

Untersuchung der Zugfestigkeit von
gedrehten Polyamid-Schrauben in
Abhängigkeit von der
Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und
Materialfeuchte

Bachelorarbeit

von

Thorsten Pfeiffer

Hochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit
und Arbeitsmedizin

Mannheim, September 2021

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mannheim, 29. September 2021

(Thorsten Pfeiffer)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA e.V). Im Zuge dessen wurde das Projekt F-05-1901 ins Leben gerufen, welches sich zunächst mit dem Einsatz von spritzgegossenen Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Materialfeuchte und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit für Explosionsklappen befasste. Ziel dieser Arbeit ist es, die Untersuchungen auf gedrehte Polyamidschrauben aus Vollmaterial auszuweiten und deren Verhalten zu charakterisieren.

Mein Dank gilt allen, die mich auf dem Weg meines Studiums begleitet und beim Gelingen vorliegender Arbeit unterstützt haben. Die Arbeit bei der FSA/BGN hat mir sehr große Freude bereitet. Ich konnte interessante Sachverhalte eigenständig untersuchen und weitere wertvolle Eindrücke der Berufswelt als Ingenieur sammeln. Ich danke Herrn Prof. Dr. Oliver Franke für die Betreuung seitens der Hochschule und die Möglichkeit, dieses Thema im Rahmen meiner Bachelor Thesis bearbeiten zu dürfen. Besonders danke ich Herrn Dr. Sebastian Nissle für die fachliche Betreuung meiner Arbeit, seine stets sehr kompetente und herzliche Unterstützung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Mein Dank gilt außerdem Herrn Dr. Dirk Lorenz, der als Teamleiter diese Arbeit seitens der FSA ermöglicht hat. Pavlo Chupin danke ich für den Aufbau und die Bereitstellung der Messeinrichtungen. Weiterhin gilt mein Dank den Teamkollegen der BGN für eine angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre sowie die Hilfsbereitschaft und Unterstützung jeglicher Art. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinem Vater, Herrn Peter Pfeiffer, der die sicherheitsrelevante Aufsicht bei der Versuchsdurchführung im Technikum Kappelrodeck übernommen hat. An dieser Stelle möchte ich außerdem meinen Eltern im Allgemeinen danken. Sie haben mich während meines gesamten Studiums finanziell, moralisch und auch fachlich bedingungslos unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	X
Symbolverzeichnis	XII
Zusammenfassung	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Aktueller Stand	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Lösungsweg	4
2 Grundlagen	5
2.1 Sicherheitstechnische Grundlagen	5
2.2 Dimensionierung von Explosionsklappen	6
2.3 Polyamid als Werkstoff	7
2.3.1 Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften von Polyamid 6.6	7
2.3.1.1 Temperatur und Feuchte	7
2.3.1.2 Belastungsanstiegsgeschwindigkeit	8
3 Aufbau der Versuchsanlage	10
4 Experimenteller Teil	12
4.1 Versuchsablauf	12
4.2 Anlagenanpassung und Versuchsgrenzen	12

4.3	Konditionieren der Schrauben	14
4.4	Versuchsprogramm	16
4.5	Auswertungsmethodik	17
4.5.1	Maximalkraft, Bruchkraft, Belastungsdauer, Belastungsan- stiegs- geschwindigkeit	17
4.5.2	Bruchdehnung	17
4.6	Ergebnisse und Auswertung	21
4.6.1	Bruchkraft	22
4.6.2	Maximalkraft	25
4.6.3	Bruchdehnung	28
4.6.4	Ausgewählte Kraft- und Dehnungsverläufe	31
4.6.5	Spannungs-/Dehnungsdiagramme	37
4.6.6	Aufnahmen der Bruchstellen	40
5	Diskussion und Ausblick	43
5.1	Diskussion	43
5.2	Ausblick	47
6	Literatur	XIV
7	Anhang	XVI

Abbildungsverzeichnis

1.1	Explosionsklappe am 1m ³ -Behälter (Quelle: Chupin 2009: 23) . . .	2
2.1	Nomogramm zur Ermittlung der notwendigen Druckentlastungsfläche von Explosionsklappen; Quelle: Bartknecht 1993: 109 . . .	6
2.2	Wechselwirkungen Luftfeuchte/Temperatur/Bruchspannung bei unverstärktem Polyamid 6 (Quelle: Lutterbeck 1984: 61)	8
2.3	Einfluss der Deformationsgeschwindigkeit auf den Ursprungsmodul E_0 (Quelle:Stommel/Korte 2011: 27)	9
3.1	Aufbau der Versuchsanordnung Teil 1 (Quelle: König 2021: 12) . .	10
3.2	Aufbau der Versuchsanordnung Teil 2 (Quelle: König 2021: 20) . .	11
4.1	Bedientableau	13
4.2	Masseabnahme einer gesättigten M6 Schraube über der Zeit durch Trocknung	15
4.3	Masseabnahme einer raumfeuchten M6 Schraube über der Zeit durch Trocknung	15
4.4	Tracking der Kamerabilder	18
4.5	Zeitbetrag des Triggersignals, um welchen Transientenrekorder und Kamera versetzt auslösen	19
4.6	Exemplarische Korrelation zwischen Kraft und Dehnung am Beispiel einer trockenen M8 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=0,55$ m/s	20
4.7	Gemittelte Bruchkraft von M6 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	22
4.8	Gemittelte Bruchkraft von M8 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	23

4.9	Gemittelte Bruchkraft von M10 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	24
4.10	Gemittelte Maximalkraft von M6 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	25
4.11	Gemittelte Maximalkraft von M8 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	26
4.12	Gemittelte Maximalkraft von M10 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	27
4.13	Gemittelte Bruchdehnung von M6 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	28
4.14	Gemittelte Bruchdehnung von M8 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	29
4.15	Gemittelte Bruchdehnung von M10 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus	30
4.16	Kraftverlauf über der Zeit von gesättigten M6 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 0,1 m/s	31
4.17	Kraftverlauf über der Zeit von trockenen M6 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 0,006 m/s	33
4.18	Kraftverlauf über der Zeit von raumfeuchten M10 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 1,3 m/s	34
4.19	Kraftverlauf über der Zeit von trockenen M10 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 0,55 m/s	35
4.20	Dehnungskurve von trockenen M10 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 1,06 m/s	36
4.21	Spannungs-/Dehnungsdiagramm; M8; gesättigt; 0,55 m/s	37
4.22	Spannungs-/Dehnungsdiagramm; M10; 0,1 m/s	38
4.23	Spannungs-/Dehnungsdiagramm; M8; 0,55 m/s	38
4.24	Spannungs-/Dehnungsdiagramm; M8; 1,3 m/s	39

4.25	Aufnahme der Bruchstelle einer trockenen M10 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=1,3$ m/s mit dem Rasterelektronenmikroskop	40
4.26	Aufnahme der Bruchstelle einer gesättigten M6 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=0,55$ m/s mit dem Rasterelektronenmikroskop	41
4.27	Aufnahme der Bruchstelle einer raumfeuchten M6 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=0,1$ m/s mit dem Rasterelektronenmikroskop	42
5.1	Vergleich der Bruchkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M6 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte	44
5.2	Vergleich der Bruchkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M8 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte	45
5.3	Vergleich der Bruchkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M10 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte	47
7.1	Vergleich der Maximalkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M6 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte	XXIII
7.2	Vergleich der Maximalkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M8 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte	XXIII
7.3	Vergleich der Maximalkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M10 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte	XXIV
7.4	Masseabnahme einer gesättigten M8 Schraube über die Zeit durch Trocknung	XXIV

7.5	Masseabnahme einer raumfeuchten M8 Schraube über die Zeit durch Trocknung	XXV
7.6	Masseabnahme einer gesättigten M10 Schraube über die Zeit durch Trocknung	XXV
7.7	Masseabnahme einer raumfeuchten M10 Schraube über die Zeit durch Trocknung	XXVI

Tabellenverzeichnis

2.1	Unterteilung nach Staubexplosionsklassen	5
4.1	Feuchtegehalt der Schrauben am Versuchstag	14
4.2	Versuchsprogramm	16
7.1	Ergebnisübersicht M6, trocken	XVI
7.2	Ergebnisübersicht M6, raumfeucht	XVII
7.3	Ergebnisübersicht M6, gesättigt	XVII
7.4	Ergebnisübersicht M8, trocken	XVIII
7.5	Ergebnisübersicht M8, raumfeucht	XVIII
7.6	Ergebnisübersicht M8, gesättigt	XIX
7.7	Ergebnisübersicht M10, trocken	XIX
7.8	Ergebnisübersicht M10, raumfeucht	XX
7.9	Ergebnisübersicht M10, gesättigt	XX
7.10	Vergleichsübersicht neu/alt; M6; trocken	XXI
7.11	Vergleichsübersicht neu/alt; M6; raumfeucht	XXI
7.12	Vergleichsübersicht neu/alt; M6; gesättigt	XXI
7.13	Vergleichsübersicht neu/alt; M8; trocken	XXI
7.14	Vergleichsübersicht neu/alt; M8; raumfeucht	XXII
7.15	Vergleichsübersicht neu/alt; M8; gesättigt	XXII
7.16	Vergleichsübersicht neu/alt; M10; trocken	XXII
7.17	Vergleichsübersicht neu/alt; M10; raumfeucht	XXII
7.18	Vergleichsübersicht neu/alt; M10; gesättigt	XXII
7.19	Vergleichsübersicht Zugfestigkeit neu/alt; M6	XXVII

7.20	Vergleichsübersicht Zugfestigkeit neu/alt; M8	XXVII
7.21	Vergleichsübersicht Zugfestigkeit neu/alt; M10	XXVII

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A_E	m^2	Druckentlastungsfläche
D	m	Durchmesser
dF/dt	N/s	Belastungsanstiegsgeschwindigkeit
$\overline{dF/dt}$	N/s	mittlere Belastungsanstiegsgeschwindigkeit
dp/dt	bar/s	Druckanstiegsgeschwindigkeit
E_f	%	Entlastungsfähigkeit einer Explosionsklappe
E	MPa	Elastizitätsmodul
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
F_{Bruch}	N	Bruchkraft
\bar{F}_{Bruch}	N	mittlere Bruchkraft
F_{max}	N	Maximalkraft
\bar{F}_{max}	N	mittlere Maximalkraft
K_{St}	bar · m/s	sicherheitstechnische Kenngröße
L	m	Abstand zwischen Zündort und Mitte der Entlastungsfläche
L_u	m	Länge nach Bruch
L_0	m	Anfangslänge
m	kg	Masse
n	-	Anzahl
p	bar, Pa	Druck
p_{stat}	bar, Pa	statischer Ansprechdruck
p_{dyn}	bar, Pa	dynamischer Ansprechdruck
p_{max}	bar, Pa	maximaler Explosionsdruck
p_{red}	bar, Pa	reduzierter Explosionsdruck
R_m	MPa	Zugfestigkeit
t	s	Zeit

t_{Bruch}	s	Bruchzeitpunkt
\bar{t}_{Bruch}	s	mittlerer Bruchzeitpunkt
v	m/s	Geschwindigkeit
x	-	Koordinate
y	-	Koordinate
\bar{W}	%	mittlere Volumenzunahme
σ	MPa; diverse	mechanische Spannung; Standardabweichung
ϵ	%	Dehnung
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$	%	mittlere Bruchdehnung
ω	U/s	Drehzahl

Zusammenfassung

Im Rahmen vorliegender Arbeit wurden gedrehte Polyamid 6.6 Schrauben aus Vollmaterial bezüglich ihres Bruchverhaltens in Abhängigkeit von Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und Materialfeuchte untersucht. Ziel war hierbei die Erkenntnis, inwieweit diese zum Einsatz beim Verschluss von Explosionsklappen kommen können. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse mit jenen der Spritzguss-schrauben verglichen, welche in einer vorhergehenden Versuchsreihe untersucht wurden. Dabei zeigte sich, dass Spritzguss-schrauben zahlreiche, größere Fehlstellen im Material beinhalten, was zu einem nicht zuverlässig prognostizierbaren und reproduzierbaren Verhalten führt. Konkrete Fragestellung dieser Arbeit war außerdem, ob Spritzguss-schrauben generell bei niedrigeren Kräften versagen und dabei in der Praxis verwendet werden können, wobei die Zulassung mittels gedrehten Vollmaterials-schrauben durchgeführt wird.

Es wurde festgestellt, dass die Materialfeuchte einen wesentlich größeren Einfluss auf das Bruchverhalten der Schrauben nimmt als die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit. Aufgrund der Versprödung wurde für trockene Schrauben eine Bruchdehnung von bis zu 10,2 % ermittelt, während diese bei den gesättigten, zähen Schrauben bis zu 77,4 % erreicht.

Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass die Kraftverläufe der Vollmaterials-schrauben bei verschiedenen Größen erwartungsgemäß weitestgehend identisch sind und sich lediglich betragsmäßig unterscheiden. Das Bruchverhalten ist daher zuverlässig und reproduzierbar.

Es konnte nicht zweifelsfrei ermittelt werden, ob gedrehte Polyamidschrauben aus Vollmaterial tatsächlich in jedem Falle bei höheren Kräften versagen als Spritzguss-schrauben. Bei genauerer Ergebnisbetrachtung der Spritzguss-schrauben verglichen mit jener der Vollmaterials-schrauben sind Teile der Ergebnisse erstgenannter jedoch kritisch zu hinterfragen. Es sind daher erneute Versuche mit Spritzguss-schrauben notwendig, um das zukünftige Vorgehen bezüglich Zulassungsverfahren und Praxistauglichkeit zu bestimmen.

1 Einleitung

Brennbare Stoffe verkörpern grundsätzlich ein Gefahrenpotential für Explosionen. Gase, Flüssigkeiten, aber auch Stäube sind unter bestimmten Voraussetzungen entflammbar, wobei die Erkenntnis über die Entflammbarkeit letztgenannter vergleichsweise jung ist. Im Jahre 1844 war es M. Faraday, der bewies, dass Kohlenstaub explosionsfähig ist. Im Nahrungsmittel- und Gastgewerbe treten häufig Mehlstäube auf, deren Explosionspotential im Jahre 1878 von R. Weber belegt wurde (vgl. Bartknecht 1993: 151). Staubexplosionen können verheerende Folgen für Anlagen und Menschen nach sich ziehen - nicht selten mit tödlichem Ausgang. Da sich die Auftretenswahrscheinlichkeit nicht immer vollständig eliminieren lässt, gilt es, durch konstruktive Maßnahmen den möglichen Schaden einer Explosion zu reduzieren. Häufig kommen bei Silos und Filteranlagen sog. Explosionsklappen zum Einsatz, die das Ausmaß einer Explosion in einem tolerierbaren Rahmen halten sollen. Explosionsklappen werden in die Wandung von Anlagen integriert und eröffnen im Explosionsfall ihre Entlastungsfläche A_E , sobald ein definierter statischer Ansprechdruck p_{stat} erreicht wird. Dabei kommt es zum Austritt von unverbranntem Staub/Luft-Gemisch sowie Verbrennungsprodukten, wodurch der interne Druck lediglich den reduzierten Explosionsdruck p_{red} erreicht. Dieser muss zwingend unterhalb der Behälterfestigkeit liegen (vgl. Bartknecht 1993: 444 f.). In der Praxis werden häufig Polyamidschrauben verwendet, welche die beweglich gelagerten Explosionsklappen fixieren. Diese sollen beim Erreichen des statischen Ansprechdrucks p_{stat} reißen, wobei sich die Explosionsklappen öffnen und ventilartig den Explosionsdruck beschränken. Aufgrund der Massenträgheit des Klappendeckels liegt der tatsächliche Ansprechdruck oberhalb des definierten statischen Ansprechdrucks p_{stat} und wird als dynamischer Ansprechdruck p_{dyn} deklariert (vgl. Bartknecht 1993: 720).

Abbildung 1.1 zeigt eine Explosionsklappe, montiert an einem 1m³-Behälter.

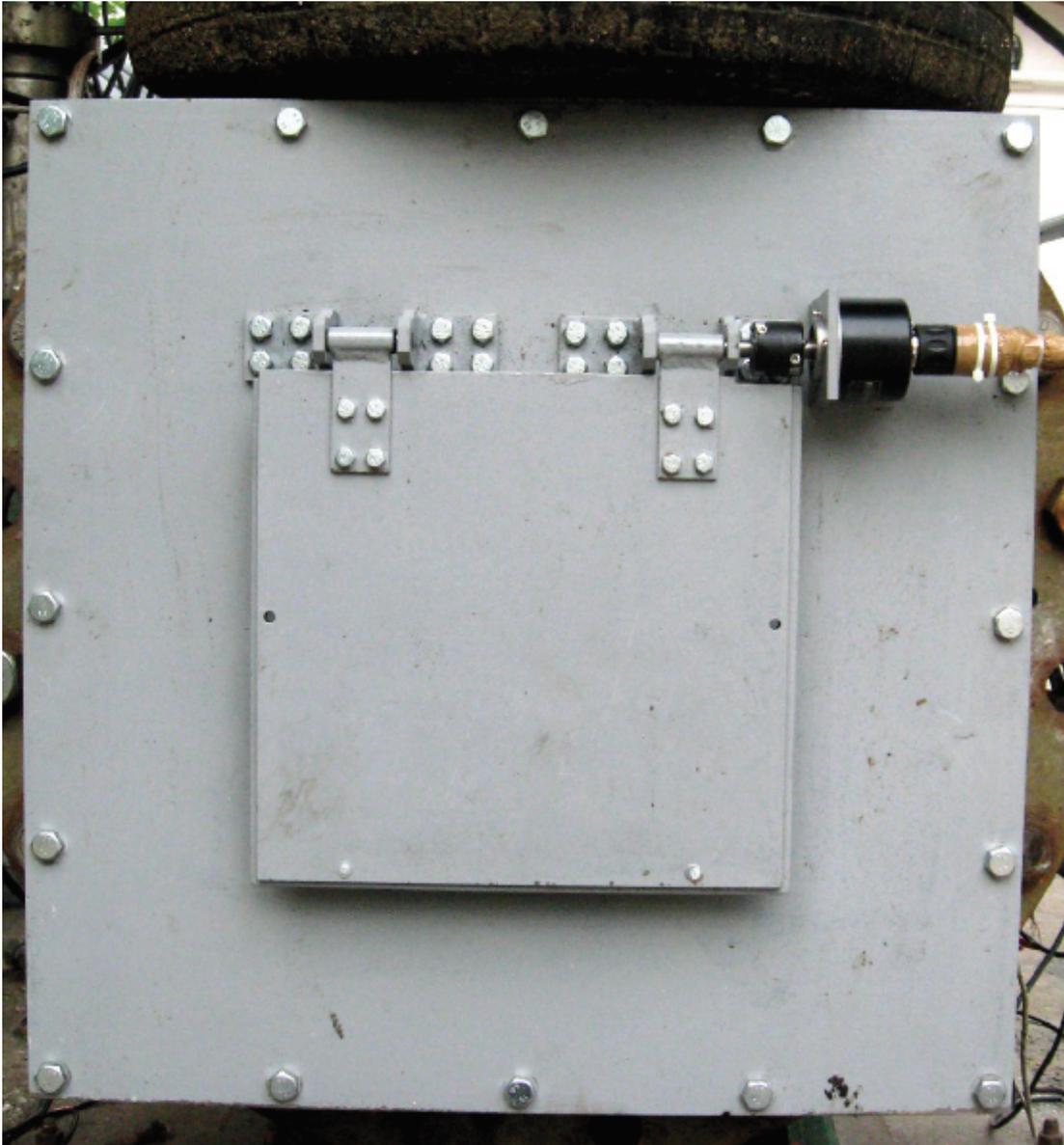


Abbildung 1.1: Explosionsklappe am 1m³-Behälter (Quelle: Chupin 2009: 23)

1.1 Aktueller Stand

In einer vorhergehenden Arbeit (vgl. König 2021) wurden gängige, nach dem Spritzgussverfahren hergestellte Polyamidschrauben hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit zum Verschließen von Explosionsklappen untersucht. Eine eigens dafür entwickelte Versuchsanlage simuliert hierbei Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten, die bei Staubexplosionen auf Klappenverschlusschrauben wirken. Ein weiterer Versuchsparameter war außerdem die Materialfeuchte, die einen signifikanten Ein-

fluss auf das Bruchverhalten (Bruchkraft, Bruchdehnung und Belastungsdauer) sowie auf E-Modul und Bruchart hat. Ein Anstieg der Materialfeuchte resultiert in einer reduzierten Bruchkraft F_{Bruch} , einer gesteigerten Bruchdehnung $\varepsilon_{\text{Bruch}}$ und einem späteren Bruchzeitpunkt t_{Bruch} sowie einem abnehmenden E-Modul in Relation zum Auslegungsfall. Bei einer Feuchtigkeitsabnahme konnten keine allgemeingültigen Korrelationen festgestellt werden. Aus Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop ging hervor, dass trockene Polyamidschrauben ein sprödes Bruchverhalten aufweisen, wohingegen für gesättigte Polyamidschrauben ein duktiler Bruchverhaltenscharakteristisch ist. Kritisch zu beurteilen ist außerdem die gewonnene Erkenntnis, dass bei 75 % aller untersuchten Schrauben Fehlstellen vorzufinden waren, die das Material schwächen. Des Weiteren konnte für raumfeuchte Schrauben keine Korrelation zwischen Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und Bruchkraft nachgewiesen werden. Während bei M6-Schrauben eine erhöhte Belastungsanstiegsgeschwindigkeit mit einem Anstieg der Bruchkraft einhergeht, wurde für M8-Schrauben keine eindeutige und für M10-Schrauben gar eine reziproke Abhängigkeit ermittelt. Erklären lässt sich dieses Verhalten durch Fehlstellen im Material. Aufgrund der nicht reproduzierbaren und teils widersprüchlichen Ergebnisse ist der Einsatz jener Spritzguss-Polyamidschrauben als sicherheitsrelevanter Klappenverschlussmechanismus zum Erreichen eines definierten dynamischen Ansprechdrucks äußerst bedenklich. Eine zuverlässige und prognostizierbare Funktionalität ist trotz erfolgreich geprüfter Schutzeinrichtung mit spritzgegossenen Polyamidschrauben als Verschlussmechanismus u. U. nicht oder lediglich rudimentär gewährleistet. Die Schrauben brechen unter nicht vorhersehbaren Bedingungen. Der dynamische Ansprechdruck wird möglicherweise überstiegen, was zum Überschreiten der Behälterfestigkeit führen kann.

1.2 Zielsetzung

Basierend auf den Versuchsergebnissen rücken nun Polyamidschrauben aus gedrehtem Vollmaterial in den Fokus. Da diese keine Fehlstellen aufweisen, ist davon auszugehen, dass gedrehte Polyamidschrauben aus Vollmaterial bei höheren Kräften versagen und eine geringere Streuung aufweisen. Dabei ließe sich das Bruchverhalten eindeutig charakterisieren und klare Zusammenhänge

würden ersichtlich. Die gedrehten Schrauben sollen nun analog zu den spritzgegossenen Schrauben in Abhängigkeit von Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und Materialfeuchte untersucht werden, wobei folgende zentrale Fragestellungen im Fokus stehen:

1. Wie hängen die Bruchkraft und die Bruchdehnung der gedrehten Polyamidschrauben von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit ab?
2. Wie hängen die Bruchkraft und die Bruchdehnung von der Materialfeuchte der gedrehten Polyamidschrauben ab?
3. Welche anderen Faktoren beeinflussen das Bruchverhalten von gedrehten Polyamidschrauben?
4. Kann die Zulassung mit gedrehten Schrauben erfolgen, wobei in der Praxis jedoch weiterhin Spritzgusschrauben zum Einsatz kommen, da diese zuverlässig bei geringeren Kräften brechen und der dynamische Ansprechdruck daher nicht überschritten wird?

1.3 Lösungsweg

Mit Hilfe der Versuchsanlage werden die gedrehten Polyamidschrauben auf ihre Zugfestigkeit untersucht. Hierfür werden zunächst Schrauben verschiedener Gewindestärken auf unterschiedliche Materialfeuchtigkeiten konditioniert. Dabei wird zwischen den Feuchtigkeitsniveaus *trocken*, *raumfeucht* und *gesättigt* (maximal mögliche Wasseraufnahme des Materials) differenziert. Nach Durchführung der Versuchsreihe erfolgt die Datenauswertung. Ergänzend werden einige Bruchstellen mit dem Elektronenmikroskop untersucht und dargestellt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen die vier zentralen Fragen der Zielsetzung beantworten und finalerweise Aufschluss über die Einsetzbarkeit von gedrehten und spritzgegossenen Polyamidschrauben zum Verschließen von Explosionsklappen geben.

2 Grundlagen

2.1 Sicherheitstechnische Grundlagen

Zentrale Faktoren bei der Charakterisierung des Explosionsverhaltens von brennbaren Staub/Luft-Gemischen sind die beiden sog. Explosionskenngrößen K_{St} und p_{max} . K_{St} ist definiert als die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit bei einer Explosion in einem geschlossenen Behälter bei optimaler Staub/Luft-Konzentration. Der zeitliche Maximalwert des Explosionsdrucks in einem Behälter, ebenfalls unter optimaler Konzentration des Staub/Luft-Gemischs, wird durch p_{max} deklariert (vgl. Bartknecht 1993: 42). Beide Kenngrößen werden unter standardisierten Versuchsbedingungen gemessen. Für die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit gilt das kubische Gesetz (Formel 2.1), nach dem der K_{St} -Wert volumenunabhängig sowie staubspezifisch ist und mit dem Wert des maximalen zeitlichen Druckanstiegs $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ korreliert. (vgl. Bartknecht 1993: 43)

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

Je nach K_{St} -Wert werden Staubexplosionen in drei Staubexplosionsklassen unterteilt (vgl. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Unterteilung nach Staubexplosionsklassen

Staubexplosionsklasse	K_{St} (bar · m/s)
1	> 0 - 200
2	> 200 - 300
3	> 300

(vgl. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) 2012)

2.2 Dimensionierung von Explosionsklappen

Bei der Dimensionierung von Explosionsklappen gilt es, die notwendige Druckentlastungsfläche A_E zu ermitteln, um den Explosionsdruck soweit zu reduzieren, dass die Behälterfestigkeit nicht überschritten wird. Eine Möglichkeit liegt in der Anwendung von Formel 2.2 nach EN 14491.

$$A_E = \left((3,26 \cdot 10^{-5} p_{\max} K_{St} p_{\text{red,max}}^{-0,569} + 0,27 (p_{\text{stat}} - 0,1) p_{\text{red,max}}^{-0,5}) V^{0,753} \right) \cdot (1 + (0,758 - 4,305 \log(p_{\text{red,max}})) \log(L/D)) \frac{E_f}{100} \quad (2.2)$$

L steht in der Formel dabei für den maximalen möglichen Abstand zwischen Zündort und Zentrum der Entlastungsfläche. D und V verkörpern den Durchmesser bzw. das Volumen des Behälters. E_f berücksichtigt die Massenträgheit einer Explosionsklappe. p_{\max} definiert den maximalen, durch die Explosion verursachten Druck, $p_{\text{red,max}}$ den maximalen, unter Einsatz der Explosionsklappen auftretenden Druck. Vereinfachend kann die notwendige Druckentlastungsfläche auch mithilfe von sog. Nomogrammen wie in Abbildung 2.1 ermittelt werden.

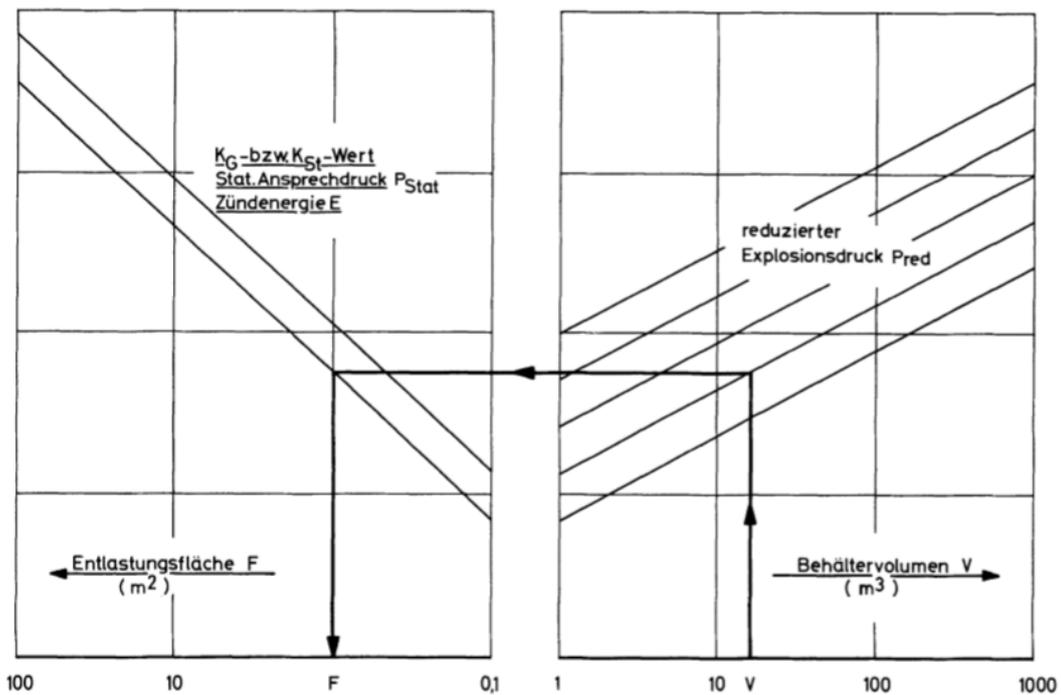


Abbildung 2.1: Nomogramm zur Ermittlung der notwendigen Druckentlastungsfläche von Explosionsklappen; Quelle: Bartknecht 1993: 109

2.3 Polyamid als Werkstoff

Bei Polyamiden handelt es sich im Generellen um stickstoffhaltige Thermoplaste, deren Grundbausteine (CH₂) durch Carbonsäureamidgruppen miteinander verknüpft sind. Dies impliziert bereits, dass die mechanischen Eigenschaften von Polyamiden u. a. temperaturabhängig sind. Weitere Einflussgrößen stellen die Materialfeuchte und Belastungsanstiegsgeschwindigkeit dar. Allgemein zeichnen sich Polyamide durch eine hohe Steifigkeit, Härte und Festigkeit, eine hohe Wärmeformbeständigkeit sowie einen hohen Verschleißwiderstand aus (vgl. Domininghaus et al. 2008: 638). Die Schrauben, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, sind aus Polyamid 6.6 (PA6.6) gefertigt. Diese Bezeichnung ergibt sich aus der chemischen Zusammensetzung, wobei PA6.6 aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure besteht und durch eine große Härte, Steifigkeit, Abriebfestigkeit und Formbeständigkeit in der Wärme charakterisiert ist (vgl. Domininghaus et al. 2008: 640). Zum Verschließen von Explosionsklappen werden Schrauben aus PA6.6 zum einen aufgrund ihres günstigen Preises verwendet, zum anderen lassen sich Polyamidschrauben einfach dimensionieren und herstellen.

2.3.1 Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften von Polyamid 6.6

2.3.1.1 Temperatur und Feuchte

Für Polyamide gilt im Allgemeinen, dass sie im trockenen Zustand hart/spröde und im gesättigten Zustand zäh/verschleißfest sind. Außerdem geht mit einer reversiblen Wasseraufnahme stets eine Volumenänderung einher, welche sich auf die Maßhaltigkeit auswirkt (vgl. Domininghaus et al. 2008: 645). Das Aufnahmepotential von Wasser hängt dabei von der jeweiligen chemischen Zusammensetzung ab und ist auf die vergleichsweise hohe Anzahl an Amidgruppen zurück zu führen. Für PA6.6 gilt eine Aufnahmefähigkeit von 8,5 % (vgl. Domininghaus et al. 2008: 644). Neben der Feuchtigkeit nimmt die Temperatur ebenfalls erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes. Beide Faktoren wirken synergetisch.

Abbildung 2.2 zeigt die Wechselwirkungen zwischen Luftfeuchte (und damit Materialfeuchtigkeit), Zugversuchstemperatur und Bruchspannung σ_{Bruch} . Hieraus wird ersichtlich, dass σ_{Bruch} mit zunehmender Temperatur bzw. Feuchtigkeit abnimmt.

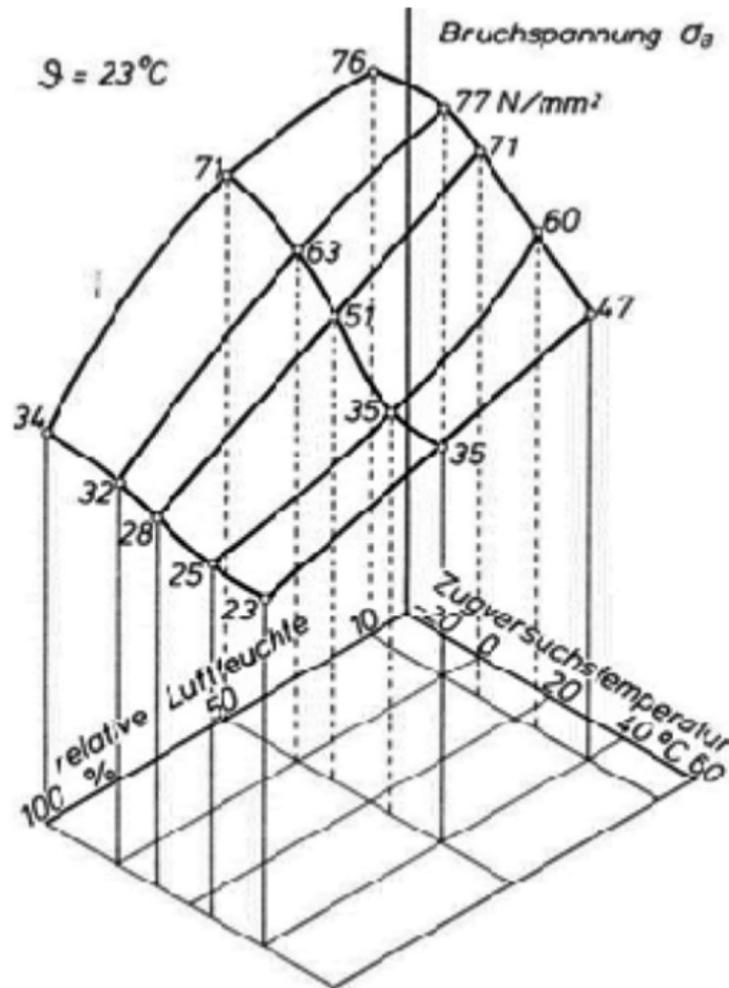


Abbildung 2.2: Wechselwirkungen Luftfeuchte/Temperatur/Bruchspannung bei unverstärktem Polyamid 6 (Quelle: Lutterbeck 1984: 61)

2.3.1.2 Belastungsanstiegsgeschwindigkeit

Die mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten, zu denen Polyamide zählen, sind neben Temperatur und Feuchtigkeit außerdem abhängig von der Belastungsanstiegsgeschwindigkeit. Nimmt diese zu, so verhält sich der Werkstoff zunehmend spröde. Dieser Effekt lässt sich auf die Polymerketten zurückführen, die mit schneller werdender Belastung weniger Zeit haben, sich zu entschlafen oder aneinander abzugleiten und schließlich zerreißen.

Abbildung 2.3 visualisiert den Einfluss der Deformationsgeschwindigkeit im Zugversuch auf den Ursprungsmodul E_0 . Es wird deutlich, dass die tangentielle Steigung von E_0 bei höherer Deformationsgeschwindigkeit steiler wird. Dies hat zur Folge, dass die Dehnung ϵ bei zunehmender mechanischer Spannung σ vergleichsweise gering und die Duktilität entsprechend reduziert ist. (vgl. Stommel/Korte 2011: 25)

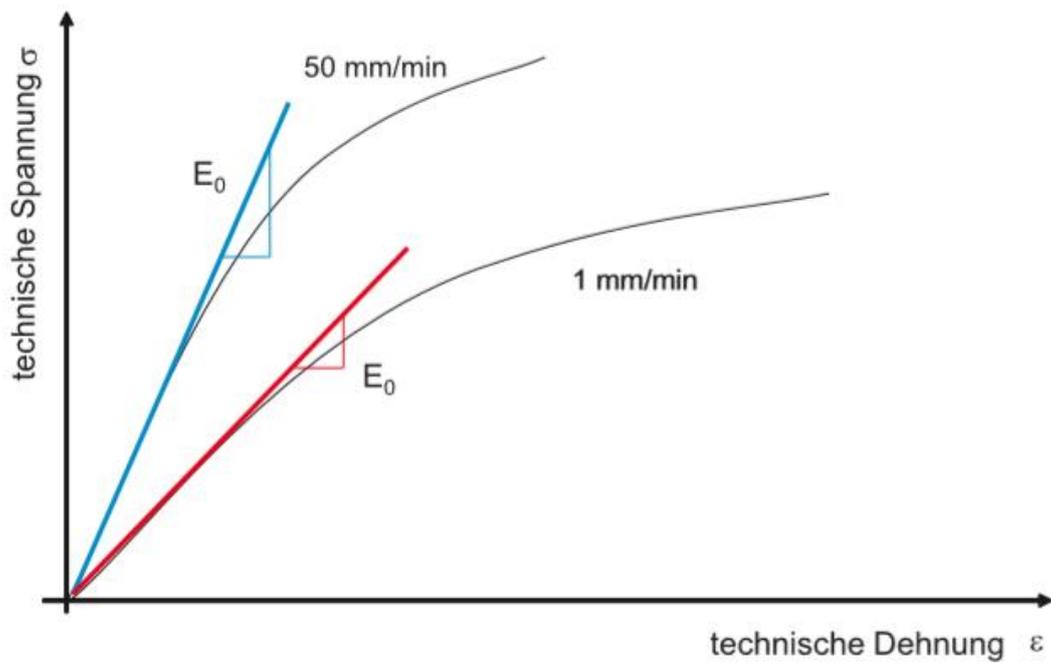


Abbildung 2.3: Einfluss der Deformationsgeschwindigkeit auf den Ursprungsmodul E_0 (Quelle:Stommel/Korte 2011: 27)

3 Aufbau der Versuchsapparatur

Zentrale Funktionseinheit ist ein Motor (1), welcher eine Spindel (5) antreibt. Diese ist über eine Mutter inklusive Trapezgewinde und Wälzkörpern (3) mit einem Schlitten (7) gekoppelt, der entlang der Spindel in eine translatorische Bewegung versetzt wird. Trifft der Schlitten auf die Einspannvorrichtung, so wird auf die eingespannte Polyamidschraube eine Zugkraft ausgeübt, welche schließlich zum Versagen dieser führt. Die Abbildungen 3.1/3.2 zeigen den detaillierten Aufbau der Versuchsapparatur.

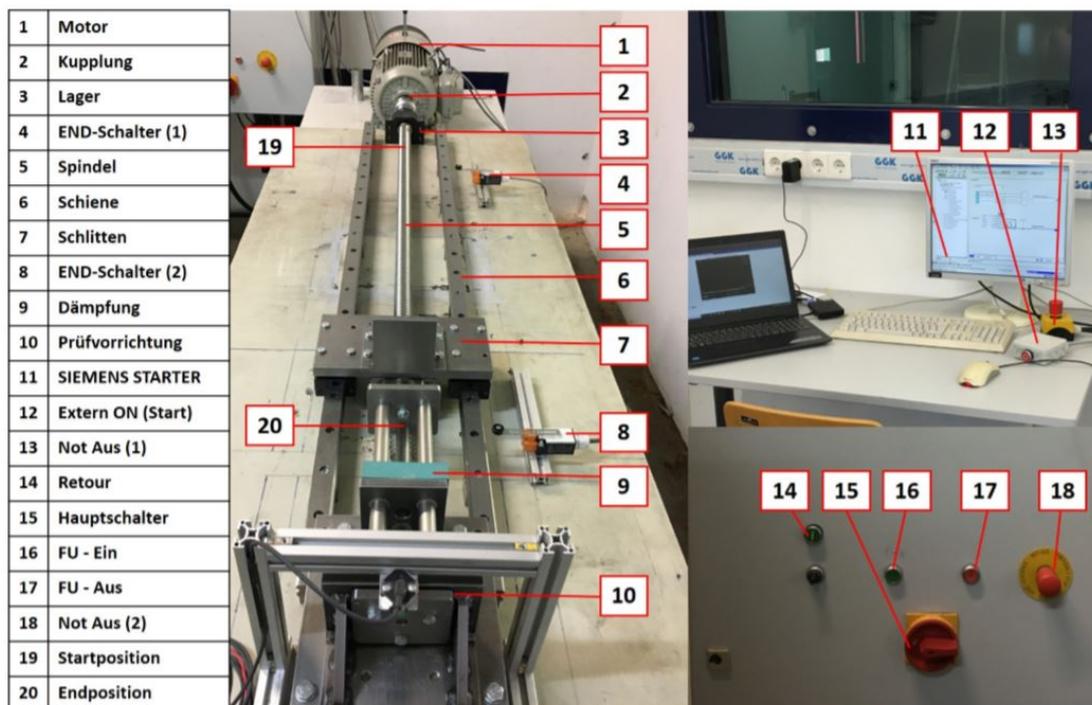


Abbildung 3.1: Aufbau der Versuchsapparatur Teil 1 (Quelle: König 2021: 12)

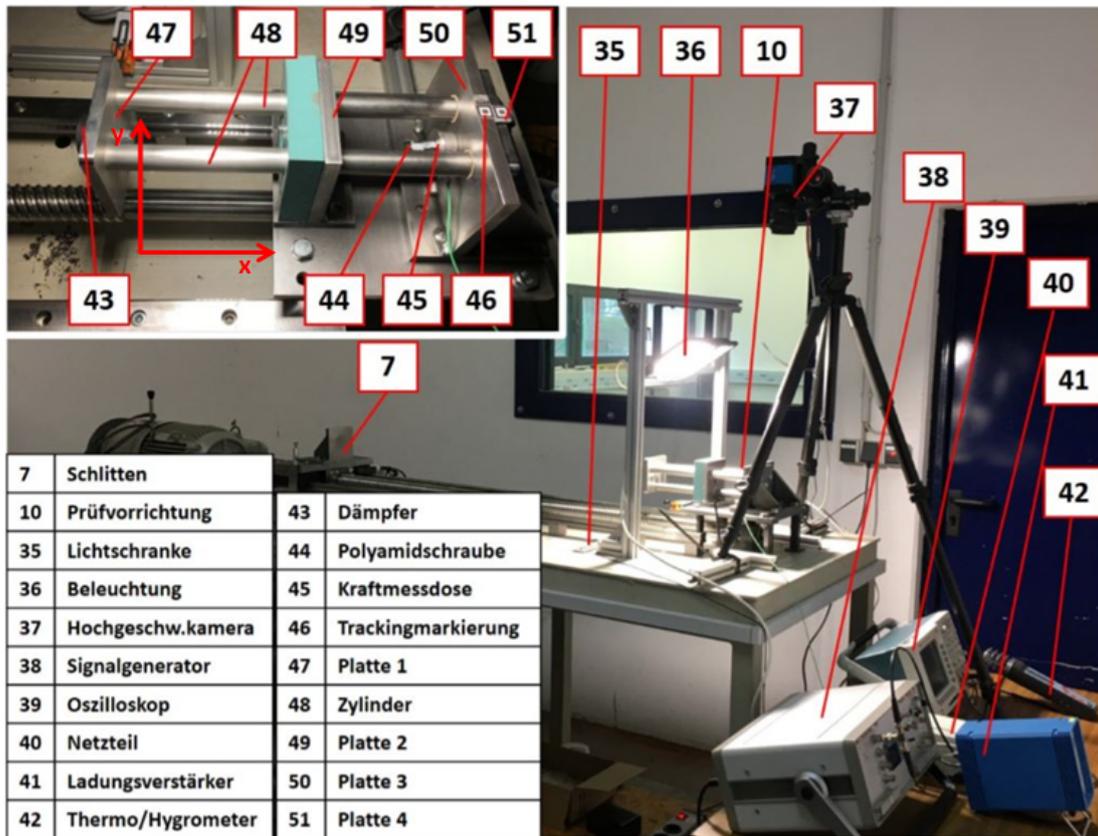


Abbildung 3.2: Aufbau der Versuchsanordnung Teil 2 (Quelle: König 2021: 20)

Nach Versuchsbeginn beschleunigt der Schlitten (7), trifft auf den Dämpfer (43) und überträgt die Kraft auf Platte 1 (47). Die Messung wird bereits mit Passieren der Lichtschranke (35) gestartet und Hochgeschwindigkeitskamera (37) sowie Transientenrekorder (in Abbildung Oszilloskop) (39) werden aktiviert. Platte 1 ist über die drei Zylinder (48) mit Platte 4 (51) und der Prüfvorrichtung (10) verbunden. In Letztgenannter wird die Schraube eingespannt. Die Gleitlager in Platte 2/3 (49/50) fungieren dabei als Führung und ermöglichen eine axiale Bewegung der Zylinder. Die durch den Schlittenstoß induzierte Axialverschiebung in positiver x-Richtung der beweglichen Einheiten belastet die eingespannte Schraube auf Zug und verursacht schließlich den Bruch. Die resultierende Kraft wird von der Kraftmessdose (45) und dem Ladungsverstärker (41) erfasst. Dieser gibt das Spannungs-Zeit-Signal an den Transientenrekorder weiter. Neben den Kraftdaten ermöglicht die Hochgeschwindigkeitskamera weitere Aussagen bezüglich des Bruchverhaltens. Über Trackingmarkierungen (46) lässt sich die zurückgelegte Strecke von Platte 4 zeitabhängig bis zum Bruch ermitteln und die Dehnung der Schraube somit bestimmen.

4 Experimenteller Teil

4.1 Versuchsablauf

Abhängig von der gewünschten Belastungsanstiegsgeschwindigkeit ist zunächst die entsprechende Motordrehzahl festzulegen. Der Ladungsverstärker wird aktiviert, die zu untersuchende Schraube zwischen die Platten 3 und 4 geschoben, mit einer Kraftmessdose eingespannt und mit zwei Metallmuttern mithilfe eines Drehmomentschlüssel auf 1 Nm festgezogen. Sobald alle Messgeräte sowie die Beleuchtung eingeschaltet sind, kann die Messung von der Messperson gestartet werden. Abschließend werden die Messdaten gespeichert und die Schraubenbruchstücke visuell untersucht. Um im weiteren Verlauf Erkenntnis über den Feuchtigkeitsgehalt je nach Konditionierung zu gewinnen, wird jede Schraube bzw. deren auffindbare Fragmente gewogen und anschließend in den Trockenschrank gelegt. Nach Abschluss kann der Schlitten wieder in Startposition gefahren werden und der nächste Versuch erfolgen.

4.2 Anlagenanpassung und Versuchsgrenzen

Im Vorfeld der Versuchsreihe musste die Versuchsanlage zunächst gemäß aktueller Sicherheitsanforderungen optimiert werden. Im Zuge dessen erfolgte eine Umverdrahtung der verbindungsprogrammierten Steuerung über ein separates Bedientableau. Die Steuerleitung des Tableaus wurde durch eine Wandöffnung vom Versuchs- in den Bedienerraum geführt sodass eine sichere Bedienung der Versuchsanlage gewährleistet ist. Um die Anlage im Notfall sicher und unmittelbar stoppen zu können, wurde außerdem eine Not-Aus-Fernsteuerung im Bedienerraum platziert. Am Schaltschrank selbst wurden sämtliche Taster zur ursprünglichen Versuchsdurchführung blindgelegt. Diese Maßnahme verhindert, dass die Prüfanlage weiterhin im Versuchsraum bedienbar ist und somit Gefahr von beweglichen Komponenten sowie umherfliegenden Schraubenteilen ausgeht.

Abbildung 4.1 zeigt das fertig verdrahtete Bedientableau.

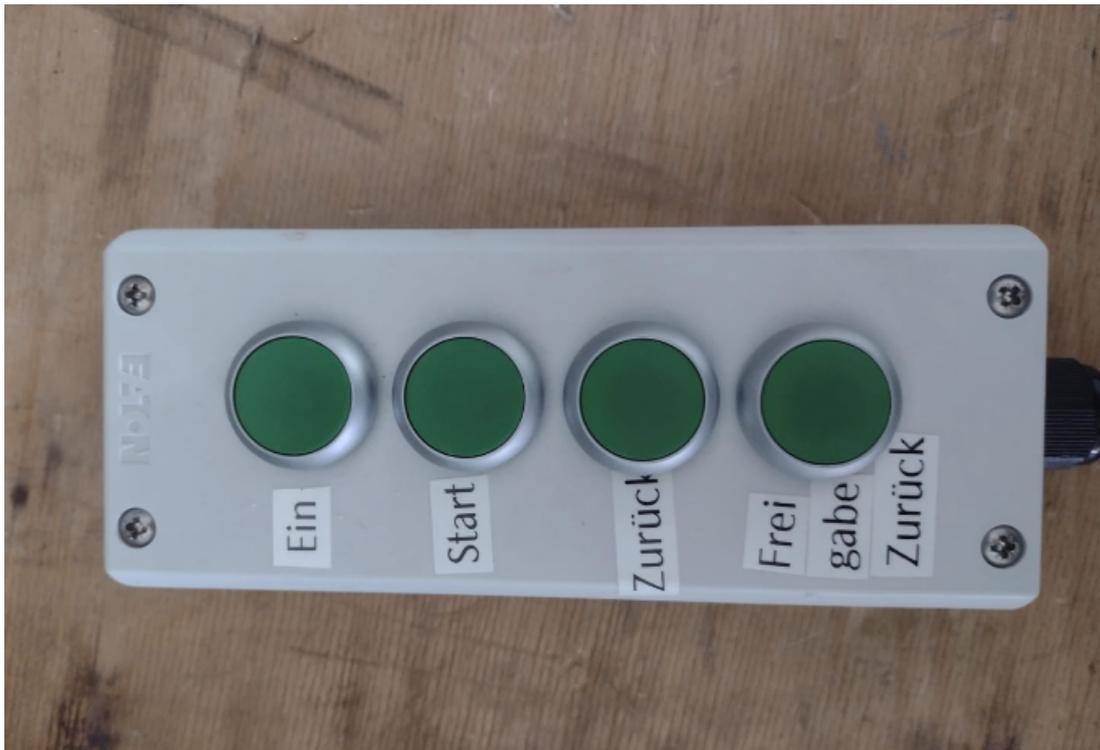


Abbildung 4.1: Bedientableau

Taster *Ein* aktiviert den Frequenzumrichter. Mit dem Taster *Start* wird der Versuch gestartet. Das Zurückfahren des Schlittens nach dem Versuch erfolgt durch die beiden Taster *zurück* und *Freigabe zurück*.

Für Schrauben der Stärken M6 und M8 im gesättigten Zustand reichte die ursprüngliche Wegstrecke des Schlittens bei den Frequenzen 0,3 Hz und 5 Hz nicht aus. Aufgrund der hohen Zähigkeit kam es daher lediglich zu einer plastischen Verformung aber nicht zum Bruch. Hierfür wurde der Schlittenbock eine Lochreihe nach vorne in Fahrtrichtung versetzt und die Belastungsstrecke somit verlängert. In Folge dessen konnten die Versuche unter diesen Bedingungen erfolgreich durchgeführt werden.

Für die M10 Schrauben war die Drehfrequenz von 0,3 Hz nicht ausreichend, um die Schraube bis zum Bruch zu belasten. Ursache hierfür ist das zu geringe Drehmoment des Motors bei niedrigen Drehzahlen. Somit konnten für diese Versuchsreihe keine Daten generiert werden. Nach leichter Verformung der Schraube blieb der Schlitten bereits stehen.

Im Verlauf der Versuchsreihe versagte die Trapezgewindemutter und wurde durch

ein Ersatzteil ausgetauscht.

Aufgrund einer instabilen elektrischen Verbindung der Kamera sind einige Aufnahmen unbrauchbar, sodass nicht zu allen Versuchen Kameradaten vorliegen.

4.3 Konditionieren der Schrauben

Die Versuchsreihe soll u. a. Aufschluss über das Verhalten der Schrauben unter verschiedenen Feuchtigkeitsbedingungen geben. Dafür wurden die Schrauben in drei Klassen unterteilt: trocken, raumfeucht und feuchtigkeitsgesättigt.

Die Trocknung erfolgte in einem Trockenschrank bei 60° C binnen 60 Tagen. Das gewünschte Feuchtigkeitsniveau zur Sättigung wurde zeitgleich durch Einlagerung in Wasser erreicht. Dieser Zeitraum ist ausreichend, um eine vollständige Trocknung/Sättigung zu gewährleisten (vgl. König 2021: 23). Da die Schrauben unmittelbar nach jedem Versuch gewogen wurden, konnte durch anschließendes Trocknen in Kombination mit erneutem Wiegen der Feuchtigkeitsverlust und dementsprechend der Feuchtegehalt am Versuchstag bestimmt werden. Tabelle 4.1 enthält die Mittelwerte des Feuchtegehalts \bar{W} am Versuchstag.

Tabelle 4.1: Feuchtegehalt der Schrauben am Versuchstag

Schraubengröße	Konditionierung	\bar{W}	σ_w [%]
M6	trocken	0	-
M6	raumfeucht	0,75	0,12
M6	gesättigt	7,71	0,21
M8	trocken	0	-
M8	raumfeucht	1,01	0,09
M8	gesättigt	5,25	0,26
M10	trocken	0	-
M10	raumfeucht	0,81	0,07
M10	gesättigt	4,40	0,40

Die Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen den Masseverlauf von M6 Schrauben über der Zeit durch Trocknung. Aus den Abbildungen 7.4-7.7 im Anhang gehen analog dazu die Masseverläufe für M8 und M10 Schrauben hervor.

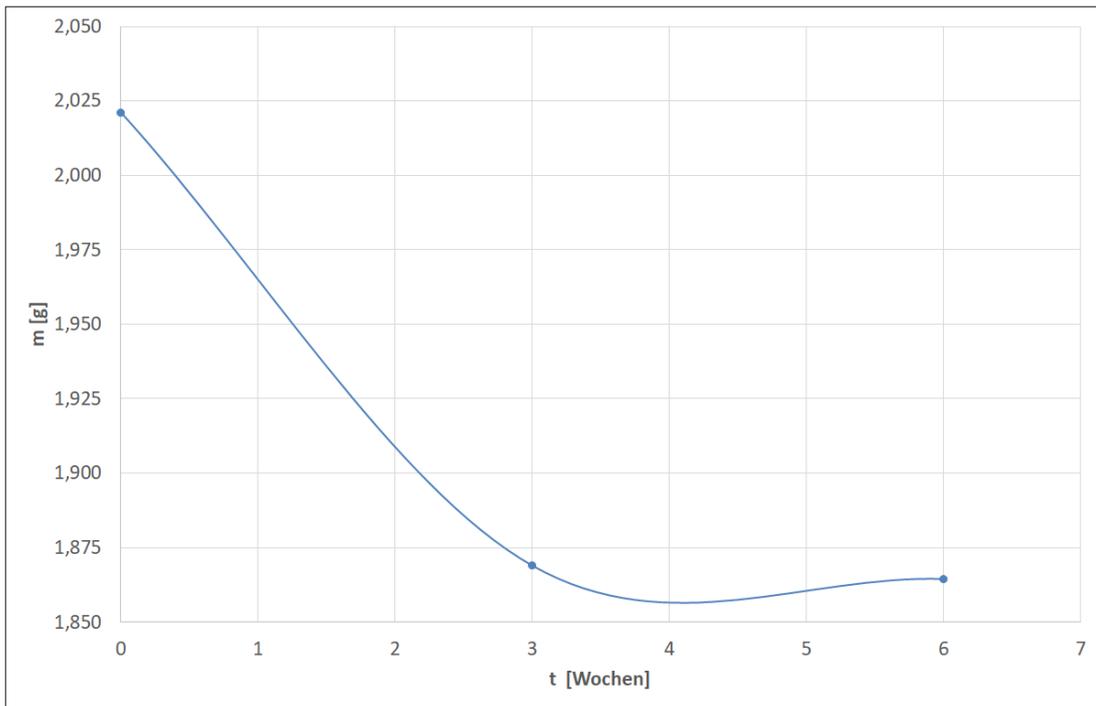


Abbildung 4.2: Masseabnahme einer gesättigten M6 Schraube über der Zeit durch Trocknung

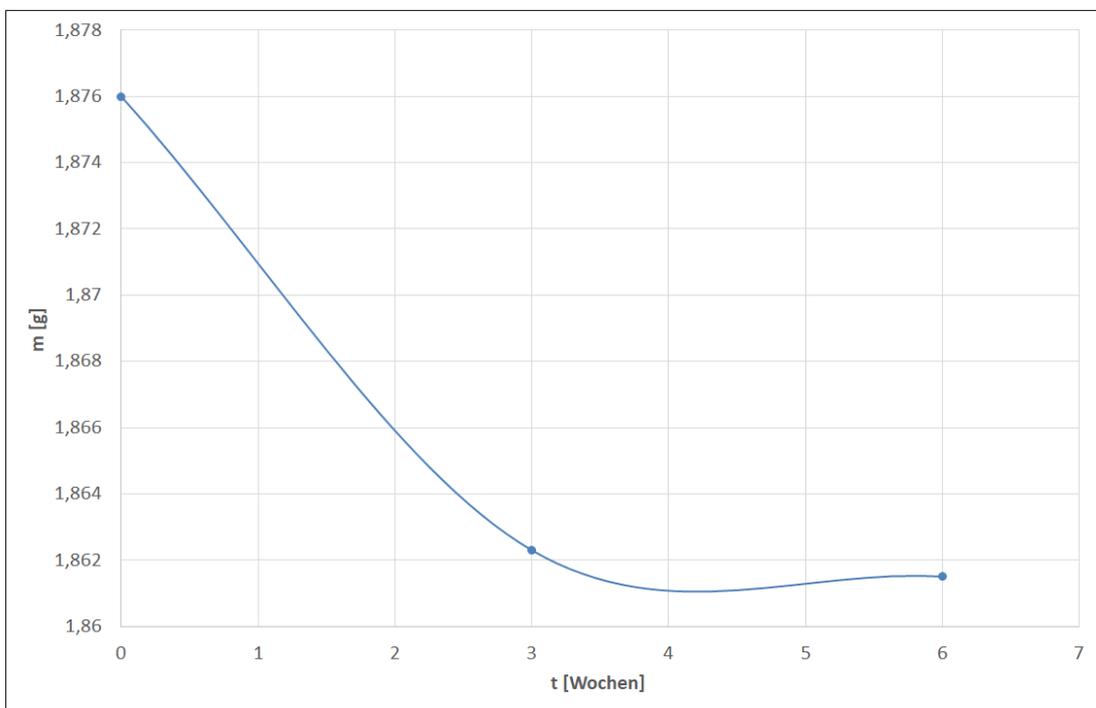


Abbildung 4.3: Masseabnahme einer raumfeuchten M6 Schraube über der Zeit durch Trocknung

Aus den beiden Diagrammen wird ersichtlich, dass sich beide Schrauben nach 6 Wochen bereits im Bereich der vollständigen Trocknung befinden, da sich die

Kurve sättigt und daher keine weitere Masseabnahme zu erwarten ist.

4.4 Versuchsprogramm

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde das vorliegende Versuchsprogramm analog zu dem der vorangegangenen Untersuchungen ausgewählt. Dort wurden bereits durch Versuche mit raumfeuchten M6 Polyamid-schrauben die verschiedenen Motordrehfrequenzen f ermittelt, welche die vorge-sehenen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten erzeugen. Die Frequenzen wurden dabei in Winkelgeschwindigkeit ω und translatorische Schlittengeschwindigkeit v umgerechnet. (vgl. König 2021: 21)

Die möglichen Versuchsparameter ergaben sich aus den vielfältigen Kombinationen der Schraubenstärken (M6; M8; M10), Feuchtigkeitsniveaus (trocken; raum-feucht; gesättigt) sowie Motordrehfrequenzen bzw. Schlittengeschwindigkeiten (0,3 Hz bzw. 0,006 m/s; 5 Hz bzw. 0,1 m/s; 27,5 Hz bzw. 0,55 m/s; 53 Hz bzw. 1,06 m/s; 65 Hz bzw. 1,3 m/s). Wie zuvor beschrieben, konnten die Versuche mit der beinhalteten Parameterkombination M10/0,3 Hz nicht durchgeführt werden. Demzufolge ergab sich das Versuchsprogramm aus Tabelle 4.2 mit 210 Versuchen. Jede Versuchskombination besteht dabei aus 5 Einzelversuchen.

Tabelle 4.2: Versuchsprogramm

f / v	0,3 Hz / 0,006 m/s	5 Hz / 0,1 m/s	27,5 Hz / 0,55 m/s	53 Hz / 1,06 m/s	65 Hz / 1,3 m/s
trocken	M6 / M8	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10
raumfeucht	M6 / M8	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10
feucht	M6 / M8	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10	M6 / M8 / M10

4.5 Auswertungsmethodik

4.5.1 Maximalkraft, Bruchkraft, Belastungsdauer, Belastungsanstiegsgeschwindigkeit

Für die weitere Verarbeitung mussten die von der Messsoftware aufgezeichneten Rohdaten zunächst in ASCII Format konvertiert werden, da die Auswertung mithilfe von VBA-Excel-Skripten erfolgte, welche für die Maximal-/ Bruchkraft, deren Zeitpunkte sowie die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit im linearen Kraftanstiegsbereich je Mittelwert und Standardabweichung bzw. Messunsicherheit ermitteln.

Die Maximalkraft F_{\max} beschreibt den höchsten auftretenden Wert der Kraft über den gesamten Versuchsablauf. Der Zeitpunkt beim Auftreten von F_{\max} ist als Zeitvariable t_{\max} definiert. Im Moment des Bruchs wirkt die Bruchkraft F_{Bruch} . Diese muss nicht zwangsläufig identisch mit der Maximalkraft sein, sondern ist oftmals deutlich geringer. Durch t_{Bruch} wird der Bruchzeitpunkt definiert. Für den linearen Kraftanstiegsbereich wird zudem die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit dF/dt ermittelt. Dies erfolgt durch Berechnung der Tangentensteigung.

4.5.2 Bruchdehnung

Die Bruchdehnung ϵ_{Bruch} beschreibt die Verlängerung der Schraube zum Zeitpunkt des Bruchs im Verhältnis zu ihrer Ursprungslänge. Es ist anzumerken, dass die Schraube durch das Anziehen mit 1 Nm bereits leicht gedehnt wird. Diese Dehnung wird nicht berücksichtigt. Zur Ermittlung der jeweiligen Bruchdehnung wurden die Aufnahmen der Highspeed-Kamera verwendet. Hierfür wurde die Software *Motion Studio* genutzt. Abbildung 4.4 zeigt das Prinzip der Auswertungsmethodik.

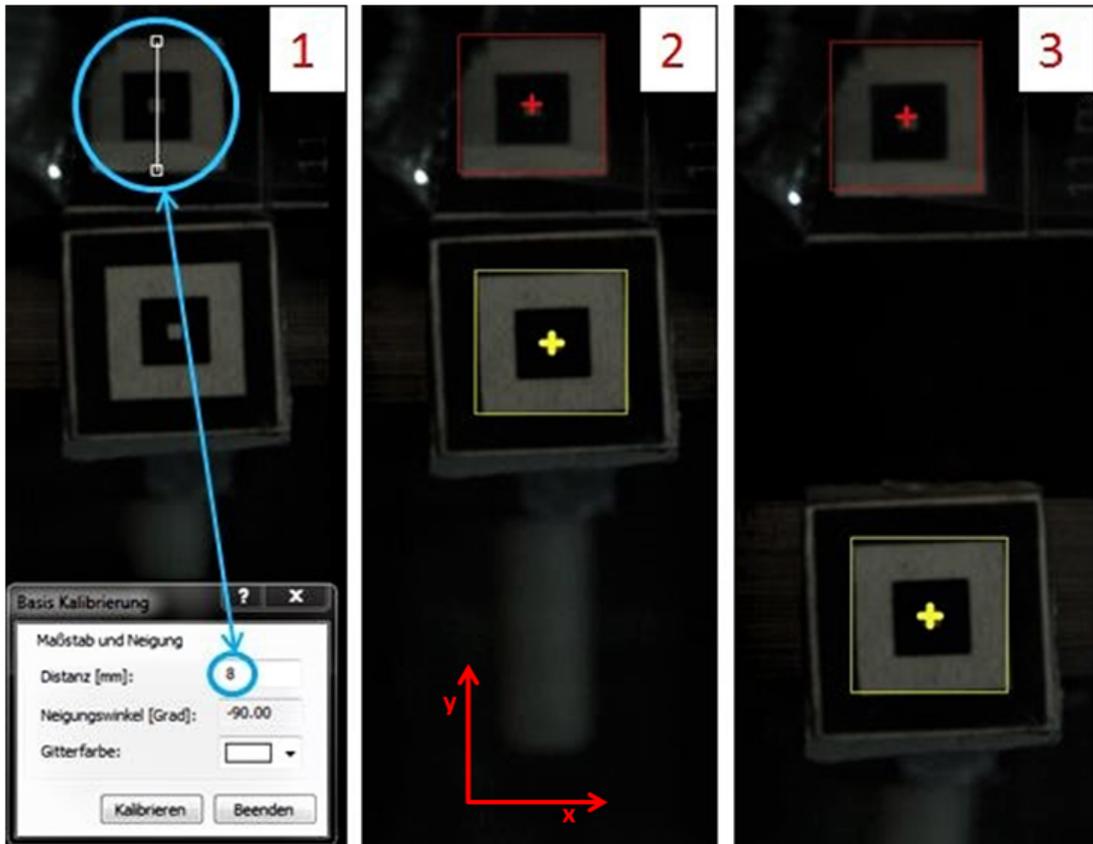


Abbildung 4.4: Tracking der Kamerabilder

Die Einzelaufnahmen werden zunächst in die Software geladen und kalibriert. Hierfür dienen die Markierungen im Bereich der Schraubeneinspannung, um der Software eine Längenreferenz zu definieren (1). Anschließend werden die Mittelpunkte der Markierungen ausgewählt (2). Beim Tracking wird die Bewegung des gelben Mittelpunktes über die Einzelbilder nachverfolgt (3). Durch die Kalibrierung ist die Software nun in der Lage, zu jedem Zeitpunkt die x/y-Koordinaten der Mittelpunkte zu bestimmen. Die Tracking Daten werden in ASCII Format ausgegeben, sodass sie direkt mit den VBA-Excel-Skripten verarbeitet werden konnten. Aufgrund verschiedener Triggereinstellungen wurde die Kamera bei fallender, der Transientenrekorder jedoch bei steigender Flanke getriggert und es entstand zwischen den Kameraaufnahmen und den entsprechenden Aufnahmen des Transientenrekorders ein zeitlicher Versatz. Dieser entspricht der Aktivierungsdauer der Lichtschranke. Daher musste eine zeitliche Anpassung der Daten erfolgen. Für jeden Versuch wurde deshalb in der Messsoftware die Signaldauer abgelesen und manuell in den Excel-Daten für alle Werte eines Versuches subtrahiert.

Abbildung 4.5 zeigt die Aktivierungsdauer der Lichtschranke von 84,5 ms.

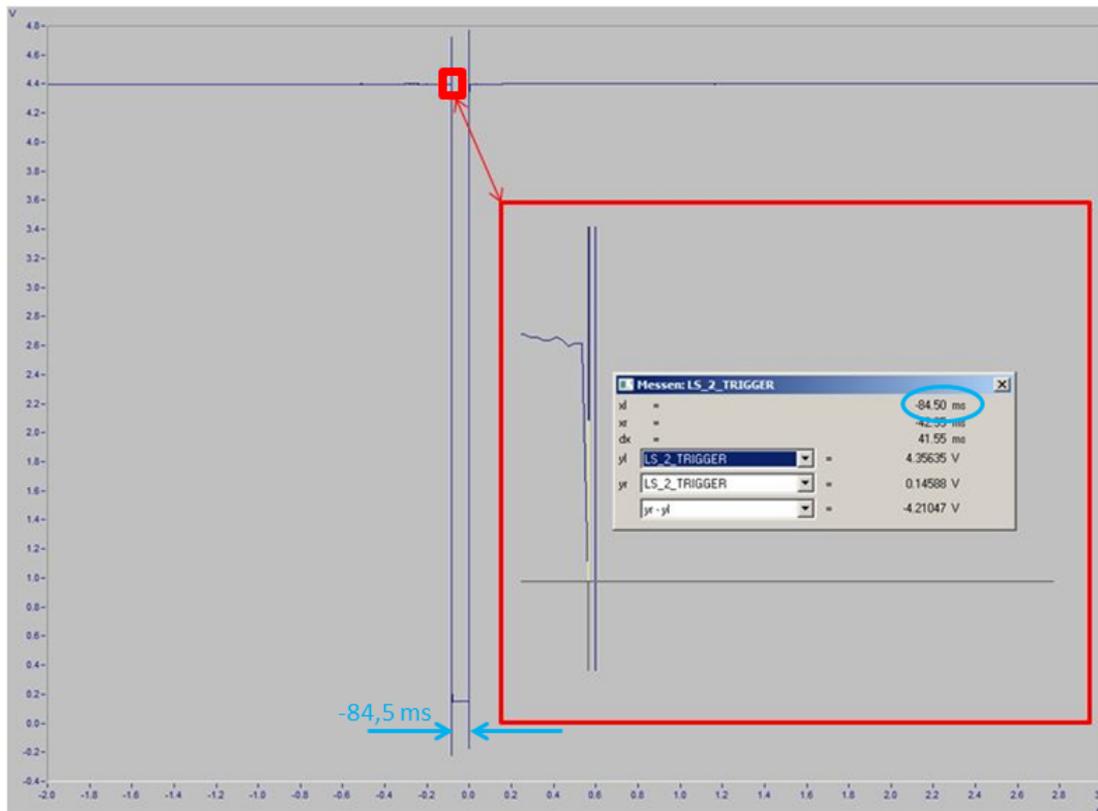


Abbildung 4.5: Zeitbetrag des Triggersignals, um welchen Transientenrekorder und Kamera versetzt auslösen

Über die zeitliche Änderung der y-Koordinate des gelben Mittelpunktes kann die Dehnung der Schraube berechnet werden. Die Dehnung zum Zeitpunkt t_{Bruch} entspricht der Bruchdehnung ϵ_{Bruch} . Abbildung 4.6 verdeutlicht dies.

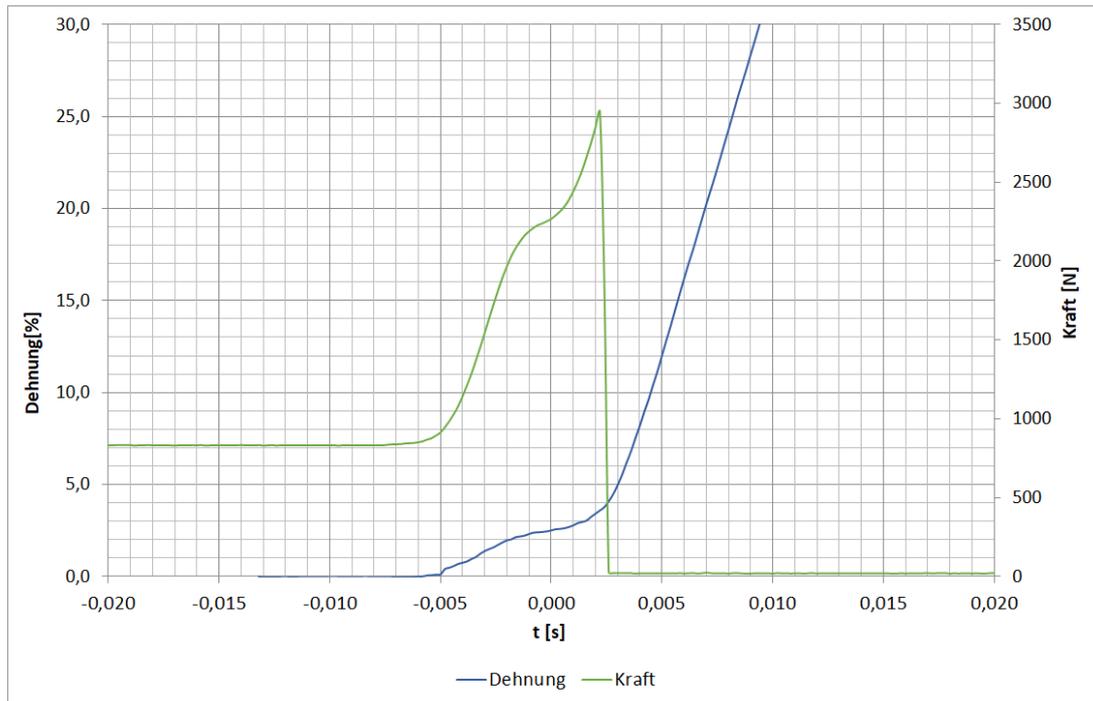


Abbildung 4.6: Exemplarische Korrelation zwischen Kraft und Dehnung am Beispiel einer trockenen M8 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=0,55$ m/s

Der Schnittpunkt beider Kurven markiert den Moment des Bruchs. An dieser Stelle ist dementsprechend die Bruchkraft bzw. -dehnung erreicht. Dies wird daher ersichtlich, da die Kraft an dieser Stelle auf 0 fällt und die Dehnrage deutlich ansteigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Dämpfer der Versuchsanlage zunächst potentielle Energie gespeichert wird, welche im Moment des Bruchs in kinetische Energie umgewandelt wird und die bewegliche Komponente der Spannvorrichtung dabei beschleunigt. Mathematisch ergibt sich die Bruchdehnung aus Formel 4.1 (vgl. Fischer et al. 1987: 138). L_0 steht hierbei für die ursprüngliche Schraubenlänge, L_u für die Länge nach dem Bruch und ΔL für die daraus resultierende bleibende Längenänderung.

$$\epsilon_{\text{Bruch}} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

4.6 Ergebnisse und Auswertung

Im folgenden Abschnitt werden die Versuchsergebnisse dargestellt, erläutert und ausgewertet. Zur Visualisierung der mittleren Bruchkraft, Maximalkraft und Bruchdehnung dienen Diagramme, wobei die Punkte/Fehlerbalken jeweils die Mittelwerte/Messunsicherheiten u markieren. Die Messunsicherheiten wurden dabei aus den jeweiligen Standardabweichungen errechnet und ergeben sich aus Formel 4.2 (Dr. Lorenz, Dirk, persönliche Korrespondenz, Mannheim, 1.09.2021). σ steht dabei für die Standardabweichung, n für die Anzahl der Versuche.

Es ist anzumerken, dass aufgrund technischer Ausfälle nicht für jede Versuchskombination ausreichend Datenmaterial generiert werden konnte, um belastbare Mittelwerte und Messunsicherheiten ermitteln zu können. Einzelne Versuche werden daher gar nicht, bzw. lediglich als Einzelwerte dargestellt. Die verwendeten Werte sind den Tabellen 7.1-7.9 im Anhang zu entnehmen.

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

4.6.1 Bruchkraft

Abbildung 4.7 zeigt die gemittelten Bruchkräfte \bar{F}_{Bruch} der M6 Schrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Sättigungsniveau.

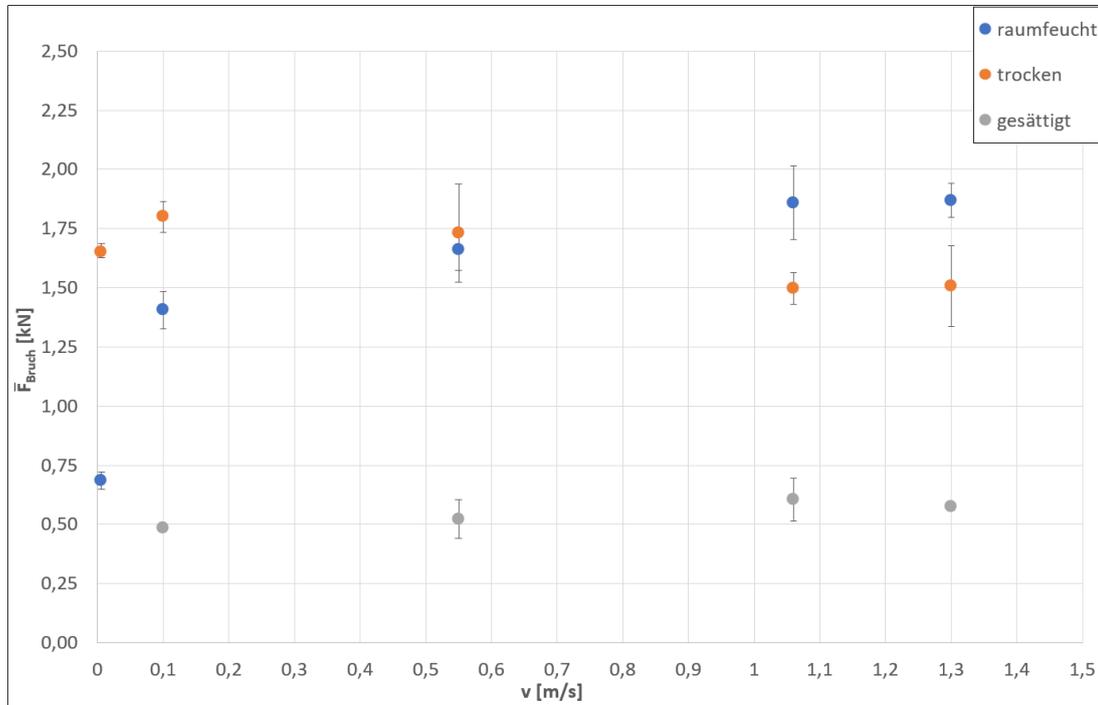


Abbildung 4.7: Gemittelte Bruchkraft von M6 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die mittleren Bruchkräfte der raumfeuchten bzw. trockenen Schrauben deutlich oberhalb derer der gesättigten Schrauben liegen und zwar bei $v=0,1$ m/s um 136 % bzw. 161 %, bei $v=1,3$ m/s um 160 % bzw. 100 %. Mit steigender Schlittengeschwindigkeit ist für \bar{F}_{Bruch} der gesättigten Schrauben eine geringere Zunahme um 18 % innerhalb der Messunsicherheit zu beobachten.

Die raumfeuchten Schrauben weisen ein ähnliches Verhalten auf, wobei bei 0,006 m/s ein Ausreiser nach unten vorliegt. Dessen Aussagekraft ist jedoch zu hinterfragen, da zum einen nicht alle Proben gebrochen sind und zum anderen die Kräfte einen inkonsistenten Verlauf mit wechselndem Kraftabfall und -anstieg hatten, wobei deren Bruchkräfte und -zeitpunkte nicht eindeutig zu bestimmen sind. Zwischen $v=0,1$ m/s und $v=1,3$ m/s beträgt die Zunahme 31 %.

Das Bruchverhalten der trockenen deckt sich nicht mit dem der gesättigten und raumfeuchten Schrauben. Zwar liegen die Kraftbeträge annähernd auf einem

geleichbleibenden Niveau, jedoch lässt sich das Verhalten bei steigender Geschwindigkeit nicht zuverlässig prognostizieren. Bei zwischenzeitlichem Anstieg liegt \bar{F}_{Bruch} für $v=1,3$ m/s um -8,71 % niedriger als bei $v=0,1$ m/s. Die minimale bzw. maximale Messunsicherheit, bezogen auf den Mittelwert, beträgt für die gesättigten Schrauben 1,51 % bzw. 17,34 %, für die raumfeuchten Schrauben 3,81 % bzw. 8,29 % und für die trockenen Schrauben 3,69 % bzw. 11,99 %.

Abbildung 4.8 visualisiert die gemittelten Bruchkräfte der M8 Schrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Sättigungsniveau.

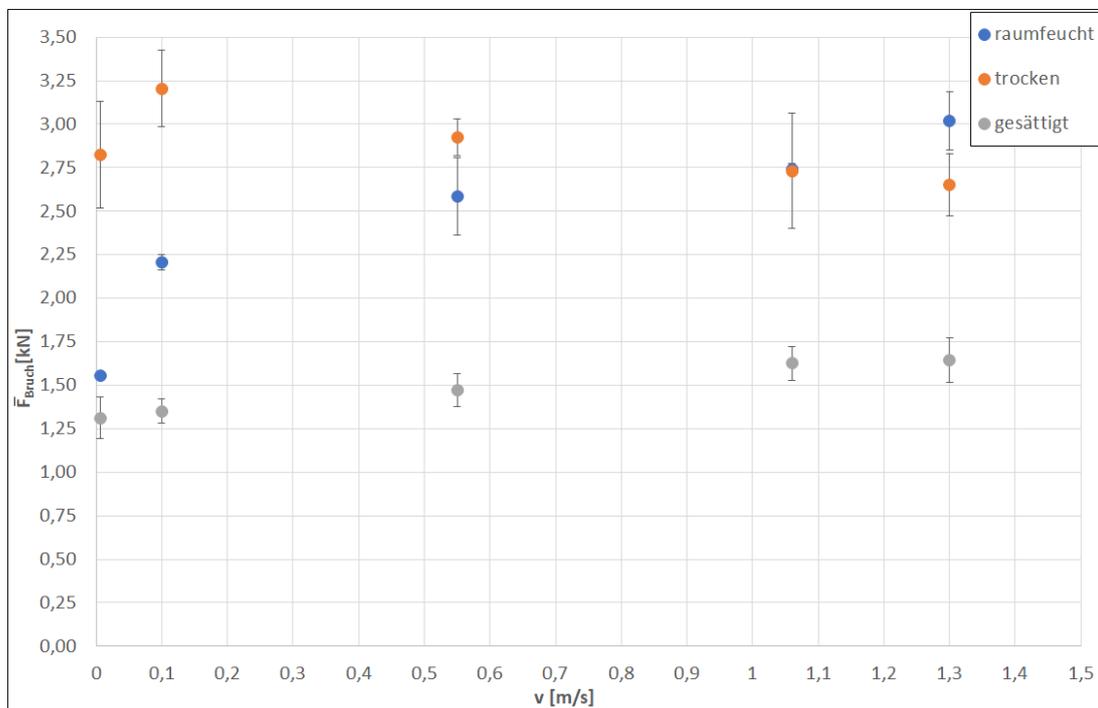


Abbildung 4.8: Gemittelte Bruchkraft von M8 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Das Verhalten der M8 Schrauben unterscheidet sich im Wesentlichen lediglich durch die Höhe der mittleren Kräfte von den M6 Schrauben. Die Kräfte der gesättigten Schrauben liegen auch hier wieder auf einem annähernd gleichbleibenden, niedrigeren Niveau bei einer Erhöhung um 25 % zwischen $v=0,006$ m/s und 1,3 m/s. Bei den raumfeuchten Schrauben nehmen die mittleren Kräfte bei steigender Geschwindigkeit reproduzierbar um 37 % zwischen $v = 0,1$ m/s und 1,3 m/s zu. Der Wert für $v=0,006$ m/s stellt auch hier einen Ausreiser dar. In dieser Versuchsreihe ist jedoch lediglich eine Schraube gebrochen, wobei aus

deren inkonsistenten Kraftverlauf die Bruchkraft nicht eindeutig bestimmbar ist. Das Bruchverhalten der trockenen M8 Schrauben ist in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ebenfalls nicht prognostizierbar, allerdings deckt sich der Verlauf mit dem der M6 Schrauben. Nach kurzem Anstieg fällt die mittlere Bruchkraft zwischen $v=0,006$ m/s und 1,3 m/s um 6 %. Bei $v=0,1$ m/s ist \bar{F}_{Bruch} der raumfeuchten Schrauben 63 % höher, \bar{F}_{Bruch} der trockenen 137 % höher als bei den gesättigten Schrauben. Für $v=1,3$ m/s übersteigt \bar{F}_{Bruch} der raumfeuchten Schrauben um 84 %, \bar{F}_{Bruch} der trockenen um 61 % bezogen auf die gesättigten Schrauben.

Die Messunsicherheit, in Relation zum Mittelwert, liegt für die gesättigten Schrauben zwischen 5,09 % und 9,20 %, für die raumfeuchten Schrauben zwischen 1,26 % und 8,56 % sowie für die trockenen Schrauben zwischen 3,61 % und 12,13 %.

Abbildung 4.9 zeigt die gemittelten Bruchkräfte der M10 Schrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Sättigungsniveau.

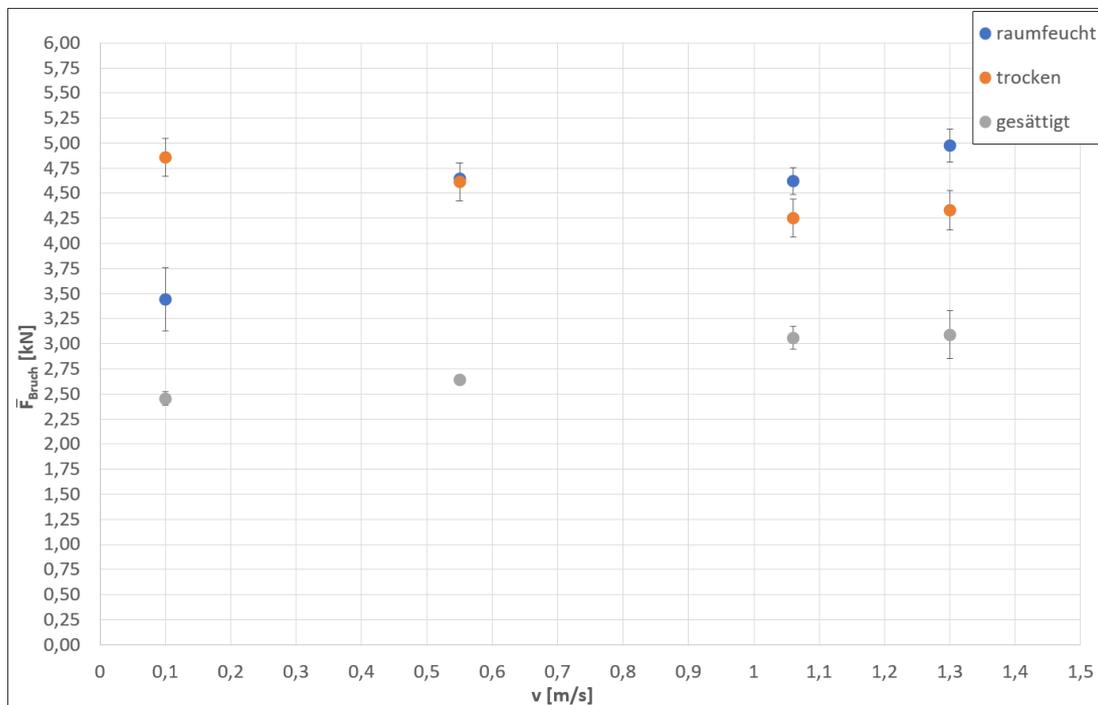


Abbildung 4.9: Gemittelte Bruchkraft von M10 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Auch hier deckt sich das Verhalten mit dem der gesättigten M6 und M8 Schrau-

ben, wobei die Messunsicherheit tendenziell geringer ist, als bei M8 Schrauben. \bar{F}_{Bruch} der gesättigten bzw. raumfeuchten Schrauben steigt im Bereich zwischen $v=0,1$ m/s und $1,3$ m/s um 26 % bzw. $44,5$ %. Bei den trockenen Schrauben erfolgt ein Abfall um $-10,8$ %. Bei $v=0,1$ m/s übersteigt \bar{F}_{Bruch} der raumfeuchten bzw. trockenen Schrauben \bar{F}_{Bruch} der gesättigten Schrauben um 40 % bzw. 98 %, bei $v=1,3$ m/s um 61 % bzw. 40 %. Die auf den Mittelwert bezogene Messunsicherheit liegt bei den gesättigten Schrauben zwischen $1,71$ % und $3,71$ %, bei den raumfeuchten Schrauben zwischen $0,40$ % und $9,20$ % sowie bei den trockenen Schrauben zwischen $3,82$ % und $4,52$ %. Es ist anzumerken, dass die Schrauben für $v=0,006$ m/s generell nicht reißen.

4.6.2 Maximalkraft

Abbildung 4.10 zeigt die mittleren maximal auftretenden Kräfte \bar{F}_{max} von M6 Schrauben. Im Allgemeinen ist erneut anzumerken, dass die Maximalkraft in den seltensten Fällen gleich der Bruchkraft ist. Zweitgenannte fällt oftmals deutlich geringer aus.

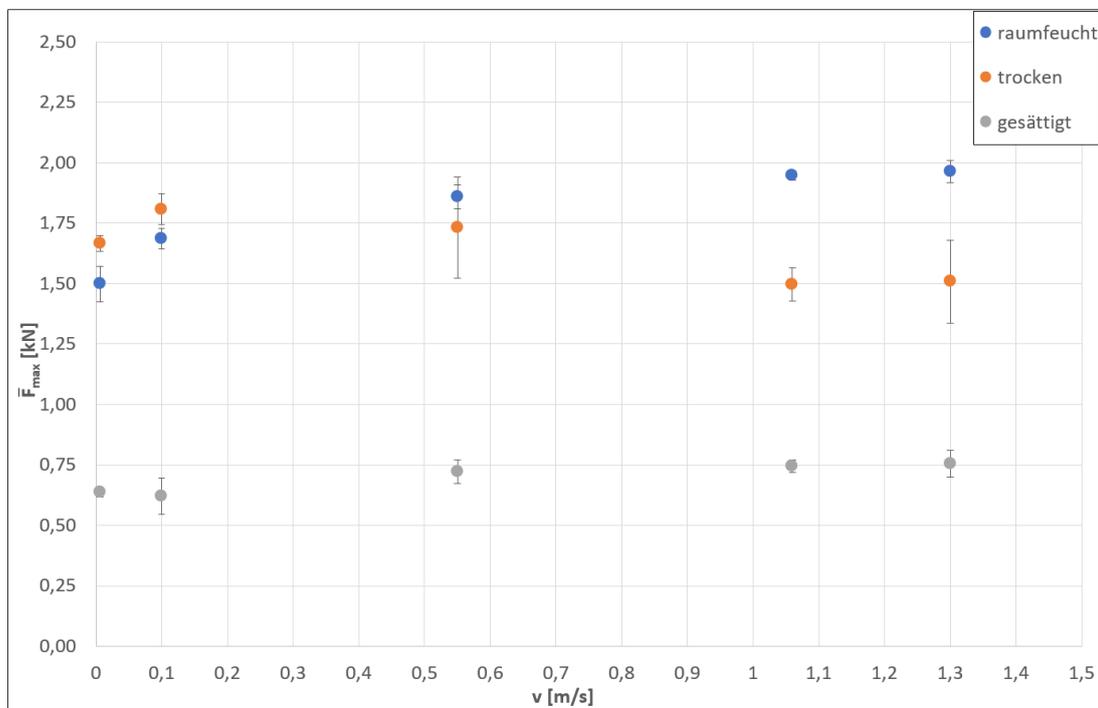


Abbildung 4.10: Gemittelte Maximalkraft von M6 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Bei den gesättigten Schrauben bewegt sich \bar{F}_{max} auf einem verhältnismäßig nied-

rigen Niveau mit steigender Tendenz bei zunehmender Schlittengeschwindigkeit. \bar{F}_{\max} ist bei $v=1,3$ m/s um 18,55 % höher als bei $v=0,006$ m/s. Auffällig ist, dass die mittlere Maximalkraft der trockenen Schrauben nach erstem Anstieg bei zunehmender Geschwindigkeit einem Abwärtstrend folgt. Dieser liegt zwischen $v=0,006$ m/s und $v=1,3$ m/s bei -9,48 %. \bar{F}_{\max} der raumfeuchten Schrauben nimmt mit steigender Geschwindigkeit konstant um bis zu 31 % zu und übersteigt dabei \bar{F}_{\max} der trockenen Schrauben. Bei $v=0,006$ m/s ist \bar{F}_{\max} der raumfeuchten Schrauben 136 % und \bar{F}_{\max} der trockenen 161 % größer als bei den gesättigten Schrauben. Bei $v=1,3$ m/s liegt der prozentuale Unterschied der raumfeuchten bzw. trockenen Schrauben bei +160 % bzw. +100 %, bezogen auf die gesättigten Schrauben. Die minimale bzw. maximale Messunsicherheit, bezogen auf den Mittelwert, beträgt für die gesättigten Schrauben 2,92 % bzw. 12,15 %, für die raumfeuchten Schrauben 1,02 % bzw. 4,87 % und für die trockenen Schrauben 2,04 % bzw. 11,99 %.

Die gemittelten Maximalkräfte von M8 Schrauben sind Abbildung 4.11 zu entnehmen.

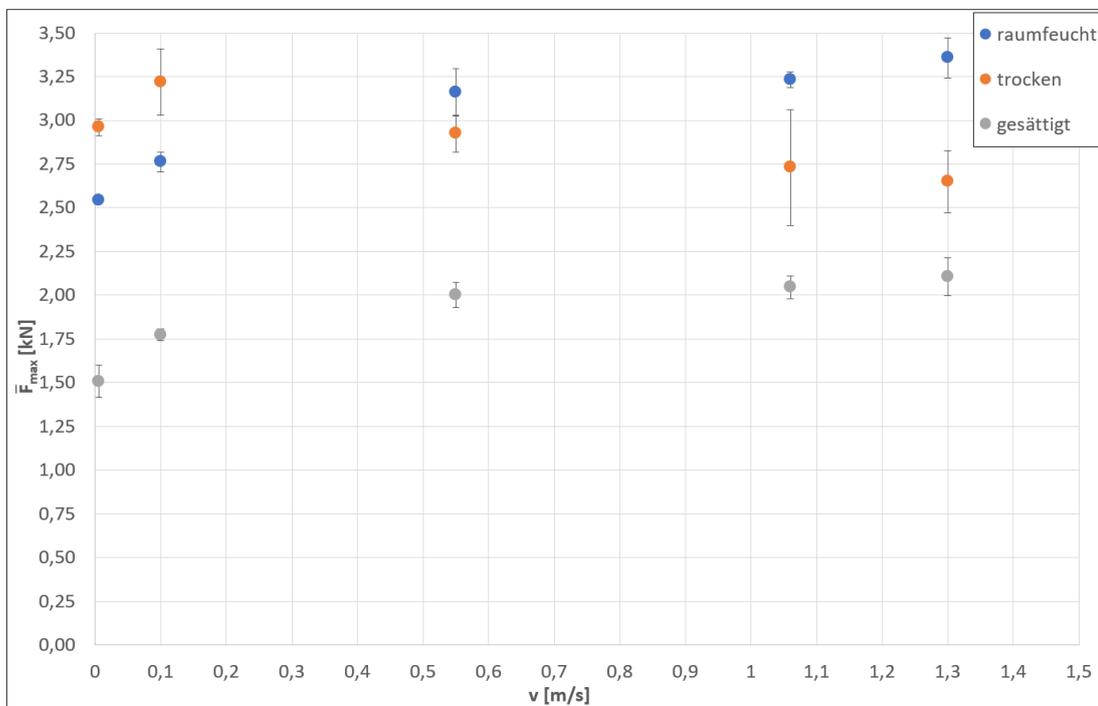


Abbildung 4.11: Gemittelte Maximalkraft von M8 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Die Kraftniveaus liegen erwartungsgemäß höher als bei M6. Auch hier ist \bar{F}_{\max} der gesättigten Schrauben am niedrigsten und nimmt mit erhöhter Geschwindigkeit allmählich um 40 % zwischen $v=0,006$ m/s und 1,3 m/s zu. Das Verhalten der trockenen und raumfeuchten Schrauben ist prinzipiell identisch zu dem der M6 Äquivalenten: Die mittlere Maximalkraft der trockenen Schrauben fällt zwischen $v=0,006$ m/s und 1,3 m/s nach kurzem Anstieg konstant um 10 % ab, während die der raumfeuchten Schrauben kontinuierlich um bis zu 32 % größer wird und im Verlauf ab einer Schlittengeschwindigkeit von 0,55 m/s \bar{F}_{\max} der trockenen Schrauben gar übersteigt. Bei $v=0,006$ m/s liegt \bar{F}_{\max} der raumfeuchten Schrauben um 69 % und \bar{F}_{\max} der trockenen um 96 % oberhalb \bar{F}_{\max} der gesättigten Schrauben. Für $v=1,3$ m/s liegt die mittlere Maximalkraft der raumfeuchten Schrauben bzw. trockenen +59 % bzw. +26 % über \bar{F}_{\max} der gesättigten Schrauben. Die Messunsicherheit, bezogen auf den Mittelwert, liegt bei den gesättigten Schrauben zwischen 1,85 % und 6,12 %, bei den raumfeuchten Schrauben zwischen 1,37 % und 4,28 % sowie bei den trockenen Schrauben zwischen 1,64 % und 12,13 %.

Abbildung 4.12 zeigt die gemittelten Maximalkräfte von M10 Schrauben.

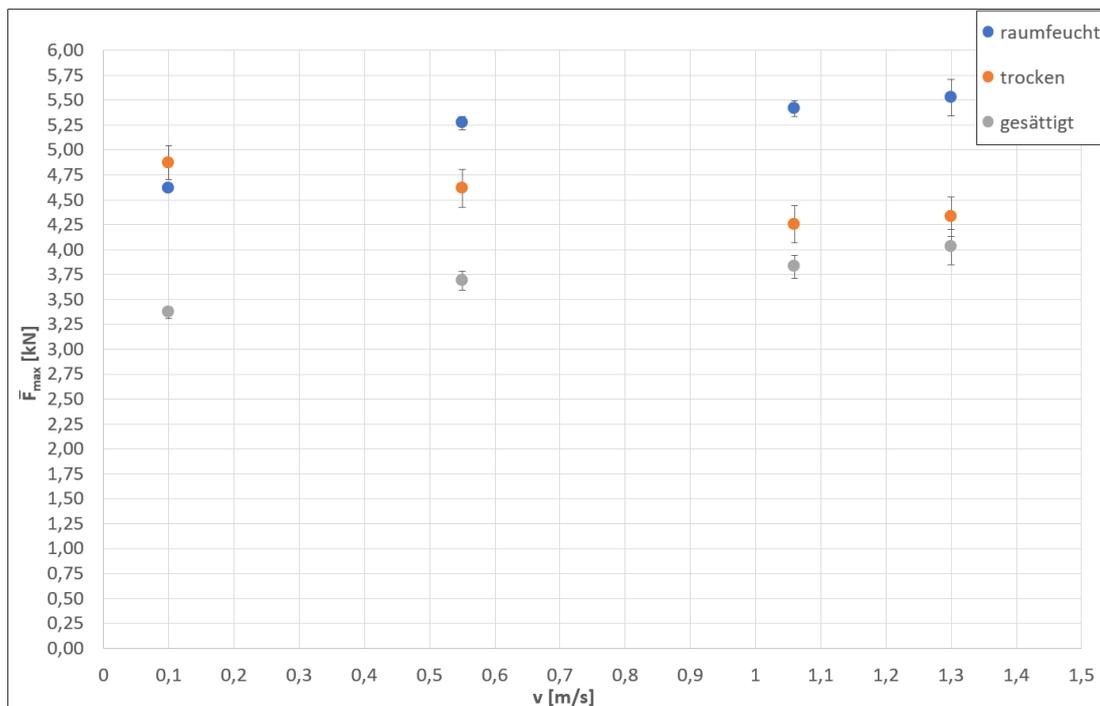


Abbildung 4.12: Gemittelte Maximalkraft von M10 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Betragsmäßig liegen die mittleren Kräfte höher als bei M6 und M8, wobei sich das Verhalten der M10 Schrauben bei zunehmender Geschwindigkeit mit dem der M6 und M8 Schrauben deckt. Bei den gesättigten Schrauben erfolgt zwischen $v=0,1$ m/s und 1,3 m/s ein Anstieg um 19,5 %, bei trockenen Schrauben ein Abfall um -11 % und bei raumfeuchten Schrauben wiederum ein Anstieg um 19,8 %. Für $v=0,1$ m/s ist \bar{F}_{\max} der raumfeuchten Schrauben um 37 % bzw. der trockenen um 45 % größer als bei den gesättigten Schrauben. Um 37 % bzw. 7,6 % übersteigt \bar{F}_{\max} der raumfeuchten bzw. trockenen Schrauben die mittlere Maximalkraft der gesättigten Schrauben. Die auf den Mittelwert bezogene Messunsicherheit liegt bei den gesättigten Schrauben zwischen 1,79 % und 4,50 %, bei den raumfeuchten Schrauben zwischen 0,73 % und 3,31 % sowie bei den trockenen Schrauben zwischen 3,44 % und 4,52 %.

4.6.3 Bruchdehnung

Abbildung 4.13 zeigt die gemittelte Bruchdehnung von M6 Schrauben.

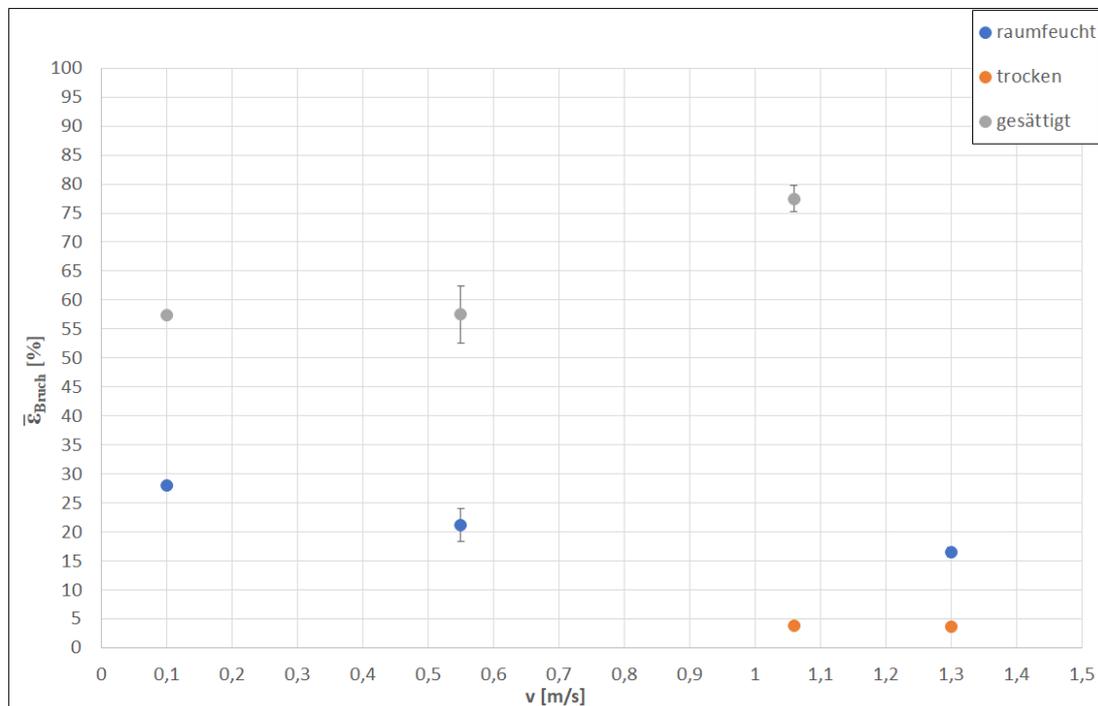


Abbildung 4.13: Gemittelte Bruchdehnung von M6 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Die gemittelte Bruchdehnung der trockenen Schrauben liegt erwartungsgemäß auf niedrigstem Niveau zwischen 3,9 % und 3,76 %. Hauptursache hierfür ist

die Versprödung des Materials durch die trockene Konditionierung. Bei den raumfeuchten Schrauben ist zu erkennen, dass die mittlere Bruchdehnung mit steigender Geschwindigkeit von 21 % bei $v=0,55$ m/s auf 16,6 % bei $v=1,3$ m/s abnimmt. Dies deckt sich mit den theoretischen Werkstoffeigenschaften. Bei zunehmender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit haben die Werkstoffgitterebenen weniger Zeit aneinander abzugleiten, was versprödend wirkt und das Material schneller versagen lässt. Dem gegenüber steht jedoch der Verlauf der mittleren Bruchdehnung gesättigter Schrauben im Diagramm. Diese nimmt mit steigender Geschwindigkeit zu. Zwischen $v=0,55$ m/s und 1,06 m/s steigt ϵ_{Bruch} von 57,5 % auf 77,7 %. Die ermittelten Messunsicherheiten, bezogen auf den Mittelwert liegen bei gesättigten Schrauben zwischen 2,92 % und 8,63 %, bei raumfeuchten Schrauben zwischen 5,35 % und 13,29 % sowie bei trockenen Schrauben zwischen 14,72 % und 15,25 %. Aufgrund unvollständiger Datensätze sind die Aussagen an dieser Stelle allerdings lediglich unter Vorbehalt verlässlich. Für $v=0,1$ m/s konnte jeweils nur ein Wert generiert werden.

Die mittlere Bruchdehnung von M8 Schrauben geht aus Abbildung 4.14 hervor.

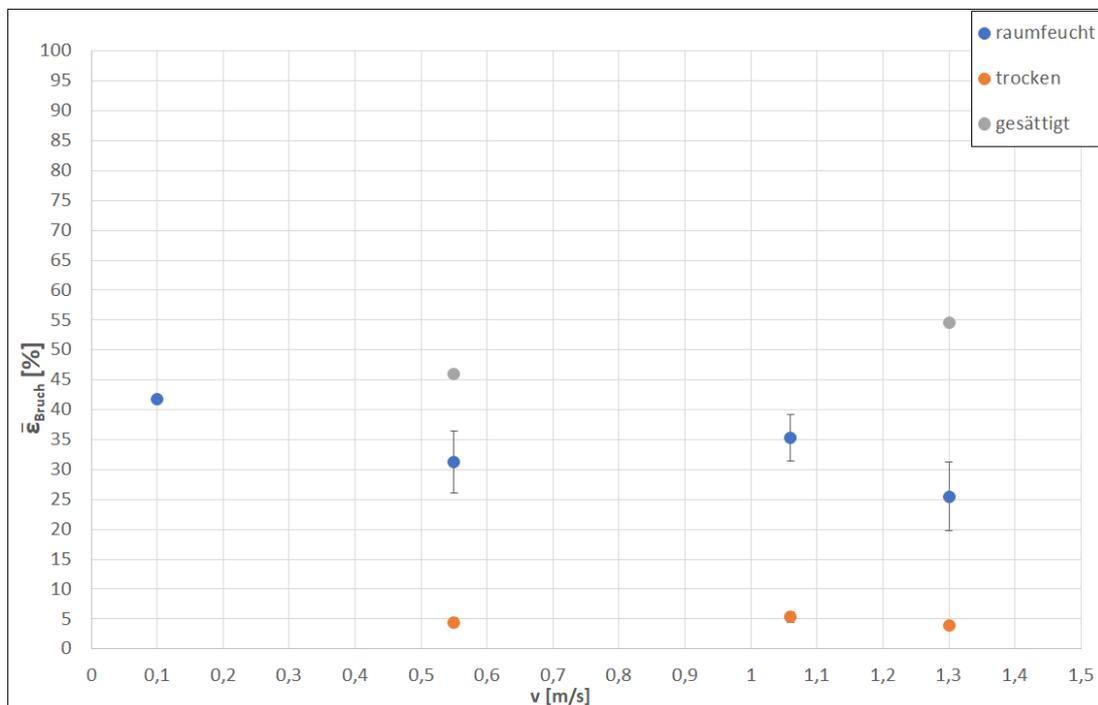


Abbildung 4.14: Gemittelte Bruchdehnung von M8 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Wie bei Schrauben der Größe M6 liegt die mittlere Bruchdehnung der trockenen Schrauben auf niedrigstem Niveau bei 5 %. Die gemittelte Bruchdehnung der raumfeuchten Schrauben schwankt mit zunehmender Geschwindigkeit. ϵ_{Bruch} beträgt hierbei für $v=0,55$ m/s 31,3 % und für $v=1,3$ m/s 25,5 %. Erwartungsgemäß weisen die gesättigten Schrauben durch ihre Zähigkeit auch hier die größte mittlere Bruchdehnung auf, wobei aufgrund mangelnder Daten keine belastbare, allgemeingültige Aussage getroffen werden kann und keine Messunsicherheiten ermittelt wurden. Bei $v=0,55$ m/s und $v=1,06$ m/s ist die mittlere Bruchdehnung der raumfeuchten Schrauben um ganze 621 % höher als die der trockenen. Die Messunsicherheit, bezogen auf den Mittelwert, liegt bei den raumfeuchten Schrauben zwischen 10,94 % und 22,59 % sowie bei den trockenen Schrauben zwischen 7,91 % und 19,02 %.

Abbildung 5.15 visualisiert die mittlere Bruchdehnung von M10 Schrauben.

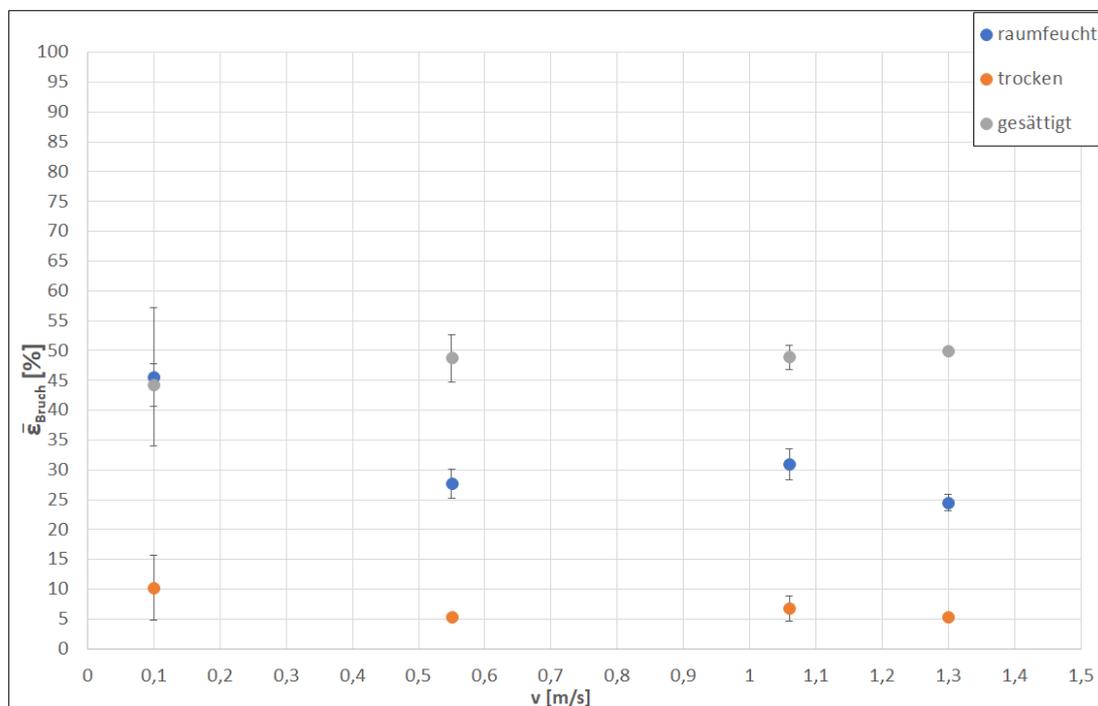


Abbildung 4.15: Gemittelte Bruchdehnung von M10 Schrauben bei verschiedenen Schlittengeschwindigkeiten und Sättigungsniveaus

Auffällig ist, dass bei niedrigster Geschwindigkeit von 0,1 m/s die Messunsicherheit, bezogen auf den Mittelwert, der raumfeuchten Schrauben mit 25,42 % stark streut. Diese wird jedoch bei mittlerer und höherer Geschwindigkeit bis 5,44 %

sukzessive kleiner. Auch bei M10 liegen die trockenen Schrauben auf niedrigstem Niveau bei einer Streuung zwischen 3,75 % und 53,46 % in Relation zum Mittelwert. Bei den gesättigten Schrauben liegt die auf den Mittelwert bezogene Messunsicherheit zwischen 0,08 % und 8,22 %. Die mittlere Bruchdehnung der raumfeuchten und gesättigten Schrauben liegt bei $v=0,1$ m/s auf ähnlichem Niveau bei 45 % und circa 337 % höher als die der trockenen Schrauben. Für $v=1,06$ m/s beträgt ϵ_{Bruch} der trockenen Schrauben 6,7 %, der raumfeuchten Schrauben 31 % und der gesättigten Schrauben 49 %.

4.6.4 Ausgewählte Kraft- und Dehnungsverläufe

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte, mitunter auffällige Kraft- und Dehnungskurven aufgezeigt und erläutert.

Das Diagramm in Abbildung 4.16 zeigt den Kraftverlauf über der Zeit $F(t)$ von vier gesättigten PA6.6-Schrauben der Gewindestärke M6 bei einer Schlittengeschwindigkeit von 0,1 m/s.

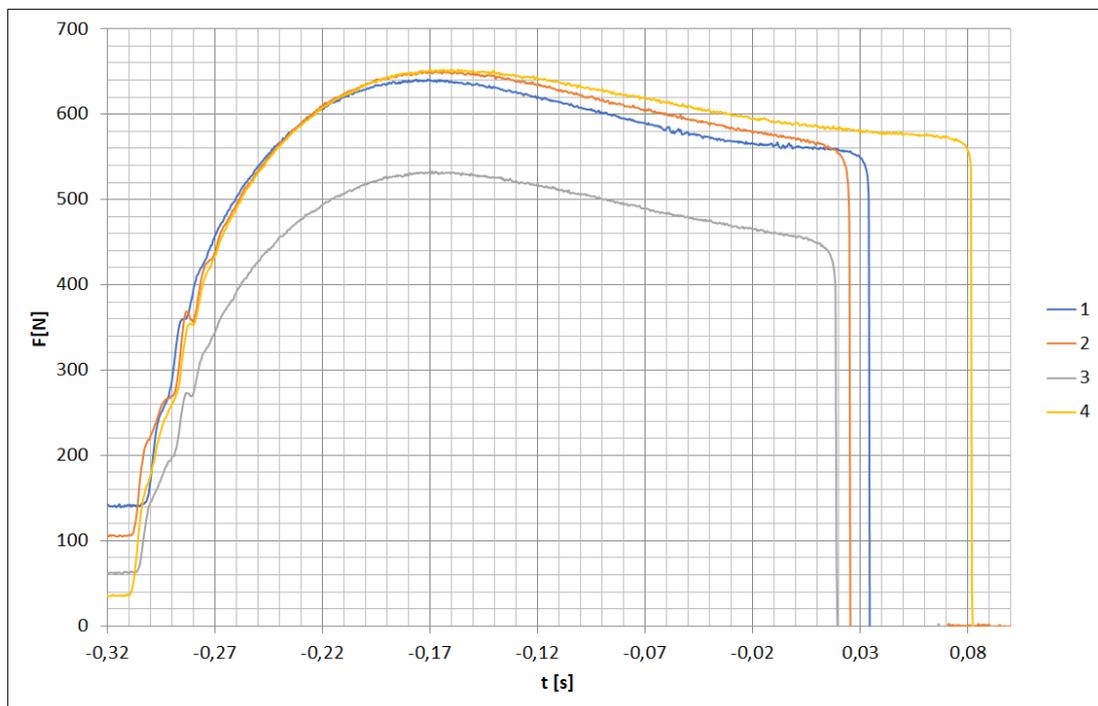


Abbildung 4.16: Kraftverlauf über der Zeit von gesättigten M6 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 0,1 m/s

Es fällt auf, dass sich die einzelnen Schrauben in ihrem Bruchverhalten miteinander signifikant unterscheiden. Der Kraftverlauf von Schraube eins, zwei und vier entwickelt sich zunächst annähernd identisch. Im linearen Bereich bis zum Erreichen von F_{\max} decken sich die Kurven. Schraube drei weist hingegen einen flacheren linearen Kraftanstieg auf, wobei F_{\max} ebenfalls auf einem deutlich niedrigeren Niveau verbleibt. F_{Bruch} der Schrauben eins, zwei und vier liegt relativ eng beisammen. Auch hier verkörpert Schraube drei einen Ausreiser nach unten. Bezüglich der Bruchdauer unterscheiden sich die Verhältnisse: Die Schrauben eins, zwei und drei brechen zeitnah beieinander, wobei Schraube vier deutlich später bricht. Auffällig ist außerdem, dass sich die Ausgangskraft, verursacht durch das Einspannen der Schrauben, bei allen Versuchen unterscheidet. Diese Differenzen lassen sich mit der Sättigung der Schrauben erklären, wobei eine kausale Wirkungskette entsteht: Die Einspannmuttern ließen sich bei den gesättigten Schrauben aufgrund der Volumenzunahme, bedingt durch die Wasseraufnahme, zunächst nur schwer auf das Gewinde führen. Beim weiteren Festziehen tordierten die Schrauben aufgrund ihrer hohen Zähigkeit außerdem, sodass kein definiertes und reproduzierbares Drehmoment von 1 Nm gewährleistet sein konnte. Damit lassen sich die abweichenden Ausgangskräfte erklären. Außerdem verursachte die Torsion womöglich bereits beim Einspannen Beschädigungen am Schraubenmaterial unterschiedlichen Ausmaßes. Dies könnte zunächst zu unterschiedlichen Kraftverläufen und schlussendlich zu ungleichem Bruchverhalten führen.

Abbildung 4.17 zeigt den Verlauf der Kraft über der Zeit von M6 Schrauben im trockenen Zustand bei 0,006 m/s.

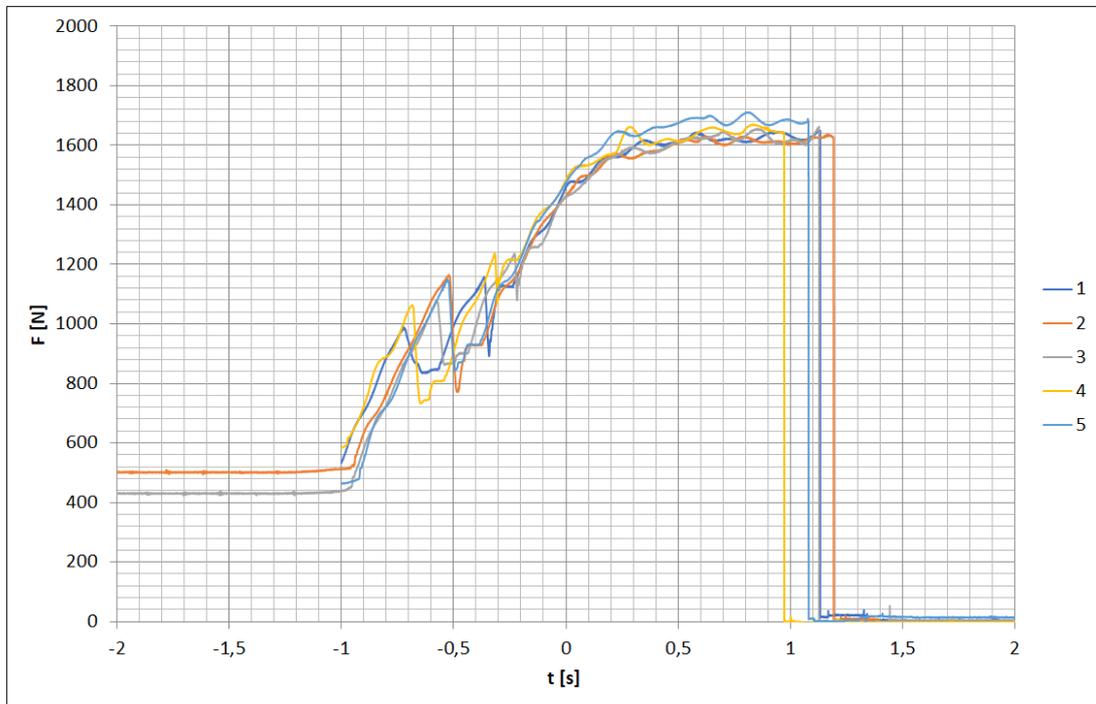


Abbildung 4.17: Kraftverlauf über der Zeit von trockenen M6 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 0,006 m/s

Diese sind weitestgehend identisch, ausgehend von der Anzugskraft, dem linearen Anstieg sowie Bruchverhalten. Letztgenanntes ist für Schrauben bei diesen Parametern daher reproduzierbar und prognostizierbar. Auffällig ist, dass im in linearen Kraftanstiegsbereich ein temporärer Kraftabfall erfolgt. Da dieser bei allen Versuchen auftritt, liegt ein systematisches Verhalten vor. Eine mögliche Ursache könnte hierbei in der Kompression des Dämpfers und der verhältnismäßig langsamen Kraftübertragung bei niedriger Geschwindigkeit liegen. Im Bereich vor dem Bruch weisen trockene Schrauben eine ausgeprägtere plastische Verformung auf als gleiche Schrauben bei höherer Schlittengeschwindigkeit. Daher sättigt sich die Kraftkurve allmählich, ehe es zum Bruch kommt.

Abbildung 4.18 zeigt den Kraftverlauf über der Zeit von M10 Schrauben im raumfeuchten Zustand bei 1,3 m/s.

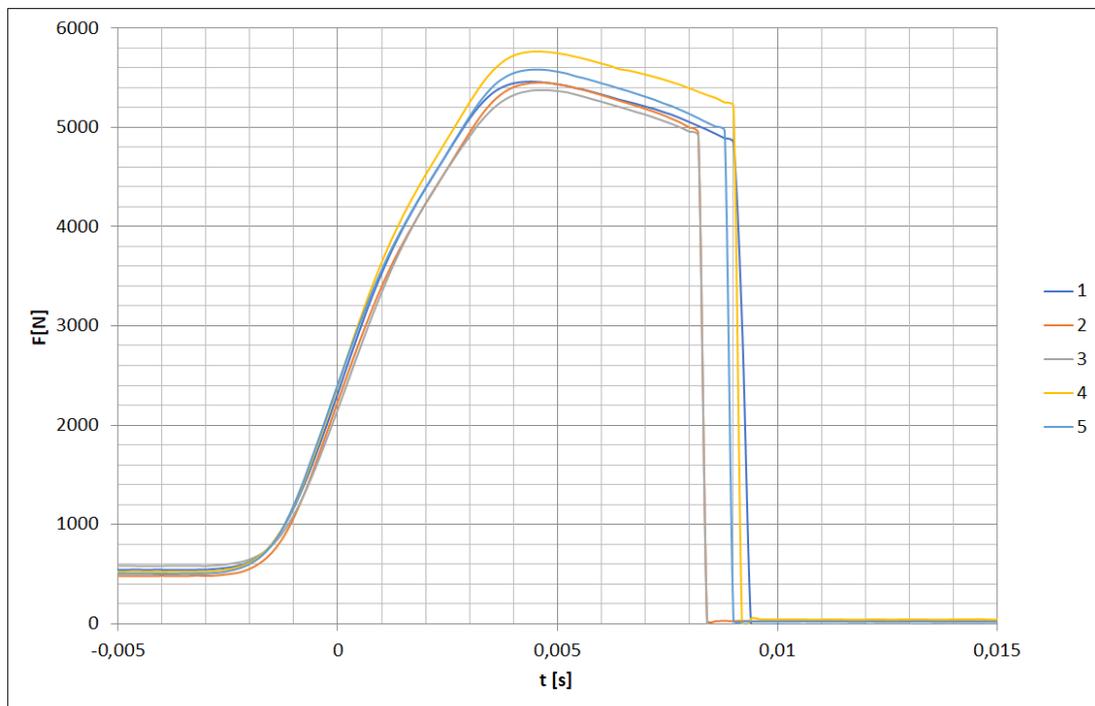


Abbildung 4.18: Kraftverlauf über der Zeit von raumfeuchten M10 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 1,3 m/s

Alle Kurven starten bei einem nahezu identischen Ausgangsniveau. Auch im ausgeprägten linearen Kraftanstiegsbereich liegen die Kurven aufeinander. Im Bereich der Sättigung weichen die Kraftverläufe voneinander ab, dementsprechend unterscheiden sich die Maximalkräfte betragsmäßig, wenn auch relativ geringfügig im Bereich von 400 N. Zwischen Sättigung und Bruch fällt die Kraft noch einmal deutlich ab, was auf eine höhere Zähigkeit zurückzuführen ist, verglichen mit trockenen Schrauben unter sonst gleichen Bedingungen. Das Bruchverhalten ist reproduzierbar und prognostizierbar.

Abbildung 4.19 zeigt den Kraftverlauf über der Zeit von trockenen M10 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 0,55 m/s.

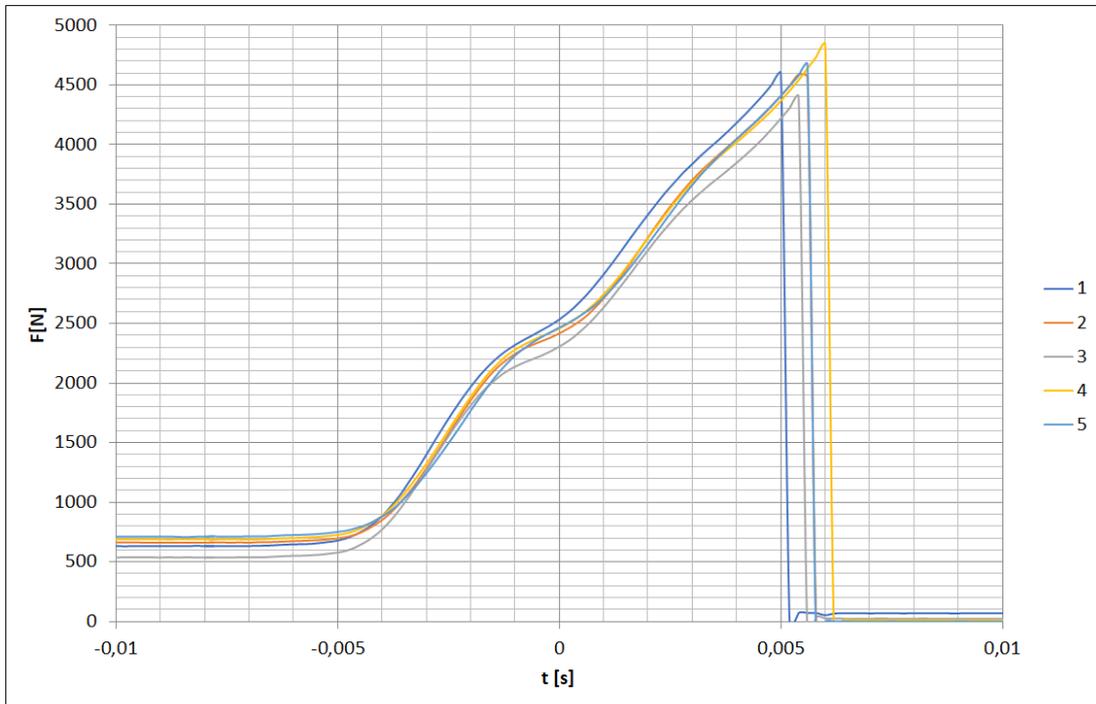


Abbildung 4.19: Kraftverlauf über der Zeit von trockenen M10 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 0,55 m/s

Dieser ist exemplarisch und deckt sich mit den theoretischen Erwartungen. Die Ausgangskräfte der verschiedenen Schrauben beim Einspannen sind annähernd identisch, was darauf schließen lässt, dass alle Schrauben mit dem gleichen Drehmoment von 1 Nm angezogen wurden und die Versuche daher unter identischen Ausgangsbedingungen stattfanden. Die Kraft steigt fast durchgängig linear und durch die höhere Schlittengeschwindigkeit rapide an. Aufgrund des trockenen Zustandes der Schrauben und der damit einhergehenden Sprödigkeit findet kaum Verformung statt und die Schrauben brechen bei geringer Dehnung. Verglichen mit den sehr niedrigen Geschwindigkeiten von 0,006 m/s und 0,1 m/s wird dieser versprödende Effekt durch die höhere Frequenz zusätzlich verstärkt, da die Gitterebenen weniger Zeit haben, aneinander abzugleiten und ihre Werkstoffbindungen daher schneller lösen. Alle Kraftkurven liegen zu jedem Zeitpunkt nah beieinander. Auch Bruchdauer, Maximal- und Bruchkraft weisen eine geringe Streuung auf. Auffällig ist, dass F_{\max} und F_{Bruch} innerhalb jeden Versuchs identisch ist. Dies untermauert, dass es kaum plastische Verformung

gibt. Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass das Bruchverhalten unter vorliegenden Bedingung sehr gut reproduzierbar und prognostizierbar ist.

Abbildung 4.20 zeigt den exemplarischen Dehnungsverlauf über der Zeit an trockenen M10 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 1,06 m/s.

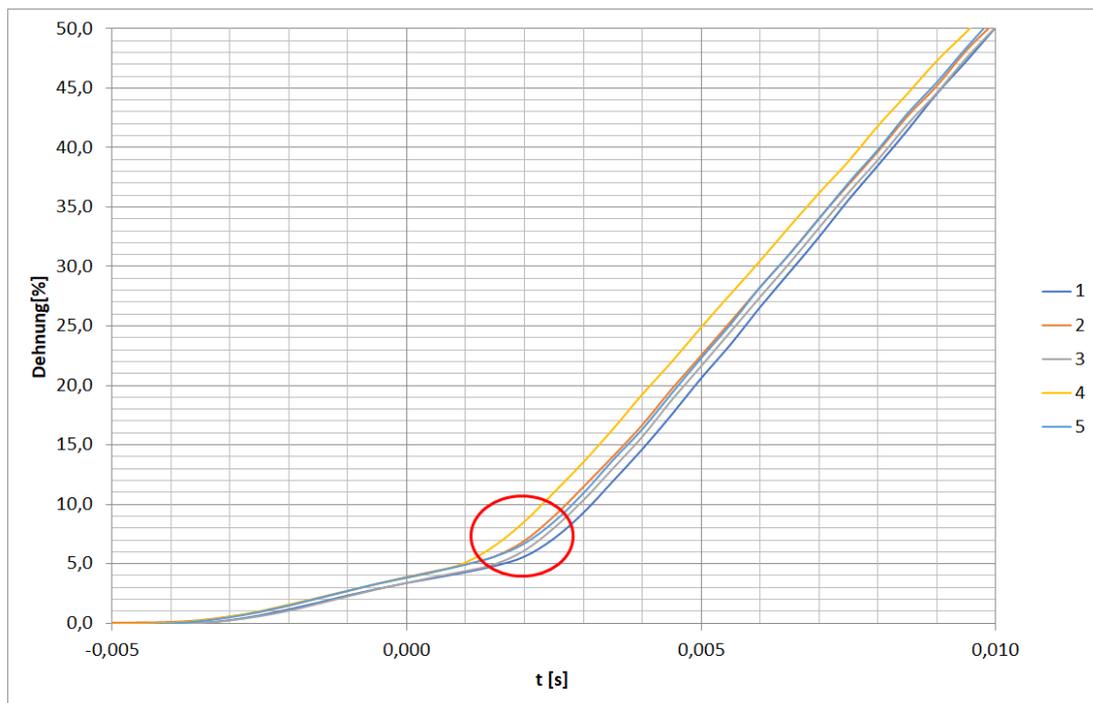


Abbildung 4.20: Dehnungskurve von trockenen M10 Schrauben bei einer Schlittengeschwindigkeit von 1,06 m/s

Im rot markierten Bereich ist der Bruchmoment eindeutig zu erkennen. Bis dahin steigen die Kurven flach linear an, ehe die Dehnrage deutlich zunimmt. Die Ursache hierfür ist der Dämpfer der Versuchsanlage, welcher durch seine Kompression zunächst potentielle Energie speichert. Mit dem Versagen der Schraube expandiert der Dämpfer und wandelt damit potentielle in kinetische Energie um, welche an die beweglichen Komponenten der Einspannvorrichtung übertragen wird und zu einer Beschleunigung führt.

4.6.5 Spannungs-/Dehnungsdiagramme

Im folgenden Absatz sind die Spannungs-/Dehnungsdiagramme ausgewählter Versuche bei den Geschwindigkeiten 0,1 m/s; 0,55 m/s und 1,3 m/s dargestellt.

Abbildung 4.21 zeigt das exemplarische Spannungs-/Dehnungsdiagramm einer gesättigten M8 Schraube bei einer Geschwindigkeit von 0,55 m/s. Die rote Gerade symbolisiert den E-Modul, der in diesem Falle 1016,63 Mpa beträgt. Dieser errechnet sich aus der Steigung m des linearen Kurvenverlaufs, welche sich aus der allgemeinen Formel 4.3 ergibt. Auf dieser basiert außerdem das Hook'sche Gesetz aus Formel 4.4.

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (4.3)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4.4)$$

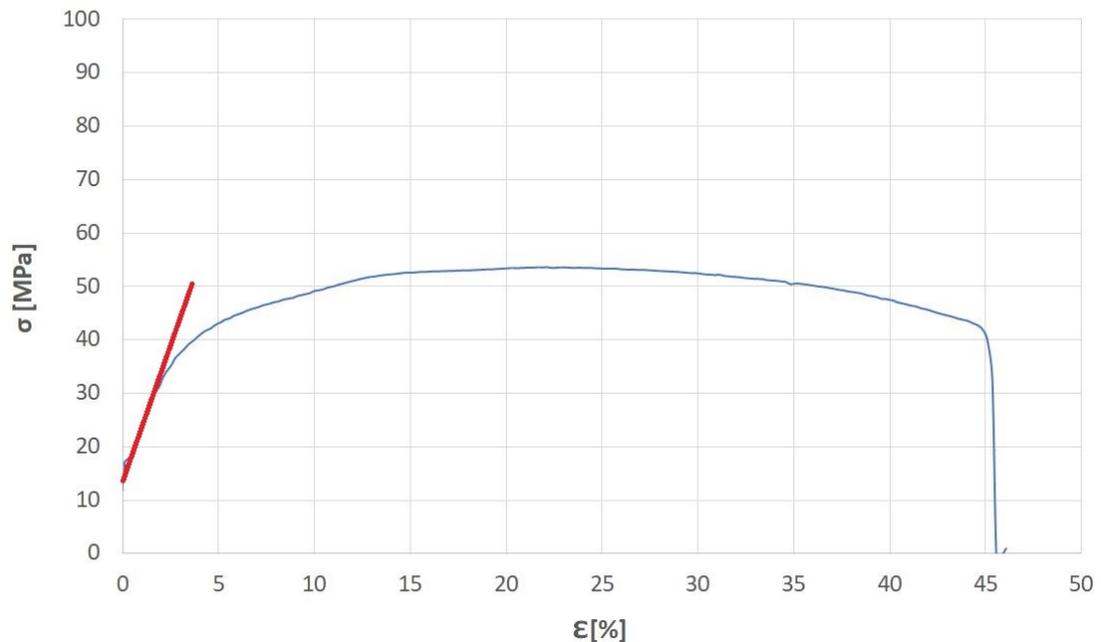


Abbildung 4.21: Spannungs-/Dehnungsdiagramm; M8; gesättigt; 0,55 m/s

Die Abbildungen 4.22-4.24 zeigen verschiedene Spannungs-/Dehnungsdiagramme trockener, raumfeuchter und gesättigter Schrauben bei den Geschwindigkeiten 0,1 m/s; 0,55 m/s und 1,3 m/s.

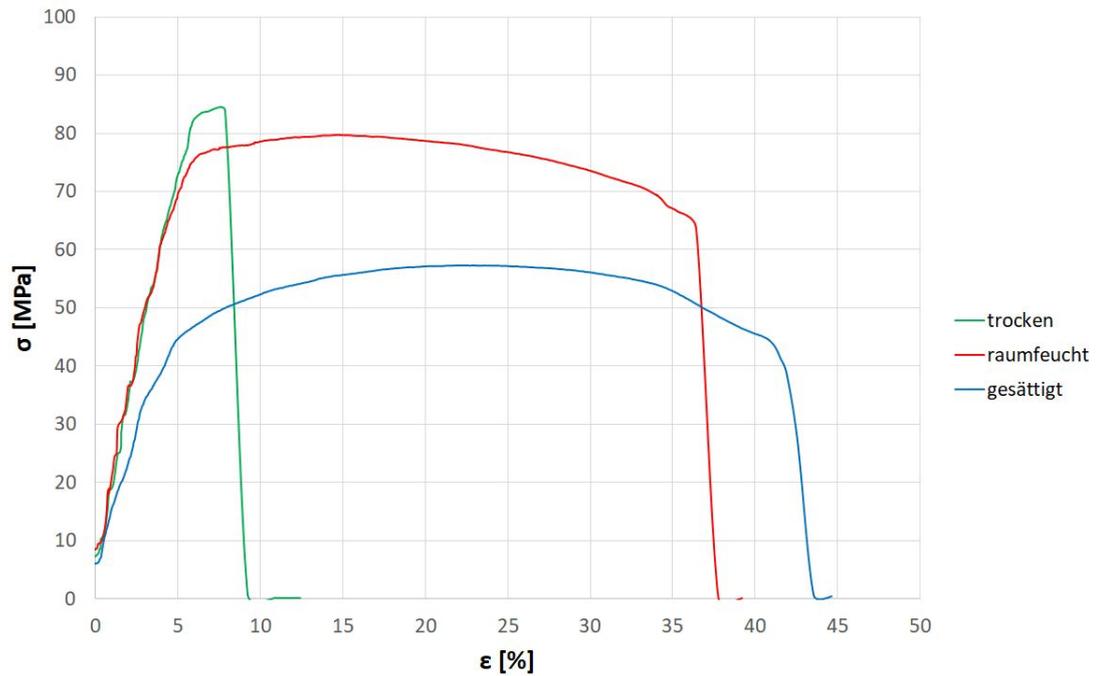


Abbildung 4.22: Spannungs-/Dehnungsdiagramm; M10; 0,1 m/s

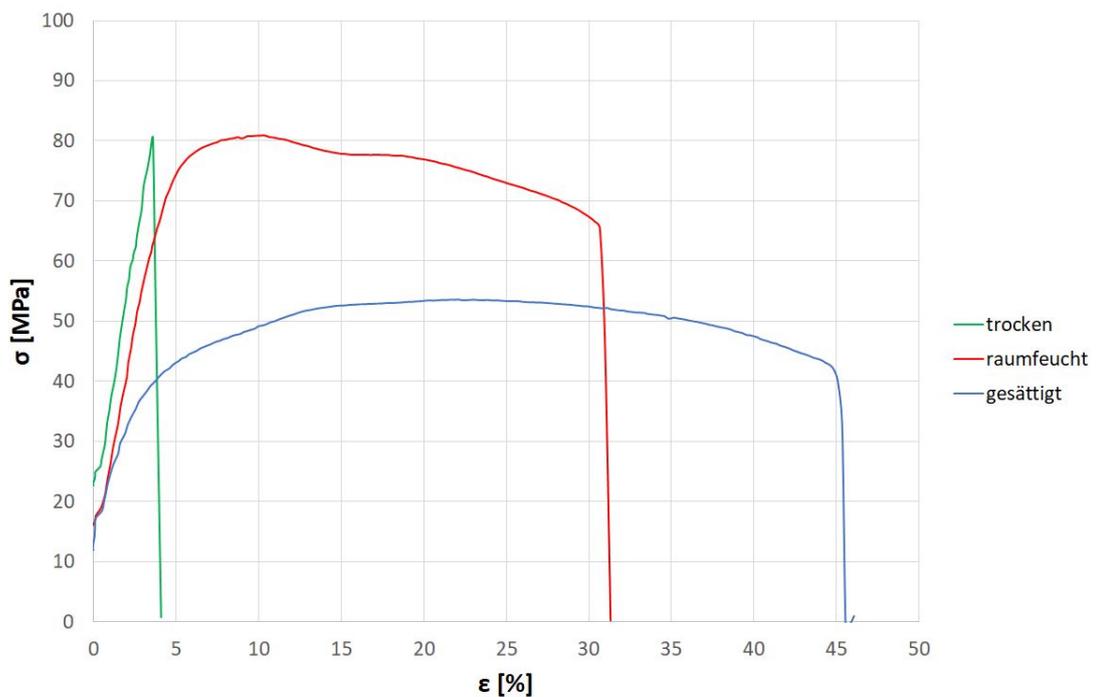


Abbildung 4.23: Spannungs-/Dehnungsdiagramm; M8; 0,55 m/s

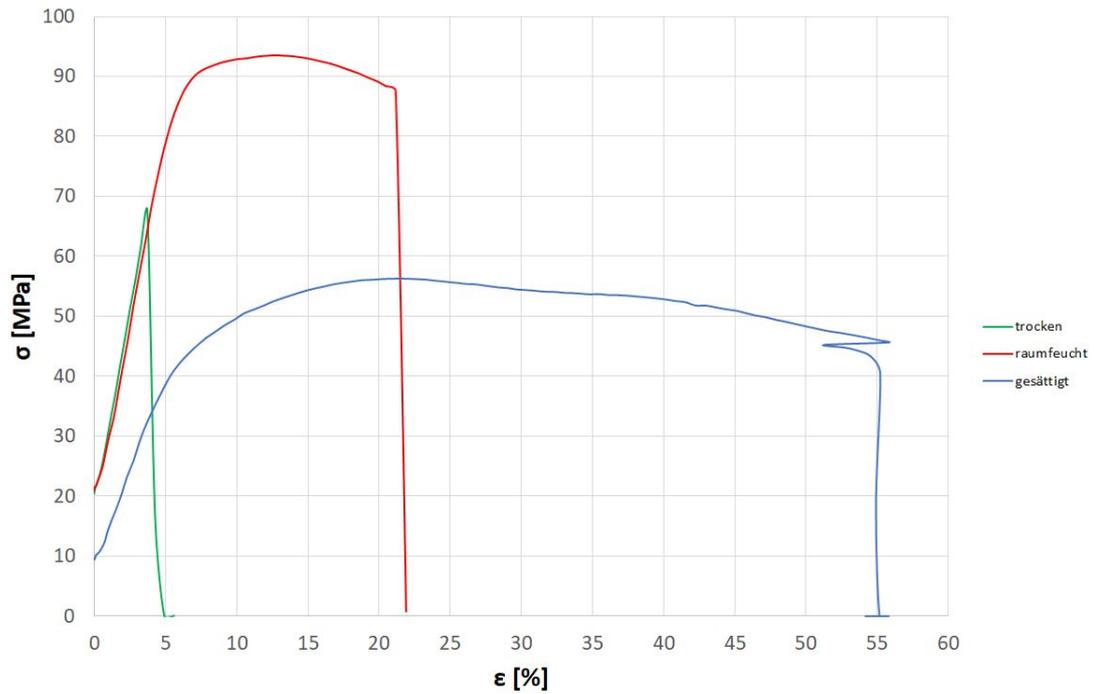


Abbildung 4.24: Spannungs-/Dehnungsdiagramm; M8; 1,3 m/s

Es fällt auf, dass der E-Modul bei den gesättigten Schrauben deutlich niedriger liegt, was der weichmachenden Wirkung des Wassers geschuldet ist. Dies deckt sich mit den Erwartungen aus der Literatur (vgl. Lutterbeck 1984: 71). In Abbildung 4.24 ist zu erkennen, dass die trockene Schraube früher versagt, als zu erwarten. Auch dies hängt mit der Versprödung des Materials zusammen.

4.6.6 Aufnahmen der Bruchstellen

Folgende Abbildungen zeigen die Aufnahmen von verschiedenen Bruchstellen mit dem Rasterelektronenmikroskop.

Abbildung 4.25 beinhaltet die Bruchstelle einer trockenen M10 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=1,3$ m/s.

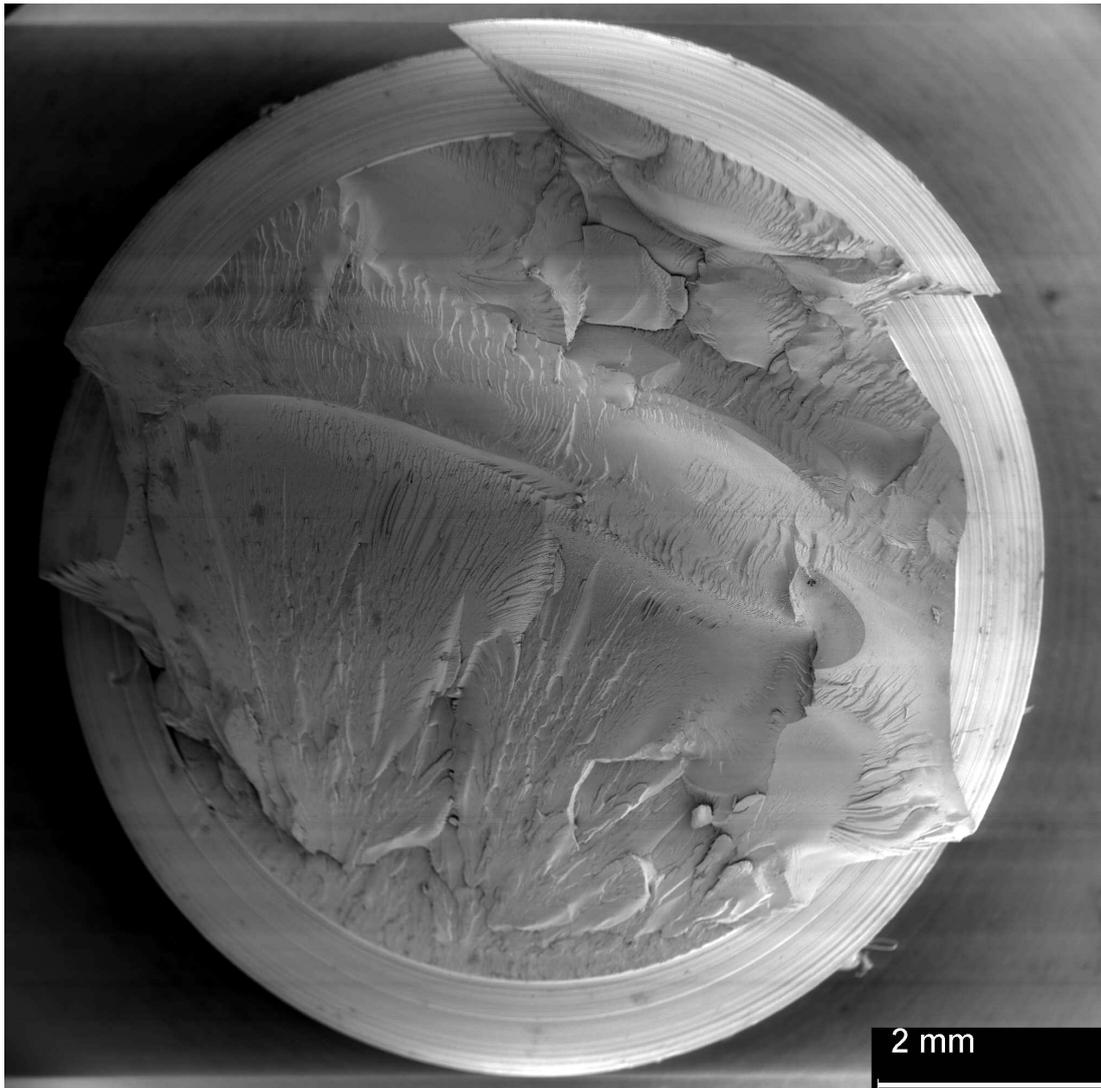


Abbildung 4.25: Aufnahme der Bruchstelle einer trockenen M10 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=1,3$ m/s mit dem Rasterelektronenmikroskop

Hierbei handelt sich um einen Sprödbruch, bei dem das Material dehnungsarm ohne Fließen versagt. Dies wird aus der Aufnahme ersichtlich, da auf der Bruchfläche viele, unregelmäßige Bruchkanten vorzufinden sind.

Aufnahme 4.26 zeigt die Bruchfläche einer gesättigten M6 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=0,55$ m/s.

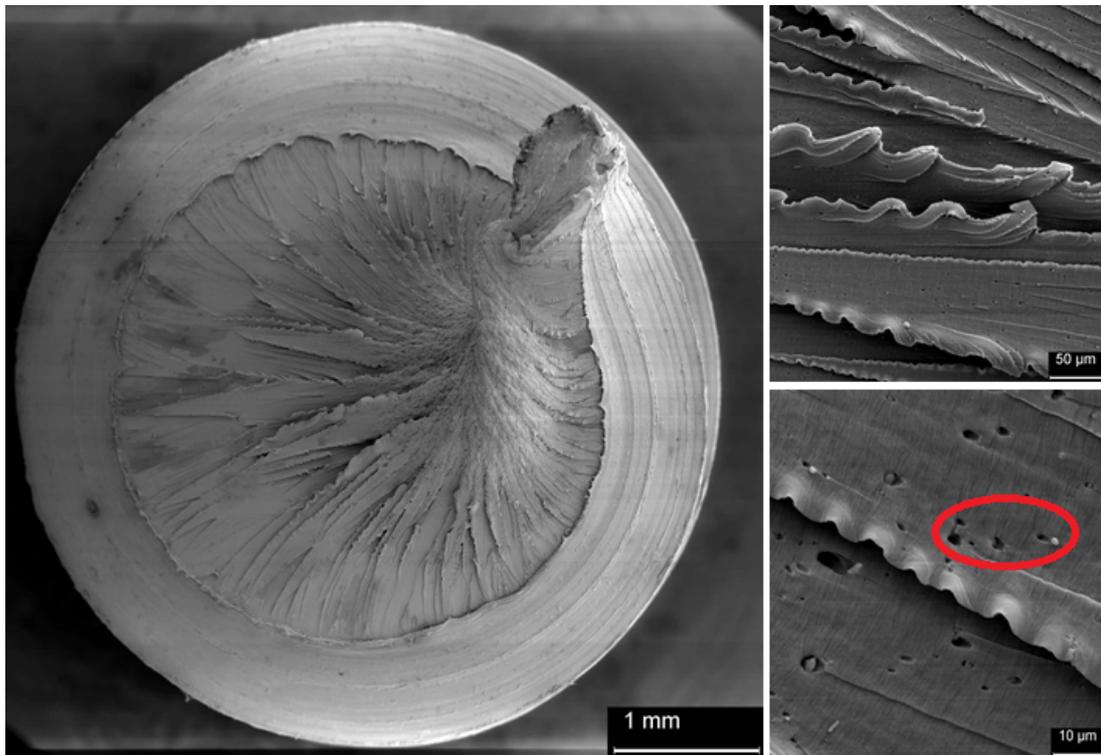


Abbildung 4.26: Aufnahme der Bruchstelle einer gesättigten M6 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=0,55$ m/s mit dem Rasterelektronenmikroskop

Hierbei handelt es sich um einen duktilen Bruch. Dies ist erkennbar durch die gleichmäßigen Fließstrukturen auf der Bruchoberfläche im großen Bildausschnitt links. Die zwei kleinen Bildausschnitte auf der rechten Bildseite zeigen eine vergrößerte Ansicht eines Teils der Bruchfläche. Hieraus wird ersichtlich, dass auch bei gedrehten Schrauben aus Vollmaterial kleinste Fehlstellen (rot umkreist) vorzufinden sind. In diesen sind separierte Partikel eingeschlossen, deren Ursprung aktuell unbekannt ist.

Abbildung 4.27 zeigt die Bruchfläche einer raumfeuchten M6 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=0,1$ m/s.

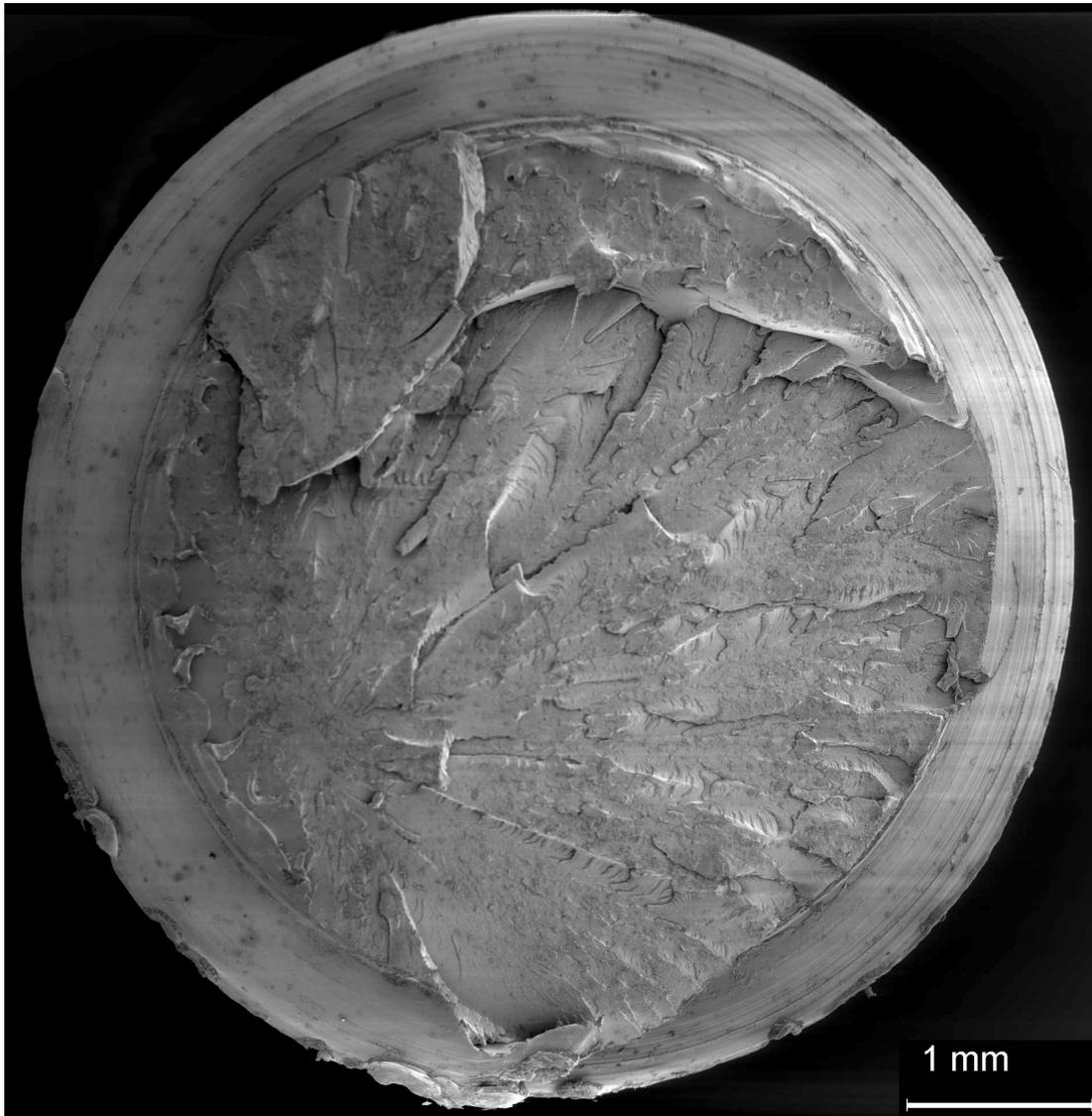


Abbildung 4.27: Aufnahme der Bruchstelle einer raumfeuchten M6 Schraube bei einer Schlittengeschwindigkeit von $v=0,1$ m/s mit dem Rasterelektronenmikroskop

Die Bruchcharakteristik ist weder einem spröden noch duktilen Bruch eindeutig zuzuordnen und entspricht daher einem Mischbruch. Scharfe Bruchkanten, wie für einen Spröbruch typisch, sind zu erkennen. Jedoch treten diese hier wesentlich gleichmäßiger in Erscheinung, verglichen mit der trockenen M10 Schraube.

5 Diskussion und Ausblick

5.1 Diskussion

Für den Einsatz bei Explosionsklappen ist die Bruchkraft der zentrale Faktor, denn von ihr ist abhängig, unter welchem Explosionsdruck die Schrauben versagen und die Explosionsklappen freigeben. In den Versuchen waren die Ergebnisse einheitlich und das Verhalten der Schrauben daher reproduzierbar. Dies ist ein Hinweis darauf, dass erwartungsgemäß die Fehlstellen der Spritzgusschrauben mitverantwortlich für die großen Streuungen sind. Im Folgenden wird auf die eingangs aufgeführten Fragestellungen eingegangen und Rückschlüsse werden gezogen.

Aus den Versuchen geht hervor, dass eine erhöhte Belastungsanstiegsgeschwindigkeit nicht zwingend mit einer höheren Bruchkraft einhergeht. Während bei gesättigten Schrauben die Bruchkraft mit steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit lediglich tendenziell wächst, nimmt sie bei raumfeuchten Schrauben deutlich zu, wohingegen die Bruchkraft bei trockenen Schrauben gar kleiner wird. Größeren Einfluss auf die Bruchkraft als die Belastungsanstiegsgeschwindigkeit hat die Konditionierung der Schrauben. Dies wird vor allem bei den großen Unterschieden zwischen gesättigten und trockenen/raumfeuchten Schrauben ersichtlich. Dieses Verhalten trat unabhängig von der Schraubengröße übereinstimmend auf, sodass ein systematisches und prognostizierbares Verhalten abzuleiten ist. Es ist anzumerken, dass die Feuchtigkeitsaufnahme der raumfeuchten Vollmaterialschauben deutlich geringer als die der raumfeuchten Spritzgusschrauben ist, was sich mit der damit einhergehenden Versprödung auf das Bruchverhalten auswirkt.

Die Bruchdehnung trockener Schrauben verbleibt unabhängig von der Schraubengröße bei jeder Belastungsanstiegsgeschwindigkeit auf einem annähernd gleichen Niveau zwischen 4 % und 10 %. Bei raumfeuchten Schrauben nimmt die Bruchdehnung, unabhängig von der Schraubengröße, mit steigender Belastungsanstiegsgeschwindigkeit tendenziell ab. Für gesättigte Schrauben kann mangels

vollständiger Daten und aufgrund nicht reproduzierbaren Verhaltens kein allgemeiner Rückschluss gezogen werden.

Relevant ist außerdem, inwieweit sich das Verhalten gedrehter Polyamidschrauben aus Vollmaterial von Spritzgusschrauben bzgl. ihrer Bruchkraft unterscheidet. Die Abbildungen 5.1-5.3 zeigen die Ergebnisse spritzgegossener sowie gedrehter Polyamidschrauben im Vergleich (vgl. König 2021: 30). Die genauen Werte sowie prozentualen Abweichungen sind den Tabellen 7.10-7.18 im Anhang zu entnehmen. Analog dazu befindet sich ein Vergleich der Maximalkraft als Abbildungen im Anhang (Abbildungen 7.1-7.3).

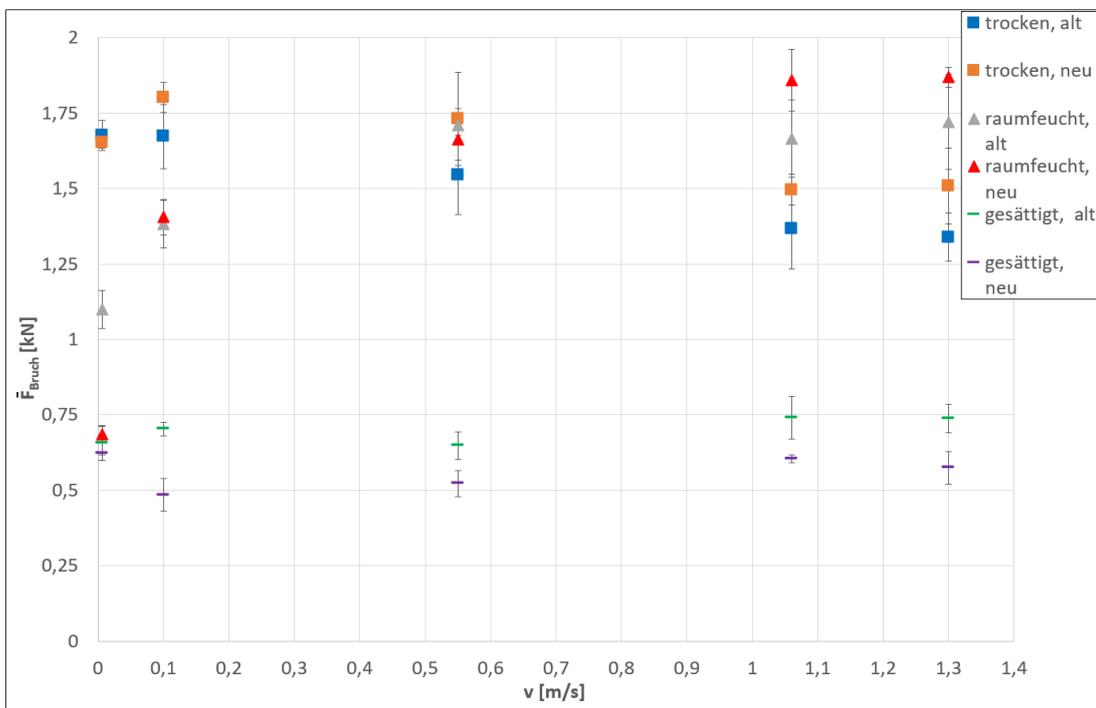


Abbildung 5.1: Vergleich der Bruchkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M6 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte

Das Diagramm suggeriert zunächst, dass gedrehte M6 Polyamidschrauben aus Vollmaterial entgegen der Erwartungen nicht generell bei höheren Bruchkräften versagen. Die Bruchkräfte gesättigter Vollmaterialschrauben liegen gar bei allen Schlitten-/Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten unterhalb derer der Spritzgusschrauben. Hier ist jedoch zu beachten, dass die Versuche der Spritzgusschrauben ohne definiertes Anzugsmoment beim Einspannen durchgeführt wurden. Es ist daher anzunehmen, dass die Vollmaterialschrauben beim Einspannen mit 1 Nm stärker beschädigt wurden und aufgrund dieser Schwächung früher versa-

gen. Gerade bei M6 Schrauben wirkt sich dies vermutlich am stärksten aus, da der Querschnitt am kleinsten ist. Folglich ist, bei ähnlicher Größe der geschädigten Fläche, dies im Verhältnis am einflussreichsten. Hierzu passt auch, dass mit steigendem Durchmesser die Zugfestigkeit der gesättigten Vollmaterialschauben deutlich zunimmt (von M6 zu M8 um circa 50 %; von M8 zu M10 um circa 20 %)(s. Anhang, Tabelle 7.19-7.21). Die Werte der raumfeuchten Vollmaterialschauben liegen bei hohen Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten höher als die der Spritzgusschauben, bei niedrigeren Belastungsanstiegsgeschwindigkeiten geringfügig tiefer und das innerhalb der Messunsicherheit. Der deutlich niedrigere Wert der raumfeuchten Vollmaterialschauben bei $v = 0,006$ m/s ist nicht aussagekräftig, da in dieser Versuchsreihe nicht alle Schrauben gerissen sind bzw. der Kraftverlauf inkonsistent war und die mittlere Bruchkraft daher nicht zweifelsfrei korrekt ist. Bei den trockenen Schrauben liegt lediglich der Wert bei $v = 0,006$ m/s der Vollmaterialschauben unter dem der Spritzgusschauben - auch hier jedoch lediglich geringfügig und innerhalb der Messunsicherheit. Darüber hinaus ist die Standardabweichung bei gedrehten Vollmaterialschauben tendenziell kleiner als bei Spritzgusschauben. Dies lässt auf ein systematischeres und reproduzierbareres Verhalten schließen.

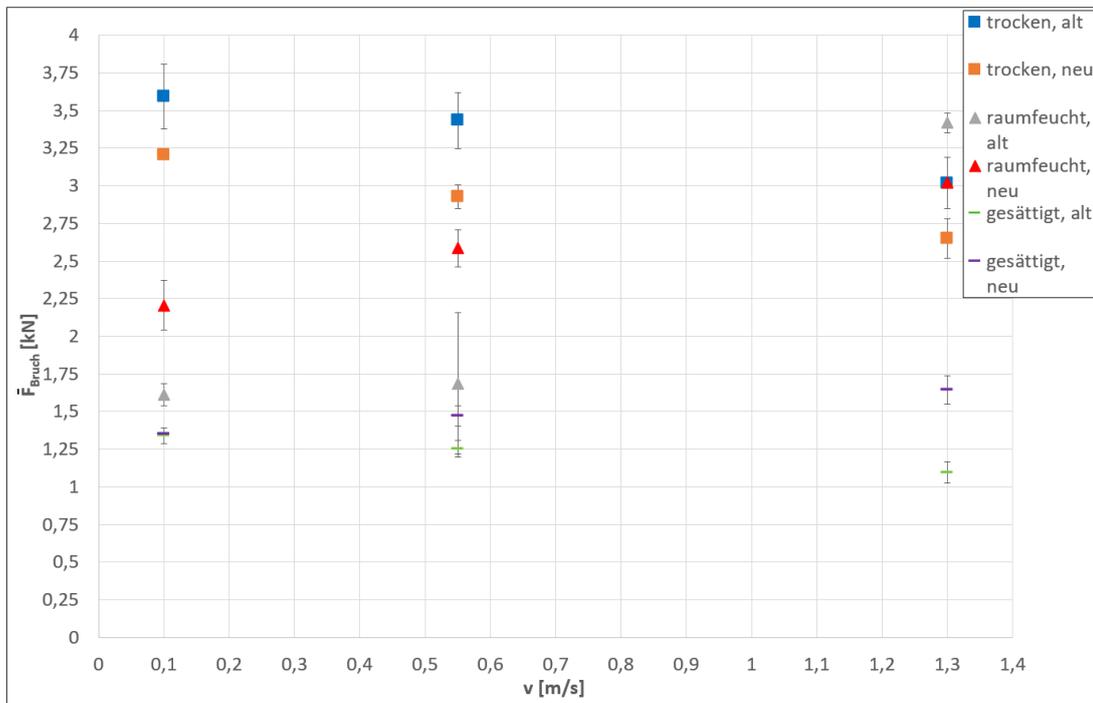


Abbildung 5.2: Vergleich der Bruchkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M8 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte

Bei den Bruchkräften der M8 Schrauben lassen sich auf den ersten Blick ebenfalls keine zuverlässigen Aussagen bzgl. der Bruchkraft machen. Während bei gesättigter Konditionierung die Kräfte der Vollmaterialschrauben konstant oberhalb derer der Spritzgusschrauben liegen, übersteigt die Bruchkraft der raumfeuchten Spritzgusschrauben bei $v=1,3$ m/s die der Vollmaterialschrauben. Allerdings ist die Aussagekraft des Wertes für die Spritzgusschraube zu hinterfragen: Aus Tabelle 7.20 im Anhang geht hervor, dass die Zugfestigkeit der raumfeuchten M8 Spritzgusschrauben trotz Fehlstellen von 93,38 MPa bei $v = 0,5$ m/s auf 46,99 MPa bei $v=1,3$ m/s für raumfeuchte M10 Schrauben sprunghaft abfällt. (Zum Vergleich: zwischen den raumfeuchten M8 und M10 Vollmaterialschrauben für die gleichen Schlittengeschwindigkeiten erfolgt ein Anstieg von 91,72 MPa auf 95,31 Mpa). Dieses Verhalten ist nicht plausibel zu erklären, was auf fehlerhafte Daten hindeutet. Bei trockener Konditionierung ist die Bruchkraft bei den Vollmaterialschrauben in allen Fällen kleiner als die der Spritzgusschrauben. Auch hier sind die Ergebnisse der Spritzgusschrauben jedoch kritisch zu hinterfragen. Aus Tabelle 7.20 im Anhang geht ebenfalls hervor, dass die Zugfestigkeit der trockenen Spritzgusschrauben mit bis zu 100,11 MPa unplausibel hoch und die Aussagekraft der Versuche daher zweifelhaft ist (Zum Vergleich: die Zugfestigkeit der trockenen Vollmaterialschrauben liegt bei M6 Schrauben zwischen 48,76 MPa und 83,3 MPa, bei M10 Schrauben zwischen 50,53 Mpa und 57,24 MPa).

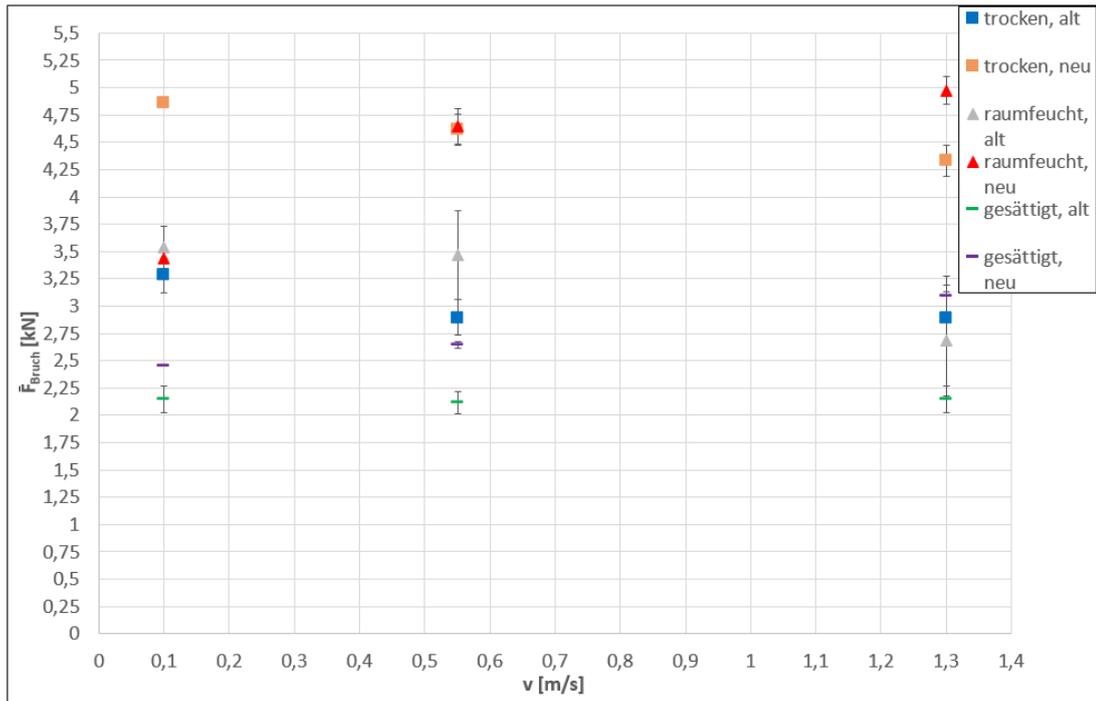


Abbildung 5.3: Vergleich der Bruchkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M10 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte

Die Bruchkraft der gedrehten M10 Vollmaterialschrauben ist in nahezu allen Fällen deutlich höher als die der Spritzgusschrauben. Für gesättigte Vollmaterialschrauben bei $v=0,1$ m/s liegt die Bruchkraft minimal niedriger - allerdings innerhalb der Messunsicherheit. Zusätzlich ist die Streuung der Vollmaterialschrauben überwiegend deutlich geringer, dementsprechend ist das Verhalten reproduzierbar. Die Ergebnisse der Spritzgusschrauben fallen bei den M10 Schrauben äußerst niedrig aus. Die Zugfestigkeit liegt hierfür bei den trockenen Schrauben zwischen 50,70 MPa und 57,24 MPa, für die raumfeuchten zwischen 46,99 MPa und 63,84 MPa und für die gesättigten zwischen 45,70 MPa und 53,11 MPa. Letztgenannte liegen als einzige im erwarteten Bereich. Es ist daher kritisch zu hinterfragen, inwieweit die übrigen Werte aussagekräftig und belastbar sind.

5.2 Ausblick

Aus den Versuchsergebnissen sollte abgeleitet werden, ob eine Zulassung mittels gedrehten Vollmaterialschrauben erfolgen könne, in der Praxis jedoch die Verwendung spritzgegossener Schrauben möglich sei. Grundvoraussetzung hierfür ist,

dass Vollmaterialschrauben in jedem Falle, oder zumindest in einem statistisch belastbaren Umfang bei höheren Kräften versagen als Spritzgusschrauben. Dies konnte in dieser Versuchsreihe nicht eindeutig nachgewiesen werden. Allerdings ist die Richtigkeit einiger Werte für die Bruchkraft bei den Spritzgusschrauben fraglich. Die nominelle Zugfestigkeit von Polyamid 6.6 liegt bei 85 MPa (vgl. Auer Kunststofftechnik o. D.). Auffällig ist, dass die ermittelte Zugfestigkeit der Spritzgusschrauben bei jenen Versuchen mitunter weit über 85 MPa liegt, bei denen die ermittelte Bruchkraft über jener der entsprechenden Vollmaterialschrauben liegt. Es ist demzufolge zu hinterfragen, inwieweit es plausibel ist, dass die ermittelte Zugfestigkeit von Material mit Fehlstellen größer ist als die der Vollmaterialschrauben und dabei zusätzlich die nominelle Zugfestigkeit signifikant überschreitet, auch wenn die Versuche nicht unter Normbedingungen durchgeführt wurden. Die ermittelten Zugfestigkeiten sind den Tabellen 7.19-7.21 im Anhang zu entnehmen.

Daher sind zunächst erneute Untersuchungen der Spritzgusschrauben notwendig, um das zukünftige Vorgehen festlegen zu können. Im Fokus stehen hier zunächst die M8 bzw. M10 Schrauben.

Abschließend müssen Versuche an Explosionsklappen unter realen Bedingungen durchgeführt werden. Für eine bessere Reproduzierbarkeit wird der Explosionsdruck mit Gas erzeugt. Das Versuchsprogramm beinhaltet dann je 5 Versuche bei raumfeuchter bzw. gesättigter Konditionierung. Dies hat folgende Gründe: Bei raumfeuchten Schrauben wurde die höchste Zugfestigkeit mit relativ großer Dehnung (circa 15-30 %) bei hoher Belastungsanstiegsgeschwindigkeit gemessen. Außerdem ist dieses Feuchteniveau im Einsatz sehr wahrscheinlich. Bei den gesättigten Schrauben wurden sehr hohe Dehnungen (> 45 %) ermittelt. Möglicherweise resultiert dies in sehr langen Öffnungszeiten der Explosionsklappen, wobei dies negativen Einfluss auf den reduzierten Explosionsdruck haben könnte. Des Weiteren ist auch dieses Sättigungsniveau im Einsatz denkbar.

Der Vergleich dieser beiden Zustände bzw. Schraubentypen zeigt, welches Szenario kritischer bzw. ob letztendlich eine Zulassung mit gedrehten Schrauben möglich ist.

6 Literatur

Auer Kunststofftechnik (o. D.): *Datenblatt PA 6.6*, [online] <http://www.auer-kunststofftechnik.de/pdf/Datenblatt%20PA%206.6%20natur%2070064.pdf> [abgerufen am 20.09.2021].

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI) (o. D.): *Brennbare Stäube*, [online] <https://www.bgrci.de/exinfode/ex-schutz-wissen/antworten-auf-haeufig-gestellte-fragen/brennbare-staeube/317-was-bedeutet-der-kst-wert/> [abgerufen am 15.06.2021].

Chupin, Pavlo (2009): *Experimentelle Verifizierung von Baumusterprüfungen im Modellmaßstab*, Masterarbeit, Elektrotechnik, Mannheim, Deutschland: Hochschule Mannheim und Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin.

Domininghaus, Hans/Elsner/Eyerer/Hirth (2008): *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, New York, Vereinigte Staaten: Springer Publishing.

Europäisches Komitee für Normung (2012): *DIN EN 14491: Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen*, Berlin, Deutschland: Beuth Verlag.

Fischer, Ulrich/Roland Kilgus/Bernd Leopold/Werner Röhler/Karl Schilling (1987): *Tabellenbuch Metall*, 36. Aufl., Wuppertal, Deutschland: Europa Lehrmittel.

König, Tobias (2021): *Charakterisierung des Bruchverhaltens von Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Belastungsanstiegsgeschwindigkeit und Materialfeuchte: F-05-1901*, Masterprojektarbeit, Verfahrenstechnik, Mannheim, Deutschland: Hochschule Mannheim.

Lutterbeck, Karin (1984): *Das Verhalten von Kunststoffen unter dem Einfluss wechselnder Umgebungsfeuchte und -temperatur*, Dissertation, Kunststoffe, [online] <https://d-nb.info/1167567714/34>.

Stommel, Markus/Wolfgang Korte (2011): *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*, München, Deutschland: Carl Hanser Verlag.

7 Anhang

Tabelle 7.1: Ergebnisübersicht M6, trocken

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	1,6662	1,8082	1,7318	1,4963	1,5081
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	0,0253	0,0465	0,1548	0,0501	0,1268
$u_{F_{\max}}$ [kN]	0,0339	0,0624	0,2077	0,0672	0,1701
\bar{t}_{\max} [s]	0,3294	0,0226	0,0005	0,0003	0,0005
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	0,0055	0,0024	0,0008	0,0001	0,0002
\bar{F}_{Bruch} [kN]	1,6520	1,8020	1,7318	1,4963	1,5081
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,0191	0,0495	0,1548	0,0501	0,1268
$u_{F_{\text{bruch}}}$ [kN]	0,0256	0,0665	0,2077	0,0672	0,1701
\bar{t}_{Bruch} [s]	1,1012	0,0275	0,0005	0,0003	0,0005
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	0,0736	0,0073	0,0008	0,0001	0,0002
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	-	-	3,9119	3,7583
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	-	0,2714	0,2702
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	-	0,5758	0,5733
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	1186,3895	35408,6552	229597,7530	424762,7956	583938,6367
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	65,8232	651,2592	46254,9894	22744,4090	22120,4520

Tabelle 7.2: Ergebnisübersicht M6, raumfeucht

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	1,4991	1,6859	1,8603	1,9479	1,9636
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	0,0544	0,0309	0,0363	0,0132	0,0214
$u_{F_{\max}}$ [kN]	0,0730	0,0415	0,0487	0,0198	0,0453
\bar{t}_{\max} [s]	0,2882	0,0050	0,0016	0,0011	0,0019
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	0,2189	0,0025	0,0006	0,0004	0,0001
\bar{F}_{Bruch} [kN]	0,6846	1,4057	1,6617	1,8592	1,8687
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,0275	0,0589	0,0667	0,1027	0,0336
$u_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,0369	0,0790	0,0894	0,1541	0,0712
\bar{t}_{Bruch} [s]	2,5765	0,1226	0,0134	0,0029	0,0040
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	0,1360	0,0118	0,0026	0,0022	0,0002
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	28,0952	21,1714	-	16,5750
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	2,0976	-	0,4179
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	2,8143	-	0,8864
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	33418,7878	319477,5070	493957,1450	647012,1417
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	523,1904	5508,3989	42483,1808	18311,6583

Tabelle 7.3: Ergebnisübersicht M6, gesättigt

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	0,6362	0,6194	0,7222	0,7443	0,7537
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	0,0087	0,0502	0,0359	0,0190	0,0414
$u_{F_{\max}}$ [kN]	0,0186	0,0752	0,0482	0,0255	0,0556
\bar{t}_{\max} [s]	1,6880	0,0000	0,0138	0,0054	0,0040
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	0,7755	-	0,0004	0,0007	0,0007
\bar{F}_{Bruch} [kN]	0,6224	0,4843	0,5225	0,6037	0,5749
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,0044	0,0540	0,0427	0,0128	0,0541
$u_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,0094	0,0809	0,0906	0,0172	0,0726
\bar{t}_{Bruch} [s]	0,0808	0,0340	0,0478	0,0247	0,0202
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	0,0568	0,0248	0,0078	0,0041	0,0092
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	57,4762	57,5048	77,4437	-
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	2,8640	1,3051	-
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	4,9606	2,2605	-
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	8308,0699	94832,2273	141732,2840	162625,0186
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	1229,7977	4377,7250	8485,5021	5717,9831

Tabelle 7.4: Ergebnisübersicht M8, trocken

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	2,9598	3,2188	2,9250	2,7312	2,6497
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	0,0229	0,1422	0,0786	0,2469	0,1329
$u_{F_{\max}}$ [kN]	0,0485	0,1908	0,1055	0,3312	0,1783
\bar{t}_{\max} [s]	0,9418	0,0541	0,0023	0,0002	0,0007
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	-	0,0086	0,0002	0,0004	0,0001
\bar{F}_{Bruch} [kN]	2,8238	3,2037	2,9250	2,7312	2,6497
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,1443	0,1642	0,0786	0,2469	0,1329
$u_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,3061	0,2203	0,1055	0,3312	0,1783
\bar{t}_{Bruch} [s]	4,5860	0,0587	0,0023	0,0002	0,0007
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	-	0,0164	0,0002	0,0004	0,0001
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	-	4,3419	5,3286	3,8631
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	0,6156	0,5876	0,1440
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	0,8259	0,8814	0,3056
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	929,9084	38011,2370	363902,7136	781663,9200	947201,3660
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	103,6944	913,9221	21621,5567	47199,4408	39802,5935

Tabelle 7.5: Ergebnisübersicht M8, raufmfeucht

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	2,5423	2,7612	3,1597	3,2321	3,3570
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	0,0573	0,0408	0,1008	0,0329	0,0863
$u_{F_{\max}}$ [kN]	0,0769	0,0548	0,1352	0,0442	0,1158
\bar{t}_{\max} [s]	2,7970	0,0826	0,0078	0,0041	0,0037
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	0,2914	0,0012	0,0002	0,0002	0,0001
\bar{F}_{Bruch} [kN]	1,5577	2,2053	2,5841	2,7398	3,0201
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	-	0,03338	0,1648	0,0257	0,1238
$u_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	-	0,4479	0,2211	0,0344	0,1661
\bar{t}_{Bruch} [s]	4,3395	0,1825	0,0239	0,0118	0,0075
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	-	0,0262	0,0032	0,0009	0,0009
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	41,8429	31,3133	35,3110	25,5226
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	3,8605	2,8796	3,8443
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	5,1794	3,8633	5,7664
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	1263,9724	39254,3782	402297,0967	790331,4400	774489,5031
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	74,2879	903,4606	17007,2697	53528,5578	30142,5746

Tabelle 7.6: Ergebnisübersicht M8, gesättigt

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	1,5072	1,7737	2,0013	2,0454	2,1052
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	0,0687	0,0245	0,0536	0,0484	0,0801
$u_{F_{\max}}$ [kN]	0,0922	0,0328	0,0719	0,0650	0,1074
\bar{t}_{\max} [s]	-		0,0150	0,0056	0,0054
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	-	0,0040	0,0003	0,0005	0,0001
\bar{F}_{Bruch} [kN]	1,3120	1,3508	1,4704	1,6251	1,6448
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,0900	0,0512	0,0699	0,0722	0,0947
$u_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	0,1207	0,0687	0,0937	0,0969	0,1270
\bar{t}_{Bruch} [s]	0,0016		0,0373	0,0193	0,0155
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	0,0021	0,0182	0,0062	0,0049	0,0010
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	-	46,0667	-	54,6071
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	-	-	-
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	-	-	-	-
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]		27369,2391	288591,8330	386437,1610	493106,9643
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]		5991,0921	11062,3599	13013,4537	14583,2653

Tabelle 7.7: Ergebnisübersicht M10, trocken

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	-	4,8713	4,6180	4,2521	4,3314
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	-	0,1249	0,1410	0,1390	0,1459
$u_{F_{\max}}$ [kN]	-	0,1676	0,1892	0,1865	0,1958
\bar{t}_{\max} [s]	-	0,0721	0,0055	0,0020	0,0017
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	-	0,0201	0,0003	0,0003	0,0002
\bar{F}_{Bruch} [kN]	-	4,8569	4,6131	4,2521	4,3314
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	-	0,1384	0,1424	0,1390	0,1459
$u_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	-	0,1856	0,1911	0,1865	0,1958
\bar{t}_{Bruch} [s]	-	0,0764	0,0055	0,0020	0,0017
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	-	0,0281	0,0003	0,0003	0,0002
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	10,2333	5,2893	6,7476	5,3405
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	3,6468	0,1324	0,9943	0,1902
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	5,4703	0,1985	2,1092	0,2551
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	48475,9703	521577,2440	961240,3107	1301043,7633
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	799,0544	16542,5510	50917,7292	17358,2632

Tabelle 7.8: Ergebnisübersicht M10, raufmfeucht

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	-	4,6142	5,2707	5,4139	5,5279
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	-	0,0251	0,0452	0,0578	0,1363
$u_{F_{\max}}$ [kN]	-	0,0337	0,0679	0,0775	0,1828
\bar{t}_{\max} [s]	-	0,1366	0,0102	0,0046	0,0046
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	-	0,0067	0,0002	0,0002	0,0001
\bar{F}_{Bruch} [kN]	-	3,4417	4,6463	4,6238	4,9744
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	-	0,2360	0,0123	0,1007	0,1248
$u_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	-	0,3166	0,0185	0,1351	0,1675
\bar{t}_{Bruch} [s]	-	0,2697	0,0205	0,0126	0,0086
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	-	0,0113	0,0011	0,0009	0,0009
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	45,5675	27,6944	30,9167	24,5119
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	6,6881	1,3927	1,7061	0,9935
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	11,5841	2,4121	2,5591	1,3329
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	45110,5336	379826,8987	895481,0880	1193081,2438
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	885,1495	4081,7490	17242,5218	42545,3498

Tabelle 7.9: Ergebnisübersicht M10, gesättigt

Frequenz	0,3 Hz	5 Hz	27,5 Hz	53 Hz	65 Hz
\bar{F}_{\max} [kN]	-	3,3686	3,6880	3,8273	4,0258
$\sigma_{F_{\max}}$ [kN]	-	0,0449	0,0709	0,0883	0,1349
$u_{F_{\max}}$ [kN]	-	0,0603	0,0951	0,1185	0,1811
\bar{t}_{\max} [s]	-	0,1500	0,0162	0,0085	0,0063
$\sigma_{t_{\max}}$ [s]	-	0,0028	0,0003	0,0012	0,0002
\bar{F}_{Bruch} [kN]	-	2,4546	2,6453	3,0600	3,0939
$\sigma_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	-	0,0484	0,0338	0,0847	0,1791
$u_{F_{\text{Bruch}}}$ [kN]	-	0,0649	0,0453	0,1137	0,2403
\bar{t}_{Bruch} [s]	-	0,2577	0,0396	0,0181	0,0157
$\sigma_{t_{\text{Bruch}}}$ [s]	-	0,0096	0,0019	0,0005	0,0011
$\bar{\epsilon}_{\text{Bruch}}$ [%]	-	44,2857	48,7280	48,8889	49,8488
$\sigma_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	2,3668	2,6717	1,1742	0,0179
$u_{\epsilon_{\text{Bruch}}}$ [%]	-	3,5503	4,0075	2,0337	0,0379
$\overline{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	41438,2196	284411,4139	718061,4048	865582,2092
$\sigma_{\Delta F/\Delta T}$ [N/s]	-	911,1300	5899,9351	23298,6290	17729,9021

Tabelle 7.10: Vergleichsübersicht neu/alt; M6; trocken

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,006	1,675	0,05	1,652	0,019	-1,38	-61,89
0,1	1,672	0,106	1,802	0,050	+7,77	-53,26
0,55	1,545	0,131	1,732	0,155	+12,09	+18,15
1,06	1,367	0,133	1,496	0,050	+9,46	-62,35
1,3	1,339	0,08	1,508	0,127	+12,63	+58,52

Tabelle 7.11: Vergleichsübersicht neu/alt; M6; raumfeucht

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,006	1,099	0,063	0,685	0,027	-37,71	-56,40
0,1	1,383	0,079	1,406	0,059	+1,64	-25,48
0,55	1,711	0,053	1,662	0,067	-2,88	+25,77
1,06	1,665	0,128	1,859	0,103	+11,67	-19,74
1,3	1,721	0,157	1,869	0,034	+8,58	-78,62

Tabelle 7.12: Vergleichsübersicht neu/alt; M6; gesättigt

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,006	0,657	0,058	0,622	0,004	-5,26	-92,35
0,1	0,703	0,023	0,484	0,054	-31,10	+134,63
0,55	0,648	0,046	0,522	0,043	-19,37	-7,17
1,06	0,740	0,071	0,604	0,013	-18,42	-81,91
1,3	0,739	0,047	0,575	0,054	-22,21	+15,15

Tabelle 7.13: Vergleichsübersicht neu/alt; M8; trocken

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,1	3,593	0,213	3,2037	0,1642	-6,68	-10,77
0,55	3,433	0,184	2,9250	0,0786	-14,80	-57,27
1,3	3,018	0,17	2,6497	0,1329	-12,20	-21,85

Tabelle 7.14: Vergleichsübersicht neu/alt; M8; raumfeucht

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,1	1,614	0,073	2,2053	0,3338	+30,65	-28,82
0,55	1,688	0,469	2,5841	0,1648	+53,09	-64,86
1,3	3,417	0,064	3,0201	0,1238	-11,62	+93,40

Tabelle 7.15: Vergleichsübersicht neu/alt; M8; gesättigt

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,1	1,339	0,053	1,3508	0,0512	+7,80	-10,18
0,55	1,253	0,057	1,4704	0,0699	+17,35	+22,56
1,3	1,096	0,073	1,6448	0,0947	+50,07	+29,66

Tabelle 7.16: Vergleichsübersicht neu/alt; M10; trocken

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,1	3,282	0,156	4,8569	0,1384	+67,65	-14,06
0,55	2,897	0,161	4,6131	0,1424	+59,24	-11,53
1,3	2,885	0,245	4,3314	0,1459	+50,14	-40,44

Tabelle 7.17: Vergleichsübersicht neu/alt; M10; raumfeucht

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,1	3,539	0,189	3,4417	0,2360	-0,73	-41,30
0,55	3,467	0,402	4,6463	0,1648	+34,01	-59,00
1,3	2,686	0,506	4,9744	0,1238	+85,20	-75,54

Tabelle 7.18: Vergleichsübersicht neu/alt; M10; gesättigt

v [m/s]	$\bar{F}_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,alt}}$ [kN]	$\bar{F}_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	$\sigma_{\text{Bruch,neu}}$ [kN]	\bar{F}_{Bruch} neu/alt [%]	σ_{Bruch} neu/alt [%]
0,1	2,146	0,118	2,4546	0,0484	+16,17	-52,11
0,55	2,113	0,101	2,6453	0,0338	+25,19	-66,55
1,3	2,146	0,118	3,0939	0,1791	+44,17	+51,76

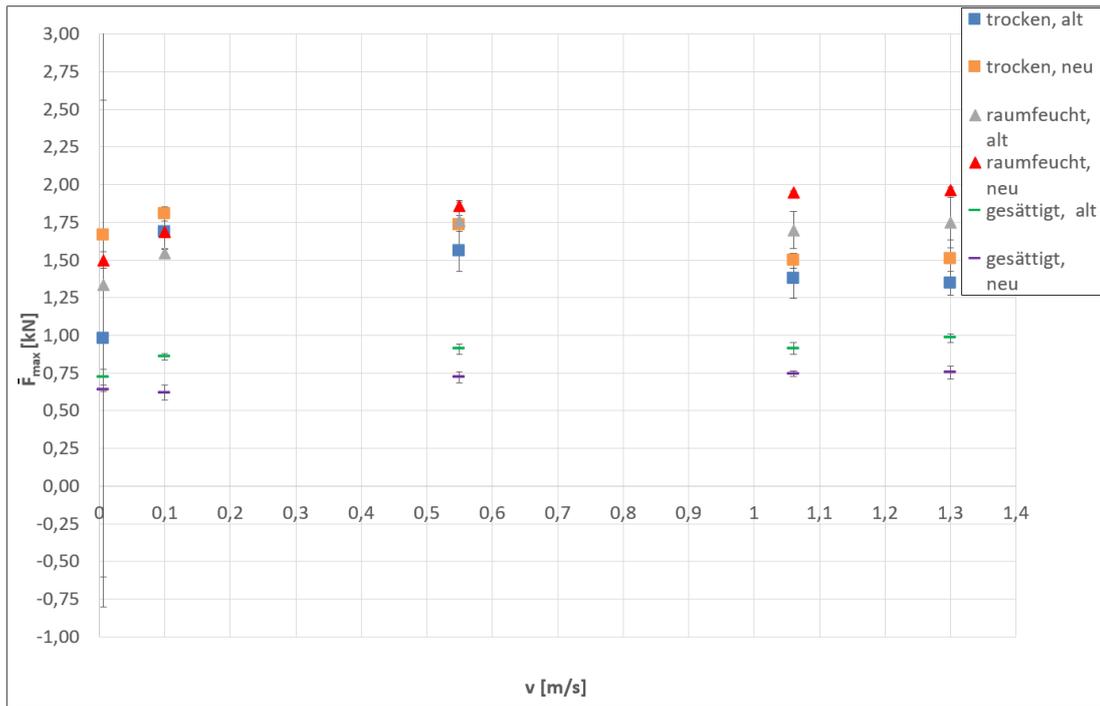


Abbildung 7.1: Vergleich der Maximalkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M6 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte

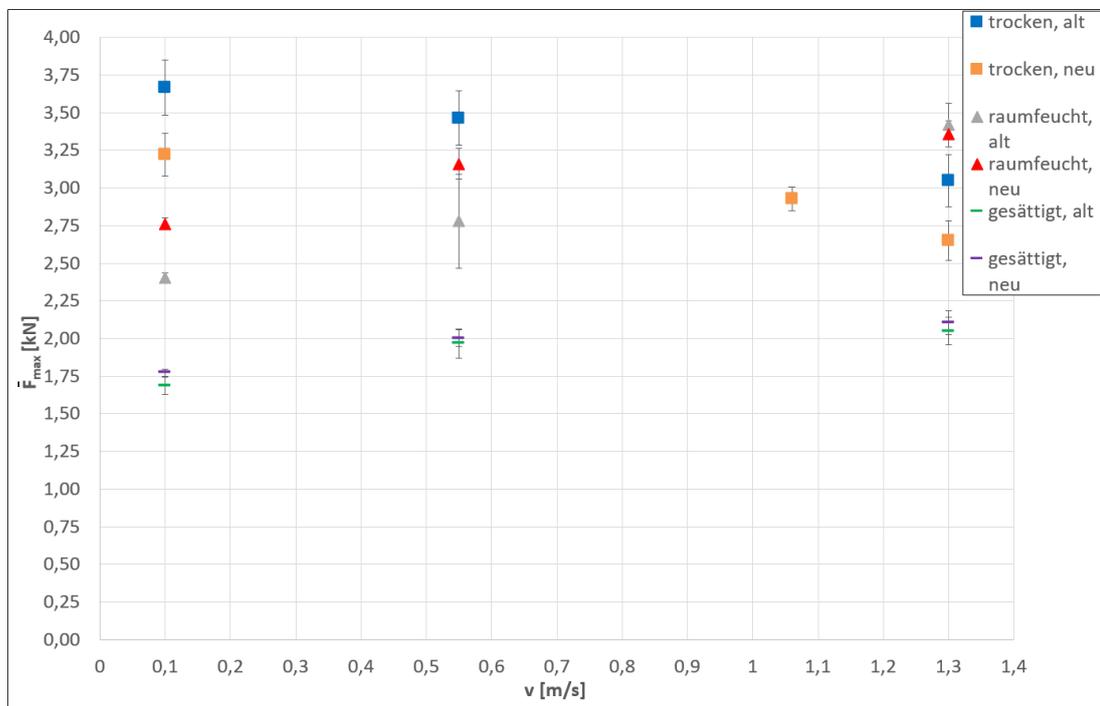


Abbildung 7.2: Vergleich der Maximalkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M8 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte

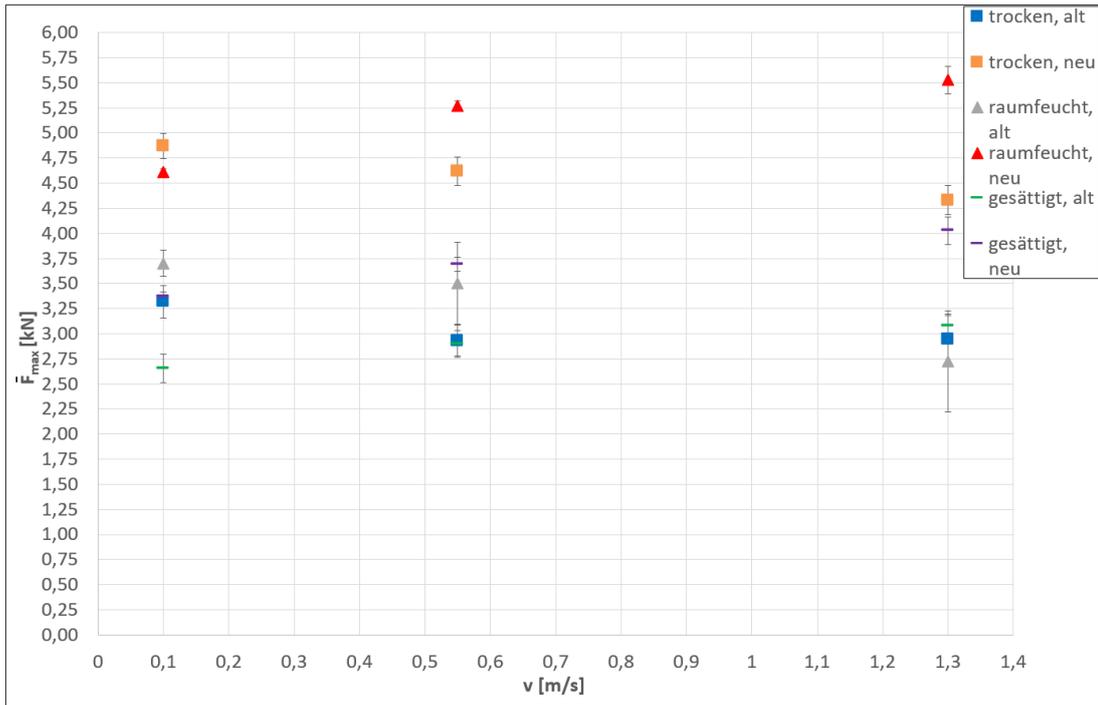


Abbildung 7.3: Vergleich der Maximalkräfte zwischen spritzgegossenen und gedrehten M10 Polyamidschrauben in Abhängigkeit von Schlittengeschwindigkeit und Materialfeuchte

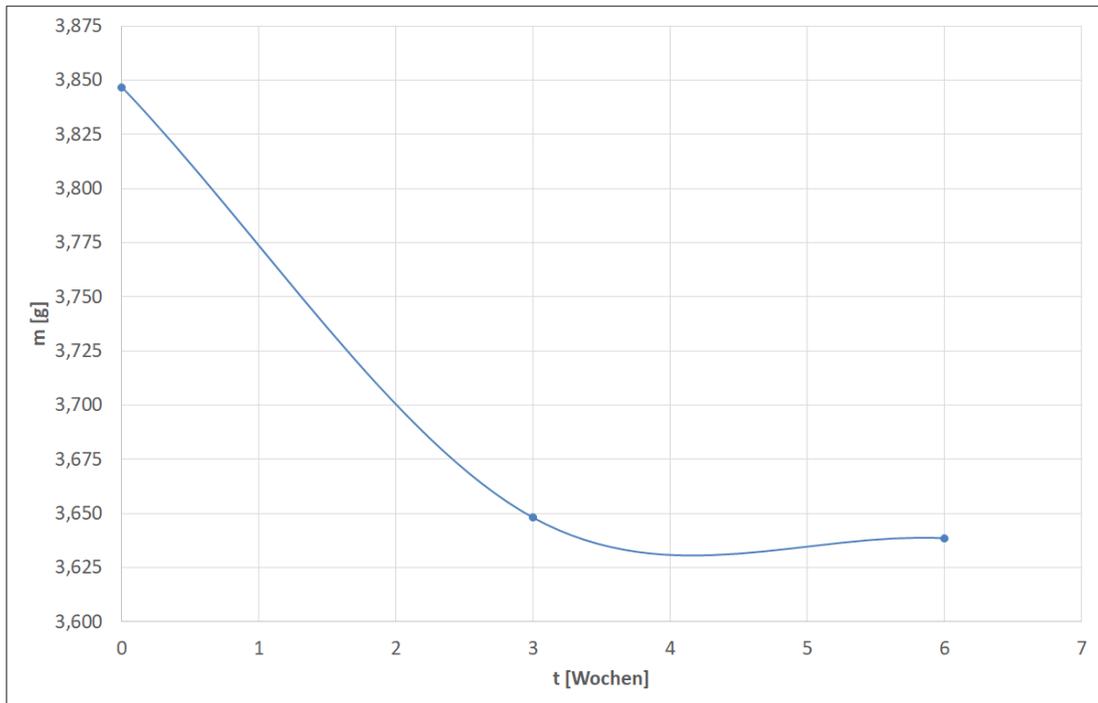


Abbildung 7.4: Masseabnahme einer gesättigten M8 Schraube über die Zeit durch Trocknung

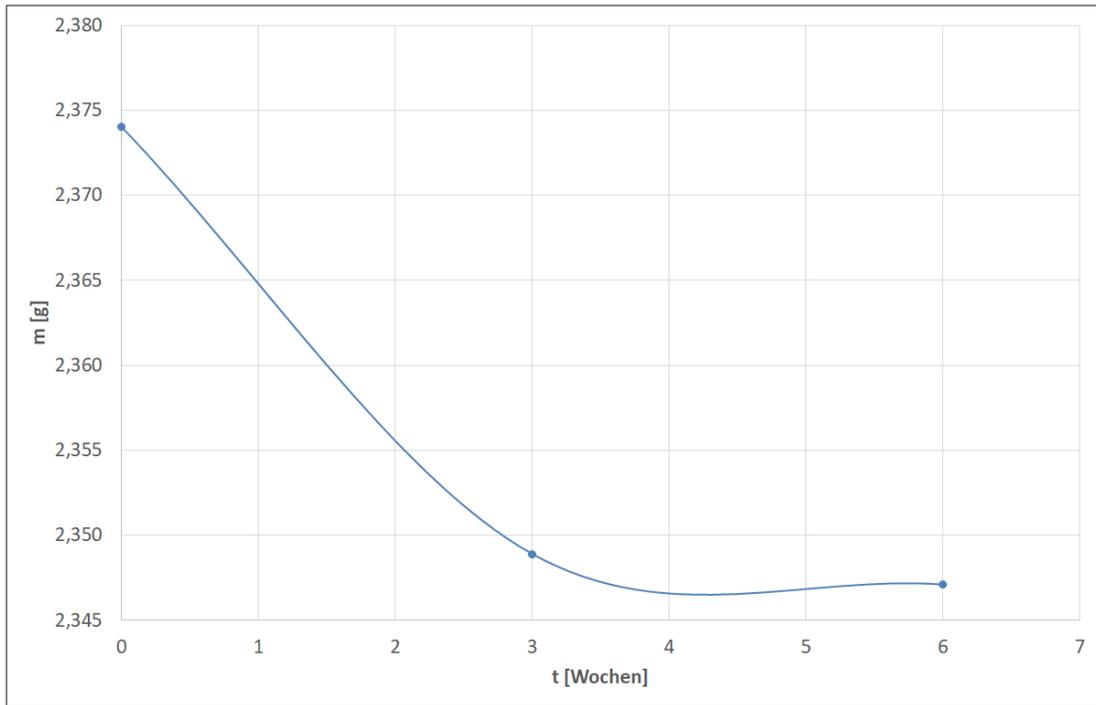


Abbildung 7.5: Masseabnahme einer raumfeuchten M8 Schraube über die Zeit durch Trocknung

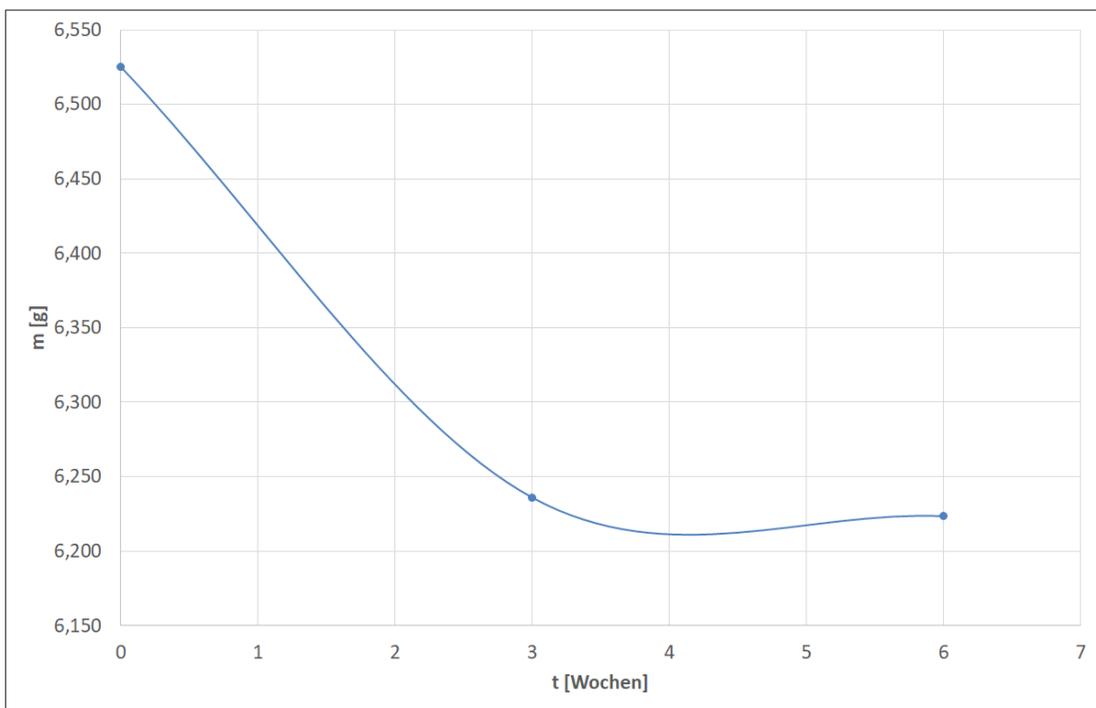


Abbildung 7.6: Masseabnahme einer gesättigten M10 Schraube über die Zeit durch Trocknung

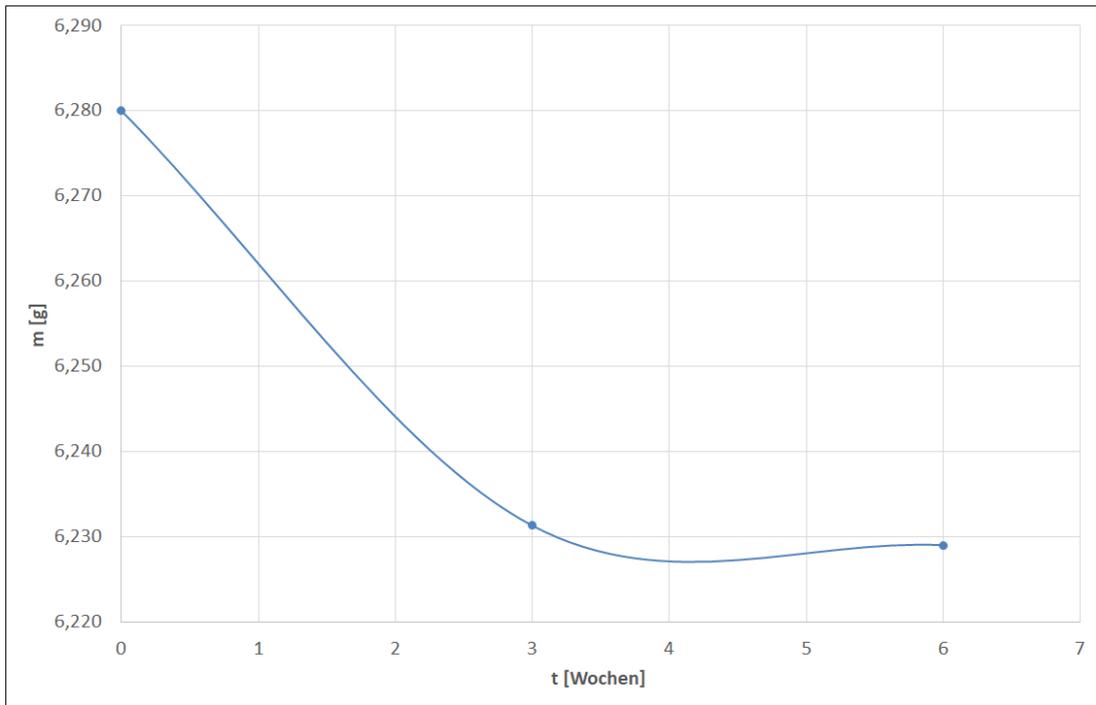


Abbildung 7.7: Masseabnahme einer raumfeuchten M10 Schraube über die Zeit durch Trocknung

Tabelle 7.19: Vergleichsübersicht Zugfestigkeit neu/alt; M6

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

Tabelle 7.20: Vergleichsübersicht Zugfestigkeit neu/alt; M8

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

Tabelle 7.21: Vergleichsübersicht Zugfestigkeit neu/alt; M10

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