

Charakterisierung des Bruch-  
verhaltens von Polyamid-  
schrauben in Abhängigkeit von  
Belastungsanstiegsgeschwin-  
digkeit und Materialfeuchte

F-05-1901

Charakterisierung des Bruchverhalten von  
Polyamidschrauben in Abhängigkeit von  
Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und  
Materialfeuchte

**Master-Projektarbeit**

von

Tobias Johannes König

Hochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und  
Arbeitsmedizin

Mannheim, Januar 2021

# Erklärung

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

Mannheim, 10. Januar 2021

-----  
(Tobias König)

# Vorwort

Diese Arbeit wurde bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA e.V) im Technikum am Standort Kappelrodeck erarbeitet. Ziel dieser Arbeit, welche im Rahmen des Projektes F-05-1901 durchgeführt wurde, ist es, das Bruchverhalten von Polyamidschrauben, welche beim Verschließen von Explosionsklappen Verwendung finden, in Abhängigkeit der äußeren Einflüsse Materialfeuchte und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit zu charakterisieren.

Ich möchte mich bei allen, die mich während meines Studiums und beim Gelingen dieser Arbeit tatkräftig unterstützt haben, bedanken.

Ich danke Prof. Dr. Bernd Schinke für die Bereitschaft diese Arbeit seitens der Hochschule Mannheim zu betreuen.

Besonders danke ich Dr. Dirk Lorenz für die herzliche und fachlich sehr kompetente Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen. Er hat die Arbeit für die FSA betreut und ermöglichte das selbständige wissenschaftliche Arbeiten in guter Arbeitsatmosphäre.

Des Weiteren bedanke ich mich ganz besonders bei Peter Schepp für die freundliche und fachlich sehr kompetente Unterstützung jeglicher Art, das entgegengebrachte Vertrauen, sowie für die Bereitstellung von Räumlichkeiten und Personal vor Ort.

Weiterhin bedanke ich mich bei Dr. Sebastian Nissle für das eingebrachte Wissen und generell für die große Hilfsbereitschaft auf fachlich hohem Niveau.

Pavlo Chupin danke ich für die fachlich sehr kompetente Unterstützung bei Auswahl, Aufbau und Einrichtung von Mess- und Steuerungstechnik.

Weiterhin möchte ich mich recht herzlich bei Wendelin Fischer, Markus Roth, Hans Wolf und Dorell Schneider für die Unterstützung bei Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsapparatur in Kappelrodeck, sowie generell für die große Hilfsbereitschaft und Kompetenz jeglicher Art bedanken.

Die Arbeit der vergangenen Monate in guter Arbeitsatmosphäre hat mir sehr große Freude bereitet. Ich konnte spannende Sachverhalte eigenständig untersuchen und mir viel neues Wissen in diversen Bereichen aneignen. Hierfür möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der FSA/BGN Mannheim herzlich bedanken.

# 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 . . . . .  | 5          |
| 1.2 Zielsetzung . . . . .   | 5          |
| 1.3 Lösungsweg . . . . .  | 6          |
| <b>2 Grundlagen</b>   | <b>7</b>   |
| 2.1 Sicherheitstechnische Kenngrößen . . . . .                            | 7          |
| 2.2 Dimensionierung von Explosionsklappen . . . . .                       | 7          |
| 2.3 Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften von Polyamid 6 . . . . . | 9          |
| 2.3.1 Einfluss der Materialfeuchte und der Temperatur . . . . .           | 9          |
| 2.3.2 Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit . . . . .            | 10         |
| <b>3 Aufbau der Versuchsapparatur</b>                                     | <b>12</b>  |
| 3.1 Montage und Funktionsprinzip der Versuchsapparatur . . . . .          | 12         |
| 3.2 Elektrische Schaltung und Parametrierung . . . . .                    | 13         |
| 3.2.1 Elektrische Schaltung . . . . .                                     | 13         |
| 3.2.2 Parametrisierung . . . . .  | 15         |
| 3.3 Bedienung . . . . .   | 17         |
| <b>4 Experimenteller Teil</b>   | <b>19</b>  |
| 4.1 Messkette und Prüfvorrichtung . . . . .                               | 19         |
| 4.2 Versuchsdurchführung . . . . .  | 21         |
| 4.2.1 Versuchsablauf . . . . .  | 21         |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2.2    | Versuchsprogramm . . . . .   | 21        |
| 4.2.3    | Schraubenkonditionierung . . . . .   | 22        |
| 4.3      | Datenauswertungsverfahren . . . . .  | 23        |
| 4.3.1    | Bruchkraft, Bruchzeitpunkt, Belastungsdauer und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit . . . . .  | 23        |
| 4.3.2    | Dehnungsverlauf und Spannungs-Dehnungs-Diagramm . . . . .                                    | 24        |
| 4.4      | Messergebnisse und Auswertung . . . . .  | 27        |
| 4.4.1    | Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und E-Modul . . . . .                                      | 27        |
| 4.4.2    | Bruchkraft . . . . .   | 29        |
| 4.4.3    | Bruchdehnung . . . . .   | 31        |
| 4.4.4    | Belastungsdauer . . . . .  | 34        |
| <b>5</b> | <b>Diskussion und Ausblick</b>   | <b>36</b> |
| 5.1      | Diskussion . . . . .   | 36        |
| 5.1.1    | Bruchkraft . . . . .   | 36        |
| 5.1.2    | Belastungsdauer . . . . .  | 39        |
| 5.1.3    | Bewertung der Ergebnisse . . . . .   | 40        |
| 5.1.4    | Konsequenzen für den Einsatz von Polyamidschrauben als Explosionsklappenverschluss . . . . . | 41        |
| 5.2      | Ausblick . . . . .   | 42        |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>47</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>52</b> |
|          | <b>A Grafiken</b>  | <b>54</b> |
|          | <b>B Tabellen</b>  | <b>70</b> |

# Symbolverzeichnis

| Symbol             | Einheit | Bedeutung  |
|--------------------|---------|--|
| $A_E$              | $m^2$   | Entlastungsfläche  |
| $D$                | 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   |
| $F$                | N, %    | Kraft  |
| $F_B$              | N       | Bruchkraft   |
| $\bar{F}_B$        | N       | mittlere Bruchkraft  |
| $G_0$              | kg      | Masse trockenen Polyamids 6  |
| 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·m/s | sicherheitstechnische Kenngröße  |
| $L$                | m       | Abstand zwischen Zündort und Mitte der Entlastungsfläche   |
| $L_0$              | m       | Anfangslänge   |
| $m_s$              | -       | normierte Schraubenmasse   |
| $n$                | -       | 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  |
| $dp/dt$            | bar/s   | Druckanstiegsgeschwindigkeit   |

|                                       |         |   |
|---------------------------------------|---------|---|
| $(dp/dt)_{\max}$                      | bar/s   | maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit                       |
| $t$                                   | s       | Zeit  |
| $t_1$                                 | s       | Zeitpunkt des Belastungsbeginns                             |
| $t_B$                                 | s       | Belastungsdauer   |
| $\bar{t}_B$                           | s       | mittlere Belastungsdauer                                    |
| $\bar{t}_{B,\text{trocken}}$          | s       | mittlere Belastungsdauer von trockenen<br>Polyamidschrauben |
| $t_{\text{Bruch}}$                    | s       | Bruchzeitpunkt  |
| $t_{\text{Bruch,m}}$                  | s       | mathematischer Bruchzeitpunkt                               |
| $T$                                   | °C      | Temperatur  |
| $T_g$                                 | °C      | Glasübergangstemperatur                                     |
| $v$                                   | m/s     | Geschwindigkeit   |
| $x$                                   | m       | Koordinate  |
| $y$                                   | m       | Koordinate  |
| $\bar{W}$                             | %       | mittlere Materialfeuchte                                    |
| $\delta$                              | diverse | Standardabweichung  |
| $\Delta G$                            | kg      | Massenänderung  |
| $\Delta G/G_0$                        | %       | relative Massenänderung durch Wasseraufnahme                |
| $\Delta \bar{t}_B$                    | s       | Änderung der mittleren Belastungsdauer                      |
| $\Delta \bar{\epsilon}_B$             | %       | Änderung der mittleren Bruchdehnung                         |
| $\epsilon$                            | %       | Dehnung   |
| $\epsilon_B$                          | %       | Bruchdehnung  |
| $\bar{\epsilon}_B$                    | %       | mittlere Bruchdehnung                                       |
| $\bar{\epsilon}_{B,\text{trocken}} >$ | %       | mittlere Bruchdehnung von trockenen<br>Polyamidschrauben    |
| $\sigma$                              | MPa     | mechanische Spannung  |
| $\sigma_B$                            | MPa     | Bruchspannung   |
| $\sigma_{B,\max}$                     | MPa     | gemessene maximale Bruchspannung<br>Polyamidschrauben       |
| $\omega$                              | U/s     | Drehzahl  |

# Glossar

| <b>Begriff</b>                         | <b>Definition</b>   |
|--|---|
| Aktion                                 | Bezeichnung für eine Variable in der Software SIEMENS STARTER zur Steuerung elektrisch betriebener Anlagen.   |
| Auslegungsfall                         | Schraubenbruchkraft gemäß zugehörigem Datenblatt, welche zur Auslegung des statischen Ansprechdruckes einer Explosionsklappe gemäß Formel (1.1) verwendet wird. |
| Belastung                              | Auf eine Schrauben wirkende Zugkraft $F$ .  |
| Belastungsanstiegs-<br>geschwindigkeit | Änderung der Belastung pro Zeit $dF/dt$ im linearen Bereich des Belastungsanstieges bei einem Schraubenreißversuch.   |
| Belastungsdauer                        | Zeitspanne von Beginn der Schraubenbelastung bis zum Abriss der Schraube.   |
| 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 dieser Arbeit verwendeten Versuchsanordnung in der Einheit U/s.   |
| duktiler Bruch                         | Bruch, der mit einer dauerhaften plastischen Materialverformung einhergeht.   |

|  |  |
|--|--|
| dynamischer Ansprechdruck                        | Differenzdruck, bei dem sich der Verschluss einer Explosionsklappe öffnet, wobei die Druckanstiegsgeschwindigkeit größer als 1 bar/s ist [22].   |
| Entlastungsfähigkeit                             | Prozentualer Anteil der Druckentlastungsfläche einer Explosionsklappe, welcher der äquivalenten Druckentlastungsfläche einer trägheitslosen Entlastungseinrichtung entspricht [22].  |
| Frequenz   | Frequenz des Steuersignals, welches der in dieser Arbeit verwendete Frequenzumrichter an den Motor der Versuchsanlage ausgibt.   |
| gesättigt  | Feuchtegehalt von Polyamidschrauben nach sechzig-tägiger Lagerung in raumtemperiertem Wasser.  |
| $K_{St}$ -Wert                                   | Sicherheitstechnische Kenngröße zur Charakterisierung der Druckanstiegsgeschwindigkeit in Behältern und Räumen bei Staubexplosionen [2, 22].   |
| maximaler Explosionsdruck                        | Maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im geschlossenen Behälter bei optimaler Staubkonzentration [2, 22].   |
| Parameter  | Bezeichnung für eine Variable in der Software „Siemens Starter“ zur Steuerung elektrisch betriebener Anlagen. Ansonsten Bezeichnung für eine physikalische Größe.  |
| raumfeucht                                       | Feuchtegehalt von Polyamidschrauben, die im klimatisierten Labor gelagert wurden.  |
| reduzierter Explosionsdruck                      | Maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im druckentlasteten Behälter [2, 22].   |
| 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 [22]. |
| reduzierter maximaler Explosionsdruck            | Maximaler Überdruck bei einer Staubexplosion im druckentlasteten Behälter bei optimaler Staubkonzentration [2, 22].  |

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Siemens Starter             | Name einer Software zur Steuerung von elektrischen betriebenen Anlagen.   |
| Sprödbbruch                 | Bruch ohne dauerhafte plastische Materialverformung.  |
| statischer<br>Ansprechdruck | Differenzdruck, bei dem sich der Verschluss einer Explosionsklappe öffnet, wobei die Druckanstiegsgeschwindigkeit kleiner als 1 bar/min ist [22]. |
| trocken                     | Feuchtegehalt von Polyamidschrauben nach sechzig tägiger Lagerung im Trockenschrank bei 60°C.   |

# Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Fragestellung, ob verbreitet eingesetzte Polyamidschrauben zum Verschließen von Explosionsklappen geeignet sind. Hierfür wird eine Versuchsanordnung 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*, die *Bruchdehnung* und die *Belastungsdauer* von Polyamidschrauben verschiedener Größen untersucht.

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

Mit zunehmender Materialfeuchte sinkt die Bruchkraft  $F_B$  auf minimal 34 % der Bruchkraft des *Auslegungsfalls*. Sinkt die Materialfeuchte ausgehend vom Auslegungsfall, ist kein allgemeingültiger Trend in Bezug auf die Bruchkraft feststellbar.

Mit zunehmender Materialfeuchte steigt die Bruchdehnung  $\epsilon_B$  um bis zu 394 % und die Belastungsdauer  $t_B$  um bis zu 220 % im Vergleich zum Auslegungsfall. Der E-Modul nimmt mit zunehmender Materialfeuchte ebenfalls ab. Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahmen von Bruchstellen zeigen eine variable Oberflächenbeschaffenheit, die mit der Materialfeuchte korreliert, was auf eine veränderte Bruchmechanik mit zunehmender Materialfeuchte hinweist. *Trockene* Polyamidschrauben sind spröde; die Bruchstelle ist typisch für einen dehnungsarmen *Sprödbbruch*. Die Bruchart von *gesättigten* Polyamidschrauben ist aufgrund der REM-Aufnahmen einem *duktilen Bruch* zuzuordnen. Das Materialverhalten ist zäh-elastisch und dehnungsreich.

Es wird festgestellt, dass 75 % der untersuchten Polyamidschrauben Fehlstellen aufweisen, die besonders bei hohen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten und geringen Materialfeuchtigkeiten die Polyamidschrauben schwächen.

Für raumfeuchte Schrauben konnte keine allgemeingültige Abhängigkeit der Bruchkraft von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit festgestellt werden. Zeigt sich bei M6-Schrauben mit wachsender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit ein Anstieg der Bruchkraft um bis 45 %, wird für M8-Schrauben keine sinnvolle und für M10-Schrauben eine umgekehrte Abhängigkeit gemessen. Dieses Verhalten wird mit den Fehlstellen in den Schrauben erklärt. Mit wachsender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit fällt die Bruchdehnung.

Die Bruchkraft von trockenen Schrauben sinkt mit zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit um bis zu 15 %, die Bruchdehnung sinkt um bis zu 32 %.

---

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

Bei gesättigten Schrauben fallen oder stagnieren sowohl die Bruchkraft als auch die Bruchdehnung mit zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit.

Die Verwendung von Polyamidschrauben als sicherheitsrelevanter Klappenverschlussmechanismus zum Erreichen eines definierten *dynamischen Ansprechdruckes* ist als äußerst kritisch zu bewerten! Es ist nicht auszuschließen, dass eine erfolgreich geprüfte Schutzeinrichtung mit Polyamidschrauben als Verschlussmechanismus im Anwendungsfall unter veränderten Umgebungsbedingungen im Vergleich zu den Prüfbedingungen den dynamischen Ansprechdruck übersteigt und dadurch die Behälterfestigkeit überschritten wird.

# Kapitel 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 Explosionsdrucks*  $p_{\text{red}}$  an. Der *reduzierte Explosionsdruck* unterschreitet dabei die Behälterfestigkeit [9, 10, 24, 29].

Zur Realisierung des statischen Ansprechdrucks  $p_{\text{stat}}$  verfügen Explosionsklappen über Schließmechanismen. Diese unterliegen beim explosionsbedingten Klappen- offnungsvorgang einer gewissen Trägheit, so dass der tatsächliche Ansprechdruck oberhalb des statischen Ansprechdrucks liegt. Der tatsächliche Ansprechdruck heißt *dynamischer Ansprechdruck*  $p_{\text{dyn}}$ . Ein in der Praxis verwendeter und kostengünstiger Schließmechanismus stellen Polyamidschrauben 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 Polyamidschrauben mit dem festen Klappenrahmen verbunden (Abbildung 1.2). Im Explosionsfall sollen die Polyamidschrauben beim Erreichen eines definierten statischen Ansprechdrucks  $p_{\text{stat}}$  reißen und so das Öffnen der Explosionsklappe ermöglichen. Der statische Ansprechdruck einer mit Polyamidschrauben verschlossenen Explosionsklappe ergibt sich aus Gleichung (1.1).

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

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 [5].

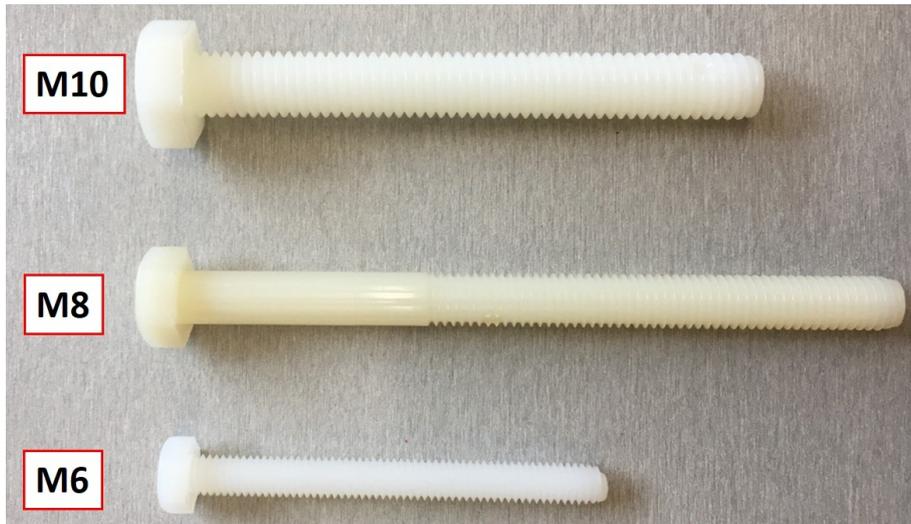


Abbildung 1.1: Polyamidschrauben (PA 6.6) verschiedener Größen.



Abbildung 1.2: Explosionsklappe, bestehend aus einer quadratischen Stahlplatte (Klappenflügel), die mit Hilfe von zwei Scharnieren an einem festen Rahmen montiert und mit vier Polyamidschrauben (rote Kreise) verschlossen ist [5].

## 1.1 Motivation

Ergebnisse aus technischen Funktionsprüfungen von Explosionsklappen mit Polyamidschraubenverschlüssen, die bei der FSA GmbH in Auftrag gegeben wurden, zeigen 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 Verwendung von Polyamidschrauben erzielt werden soll. Weil die Höhe des  $p_{\text{red}}$  stark mit dem  $p_{\text{dyn}}$  wächst (siehe Abschnitt 2.1), besteht bei einer deutlichen Überschreitung des  $p_{\text{stat}}$  die Gefahr des Behälterberstens. Aus diesem Grund muss untersucht werden, worin die Ursachen der Schwankungen in  $p_{\text{dyn}}$  liegen sowie ob und wie diese Schwankungen zu quantifizieren sind.

Aus vorhergehenden Untersuchungen [5, 16, 21] ist bekannt, dass die Bruchkraft von Polyamidschrauben 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 Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten in einem breiten Bereich an den Verschlusschrauben aus Polyamid auf. Dieser Bereich wird durch herkömmliche Zugversuche nicht abgedeckt, weshalb keine umfassenden Informationen über die Bruchkraft der Polyamidschrauben für diese Fälle vorliegen.

Weil mit Polyamidschrauben 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 Polyamidschrauben aktuell nicht möglich.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ergibt sich aus den Ausführungen des vorigen Abschnittes 1.1, nämlich die Charakterisierung des Bruchverhaltens von Polyamidschrauben als Funktion von Materialfeuchte und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit. Wegen des für diese Arbeit zur Verfügung stehenden knappen Zeitrahmens wurde auf die Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Bruchverhalten verzichtet. Folgende Fragestellungen sollten beantwortet werden:

1. Wie hängt die Bruchkraft, die Belastungsdauer und die Bruchdehnung der Polyamidschrauben von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit ab?
2. Wie hängt die Bruchkraft, die Belastungsdauer und die Bruchdehnung von der Materialfeuchte der Polyamidschrauben ab?
3. Welche andere Faktoren beeinflussen das Bruchverhalten von Polyamidschrauben?

## 1.3 Lösungsweg

Die in der Bachelorarbeit [16] entwickelte Versuchsapparatur zur Untersuchung des Einflusses der genannten Parameter auf die Bruchkraft von Polyamidschrauben verschiedener Größen wird aufgebaut und in Betrieb genommen. Benötigte Messtechnik wird integriert und auf korrekte Funktion getestet. Zeitlich parallel dazu wird ein Versuchsprogramm erarbeitet, das zum einen die an Explosionsklappen auftretenden Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten abdeckt und zum anderen die in der Praxis verwendeten Schraubengrößen berücksichtigt. Bei der Erstellung des Versuchsprogramms werden drei verschiedene Materialfeuchten, nämlich trocken, raumfeucht und gesättigt eingeplant. Vor Beginn der Versuchsreihen wird eine ausreichend große Schraubenanzahl auf die benötigten Materialfeuchtigkeiten konditioniert. Die festgelegten Versuchsreihen werden durchgeführt und die Messdaten ausgewertet. Mit Hilfe der erhaltenen Ergebnisse werden Aussagen zu den in Abschnitt 1.2 formulierten Fragestellungen erarbeitet. Abschließend wird bewertet, ob und wenn ja unter welchen Bedingungen Polyamidschrauben als Klappenverschlussmechanismus zum Einstellen eines definierten statischen Ansprechdrucks geeignet sind.

# Kapitel 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 *maximaler 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. der 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 [11].

### 2.2 Dimensionierung von Explosionsklappen

Zur Berechnung der notwendigen Entlastungsfläche  $A_E$  von Explosionsklappen wird üblicherweise Formel 2.2 aus EN 14491 [10] verwendet. Die dabei errechnete Entlastungsfläche ist notwendig, um den im Falle einer Staubexplosion auftretenden Explosionsdruck ausreichend zu reduzieren. Damit wird das Überschreiten der Behälterfestigkeit und in Folge dessen ein 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 die Behälterfestigkeit, versehen mit einem Sicherheitszuschlag, mit dem *reduzierten maximalen Explosionsdruck*  $p_{\text{red,max}}$  identifiziert und in Formel (2.2) eingesetzt. Die weiteren Größen in (2.2) ergeben sich aus der Behältergeometrie oder sind sicherheitstechnische Kenngrößen 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  $p_{\text{stat}}$  einer Explosionsklappe ist für die Dimensionierung der Entlastungsfläche ebenfalls relevant. Je höher  $p_{\text{stat}}$ , also der Druck bei dessen Erreichen die Explosionsklappe ihre Entlastungsfläche freigibt, desto höher ist der reduzierte Explosionsdruck. Diese Abhängigkeit ist stark, weshalb der Funktionstüchtigkeit der Explosionsklappenverschlusstechnik besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit von  $p_{\text{stat}}$  und  $p_{\text{red,max}}$ . Eine Änderung von  $p_{\text{stat}}$  um 0,2 bar hat bereits eine Änderung des reduzierten maximalen Explosionsüberdruck um den Faktor  $K = 3$  zur Folge.

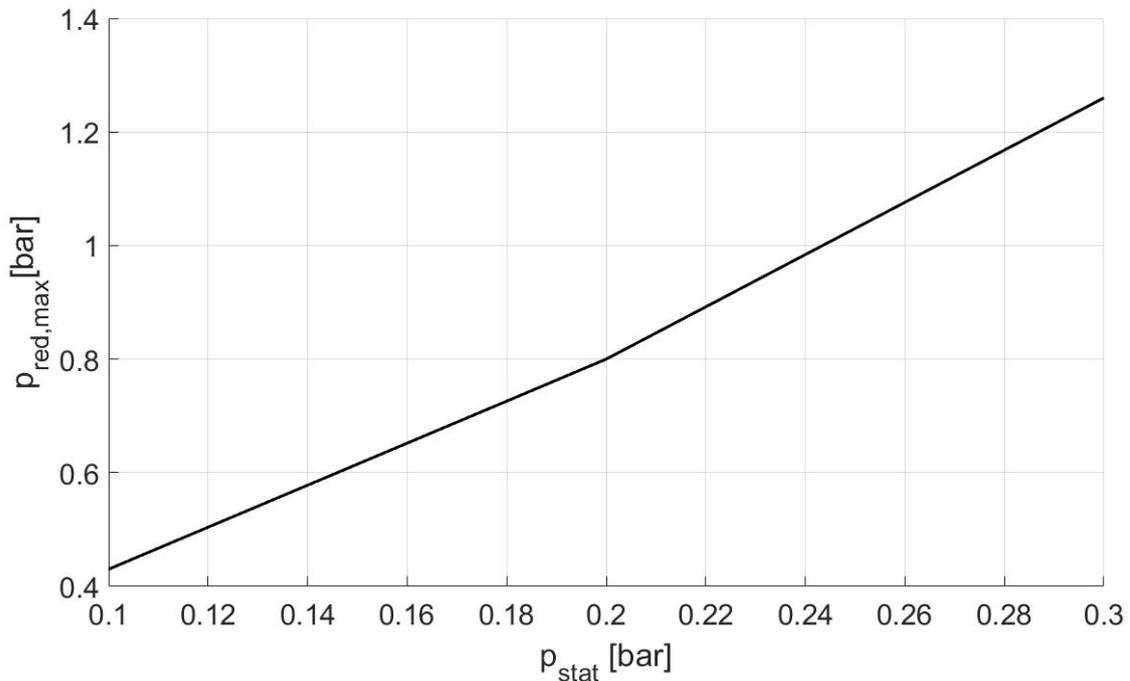


Abbildung 2.1: Abhängigkeit des reduzierten maximalen Explosionsdrucks  $p_{\text{red,max}}$  vom statischen Ansprechdruck  $p_{\text{stat}}$ . Randbedingungen:  $V = 25 \text{ m}^3$ ,  $p_{\text{max}} = 9 \text{ bar}$ ,  $L/D = 1$ ,  $A_E = 1,4 \text{ m}^2$ ,  $K_{\text{St}} = 200 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$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

## 2.3 Einflüsse 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 [6, 23].

### 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 führen 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 [23]. 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.

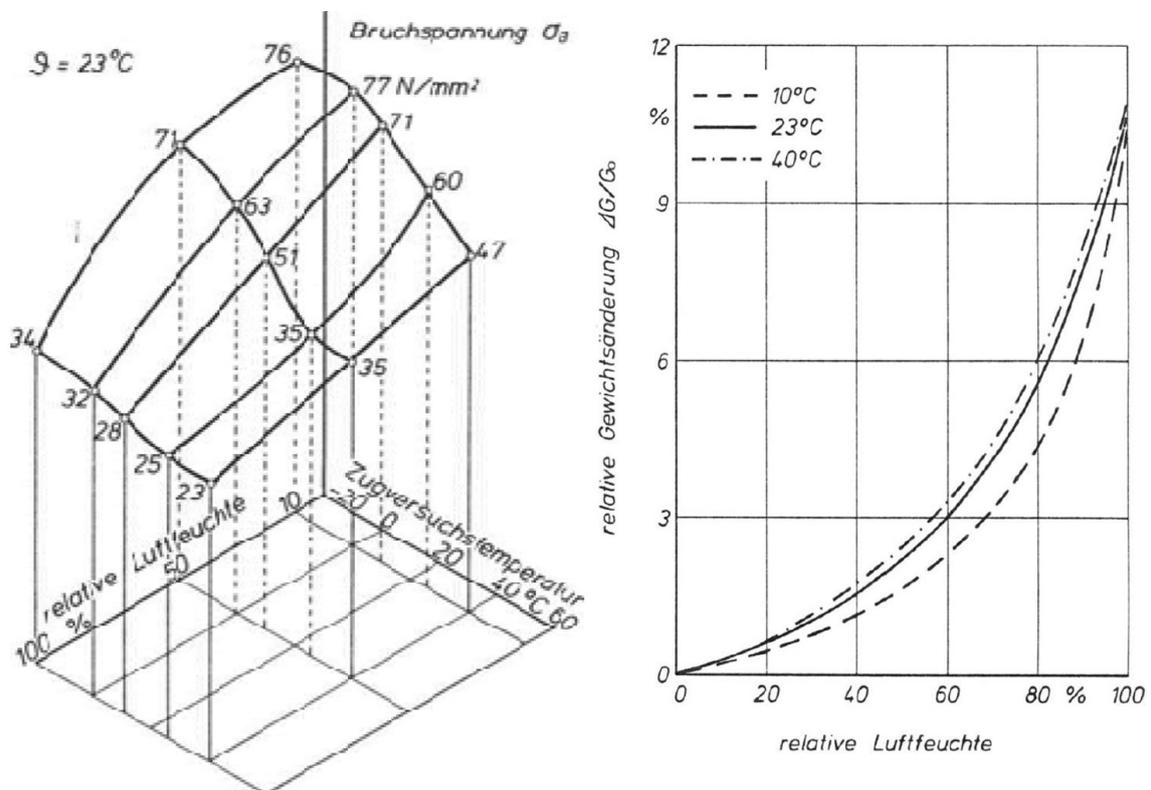


Abbildung 2.2: Links: Abhängigkeit der Bruchspannung  $\sigma_B$  von der Temperatur und der Konditionierungsbedingung von Polyamid 6. Rechts: Materialfeuchte von Polyamid 6 in Abhängigkeit der Konditionierungsbedingung (relative Luftfeuchte) [23].

$\Delta G/G_0$  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.  $K = 3$  [23].

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, 23, 26].

### 2.3.2 Einfluss der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit

Die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit hat bei Polyamid 6 ebenfalls einen Einfluss auf dessen Materialeigenschaften [1, 23, 26]. Abbildung 2.3 zeigt Spannungs-Dehnungs-Kurven bei verschiedenen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten. Der E-Modul und die

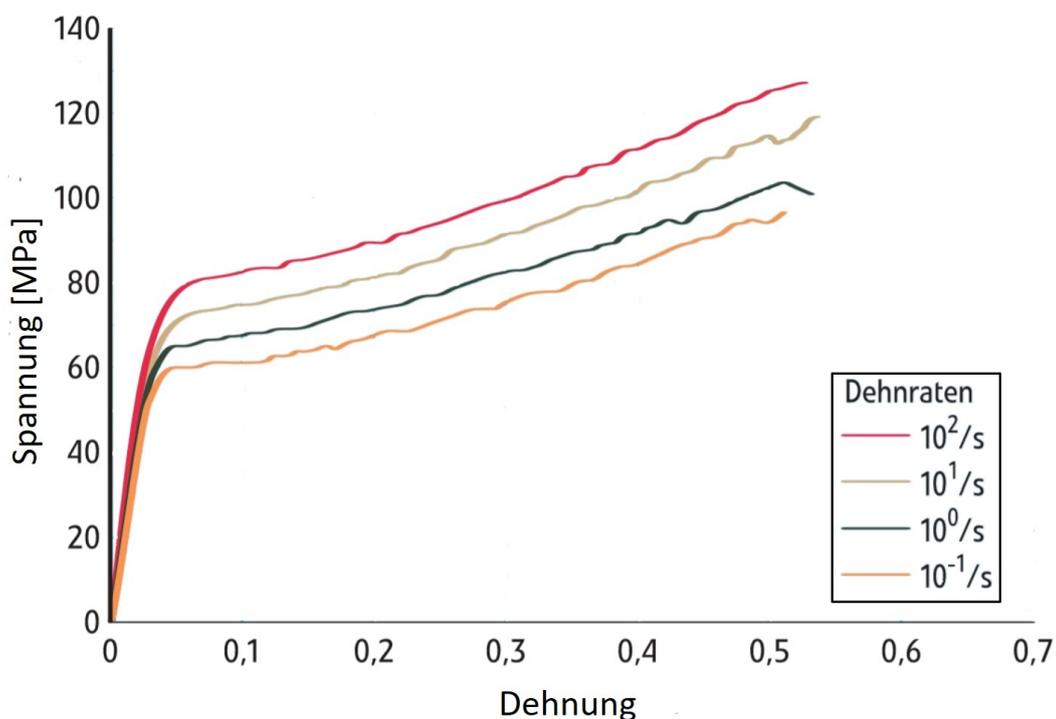


Abbildung 2.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PA 6 bei verschiedenen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten (Dehnraten) [28].

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 geringer.

# Kapitel 3

## Aufbau der Versuchsanordnung

### 3.1 Montage und Funktionsprinzip der Versuchsanordnung

Zur Durchführung der geplanten Versuche wurde die in [16] entwickelte Versuchsanordnung realisiert. Hierfür wurde der Elektromotor (1) in Abbildung 3.1 auf einem Stahltisch befestigt und verkabelt. Nach Prüfung auf Funktion wurden Kupplung (2), Lager (3) und Spindel (5) verbaut. Anschließend wurden die Schienen (6) positioniert

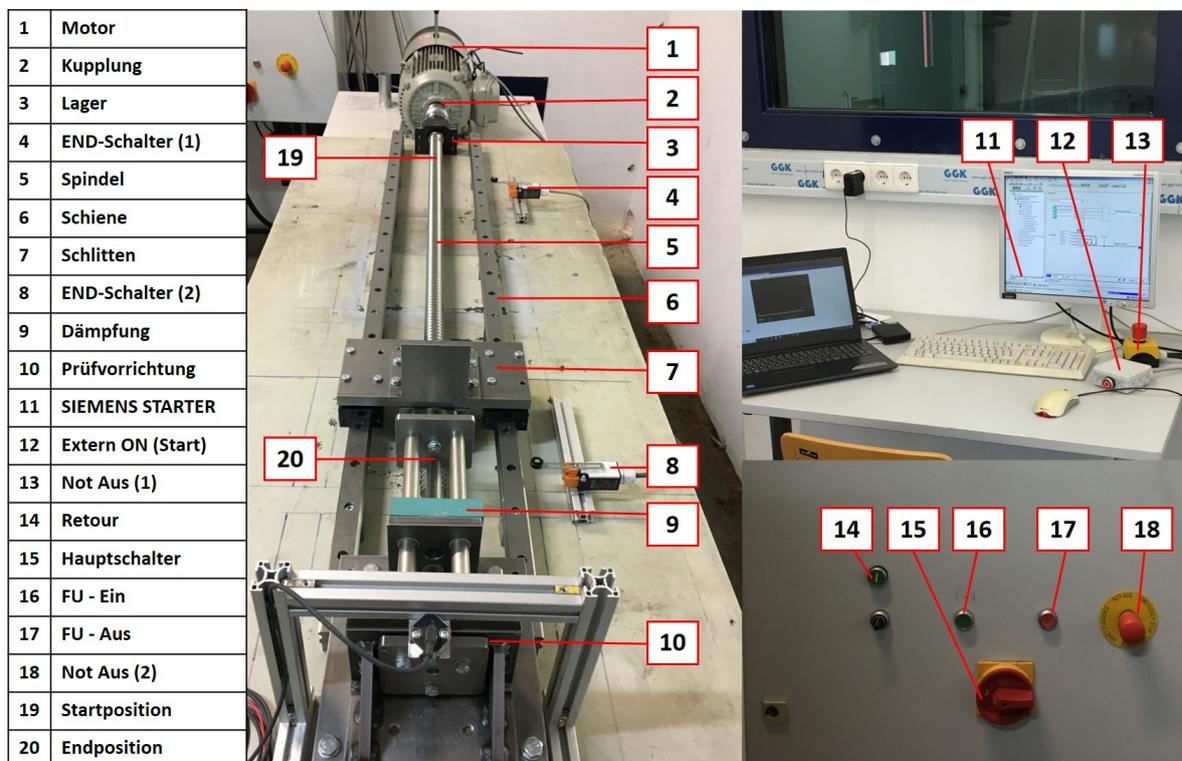


Abbildung 3.1: Links: Montierte Versuchsanordnung ohne Messtechnik. Rechts oben: PC mit Steuerungssoftware sowie Start Knopf. Rechts unten: Nahaufnahme Schaltschrank.

und der Schlitten (7) aufgeschoben. Es folgte der Einbau der Prüfvorrichtung (10) zum Einspannen der Probe und der Endschalter 1 (4) und 2 (8) zum Begrenzen des Laufweges des Schlittens. Abschließend wurde der Frequenzumrichter zum Steuern des Elektromotors über die Software „*Siemens Starter*“ konfiguriert. Die Steuerung geschieht über Signale mit definierten *Frequenzen*. Frequenz  $f$ , Motor- und Spindeldrehzahl  $\omega$  sowie Schlittengeschwindigkeit  $v$  hängen dabei wie folgt zusammen:

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

Bei Versuchsbeginn befindet sich der Schlitten in Startposition (19). Endschalter 1 ist dabei durch den Schlitten ausgelöst. Zum Starten des Versuchs wird der Druckknopf „Extern on“ (12) betätigt. Der Schlitten beginnt zu beschleunigen. Beim Auslösen von Endschalter 2 durch den sich fortbewegenden Schlitten ist die eingespannte Schraube bereits gerissen. Die Stromzufuhr zum Motor wird unterbrochen und die Gleichstrombremse aktiviert. Der Schlitten kommt zum Stehen. Anschließend wird der „Retour“-Knopf (14) betätigt. Der Schlitten fährt bei geringer Drehzahl zum Startpunkt zurück und stoppt beim Auslösen von Endschalter 1.

Bei hohen Schlittengeschwindigkeiten (Frequenz  $> 55$  Hz) reicht der vorhandene Bremsweg nach Auslösen von Endschalter 2 nicht aus, um den Schlitten vollständig zum Stillstand zu bringen. Dieser gleitet dann mit einer geringen Restgeschwindigkeit von der Antriebsspindel herab und wird von einer Dämpfungsmatte (9) vollständig abgebremst. Bei anschließendem Wiederaufbringen des Schlittens auf die Spindel durch Betätigen des „Retour“-Knopfes muss die eingestellte Frequenz  $< 0,5$  Hz sein. Eine detailliertere Beschreibung findet sich in Abschnitt 3.3.

## 3.2 Elektrische Schaltung und Parametrierung

Die Abläufe an der Versuchsapparatur werden mit Hilfe von verschiedenen Schaltern, einem Frequenzumrichter und eines Rechners mit der Software „*Siemens Starter*“ gesteuert. Die Betätigung der verschiedenen Schalter hat eine An- oder Abschaltung von +24 V Spannung an PINs (Abbildung 3.3, links unten), welche sich am Frequenzumrichter befinden, zur Folge. Dies wiederum generiert die Ausgabe von Steuersignalen vom Rechner auf den Frequenzumrichter. Letztgenannter gibt daraufhin über bestimmte PINs definierte Strom- und Spannungsverläufe an Komponenten der Versuchsapparatur ab. Die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Funktionen der Versuchsapparatur erfordern folglich eine entsprechende elektrische Verschaltung der PINs mit den elektrischen Komponenten der Versuchsapparatur sowie die Parametrisierung der Software „*Siemens Starter*“.

### 3.2.1 Elektrische Schaltung

Um die elektrische Verschaltung zu realisieren, wurden die verschiedenen Schalter der Versuchsapparatur mit Hilfe von Anschlüssen in einem Schaltschrank (Klemmstellen) gemäß dem schematischen Schaltplan in Abbildung 3.2 mit den PINs des Frequenzumrichters, der sich ebenfalls im Schaltschrank befindet, verdrahtet. Die im Schaltplan

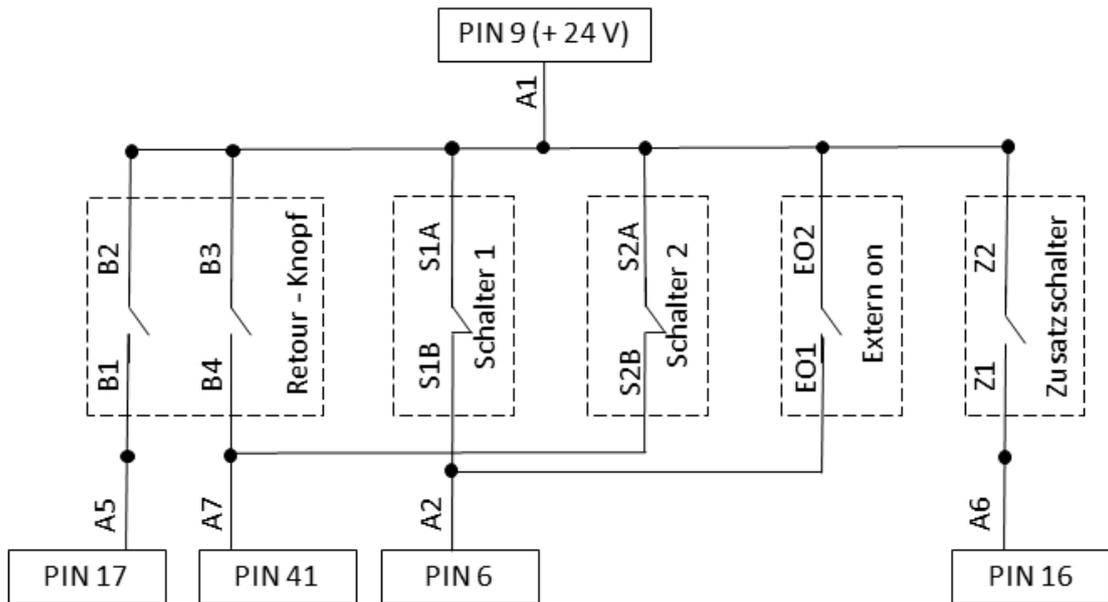


Abbildung 3.2: Schematischer Schaltplan der Versuchsanordnung.

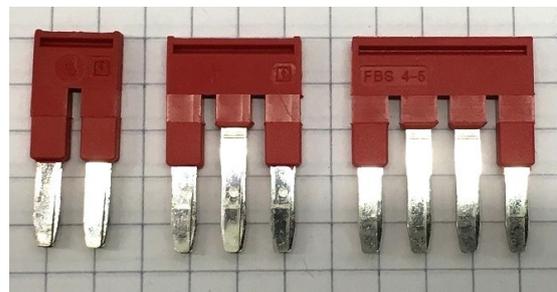
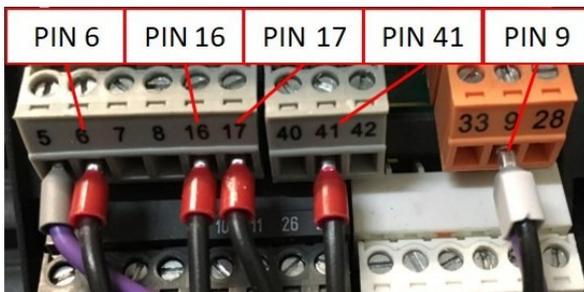
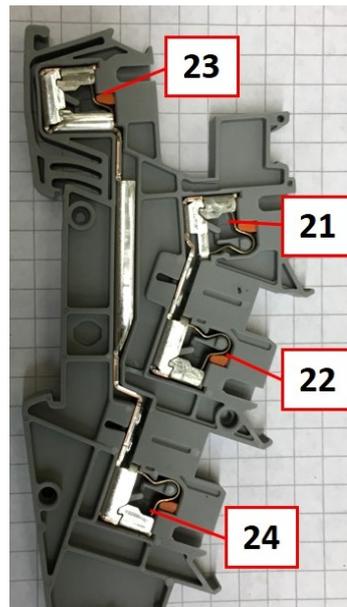


Abbildung 3.3: Fotografien der Klemmleiste (links oben), einer Doppelstockklemme (rechts oben), PIN-Anschlüsse (links unten) und dreier Brückenstecker (rechts unten).

|    |     |     |    |  |    |     |    |     |     |
|----|-----|-----|----|--|----|-----|----|-----|-----|
|    |     |     |    |  |    |     | A6 | EO1 | S1B |
| A1 | S1A | S2A |    |  |    | S2B |    | A5  | B1  |
| B2 | EO2 | Z2  | B3 |  | B4 | A7  |    |     |     |
|    |     |     |    |  |    |     | Z1 |     | A2  |

Abbildung 3.4: Schematisches Anschlussbild an der Klemmleiste. Aneinander grenzende hellgraue Kästchen sowie die dunkelgrauen Kästchen sind mit Hilfe von Steckbrücken elektrisch leitend miteinander verbunden.

gezeigten elektrischen Verbindungen werden mit Hilfe einer Klemmleiste (Abbildung 3.3, links oben) realisiert, die aus zehn aneinandergereihten Doppelstockklemmen (Abbildung 3.3, rechts oben) besteht. Eine Doppelstockklemme weist dabei die vier Klemmstellen (21) bis (24) auf, wobei jeweils die Klemmstellen (21) und (22) sowie (23) und (24) elektrisch leitend verbunden sind. Mit Hilfe von Brückensteckern (Abbildung 3.3, rechts unten) können dabei die inneren Klemmstellen (21) und (22) oder die äußeren Klemmstellen (23) und (24) mehrerer Doppelstockklemmen miteinander verbunden werden. Die Brückenstecker wurden so eingesetzt, dass sich das schematisierte Anschlussbild in Abbildung 3.4 ergab. Ein Kästchen in Abbildung 3.4 stellt eine Klemmstelle dar. Vier Kästchen übereinander symbolisieren eine Doppelstockklemme. Die in den Kästchen dargestellten Bezeichnungen korrespondieren dabei mit den Bezeichnungen der in Abbildung 3.2 dargestellten elektrischen Leitungen. Die grau hinterlegten und aneinander grenzenden Kästchen bzw. Klemmstellen sind elektrisch leitend miteinander verbunden, was die Realisierung der elektrischen Verbindungen des Schaltplans in Abbildung 3.1 bedeutet.

### 3.2.2 Parametrisierung

Die Software „Siemens Starter“ arbeitet mit den Variablen „*Aktion*“ und „*Parameter*“ (Abbildung 3.6). Die Variable „*Aktion*“ kann lediglich die Zustände „On“ und „Off“ annehmen, d. h. sie hat den Charakter eines Schalters. Demgegenüber kann die Variable „*Parameter*“ diverse Werte annehmen. Jeder dieser Werte ist ein Steuerungsvorgang an der Versuchsanlage. Durch Kombinieren der beiden Variablen und Besetzen mit Werten sowie Zuordnung eines PIN mit Hilfe von „Siemens Starter“ können verschiedene Abläufe an der Versuchsanlage definiert werden. Als Folge werden definierte Steuerungsvorgänge an der Versuchsanlage ausgelöst, wenn an den belegten PINs die Spannung +24 V an- oder abgeschaltet wird. Abbildung 3.5 veranschaulicht dies.

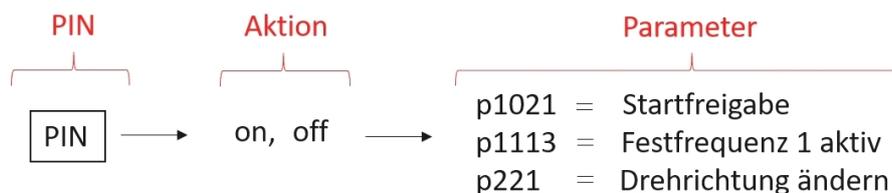


Abbildung 3.5: Veranschaulichung der variablenbasierten Anlagensteuerung mit „Siemens Starter“.

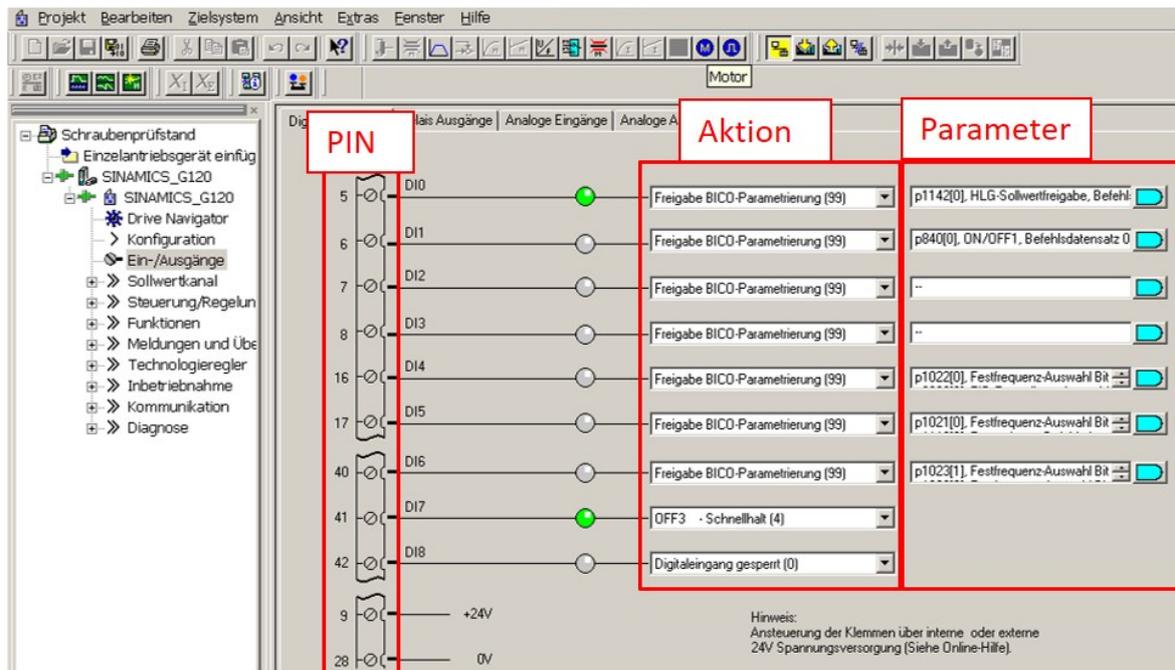


Abbildung 3.6: Screenshot der Steuerungssoftware „Siemens Starter“ mit PIN Belegung, Aktion und zugehörigem Parameter

Beispielsweise werden durch Drücken des „Extern on“-Knopfes der Versuchsanlage +24 V auf PIN 6 gegeben, wodurch ein Steuerungsvorgang ausgelöst wird, die durch den Parameter mit der Bezeichnung „p840“ definiert ist. Konkret bedeutet dies, dass der Motor freigegeben und auf die konfigurierte Drehzahl beschleunigt wird.

Die Steuerung der Versuchsanlage wurde wie folgt realisiert:

Über PIN 17 wird die Motordrehzahl sowie die Motordrehrichtung gesteuert. Durch Drücken des „Retour“-Knopfes werden an PIN 17 +24 V angelegt, wodurch ein festgelegter Wert zur eingestellten Festfrequenz addiert (genauere Beschreibung siehe Abschnitt 3.3) sowie die Drehrichtung geändert werden. Zusätzlich wird durch Betätigung des „Retour“-Knopfes PIN 41 mit Spannung beaufschlagt, was eine langsame Bewegung des Schlittens in die Ausgangsstellung zur Folge hat.

Das Abschalten von +24 V an PIN 41 verursacht eine Unterbrechung der Motorstromversorgung bei gleichzeitigem Einschalten der Gleichstrombremse. Ausgelöst wird dieser Vorgang durch die Betätigung von Endschalter 2. Diese Schaltung ist als Sicherheitsschaltung ausgeführt, d. h. im Gegensatz zu den restlichen Schaltungen wird der Vorgang durch Trennen des Pins von der Spannungsversorgung getriggert. Erst wenn dieser Vorgang inaktiv ist, also PIN 41 wieder mit Spannung versorgt ist, ist ein Drehen des Motors möglich. Diese Schaltung hat zur Folge, dass bei einem technischen Defekt, der die Endschalter funktionslos machen würde (z. B. Kabelbruch), kein Motorstart möglich ist.

Durch das Anlegen von Spannung an PIN 6 wird die Freigabe zum Start des Motors erteilt. Wird die Spannung an PIN 6, durch Betätigen von Schalter 1 beim Zurückfahren des Schlittens in die Startposition, unterbrochen, erlischt die Startfreigabe und der Motor kommt zum Stehen. Durch Betätigen des „Extern on“-Knopfes wird Schalter 1 überbrückt und PIN 6 mit Spannung versorgt (Abbildung 3.2).

Für Versuche bei Frequenzen  $> 55$  Hz wurde ein Zusatzschalter integriert. Beim Auslösen dieses Zusatzschalters werden  $+24$  V auf PIN 16 gegeben, wodurch zur aktiven Festfrequenz ein weiterer Wert addiert wird. Somit wird kurzzeitig die Motordrehzahl, mit der der Schlitten in die Ausgangsposition zurück bewegt wird, erhöht. Diese Funktion ist bei Versuchen mit Frequenzen über 55 Hz nützlich, um die Dauer für das Rückfahren des Schlittens in die Ausgangsposition zu verkürzen (genaue Beschreibung siehe Abschnitt 3.3).

### 3.3 Bedienung

Die Bedienung der Versuchsapparatur erfolgt über die in Abbildung 3.1 dargestellten Knöpfe sowie die Steuerungssoftware „Siemens Starter“. Damit „Siemens Starter“ eine Verbindung zum Frequenzumrichter aufbauen kann, muss dieser eingeschaltet sein. Hierzu wird der Hauptschalter (15) in Abbildung 3.1 aktiviert und der „On“-Knopf (16) betätigt. Anschließend wird über den Button (25) in Abbildung 3.7 „mit Zielgerät verbinden“ eine Verbindung aufgebaut. Ist dies erfolgt, erscheint die Anzeige „Online-Modus“ in Feld (33). Die gewünschte Drehzahl kann nun vorgegeben werden.

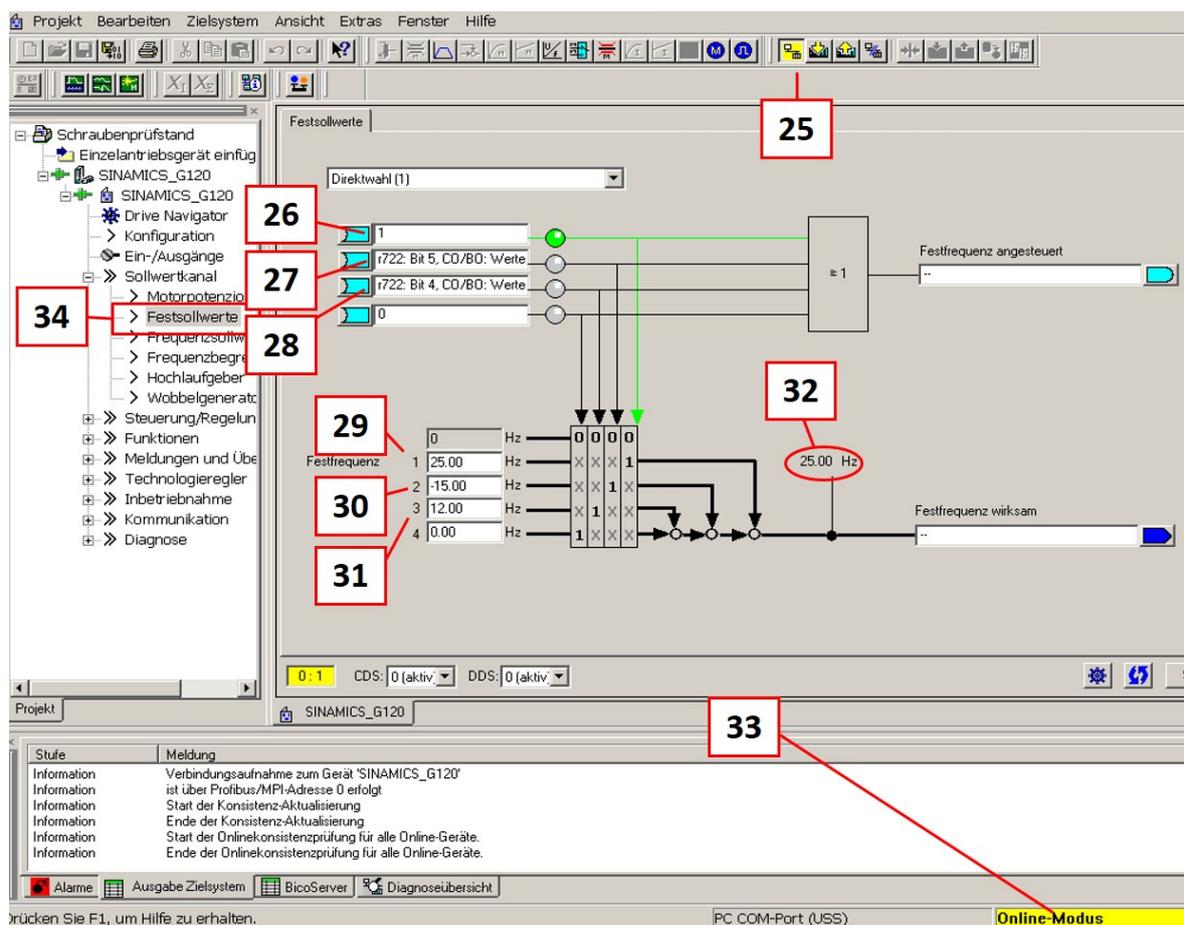


Abbildung 3.7: Screenshot der Steuerungssoftware „Siemens Starter“. Darstellung und Ansteuerung von Festfrequenzen.

Hierzu wird in der Kategorie „Sollwertkanal“ der Reiter „Festsollwerte“ (34) ausgewählt. Unter der Bezeichnung „Festsollwert 1“ (29) bzw. (26) wird die gewünschte Frequenz eingetragen (hier: 25 Hz). Der eingetragene Festwert ist stets aktiv.

Wird der in Abschnitt 3.2.2 beschriebene „Retour“-Knopf betätigt, wird Festfrequenz 2 (30) bzw. (27) zusätzlich aktiviert.

Damit die Einstellungen wirksam werden, müssen diese an den Frequenzumrichter übertragen werden. Dies geschieht, indem mit der rechten Maustaste auf „Festsollwerte“ geklickt und „RAM nach ROM kopieren“ ausgewählt wird.

Die resultierende Frequenz (32) besteht nun aus der Summe von Festfrequenz 1 und Festfrequenz 2. Dabei muss Festfrequenz 2 so gewählt werden, dass beim Aktivieren von Festfrequenz 2 (durch Drücken des „Retour“-Knopfes) in der Summe stets eine Frequenz von 10 Hz resultiert. Bei der zuvor festgelegten Drehzahl von 25 Hz sind dies also -15 Hz. Es ist unbedingt zu beachten, dass die Vorzeichen korrekt sind. Folglich wird beim Drücken des „Retour“-Knopfes der Schlitten mit  $v = 0,2 \text{ m/s}$  bzw. mit einer Frequenz von 10 Hz in die Startposition zurück gefahren.

Bei Versuchen mit Frequenzen  $> 55 \text{ Hz}$  sind besondere Einstellungen vorzunehmen. Da bei diesen Frequenzen ein vollständiges Abbremsen des Schlitten nicht möglich ist, rutscht dieser mit einer Restgeschwindigkeit von der Spindel herab. Spindel und Schlitten besitzen bei Motorstillstand nun keinen Eingriff mehr. Um den Schlitten wieder auf die Spindel aufzubringen, muss diese mit einer maximalen Frequenz von 0,5 Hz rückwärts drehen. Findet ein Versuch beispielsweise mit einer Festfrequenz 1 von 65 Hz statt, muss Festfrequenz 2 folglich -64,5 Hz betragen. Die resultierende Frequenz beim Betätigen des „Retour“-Knopfes beträgt dann 0,5 Hz. Bei dieser Frequenz wird der Schlitten durch leichtes manuelles Anpressen wieder auf die Spindel aufgebracht.

Haben Schlitten und Spindel wieder vollen Eingriff, kann durch Drücken des Zusatzschalters (Abbildung 3.2) die Frequenz kurzzeitig erhöht werden, indem die Festfrequenz 3 (31) bzw. (28) zusätzlich wirksam wird. Die resultierende Frequenz besteht nun aus der Summe der Festfrequenzen 1, 2 und 3. Wird Festfrequenz 3 beispielsweise mit 12 Hz definiert, resultiert beim Drücken des „Retour“-Knopfes und des Zusatzschalters eine Frequenz von 12,5 Hz im vorherigen Beispiel. Der Schlitten fährt nach dem Aufbringen auf die Spindel mit  $v = 0,25 \text{ m/s}$  bzw. mit einer Frequenz von 12,5 Hz in die Ausgangsposition zurück.

Bei der Vergabe der Festfrequenzen müssen die Angaben vor der Übertragung auf den Frequenzumrichter unbedingt auf Richtigkeit geprüft werden. Falsche Einstellungen oder Vorzeichenfehler können die Versuchsanlage beschädigen.

# Kapitel 4

## Experimenteller Teil

### 4.1 Messkette und Prüfvorrichtung

Zur Durchführung der Versuche wurde die in Kapitel 3 beschriebene Versuchsanordnung mit Messtechnik ausgestattet (Abbildung 4.1). Der Schlitten (7) bewegt sich mit der eingestellten Geschwindigkeit auf die Prüfvorrichtung (10) zu. In Letztgenannter befindet sich die zu untersuchende Polyamidschraube (44). Beim Erreichen der Lichtschranke (35) wird die Messkette (Abbildung 4.2) getriggert bzw. die Messung gestartet. Die Lichtschranke gibt ein Signal geringer Spannung an den Signalgenerator (38) ab. Dieser wiederum erzeugt einen Rechteckimpuls womit zeitgleich die Aufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera (37) und die Datenerfassung am Oszilloskop (39) gestartet wird. Der Signalgenerator wird benötigt weil die Hochgeschwindigkeitskamera einen Rechteckimpuls als Triggersignal erwartet.

Trifft der Schlitten auf die Prüfvorrichtung, wird der angebrachte Dämpfer (43) gestaucht. Platte 1 (47) der Prüfvorrichtung, an welcher der Dämpfer befestigt ist, ist über drei Zylinder (48) mit Platte 4 (51) der Prüfvorrichtung verbunden. Platte 2 (49) und Platte 3 (50) fungieren lediglich als Führung und sind unbeweglich. An Platte 2 und 3 sind Aussparungen angebracht, durch welche die Zylinder hindurch gleiten. Wird der Dämpfer nun durch den Schlitten gestaucht, werden Platte 1 und Platte 4 mit den Zylindern nach rechts geschoben (Abbildung 4.1). Die Polyamidschraube wird auf Zug belastet. Die dabei an der Schraube anliegende Kraft wird von einer Kraftmessdose (45) der Firma Kistler mit zugehörigem Ladungsverstärker (41) gemessen. Das vom Ladungsverstärker ausgegebene Spannungs-Zeit-Signal sowie der vom Signalgenerator erzeugte Rechteckimpuls werden mit dem Oszilloskop erfasst und gespeichert.

Um Aussagen über die Dehnung der Polyamidschraube treffen zu können, ist die Versuchsanordnung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und einer zusätzlichen Beleuchtung (36) ausgestattet. Kamera und Beleuchtung sind auf Platte 4 der Prüfvorrichtung ausgerichtet. An Platte 4 sind sowohl Markierungen (46) als auch eine Längenskala (46) angebracht. Damit lässt sich der zurückgelegte Weg von Platte 4 und somit die Dehnung der Polyamidschraube bildlich erfassen und die Dehnungslänge messen. Das verwendete Kameraobjektiv ermöglicht eine maximale Aufnahmezeit von bis zu 6000 Bildern pro Sekunde.

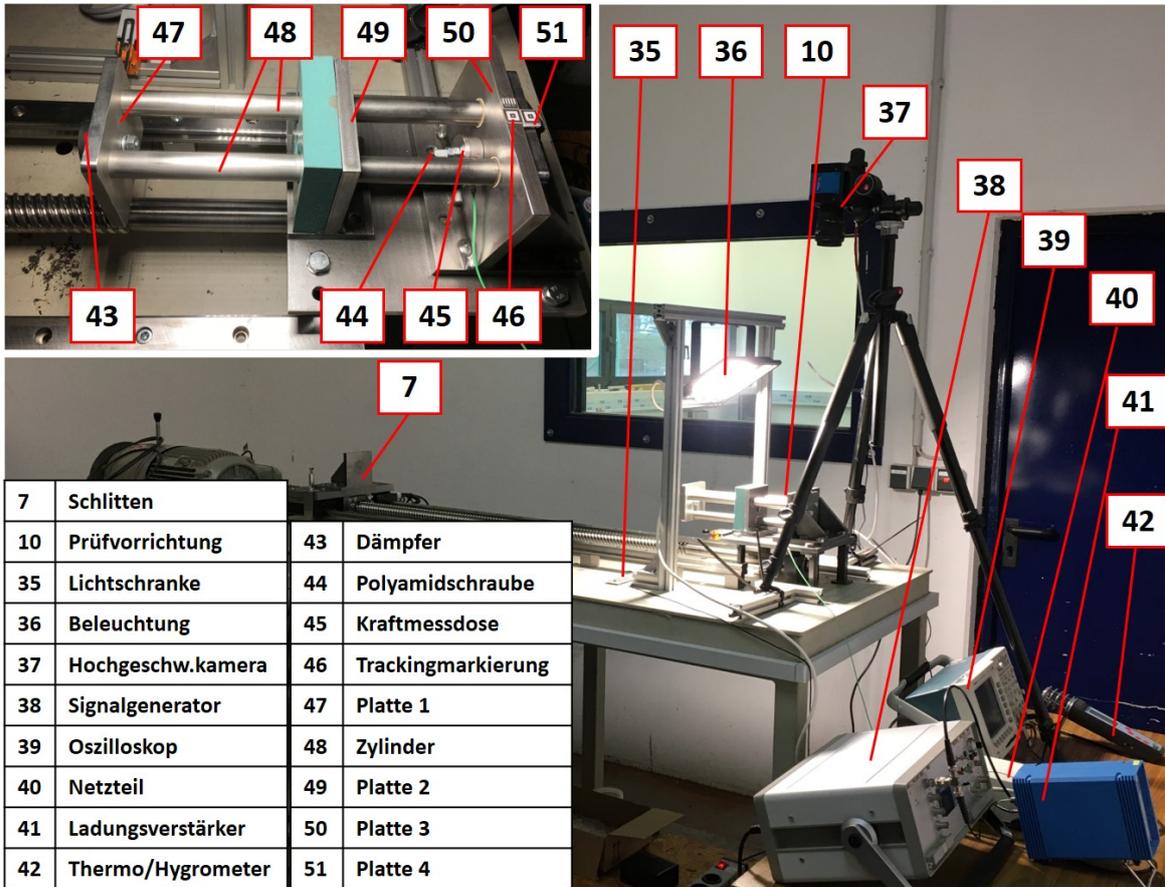


Abbildung 4.1: Versuchsapparatur mit Messtechnik. Links oben: Nahaufnahme der Prüfvorrichtung mit eingespannter Polyamidschraube.

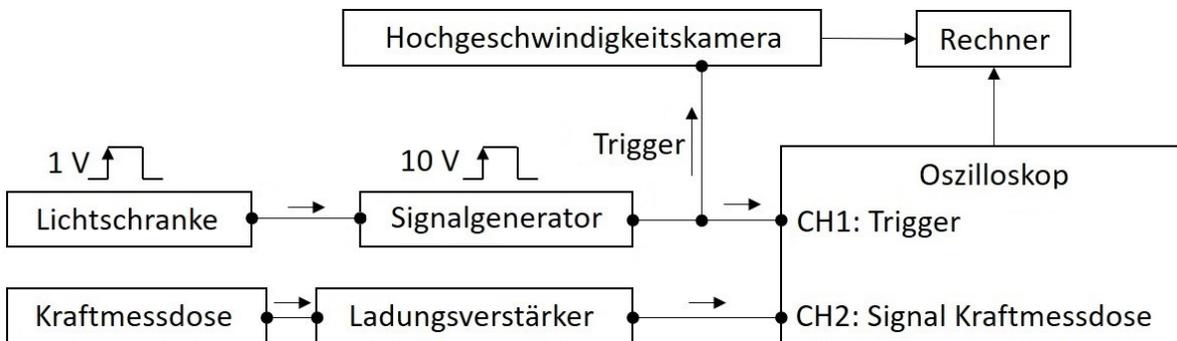


Abbildung 4.2: Blockbild der Messkette.

## 4.2 Versuchsdurchführung

### 4.2.1 Versuchsablauf

Zunächst wird gemäß Abschnitt 3.3 die Motordrehzahl konfiguriert und die Versuchsvorrichtung in Ausgangsstellung gebracht. Anschließend wird die zu untersuchende Polyamidschraube von rechts durch Platte 4 und Platte 3 geführt. Bei Schrauben der Größe M6 wird zusätzlich eine Hülse verwendet, die ein Aufliegen des Schraubenkopfes der Probe auf Platte 4 gewährleistet. Danach wird von links die Kraftmessdose über die Schraube geschoben (bei Schrauben der Größe M6 erneut mit Hülse). Anschließend werden zwei Metallmuttern auf die Schraube handfest aufgedreht. Die Verwendung von zwei Metallmuttern verhindert ein Abziehen des Kunststoffgewindes der Schraube. Anschließend werden alle Messgeräte in Bereitschaft versetzt und die Beleuchtung eingeschaltet. Unmittelbar vor Messbeginn wird der Ladungsverstärker aktiviert. Die messende Person positioniert sich hinter einer Scheibe aus Sicherheitsglas und startet den Versuch durch Drücken des „Extern on“-Knopfes. Nach dem Versuch werden alle Messdaten gespeichert und die Schraubenbruchstücke visuell auf Fehlstellen untersucht. Durch Drücken des „Retour“-Knopfes wird der Schlitten in die Ausgangsstellung zurückgefahren. Bei raumfeuchten und feuchtigkeitsgesättigten Schrauben werden je Versuchsreihe 5 Schraubenbruchstücke gewogen, markiert und im Trockenschrank bei 60 °C bis zur vollständigen Trocknung gelagert. Durch Massendifferenzbildung wird so die Materialfeuchte der Bruchstücke am Versuchstag bestimmt.

### 4.2.2 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 Polyamidschrauben auftreten, wenn diese als Verschlusschrauben von Explosionsklappen eingesetzt werden. Die Bandbreite der Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten beträgt nach [16]:

$$2.334 \text{ N/s} \leq \frac{dF}{dt} \leq 754.920 \text{ N/s} \quad (4.1)$$

Da bei solchen Explosionsklappen Polyamidschrauben 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. Darüber hinaus wurden sieben Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten, welche den in (4.1) dargestellten Bereich abdecken, untersucht.

Um ein Vergleichskriterium zu schaffen, wurden vor Messprogrammbeginn mit Hilfe von Versuchen an raumfeuchten M6-Polyamidschrauben die einzustellenden Frequenzen ermittelt, welche die gewünschten Belastungsanstiegsgeschwindigkeit erzeugen. Dabei wurde die Frequenz bzw. Motordrehzahl bzw. Schlittengeschwindigkeit so lange variiert, bis die jeweilige Belastungsanstiegsgeschwindigkeit, bestimmt gemäß des Verfahrens in Abschnitt 4.3, erreicht wurde. Die so bestimmten sieben Frequenzen wurden

| 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 |

Tabelle 4.1: Ermittelte Frequenzen, Drehzahlen und Schlittengeschwindigkeiten mit zugehörigen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten für raumfeuchte Polyamidschrauben der Größe M6.

für alle Versuche verwendet. In Tabelle 4.1 sind die ermittelten Motordrehzahlen für die festgelegten Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten dargestellt.

Unter Verwendung der Daten aus Tabelle 4.1 wurde das in Tabelle 4.2 aufgezeigte Versuchsprogramm erstellt. Um das Versuchsprogramm in dem dafür vorgesehenen Zeitrahmen durchführen zu können, wurden für die Schraubengrößen M8 und M10 nur jeweils drei Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten untersucht. Das Versuchsprogramm umfasst insgesamt 390 Versuche, welche nach dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen Vorgehen ausgewertet wurden.

|          |                |           | Schraubengröße   Versuchsanzahl |            |           |
|----------|----------------|-----------|---------------------------------|------------|-----------|
| $f$ [Hz] | $\omega$ [U/s] | $v$ [m/s] | trocken                         | raumfeucht | gesättigt |
| 0,3      | 0,15           | 0,006     | M6   10                         | M6   10    | M6   10   |
| 5        | 2,5            | 0,1       | M6   10                         | M6   10    | M6   10   |
| 15       | 7,5            | 0,3       | M6   10                         | M6   10    | M6   10   |
| 27,5     | 13,75          | 0,55      | M6   10                         | M6   10    | M6   10   |
| 38       | 19             | 0,76      | M6   10                         | M6   10    | M6   10   |
| 53       | 26,5           | 1,06      | M6   10                         | M6   10    | M6   10   |
| 65       | 32,5           | 1,3       | M6   10                         | M6   10    | M6   10   |
| 5        | 2,5            | 0,1       | M8   10                         | M8   10    | M8   10   |
| 27,5     | 13,75          | 0,55      | M8   10                         | M8   10    | M8   10   |
| 65       | 32,5           | 1,3       | M8   10                         | M8   10    | M8   10   |
| 5        | 2,5            | 0,1       | M10   10                        | M10   10   | M10   10  |
| 27,5     | 13,75          | 0,55      | M10   10                        | M10   10   | M10   10  |
| 65       | 32,5           | 1,3       | M10   10                        | M10   10   | M10   10  |

Tabelle 4.2: Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführtes Versuchsprogramm.

### 4.2.3 Schraubenkonditionierung

Die benötigten Schrauben wurden je nach gewünschtem Konditionierungszustand in einem Trockenschrank bei 60 °C oder in raumtemperiertem Leitungswasser für mindestens 60 Tage gelagert und auf diese Art und Weise für die Versuche vorbereitet. Nach

diesem Zeitraum sind alle Proben vollständig trocken bzw. feuchtigkeitsgesättigt (Abbildungen A.1 und A.2). In Tabelle 4.3 ist die Feuchtigkeitsaufnahme der verschiedenen Polyamidschrauben je nach Konditionierungszustand in Volumenprozent aufgelistet. Die Materialfeuchtigkeit  $W$  wurde dabei durch Mittelwertbildung der Materialfeuchte verschiedener Schraubenbruchstücke nach vollständiger Trocknung bestimmt.

| 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               |

Tabelle 4.3: Konditionierungszustände mit zugehöriger Materialfeuchte  $W$  für Polyamidschrauben der Größe M6, M8 und M10.

## 4.3 Datenauswertungsverfahren

Die Messergebnisse aller durchgeführten Versuche wurden nach den im Folgenden beschriebenen Verfahren ausgewertet. Um dies möglichst effizient zu gestalten, wurden vom Autor entwickelte VBA-Excel-Skripte eingesetzt.

### 4.3.1 Bruchkraft, Bruchzeitpunkt, Belastungsdauer und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit

Üblicherweise wird bei Zugversuchen zur Bestimmung der Bruchkraft die Flanke des abfallenden Signals nach Erreichen des Kraftmaximums verwendet. Hier dient in der Regel eine Abweichung von mindestens 20 % zwischen zwei aufeinander folgende Messwerte als Bestimmungskriterium [12]. Aufgrund der hohen Abtastrate des verwendeten Oszilloskops und des bei feuchtigkeitsgesättigten Schrauben zähen Materialverhaltens, beträgt die Abweichung zwischen zwei aufeinanderfolgende Messwerte bei zahlreichen Versuchen weniger als 20 %. Eine Bestimmung der Bruchkraft mit dem genannten Abweichungskriterium ist deshalb für diese Versuche nicht konsistent anwendbar.

Aus diesem Grund wird zur Bestimmung der Bruchkraft  $F_B$  sowie der Belastungsdauer  $t_B$  ein alternatives Verfahren verwendet. Dabei werden dem gemessenen Belastungsverlauf zwei Geraden G1 und G2 (Abbildung 4.3) angeglichen. 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

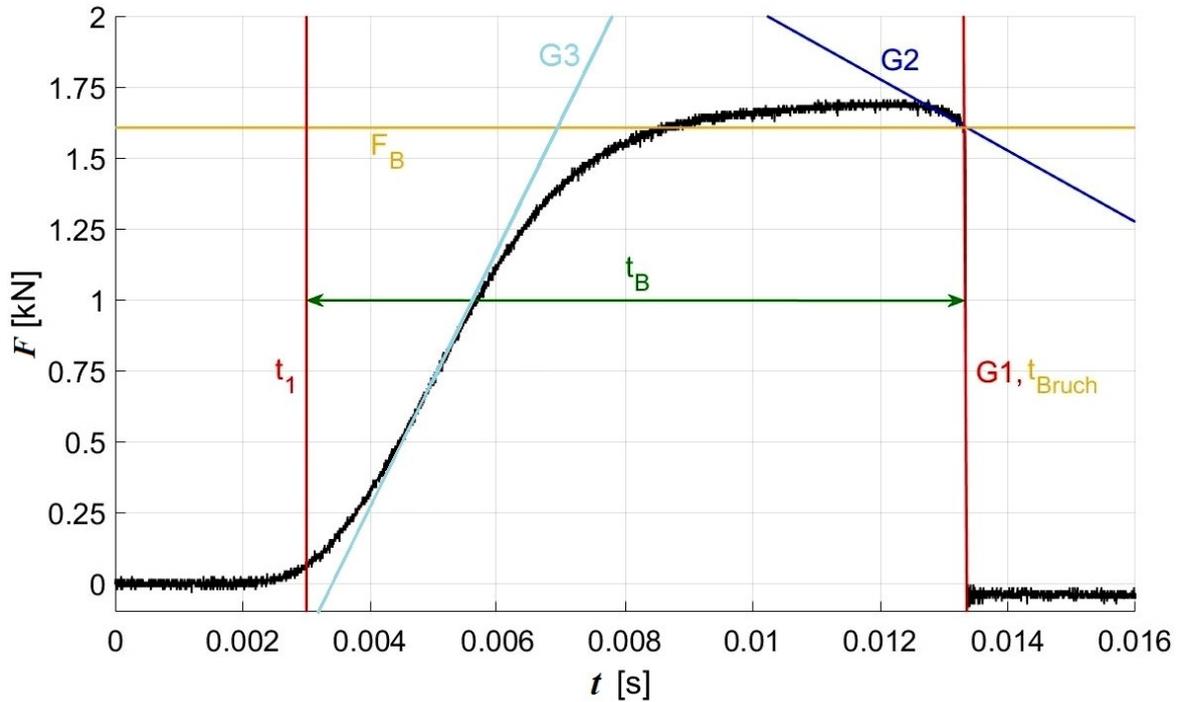


Abbildung 4.3: Exemplarischer Belastungsverlauf einer M6-Polyamidschraube mit Bruchkraft  $F_B$ , Belastungsdauer  $t_B$  und den zur Bestimmung des Bruchzeitpunkts sowie der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit verwendeten Geraden G1, G2 und G3.

abfallenden Flanke angelegt. Der errechnete Schnittpunkt der Geraden G1 und G2 wird als mathematischer Bruchzeitpunkt  $t_{\text{Bruch,m}}$  der Polyamidschraube 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  $F_B$ . Die Belastungsdauer  $t_B$  ist dabei die Differenz zwischen  $t_{\text{Bruch}}$  und dem Anfangszeitpunkt der Schraubenbelastung  $t_1$ . 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  $dF/dt$ .

### 4.3.2 Dehnungsverlauf und Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die Auswertung der mit der Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichneten Bildsequenzen erfolgt mit der Trackingsoftware „Motion Studio“ der Firma „IDT Vision“. Zur Bestimmung der bei der Versuchsdurchführung auftretenden Dehnung der Polyamidschraube wird die Bewegung von Platte 4 der Prüfvorrichtung erfasst (Abschnitt 4.1). Hierfür wird in der Software „Motion Studio“ mit Hilfe der auf der Prüfvorrichtung angebrachten Trackingmarkierungen (Abbildung 4.4) ein Motion Tracking durchgeführt. Als Ergebnis werden  $x$ - und  $y$ -Koordinaten der Platten 3 und 4 in Abhängigkeit der

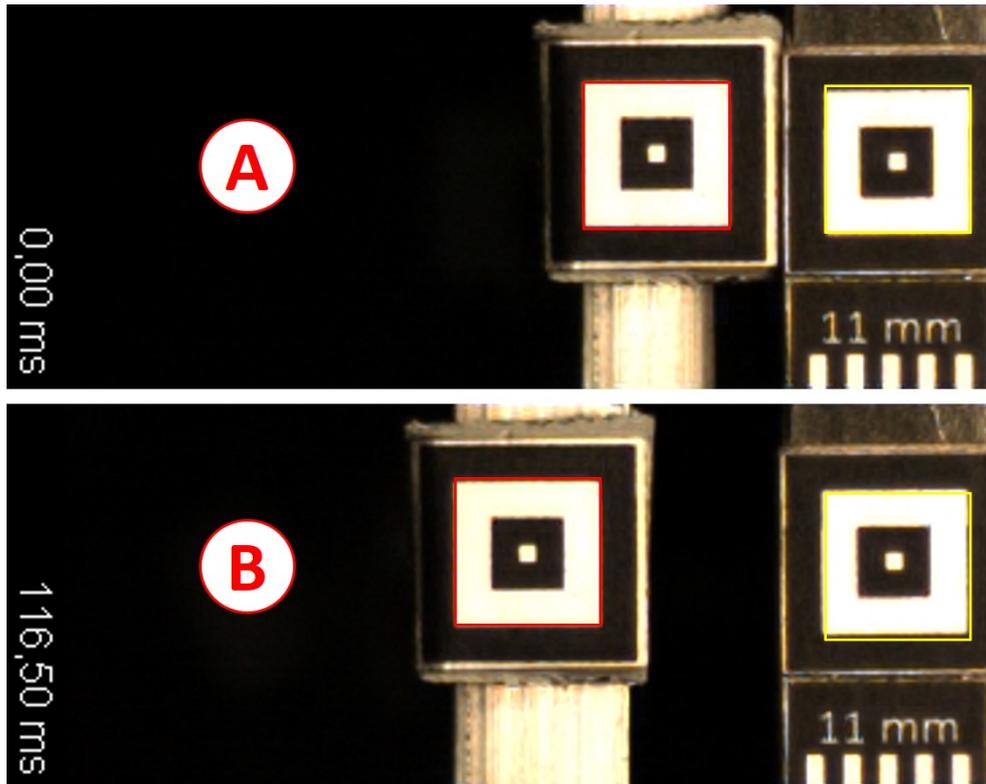


Abbildung 4.4: Exemplarische Aufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera mit Trackingmarkierungen bei Messbeginn (A) und beim Bruch der Schraube (B).

Zeit ausgegeben. Durch Differenzbildung wird der zurückgelegte Weg von Platte 4 in Abhängigkeit der Zeit bestimmt. Unter Berücksichtigung der Länge der eingespannten Schraube wird daraus der Dehnungsverlauf  $\epsilon(t)$  der Schraube erstellt (Abbildung 4.5). Aufgrund der Triggerung der Messkette sind alle Messdaten zeitlich synchronisiert. Deshalb ist die Bruchdehnung  $\epsilon_B$  die Dehnung, die zum Bruchzeitpunkt  $t_{\text{Bruch}}$  gemessen wurde (Abbildung 4.5). Weil sich jedoch die Abtastrate des Oszilloskops und die Bildrate der Hochgeschwindigkeitskamera unterscheiden, fallen die Aufnahmezeitpunkte der Bilder zumeist nicht mit den Messzeitpunkten des Oszilloskops zusammen. Aus diesem Grund wird zur Bestimmung der Bruchdehnung das Bild der Hochgeschwindigkeitskamera herangezogen, dessen Aufnahmezeitpunkt so wenig wie möglich von  $t_{\text{Bruch}}$  aus dem Oszilloskopdatensatz abweicht.

Zur Erstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms wird jedem Messwert aus den Daten der Hochgeschwindigkeitskamera ein Messwert aus den Daten der Kraftmessdose zugeordnet. Wegen des bereits erwähnten Unterschiedes in der Bild- und Oszilloskopabtastrate wird für jeden Bildaufnahmezeitpunkt der Hochgeschwindigkeitskamera im Datensatz der Kraftmessdose derjenige Messwert mit der geringsten Abweichung im Zeitwert bestimmt. Unter Berücksichtigung des entsprechenden Kerndurchmessers der Polyamidschraube  $D_K$  kann dann die Dehnung bestimmt und ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellt werden. Durch Mittelwertbildung mehrerer Spannungs-Dehnungskurven wird das mittlere Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellt. Als mittlerer E-Modul wird die Steigung einer Geraden durch den linear-elastischen Bereich  $dF/d\epsilon$  definiert (Abbildung 4.6).

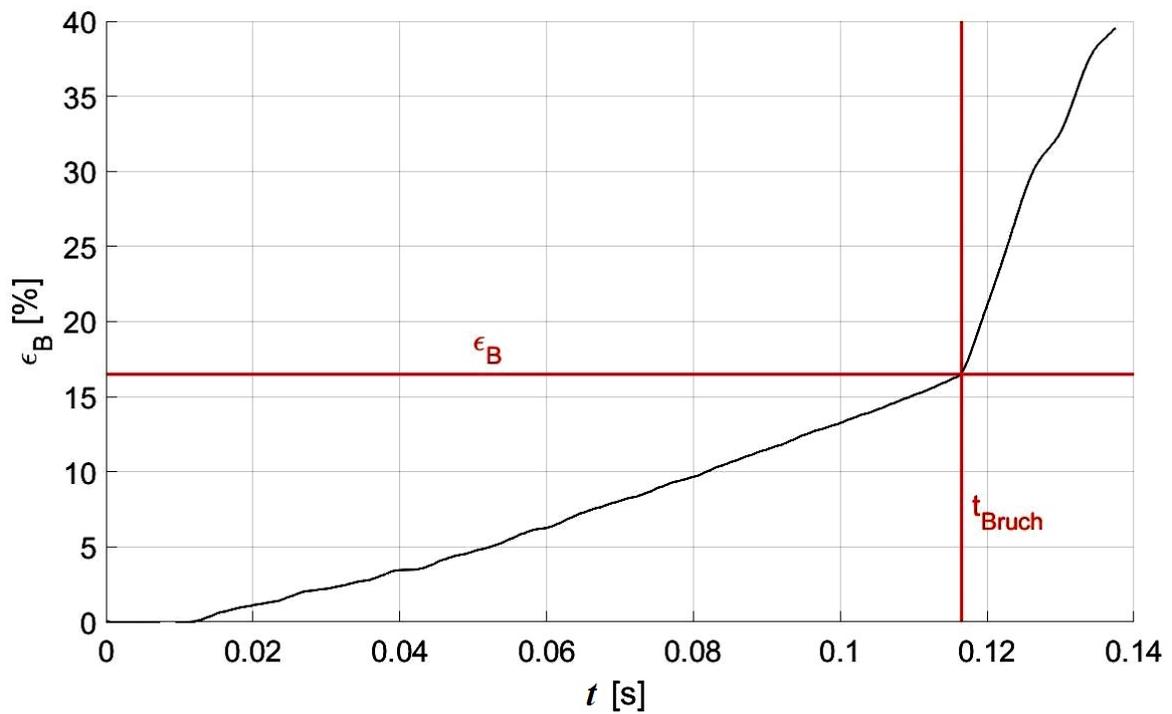


Abbildung 4.5: Exemplarischer Dehnungsverlauf mit Bruchdehnung  $\epsilon_B$  und Bruchzeitpunkt  $t_{\text{Bruch}}$ .

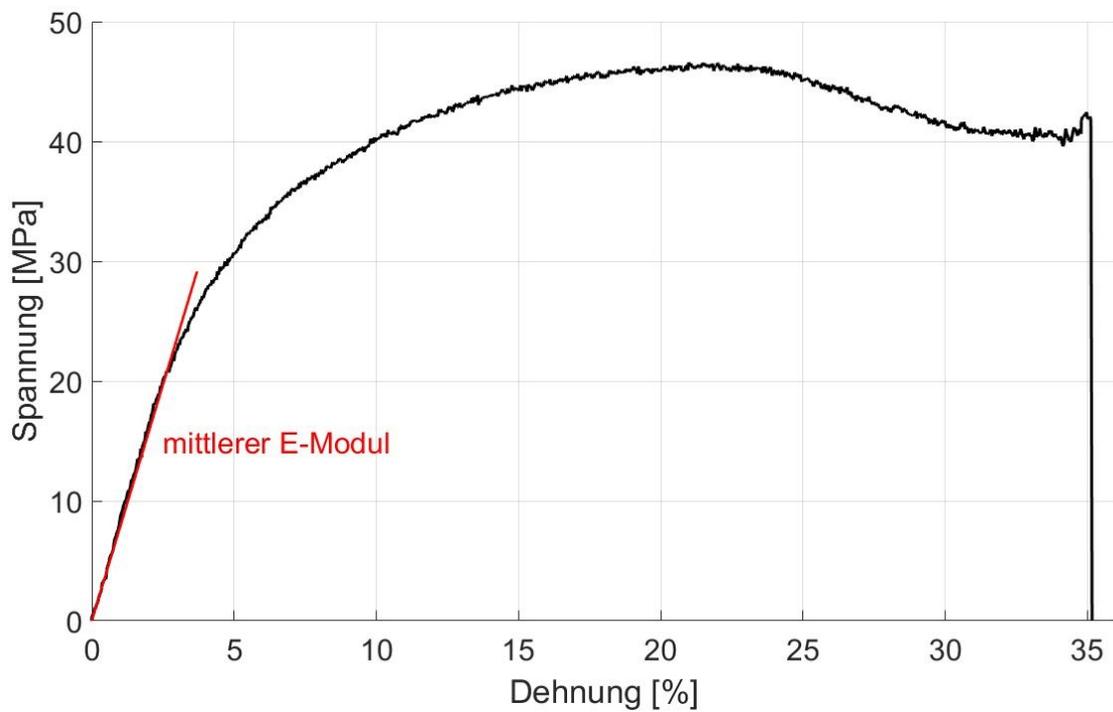


Abbildung 4.6: Exemplarisches mittleres Spannungs-Dehnungs-Diagramm von gesättigten Polyamidschrauben der Größe M6 ( $f = 5 \text{ Hz}$ ).

## 4.4 Messergebnisse und Auswertung

Wie in Abschnitt 4.2.2 erläutert, wurden für eine Versuchsparameterkombination jeweils zehn Einzelversuche durchgeführt, um eine statistisch brauchbare Messwertbasis zu generieren. Im Rahmen der Auswertung wurde dann über die zehn Messwerte einer interessierenden Messgröße gemittelt und die zugehörige Standardabweichung berechnet.

### 4.4.1 Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und E-Modul

In Abbildung 4.7 ist die mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  mit Standardabweichung  $\delta$  über der Frequenz  $f$  für M6-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen trocken, raumfeucht und gesättigt aufgetragen. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle B.1 im Anhang aufgelistet. Man entnimmt der Grafik, dass  $\overline{dF/dt}$  unabhängig vom Konditionierungszustand mit  $f$  steigt. Die mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit sowie die Standardabweichung ist bei trockenen und raumfeuchten Polyamidschrauben ähnlich. Bei gesättigten Schrauben liegt die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit für alle Frequenzen stets unterhalb dieses Niveaus. Diese Abnahme der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit liegt unter Berücksichtigung der Standardabweichung bei allen Frequenzen zwischen 57% und 68% (Tabelle B.1). Demnach unterschreitet die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit bei der Untersuchung von gesättigten M6-Polyamidschrauben diejenige der raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben um mindestens 57% bei identischen Frequenzen.

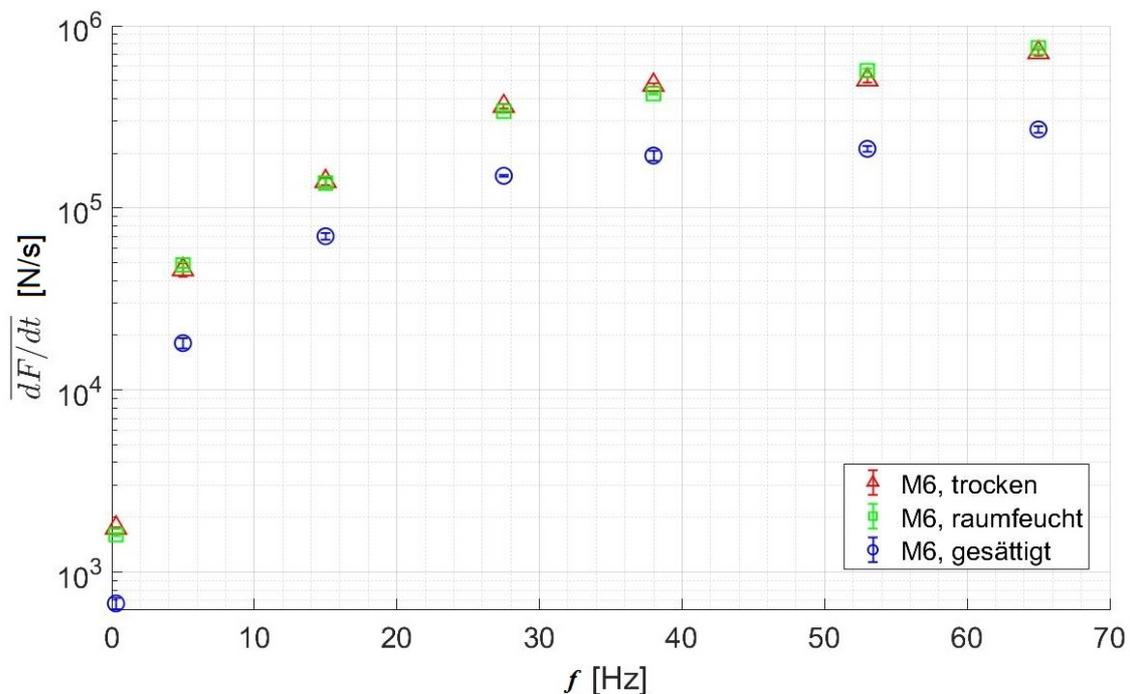


Abbildung 4.7: Logarithmische Darstellung der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  in Abhängigkeit der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M6.

Ein ähnliches Ergebnis zeigte sich für M8- und M10-Polyamidschrauben, wie man den Abbildungen A.5 und A.6 im Anhang entnimmt. Jedoch unterscheiden sich bei diesen Schraubengrößen auch die mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten bei raumfeuchten und trockenen Schrauben bei identischen Frequenzen. Vor allem bei hohen Frequenzen zeigen trockene Polyamidschrauben eine höhere mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit als raumfeuchte Polyamidschrauben.

Aus diesem Ergebnis folgt, dass die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit beim gewählten Versuchsprogramm feuchtigkeitsabhängig ist. Deshalb wird in diesem Kapitel auf die Darstellung des Einflusses der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf Parameter wie Bruchkraft, Bruchdehnung oder Belastungsdauer bei gleichzeitigem Vergleich der Materialfeuchte verzichtet. Stattdessen werden in den folgenden Abschnitten die Messergebnisse in Abhängigkeit der Frequenz  $f$  aufgetragen. Diese ist unabhängig von äußeren Faktoren und erlaubt somit einen aussagekräftigen Vergleich der Ergebnisse. Die Abhängigkeiten der Größen Bruchkraft, Bruchdehnung und Belastungsdauer von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit sind für alle Schraubengrößen in den Abbildungen 5.1 bis 5.4 und A.13 bis A.17 im Anhang dargestellt.

In Abbildung 4.8 ist der mittlere E-Modul über der Frequenz als Funktion der drei Konditionierungszustände dargestellt. Die Grafik zeigt, dass der mittlere E-Modul bei identischen Frequenzen für raumfeuchte und trockene Schrauben im Rahmen der Messunsicherheit gleich ist. Dieses Verhalten wurde auch im Hinblick auf die mittleren Spannungs-Dehnungs-Kurven beobachtet, wie man den Abbildungen 4.9 und A.3 sowie A.4 im Anhang entnimmt.

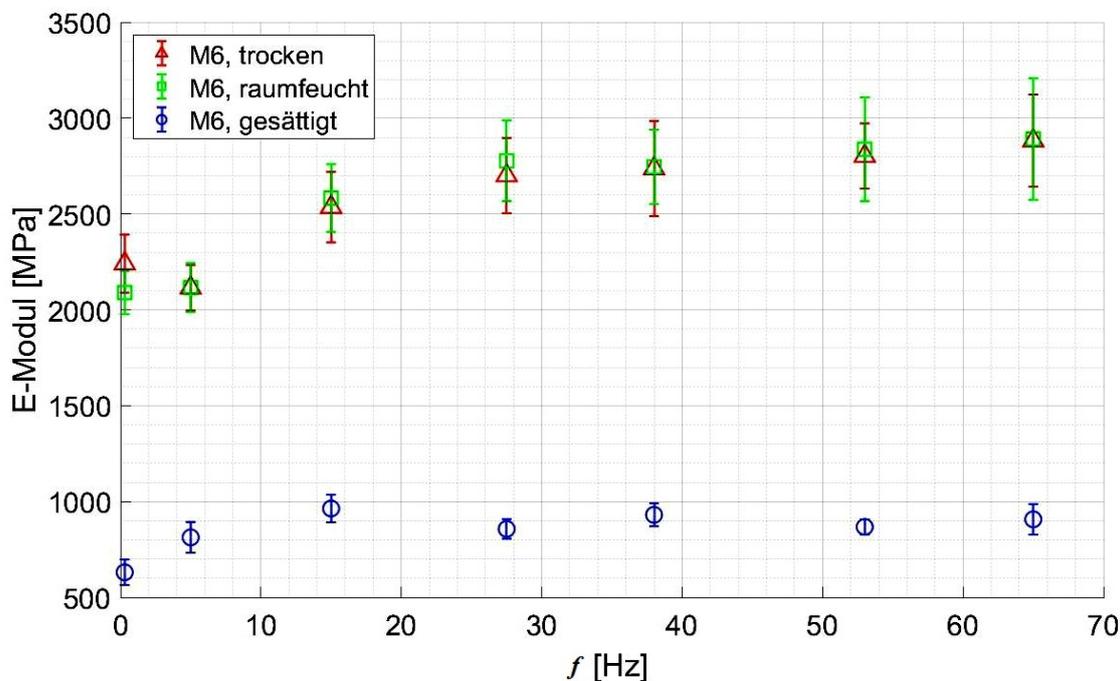


Abbildung 4.8: Darstellung des mittleren E-Moduls in Abhängigkeit der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M6.

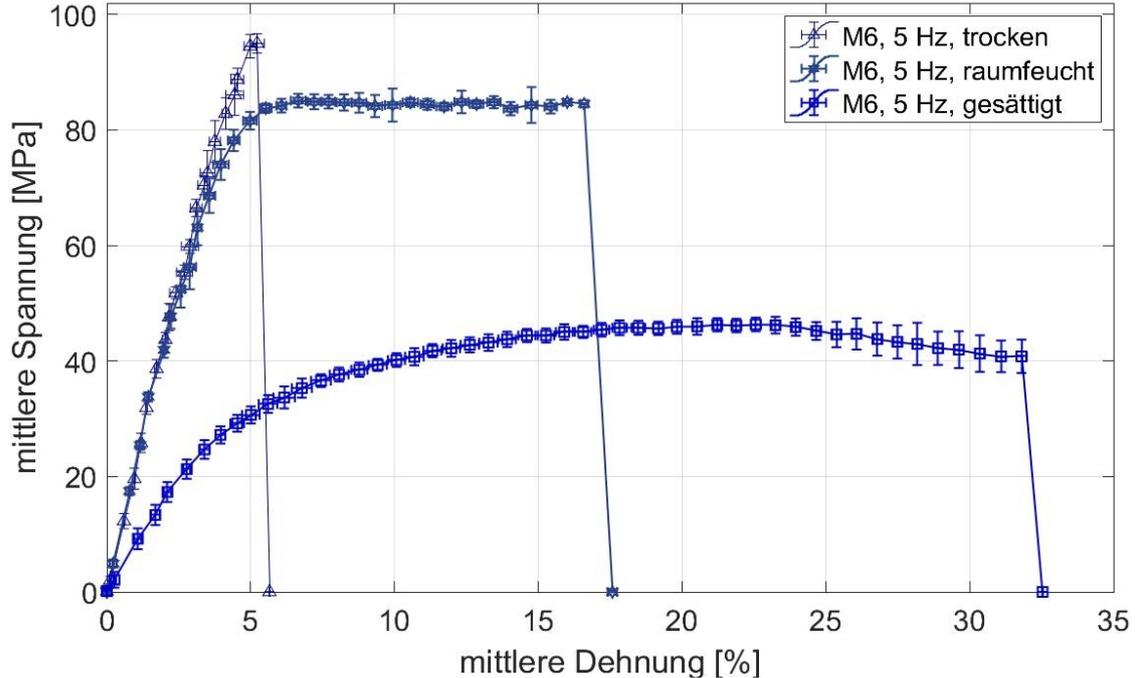


Abbildung 4.9: Mittlere Spannung über mittlerer Dehnung für Polyamidschrauben der Größe M6 in den Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und gesättigt bei einer Frequenz von  $f = 5$  Hz.

Bei gesättigten Polyamidschrauben liegt der mittlere E-Modul bei allen Frequenzen unterhalb des mittleren E-Modul der raumfeuchten und trockenen Schrauben. Diese Abnahme des mittleren E-Modul liegt zwischen 62 % und 74 %, also in einer ähnlichen Größenordnung wie die Abnahme der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit. Bei gesättigten Schrauben ist der mittlere E-Modul im Rahmen der Messunsicherheit unabhängig von der Frequenz bzw. mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit (Abbildung 4.8. Schrauben der Größe M8 und M10 verhalten sich ähnlich (Abbildungen A.5, A.6 und B.2).

Die beobachteten Messergebnisse in Bezug auf den E-Modul entsprechen im Wesentlichen dem Verhalten von Polyamid, welches aus der Literatur bekannt ist. Die Abnahme des mittleren E-Modul mit zunehmender Materialfeuchte liegt in derselben Größenordnung wie bei Ergebnissen aus Zugversuchen einschlägiger Literatur und ist auf eine weichmachende Wirkung des im Polyamid eingelagerten Wassers zurück zu führen [23, 26]. Dies führt mit zunehmendem Wassergehalt der Polyamidschrauben zu einer Absenkung der Glasübergangstemperatur  $T_g$ , des E-Moduls sowie zu weiteren Eigenschaftsänderungen bis hin zur Hydrolyse [14].

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven und deren Änderung mit Zunahme der Materialfeuchte ist laut Literatur für Polyamid typisch und deshalb plausibel [1, 6, 25, 28].

#### 4.4.2 Bruchkraft

Abbildung 4.9 zeigt die mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$  in Abhängigkeit der Frequenz  $f$  von Polyamidschrauben der Größe M6 verschiedener Konditionierungszustände. Es ist erkennbar, dass die mittlere Bruchkraft bei gesättigten Polyamidschrauben im Rahmen der

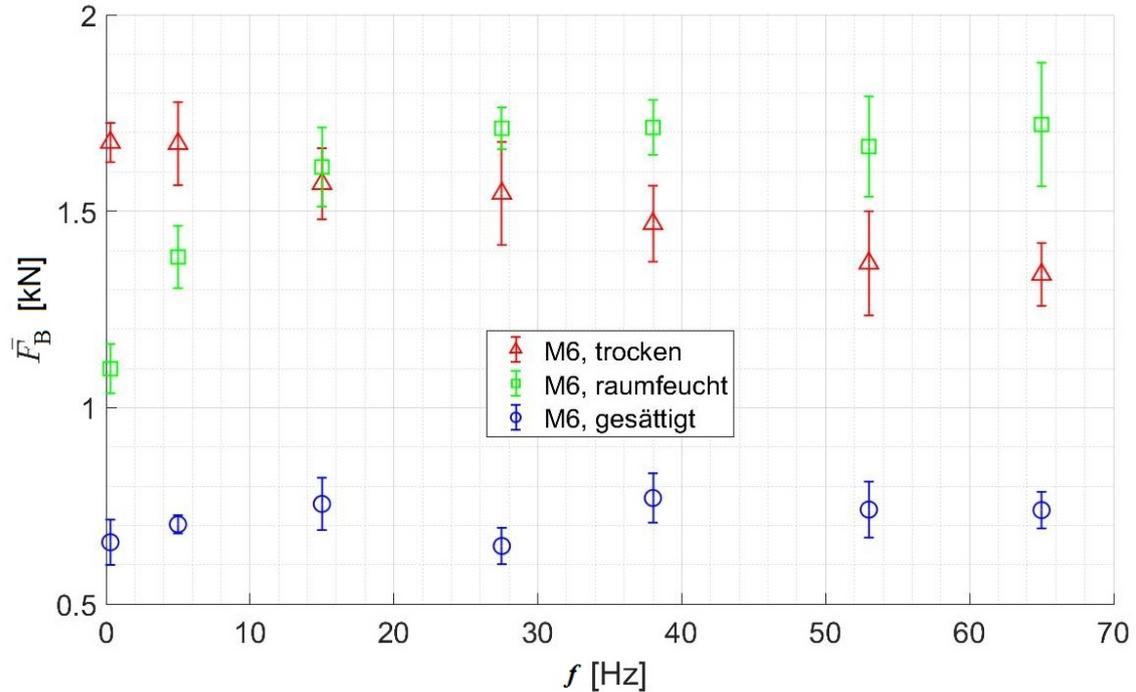


Abbildung 4.10: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$  von M6-Polyamidschrauben verschiedener Konditionierungszustände über der Frequenz  $f$ . Die zugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle 4.4 aufgelistet.

Messunsicherheit unabhängig von der Frequenz bzw. der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit ist.  $\bar{F}_B$  ist bei diesen Schrauben durchweg geringer als  $\bar{F}_B$  bei raumfeuchten und trockenen Polyamidschrauben. Die mittlere Bruchkraft nimmt bei raumfeuchten Schrauben von  $\bar{F}_B = 1,10$  kN bei  $f = 0,3$  Hz über  $\bar{F}_B = 1,383$  kN bei  $f = 5$  Hz auf  $\bar{F}_B = 1,612$  kN bei  $f = 15$  Hz zu und bleibt mit zunehmender Frequenz im Rahmen der Messunsicherheit auf diesem Niveau. Das entspricht unter Berücksichtigung der Standardabweichung einer Zunahme der mittleren Bruchlast von  $f = 0,3$  Hz auf  $f = 15$  Hz um 32 % (Tabelle 4.4). Bei trockenen Polyamidschrauben nimmt die mittlere Bruchkraft mit zunehmender Frequenz kontinuierlich leicht ab. Bei einer Frequenz von  $f = 0,3$  Hz ist  $\bar{F}_B = 1,675$  kN, bei  $f = 65$  Hz ist  $\bar{F}_B = 1,339$  kN. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung beträgt die Abnahme der mittleren Bruchkraft mit zunehmender Frequenz 12 %.

| $f$ [Hz]                      | 0,3   | 5     | 15    | 27,5  | 38    | 53    | 65    |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{F}_{B,trocken}$ [kN]    | 1,675 | 1,672 | 1,570 | 1,545 | 1,468 | 1,367 | 1,339 |
| $\delta$ [kN]                 | 0,050 | 0,106 | 0,090 | 0,131 | 0,097 | 0,133 | 0,080 |
| $\bar{F}_{B,raumfeucht}$ [kN] | 1,099 | 1,383 | 1,612 | 1,711 | 1,713 | 1,665 | 1,721 |
| $\delta$ [kN]                 | 0,063 | 0,079 | 0,101 | 0,053 | 0,070 | 0,128 | 0,157 |
| $\bar{F}_{B,gesättigt}$ [kN]  | 0,657 | 0,703 | 0,755 | 0,648 | 0,770 | 0,740 | 0,739 |
| $\delta$ [kN]                 | 0,058 | 0,023 | 0,067 | 0,046 | 0,063 | 0,071 | 0,047 |

Tabelle 4.4: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$  mit Standardabweichung  $\delta$  von gesättigten, raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben in Abhängigkeit der Frequenz  $f$ .

Bei kleinen Frequenzen ( $f = 0,3 \text{ Hz}$  und  $f = 5 \text{ Hz}$ ) ist die mittlere Bruchlast bei trockenen Schrauben größer als die mittlere Bruchkraft von raumfeuchten Schrauben. Bei den Frequenzen  $f = 15 \text{ Hz}$  und  $f = 27,5 \text{ Hz}$  ist im Rahmen der Messunsicherheit kein Unterschied in Bezug auf  $\bar{F}_B$  zwischen trockenen und raumfeuchten Schrauben festzustellen. Oberhalb einer Frequenz von  $f = 38 \text{ Hz}$  übersteigt die mittlere Bruchkraft von raumfeuchten Schrauben diejenige der trockenen Schrauben.

Ein Vergleich der mittleren Bruchkraft bei  $f = 0,3 \text{ Hz}$  zeigt, dass diese mit abnehmenden Feuchtegehalt von  $\bar{F}_B = 0,657 \text{ kN}$  um 49 % auf  $\bar{F}_B = 1,099 \text{ kN}$  und um 26 % auf  $\bar{F}_B = 1,675 \text{ kN}$  zunimmt. Bei  $f = 65 \text{ Hz}$  steigt  $\bar{F}_B$  zunächst von  $\bar{F}_B = 0,739 \text{ kN}$  um 105 % auf  $\bar{F}_B = 1,721 \text{ kN}$  an, um dann bei weiter sinkender Materialfeuchte um 36 % auf  $\bar{F}_B = 1,339 \text{ kN}$  zu fallen. Die größte Abnahme der mittleren Bruchkraft von raumfeuchten zu gesättigten Schrauben ist bei der Frequenz von  $f = 27,5 \text{ Hz}$  erkennbar.  $\bar{F}_B$  fällt hier von  $\bar{F}_B = 1,710 \text{ kN}$  um 149 % auf  $\bar{F}_B = 0,670 \text{ kN}$ .

Die beobachtete Abhängigkeit der Bruchkraft von Polyamidschrauben von deren Feuchtegehalt stimmt partiell nicht mit derjenigen aus der Literatur überein. Gemäß Literatur ist eine Zunahme der Bruchkraft mit sinkender Materialfeuchte bedingt durch wachsende Materialversprödung zu erwarten [6, 14, 15]. Letztgenanntes Verhalten wurde lediglich bei den geringen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten bzw. den Frequenzen  $f = 0,3 \text{ Hz}$  und  $f = 5 \text{ Hz}$  festgestellt. Bei Frequenzen oberhalb ca. 10 Hz trifft dies nicht mehr zu (Abbildung 4.10).

Die Begründung für diese Diskrepanz liegt in folgender Hypothese: Aufgrund der preisgünstigen und nicht standardisierten Herstellung durch Spritzgießen weisen rund 75 % der untersuchten Polyamidschrauben Fehlstellen auf. Diese entstehen unter anderem durch Wasserdampfeinschlüsse im Schraubenkörper während des Herstellungsprozesses auf Grund der Verwendung von ungetrocknetem Polyamidgranulat [3]. Abbildung 4.10 zeigt einige Beispiele. Die Fehlstellen sind Schwachpunkte im Schraubenkörper, von denen vermehrt bei hohen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten und geringer Materialfeuchte (Konditionierungszustand trocken) Makro- und Mikrorisse ausgehen, die zu einem frühzeitigen Versagen der Schrauben führen können [15]. Der Beweis für die Richtigkeit dieser Hypothese konnte aus Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht angetreten werden, so dass an dieser Stelle auf den Abschnitt 5.2 verwiesen wird.

### 4.4.3 Bruchdehnung

In Abbildung 4.12 ist die mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  von Polyamidschrauben der Größe M6 der Konditionierungszustände gesättigt, raumfeucht und trocken als Funktion der Frequenz  $f$  aufgetragen. Die zugehörigen Zahlenwerte finden sich in Tabelle 4.5.

Wie in der Abbildung zu sehen, steigt die mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  bei allen Frequenzen mit zunehmender Materialfeuchte an. Bei gesättigten Polyamidschrauben ist im Rahmen der Messunsicherheit eine Frequenzunabhängigkeit der mittleren Bruchdehnung feststellbar. Bei raumfeuchten und trockenen Schrauben fällt die mittlere Bruchdehnung mit steigender Frequenz. Bei  $f = 0,3 \text{ Hz}$  ist die Zunahme der mittleren Bruchdehnung mit der Materialfeuchte maximal. Mit wachsender Frequenz wird dieser Unterschied geringer. Bei  $f = 53 \text{ Hz}$  und  $f = 65 \text{ Hz}$  ist bei raumfeuchten und trockenen Schrauben kein Unterschied in  $\bar{\epsilon}_B$  erkennbar.

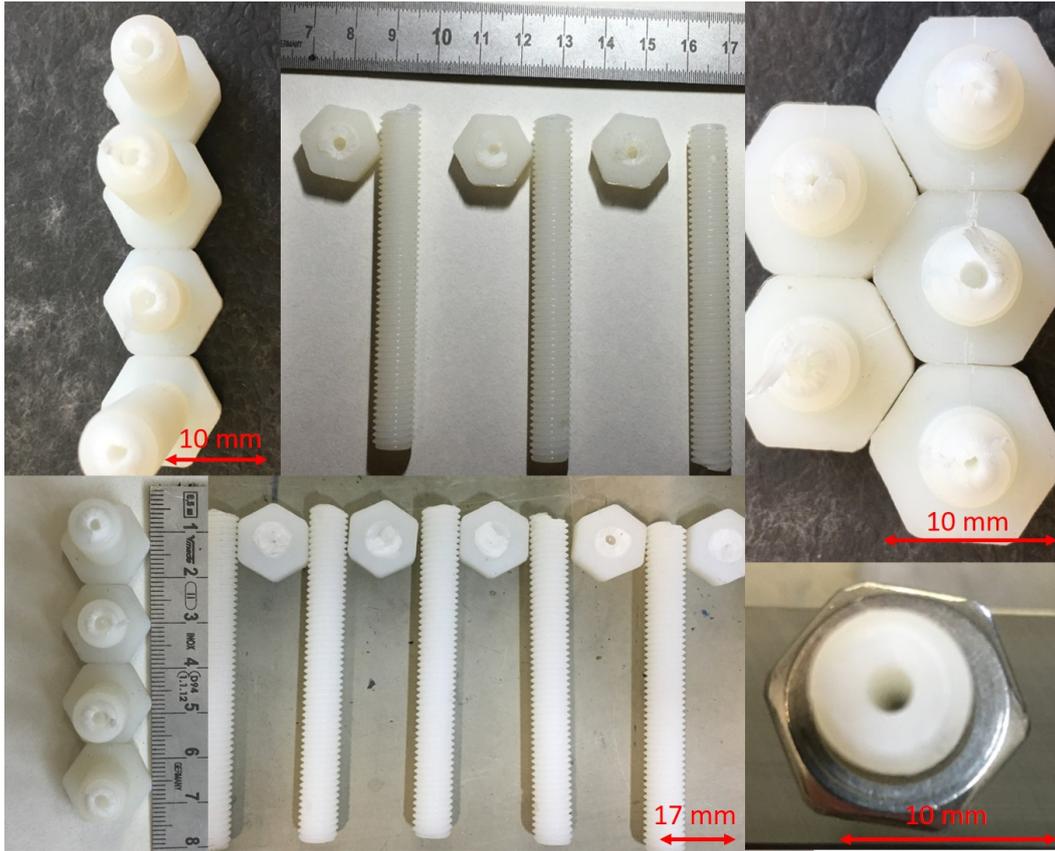


Abbildung 4.11: Zusammenstellung von Polyamidschrauben verschiedener Größen mit Fehlstellen im Schraubenkörper.

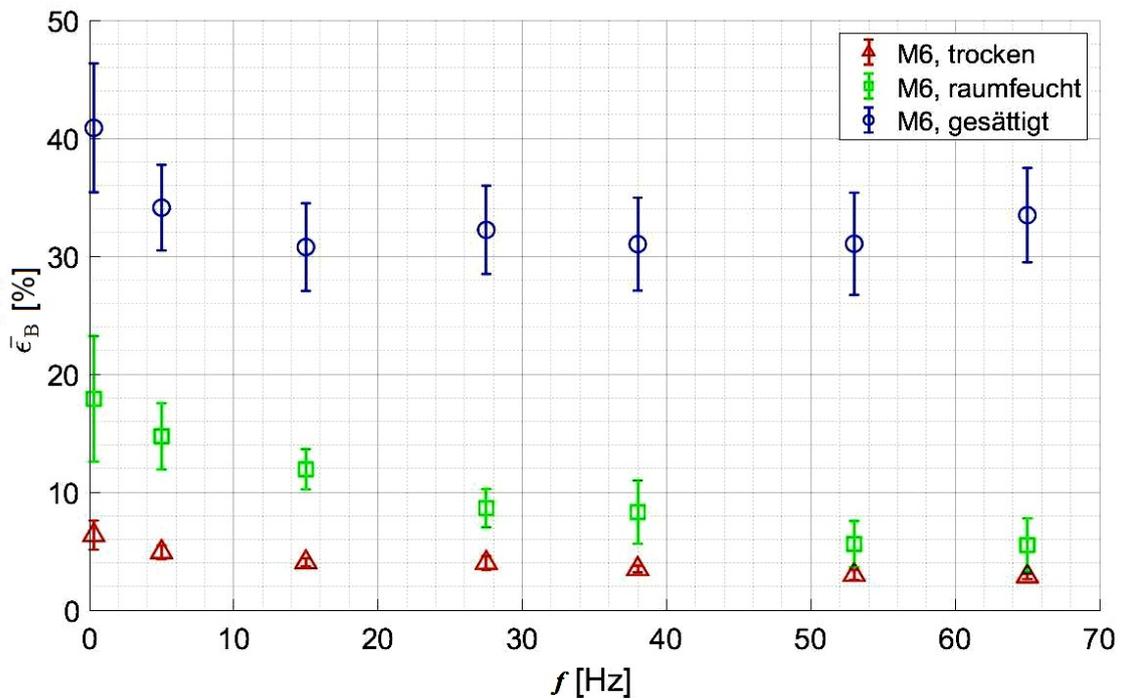


Abbildung 4.12: Mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  über der Frequenz  $f$  von gesättigten, raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben.

| $f$ [Hz]                            | 0,3   | 5     | 15    | 27,5  | 38    | 53    | 65    |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\bar{\epsilon}_{B,trocken}$ [%]    | 6,35  | 4,91  | 4,06  | 4,00  | 3,48  | 2,99  | 2,86  |
| $\delta$ [%]                        | 1,23  | 0,58  | 0,34  | 0,58  | 0,29  | 0,43  | 0,23  |
| $\bar{\epsilon}_{B,raumfeucht}$ [%] | 17,91 | 14,74 | 11,94 | 8,65  | 8,30  | 5,60  | 5,51  |
| $\delta$ [%]                        | 5,32  | 2,81  | 1,71  | 1,62  | 2,68  | 1,96  | 2,28  |
| $\bar{\epsilon}_{B,gesättigt}$ [%]  | 40,87 | 34,11 | 30,77 | 32,23 | 31,02 | 31,05 | 33,48 |
| $\delta$ [%]                        | 5,46  | 3,63  | 3,72  | 3,75  | 3,94  | 4,33  | 4,00  |

Tabelle 4.5: Mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  mit Standardabweichung  $\delta$  von gesättigten, raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben in Abhängigkeit der Frequenz  $f$ .

Bei  $f = 0,3\text{Hz}$  wächst die Bruchdehnung mit der Materialfeuchte von  $\bar{\epsilon}_B = 6,35\%$  (trocken) um 79% auf  $\bar{\epsilon}_B = 17,9\%$  (raumfeucht) und von diesem Wert um 68% auf  $\bar{\epsilon}_B = 40,87\%$  (gesättigt) an. Bei  $f = 65\text{Hz}$  ist die Zunahme der mittleren Bruchdehnung zwischen raumfeuchten und getrockneten Schrauben maximal.  $\bar{\epsilon}_B$  nimmt dabei von  $\bar{\epsilon}_B = 5,51\%$  um 394% auf  $\bar{\epsilon}_B = 33,48\%$  zu.

Die beschriebene Abnahme der mittleren Dehnung mit zunehmender Frequenz bei trockenen und raumfeuchten Schrauben entspricht den Erwartungen und ist auf eine Versprödung des Materials bei Zunahme der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit zurück zu führen [1, 15]. Diese Versprödung führt zu einer Zunahme der Bruchkraft bei Abnahme der Bruchdehnung [1, 15, 14, 26]. Die im Konditionierungszustand gesättigt eingelagerte große Wassermenge von 6,7 Vol-% (Tabelle 4.3) und der damit verbundenen stark weichmachenden Wirkung verändert die Bruchmechanik [14, 25]. Eine Untersuchung der Bruchstellen mit dem BGN-eigenen Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) ergab, dass sich die Bruchoberfläche von gesättigten und trockenen Polyamidschrauben unterscheidet (Abbildung 4.13). Bei trockenen Polyamidschrauben entspricht die

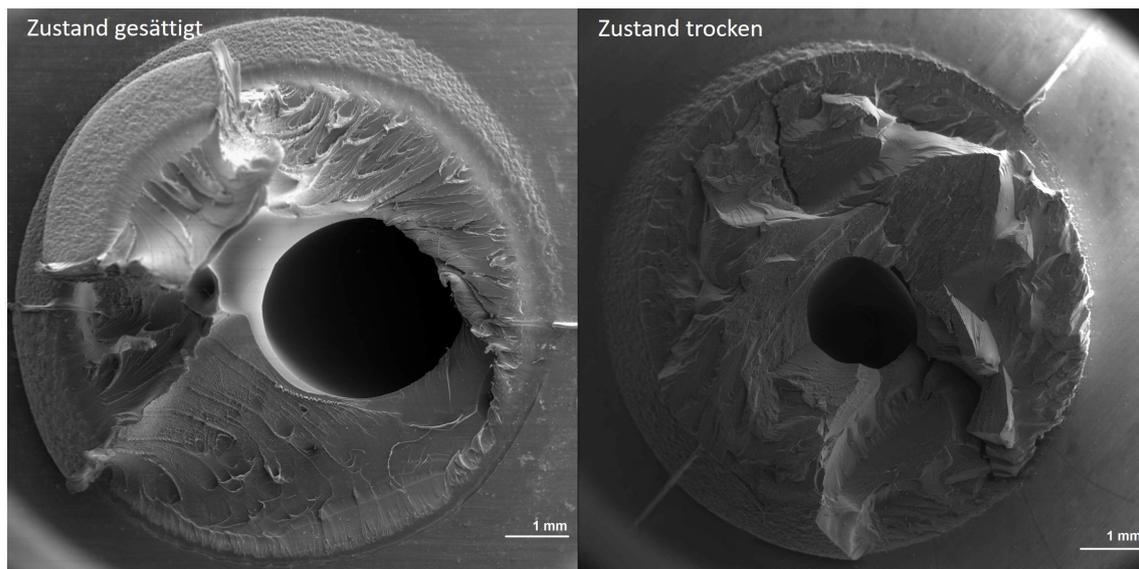


Abbildung 4.13: REM-Aufnahmen von Bruchstellen an M6-Polyamidschrauben. Links: Konditionierungszustand gesättigt. Rechts: Konditionierungszustand trocken.

Bruchoberfläche einem verformungsarmen Sprödbbruch [8]. Für einen Sprödbbruch typische Bruchkanten und Bruchflanken sind in Abbildung 4.13, rechts gut erkennbar. Die Bruchoberfläche der gesättigten Schraube im linken Teil der Abbildung ist einem dehnungsreichen, duktilen Bruchverhalten mit Fließen zuzuordnen.

Die Versuche mit den Polyamidschrauben der Größe M8 und M10 führten zu ähnlichen Ergebnissen. Diese sind in Abbildung A.10 und Tabelle B.1 im Anhang dargestellt.

#### 4.4.4 Belastungsdauer

Abbildung 4.14 zeigt die Abhängigkeit der mittleren Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  von der Frequenz  $f$  für M6-Polyamidschrauben mit den Materialfeuchten gesättigt, raumfeucht und trocken. Die zugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

Aus der Abbildung geht hervor, dass die mittlere Belastungsdauer bei allen Frequenzen mit der Materialfeuchte zunimmt. Diese Zunahme wächst insbesondere beim Übergang von raumfeuchten zu gesättigten Schrauben mit zunehmender Frequenz. Bei  $f = 0,3 \text{ Hz}$  wächst die mittlere Belastungsdauer mit steigender Materialfeuchte von  $\bar{t}_B = 1,30 \text{ s}$  (trocken) um 25 % auf  $\bar{t}_B = 2,36 \text{ s}$  (raumfeucht) und von diesem Wert um 22 % auf  $\bar{t}_B = 3,94 \text{ ms}$  (gesättigt). Bei  $f = 65 \text{ Hz}$  verläuft dieser Anstieg von  $\bar{t}_B = 1,79 \text{ ms}$  (trocken) um 13 % auf  $\bar{t}_B = 2,82 \text{ ms}$  (raumfeucht) und um 200 % auf  $\bar{t}_B = 10,81 \text{ ms}$  (gesättigt).

Die mittlere Belastungsdauer nimmt erwartungsgemäß mit zunehmender Frequenz bei allen Konditionierungszuständen ab.

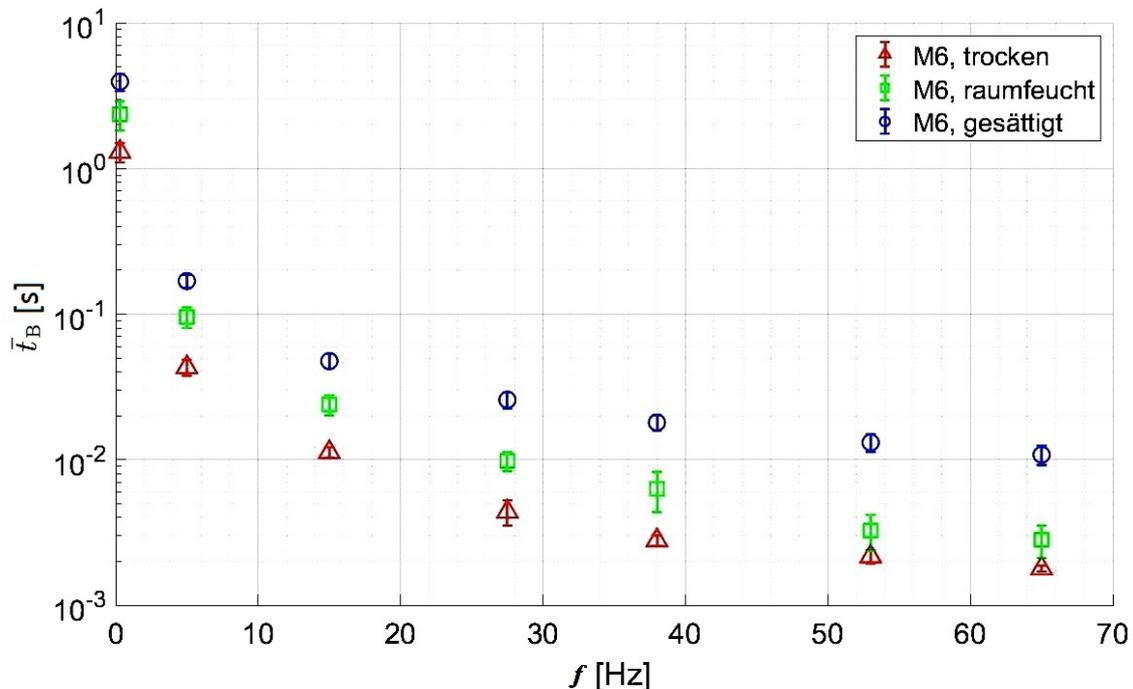


Abbildung 4.14: Mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  von gesättigten, raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben in Abhängigkeit der Frequenz  $f$ .

| $f$ [Hz]                     | 0,3     | 5       | 15      | 27,5    | 38      | 53      | 65      |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\bar{t}_{B,trocken}$ [s]    | 1,29828 | 0,04307 | 0,01125 | 0,00439 | 0,00279 | 0,00216 | 0,00179 |
| $\delta$ [s]                 | 0,19899 | 0,00538 | 0,00093 | 0,00087 | 0,00023 | 0,00023 | 0,00009 |
| $\bar{t}_{B,raumfeucht}$ [s] | 2,35640 | 0,09553 | 0,02393 | 0,00980 | 0,00630 | 0,00326 | 0,00282 |
| $\delta$ [s]                 | 0,53202 | 0,01547 | 0,00380 | 0,00147 | 0,00194 | 0,00091 | 0,00071 |
| $\bar{t}_{B,gesättigt}$ [s]  | 3,94220 | 0,16875 | 0,04763 | 0,02576 | 0,01800 | 0,01313 | 0,01081 |
| $\delta$ [s]                 | 0,53439 | 0,01651 | 0,00542 | 0,00324 | 0,00215 | 0,00180 | 0,00165 |
| $\Delta\bar{t}_B$ [s]        | 0,51939 | 0,04124 | 0,01448 | 0,01125 | 0,00761 | 0,00716 | 0,00564 |
| $\Delta\bar{t}_B$ [%]        | 22,0    | 43,2    | 60,5    | 114,8   | 120,8   | 219,6   | 200,2   |

Tabelle 4.6: Mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  mit Standardabweichung  $\delta$  in Abhängigkeit der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene M6-Polyamidschrauben.  $\Delta\bar{t}_B$  bezieht sich auf die Konditionierungszustände gesättigt und raumfeucht

Angesichts der in Abschnitt 4.4.2 gemessenen geringen Abhängigkeit zwischen Bruchkraft und Frequenz waren die ausgeführten Ergebnisse bezüglich  $\bar{t}_B$  zu erwarten. Zunehmende Frequenzen bzw. Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten müssen sinkende Belastungsdauern zur Folge haben wenn die Stabilität der Schrauben nicht überproportional mit der Frequenz wächst. Die mittlere Belastungsdauer korreliert mit der mittleren Bruchdehnung. Eine erhöhte Bruchdehnung auf Grund von höherer Materialfeuchte hat auch eine höhere Belastungsdauer zur Folge.

Ähnliche Messergebnisse in Bezug auf die Belastungsdauer ergaben sich für die Polyamidschrauben der Größen M8 und M10. Diese finden sich in Abbildung A.11 und Tabelle B.5 im Anhang.

# Kapitel 5

## Diskussion und Ausblick

### 5.1 Diskussion

Die in Abschnitt 4.4.3 abgeleiteten E-Module von Polyamidschrauben decken sich in etwa mit E-Modulen für Polyamid 6.6 aus der Literatur, wobei letztgenannte mit standardisierten Verfahren (Zugversuche) bestimmt wurden [15]. Die Abhängigkeit der E-Module von der Materialfeuchte entspricht ebenfalls den Werten aus der Literatur [4, 15]. Dies wird als Indiz dafür gewertet, dass bei der Durchführung der Versuche keine systematischen Fehler begangen wurden.

#### 5.1.1 Bruchkraft

Von entscheidender Bedeutung für den Einsatz von Polyamidschrauben als Explosionsklappenverschluss ist ihre Bruchkraft und deren Abhängigkeit von Parametern wie z. B. der Materialfeuchte. Aus diesem Grund wurden in den Abbildungen 5.1 bis 5.3 die Bruchkraft  $F_B$  über der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $dF/dt$  für die M6-, M8- und M10-Polyamidschrauben aller drei Konditionierungszustände aufgetragen. Die Betrachtung der drei Abbildungen lässt folgende Schlüsse zu:

1. Eine Erhöhung der Bruchkraft von Polyamid mit abnehmender Materialfeuchte, wie dies in der Literatur zu finden ist, kann nicht generell festgestellt werden.
2. Die Bruchkraft fällt generell mit zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit bei trockenen Polyamidschrauben. Dabei ist das gemessene Bruchkraftniveau bei den trockenen M10-Schrauben zu gering. Es müsste aufgrund von Querschnittsflächenvergleich rund 2,89 mal größer sein als das der M6-Schrauben und 1,58 mal größer als das der M8-Schrauben. Dieser Fehlbetrag ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf gehäufte Fehlstellen in den Schrauben bei diesen Versuchen zurückzuführen (Abschnitte 4.4.2 und 4.4.3).
3. Die Bruchkraft fällt generell oder stagniert mit zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit bei gesättigten Polyamidschrauben. Dabei beträgt das Bruchkraftniveau zwischen rund 34 % und 54 % des Bruchkraftniveaus von raumfeuchten Schrauben.

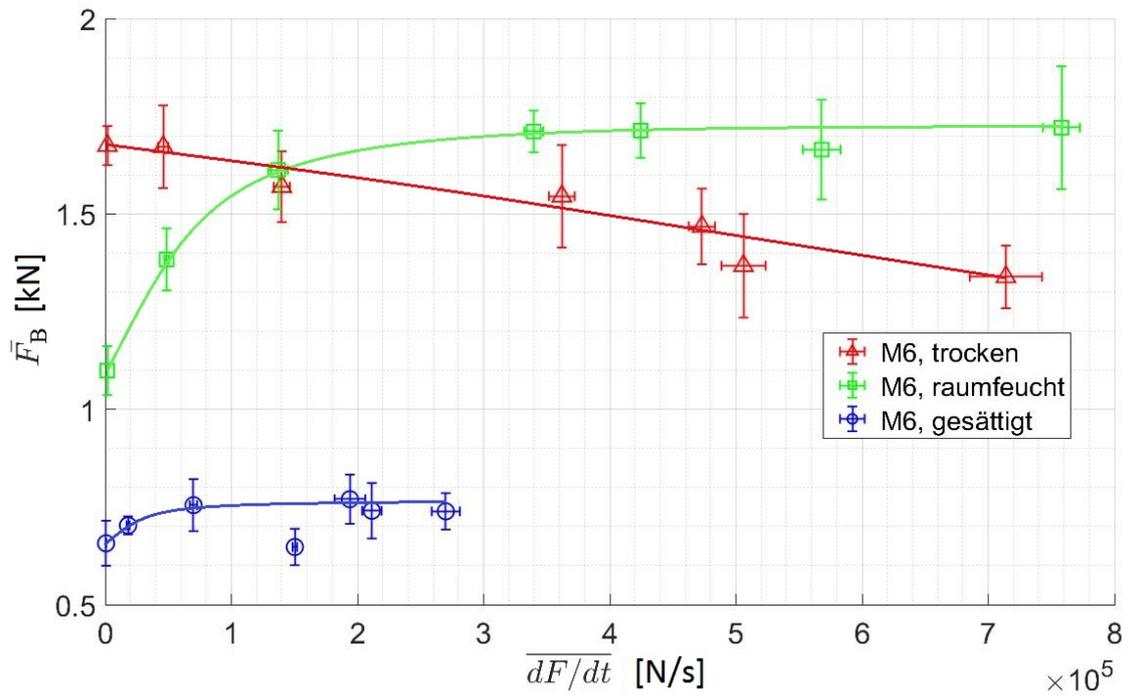


Abbildung 5.1: Bruchkraft über Belastungsanstiegsgeschwindigkeit für M6-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen gesättigt, raumfeucht und trocken.

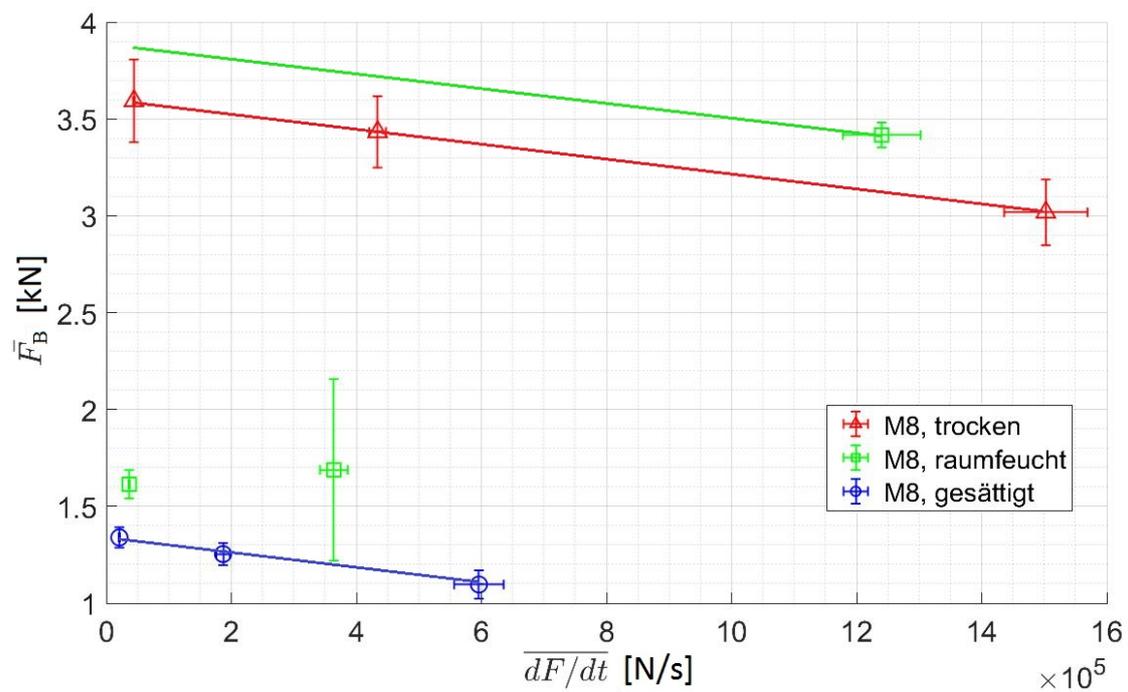


Abbildung 5.2: Bruchkraft über Belastungsanstiegsgeschwindigkeit für M8-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen gesättigt, raumfeucht und trocken.

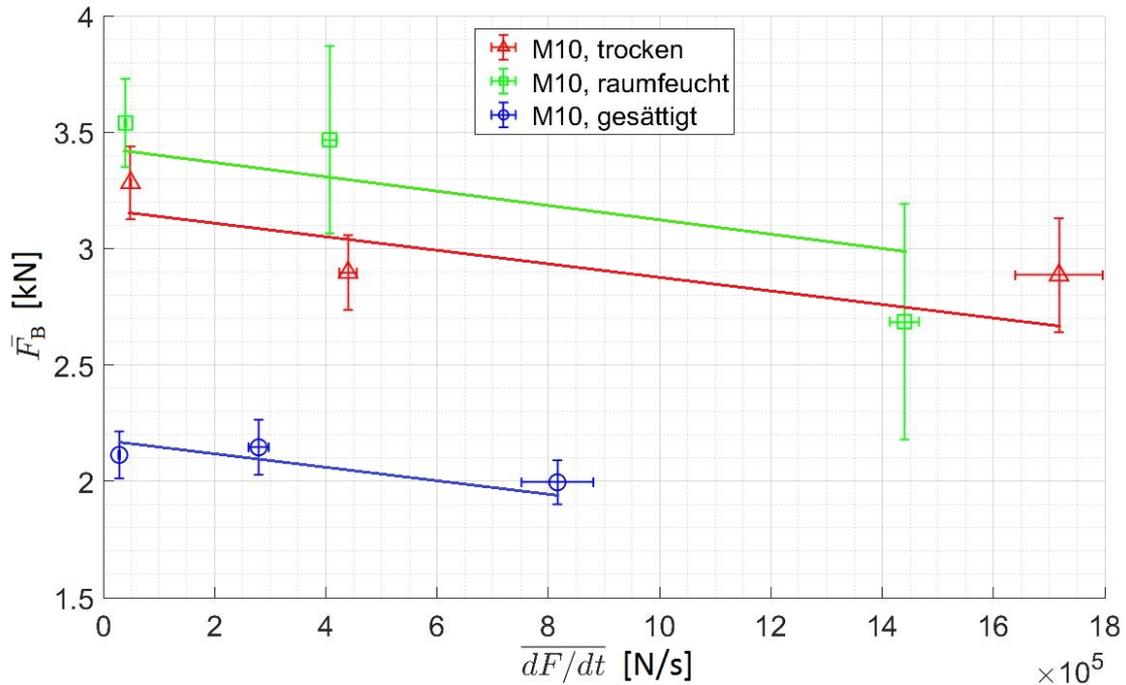


Abbildung 5.3: Bruchkraft über Belastungsanstiegsgeschwindigkeit für M10-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen gesättigt, raumfeucht und trocken.

- Für raumfeuchte Polyamidschrauben liegt ein uneinheitliches Bild vor, ob und wie die Bruchkraft von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit abhängig ist. Für die Schrauben der Größe M6 scheint es ein Wachstum der Bruchkraft mit der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit unterhalb von ca. 20 kN/s zu geben. Dies könnte mit dem Feuchtegehalt der Schrauben zusammenhängen, der eine Versprödung des Materials mit steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit erlaubt. Trockene Schrauben sind bereits sehr spröde, weshalb hier eine wachsende Belastungsanstiegsgeschwindigkeit keine weitere Versprödung hervorruft. Wäre dem so, sollten jedoch die raumfeuchten M8- und M10-Polyamidschrauben sowie die gesättigten Schrauben ein ähnliches Verhalten zeigen. Dem ist nicht so. Möglicherweise ist eine inhomogene Durchfeuchtung oder Trocknung der Grund für diese Diskrepanz, jedoch sprechen die Konditionierungskurven in den Abbildungen A.1 und A.2 gegen diese Hypothese. Das legt den Schluss nahe, dass insbesondere bei den raumfeuchten Schrauben die Fehlstellen die gemessenen Bruchkräfte verfälscht haben. Letztgenannte wären in diesem Fall bei den kleinen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten zu gering ausgefallen. Dafür spricht, dass ein Anstieg um rund 54 % aufgrund höherer Belastungsanstiegsgeschwindigkeit als sehr groß erscheint und die Bruchkraft bei den kleinen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten lediglich rund 68 % des Sollwertes laut Materialdatenblatt ( $F_B \approx 1,6$  kN) aufweist. Auch sind die gemessenen Bruchkräfte bei den M8- und M10-Schrauben zu gering. Insbesondere die beiden linken grünen Punkte in Abbildung 5.2 liegen deutlich unter dem Sollwert von rund 3 kN, was als Hinweis darauf gewertet wird, dass diese Messwerte ganz besonders durch die Fehlstellen in den Schrauben herabgesetzt sind. Aus letztgenanntem Grund wurden diese beiden Punkte beim Zeichnen der grünen Geraden nicht berücksichtigt. Die Indizien sprechen folglich dafür, dass

insbesondere die Richtigkeit der Messpunkte der raumfeuchten Schrauben angezweifelt werden muss.

Folglich ist für detailliertere Schlussfolgerungen die Messdatensicherheit aufgrund der Fehlstellen in den Schrauben zu gering. Im anschließenden Abschnitt 5.2 werden diesbezüglich Lösungsvorschläge aufgezeigt. Dennoch lassen sich aus den erzielten Messergebnissen einige wichtige Konsequenzen für den Einsatz von Polyamidschrauben als Verschluss technik für Explosionsklappen ableiten, wie in Abschnitt ?? geschildert wird.

### 5.1.2 Belastungsdauer

Wie in Abschnitt 4.4.3 und 4.4.4 beschrieben, steigt die mittlere Bruchdehnung und damit die mittlere Belastungsdauer mit zunehmender Materialfeuchte stark an. Bei hohen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten ist diese Veränderung besonders stark ausgeprägt, wie man Abbildung 5.4 leicht entnehmen kann.

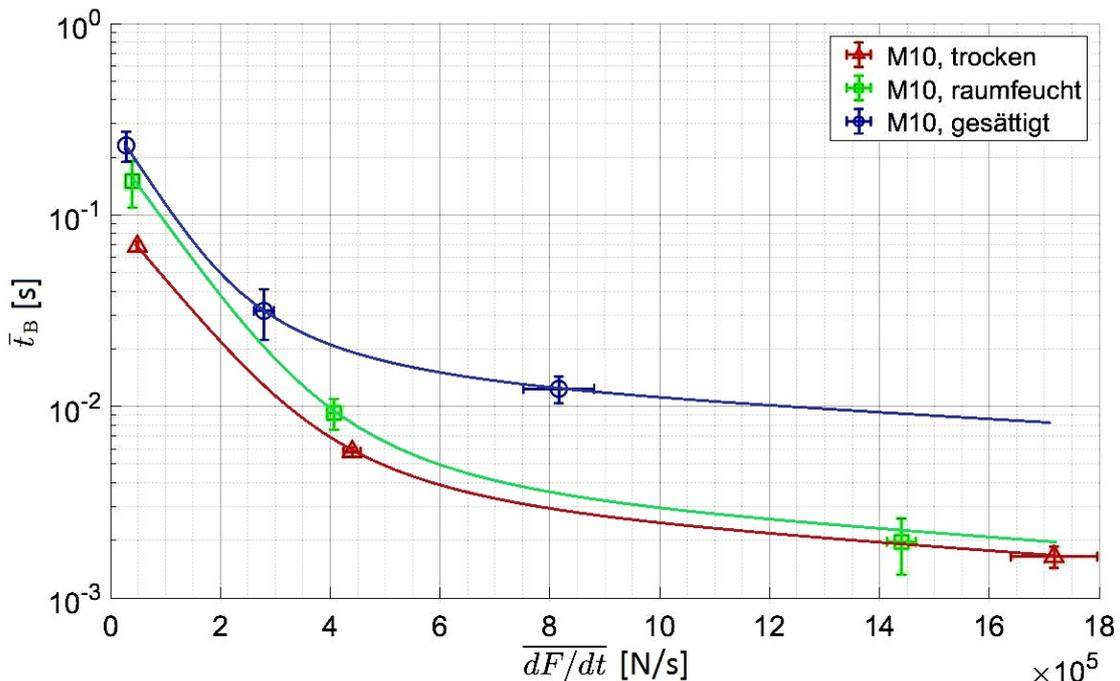


Abbildung 5.4: Mittlere Bruchdauer für M10-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen gesättigt, raumfeucht und trocken mit möglichen Regressionskurven.

Zwar sinkt bei zunehmender Materialfeuchte die Bruchkraft  $F_B$ , dennoch ist nicht auszuschließen, dass eine erhöhte Belastungsdauer ein Ansteigen des dynamischen Ansprechdruckes einer Explosionsklappe nach sich zieht und damit einen größeren reduzierten Explosionsdruck zur Folge hat. Besonders bei schnell ablaufenden Explosionsvorgängen hängt die Höhe des reduzierten Explosionsdruckes sehr sensibel von der Höhe des dynamischen Ansprechdruckes ab. Aber gerade schnelle Explosionsvorgänge, die vorwiegend in kleinen Behältern auftreten, bewirken eine hohe Belastungsanstiegsgeschwindigkeit. Aufgrund dessen könnte bei schnell ablaufenden Explosionen der Fall

eintreten, dass bei gesättigten Polyamidverschlusschrauben die ansprechdrucksteigernde Bruchdauererhöhung die ansprechdrucksenkende niedrigere Bruchkraft dominiert und es so insgesamt zu einer Erhöhung des reduzierten Explosionsdruckes kommt. Eine mögliche Überschreitung der Behälterfestigkeit und ein Bersten des Behälters wären die Folge. Weiteres dazu findet sich in Abschnitt 5.2.

### 5.1.3 Bewertung der Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit war, die Abhängigkeit des Bruchverhaltens von Polyamidschrauben von den folgenden Einflüssen zu untersuchen:

1. Belastungsanstiegsgeschwindigkeit
2. Materialfeuchte
3. andere Faktoren

Es konnte gezeigt werden, dass die Bruchkraft für trockene und gesättigte Polyamidschrauben mit steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit sinkt oder stagniert. Für raumfeuchte Polyamidschrauben konnte dieser Beweis nicht überzeugend erbracht werden. Fehlstellen in den Schrauben sind der Grund dafür.

Die Bruchdehnung fällt mit steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit, wobei dieser Effekt für trockene Polyamidschrauben gering ausgeprägt ist.

Die Belastungsdauer fällt ebenfalls mit der steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit, wobei hier die gesättigten Polyamidschrauben weniger betroffen sind.

Die Bruchkraft fällt mit der Materialfeuchte, wobei der experimentelle Nachweis für diese Aussage generell nur für hohe Materialfeuchten erbracht werden konnte. So ist die Bruchkraft bei gesättigte Polyamidschrauben um 34 % bis 54 % geringer als bei raumfeuchten Schrauben. Der Vergleich zwischen raumfeuchten und trockenen ergibt keine eindeutige Abhängigkeit der Bruchkraft von der Materialfeuchte. Vermutlich überdeckt hier die Bruchkrafterniedrigung durch Fehlstellen die erwartete Bruchkraftenerhöhung durch Trocknung.

Die Bruchdehnung steigt erheblich mit der Materialfeuchte.

Gleiches gilt für die Belastungsdauer, wobei dieses Wachstum insbesondere bei hohen Materialfeuchten auftritt.

Als sehr wichtigen weiteren Einflussfaktor konnten zahlreiche, zum Teil großflächige Fehlstellen in den Polyamidschrauben identifiziert werden. Diese Fehlstellen dominieren zuweilen die anderen Einflussgrößen, was die Interpretation der Messergebnisse erheblich erschwert bzw. die seriöse Ableitung genereller Zusammenhänge unmöglich macht. Aus diesem Grund konnte das Ziel dieser Arbeit nicht vollumfänglich erreicht werden.

Bei der Bewertung von Polyamidschrauben als Klappenverschlussmechanismus sind noch weitere Faktoren relevant, die aus Zeitgründen oder wegen des hohen experimentellen Aufwandes im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden konnten. Diese sind unter anderem die Materialtemperatur, UV-Strahlung sowie Scherkräfte auf die Schrauben durch mögliche Klappenwölbungen im Entlastungsfall. Da mit Polyamidschrauben

verschlossene Explosionsklappen häufig im Freien verbaut sind, variiert deren Temperatur im täglichen und jahreszeitlichen Verlauf, wobei Temperaturunterschiede von 40 °C und mehr durchaus realistisch sind. Im Freien sind Polyamidschrauben auch UV-Strahlung ausgesetzt, die das Material im Laufe der Zeit verspröden lassen.

#### **5.1.4 Konsequenzen für den Einsatz von Polyamidschrauben als Explosionsklappenverschluss**

Basierend auf den zuvor präsentierten Ergebnissen ist die Verwendung von Polyamidschrauben als sicherheitsrelevanter Klappenverschlussmechanismus zum Erreichen eines definierten dynamischen Ansprechdruckes äußerst kritisch zu bewerten! Der Grund dafür ist im Wesentlichen in der EU-Baumusterprüfung zu sehen, die Explosionsklappen vor ihrer Zulassung durchlaufen müssen. Werden bei dieser Prüfung Polyamidschrauben verwendet, die erheblich durch Fehlstellen oder hohe Materialfeuchte geschwächt sind, kann

1. die Anzahl der Verschlusschrauben zu hoch ausfallen.
2. die Entlastungsfähigkeit zu hoch gemessen werden.
3. ein falscher Ansprechdruck vorgetäuscht werden.

Alle genannten Vorkommnisse führen zu einem erhöhten dynamischen Ansprechdruck und reduziertem Explosionsdruck wenn im Auslegungsfall Polyamidschrauben ohne Fehlstellen verbaut werden. Polyamidschrauben als Klappenverschlussmechanismus sollten folglich nur zugelassen werden, wenn deren Fehlstellenfreiheit gewährleistet werden kann. Dies setzt voraus, dass ein reproduzierbares Bruchverhalten bei solchen Schrauben nachweisbar ist (Abschnitt 5.2).

Die Ergebnisse dieser Arbeit führen zu einer weiteren Konsequenz für EU-Baumusterprüfungen von Explosionsklappen mit Verschlusschrauben aus Polyamid: Es dürfen bei der Prüfung keine Schrauben mit hoher Materialfeuchte verwendet werden. Außerdem sollte die Prüfung bei moderaten Temperaturen unterhalb von 20 °C durchgeführt werden.

Da bei einer EU-Baumusterprüfung zwingend mehrere Versuche mit unterschiedlichen Druckanstiegsgeschwindigkeiten vorgeschrieben sind und im Zertifikat der Explosionsklappe die im Hinblick auf die Entlastungseigenschaften ungünstigsten Versuchsergebnisse verbrieft werden, ist die im Rahmen dieser Arbeit ermittelte schwache Abhängigkeit der Bruchkraft von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Prüfvorschrift bereits ausreichend berücksichtigt. Sicherheitshalber sollte diese Hypothese jedoch noch einmal mit fehlstellenfreien Polyamidschrauben überprüft werden.

Kann sichergestellt werden, dass EU-Baumusterprüfungen mit stabilitätsoptimierten Polyamidschrauben durchgeführt werden, sind Polyamidschrauben als Explosionsklappenverschluss legitim. Zur Feststellung der Bedingungen für die maximale Stabilität von Polyamidschrauben sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

## 5.2 Ausblick

Um die in Abschnitt 1.2 definierten Fragestellungen vollständig beantworten zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Dabei steht an erster Stelle die Klärung der Frage, wie sich die Fehlstellen in den verwendeten Polyamidschrauben auf die Versuchsergebnisse ausgewirkt haben. Zu diesem Zweck sollte das in Abschnitt 4.2.2 definierte Versuchsprogramm mit fehlerstellenfreien Polyamidschrauben zunächst partiell wiederholt werden. Werden dabei deutliche Unterschiede zu den im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnissen festgestellt, muss das gesamte Versuchsprogramm wiederholt werden. Idealerweise sollten dabei auch bei den M8- und M10-Polyamidschrauben alle sieben Frequenzen berücksichtigt werden. Fehlerstellenfreie Polyamidschrauben könnten mit Hilfe eines alternativen Fertigungsverfahrens, wie z. B. Drehen hergestellt werden.

Sollten die Ergebnisse der Versuchsreihen mit fehlerstellenfreien Polyamidschrauben a) gut reproduzierbar sein und b) im Wesentlichen mit Messergebnissen aus der Literatur übereinstimmen, könnten letztgenannte auf die Polyamidschrauben übertragen und zur Extrapolation genutzt werden. Weiterhin wäre es dann möglich, die Abhängigkeit des Bruchverhaltens von weiteren Einflussgrößen wie z. B. der Materialtemperatur ebenfalls auf die Polyamidschrauben anzuwenden. Wäre dem so, könnten auf theoretischem Weg die bruchkraftmaximierenden Bedingungen abgeleitet werden, um diese dann bei EU-Baumusterprüfungen anzuwenden.

Für den Fall, dass keine Übereinstimmung mit Messwerten aus der Literatur gefunden wird, müssen weitere eigene Versuchsreihen durchgeführt werden. Dazu wäre entweder eine Erweiterung der vorhandenen Versuchsapparatur oder die Entwicklung einer alternativen Apparatur erforderlich, so dass auch eine Temperaturkonditionierung der Polyamidschrauben möglich ist.

Ferner könnten Polyamidschrauben unter UV-Lampen einem künstlichen Alterungsprozess unterzogen werden, um so den Einfluss von UV-Intensität und Bestrahlungsdauer auf die Bruchkraft zu ermitteln.

Um die Frage beantworten zu können, inwieweit sich die stark vergrößerte Belastungsdauer bei gesättigten Schrauben auf den Öffnungsvorgang von Explosionsklappen auswirkt, sind Explosionsversuche an realen Versuchsbehältern mit Explosionsklappen erforderlich. Wie in Abschnitt 5.1.2 ausgeführt wurde, zeigen gesättigte Polyamidschrauben gegenüber der raumfeuchten Variante zwar relativ kleine Bruchkräfte jedoch stark verlängerte Belastungsdauern. Ob eine der beiden Größen beim Klappenöffnungsvorgang dominiert und in welcher Art und Weise sich dies auswirkt, kann nur durch Explosionsversuche bestimmt werden. Empfehlenswert sind diesbezüglich Versuche am 1 m<sup>3</sup>-Behälter mit Gas als Brennstoff, weil

1. der experimentelle Aufwand vergleichsweise gering ist.
2. die Reproduzierbarkeit gegenüber Staubexplosionen besser ist.
3. sehr hohe Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten eingestellt werden können.

Durch den Einsatz von Explosionsklappen mit verschiedenen starken Plattenstärken kann dabei auch der Einfluss der Plattenwölbung auf die Bruchkraft der Polyamidschrauben untersucht werden.

Abschließend wird vorgeschlagen, Schrauben aus einem alternativen Werkstoff ausfindig zu machen oder Schrauben aus einem solchen Werkstoff fertigen zu lassen. Solche Schrauben müssten folgende Eigenschaften besitzen:

- Das Bruchverhalten ist nicht oder nur wenig abhängig von Feuchtigkeit und Temperatur im Bereich von  $-40^{\circ}$  bis  $80^{\circ}$ .
- Die Bruchkraft der Schrauben ist ähnlich hoch wie die von Polyamidschrauben.
- Das Schraubenmaterial ist UV-beständig und langzeitstabil.
- Der Schraubenpreis überschreitet den Preis für Stahlschrauben nicht oder nur geringfügig.

Bei der Suche eines alternativen Werkstoffes für Verschlusschrauben sollten auch Faserverbundwerkstoffe berücksichtigt werden, da diese aufgrund des Verbundes unvorteilhafte Eigenschaften von reinen Werkstoffen oftmals positiv beeinflussen können. Denkbar wäre auch, handelsübliche Schrauben aus Metall gezielt zu schwächen, z. B. durch eine zentrale Bohrung.

Sind die Abhängigkeiten zwischen Bruchkraft und deren Einflussfaktoren für Explosionsklappenverschlusschrauben mit hinreichender Sicherheit bekannt, kann damit Formel (1.1) erweitert und für die Ansprechdruckauslegung optimiert werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] BARGEL, H., SCHULZE, G.: *Werkstoffkunde*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- [2] BARTKNECHT, W.: *Explosionsschutz*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [3] BEAUMONT, J.: *Auslegung von Ausguss und Angusskanal: Spritzgießwerkzeuge erfolgreich einsetzen*, Carl Hanser Verlag, München, 2020
- [4] BONTEN, C.: *Kunststofftechnik- Einführung und Grundlagen*, Carl Hanser Verlag, München, 2014
- [5] CHUPIN, P.: *Experimentelle Verifizierung von Baumusterprüfungen im Modellmaßstab*, Masterarbeit, Hochschule Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e. V., Mannheim, 2009.
- [6] DOMININGHAUS, H., ELSNER, P., EYERER, P., HIRTH, T.: *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [7] ECKHOFF, R. K.: *Dust Explosions in the Process Industrie*, Butterworth Heineemann, Oxford, 1997.
- [8] EHRENSTEIN, G. W., ENGEL, K., KLINGELE, H., SCHAPER, H.: *Scanning Electron Microscopy of Plastic Failure/ REM von Kunststoffschäden*, Carl Hanser Verlag, München 2011.
- [9] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN 14797: Einrichtungen zur Explosionsdruckentlastung*, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [10] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN 14491: Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [11] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN 14034: Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen*, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- [12] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe- Bestimmung der Zugeigenschaften*, Beuth Verlag, Berlin, 2019.
- [13] 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.

- [14] HEYN, J., BONTEN, C.: *Feuchtigkeitseinfluss auf die Fließbruchmechanischen Eigenschaften von PA6-Kautschuk-Blends*, Zeitschrift Kunststofftechnik 10 (2014), Carl-Hanser-Verlag, München, 2014.
- [15] GRELLMANN, W., SEIDLER, S.: *Kunststoffprüfung*, Carl-Hanser-Verlag, München, 2015.
- [16] KÖNIG, T.: *Untersuchung der Bruchlast von Polymaidschrauben in Abhängigkeit der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit*, Bachelorarbeit, FSA Mannheim, Mannheim, 2019.
- [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.: *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.
- [19] LORENZ, D., SCHIEBLER H.: *ExProtect - Ein Programm zur Beantwortung wichtiger Fragen zum angewandten Explosionsschutz*, VDI-Berichte 1601, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [20] LORENZ, D., SCHIEBLER, H.: *ExProtect - Ein Programm zur Beantwortung sicherheitstechnisch relevanter Fragen bei Gas- und Staubexplosionen*, Technische Überwachung, 3, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [21] 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.
- [22] LORENZ, D.: *Modellgestützte Optimierung des Schutzsystems Explosionsklappe zur kontrollierten Druckentlastung verfahrenstechnischer Apparate bei Staubexplosionen*, Dissertation, Wuppertal, 2020.
- [23] LUTTERBECK, K.: *Das Verhalten von Kunststoffen unter dem Einfluss wechselnder Umgebungsfeuchte und -temperatur*, Forschungsbericht, RAM-Verlag, 2016.
- [24] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION: *NFPA 68: Guide for Venting of Deflagrations*, Quincy, 2002.
- [25] 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

- [26] SCHWARZ, O., RICHTER, F., EBLING, F.: *Kunststoffkunde* , Vogel Buchverlag, Würzburg, 2016
- [27] STEEN, H.: *Handbuch des Explosionsschutzes*, Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [28] SRAUCH, J.: *Thermische Effekte in der Materialmodellierung von Polyamid 6 bei kurzzeitdynamischen Belastungsvorgängen*, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2019.
- [29] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 3673 Blatt 1: Druckentlastung von Staubexplosionen*, Beuth Verlag, Berlin, 2002.

# Abbildungsverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Polyamidschrauben (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 Polyamidschrauben (rote Kreise) verschlossen ist [5]. . . . .  | 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 $E_f = 70 \%$ . . . . . | 8  |
| 2.2 | Links: Abhängigkeit der Bruchspannung $\sigma_B$ von der Temperatur und der Konditionierungsbedingung von Polyamid 6. Rechts: Materialfeuchte von Polyamid 6 in Abhängigkeit der Konditionierungsbedingung (relative Luftfeuchte) [23]. . . . .   | 9  |
| 2.3 | Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PA 6 bei verschiedenen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten (Dehnraten) [28]. . . . .  | 10 |
| 3.1 | Links: Montierte Versuchsapparatur ohne Messtechnik. Rechts oben: PC mit Steuerungssoftware sowie Start Knopf. Rechts unten: Nahaufnahme Schaltschrank. . . . .   | 12 |
| 3.2 | Schematischer Schaltplan der Versuchsapparatur. . . . .   | 14 |
| 3.3 | Fotografien der Klemmleiste (links oben), einer Doppelstockklemme (rechts oben), PIN-Anschlüsse (links unten) und dreier Brückenstecker (rechts unten). . . . .   | 14 |
| 3.4 | Schematisches Anschlussbild an der Klemmleiste. Aneinander grenzende hellgraue Kästchen sowie die dunkelgrauen Kästchen sind mit Hilfe von Steckbrücken elektrisch leitend miteinander verbunden. . . . .   | 15 |
| 3.5 | Veranschaulichung der variablenbasierten Anlagensteuerung mit „Siemens Starter“. . . . .  | 15 |
| 3.6 | Screenshot der Steuerungssoftware „Siemens Starter“ mit PIN Belegung, Aktion und zugehörigem Parameter . . . . .  | 16 |
| 3.7 | Screenshot der Steuerungssoftware „Siemens Starter“. Darstellung und Ansteuerung von Festfrequenzen. . . . .  | 17 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.1  | Versuchsapparatur mit Messtechnik. Links oben: Nahaufnahme der Prüfvorrichtung mit eingespannter Polyamidschraube. . . . .  | 20 |
| 4.2  | Blockbild der Messkette. . . . .  | 20 |
| 4.3  | Exemplarischer Belastungsverlauf einer M6-Polyamidschraube mit Bruchkraft $F_B$ , Belastungsdauer $t_B$ und den zur Bestimmung des Bruchzeitpunkts sowie der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit verwendeten Geraden G1, G2 und G3. . . . . | 24 |
| 4.4  | Exemplarische Aufnahme der Hochgeschwindigkeitskamera mit Trackingmarkierungen bei Messbeginn (A) und beim Bruch der Schraube (B). . . . .  | 25 |
| 4.5  | Exemplarischer Dehnungsverlauf mit Bruchdehnung $\epsilon_B$ und Bruchzeitpunkt $t_{\text{Bruch}}$ . . . . .  | 26 |
| 4.6  | Exemplarisches mittleres Spannungs-Dehnungs-Diagramm von gesättigten Polyamidschrauben der Größe M6 ( $f = 5$ Hz). . . . .  | 26 |
| 4.7  | Logarithmische Darstellung der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ in Abhängigkeit der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M6. . . . .                           | 27 |
| 4.8  | Darstellung des mittleren E-Moduls in Abhängigkeit der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M6. . . . .  | 28 |
| 4.9  | Mittlere Spannung über mittlerer Dehnung für Polyamidschrauben der Größe M6 in den Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und gesättigt bei einer Frequenz von $f = 5$ Hz. . . . .  | 29 |
| 4.10 | Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ von M6-Polyamidschrauben verschiedener Konditionierungszustände über der Frequenz $f$ . Die zugehörigen Zahlenwerte sind in Tabelle 4.4 aufgelistet. . . . .  | 30 |
| 4.11 | Zusammenstellung von Polyamidschrauben verschiedener Größen mit Fehlstellen im Schraubenkörper. . . . .   | 32 |
| 4.12 | Mittlere Bruchdehnung $\bar{\epsilon}_B$ über der Frequenz $f$ von gesättigten, raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben. . . . .  | 32 |
| 4.13 | REM-Aufnahmen von Bruchstellen an M6-Polyamidschrauben. Links: Konditionierungszustand gesättigt. Rechts: Konditionierungszustand trocken. . . . .  | 33 |
| 4.14 | Mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ von gesättigten, raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben in Abhängigkeit der Frequenz $f$ . . . . .  | 34 |
| 5.1  | Bruchkraft über Belastungsanstiegsgeschwindigkeit für M6-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen gesättigt, raumfeucht und trocken. . . . .   | 37 |
| 5.2  | Bruchkraft über Belastungsanstiegsgeschwindigkeit für M8-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen gesättigt, raumfeucht und trocken. . . . .   | 37 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.3  | Bruchkraft über Belastungsanstiegsgeschwindigkeit für M10-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen gesättigt, raumfeucht und trocken. . . . .  | 38 |
| 5.4  | Mittlere Bruchdauer für M10-Polyamidschrauben mit den Konditionierungszuständen gesättigt, raumfeucht und trocken mit möglichen Regressionskurven. . . . .  | 39 |
| A.1  | Mittlerer Trocknungsverlauf von Polyamidschrauben PA 6.6 der Größen M6, M8 und M10 durch Trockenschranklagerung bei 60 °C. . . . .  | 55 |
| A.2  | Mittlerer Befeuchtungsverlauf von Polyamidschrauben PA 6.6 der Größen M6, M8 und M10 durch Wasserbadlagerung bei Raumtemperatur. . . . .  | 55 |
| A.3  | Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Polyamidschrauben der Größe M6 in den Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und gesättigt bei einer Frequenz von $f = 27,5$ Hz. . . . .                    | 56 |
| A.4  | Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Polyamidschrauben der Größe M6 in den Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und gesättigt bei einer Frequenz von $f = 53$ Hz. . . . .                      | 56 |
| A.5  | Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ über der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8. . . . .                              | 57 |
| A.6  | Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ über der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10. . . . .                             | 57 |
| A.7  | Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ über der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8. . . . .  | 58 |
| A.8  | Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ über der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10. . . . .   | 58 |
| A.9  | Mittlere Bruchdehnung $\bar{\epsilon}_B$ über der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8. . . . .   | 59 |
| A.10 | Mittlere Bruchdehnung $\bar{\epsilon}_B$ über der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10. . . . .  | 59 |
| A.11 | Mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8. . . . .   | 60 |
| A.12 | Mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10. . . . .  | 60 |
| A.13 | Mittlere Bruchdehnung $\bar{\epsilon}_B$ über der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M6. . . . . | 61 |
| A.14 | Mittlere Bruchdehnung $\bar{\epsilon}_B$ über der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8. . . . . | 61 |

|   |    |
|---|----|
| A.15 Mittlere Bruchdehnung $\bar{\epsilon}_B$ über der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10. . . . .                                 | 62 |
| A.16 Mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M6. . . . .                                      | 62 |
| A.17 Mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8. . . . .                                      | 63 |
| A.18 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 0,3$ Hz. . . . .  | 63 |
| A.19 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 5$ Hz. . . . .    | 64 |
| A.20 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 15$ Hz. . . . .   | 64 |
| A.21 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 27,5$ Hz. . . . . | 65 |
| A.22 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 38$ Hz. . . . .   | 65 |
| A.23 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 53$ Hz. . . . .   | 66 |
| A.24 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 65$ Hz. . . . .   | 66 |
| A.25 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M8-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 5$ Hz. . . . .    | 67 |
| A.26 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M8-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 27,5$ Hz. . . . . | 67 |
| A.27 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M8-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 65$ Hz. . . . .   | 68 |
| A.28 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M10-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 5$ Hz. . . . .   | 68 |

|  |    |
|--|----|
| A.29 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M10-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 27,5$ Hz. . . . . | 69 |
| A.30 Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_B$ und mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ über der mittleren Materialfeuchte $\bar{W}$ von M10-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von $f = 65$ Hz. . . . .   | 69 |

# Tabellenverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.1 | Ermittelte Frequenzen, Drehzahlen und Schlittengeschwindigkeiten mit zugehörigen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten für raumfeuchte Polyamidschrauben der Größe M6. . . . .  | 22 |
| 4.2 | Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführtes Versuchsprogramm. . . . .  | 22 |
| 4.3 | Konditionierungszustände mit zugehöriger Materialfeuchte $W$ für Polyamidschrauben der Größe M6, M8 und M10. . . . .  | 23 |
| 4.4 | Mittlere Bruchkraft $\bar{F}_B$ mit Standardabweichung $\delta$ von gesättigten, raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben in Abhängigkeit der Frequenz $f$ . . . . .   | 30 |
| 4.5 | Mittlere Bruchdehnung $\bar{\epsilon}_B$ mit Standardabweichung $\delta$ von gesättigten, raumfeuchten und trockenen M6-Polyamidschrauben in Abhängigkeit der Frequenz $f$ . . . . .  | 33 |
| 4.6 | Mittlere Belastungsdauer $\bar{t}_B$ mit Standardabweichung $\delta$ in Abhängigkeit der Frequenz $f$ für gesättigte, raumfeuchte und trockene M6-Polyamidschrauben. $\Delta\bar{t}_B$ bezieht sich auf die Konditionierungszustände gesättigt und raumfeucht . . . . .   | 35 |
| B.1 | In Abbildung <u>5.1</u> dargestellte Werte. Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ von Polyamidschrauben der Größe M6 der Konditionierungszustände trocken (tr), raumfeucht (ra) und gesättigt (ge) bei unterschiedlichen Frequenzen $f$ . $\overline{dF/dt}$ und $\delta$ in [N/s]. . . . . | 71 |
| B.2 | In Anhang A.5 und A.6 dargestellte Werte. Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ von Polyamidschrauben der Größe M8 und M10 der Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und gesättigt bei unterschiedlichen Frequenzen $f$ . . . . .  | 71 |
| B.3 | In Anhang A.7 und A.8 dargestellte Werte. Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ von Polyamidschrauben der Größe M8 und M10 der Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und bei unterschiedlichen Frequenzen $f$ . . . . .  | 71 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| B.4 | In Anhang A.9 und A.10 dargestellte Werte. Darstellung der Änderung der mittleren Bruchdehnung $\bar{\epsilon}_B$ mit zunehmender Materialfeuchte in Abhängigkeit der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ für Polyamidschrauben der Größe M8 und M10. $d\bar{\epsilon}_B$ beschreibt die Änderung zwischen den Konditionierungszuständen trocken und gesättigt unter Einbezug der Standardabweichung $\delta$ . . . . . | 72 |
| B.5 | In Anhang A.11 und A.12 dargestellte Werte. Darstellung der Änderung der Belastungsdauer $dt_B$ mit zunehmender Materialfeuchte in Abhängigkeit der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit $\overline{dF/dt}$ . $\overline{dt}_B$ beschreibt die Änderung zwischen den Konditionierungszuständen trocken und gesättigt unter Einbezug der Standardabweichung $\delta$ . . . . .   | 72 |

Anhang A

Grafiken

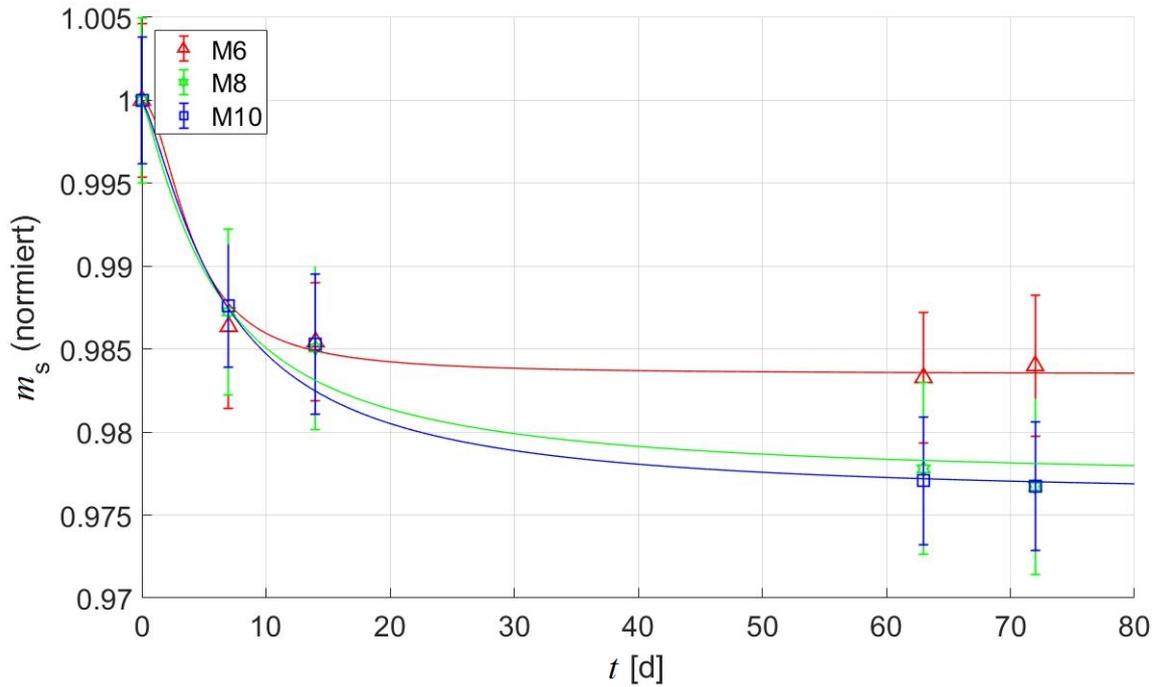


Abbildung A.1: Mittlerer Trocknungsverlauf von Polyamidschrauben PA 6.6 der Größen M6, M8 und M10 durch Trockenschranklagerung bei 60 °C.

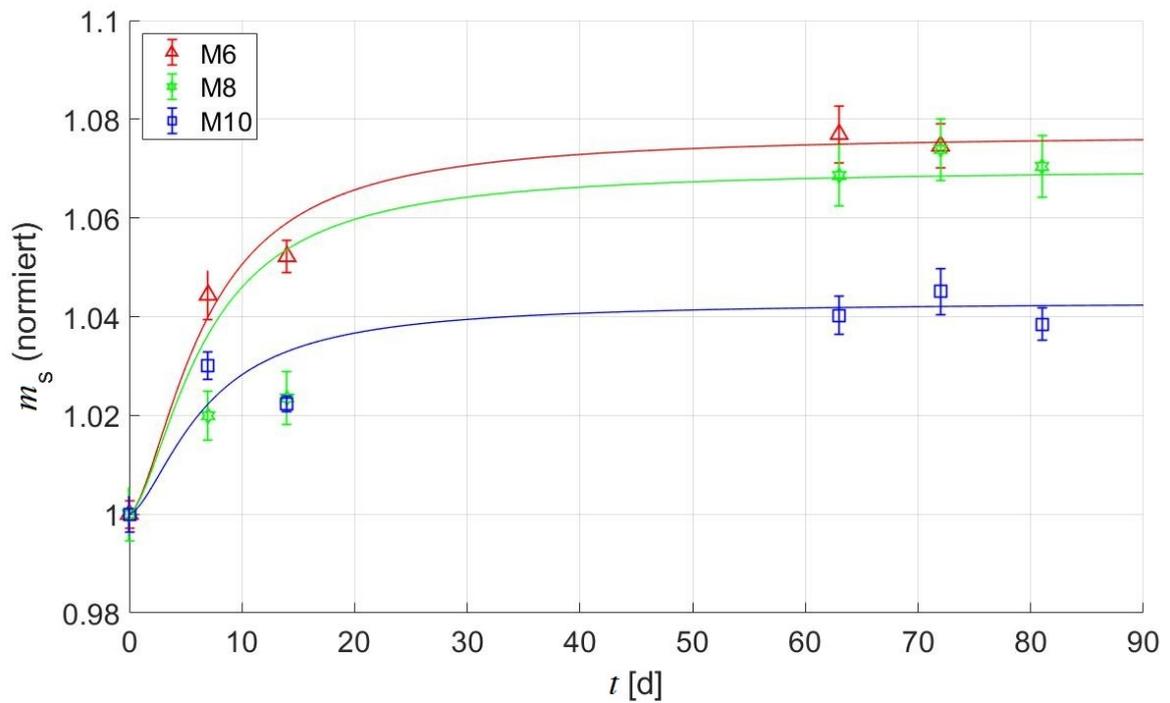


Abbildung A.2: Mittlerer Befeuchtungsverlauf von Polyamidschrauben PA 6.6 der Größen M6, M8 und M10 durch Wasserbadlagerung bei Raumtemperatur.

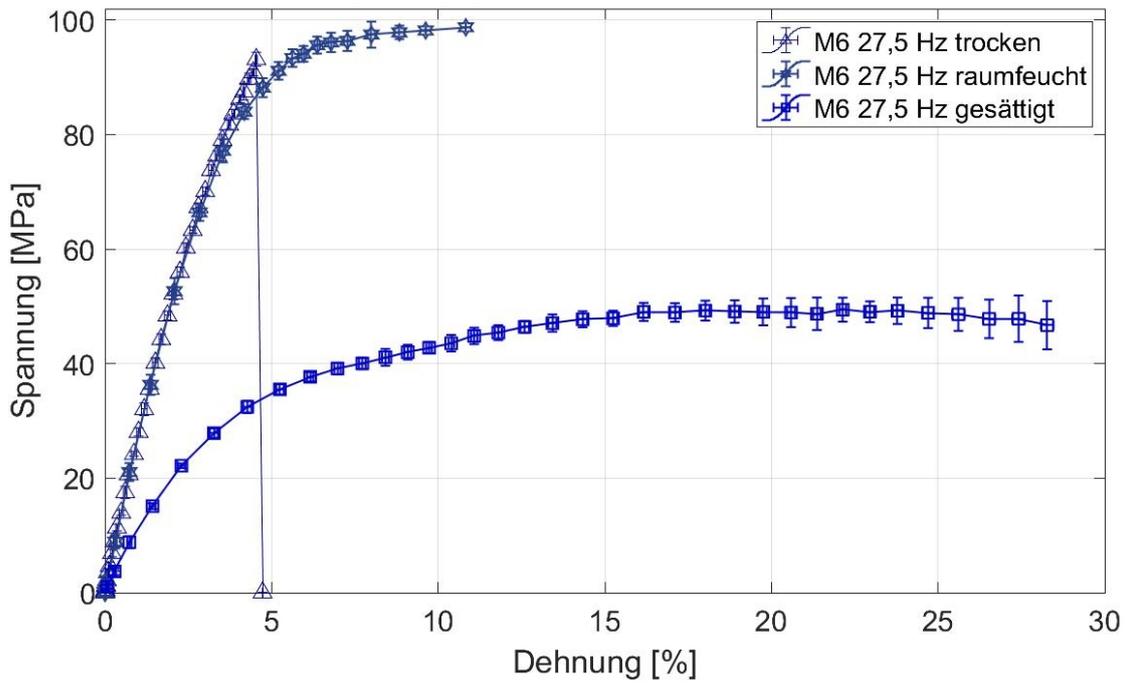


Abbildung A.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Polyamidschrauben der Größe M6 in den Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und gesättigt bei einer Frequenz von  $f = 27,5$  Hz.

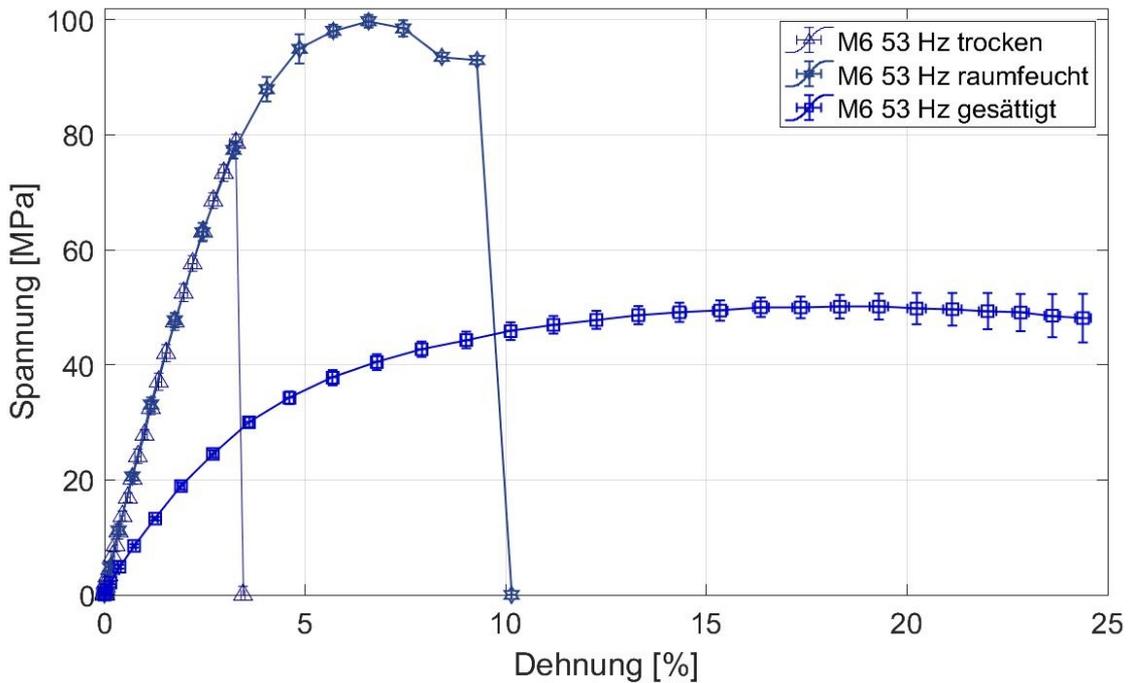


Abbildung A.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Polyamidschrauben der Größe M6 in den Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und gesättigt bei einer Frequenz von  $f = 53$  Hz.

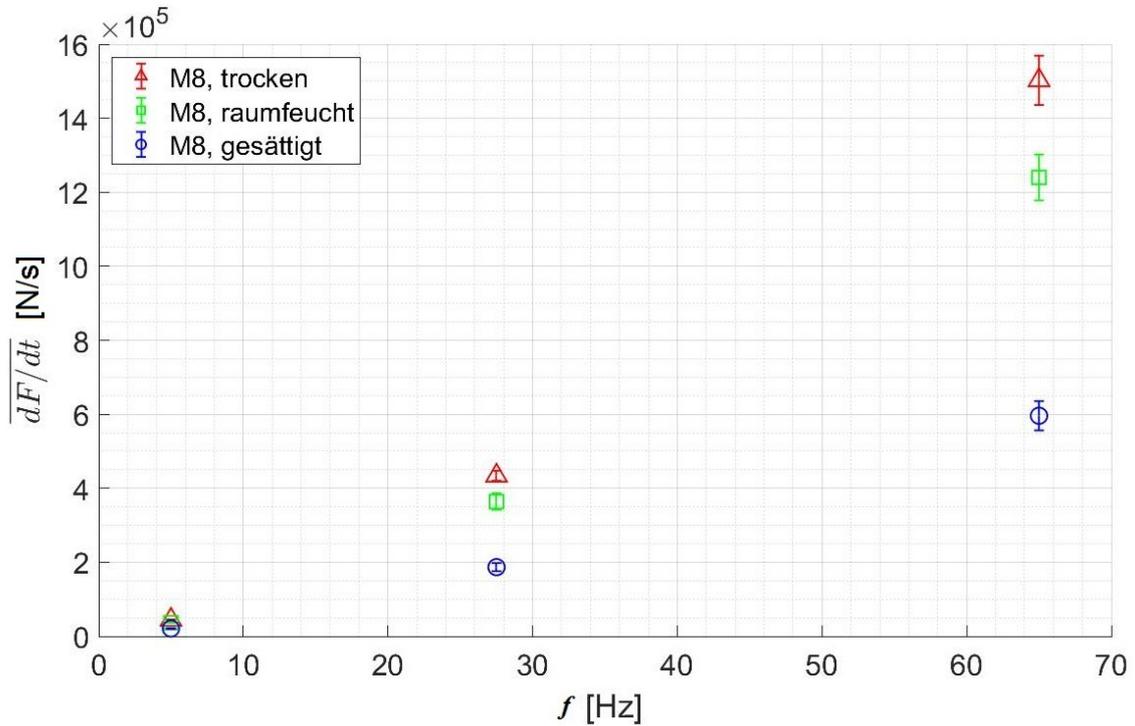


Abbildung A.5: Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  über der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8.

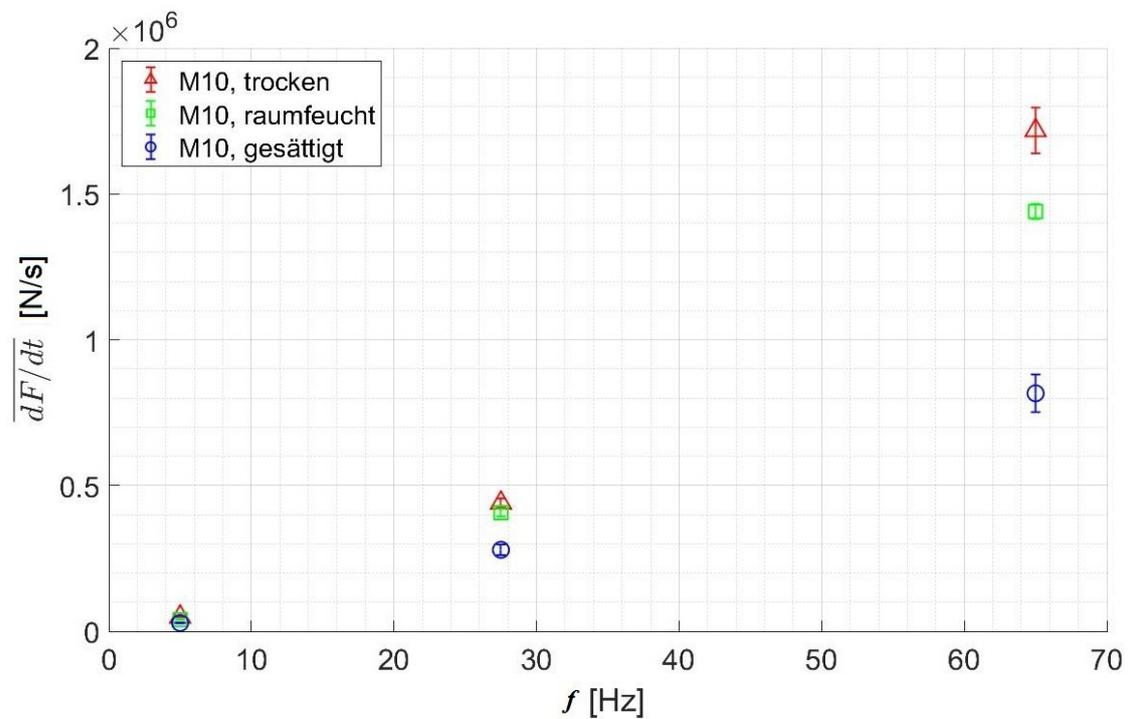


Abbildung A.6: Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  über der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10.

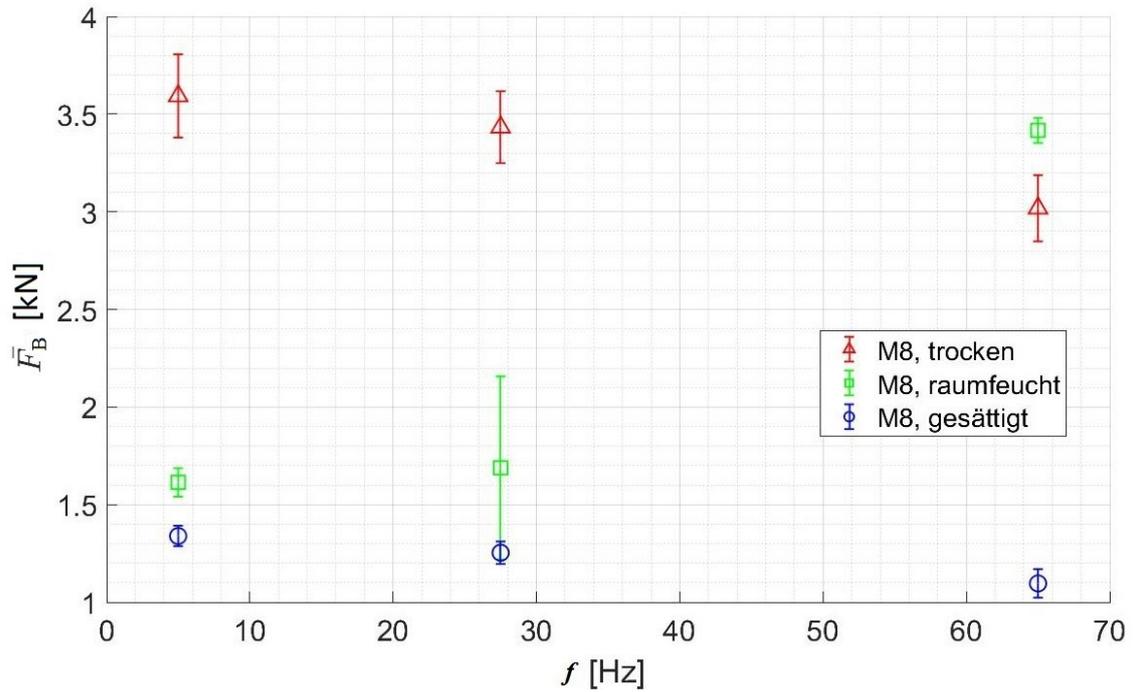


Abbildung A.7: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$  über der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8.

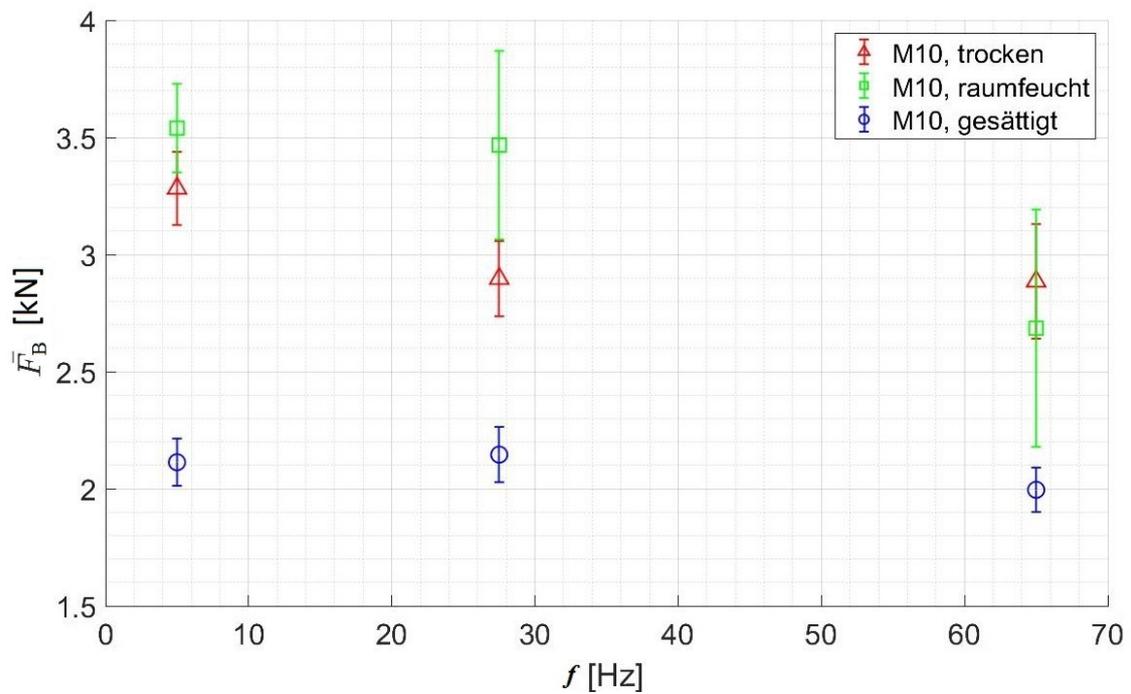


Abbildung A.8: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$  über der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10.

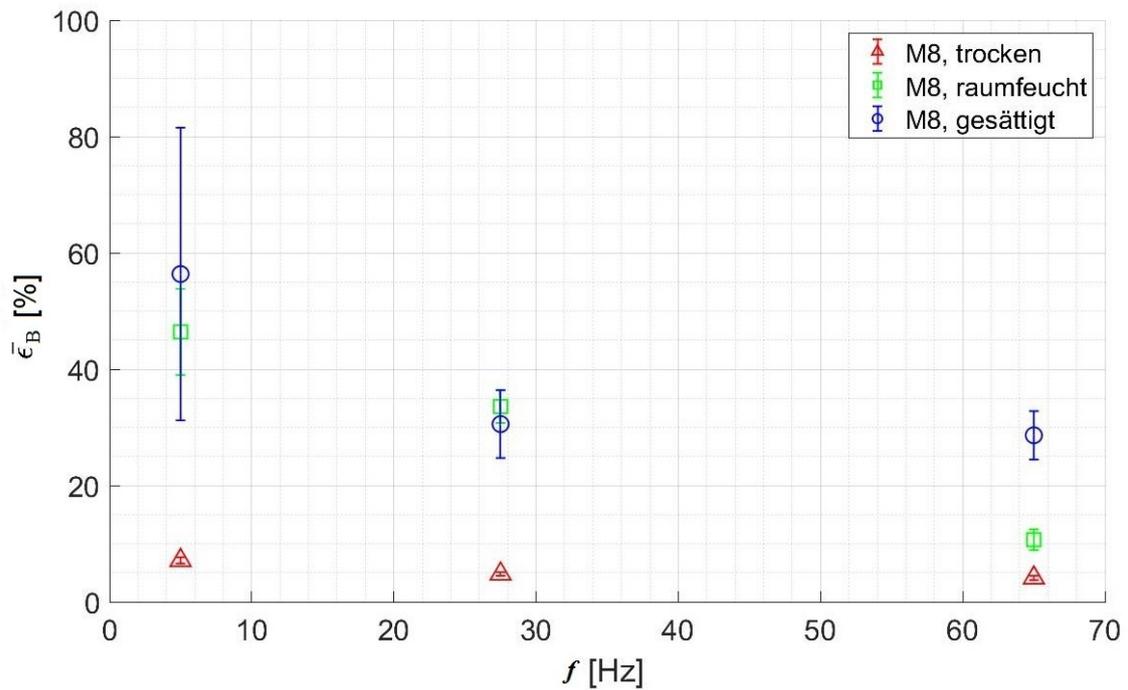


Abbildung A.9: Mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  über der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8.

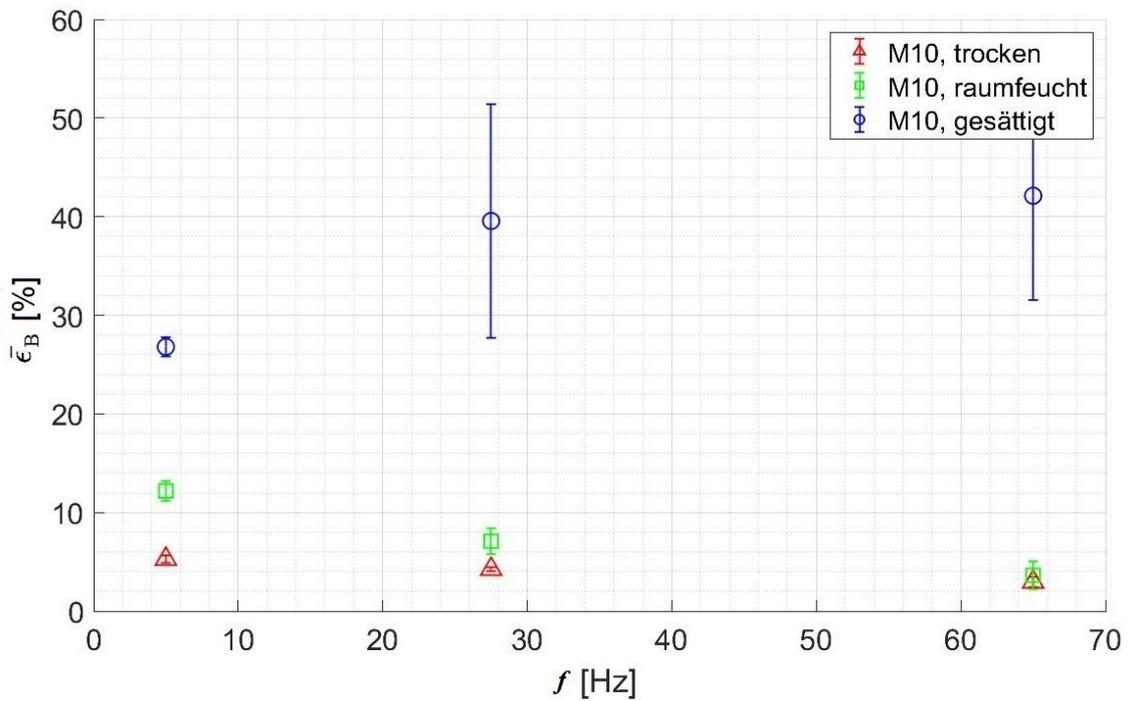


Abbildung A.10: Mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  über der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10.

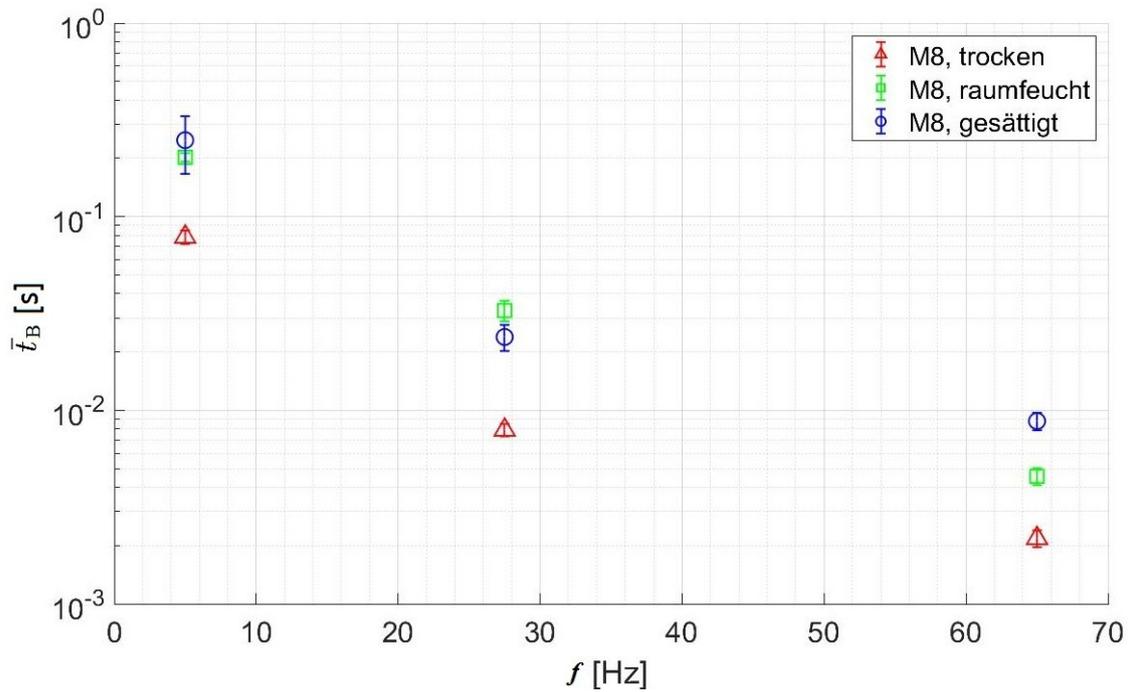


Abbildung A.11: Mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8.

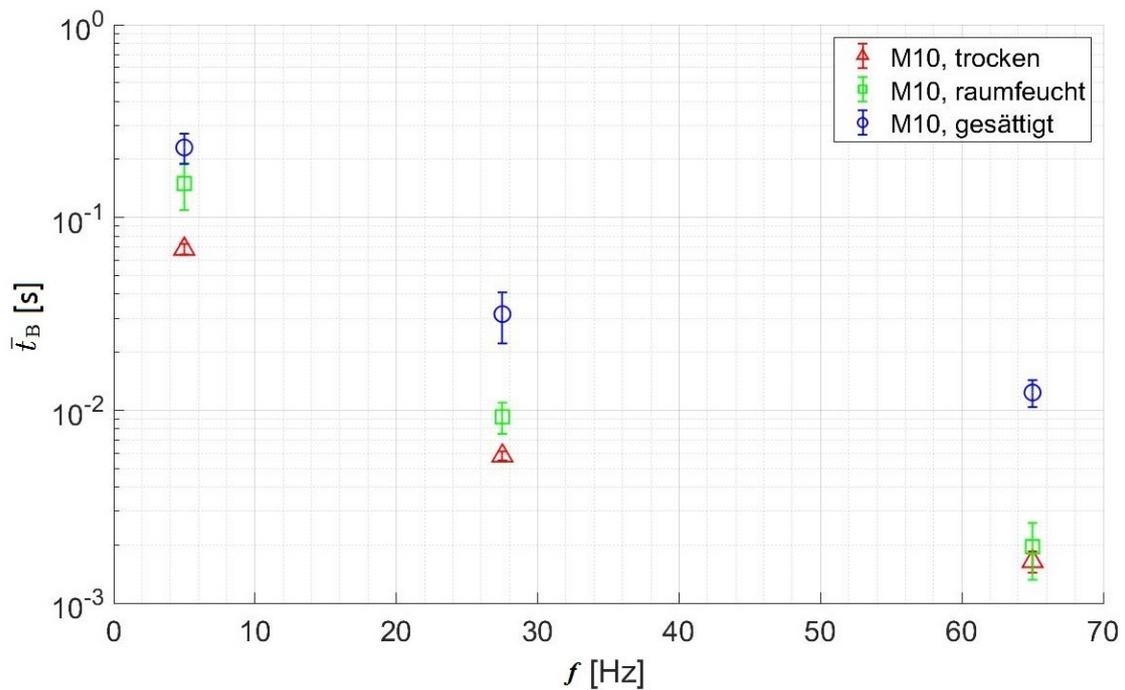


Abbildung A.12: Mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der Frequenz  $f$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M10.

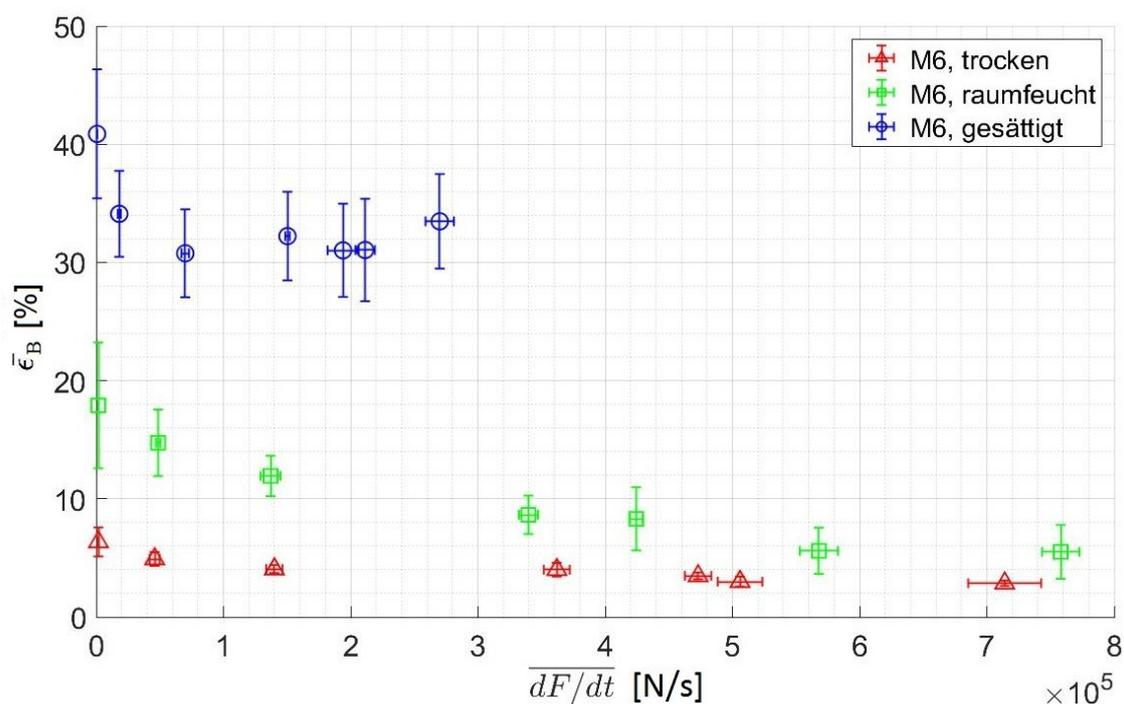


Abbildung A.13: Mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  über der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M6.

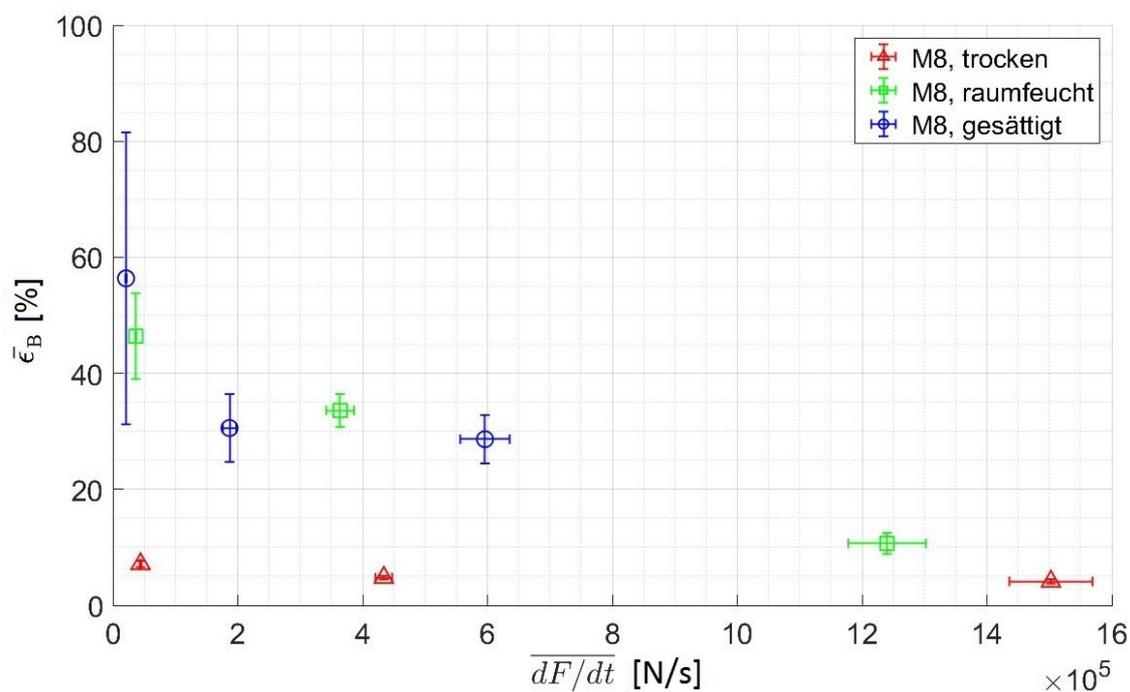


Abbildung A.14: Mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  über der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8.

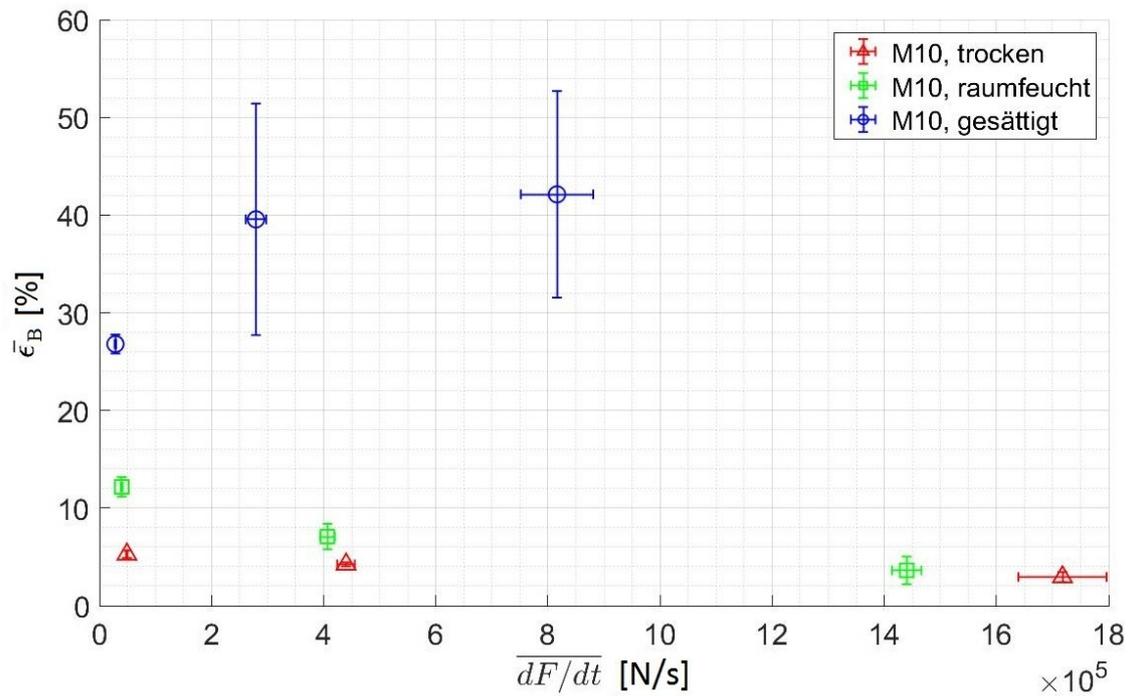


Abbildung A.15: Mittlere Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  über der mittleren Belastungsanstiegsge-  
schwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der  
Größe M10.

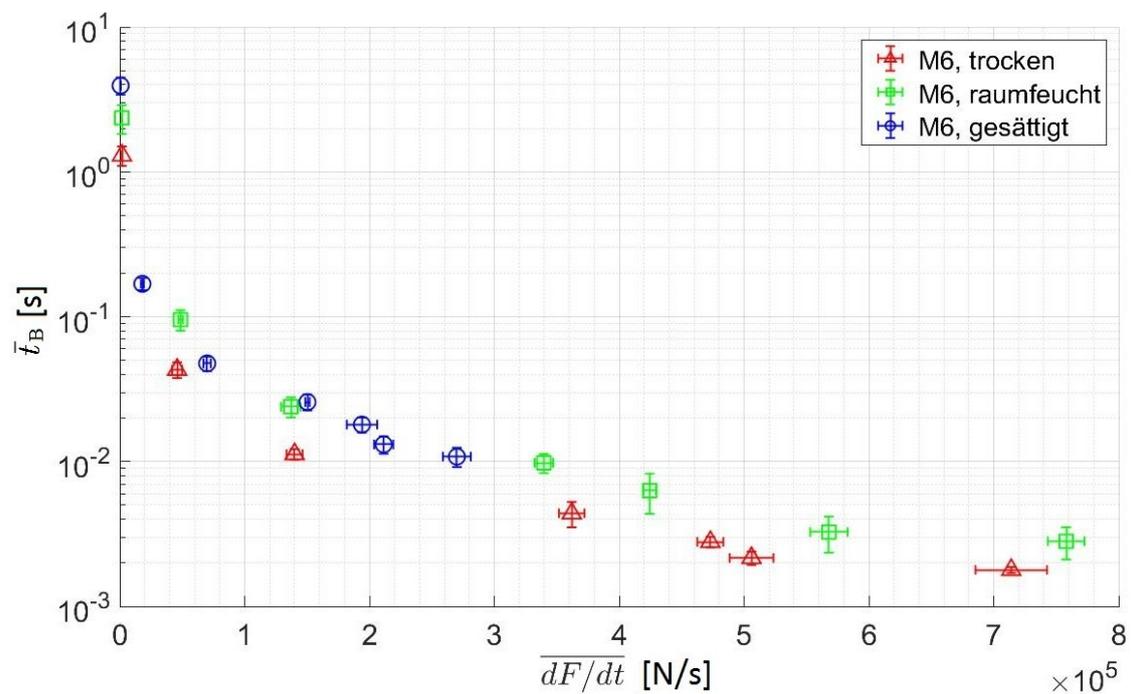


Abbildung A.16: Mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Belastungsanstiegsge-  
schwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der  
Größe M6.

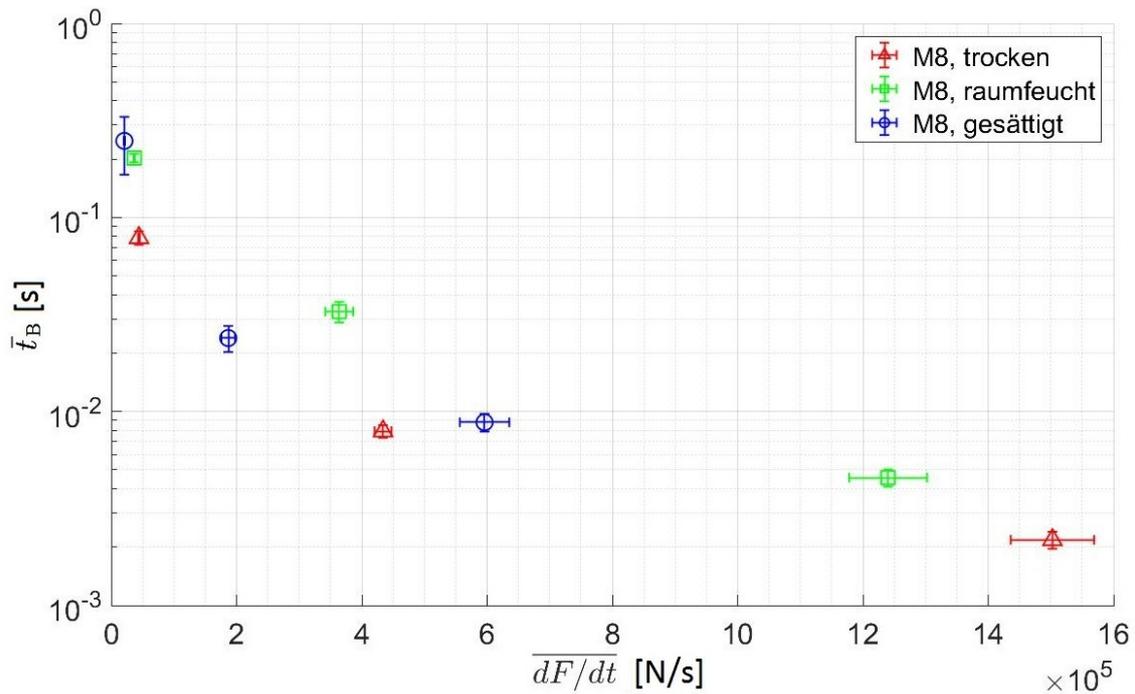


Abbildung A.17: Mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\frac{dF}{dt}$  für gesättigte, raumfeuchte und trockene Polyamidschrauben der Größe M8.

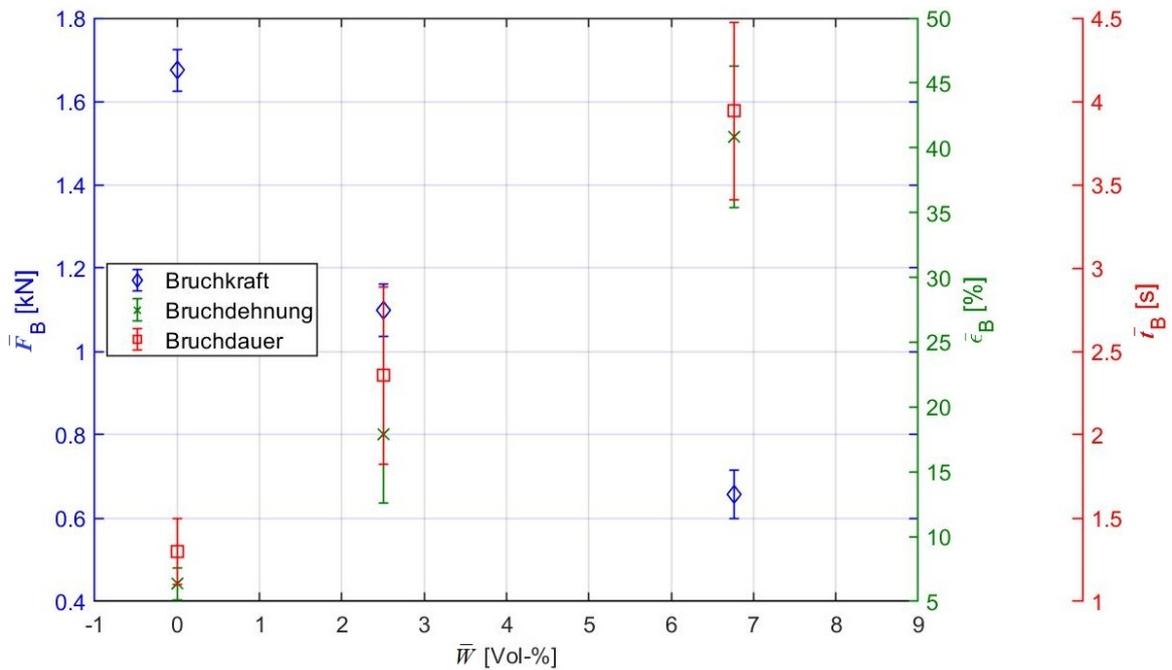


Abbildung A.18: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 0,3$  Hz.

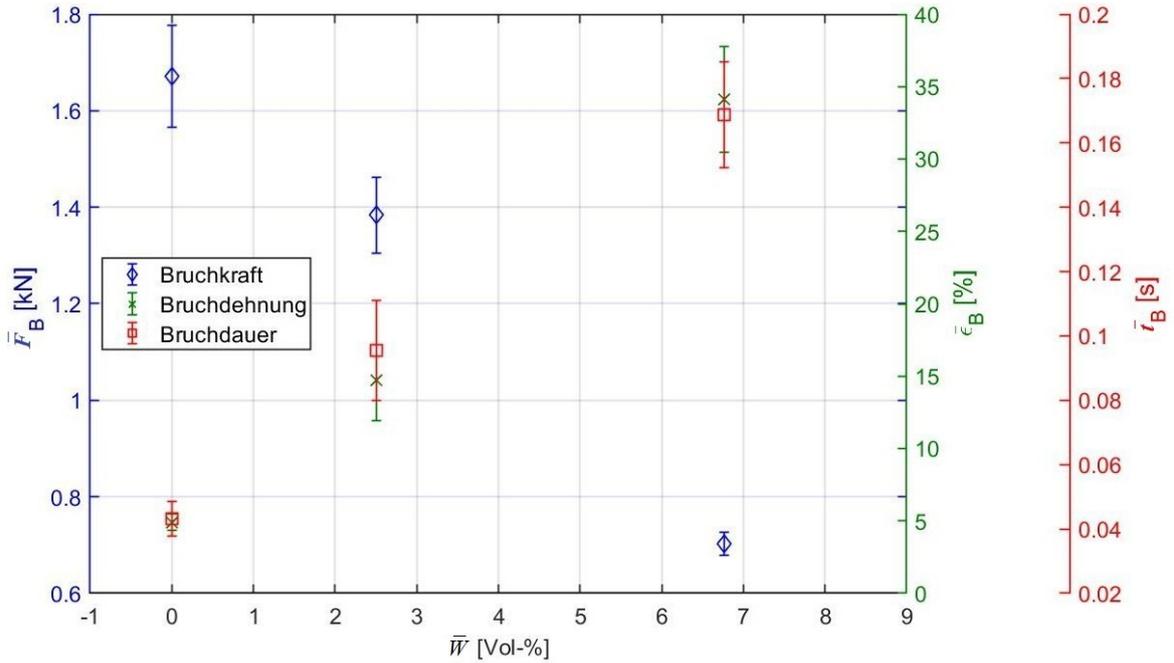


Abbildung A.19: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 5$  Hz.

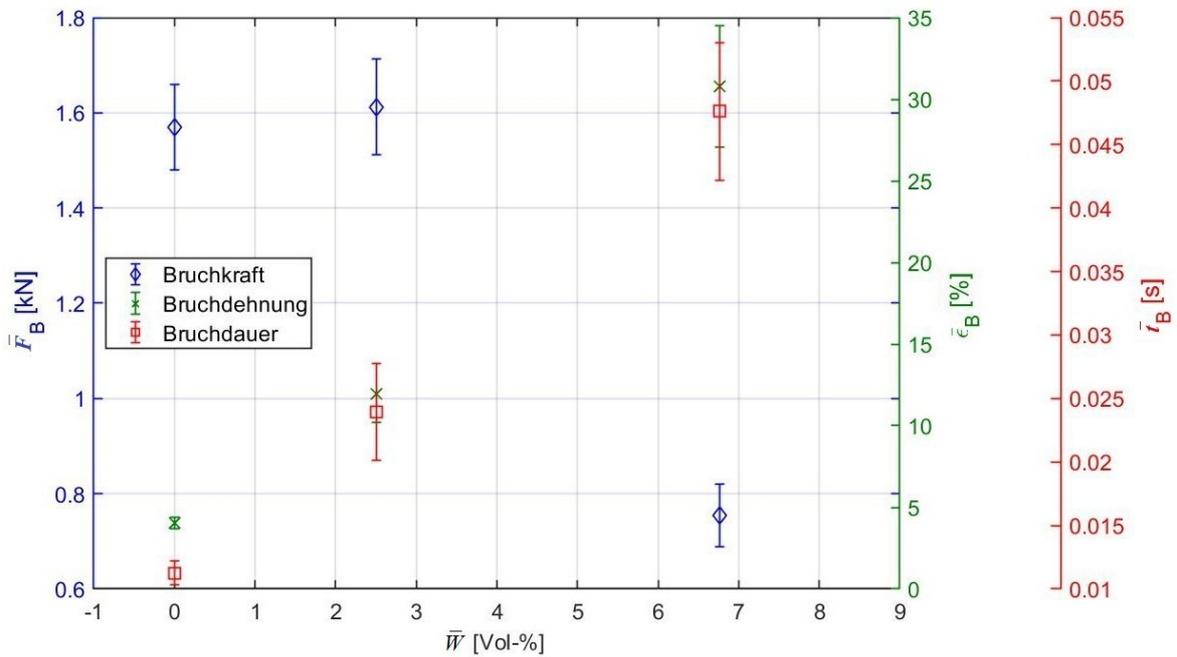


Abbildung A.20: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 15$  Hz.

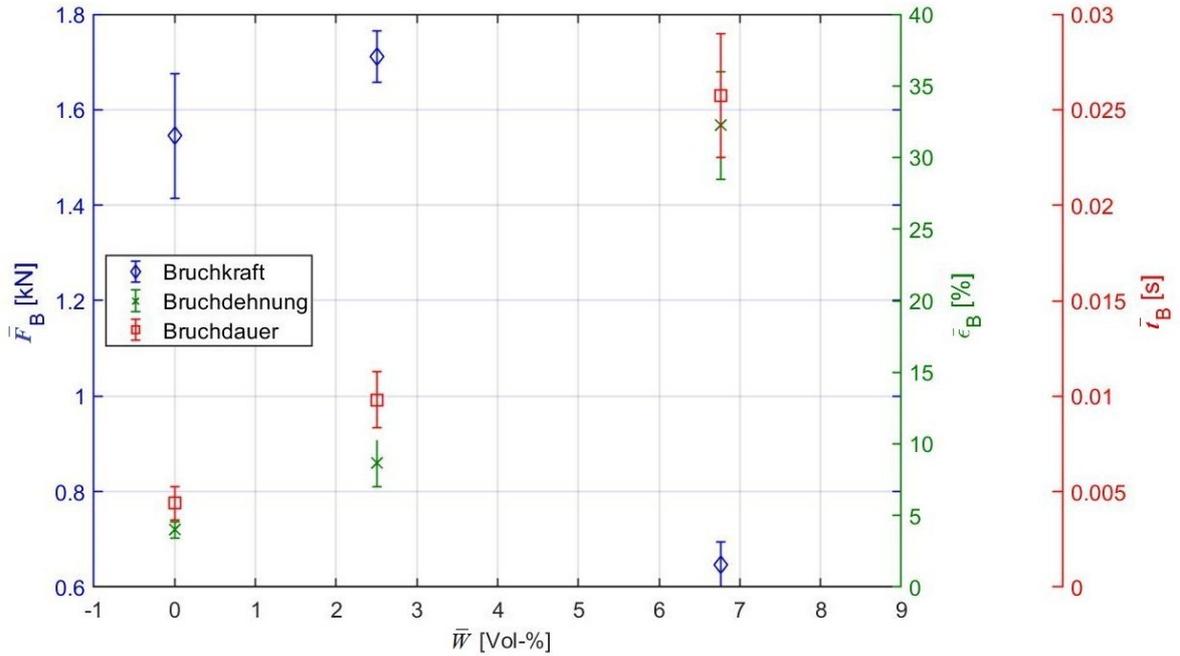


Abbildung A.21: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 27,5$  Hz.

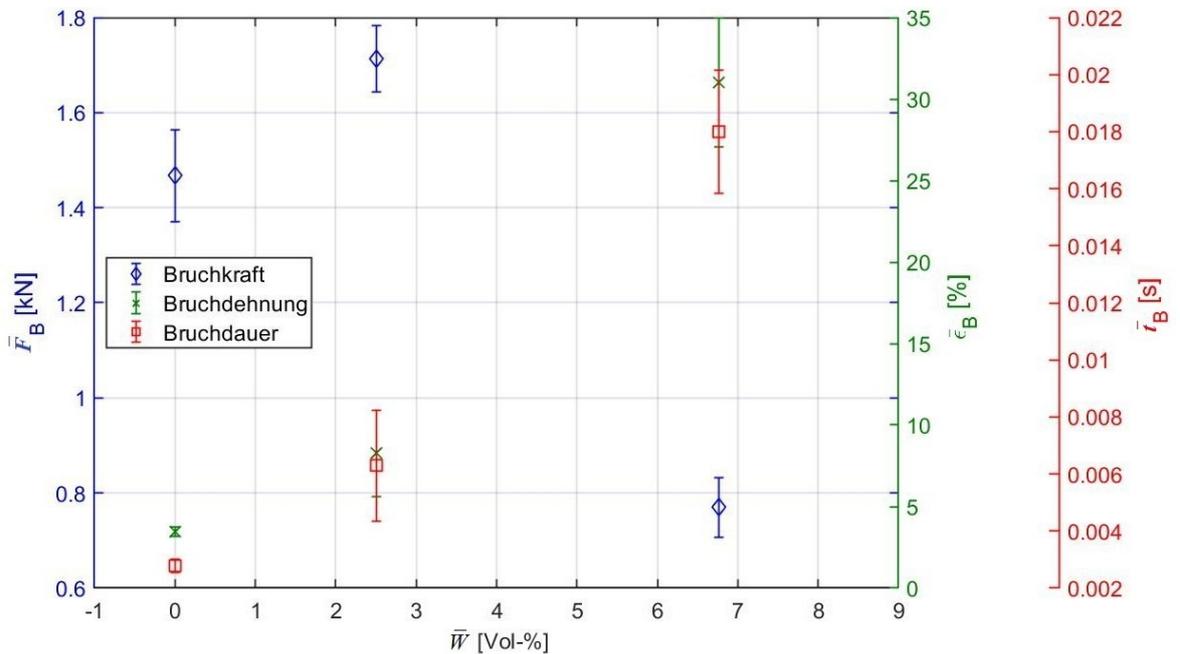


Abbildung A.22: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 38$  Hz.

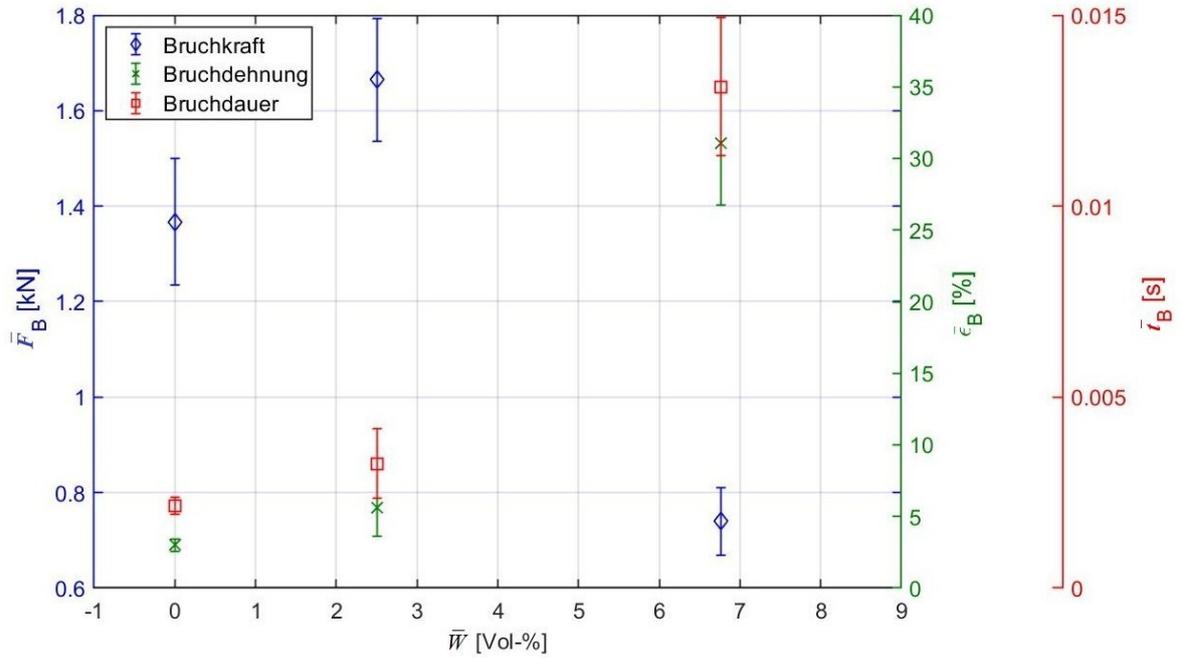


Abbildung A.23: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 53$  Hz.

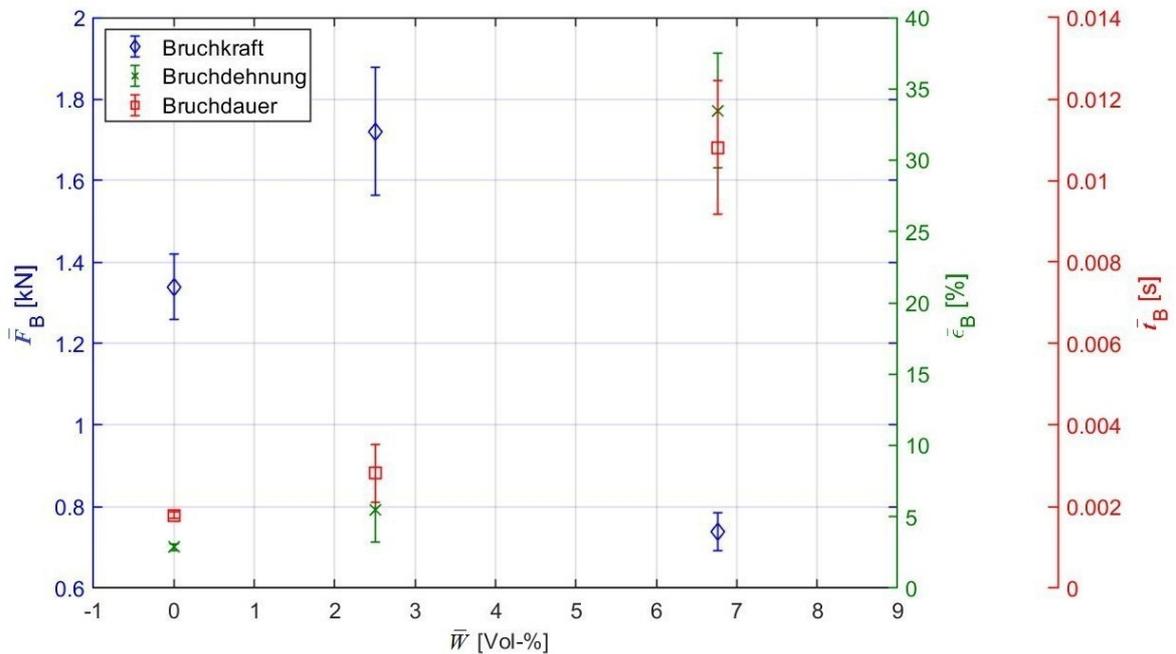


Abbildung A.24: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M6-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 65$  Hz.

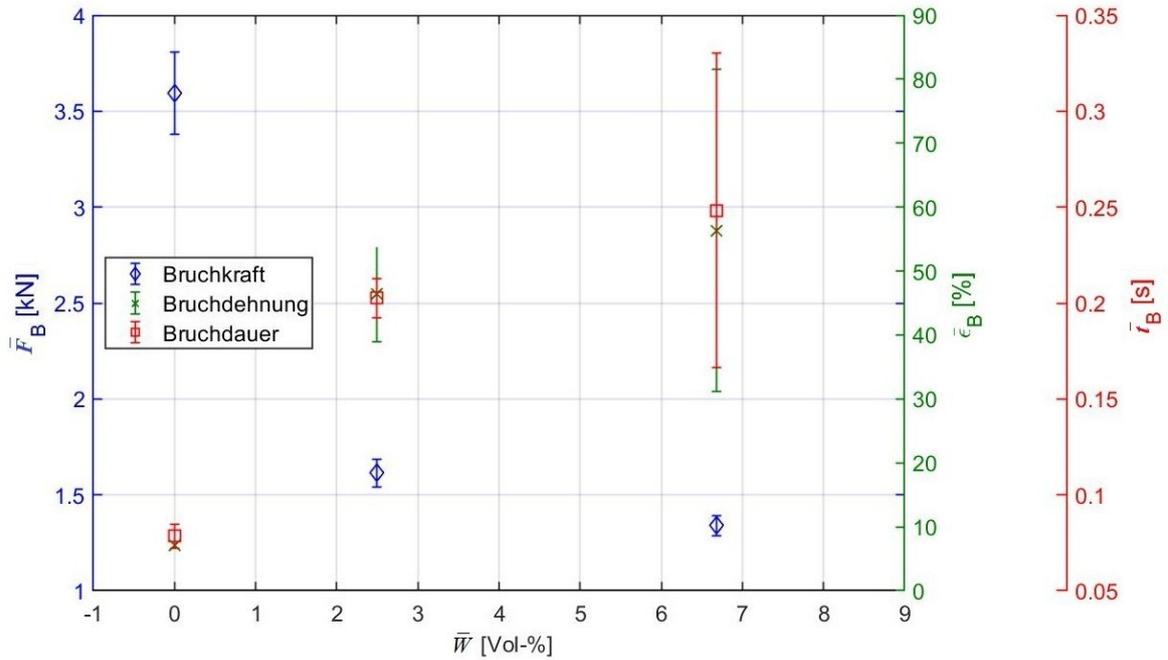


Abbildung A.25: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M8-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 5$  Hz.

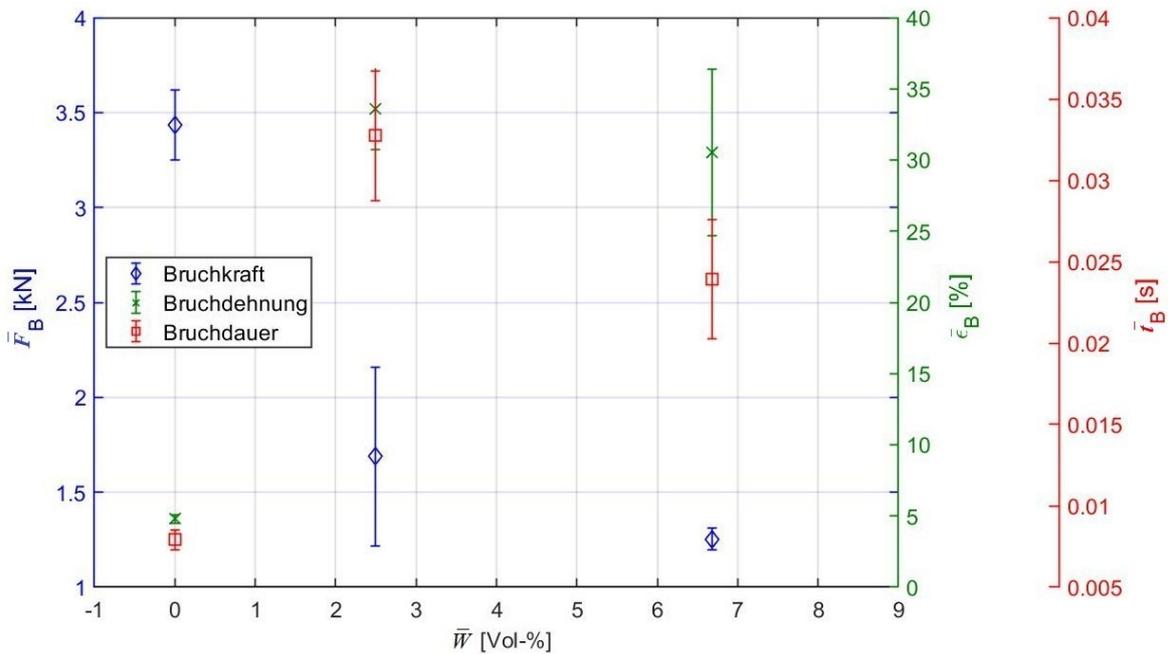


Abbildung A.26: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M8-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 27,5$  Hz.

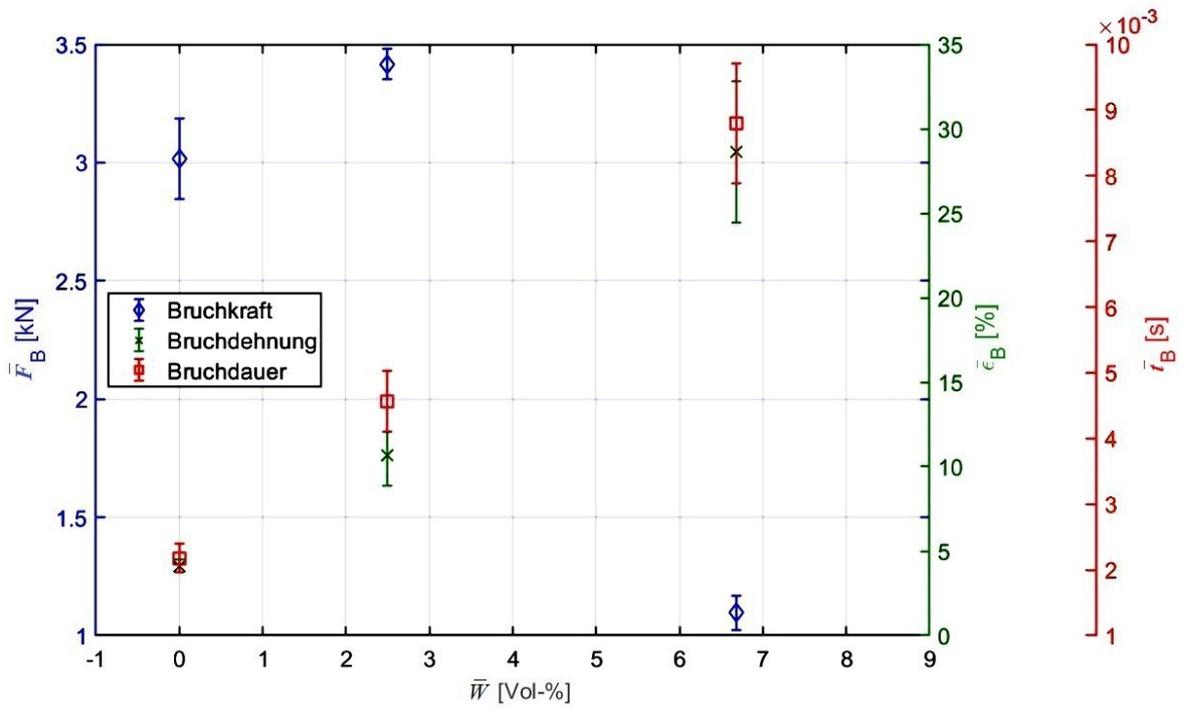


Abbildung A.27: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M8-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 65$  Hz.

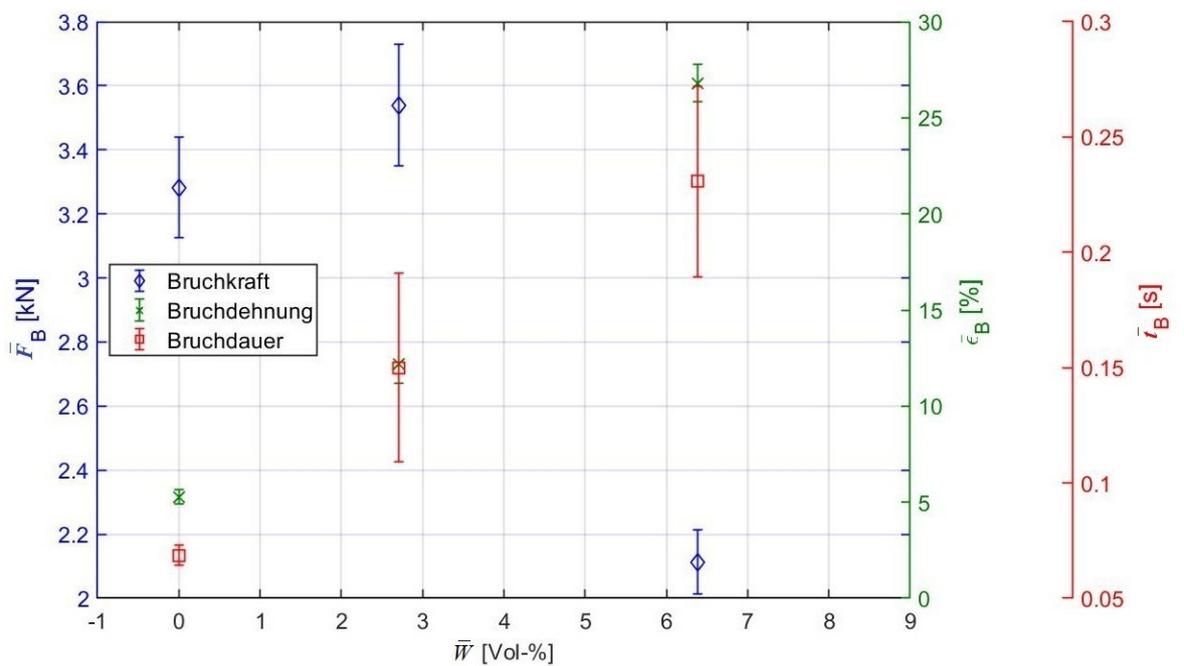


Abbildung A.28: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M10-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 5$  Hz.

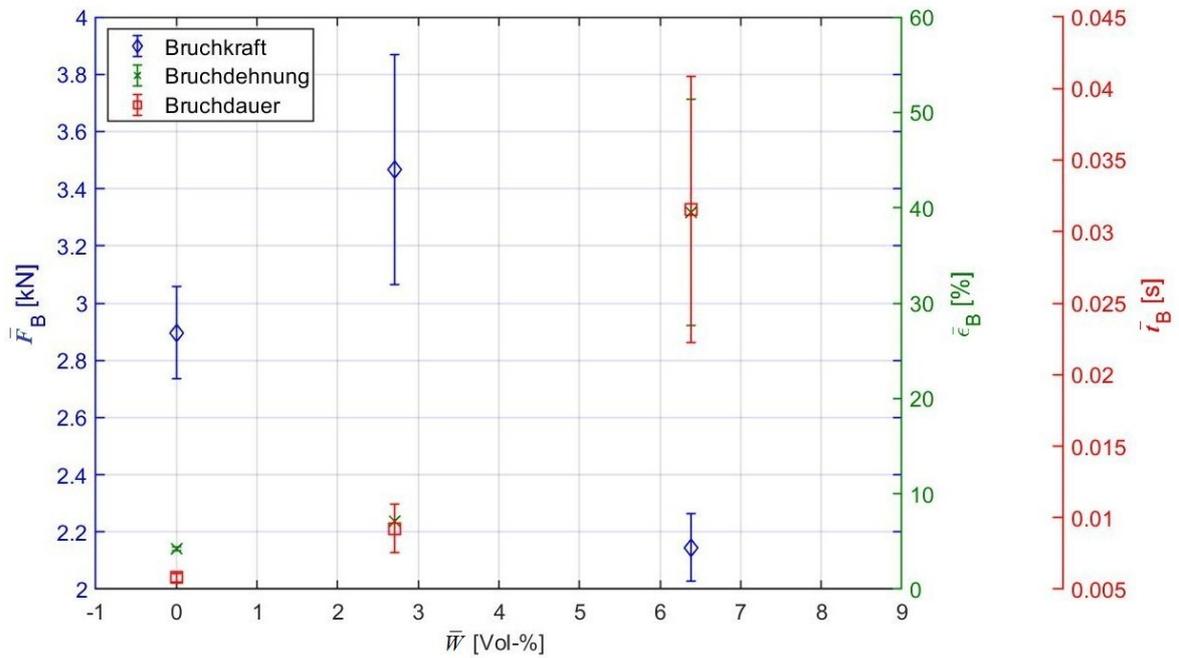


Abbildung A.29: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M10-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 27,5$  Hz.

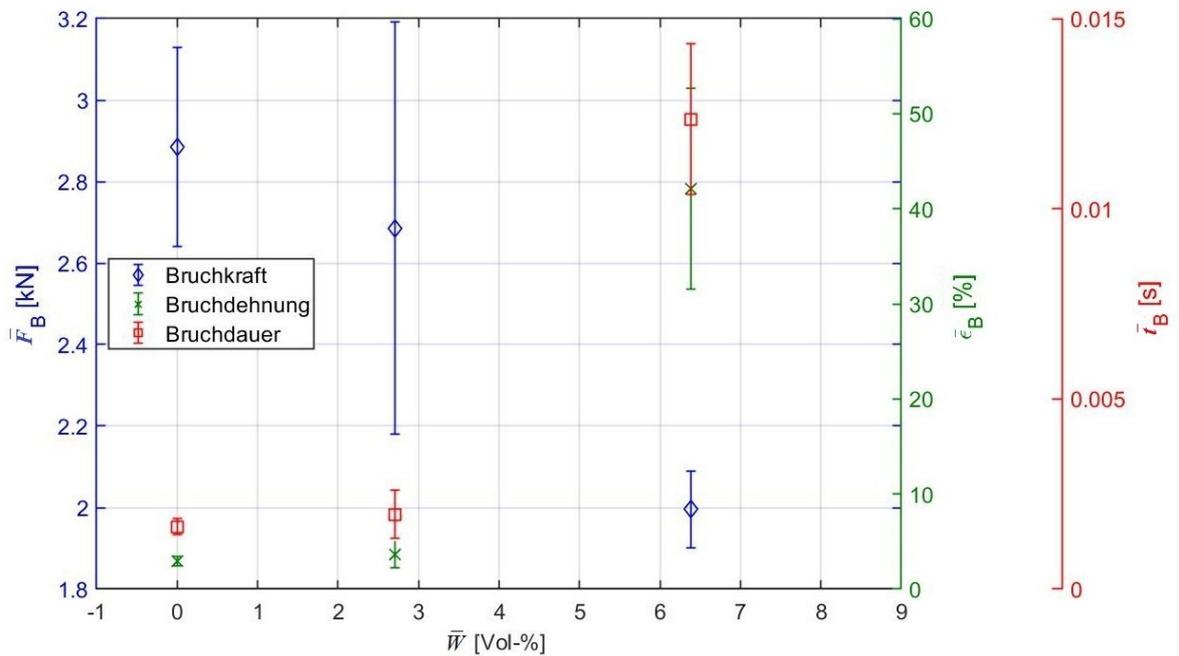


Abbildung A.30: Mittlere Bruchkraft  $\bar{F}_B$ , mittlere Dehnung  $\bar{\epsilon}_B$  und mittlere Belastungsdauer  $\bar{t}_B$  über der mittleren Materialfeuchte  $\bar{W}$  von M10-Polyamidschrauben bei einer Frequenz von  $f = 65$  Hz.

# Anhang B

## Tabellen

| $f$ [Hz]                       | 0,3  | 5                 | 15                | 27,5              | 38                | 53                | 65                |
|--------------------------------|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\overline{dF/dt}_{\text{tr}}$ | 1753 | $4,59 \cdot 10^4$ | $1,40 \cdot 10^5$ | $3,62 \cdot 10^5$ | $4,73 \cdot 10^5$ | $5,06 \cdot 10^5$ | $7,14 \cdot 10^5$ |
| $\delta$                       | 17   | 3976              | 6403              | $1,02 \cdot 10^4$ | $1,04 \cdot 10^4$ | $1,75 \cdot 10^4$ | $2,87 \cdot 10^4$ |
| $\overline{dF/dt}_{\text{ra}}$ | 1610 | $4,87 \cdot 10^4$ | $1,37 \cdot 10^5$ | $3,40 \cdot 10^5$ | $4,24 \cdot 10^5$ | $5,68 \cdot 10^5$ | $7,58 \cdot 10^5$ |
| $\delta$                       | 32   | 1729              | 7803              | 7441              | 5092              | $1,50 \cdot 10^4$ | $1,46 \cdot 10^4$ |
| $\overline{dF/dt}_{\text{ge}}$ | 675  | $1,81 \cdot 10^4$ | $7,00 \cdot 10^4$ | $1,50 \cdot 10^5$ | $1,94 \cdot 10^5$ | $2,11 \cdot 10^5$ | $2,70 \cdot 10^5$ |
| $\delta$                       | 48   | 1174              | 2936              | 1795              | $1,22 \cdot 10^4$ | 7649              | $1,12 \cdot 10^4$ |

Tabelle B.1: In Abbildung 5.1 dargestellte Werte. Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  von Polyamidschrauben der Größe M6 der Konditionierungszustände trocken (tr), raumfeucht (ra) und gesättigt (ge) bei unterschiedlichen Frequenzen  $f$ .  $\overline{dF/dt}$  und  $\delta$  in [N/s].

| Schraubengröße                               | M8    |        |         | M10   |        |         |
|--|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
| $f$ [Hz]                                     | 5     | 27,5   | 65      | 5     | 27,5   | 65      |
| $\overline{dF/dt}_{\text{trocken}}$ [N/s]    | 44219 | 433889 | 1502500 | 49000 | 440000 | 1717778 |
| $\delta$ [N/s]                               | 1422  | 13494  | 66662   | 1054  | 15653  | 78567   |
| $\overline{dF/dt}_{\text{raumfeucht}}$ [N/s] | 36633 | 364000 | 1240000 | 39889 | 406857 | 1440000 |
| $\delta$ [N/s]                               | 912   | 22226  | 62183   | 1560  | 12778  | 26186   |
| $\overline{dF/dt}_{\text{gesättigt}}$ [N/s]  | 20967 | 186786 | 596000  | 28575 | 279375 | 816250  |
| $\delta$ [N/s]                               | 1048  | 10874  | 39547   | 1369  | 18103  | 64602   |

Tabelle B.2: In Anhang A.5 und A.6 dargestellte Werte. Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  von Polyamidschrauben der Größe M8 und M10 der Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und gesättigt bei unterschiedlichen Frequenzen  $f$ .

| Schraubengröße                            | M8    |       |       | M10   |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f$                                       | 5     | 27,5  | 65    | 5     | 27,5  | 65    |
| $\overline{F}_{\text{B,trocken}}$ [kN]    | 3,593 | 3,433 | 3,018 | 3,282 | 2,897 | 2,885 |
| $\delta$ [kN]                             | 0,213 | 0,184 | 0,170 | 0,156 | 0,161 | 0,245 |
| $\overline{F}_{\text{B,raumfeucht}}$ [kN] | 1,614 | 1,688 | 3,417 | 3,539 | 3,467 | 2,686 |
| $\delta$ [kN]                             | 0,073 | 0,469 | 0,064 | 0,189 | 0,402 | 0,506 |
| $\overline{F}_{\text{B,gesättigt}}$ [kN]  | 1,339 | 1,253 | 1,096 | 2,146 | 2,113 | 2,146 |
| $\delta$ [kN]                             | 0,053 | 0,057 | 0,073 | 0,118 | 0,101 | 0,118 |

Tabelle B.3: In Anhang A.7 und A.8 dargestellte Werte. Mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  von Polyamidschrauben der Größe M8 und M10 der Konditionierungszustände trocken, raumfeucht und bei unterschiedlichen Frequenzen  $f$ .

| Schraubengröße                             | M8     |        |        | M10    |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $f$ [Hz]                                   | 5      | 27,5   | 65     | 5      | 27,5   | 65     |
| $\bar{\epsilon}_{B,\text{trocken}}$ [%]    | 7,13   | 4,79   | 4,12   | 5,27   | 4,24   | 2,94   |
| $\delta$ [%]                               | 0,54   | 0,32   | 0,38   | 0,38   | 0,21   | 0,51   |
| $\bar{\epsilon}_{B,\text{raumfeucht}}$ [%] | 46,40  | 33,59  | 10,67  | 12,17  | 7,09   | 3,62   |
| $\delta$ [%]                               | 7,40   | 2,83   | 1,80   | 1,00   | 1,31   | 1,42   |
| $\bar{\epsilon}_{B,\text{gesättigt}}$ [%]  | 56,36  | 30,56  | 28,64  | 26,79  | 39,56  | 42,12  |
| $\delta$ [%]                               | 25,16  | 5,85   | 4,16   | 0,97   | 11,85  | 10,58  |
| $d\bar{\epsilon}_B$ [%] absolut            | 23,53  | 19,61  | 19,98  | 20,18  | 23,25  | 28,09  |
| $d\bar{\epsilon}_B$ [%] relativ            | 330,12 | 409,58 | 485,09 | 382,93 | 548,15 | 954,37 |

Tabelle B.4: In Anhang A.9 und A.10 dargestellte Werte. Darstellung der Änderung der mittleren Bruchdehnung  $\bar{\epsilon}_B$  mit zunehmender Materialfeuchte in Abhängigkeit der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$  für Polyamidschrauben der Größe M8 und M10.  $d\bar{\epsilon}_B$  beschreibt die Änderung zwischen den Konditionierungszuständen trocken und gesättigt unter Einbezug der Standardabweichung  $\delta$ .

| Schraubengröße                      | M8      |         |         | M10     |         |         |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $f$ [Hz]                            | 5       | 27,5    | 65      | 5       | 27,5    | 65      |
| $\bar{t}_{B,\text{trocken}}$ [s]    | 0,07855 | 0,00791 | 0,00218 | 0,06858 | 0,00580 | 0,00164 |
| $\delta$ [s]                        | 0,00632 | 0,00059 | 0,00022 | 0,00434 | 0,00032 | 0,00021 |
| $\bar{t}_{B,\text{raumfeucht}}$ [s] | 0,20251 | 0,03274 | 0,00456 | 0,15008 | 0,00924 | 0,00196 |
| $\delta$ [s]                        | 0,01000 | 0,00398 | 0,00046 | 0,04079 | 0,00170 | 0,00064 |
| $\bar{t}_{B,\text{gesättigt}}$ [s]  | 0,24818 | 0,02391 | 0,00879 | 0,23070 | 0,03155 | 0,01236 |
| $\delta$ [s]                        | 0,08201 | 0,00367 | 0,00092 | 0,04119 | 0,00933 | 0,00197 |
| $dt_B$ [s]                          | 0,08131 | 0,01174 | 0,00548 | 0,11660 | 0,01609 | 0,00853 |
| $dt_B$ [%]                          | 103,5   | 148,4   | 251,5   | 170,0   | 277,2   | 518,8   |

Tabelle B.5: In Anhang A.11 und A.12 dargestellte Werte. Darstellung der Änderung der Belastungsdauer  $dt_B$  mit zunehmender Materialfeuchte in Abhängigkeit der mittleren Belastungsanstiegsgeschwindigkeit  $\overline{dF/dt}$ .  $\bar{dt}_B$  beschreibt die Änderung zwischen den Konditionierungszuständen trocken und gesättigt unter Einbezug der Standardabweichung  $\delta$ .