



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Masterarbeit**

Sebastian Allermann

# **Untersuchung des Vorspannkraftverhaltens bei Kunststoff-Direktverschraubungen**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Sebastian Allermann**

**Untersuchung des  
Vorspannkraftverhaltens bei  
Kunststoff-Direktverschraubungen**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Meyer-Eschenbach  
Zweitprüfer/in : Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer

Abgabedatum: 19.11.2016

# **Zusammenfassung**

**Sebastian Allermann**

## **Thema der Masterthesis**

Untersuchung des Vorspannkraftverhaltens bei Kunststoff-Direktverschraubungen

## **Stichworte**

Direktverschraubung, Schraubenverbindung, Gewinde, Reibung, gewindeformende Schrauben, Vorspannkraft, Relaxation, Kunststoff, Einflussfaktoren

## **Kurzzusammenfassung**

Für die Konstruktion von Kunststoffbauteilen werden als kostengünstige Verbindungsart vermehrt Direktverschraubungen mit gewindeformenden Metallschrauben eingesetzt. Diese Art der Verbindung erlaubt eine spanlose Formgebung des Gewindes und minimiert das Risiko des selbsttätigen Lösens der Schraube. Nachteilig wirkt sich die zeitabhängige Abnahme der Vorspannkraft, bedingt durch das viskoelastische Materialverhalten von Kunststoffen, auf eine solche Verbindung aus. Die Vorspannkraft ist die qualitätsbestimmende Größe der Direktverschraubung und sollte über den gesamten Produktlebenszyklus ausreichend vorhanden sein. In dieser Arbeit werden daher analytische und experimentelle Untersuchungen zur Vorspannkraftabnahme in Abhängigkeit der Zeit durchgeführt. Einflussfaktoren, die sich auf das Vorspannkraftverhalten auswirken, wie Relaxation, Belastungsart, -dauer und -geschwindigkeit, sowie das Nachziehen der Direktverschraubung und die sich daraus ergebenden Belastungsunterschiede, werden in experimentellen Untersuchungen betrachtet und die Ergebnisse interpretiert.

**Sebastian Allermann**

## **Title of the paper**

Examination of the preload behaviour at self-tapping screw connections

## **Keywords**

Direct screw coupling, screw connection, thread, friction, self-tapping screws, preload, relaxation, plastic, influencing parameters

## **Abstract**

Self-tapping screw connections with threaded metal screws are increasingly used as a cost efficient connection type for the engineering design of plastic components. On the one hand this type of connection tolerates a non-cutting forming of the thread and minimizes the risk of loosening the screw connection. On the other hand time related decline of the preload has a negative impact on the connection due to the visco-elastic material behaviour of plastic. Besides the preload is the main parameter to determine the quality of direct screws. Therefore it should be sufficiently available during the whole product life cycle. In this work, analytical and experimental research about the reduction of the preload according to the time has been made. The results of the experimental investigations about the influencing factors that affect the preload such as relaxation, loading type, loading duration, loading rate, retightening of the direct screw and the resulting loading differences have been considered and interpreted.

## Aufgabenstellung

### für die Masterarbeit

von Herrn Sebastian Allermann

Matrikel-Nummer: 1901191

### Thema: Untersuchung des Vorspannkraftverhaltens bei Kunststoff-Direktverschraubungen

Mit gewindeformenden Direktverschraubungen werden kostengünstige und materialsparende Verbindungen ermöglicht. Zur prozesssicheren Produktion und zum zuverlässigen Betrieb über Lebensdauer, sind detaillierte Kenntnisse zu den Einflussparametern unbedingt notwendig, so dass hier noch Forschungsbedarf besteht. Im Rahmen der Arbeit sollen Einflüsse (z.B. Material, Kernlochdurchmesser, Schraubengeometrie, Eindrehgeschwindigkeit, Anzahl der Nachziehvorgänge, Temperatur, Zeit) auf eine Kunststoffdirektverschraubung analytisch und experimentell untersucht und beurteilt werden. Des Weiteren soll die Analyse und Bewertung des Nachziehens durchgeführt und das Setzverhalten von Kunststoffen beurteilt werden.

In dieser Masterarbeit werden folgende Aufgabenpakete bearbeitet:

- Literaturrecherche und Analyse relevanter Grundlagen
- Methodische Analyse relevanter Wirkgeometrien und Methodische Analyse des Vorspannkraftverhaltens sowie des Vorspannkraftverlustes durch Relaxation
- Durchführung von Modell- und Vorversuchen
- Versuchsplanung und Versuchsvorbereitung
- Versuchsdurchführung
- Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse sowie Ableitung von Empfehlungen für die Praxis anhand von ausgewählten Beispielen

_____ Ort	_____ Datum	_____ Prof. Dr.-Ing. Andreas Meyer-Eschenbach
_____ Ort	_____ Datum	_____ Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer
_____ Ort	_____ Datum	_____ B. Eng. Sebastian Allermann



## Selbstständigkeitserklärung

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich, Sebastian Allermann, geboren am 13.05.1987 in Achim, dass ich die vorliegende Masterthesis mit dem Thema:

**„Untersuchung des Vorspannkraftverhaltens bei Kunststoff-Direktverschraubungen“**

Selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet.

---

Ort

---

Datum

---

Sebastian Allermann

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>I</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b> .....	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Formelzeichen und Symbole</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung.....	2
1.2 Methodisches Vorgehen .....	2
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....	<b>5</b>
2.1 Kunststoffe .....	5
2.1.1 Entwicklung und Einsatzbereiche der Kunststoffe .....	5
2.1.2 Herstellung von Kunststoffen .....	7
2.1.3 Einteilung der Kunststoffe.....	9
2.1.4 Thermoplaste.....	10
2.1.5 Duroplaste.....	13
2.1.6 Elastomere .....	14
2.1.7 Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen .....	16
2.2 Schraubenverbindung und der Einfluss von Reibung.....	21
2.3 Verbindungsvarianten für Kunststoffe .....	25
2.3.1 Schnappverbindungen .....	26
2.3.2 Pressverbindungen.....	26

---

2.3.3	Schrauben.....	27
<b>3</b>	<b>Analytische Betrachtung von Direktverschraubungen .....</b>	<b>29</b>
3.1	Eigenschaften von Direktverschraubungen.....	29
3.2	Einschraubvorgang gewindeformender Direktverschraubungen.....	30
3.3	Berechnungsansätze und konstruktive Empfehlungen .....	35
3.4	Vorteile von Direktverschraubungen.....	39
3.5	Einflussgrößen auf Direktverschraubungen .....	40
3.5.1	Gewindegeometrie der Schraube .....	41
3.5.2	Kernlochdurchmesser .....	42
3.5.3	Entlastungsbohrung.....	42
3.5.4	Einschraublänge .....	43
3.5.5	Art der Abstützung .....	44
3.5.6	Einfluss der Temperatur .....	44
<b>4</b>	<b>Bisherige Untersuchungen an der HAW Hamburg.....</b>	<b>46</b>
4.1	Übersicht bisheriger wissenschaftlicher Arbeiten .....	47
4.2	Einflussparameter Kernlochdurchmesser in Leichtmetallen.....	48
4.3	Einfluss der Relaxation auf die Vorspannkraft.....	51
4.4	Einfluss des Nachziehens von Direktverschraubungen .....	52
<b>5</b>	<b>Versuchseinrichtung .....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>Versuchsplanung und Vorbereitung.....</b>	<b>55</b>
6.1	Planung der Versuche.....	55
6.2	Versuchsvorbereitung .....	57
6.2.1	Herstellung der Kunststoffproben/Komponenten des Modellversuchs .....	57
6.2.2	Eigenschaften und Abmessungen der Prüflinge für die Vorversuche.....	58

---

6.2.3	Eigenschaften/Abmessungen der Prüflinge für Direktverschraubungen ..	60
<b>7</b>	<b>Versuchsdurchführung .....</b>	<b>61</b>
7.1	Modellversuch .....	61
7.1.1	Variation der Schrauben .....	64
7.1.2	Einsatz von Tellerfedern .....	65
7.2	Druckversuch.....	67
7.3	Starre Verbindung.....	68
7.4	Direktverschraubung .....	69
<b>8</b>	<b>Ergebnisse und Ableitungen.....</b>	<b>70</b>
8.1	Druckversuch.....	70
8.1.1	Belastung bis zum Versagen .....	70
8.1.2	Verformungsverhalten von PP-GF 30 unter konstantem Druck.....	72
8.2	Modellversuche .....	74
8.3	Starre Verbindung.....	75
8.4	Kunststoffdirektverschraubung .....	76
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>77</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>79</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang: Versuchsprotokolle</b>	
<b>A 1</b>	<b>Versuchsprotokolle der Modellversuche</b>	
<b>A 2</b>	<b>Versuchsprotokolle der Druckversuche</b>	
<b>A 3</b>	<b>Versuchsprotokolle der starren Verbindungen</b>	
<b>A 4</b>	<b>Versuchsprotokolle der Direktverschraubungen</b>	
<b>B.</b>	<b>Anhang: Technische Zeichnungen</b>	
<b>C.</b>	<b>Anhang: Wissenschaftliche Veröffentlichung</b>	

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1-1 Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise.....</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 2-1 Weltweite Kunststoffproduktion von 1950 bis 2012 [11].....</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 2-2 Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland im Jahr 2015 [13].....</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 2-3 Destillation von Erdöl mit Röhrenofen (links) und Fraktionierturm (rechts) [14].....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 2-4 Herstellung von Kunststoffen.....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 2-5 Unterteilung der Polymere in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere .....</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 2-6 Zustandsdiagramm der amorphen Thermoplaste [9] .....</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 2-7 Zustandsdiagramm der teilkristallinen Thermoplaste [9] .....</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 2-8 Zustandsdiagramm der Duroplaste [9] .....</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 2-9 Zustandsdiagramm von Elastomeren [9].....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 2-10 Einsatzfelder von Kunststoffen in Deutschland nach Branchen im Jahr 2015 [13].....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 2-11 Modell zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens.....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 2-12 Modell zur Beschreibung des visko-elastischen Materialverhaltens .....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 2-13 Modell zur Beschreibung des viskosen Materialverhaltens.....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 2-14 Burger Modell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Kunststoffen .....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 2-15 Metrisches ISO-Gewinde nach DIN 13 [4].....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 2-16 Reibung in einer metrischen Schraubverbindung [23].....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 2-17 Reibungsverluste in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten [23] .....</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 2-18 Fügeverfahren für Kunststoffbauteile (Teile aus: [24]) .....</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 3-1 Aufbau einer gewindeformenden Direktverschraubung [23] .....</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 3-2 Drehmomentverlauf einer Sackloch- und Durchgangverschraubung (Teile aus: [4]) .....</i>	<i>30</i>

---

<i>Abbildung 3-3 Momenten- und Vorspannkraftverlauf einer Direktverschraubung in PP-GF30 .....</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 3-4 Ansetzen und Eindrehen der gewindeformenden Schraube (Teile aus: [27]) .....</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 3-5 Erhöhung des Reibmoments mit zunehmender Einschraubtiefe (Teile aus: [27]) .....</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 3-6 Eindrehen der Schraube bis zur Kopfauflage (Teile aus: [27]).....</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 3-7 Vorspannkraftaufbau durch Anziehen der Schraube bis zum Anziehmoment (Teile aus: [27]) .....</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 3-8 Weiteres Anziehen der Schraube bis zum Versagen der Verbindung (Teile aus: [27]) .....</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 3-9 Konstruktive Abmessungen von Einschraubdom und gewindeformender Schraube [28].....</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 3-10 Verschraubungen mit Gewindeeinsätzen und Direktverschraubungen (Teile aus: [29]) .....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 3-11 Einflussgrößen auf Direktverschraubungen in Kunststoff.....</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 3-12 Zwei typische gewindeformende Schrauben für Kunststoffe (Teile aus: [4]) .....</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 3-13 Einfluss des Durchmessers auf das Überdrehmoment <math>M_{\bar{U}}</math> und das Eindrehmoment <math>M_E</math> .....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 3-14 Einfluss der Entlastungsbohrung auf die Spannungen im Kunststoffdom [29] .....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 3-15 Einfluss der Einschraublänge auf <math>M_{\bar{U}}</math> und <math>M_E</math>.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 3-16 Art der Abstützung: linke Seite Fußabstützung, rechte Seite Stirnabstützung [23] .....</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 4-1 Versuchsablauf [23].....</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 4-2 Untersuchte Einflussfaktoren von Mahn [4].....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 4-3 Untersuchte Einflussfaktoren von Schreiner [30] .....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 4-4 Untersuchte Einflussfaktoren von Bronstein [6].....</i>	<i>47</i>

---

<i>Abbildung 4-5</i> Untersuchte Einflussfaktoren von Allermann.....	47
<i>Abbildung 4-6</i> Darstellung der theoretischen Gewindeüberdeckung [23].....	48
<i>Abbildung 4-7</i> Einfluss des Kernlochdurchmessers auf das Eindreh- und Überdrehmoment .....	49
<i>Abbildung 4-8</i> Einfluss des Kernlochdurchmesser auf die Vorspannkraft in Leichtmetallen [23].....	50
<i>Abbildung 4-9</i> Vorspannkraftverlust aufgrund von Relaxation des Kunststoffs [23] .....	51
<i>Abbildung 4-10</i> Langzeitversuch mit Nachziehen nach 30 Sekunden [23].....	52
<i>Abbildung 5-1</i> Verschraubungsprüfstand der Hochschule für Angewandte Wissenschaften	53
<i>Abbildung 5-2</i> Detaillierte Übersicht der Komponenten des Verschraubungsprüfstands (Teile aus: [23]) .....	54
<i>Abbildung 6-1</i> Vorgehensweise bei der Planung der Versuchsreihen.....	56
<i>Abbildung 6-2</i> Herstellung der Versuchsproben und Komponenten des Modellversuchs .....	57
<i>Abbildung 6-3</i> Prüflinge für die Vorversuche [Programm: Catia V5].....	59
<i>Abbildung 6-4</i> Darstellung der Proben für die Versuche zur Direktverschraubung [4, 6] .....	60
<i>Abbildung 7-1</i> Bedeutsamkeit der Messfrequenz bei den Vorspannkraftmessungen .....	61
<i>Abbildung 7-2</i> Anordnung der Komponenten für den Modellversuch [Programm: Catia V5]	62
<i>Abbildung 7-3</i> Abmaße des verwendeten Axiallagers im Modellversuch [33].....	62
<i>Abbildung 7-4</i> Elastische Dehnung von metrischen Schrauben mit einer Länge von 140mm .....	64
<i>Abbildung 7-5</i> Anordnung der Tellerfedern.....	65
<i>Abbildung 7-6</i> Abmaße der verwendeten Tellerfedern .....	65
<i>Abbildung 7-7</i> Mögliche Anordnung der Tellerfedern (Kraft über Weg).....	66
<i>Abbildung 7-8</i> Aufbau des Druckversuchs.....	67
<i>Abbildung 7-9</i> Starre Verbindung im Schraubstock.....	68
<i>Abbildung 7-10</i> Darstellung der Direktverschraubungen [4].....	69
<i>Abbildung 8-1</i> Verformung der Kunststoffproben aus PP und PP-GF 30.....	71

---

<i>Abbildung 8-2 Spannungsverlauf von PP und PP-GF 30 bis zum Versagen .....</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 8-3 Ansicht der zerstörten Probe PP-GF 30 unter dem Mikroskop (500 <math>\mu</math>m) .....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 8-4 Verformungsverhalten von PP-GF 30 bei 20 kN .....</i>	<i>73</i>
<i>Abbildung 8-5 Vergleich: Tellerfeder, Schraube M5x240 und Schraube M8x140 .....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 8-6 relative Restvorspannkraft nach 10 min., 1Std. und 10Std. ....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 8-7 Vergleich bei unterschiedlichen Belastungsarten.....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 8-8 Langzeitversuch mit Nachziehen in PP-GF 30.....</i>	<i>76</i>



## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2-1 Unterscheidung der Begriffe: Festigkeit Steifigkeit und Zähigkeit</i>	17
<i>Tabelle 6-1 Übersicht der hergestellten Prüflinge mit Angabe der Länge</i>	59
<i>Tabelle 6-2 Eigenschaften der Materialien PP, PP-GF20 und PP-GF 30</i>	58
<i>Tabelle 6-3 Übersicht der Proben für Direktverschraubungen</i>	60
<i>Tabelle 7-1 Übersicht der durchgeführten Modellversuche</i>	63
<i>Tabelle 7-2 Übersicht der durchgeführten Druckversuche</i>	67
<i>Tabelle 7-3 Übersicht der durchgeführten Versuche mit starrer Einspannung</i>	68
<i>Tabelle 7-4 Übersicht der durchgeführten Versuche zu Direktverschraubungen</i>	69
<i>Tabelle 8-1 Darstellung der Ergebnisse aus den Modellversuchen</i>	74

## Formelzeichen und Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A_3$	[mm <sup>2</sup> ]	Kernquerschnitt
$A_S$	[mm <sup>2</sup> ]	Spannungsquerschnitt
$D$	[mm]	Gewindenennmaß
$d$	[mm]	Gewindenennmaß
$d_1$	[mm]	Nenndurchmesser der Schraube
$d_2$	[mm]	Kerndurchmesser der Schraube
$D_2$	[mm]	Flankendurchmesser
$d_3$	[mm]	Kerndurchmesser des Außengewindes
$d_A$	[mm]	Außendurchmesser Prüfdorn
$d_K$	[mm]	Kernlochdurchmesser
$d_{KA}$	[mm]	Äußerer Durchmesser des Schraubenkopfes
$d_S$	[mm]	Durchmesser der Entlastungsbohrung
$E_0$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Federsteifigkeit (elastischer Anteil)
$E_{rel}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Federsteifigkeit (visko-elastischer Anteil)
$F_V$	[N]	Vorspannkraft
$h$	[mm]	Tubushöhe
$l$	[mm]	Schraubenlänge
$l_E$	[mm]	Einschraublänge
$M$	[Nm]	Drehmoment
$M_A$	[Nm]	Anziehmoment
$M_E$	[Nm]	Eindrehmoment
$M_F$	[Nm]	Gewindeformmoment
$M_{Gr}$	[Nm]	Gewindereibungsmoment
$M_{Gst}$	[Nm]	Gewindesteigungsmoment
$M_K$	[Nm]	Kopfreibungsmoment

$M_R$	[Nm]	Reibmoment
$M_U$	[Nm]	Überdrehmoment
$P$	[mm]	Gewindesteigungsmoment
$R_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit
$s$	[mm]	Wanddicke
$t$	[s]	Zeit
$T_g$	[°C]	Glastemperatur
$t_s$	[mm]	Tiefe der Entlastungsbohrung
$T_Z$	[°C]	Zersetzungstemperatur
$\alpha$	[°]	Gewindeflankenwinkel
$\beta$		Fächerwinkel
$\varepsilon$	[mm] [%]	Verformung allgemein
$\varepsilon_e$	[mm] [%]	Elastische Dehnung
$\varepsilon_{ges}$	[mm] [%]	Gesamtdehnung
$\varepsilon_{rel}$	[mm] [%]	relaxierende Dehnung
$\varepsilon_v$	[mm] [%]	viskose Dehnung
$\eta_0$	[kg/(m*s)]	Viskosität (viskoser Anteil)
$\eta_{rel}$	[kg/(m*s)]	Viskosität (visko-elastischer Anteil)
$\mu$		Gleitreibungszahl
$\mu_G$		Reibzahl im Bereich des Gewindes
$\mu_{ges}$		Gesamtreibwert
$\mu_K$		Reibwert Kopfauflage
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung
$\sigma_{DF}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Druckspannung
$\sigma_F$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Fließspannung des Kunststoffes
$\sigma_S$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Streckspannung
$\tau$	[s]	Relaxationszeit

## Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Beschreibung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymer
COC	Cyclopolyolefin-Copolymere
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E-modul	Elastizitätsmodul
HDPE	Polyethylen mit schwach verzweigten Polymerketten
KFZ	Kraftfahrzeug
LCP	Liquid Crystal Polymer
LDPE	Polyethylen mit stark verzweigten Polymerketten
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PEEK	Polyetheretherketon
PE-LD	Polyethylen niederer Dichte
PE-LLD	Polyethylen niederer Dichte
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PP-GF 30	Polypropylen mit 30% Glasfasergehalt
PP-GF20	Polypropylen mit 20% Glasfasergehalt
PPO	Polyphenylenoxid
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan

PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

# 1 Einführung

## *Introduction*

Für die Entwicklung neuer Produkte haben Konstrukteure eine zunehmende Anzahl von Anforderungen an die Funktion und Wartung von Produkten zu erfüllen. Das Bestreben nach einer immer günstigeren Produktion, führt zusätzlich zu neuen Anforderungen an den Aufbau eines Produkts, wie beispielsweise die Anordnung der einzelnen Komponenten und ihre Verbindungen. Diese Verbindungen sollen möglichst effizient, zuverlässig, sicher und wirtschaftlich sein. Außerdem wird die Möglichkeit einer einfachen Montage, Wartung, Demontage und letztlich das Recycling vorausgesetzt. Ermöglicht werden diese Forderungen meist durch Einsatz lösbarer Verbindungen. Diese bieten die Möglichkeit, Teile aus unterschiedlichen Materialien zusammenzufügen. Bei Komponenten und Bauteilen aus Leichtmetall und Kunststoff werden zunehmend Direktverschraubungen mit gewindeformenden Metallschrauben eingesetzt, [1].

Für den Einsatz von Direktverschraubungen kann das Kernloch der zu verbindenden Komponente in einem spanlosen Prozess, wie beispielsweise durch Druckgießen bei Leichtmetallen und Spritzgießen bei Kunststoffen, hergestellt werden. Das Gewinde entsteht in einem spanlosen Umformprozess direkt beim Eindrehen der Metallschraube. Somit dient die Schraube gleichzeitig als Werkzeug zur Gewindeherstellung. Folglich können beim Einsatz von Direktverschraubungen Materialkosten und Arbeitsgänge eingespart werden.

Besonders lukrativ wirkt sich dieser Vorgang in der Massenfertigung, wie zum Beispiel bei der Herstellung von KFZ-Komponenten, Haushaltsgeräten oder Elektrowerkzeugen, aus, [2]. Zusätzlich minimiert diese Technologie das Risiko des selbsttätigen Lösens der Schraubenverbindung, welches insbesondere bei Verbindungen mit hohen Sicherheitsanforderungen, wie beispielsweise in der Automobilindustrie, der Fall ist, [3].

## **1.1 Zielsetzung** *Objective Targets*

Ziel dieser Arbeit ist eine analytische und experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen auf Direktverschraubungen in Kunststoffen. Dazu soll die Vorspannkraft als qualitätsbestimmende Größe für eine sichere Schraubenverbindung über eine bestimmte Dauer gemessen werden. Die Beurteilung bisheriger Arbeiten der Studenten Mahn [4], Schreiner [5], Bronstein [6] und Mayer [7], dient als Grundlage für weitere Versuche. Um das Materialverhalten von Kunststoffen genauer bewerten zu können, werden im Vorfeld zu den Direktverschraubungen Modellversuche durchgeführt. Dabei soll insbesondere die Vorspannkraftabnahme auf Grund von Relaxation und das Verformungsverhalten auf Grund von Retardation in Abhängigkeit von Höhe, Art und Dauer der Belastung untersucht werden. Des Weiteren wird eine Analyse und Bewertung des Nachziehens durchgeführt und das Setzverhalten von Kunststoffen beurteilt.

## **1.2 Methodisches Vorgehen** *Methodical Procedure*

Eine umfassende Literaturrecherche bildet die Basis für die Behandlung der Grundlagen.

Im Kapitel 2 „Grundlagen und Stand der Technik“ werden zunächst die unterschiedlichen Kunststoffe beschrieben und deren Eigenschaften, insbesondere unter äußeren Belastungen, näher untersucht. Dabei wird das visko-elastische Verhalten, welches letztlich zur Abnahme der Vorspannkraft der Direktverschraubung führt, mit Hilfe des Burger-Modells beschrieben.

Genau wie bei metrischen Standardverschraubungen unterliegen Direktverschraubungen Reibungseinflüssen. Eine Beschreibung der Reibungseinflüsse und das generelle Wirkprinzip einer Schraubenverbindung werden im Detail erörtert. Die Basis für eine analytische Betrachtung von Direktverschraubungen in Kapitel 3 setzt die Kenntnisse über Einflüsse auf eine Schraubverbindung und das Verformungsverhalten von Kunststoffen voraus. Die Kenntnis zu den Einflüssen auf eine Schraubenverbindung und den Grundlagen des Verformungsverhaltens von Kunststoffen bildet die

Grundlage für eine analytische Betrachtung von „Direktverschraubungen“ in Kapitel 3. Dabei wird der Einschraubprozess detailliert beschrieben und die Wirkmechanismen bildhaft dargestellt. Zusätzlich werden die Vorteile von Direktverschraubungen und deren gängigsten Berechnungsansätze bzw. Auslegungsempfehlungen aufgezeigt.

Direktverschraubungen unterliegen im Gegensatz zu metrischen Standardverschraubungen einer Reihe von Einflussfaktoren. Einige der relevantesten Einflüsse werden detailliert dargestellt. Zusammen mit bisherigen Untersuchungen an Direktverschraubungen, dargestellt in Kapitel 4, ergibt sich der Forschungsbedarf, der als Grundlage für die Versuchsplanung- und Vorbereitung in Kapitel 6 dient.

Zu den Vorbereitungen der experimentellen Untersuchungen zählt die Beschaffung aller notwendigen Materialien, die für die Durchführung der Versuche erforderlich sind. Dazu gehören die Kunststoff- und Metallformteile einschließlich erforderlicher Schrauben. Für die eigentliche Herstellung der Kunststoffproben und den metallischen Komponenten, die für den Modellversuch notwendig sind, steht die zentrale Laborwerkstatt der Hochschule für Angewandte Wissenschaften zur Verfügung. Außerdem werden grob die Versuchsblöcke definiert, die im Laufe der Durchführung der Versuche durch Teilauswertung der Einzelversuche stetig angepasst werden.

Die eigentliche Durchführung der Versuchsblöcke findet in Kapitel 7 statt. Dort werden die Versuchsaufbauten für die vier Versuchsblöcke (Modellversuch (VA), Druckversuch (VD), starre Verbindung (VC), Direktverschraubung(VB)) dargestellt und beschrieben.

Nach einer Auswertung und Interpretation der Ergebnisse in Kapitel 8 werden die aussagekräftigsten Ergebnisse in Kapitel 9 zusammengefasst und anschließend ein Ausblick für weitere Forschungsarbeit gegeben.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr.- Ing. Andreas Meyer-Eschenbach ein Wissenschaftlicher Bericht für das „JSME Journal“ mit dem Titel: „Important parameters for self-tapping screw connections“ ausgearbeitet. Der Bericht befindet sich im Anhang C.



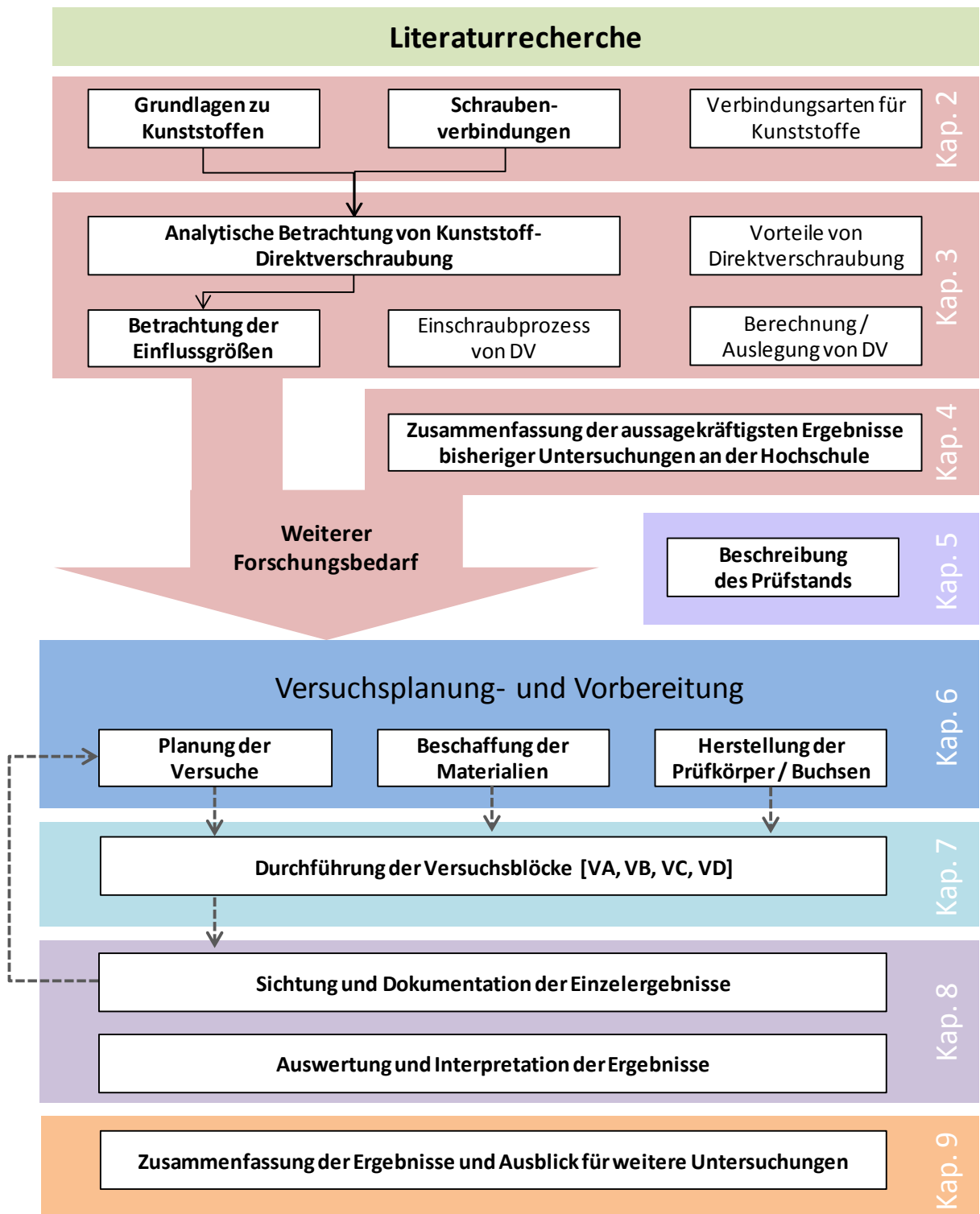


Abbildung 1-1 Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise

## **2 Grundlagen und Stand der Technik** *Fundamentals and State of the Art*

Für das Verständnis von Direktverschraubungen in Kunststoffe werden zu Beginn der Arbeit Grundlagen zu den Themen Kunststoffe und Verschraubungen geschaffen. Neben einer Unterscheidung der Kunststoffe werden insbesondere deren Einsatzbereiche und die mechanischen Eigenschaften erläutert. Die Grundlagen sind für das spätere Verständnis der Versuche erforderlich.

Zum Thema Schraubenverbindungen werden die Wirkprinzipien und der Einfluss der Reibung genauer betrachtet. Die Grundlagen der Direktverschraubungen bilden ein separates Kapitel.

### **2.1 Kunststoffe** *Plastics*

*„Kunststoffe (Polymere) sind Werkstoffe; die Kunststoffkunde ist somit ein Teil der Werkstoffkunde. Werkstoffe sind für die Konstruktion nützliche, feste Stoffe, die sich technisch, wirtschaftlich, umweltlich und physiologisch gut verarbeiten, anwenden und zurückgewinnen lassen. Kunststoffe sind Werkstoffe (nach Maß) mit allen Chancen und Risiken aus dieser Anpassungsfähigkeit“, [8].*

#### **2.1.1 Entwicklung und Einsatzbereiche der Kunststoffe** *Development and Field of Application of Plastics*

Kunststoffe sind im Vergleich zu metallischen Werkstoffen eine vergleichsweise neue Werkstoffgruppe. Seit 1940 steigt die Produktion von Kunststoffen stetig an und nimmt in der heutigen Zeit eine entscheidende Rolle in verschiedensten Industriezweigen ein. Aufgrund des niedrigen spezifischen Gewichts und der guten mechanischen Eigenschaften werden Kunststoffe zunehmend als Konstruktionswerkstoffe eingesetzt. Die verhältnismäßig niedrige Schmelztemperatur von Kunststoffen erlaubt eine kostengünstige Bauteilherstellung, wie beispielsweise im Spritzgießprozess.

Im Jahr 2014 betrug die weltweite Produktion von Kunststoffen 311 Mio. Tonnen. Das entspricht einem Produktionsvolumen von 283 Mio. m<sup>3</sup> und liegt somit deutlich

höher als bei Stahl und Aluminium. Diese liegen zusammengerechnet mit 251 Mio. m<sup>3</sup> unter dem Produktionsvolumen von Kunststoff. (Abbildung 2-1), [9, 10].

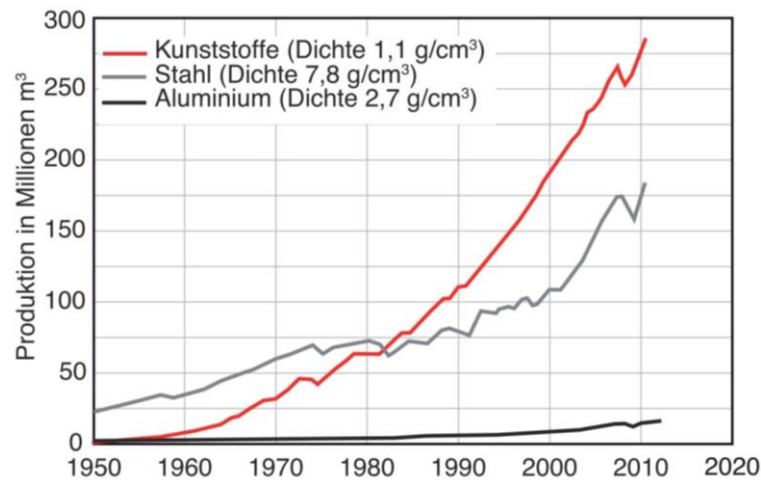


Abbildung 2-1 Weltweite Kunststoffproduktion von 1950 bis 2012 [11]

Kunststoffe haben ein sehr breites Einsatzspektrum. Abbildung 2-2 zeigt eine Übersicht der Haupteinsatzbereiche. Den größten Teil der Kunststoffe nimmt die Verpackungsindustrie mit 32 % ein. Die Kunststoffe dienen meist als Schutz, besonders in der Lebensmittelindustrie, und werden mit minimalen Einsatzmengen genutzt. Außerdem zählt zum Einsatzgebiet des Kunststoffes auch das Bauwesen mit einem sehr hohen Anteil von 25 %. Dort wird Kunststoff als Dämmmaterial oder auch für Rohrleitungen verwendet.

Außerdem wird Kunststoff im Fahrzeugbau mit einem Anteil von 9 % und für elektrotechnische Anwendungen mit einem Anteil von 7,4 % eingesetzt. Besonders im Fahrzeugbau ergeben sich erhebliche Vorteile durch die Gewichtseinsparungen. Mit den geringen Massenkräften wird die Massenträgheit reduziert. Bei Reduzierung der Massenträgheit kann gleichzeitig die notwendige Motorleistung gesenkt und damit Ressourcen gespart werden.

Weitere Einsatzgebieten des Kunststoffes sind die Möbelindustrie, die Landwirtschaft und auch die Medizintechnik. [11, 12]

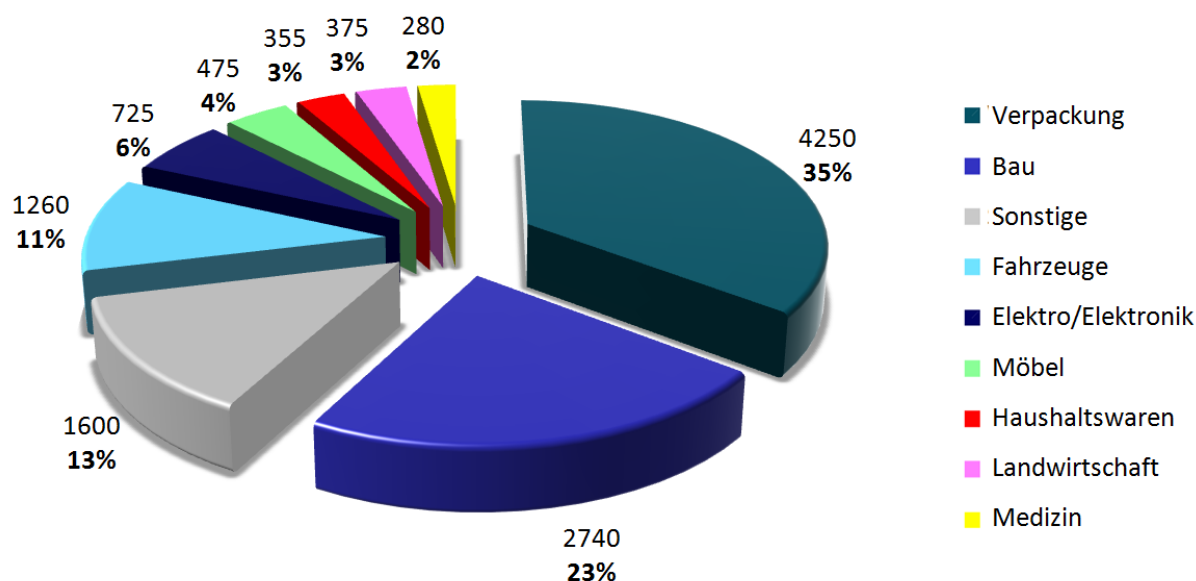


Abbildung 2-2 Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland im Jahr 2015 [13]

## 2.1.2 Herstellung von Kunststoffen

### *Manufacturing of Plastics*

Bei Kunststoff handelt es sich um einen künstlich hergestellten Stoff, genauer gesagt einen synthetischen Stoff, der organische und chemische Verbindungen enthält. Organische Stoffe bestehen hauptsächlich aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff. In vielen organischen Verbindungen finden sich auch die Elemente Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Chlor, Fluor und Silizium.

Fast alle synthetischen Stoffe haben als Rohstoffbasis Erdöl, welches mehr als 1000 verschiedene Kohlenwasserstoffverbindungen enthält. Zur Aufbereitung des Erdöls wird dieses mit Hilfe eines Röhrenofens auf etwa 400°C erhitzt und einem Fraktionierturm zugeleitet. Da der größte Teil des Erdöls verdampft und somit durch die verschiedenen Etagen des Fraktionierturms wandert, können beim späteren Abkühlen durch Kondensation in den einzelnen Etagen bestimmte Erdölanteile herausgefiltert werden. Die Etagendurchlässe des Fraktionierturms sind mit Glocken abgedeckt und verhindern so ein zu schnelles Aufsteigen der Dämpfe. Die unterschiedlichen Siedepunkte und Größen der Kohlenwasserstoffmoleküle ermöglichen eine Trennung der Erdölanteile. Der schematische Ablauf des Destillationsprozesses ist in Abbildung 2-3 dargestellt, [14].

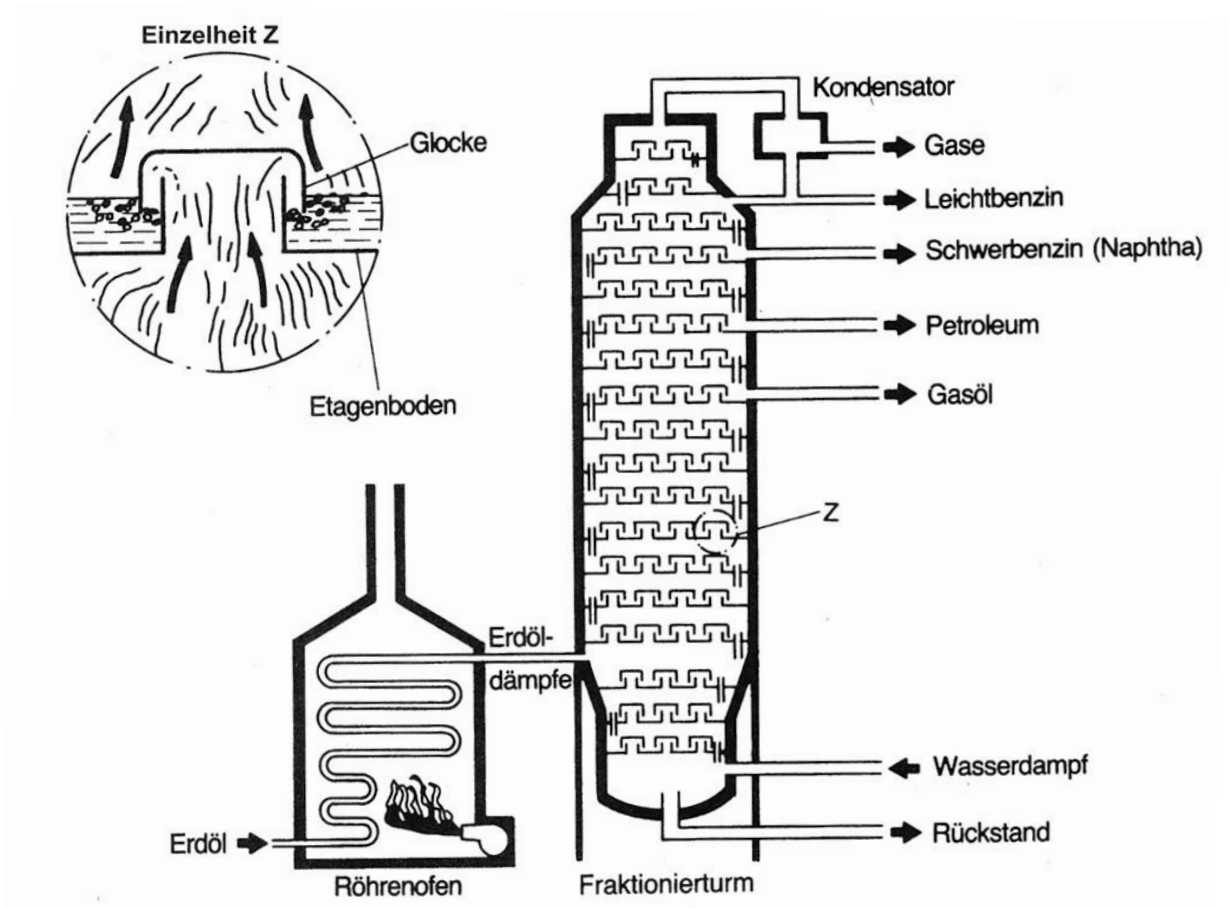


Abbildung 2-3 Destillation von Erdöl mit Röhrenofen (links) und Fraktionierturm (rechts) [14]

Als Basisrohstoff kommen für die weitere Verarbeitung zum Kunststoff nur die Benzinfraktionen in Frage. Die Kohlenwasserstoffe dieser Fraktionen werden durch Temperaturen um 850°C und Katalysatoren in kleinere, gasförmige, ungesättigte Kohlenwasserstoffe verändert. Dieser Vorgang wird auch „cracken“ genannt.

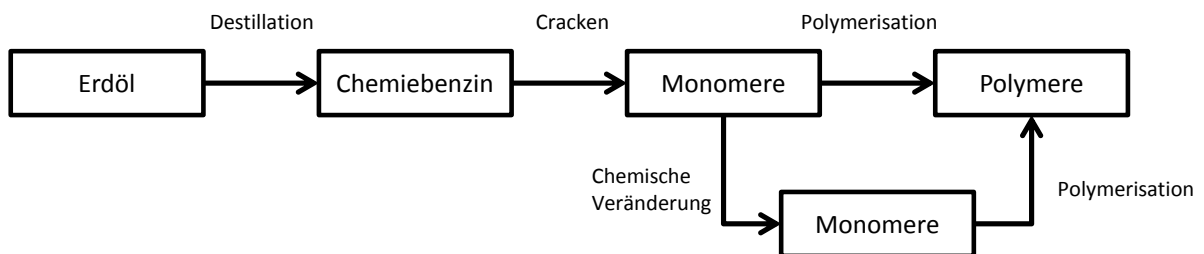


Abbildung 2-4 Herstellung von Kunststoffen

Die so entstehenden Moleküle können zur Kunststoffherstellung eingesetzt werden. Man bezeichnet sie als Monomere. Über Polyreaktionen werden aus den Monome-

ren Großmoleküle oder Polymere aufgebaut. Abbildung 2-4 verdeutlicht die Schritte zur Herstellung von Polymeren.

### 2.1.3 Einteilung der Kunststoffe

#### *Classification of Plastics*

Die Eigenschaften der unterschiedlichen Kunststoffe hängen insbesondere von der Gestalt der Makromoleküle und deren Bindungskräften ab. Abbildung 2-5 zeigt die Unterteilung der Kunststoffe in **Thermoplasten**, **Duroplasten** und **Elastomeren**. Thermoplasten bestehen aus kettenförmig, eindimensional aufgebauten Makromolekülen und können in amorphe und teilkristalline Stoffe unterteilt werden. **Duroplasten** und **Elastomeren** bestehen aus vernetzten, dreidimensional aufgebauten Makromolekülen.

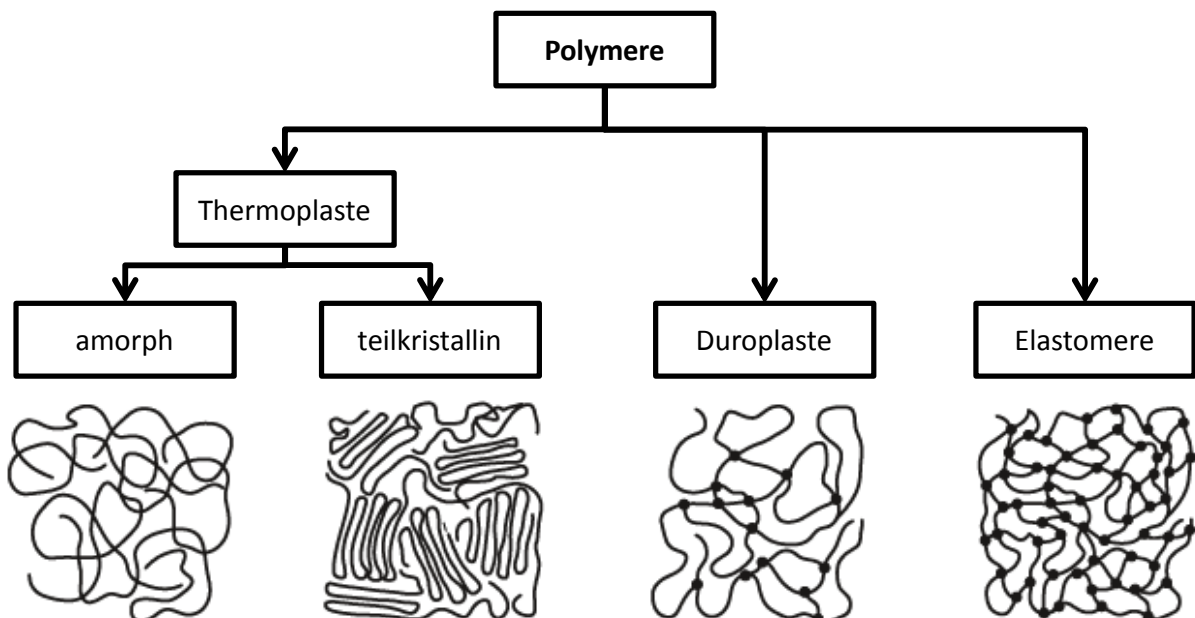


Abbildung 2-5 Unterteilung der Polymere in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere

Je nach Aufbau unterscheiden sich die Eigenschaften der Kunststoffe wie Festigkeit, Dehnung, Härte, Gasdurchlässigkeit, Löslichkeit und Quellbarkeit. Durch gezielte Zugabe von sogenannten Additiven lassen sich Synthese, Fertigung und Eigenschaften von Polymeren weiter beeinflussen, beziehungsweise für den Einsatzbereich optimieren. Bei den Additiven wird unterschieden zwischen Stoffen die der Steuerung der Kunststoffsynthese dienen, Stoffen zur Beeinflussung der chemischen und physikalischen Eigenschaften und Stoffen zur Steuerung der mechanischen Eigenschaf-

ten. Ein Beispiel für Additive zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des Polymers sind Glasfasern. Durch Zugabe dieses Füllstoffs wird die Festigkeit eines Polymers erhöht, [9].

Die Eigenschaften von Kunststoffen lassen sich gezielt positiv beeinflussen, dennoch ändern sie sich bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, insbesondere aufgrund unterschiedlicher Temperaturen. Um Kunststoffe in ihrem Verhalten besser einschätzen zu können, werden für die unterschiedlichen Gruppen von Kunststoffen sogenannte Zustandsbereiche eingeteilt, in denen sich die Eigenschaften nur wenig ändern. Man nennt die Zustandsbereiche auch Aggregatzustände. Es werden grundsätzlich vier Zustandsbereiche bezüglich des thermisch-mechanischen Verhaltens unterschieden:

Bei tiefen Temperaturen liegen Kunststoffe im Bereich des Glaszustands. Die Bewegungen der Atome und Molekülteile sind sehr gering, so dass von einem eingefrorenen Zustand die Rede ist. Bei zunehmender Temperatur befinden sich die Kunststoffe im sogenannten *Glasübergangsbereich*. In diesem Bereich nimmt die Steifigkeit extrem ab und die Verformbarkeit zu. Oberhalb der *Glasübergangstemperatur* verhalten sich weitmaschig vernetzte amorphe Kunststoffe gummielastisch. Übersteigt die Temperatur die Schmelztemperatur findet viskoses Fließen statt, [15].

Welchen Einfluss die Zustandsbereiche auf die verschiedenen Kunststoffe haben, wird im Folgenden erläutert.

#### **2.1.4 Thermoplaste** *Thermoplastics*

Thermoplaste haben aufgrund ihrer langen unvernetzten Molekülketten eine relativ hohe Kriechneigung, die sich bei steigenden Temperaturen weiter erhöht. Die Molekülketten werden durch Verschlaufungen und Nebervalenzkräfte zusammengehalten. Nebervalenzbindungen beruhen auf Van-der-Waals-Kräften. Es bestehen keine Hauptvalenzbindungen zwischen den Molekülketten. Lange Molekülketten führen zu mehr Verschlaufungen, wodurch sich ein Abgleiten der Ketten verringert und die gesamte Festigkeit des Kunststoffs zunimmt. Im gleichen Zug nimmt die Fließfähigkeit ab. Aufgrund der unterschiedlichsten Einsatzbereiche der Thermoplaste bieten Her-

steller diese in unterschiedlich fließfähigen Varianten an. Weitere Eigenschaften von Thermoplasten sind die Löslichkeit, Quellbarkeit und das spröde oder zähelastische Verhalten bei Raumtemperatur.

Thermoplaste können teilweise kristalline Bereiche aufweisen. In diesem Fall spricht man von teilkristallinen Thermoplasten. Sind keine kristallinen Bereiche vorhanden, handelt es sich um amorphe Thermoplaste.

### **Amorphe Thermoplaste**

Da die Moleküle ungeordnet und wenig verzweigt sind, wird der Werkstoff steifer und die Rohdichte steigt. Die Festigkeitseigenschaften sind isotrop und somit in alle Richtungen gleich. Amorphe Thermoplaste besitzen eine unregelmäßige Struktur und dadurch lediglich eine Nahordnung, also eine Ordnung ausschließlich zu den nächsten Nachbaratomen.

Die Glastemperatur  $T_g$  liegt bei den amorphen Thermoplasten bei etwa 80°C. Eingesetzt werden amorphe Thermoplasten im Temperaturbereich unterhalb der Glastemperatur, denn oberhalb dieser erweichen sie. Abbildung 2-6 zeigt schematisch die Zustandsbereiche amorpher Thermoplasten bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Zugfestigkeit nimmt im Gebrauchsbereich mit steigender Temperatur ab. Gleichzeitig steigt die Dehnung. Im thermoelastischen Bereich sind die Nebervalenzbindungen teilweise aufgelöst und führen zu einer geringeren Zugfestigkeit. Liegt die Temperatur über dem Fließtemperaturbereich  $T_f$ , sind die Nebervalenzbindungen vollständig abgebaut und die Molekülketten beginnen zu fließen. In diesem Bereich sind die Kunststoffe schweißbar oder lassen sich spritzgießen.



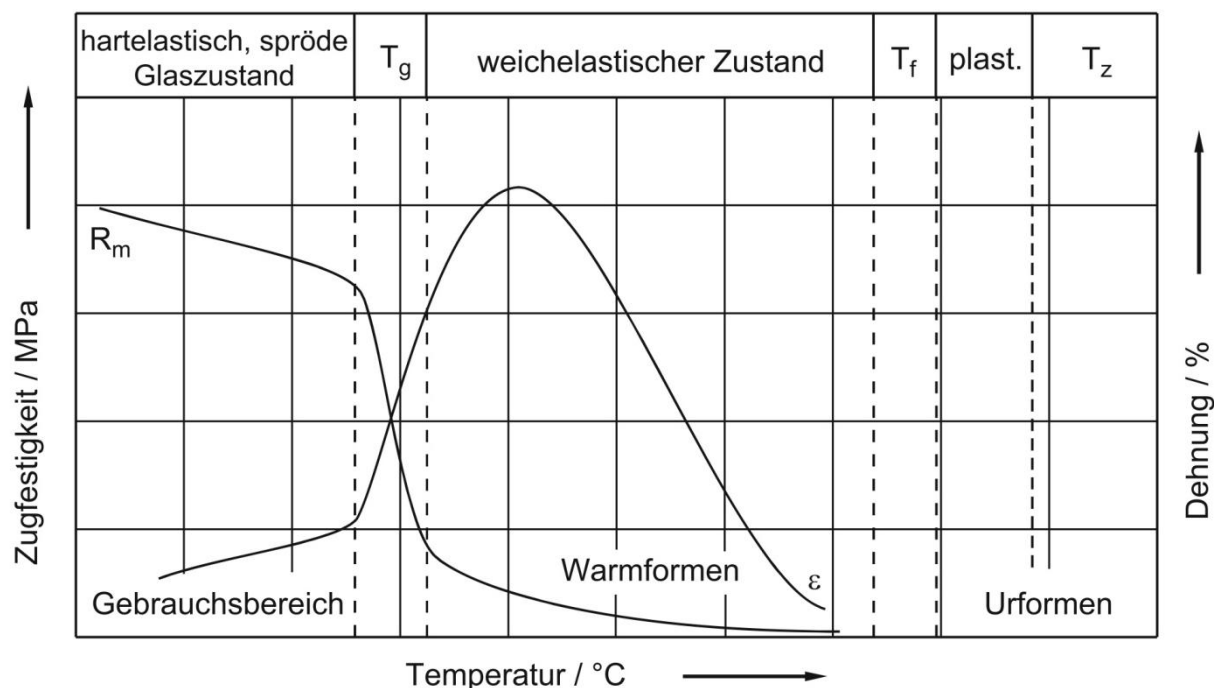


Abbildung 2-6 Zustandsdiagramm der amorphen Thermoplaste [9]

Amorphe Thermoplaste sind häufig durchsichtig, so dass der aus amorphen Polymeren hergestellte Kunststoff immer transparent wirkt, sofern keine lichtbrechenden oder farbigen Zusatzstoffe hinzugegeben werden. Amorphe Thermoplasten wie z.B. PVC, PS, PC, ABS, SAN lassen sich spritzgießen, folienblasen, tiefziehen oder auch schweißen.

### Teilkristalline Thermoplaste

Die Moleküle der teilkristallinen Polymere sind in der Lage sich zu kristallisieren und somit nah aneinander zu lagern. Dazu ist es notwendig, dass die Struktur der Makromoleküle überwiegend regelmäßig aufgebaut ist und nicht durch sperrige Substituenten verhindert wird. Durch das nahe aneinander lagern entstehen dichte Packungen, welche dafür sorgen, dass Nebervalenzkräfte stark wirken können. Somit erhöhen sich sowohl die Härte, die Zugfestigkeit, die Lösungsmittel-Beständigkeit als auch die Schmelztemperatur der Thermoplaste. Hierbei beginnt zugleich eine Abnahme der Schlagzähigkeit und der Transparenz. Aufgrund eines inhomogenen Kristallitenaufbaus gibt es keinen Schmelzpunkt, sondern einen Schmelzbereich. Teilkristalline Thermoplasten werden also zwischen Glas- und Schmelztemperatur  $T_m$

eingesetzt, wobei sie noch gute Festigkeitseigenschaften aufzeigen. Der Gebrauchsbereich ist in der Abbildung 2-7 schematisch dargestellt.

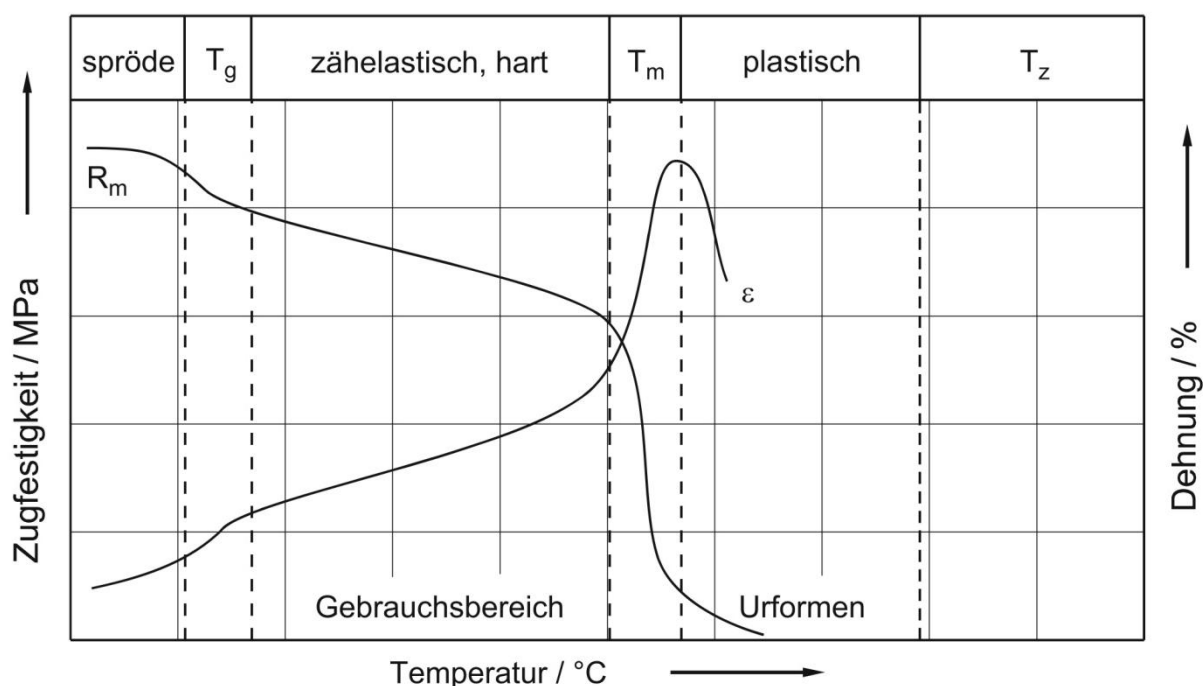


Abbildung 2-7 Zustandsdiagramm der teilkristallinen Thermoplaste [9]

Verarbeitet werden teilkristalline Thermoplasten, z.B. PA, PE, PP, POM, PTFE, im gleichen Verfahren, wie die amorphen Thermoplasten.

### 2.1.5 Duroplaste

#### *Thermosets*

Die Makromoleküle der Duroplaste bestehen aus tri- oder multifunktionellen Monomeren. Die Anordnung der Molekülketten ist ungeordnet, somit sind Duroplaste amorph. Bei der Herstellung von Duroplasten wird über chemische Vernetzungsreaktionen durch Zugabe von sogenannten Härtern ein fester Formstoff mit sehr engen und räumlichen Netzstrukturen erzeugt. Duroplaste besitzen starke Hauptvalenzbindungen, welche zu einem hohen Elastizitätsmodul führen.

Weitere Eigenschaften von Duroplaste sind eine geringe Kriechneigung und eine sehr gute thermische und chemische Beständigkeit. Aufgrund der engen Netzstruktur, also einer großen Anzahl von Vernetzungsstellen, besitzen Duroplaste eine hohe Steifigkeit und Beanspruchbarkeit bei höheren Temperaturen. Wie der Abbildung 2-8

zu entnehmen ist, gibt es bei Duroplasten keine Glas- oder Schmelztemperatur. Sie zersetzen sich bei einer bestimmten Temperatur  $T_z$ .

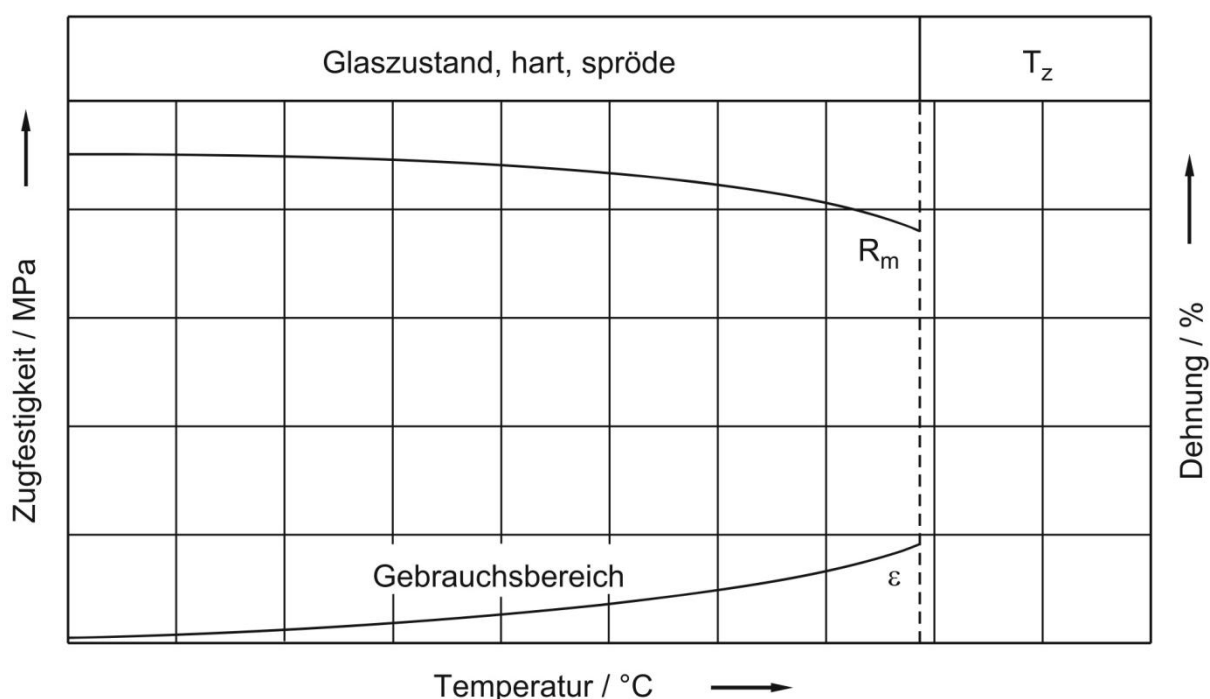


Abbildung 2-8 Zustandsdiagramm der Duroplaste [9]

Durch die unlösliche Vernetzung ergeben sich auch Nachteile: Duroplaste sind nicht aufschmelzbar und somit nicht schweißbar. Als Folge ergibt sich daraus ein sehr kostenintensives Recycling, wobei Duroplaste meist nur geschreddert als Dämmmaterial verwendet wird. Die hohe Vernetzungsdichte führt zu einer geringen Zähigkeit und sprödem Bruchverhalten. Duroplaste können ohne Zugabe von Füllstoffen oder Verstärkungsfasern nicht als Konstruktionswerkstoffe genutzt werden, [16].

### 2.1.6 Elastomere

#### *Elastomers*

Die Molekülketten der Elastomere sind untereinander vernetzt und bekommen daher ihre hohe Dehnfähigkeit. Dadurch lässt sich eine gute, elastische, reversible Verformbarkeit erreichen. Außerdem sind Elastomere nicht löslich oder schmelzbar und somit auch nicht schweißbar. Sie besitzen jedoch die Eigenschaft der Quellbarkeit. Durch ihre wenigen Vernetzungspunkte wird ein Abgleiten der Molekülketten untereinander verhindert. Diese Vernetzung erfolgt zum einen über Schwefelatome und zum anderen über Benzoxyl-, Methylethylketon Peroxid. Eingesetzt werden Elasto-

mere im gummielastischen Zustand, schematisch dargestellt in Abbildung 2-9. Ihre Gebrauchstemperatur liegt dabei oberhalb der Glasübergangstemperatur  $T_g$ , von  $0^\circ\text{C}$ . Kautschuke nennt man die den Elastomeren zugrunde liegenden, unvernetzten Polymere, bei denen der Vernetzungsvorgang durch die Vulkanisation stattfindet. Diese sind als Reifenwerkstoff weit verbreitet, besonders die Natur-, Isopren- und Butadien-Kautschuke.

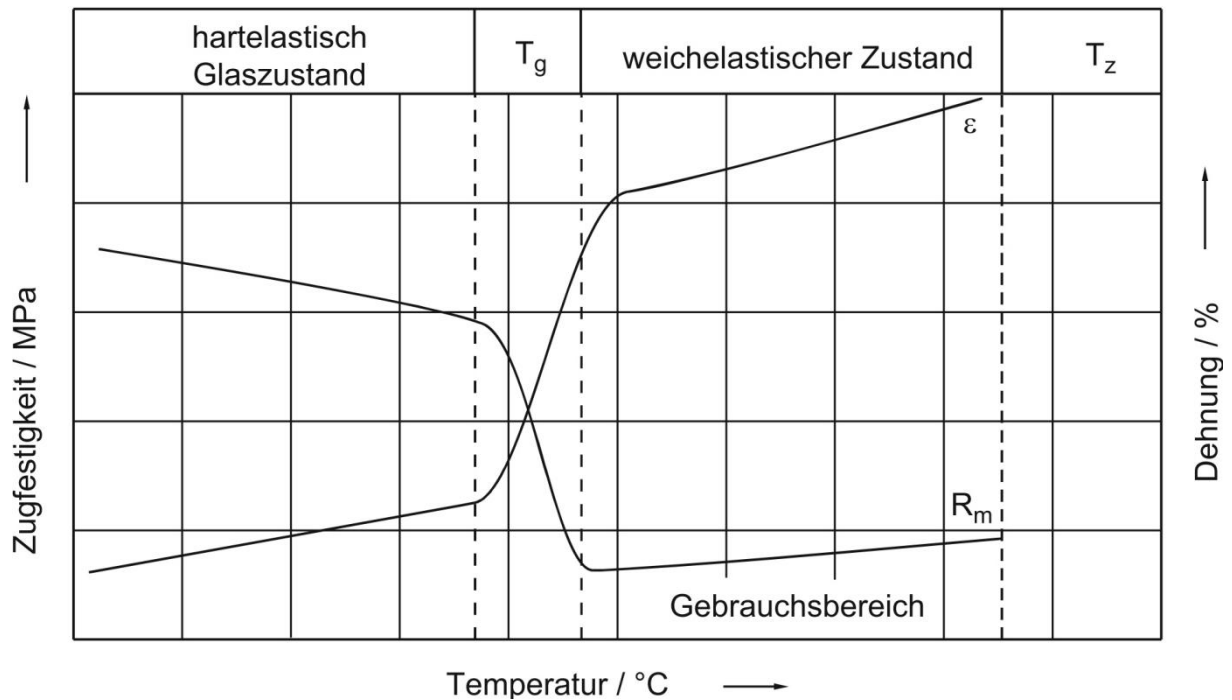


Abbildung 2-9 Zustandsdiagramm von Elastomeren [9]

### Verwendung unterschiedlicher Kunststoffe

Abbildung 2-10 zeigt die Menge der wichtigsten verarbeiteten Kunststoffe nach Einsatzbereich und Kunststoffarten. Polypropylen (PP) ist im Automobil und Elektronikbereich stark vertreten. In diesen Bereichen werden Direktverschraubungen oft als Fügeverfahren genutzt.



Abbildung 2-10 Einsatzfelder von Kunststoffen in Deutschland nach Branchen im Jahr 2015 [13]

## 2.1.7 Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen

### *Mechanical Properties of Plastics*

Um genauere Aussagen über die Sicherheit einer Kunststoffdirektverschraubung geben zu können, ist die Abnahme der Vorspannkraft über die Zeit von hoher Bedeutung, da diese qualitätsbestimmend für die Verbindung ist. Der Vorspannkraftverlust ist wesentlich von dem visko-elastischen Verformungsverhalten des Kunststoffs abhängig. Dieses Verhalten führt zu einer Relaxation bzw. Retardation des Kunststoffs mit fortschreitender Zeit. Unter Relaxation versteht man die zeitliche Abnahme der Vorspannkraft nach einer definierten Verformung. Retardation ist das Kriechen bzw. die Verformung eines Kunststoffs unter einer konstanten äußeren Belastung. Mit Hilfe von Ersatzmodellen wird das Verhalten von Kunststoffen unter Einwirkung einer äußeren Last dargestellt, um so das Werkstoffverhalten besser einschätzen zu können. Zunächst sollen die Begriffe Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit erläutert bzw. unterschieden werden.

Die *Festigkeit* eines Werkstoffs zeigt sich in der maximalen Beanspruchung durch mechanische Belastung, bei der es zum Versagen des Werkstoffs in Form einer ungewollten plastischen Verformung oder einem Bruch kommt. Je nach Werkstoff,

Dauer und Art der Beanspruchung und weiteren äußeren Einflüssen, wie beispielsweise die Temperatur, kann die Festigkeit variieren.

*Steifigkeit* ist ein Maß für den Widerstand gegen eine elastische Verformung durch Aufbringen einer äußeren Belastung. Je nach Art der Belastung wird zwischen Dehn-, Biege-, und Torsionsfestigkeit unterschieden.

Unter *Zähigkeit* versteht man die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen Bruch oder Rissausbreitung, [17].

Tabelle 2-1 Unterscheidung der Begriffe: Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit

Festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Steifigkeit [N]	Zähigkeit [ ]
Maximale Belastung	Widerstand gegen elastische Verformung	Widerstand gegen Bruch oder Rissausbreitung

Das Verformungsverhalten von Kunststoffen unter einer äußeren Last ist durch verschiedene Verformungsanteile, die sich überlagern, charakterisiert. Es handelt sich um die spontan elastische Verformung, die zeitabhängige visko-elastische Verformung und die zeitabhängige viskose Verformung. Diese können durch mechanische Analogiemodelle veranschaulicht werden:

### **Elastische Verformung**

Elastisches Materialverhalten liegt vor, wenn sich zu jeder Belastung eindeutig eine Dehnung zuordnen lässt. Die elastische Verformung steigt auf einen konstanten Wert, sobald eine äußere konstante Last aufgebracht wird. Durch spontane Abstandsänderungen von Atomen und Veränderungen von Valenzwinkeln, ist die Verformung möglich. Bei Entlastung sinkt die Verformung sofort wieder auf den Anfangswert zurück und ist somit reversibel. Als Vergleich kann eine Feder mit konstanter Federsteifigkeit  $E_0$  nach dem linearen Hookeschen Spannungs-Dehnungs-Gesetz genutzt werden, [18–20] (Abbildung 2-11).

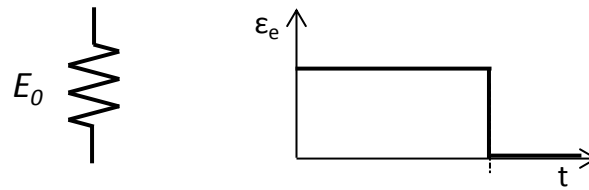


Abbildung 2-11 Modell zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens

Berechnen lässt sich die elastische Verformung  $\varepsilon_e$  mit folgender Formel:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E_0} \quad (1)$$

Dabei entspricht  $\sigma$  der konstanten äußere Belastung und  $E_0$  der Federsteifigkeit und in diesem Fall dem E-Modul des Kunststoffes.

### Viskoelastische bzw. relaxierende Verformung

Bei Parallelschaltung einer elastischen Feder mit der Federkonstante  $E_{rel}$  und einem viskosen Dämpfer mit der Viskosität  $\eta_{rel}$  ergibt sich ein viskoelastisches Verhalten. Bei Belastung beginnt der Kunststoff sich zu verformen, kehrt bei Entlastung zeitverzögert wieder in seinen Ausgangszustand zurück und verhält sich somit reversibel. Das Modell ist in Abbildung 2-12 dargestellt und wird auch als Voigt-Kelvin Modell bezeichnet.

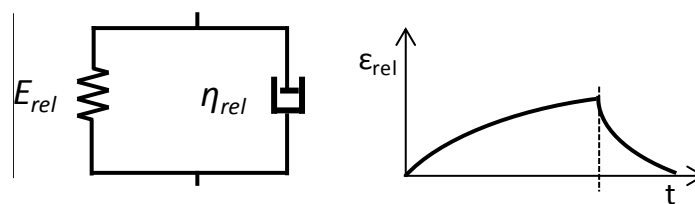


Abbildung 2-12 Modell zur Beschreibung des visko-elastischen Materialverhaltens

Die Formel zur Berechnung der visko-elastischen Verformung  $\varepsilon_{rel}$  lautet:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\sigma}{E_{rel}} \cdot \left[ 1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right] \quad (2)$$

$\tau$  entspricht dabei der Relaxationszeit.

## Viskose Verformung

Die viskose Verformung ist zeitabhängig und bleibt nach der Entlastung bestehen. (Abbildung 2-13) Die Verformung ist somit irreversibel und kann mit dem Verhalten eines Dämpfers mit der Viskosität  $\eta_0$  verglichen werden.

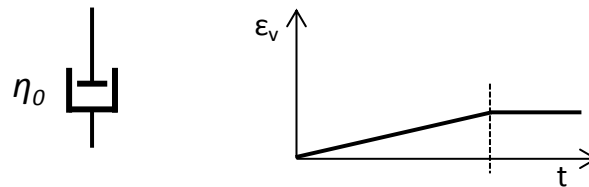


Abbildung 2-13 Modell zur Beschreibung des viskosen Materialverhaltens

Die Formel zur Berechnung der viskosen Verformung  $\epsilon_v$  lautet:

$$\epsilon_v = \frac{\sigma}{\eta_0} \cdot t \quad (3)$$

Durch Kombination aller drei Verformungsanteile ergibt sich das sogenannte Burger-Modell. Bei konstanter äußerer Belastung findet eine sofortige elastische Verformung statt. Mit Fortschreiten der Zeit wird dieser Zustand durch Anteile von viskoser und viskoelastischer Verformung überlagert. Bei Entlastung des Werkstoffs findet eine sofortige elastische Rückverformung statt. Zeitverzögert nimmt die viskoelastische Verformung ab. Der viskose Verformungsanteil bleibt bestehen.



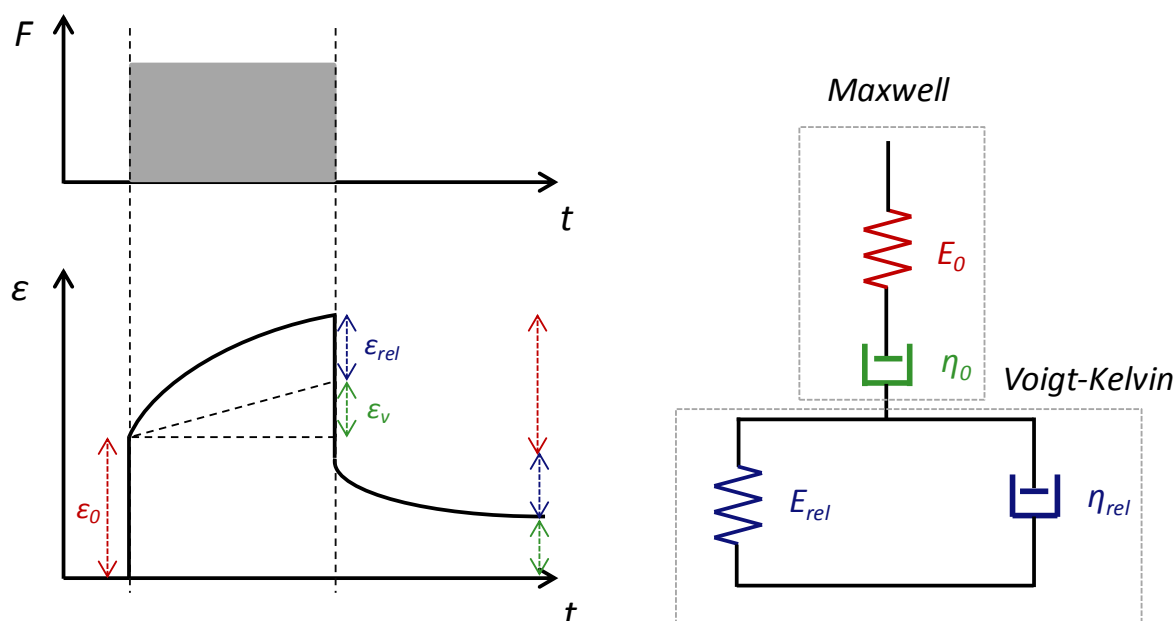


Abbildung 2-14 Burger Modell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Kunststoffen

Durch Überlagerung aller drei Verformungsanteile ergibt sich folgende Formel für die Gesamtverformung  $\epsilon_{ges}$ :

$$\epsilon_{ges} = \epsilon_e + \epsilon_{rel} + \epsilon_v = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{\eta_0} \cdot t + \frac{\sigma}{E_{rel}} \cdot \left[ 1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right] \quad (4)$$

Diese Formel gilt nur für den linear-viskoelastischen Bereich.

Neben der Höhe und Dauer der Beanspruchung, haben ebenso die Belastungsgeschwindigkeit, die Temperatur und der strukturelle Aufbau der Kunststoffe großen Einfluss auf deren Verformungsverhalten. In der Praxis kommt hinzu, dass Belastungen oft nicht rein statisch auftreten. Daher ist die Betrachtung des Verhaltens von Kunststoffen unter dynamischer Last, wie es beispielsweise im Automobilbereich der Fall ist, von großer Bedeutung. Eine experimentelle Untersuchung des Verformungsverhaltens unter dynamischer Last wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht. An dieser Stelle wird auf weiterführende Literatur zum Thema „Verformungsverhalten von Kunststoffen“ verwiesen: [12, 20–22].

## 2.2 Schraubenverbindung und der Einfluss von Reibung

### *Screw Connection and the Influence of Friction*

Schraubenverbindungen sind lösbare Verbindungen von zwei oder mehreren Teilen mit Hilfe einer oder mehrerer Schrauben. Grundsätzlich können zwei Arten von Schraubenverbindungen unterschieden werden. Bewegungsschrauben lassen definierte Relativbewegungen zwischen den verschraubten Teilen zu. So kann eine Drehbewegung in eine Längsbewegung umgesetzt werden. Befestigungsschrauben müssen die Betriebskräfte sicherstellen, ohne dass sich die Teile gegeneinander bewegen können. Für die systematische Berechnung hoch beanspruchter Schraubenverbindungen steht die VDI-Richtlinie 2230 als anerkanntes Standardwerk zur Verfügung, [23].

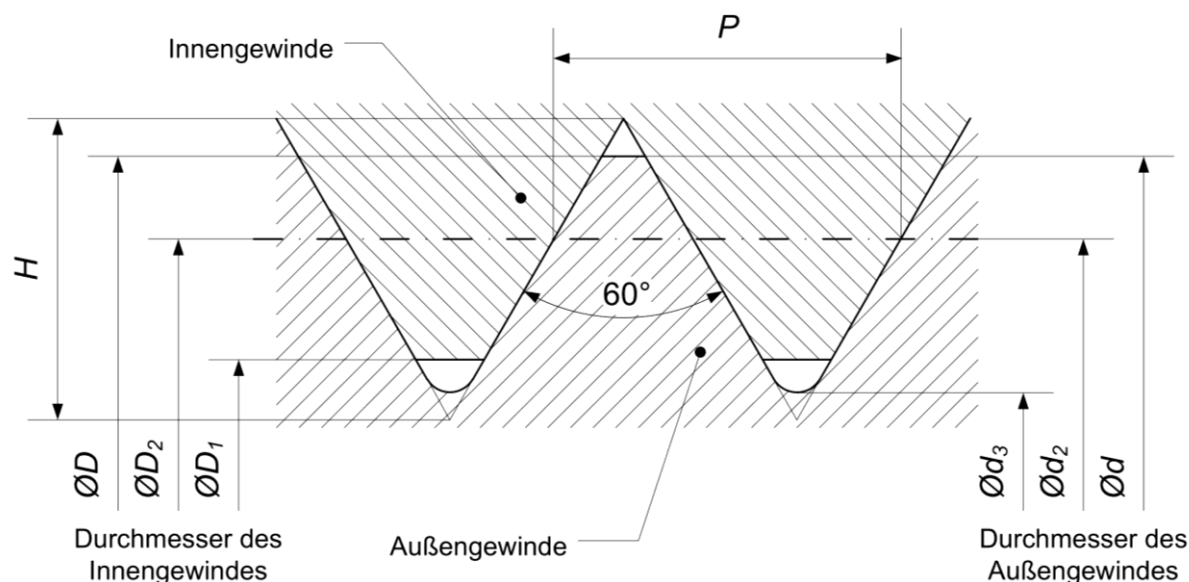


Abbildung 2-15 Metrisches ISO-Gewinde nach DIN 13 [4]

Beim Anziehen einer Befestigungsschraube wird eine rotatorische Bewegung in eine translatorische umgewandelt. Das aufgebrachte Drehmoment wird dabei in eine axiale Kraft, der sogenannten Vorspannkraft  $F_v$ , umgewandelt. In Abbildung 2-15 ist ein metrisches Schraubengewinde abgebildet, welches in einem Außengewinde verschraubt ist. Die Gewindesteigung  $P$  gibt an, welcher translatorische Weg bei einer kompletten rotatorischen Drehung der Schraube zurückgelegt wird. Der Außendurchmesser des Innengewindes der Mutter  $D$  ist gleich dem Außendurchmesser

des Außengewindes der Schraube  $d$  und wird als Nenndurchmesser bezeichnet. Der Kerndurchmesser der Schraube  $d_3$  ist der minimale Durchmesser des Schraubengewindes. Mit diesem lässt sich der Kernquerschnitt  $A_3$  berechnen:

$$A_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \quad (5)$$

Der Flankendurchmesser der Schraube  $d_2$  und der Mutter  $D_2$  ist gleich groß und liegt an der Stelle wo Gewindezahn und Gewinderille die gleiche Breite in Axialrichtung haben. Mit dem Flankendurchmesser lässt sich der mittlere Steigungswinkel  $\beta$  des Schraubengewindes berechnen:

$$\tan \beta = \frac{P}{\pi \cdot d_2} \quad (6)$$

Der Flankenwinkel  $\alpha$  liegt bei  $60^\circ$ . Die rechnerischen Auslegungen von Schraubverbindungen werden nach der VDI Richtlinie 2230 durchgeführt. Für Festigkeitsberechnungen wird der Spannungsquerschnitt  $A_S$  genutzt und wie folgt berechnet:

$$A_S = \frac{\pi \cdot [d_2 + d_3]^2}{16} \quad (7)$$

Jede Schraubverbindung ist während des Schraubvorgangs ein tribologisches System, [24]. Die Reibung zwischen dem Schraubenkopf und der zu verbindenden Komponente, sowie die Reibung zwischen Außen- und Innengewinde, haben einen signifikanten Einfluss auf die Vorspannkraft, [25]. Abbildung 2-16 zeigt die auftretende Reibung einer Schraubverbindung.

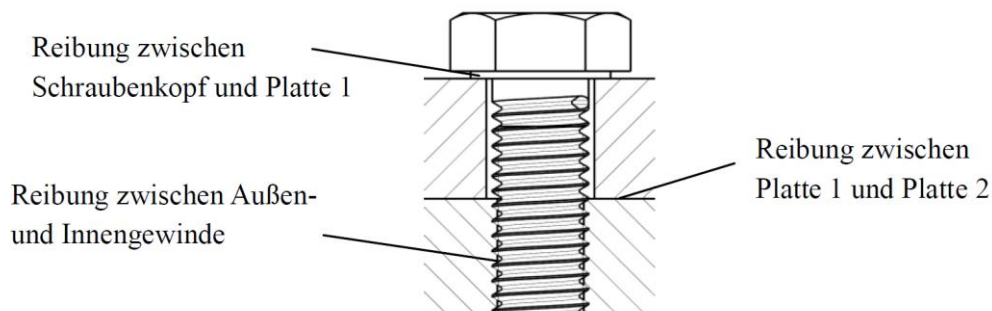


Abbildung 2-16 Reibung in einer metrischen Schraubverbindung [26]

Für die weiteren Betrachtungen wird vereinfachend angenommen, dass der Reibungskoeffizient zwischen Schraubenkopf und Platte  $\mu_K$  und der Reibungskoeffizient zwischen dem Gewinde der Schraube und dem Innengewinde  $\mu_G$  der Platte gleich groß sind und zusammen den Reibungskoeffizienten  $\mu_{ges}$  ergeben. Als weitere Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass kleine Oberflächenbeschädigungen, die durch den Einschraubvorgang entstehen könnten, vernachlässigt werden und die Reibungskoeffizienten über den gesamten Montageprozess konstant bleiben.

Das Anziehmoment  $M_A$  ist in drei Teile unterteilt, (Abbildung 2-17). Das Diagramm zeigt die Einteilung von Drehmomenten, bezogen auf eine Schraubenverbindung mit metrischen Schrauben M10 DIN 931. Die Bauteile und die Schraube sind aus Stahl gefertigt.

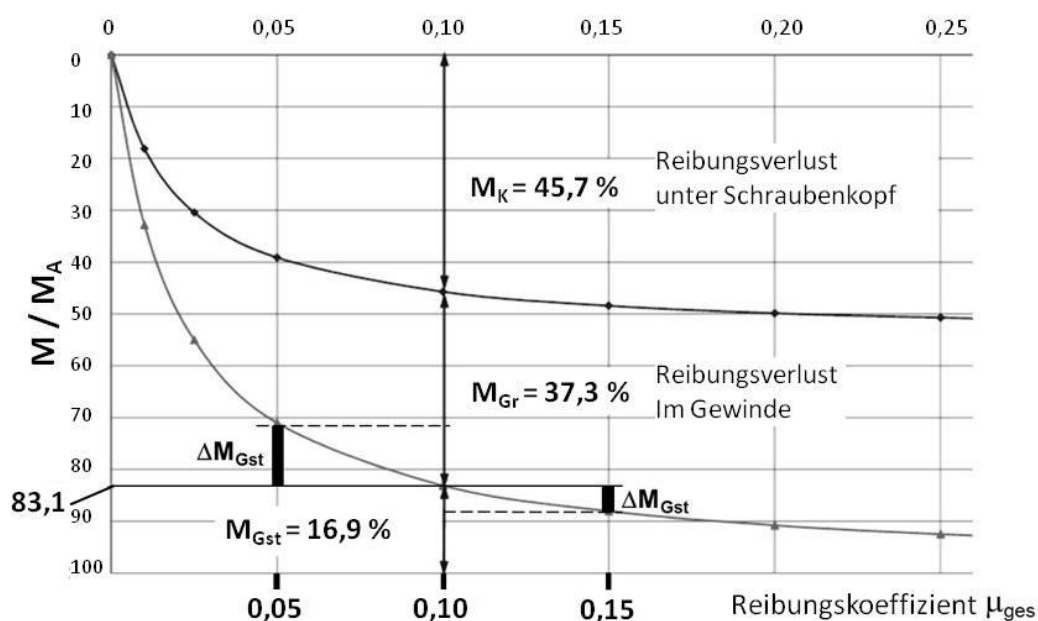


Abbildung 2-17 Reibungsverluste in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten [26]

Beträgt der Reibungskoeffizient  $\mu_{ges} = 0,1$ , wird 45,7 % des Anziehmoments  $M_A$  benötigt, um dem Moment  $M_K$  entgegenzuwirken und die Reibung zwischen Schraubenkopf und Platte zu überwinden. Zusätzlich wird 37,3 % des Anziehmoments  $M_A$  benötigt um das Moment  $M_{Gr}$  aufzubringen und somit die Reibung im Gewinde zu überwinden. Nur 16,9 % der Energie, die für das Anziehen der Schraubverbindung aufgebracht wird, erzeugt die eigentliche Vorspannkraft, [4, 25].

Schon ein geringer Reibungsunterschied hat einen signifikanten Einfluss auf den Teil des Anziehungsmoments, welches zum Vorspannkraftaufbau übrig bleibt, wie in Abbildung 2-17 zu erkennen ist. Ändert sich also der Reibungskoeffizient, führt dieses zu einer Änderung des Moments zum Vorspannkraftaufbau um den Wert  $\Delta M_{Gst}$ .

Geringere Reibungskoeffizienten einer Schraubenverbindung führen zu höheren Vorspannkräften. Der Konstrukteur kann eine kleinere Schraube wählen, sodass leistungsschwächere Schrauber benötigt werden. Dieses führt jedoch dazu, dass kleine Unterschiede der Reibungskoeffizienten größere Unterschiede in der Vorspannkraft erzeugen. Somit wären hochwertigere Werkzeuge mit elektronischer Messeinrichtung erforderlich.

Höhere Reibungskoeffizienten einer Schraubenverbindung resultieren in einer geringeren Vorspannkraft, wodurch der Konstrukteur die Wahl eines größeren Schraubendurchmessers treffen muss. Aufgrund der sich daraus ergebenden höheren Momente, werden wiederum größere Schrauber benötigt. Kleine Unterschiede in den Reibungskoeffizienten haben weniger Einfluss auf die Vorspannkraft und der Montageprozess ist insgesamt robuster.

Die korrekte Vorspannkraft ist für die sichere Funktion einer Schraubenverbindung von höchster Bedeutung. Zu hohe Vorspannkräfte können die Schraubenverbindung aufgrund von Zugspannungen zerstören. Im Gegensatz dazu, führen zu geringe Vorspannkräfte zu unzureichendem Zusammenpressen der Bauteile, welches unter dynamischen Belastungen schnell zum selbsttätigen Lösen der Schraubenverbindung führen kann. Da das Schraubengewinde ein gewisses Flankenspiel besitzt, ist eine Sicherung gegen selbsttätiges lösen ohne besondere Vorkehrungen nicht gegeben. Einzig die erzeugte Vorspannkraft, die zu einer elastischen Verformung der Schraube führt, sorgt für eine klapperfreie Verbindung. Da bei metrischen Schraubenverbindungen ein gewisses Flankenspiel zwischen Innen- und Außengewinde besteht, kann die dort vorhandene Reibung ein Lösen der Verbindung nicht komplett verhindern. Im Gegensatz dazu kann bei selbstformenden Direktverschraubungen das Risiko eines selbsttätigen Lösens minimiert werden.

## 2.3 Verbindungsvarianten für Kunststoffe

### *Joining Processes for Plastics*

Konstrukteure haben die Wahl zwischen verschiedenen Arten der Verbindung von Kunststoffbauteilen, je nach Anforderungen und Einsatzbereich. Aufgabe der konstruktiven Planung ist es, den Anforderungen entsprechend die geeigneten Verbindungselemente zu bestimmen. Eine Übersicht der verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten von Kunststoffen, zeigt Abbildung 2-18. Grundsätzlich können drei verschiedene Fügeverfahren für Kunststoffe unterschieden werden, [27].

- Schweißen
- Kleben
- Mechanische Verbindungen

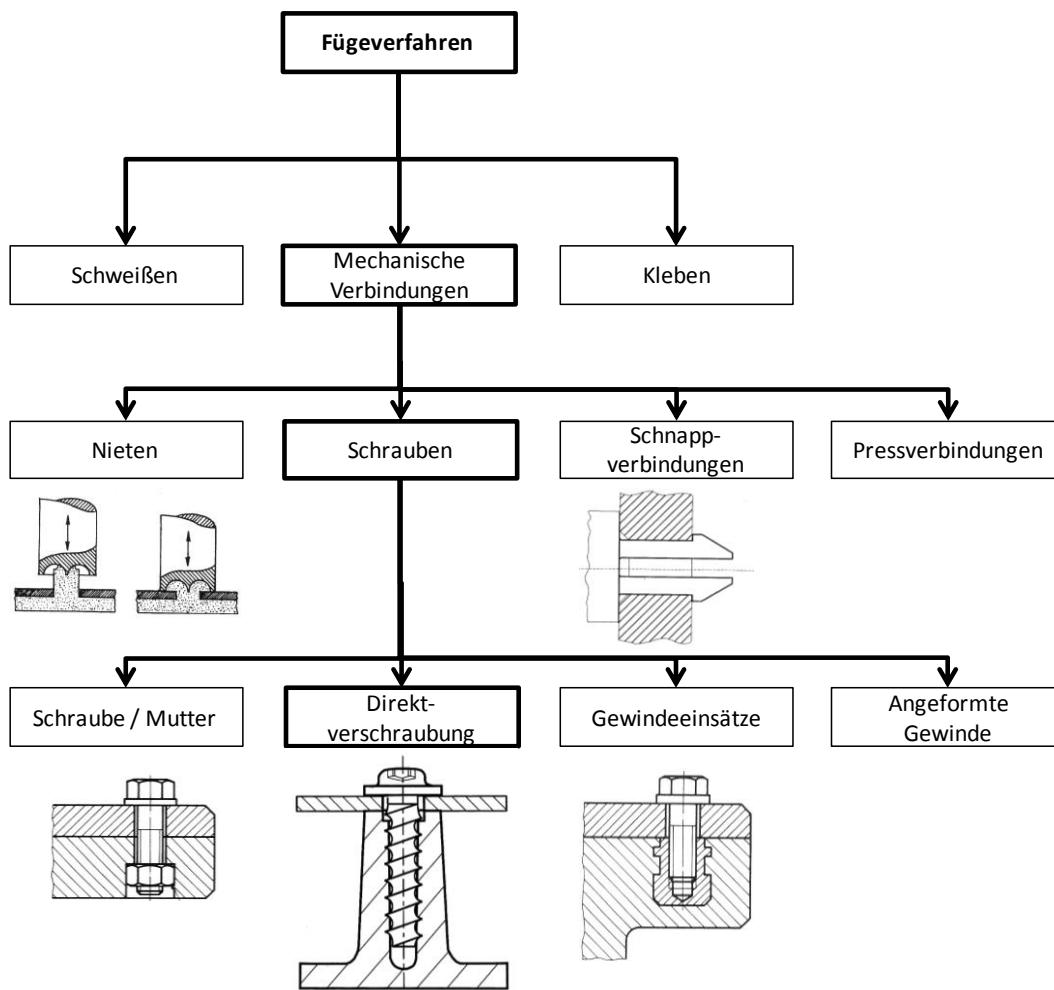


Abbildung 2-18 Fügeverfahren für Kunststoffbauteile (Teile aus: [28])

Auf die Fügeverfahren Schweißen und Kleben wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Literatur dazu findet sich in [28, 29]. Im Folgenden werden die lösbaren Verbindungen genauer beschrieben.

### **2.3.1 Schnappverbindungen** *Snap-on Fastenings*

Schnappverbindungen gehören zu den kostengünstigsten Möglichkeiten und sind einfach zu montieren. Sie sind formschlüssige Verbindungen und haben vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten. Die Funktion bei jeder Schnappschaltung ist gleich. Die vorstehende Stelle eines Teils, wie z.B. ein Haken, wird während der Montage ausgelenkt und somit in eine Vertiefung des Verbindungspartners eingerastet.

Diese Verbindungen können abhängig vom Verbindungspartner unlösbar oder lösbar sein. Die unlösbaren besitzen die Fähigkeit, dass sie auch bei höheren Temperaturen Dauerlasten aufnehmen können. Da die Verbindungen im unbelasteten Zustand nur geringen Spannungen unterliegen, dichten diese die Verbindungsstelle nicht ab. Für eine dichte Verbindung werden Dichteelemente benötigt. Weitere Verbindungselemente, die nach dem Prinzip einer Schnappverbindung funktionieren, sind z.B. Schnappnieten, Klammern und Klipse, [28].

### **2.3.2 Pressverbindungen** *Pressed Connections*

Die Pressverbindung zählt zu den kraftschlüssigen Verbindungen für verschiedene Funktionselemente, welche überwiegend in der Feinwerktechnik Verwendung finden. Sie werden ebenfalls zur Befestigung von Lüfter- und Pumpenlaufrädern eingesetzt.

Pressverbindungen sollen dafür sorgen, dass verspannte Berührungsflächen durch Reibung schlupffrei bis zur Grenze des Durchrutschens über äußere Kräfte und/oder Drehmomente übertragen werden. Durch Zusammenfügen der verbindenden Teile und deren elastischen Werkstoffeigenschaften wird eine Vorspannung erzeugt, welche für den Prozess der Pressverbindungen und eine dauerhafte Verbindung notwendig ist, [28].

### 2.3.3 Schrauben

#### *Screws*

Die Schraubenverbindung ist eine häufig genutzte Möglichkeit für eine lösbare Verbindung von Kunststoffteilen, da sie in der Lage ist, bei höheren Betriebstemperaturen eine Dauerbeanspruchung aufzunehmen. Hierbei unterscheidet man zwischen vier Verbindungen:

- angeformten Gewinden
- gewindeformenden Schrauben
- metrischen Schrauben
- Schraube/Mutter Verbindungen

#### **Angeformte Gewinde**

Angeformte Gewinde werden während des Spritzgießens eines Bauteils direkt hergestellt. Es gibt gewisse Anforderungen für eine feste Verbindung mit angeformten Gewinden. Zum Beispiel müssen solche Verbindungen dicht sein und ein selbsttätiges Lösen der Verbindung darf nicht eintreten. Die Einsatzbereiche dieser Fügeart sind oftmals Gehäuse, beispielsweise an Wasch- und Spülmaschinen, Filtergehäuse und Rohrverschraubungen, [29].

#### **Gewindeformende Schrauben**

Gewindeformende Schrauben sollen für optimale Funktionsfähigkeit bestimmte Kriterien erfüllen: eine geringe Radialdehnung des Tubus, ein niedriges Eindrehmoment bzw. hohes Überdrehmoment, große Flankenüberdeckung und einen geringen Toleranzbereich. Die Kerndurchmesser und Flankenwinkel sind gering, daher besitzen sie eine größere Flankenhöhe. Durch Schrauben mit Schneidkanten lässt sich das Eindrehen erleichtern, jedoch ist eine Wiederholung in der Montage nicht mehr möglich. Diese eignen sich daher eher für Duroplaste, [29].

#### **Metrische Schrauben**

Metrische Schrauben nach DIN 13 sind aufgrund ihrer geringen Gewindetiefe nicht geeignet für das unmittelbare Eindrehen in das Kunststoffteil. Daher kombiniert man diese mit einer Metallmutter oder Gewindeeinsätzen. Das Einschnappen der Mutter



in eine mit Hinterschnitten versehene Aussparung erleichtert die Montage. Zusätzlich kann eine dünne, geschlitzte Metallhülse in die Bohrung eingeführt werden, um eine Verformung des Kunststoffteils unter Verlust der Vorspannung durch die Schraubenvorspannkraft zu vermeiden. [28, 30]

### **Gewindeeinsätze**

Gewindeeinsätze werden oft in Bereichen eingesetzt, in denen die Verbindung aus Wartungs- oder Reparaturgründen häufig gelöst und remoniert wird. Die Einsätze, auch Inserts genannt, können mit Hilfe der Mould-in-Technik direkt bei der Bauteilherstellung in den Kunststoff eingebettet werden. Setzt man die Gewindeeinsätze nachträglich in das Bauteil ein, spricht man von der sogenannten After-Moulding-Technik, [28].

### 3 Analytische Betrachtung von Direktverschraubungen *Analytical Description of Self-Tapping Screw Connections*

Gewindeformende Direktverschraubungen werden in großen Mengen in verschiedenen Industriezweigen, besonders für Bauteile aus Leichtmetall, Kunststoff oder Holz, genutzt. Im Allgemeinen ist die Herstellung sehr einfach und die Komplexität einer Direktverschraubung wird auf ein Minimum reduziert, denn Sicherungsscheiben oder Gewindeeinsätze sind nicht erforderlich.

#### 3.1 Eigenschaften von Direktverschraubungen *Properties of Self-Tapping Screw Connections*

Die bedeutendste Eigenschaft von gewindeformenden Schraubverbindungen ist die spanlose Formung des Innengewindes durch die Schraube selbst. Zu diesem Zweck besitzen gewindeformende Schrauben kein metrisches Gewinde, sondern einen Flankenwinkel  $\alpha$  des Gewindes von  $25^\circ - 35^\circ$  für Kunststoffbauteile und  $60^\circ$  für den Einsatz von Leichtmetallen. Infolge der Reibungskoeffizienten zwischen Schraube und Kunststoffdom, sowie der auftretenden Druckspannung durch Aufbau der Vorspannkraft, wird gleichzeitig das Risiko für selbsttätiges Lösen der Schraubverbindung minimiert. Abbildung 3-1 zeigt die Komponenten einer Kunststoff- Direktverschraubung.

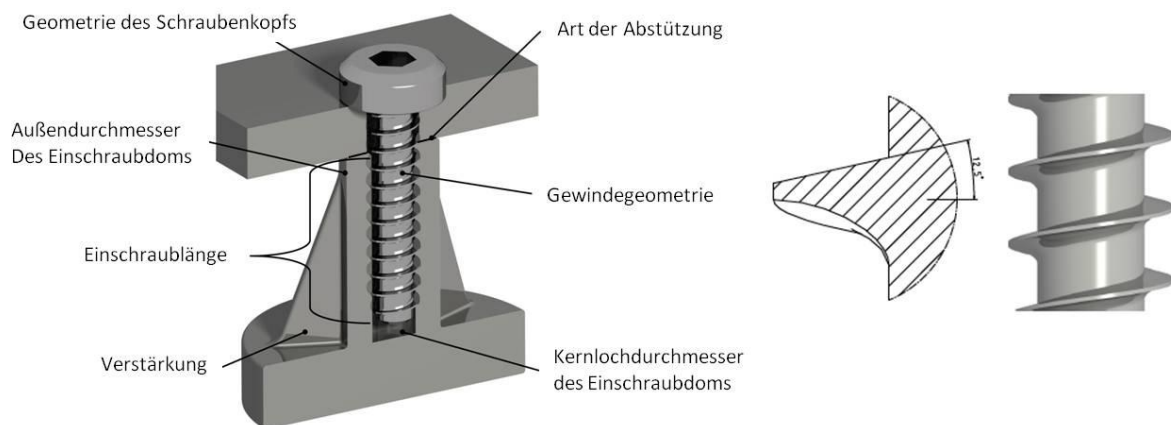


Abbildung 3-1 Aufbau einer gewindeformenden Direktverschraubung [26]

### 3.2 Einschraubvorgang gewindeformender Direktverschraubungen *Screw Assembly of Self-Tapping Screw Connections*

Direktverschraubungen besitzen ein anderes Montageverhalten im Vergleich zu metrischen Standardverschraubungen. Die Montage der Direktverschraubungen wird im Gegensatz zu metrischen Standardverschraubungen von einem Formungsprozess überlagert. Das Gewinde der gewindeformenden Schraube dient also zum einen als Werkzeug für den Umformprozess, zum anderen als Formschlussverbindung, sobald der Anziehvorgang beginnt. Grundsätzlich können dabei die in Abbildung 3-2 dargestellten Einschraubvarianten Sackloch und Durchgangsbohrung unterschieden werden:

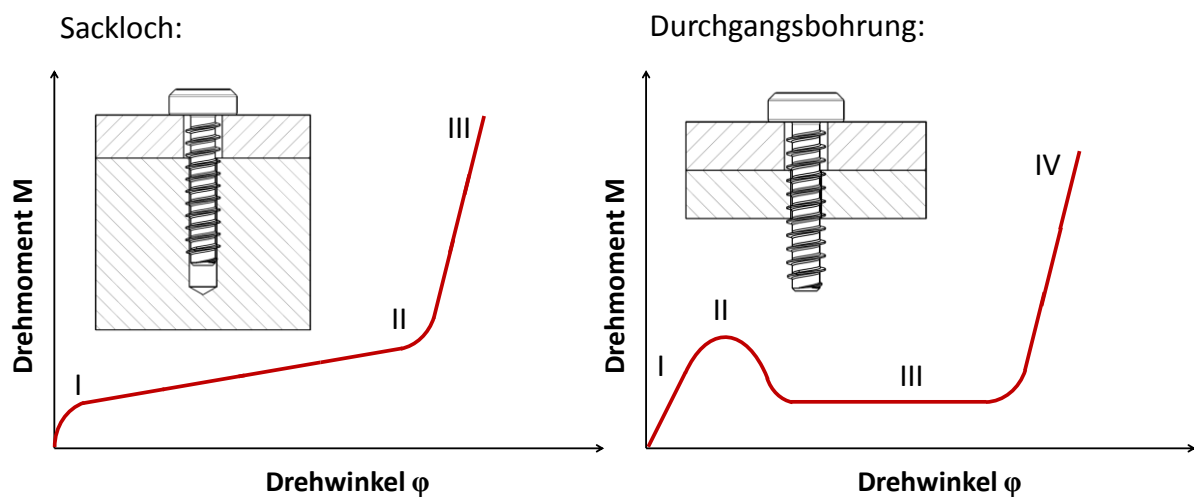


Abbildung 3-2 Drehmomentverlauf einer Sackloch- und Durchgangsverschraubung (Teile aus: [4])

#### Variante A: Sackloch

Das für den Einschraubvorgang notwendige Eindrehmoment setzt sich aus dem Formmoment  $M_F$ , welches zum Formen des Gewindes notwendig ist, und dem Reibmoment  $M_R$ , welches aufgrund der elastischen Rückverformung des Materials entsteht, zusammen.

Im Fall A steigt das Drehmoment aufgrund des kontinuierlichen Formungsprozesses kontinuierlich an. Diese Art der Montage ist bei Kunststoffbauteilen sehr typisch. Der Montagevorgang kann in drei Phasen eingeteilt werden:

I: Ansetzen der Schraube

II: Formung des Gewindes und Eindrehen der Schraube

III: Anziehen der Schraube und Aufbau der Vorspannkraft

### **Variante B: Durchgangsbohrung**

Durchgangsbohrungen werden hauptsächlich für Leichtmetalle und Stahl eingesetzt. Zu Beginn des Montageprozesses formt die Schraube das Gewinde. Es tritt das Formmoment  $M_F$  auf. Gleichzeitig wird das Formmoment durch das Reibmoment überlagert. Das Drehmoment steigt somit weiter an. Sobald die Schraube den Formprozess beendet hat, fällt das Drehmoment auf einen konstanten Wert ab und resultiert nur noch aus dem bleibenden Reibmoment durch elastische Rückverformung des verdrängten Materials. Ab der Kopfauflage erhöht sich das Drehmoment und der Vorspannkraftaufbau beginnt.

I: Ansetzen der Schraube

II: Formung des Gewindes und Eindrehen der Schraube

III: Weiteres Eindrehen der Schraube bis zur Kopfauflage

IV: Anziehen der Schraube und Aufbau der Vorspannkraft

Im Folgenden wird der Einschraubvorgang einer gewindeformenden Schraube in ein Kunststoffbauteil im Detail betrachtet. Grundsätzlich lassen sich alle thermoplastischen Kunststoffe direkt verschrauben. Bei spröden Termoplasten oder Duroplasten ist der Einsatz von gewindeformenden Schrauben mit einer Schneidkante sinnvoll, um die radiale Spannungskomponente im Kunststoffdom zu reduzieren.

Zum Eindrehen einer gewindeformenden Schraube ist ein bestimmtes Drehmoment erforderlich. Der Drehmomentverlauf wird besonders durch die auftretende Reibung der Schraubverbindung beeinflusst. Einen schematischen Momentenverlauf eines Einschraubprozesses mit gleichzeitigem Vorspannkraftaufbau kann der Abbildung 3-3 entnommen werden.



① Ansetzen der Schraube und Formung des Gewindes

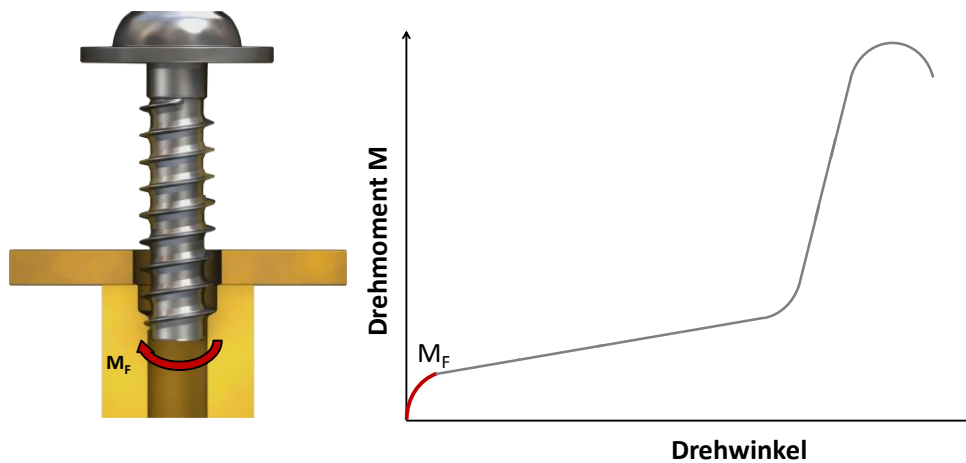


Abbildung 3-4 Ansetzen und Eindrehen der gewindeformenden Schraube (Teile aus: [31])

Mit dem weiteren Eindrehen der Schraube wird das Formmoment durch das Reibmoment  $M_R$  überlagert. Das Reibmoment entsteht zwischen dem Gewinde der Schraube und dem Kunststoffdom durch elastische Rückverformung des Kunststoffs. Das Moment für den Formprozess bleibt konstant.

② Erhöhung des Reibmoments durch Eindrehen der Schraube

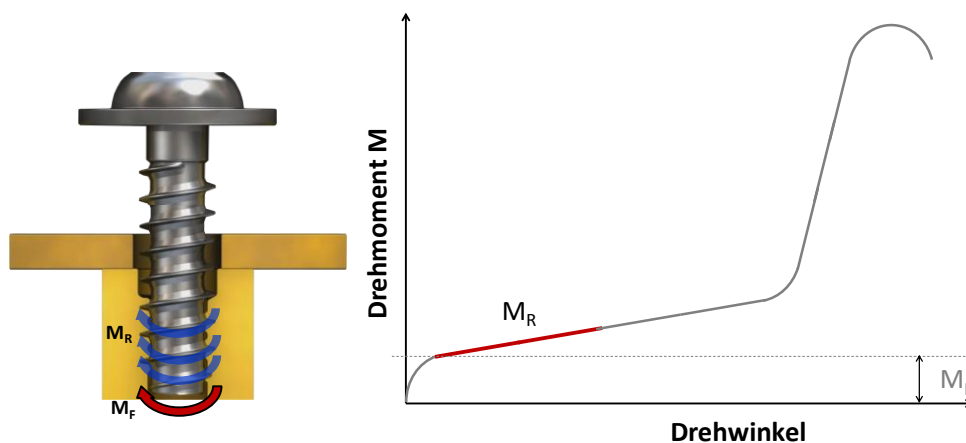


Abbildung 3-5 Erhöhung des Reibmoments mit zunehmender Einschraubtiefe (Teile aus: [31])

Mit zunehmender Einschraubtiefe  $T_E$  steigt die Reibung zwischen Kunststoffdom und Schraubengewinde aufgrund der Druckspannung  $\sigma_{DF}$  linear an, bis der Schraubenkopf das Anbauteil berührt. An diesem Punkt ergibt sich das Eindrehmoment  $M_E$  aus der Summe des Form- und Reibmoments.

③ Eindrehen der Schraube bis zur Kopfauflage

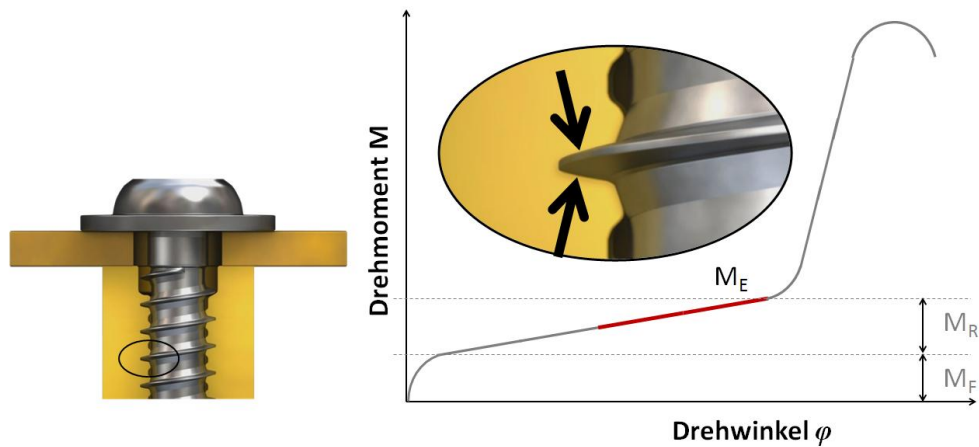


Abbildung 3-6 Eindrehen der Schraube bis zur Kopfauflage (Teile aus: [31])

Das Anziehen der Schraube führt zu dem Aufbau der Vorspannkraft  $F_V$ . Das Drehmoment wird zusätzlich zu dem Eindrehmoment durch die Kopfreibung zwischen Schraubenkopf und Anbauteil erhöht. Druckkräfte unter dem Schraubenkopf und den oberen Flächen der Gewindeflanken der Schraube sorgen für das Zusammenpressen der Bauteile. Die Schraube wird bis zu einem bestimmten Drehmoment, dem sogenannten Anziehmoment  $M_A$ , weitergedreht. Für eine ausreichende Montagesicherheit sollte ein möglichst großer Abstand zwischen dem Überdrehmoment  $M_{\bar{U}}$  und dem Eindrehmoment  $M_E$  bestehen.

④ Aufbau der Vorspannkraft bis zum Erreichen von  $M_A$

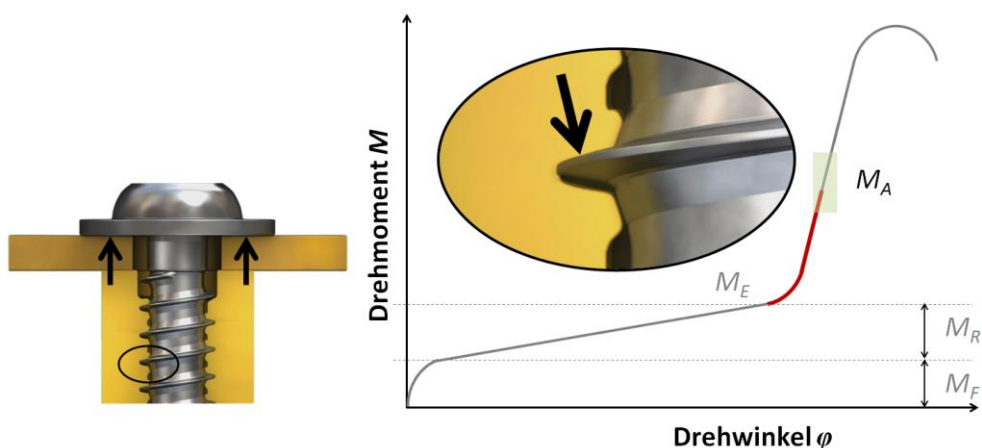


Abbildung 3-7 Vorspannkraftaufbau durch Anziehen der Schraube bis zum Anziehmoment (Teile aus: [31])

Zum Versagen einer Direktverschraubung kommt es, wenn mit einem Drehmoment über dem Versagemoment  $M_{\ddot{U}}$  verschraubt wird. Je nach konstruktivem Aufbau des Kunststoffdoms und der Materialeigenschaften der Komponenten, kann das Versagen der Direktverschraubung ein Abriss des Tubus, ein Abdrehen der Schraube oder der Schraubenauszug sein.

⑤ Anziehen der Schraube bis zum Versagen durch:

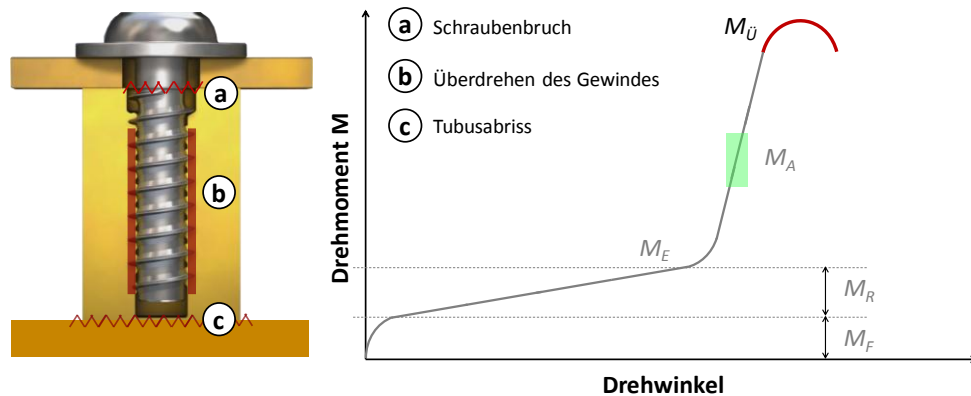


Abbildung 3-8 Weiteres Anziehen der Schraube bis zum Versagen der Verbindung (Teile aus: [31])

Um ein Versagen einer Direktverschraubung zu verhindern, gibt es verschiedene Berechnungsansätze, beziehungsweise Montageempfehlungen einiger Schraubenhersteller. In Kapitel 3.3 sind die Berechnungsempfehlungen und konstruktiven Vorschläge nach Ehrenstein zusammengefasst.

### 3.3 Berechnungsansätze und konstruktive Empfehlungen

#### *Calculation Approaches and Recommendations for Engineering Design*

Da im industriellen Einsatz die Möglichkeit der Vorspannkraftmessung mit verhältnismäßig großem Aufwand verbunden ist, erfolgt das Anziehen der Schraube drehmomentgesteuert. Das optimale Anziehdrehmoment  $M_A$  soll einen ausreichenden Abstand zum Eindrehmoment  $M_E$  und Überdrehmoment  $M_{\ddot{U}}$  haben. Nach Ehrenstein wird empfohlen das Montageanzugsmoment nach folgender Formel zu berechnen.

$$M_A = M_E + \frac{1}{2} \dots \frac{1}{3} \cdot [M_{\ddot{U}} - M_E] \quad (8)$$



Eine Abschätzung für das Eindrehmoment kann mit der nachstehenden Formel erfolgen, sofern keine praktischen Werte vorhanden sind. Allerdings wird bei den Berechnungsvorschlägen von konstanten Fertigungsbedingungen ausgegangen.

Das Eindrehmoment  $M_E$  ergibt sich aus der Summe des Formmoments  $M_F$  und Reibmoments  $M_R$ :

$$M_E = M_F + M_R = \frac{\sigma_F(d_1-d_K)}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \left( \tan \frac{\alpha}{2} + \sqrt{1 + \tan^2 \frac{\alpha}{2}} \right) \cdot \sqrt{\left( \frac{d_1+2d_K}{3} \pi \right)^2 + P^2} \cdot \left( \frac{d_1+2d_K}{6} \right) + \frac{(1+\beta) \cdot \mu \cdot L_E \cdot (d_1-d_K)}{4 \cdot P \cdot \cos \frac{\alpha}{2}} \cdot \sqrt{\left( \frac{d_1+d_K}{2} \pi \right)^2 + P^2} \right] \quad (9)$$

$\sigma_y$	Streckspannung [Mpa]
$\sigma_F$	Fließspannung [MPa]
$\alpha$	Flankenwinkel des Gewindes [°]
$\beta$	Fächerwinkel im Bogenmaß
$p$	Gewindesteigung [mm]
$\mu$	Gleitreibungszahl

Für das Überdrehmoment  $M_{\ddot{U}}$  gilt:

$$M_{\ddot{U}} = \frac{\sigma_S \pi d_1^2 L_E (P + \pi \mu d_1)}{2\sqrt{3}(\pi d_1 - \mu P)} \quad (10)$$

Allerdings berücksichtigt die Gleichung nur das im Gewinde auftretende Moment. Hinzu wird das Kopfreibmoment  $M_{KR}$  addiert.  $M_{KR}$  wird mit der Reibungszahl zwischen Schraubenkopf und Auflagefläche, der Vorspannkraft und den Abmessungen des Schraubenkopf  $d_{KA}$  und  $d_L$  berechnet:

$$M_{KR} = \mu_A F_V \frac{1}{4} \cdot [d_{KA} + d_L] \quad (11)$$

Eine optimale Auslegung des Kunststoffdoms in Kombination einer Schraube, ist für die sichere Direktverschraubung von sehr hoher Bedeutung. In Abbildung 3-9 sind die relevanten Maße des Kunststoffdoms und einer gewindeformenden Schraube abgebildet, [32].

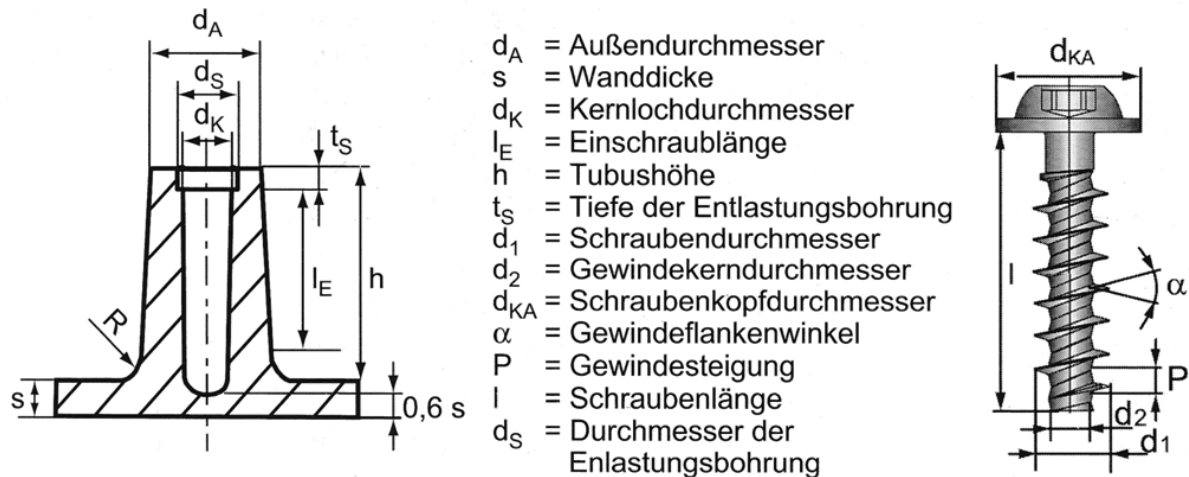


Abbildung 3-9 Konstruktive Abmessungen von Einschraubdom und gewindeformender Schraube [33]

Für die Konstruktion des Einschraubdoms sind folgende Berechnungsempfehlungen bekannt:

Einschraublänge  $l_E$ :

$$l_E = 2 \dots 2,5 \cdot d_1 \quad (12)$$

Kernlochdurchmesser  $d_K$ :

$$d_K = 0,7 \dots 0,9 \cdot d_1 \quad (13)$$

Tiefe der Entlastungsbohrung  $t_S$ :

$$t_S = 0,4 \dots 0,6 \cdot d_1 \quad (14)$$

Durchmesser der Entlastungsbohrung  $d_S$ :

$$d_S = 1,1 \cdot d_1 \quad (15)$$

Außendurchmesser  $d_A$ :

$$d_A \geq \sqrt{\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot d_1 \cdot L_E + d_K^2} \quad (16)$$

Ist die Betriebskraft der Schraubenverbindung bekannt, kann mit folgender Formel der Schraubendurchmesser  $d_1$  berechnet werden:

$$d_1 \geq \sqrt{3} \cdot \frac{F_{vorh} \cdot S \cdot A}{\sigma_S \cdot L_E \cdot \pi} \quad (17)$$

Für die maximal zulässige Kraft, die zum Versagen der Schraubenverbindung führt, kann für die Fälle Tubusabriss und Schraubenauszug folgende Formel verwendet werden:

Die erforderliche Kraft  $F_{max}$  zum Tubusabriss wird mit Hilfe der Zugfestigkeit des Kunststoffes  $\sigma_{zB}$  abgeschätzt:

$$F_{max} = \sigma_{zB} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [d_A^2 - d_K^2] \quad (18)$$

Kraft  $F_{max}$  zum Schraubenauszug kann mit der Schubfestigkeit des Kunststoffes  $\tau_B$  berechnet werden

$$F_{max} = \tau_B \cdot d_1 \cdot \pi \cdot L_E \quad (19)$$

Dabei ist  $F_{max}$  der niedrigere Wert

### 3.4 Vorteile von Direktverschraubungen

#### *Advantages of Self-Tapping Screw Connections*

Ein Vergleich zwischen verschiedenen Fügeverfahren ist nur teilweise sinnvoll, da je nach Anforderungen und Umsetzbarkeit bestimmte Fügeverfahren nicht in Frage kommen. Daher sollen die Vorteile von Direktverschraubungen nur mit weiteren lösbaren Fügeverfahren verglichen werden, wie zum Beispiel Verschraubungen mit Gewindeeinsätzen.

Durch die geringe Komplexität von Direktverschraubungen ergeben sich erhebliche wirtschaftliche Vorteile. Im Vergleich zu Verschraubungen mit Gewindeeinsätzen, können beim Einsatz von Direktverschraubungen die Gesamtkosten eines Produkts gesenkt werden.

Neben den Materialeinsparungen werden durch die Verringerung der Komplexität, Arbeitsgänge und somit Montagezeit in der Fertigung reduziert. Aus konstruktiver Sicht lassen sich mit Direktverschraubung platzsparendere Verbindungen erzeugen.

Weitere Kosten für die Beschaffung, Lagerung, Logistik der Inserts entfallen. Außerdem ist das spätere Recycling bei Direktverschraubungen aufgrund der leichten Werkstofftrennung sehr wirtschaftlich. Die wichtigsten Vorteile einer Direktverschraubung gegenüber Gewindeeinsätzen ist der Abbildung 3-10 zu entnehmen.



Abbildung 3-10 Verschraubungen mit Gewindeeinsätzen und Direktverschraubungen (Teile aus: [34])

### 3.5 Einflussgrößen auf Direktverschraubungen

#### *Influencing Parameters on Self-Tapping Screw Connections*

Im Gegensatz zu metrischen Schraubverbindungen mit vorgefertigtem Innengewinde, bestimmen bei Direktverschraubungen eine Reihe von Einflussgrößen das Montage- und Betriebsverhalten und somit die Sicherstellung der Schraubverbindung. Aufgrund der Gewindeformung muss besonderes Augenmerk auf den Einschraubprozess gelegt werden. Die Betriebssicherheit einer Schraubenverbindung ist hauptsächlich von der erreichten Vorspannkraft abhängig. Diese hängt wiederum von konstruktiven und prozesstechnischen Größen ab. Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Kunststoffen tritt eine Vorspannkraftrelaxation in den ersten Minuten nach Verschraubung ein.

Abbildung 3-11 zeigt eine Übersicht der Einflüsse auf Direktverschraubungen, unterteilt in konstruktive Einflussparameter, dem Material, der Montage und dem Einsatz.

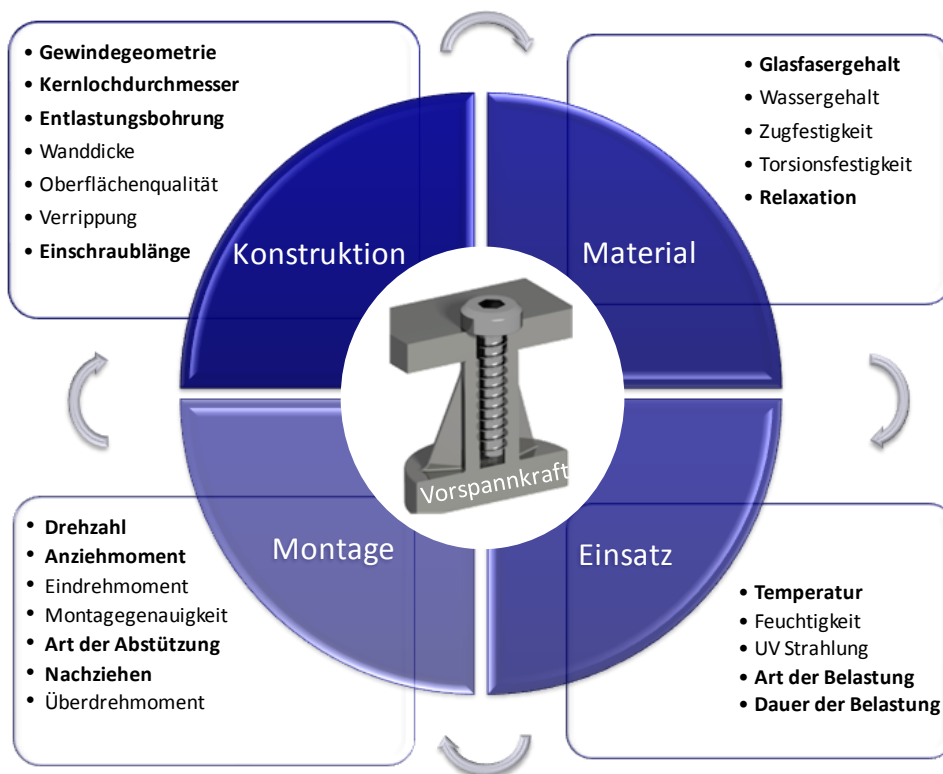


Abbildung 3-11 Einflussgrößen auf Direktverschraubungen in Kunststoff

### 3.5.1 Gewindegeometrie der Schraube

#### *Thread geometry of the screw*

Für die sichere Verbindung in Kunststoffen gibt es für Direktverschraubungen verschiedene Schraubentypen mit unterschiedlichen Gewindegeometrien. Ziel ist eine möglichst große Überdeckung von Flanke und Kunststoff. Die bei der Gewindeformung auftretenden radialen Spannungen sind umso geringer, je kleiner der Flankenwinkel des Gewindes gewählt wird. Gleichzeitig wird das Risiko des Aufplatzens des Tubus minimiert und es kann eine geringere Wanddicke des Tubus erreicht werden. Für normale Kunststoffe hat sich ein Flankenwinkel um  $30^\circ$  als günstig erwiesen.

Zwei typische Schrauben, die für Kunststoffverbindungen genutzt werden und in bisherigen Arbeiten untersucht wurden, sind REMFORM® und Delta PT®. Die Gewindegeometrien sind in Abbildung 3-12 dargestellt.

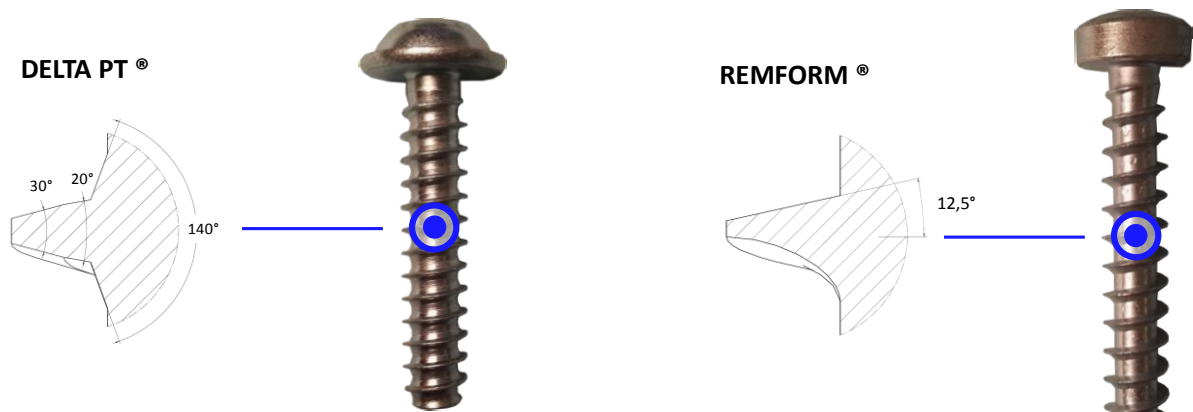


Abbildung 3-12 Zwei typische gewindeformende Schrauben für Kunststoffe (Teile aus: [4])

Eigenschaften von gewindefurchenden Schrauben laut Hersteller sind:

- Geringe Radialdehnung des Tubus
- Niedriges Eindrehmoment  $M_E$
- Hohes Überdrehmoment  $M_{\bar{U}}$
- Große Flankenüberdeckung zwischen Gewindeflanke und Kunststoff
- Geringe Toleranzbereiche

### 3.5.2 Kernlochdurchmesser

#### *Core-hole Diameter*

Die Wahl eines optimalen Kernlochdurchmessers  $d_K$  ist für den Aufbau und Erhalt der Vorspannkraft ebenfalls von hoher Bedeutung. Wählt der Konstrukteur einen zu kleinen Durchmesser, wird die Materialverdrängung im Bauteil verhindert. Als Folge ergibt sich ein erhöhtes Eindrehmoment  $M_E$ , wodurch weniger Moment für den Aufbau der Vorspannkraft zur Verfügung steht. Ein zu großer Durchmesser erhöht wiederum das Risiko des Überdrehens der Schraube, wodurch das Anziehmoment  $M_A$  aus sicherheitsrelevantem Abstand zum Überdrehmoment  $M_{Ü}$  kleiner ausfällt und somit auch die Vorspannkraft  $F_V$  sinkt, [2], (Abbildung 3-13).

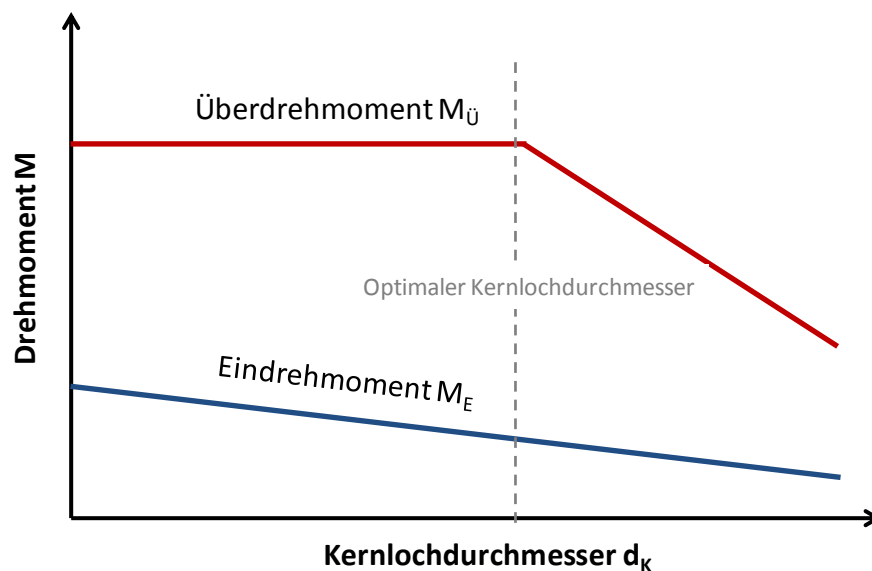


Abbildung 3-13 Einfluss des Durchmessers auf das Überdrehmoment  $M_{Ü}$  und das Eindrehmoment  $M_E$

### 3.5.3 Entlastungsbohrung

#### *Relief Hole*

Die Entlastungsbohrung begünstigt einerseits das Einführen der Schraube während der Montage, andererseits werden zusätzliche Spannungen durch den ersten Gewindegang minimiert. Es entstehen somit nur Spannungen durch Auflage des Schraubenkopfes. In Abbildung 3-14 sind die auftretenden Spannungen in einem Kunststofftubus mit und ohne Entlastungsbohrung dargestellt.

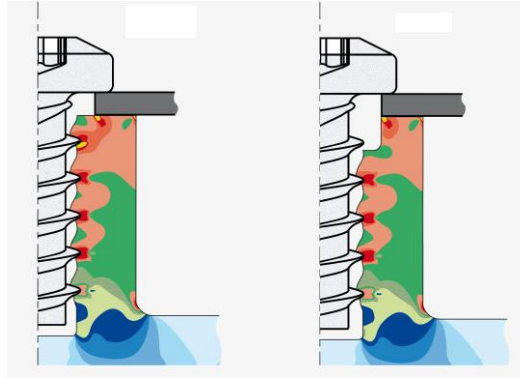
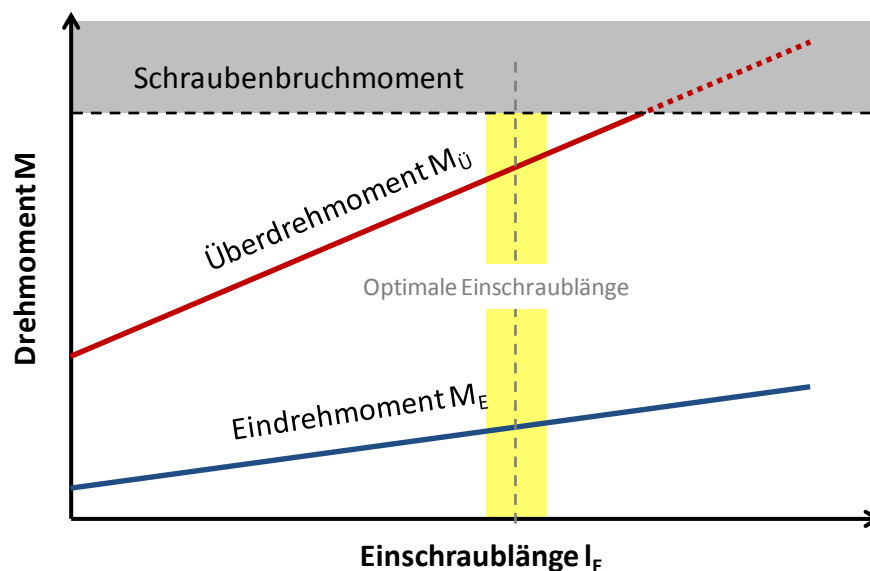


Abbildung 3-14 Einfluss der Entlastungsbohrung auf die Spannungen im Kunststoffdom [34]

### 3.5.4 Einschraublänge *Screw-in length*

Die Einschraublänge sollte aus Festigkeitsgründen möglichst groß gewählt werden. Das Eindrehmoment nimmt mit zunehmender Einschraublänge in der Regel nur geringfügig zu, während das Überdrehmoment und die Auszugskraft deutlich ansteigen. Die höhere Differenz zwischen Eindreh- und Überdrehmoment führt zu höheren Anziehungsmomenten. Allerdings begrenzen die Werkstoffeigenschaften und die Geometrie der Schraube durch das sogenannte Schraubenbruchmoment die Einschraublänge. (Abbildung 3-15)

Abbildung 3-15 Einfluss der Einschraublänge auf  $M_{\text{Ü}}$  und  $M_{\text{E}}$



### 3.5.5 Art der Abstützung

#### *Type of Support*

Der Konstrukteur kann in der Entwurfsphase zwischen zwei Arten der Abstützung wählen: der *Fußabstützung* und der *Stirnabstützung*. Je nach Art der Abstützung tritt ein unterschiedlicher Spannungsverlauf in der montierten Einheit auf. (Abbildung 3-16) Aufgrund von bisherigen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass bei Wahl der Fußabstützung der Abriss des Tubus zum Versagen der Verbindung geführt. Wird dagegen die Stirnabstützung verwendet, führt ein Überdrehen des geformten Innengewindes zum Versagen der Verbindung. Allerdings liegt das Überdrehmoment  $M_{\dot{U}}$  bei der Stirnabstützung höher als bei der Fußabstützung, woraus sich ein höheres Anziehmoment  $M_A$  ergibt. Bei Wahl der Fußabstützung sollte der Bereich der Sollbruchstelle durch Verrippung gestärkt werden.

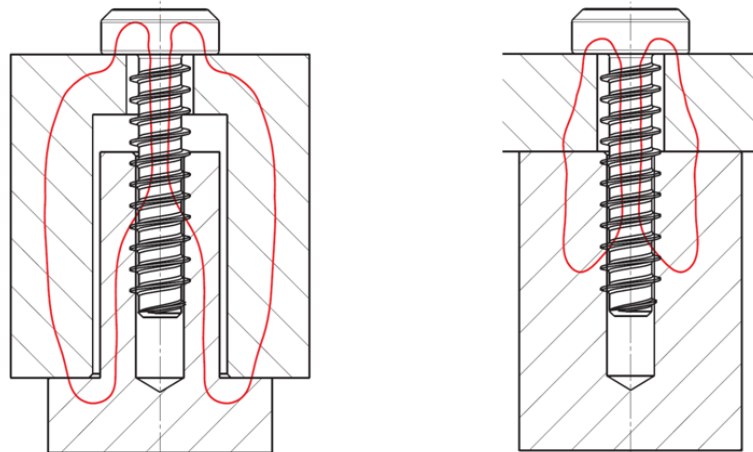


Abbildung 3-16 Art der Abstützung: linke Seite Fußabstützung, rechte Seite Stirnabstützung [26]

### 3.5.6 Einfluss der Temperatur

#### *Influence of the Temperature*

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, verhalten sich Kunststoffe je nach Temperatur unterschiedlich. Durch Temperaturerhöhungen werden makromolekulare Bewegungsvorgänge im Kunststoff beschleunigt. Der Einsatzbereich wird für viele Kunststoffe allein durch die Umgebungstemperaturen beschränkt. Grundsätzlich sollte die Einsatztemperatur den Glasübergangsbereich eines Kunststoffs nicht überschreiten. Übersteigt die Einsatztemperatur diesen Bereich, ist mit einer großen Reduzierung der mechanischen Eigenschaften zu rechnen, wie beispielsweise einer höheren

Kriechneigung des Kunststoffs. Als Faustformel kann angenommen werden, dass sich bei Erhöhung der Umgebungstemperatur um 15 K die Relaxationsvorgänge um den Faktor 10 beschleunigen, [2].

## 4 Bisherige Untersuchungen an der HAW Hamburg

### *Previous Investigations at the University of Applied Sciences*

Grundsätzlich folgen die experimentellen Untersuchungen dem Ablauf, wie er in Abbildung 4-1 dargestellt ist. Im ersten Schritt werden Einschraub- und Losdrehversuche durchgeführt, um das Einschraubmoment  $M_E$  und dessen Unterteilung in Furchmoment  $M_F$  und Reibmoment  $M_R$  zu ermitteln. Anschließend wird durch Überdrehen der Schraubverbindung das Versagemoment  $M_{\dot{U}}$  ermittelt, um damit das optimale Anziehmoment  $M_A$  für die weiteren Montageversuche zu errechnen. Zusätzlich dienen die Werte dazu, Vergleiche mit Berechnungsmethoden aus der Literatur zu ziehen. Schlussendlich wird der Einfluss des gezielten Nachziehens der Schraubverbindung und dessen Effekt auf die Vorspannkraft untersucht. Dabei werden die Zeiten des Nachziehens variiert.

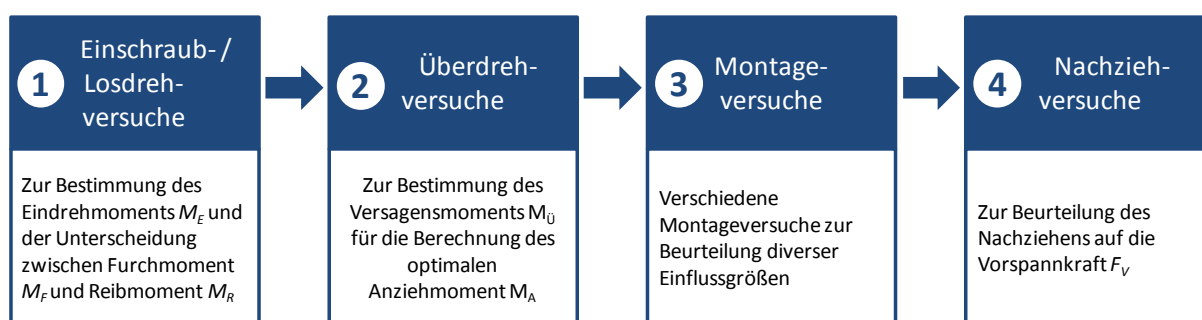


Abbildung 4-1 Versuchsablauf [26]

Bei der Wahl der Montageparameter wird Bezug auf Herstellerangaben oder gängigen Werten aus der Industrie genommen. Die Drehzahl während der Montage wird bei allen Versuchen konstant gehalten, ebenso das Anziehmoment  $M_A$ , welches für einen Schraubendurchmesser von 8 mm bei Kunststoffen 12 Nm und Leichtmetallen 29 Nm beträgt. Diese Werte dienen als Vorgabe für den Schrauber. Gemessen wird die Vorspannkraft  $F_V$  und das Moment  $M_A$  über dem Drehwinkel  $\varphi$ .

#### 4.1 Übersicht bisheriger wissenschaftlicher Arbeiten

*Survey of previous academic works*

Die Einflussgrößen auf Kunststoffdirektverschraubungen, welche in bisherigen Masterarbeiten oder Projekten untersucht wurden sind in der Abbildung zu sehen:

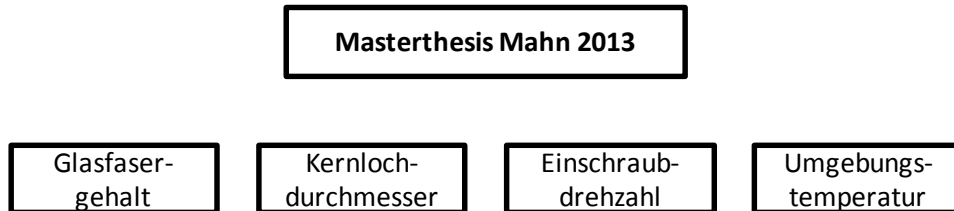


Abbildung 4-2 Untersuchte Einflussfaktoren von Mahn [4]

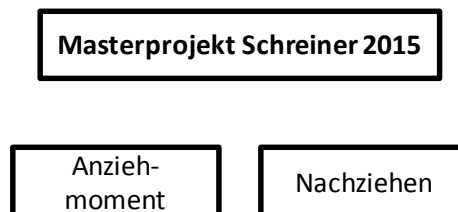


Abbildung 4-3 Untersuchte Einflussfaktoren von Schreiner [35]

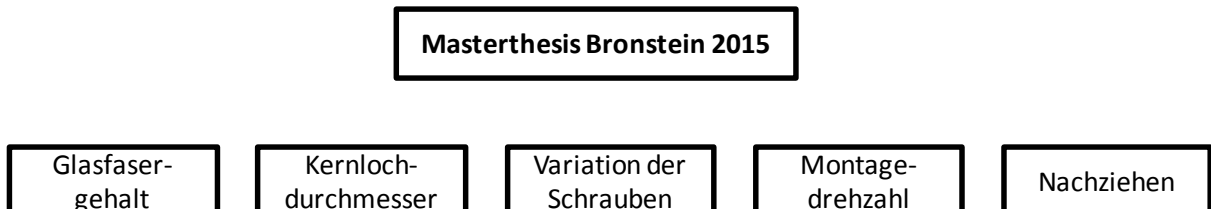


Abbildung 4-4 Untersuchte Einflussfaktoren von Bronstein [6]

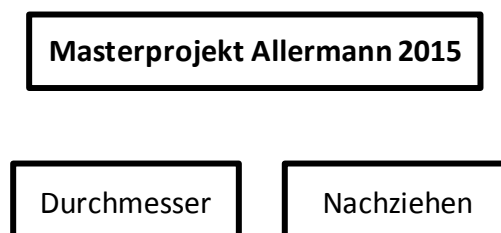


Abbildung 4-5 Untersuchte Einflussfaktoren von Allermann

Die aussagekräftigsten Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten werden im nächsten Kapitel detailliert dargestellt und interpretiert.

## 4.2 Einflussparameter Kernlochdurchmesser in Leichtmetallen

### *Influencing Parameter Core-hole Diameter of Light Alloys*

Bei der Untersuchung des Kernlochdurchmessers in Leichtmetallen wird die Spanne zwischen kleinst möglichem und größtmöglichem Durchmesser mit 100 % festgelegt. Der größte Kernlochdurchmesser  $d_K$  liegt bei 8.00 mm ohne Gewindeüberdeckung. Der kleinste Kernlochdurchmesser  $d_{Kmin}$  beträgt 7.19 mm, welcher dem Kerndurchmesser  $d_3$  der Schraube entspricht und eine Gewindeüberdeckung von 100 % ergibt. Der brauchbare Bereich des Kernlochdurchmessers liegt zwischen 7,35 mm und 7,60 mm. Laut Herstellerangaben beläuft sich der optimale Kernlochdurchmesser auf 7,43 mm und soll einer realen Gewindeüberdeckung von 70 % entsprechen. Aufgrund des Umformprozesses während der Schraubenmontage, ist die reale Flankenüberdeckung größer als die theoretische.

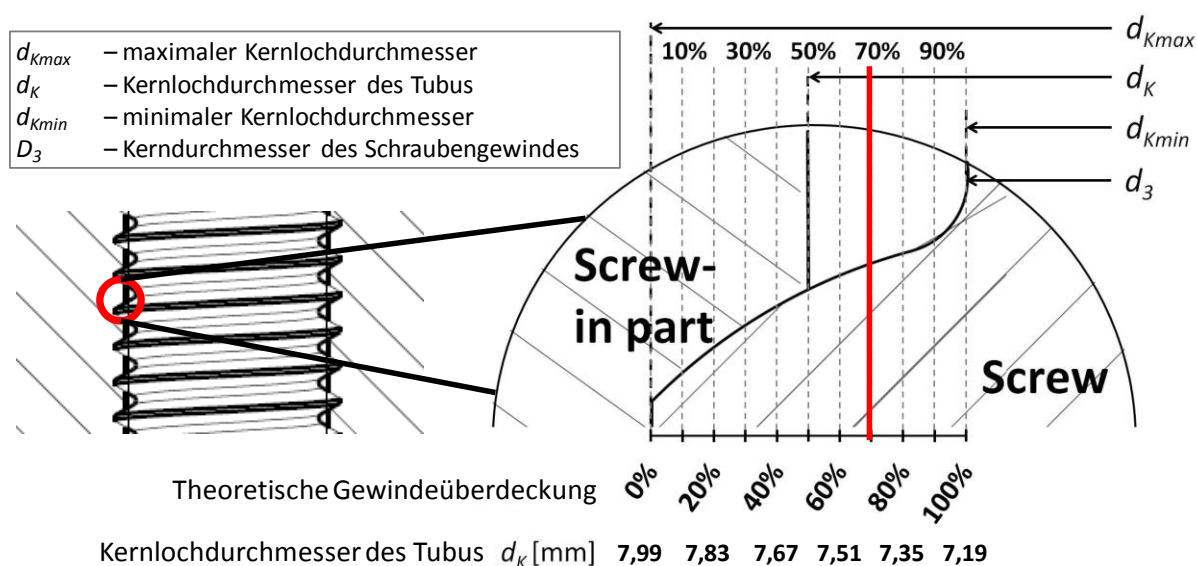


Abbildung 4-6 Darstellung der theoretischen Gewindeüberdeckung [26]

In den experimentellen Untersuchungen wurde der Durchmesser um 0,1 mm verändert. Toleranzen aufgrund von Ungenauigkeiten in der Fertigung führen zu weiteren Abmessungen der Durchmesser.

Im ersten Schritt wurden das Eindrehmoment und das Überdrehmoment  $M_{\dot{U}}$  bei unterschiedlichen Durchmessern gemessen, um das Anziehmoment zu bestimmen. Je

höher dabei die Differenz zwischen  $M_{\dot{U}}$  und  $M_E$  ist, desto mehr Vorspannkraftaufbau ist möglich. Abbildung 4-7 zeigt die gemessenen Werte.

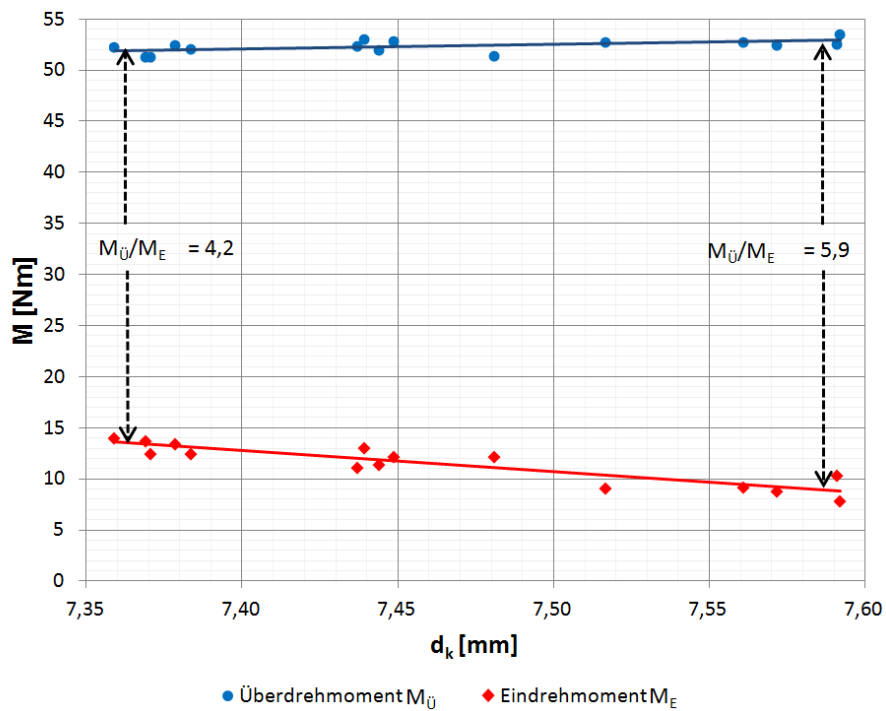


Abbildung 4-7 Einfluss des Kernlochdurchmessers auf das Eindreh- und Überdrehmoment

Laut diesen Messwerten sollte sich die Vorspannkraft mit steigendem Kernlochdurchmesser erhöhen. Abbildung 4-8 zeigt, dass sich diese Annahmen bestätigen.

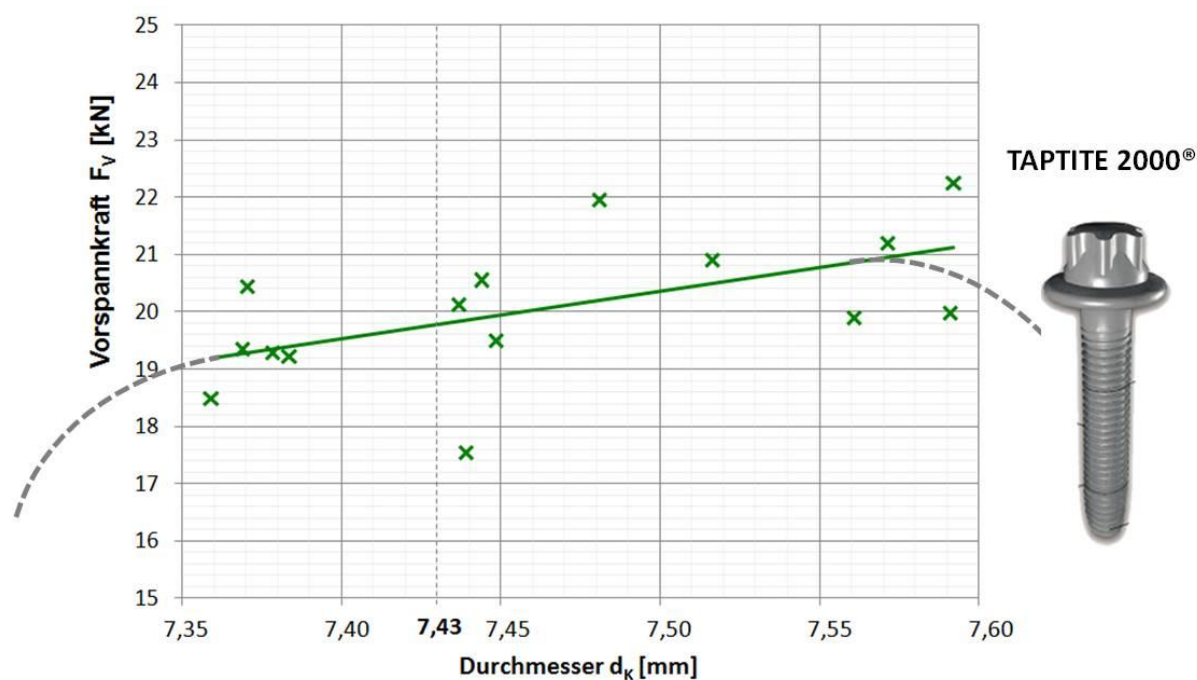


Abbildung 4-8 Einfluss des Kernlochdurchmesser auf die Vorspannkraft in Leichtmetallen [26]

Die Testreihe in Abbildung 4-8 zeigt zudem eine große Streuung der 15 Messwerte, welche besagt, dass der Parameter Kernlochdurchmesser sehr sensibel ist. Für eine genauere Auswertung sind weitere Versuche notwendig. Allerdings wurde die Anzahl der Versuche bereits in der Versuchsplanung festgelegt und begrenzt.

Die Versuche basieren auf der Wahl von Durchmessern, die für die Industrie von Bedeutung sind. Für weitere Aussagen über den Einfluss des Durchmessers auf die Direktverschraubung sind größere Messbereiche notwendig. Der Bereich nahe dem optimalen Durchmesser, zeigt einen linearen Anstieg der Vorspannkraft, jedoch würde ein weiterer Messbereich in Richtung des minimalen und maximalen Durchmessers einen absteigenden Verlauf der Vorspannkraft zeigen. Um genauere Aussagen zu dem Einflussparameter Durchmesser treffen zu können, sind weitere analytische und experimentelle Untersuchungen an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften geplant.

### 4.3 Einfluss der Relaxation auf die Vorspannkraft

#### *Influence of Relaxation on Preload*

Kunststoffe besitzen ein visko-elastisches Materialverhalten, welches zu einer Relaxation des Werkstoffs und somit zur Abnahme der Vorspannkraft über die Zeit führt. Die Temperatur hat einen weiteren Einfluss auf die Verbindung. Schon bei kleinen Temperaturänderungen verhält sich ein Kunststoff sehr unterschiedlich, [33]. Die meisten Versuche wurden bei Umgebungstemperaturen zwischen 22° C und 25° C durchgeführt. Dabei wurde bei allen Versuchen die Umgebungstemperatur während des Einschraubvorgangs dokumentiert. Schon kleine Abweichungen der Temperaturen haben einen signifikanten Einfluss auf die Relaxation des Kunststoffs.

Wie in Abbildung 4-9 zu erkennen ist, hat der Parameter Relaxation einen großen Einfluss auf die Vorspannkraft. Bereits 2 Sekunden nach dem Anziehen der Schraube fällt die Vorspannkraft bei dem verwendeten Werkstoff *Polypropylen mit 30 % Glasfasergehalt (PP-GF30)* um 16 % bis 26 %.

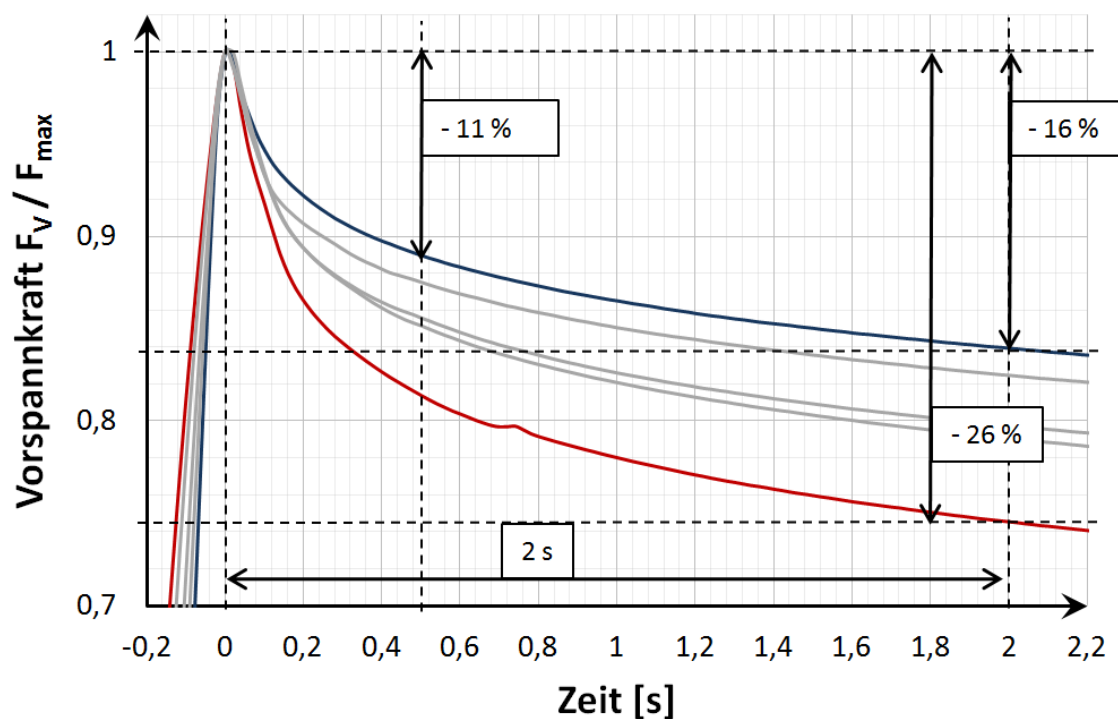


Abbildung 4-9 Vorspannkraftverlust aufgrund von Relaxation des Kunststoffs [26]



#### 4.4 Einfluss des Nachziehens von Direktverschraubungen *Influence of Re-tightening on Self-Tapping Screw Connections*

Es wurde ein statischer Langzeittest über neun Tage mit Kunststoffproben aus PP-GF30 durchgeführt, wie der Abbildung 4-10 zu entnehmen ist. Die Abbildung zeigt das Verhalten der Vorspannkraft mit einem Nachziehen der Schraube nach 30 Sekunden. Es ist deutlich erkennbar, welchen positiven Einfluss das Nachziehen auf die bleibende Vorspannkraft hat.

Nach 9 Tagen ist die verbleibende Vorspannkraft 9 % höher als in Versuchen ohne Nachziehen. Eine Extrapolation auf 6 Monate führt zu einem Unterschied der verbleibenden Vorspannkraft von 11 %.

Eine Direktverschraubung mit gezieltem Nachziehen der Schraube führt definitiv zu einem besseren Langzeitverhalten. Weiterführende Tests mit einem Nachziehen der Schraubverbindung nach definierten Zeiten wurden generell auf eine Dauer von 10 Minuten limitiert, da der größte Vorspannkraftverlust in den ersten Minuten auftritt.

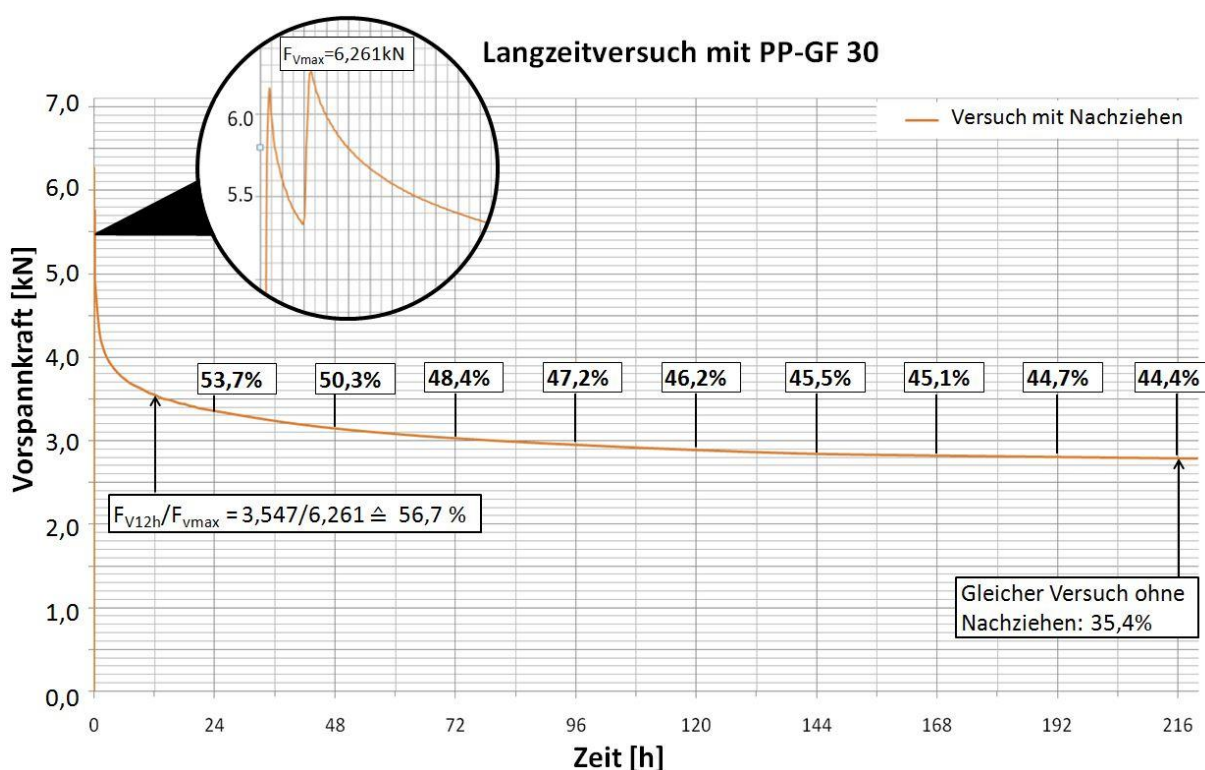


Abbildung 4-10 Langzeitversuch mit Nachziehen nach 30 Sekunden [26]

## 5 Versuchseinrichtung

### *Experimental Equipment*

Für die Schraubversuche steht ein Prüfstand zum definierten Anziehen und Lösen von Schraubverbindungen zur Verfügung. Der Prüfstand ist mit industriellem Schraubequipment von der Firma *Desoutter Industrial Tools Inc.* ausgestattet und verfügt über eine *1-Kanal Schraubsteuerung CVI3 function* mit Mess- und Steuer-elektronik. Während eines Einschraubversuchs können die Kenngrößen Drehmoment und Drehwinkel erfasst werden. Als Schraubwerkzeug kommt das Modell *EID25-1200* mit einem maximalen Drehmoment von 25 Nm und einer maximalen Drehzahl von  $1200 \text{ min}^{-1}$  zum Einsatz. Die Drehmoment-Streubreite liegt bei unter 5 %. Der Schrauber befindet sich in einem Werkzeugständer (*D53-100S*). Dieser übernimmt die Führung des Werkzeugs.

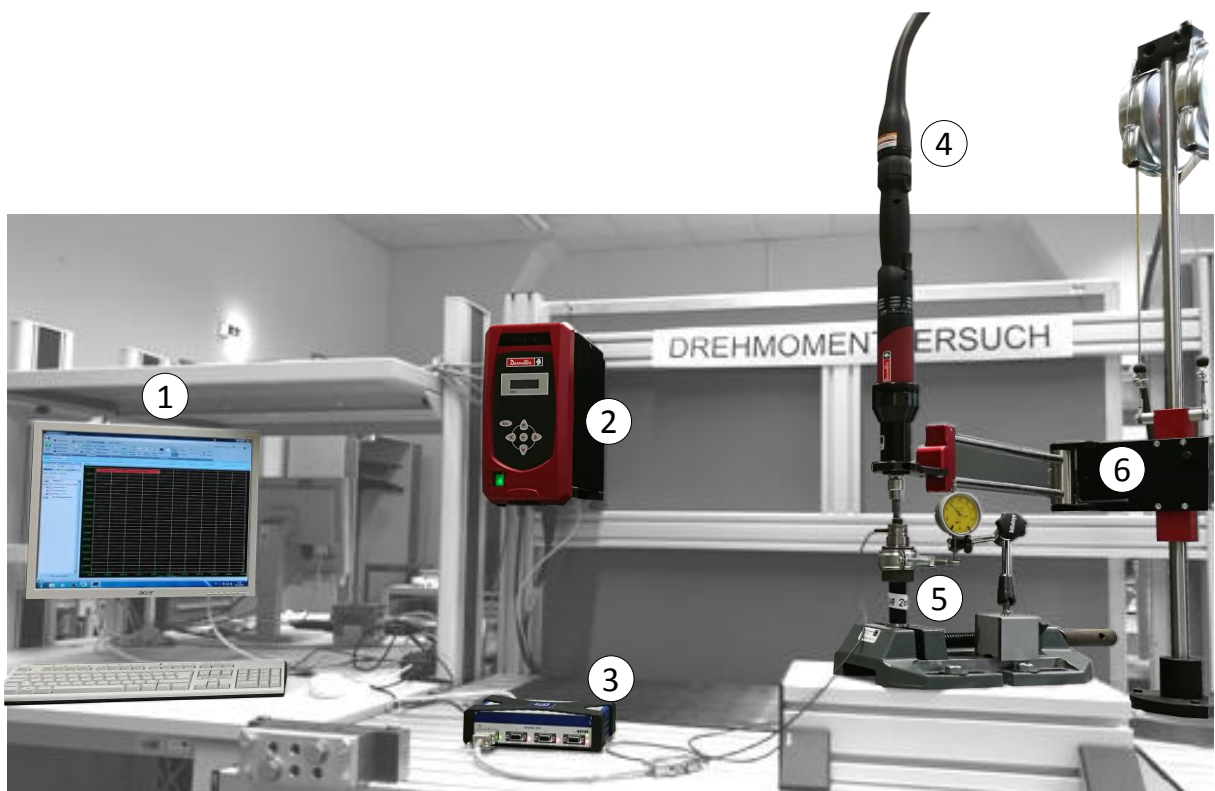


Abbildung 5-1 Verschraubungsprüfstand der Hochschule für Angewandte Wissenschaften

- (1) Computer, Programme: *catman Easy 3.4.2* und *VCI PC 1.30.1.4*
- (2) Schraubsteuerung
- (3) Universalmessverstärker *HBM-MX440A*
- (4) Schrauber EID25-1200
- (5) Einspannung, Kraftmessring HBM 60
- (6) Werkzeugständer *D53-100S*

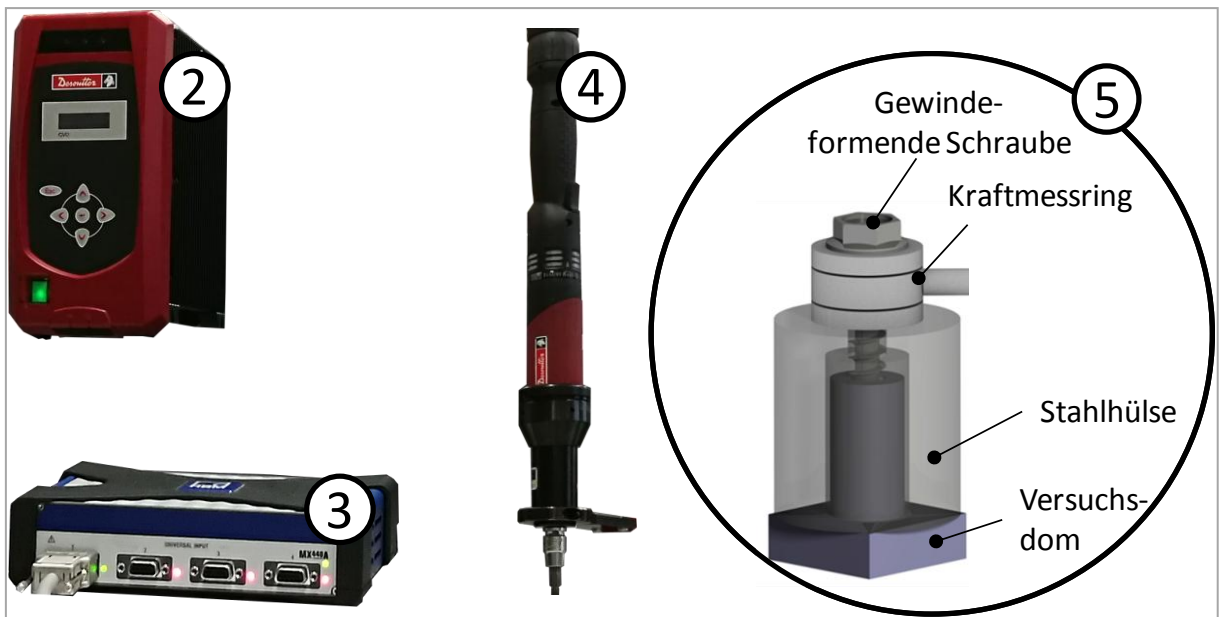


Abbildung 5-2 Detaillierte Übersicht der Komponenten des Verschraubungsprüfstands (Teile aus: [26])

Zur Erfassung der Vorspannkraft werden Kraftmessringe der Firma *Hottinger Baldwin Inc.* verwendet. Zusammen mit zwei gehärteten Scheiben ergibt sich das Krafteinleitungsteil. Der Kraftsensor hat eine Linearitätsabweichung von 10 %. Bei Vorspannkraftmessungen aus dem vorgespannten Zustand, besitzen die Kraftmessringe eine höhere Genauigkeit.

Über einen Universalmessverstärker (*HBM-MX440A*) wird das gemessene Signal weiterverarbeitet und an einen Computer übermittelt. Als Software für die Erfassung und Visualisierung der gemessenen Vorspannkraft wird das Programm *catman Easy 3.4.2* von der Firma *Hottinger Baldwin Inc.* verwendet. Zur Aufzeichnung des Drehwinkels und dem Drehmoment wird das Programm *VCI PC 1.30.1.4* der Firma *Desoutter Industrial Tools Inc* genutzt.

## **6 Versuchsplanung und Vorbereitung** *Design of Experiments and Preparation of the Tests*

Ziel der Versuchsplanung ist die Auswahl von Parametern, welche besonders hohen Einfluss auf Direktverschraubungen und deren Qualität haben. Wichtig sind dabei die Einflüsse auf die Vorspannkraft, da diese das Hauptmerkmal einer sicheren Schraubverbindung darstellt.

### **6.1 Planung der Versuche** *Planning of the Tests*

Aus vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten wird deutlich, dass die Vorspannkraft von vielen Parametern abhängt. Bei allen Untersuchungen ist das Materialverhalten des Kunststoffes hauptverantwortlich für die zeit- und temperaturabhängige Abnahme der Vorspannkraft. Daher soll in dieser Arbeit die Relaxation und der Einfluss des Nachziehens untersucht werden. Für diesen Zweck wird ein Modellversuch entwickelt, mit dessen Hilfe Kunststoffhülsen aus PP-GF30 auf unterschiedliche Arten untersucht werden sollen. Dabei werden Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten des Kunststoffes und dem Vorspannkraftverlust gezogen, um Vergleiche mit den dargestellten Modellen aus Kapitel 2.1.7 zu ziehen. Zusätzlich wird das Materialverhalten bei unterschiedlich hohen Belastungen und Belastungsgeschwindigkeiten untersucht. Bei einem Großteil der Versuche wird eine Versuchsdauer von mehreren Tagen angesetzt.

Vor der Versuchsplanung werden die Ziele der Untersuchungen genau definiert und anschließend ausgewertet, um neue Erkenntnisse für weitere Untersuchungen in die Versuchsplanung mit einfließen zu lassen. Die Versuchsplanung zieht sich also durch die kompletten experimentellen Untersuchungen.

Ziel der Versuche ist die Untersuchung der Vorspannkraft unter Einfluss der Relaxation der Kunststoffproben. Dabei soll einerseits der Vorspannkraftverlauf bei möglichst starrer vorgegebener Dehnung der Proben und andererseits das Verformungsverhalten unter möglichst konstanter, äußerer Belastung untersucht werden.

Insgesamt werden 4 Versuchsblöcke durchgeführt.

**Vorversuche:**

- **Druckversuch (VD)**
  - Ziel: Verformungsverhalten des Kunststoffes unter konstanter Kraft
  - Verhalten des Kunststoffes bis zum Versagen
- **Durchschraubversuch (Modellversuch) (VA)**
  - Vorspannkraftrelaxation und Verformungsverhalten bei unterschiedlichen Schraubversuchen (M8, M5, Einsatz von Tellerfedern)
- **Starre Verbindung (VC)**
  - Vorspannkraftverlust bei einer starren Verbindung und somit vorgegebenen Dehnung der Kunststoffprobe
  - Verhalten des Kunststoffes bei Variation der Belastungshöhe

**Direktverschraubung (VB):**

- Langzeitverhalten der Vorspannkraft mit Einfluss des Nachziehens
- Einfluss der Montage (Einschraubdrehzahl  $n_E$  / Anziehdrehzahl  $n_A$ )

Abbildung 6-1 zeigt schematisch die Übersicht der geplanten Versuche. Die Erkenntnisse aus den Einzelmessungen fließen kontinuierlich in die Planung der darauffolgenden Versuche ein.

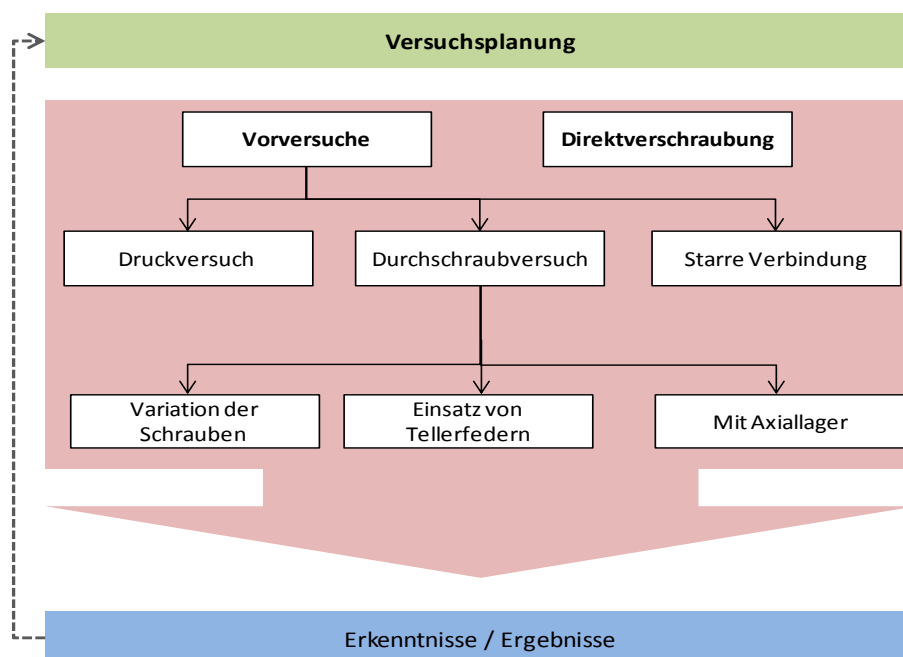


Abbildung 6-1 Vorgehensweise bei der Planung der Versuchsreihen

## 6.2 Versuchsvorbereitung

### *Preparation of the Tests*

Die Versuchsvorbereitung umfasst die Beschaffung der Kunststoff- und Metallformteile, sowie die Herstellung der Prüfkörper und Komponenten für den Modellversuch. Die Kunststoffe wurden in Form von Rundstäben von der Firma „Kunststoffe Nickel“ aus Barsbüttel bezogen.

### 6.2.1 Herstellung der Kunststoffproben/Komponenten des Modellversuchs

#### *Production of the plastic samples and the modules of the model test*

Die Kunststoffproben und die metallischen Komponenten für den Modellversuch wurden in Eigenleistung in der zentralen Laborwerkstatt der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg hergestellt. Die Aufnahmen in Abbildung 6-2 zeigen die angewendeten Fertigungsverfahren:

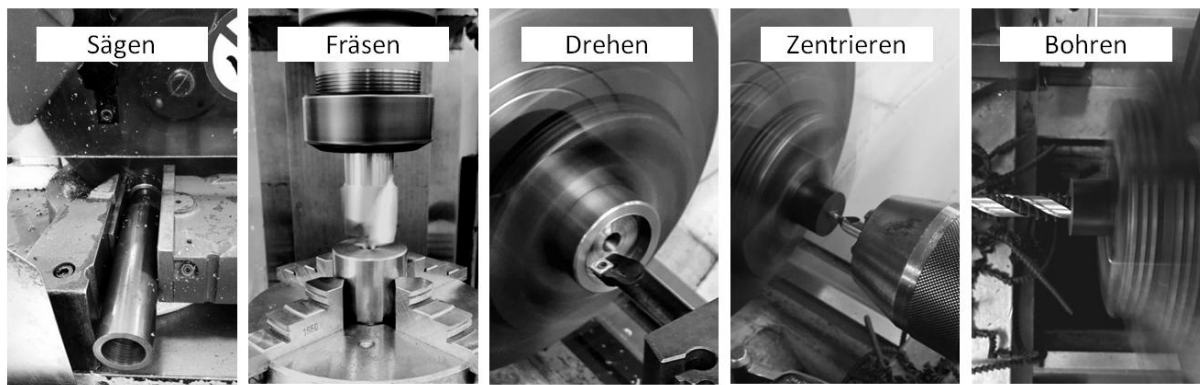


Abbildung 6-2 Herstellung der Versuchsproben und Komponenten des Modellversuchs

Die technischen Zeichnungen der hergestellten Komponenten für den Modellversuch befinden sich in Anhang B

### 6.2.2 Eigenschaften und Abmessungen der Prüflinge für die Vorversuche

*Properties and dimensions of the Test Specimen for the Pretests*

Bei den Vorversuchen werden zusätzlich Proben aus reinem Polypropylen und Polypropylen mit 30 % Glasfasergehalt verwendet.

Polypropylen ist ein häufig verwendeter Kunststoff und gehört zur Gruppe der Polyolefine. PP zeichnet sich auf Grund sehr guter mechanischer Eigenschaften bzgl. Härte und Wärmebeständigkeit bis zu 140°C aus. Bei einer vergleichsweise geringen Dichte von  $0,9\text{g/cm}^3$  weist PP hervorragende Formungs- und Gewichtseigenschaften auf, [36, 37].

Tabelle 6-1 Eigenschaften der Materialien PP, PP-GF20 und PP-GF 30

Eigenschaft	PP	PP-GF 20	PP-GF30
Dichte	0,90 – 0,915 g/cm <sup>3</sup>	1,05 g/cm <sup>3</sup>	1,12 – 1,14 g/cm <sup>3</sup>
Zug E-modul	1450 MPa	5400 MPa	7200 MPa
Zugfestigkeit	33 Mpa	80 Mpa	101 MPa
Wärmeformbeständigkeit	100 °C	148 °C	151 °C
Faserlänge	-	2...3 mm	2...3 mm
Max. Temperatur kurzzeitig	140 °C	140 °C	140 °C
Max. Temperatur dauernd	100 °C	100 °C	100 °C
Schmelztemperatur	154 °C	165 °C	165 °C

PP ist ein Massenkunststoff mit den höchsten Wachstumsraten der Kunststoffbranche. Durch Verstärkung von Glasfasern wird PP zunehmend für technische Anwendungen eingesetzt und kommt den Materialeigenschaften von ABS und PA sehr nah.

Typische Einsatzbereiche von Polypropylen sind: [38]

- Herstellung von Gehäusen, Gartenmöbeln, Rohren, Heißwasserbehältern
- Kleinelektronik, Karosserieteile, Formteile im Innenraum von Kraftfahrzeugen
- Stoßfänger

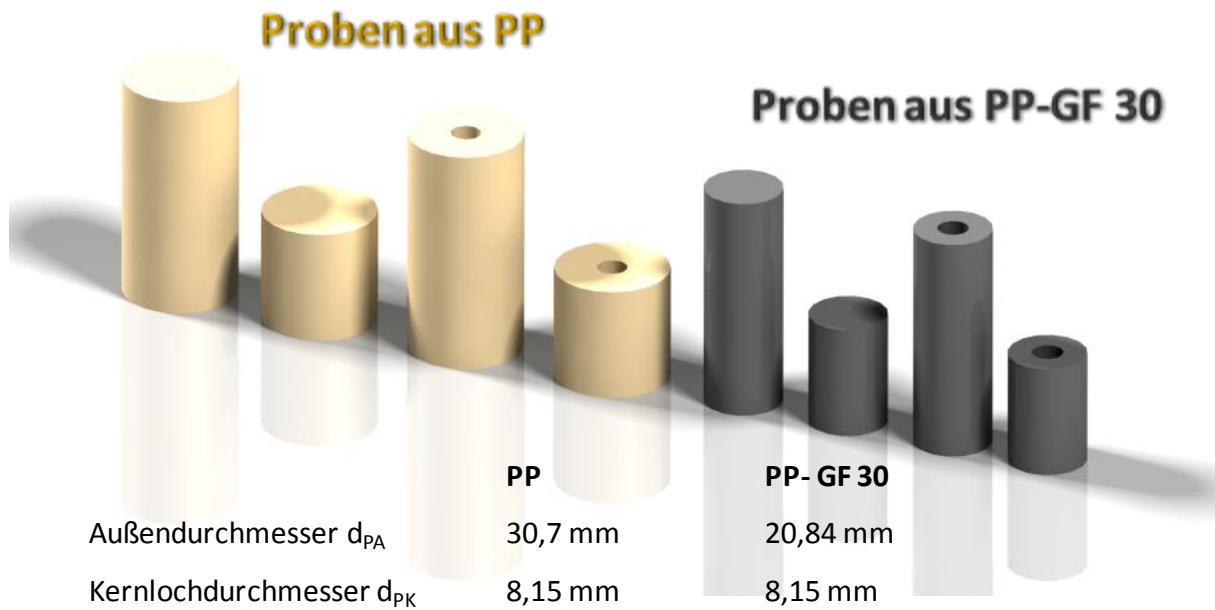


Abbildung 6-3 Prüflinge für die Vorversuche [Programm: Catia V5]

Der Außendurchmesser der Proben aus PP beträgt 30,7 mm. Das Kernloch hat einen Durchmesser von 8,14 mm. Die Längen der Proben variieren und können Tabelle 6-2 entnommen werden.

Tabelle 6-2 Übersicht der hergestellten Prüflinge mit Angabe der Länge

Proben aus PP-GF 30	Anzahl Proben	Mit Kernloch	Länge [mm]
Variante 1	3	x	20,00
Variante 2	6	x	30,00
Variante 3	3	x	40,00
Variante 4	3	x	50,00
Variante 5	14	x	60,00
Variante 6	1		30,00
Proben aus PP	Anzahl Proben	Mit Kernloch	Länge [mm]
Variante 1	1	x	30,00
Variante 2	4	x	60,00

Die genauen Abmessungen der Proben für den Modellversuch befinden sich in den Versuchsprotokollen im Anhang A1



### 6.2.3 Eigenschaften/Abmessungen der Prüflinge für Direktverschraubungen *Properties/Dimensions of the Test Specimen for Direct Assemblies*

Bei den in den Versuchen verwendeten Prüflingen aus dem Material PP GF30 und PP GF20, handelt es sich um Kunstfaserverbundstoffe mit einem Polypropylenanteil (PP), gekoppelt mit einem Glasfasergehalt (GF) von dreißig bzw. 20 Prozent.

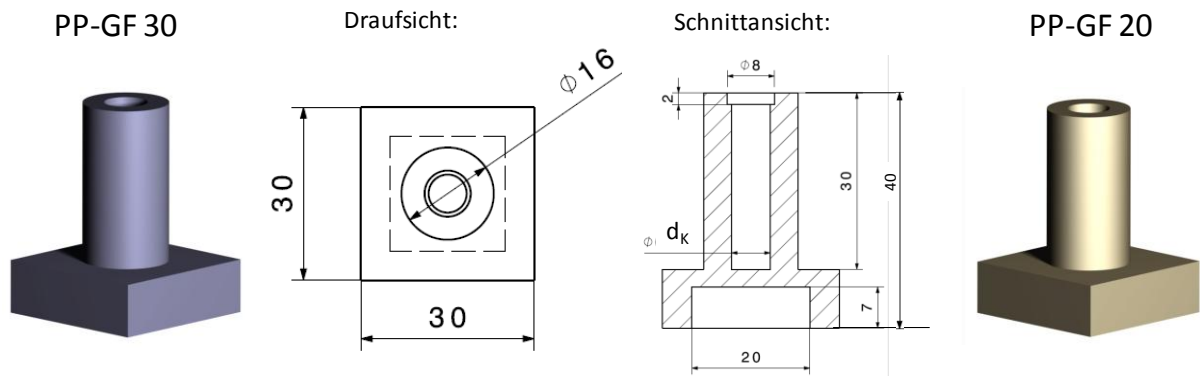


Abbildung 6-4 Darstellung der Proben für die Versuche zur Direktverschraubung [4, 6]

Der genaue Kernlochdurchmesser ist in den Protokollen zu den Einschraubversuchen in Anhang A4 zu finden.

Tabelle 6-3 Übersicht der Proben für Direktverschraubungen

Nr.	Material	Durchmesser $d_K$ [mm]
Probe 1	PP-GF 30	6,96
Probe 2	PP-GF 20	6,86
Probe 3	PP-GF 20	6,88
Probe 4	PP-GF 20	6,84
Probe 5	PP-GF 20	6,86
Probe 6	PP-GF 20	6,86
Probe 7	PP-GF 20	6,83

## 7 Versuchsdurchführung

### Execution of the tests

Bei der Durchführung der Versuche ist darauf zu achten, dass während der Schraubphasen eine Messfrequenz von 50 Hz eingestellt wird. Grund dafür ist die schnelle Abnahme der Vorspannkraft innerhalb weniger Millisekunden. Abbildung 7-1 zeigt die mögliche Varianz der Vorspannkraft von 5,86 % bei der Messung mit 1 Hz.

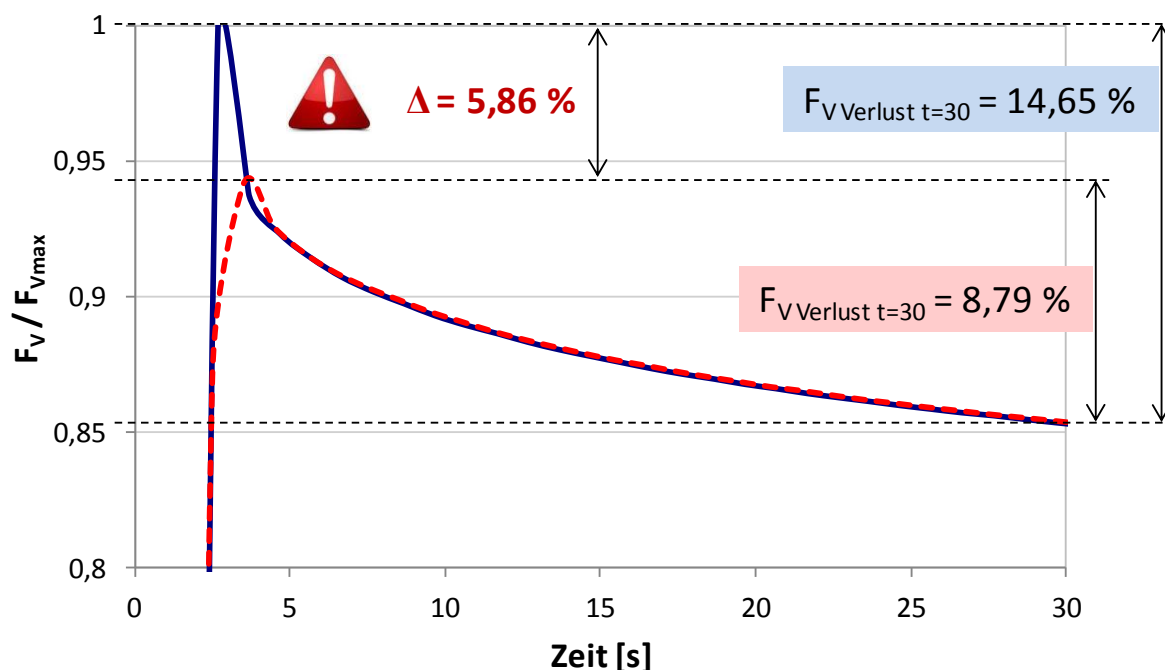


Abbildung 7-1 Bedeutsamkeit der Messfrequenz bei den Vorspannkraftmessungen

### 7.1 Modellversuch

#### Pilot Project

Der generelle Aufbau des Modellversuchs kann der Abbildung 7-2 entnommen werden. Die Versuche können mit Verwendung eines Axiallagers durchgeführt werden um den Einfluss der Kopfreibung zu minimieren. Die Kunststoffprobe befindet sich zwischen den Stahlhülsen, die je nach Art des Versuchs mit Distanzstücken versehen werden können um zum Beispiel die Klemmlänge der Schraubenverbindung zu erhöhen. Durch den Einsatz unterschiedlicher Schrauben mit verschiedenen Längen wird das Vorspannkraftverhalten und teilweise die Verformung gemessen. Mit Hilfe von Tellerfedern kann versucht werden, den Vorspannkraftverlust zu minimieren und

das Verformungsverhalten der Kunststoffproben über einen längeren Zeitraum zu untersuchen.

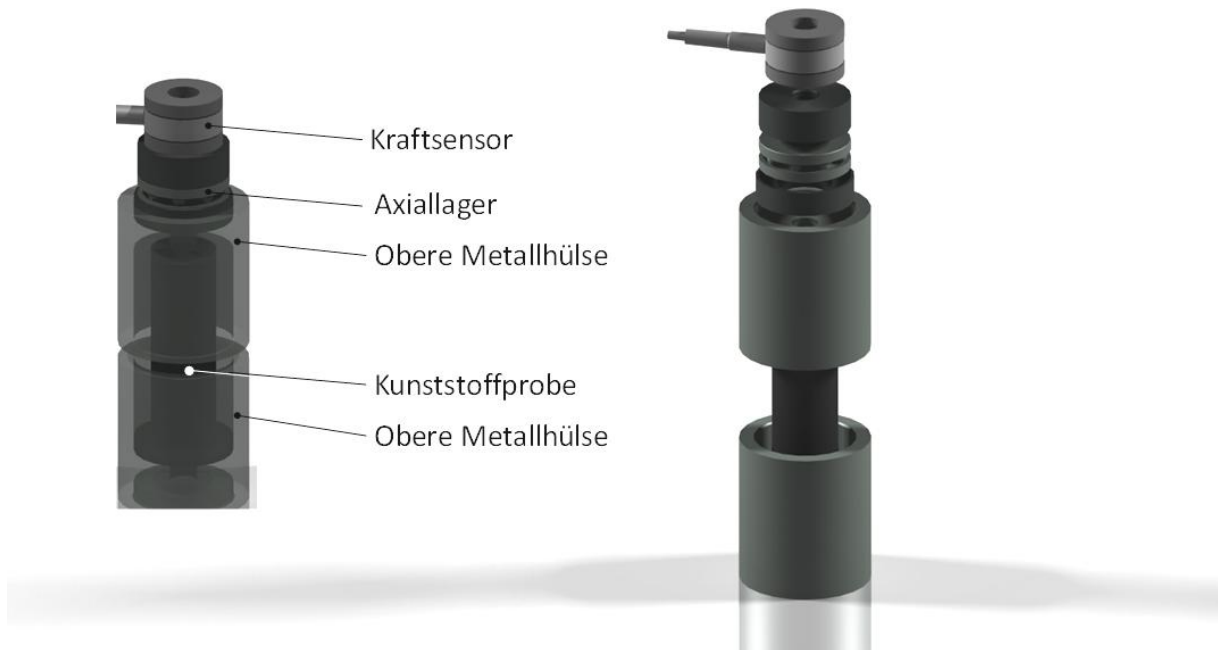
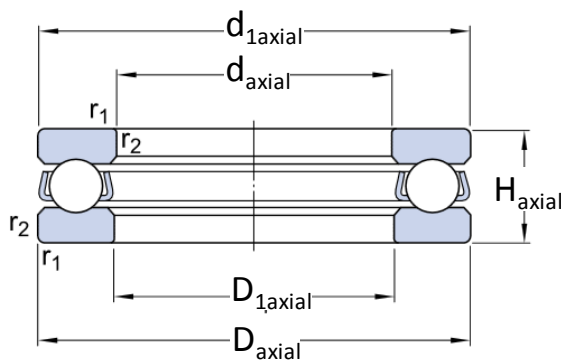


Abbildung 7-2 Anordnung der Komponenten für den Modellversuch [Programm: Catia V5]



Oberer Innendurchmesser $d_{axial}$	15	mm
Unterer Außendurchmesser $D_{axial}$	28	mm
Höhe $H_{axial}$	9	mm
Oberer Außendurchmesser $d_{1axial}$	28	mm
Unterer Innendurchmesser $D_{1axial}$	16	mm
$r_{1,2}$	0,3	mm

Abbildung 7-3 Abmaße des verwendeten Axiallagers im Modellversuch [39]

Das Axiallager hat eine statische Tragzahl  $C_0$  von 18,3 kN und darf maximal mit einer Drehzahl von 12000 U/min belastet werden.

Tabelle 7-1 Übersicht der durchgeführten Modellversuche

Nr.	Dauer	Werkstoff	L [mm]	Schraube	$l_K$ [mm]	$M_A$ [Nm]	$n_A$	Nach- ziehen	Axiallager
VA-1	14 Tage	PP	59,8	M8x140 4.6	100	12	30	ja	nein
VA-2	1 h	PP	59,7	M8x140 4.6	100	12	30	ja	nein
VA-3	1 h	PP	29,8	M8 x 80 8.8	70	12	30	ja	nein
VA-4	1 Tag	PP-GF30	60	M8 Gewinde	200	20		nein	nein
VA-5	5 Tage	PP-GF30	60,06	M8x100 8.8	80	20	30	nein	nein
VA-6	1 Tag	PP-GF30	60	M8x140 4.6	120	12	30	nein	ja
VA-7	1 Tag	PP-GF30	60	M8 Gewinde	150	12	30	ja	ja
VA-8	5 Tage	PP-GF30	60	M5 Gewinde	140	6	5	ja	ja
VA-9	9 Tage	PP-GF30	30	M8x100 8.8	90	12	5	nein	ja
VA-10	10 min.	PP-GF30	30,1	M8x100 8.8	92	var.	5		nein
VA-11	9 Tage	PP-GF30	60	M5x240 12.9	228	5	5	nein	ja
VA-12	9 Tage	PP-GF30	60	M8x140 12.9	130	8,5	5	nein	ja
VA-13	2 h	PP-GF30	60	M8x140 12.9	130	9	5	ja	ja
VA-14	20 h	PP-GF30	60,07	M8x140 12.9	130	12	5	nein	ja
VA-15	20 min.	PP-GF30	60,05	M8x140 12.9	130	15	150	ja	ja
VA-16	20 min.	PP-GF30	60,1	M8x140 12.9	130	15	150	ja	ja
VA-17	20 min.	PP-GF30	60,05	M8x140 12.9	130	15	500	ja	ja

### 7.1.1 Variation der Schrauben

#### *Variation of the Screws*

Schrauben verformen sich während des Vorspannkraftaufbaus elastisch. Das elastische Verformungsverhalten von Schrauben unterscheidet sich je nach Geometrie und mechanischen Eigenschaften. Für die Versuche werden metrische Schrauben und Muttern verwendet. In Abbildung 7-4 ist die Dehnung von metrischen Schrauben in Bezug auf die Vorspannkraft abgebildet. Will man beispielsweise in den Versuchen eine möglichst große elastische Dehnung der eingesetzten Schraube bei geringer Vorspannkraft erzeugen, macht es Sinn, Schrauben mit kleinem Durchmesser und hoher Festigkeitsklasse zu verwenden.

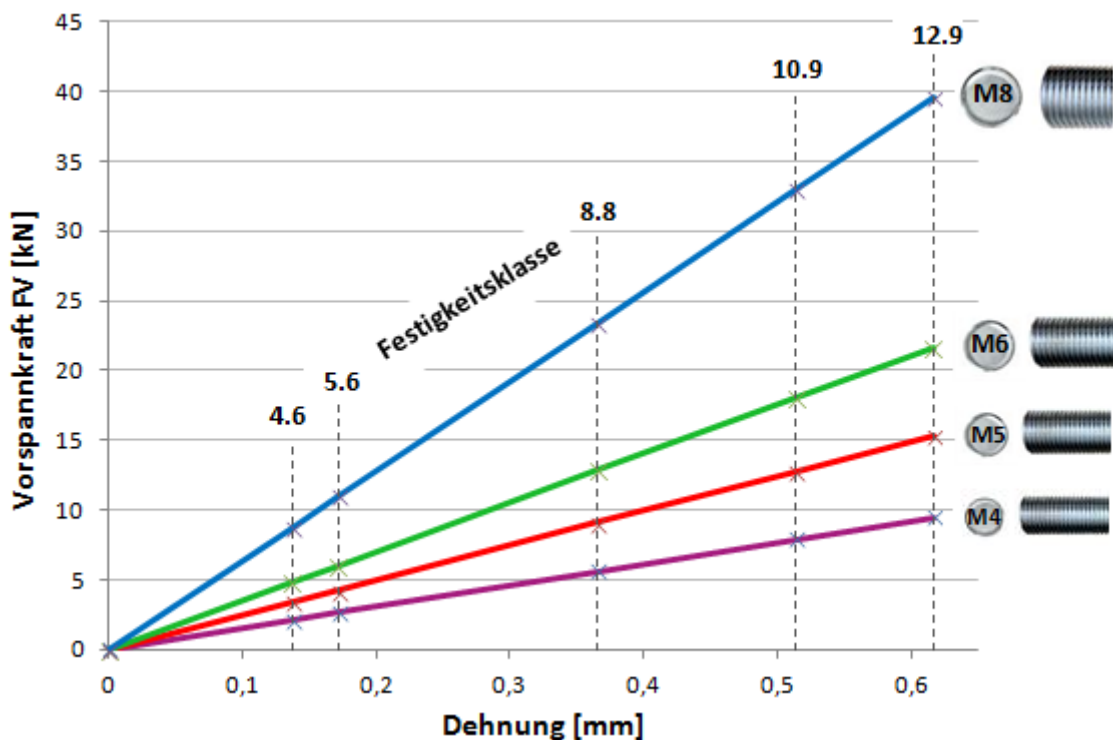


Abbildung 7-4 Elastische Dehnung von metrischen Schrauben mit einer Länge von 140mm

### 7.1.2 Einsatz von Tellerfedern

#### *Use of Disc Springs*

Mit Hilfe von Tellerfedern wird versucht, die Kunststoffprobe über eine bestimmte Zeit mit einer möglichst gleichbleibenden Kraft zu belasten. In Abbildung 7-5 ist die Anordnung der Tellerfedern im Modellversuch zu erkennen.

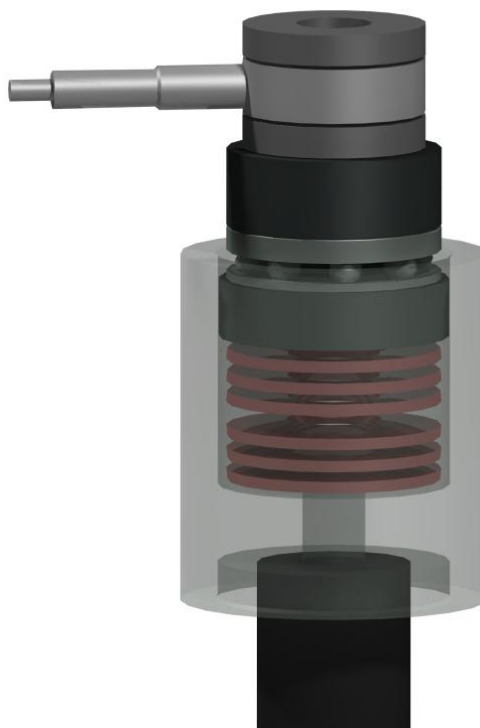
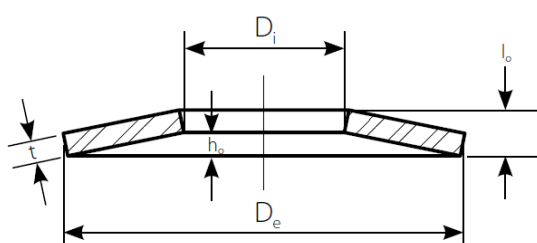


Abbildung 7-5 Anordnung der Tellerfedern

Abbildung 7-6 zeigt die Bemaßungen der eingesetzten Tellerfedern:



$D_e$	28,00	mm
$D_i$	12,20	mm
$t$	1,50	mm
$l_o$	2,25	mm
$h_o$	0,75	mm

Abbildung 7-6 Abmaße der verwendeten Tellerfedern

Wie in Abbildung 7-7 zu erkennen ist, können mehrere Tellerfedern gleicher Bauart geschichtet werden.

- Bei wechselsinniger Anordnung der Tellerfeder addiert sich mit gleichbleibender Kraft  $F$  der Federweg  $s$ .
- Die Federkraft  $F$  addiert sich bei gleichsinniger Anordnung und konstantem Federweg  $s$

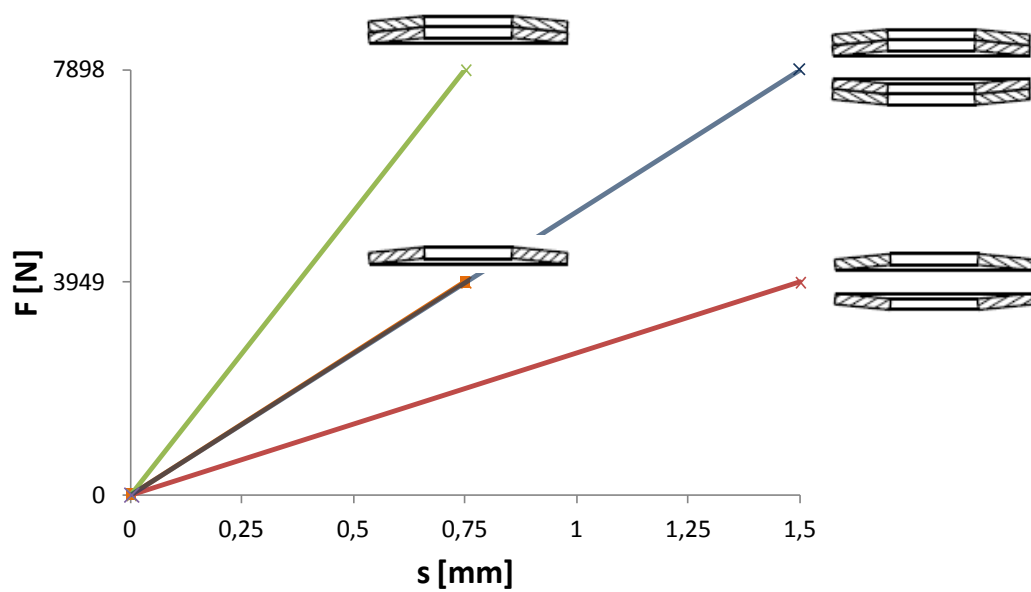


Abbildung 7-7 Mögliche Anordnung der Tellerfedern (Kraft über Weg)

## 7.2 Druckversuch *Pressure Test*

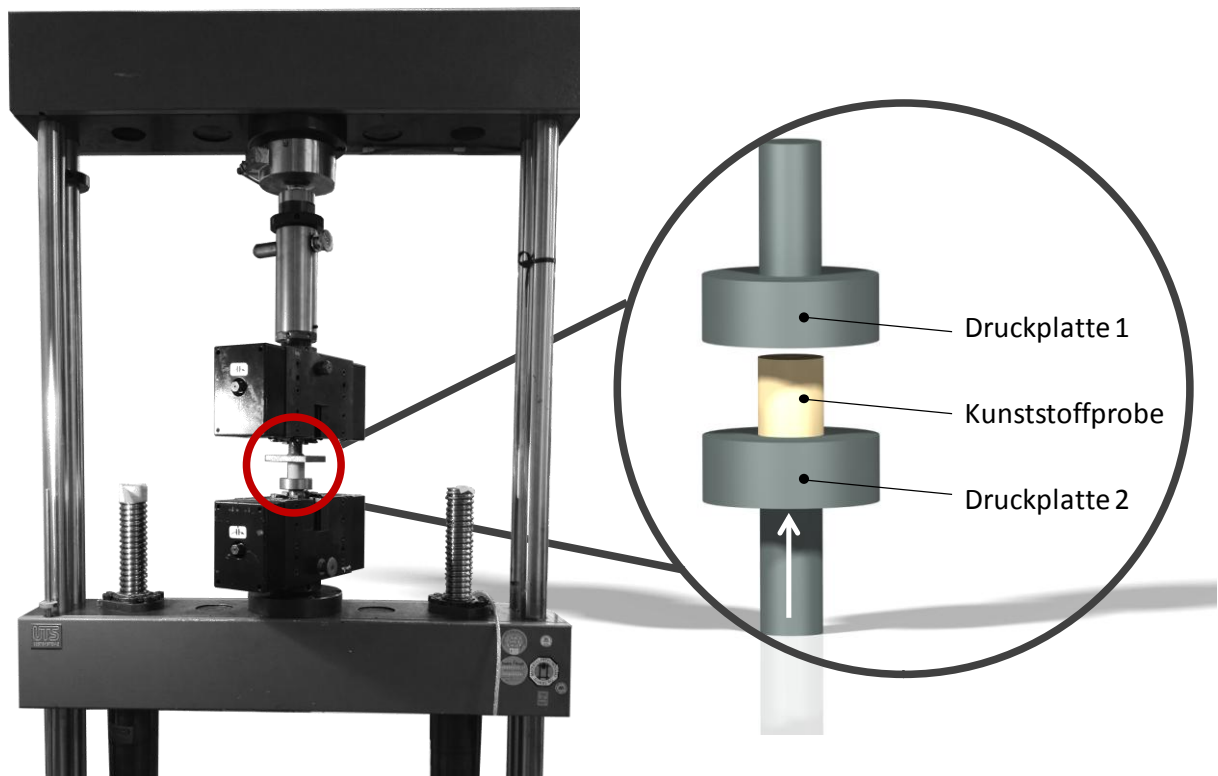


Abbildung 7-8 Aufbau des Druckversuchs

Die Druckversuche werden im Labor für Werkstoffkunde an der HAW Hamburg durchgeführt. Es können einachsige Druckspannungen bis zu 100 kN eingestellt werden. Mit Hilfe der Traversen ist eine Wegänderung der Druckplatte 2 möglich. In Abbildung 7-8 ist der Aufbau des Druckversuchs mit der untersuchten Kunststoffprobe aus PP zu erkennen. Tabelle 7-2 zeigt die Übersicht der durchgeführten Versuche.

Tabelle 7-2 Übersicht der durchgeführten Druckversuche

Nr.	Dauer	Material	Abmessungen	Art des Versuchs	Vorschub	Sollwert
VD-1	5 min.	PP-GF30	30 x 20,84 x 8,15	konst. Vorschub	0,08 mm/s	25 mm
VD-2	5 min.	PP	29,92 x 30,7 x 8,15	konst. Vorschub	0,08 mm/s	25 mm
VD-3	3 h	PP-GF30	30 x 20,84	konst. Kraft	0,5 kN / s	20 kN



### 7.3 Starre Verbindung *Rigid Connection*

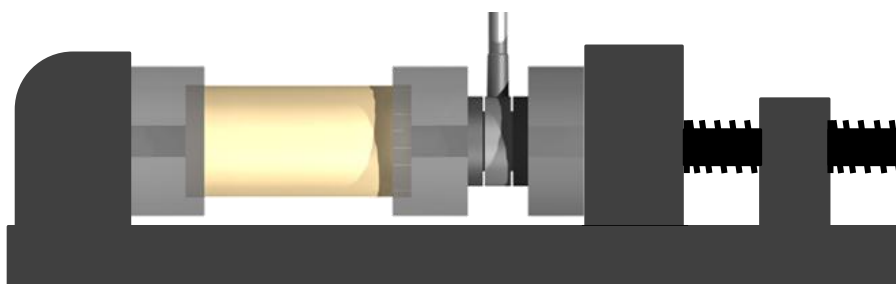


Abbildung 7-9 Starre Verbindung im Schraubstock

Mit Hilfe dieser Versuchsreihe soll die Relaxation des Kunststoffes näher untersucht werden. Dafür werden die Proben in einen Schraubstock eingespannt um eine definierte Längenänderung zu erzielen. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich das Spannfutter des Schraubstocks nicht verformt. Abbildung 7-9 zeigt den Versuchsaufbau.

Die nachstehende Tabelle zeigt eine Übersicht der durchgeführten Versuche.

Tabelle 7-3 Übersicht der durchgeführten Versuche mit starrer Einspannung

Nr.	Dauer	Dauer des Anziehens	Werkstoff	Abmessungen der Proben	Kraft F [kN]	Nachziehen
<b>VC-1</b>	90 min	stufenweise	PP	60 x 30,7 x 8,15	Var.	nein
<b>VC-2</b>	1 Tag	6 s	PP-GF30	60,03 x 20,84 x 8,15	14	nein
<b>VC-3</b>	1,5 T	1 s	PP-GF30	29,92 x 20,85 x 8,15	16	nein
<b>VC-4</b>	20 min.	1 s	PP-GF30	30,1 x 20,85 x 8,15	17	nein
<b>VC-5</b>	20 min.	1 s	PP-GF30	30 x 20,85 x 8,15	25	nein
<b>VC-6</b>	20 min.	1 s	PP-GF30	40 x 20,85 x 8,15	17	nein
<b>VC-7</b>	20 min.	1 s	PP-GF30	50 x 20,85 x 8,15	16	nein
<b>VC-8</b>	20 min.	45 s	PP-GF30	50 x 20,85 x 8,15	17	nein
<b>VC-9</b>	20 min.	2 s	PP-GF30	49,95 x 20,85 x 8,15	17	ja
<b>VC-10</b>	20 min.	2 s	PP-GF30	19,98 x 20,85 x 8,15	15	nein
<b>VC-11</b>	3 Tage	1,5 s	PP-GF30	19,98 x 20,85 x 8,15	22	nein
<b>VC-12</b>	20 min.	2 s	PP-GF30	60 x 20,84 x 8,15	17	nein

## 7.4 Direktverschraubung

### *Self-Tapping Screw Connections*

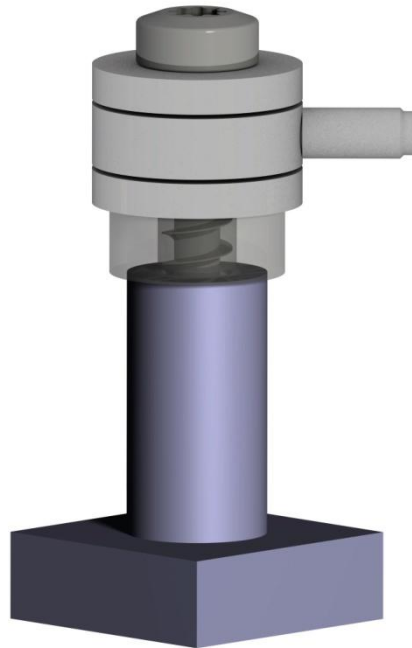


Abbildung 7-10 Darstellung der Direktverschraubungen [4]

Die Anordnung der Versuche zu Direktverschraubungen ist in Abbildung 7-10 dargestellt. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche zeigt Tabelle 7-4.

Tabelle 7-4 Übersicht der durchgeführten Versuche zu Direktverschraubungen

Nr.	Dauer	Material	$d_K$ [mm]	$l_E$ [mm]	$M_A$ [Nm]	$n_E$ [1/min]	$n_A$ [1/min]	Nach- ziehen
<b>VB-1</b>	12 Tage	PP-GF 30	6,96	26,96	12	150	30	Ja
<b>VB-2</b>	12 Tage	PP-GF 20	6,86	26,96	12	150	5	Ja
<b>VB-3</b>	20 min.	PP-GF 20	6,87	26,96	12	500	5	nein
<b>VB-4</b>	20 min.	PP-GF 20	6,84	26,96	12	500	5	ja
<b>VB-5</b>	20 min.	PP-GF 20	6,86	26,96	12	500	400	nein
<b>VB-6</b>	20 min.	PP-GF 20	6,86	26,96	12	30	5	nein
<b>VB-7</b>	20 min.	PP-GF 20	6,83	26,96	12	1000	5	nein

## **8 Ergebnisse und Ableitungen** *Results and Deductions*

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen dargestellt und Schlussfolgerungen über die mögliche Beeinflussung der Vorspannkraftabnahme über die Zeit gezogen. Außerdem werden Erkenntnisse über das mechanische Werkstoffverhalten und die Verformung von Kunststoffen unter bestimmten Belastungen gewonnen. Weitere Auswertungen werden in einer Kurzfassung in den Protokollen zu den Versuchen dokumentiert.

### **8.1 Druckversuch** *Pressure Test*

Zwei unterschiedliche Arten von Druckversuchen sollen Aufschluss über das Verformungsverhalten von Kunststoffen aus PP und PP-GF 30 geben. Im ersten Versuch wird je eine Kunststoffprobe bis zum Versagen belastet. Anschließend wird eine Probe aus PP-GF 30 für 3 Stunden einer konstanten Last von 20 kN unterzogen. Mit Hilfe einer Messuhr ist die Dokumentation der zeitlichen Verformung der Kunststoffe möglich

#### **8.1.1 Belastung bis zum Versagen** *Failure under Compression Force*

Bei einem Vorschub von 0,08 m/s ergeben sich die Spannungsverläufe aus Abbildung 8-1 mit den Kunststoffproben: PP und PP-GF30. Die Zeitliche Verformung der Kunststoffe wird mit einer Kamera festgehalten und ist in Abbildung 8-2 dargestellt.

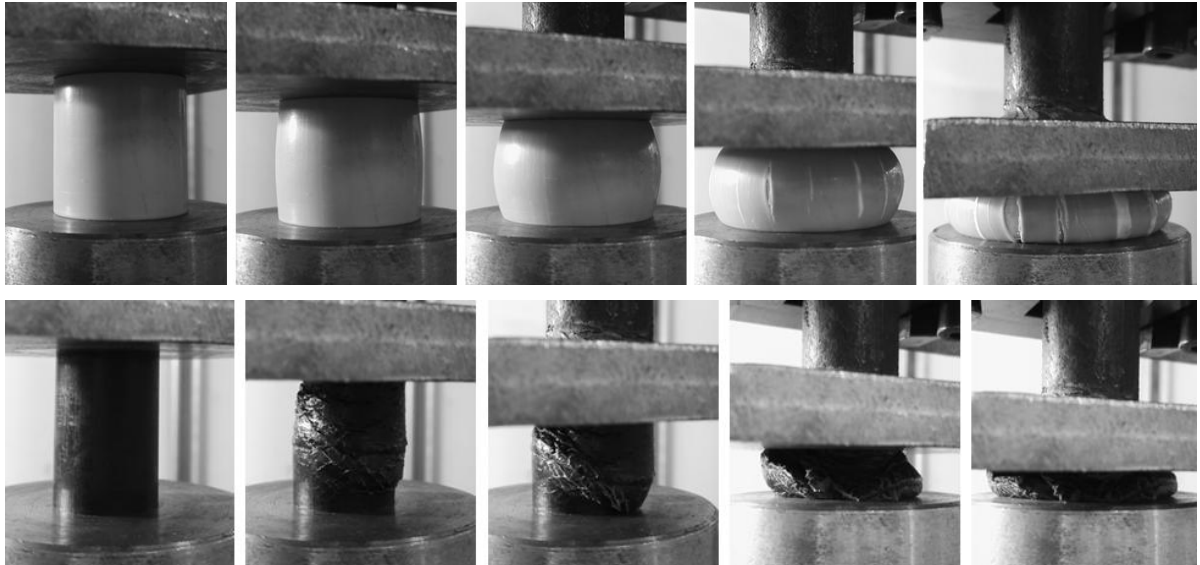


Abbildung 8-1 Verformung der Kunststoffproben aus PP und PP-GF 30

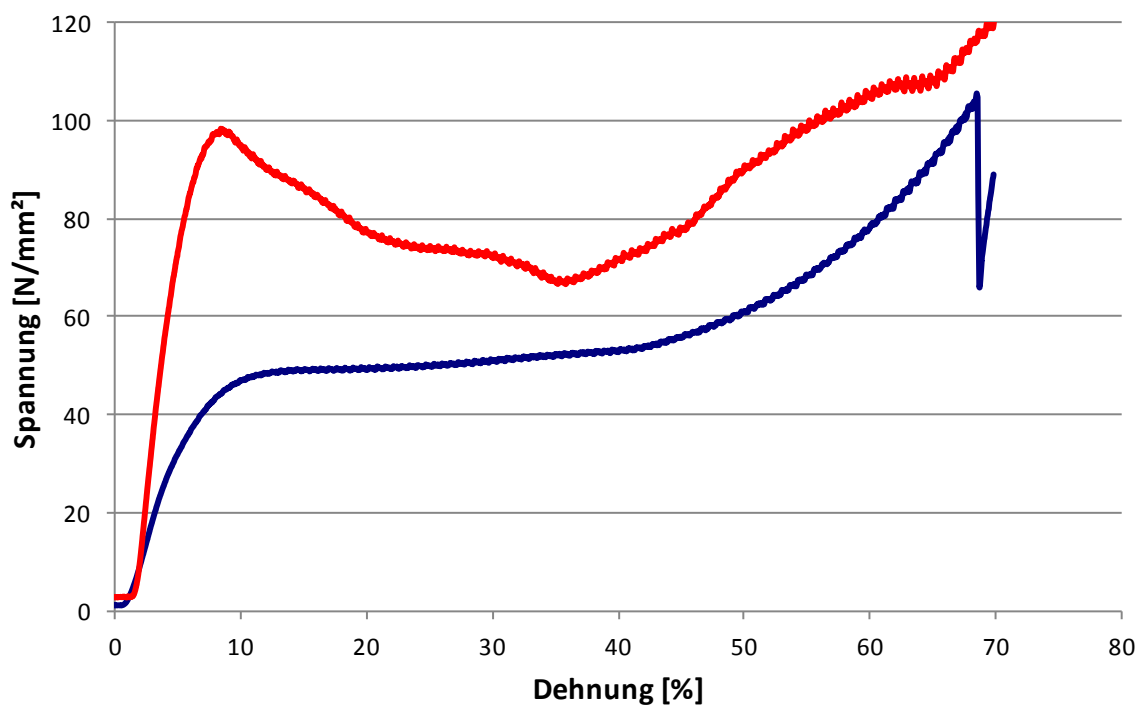


Abbildung 8-2 Spannungsverlauf von PP und PP-GF 30 bis zum Versagen

Bei der Betrachtung der Kunststoffproben aus PP nach Entlastung ist eine elastische Rückverformung zu erkennen. Ein Versagen der Probe findet später als bei PP-GF 30 statt und deutet sich durch die Rissbildung ab.

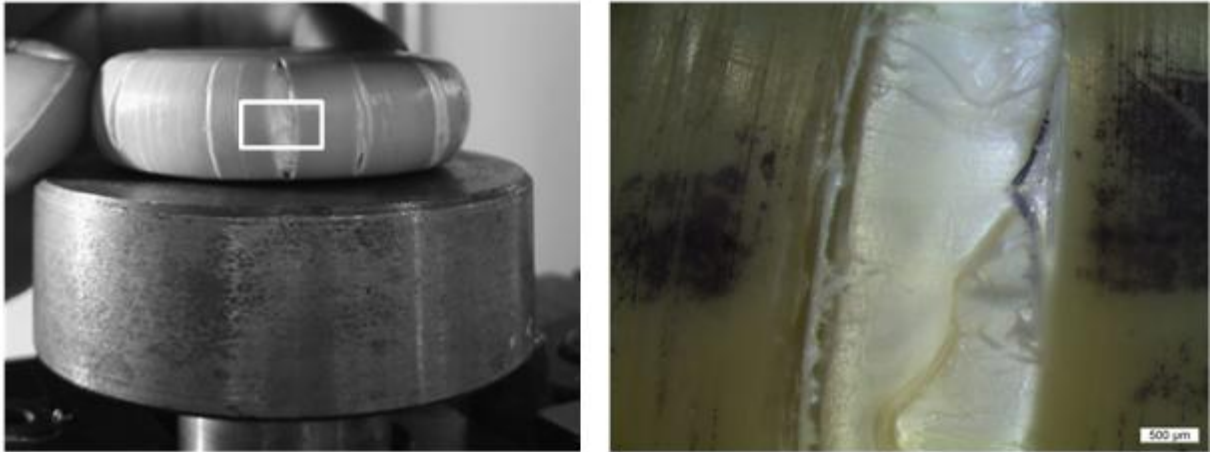


Abbildung 8-3 Ansicht der zerstörten Probe PP-GF 30 unter dem Mikroskop (500  $\mu\text{m}$ )

Bei näherer Betrachtung der Kunststoffprobe aus PP-GF 30 ist zu erkennen, dass nach Entlastung keine Rückverformung zu erkennen ist.



Abbildung 8-2 Ansicht der zerstörten Probe PP-GF 30 unter dem Mikroskop (500  $\mu\text{m}$ )

### 8.1.2 Verformungsverhalten von PP-GF 30 unter konstantem Druck

#### *Deformation Behaviour of PP-GF 30 under Constant Pressure*

Bei einer konstanten Belastung der Kunststoffprobe aus PP-GF 30 mit einer Kraft von 20 kN (58,97 N/mm<sup>2</sup>) ergibt sich eine bleibende Verformung von 0,26 mm. Bezogen auf die Ausgangslänge der Probe von 30 mm entspricht dies einer Stauchung von 0,87 %. Die Kraft wurde mit einer Geschwindigkeit von 0,8 kN/s bis auf den Sollwert von 20 kN gefahren. In diesem Bereich nimmt ergibt sich bei der Verformung ein linearer Verlauf. Bezogen auf das Burger-Modell kann dieser Bereich als die elastische Verformung  $\varepsilon_0$  angesehen werden. Mit fortschreitender Zeit findet eine weitere

Stauchung des Kunststoffes statt in die visko-elastisch reversiblen  $\epsilon_{rev}$  und bleibenden Verformungen  $\epsilon_v$  auftreten.

Wird davon ausgegangen, dass die Verformung der Probe im linear-elastischen Bereich stattfindet, können mithilfe des Burger-Modells folgende Werte für die Verformungsanteile ermittelt werden:

Für die spontan elastische Verformung  $\epsilon_0$  ergibt sich ein Wert von 0,63 mm (2,13 %)

Die viskoelastische Verformung  $\epsilon_{rev}$  beträgt 0,12 mm (0,41%)

Die bleibende viskose Verformung liegt bei 0,25 mm (0,92 %)

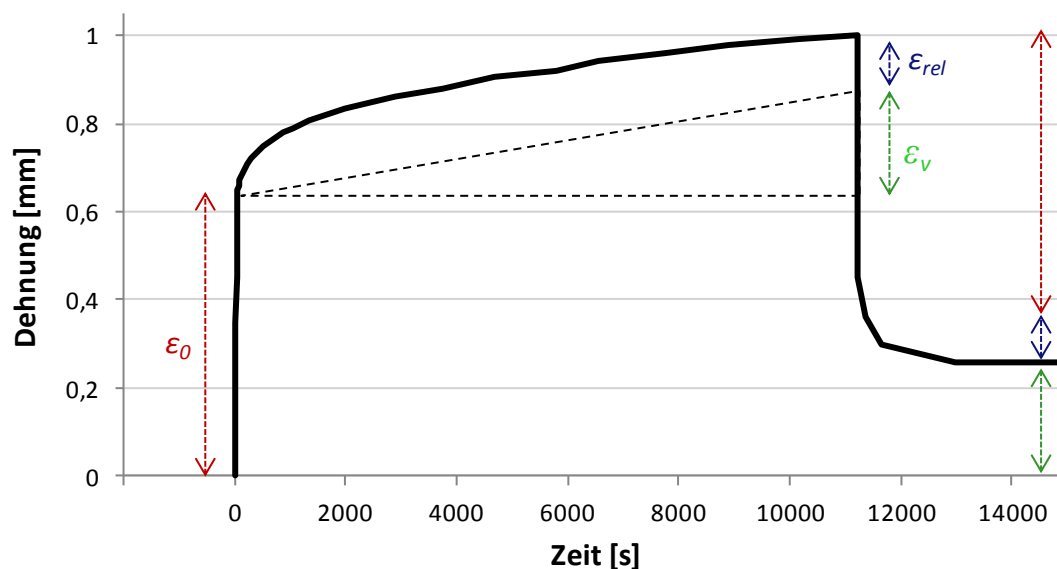


Abbildung 8-4 Verformungsverhalten von PP-GF 30 bei 20 kN

Erkenntnisse:

- Verformungsverhalten ähnelt dem Burger Modell
- Bereits während des Druckaufbaus von 0,8 kN / s sind alle drei Verformungsanteile vorhanden, werden hier jedoch vernachlässigt.

Ausblick:

- Besser wäre ein Versuchsaufbau mit konstanter Last (Gewicht) über längeren Zeitraum mit Lastaufbringung innerhalb von wenigen Sekunden.

## 8.2 Modellversuche

### *Pilot Projects*

Abbildung 8-5 zeigt einen Vergleich der Vorspannkraftverläufe der Versuche VA 11, VA 12 und VA 14. Es ist deutlich zu erkennen, dass die verbleibende Restvorspannkraft bei Einsatz einer metrischen Schraube M5 x 240 am höchsten ist.

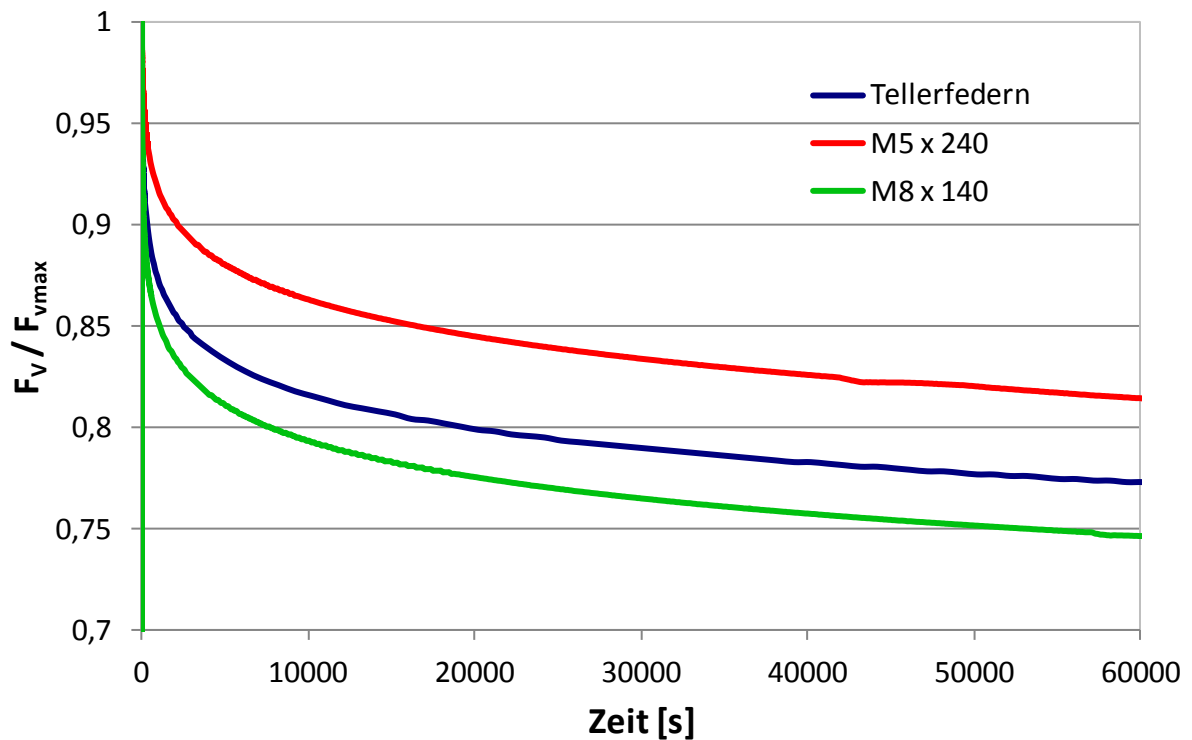


Abbildung 8-5 Vergleich: Tellerfeder, Schraube M5x240 und Schraube M8x140

Die Ergebnisse der bleibenden Verformung (%) nach 10 Minuten, 1 Stunde und 10 Stunden sind in Tabelle 8-1 aufgeführt und grafisch in Abbildung 8-6 dargestellt.

Tabelle 8-1 Darstellung der Ergebnisse aus den Modellversuchen

Versuche	F <sub>vmax</sub> [kN]	F <sub>vmax</sub> [%]	FV <sub>10 min</sub> /F <sub>vmax</sub> [%]	FV <sub>1h</sub> /F <sub>vmax</sub> [%]	FV <sub>10h</sub> /F <sub>vmax</sub> [%]
<b>VA 11: Tellerfedern</b>	13,16	100	88,83	84,35	78,57
<b>VA 12: M5 x 240</b>	11,56	100	93,08	88,84	82,89
<b>VA 14: M8 x 140</b>	12,87	100	86,48	81,97	76,01

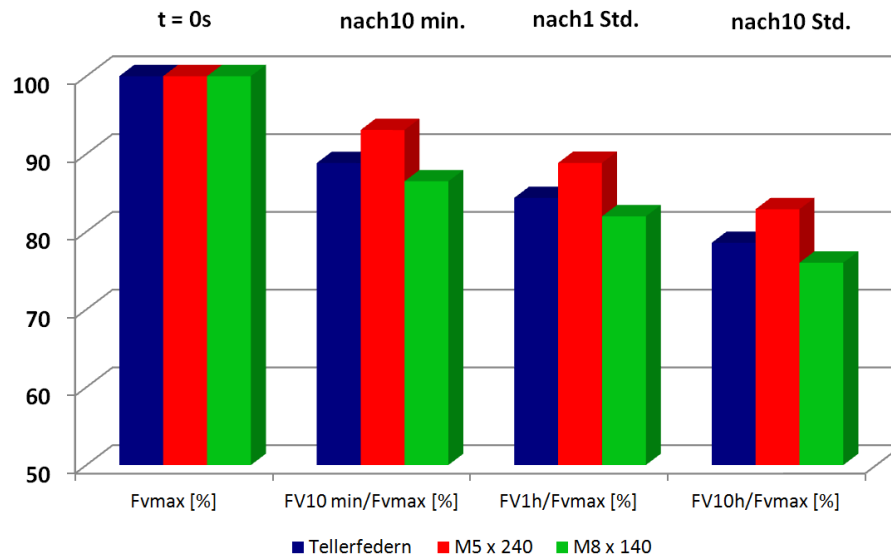


Abbildung 8-6 relative Restvorspannkraft nach 10 min., 1Std. und 10Std.

### 8.3 Starre Verbindung *Rigid Connection*

Abbildung 8-7 zeigt einen Vergleich der Versuche VC7, VC8 und VC9. Die Kunststoffproben, die in der Belastungsart- und Geschwindigkeit variieren. „Normale Belastung“ heißt in diesem Fall ein Anziehen des Schraubstocks innerhalb von 2 Sekunden. Das „langsame Anziehen“ erfolgt in einer Zeitspanne von 45 Sekunden und hat einen geringeren Vorspannkraftverlust zur Folge. Der geringste Vorspannkraftverlust wird mit 2-maligem Nachziehen der Kunststoffprobe erreicht.

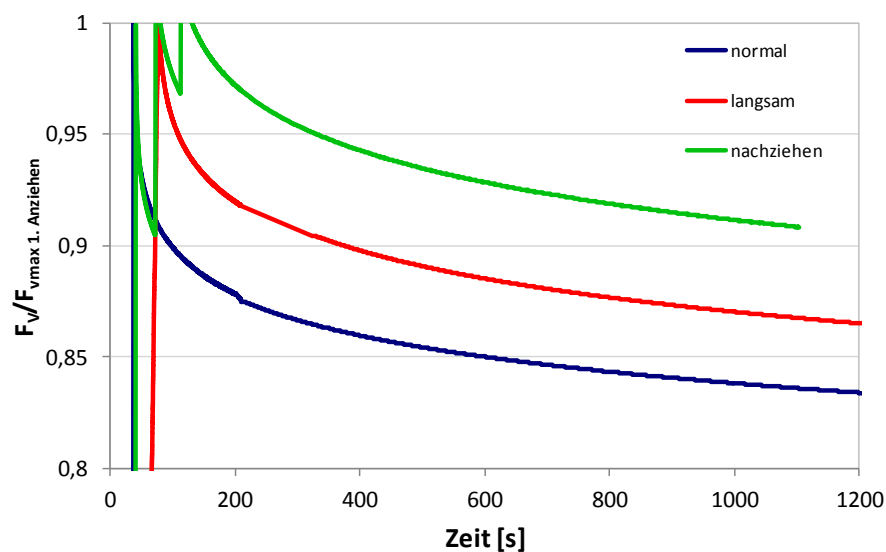


Abbildung 8-7 Vergleich bei unterschiedlichen Belastungsarten



## 8.4 Kunststoffdirektverschraubung

### *Self-Tapping Screw Connection in Plastics*

Ein Langzeitversuch mit einer Probe aus PP GF 30 über 13 Tage mit Einfluss des Nachziehens der Schraubenverbindung nach 120 Sekunden, 240 Sekunden und 5 Tagen ist in Abbildung 8-8 dargestellt. Die Abbildung zeigt, welchen Einfluss ein Nachziehen auf den Vorspannkraftverlauf hat. Das Abfallen der Vorspannkraft direkt nach dem Anziehen wird durch gezieltes Nachziehen positiv beeinflusst.

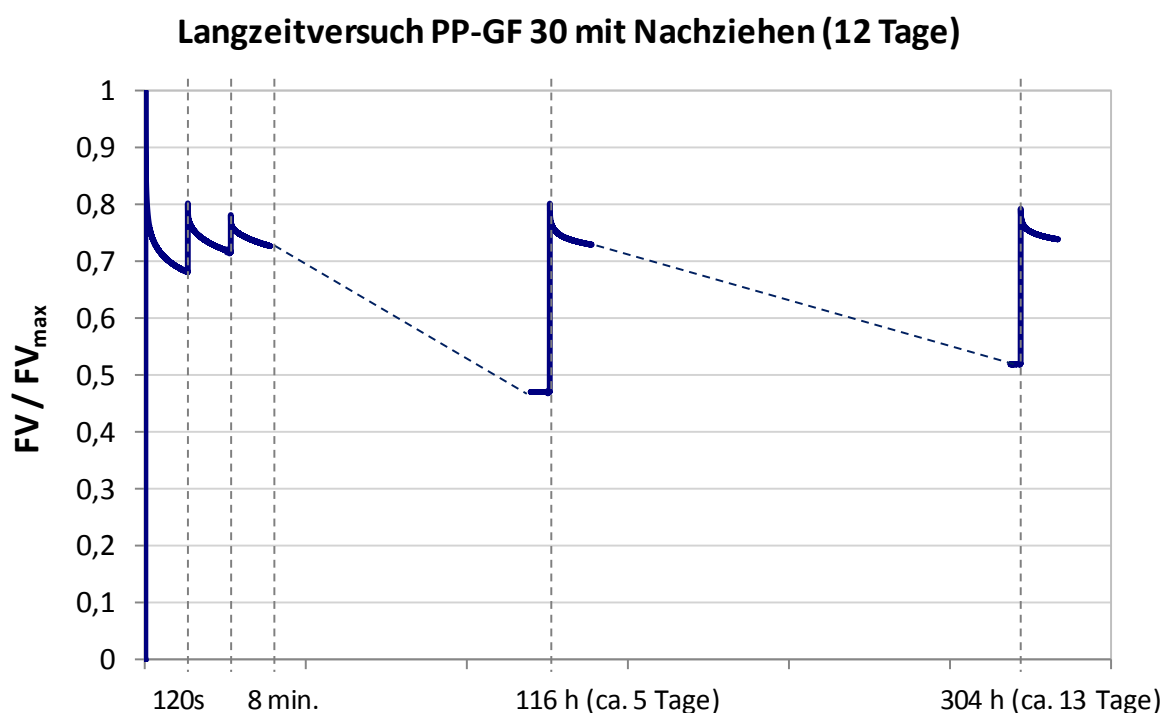


Abbildung 8-8 Langzeitversuch mit Nachziehen in PP-GF 30

Montageschritt	Bleibende Vorspannkraft
1. Anziehen auf 100 %	Bleibende Vorspannkraft nach <b>120 s</b> : 68,5 %
1. Nachziehen auf 80 %	Bleibende Vorspannkraft nach <b>120 s</b> : 71,5 %
2. Nachziehen auf 78,5 %	Bleibende Vorspannkraft nach <b>120 s</b> : 73 % Bleibende Vorspannkraft nach <b>116 h</b> : 47,5 %
3. Nachziehen auf 80,8 %	Bleibende Vorspannkraft nach <b>7 Tagen</b> : 52 %
4. Nachziehen auf 80 %	Bleibende Vorspannkraft nach <b>120 s</b> : 74,5 %

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

### *Conclusion and Outlook*

Konstrukteure haben die Wahl zwischen verschiedenen Arten von Schraubverbindungen.

Metrische Schraubverbindungen besitzen hervorragende tribologische Eigenschaften. Auftretende Reibung zwischen Schraubenkopf und Bauteil, sowie Reibung im Gewinde, haben großen Einfluss auf die Vorspannkraft und sind daher die wichtigsten Kenngrößen.

Direktverschraubungen unterliegen aufgrund des komplexen Einschraubvorgangs einer Reihe von Einflussfaktoren:

- Bei Direktverschraubungen in Leichtmetall ist der Durchmesser ein wichtiger Einflussparameter. Die spanlose Fertigung des Durchmessers ist zwar möglich, allerdings würde die Fertigungsqualität bei einem gebohrten Kernloch aufgrund der geringeren Fertigungsabweichungen deutlich besser ausfallen.
- Bei Direktverschraubungen in Kunststoffbauteilen hat die Relaxation den größten Einfluss auf die Vorspannkraft der Schraubenverbindung. Bereits 2 Sekunden nach dem Anziehen der Schraube fällt die Vorspannkraft um einen Wert zwischen 16 % - 26 %.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Direktverschraubungen für den Konstruktionsprozess sehr zu empfehlen sind. Allerdings basieren die Auslegungen einer Direktverschraubung auf empirischen Daten, daher sind weitere analytische und experimentelle Untersuchungen empfehlenswert.

Mit dem entwickelten Modellversuch aus Kapitel 7.1 können Relaxationsversuche durchgeführt werden. Durch Einsatz eines Axiallagers lassen sich die Einflüsse der Unterkopfreibung auf ein Minimum reduzieren. Die Wahl verschiedener Schrauben oder der Einsatz von Tellerfedern, bieten Möglichkeiten den Vorspannkraftverlauf zu beeinflussen. Großer Vorteil des Modellversuchs ist die kostengünstige Beschaffung und Herstellung der Probenkörper.

Im Anhang befinden sich alle Versuchsprotokolle der durchgeführten Versuche mit einer kurzen Ergebnisübersicht. Diese können für weitere Auswertungen verwendet werden.

Die ersten Ergebnisse des Druckversuchs zeigen das Verformungsverhalten der beiden Kunststoffe PP und PP-GF 30 bis zum Versagen.

Das Verformungsverhalten von PP-GF 30 unter einer konstanten Kraft von 20 kN, ähnelt dem Burger-Modell. Die Verformungsanteile konnten unter Annahme einer linear-viskoelastischer Verformung bestimmt werden. Leider können Versuche mit konstanter Druckbelastung nur in einem gewissen zeitlichen Rahmen durchgeführt werden.

Die Entwicklung einer konstanten Druckvorrichtung (Gewicht / Hebelarm) ist ein Vorschlag für weitere Forschungsarbeiten an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften.

Generell ist für alle weiteren experimentellen Untersuchungen an dem Verschraubungsprüfstand der Hochschule für Angewandte Wissenschaften zu empfehlen, alle Versuche detailliert zu protokollieren.

Ein Beispiel eines solchen Protokolls ist in Anhang A zu finden.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Wünsche, T.; Meyer-Eschenbach, A.; Blessing, L.: Analysis of connections and fasteners to determine disassembly and strenght caracteristics. Melbourne 2005.
- [2] Tome, A.: Vorspannkraftrelaxation von Kunststoff-Direktverschraubungen, Dissertation. Erlangen 2000.
- [3] Egger, P.: Vorspannkraftverhalten von gewindeformenden Schrauben des Typ "TAPTITE 2000". Hamburg 2016.
- [4] Mahn, D.: Konstruktive und prozesstechnische Einflussgrößen bei Direktverschraubungen, Masterarbeit. Hamburg 2013.
- [5] Schreiner, I.: Experimentelle Untersuchung zur Vorspannkraft an Kunststoff-Direktverschraubungen. Hamburg 2015.
- [6] Bronstein, K.: Analyse und experimentelle Untersuchung von Direktverschraubungen in Kunststoffen, Masterarbeit. Hamburg 2016.
- [7] Mayer, E.: Analyse und experimentelle Untersuchung von Direktverschraubungen in Leichtmetallen, Masterthesis. Hamburg 2016.
- [8] Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T. (Hrsg.): Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. Berlin, Heidelberg 2012.
- [9] Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung, 5. Aufl. Berlin 2015.
- [10] N.N.: Internationale Stahlmärkte. URL: [www.stahl-online.de](http://www.stahl-online.de).
- [11] Baur, E.; Brinkmann, S.; Osswald, T. A.; Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 31., [komplett überarb., aktualisierte] Auflage. München 2013.
- [12] Bonten, C.: Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen, 1. Aufl. s.l. 2014.

- 
- [13] Consultic: Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 (2016). Abrufdatum 13.11.2016.
- [14] Schwarz, O.; Ebeling, F. W.; Richter, F.: Kunststoffkunde. Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere, 10., überarbeitete Auflage 2016.
- [15] Thienel, K.-C.: Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens. München 2011.
- [16] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2007.
- [17] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen, 4. Aufl. München 2008.
- [18] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften, 2. völlig überarb. Aufl. München, Wien 2006.
- [19] Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, 4., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden 2012.
- [20] Ehrenstein, G. W.: Polymer-Werkstoffe. Struktur - Eigenschaften - Anwendung, 3. Aufl. München 2011.
- [21] Dallner, C.; Ehrenstein, G. W.: Thermische Einsatzgrenzen von Kunststoffen. Teil I: Kriechverhalten unter statischer Belastung. In: Kunststofftechnik 03 (2006).
- [22] Ranz, T.: Elementare Materialmodelle der Linearen Viskoelastizität im Zeitbereich (2007) 5/07.
- [23] VDI 2230 Blatt 1. Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen : Zylindrische Einschraubenverbindungen = VDI 2230 Part 1. Berlin 2015.
- [24] Czichos, H.; Habig, K.-H. (Hrsg.): Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden 2015.
- [25] Kloos, K.-H.; Thomala, W.; Wiegand, H.: Schraubenverbindungen. Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung, 5. Aufl. Berlin 2007.

- 
- [26] Meyer-Eschenbach, A.; Allermann, S.: Important parameters for self-tapping screw connections. In: The Japan Society of Mechanical Engineers (2016).
- [27] Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Achtzehnte Auflage. Berlin, Heidelberg 1995.
- [28] Potente, H.: Fügen von Kunststoffen. Grundlagen, Verfahren, Anwendung ; mit 31 Tabellen. München 2004.
- [29] Ehrenstein, G. W.: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. München 2004.
- [30] Ehrenstein, G. W.; Ahlers-Hestermann, G. (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. München 2004.
- [31] Semblex: DELTA PT New Thin Thread Technology for Thermoplastics 2016.
- [32] Dratschmidt, F.: Zur Verbindungstechnik von glasfaserverstärktem Polyamid. Schrauben und Gewindeeinsätze, Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 1999. Erlangen-Nürnberg 2000.
- [33] Yao, Y.: Polymerwerkstoff-Direktverschraubung: Einsatz von Experiment und Simulation zur Analyse des Vorspannkraftverlaufs, Dissertation. Kaiserslautern 2011.
- [34] SFS intec AG: REMFORM II Die optimale Schraubengeometrie für ihre Kunststoffanwendung. Produktbroschüre (2015). Abrufdatum 19.11.2016.
- [35] Meyer-Eschenbach, A.; Schreiner, I.: Vorspannkraft in Kunststoffdirektverschraubungen. Hamburg 2015.
- [36] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, 3., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden 2010.
- [37] Ensinger: Technische Kunststoffe - Das Handbuch (2012). URL: [www.ensinger-online.com](http://www.ensinger-online.com).
- [38] Abts, G.: Kunststoff-Wissen für Einsteiger, 2., aktualisierte Aufl. München 2014.
- [39] Wälzlager. [Katalog]. Schweinfurt 2014.

## **A. Anhang: Versuchsprotokolle**

## A 1 Versuchsprotokolle der Modellversuche





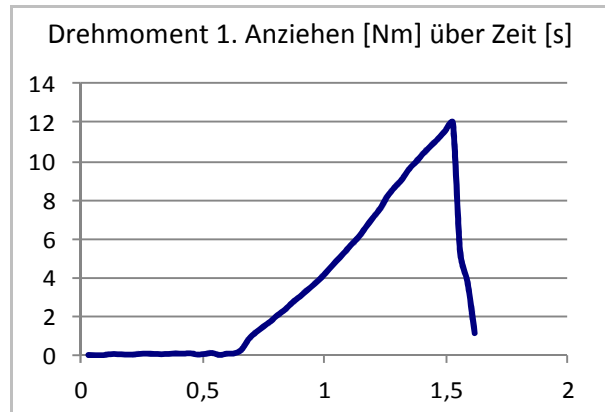
## Modellversuch: VA 1

Material	PP
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	150 $\text{min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	30 $\text{min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	°C
Axiallager	nein



## Modellversuch

Schraube	M8 x 140
Festigkeitsklasse	4.6
Außendurchmesser Probe $d_A$	30,64 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	59,8 mm
Obere Fläche $A_p$	685 $\text{mm}^2$
Volumen Probe $V_p$	40935 $\text{mm}^3$
Klemmlänge $l_k$	100 mm

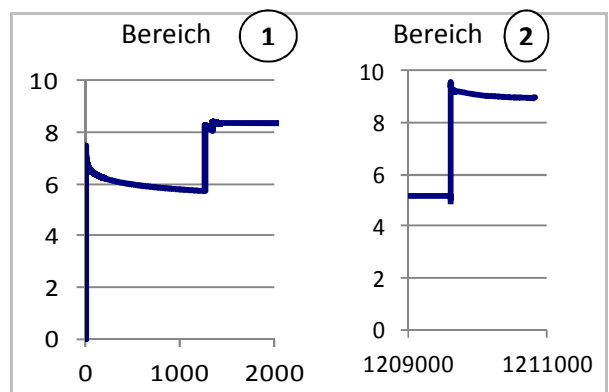
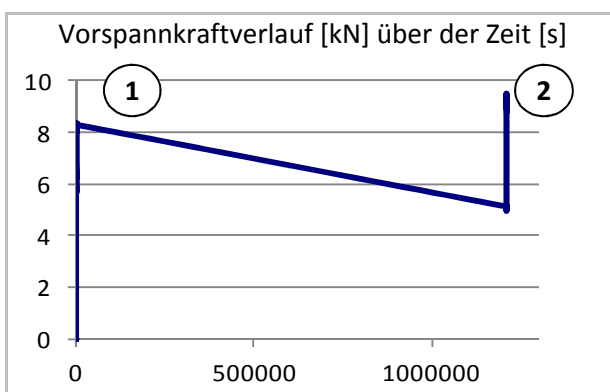


## Anmerkungen:

4-maliges Anziehen: 1. Nachziehen nach 1250s; 2. Nachziehen nach 1350s; 3. Nachziehen nach 1210000s

## Ergebnisübersicht:

Vorspannkraft 1. Anziehen	7,47 kN	max. Verformung	59,34 mm
Maximale Spannung	10,91 Mpa	bleibende Verformung	59,79 mm



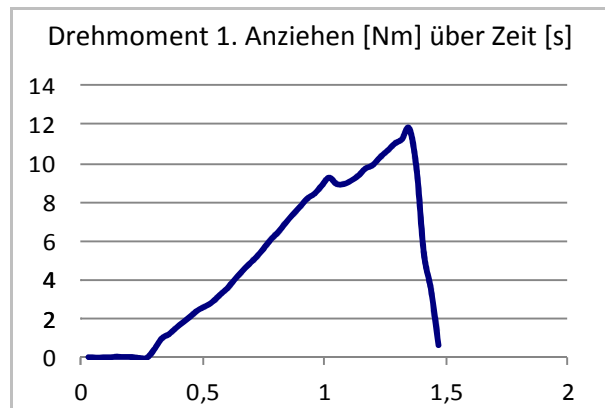
## Modellversuch: VA 2

Material	PP
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	150 min <sup>-1</sup>
Anziedrehzahl $n_A$	30 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	24 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

Schraube	M8 x 140
Festigkeitsklasse	4.6
Außendurchmesser Probe $d_A$	30,64 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	59,7 mm
Obere Fläche $A_p$	685 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	40866 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	100 mm

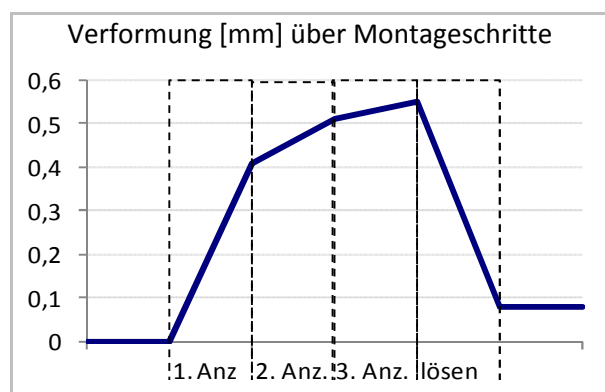
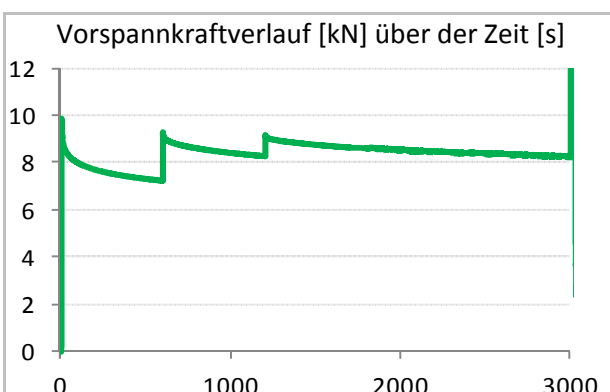


## Anmerkungen:

6 maliges Anziehen: Nachziehen nach 600s, 1200s, 1800s, 2400s, 3000s (20Nm) Überdrehen

## Ergebnisübersicht:

Vorspannkraft 1. Anziehen	9,88 kN	max. Verformung	59,13 mm
Maximale Spannung	14,43 Mpa	bleibende Verformung	59,61 mm



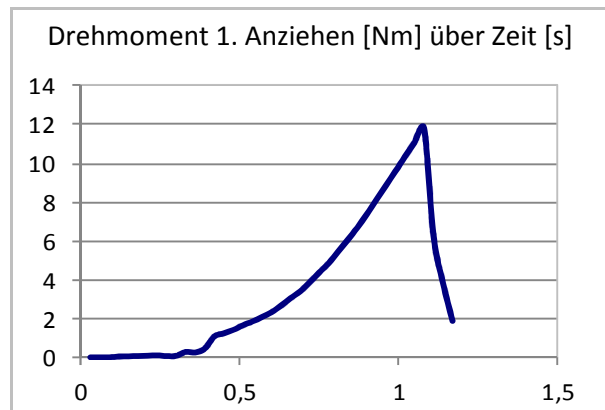
## Modellversuch: VA 3

Material	PP
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	150 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	30 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	23,5 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	30,74 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	29,8 mm
Obere Fläche $A_p$	689 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	20543 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	70 mm

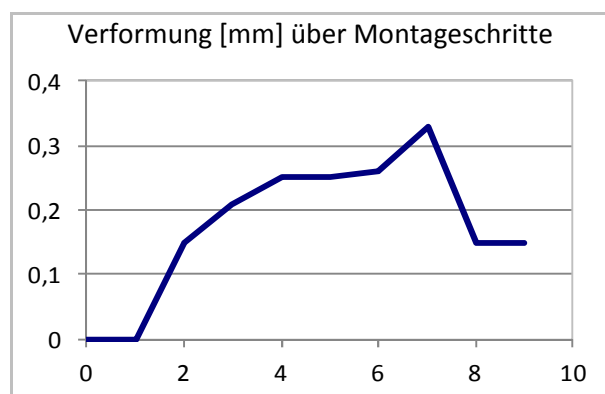
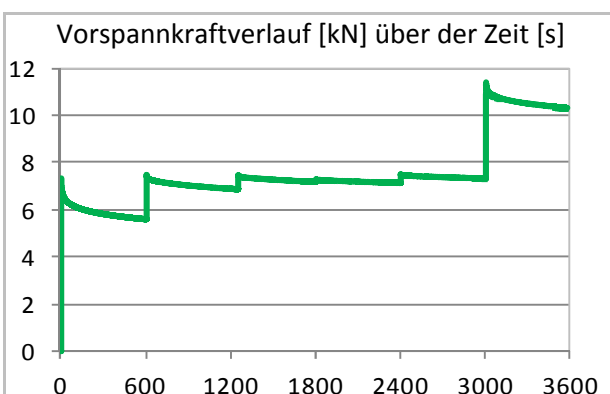


## Anmerkungen:

6 maliges Anziehen: Nachziehen nach 600s, 1200s, 1800s, 2400s, 3000s (18Nm)

## Ergebnisübersicht:

Vorspannkraft 1. Anziehen	7,32 kN	max. Verformung	29,55 mm
Maximale Spannung	10,62 Mpa	bleibende Verformung	29,73 mm



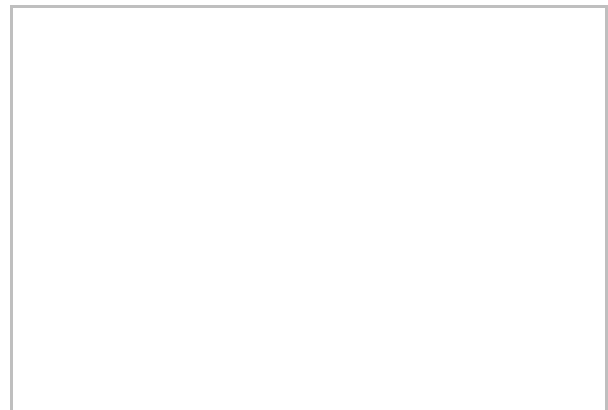
## Modellversuch: VA 4

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	20 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	100 $\text{min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	30 $\text{min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	23,7 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

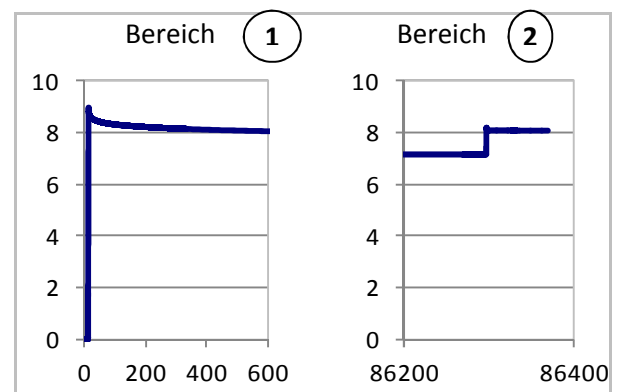
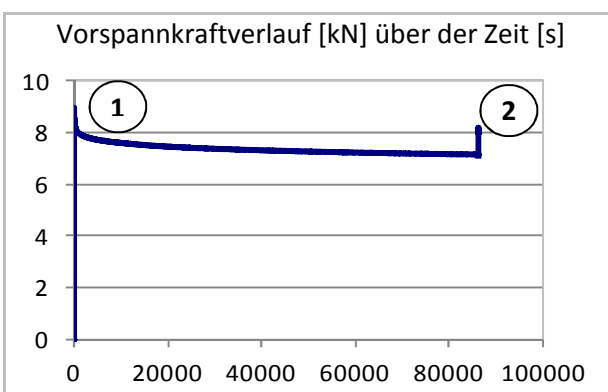
Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 $\text{mm}^2$
Volumen Probe $V_p$	17317 $\text{mm}^3$
Klemmlänge $l_k$	80 mm



## Anmerkungen:

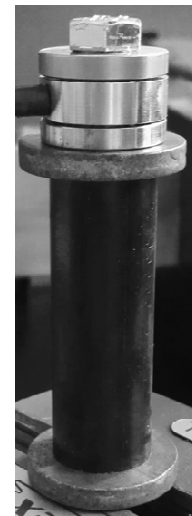
## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	9 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	31,18 Mpa	bleibende Verformung	mm



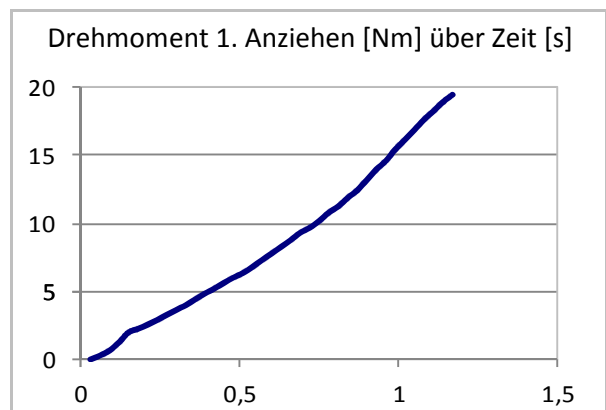
## Modellversuch: VA 5

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	20 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	100 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	30 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	24,1 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

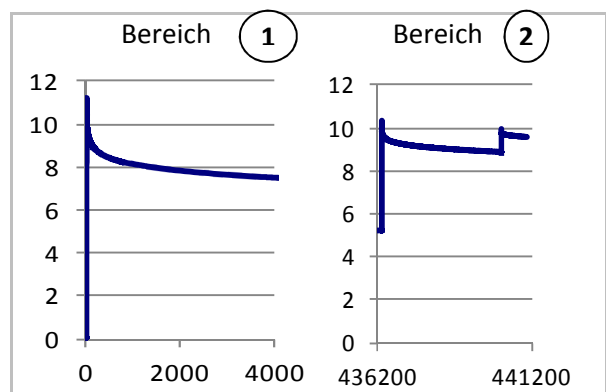
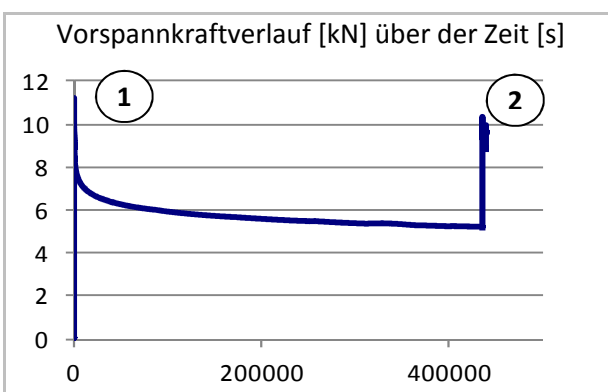
Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60,06 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17335 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	80 mm



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	11,26 kN	max. Verformung	59,56 mm
Maximale Spannung	39,01 Mpa	bleibende Verformung	59,95 mm



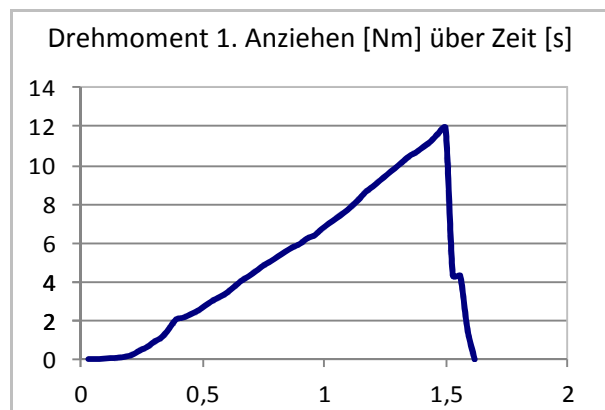
## Modellversuch: VA 6

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	100 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	30 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	23 °C
Axiallager	ja



## Modellversuch

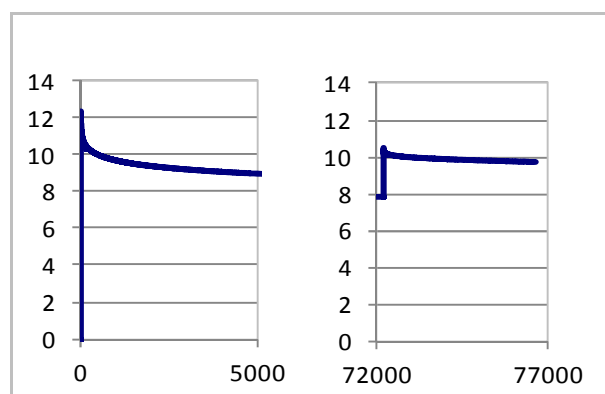
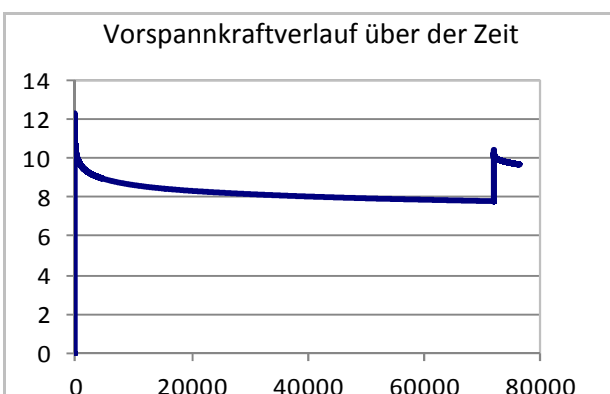
Schraube	M8 x 140
Festigkeitsklasse	4.6
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17317 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	80 mm



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	12,32 kN	max. Verformung	59,3 mm
Maximale Spannung	42,69 Mpa	bleibende Verformung	59,94 mm



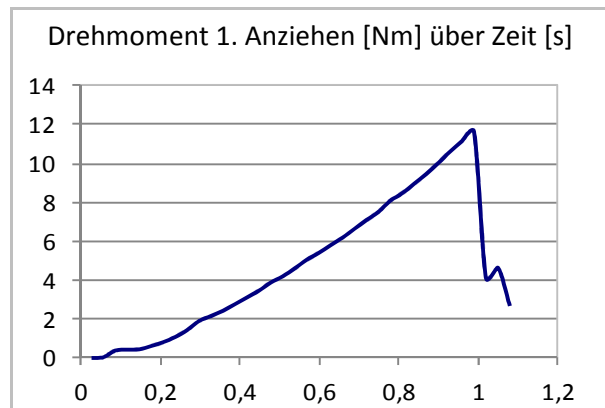
## Modellversuch: VA 7

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	100 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	30 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	23 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

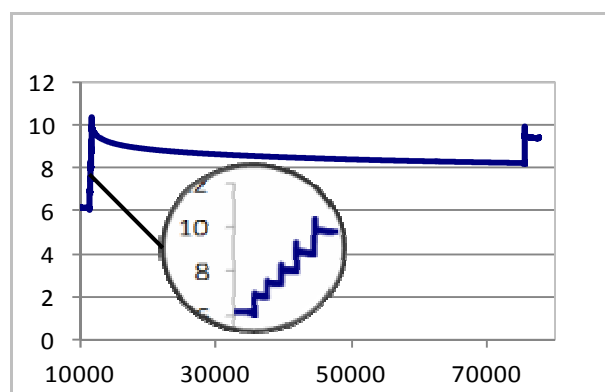
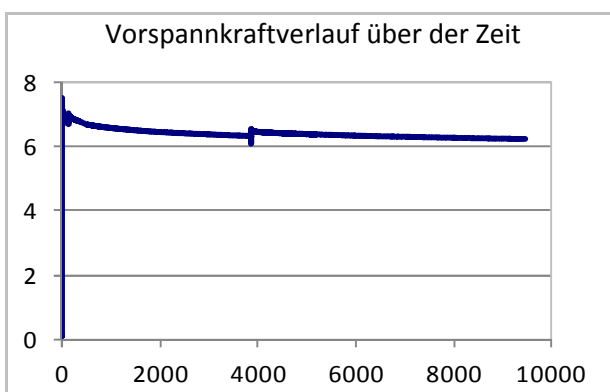
Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17317 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	80 mm



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Vorspannkraft 1. Anziehen	7,49 kN	max. Verformung	59,5 mm
Maximale Spannung	25,95 Mpa	bleibende Verformung	59,97 mm



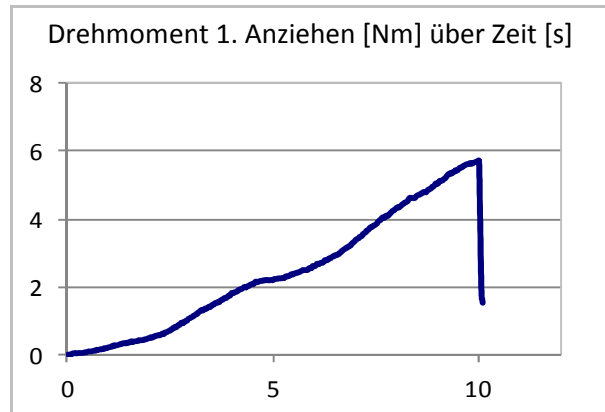
## Modellversuch: VA 8

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	8 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	$5 \text{ min}^{-1}$
Anziedrehzahl $n_A$	$5 \text{ min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	24 °C
Axiallager	ja



## Modellversuch

Schraube	M5 Gewinde
Festigkeitsklasse	0
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17317 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	80 mm

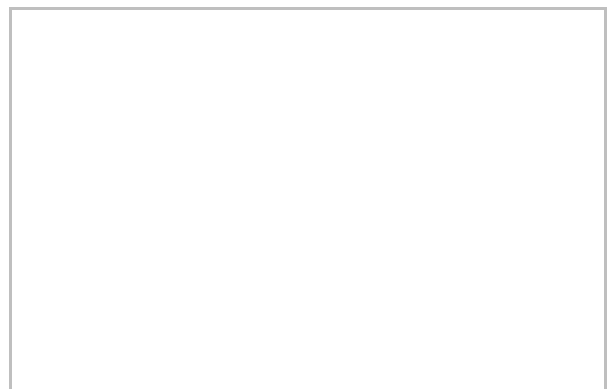
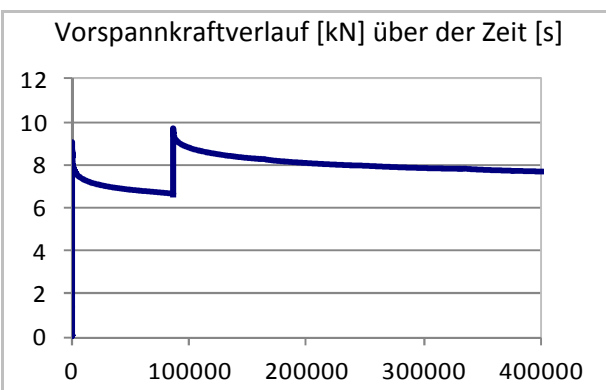


## Anmerkungen:

1. Anziehen nur bis 6 Nm geschafft
2. Anziehen bis 8 Nm

## Ergebnisübersicht:

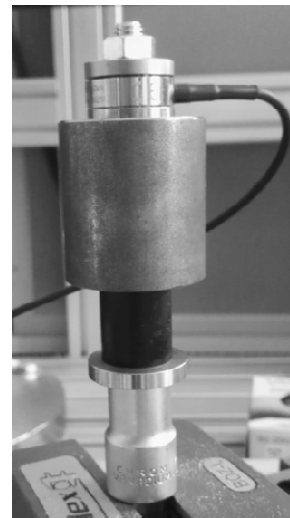
Vorspannkraft 1. Anziehen	9,07 kN	max. Verformung	59,2 mm
Maximale Spannung	31,43 Mpa	bleibende Verformung	59,9 mm





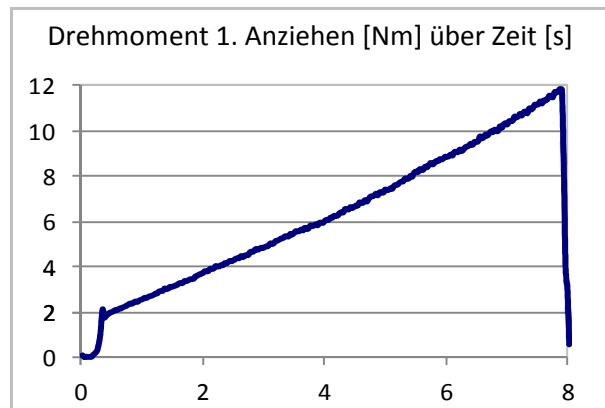
## Modellversuch: VA 9

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	150 min <sup>-1</sup>
Anziedrehzahl $n_A$	5 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	23,8 °C
Axiallager	ja



## Modellversuch

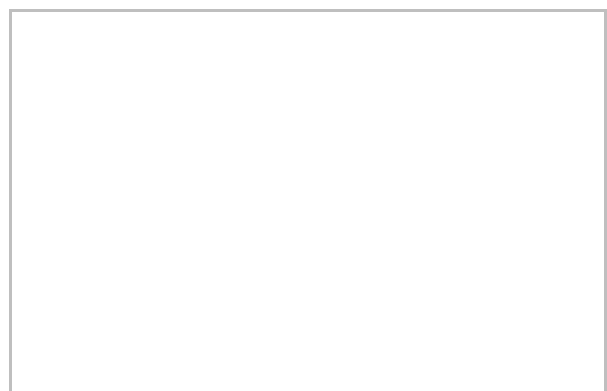
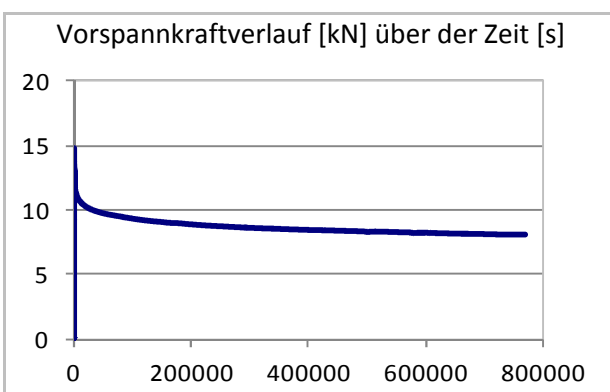
Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	8659 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	90 mm




## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	14,85 kN	max. Verformung	29,7 mm
Maximale Spannung	51,45 Mpa	bleibende Verformung	29,96 mm



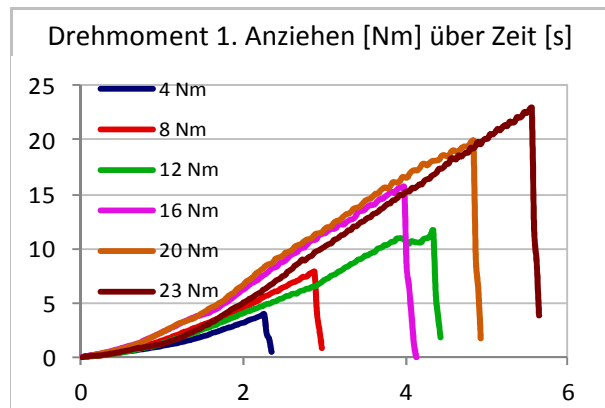
## Modellversuch: VA 10

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	4 8 12 16 20 23 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	5 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	5 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	22,6 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,14 mm
Länge Probe $l_p$	30,1 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	8711 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	80 mm

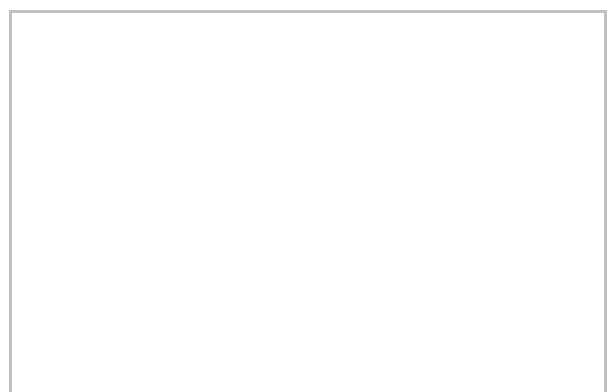
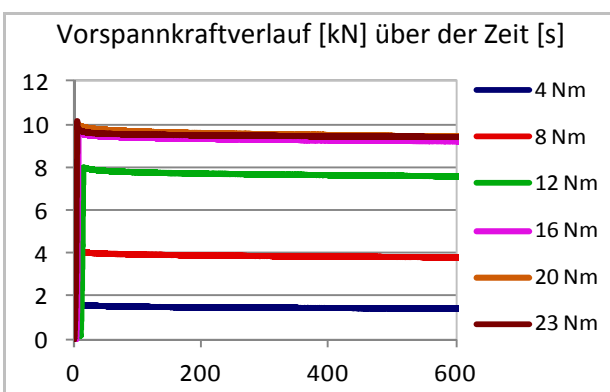


## Anmerkungen:

4 Nm -> 1,79 kN	16 Nm -> 9,68 kN
8 Nm -> 4,41 kN	20 Nm -> 10,06 kN
12 Nm -> 7,94 kN	23 Nm -> 10,17 kN

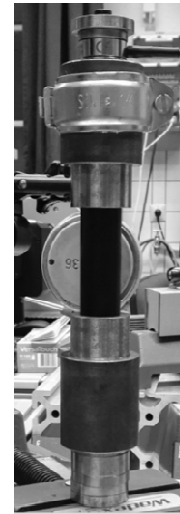
## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	variiert	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	variiert	bleibende Verformung	29,98 mm



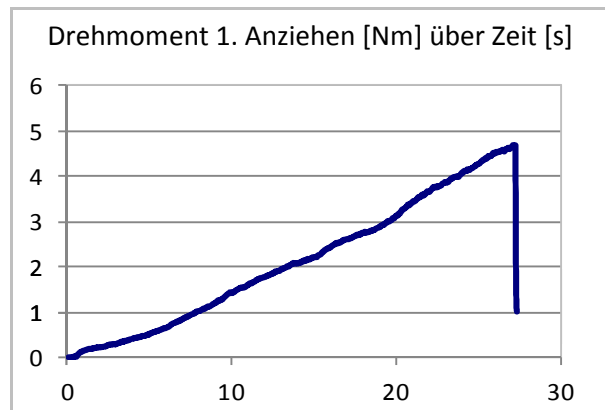
## Modellversuch: VA 11

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	5 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	5 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	22,4 °C
Axiallager	ja



## Modellversuch lange M5 Schraube

Schraube	M5x240
Festigkeitsklasse	12.9
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,84 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	288 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17298 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	228 mm

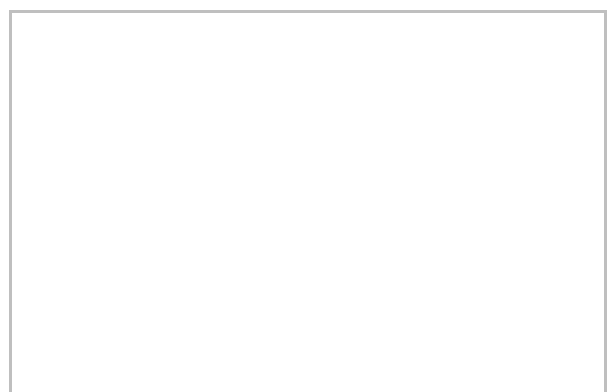
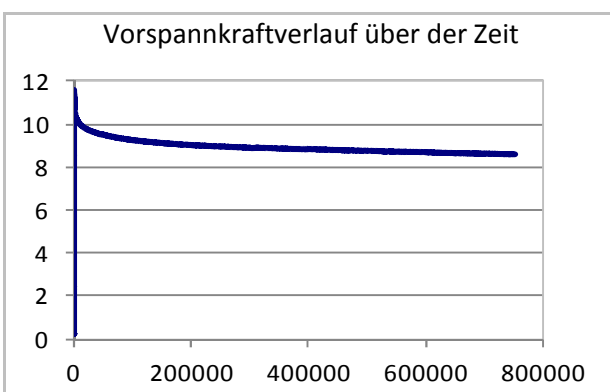


### Anmerkungen:

Schraube war geschmiert, Abbruch des Anziehens bei 12kN und 5Nm

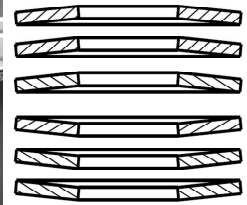
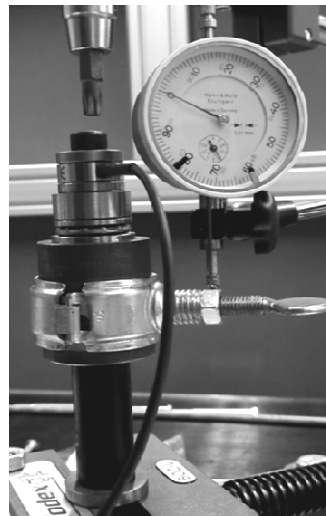
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	11,56 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	40,10 Mpa	bleibende Verformung	59,87 mm



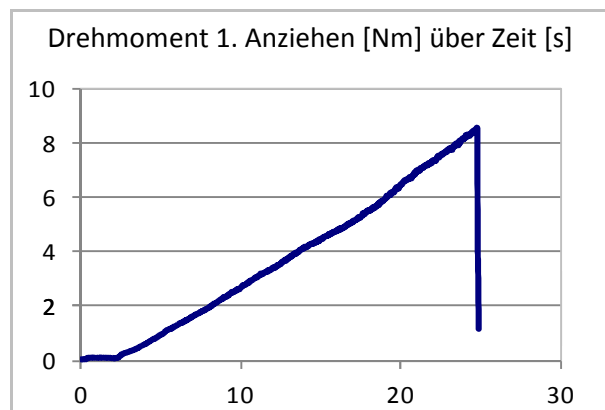
## Modellversuch: VA 12

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	8,53 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	5 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	5 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	22,5 °C
Axiallager	ja



## Modellversuch mit Tellerfedern

Schraube	M8 x 140
Festigkeitsklasse	12.9
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,83 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60,06 mm
Obere Fläche $A_p$	288 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17295 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	130 mm

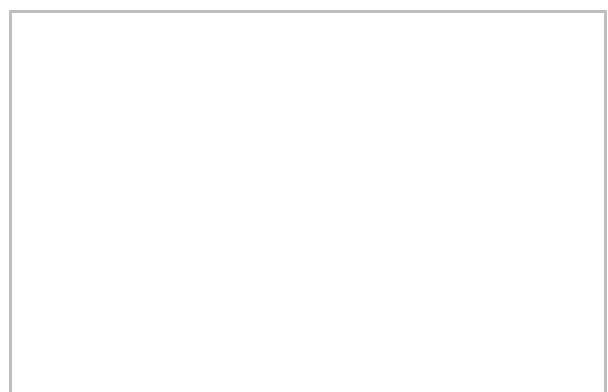
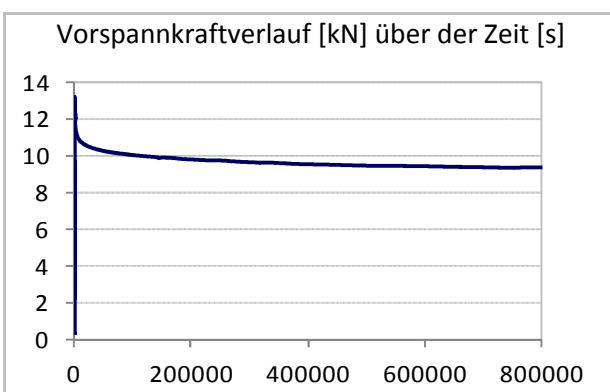


## Anmerkungen:

Einsatz von 6 Tellerfedern, 3 parallel in Reihe

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	13,16 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	45,70 Mpa	bleibende Verformung	59,89 mm



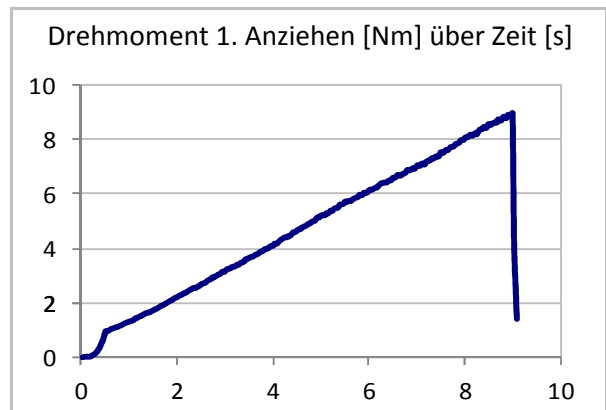
## Modellversuch: VA 13

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	9 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	$5 \text{ min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	$5 \text{ min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	22,8 °C
Axiallager	ja



## Modellversuch

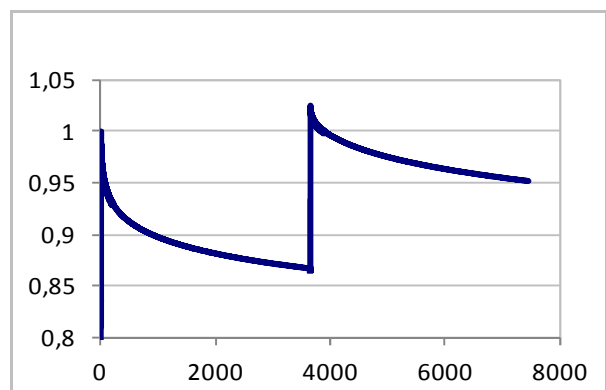
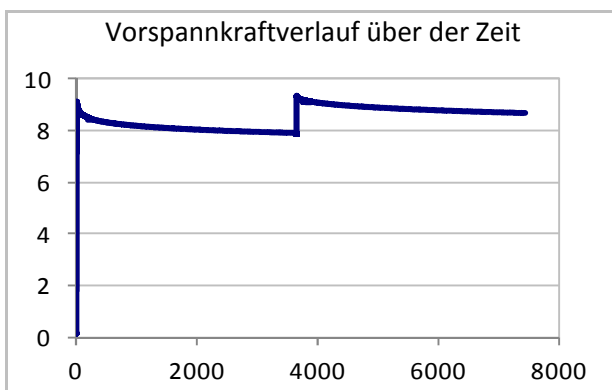
Schraube	M8 x 140
Festigkeitsklasse	12.9
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17317 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	130 mm



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	9,15 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	31,70 Mpa	bleibende Verformung	59,95 mm



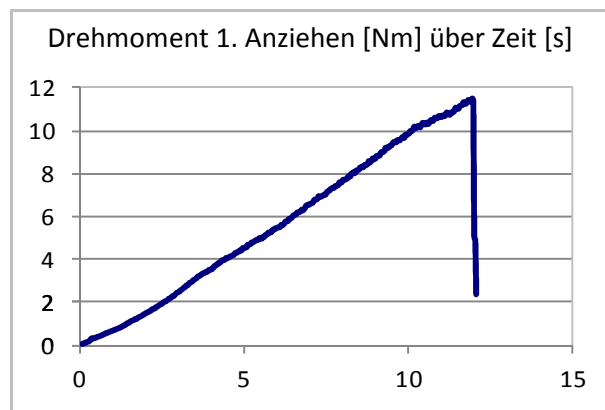
## Modellversuch: VA 14

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	$5 \text{ min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	$5 \text{ min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	22,8 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

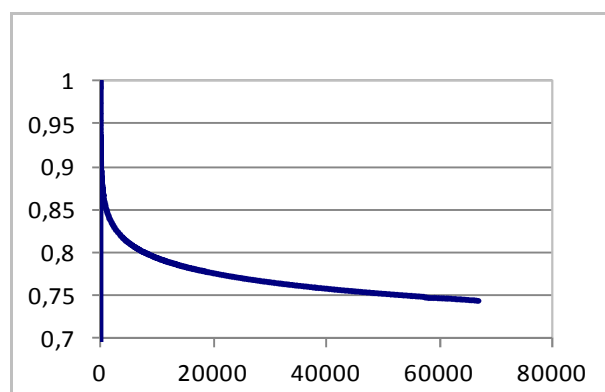
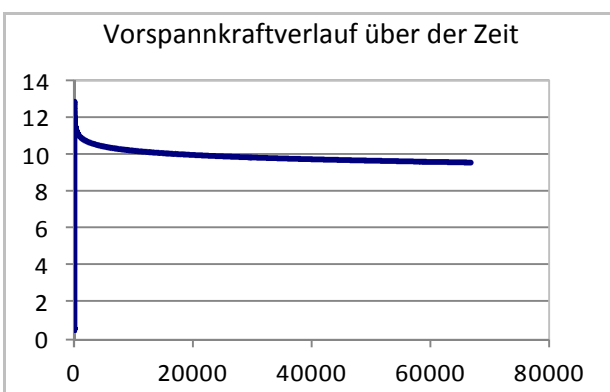
Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17317 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	130 mm



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	12,87 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	44,59 Mpa	bleibende Verformung	59,9 mm



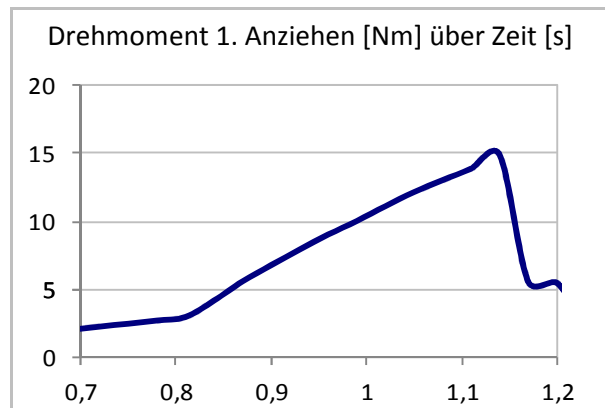
## Modellversuch: VA 15

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	15 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	150 min <sup>-1</sup>
Anziedrehzahl $n_A$	150 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	22,8 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

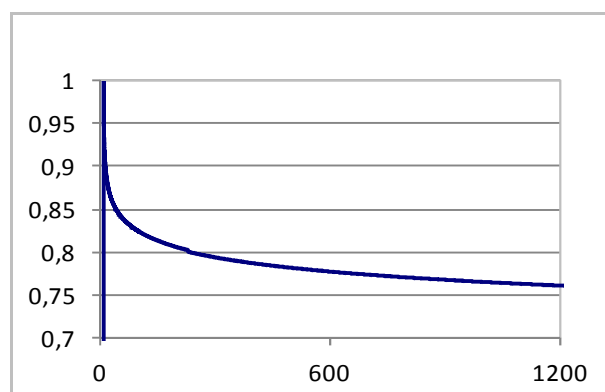
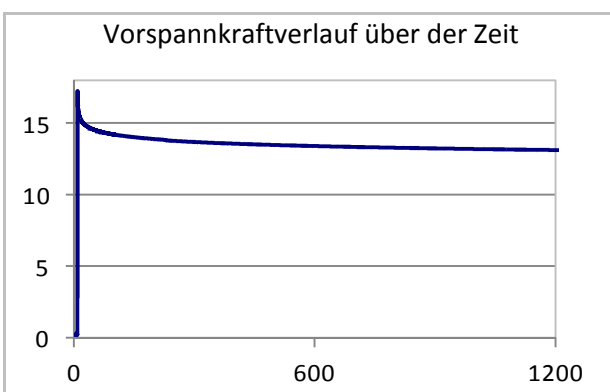
Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17317 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	130 mm



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	17,34 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	60,08 Mpa	bleibende Verformung	59,96 mm



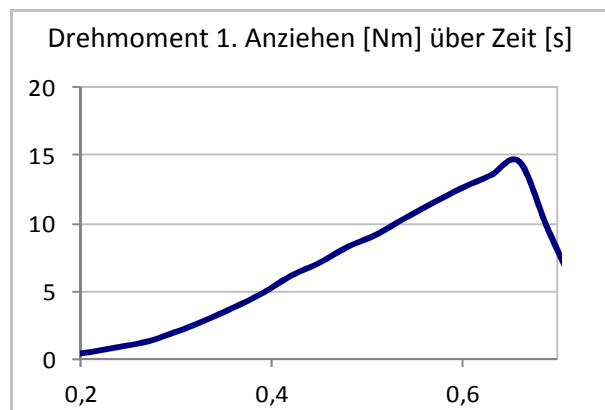
## Modellversuch: VA 16

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	15 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	150 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	150 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	22,8 °C
Axiallager	nein



## Modellversuch

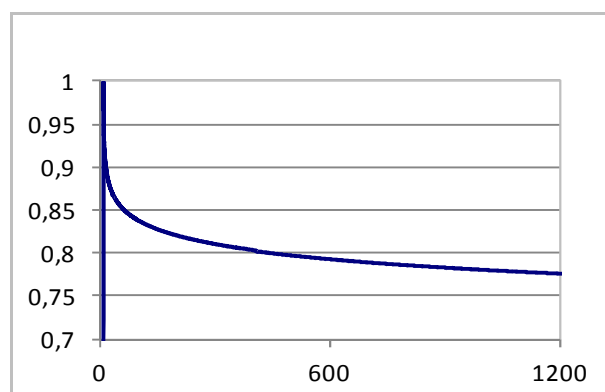
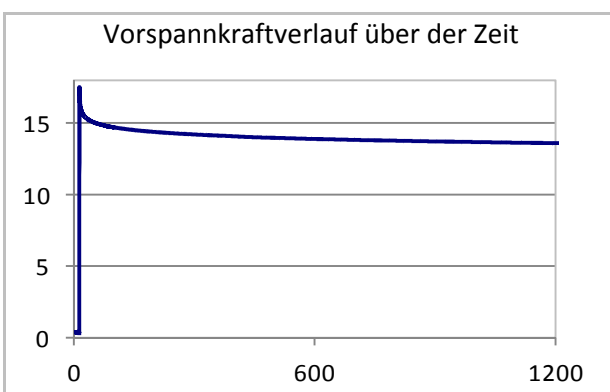
Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	17317 mm <sup>3</sup>
Klemmlänge $l_k$	130 mm



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	9,383 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	32,51 Mpa	bleibende Verformung	59,99 mm





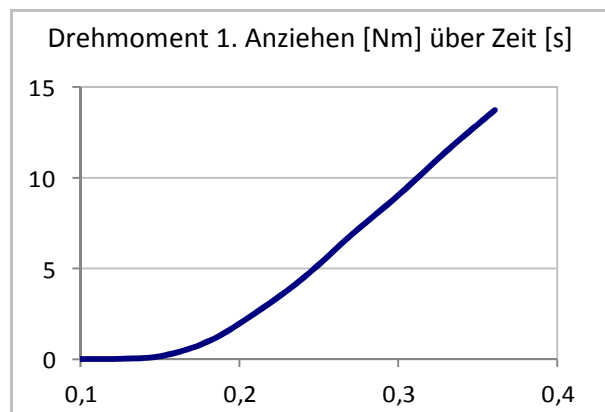
## Modellversuch: VA 17

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	15 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	500 $\text{min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	500 $\text{min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	22,8 °C
Axiallager	nein



### Modellversuch

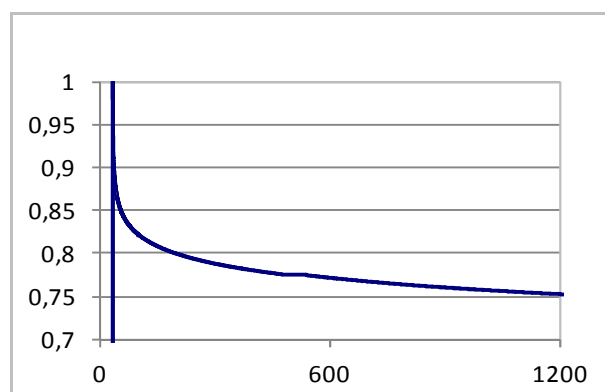
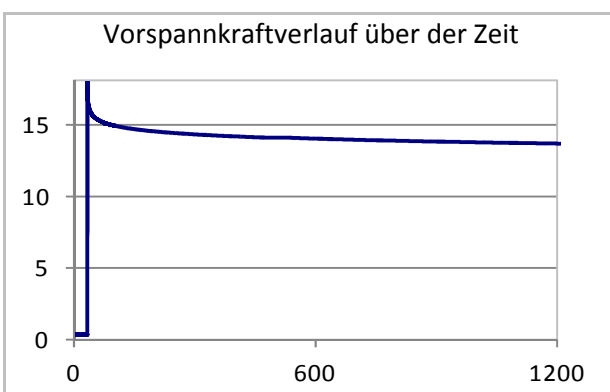
Schraube	M8 x 100
Festigkeitsklasse	8.8
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,85 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,2 mm
Länge Probe $l_p$	60 mm
Obere Fläche $A_p$	289 $\text{mm}^2$
Volumen Probe $V_p$	17317 $\text{mm}^3$
Klemmlänge $l_k$	130 mm



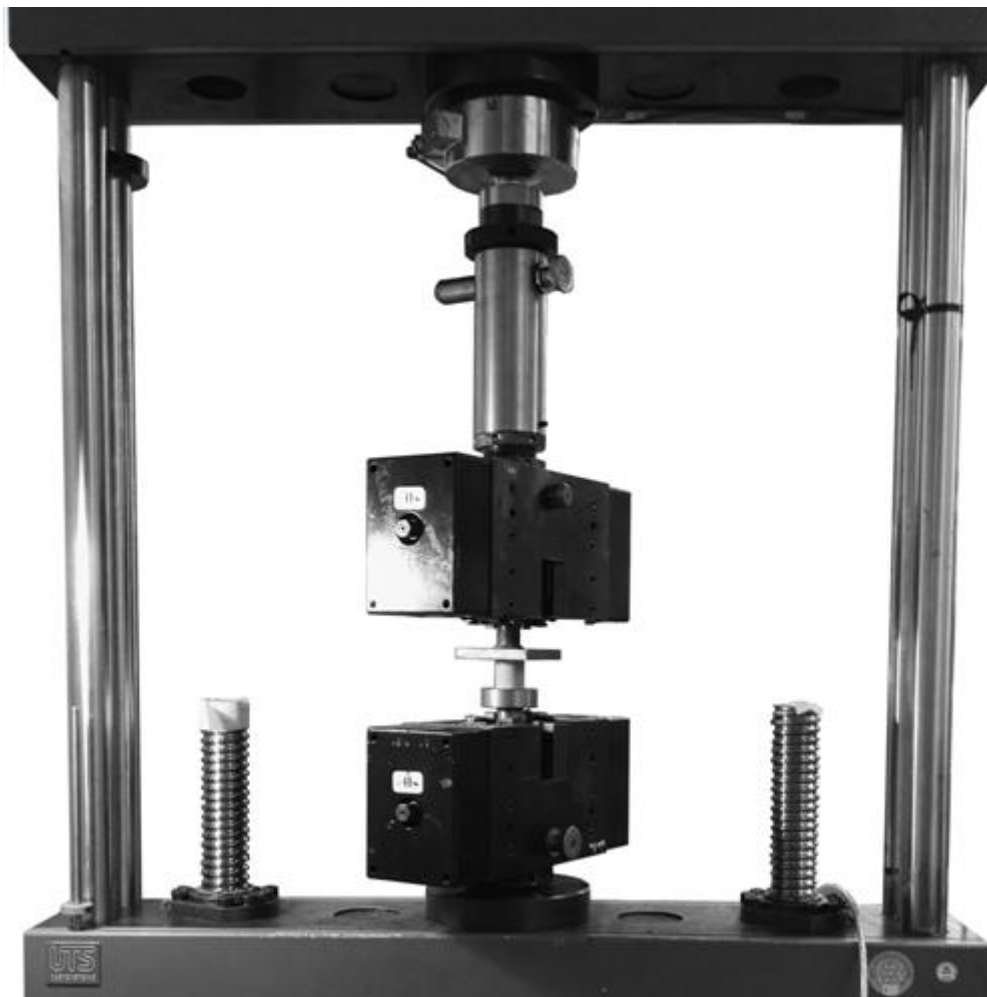
### Anmerkungen:

### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	9,383 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	32,51 Mpa	bleibende Verformung	59,97 mm



## A 2 Versuchsprotokolle der Druckversuche



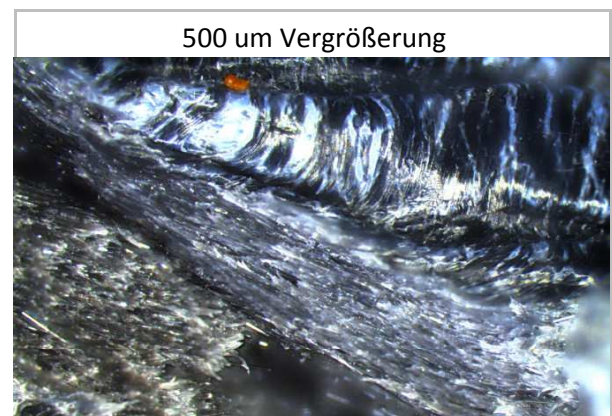
## Druckversuch VD 1

Material	PP-GF30
Versuchsanordnung:	→
Art des Versuchs	Versagen
Messfrequenz	1 Hz
Fester Parameter: Vorschub	0,08 mm/s
Zielwert (Stauchung)	25 mm
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C



## Druckversuch

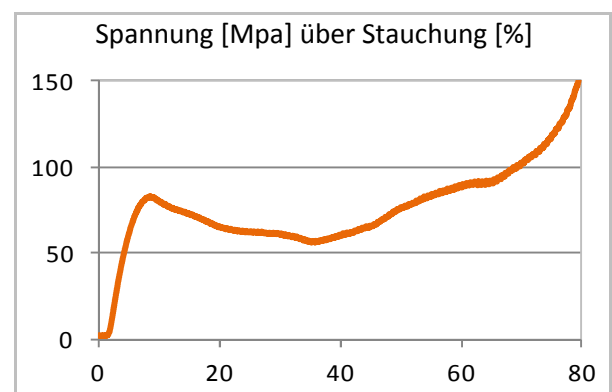
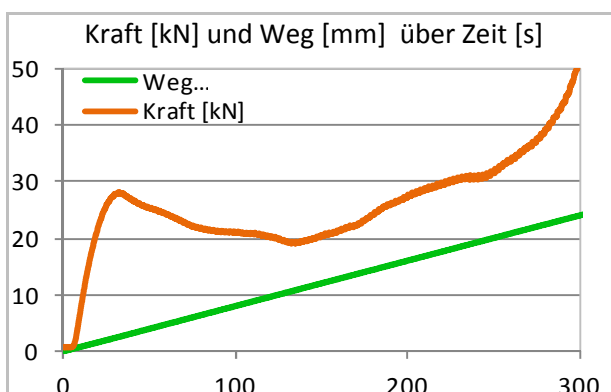
Außendurchmesser Probe $d_A$	20,78 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,15 mm
Länge Probe $l_p$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	287 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	8609 mm <sup>3</sup>



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	28 kN	max. Verformung	8,45 mm
Maximale Spannung	97,57 Mpa	bleibende Verformung	8,45 mm



## Druckversuch VD 2

Material	PP
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	Versagen
Messfrequenz	1 Hz
Fester Parameter: Vorschub	0,08 mm/s
Zielwert (Stauchung)	25 mm
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C



## Druckversuch

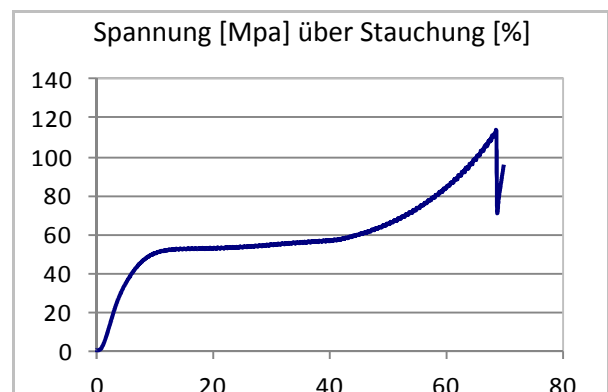
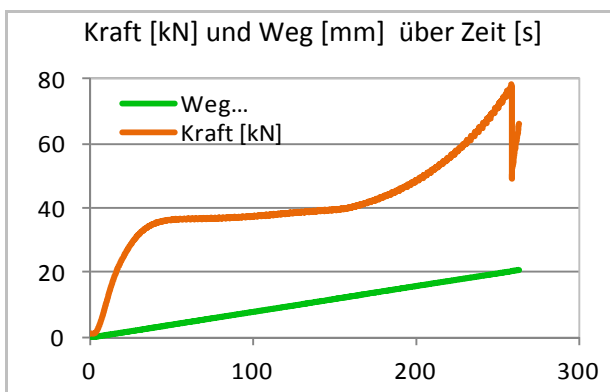
Außendurchmesser Probe $d_A$	30,7 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	8,15 mm
Länge Probe $l_p$	29,92 mm
Obere Fläche $A_p$	688 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	20587 mm <sup>3</sup>



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	38 kN	max. Verformung	10,2 mm
Maximale Spannung	55,23 Mpa	bleibende Verformung	15,51 mm



## Druckversuch VD 3

Material	PP-GF30
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	Versagen
Messfrequenz	1 Hz
Fester Parameter: Kraft	20 kN
Messzeit	3 h
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C



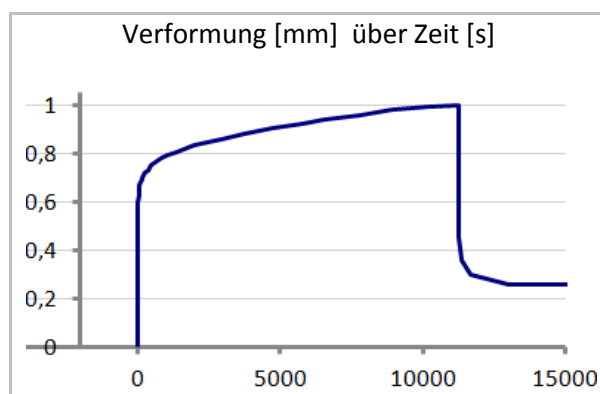
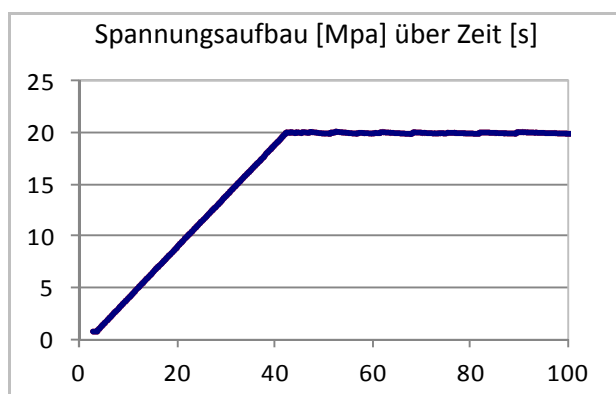
## Druckversuch

Außendurchmesser Probe $d_A$	20,78 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	0 mm
Länge Probe $l_p$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	339 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	10174 mm <sup>3</sup>

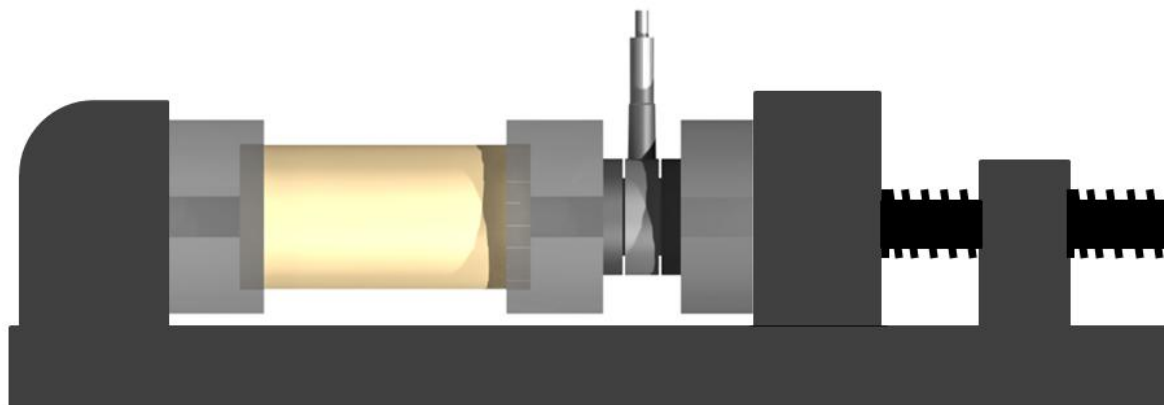
## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	20 kN	max. Verformung	29 mm
Maximale Spannung	58,97 Mpa	bleibende Verformung	29,79 mm

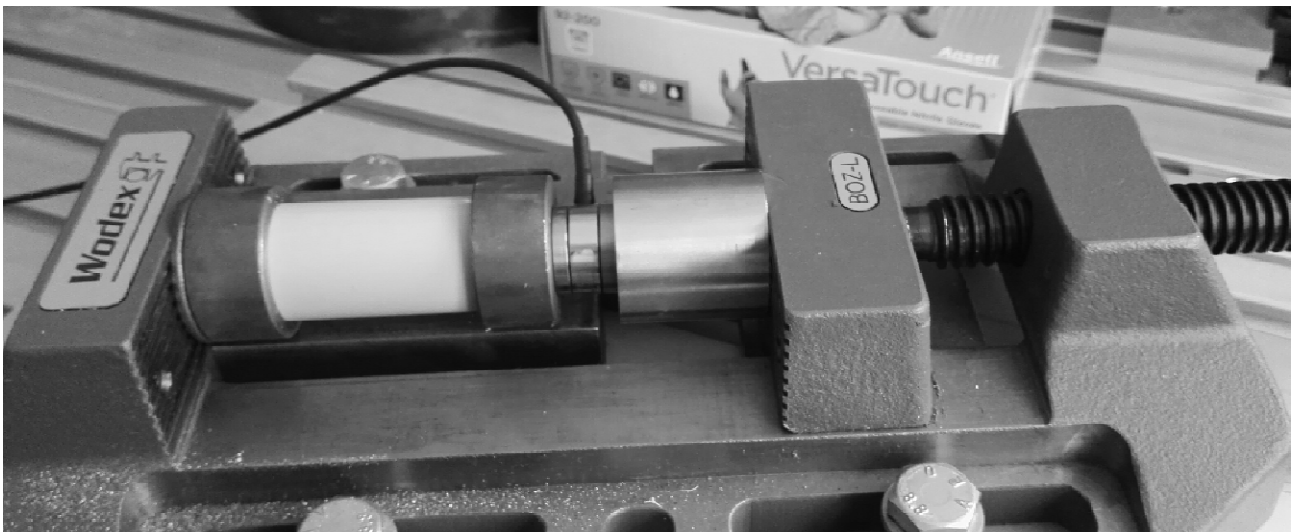


## A 3 Versuchsprotokolle der starren Verbindungen



## Starre Verbindung VC 1

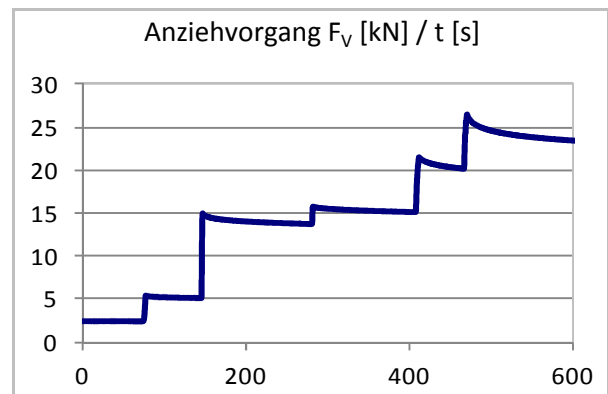
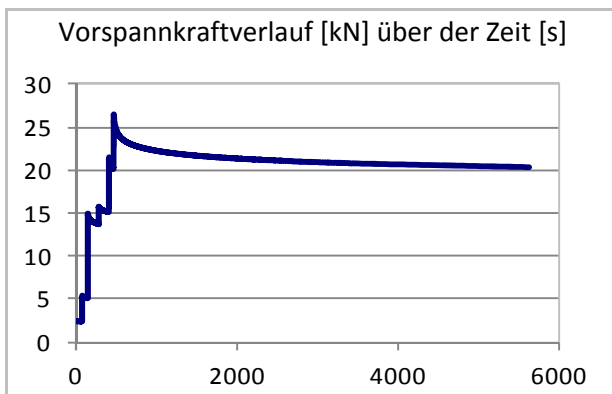
Material	PP	Außendurchmesser Probe $d$	30,7 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	Kurzzeit	Länge Probe $l_p$	60 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	688 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	Etappen	Volumen Probe $V_p$	41284 mm <sup>3</sup>
Vorspannkraft	25 kN		
Umgebungstemperatur TU	24,5 °C		



### Anmerkungen:

### Ergebnisübersicht:

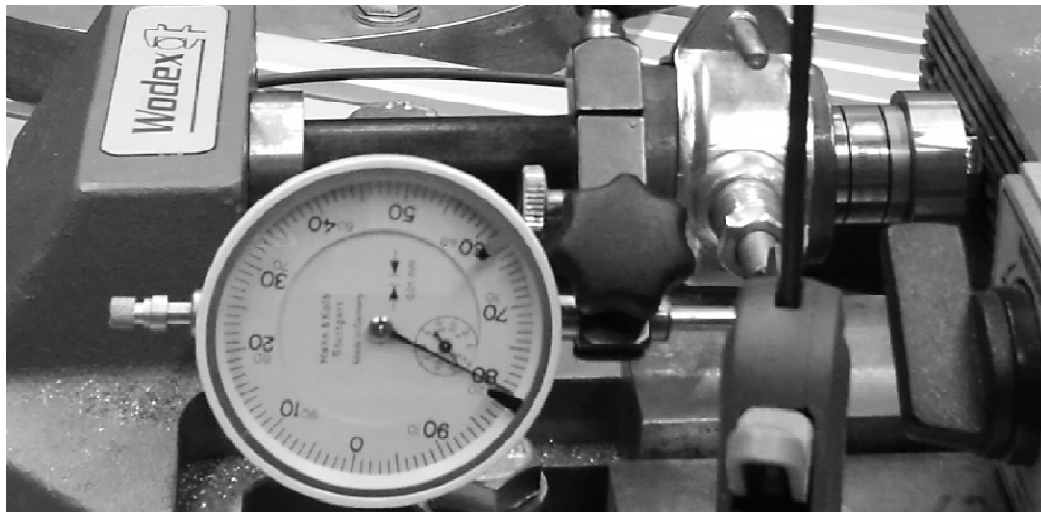
Maximale Vorspannkraft	26,35 kN	max. Verformung	58,88 mm
Maximale Spannung	38,30 Mpa	bleibende Verformung	59,87 mm





## Starre Verbindung VC 2

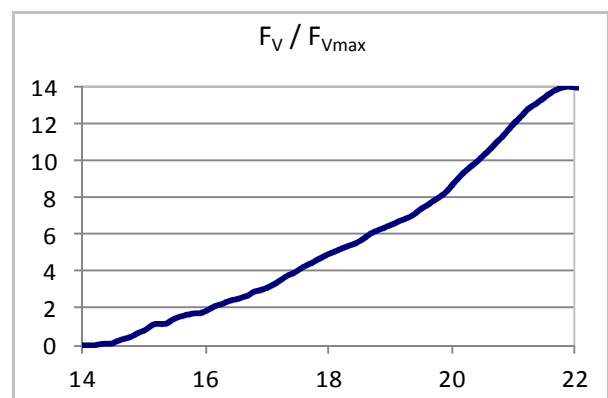
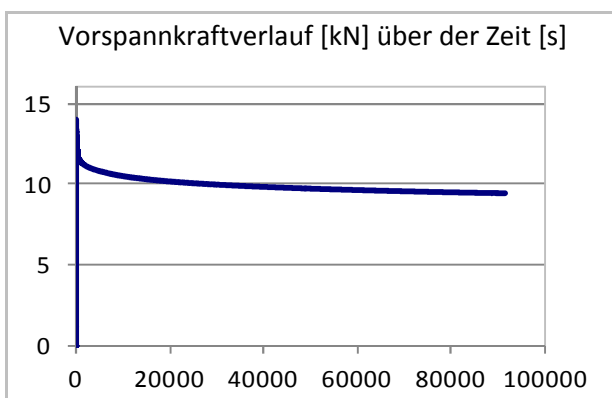
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	Langzeit	Länge Probe $l_p$	60,03 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	6 s	Volumen Probe $V_p$	17345 mm <sup>3</sup>
Vorspannkraft	14 kN		
Umgebungstemperatur TU	24,3 °C		



Anmerkungen:

### Ergebnisübersicht:

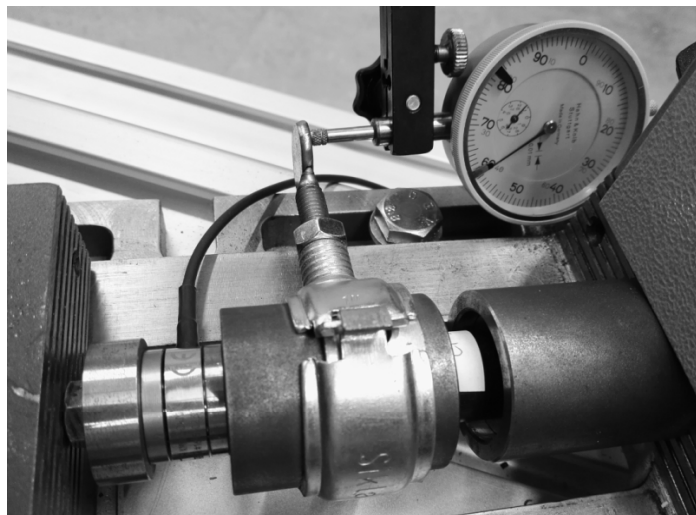
Maximale Vorspannkraft	14,04 kN	max. Verformung	59,38 mm
Maximale Spannung	48,59 Mpa	bleibende Verformung	59,94 mm





## Starre Verbindung VC 3

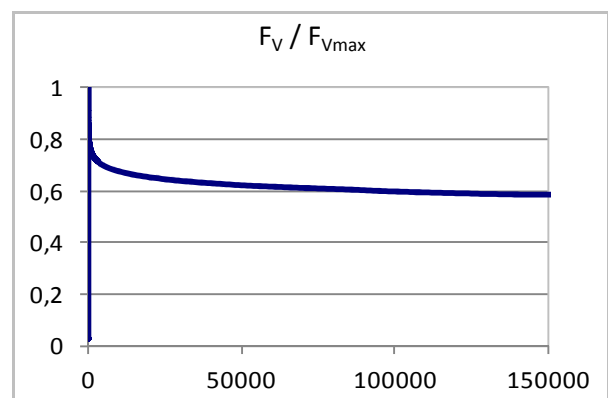
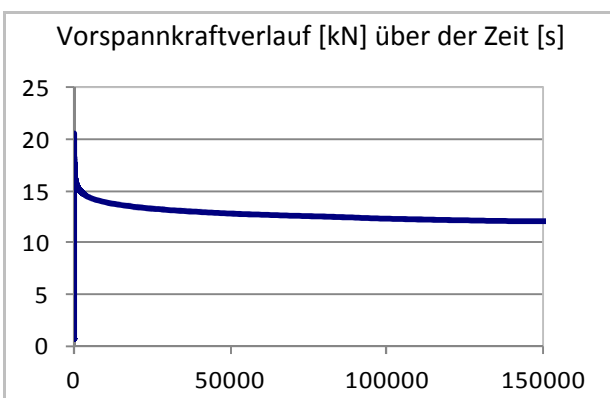
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	langzeit	Länge Probe $l_p$	29,92 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	1 s	Volumen Probe $V_p$	8645 mm <sup>3</sup>
Vorspannkraft	20 kN		
Umgebungstemperatur TU	22,6 °C		



### Anmerkungen:

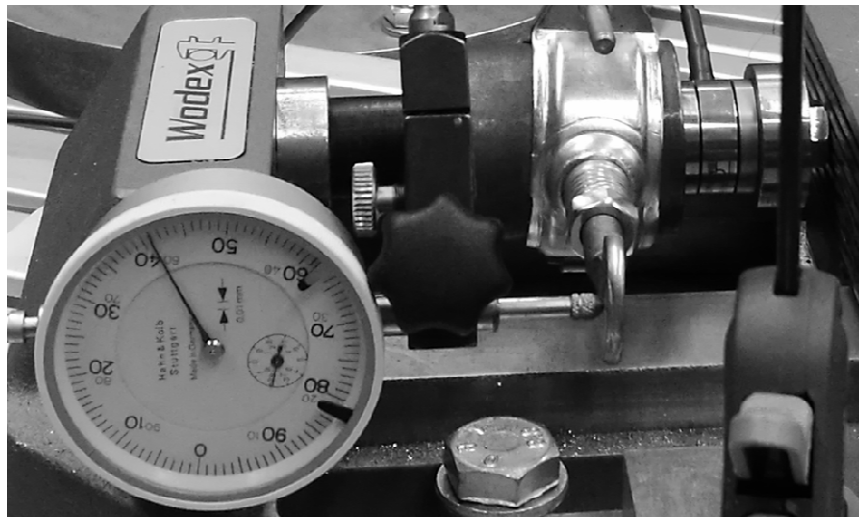
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	20,55 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	71,12 Mpa	bleibende Verformung	29,8 mm



## Starre Verbindung VC 4

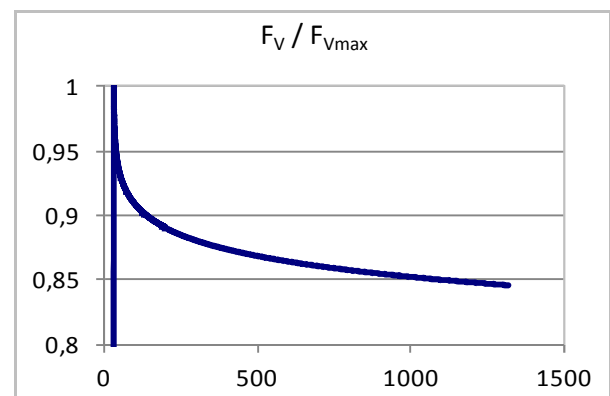
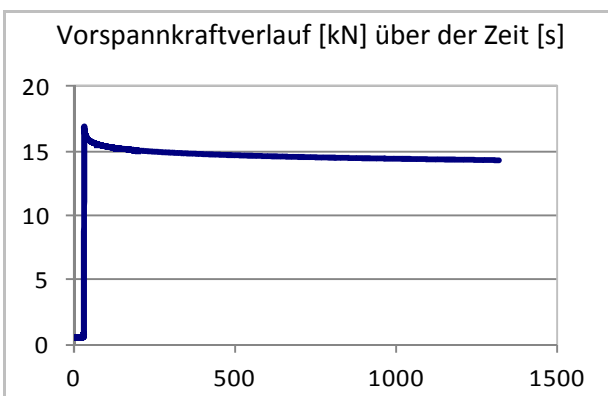
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,12 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	30,1 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	1 s	Volumen Probe $V_p$	8708 mm <sup>3</sup>
Vorspannkraft	16 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



Anmerkungen:

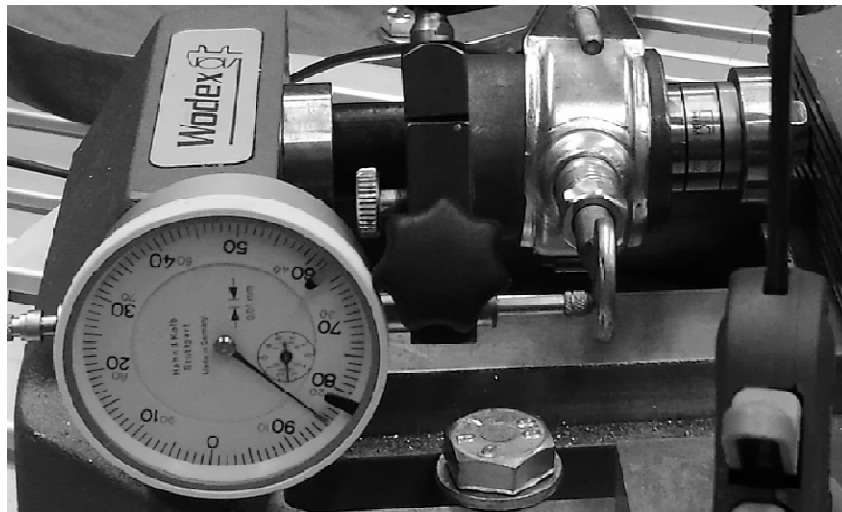
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	16,94 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	58,55 Mpa	bleibende Verformung	59,95 mm



## Starre Verbindung VC 5

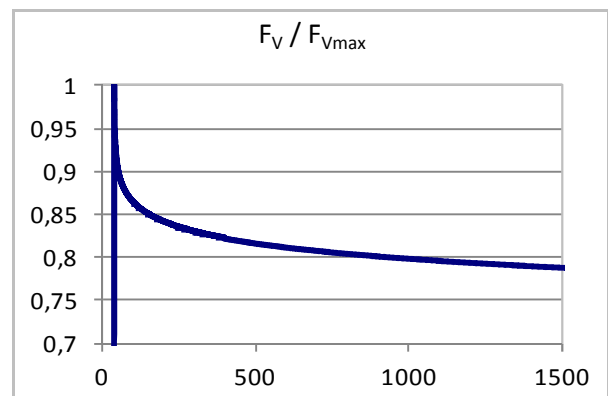
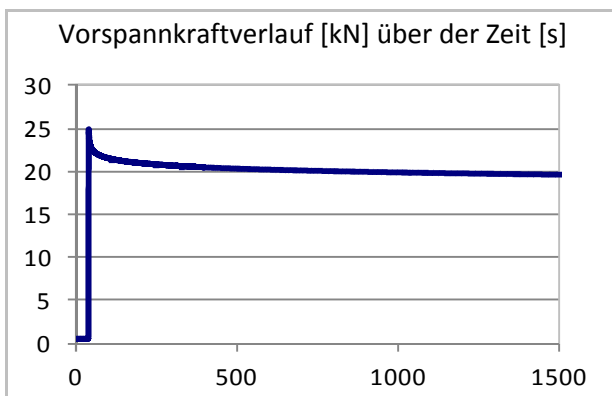
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	30 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	1 s	Volumen Probe $V_p$	8668 mm <sup>3</sup>
Vorspannkraft	25 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



Anmerkungen:

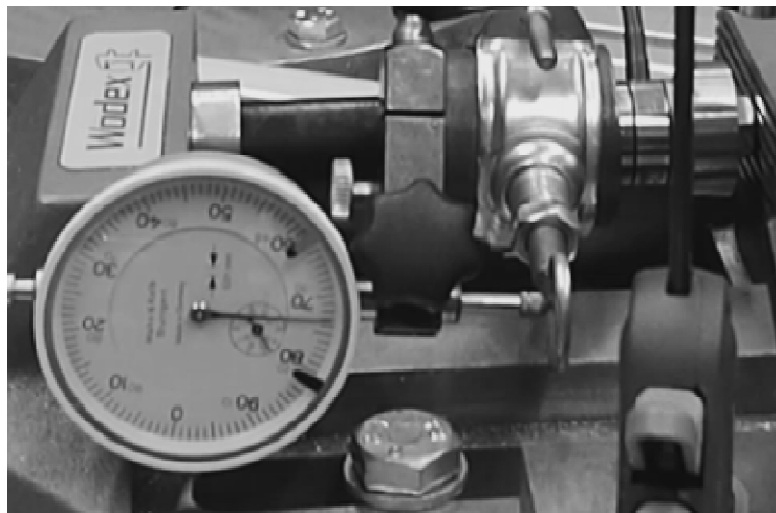
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	24,97 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	86,42 Mpa	bleibende Verformung	29,92 mm



## Starre Verbindung VC 6

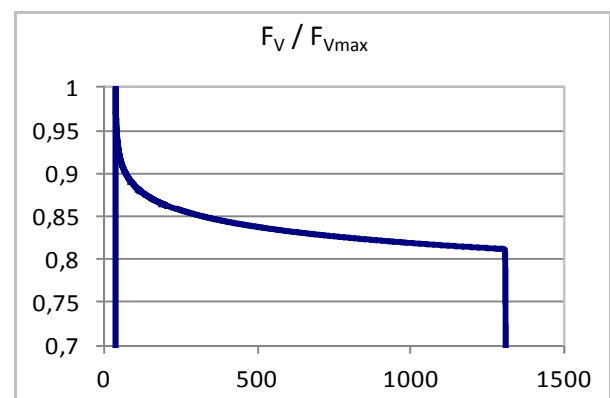
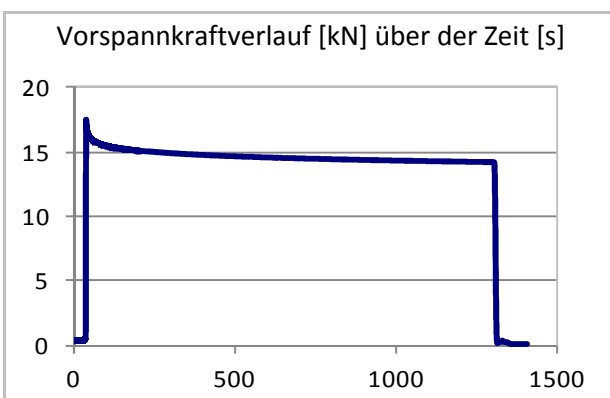
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	40 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	1 s	Volumen Probe $V_p$	11557 mm <sup>3</sup>
Zielbereich Vorspannkraft	15-18 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



### Anmerkungen:

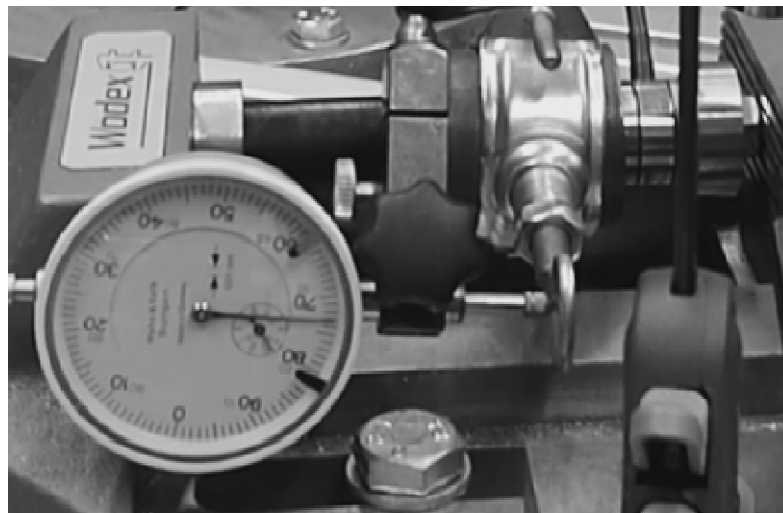
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	17,51 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	60,60 Mpa	bleibende Verformung	39,98 mm



## Starre Verbindung VC 6\_2

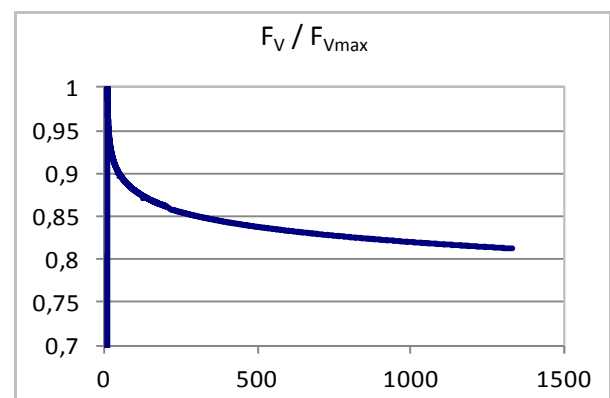
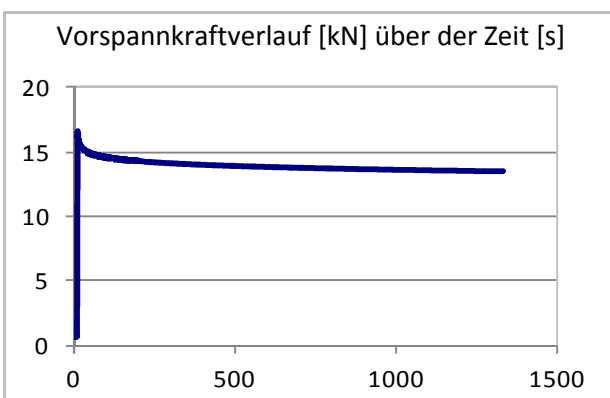
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	40,04 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	1 s	Volumen Probe $V_p$	11569 mm <sup>3</sup>
Zielbereich Vorspannkraft	15-18 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



### Anmerkungen:

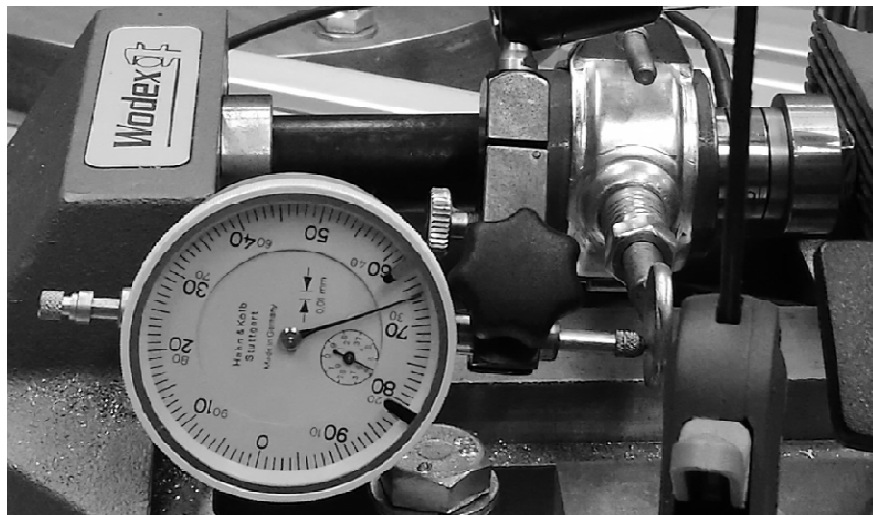
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	16,62 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	57,52 Mpa	bleibende Verformung	29,98 mm



## Starre Verbindung VC 7

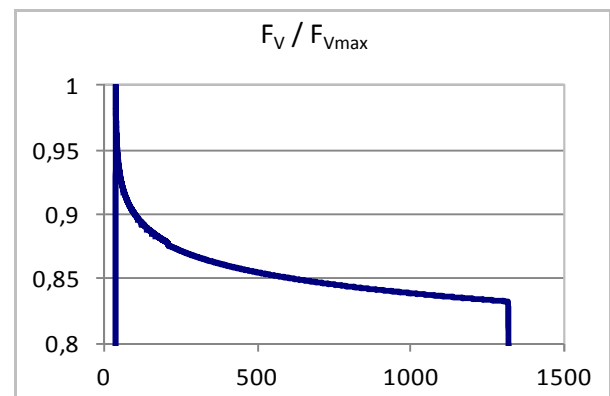
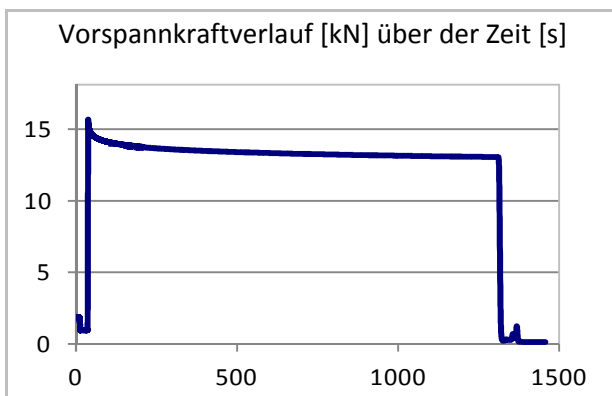
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	50,15 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	1,5 s	Volumen Probe $V_p$	14490 mm <sup>3</sup>
Zielbereich Vorspannkraft	15-18 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		




### Anmerkungen:

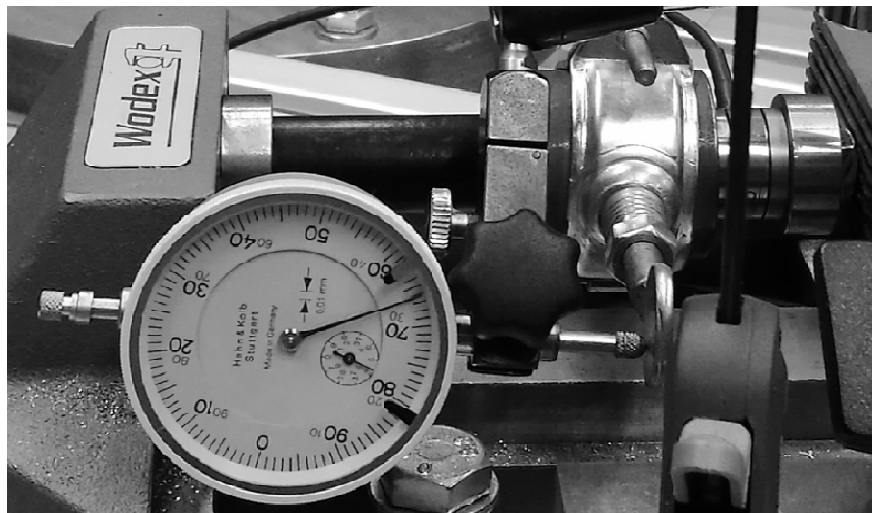
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	15,58 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	53,92 Mpa	bleibende Verformung	50,03 mm



## Starre Verbindung VC 8

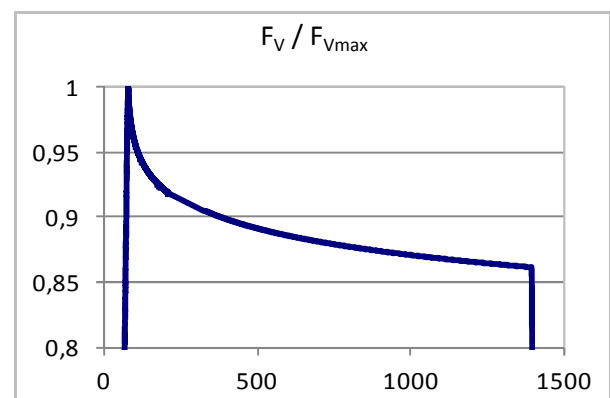
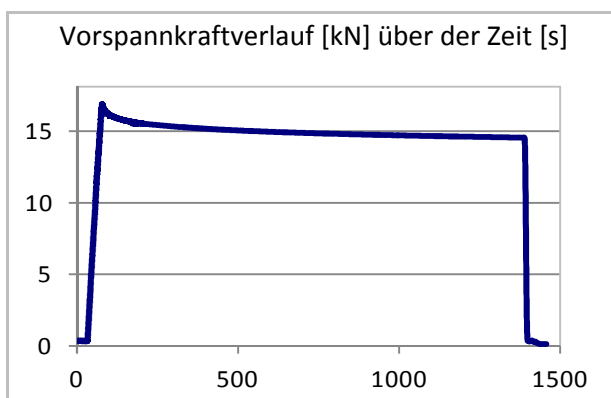
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild 	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	50,15 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	45 s	Volumen Probe $V_p$	14490 mm <sup>3</sup>
Zielbereich Vorspannkraft	15-18 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



### Anmerkungen:

### Ergebnisübersicht:

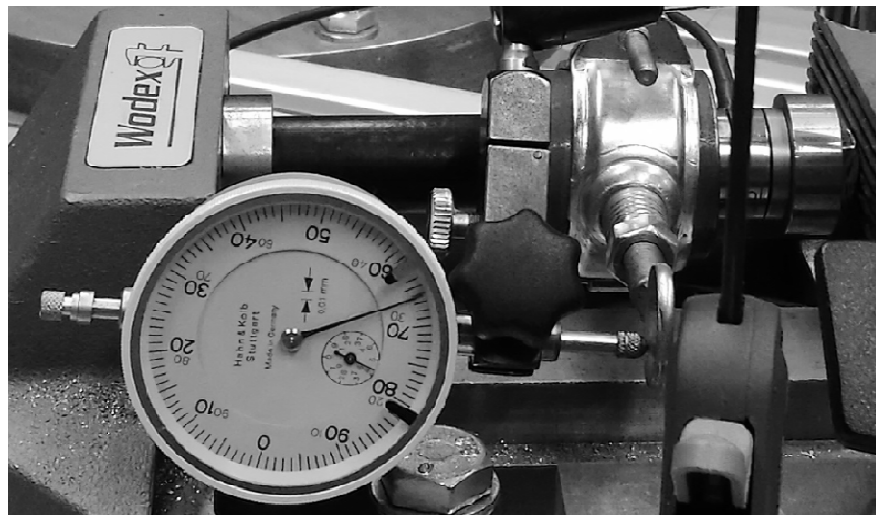
Maximale Vorspannkraft	16,85 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	58,32 Mpa	bleibende Verformung	50 mm





## Starre Verbindung VC 9

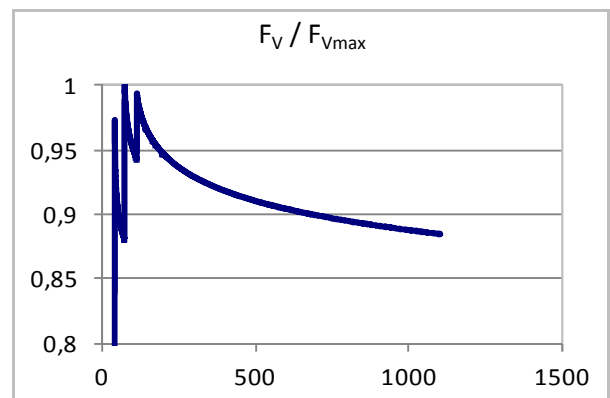
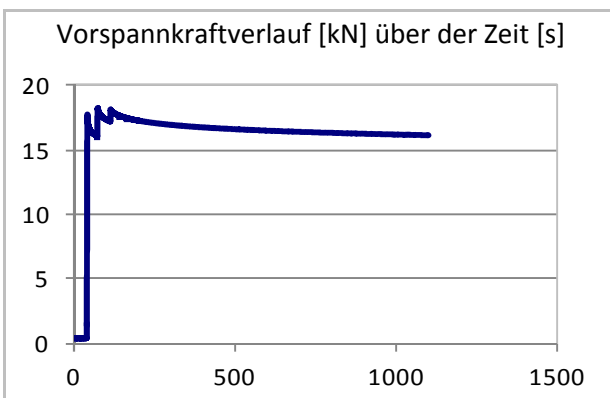
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	50,15 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	2 s	Volumen Probe $V_p$	14490 mm <sup>3</sup>
Zielbereich Vorspannkraft	15-18 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



### Anmerkungen:

### Ergebnisübersicht:

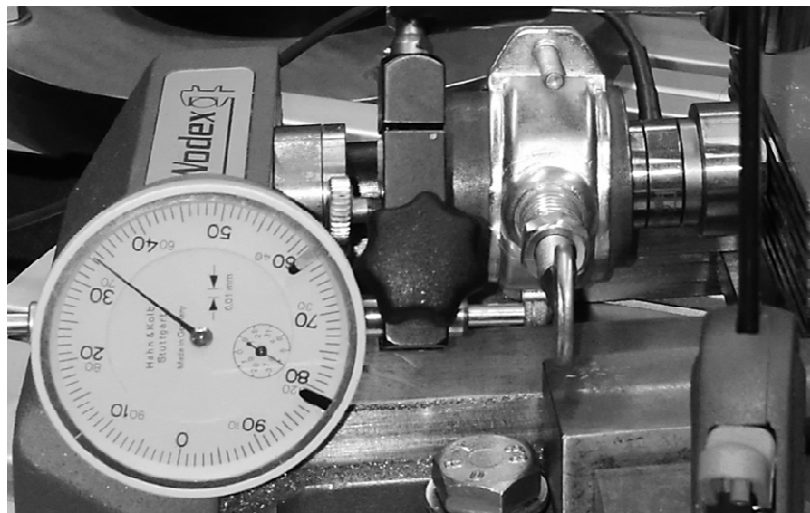
Maximale Vorspannkraft	18,27 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	63,23 Mpa	bleibende Verformung	50,03 mm





## Starre Verbindung VC 10

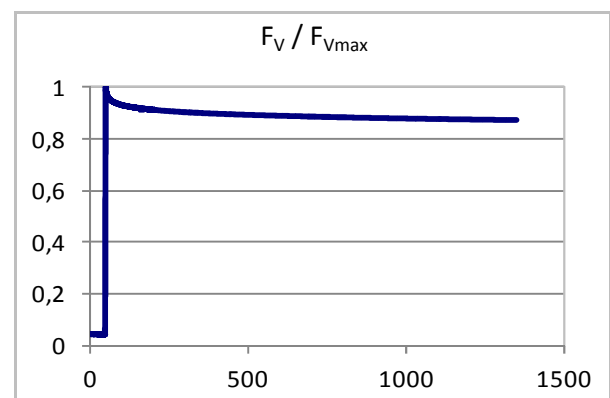
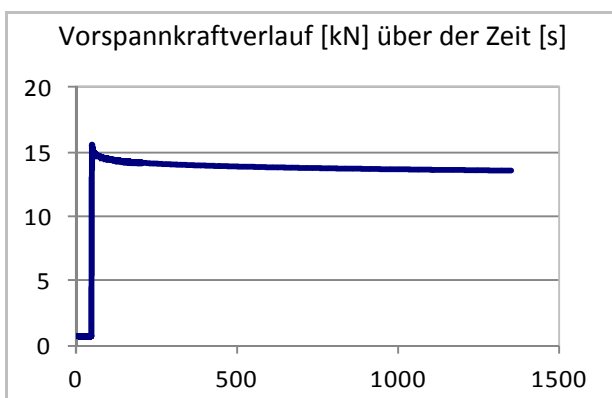
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	19,98 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	2 s	Volumen Probe $V_p$	5773 mm <sup>3</sup>
Vorspannkraft	15-18 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



### Anmerkungen:

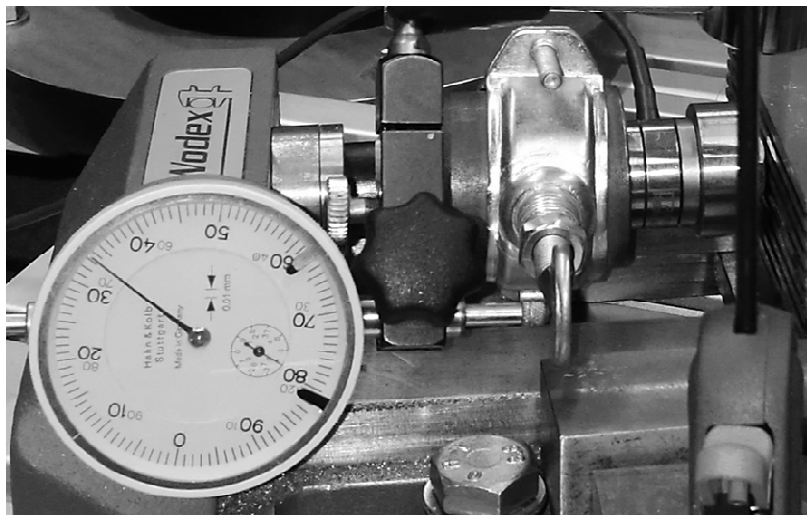
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	15,55 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	53,82 Mpa	bleibende Verformung	19,87 mm



## Starre Verbindung VC 11

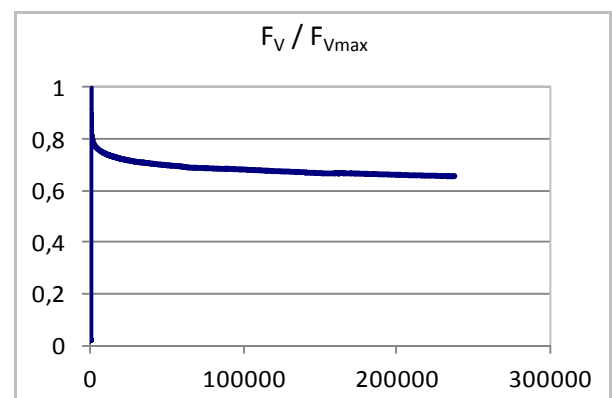
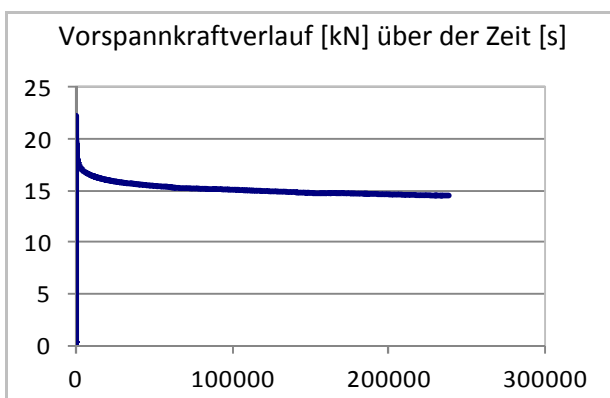
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	langzeit	Länge Probe $l_p$	19,98 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	1,5 s	Volumen Probe $V_p$	5773 mm <sup>3</sup>
Vorspannkraft	22 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



### Anmerkungen:

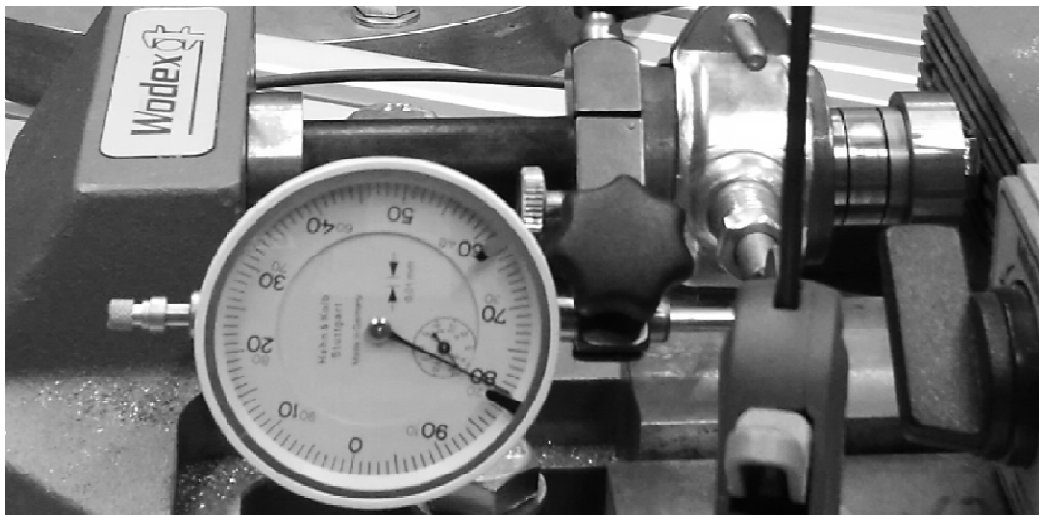
### Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	22,29 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	77,15 Mpa	bleibende Verformung	19,76 mm



## Starre Verbindung VC 12

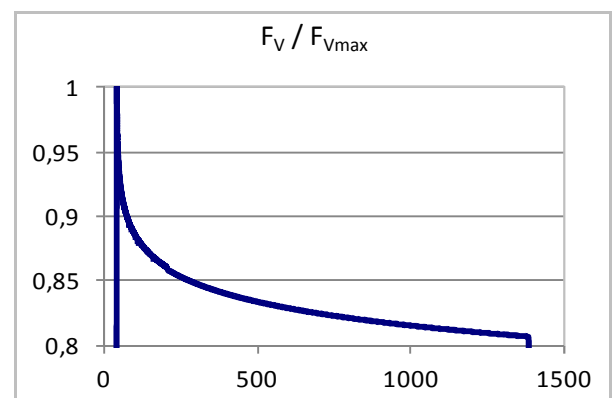
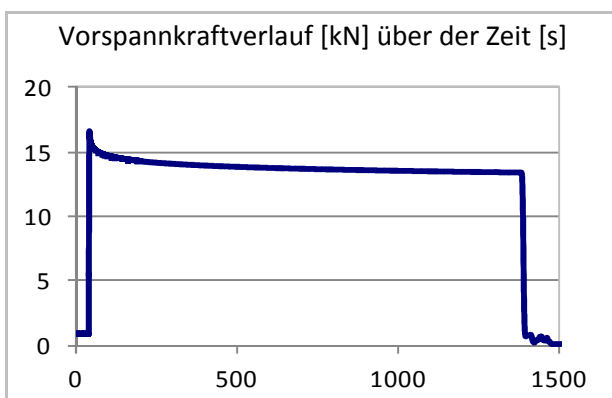
Material	PP-GF30	Außendurchmesser Probe $d$	20,84 mm
Versuchsanordnung:	Bild	Kernlochdurchmesser Probe	8,15 mm
Art des Versuchs	kurzzeit	Länge Probe $l_p$	60 mm
Messfrequenz	50 Hz	Obere Fläche $A_p$	289 mm <sup>2</sup>
Zeit des Anziehens	2 s	Volumen Probe $V_p$	17336 mm <sup>3</sup>
Vorspannkraft	15-18 kN		
Umgebungstemperatur TU	23,6 °C		



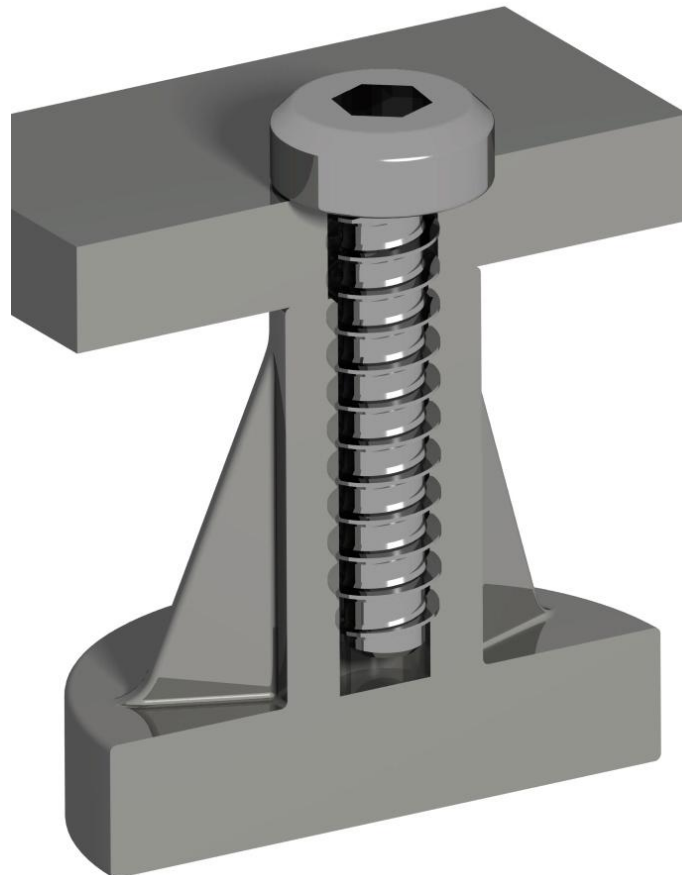
### Anmerkungen:

### Ergebnisübersicht:


Maximale Vorspannkraft	16,66 kN	max. Verformung	mm
Maximale Spannung	57,66 Mpa	bleibende Verformung	59,97 mm



## A 4 Versuchsprotokolle der Direktverschraubungen



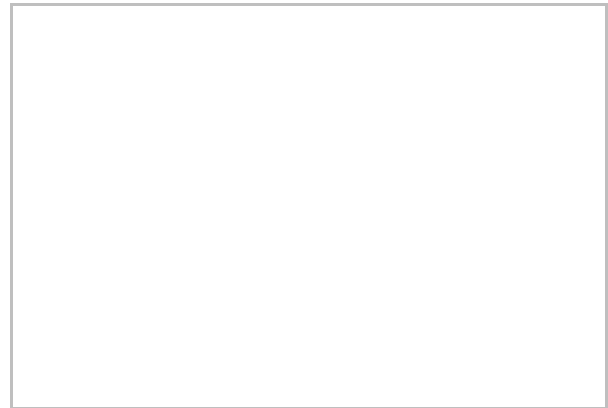
## Modellversuch: VB 1

Material	PP-GF 30
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	Langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	150 $\text{min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	30 $\text{min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	23,6 °C
Art der Abstützung	Stirn



## Modellversuch

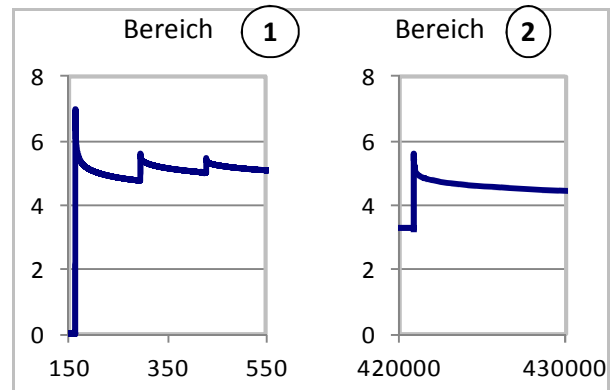
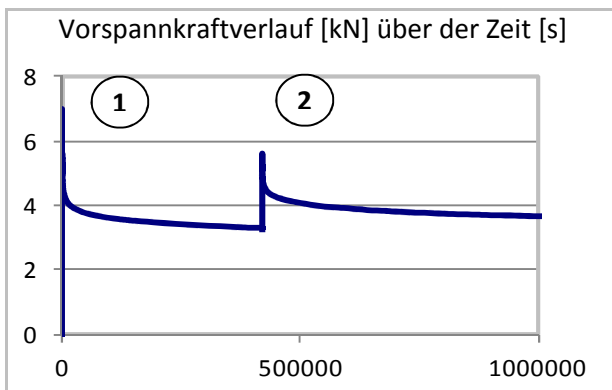
Schraube	Remform
Abmaße (Nenndurchmesser x Länge)	M8 x 50
Außendurchmesser Probe $d_A$	16 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	6,957 mm
Tubushöhe $h$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	163 $\text{mm}^2$
Volumen Probe $V_p$	4891 $\text{mm}^3$
Einschraubtiefe	26,96 mm




## Anmerkungen:

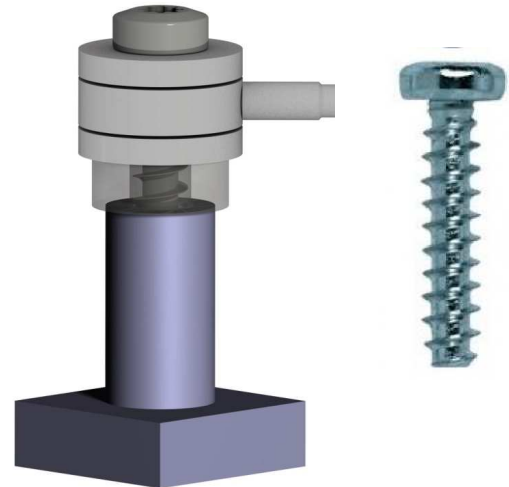
## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	6,99 kN
Maximale Spannung	42,87 Mpa



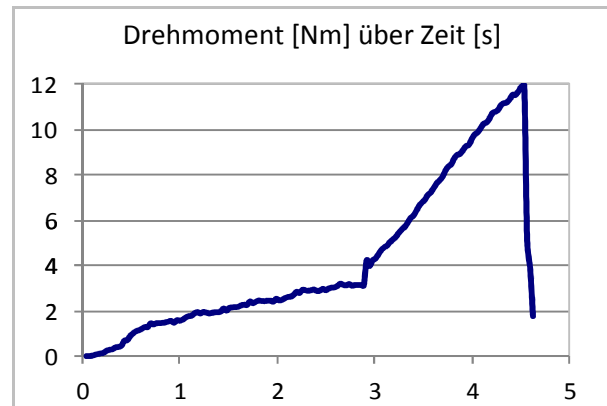
## Modellversuch: VB 2

Material	PP-GF 20
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	Langzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	$150 \text{ min}^{-1}$
Anziedrehzahl $n_A$	$5 \text{ min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	$21,8 \text{ }^\circ\text{C}$
Art der Abstützung	Stirn



## Modellversuch

Schraube	Remform
Abmaße (Nenndurchmesser x Länge)	M8 x 50
Außendurchmesser Probe $d_A$	16 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	mm
Tubushöhe $h$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	<b>201</b> mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	<b>6032</b> mm <sup>3</sup>
Einschraubtiefe	26,96 mm



## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	9,762 kN
Maximale Spannung	48,55 Mpa

Vorspannkraftverlauf [kN] über der Zeit [s]

①

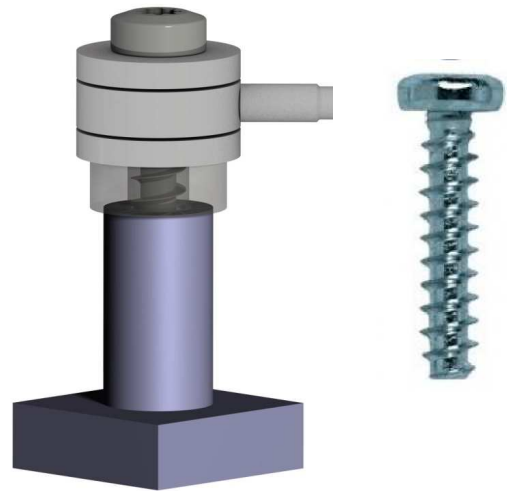
②

Bereich ①

Bereich ②

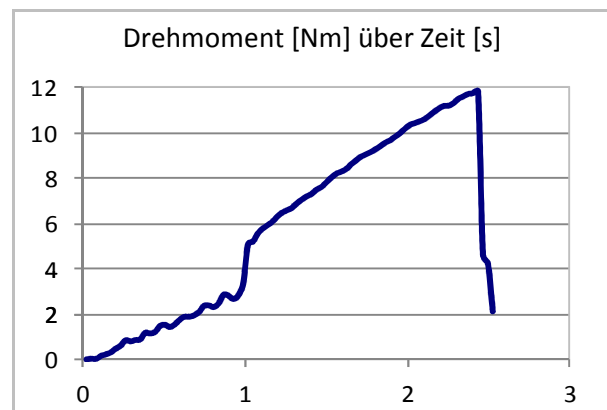
## Modellversuch: VB 3

Material	PP-GF 20
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	500 $\text{min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	5 $\text{min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	21,8 °C
Art der Abstützung	Stirn



## Modellversuch

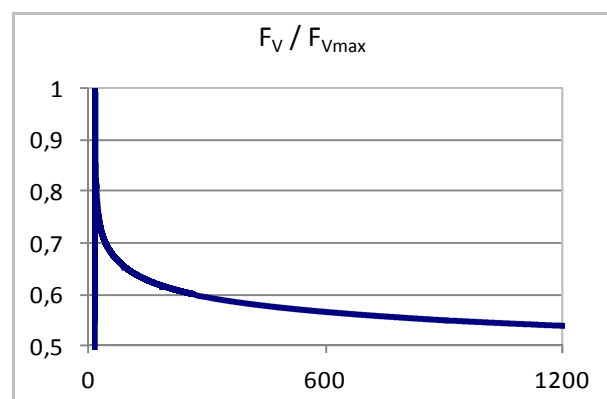
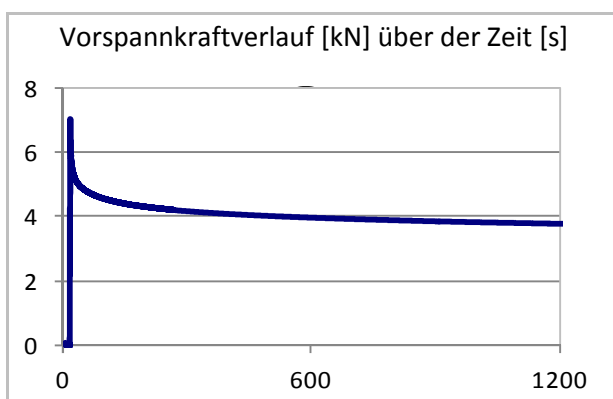
Schraube	Remform
Abmaße (Nenndurchmesser x Länge)	M8 x 50
Außendurchmesser Probe $d_A$	16 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	6,875 mm
Tubushöhe $h$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	164 $\text{mm}^2$
Volumen Probe $V_p$	4918 $\text{mm}^3$
Einschraubtiefe	26,96 mm



## Anmerkungen:

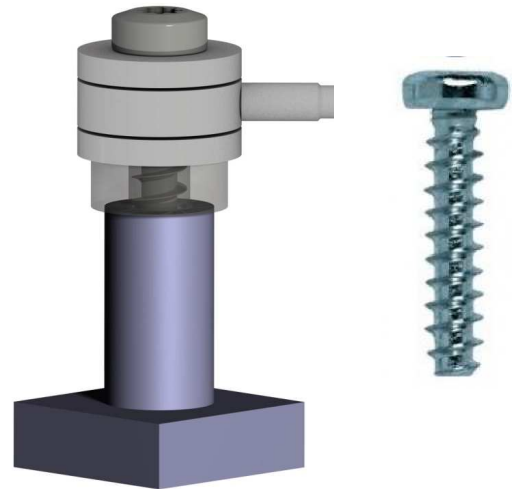
## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	7,048 kN
Maximale Spannung	42,99 Mpa



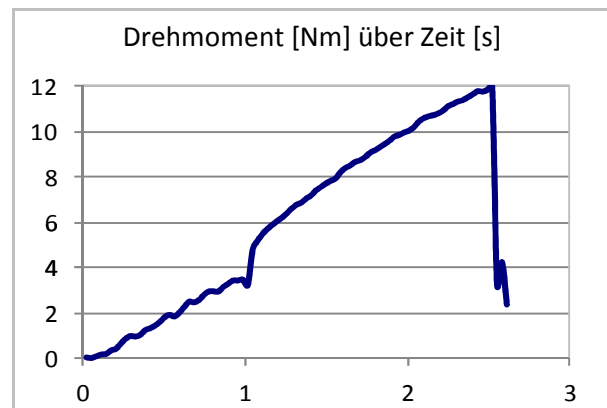
## Modellversuch: VB 4

Material	PP-GF 20
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	500 $\text{min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	5 $\text{min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	21,8 °C
Art der Abstützung	Stirn



## Modellversuch

Schraube	Remform
Abmaße (Nenndurchmesser x Länge)	M8 x 50
Außendurchmesser Probe $d_A$	16 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	6,84 mm
Tubushöhe $h$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	164 $\text{mm}^2$
Volumen Probe $V_p$	4929 $\text{mm}^3$
Einschraubtiefe	26,96 mm

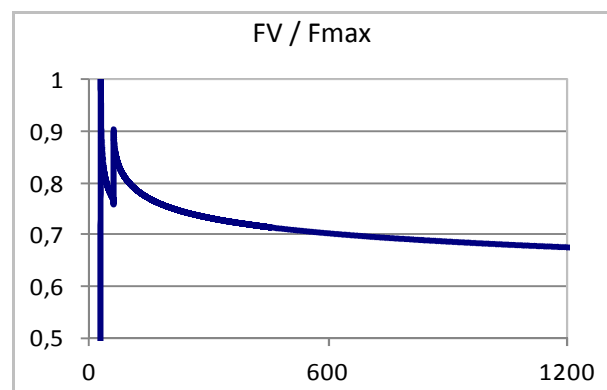
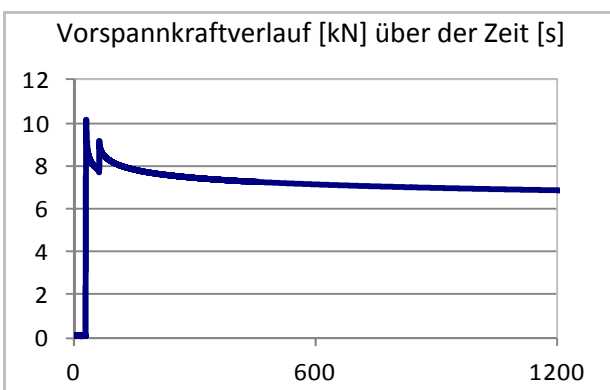


## Anmerkungen:

Nachziehen nach 30 s

## Ergebnisübersicht:

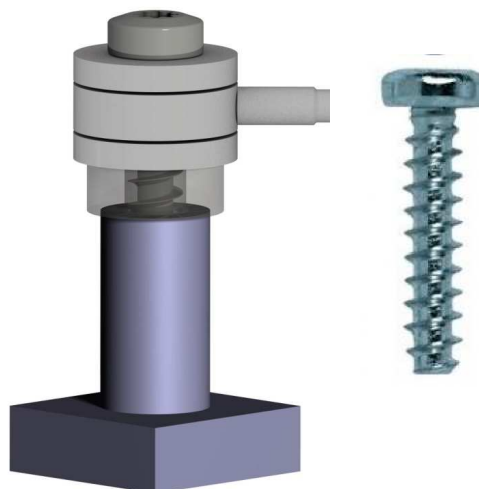
Maximale Vorspannkraft	10,83 kN
Maximale Spannung	65,91 Mpa





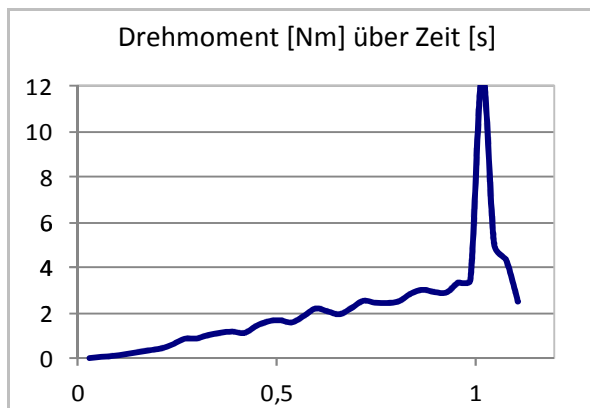
## Modellversuch: VB 5

Material	PP-GF 20
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	500 $\text{min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	400 $\text{min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	21,8 °C
Art der Abstützung	Stirn



## Modellversuch

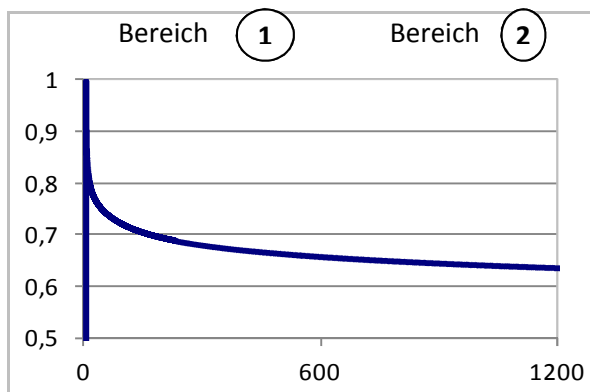
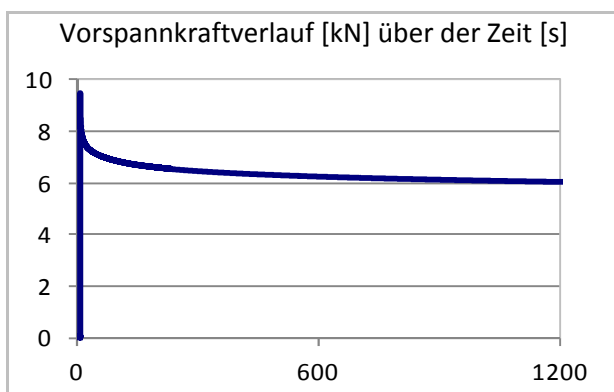
Schraube	Remform
Abmaße (Nenndurchmesser x Länge)	M8 x 50
Außendurchmesser Probe $d_A$	16 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	6,857 mm
Tubushöhe $h$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	164 $\text{mm}^2$
Volumen Probe $V_p$	4924 $\text{mm}^3$
Einschraubtiefe	26,96 mm



## Anmerkungen:

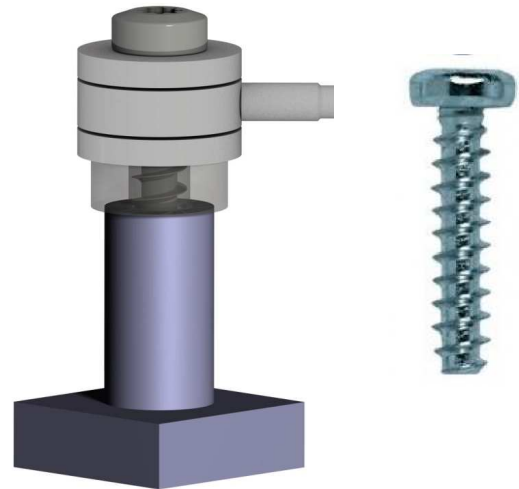
## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	9,458 kN
Maximale Spannung	57,62 Mpa



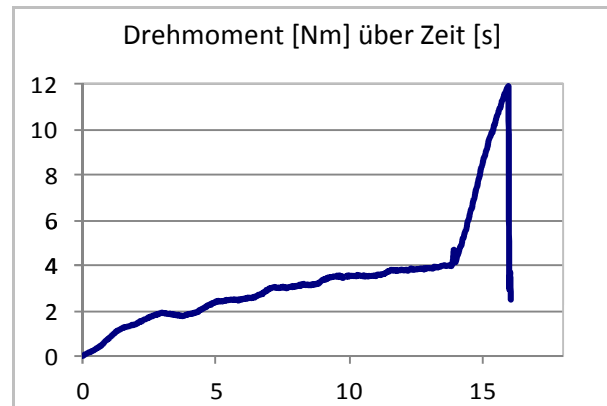
## Modellversuch: VB 6

Material	PP-GF 20
Versuchsanordnung:	➔
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	30 min <sup>-1</sup>
Anziehdrehzahl $n_A$	5 min <sup>-1</sup>
Umgebungstemperatur $T_U$	21,8 °C
Art der Abstützung	Stirn



## Modellversuch

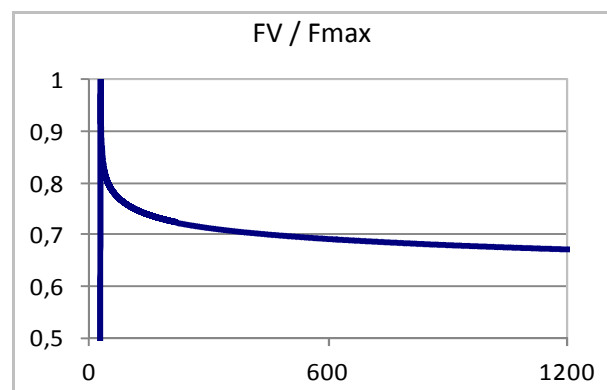
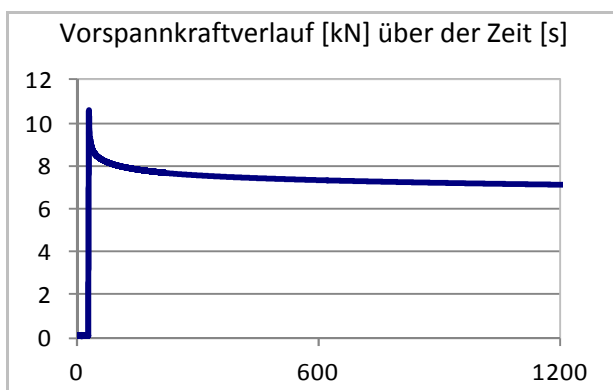
Schraube	Remform
Abmaße (Nenndurchmesser x Länge)	M8 x 50
Außendurchmesser Probe $d_A$	16 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	6,857 mm
Tubushöhe $h$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	164 mm <sup>2</sup>
Volumen Probe $V_p$	4924 mm <sup>3</sup>
Einschraubtiefe	26,96 mm



## Anmerkungen:

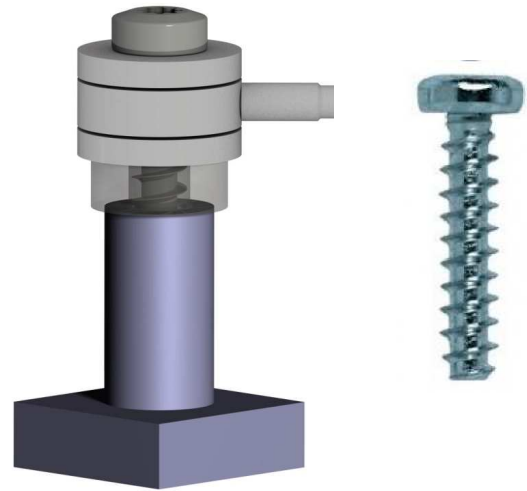
## Ergebnisübersicht:

Maximale Vorspannkraft	10,54 kN
Maximale Spannung	64,22 Mpa



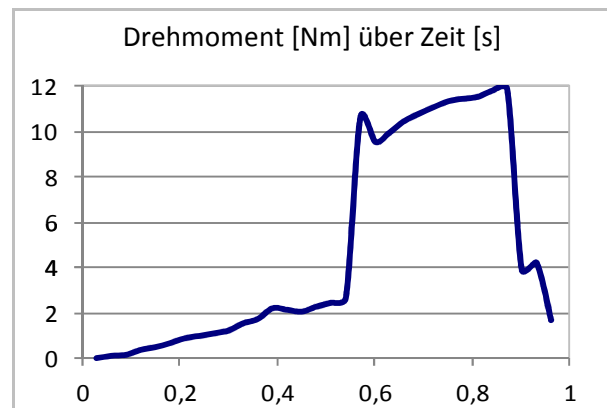
## Modellversuch: VB 7

Material	PP-GF 20
Versuchsanordnung:	
Art des Versuchs	kurzzeit
Messfrequenz	50 Hz
Anziehungsmoment $M_A$	12 Nm
Einschraubdrehzahl $n_E$	1000 $\text{min}^{-1}$
Anziehdrehzahl $n_A$	5 $\text{min}^{-1}$
Umgebungstemperatur $T_U$	21,8 °C
Art der Abstützung	Stirn



## Modellversuch

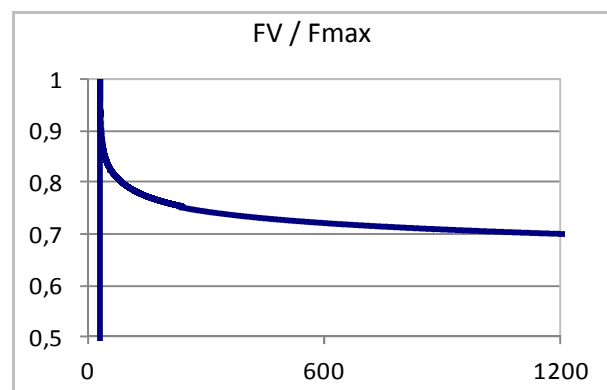
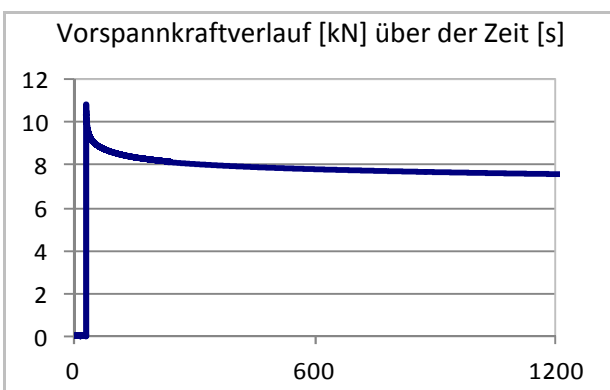
Schraube	Remform
Abmaße (Nenndurchmesser x Länge)	M8 x 50
Außendurchmesser Probe $d_A$	16 mm
Kernlochdurchmesser Probe $d_K$	mm
Tubushöhe $h$	30 mm
Obere Fläche $A_p$	201 $\text{mm}^2$
Volumen Probe $V_p$	6032 $\text{mm}^3$
Einschraubtiefe	26,96 mm



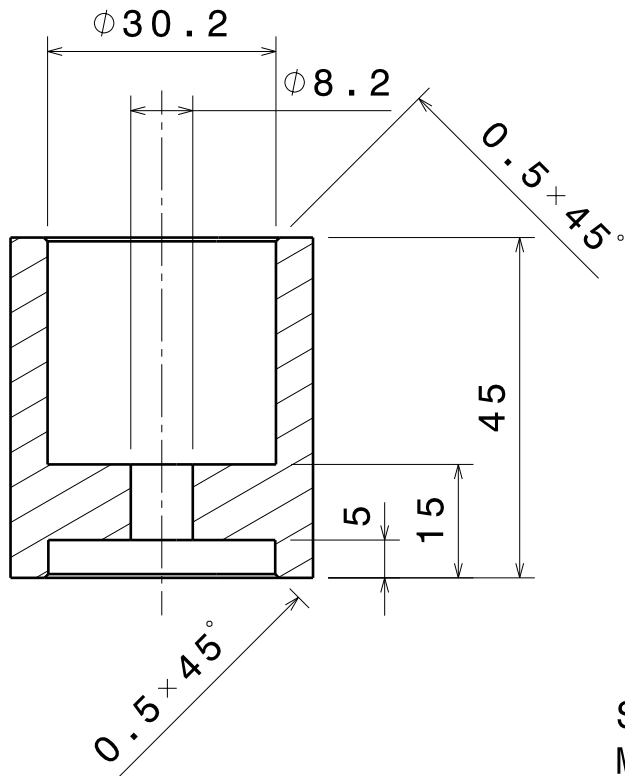
## Anmerkungen:

## Ergebnisübersicht:

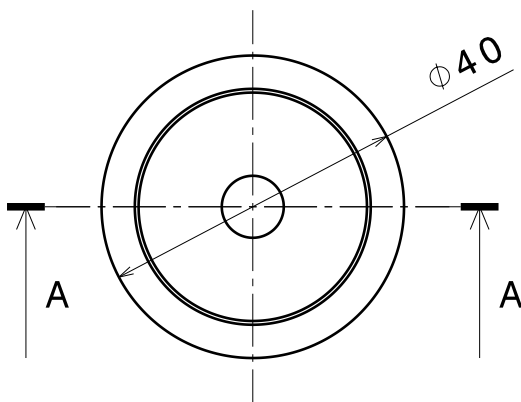
Maximale Vorspannkraft	10,83 kN
Maximale Spannung	53,86 Mpa



## **B. Anhang: Technische Zeichnungen**

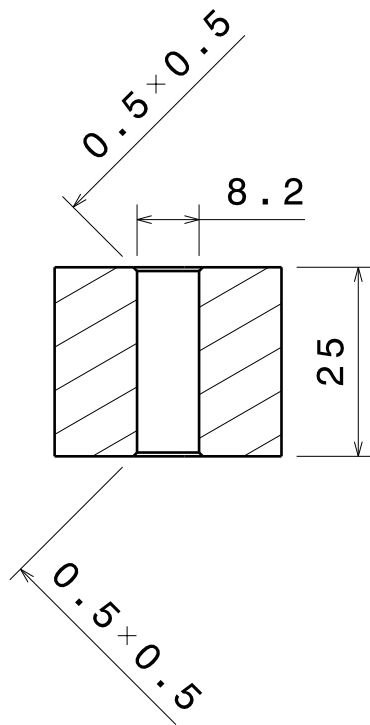


Schnitt A-A  
Maßstab: 1:1

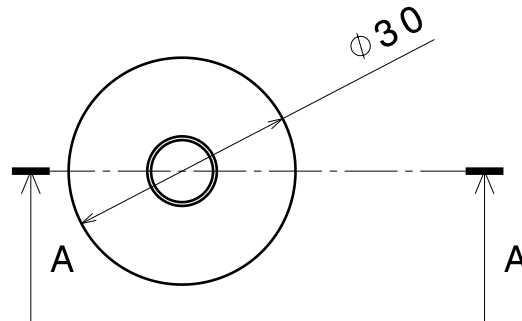


Vorderansicht  
Maßstab: 1:1

Komponenten für den Modellversuch				DIN ISO 2768-f		Rz20	Maßstab 1:1	2 Stück	
				Werkstoff: Stahl					
				Datum	Name	<h1>Buchse für Modellversuch</h1>			
				Bearb	23.08.16				Allermann
				Gepr.					
				Norm					
				Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences			Sebastian Allermann		Blatt A4
Zust	Änderung	Datum	Name	Urspr.	Ers. f.:		Ers. d.:		

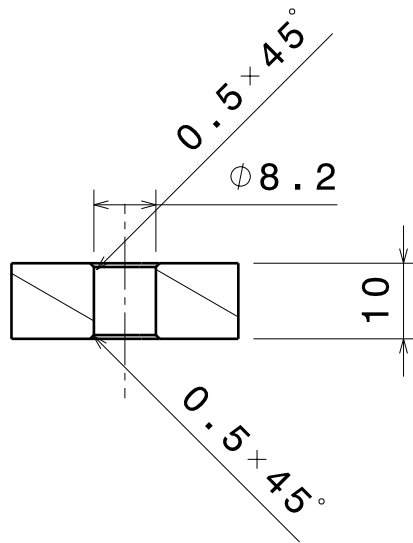


Schnitt A-A  
Maßstab: 1:1

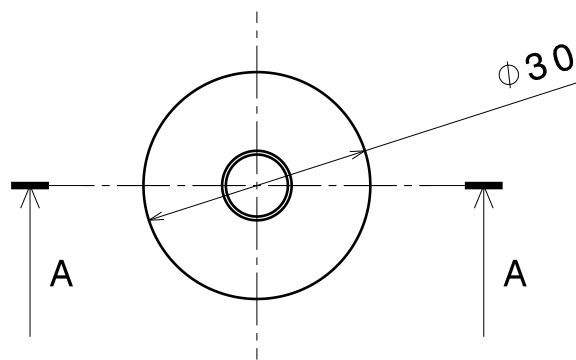


Vorderansicht  
Maßstab: 1:1

Komponenten für den Modellversuch				DIN ISO 2768-f		Rz20	Maßstab 1:1	Stück: 2	
				Werkstoff: Stahl					
				Datum	Name	<b>Distanzstück 25mm</b>			
				Bearb	23.08.16				Allermann
				Gepr.					
				Norm					
				Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences			Sebastian Allermann		Blatt A4
							Ers. d.:		
Zust	Änderung	Datum	Name	Urspr.			Ers. f.:	Ers. d.:	

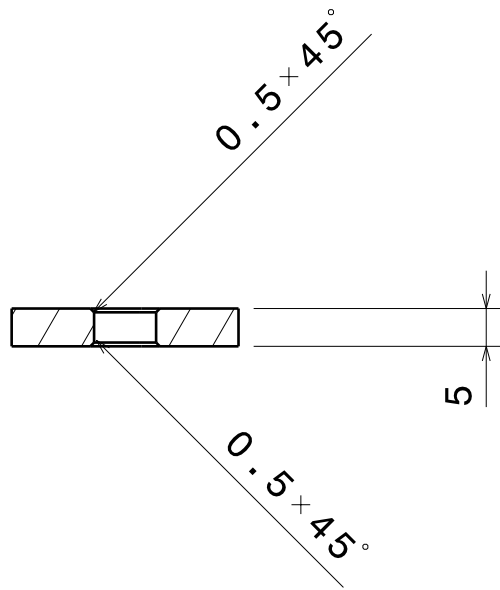


Schnitt A-A  
Maßstab: 1:1

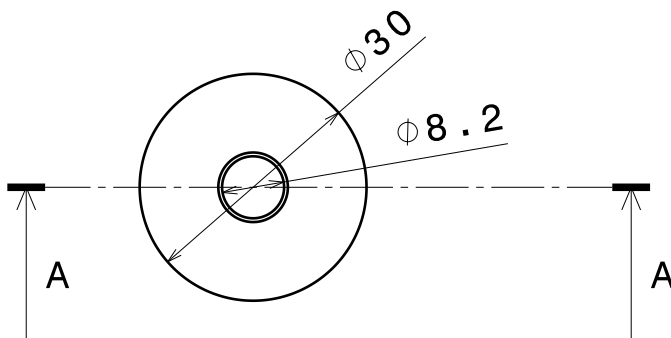


Vorderansicht  
Maßstab: 1:1


Komponenten für den Modellversuch				DIN ISO 2768-f		Rz20	Maßstab 1:1	Stück: 2
				Werkstoff: Stahl				
				Bearb	Datum	Name	<b>Distanzscheibe 10mm großer Durchm.</b>	
				Gepr.	23.08.16	Allermann		
				Norm				
				Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences			Sebastian Allermann	
							Blatt A4	
							Bl.	
Zust	Änderung	Datum	Name	Urspr.			Ers. f.:	Ers. d.:



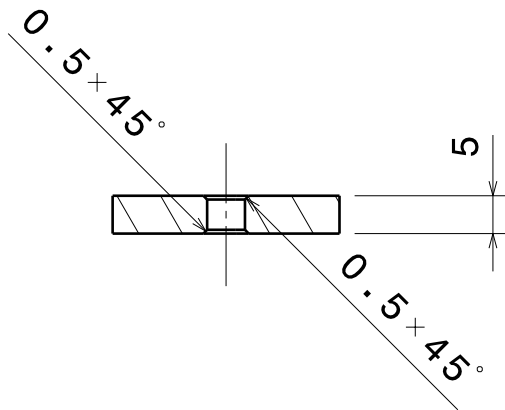
Schnitt A-A  
Maßstab: 1:1



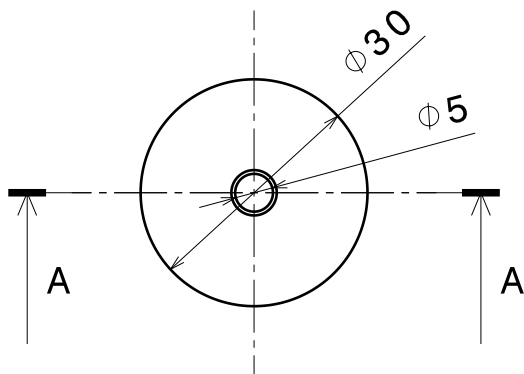
Vorderansicht  
Maßstab: 1:1

Komponenten für den Modellversuch				DIN ISO 2768-f		√ Rz20	Maßstab 1:1	Stück: 2	
				Material: Stahl					
				Datum	Name	<b>Distanzscheibe 5mm D8</b>			
				Bearb	23.08.16				Allermann
				Gepr.					
				Norm					
				 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences			Sebastian Allermann		
							Blatt A4		
							Bl.		
Zust	Änderung	Datum	Name	Urspr.			Ers. f.:	Ers. d.:	




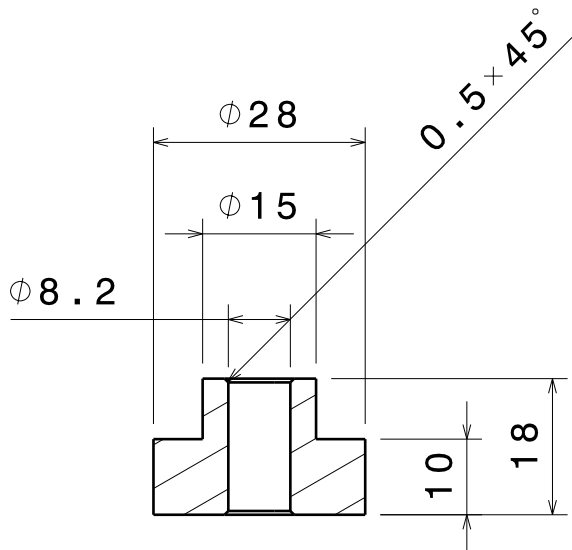


Schnitt A-A  
Maßstab: 1:1

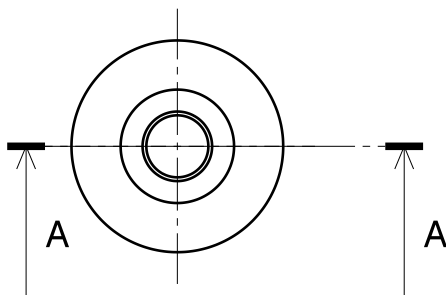


Vorderansicht  
Maßstab: 1:1

Komponenten des Modellversuchs				DIN ISO 2768-f		√ Rz20	Maßstab 1:1		0	
				Werkstoff: Stahl						
				Datum	Name		<b>Distanzscheibe klein Modellversuch</b>			
				Bearb	23.08.16	Allermann				
				Gepr.						
				Norm						
				 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences			Sebastian Allermann			Blatt A4
							Ers. f.:			Ers. d.:
Zust	Änderung	Datum	Name	Urspr.					Bl.	

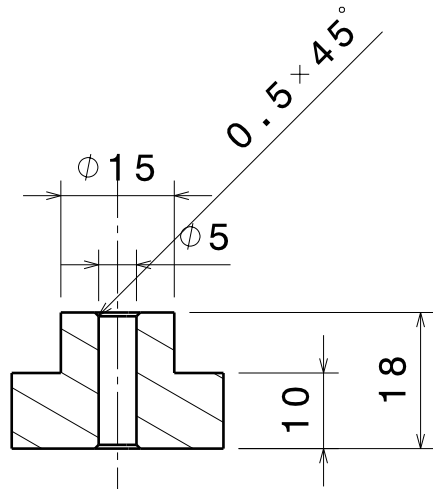


Schnitt A-A  
Maßstab: 1:1

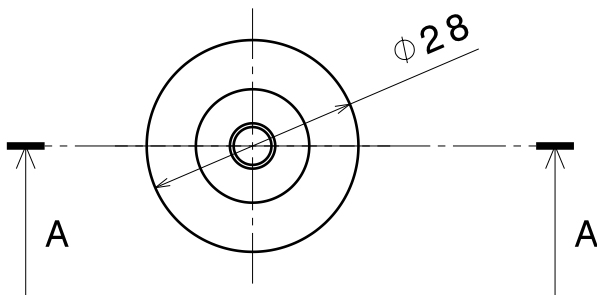


Vorderansicht  
Maßstab: 1:1

Komponenten für den Modellversuch				DIN ISO 2768-f		Rz20	Maßstab 1:1	Stück: 1	
				Werstoff: Stahl					
				Datum	Name	Axiallager Aufsatz 8mm			
				Bearb	23.08.16				Allermann
				Gepr.					
				Norm					
				Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences			Sebastian Allermann		Blatt A4
									Bl.
Zust	Änderung	Datum	Name	Urspr.			Ers. f.:	Ers. d.:	

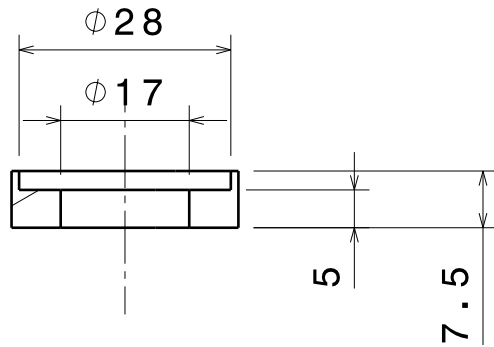


Schnitt A-A  
Maßstab: 1:1

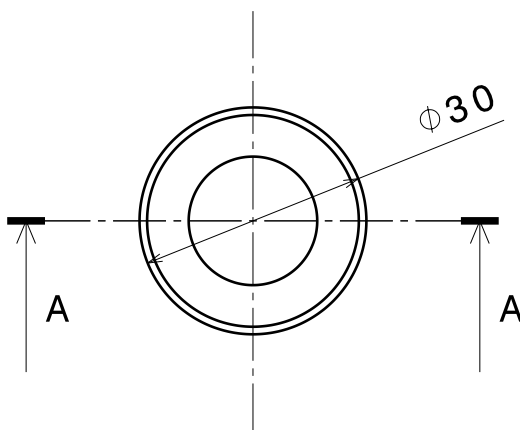


Vorderansicht  
Maßstab: 1:1


Komponenten für den Modellversuch			DIN ISO 2768-f		Rz20	Maßstab 1:1	Stück: 1
					Werkstoff: Stahl		
				Datum	Name	Axiallager Aufsatz 5mm	
			Bearb	23.08.16	Allermann		
			Gepr.				
			Norm				
			Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Sebastian Allermann		Blatt A4
Zust	Änderung	Datum	Name	Urspr.	Ers. f.:	Ers. d.:	



Schnitt A-A  
Maßstab: 1:1



Vorderansicht  
Maßstab: 1:1

Komponenten für den Modellversuch				DIN ISO 2768-f		√ Rz20	Maßstab 1:1	Stück: 2	
				Werkstoff Stahl					
				Datum	Name	<b>Axiallager Einsatz</b>			
				Bearb	23.08.16				Allermann
				Gepr.					
				Norm					
				 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences			Sebastian Allermann		Blatt A4
									Bl.
Zust	Änderung	Datum	Name	Urspr.			Ers. f.:	Ers. d.:	

## **C. Anhang: Wissenschaftliche Veröffentlichung**

# Important parameters for self-tapping screw connections

Andreas MEYER-ESCHENBACH\*, Sebastian ALLERMANN\*

\*Hamburg University of Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering and Production,  
Berliner Tor 21, 20099 Hamburg, Germany  
E-mail: andreas.meyer-eschenbach@haw-hamburg.de

Received August 6, 2016

## Abstract

Design engineers in different branches of industry are using regular bolt connections in addition to more and more self-tapping screw connections. This technology allows a cheaper chipless forming of the thread and minimizes the risk of loosening the screw connection. In this paper, the authors describe the functions of self-tapping screw connections and the most important parameters. Preload over lifetime is very important for the quality and reliability of these connections. Therefore, extensive literature researches were conducted and numerous investigations that have been carried out at the Hamburg University of Applied Sciences are analyzed and discussed in detail. In addition, the latest results of analytical and experimental methods are compared with the experience of mechanical engineers. Selected influences and parameters are pointed out and explained. Some results and conclusions will be shown and summarized in a short and helpful list of recommendations for design engineers. Finally, an outlook shows the further need of research into the engineering design of self-tapping screw connections.

**Key words:** Screw connection, Bolt connection, Chipless forming, Self-tapping, Preload, Plastic, Light alloy, Friction

## 1. Introduction

For the development of new products design engineers have to fulfill an increasing number of product function and maintenance requirements. The need for cheaper production also puts large demands on the product structure, i.e. the layout of the product components and their connections. These connections have to be efficient, reliable, safe and economic and should enable easy assembly, maintenance, disassembly and recycling. Therefore detachable connections are often used. The combination and assembly of parts of different materials can also be realized with detachable connections, especially with bolt and screw connections, Wünsche et. al. (2005). Components and parts made of light alloys or plastics are increasingly connected using self-tapping screw connections.

For this purpose, the pilot hole can be produced in a non-cutting fabrication process, especially through die casting of light alloys or injection molding of plastics. The thread is produced by the self-tapping screw in a chipless forming process. Cost advantages are very important in mass production, for example when it comes to automotive components, household appliances and power tools, Tome (2000). In addition, this technology prevents or minimizes the risk of loosening the screw connection, which is very important for connections with high safety requirements such as in the automotive industry, Egger (2016).

Based on a survey of the literature, relevant facts of screw connections were analyzed and compared, Mahn (2013). Afterwards, open questions of design engineers were discussed and the demands for experimental research clarified. In workshops with four managing engineers, two professors and three research associates, the subsequent test series were planned. The tests were prepared and carried out at the Laboratory of Machine Elements and Tribology, which is part of the Department of Mechanical Engineering and Production, and supported by students finishing their master's theses, Bronstein (2016), Mayer (2016). After the evaluation and interpretation of the test results, the findings were discussed. Finally conclusions and recommendations were made.

## 2. Screw connections and influence of friction

A comprehensive survey of literature was made with a number of 214 references, Mahn (2013). Those with the highest relevance were evaluated and ranked. In further studies updates of literature were also considered. Some of the most relevant references are listed in this paper.

Every bolted joint is a tribological system during the tightening process, Czichos et. al. (2015). The friction between screw head and plate and the friction between external screw thread and internal thread have a major influence on preload, Wiegand et. al. (2007). To simplify further considerations, we will assume that the coefficients of friction between screw head and plate  $\mu_K$  and between external screw thread and internal thread  $\mu_G$  are the same and can be declared as  $\mu_{ges}$ . Also for simplification purposes, we will suppose that scuffing or little surface damages during the tightening process are not relevant and that the friction coefficients will be constant over the entire tightening process.

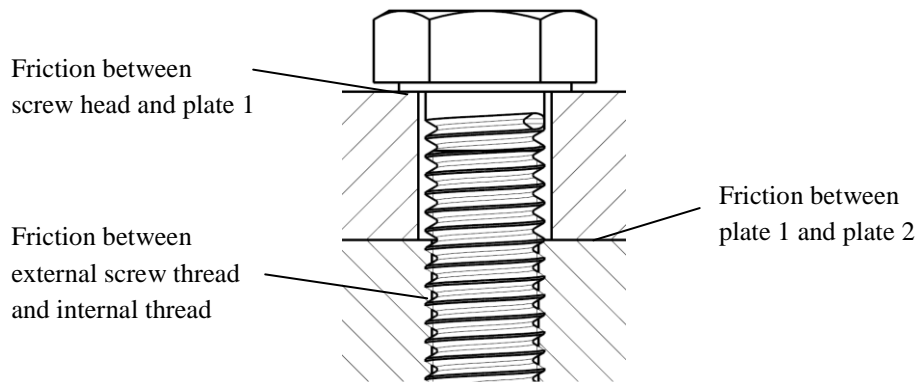


Fig. 1 A hexagonal metric screw connects two parts. The thread is produced in several steps and the screw thread has flank clearance. The flank angle is  $60^\circ$ .  
Source: Mahn (2013)

The tightening torque  $M_A$  is divided into three parts, (see fig. 2). The diagram shows the segmentation of torques acting on a joint with metric screw M10 DIN 931. Plates and screw are made of steel.

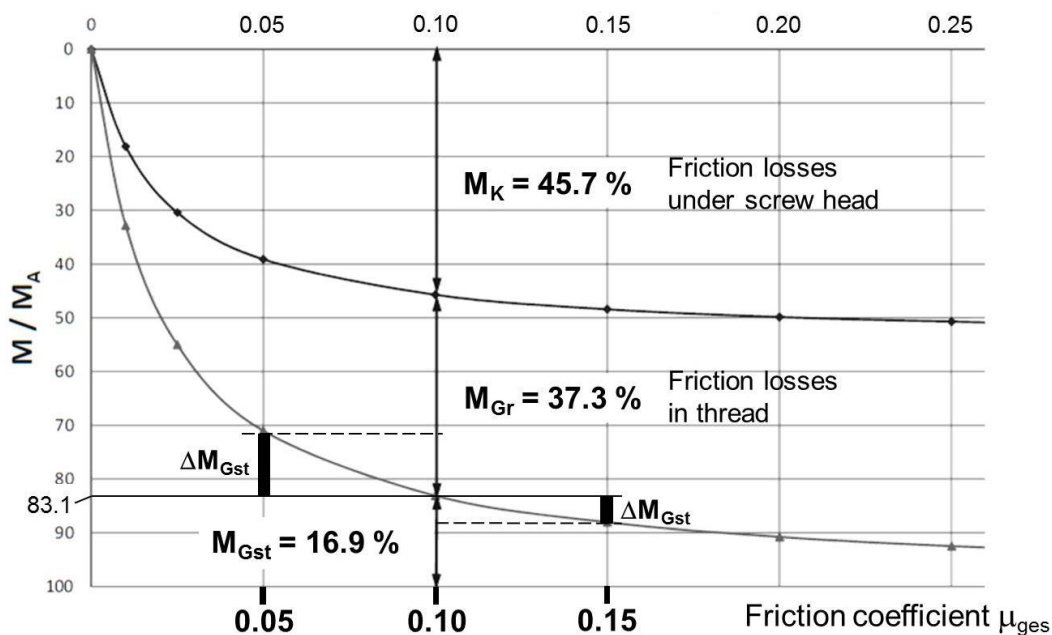


Fig. 2 Two curves show the segmentation of torques acting on a joint with screw M10 DIN 931.  
Source: Mahn (2013), Wiegand et. al. (2007)

In case of friction coefficient  $\mu_{ges} = 0.1$  then 45.7 % of the tightening torque  $M_A$  are necessary to overcome counteracting torque  $M_K$  because of the friction between screw head and plate. In addition 37.3 % of the tightening torque  $M_A$  is needed to counteract torque  $M_{Gr}$  because of the friction between external screw thread and internal thread. Only 16.9 % of the tightening energy can be used for torque  $M_{Gst}$ , which generates preload, Wiegand et. al. (2007), Mahn (2013).

Even a small friction difference has a major impact, has been shown as difference of tightening torque  $\Delta M_{Gst}$  in fig. 2. The distribution of the frictional behavior tends to result in a distribution of the preload force.

Lower friction coefficients in screw connections cause higher preloads. The design engineer can choose a smaller screw and consequently smaller power screw drivers, but then small differences in friction coefficients produce big preload variances. Therefore, expensive tools with electronic measurement are often needed.

Higher friction coefficients in screw connection tools cause lower preloads, which means the design engineer has to choose a bigger screw diameter. Because of higher torques bigger screw drivers are necessary. Small differences in friction coefficients are not as important and the assembly process is more robust.

The correct preload is an important factor in the safe function of a screw connection. Preloads that are too high can destroy the connection due to tensile stress, but preloads that are too low press the parts together insufficiently, meaning vibrations will cause the metric screws to loosen. Because the screw thread has flank clearance the friction between external screw thread and internal thread cannot prevent the loosening. In contrast to metric bolt or screw connections self-tapping screw connections can prevent loosening of the screw.

### 3. Self-tapping screw connections

Self-tapping screw connections are used in high quantities in different branches of industry especially for parts made of light alloys, plastic or wood. In general the production is very simple and the complexity of connections can be reduced to a minimum because nut, lock washers or inserts are not necessary.

#### 3.1 Properties of self tapping screw connections

Chipless forming of the inner thread by the screw itself is one the most important properties. For this purpose, self-tapping screws usually have a thread angle of  $25^\circ - 35^\circ$  for plastic materials instead of  $60^\circ$  for light alloys. Furthermore there is no flank clearance and the risk of loosening the screw is minimized.

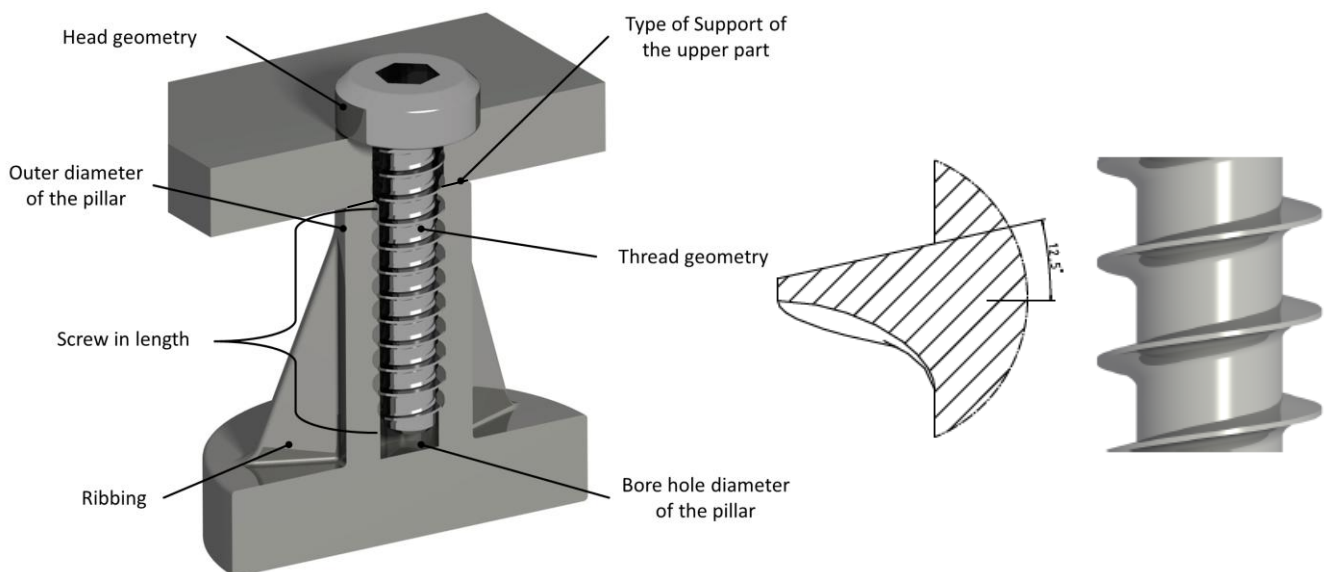


Fig. 3 A self-tapping screw with a thread angle of about  $25^\circ$  connects a plate with plastic dome which is reinforced with ribs. The thread on the right has a special asymmetric geometry (REMFORM®).

Source: Mahn and Meyer-Eschenbach (2013)



### 3.2 Process of tapping and tightening self-tapping screw connections

Direct screw couplings have a different assembly behavior compared to standard metric joints. Assembly is superposed by a forming process. There are two different cases:

Case A: Blind hole - tightening includes tapping torque  $M_t$  and friction due to elastic recovery of the formed material.

Case B: Through bore-hole - tightening includes only the friction due to elastic recovery of the formed material.

In case A, the torques are higher because the forming process is necessary permanently. This process is needed very often for plastic parts. Assembly consists of three phases:

A1: Engaging the screw

A2: Forming the thread and advancing the screw

A3: Tightening the screw, building up preload

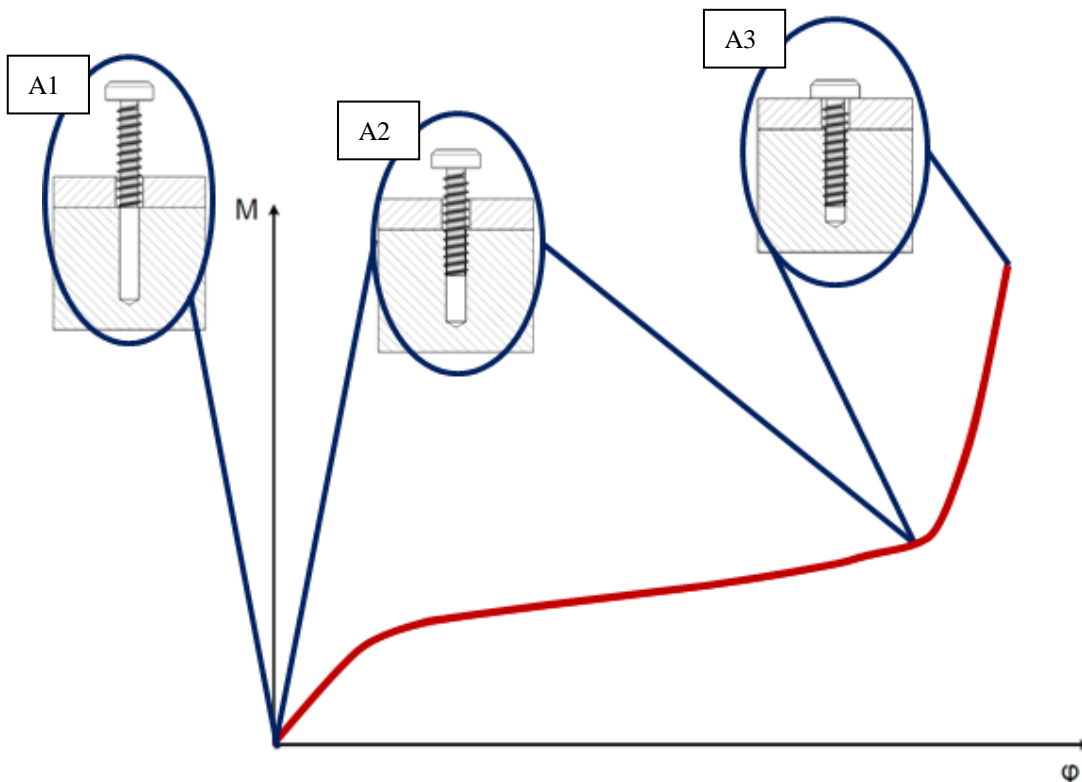


Fig. 4 A self-tapping screw is assembled in a blind hole in three phases. The preload is generated in phase A3 on the right-hand side. The torque  $M$  increases with rotation angle  $\varphi$ .

Source: Mahn and Meyer-Eschenbach (2013)

### 3.3 Parameters for screw connections

Compared to metric screw joints with a prefabricated internal thread, additional factors have an impact on the installation and operating behavior for securing/ensuring the direct screw connection. Special attention is required during screw assembly due to the forming of the thread. Operational safety is mainly dependent on the preload. The preload is dependent on the construction of the bonding element and the thread forming screws as well as on other process parameters. It is very important to know about the characteristics of plastic with regard to specific creep and relaxation, which results in a higher loss of preload, Tome (2000), Ehrenstein (2004).

Figure 5 shows an overview of the influences on direct fasteners divided into parameters of four areas: engineering design, materials, assembly and operation. After analyzing this areas particular relevant parameters were detected: wall thickness, pilot hole diameter, type of support, relaxation and the influence of re-tightening.

Among the influencing parameters of the engineering design, the wall thickness of the screw-in part is very important. In addition to maximum utilization of the material, the component must have a minimum wall thickness to prevent the formation of cracks or even bursting of the component and to ensure the correct function of the screw connection.

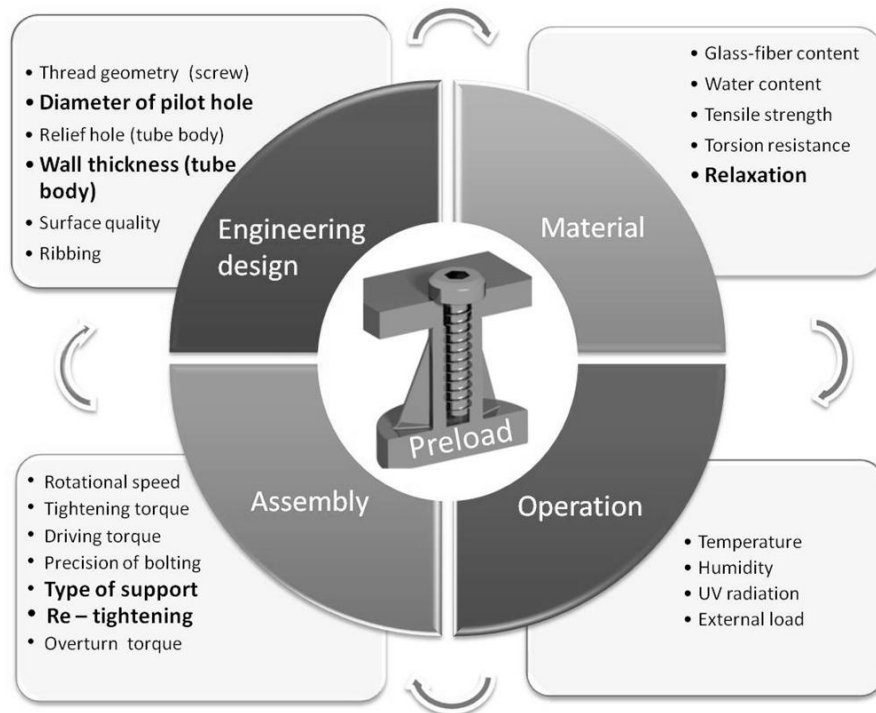


Fig. 5 Direct fastenings are influenced by a number of factors like engineering design, materials, assembly and operation.  
Source: Mahn (2013), Tome (2000)

### 3.4 Type of support

In the stage of embodiment design the design engineer has the choice between the two variants *foot support* and *forehead support*. Depending on the type of support, a different stress curve occurs. There is a distinction between foot support and forehead support, fig. 6. In previous experiments, the plastic part failed due to demolition of the tube when using the foot support. When using the forehead support, the thread of the screw-in part has been known to fail, resulting in a higher overturn torque. In this case, a higher tightening torque  $M_A$  can be selected. If the foot support is used, the area of the predetermined breaking point should be strengthened either by ribbing or using a bigger diameter.

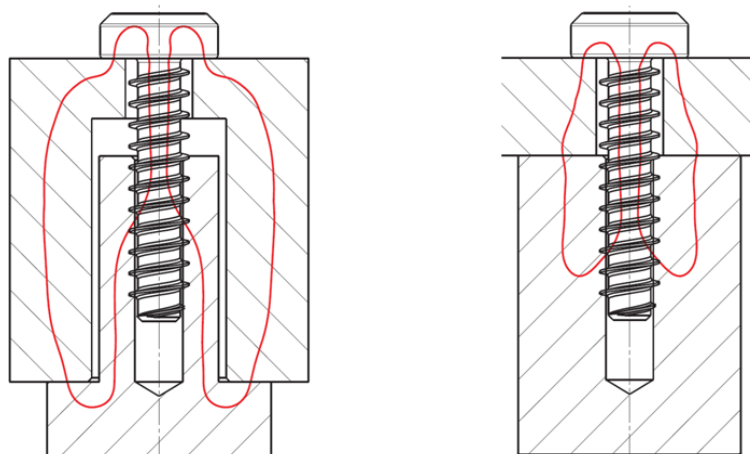


Fig.6 There are two different types of support with different load applications which induce different flow lines of force.  
On the left-hand side: foot support. On the right-hand side: forehead support.  
Source: Mahn (2013)

### 3.5 Diameter of pilot hole

It is also important to choose an optimum pilot hole diameter  $d_K$  of the screw-in part, Tome (2000). A diameter that is too small results in less space for material displacement of the screw-in part. In addition, the driving torque  $M_E$  would increase, resulting in a lower tightening torque  $M_A$  and ultimately less preload. If the diameter of the pilot hole exceeds a certain size, the risk of an overturning screw increases. A smaller stripping torque would result in a very low tightening torque and ultimately in a lower build-up of preload (fig. 7).

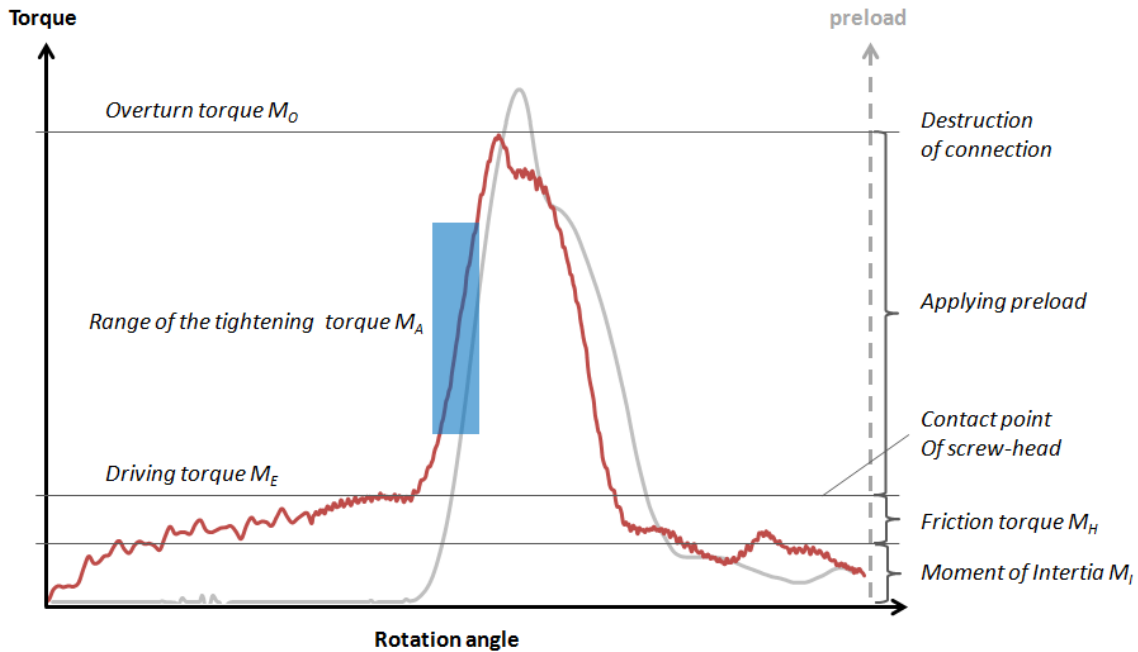


Fig. 7 The optimum threading process has a low driving torque  $M_E$  and a high overturn torque  $M_O$ . This results in a higher torque for the build-up of preload.

Source: Mayer (2016)

## 4. Experimental investigations

The experimental studies at the Hamburg University of Applied Sciences were preceded by a specific experimental design. In chapter 4.1, the exact procedure will be described and explained by investigating the influence parameters.

In order to make qualitative statements about the screw fastening, all relevant parameters must be recorded in compliance with specified tightening parameters. Therefore, the experimental setting and the associated electronic screwdriver equipment of the Laboratory for Machine Elements and Tribology will be explained in detail in chapter 4.2. An overview of the various tests that have taken place is shown in chapter 4.3.

### 4.1 Design of experiments

The aim of the experimental design is to find out which parameters have the largest influence on the direct fastening. Moreover, special attention must be paid to the influences on preload because this is a security-relevant variable for direct fastening in plastic. A design structure matrix was created to filter which tests would make the most sense. Furthermore, the technical feasibility of making an experiment is dependent on the testing machine.

### 4.2 Test equipment

The screw testing machine is equipped with an industrial replacement of the company *Desoutter Industrial Tools Inc.* and has a *1-channel controller CVI3 function* with measuring and control electronics. During a screw assembly process, the variables torque and angle can be detected. As a screwing tool, the model *EID25-1200* is used with a

maximum torque of 25 Nm and a maximum speed of 1200 min<sup>-1</sup>. The torque spread is less than 5%. The screwing tool is located in a tool stand (*D53-100S*) to guide the movements.

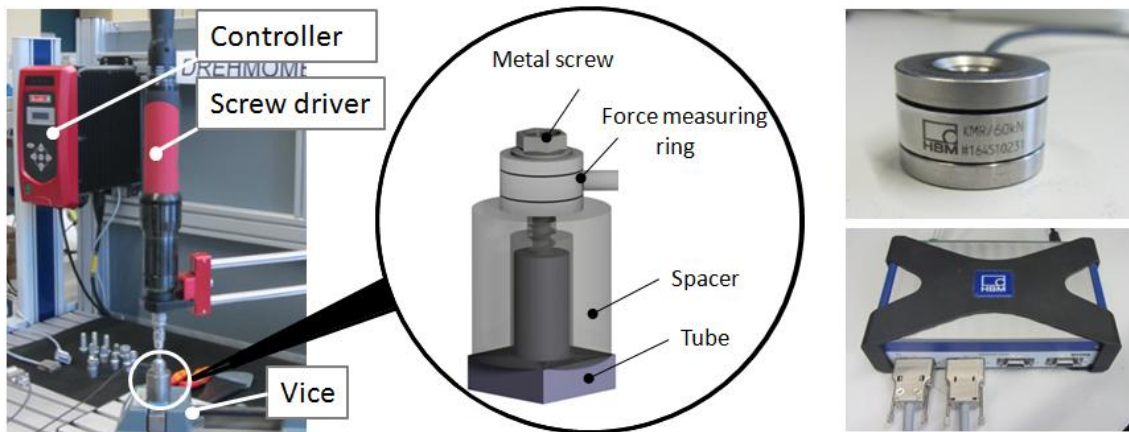


Fig. 8 Test equipment at the Hamburg University of Applied Sciences, consisting of the controller, electric screwdriver and vice on the left-hand side. The force sensor and instrument amplifier can be seen on the right.  
Source: Bronstein (2016)

Sensors by the company *Hottinger Baldwin Inc.* are used to record the preload force  $F_V$ . The additional use of two hardened washers ensures complete force measurement. The force sensor has a linearity deviation of 10 %. For preload measurements based on a pre-stressed state, the force sensors have a high level of accuracy.

The signals of the force are picked up by an instrument amplifier (*HBM MX440A*) and forwarded to the computer.

Software by the name of *catman Easy 3.4.2* is used to record and visualize the preload. The angle of rotation and torque are recorded by the VCI PC 1.30.1.4 program of *Desoutter Industrial Tools Inc.*

### 4.3 Execution of the tests

Figure 9 shows the trial experiments at the Hamburg University of Applied Sciences. The first step involves screw-in and screw-out tests to determine the parameters driving torque  $M_E$ , friction torque  $M_H$  and moment of inertia  $M_I$ . Afterwards, several overturn experiments were carried out to determine the overturn torque  $M_O$  to calculate the optimal tightening torque  $M_A$  for the subsequent tests. In addition, the determined values are used to validate further calculation methods and, if necessary, their own calculation methods. Finally, the re-tightening behavior of the screw connection was studied during various different re-tightening processes.

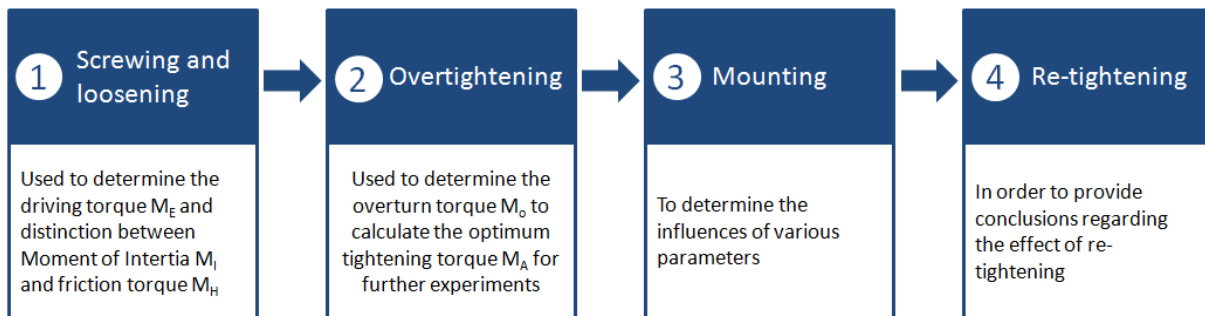


Fig. 9 Systematic process of conditioning the tests to determine the process parameters ( $M_E$ ,  $M_O$ ,  $M_I$ ,  $M_H$ ) in the first step and the influences of various parameters in the second step.  
Source: Mahn (2013)

All tests are carried out by certain specifications such as assembly processes in the industry. The tests were performed at an equal speed and a constant tightening torque of 12 Nm in plastics and 29 Nm in light alloys and serve as specified values for the screwdriver. Measured values are the preload  $F_V$  and tightening torque  $M_A$  over rotation angle  $\varphi$ .

## 5. Results

Three of the most relevant test results of the investigations will be discussed as an exemplary illustration. The influence of the pilot hole diameter  $d_K$  is shown in chapter 5.1. Relaxation in plastics and the influence of re-tightening are discussed in chapter 5.2 and 5.3.

### 5.1 Diameter of pilot hole in parts made of light alloy AlMgSi 0.5 (EN-AW-6060)

The largest pilot hole diameter  $d_K$  is 8.00 mm without thread engagement, and the minimum pilot hole diameter  $d_K$  is 7.19 mm, which corresponds to a thread engagement of 100 percent. A useful range is between 7.35 mm and 7.60 mm. According to the manufacturer, the optimum pilot hole diameter is 7.43 mm with a real thread engagement of 70 percent. Because of the forming process the real thread engagement is bigger than the theoretical engagement.

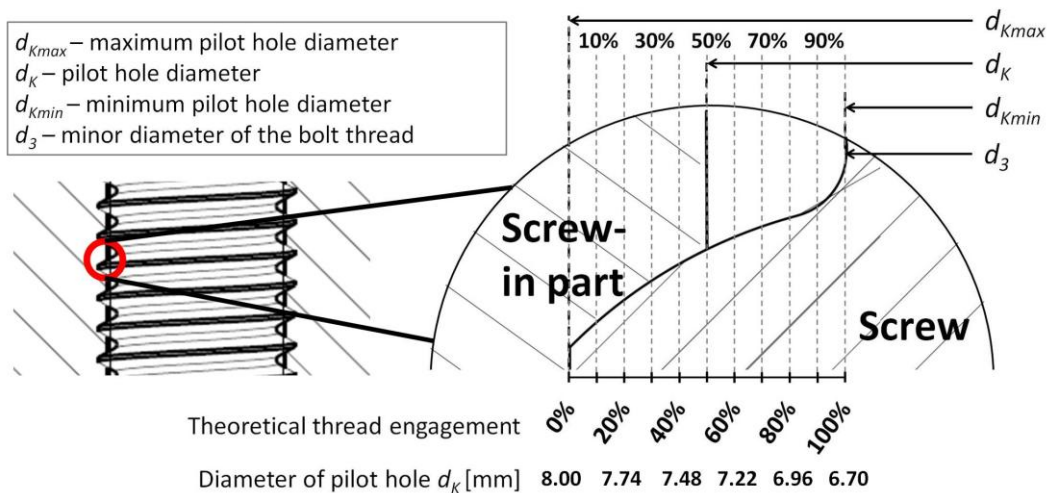


Fig. 10 The diameter of the pilot hole  $d_K$  with theoretical thread engagement between 0 % and 100 % of TAPTITE 2000® M8x55  
Source: Mahn (2013)

In the experiments, the diameter was varied by around 0.1 mm. Based on different production tolerances, other diameters can result. In the first step, the overturn torque  $M_O$  and driving torque  $M_E$  are measured. As the diameter increases, the relation of  $M_O$  to  $M_E$  rises, leading to a higher preload  $F_V$ .

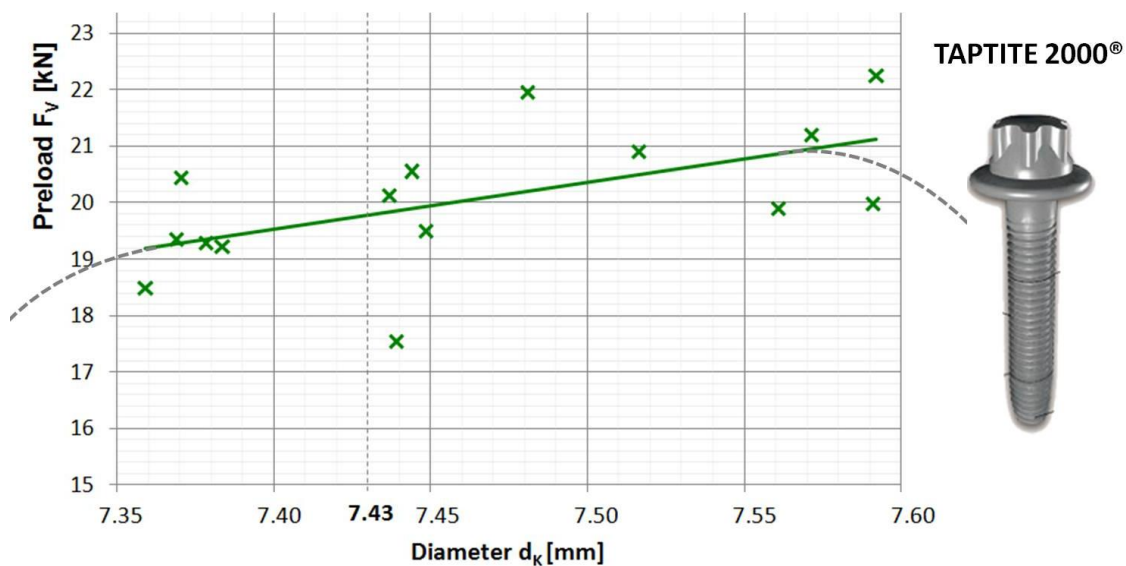


Fig. 11 Impact of the pilot hole diameter  $d_K$  on the preload  $F_V$  with TAPTITE 2000® M8x55. The measured values of preload  $F_V$  show a large spread. The tightening torque  $M_A$  is predetermined at 29 Nm.  
Source: Mayer (2016)



This test series also shows a large variance of the 15 test results which confirms that the parameter  $d_K$  is very sensitive. For a better evaluation more tests are needed, but the number of specimens were planned before and limited.

The tests were carried out in a range of diameters which are relevant for industrial production. For a more intensive discussion of the influences of this diameter also an increased range is absolutely necessary. In the small range near the optimum pilot diameter the linear relation, as shown in fig. 11, will be right, but in the range near the minimum and the maximum diameter the line must be assumed as a descendent curve.

To clarify the important influence of this sensitive parameter the Hamburg University of Applied Sciences will carry out further analytical and experimental investigations.

## 5.2 Relaxation in plastics PP-GF 30

Plastics have a viscoelastic character which causes a relaxation and a loss of preload. Also there are open questions about the influence of relaxation due to time and temperature, Ehrenstein (2004), Yao (2004). Most tests have been carried out by temperatures about 22° C to 25° C.

As seen in fig. 12, the relaxation in is the most important influence on preload. Only 2 seconds after tightening, the preload already drops by 16 % to 26 % in material *Polypropylene 30 % glass fiber* (PP-GF30).

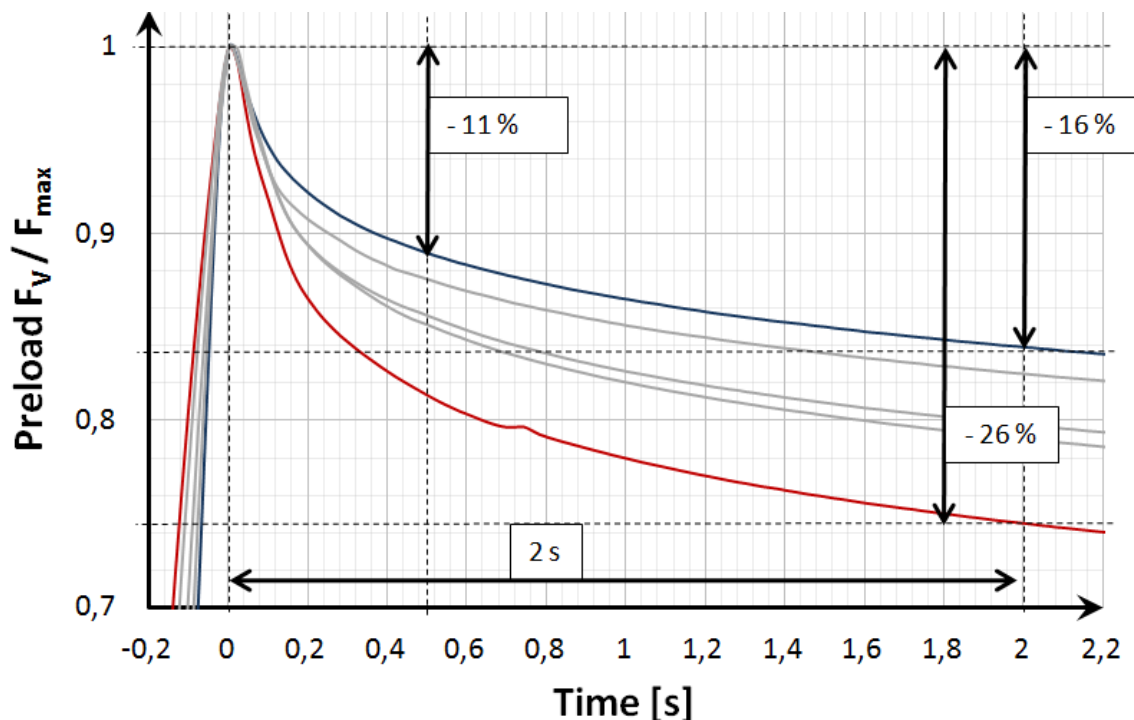


Fig. 12 Impact of relaxation on the preload in material PP-GF 30 with REMFORM® 8x55. The tightening torque  $M_A$  is predetermined at 12 Nm. The temperature  $T$  was around 22 to 25°C.

Source: Mahn (2013)

## 5.3 Re-tightening in plastics PP-GF 30

A static long-term test over nine days with material PP-GF30 was carried out which is shown in fig. 13. The figure demonstrates a preload behavior with re-tightening of the screw after 30 seconds. It can be clearly seen what a significant impact the re-tightening process has on the remaining preload.

After 9 days, the remaining preload is 9 % higher compared to the test without re-tightening. Extrapolated up to 6 months, the graph illustrates a difference in the remaining preload of 11%.

A self-tapping screw connection with re-tightening definitely results in a better long-term behavior. Subsequent tests of re-tightening the screw fastening were mostly limited to 10 minutes due to the highest loss of preload within the first few minutes.

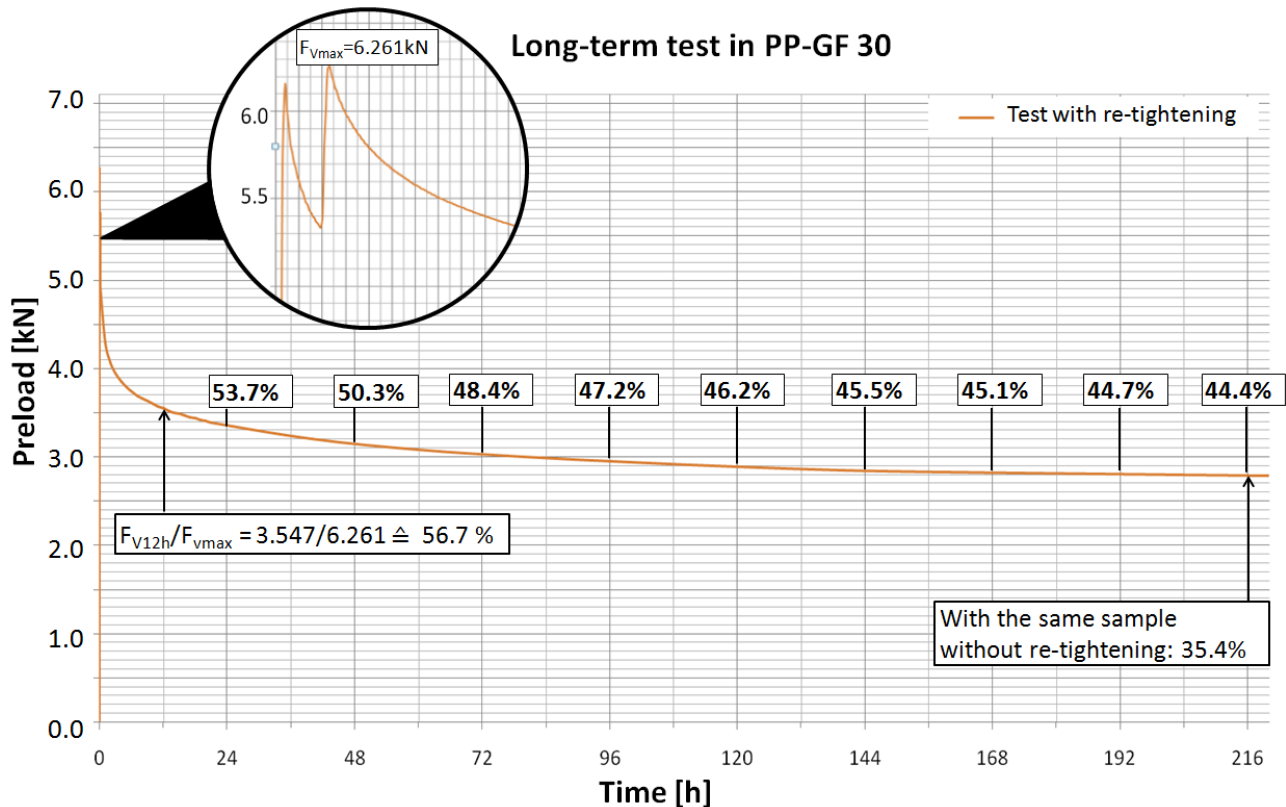


Fig. 13 Long-term test (9 days) with re-tightening after 30 seconds results in a lower relaxation of the plastic. After 9 days, a 9 % difference in remaining preload is recognized.

Source: Meyer-Eschenbach and Schreiner (2015)

## 6. Conclusion and outlook

Design engineers can use different screw connection concepts. The most important parameters of these connections influence preload substantially.

In metric screw connections, tribological properties are outstanding. The friction under the screw head and the friction in the thread are important and have a major impact on preload.

With self-tapping screw connections for parts made of light alloys, the diameter of the pilot hole is significant. Chipless production of the pilot hole is possible, but the process quality will be much better with a drilled pilot hole because of lower tolerances of the diameter.

With self-tapping screw connections for parts made of plastic, relaxation is the most important influence on preload. Only 2 seconds after tightening, the preload already drops by 16 % to 26 %. Test series of self-tapping screw connections with re-tightening after 2 seconds were successful.

Finally, self-tapping screw connections can be recommended for the design process, but test results are necessary for the embodiment design and for quality over lifetime. Hence, further analytical and experimental investigations are needed. Also there are still open questions about the influence of relaxation due to time and temperature.

## References

- Beitz, W. and Küttner, K.-H., *Dubbel Handbook of Mechanical Engineering*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1994).
- Bronstein, K., *Analyse und experimentelle Untersuchung von Direktverschraubungen in Kunststoffen*, master`s thesis, Hamburg University of Applied Sciences (2016).
- Czichos, H. and Habig, K.-H., *Tribologie Handbuch*, Springer-Vieweg, Wiesbaden (2015).
- Dratschmidt, F. *Zur Verbindungstechnik von glasfaserverstärktem Polyamid*, dissertation. University of Erlangen-Nürnberg : s.n., (1999).
- Egger, P., *Vorspannkraftverhalten von gewindefurchenden Schrauben des Typ „TAPTITE 2000“*, Norddeutsches-Kolloquium-Schraubenverbindungen 2016, Hamburg University of Applied Sciences (2016)
- Ehrenstein, G., *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*, 1st edition, Hanser Verlag, (2004)
- Mahn, D., *Konstruktive und prozesstechnische Einflussgrößen bei Direktverschraubungen*, master`s thesis, Hamburg University of Applied Sciences (2013).
- Mahn, D. and Meyer-Eschenbach, A., *Influence of friction on couplings with self-tapping screw connections*. Arnold-Tross-Colloquium, Hamburg University of Applied Sciences (2013).
- Mayer, E., *Analyse und experimentelle Untersuchung von Direktverschraubungen in Leichtmetallen*, master`s thesis, Hamburg University of Applied Sciences (2016).
- Meyer-Eschenbach, A. and Schreiner, I., *Vorspannkraft in Kunststoffdirektverschraubungen*, Norddeutsches-Kolloquium-Schraubenverbindungen 2015, Hamburg University of Applied Sciences (2015).
- Meyer-Eschenbach, A., Bronstein, K. and Mayer, E., *Vorspannkraft in Direktverschraubungen*, Norddeutsches-Kolloquium-Schraubenverbindungen 2016, Hamburg University of Applied Sciences (2016).
- Tome, A.: *Vorspannkraftrelaxation von Kunststoff-Direktverschraubungen*, University of Erlangen-Nuremberg, dissertation (2000).
- Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 2230, part 1, Systematic calculation of highly stressed bolted joints, Joints with one cylindrical bolt* (2015).
- Wiegand, H., Kloos, K.-H. and Thomala, W., *Schraubenverbindungen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2007).
- Wünsche, T., Meyer-Eschenbach, A. and Blessing, L., *Analysis of connections and fasteners to determine disassembly and strength characteristics*. International conference on engineering design, ICED 2005, Melbourne (2005).
- Yao, Yuan: *Polymerwerkstoff-Direktverschraubung: Einsatz von Experiment und Simulation zur Analyse des Vorspannkraftverlaufs*, Kaiserslautern University of Technology, dissertation (2004)





## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: \_\_\_\_\_

Vorname: \_\_\_\_\_

dass ich die vorliegende \_\_\_\_\_ – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der \_\_\_\_\_ ist erfolgt durch:

\_\_\_\_\_  
Ort

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift im Original