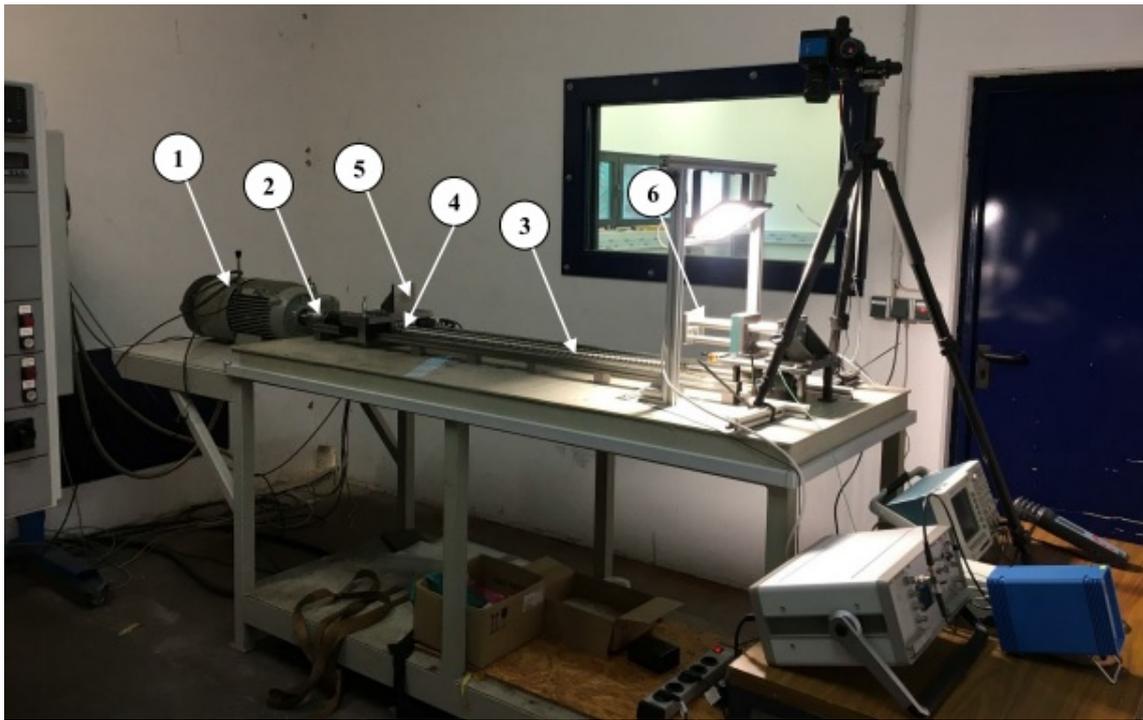


Abbildung 3.1: Schraubenprüfstand im Technikum in Kappelrodeck.

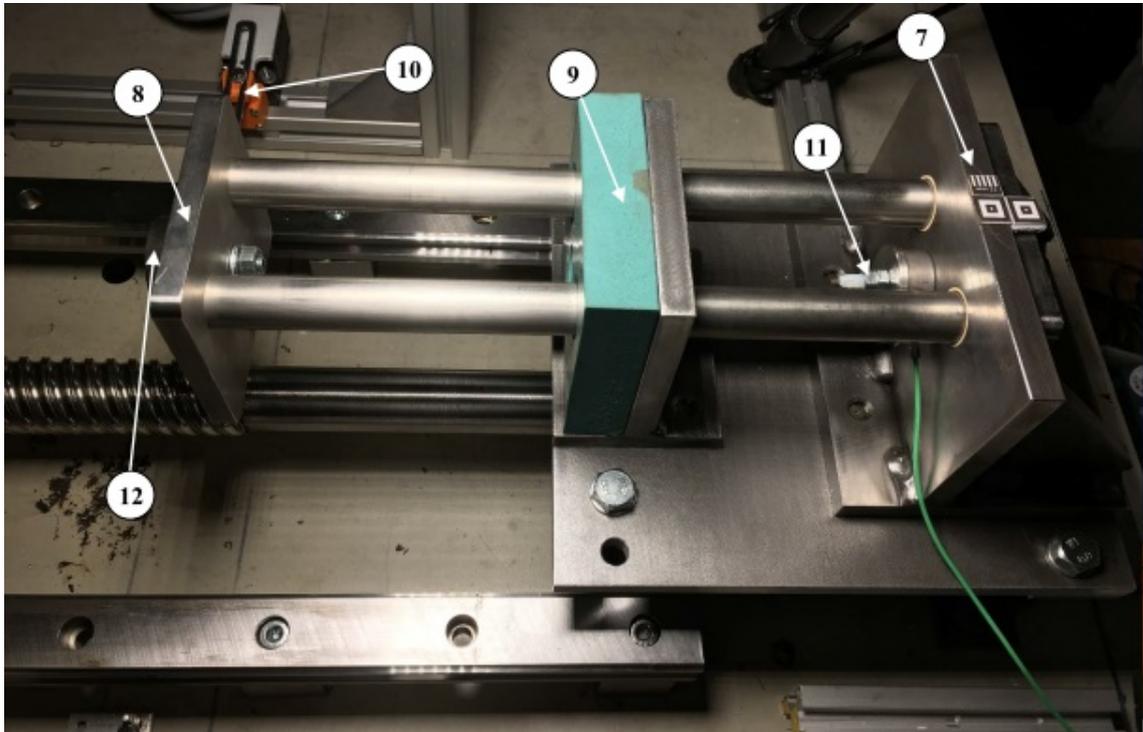


Abbildung 3.2: Detailaufnahme der Prüfvorrichtung des Schraubenprüfstands im Technikum in Kappelrodeck.

### 3.1.2 Messdatenerfassung

Für die spätere Auswertung der Versuche wurden die an der Polyamid-Schraube anliegende Kraft sowie der Längenänderung der Schraube zeitlich aufgelöst erfasst. Der Schlitten (5) passiert kurz vor dem Auftreffen auf die Belastungseinheit eine Lichtschranke. Die Lichtschranke gibt ein Signal geringer Spannung an einen Signalgenerator ab. Dieser wiederum erzeugt einen Rechteckimpuls womit zeitgleich die Aufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera und die Datenerfassung am Oszilloskop bzw. Transientenrekorder gestartet wird. Der Signalgenerator wird benötigt weil die Hochgeschwindigkeitskamera einen Rechteckimpuls als Triggersignal erwartet. Die während des Versuchs an der Schraube anliegende Kraft wird von einer Kraftmessdose der Firma Kistler mit zugehörigem Ladungsverstärker gemessen. Das vom Ladungsverstärker ausgegebene Kraft-Zeit-Signal sowie der vom Signalgenerator erzeugte Rechteckimpuls werden mit dem Oszilloskop bzw. Transientenrekorder erfasst und gespeichert. Um Aussagen über die Dehnung der Polyamid-Schraube treffen zu können, ist die Versuchsanlage mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und einer zusätzlichen Beleuchtung ausgestattet. Kamera und Beleuchtung sind auf den hinteren Teil der Prüfvorrichtung (7) ausgerichtet. An dieser sind sowohl Markierungen als auch eine Längenskala angebracht. Aus den Weg-Zeit-Daten für die Prüfvorrichtung lässt sich der Dehnungsverlauf berechnen. Das verwendete Kameraobjektiv ermöglicht eine maximale Aufnahmezeit von bis zu 6000 Bildern pro Sekunde.

## 3.2 Versuchsdurchführung

### 3.2.1 Versuchsablauf

Zunächst wird gemäß Abschnitt 3.2.2 die Motordrehzahl konfiguriert und die Versuchsanlage in Ausgangsstellung gebracht. Anschließend wird die zu untersuchende Polyamid-Schraube im Prüfstand eingespannt. Dazu wird die Kraftmessdose über die sich im Prüfstand befindliche Schraube geschoben (bei Schrauben der Größe M6 mit einer Hülse, um ein Aufliegen des Schraubenkopfs zu gewährleisten). Anschließend werden zwei Metallmutter mit einem definierten Drehmoment auf die Schraube aufgedreht. Die Verwendung von zwei Metallmutter verhindert ein Abziehen der Mutter vom Kunststoffgewinde der Schraube. Anschließend werden alle Messgeräte in Bereitschaft versetzt und die Beleuchtung eingeschaltet. Unmittelbar vor Messbeginn wird der Ladungsverstärker aktiviert. Nach dem Versuch werden alle Messdaten gespeichert und die Schraubenbruchstücke visuell auf Fehlstellen untersucht. Bei raumfeuchten und feuchtigkeitsgesättigten Schrauben werden einige Schraubenbruchstücke gewogen, markiert und im Trockenschrank bei 60 °C bis zur vollständigen Trocknung gelagert. Durch Massendifferenzbildung wird so im Nachhinein die Materialfeuchte der Bruchstücke am Versuchstag bestimmt.

### 3.2.2 Versuchsprogramm

Um die in Abschnitt 1.2 formulierten Fragestellungen beantworten zu können, wurde ein Versuchsprogramm zur Schaffung einer einschlägigen Messdatenbasis erarbeitet. Dabei wurden Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten herangezogen wie sie an Polyamid-Schrauben auftreten, wenn diese als Verschlusschrauben von Explosionsklappen eingesetzt werden. Die Bandbreite der Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten beträgt nach [15]:

$$2.334 \text{ N/s} \leq \frac{dF}{dt} \leq 754.920 \text{ N/s} \quad (3.2)$$

Da bei solchen Explosionsklappen Polyamid-Schrauben bis zur Größe M10 Verwendung finden, wurden im Versuchsprogramm Schrauben der Größen M6, M8 und M10 untersucht. Dabei wurden die drei Materialfeuchtezustände trocken, raumfeucht, gesättigt (siehe Glossar) berücksichtigt. Um den in [15] dargestellten Bereich möglichst gut abzudecken, wurden bis zu 7 verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten untersucht, wie man Tabelle 3.1 entnehmen kann.

Tabelle 3.1: Ermittelte Frequenzen, Drehzahlen und Schlittengeschwindigkeiten mit zugehörigen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten für spritzgegossene, raumfeuchte Polyamid-Schrauben der Größe M6.

Schrauben	Größe M6, raumfeucht						
$f$ [Hz]	0,3	5	15	27,5	38	53	65
$\omega$ [U/s]	0,15	2,5	7,5	13,75	19	26,5	32,5
$v$ [m/s]	0,006	0,1	0,3	0,55	0,76	1,06	1,3
$dF/dt$ [N/s]	2000	45.000	150.000	300.000	450.000	600.000	750.000

Um ein Vergleichskriterium zu schaffen, wurden vor Messprogrammbeginn mit Hilfe von Versuchen an raumfeuchten Polyamid-Schrauben der Größe M6 die einzustellenden Frequenzen ermittelt, mit denen sich die gewünschten Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten ergeben. Dabei wurde die Frequenz bzw. Motordrehzahl bzw. Schlittengeschwindigkeit so lange variiert, bis die jeweilige Belastungsanstiegsgeschwindigkeit (vgl. Formel 3.2) erreicht wurde. Die so bestimmten sieben Frequenzen wurden für alle Versuche verwendet. In Tabelle 3.1 sind die ermittelten Motordrehzahlen für die festgelegten Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten dargestellt. Aus zeitlichen Gründen wurden teilweise nur jeweils drei beziehungsweise fünf Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten pro Konfiguration untersucht, da sich hieraus bereits klare Trends ableiten ließen.

### 3.2.3 Schraubenkonditionierung

Die benötigten Schrauben wurden vor Versuchsbeginn für mindestens 60 Tage in einem Trockenschrank bei 60 °C oder in raumtemperiertem Leitungswasser gelagert, um eine vollständige Trocknung bzw. Sättigung sicherzustellen. Durch Wiegen der Schrauben

wurde der Gleichgewichtszustand der Materialfeuchte in beiden Fällen sichergestellt. In Tabelle 3.2 ist die Materialfeuchte der Polyamid-Schrauben in Abhängigkeit des Konditionierungszustand sowie der Schraubengröße aufgelistet. Die Materialfeuchte  $W$  wurde dabei durch Mittelwertbildung der Materialfeuchte verschiedener Schraubbruchstücke nach vollständiger Trocknung bestimmt.

Tabelle 3.2: Konditionierungszustände mit zugehöriger Materialfeuchte  $W$  für Polyamid-Schrauben der Größen M6, M8 und M10.

Schraubengröße	Konditionierungszustand	$\bar{W}$ [Vol- %]
M6	trocken	0
M6	raumfeucht	2,50
M6	gesättigt	6,76
M8	trocken	0
M8	raumfeucht	2,49
M8	gesättigt	6,68
M10	trocken	0
M10	raumfeucht	2,71
M10	gesättigt	6,38

### 3.2.4 Schraubenbeschaffenheit

Für die Versuche wurden Polyamid-Schrauben aus verschiedenen Herstellungsverfahren verwendet. Zunächst wurden spritzgegossene Schrauben untersucht. Diese sind kostengünstig und kurzfristig am Markt verfügbar, weshalb sie auch zum Verschließen von Explosionsklappen eingesetzt werden. Im Laufe der Versuche zeigte sich jedoch, dass die Schrauben produktionsbedingt häufig Fehlstellen aufweisen (vgl. Abbildung 3.3). Hierdurch werden die Schrauben - abhängig von der Ausprägung der Fehlstelle - unterschiedlich stark geschwächt. Dies führt zu starken Streuungen in den Versuchsergebnissen. In der Prüfung von mit spritzgegossenen Polyamid-Schrauben verschlossenen Explosionsklappen entstehen hierdurch große Unsicherheiten und möglicherweise in der Folge ein Öffnen der Klappe bei zu hohen Drücken in der Anwendung. Deshalb wurde eine weitere Versuchsreihe mit aus Stangenmaterial gedrehten Polyamid-Schrauben durchgeführt. Diese Schrauben weisen keine sichtbaren Fehlstellen auf.

## 3.3 Versuchsauswertung

Zur Bestimmung der Bruchkraft wird bei Zugversuchen die Flanke des abfallenden Signals nach Erreichen des Kraftmaximums verwendet. Hier dient in der Regel eine Abweichung von mindestens 20 % zwischen zwei aufeinander folgenden Messwerten als Bestimmungskriterium [11]. Aufgrund der hohen Abtastrate bei der Messwerterfassung



Abbildung 3.3: Beispielhafte Fehlstellen in geprüften Polyamid-Schrauben [16].

und des bei feuchtigkeitsgesättigten Schrauben zähen Materialverhaltens, beträgt die Abweichung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messwerten häufig weniger als 20%. Eine Bestimmung der Bruchkraft mit dem genannten Abweichungskriterium ist deshalb für diese Versuche nicht konsistent anwendbar. Deshalb wurde die Schwelle für die Abweichung für einige Versuchsreihen herabgesetzt.

Wenn auch das Herabsetzen der Schwelle keine sinnvollen Ergebnisse liefert, wird die Bruchkraft  $F_B$  mit Hilfe eines alternativen Verfahrens bestimmt. Dafür werden zwei Geraden G1 und G2 an die Kraftkurve angelegt (Abbildung 3.4). Gerade G1 verläuft dabei entlang der abfallenden Flanke des Belastungsverlaufes nach Erreichen des Kraftmaximums. Gerade G2 wird entlang einer definierten Anzahl an Messwerten vor der abfallenden Flanke angelegt. Der errechnete Schnittpunkt der Geraden G1 und G2 wird als mathematischer Bruchzeitpunkt  $t_{\text{Bruch,m}}$  der Polyamid-Schraube definiert. Weil  $t_{\text{Bruch,m}}$  nicht zwingend mit einem Zeitpunkt aus dem zugrunde liegenden Messdatensatz übereinstimmt, wird derjenige Zeitpunkt aus den Messdaten als Bruchzeitpunkt  $t_{\text{Bruch}}$  festgelegt, dessen Abweichung von  $t_{\text{Bruch,m}}$  minimal ist. Der zu  $t_{\text{Bruch}}$  gehörige Kraftmesswert ist dann die Bruchkraft  $F_B$ .

Zur Bestimmung des zeitlichen Dehnungsverlauf der Polyamid-Schrauben werden die mit der Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichneten Bildsequenzen verwendet. Mit der Trackingsoftware „Motion Studio“ der Firma „IDT Vision“ wird die Bewegung der

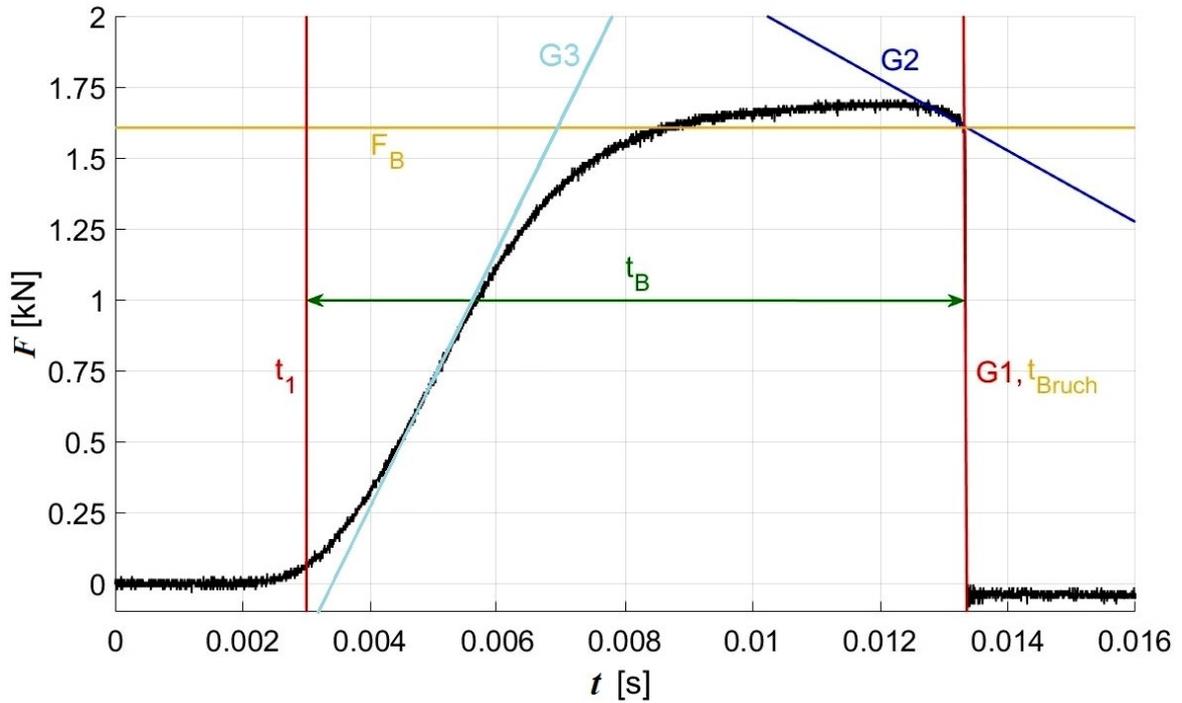


Abbildung 3.4: Exemplarischer Belastungsverlauf einer M6-Polyamid-Schraube mit Bruchkraft  $F_B$  und den zur Bestimmung des Bruchzeitpunkts sowie der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit verwendeten Geraden G1, G2 und G3 [16].

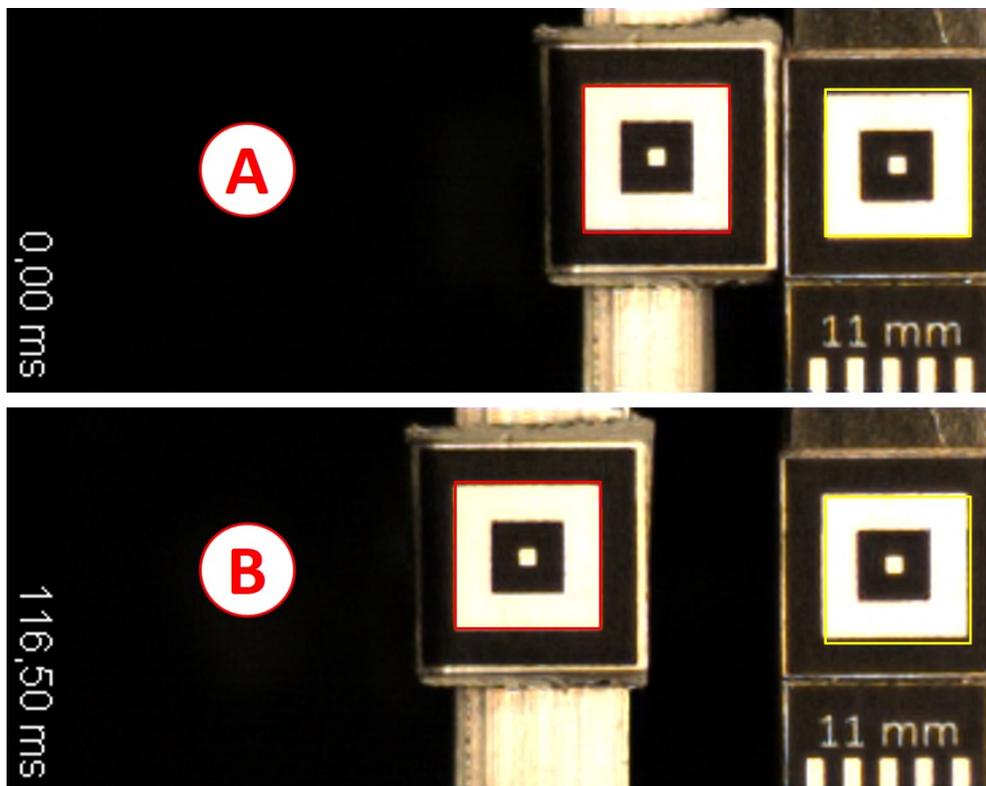


Abbildung 3.5: Exemplarische Aufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera mit Trackingmarkierungen bei Messbeginn (A) und beim Bruch der Schraube (B) [16].

Krafteinleitungseinheit (8) (Abschnitt 3.1.1) ausgewertet. Diese entspricht der Längenänderung  $\Delta l$  der Polyamid-Schraube. Hierfür wird in der Software „Motion Studio“ mit Hilfe der auf der Prüfvorrichtung angebrachten Trackingmarkierungen (Abbildung 3.5) ein Motion Tracking durchgeführt. Als Ergebnis werden zeitabhängig die  $x$ - und  $y$ -Koordinaten der Belastungseinheit ausgegeben. Unter Berücksichtigung der eingespannten Länge der Schraube  $l_0$  lässt sich mit

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.3)$$

die Dehnung berechnen. Die Dehnung zum Zeitpunkt des Bruchs  $t_{\text{Bruch}}$  entspricht der Bruchdehnung  $\varepsilon_{\text{Bruch}}$ .

Die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $dF/dt$  ist definiert als die Steigung der Geraden G3, welche die mittlere Steigung des linearen Bereichs der aufsteigenden Flanke des Belastungsverlaufs aufweist. Die mittlere Steigung ergibt sich, indem der lineare Bereich visuell ausgewählt und die Ableitung für diesen numerisch berechnet wird. Das Mittel über die Ableitungswerte ist  $dF/dt$ .

## 3.4 Versuchsergebnisse

Zunächst werden die Versuche mit spritzgegossenen und gedrehten Schrauben einzeln betrachtet. Abschließend werden die beiden Schraubentypen vergleichend betrachtet.

### 3.4.1 Versuchsergebnisse für spritzgegossene Schrauben

Bei den Versuchen mit spritzgegossenen Polyamid-Schrauben zeigte sich wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben und in Abbildung 3.3 gezeigt, dass die meisten Schrauben Fehlstellen unterschiedlicher Ausprägung aufweisen. Dies führte zu stark streuenden Versuchsergebnissen. Aufgrund dieser großen Streuung und der damit verbundenen Unsicherheit in den Ergebnissen lassen sich keine allgemeinen Aussagen zur Abhängigkeit der Brucheigenschaften von den Versuchsbedingungen ableiten.

Der Einfluss der Materialfeuchte auf das Bruchverhalten der Polyamid-Schrauben entspricht dem aus der Literatur (vgl. Abschnitt 2.3.1) bekannten Verhalten. Das heißt mit abnehmender Materialfeuchte steigt die Bruchspannung an, während die Bruchdehnung abnimmt (vgl. Abbildung 3.6). Auch der E-Modul sinkt bei zunehmender Materialfeuchte, was auf die weichmachende Wirkung des eingelagerten Wassers zurückzuführen ist [20, 24]. Dies ist unter anderem durch die Absenkung der Glasübergangstemperatur  $T_g$  durch das eingelagerte Wasser zu erklären.

Die detaillierten Ergebnisse der Versuche mit spritzgegossenen Polyamid-Schrauben können [16] entnommen werden.

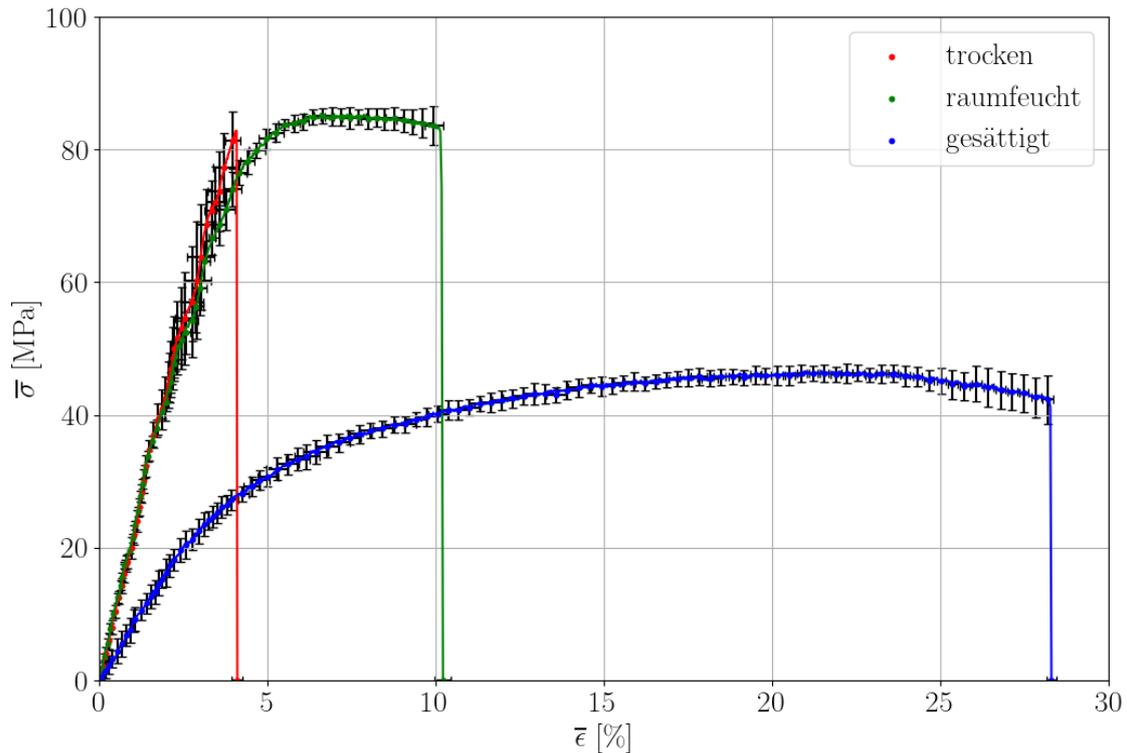


Abbildung 3.6: Spannung-Dehnung-Diagramm (gemittelt) für Polyamid-Schrauben der Größe M6 mit den drei untersuchten Konditionierungszuständen trocken, raumfeucht, gesättigt bei einer Schlittengeschwindigkeit  $v_{\text{Schlitten}} = 0,1 \text{ m/s}$ .

### 3.4.2 Versuchsergebnisse für gedrehte Schrauben

Die Versuchsergebnisse mit gedrehten Schrauben zeigen klare Tendenzen, was die Abhängigkeit der Brucheigenschaften von den Versuchsparametern angeht. Bei raumfeuchten und gesättigten Polyamid-Schrauben steigt mit zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit die Bruchkraft an, während bei trockenen Schrauben die Bruchkraft mit zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit abnimmt. Die Bruchdehnung wird von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit nahezu nicht beeinflusst.

Der Einfluss der Materialfeuchte auf das Bruchverhalten der Polyamid-Schrauben entspricht auch bei gedrehten Schrauben dem aus der Literatur (vgl. Abschnitt 2.3.1) bekannten Verhalten.

Detaillierte Ergebnisse der Versuche mit gedrehten Polyamid-Schrauben können [23] entnommen werden.

### 3.4.3 Vergleich zwischen spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben

Beim Vergleich der Ergebnisse der Versuche mit spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben fällt auf, dass die fehlstellenfreien gedrehten Schrauben eine geringere Streuung aufweisen (vgl. Abbildungen 3.7, A.1 & A.2). Außerdem ist die mittlere

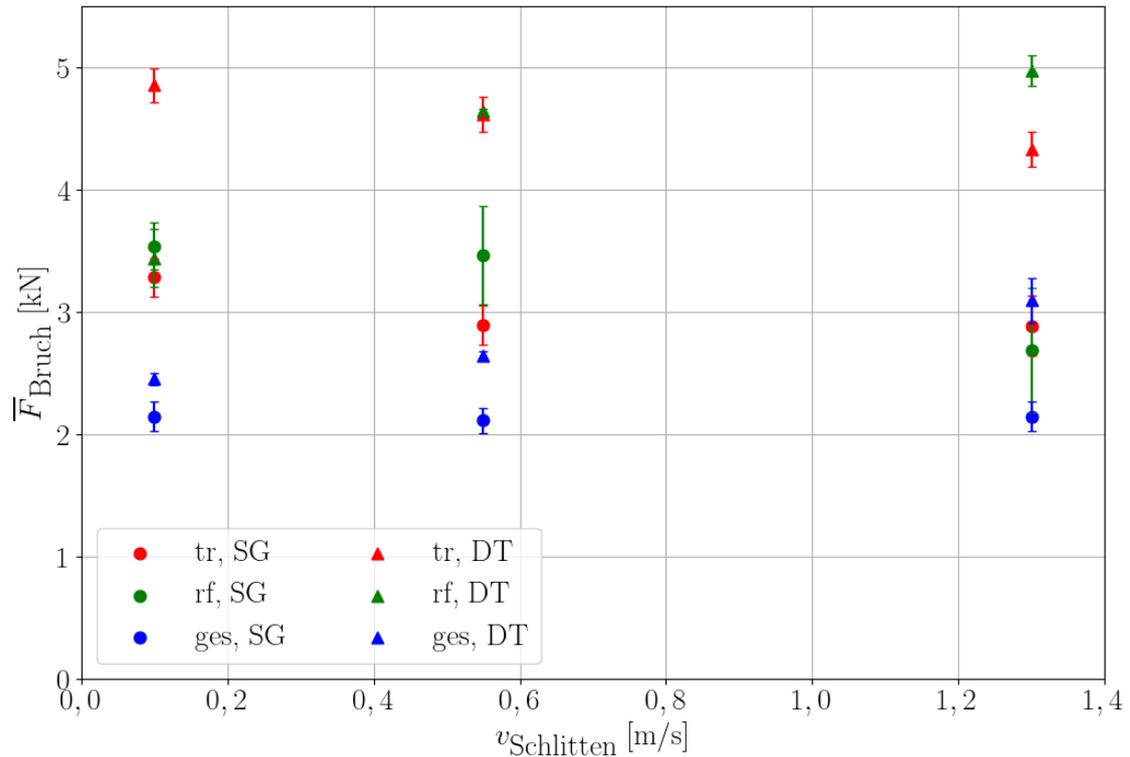


Abbildung 3.7: Vergleich der Bruchkräfte von spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben der Größe M10 für verschiedene Schlittengeschwindigkeiten (SG: Spritzguss, DT: Drehteil, tr: trocken, rf: raumfeucht, ges: gesättigt)

Bruchkraft bei den gedrehten Schrauben bis auf wenige Ausnahmen größer oder gleich der Bruchkraft für spritzgegossene Schrauben. Die Ausnahmen betreffen insbesondere die Schraubengröße M8. Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Schraubengrößen zeigt allerdings, dass in diesen Fällen die Bruchkräfte für die spritzgegossene Schrauben der Größe M8 größer als bei Schrauben der Größe M10 sind, was aufgrund der kleineren Querschnittsfläche eine deutliche größere Bruchspannung bedeutet. Diese Ergebnisse sind folglich kritisch zu hinterfragen. Betrachtet man die berechneten mittleren Zugfestigkeiten für die verschiedenen Versuche (B.1 - B.3), so fällt auf, dass in den beschriebenen Fällen die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Schrauben deutlich oberhalb der nominellen Zugfestigkeit des Materials (Polyamid66) von etwa 85 MPa [7] liegt. Außerdem liegt die mittlere Bruchkraft bei gesättigten spritzgegossene Schrauben der Größe M6 höher als bei den gedrehten Schrauben. Da bei den gesättigten Schrauben durch das Verschrauben im Prüfstand relativ hohe Torsionsbelastungen auf die Schrauben aufgebracht werden, ist eine Vorschädigung dieser nicht auszuschließen. Die hohe Torsionsbelastung rührt von der mit der Wasseraufnahme einhergehenden Volumen- und damit auch Durchmesserzunahme her, die zu einer Übergangs- bzw. Presspassung zwischen Schraube und Mutter führt. Dies wirkt sich insbesondere bei der Schraubengröße M6 deutlich aus, da hier auftretende Schädigungen relativ zur Querschnittsfläche der Schraube stärker ausgeprägt sind. Ein Anziehen der Muttern auf gesättigten Polyamid-Schrauben mit einem definierten Drehmoment war aufgrund der starken Volumenzunahme dieser nahezu unmöglich. Deshalb kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Versuchsergebnisse von der durchführenden Person abhängig sind.

# 4 Experimentelle Untersuchung des Öffnungsverhaltens von Explosionsklappen

## 4.1 Versuchsaufbau

Um das Versagensverhalten von Polyamid-Schrauben im Einsatzfall - Verschluss einer Explosionsklappe - abschließend bewerten zu können, wurde das Öffnungsverhalten einer mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Explosionsklappe experimentell untersucht. Die Versuche wurden am 1 m<sup>3</sup>-Behälter auf dem Versuchsfeld in Kappelrodeck durchgeführt. Hierfür wurde am Behälter eine Entlastungsklappe mit einer Entlastungsfläche  $A_E$  von 0,0625 m<sup>2</sup> angebracht (siehe Abbildung 4.1), welche mit vier Polyamid-Schrauben der Größe M3 verschlossen wurde.

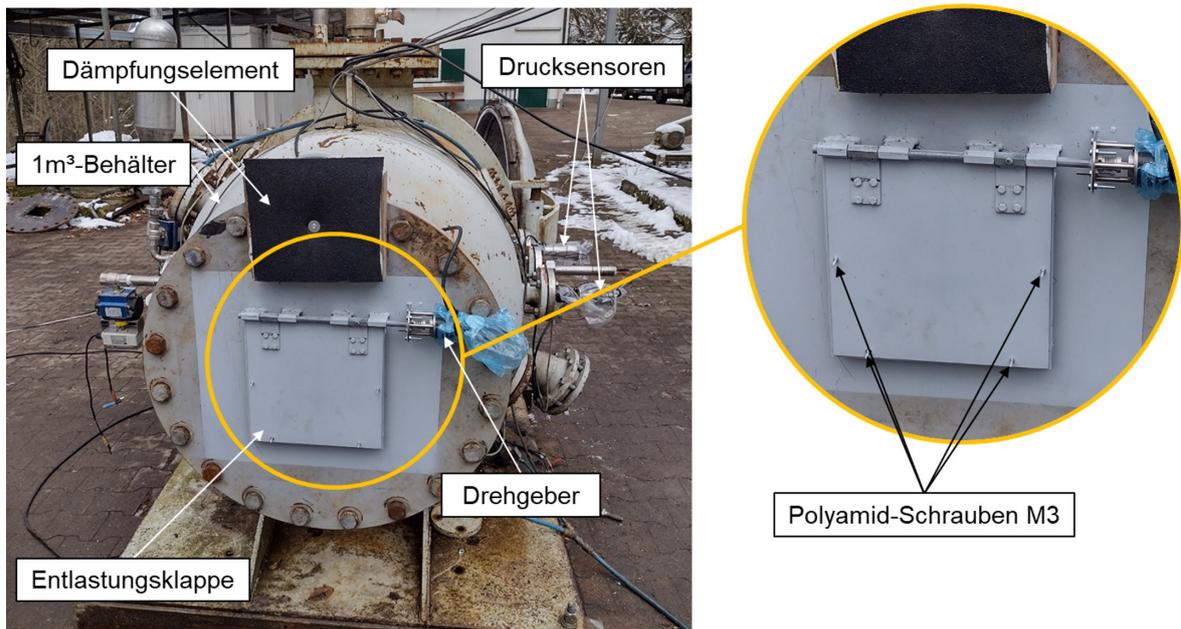


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau am 1 m<sup>3</sup>-Behälter. Links: 1 m<sup>3</sup>-Behälter mit montierter Klappe, rechts: Detailaufnahme der mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Klappe.

Die Abstände der Schrauben von der Drehachse sowie die Dimensionen der Klappe können Abbildung 4.2 entnommen werden. Zum Erfassen des Öffnungsvorgangs wurde an der Drehachse der Entlastungsklappe ein Drehgeber montiert. Zusätzlich wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, die seitlich auf die Klappe ausgerichtet wurde, das Öffnungsverhalten der Klappe dokumentiert. Ein am Behälter ange-



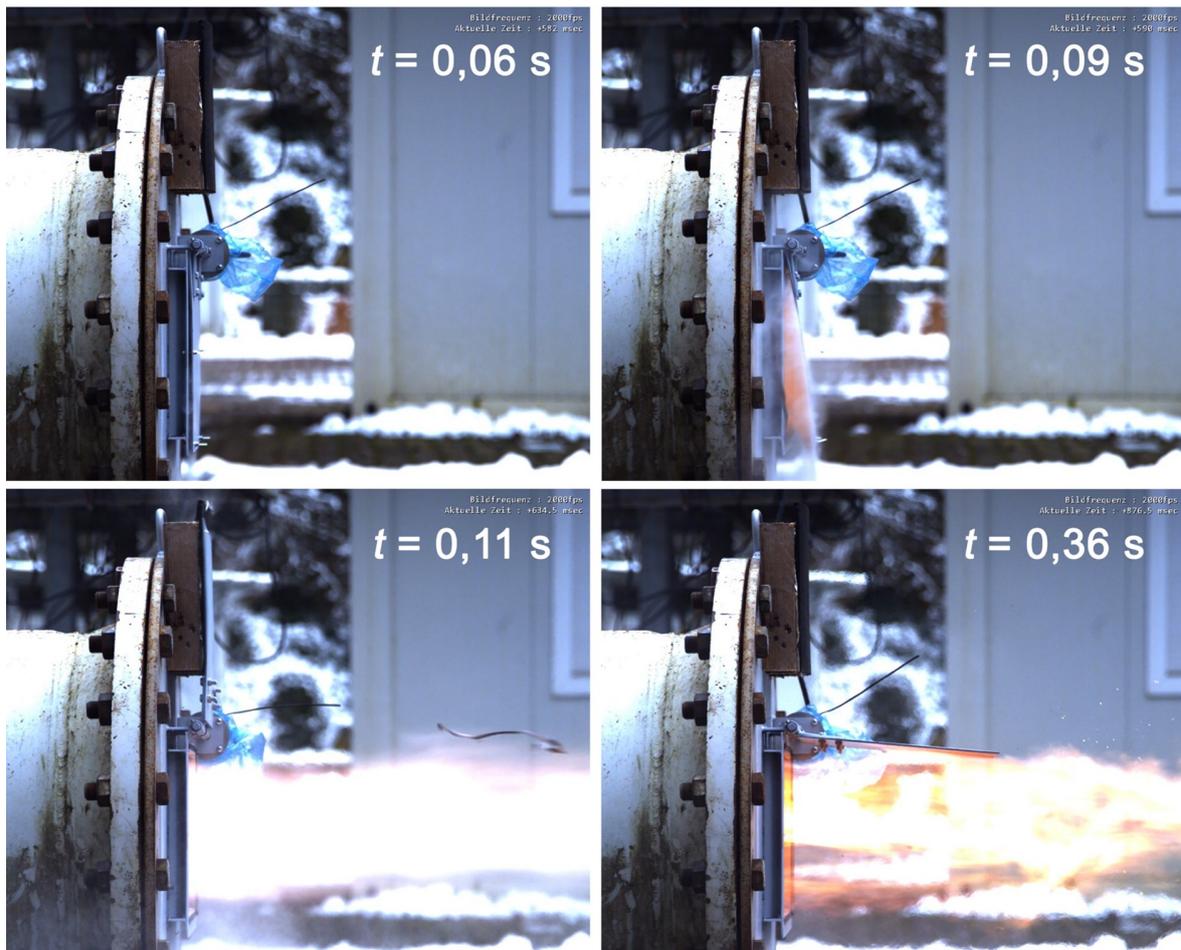


Abbildung 4.3: Öffnungsvorgang einer mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Explosionsklappe am 1 m<sup>3</sup>-Behälter; Zündung bei  $t = 0$  s.

Nach der Zündung steigt der Druck im Behälter an. Bei Erreichen der Bruchfestigkeit versagen die Polyamid-Schrauben an der Explosionsklappe und diese öffnet sich. Abbildung 4.3 zeigt einzelne Bilder des Öffnungsvorgangs, der mit der Hochgeschwindigkeitskamera dokumentiert wurde.

Nach Versuchsende werden die Versuchsdaten gespeichert und der nächste Versuch kann vorbereitet werden.

## 4.2.2 Versuchsprogramm

Um den Einfluss der Materialfeuchte der Polyamid-Schrauben auf den Öffnungsvorgang der Explosionsklappe zu untersuchen, wurden Versuche mit raumfeuchten und gesättigten Schrauben durchgeführt. Die gesättigten Schrauben wurden vor Versuchsbeginn für 8 Wochen in Wasser gelagert und erst beim Verschließen der Entlastungsklappe aus dem Wasser entnommen. Die Lufttemperatur und somit auch die Schraubentemperatur betrug während der Versuche ca. 0°C. Es wurden zwei verschiedene Stäube mit unterschiedlichen Konzentrationen  $c_{St}$  eingesetzt: Maisstärke (ungetrocknet) und

Weizenmehl. Hierdurch sollte der Einfluss der Druckanstiegsgeschwindigkeit auf das Öffnungsverhalten der Klappe untersucht werden. Je Parametervariante wurden 5 Versuche durchgeführt. Die Versuchsparameter und -anzahl können Tabelle 4.1 entnommen werden. Zu Beginn wurde ein Versuch mit Maisstärke ( $650 \text{ g/m}^3$ ) und  $t_v = 0,52 \text{ s}$  durchgeführt. Da hierbei  $p_{\text{red}}$  über  $1,5 \text{ bar}$  lag, wurden die Versuchsparameter anschließend angepasst, um für  $p_{\text{red}}$  Werte unter  $1 \text{ bar}$  zu erreichen.

Tabelle 4.1: Untersuchte Parameter bei den Versuchen mit Explosionsklappe am  $1 \text{ m}^3$ -Behälter.

Staub	Konditionierungszustand	$c_{\text{st}} [\text{g/m}^3]$	$t_v [\text{s}]$	Versuchsanzahl
Maisstärke	raumfeucht	650	0,52	1
Weizenmehl	raumfeucht	750	0,52	5
Weizenmehl	gesättigt	750	0,52	5
Maisstärke	raumfeucht	500	0,65	5
Maisstärke	gesättigt	500	0,65	5

### 4.3 Versuchsauswertung

Für die Auswertung der Versuche wird zunächst  $p_{\text{red},n}$  für beide Drucksensoren für die jeden Versuch  $n$  bestimmt und hieraus der Mittelwert  $\bar{p}_{\text{red}}$  berechnet. Danach wird  $p_{\text{dyn},n}$  für beide Drucksensoren bestimmt. Hierfür werden zwei verschiedene Methoden genutzt:

1. Es wird das Signal des Drehgebers verwendet. Dabei wird der Druck, der bei einem Öffnungswinkel  $\theta$  von  $1^\circ$  im Behälter herrscht, als  $p_{\text{dyn},n}$  definiert.
2. Es werden die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera ausgewertet. Hierbei wird der Behälterdruck, der zu dem Zeitpunkt herrscht, bei dem eine Bewegung der Explosionsklappe zu erkennen ist, als  $p_{\text{dyn},n}$  definiert, da die Bewegung der Entlastungsklappe durch das Versagen der Polyamid-Schrauben bedingt ist.

Auch hier wird aus den Werten für die beiden Drucksensoren der Mittelwert  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  berechnet. Der zeitliche Unterschied zwischen den beiden Bestimmungsmethoden für  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  wird in Abbildung 4.4 deutlich. Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wird für  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  der Wert verwendet, der mit Methode 2 (Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen) ermittelt wird, da die Werte für  $\bar{p}_{\text{dyn}}$ , die mit Methode 1 ermittelt werden, deutlich zu hoch sind. Die Messunsicherheit  $\sigma$  ergibt sich für einen Vertrauensbereich  $v = 3 \cdot m$ , mit

$$m = \pm \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

bei der mit einer Wahrscheinlichkeit  $P$  von  $99,7\%$  alle Messwerte innerhalb des Intervalls liegen [28] nach Formel 4.2, mit Standardabweichung  $s$  und dem Stichprobenumfang (Anzahl der Versuche)  $n$ .



Abbildung 4.4: Zustand der Klappe bei Bestimmung von  $p_{\text{dyn}}$  mittels Hochgeschwindigkeitskamera (links),  $t = 0,0585$  s, und Drehgeber (rechts),  $t = 0,067$  s, Zündung bei  $t = 0$  s.

$$\sigma = \pm 3 \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

Zur Bestimmung der Druckanstiegsgeschwindigkeit  $(dp/dt)_{\text{red}}$  wird zunächst mit der Funktion 4.3 (Polynom 4. Grades) der zeitliche Druckverlauf gefittet und anschließend die 1. Ableitung  $f(t)'$  gebildet.  $(dp/dt)_{\text{red}}$  ergibt sich dann aus der maximalen Steigung von  $f(t)'$  innerhalb der zeitlichen Versuchsgrenzen  $[t_{\text{zünd}}, t_{\text{pred}}]$ . Abbildung 4.5 zeigt beispielhaft den zeitlichen Druckverlauf sowie die zugehörige Fitkurve.

$$f(t) = a \cdot t^4 + b \cdot t^3 + c \cdot t^2 + d \cdot t + e \quad (4.3)$$

## 4.4 Versuchsergebnisse

Wie in den vorherigen Abschnitten 4.2 und 4.3 beschrieben wurden je Versuchsparameterkombination 5 Versuche durchgeführt und hieraus die Werte für  $p_{\text{red}}$ ,  $p_{\text{dyn}}$  sowie für  $(dp/dt)_{\text{red}}$  ermittelt.

Abbildung 4.5 zeigt exemplarisch den zeitlichen Druckverlauf während eines Versuchs mit Maisstärke ( $c_{\text{St}} = 500 \text{ g/m}^3$ ,  $t_{\text{v}} = 0,65 \text{ s}$ ). Es ist zunächst ein geringer Druckanstieg auf ca. 0,1 bar zu erkennen, der durch das Einblasen des Staubs bedingt ist. Nach der Zündung des Staub-Luft-Gemischs ( $t = 0,65 \text{ s}$ ) steigt der Druck bis zum Erreichen von  $p_{\text{red,n}}$  an, bevor er dann wieder abfällt. Das Öffnen der Entlastungsklappe hat keinen erkennbaren Einfluss auf den Druckanstieg.

Abbildung 4.6 zeigt die gemittelten Drücke  $\bar{p}_{\text{red}}$  und  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  für die verschiedenen Versuchsparameterkombinationen (Weizenmehl mit raumfeuchten und gesättigten Schrauben sowie Maisstärke mit raumfeuchten und gesättigten Schrauben). Es wird deutlich,

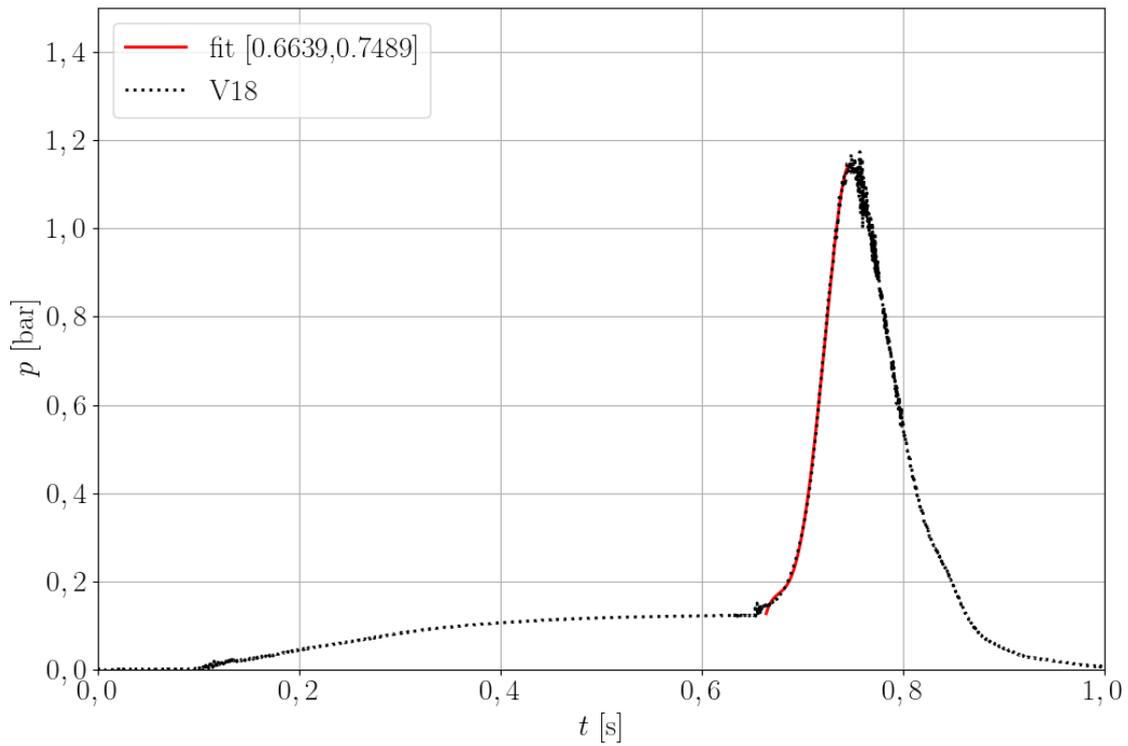


Abbildung 4.5: Zeitlicher Druckverlauf eines beispielhaften Versuchs (Maisstärke,  $c_{St} = 500 \text{ g/m}^3$ ,  $t_v = 0,65 \text{ s}$ ) sowie zugehörige Fitkurve zur Bestimmung der Druckanstiegsgeschwindigkeit.

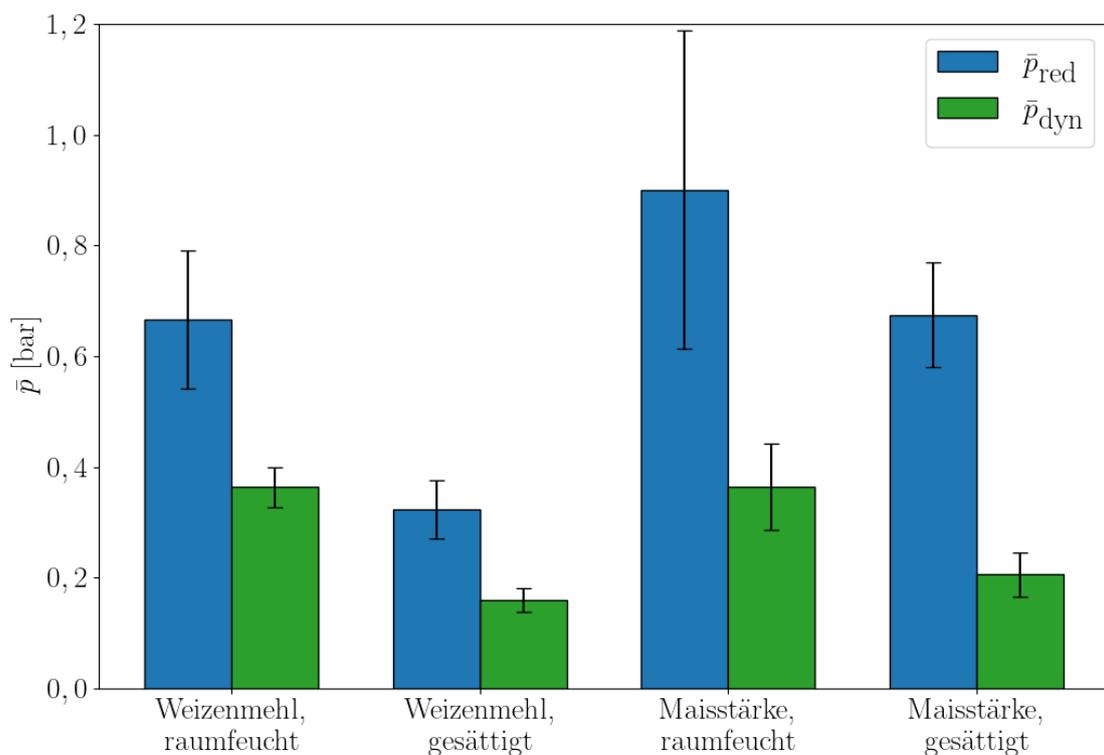


Abbildung 4.6: Gemittelte Drücke  $\bar{p}_{red}$  und  $\bar{p}_{dyn}$  für die verschiedenen Versuchsparameterkombinationen.

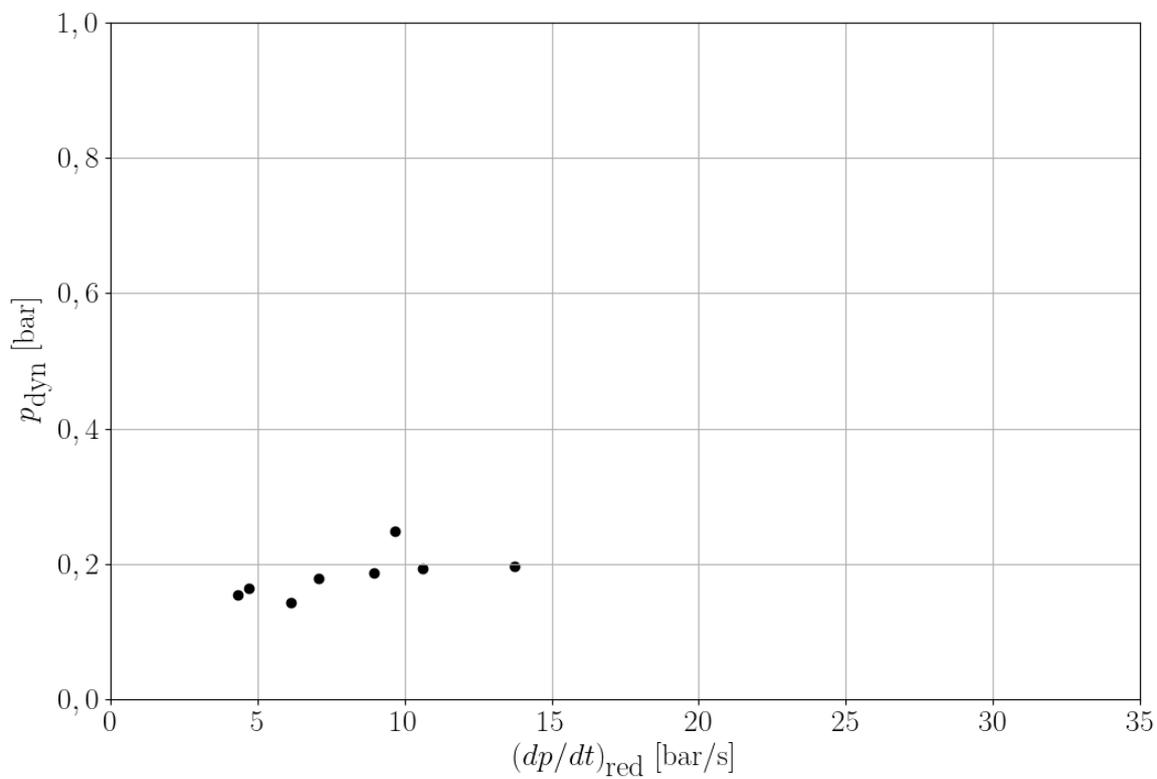
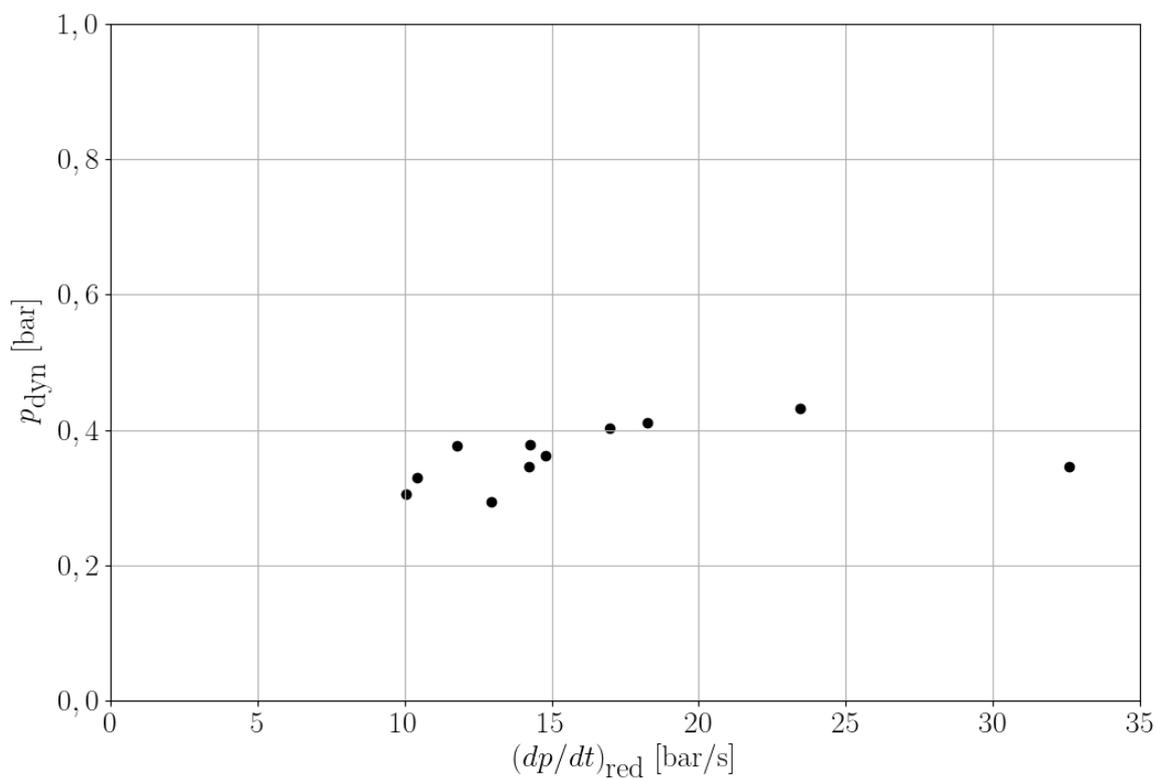


Abbildung 4.7: Abhängigkeit des dynamischen Ansprechdrucks  $p_{dyn}$  von der Druckanstiegsgeschwindigkeit  $(dp/dt)_{red}$  bei raumfeuchten (oben) und gesättigten (unten) Schrauben.

dass  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  vor allem vom Konditionierungszustand der Schrauben abhängig ist, während die weiteren Versuchsparameter (Staub, Staubkonzentration und Zündverzögerungszeit) keinen nennenswerten Einfluss auf  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  haben. Für raumfeuchte Schrauben wurde in den Versuchen ein  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  von etwa 0,36 bar gemessen. Für die gesättigten Schrauben lag  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  bei den Versuchen mit Weizenmehl bei ca. 0,16 bar und bei den Versuchen mit Maisstärke bei etwa 0,2 bar. Im Gegensatz zu  $\bar{p}_{\text{dyn}}$  zeigt sich für  $\bar{p}_{\text{red}}$  ein deutlicher Einfluss der untersuchten Versuchsparameter. Bei den Versuchen mit Weizenmehl wurde für  $\bar{p}_{\text{red}}$  mit raumfeuchten Schrauben ein Wert von 0,67 bar und mit gesättigten Schrauben ein Wert von 0,32 bar gemessen. Bei den Versuchen mit Maisstärke wurden 0,9 bar beziehungsweise 0,67 bar gemessen. Insbesondere bei den Versuchen mit Maisstärke und raumfeuchten Schrauben wurde eine starke Streuung beobachtet. Die detaillierten Ergebnisse der Versuche können den Tabellen im Anhang (B.4 - B.8) entnommen werden.

Abbildung 4.7 verdeutlicht, dass der dynamische Ansprechdruck  $p_{\text{dyn}}$  bei den durchgeführten Versuchen nahezu unabhängig von der Druckanstiegsgeschwindigkeit  $(dp/dt)_{\text{red}}$  ist. Lediglich bei den Versuchen mit raumfeuchten Schrauben lässt sich für niedrige  $(dp/dt)_{\text{red}} < 15$  bar/s keine eindeutige Aussage treffen.

# 5 Diskussion der Ergebnisse

Ziel dieses Projekts war die Beurteilung der Einsatzfähigkeit von Polyamid-Schrauben als Verschlussmechanismus von Explosionsklappen. Hierbei war vor allem der Einfluss äußerer Faktoren auf das Bruchverhalten der Schrauben und damit das Öffnungsverhalten von Explosionsklappen entscheidend. Untersucht wurde, wie sich die Belastungsanstiegs- beziehungsweise Druckanstiegsgeschwindigkeit sowie die Materialfeuchte auf das Versagens- und somit Öffnungsverhalten auswirken.

## 5.1 Untersuchung des Bruchverhaltens von Polyamid-Schrauben

Die im Abschnitt 1.2 definierten Fragestellungen (1. - 3.) können auf Basis der Ergebnisse wie folgt beantwortet werden:

1. Die Bruchkraft steigt mit zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit zunächst an, bevor sie bei weiter steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit nahezu konstant bleibt. Für die Bruchdehnung ist ein vergleichbares Verhalten zu sehen. Zunächst nimmt die Bruchdehnung mit zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit ab, bevor auch die Bruchdehnung bei weiterer Zunahme der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit nahezu konstant bleibt.
2. Die Materialfeuchte hat einen großen Einfluss auf das Bruchverhalten der untersuchten Polyamid-Schrauben. Durch die weichmachende Wirkung des eingelagerten Wassers kommt es mit zunehmender Materialfeuchte zu einer deutlichen Abnahme der Bruchkraft bei gleichzeitiger Zunahme der Bruchdehnung. Durch das Trocknen der Schrauben aus dem raumfeuchten Zustand wird eine Versprödung des Materials erreicht, wodurch die Bruchdehnung abnimmt. Die Bruchkraft wird hierdurch aber nur in geringem Maße beeinflusst.
3. Einen entscheidenden Einfluss auf das Bruchverhalten hat jedoch vor allem die Herstellung der Polyamid-Schrauben. Diese werden üblicherweise im Spritzgussverfahren hergestellt. Da Polyamid-Schrauben ein günstiges Massenprodukt sind, bei dem die mechanischen Eigenschaften nur einen nachrangigen Stellenwert haben, zeigten sich bei der deutlichen Mehrzahl der untersuchten Polyamid-Schrauben Fehlstellen im Bereich des Übergangs zwischen Schraubenkopf und -schaft, die auch keine einheitliche Ausprägung aufwiesen. Dies führte zu sehr stark streuenden und kaum bewertbaren Versuchsergebnissen, weshalb eine weitere Versuchsreihe mit aus Stangenmaterial gedrehten Polyamid-Schrauben durchgeführt wurde. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe waren konsistent bei einer zusätzlichen deutlichen Abnahme der Standardabweichung. Die Schraubengröße hingegen hat nur einen untergeordneten Einfluss auf das Bruchverhalten der

Polyamid-Schrauben. Lediglich bei den gesättigten Schrauben wurde ein Einfluss gemessen, der aber sehr wahrscheinlich durch die Versuchsvorbereitung bedingt ist. Durch die Volumenzunahme in Folge der Wasseraufnahme ist es deutlich schwieriger die Schrauben mit den zugehörigen Muttern im Versuchsstand zu fixieren. Die Schrauben werden bereits beim Einbau tordiert und somit vorgeschädigt. Je geringer der Schraubendurchmesser ist, desto geringer ist auch der Torsionswiderstand und desto größer ist auch der Einfluss von eingebrachten Schädigungen, da das Verhältnis von intakter Querschnittsfläche zu Schädigung abnimmt.

## 5.2 Untersuchung des Öffnungsverhaltens von Explosionsklappen

Die Fragestellungen 4. & 5. (vgl. Abschnitt 1.2) wurden durch Versuche mit einer Entlastungsklappe an einem  $1\text{m}^3$ -Behälter beantwortet:

1. Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben hat die Druckanstiegsgeschwindigkeit  $(dp/dt)_{\text{red}}$  nur bei Werten  $< 15 \text{ bar/s}$  einen Einfluss auf den dynamischen Ansprechdruck  $p_{\text{dyn}}$  und damit auf das Öffnungsverhalten der Explosionsklappe. Der Vergleich zwischen raumfeuchten und gesättigte Schrauben zeigt, dass raumfeuchte Schrauben zu deutlich höheren  $p_{\text{dyn}}$  und damit auch zu höheren  $p_{\text{red}}$  führen und damit kritischer für den Einsatz sind.
2. Auf Basis der Versuchsergebnisse zum Bruchverhalten von Polyamid-Schrauben sowie zum Öffnungsverhalten von Explosionsklappen lassen sich für die Prüfung von mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Explosionsklappen drei Kriterien ableiten. Werden diese beachtet kann von einer sicheren Verwendung im Einsatz ausgegangen werden.
  - (a) Die Prüfung muss mit fehlerstellenfreien Schrauben (z.B. Drehteile) durchgeführt werden.
  - (b) Die Prüfung muss mit einer Druckanstiegsgeschwindigkeit größer  $15 \text{ bar/s}$  durchgeführt werden.
  - (c) Es müssen Schrauben mit geringer Materialfeuchte (Lagerung bei Raumbedingungen ausreichend) eingesetzt 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.: *Kunststofftechnik- 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 Heineemann, Oxford, 1997.
- [7] ENSINGER GMBH: *TECAMID 66 natural - Halbzeug (Rundstäbe, Platten, Hohlstäbe)*, Technisches Datenblatt, Nufingen, 2023.
- [8] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN 14797: Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung*, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [9] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN 14491: Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [10] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN 14034: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen*, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [11] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe- Bestimmung der Zugeigenschaften*, Beuth Verlag, Berlin, 2019.
- [12] 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 Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen*, Amtsblatt der Europäischen Union L96/309, 57. Jahrgang, EUR-Lex (Internet), 2014.
- [13] HEYN, J., BONTEN, C: *Feuchtigkeitseinfluss auf die Fließbruchmechanischen Eigenschaften von PA6-Kautschuk-Blends*, Zeitschrift Kunststofftechnik 10 (2014), Carl-Hanser-Verlag, München, 2014.
- [14] GRELLMANN, W., SEIDLER, S: *Kunststoffprüfung*, Carl-Hanser-Verlag, München, 2015.

- [15] KÖNIG, T.: *Untersuchung der Bruchlast von Polyamid-Schrauben in Abhängigkeit der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit*, Bachelorarbeit, FSA Mannheim, Mannheim, 2019.
- [16] KÖNIG, T.: *Charakterisierung des Bruchverhalten von Polyamid-Schrauben in Abhängigkeit von Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und Materialfeuchte*, Masterprojektarbeit, FSA Mannheim, Mannheim, 2021.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] LORENZ, D.: *Modellgestützte Optimierung des Schutzsystems Explosionsklappe zur kontrollierten Druckentlastung verfahrenstechnischer Apparate bei Staubexplosionen*, Dissertation, Wuppertal, 2020.
- [20] LUTTERBECK, K.: *Das Verhalten von Kunststoffen unter dem Einfluss wechselnder Umgebungsfeuchte und -temperatur*, Forschungsbericht, RAM-Verlag, 2016.
- [21] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION: *NFPA 68: Guide for Venting of Deflagrations*, Quincy, 2002.
- [22] PAI, C., JENG, R., GROSSMAN, S., HUANG, J.: *Effects of Moisture on Thermal and Mechanical Properties of Nylon 6,6*, Advances in Polymer Technology Vol.9 No.2 157-163, John Wiley & Sons Inc., 1989
- [23] PFEIFFER, T.: *Untersuchung der Zugfestigkeit von gedrehten Polyamid-Schrauben in Abhängigkeit der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und Materialfeuchte*, Bachelorarbeit, FSA Mannheim, Mannheim, 2021.
- [24] SCHWARZ, O., RICHTER, F., EBLING, F.: *Kunststoffkunde*, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2016
- [25] STEEN, H.: *Handbuch des Explosionsschutzes*, Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [26] SRAUCH, J.: *Thermische Effekte in der Materialmodellierung von Polyamid 6 bei kurzzeitdynamischen Belastungsvorgängen*, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2019.
- [27] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [28] WALCHER, W.: *Praktikum der Physik*, Teubner Studienbücher, 1979.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Polyamid-Schrauben (PA 6.6) verschiedener Größen. . . . .	4
1.2	Explosionsklappe, bestehend aus einer quadratischen Stahlplatte (Klappenflügel), die mit Hilfe von zwei Scharnieren an einem festen Rahmen montiert und mit vier Polyamid-Schrauben (rote Kreise) verschlossen ist [4]. . . . .	4
2.1	Abhängigkeit des reduzierten maximalen Explosionsdrucks $p_{red,max}$ vom statischen Ansprechdruck $p_{stat}$ . Randbedingungen: $V = 25 \text{ m}^3$ , $p_{max} = 9 \text{ bar}$ , $L/D = 1$ , $A_E = 1,4 \text{ m}^2$ , $K_{St} = 200 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ und $E_f = 70 \%$ . . . . .	7
2.2	Links: Abhängigkeit der Bruchspannung $\sigma_B$ von Polyamid 6 von Temperatur und Feuchte. Rechts: Materialfeuchte von Polyamid 6 in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte [20]. . . . .	8
2.3	Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PA 6 bei verschiedenen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten (Dehnraten) [26]. . . . .	9
3.1	Schraubenprüfstand im Technikum in Kappelrodeck. . . . .	11
3.2	Detailaufnahme der Prüfvorrichtung des Schraubenprüfstands im Technikum in Kappelrodeck. . . . .	11
3.3	Beispielhafte Fehlstellen in geprüften Polyamid-Schrauben [16]. . . . .	15
3.4	Exemplarischer Belastungsverlauf einer M6-Polyamid-Schraube mit Bruchkraft $F_B$ und den zur Bestimmung des Bruchzeitpunkts sowie der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit verwendeten Geraden G1, G2 und G3 [16]. . . . .	16
3.5	Exemplarische Aufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera mit Trackingmarkierungen bei Messbeginn (A) und beim Bruch der Schraube (B) [16]. . . . .	16
3.6	Spannung-Dehnung-Diagramm (gemittelt) für Polyamid-Schrauben der Größe M6 mit den drei untersuchten Konditionierungszuständen trocken, raumfeucht, gesättigt bei einer Schlittengeschwindigkeit $v_{Schlitten} = 0,1 \text{ m/s}$ . . . . .	18
3.7	Vergleich der Bruchkräfte von spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben der Größe M10 für verschiedene Schlittengeschwindigkeiten (SG: Spritzguss, DT: Drehteil, tr: trocken, rf: raumfeucht, ges: gesättigt)	19
4.1	Versuchsaufbau am $1 \text{ m}^3$ -Behälter. Links: $1 \text{ m}^3$ -Behälter mit montierter Klappe, rechts: Detailaufnahme der mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Klappe. . . . .	20

4.2	Zeichnung der für die Versuche verwendeten Klappe. . . . .	21
4.3	Öffnungsvorgang einer mit Polyamid-Schrauben verschlossenen Explosionsklappe am 1 m <sup>3</sup> -Behälter; Zündung bei $t = 0$ s. . . . .	22
4.4	Zustand der Klappe bei Bestimmung von $p_{\text{dyn}}$ mittels Hochgeschwindigkeitskamera (links), $t = 0,0585$ s, und Drehgeber (rechts), $t = 0,067$ s, Zündung bei $t = 0$ s. . . . .	24
4.5	Zeitlicher Druckverlauf eines beispielhaften Versuchs (Maisstärke, $c_{\text{St}} = 500$ g/m <sup>3</sup> , $t_v = 0,65$ s) sowie zugehörige Fitkurve zur Bestimmung der Druckanstiegsgeschwindigkeit. . . . .	25
4.6	Gemittelte Drücke $\bar{p}_{\text{red}}$ und $\bar{p}_{\text{dyn}}$ für die verschiedenen Versuchsparameterkombinationen. . . . .	25
4.7	Abhängigkeit des dynamischen Ansprechdrucks $p_{\text{dyn}}$ von der Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{\text{red}}$ bei raumfeuchten (oben) und gesättigten (unten) Schrauben. . . . .	26
A.1	Vergleich der Bruchkräfte von spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben der Größe M6 für verschiedene Schlittengeschwindigkeiten (SG: Spritzguss, DT: Drehteil, tr: trocken, rf: raumfeucht, ges: gesättigt)	36
A.2	Vergleich der Bruchkräfte von spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben der Größe M8 für verschiedene Schlittengeschwindigkeiten (SG: Spritzguss, DT: Drehteil, tr: trocken, rf: raumfeucht, ges: gesättigt)	36

# Tabellenverzeichnis

3.1	Ermittelte Frequenzen, Drehzahlen und Schlittengeschwindigkeiten mit zugehörigen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten für spritzgegossene, raumfeuchte Polyamid-Schrauben der Größe M6. . . . .	13
3.2	Konditionierungszustände mit zugehöriger Materialfeuchte $W$ für Polyamid-Schrauben der Größen M6, M8 und M10. . . . .	14
4.1	Untersuchte Parameter bei den Versuchen mit Explosionsklappe am $1\text{ m}^3$ -Behälter. . . . .	23
B.1	Vergleichsübersicht der Zugfestigkeit für spritzgegossene und gedrehte Polyamid-Schrauben der Größe M6. . . . .	38
B.2	Vergleichsübersicht der Zugfestigkeit für spritzgegossene und gedrehte Polyamid-Schrauben der Größe M8. . . . .	38
B.3	Vergleichsübersicht der Zugfestigkeit für spritzgegossene und gedrehte Polyamid-Schrauben der Größe M10. . . . .	38
B.4	Detaillierte Versuchsergebnisse der Versuche am $1\text{ m}^3$ -Behälter mit Weizenmehl und raumfeuchten Schrauben. . . . .	38
B.5	Detaillierte Versuchsergebnisse der Versuche am $1\text{ m}^3$ -Behälter mit Weizenmehl und gesättigten Schrauben. . . . .	39
B.6	Detaillierte Versuchsergebnisse der Versuche am $1\text{ m}^3$ -Behälter mit Maisstärke und raumfeuchten Schrauben. . . . .	39
B.7	Detaillierte Versuchsergebnisse der Versuche am $1\text{ m}^3$ -Behälter mit Maisstärke und gesättigten Schrauben. . . . .	39
B.8	Mittelwerte und Messunsicherheit der Versuchsergebnisse für die einzelnen Parameterkombinationen der Versuche am $1\text{ m}^3$ -Behälter. . . . .	39

# A Grafiken

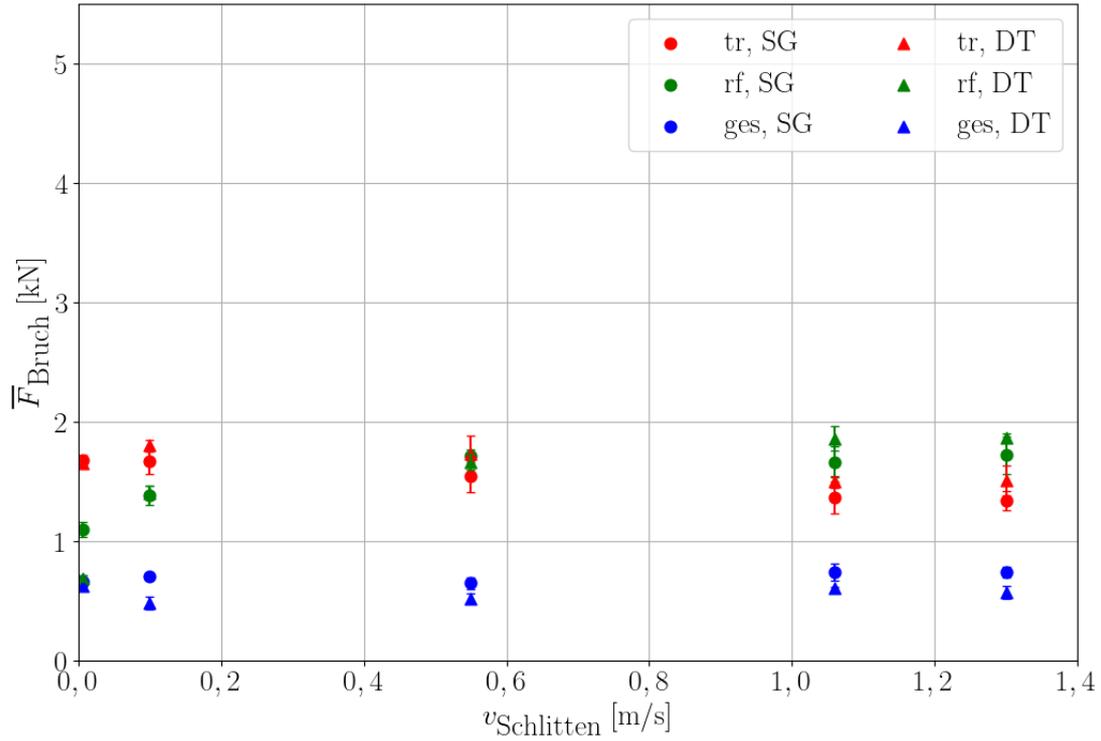


Abbildung A.1: Vergleich der Bruchkräfte von spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben der Größe M6 für verschiedene Schlittengeschwindigkeiten (SG: Spritzguss, DT: Drehteil, tr: trocken, rf: raumfeucht, ges: gesättigt)

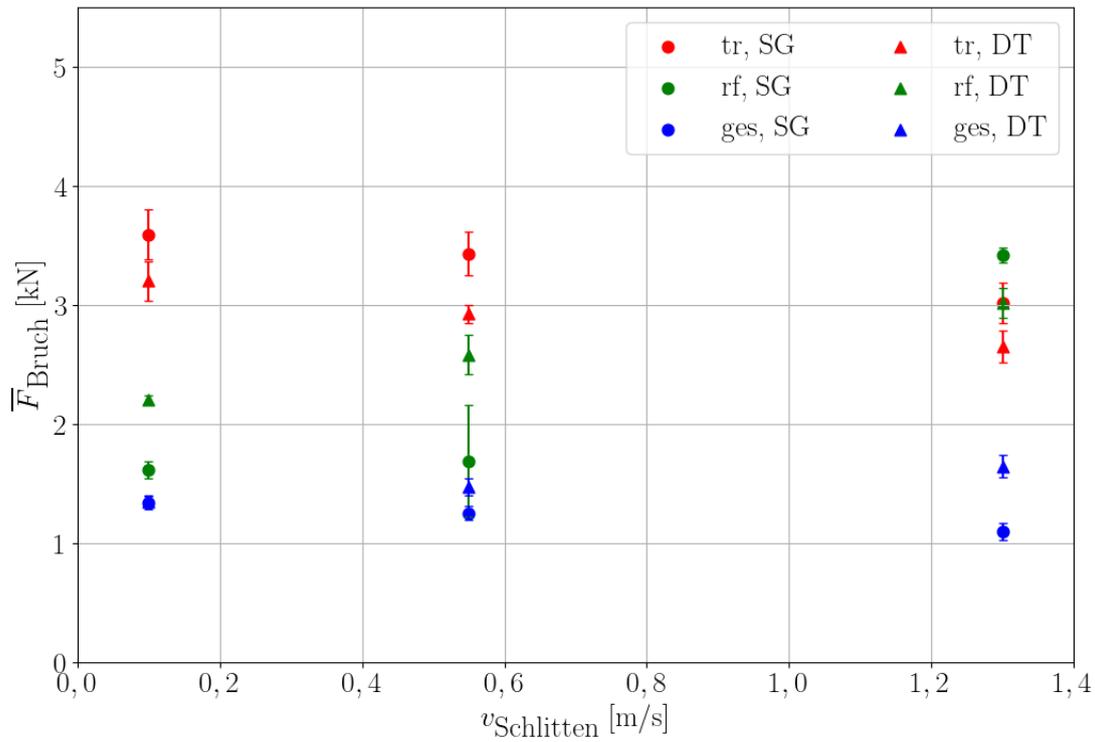


Abbildung A.2: Vergleich der Bruchkräfte von spritzgegossenen und gedrehten Polyamid-Schrauben der Größe M8 für verschiedene Schlittengeschwindigkeiten (SG: Spritzguss, DT: Drehteil, tr: trocken, rf: raumfeucht, ges: gesättigt)

# B Tabellen

Tabelle B.1: Vergleichsübersicht der Zugfestigkeit für spritzgegossene und gedrehte Polyamid-Schrauben der Größe M6.

v [m/s]	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] trocken	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] trocken	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] raumfeucht	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] raumfeucht	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] gesättigt	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] gesättigt
0,006	48,76	82,90	66,34	74,58	35,92	31,65
0,1	83,77	89,96	76,90	83,88	42,72	30,82
0,55	77,57	86,16	87,60	92,55	45,30	35,93
1,06	68,52	74,44	84,50	96,91	45,38	37,03
1,3	67,00	75,03	87,09	97,69	48,85	37,50

Tabelle B.2: Vergleichsübersicht der Zugfestigkeit für spritzgegossene und gedrehte Polyamid-Schrauben der Größe M8.

v [m/s]	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] trocken	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] trocken	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] raumfeucht	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] raumfeucht	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] gesättigt	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] gesättigt
0,1	100,11	87,95	65,71	75,44	46,11	48,46
0,55	94,64	79,92	75,92	86,33	53,72	54,68
1,3	83,34	72,40	93,38	91,72	55,96	57,52

Tabelle B.3: Vergleichsübersicht der Zugfestigkeit für spritzgegossene und gedrehte Polyamid-Schrauben der Größe M10.

v [m/s]	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] trocken	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] trocken	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] raumfeucht	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] raumfeucht	$\bar{R}_{m,DT}$ [MPa] gesättigt	$\bar{R}_{m,SG}$ [MPa] gesättigt
0,1	57,24	83,99	63,84	79,55	45,70	58,08
0,55	50,53	79,62	60,42	90,87	49,93	63,59
1,3	50,70	74,68	46,99	95,31	53,11	69,41

Tabelle B.4: Detaillierte Versuchsergebnisse der Versuche am 1 m<sup>3</sup>-Behälter mit Weizenmehl und raumfeuchten Schrauben.

Versuchsnummer	V2	V3	V4	V5	V6
$p_{1,dyn,HGK}$ [bar]	0,330953	0,403833	0,377709	0,364036	0,348898
$p_{2,dyn,HGK}$ [bar]	0,328389	0,399927	0,374901	0,360984	0,343527
$p_{1,red}$ [bar]	0,526033	0,791552	0,644937	0,718306	0,660197
$p_{2,red}$ [bar]	0,52054	0,787279	0,638345	0,715009	0,662272
$dp/dt$ [bar/s]	10,414897	16,989456	11,783328	14,807273	14,216355

Tabelle B.5: Detaillierte Versuchsergebnisse der Versuche am 1 m<sup>3</sup>-Behälter mit Weizenmehl und gesättigten Schrauben.

Versuchsnummer	V7	V8	V9	V10	V11
$p_{1,\text{dyn,HGK}}$ [bar]	0,165782		0,147226	0,178234	0,155283
$p_{2,\text{dyn,HGK}}$ [bar]	0,163218		0,137704	0,178111	0,152719
$p_{1,\text{red}}$ [bar]	0,288714	0,346335	0,344748	0,373314	0,274187
$p_{2,\text{red}}$ [bar]	0,286394	0,342184	0,339132	0,366966	0,270036
$dp/dt$ [bar/s]	4,712440	6,117393	5,171856	7,088216	4,329282

Tabelle B.6: Detaillierte Versuchsergebnisse der Versuche am 1 m<sup>3</sup>-Behälter mit Maisstärke und raumfeuchten Schrauben.

Versuchsnummer	V12	V13	V14	V15	V16
$p_{1,\text{dyn,HGK}}$ [bar]	0,308857	0,436062	0,414454	0,381493	0,297015
$p_{2,\text{dyn,HGK}}$ [bar]	0,302997	0,428127	0,407129	0,375145	0,2914
$p_{1,\text{red}}$ [bar]	0,720869	1,17402	1,12995	0,71623	0,769578
$p_{2,\text{red}}$ [bar]	0,710737	1,15534	1,13203	0,704755	0,794238
$dp/dt$ [bar/s]	10,065409	23,443117	18,269356	14,248418	12,945087

Tabelle B.7: Detaillierte Versuchsergebnisse der Versuche am 1 m<sup>3</sup>-Behälter mit Maisstärke und gesättigten Schrauben.

Versuchsnummer	V17	V18	V19	V20	V21
$p_{1,\text{dyn,HGK}}$ [bar]		0,250626	0,187389	0,196789	0,194836
$p_{2,\text{dyn,HGK}}$ [bar]		0,24733	0,185314	0,194836	0,191784
$p_{1,\text{red}}$ [bar]	0,668864	0,575475	0,690594	0,771654	0,610755
$p_{2,\text{red}}$ [bar]	0,680339	0,60575	0,701215	0,794482	0,643594
$dp/dt$ [bar/s]	9,681175	8,956894	8,421760	13,726543	10,602308

Tabelle B.8: Mittelwerte und Messunsicherheit der Versuchsergebnisse für die einzelnen Parameterkombinationen der Versuche am 1 m<sup>3</sup>-Behälter.

Konditionierungszustand	Weizenmehl		Maisstärke	
	raumfeucht	gesättigt	raumfeucht	gesättigt
$\bar{p}_{\text{dyn}}$ [bar]	0,363316	0,159785	0,364268	0,206113
$\sigma$ [bar]	0,035202	0,021510	0,078307	0,040129
$\bar{p}_{\text{red}}$ [bar]	0,666447	0,323201	0,9007747	0,674272
$\sigma$ [bar]	0,124590	0,052561	0,288094	0,094259
$\overline{dp/dt}$ [bar/s]	13,642262	5,483837	15,794277	10,277736
$\sigma$ [bar/s]	3,470292	1,500121	6,970023	2,809831