



TU Clausthal

Bachelorarbeit

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Evaluation des Werkstoffverhaltens additiv gefertigter Strukturen cellulose- faserhaltiger PLA/PBS-Systeme

Vorgelegt von:

Maximilian Beyer

Hüttenweg 6

38678 Clausthal-Zellerfeld

Matrikel-Nr.: 404893

Betreuer:

Dr. Sc. nat. Leif Steuernagel /

M. Sc. Fabian Hartkopf

Erstgutachter:

Dr. Sc. nat. Leif Steuernagel

Zweitgutachterin:

Prof. Dr. Regina Semmler-Ludwig

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und dass alle Stellen dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht wurden und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt oder veröffentlicht wurde.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich mit der öffentlichen Bereitstellung meiner Abschlussarbeit in der Instituts- und/oder Universitätsbibliothek einverstanden bin.

Datum und Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Symbole und Indizes	VII
Zusammenfassung	IX
Abstract	X
1 Einleitung	1
2 Theorie	2
2.1 (Natur-)Faserverstärkte Kunststoffe	2
2.2 Materialien	3
2.2.1 Polylactid	3
2.2.2 Polybutylensuccinat	3
2.2.3 Cellulosefaser	4
2.3 Additive Fertigung	4
2.3.1 Allgemeines	4
2.3.2 Fused Deposition Modeling Verfahren	7
3 Methodik	9
3.1 Verwendete Materialien	9
3.2 Herstellung der Filamente	10
3.3 Bestimmung der Fasergehalte	11
3.4 Bestimmung geeigneter Druckparameter	11
3.5 Herstellung der Probenkörper	16
3.6 Bestimmung der Flüssigkeitsdurchlässigkeit	16
3.7 Bestimmung der Zugeigenschaften	17
3.8 Bestimmung des Diffusionskoeffizienten	17
3.9 Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften	18
3.10 Übersicht der angewandten Methodik	19
4 Ergebnisse	20
4.1 Filamente	20
4.2 Fasergehalte	21
4.3 Druckprozess	22
4.3.1 Herausforderungen	22
4.3.2 Druckparameter	26
4.3.3 Verarbeitbarkeit	28

4.4	Probekörper	29
4.4.1	Allgemeines.....	29
4.4.2	Maßhaltigkeit.....	30
4.5	Flüssigkeitsdurchlässigkeit.....	33
4.6	Zugeigenschaften.....	39
4.6.1	Allgemeines.....	39
4.6.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Bruchbilder.....	40
4.6.3	Vergleich der Kennwerte	42
4.7	Diffusionskoeffizient	47
4.8	Dynamisch-mechanische Eigenschaften.....	52
4.8.1	Allgemeines.....	52
4.8.2	Vergleich der Kennwerte	56
5	Fazit.....	61
6	Ausblick	64
7	Literaturverzeichnis	65
8	Anhangsverzeichnis	70
9	Anhang	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsprinzip der additiven Fertigung	5
Abbildung 2: Kernbegriffe und Einteilung der Additiven Fertigung.....	6
Abbildung 3: Prinzip des Fused Deposition Modeling Verfahrens	7
Abbildung 4: Temperatorturm mit eingezeichneten Stufen	13
Abbildung 5: Kalibrierungswürfel mit Seitenlängen.....	14
Abbildung 6: Betroffene Proben des Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches	17
Abbildung 7: Herstell- und Versuchsablauf.....	19
Abbildung 8: Hergestellte Filamente	20
Abbildung 9: Hergestellte Filamentstränge	21
Abbildung 10: Aufbauänderungen des FDM-Druckers	23
Abbildung 11: Bauliche Änderungen am Schrittmotor	24
Abbildung 12: Filamentinduzierte Druckprobleme	25
Abbildung 13: Herausforderungen der <i>Arburg</i> -Druckplatte.....	25
Abbildung 14: Evaluationsstrukturen der Druckparameter	26
Abbildung 15: Im FDM-Verfahren hergestellte Probekörper F1-F5	30
Abbildung 16: Beispiele der ausgestanzten Proben	30
Abbildung 17: Messpunkte der Zugprobe	31
Abbildung 18: Messmethodik Zugproben	31
Abbildung 19: Versuchsabschnitt I des Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches	34
Abbildung 20: Ergebnisse auf dem Zellstoffpapier	34
Abbildung 21: Versuchsabschnitt II des Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches	35
Abbildung 22: Versuchsabschnitt III des Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches	36
Abbildung 23: Ergebnisse des 10 Stunden Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches .	37
Abbildung 24: Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuch mit Zugproben	38
Abbildung 25: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F1_80.....	41
Abbildung 26: Bruchstellen der Proben F1_80 nach der Zugprüfung	41
Abbildung 27: Mittleres Elastizitätsmodul der Materialien.....	45
Abbildung 28: Mittlere Zugfestigkeit der Materialien	46
Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf der Feuchtaufnahme der Proben F1-F5	48
Abbildung 30: Mittlerer Diffusionskoeffizient der Materialien	51
Abbildung 31: Ergebnisse der DMA des Materials F5_90_1	53
Abbildung 32: Ergebnisse der DMA der Materialien F1_100_3 und F5_100_1.....	54

Abbildung 33: Mittlere Speichermoduln bei den Temperaturen 0-, 21-, 42 °C.....	59
Abbildung 34: Mittlerer Verlustfaktor bei den Temperaturen 0-, 21-, 42 °C	60
Abbildung 35: Aufwickereinheit der Filamentspulen.....	72
Abbildung 36: Technische Zeichnung der Zugprobe	73
Abbildung 37: Evaluationsstrukturen des Materials F1	75
Abbildung 38: Evaluationsstrukturen des Materials F2	75
Abbildung 39: Evaluationsstrukturen des Materials F3	76
Abbildung 40: Evaluationsstrukturen des Materials F4	76
Abbildung 41: Evaluationsstrukturen des Materials F5	77
Abbildung 42: Gefertigte Prüfkörper des Materials F1	78
Abbildung 43: Gefertigte Prüfkörper des Materials F1	79
Abbildung 44: Gefertigte Prüfkörper des Materials F3	80
Abbildung 45: Gefertigte Prüfkörper des Materials F4	81
Abbildung 46: Gefertigte Prüfkörper des Materials F5	82
Abbildung 47: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F1_90.....	88
Abbildung 48: Bruchbilder der Proben F1_90.....	88
Abbildung 49: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F1_100.....	89
Abbildung 50: Bruchbilder der Proben F1_100.....	89
Abbildung 51: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F2_80.....	90
Abbildung 52: Bruchbilder der Proben F2_80.....	90
Abbildung 53: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F2_90.....	91
Abbildung 54: Bruchbilder der Proben F2_90.....	91
Abbildung 55: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F2_100.....	92
Abbildung 56: Bruchbilder der Proben F2_100.....	92
Abbildung 57: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F3_80.....	93
Abbildung 58: Bruchbilder der Proben F3_80.....	93
Abbildung 59: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F3_90.....	94
Abbildung 60: Bruchbilder der Proben F3_90.....	94
Abbildung 61: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F3_100.....	95
Abbildung 62: Bruchbilder der Proben F3_100.....	95
Abbildung 63: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F4_80.....	96
Abbildung 64: Bruchbilder der Proben F4_80.....	96
Abbildung 65: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F4_90.....	97
Abbildung 66: Bruchbilder der Proben F5_ 90.....	97

Abbildung 67: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F4_100.....	98
Abbildung 68: Bruchbilder der Proben F4_100.....	98
Abbildung 69: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F5_80.....	99
Abbildung 70: Bruchbilder der Proben F5_80.....	99
Abbildung 71: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F5_90.....	100
Abbildung 72: Bruchbilder der Proben F5_90.....	100
Abbildung 73: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F5_100.....	101
Abbildung 74: Bruchbilder der Proben F5_100.....	101
Abbildung 75: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F1	102
Abbildung 76: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F2	102
Abbildung 77: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F3	103
Abbildung 78: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F4	103
Abbildung 79: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F5	104
Abbildung 80: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F1_80.....	108
Abbildung 81: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F1_90.....	109
Abbildung 82: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F1_100.....	110
Abbildung 83: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F22_80.....	111
Abbildung 84: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F2_90.....	112
Abbildung 85: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F2_100.....	113
Abbildung 86: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F3_80.....	114
Abbildung 87: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F3_90.....	115
Abbildung 88: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F3_100.....	116
Abbildung 89: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F4_80.....	117
Abbildung 90: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F4_90_1 und F4_90_2....	118
Abbildung 91: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F4_90_3 und F4_90_4....	119
Abbildung 92: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F4_100.....	120
Abbildung 93: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F5_80.....	121
Abbildung 94: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F5_90_1 und F5_90_2..	122
Abbildung 95: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F5_90_3 und F5_90_4..	123
Abbildung 96: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F5_100.....	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Material, Markenname und Hersteller der verwendeten Materialien	9
Tabelle 2: Extrusionsparameter Herstellungsschritt 1	10
Tabelle 3: Extrusionsparameter Herstellungsschritt 2	11
Tabelle 4: Feststehende Parameter	12
Tabelle 5: Zu evaluierende Parameter	12
Tabelle 6: Fehlerszenarien und Einflussparameter	15
Tabelle 7: Versuchsparameter des Einlagerungsversuches.....	18
Tabelle 8: Bandbreite der hergestellten Filamentdurchmesser.....	21
Tabelle 9: Analysierte Fasergehalte der Filamente	22
Tabelle 10: Druckparameter der Filamente	28
Tabelle 11: Verarbeitbarkeit der Filamente.....	29
Tabelle 12: Mittlere absolute prozentuale Abweichungen der Zugproben	33
Tabelle 13: Beobachtungen zu den Abbildungen 26 und 27	42
Tabelle 14: Kurventypverläufe aller getesteten Proben	55
Tabelle 15: Reihenfolge der Materialien des Speichermoduls.....	56
Tabelle 16: Vergleich des Elastizitätsmoduls mit dem Speichermodul	57
Tabelle 17: Einfluss der Materialparameter auf die Materialeigenschaften	63
Tabelle 18: Messprotokoll der Fasergehaltsanalyse.....	74
Tabelle 19: Maße der Zugproben	83
Tabelle 20: Kennwerte der Einzelmessung aus dem Zugversuch	85
Tabelle 21: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Materialien.....	87
Tabelle 22: Messprotokoll Einlagerungsversuch	104
Tabelle 23: Mittelwerte der Diffusionskoeffizienten.....	107
Tabelle 24: Mittlerer Speichermodul und mittlerer Verlustfaktor der Materialien.....	125

Symbole und Indizes

Symbole:

Zeichen	Bedeutung	Einheit
b	Breite	mm
d	Dicke	mm
ε_m	Dehnung bei Zugfestigkeit	%
E-Modul	Elastizitätsmodul	MPa
E'	Speichermodul	MPa
E''	Verlustmodul	MPa
F_2, F_1	Feuchtegehalt der Probe zu verschiedenen Zeiten t_2 und t_1	%
F_0	Feuchtegehalt der Probe zu Beginn des Einlagerungsversuches	%
F_{max}	Sättigungsfeuchtigkeitsgehalt	%
h	Höhe	mm
$l_{i,gemessen}$	Länge des real gemessenen Maßes	mm
$l_{i,CAD-Modell}$	Länge des im CAD konstruierten Maßes	mm
M	Masse	g
n	Anzahl der Messwerte	-
rpm	Rotationen pro Minute	1/min
σ_m	Zugfestigkeit	MPa
t	Zeit	s
$\tan \delta$	Verlustfaktor	-
v	Variationskoeffizient	%
wt	Weight Percent (Gewichtsprozent, Massenanteil)	%
w_i	Massenanteil	%
$\bar{x}$	Empirischer Mittelwert	variabel
x_i	Messwert	variabel

Indizes und Abkürzungen

B	Breite
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
DCM	Dichlormethan
DMA	Dynamisch-Mechanische Analyse
F1-F5	Hergestellte Filamente
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
H	Höhe
HDPE	High Density Polyethylen
L	Länge
LDPE	Low Density Polyethylen
LLM	Layer Laminate Manufacturing
MAPE	Mittlerer absoluter prozentualer Fehler
PBS	Polybutylensuccinat
PE	Polyethylen
PLA	Polylactid
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
RM	Rapid Manufacturing
SL	Stereolithografie
SLS	Selektives Lasersintern
SLM	Selektives Laserschmelzen

Zusammenfassung

Um die Materialeigenschaften additiv gefertigter Strukturen cellulosefaserhaltiger PLA/PBS-Systeme (Verhältnis 8:2) zu untersuchen, wurden zunächst Filamente mit unterschiedlichen Fasergehalten extrudiert, die im FDM-Verfahren zu Prüfkörper weiterverarbeitet wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden der Einfluss des Fasermassenanteils in den Schritten 0-, 8,66-, 18,01-, 25,74-, 29,15 % und der gedruckte Füllgrad 80, 90, 100 % der Prüfkörper auf die Verarbeitbarkeit, die Maßhaltigkeit der Probekörper, die Flüssigkeitsdurchlässigkeit, die Zugeigenschaften, den Diffusionskoeffizienten und die dynamisch-mechanischen Eigenschaften untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass die Prozessstabilität und Druckbetthaftung mit höheren Fasergehalten steigen und damit die Verarbeitbarkeit des Materials steigt. Der Fasergehalt oder der gedruckte Füllgrad von Prüfkörpern hat im Kontext dieser Arbeit keinen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der Bauteile. Die Versuche zu den Flüssigkeitsdurchlässigkeitseigenschaften der Proben weisen eine Durchlässigkeit der Proben gegenüber Kaffeelösung bei den Füllgraden von 80- und 90 % und eine Undurchlässigkeit bei 100 % bzw. eine Unabhängigkeit gegenüber dem Fasergehalt nach. Für die im Zugversuch verglichenen Zugfestigkeiten und Elastizitätsmoduln kann für einen zunehmenden Füllgrad ein Anstieg beider Kennwerte dokumentiert werden. Der Einfluss des Fasergehaltes lässt sich für beide Kennwerte nicht eindeutig zuordnen, da die Zugfestigkeit für die Fasergehalte 0-25,74 wt-% sinkt und danach (25,74-29,15 wt-%) wieder steigt. Der Elastizitätsmodul steigt von 0-8,66 wt-% Faseranteil, fällt zwischen 8,66-18,01 wt-% und steigt erneut von 18,01-29,15 wt-%. Der Einlagerungsversuch belegt mit steigendem Fasergehalt eine steigende maximale Feuchtigkeitssorption und steigende Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsaufnahme. Ein Einfluss des Fasergehaltes und des Füllgrades ist unter den gegebenen Bedingungen nicht beobachtbar. Die dynamisch-mechanischen Eigenschaften, verglichen an drei verschiedenen Temperaturen über den Speichermodul und den Verlustfaktor, zeigen analog zum Zugversuch für den Speichermodul einen Einfluss des Füllgrades. Ein Einfluss des Fasergehaltes kann nicht nachgewiesen werden.

Abstract

In order to investigate the material properties of additively manufactured structures of PLA/PBS systems containing cellulose fibers (ratio 8:2), filaments with different fiber contents were first extruded, which were further processed into test specimens in the FDM process. The influence of the fiber mass fraction in the steps 0-, 8.66-, 18.01-, 25.74-, 29.15 % and the filling-ratio 80, 90, 100 % of the test specimens were evaluated on the processability, the dimensional accuracy of the test specimens, the liquid permeability, the tensile properties, the diffusion coefficient and the dynamic-mechanical properties. The investigations show that process stability and print bed adhesion increase with higher fiber contents, thus increasing the processability of the material. In the context of this work, the fiber content (weight percent) or the printed filling level of test specimens has no influence on the dimensional accuracy of the components. The tests on the liquid permeability properties of the specimens demonstrate a permeability of the specimens to coffee solution at the 80- and 90 % infill level, an impermeability at 100 % and an independence to the fiber weight percentage. For the tensile strengths and elastic moduli compared in the tensile test, an increase of both properties can be documented for a rising infill. The influence of the fiber content cannot be clearly assigned for both characteristic values since the tensile strength decreases for fiber contents 0-25.74 wt-% and then increases again (25.74-29.15 wt-%). The elastic modulus increases from 0-8.66 wt-% fiber content, drops between 8.66-18.01 wt-%, and increases again from 18.01-29.15 wt-%. The storage test proves an increasing maximum moisture sorption and increasing speed of moisture absorption with increasing fiber content. An influence of the fiber content and the infill level cannot be observed under the given conditions. The dynamic mechanical properties, compared at three different temperatures via the storage modulus and the loss factor, show an influence of the filler content similar to the tensile test for the storage modulus. An influence of the filler content cannot be proven.

1 Einleitung

Sowohl durch ein zunehmendes Umweltbewusstsein in Politik und Industrie und der damit einhergehenden Frage der Lagerung bzw. Entsorgung von Kunststoffen als auch durch die immer weiter zunehmende Sorge um begrenzte fossile Ressourcen haben Biokompositwerkstoffe in den letzten Jahren stark an Interesse gewonnen. [Endres, 2009, Ostrowska, 2019, Su, 2019]

Die aus Biopolymeren und Naturfasern bestehenden Biokompositwerkstoffe können aus nachwachsenden Rohstoffen produziert werden und haben meist hervorragende Entsorgungseigenschaften. [Endres, 2009]

Eine beliebte Kombination aus biologisch abbaubaren Polymeren, welche die eben genannten Eigenschaften erfüllt und bereits in der Verpackungs-, Medizin- und Pharmabranche eingesetzt wird, ist ein Compound aus Polylactid (PLA) und Polybutylensuccinat (PBS). Die spezifischen Materialeigenschaften dieser Compounds wurden bereits in der Vergangenheit in einigen Studien untersucht. Dabei schränkt die thermodynamisch begünstigte biphasische Zusammensetzung oftmals ihre Anwendung ein. [Ostrowska, 2019, Su, 2019]

Der in dieser Arbeit verwendete 3D-Druck lässt eine Kombination der erwähnten Materialien und komplexer Geometrien zu und könnte die bisherigen Anwendungsmöglichkeiten z. B. im hochtechnischen Bereich erweitern.

In der vorliegenden Arbeit werden aus diesem Grund cellulosefaserverstärkte PLA/PBS Filamente mit unterschiedlichen Fasergehalten für den 3D-Druck im Fused Deposition Modeling (FDM) Verfahren hergestellt. Anschließend werden mit Hilfe des 3D-Druckes von Vergleichsstrukturen geeignete Druckparameter entwickelt, die zur Herstellung der für die Materialanalyse notwendigen Prüfkörper dienen.

Im Kontext dieser Arbeit werden anhand der Prüfkörper die Flüssigkeitsdurchlässigkeit, der Diffusionskoeffizient, die dynamisch-mechanischen Eigenschaften und die Zugeigenschaften der Materialien analysiert. Zusätzlich werden die Verarbeitbarkeit der Materialien und die Maßhaltigkeit der im FDM-Verfahren gefertigten Prüfkörper verglichen. Ziel der Arbeit ist, den Einfluss der verschiedenen Fasergehalte und den Füllgrad der Innenstruktur auf die eben genannten Eigenschaften zu untersuchen und ggf. den maximal druckbaren Fasergehalt dieser Werkstoffkombination zu finden.

2 Theorie

2.1 (Natur-)Faserverstärkte Kunststoffe

Bei der Werkstoffgruppe der faserverstärkten Kunststoffe (FVK) handelt es sich grundsätzlich um einen Werkstoff, der aus einer Verstärkungsfasern und Kunststoff-Matrix besteht. Wenn die eingesetzten Fasern nativer Herkunft sind, kann der Kunststoff als naturfaserverstärkt bezeichnet werden. Die Fasern, die in der Regel eine viel höhere Festigkeit und Steifigkeit im Vergleich zur Matrix haben, werden durch adhäsive Wechselwirkungen an die Matrix gebunden. Die Matrix umgibt dabei die Fasern, hält diese zusammen, fixiert diese in ihrer Ausrichtung und schützt sie vor Umwelteinflüssen. [Witten, 2014]

Diese Kombination führt dazu, dass der konstruierte Werkstoff viel höhere mechanische Spannungen aufnehmen kann und die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Festigkeit und Steifigkeit der Matrix, gesteigert wird. Je nach verwendetem Fasertyp können auch die thermomechanischen Eigenschaften (z. B. die Wärmeformbeständigkeit) verbessert werden. [Erdmann, 2017]

Die mechanischen Eigenschaften von FVK sind daher stark von den verwendeten Werkstoffen und dem Volumenverhältnis von Faser und Matrix abhängig. Außerdem wird die Mechanik von FKV durch die Faserlänge, die Faserorientierung, die Faser-Matrix-Haftung, die Faserverteilung, Fehlstellen und Eigenspannungen beeinflusst. [Ehrenstein, 2006, Hornbogen, 2019, Neitzel, 2014, Parlevliet, 2007, Schmidt, 2013, Witten, 2014]

Es findet, je nach vorhandener Faserverteilung, eine Unterscheidung zwischen Verbundwerkstoff und Werkstoffverbund, statt. Bei einer homogenen Faserverteilung spricht man von einem Verbundwerkstoff. Ist die vorliegende Faserverteilung inhomogen, wie z. B. bei Schichtverbunden, ist dies ein Werkstoffverbund. Eine zusätzliche Einteilung der FVK kann, nach der Länge der verwendeten Fasern, in kurz-(0,1-5,0 mm), lang- (5,0-50,0 mm) und endlosfaserverstärkten (>50,0 mm) Kunststoffen erfolgen. [Ehrenstein, 2006, Schürmann, 2007]

Zu den größten Vorteilen der faserverstärkten Kunststoffe zählen gewichtsbezogene Festigkeit und Steifigkeit (Leichtbaupotential), geringe Wärmeausdehnung, hohe Korrosionsbeständigkeit, hohe Schwingfestigkeit und günstiges Schlagzähverhalten. [Erdmann, 2017]

Die naturfaserverstärkten Kunststoffe haben neben den bereits genannten Vorzügen zusätzlich ökologische (Ressourcenschonung und Kompostierbarkeit) und teilweise ökonomische Vorteile (bspw. im Vergleich zu glasfaserverstärkten Kunststoffen). [FNR, 2015]

2.2 Materialien

Der für diese Arbeit hergestellte Werkstoff gehört aufgrund des verwendeten Fasertyps (Naturfaser), der Faserlänge (150-350 μm) und der homogenen Faserverteilung zur Gruppe der Naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffe.

Im Folgenden werden die Komponenten des Werkstoffes weiter aufgeschlüsselt und erläutert.

2.2.1 Polylactid

Polylactid ist ein aliphatischer Polyester, der entweder aus Milchsäure durch Polykondensation oder Ringöffnungspolymerisation synthetisiert werden kann. Umgangssprachlich wird Polylactid auch als Polymilchsäure bezeichnet. [Domininghaus, 2005]

Polylactid zählt zu den abbaubaren biobasierten Biopolymeren, d. h. der Kunststoff basiert auf nachwachsenden Rohstoffen und ist unter bestimmten Bedingungen (60 °C, 95 % Luftfeuchtigkeit) biologisch abbaubar. Die zur Herstellung des PLA verwendeten Milchsäuren werden durch Fermentation von Zucker, Mais, Stärke oder Traubenzucker erzeugt. [Endres, 2009]

Die Eigenschaften des teilkristallinen thermoplastischen Materials sind die hohe Widerstandsfähigkeit gegen Fette, Feuchte und Alkohol, glänzende und transparente Oberfläche und Modifizierbarkeit je nach Anwendungsfall. [Domininghaus, 2005]

Ohne Additive ist das Material sehr spröde und hat eine geringe Wärmeformbeständigkeit. [Türk, 2014]

Die mechanischen Eigenschaften sind, wie bei anderen konventionellen Polymeren, stark vom Polymerisationsgrad, dem Kristallisationsgrad und der Molekülmasse abhängig. Nehmen diese Parameter zu, so führt dies zu einer Zunahme der Festigkeit (Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul), des elastischen Verformungswiderstandes, der Glasübergangs- und Schmelztemperatur.

[Endres, 2009]

2.2.2 Polybutylensuccinat

Polybutylensuccinat zählt zu den linear aliphatischen Polyestern. Die Herstellung erfolgt durch die Reaktion von Bernsteinsäure und 1,4-Butandiol. Die genannten Ausgangsstoffe können sowohl aus fossilen als auch aus nachwachsenden Rohstoffen (Glucose) gewonnen werden. PBS ist kompostierbar und zersetzt sich in Wasser und zählt daher auch zu den abbaubaren biobasierten Biopolymeren. [Türk, 2014]

Zu den Eigenschaften des Thermoplastes zählen die gute Verarbeitbarkeit und chemische Resistenz. Der Schmelzpunkt liegt bei 90-120 °C (ähnlich wie Polyethylen (PE) mit stark verzweigten Polymerketten (LDPE)) und die Glasübergangstemperatur zwischen -45 °C und -10 °C. Bei der Zugfestigkeit lässt sich PBS zwischen PE und Polypropylen (PP) einordnen und für die Härte kann das Material zwischen Low-Density Polyethylen (LDPE) und High-Density Polyethylen mit schwach verzweigten Polymerketten (HDPE) eingeordnet werden. [Steffen, 2019]

2.2.3 Cellulosefaser

Die zu den pflanzlichen Naturfasern gehörenden Cellulosefasern lassen sich in die natürlichen bzw. nativen (Holzfaser, Baumwolle, etc.) und künstlichen (Rayon, Viskose, Celluloseregeneratfaser) Cellulosefasern einteilen. [Rath, 1952]

Cellulose ist Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände und damit das am häufigsten vorkommende Biopolymer der Erde. Mit einer Bildungsrate von 10^{11} - 10^{12} Tonnen pro Jahr ist Cellulose der bedeutendste nachwachsende Rohstoff. [Klemm, 1998]

Das nichttoxische, geruchs- und farblose Polymer zählt zu den unverzweigten Polysacchariden. Cellulose besteht aus einer β -1,4-glycosidisch verknüpften Poly(anhydroglycopyranose) mit den Wiederholungseinheiten der Cellobiose.

Die für diese Arbeit relevante native Cellulose liegt polydispers vor, d. h. in einer Mischung von Makromolekülen mit mehr oder weniger breiten Molekulargewichtsverteilungen. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Cellulose werden stark von der räumlichen Position der Hydroxylgruppen in Bezug auf ihre benachbarten Moleküle beeinflusst. [Klook, 2008]

2.3 Additive Fertigung

2.3.1 Allgemeines

Viele Begriffe des Themenkomplexes der additiven Fertigung werden öffentlich analog füreinander verwendet. Beispielsweise werden viele der unterschiedlichen Verfahren unter dem Namen „3D-Druck“ zusammengefasst, so Wirth [2017]. Dabei bezeichnet der Terminus der additiven Fertigung eine Technologie und damit ein technisches Konzept.

Die additiven bzw. generativen Fertigungsverfahren basieren alle auf dem gleichen grundlegenden Funktionsprinzip des schichtweisen Aufbaus eines Bauteils. Der allgemeine Ablauf wird anhand von **Abbildung 1** erklärt.

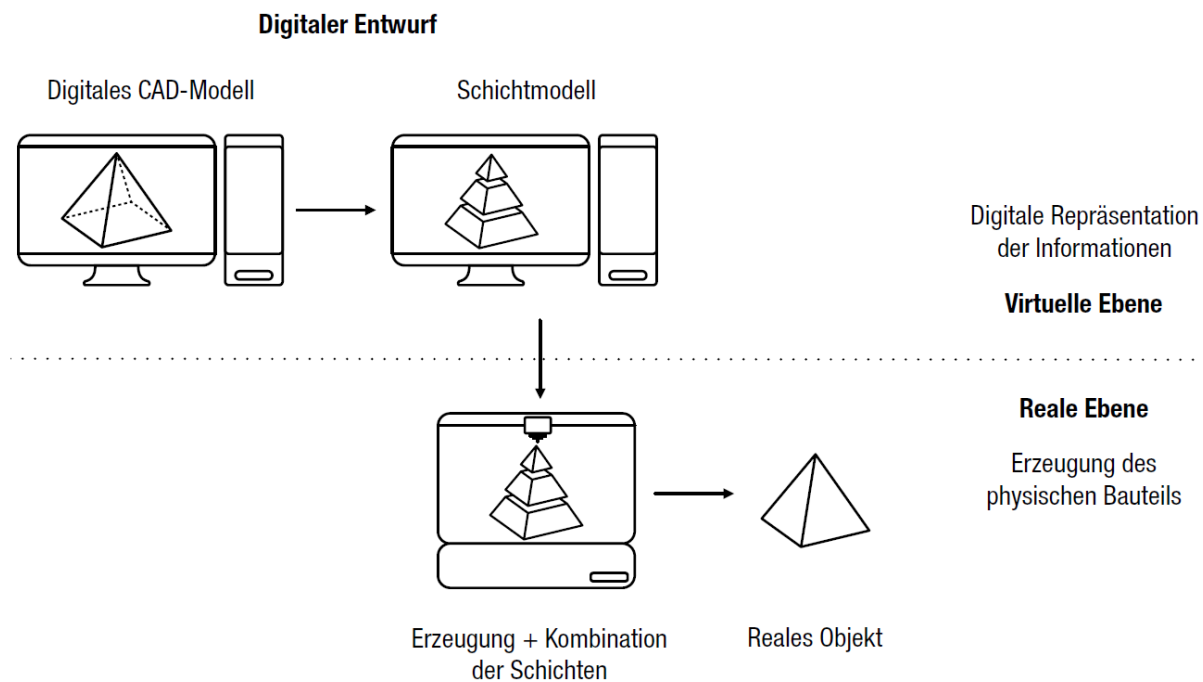


Abbildung 1: Funktionsprinzip der additiven Fertigung [Gebhardt, 2016a]

Im ersten Schritt der additiven Fertigung steht ein digitales Modell des zu fertigenden Bauobjektes. Dies wird in den meisten Fällen mit Hilfe eines CAD-Programmes (Computer Aided-Design) erstellt. Das dreidimensionale CAD-Modell muss im Anschluss, aufgrund des genannten Schicht für Schicht Fertigungsverfahrens, in ein Schichtmodell umgewandelt werden.

Dieser Vorgang wird auch „Slicing“ genannt und wird ebenfalls durch eine Software bewerkstelligt, die aus allen eingestellten Daten den sogenannten G-Code erzeugt, der für Maschinen (wie den Drucker) lesbar ist. Die Daten, in Form des G-Codes, werden dem 3D-Drucker zugeführt und dieser fertigt das reale Objekt durch Erzeugung und Kombination der Schichten. Im letzten Schritt kann eine Nachbearbeitung des Bauteils erfolgen. Dabei werden bspw. Kanten und Oberflächen mechanisch nachbearbeitet, Stützstrukturen entfernt oder Bauteile gereinigt. [Gebhardt, 2016a, Gibson, 2015]

Generell werden die verschiedenen Anwendungszwecke bei der additiven Fertigung unterschieden und deklariert. Im Zusammenhang der Herstellung von Prototypen und Mustern wird die Anwendung als Rapid Prototyping (RP) bezeichnet. Für den Anwendungszweck des Werkzeugbaus nach generativem Funktionsprinzip wird der Begriff des Rapid Toolings (RT) genutzt. Die Bezeichnung Rapid Manufacturing (RM) wird bei der Fertigung von Endprodukten genutzt. [Gebhardt, 2016b, Grund, 2015]

Die genannten Anwendungszwecke können durch verschiedene additive Verfahren realisiert werden. Die 3D-Druck Verfahren werden in der Literatur entweder nach dem Aggregatzustand

der verwendeten Materialien oder nach dem physikalischen Prinzip beim Fügen der Volumenelemente eingeteilt. [Fastermann, 2016, Gao, 2015, Gebhardt, 2016c, Grund, 2015]

Zu den Verfahrensklassen gehört die Polymerisation, bei der eine Verhärtung eines flüssigen Werkstoffes durch die eben genannte Reaktion zu einem Aufbau von Schichten (Grundprinzip) führt. Der etablierte Verfahrensname ist Stereolithografie (SL/SLA). Eine weitere Verfahrensklasse bildet das Pulver-Binder-Verfahren. Der Aufbau der Schichten findet hier durch die Verfestigung beim Einspritzen eines flüssigen Bindemittels in ein Pulverbett statt. [Gebhardt, 2012, Wirth, 2017]

Verfahren wie Selektives Lasersintern (SLS) und Selektives Laserschmelzen (SLM) lassen sich der Verfahrensklasse Sintern und Schmelzen zuordnen. Bei diesen Verfahren wird ein pulverförmiges Ausgangsmaterial am Bearbeitungspunkt des Werkstückes entweder lokal angeschmolzen oder vollständig aufgeschmolzen. [Deckard, 1989, Meiners, 1996]

Eine weitere Verfahrensklasse bildet das physikalische Prinzip der Extrusion. Zu dieser Gruppierung zählt das in dieser Arbeit verwendete und unter dem Markennamen bekannte Fused Deposition Modeling Verfahren (detailliert betrachtet in **Abschnitt 2.3.2**). Bei den auf Extrusion basierenden Verfahren wird das Werkstück mit Hilfe von Schmelzschichtung eines Kunststoffes gefertigt. [Crump, 1989]

Die letzte zu nennende Verfahrensklasse arbeitet nach dem Prinzip des Schicht-Laminats. Das zu dieser Klasse gehörende Layer Laminat Manufacturing (LLM) Verfahren nutzt zugeschnittene Folien, die schichtweise aufeinander verklebt werden. Der Zuschnitt kann dabei über ein Messer, einen heißen Draht oder durch einen Laser erfolgen. [Gebhardt, 2016a]

Ein Überblick der Kernbegriffe und der Verfahrensklassen ist in **Abbildung 2** dargestellt.

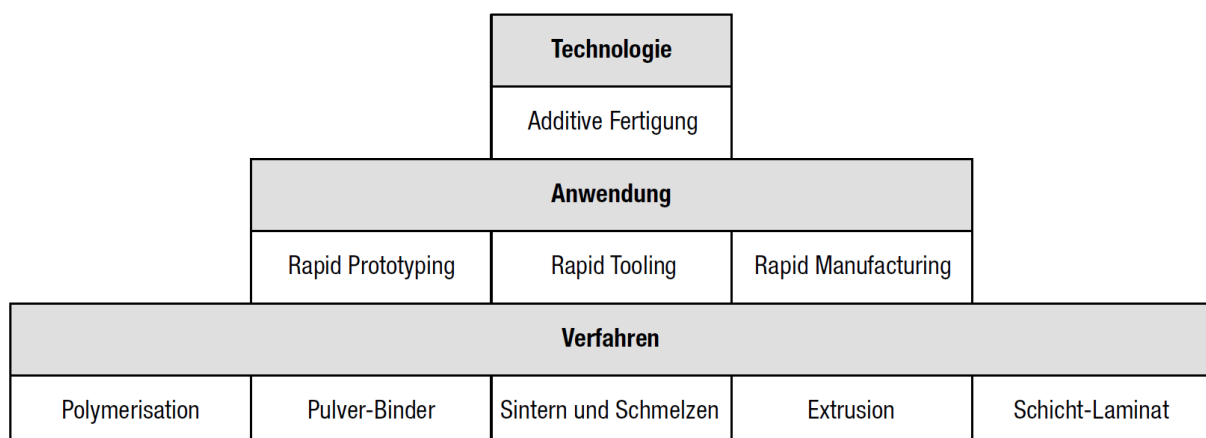


Abbildung 2: Kernbegriffe und Einteilung der Additiven Fertigung [Wirth, 2017]

Neben den verfahrensspezifischen Vor- und Nachteilen bieten alle Verfahrensklassen der additiven Fertigung eine Vielzahl an allgemeinen Vorteilen. Der wohl größte Vorteil aller Verfahren bildet die realisierbare/fertigbare Komplexität der Bauteilgeometrie. Im Vergleich zur subtraktiven Fertigung bietet die additive Fertigung den weiteren Vorteil, dass es nahezu kein Materialverlust gibt. Verfahrensbedingt hat die additive Fertigung, so Gebhardt [2016c] und Grund [2015], zusätzlich den positiven Nutzen der Flexibilität, Funktionsintegration, Individualisierung, Automatisierung, Dezentralisierung und in einigen Fällen der niedrigeren Produktionskosten im Vergleich zu herkömmlichen subtraktiven Verfahren.

Zu den Nachteilen der additiven Fertigung zählen die durch geringe Prozessdrücke und nicht vorhandene Werkzeugoberflächen, geringen mechanischen Eigenschaften und Oberflächenqualität. [Richard, 2017]

2.3.2 Fused Deposition Modeling Verfahren

Das bereits erwähnte Fused Deposition Modeling Verfahren, alternativ auch unter der markenrechtsfreien Bezeichnung Fused Filament Fabrication (FFF) bekannt, ist ein voll automatisches, auf Extrusion basierendes 3D-Druck Verfahren. Das Verarbeitungsmaterial in einer Strangform wird als Filament bezeichnet und hat meist einen Standarddurchmesser von 1,75 mm oder 2,85 mm. Der Prozessablauf wird anhand von **Abbildung 3** erläutert.

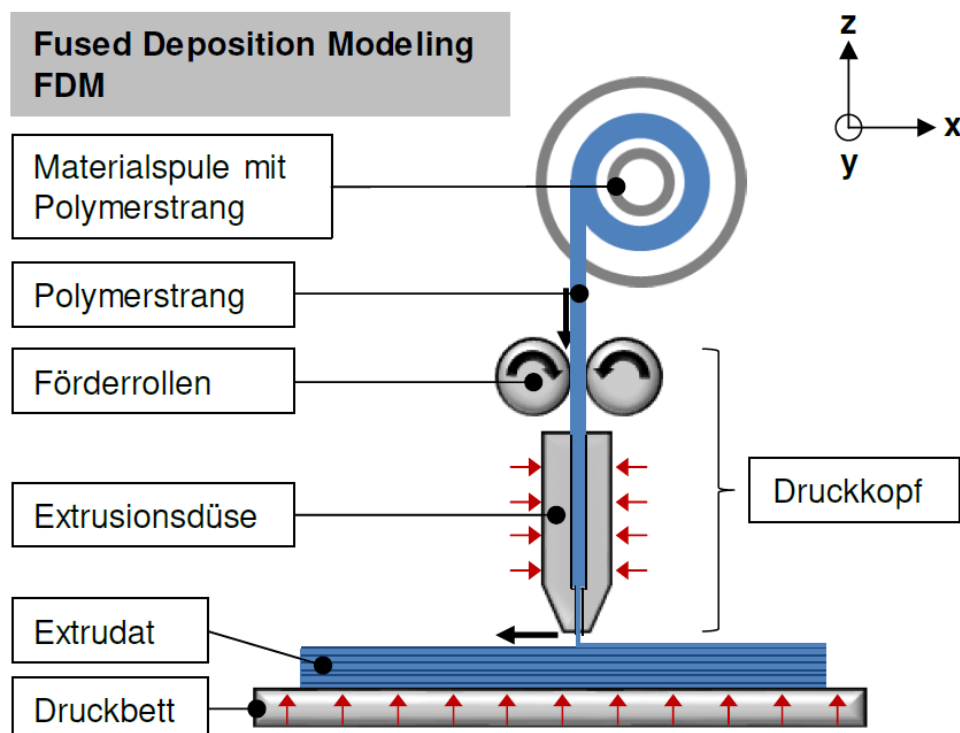


Abbildung 3: Prinzip des Fused Deposition Modeling Verfahrens [Domm, 2020]

Zu Beginn des 3D-Druckprozesses wird das Filament, das in den meisten Fällen auf einer Spule aufgewickelt ist, durch eine Fördereinheit (z. B. einen Schrittmotor) zur Extrusionsdüse in einen PTFE (Polytetrafluorethylen) Schlauch gefördert. Viele der Drucker besitzen im Schrittmotor eine Förderrolle mit gezahnter oder geriffelter Oberfläche, um eine sichere Förderung des Filaments zu gewährleisten. In der Extrusionsdüse wird das Filament aufgeschmolzen und über eine konische oder stufenförmige Querschnittsverengung auf den Düsenausgangsdurchmesser gebracht. Das aufgeschmolzene Filament wird auf dem Druckbett abgelegt, kühlt durch die Umgebungsluft ab und erstarrt. Das Werkstück wird, durch das zeilenweise nebeneinander Ablegen und Stapeln der einzelnen Zeilen bzw. Arbeitsebenen, aufgebaut. Das Ablegen des Extrudats in x- und y-Richtung (s. **Abbildung 3**) wird durch Portalsysteme (bspw. Riemen und Schrittmotoren) oder Delta-Roboter bewerkstelligt. Die Möglichkeit, die einzelnen Schichten zu stapeln und damit in z-Richtung zu verfahren, kann durch das Absenken der Druckplattform oder das Anheben der Düse realisiert werden. Damit die ersten Lagen des Druckprozesses eine ausreichende Haftung haben, kann bei den meisten Druckern das Druckbett beheizt, eine Beschichtung aufgebracht oder auch spezielle Druckplatten eingelegt werden. Bei den meisten Modellen von 3D-Druckern besteht die Möglichkeit, den Druckraum sowohl gegen die Außenwelt zu isolieren als auch diesen zu beheizen. Dies ist vor allem für temperatursensiblere Kunststoffsysteme, wie bspw. Thermoplaste mit hohen Schmelztemperaturen oder teilkristallinen Thermoplasten, wichtig. [Domm, 2020, Gebhardt, 2016c, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2014]

3 Methodik

3.1 Verwendete Materialien

Einige der bereits in Abschnitt 2.2.1 genannten Eigenschaften von PLA sind die Sprödigkeit, geringe Bruchdehnung und geringe Kristallisationsrate des Materials. Diese Eigenschaften schränken die Verarbeitbarkeit und Anwendungsmöglichkeiten im 3D-Druck ein. [Ou-Yang, 2018]

In der Literatur sind verschiedene Methoden dokumentiert, die die Eigenschaften und Verarbeitbarkeit von PLA verbessern können. Dazu zählen unter anderem Plastifizierungsverfahren, die Zugabe von Schlagzähigkeitsmodifikatoren und die Mischung mit anderen Polymeren unterschiedlicher Eigenschaften. Die Mischung von PLA mit PBS in den Untersuchungen von Ostrowska [2019], Su [2019], Qiu [2016] und Zhang [2018] zeigt, dass mit der Zugabe von PBS die Duktilität (Bruchdehnung und Schlagzähigkeit) bei abnehmender Steifigkeit und Festigkeit von PLA gesteigert werden kann. Aus der Untersuchung von Ou-Yang [2018] folgt, dass die Blends dieser Materialien sehr gute Verarbeitungseigenschaften hinsichtlich des 3D-Druckes im FDM-Verfahren besitzen. In der gleichen Studie konnte ebenfalls herausgestellt werden, dass sowohl ein Massenanteil von mindestens 40 % PLA für die Verarbeitbarkeit notwendig ist als auch der Verzug des Bauteils bei höherem PBS Gehalt steigt. Dies geschieht, so Ou-Yang [2018], aufgrund der größeren Volumenschrumpfung, die aus dem höheren Kristallinitätsgrad des Blends resultiert. Zusätzlich erhöht sich mit steigendem PBS Gehalt die Schichthaftung.

Auf Basis dieser gesammelten Erkenntnisse wird für die vorliegende Untersuchung ein Blend aus PLA und PBS in einem festen Verhältnis von 8:2 festgelegt.

Als Verstärkungsfasern des Biokompositwerkstoffes wird native Cellulosefaser genutzt.

Die verwendeten Materialien, deren Markenname und der Hersteller sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Material, Markenname und Hersteller der verwendeten Materialien

Material	Markenname	Hersteller
Polylactid (PLA)	PLI 005	<i>NaturePlast</i> (IFS, Frankreich)
Polybutylensuccinat (PBS)	FD72PB	<i>PTT MCC Biochem Company Ltd.</i> © (Bangkok, Thailand)
Cellulosefaser	TECHNOCEL fiber HM 200	<i>CFF GmbH & Co. KG</i> (Ilmenau, Deutschland)

3.2 Herstellung der Filamente

Für die vorliegende Arbeit werden 5 Filamente mit unterschiedlichem Fasergehalt hergestellt. Es wird dabei ein Massenanteil (wt) von 0-, 10-, 20-, 30- und 40 % der Fasern angestrebt.

Der Herstellungsprozess der Filamente findet in zwei Schritten statt. Im ersten Schritt werden die als Granulat (PLA und PBS) vorliegenden Ausgangsmaterialien in dem bereits genannten Verhältnis von 80 % PLA und 20 % PBS abgewogen. Anschließend wird das Granulatgemisch in einem großen Behälter manuell über eine Zeit von 5 Minuten durchmischt und dem Zweischnckenextruder über einen Schneckenförderer zugeführt. Die Cellulosefaser wird dem Extruder mit einem gravimetrischen Dosierer (mit Rührwerk) über einen Seitenförderer zugegeben. Der verwendete Zweischnckenextruder ZE 25A (*KraussMaffei© Berstorff*, Hannover, Germany) wird mit den in **Tabelle 2** dargestellten Parametern für den ersten Schritt betrieben. Die Abkürzungen F1, F2, F3, F4 und F5 stehen dabei für die Filamente mit den angestrebten Fasermassenanteilen von 0-, 10-, 20-, 30- und 40 % bzw. im späteren Verlauf für die realisierten Fasergehalte, die ab **Abschnitt 4.2** folgen. Das extrudierte Rundprofil wird anschließend über ein Wasserbecken in einen Granulator geführt und erneut auf Granulatgröße zerkleinert. Vor dem nächsten Herstellungsschritt werden alle hergestellten Granulate in einem Heizofen bei 65 °C über 7 Tage in einem geeigneten Behälter getrocknet.

Tabelle 2: Extrusionsparameter Herstellungsschritt 1

Extruder									
Filamente	F1		F2		F3		F4		F5
Sollwert [rpm]	80		80		80		80		80
Heizprofil									
Zone	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sollwert [°C]	/	120	140	175	175	170	170	160	160
Seitenförderer									
Drehzahl	F1		F2		F3		F4		F5
Sollwert [rpm]	250		250		300		400		400

Im zweiten Schritt der Herstellung werden die Granulate erneut extrudiert. Für die Extrusion der Filamente wird derselbe Extruder mit einer Rundprofildüse von 3 mm Durchmesser genutzt. Das Filamentprofil wird über ein Wasserbad abgekühlt und im Falle der ersten beiden Filamente (F1 und F2) mit Hilfe eines Horizontalwicklers (Teachline AZW130T) der Firma *COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH©* auf gewöhnliche Filamentspulen mit einem Aufwickeldurchmesser von 105 mm gewickelt. Aufgrund einer höheren zu erwartenden Sprödigkeit bei den Filamenten mit höherem Fasergehalt (F3-F5) werden Spulen der Firma *Alpaplastic* (RS 300/15 GZ) mit einem größeren Wickeldurchmesser von 212 mm in Kombination mit einer

selbstgebauten Aufwickereinheit (siehe **Anhang A**) verwendet. Der Extruder wird erneut mit dem in **Tabelle 2** abgebildeten Temperaturprofil genutzt. Der Extruder wird in diesem zweiten Extrusionsschritt mit den in **Tabelle 3** dargestellten Drehzahlen betrieben. Grund für die niedrigen Drehzahlen ist der angestrebte Filamentdurchmesser von 2,85 mm. Das Filament F1 wird ohne angebauten Seitenförderer produziert, daher läuft dieser während der Extrusion nicht mit.

Tabelle 3: Extrusionsparameter Herstellungsschritt 2

Extruder ZE 25A					
Filament	F1	F2	F3	F4	F5
Drehzahl Sollwert [rpm]	40	28	30	40	40
Einstellungen Seitenförderer					
Filament	F1	F2	F3	F4	F5
Drehzahl Sollwert [rpm]	/	250	250	250	250

3.3 Bestimmung der Fasergehalte

Die Fasergehalte der Filamente werden durch das Herauslösen der Kunststoffanteile (PLA/PBS) und anschließendem Wiegen des Faseranteiles bestimmt. Für die Analyse werden von jedem Filament jeweils drei Proben mit einem Gewicht von 1 g abgewogen. Die Proben werden mit dem Lösungsmittel Dichlormethan (DCM, Methylenchlorid) versetzt und über eine Zeit von 20 Minuten bei Raumtemperatur mit Hilfe eines Magnetrührers vermischt, bis sich keine sichtbaren Partikel mehr in dem Erlenmeyerkolben befinden. Anschließend wird ein Filtertiegel (Porosität 3) gewogen und die hergestellten Lösungen mit Hilfe eines erzeugten Unterdruckes durch den Filtertiegel gezogen. Der Filtertiegel inklusive der aufgefangenen Fasern wird für eine Zeit von 20 min in einem Trockenschrank bei einer Temperatur von 80 °C gelagert. Im letzten Schritt wird der Filtertiegel erneut abgewogen, um somit das Gewicht der unlöslichen Fasern zu bestimmen.

3.4 Bestimmung geeigneter Druckparameter

Alle Drucke im FDM-Verfahren dieser Arbeit werden mit Hilfe des Doppelsextruder-Druckers „Sigma“ der Firma *BCN3D Technologies* durchgeführt. Der Drucker ist aufgrund baulicher Veränderungen fähig, auf dem linken Extruder Filamente mit einem Durchmesser von 2,85 mm und auf dem rechten Extruder Filamente mit einem Durchmesser von 1,75 mm zu verarbeiten. Alle Proben und Vergleichskörper werden über die linke Seite des 3D-Druckers mit einem Düsendurchmesser von 0,8 mm gedruckt. Auf die Druckplattform des Druckers wird für alle Druckvorgänge eine *Arburg*-Druckplatte befestigt, da die späteren Prüfkörper ohne Raft (mitgedruckte Hilfskonstruktion bzw. Druckbett) gedruckt werden sollen. Die Druckplatte wird

aufgrund abnehmender Haftung der gedruckten Bauteile alle drei bis vier Druckvorgänge ausgetauscht.

Vor der Beschreibung der Bestimmung geeigneter Druckparameter werden im Folgenden zunächst die für diese Arbeit relevanten Parameter erläutert. Die wichtigsten Prozessparameter werden in feststehende und zu bestimmende unterteilt. Die in **Tabelle 4** dargestellten Parameter werden zu Beginn der Arbeit einmalig für alle Filamente festgelegt. Der Füllgrad stellt als Parameter eine Ausnahme dar, da er in drei verschiedenen festen Konfigurationen (80-,90-,100 %) für jedes Filament genutzt wird.

Tabelle 4: Feststehende Parameter

Prozessparameter	Beschreibung	Einheit
Düsendurchmesser	Durchmesser des Düsenausgangs	mm
Lagenhöhe (Düsenabstand)	Bezeichnet die Höhe der einzelnen Bauteillagen und damit den angefahrenen Abstand des Druckers zwischen Spitze der Extrusionsdüse und Ablageebene	mm
Füllgrad	Maß für die Füllung (Struktur, die im Inneren gedruckt wird) eines Druckobjektes	%

Die in **Tabelle 5** erläuterten Parameter werden für jedes/n Filament/Fasergehalt neu ermittelt. Generell wird während jedes Analyseprozesses immer nur ein Parameter gleichzeitig verändert, da andernfalls kein Rückschluss auf den eingestellten Parameter möglich ist.

Tabelle 5: Zu evaluierende Parameter

Prozessparameter	Beschreibung	Einheit
Düsentemperatur	Temperatur der Extrusionsdüse	°C
Extrusionsbreite	Dicke eines einzelnen Fadens, der entweder in freier Luft oder über einer Oberfläche extrudiert wird	mm
Fördergeschwindigkeit (Extrusions-Multiplier)	Geschwindigkeit, mit der das Filament vom Schrittmotor in die Extrusionsdüse gefördert wird	mm/s
Druckbetttemperatur	Temperatur des Druckbettes	°C
Druckgeschwindigkeiten (Allgemeine, Outline, Infill)	Einstellbare Verfahrensgeschwindigkeiten der Düse für jeweilige Druckelemente	mm/s

Düsentemperatur

Die Bestimmung der Düsentemperatur wird mit Hilfe des Druckes eines sogenannten Temperaturturms durchgeführt. Der Temperaturturm, dargestellt in **Abbildung 4**, wird mit der Slicing-Software (*Simplify3D*©) in verschiedene Temperaturbereiche eingeteilt.

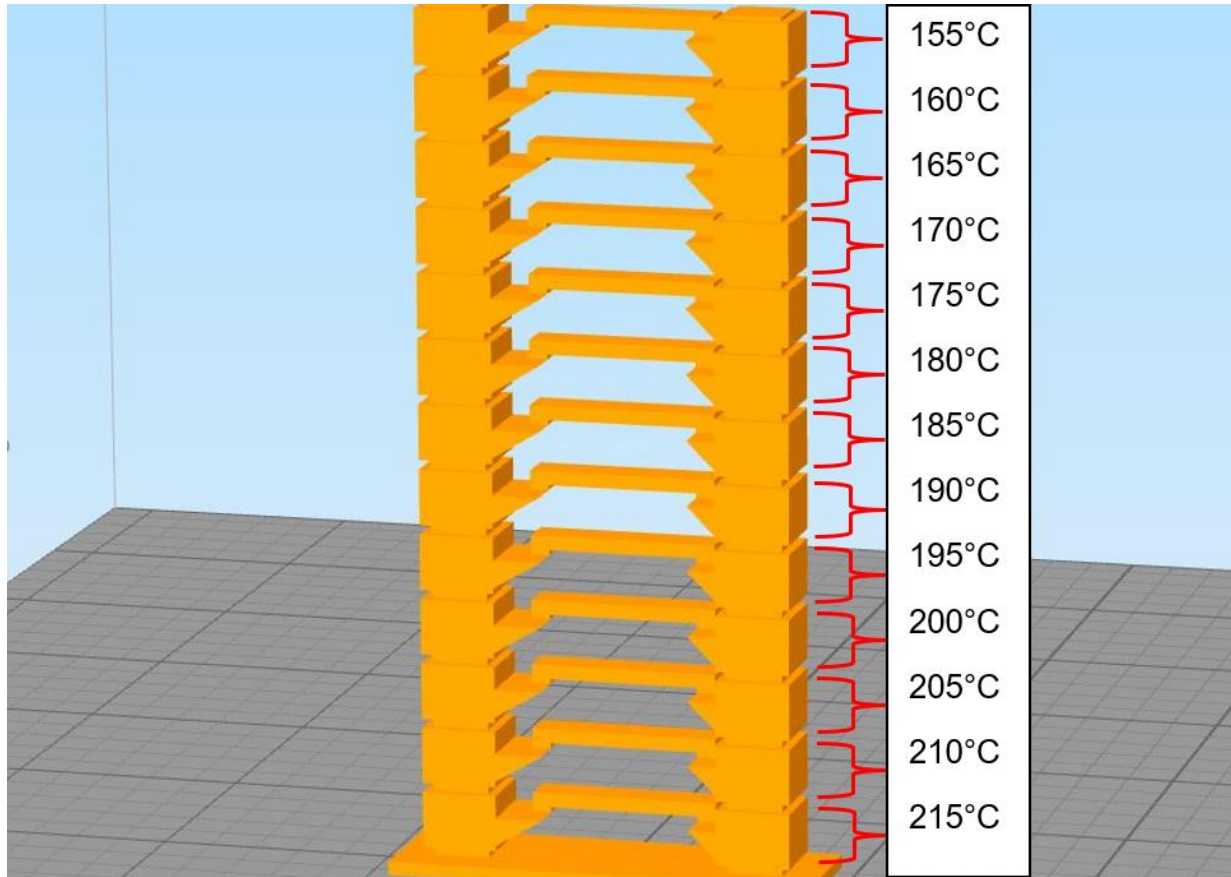


Abbildung 4: Temperaturturm mit eingezeichneten Stufen

Der in dieser Arbeit verwendete Temperaturturm verfügt über 13 mögliche Temperaturstufen. Als erster Anhaltspunkt werden dabei die Versuche von Ou-Yang [2018] bei 190°C herangezogen. Um möglichst nahe an die geeignetste Düsentemperatur zu gelangen, wird, wie in **Abbildung 4** zu erkennen, beginnend bei 215 °C die Temperatur pro Stufe um 5 °C verringert. Sobald der Drucker alle Temperaturstufen gedruckt hat oder ab einer bestimmten Temperaturstufe das Filament nicht mehr aufschmelzen kann und demzufolge nicht mehr weiterdruckt, wird der gedruckte Temperaturturm optisch bewertet. Die beste gedruckte Brücke wird ausgewählt und anschließend als Düsentemperatur festgelegt.

Extrusionsbreite

Die Ermittlung der Extrusionsbreite erfolgt über das Vermessen eines in die Luft gedruckten Stranges. Mit Hilfe eines Messschiebers wird der Durchmesser des extrudierten Stranges gemessen und der Slicersoftware zur Verfügung gestellt.

Fördergeschwindigkeit

Für die Bestimmung der Fördergeschwindigkeit wird ein weiterer Vergleichskörper gedruckt. Der Kalibrierungswürfel hat im 3D-Modell, wie in **Abbildung 5** zu sehen, die Maße 20×20×20 mm (Länge×Breite×Höhe). Nach dem Druck werden die Seiten des Kalibrierungswürfels ebenfalls mit Hilfe eines Messschiebers gemessen und die ermittelten Istwerte mit den theoretischen Sollwerten verglichen. Werden die idealen Maße über- bzw. unterschritten, wird die Fördergeschwindigkeit entsprechend angepasst. Die beschriebene Methode macht ein direktes Messen des Schrumpfverhaltens, unter der Berücksichtigung des Filamentdurchmesser, möglich.

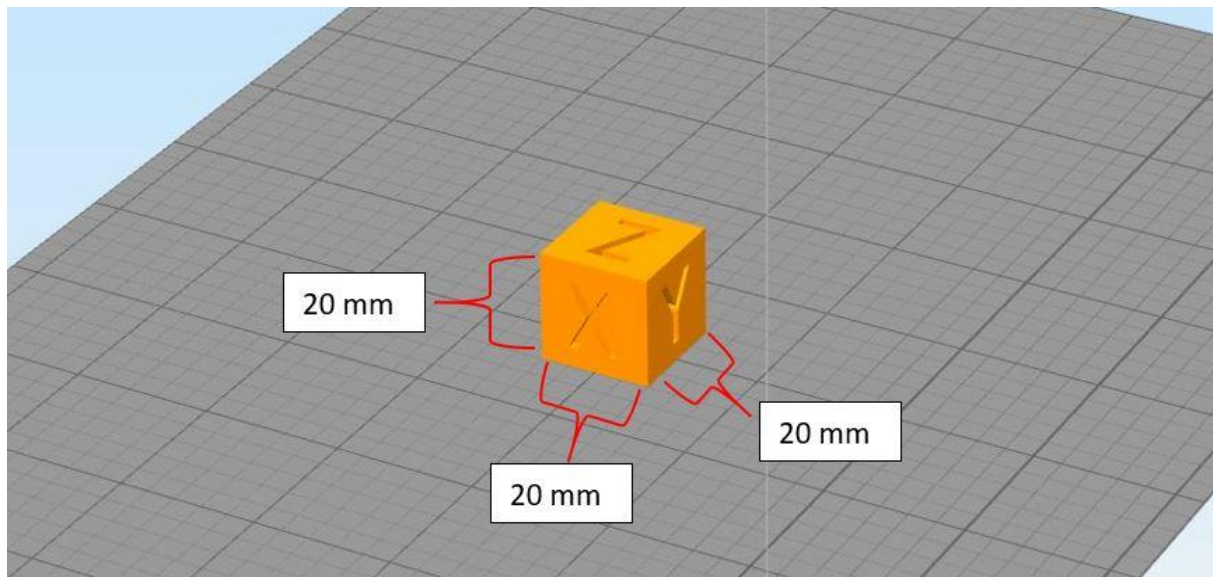


Abbildung 5: Kalibrierungswürfel mit Seitenlängen

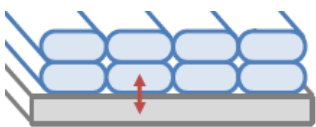
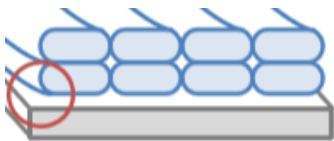
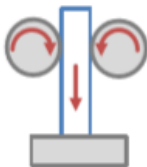
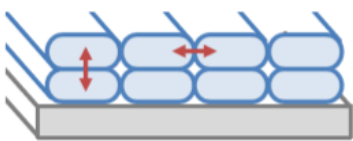
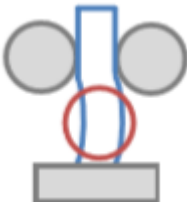
Druckbetttemperatur

Das Einstellen der Druckbetttemperatur erfolgt ebenfalls anhand des gedruckten Kalibrierungswürfels. Die Haftung des Materials auf dem Druckbett und das Schrumpfverhalten des Bauteils sind ein Indikator für die Druckbetttemperatur. Ein sehr schnelles Abkühlen (aufgrund eines Druckbettes bei Raumtemperatur) eines Materials mit hohen Schwindungseigenschaften kann dazu führen, dass der Strang nicht ausreichend auf dem Druckbett haftet oder sich das Bauteil wölbt und somit die Haftung am Druckbett verliert. Ist das Druckbett über viele Lagen auf einer hohen Temperatur, so kann dies zum Einsinken des Bauteils, aufgrund der zu langsam erstarrenden Schichten kommen. Daher wird sowohl der Druckvorgang während der ersten Lage beobachtet als auch das fertige Bauteil betrachtet und auf dieser Grundlage eine Druckbetttemperatur über x-Lagen eingestellt. [Gebhardt, 2016c]

Druckgeschwindigkeit

Zur Bestimmung des letzten, in **Tabelle 5** genannten, Parameters wird ebenfalls der Druck des Kalibrierungswürfels herangezogen. Kommt es beim Druck des Bauteils zum Ausdünnen oder Abreißen des Extrudats während des Druckvorgangs, kann dies für eine zu hoch eingestellte Druckgeschwindigkeit sprechen. Daher wird zur Einstellung der Druckgeschwindigkeit die Ablage bzw. Gleichmäßigkeit des extrudierten Stranges beobachtet und dementsprechend angepasst. Die bereits genannten und für diese Arbeit relevanten Fehlerszenarien und deren Beeinflussung bzw. Rückschlussmöglichkeiten auf die erläuterten Parameter sind in **Tabelle 6** zusammengefasst.

Tabelle 6: Fehlerszenarien und Einflussparameter in Anlehnung an Domm [2020]

Fehlerszenario	Skizze	Einflussparameter
Warping: Bezeichnet das Ablösen/Wölben des Extrudats aufgrund von mangelnder Haftung oder Verzug		➤ Material ➤ Druckbetttemperatur ➤ Druckraumtemperatur ➤ Düsenabstand
Verzug aufgrund von temperaturinduzierter Schwindung		➤ Material ➤ Druckbetttemperatur ➤ Druckraumtemperatur
Änderung des extrudierten Strangdurchmessers (bspw. Ausdünnen) oder Abreißen des Extrudats		➤ Material ➤ Düsentemperatur ➤ Fördergeschwindigkeit ➤ Druckraumtemperatur
Schlechte Verbindung der Stränge (Strang- bzw. Schichthaftung)		➤ Düsentemperatur ➤ Düsenabstand ➤ Druckraumtemperatur
Umformung des Stranges zwischen Schrittmotor und Düse		➤ Material ➤ Düsentemperatur ➤ Fördergeschwindigkeit ➤ Druckraumtemperatur

3.5 Herstellung der Probenkörper

Mit den ermittelten und eingestellten Druckparametern werden im Anschluss pro Füllgrad (80-, 90-, 100 %) und Filament (Fasergehalt) jeweils sieben Probenkörper gedruckt. Die sieben Proben bestehen aus sechs Zugproben (nach DIN EN ISO 527-2:2012-06 Probenkörpertyp 1B mit einer geänderter Gesamtlänge von 180 mm) und einer Platte mit den Maßen 170×130×1,2 mm (L×B×H). Eine technische Zeichnung der Zugprobe ist im **Anhang B** zu finden. Nach jedem Wechsel auf einen anderen Fasergehalt wird die Düse des Druckers mit reinem weißen PLA gespült. Die gedruckten Zugproben werden ohne Nachbearbeitung direkt im Zugversuch zur Bestimmung der Zugeigenschaften genutzt. Für die Bestimmung der Flüssigkeitsdurchlässigkeit, des Diffusionskoeffizienten und der dynamisch-mechanischen Eigenschaften werden die Probekörper in einem zweiten Schritt aus den gedruckten Platten mit Hilfe einer pneumatischen Werkstattpresse herausgestanzt.

Für die Versuche (Bestimmung der Flüssigkeitsdurchlässigkeit und des Diffusionskoeffizienten) werden pro Platte mindestens neun quadratische Proben mit den Abmessungen 25×25 mm und für die dynamisch-mechanische Analyse mindestens drei rechteckige Streifen mit den Abmessungen 10×60 mm gestanzt.

3.6 Bestimmung der Flüssigkeitsdurchlässigkeit

Die Bestimmung der Flüssigkeitsdurchlässigkeit des Materials wird mit Hilfe eines selbstentwickelten Verfahrens durchgeführt. Für den Versuch werden sechs der quadratischen Probekörper pro Füllgrad und Fasergehalt genutzt. Die Probekörper werden vor dem Versuch bei 42 % Luftfeuchtigkeit und 21 °C (DIN EN ISO 291:2008-08 Klasse 2 Bedingungen) für 88 Stunden gelagert. Anschließend werden die Proben, wie in **Abbildung 6** dargestellt, auf drei verschiedene Zeitintervalle (2, 4 und 6 Stunden) aufgeteilt und auf einem blauen Zellstoffpapier mit ausreichendem Abstand bei Zimmertemperatur und -atmosphäre platziert. Danach wird auf alle Proben mit Hilfe einer Pipette vier Tropfen einer Kaffeelösung gegeben. Nach den angegebenen Zeitintervallen werden die Probenkörper abgetupft und vom Zellstoffpapier genommen. Durch eine mögliche Permeation der Kaffeelösung entsteht auf der Seite des Zellstoffpapiers ein Kaffeefleck. Die Durchlässigkeit der Probe wird anhand der Größe des entstandenen Kaffeeflecks gemessen.

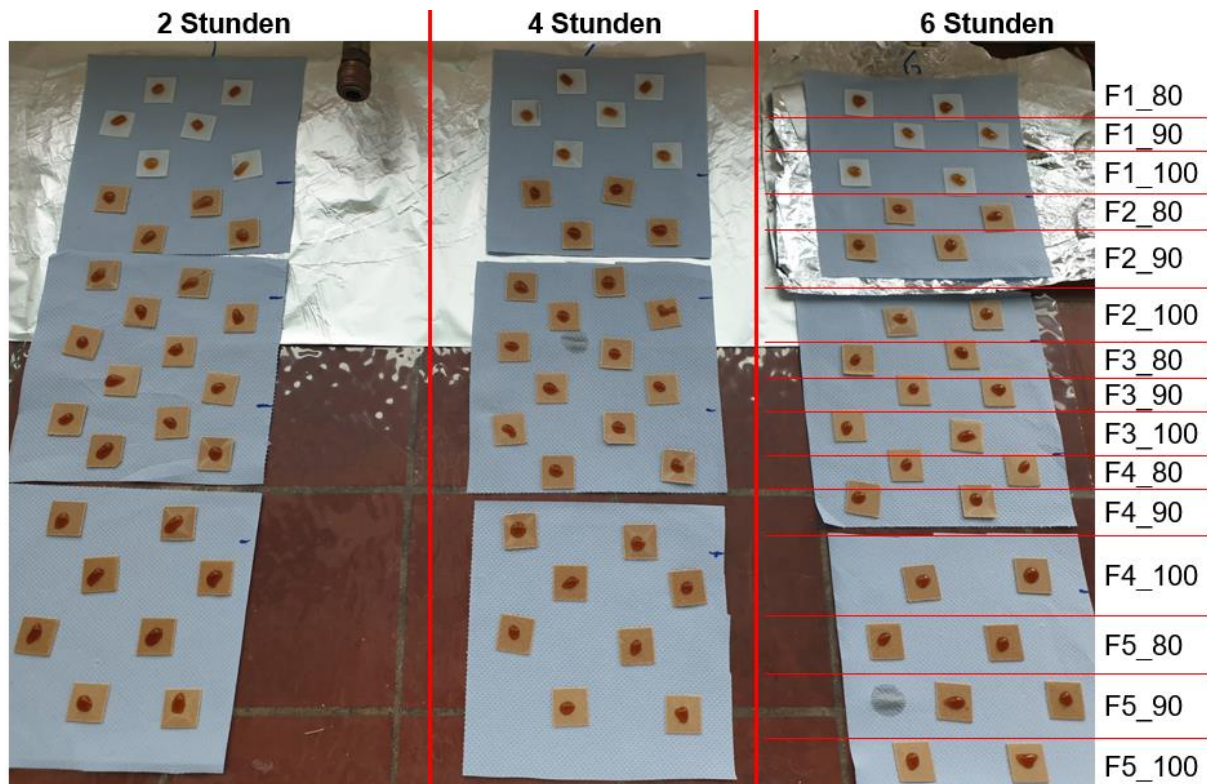


Abbildung 6: Betroffene Proben des Flüssigkeitsdurchlässigkeitversuches

3.7 Bestimmung der Zugeigenschaften

Vor der Durchführung des Zugversuches werden die gefertigten Zugprüfkörper für 88 Stunden bei 42% Luftfeuchtigkeit und 21 °C (DIN EN ISO 291:2008-08 Klasse 2 Bedingungen) konditioniert. Die Zugprüfung findet nach dem in DIN EN ISO 527-1:2019-12 beschriebenen Verfahren und Bedingungen statt. Die 90 Zugproben werden mit Hilfe einer Universalprüfmaschine der Firma *ZwickRoell GmbH & Co. KG* des Typs BZ2-MM100TL.ZW01 geprüft. Es wird mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min für jede Probe gearbeitet. Die nominelle Dehnung der Proben wird im Verfahren B bestimmt.

3.8 Bestimmung des Diffusionskoeffizienten

Die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten findet in Anlehnung an das in der Norm DIN EN ISO 62:2008-05 beschriebenen Verfahren für die Bestimmung der Wasseraufnahme eines Kunststoffes statt. Dafür werden jeweils drei der gestanzten quadratischen Prüfkörper (25×25 mm) pro Füllgrad und Fasergehalt genutzt. Die Proben werden zu Beginn in einem Trocknungsschrank bei 80 °C für 72 Stunden getrocknet. Anschließend werden diese in verschlossenen Probenbüten in einem Eimer mit Silica Gelkugeln in den nach DIN EN ISO 291 eingerichteten

Raum (42 % Luftfeuchtigkeit und 21 °C) gebracht und über eine Zeit von 1 Stunde auf Raumtemperatur abgekühlt. Wenn die Proben die geforderten 23 °C erreicht haben, werden die Probentüten geöffnet und alle Proben werden initial gewogen. Sobald die Proben der 42 % Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind, nehmen diese an Gewicht zu, welches in den ersten 30 Minuten alle 5 Minuten und danach alle 15 Minuten protokolliert wird. Der Versuch gilt als abgeschlossen, wenn die Gewichtsänderung einer Probe von drei aufeinanderfolgenden Messungen nicht mehr als 0,5 Prozent beträgt.

Tabelle 7: Versuchsparameter des Einlagerungsversuches

Versuchsparameter	Werte
Probengröße	25×25 mm
Trocknung	• 72 h • 80 °C
Abkühlung	• 24 h • 23 °C
Einlagerung	nach DIN EN ISO 291:2008-08: • 23 ± 1 °C • Rel. Luftfeuchte 50 ± 5 %
Gewichtsmessung	t<30 Minuten → alle 5 Minuten t>30 Minuten → alle 15 Minuten

3.9 Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften

Die Bestimmung der dynamisch-mechanischen Eigenschaften der Materialien erfolgt mit Hilfe der dynamisch-mechanischen Analyse (DMA). Die Analyse findet nach dem in DIN EN ISO 6721-1:2019 beschriebenen Verfahren und Bedingungen statt. Das verwendete Messgerät Q800 der Firma *TA Instruments Inc.*© wird im Dual-Cantilever-Messsystem betrieben. Die rechteckigen Proben (60×10×1,2 mm; L×B×H) werden vor der Analyse für 88 Stunden bei 42 % Luftfeuchtigkeit und 21 °C (DIN EN ISO 291:2008-08 Klasse 2 Bedingungen) konditioniert. Es werden pro Fasergehalt und Füllgrad mindestens 2 Proben analysiert. Auf Basis der dokumentierten Glasübergangstemperatur von 52,3 °C durch Ou-Yang [2018] für ein Filament von PLA/PBS in einem Verhältnis 8:2, werden die Proben von -10 °C bis +100 °C mit einer konstanten Temperaturerhöhung von 2 °C/min untersucht. Die jeweilige Probe wird zu Beginn des Versuches für 5 Minuten bei -10 °C gehalten und für den gesamten Versuch bei einer konstanten Frequenz von 1 Hz belastet. Als Kühlmittel wird flüssiger Stickstoff eingesetzt.

3.10 Übersicht der angewandten Methodik

Die folgende **Abbildung 7** gibt eine Übersicht über die im vorangegangenen **Kapitel 3** erläuterten Abläufe und die angewandte Methodik dieser Arbeit.

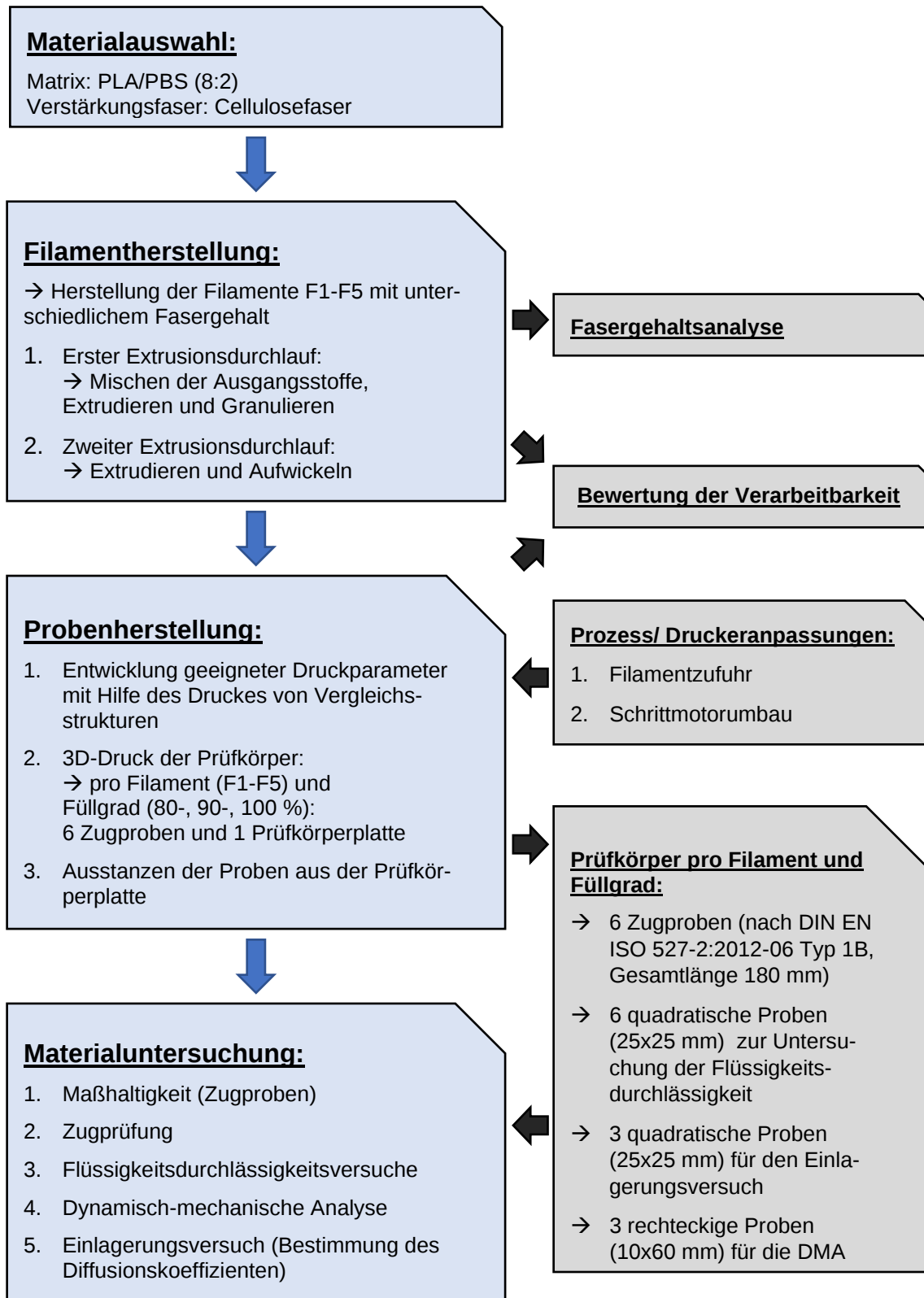


Abbildung 7: Herstell- und Versuchsablauf

4 Ergebnisse

4.1 Filamente

Während der Herstellung der Filamente traten folgende Problematiken auf:

1. Im ersten Extrusionsschritt ließ sich ein Stauen von Cellulosefasern im Seitenförderer bei den Filamenten F4 und F5 feststellen.
2. Bei der Extrusion aller Filamente im ersten und zweiten Extrusionsschritt (F1-F5) kam es zum wiederholten Abreißen oder Einschnüren des Stranges nahe der Düse. Grundsätzlich wurde, um das Problem zu minimieren, das Wasserbad sehr nah (10 cm) an der Düse platziert, sodass der extrudierte Strang schnellstmöglich abkühlt.
3. Bei den Filamenten mit einem Faseranteil (F2-F5) kam es zur Agglomeration von Faserresten an der Düse. Dieser Effekt trat mit zunehmendem Fasergehalt stärker auf und führte teilweise zu der unter 2. beschriebenen Problematik.

Die extrudierten und aufgewickelten Filamente F1-F5 (von links nach rechts) sind in **Abbildung 7** dargestellt.

Bei dem optischen Vergleich der Filamente, ist erkennbar, dass die Filamentfarbe durch die Zugabe der verwendeten Cellulosefaser ein Brauntönen ist. Zusätzlich ist eine Verdunklung des Brauntönen mit ansteigendem Fasergehalt feststellbar.

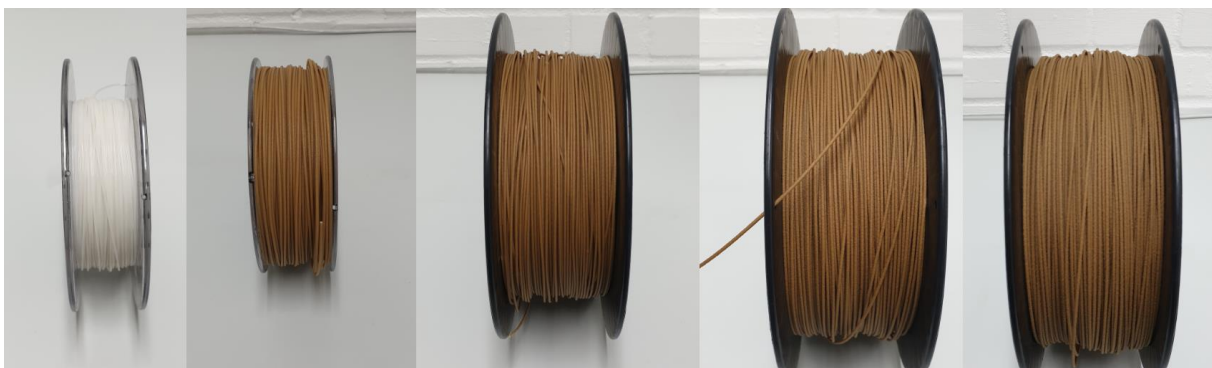


Abbildung 8: Hergestellte Filamente (ansteigender Fasergehalt v. links n. rechts)

Sowohl durch einen haptischen Test (gewöhnliches mit den Fingern darüberfahren) als auch optisch in **Abbildung 8**, ist eine steigende Rauheit und Sprödigkeit mit steigendem Fasergehalt der Filamentstränge beobachtbar. Darüber hinaus lassen sich die Filamentstränge mit höherem Fasergehalt deutlich leichter zerbrechen und haben, wie in **Abbildung 8** ersichtlich, deutlich dunklere Bruchkanten. Die Filamente mit einem niedrigerem Fasergehalt (F1-F3) haben eine fast weiße Bruchfläche.



Abbildung 9: Hergestellte Filamentstränge (F1, F2, F3, F4, F5)

In **Tabelle 8** ist die Bandbreite der punktuell gemessenen Durchmesser der hergestellten Filamente dargestellt. Bei dem Vergleich mit dem bereits in **Abschnitt 3.2** erwähnten angestrebten Filamentdurchmesser von 2,85 mm, ist erkennbar, dass diese bis auf F1 stark abweichen. Die Abweichungen betragen dabei zwischen 0,74- und 0,47 mm. Der Durchmesser der Filamente wurde nach dem Wasserbad im zweiten Extrusionsschritt alle 3 Minuten gemessen. Den bereits im Prozess erkannten Abweichungen wurde versucht mit verminderten Drehzahlen und einem Wechsel auf einen größeren Düsendurchmesser (4 mm) entgegenzuwirken. Aufgrund des erhöhten Aufkommens der zu Beginn dieses Abschnittes beschriebenen Problematiken im Zusammenhang mit den durchgeführten Maßnahmen, wurden diese wieder rückgängig gemacht und die Filamente in kleineren Durchmessern extrudiert.

Tabelle 8: Bandbreite der hergestellten Filamentdurchmesser

Angestrebter Faser- gehalt [wt-%]	0	10	20	30	40
Punktuell gemessener Durchmesser [mm]	2,84-2,91	2,23-2,35	2,11-2,28	2,17-2,24	2,3-2,38

4.2 Fasergehalte

Aufgrund der genannten Verarbeitungsschwierigkeiten in **Abschnitt 4.1** und der daraus folgenden Vermutung, dass die hergestellten Filamente nicht die eingestellten/gewünschten Fasergehalte haben, wurde im Anschluss der Herstellung eine Bestimmung des Fasergehaltes, wie in **Abschnitt 3.3** beschrieben, durchgeführt. Ein Protokoll der gemessenen Daten ist dem **Anhang C** beigelegt. Die in **Tabelle 9** dargestellten Fasergehalte werden durch arithmetische Mittelung der drei Analysen pro Filament berechnet.

Bei der Herstellung konnten von den angestrebten 10-, 20-, 30- und 40 % Fasermassenanteilen 8,66-, 18,01-, 25,74- und 29,15 % (vgl. **Tabelle 9**) realisiert werden.

Die Filamente F2 und F3 sind, mit einer absoluten Abweichung von unter 2 wt-%, nahe an den angestrebten Fasergehalten. Für die Filamente F4 und F5 zeigen sich absolute Abweichungen von 4,26- bzw. 10,85 wt-%. Dies spiegelt die in **Abschnitt 3.2** erwähnte Problematik des Faserstaus im Seitenförderer, trotz maximal eingestellter Umdrehungszahl, wider. Generell ist eine Steigerung der absoluten Abweichung bei steigendem angestrebtem Fasergehalt erkennbar.

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit stehen die Bezeichnungen F1-F5 für die Filamente mit den realen Massenanteilen (0-, 8,66-, 18,01-, 25,74- und 29,15 %) der Faserkomponente bzw. geben das Filament an, aus dem die Proben gefertigt wurden.

Tabelle 9: Analyisierte Fasergehalte der Filamente

Bezeichnung Filamente	F2	F3	F4	F5
Angestrebter Fasergehalt [wt-%]	10	20	30	40
Realer Fasergehalt [wt-%]	8,66	18,01	25,74	29,15
Absolute Fasergehaltabweichung [wt-%]	1,34	1,99	4,26	10,85

4.3 Druckprozess

4.3.1 Herausforderungen

Während des Druckprozesses der Vergleichsstrukturen und Probenkörper ergaben sich aus unterschiedlichen Faktoren zusätzliche Herausforderungen. Im Folgenden werden die verschiedenen Herausforderungen, deren Ursache und die ggf. eingeleiteten Gegenmaßnahmen aufgeführt.

1. Die Filamente F3-F5 wurden, aufgrund der Sprödigkeit des Materials mit zunehmendem Fasergehalt, wie bereits in der Durchführung beschrieben, auf größere Filamentspulen gewickelt. Infolgedessen passen die Filamentspulen mit einem Durchmesser von 212 mm nicht an den vom Hersteller des 3D-Druckers vorgesehenen Platz. Daher wurden die Filamentspulen hinter dem Drucker, wie links in **Abbildung 9** gezeigt, mit Hilfe eines Laborstativs platziert. Über ein Loch in der Rückwand und einen gebogenen PET-Schlauch (um die Reibung gering zu halten), dargestellt auf der rechten Seite von **Abbildung 9**, kann der Schrittmotor den Filamentstrang in den Drucker ziehen.

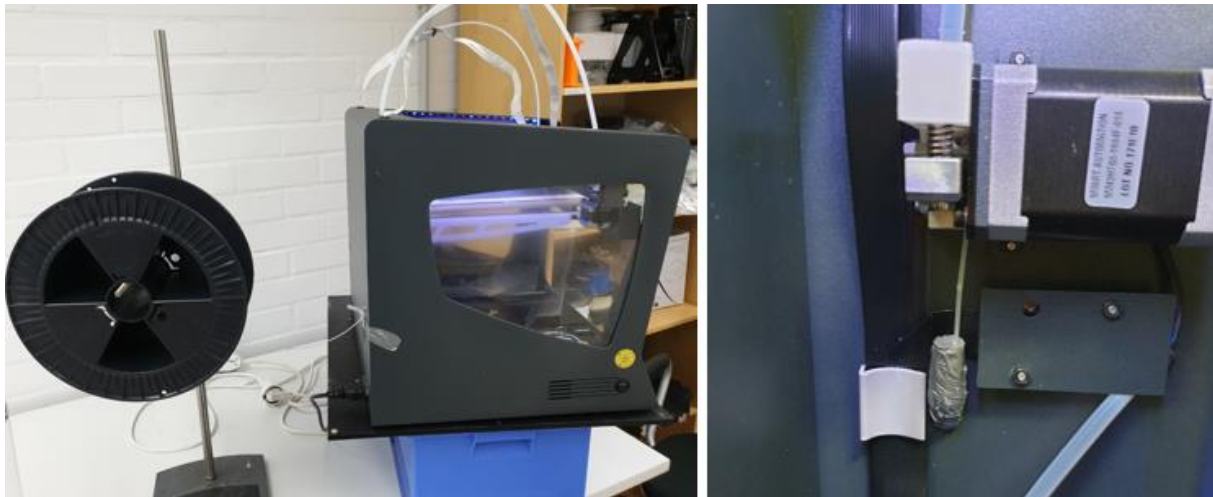


Abbildung 10: Aufbauänderungen des FDM-Druckers - Aufbau Filamentabwicklung (links) und Filamenteingang auf der Innenseite des Druckers (rechts)

2. Das größte Problem der Verarbeitung bzw. des Druckprozesses stellte der Filamentdurchmesser der Filamente F2-F5 dar. Generell werden 3D-Drucker vom Hersteller nur auf die zwei Standarddurchmesser (1,75- und 2,85 mm) ausgelegt. Die produzierten Durchmesser liegen für F2-F5 zwischen 2,11-2,38 mm und haben damit, wie bereits in **Kapitel 4.1** beschrieben, zum großen Standarddurchmesser einen Abstand zwischen 0,74 und 0,47 mm. Aufgrund der Differenz der Filamentdurchmesser zum Standarddurchmesser konnte der Schrittmotor keine konstante Förderung realisieren. Ohne die konstante Förderung des Schrittmotors kommt es in vielen Fällen zu Fehldrucken. Damit das Durchrutschen der Filamente verhindert werden konnte, wurde der Schrittmotor baulich, wie in **Abbildung 10** dargestellt, verändert. Das Rollenkugellager, welches das Gegenstück zum gezahnten Schrittmotorantrieb bildet und einen ursprünglichen Durchmesser von 10 mm besaß, wurde durch ein neues mit einem Durchmesser von 13 mm ersetzt. In Folge des vergrößerten Durchmessers musste das verbaute Klemmgegenstück (oben rechts; **Abbildung 10**) ebenfalls ersetzt werden. Dies wurde mit Hilfe einer 3D-CAD Software (*SolidWorks®*) in den für diesen Fall passenden Maßen gezeichnet und nach dem Slicen mittels SLA aus dem Material Rigid 4000 von *Formlabs®* gefertigt und nachgehärtet. Durch das Einlegen von zusätzlichen Unterlegscheiben im Federloch kann der Anpressdruck, äquivalent zu der im Originalbauteil verbauten Stellschraube, zusätzlich erhöht werden.

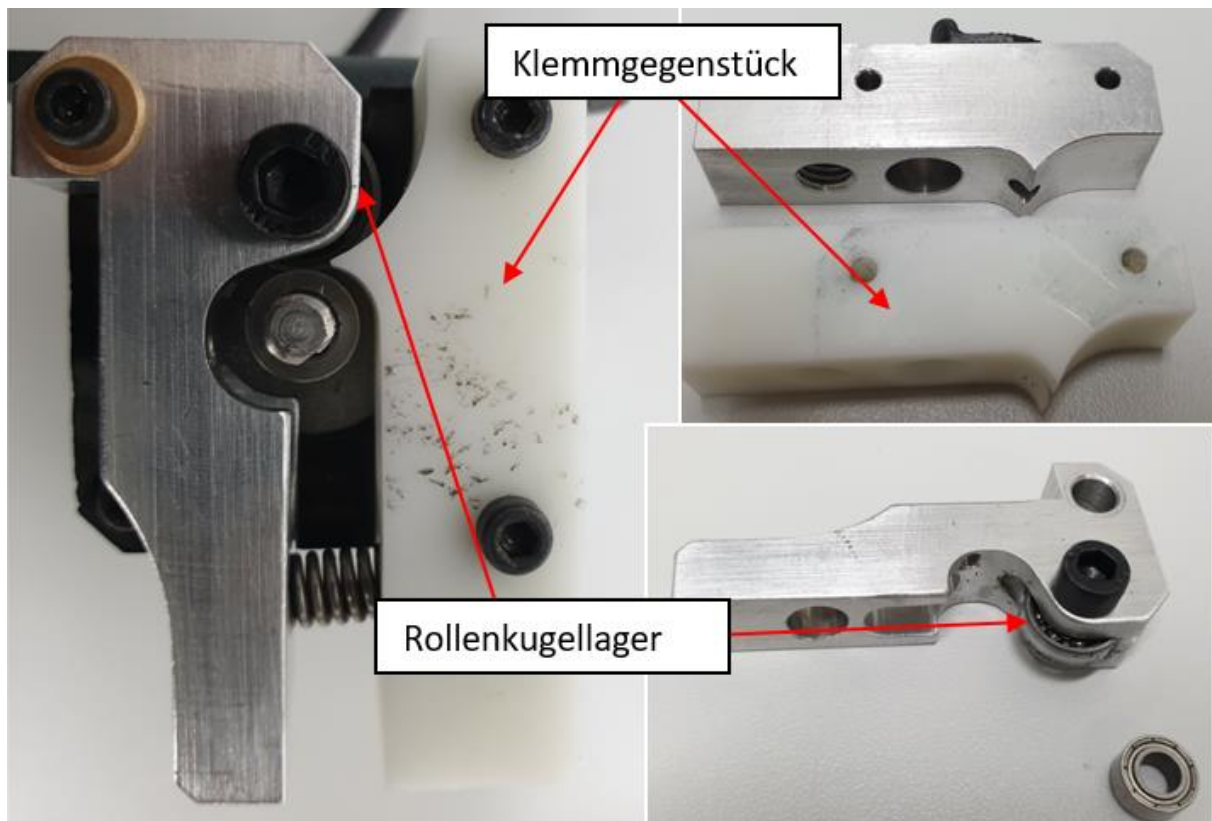


Abbildung 11: Bauliche Änderungen am Schrittmotor - Zusammengebauter Schrittmotor mit ausgetauschten Teilen (links), Klemmgegenstück (oben rechts), Rollenkugellager und Halterung (unten rechts)

3. Einen großen Anteil an den Fehldrucken und erzwungenen Druckabbrüchen hatte das Brechen des Filamentes. In diesem Zusammenhang müssen zusätzlich die zwei Szenarien unterschieden werden, in denen der Bruch des Filamentstranges auftritt. Bricht das Filament vor Erreichen des Schrittmotors, ist ab einem gewissen Zeitpunkt kein Material mehr zum Weiterfördern da und das zu druckende Bauteil bleibt unvollständig, siehe **Abbildung 11** (rechts). Bricht der Filamentstrang nach dem Schrittmotor im PTFE-Schlauch, ist dies nur kritisch, wenn es zum Verschieben, wie in **Abbildung 11** links zu sehen, der Filamentstrangstücke übereinander kommt. Dies kann zu einer Verstopfung des Schlauches mit der Folge eines unvollständigen Druckes führen. Die Gründe für das Brechen des Filamentes sind die Sprödigkeit, die Rauheit und schlechte Wicklung des Filamentes. Die Kombination aus Rauheit und schlechter Wicklung führt dazu, dass das Filament sich mit den anderen Strängen verkeilt und infolgedessen eine zu hohe Spannung beim Abwickeln entsteht, die das Material nicht ertragen kann. Bei der Förderung des Materials durch den Schrittmotor wird das Material zusätzlich einer erhöhten mechanischen Penetration ausgesetzt, die aufgrund der genannten Sprödigkeit zum Bruch führen kann.

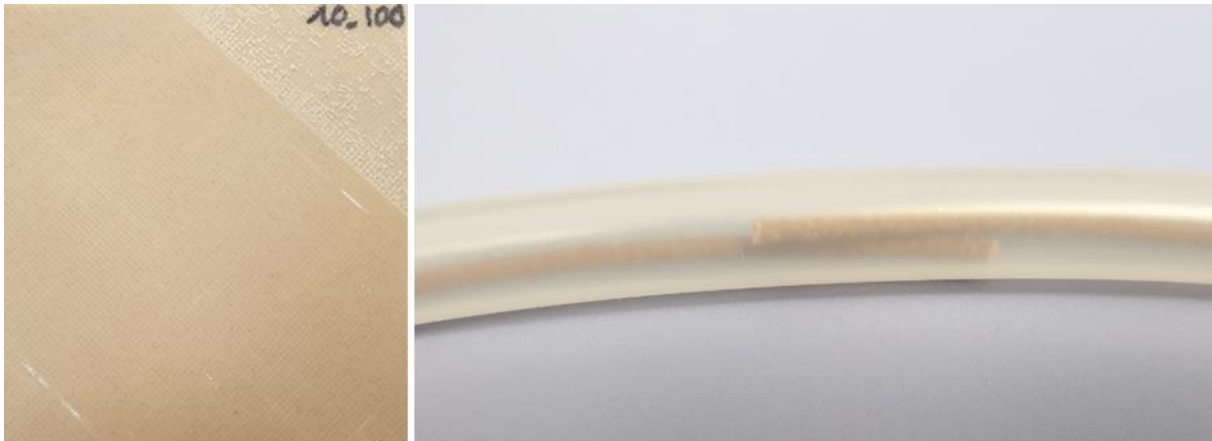


Abbildung 12: Filamentinduzierte Druckprobleme - Bauteil nach dem Bruch eines Filamentes (links), Übereinanderschieben der Filamentstränge (rechts)

4. Aufgrund der Wärme der Druckplattform und der Feuchtigkeitsaufnahme der Druckplatten verziehen sich die *Arburg*-Druckplatten. Dieser Problematik wird mit dem Verkleben der Platte, wie in **Abbildung 12** ersichtlich, mit Hilfe von breitem Klebeband auf das Druckbett entgegengewirkt. Darüber hinaus haben die Platten herstellerseitig keine konstante Dicke. Um trotzdem eine ausreichende Haftung an jeder Stelle der Druckplatte während des Druckes zu erzeugen, muss der Druckkopf näher als nötig an der Druckplatte positioniert werden. Dies führt dazu, wie in **Abbildung 12** kenntlich gemacht, dass keine gleichmäßige erste Schicht gefertigt werden kann.

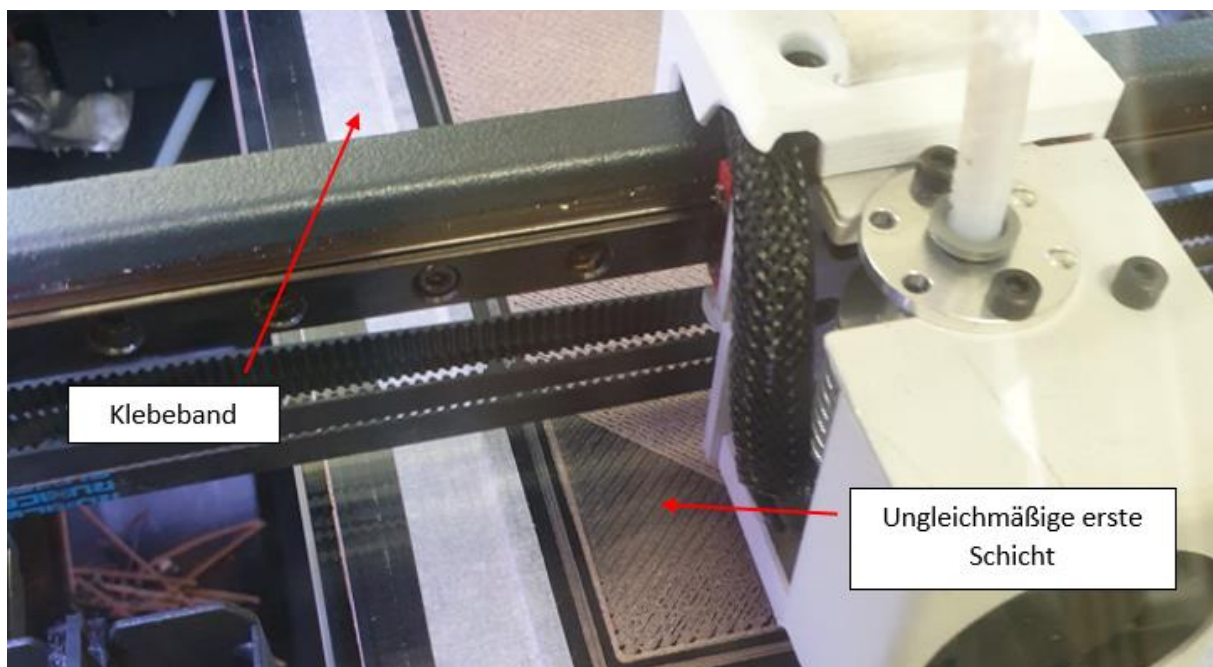


Abbildung 13: Herausforderungen der *Arburg*-Druckplatte

5. Ein weiteres Problem bei Filamenten mit einem Fasergehalt stellt die Agglomeration von Faserpartikeln (mit minimalem Anteil der Matrix) an der Düse dar. Wenn der Materialklumpen eine gewisse Größe erreicht hat, kann er zur Mitnahme des frisch extrudierten Stranges führen oder dieser bleibt am Bauteil hängen und kühlt dort ab. Beides führt zur Beschädigung (erkennbar in **Abbildung 11** als helle Streifen auf der fertigen Schicht) oder zum Abbruch bzw. Zerstörung des Bauteils. Je höher der Fasergehalt des Filaments ist, desto öfter und verstärkt tritt der Effekt auf. Aufgrund der eben genannten Verhaltensweise wurde bei den Filamenten mit höherem Fasergehalt (F4 und F5) nach jedem Druck die Düse mit reinem (weißem) PLA gespült/ gereinigt.

4.3.2 Druckparameter

Bei der Evaluation der Druckparameter und dem Druck der Probenkörper wird mit Filament F2 begonnen. Ausgehend von dem erstellten Druckprofil des Filaments F2 werden die folgenden Profile F3, F4, F5, F1 angepasst. Die Evaluierung der Parameter wird, wie in der in **Abschnitt 3.4** dargestellten Reihenfolge (1.Düsentemperatur 2.Extrusionsbreite 3.Fördergeschwindigkeit 4.Druckbetttemperatur 5.Druckgeschwindigkeit) vorgenommen.

Die Auswahl der Druckparameter findet an dieser Stelle exemplarisch anhand der in **Abbildung 13** dargestellten Vergleichskörper des Filaments F2 (8,66 wt-% Faseranteil) statt.

Für den Druck des Temperaturturms werden zunächst die Standardeinstellungen der Slicersoftware für die Parameter Extrusionsbreite (0,8 mm bei einem Düsendurchmesser von 0,8 mm) und Fördergeschwindigkeit (1,0 mm/s) gewählt. Die Druckbetttemperatur und Druckgeschwindigkeit werden in Anlehnung an Ou-Yang [2018] auf Raumtemperatur und 1500 mm/min festgelegt.



Abbildung 14: Evaluationsstrukturen der Druckparameter (Filament F2)

Bei der Betrachtung des gedruckten Temperaturturms in **Abbildung 13**, ist erkennbar, dass der Drucker in den räumlich unteren Temperaturzonen (höhere Drucktemperatur) des Turms keine durchgehenden Brücken gebildet hat. Mit sinkender Drucktemperatur kann der Drucker eine Verbindung der beiden Turmseiten bilden und eine Brücke bauen. Ein Vergleich der Temperaturstufen bei denen der Drucker eine Brücke gebildet hat, zeigt für die beiden obersten Temperaturen (175 °C und 170 °C) keine massiven Fehler. Bei einer Temperatur von 165 °C verstopft die Düse und der Turm kann nicht weiter gefertigt werden. Zugunsten der Druckprozessstabilität wird die höhere der beiden akzeptablen Temperaturstufen (175 °C) gewählt.

Im Anschluss an die Bestimmung der geeigneten Düsentemperatur wurde mit der genannten Temperatur ein Strang (zweite von links in **Abbildung 13**) extrudiert und mit 0,78 mm gemessen. Mit Hilfe der bisher evaluierten Düsentemperatur und Extrusionsbreite wird ein erster Kalibrierungswürfel gedruckt. Der Würfel (der dritte von links in **Abbildung 13**) weist eine unvollständige und fehlerhafte Stützstruktur auf. Durch das Vermessen der Breite, Länge und Höhe des gedruckten Würfels ist feststellbar, dass die Seitenlängen unter den geforderten Maßen von jeweils 20 mm sind. Aufgrund des bereits zuvor bekannten niedrigen Filamentdurchmessers und den beschriebenen Indizien des Druckes wird die Fördergeschwindigkeit auf 1,35 mm/s angehoben. Der Druck eines weiteren Kalibrierungswürfels (dritter von rechts in **Abbildung 13**) zeigt, bis auf die Höhe des Bauteils, keine Unregelmäßigkeit bei der geforderten Seitenlänge und Stützstruktur. Die Seite X (Höhe) des zweiten Kalibrierungswürfels zeigt eine Verformung im unteren Teil und deshalb eine verminderte Seitenlänge. Aufgrund dieser Verformung wird für den nächsten Druck die Druckbettheizung auf 50 °C für die ersten drei Schichten angestellt. Temperaturen zwischen 50-60 °C werden häufig bei der Verarbeitung im FDM-Verfahren von PLA genutzt [vgl. Chalgham [2021], Spoerk [2018], Yao [2020]]. Der Druck des nächsten Kalibrierungswürfels zeigte in alle Richtungen einen sehr maßgenauen Würfel mit hoher Oberflächengüte (für einen FDM-Druck).

Aus zeitökonomischen Gründen wird für den letzten Druck die Druckgeschwindigkeit von den ursprünglichen 1500 mm/min auf 1600 mm/min angehoben. Der letzte in **Abbildung 14** dargestellte Kalibrierungswürfel (ganz rechts) zeigt, dass der Drucker auch mit der erhöhten Druckgeschwindigkeit einen maßhaltigen Würfel fertigen kann. Alle Druckparameter der Filamente F1-F5 sind in **Tabelle 10** zusammengefasst.

Die Evaluationsdrucke der anderen Filamente, die als Grundlage für die Anpassungen der erstellten Druckprofile dienten, sind dem **Anhang D** beigelegt.

Tabelle 10: Druckparameter der Filamente

Bezeichnung Filamente	F1	F2	F3	F4	F5
Fasergehalt des Filaments [wt-%]	0	8,66	18,01	25,74	29,15
Düsentemperatur [°C]	175	175	180	185	195
Extrusionsbreite [mm]	0,8	0,78	0,8	0,8	0,82
Fördergeschwindigkeit [mm/s]	1,0	1,35	1,35	1,35	1,3
Druckbetttemperatur anhand der gedruckten Lagen [°C]	1-3: 50 Ab 3: 30				
Druckgeschwindigkeiten [mm/s]	1600				
Einsatz des umgebauten Schrittmotors	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja

Die Fördergeschwindigkeit und Extrusionsbreite der verschiedenen Druckprofile, wie in **Tabelle 10** gezeigt, wurden aufgrund der unterschiedlichen Filamentdurchmesser dem jeweiligen Filament angepasst. Da im Zusammenhang mit der Druckbetttemperatur und Druckgeschwindigkeit keine vermehrten Druckfehler auftraten, wurden diese für alle Druckprofile beibehalten. Auffällig bei den Druckparametern ist, dass die geeignete Düsentemperatur mit steigendem Fasergehalt der Filamente ebenfalls zunimmt. Ein Grund dafür ist die steigende Viskosität des Materials bei gleichbleibender Temperatur. Mit steigender Viskosität des Materials werden die Brücken des Temperaturturms durch den 3D-Drucker eher gefertigt, jedoch treten bspw. vermehrt kleine Oberflächenschädigungen in Folge von Extrudatagglomeration auf.

4.3.3 Verarbeitbarkeit

Für die Extrusion der Filamente und den Druck der Probenstrukturen ist die Verarbeitbarkeit der Materialien von großer Bedeutung. Die Grundlage der Verarbeitbarkeit der Materialien bilden die Materialeigenschaften im Zusammenhang mit den im Prozess verwendeten Maschinen und Hilfsmitteln. Zu diesen Materialeigenschaften gehören die bereits in **Abschnitt 4.1** angesprochene Rauheit, Sprödigkeit, der Fasergehalt und die daraus resultierende Viskosität des Materials. Aus den angesprochenen Materialeigenschaften ergeben sich je nach Material häufig oder weniger häufig Probleme bei der Filament- oder Probenkörperherstellung und eine dementsprechende Prozessstabilität oder –instabilität.

Die folgende **Tabelle 11** trägt die in dem vorherigen Abschnitt teilweise beschriebenen Eigenschaften zusammen und stellt diese in Korrelation zu den bspw. benötigten Prozessanpassungen (Schrittmotor) und der subjektiv empfundenen Prozessstabilität (in Form von Fehlgedrucken/ Druckabbrüchen).

Tabelle 11: Verarbeitbarkeit der Filamente

Filamente	F1	F2	F3	F4	F5
Rauheit/ Sprödigkeit	-	0	+	++	+++
Viskosität	-	0	+	++	+++
Prozessstabilität	-	0	+	++	+
1. Filamentherstellung					
2. Probekörperherstellung	0	+	+	+	++
Skala: - = niedrig , 0 = mittel , + = hoch					

Auffallend ist, dass die Filamente mit einer hohen Sprödigkeit und einem hohen Fasergehalt eine unter den gegebenen Voraussetzungen höhere Prozessstabilität haben als die Filamente mit weniger Faseranteil. Das Filament ohne Fasern verursachte sowohl bei der Herstellung als auch beim Verdrucken die meisten Probleme.

Die Filamente mit höherem Fasergehalt scheinen, insbesondere wenn die Herausforderungen des Druckprozesses beseitigt sind, weniger anfällig für Druckabbrüche und Fehler zu sein.

Zudem zeigen die Filamente mit einem höheren Fasergehalt eine deutlich erhöhte Druckbett-haftung und weniger Warming-Fehler.

4.4 Probekörper

4.4.1 Allgemeines

Die im FDM-Verfahren gedruckten Probekörper weisen, wie in **Abschnitt 4.1** beschrieben, mit steigendem Fasergehalt eine dunklere Farbgebung, dargestellt in **Abbildung 14**, auf. Eine größere Darstellung der gedruckten Proben sind dem **Anhang E** beigelegt. Die Rauigkeit und Sprödigkeit des Materials steigen mit höherem Fasergehalt ebenfalls. Auffallend ist, dass die Unterseiten der gedruckten Platten sowohl haptisch als auch optisch glatter und solider (bspw. keine sichtbaren Abstände der abgelegten Extrusionsstränge trotz eines Füllgrades von 80/90 %) als die Oberseiten (letzte gedruckte Schicht) sind. Dies lässt sich auf den in **Abschnitt 4.3** beschriebenen Umstand zurückführen, in dem der Druckkopf aufgrund der Unebenheit der verwendeten Druckplatte sehr nahe an diese eingestellt wurde. Das Material des extrudierten Stranges wird infolge des zu niedrigen Abstandes teilweise (je nach momentanem Abstand) sehr stark in alle Richtungen weg von der Düse gedrückt, sodass beispielsweise bei einem Füllgrad von 90 % die einzelnen abgelegten Stränge miteinander verschmelzen und damit eine solide Schicht entsteht.

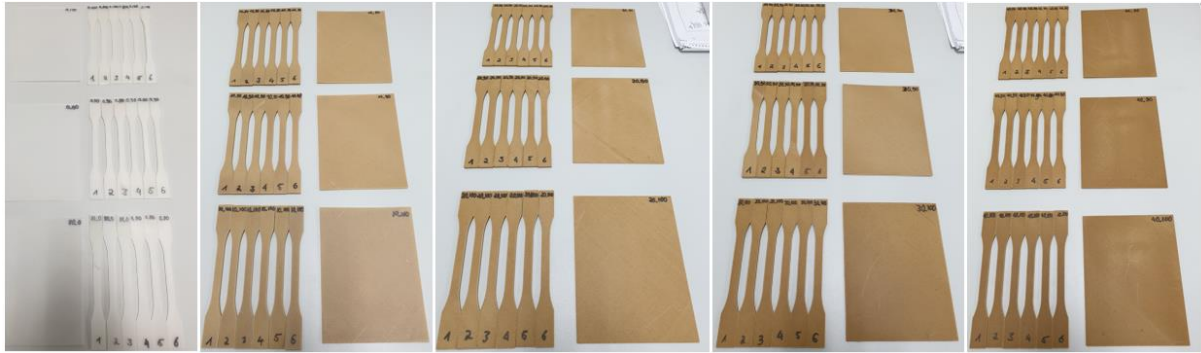


Abbildung 15: Im FDM-Verfahren hergestellte Probekörper F1-F5 (v. links nach rechts)

Mit steigendem Fasergehalt lassen sich die Probekörper, aufgrund des spröderen Materialverhaltens, leichter aus den Platten stanzen. Die gestanzten Probekörper haben, wie in **Abbildung 15** mittig und rechts beispielhaft zu sehen, keine glatten Stanzkanten. Umso höher der Faseranteil der Proben desto unsauberer sind die Kanten. Das Herausstanzen der Proben ohne oder mit geringem Faseranteil (F1 und F2) aus den Platten ist deutlich schwieriger, da das Material sich gut elastisch/plastisch verformt und daher meist mit höherer Kraft gestanzt werden muss. Dies hat zur Folge, dass die Probekörper teilweise in der Stanzform festsitzen und plastische Verformungen bzw. charakteristische weiße Stellen/Flächen einer plastischen Dehnung, wie in **Abbildung 15** (links und mittig) gezeigt, aufweisen.



Abbildung 16: Beispiele der ausgestanzten Proben - verformte quadratische Probe (links), weiße Flächen durch elastische/plastische Verformung (mittig), ausgestanzte Proben mit z. T. unsauberen Kanten (rechts)

4.4.2 Maßhaltigkeit

Aufgrund von materialspezifischem Schwindungsverhalten und den unterschiedlichen Durchmessern der Filamente wird bspw. die Fördergeschwindigkeit, wie bereits in **Abschnitt 3.4** beschrieben, evaluiert und angepasst. Die Maßhaltigkeit der Bauteile kann zusätzlich von anderen Faktoren, wie dem Abstand der Düse zum Druckbett/Bauteil, beeinflusst werden. Der Abstand der Düse kann sich bspw. während des Druckes durch Warpingverhalten des Bauteils ändern. Infolge des geringeren Abstandes kann der Extrusionskopf des Druckers die Stränge in einer Schicht nicht mehr gleichmäßig auftragen. Ein weiterer Faktor ist die Unebenheit der

Arburg-Druckplatte, die in den ersten Schichten durch den ungleichmäßigen Abstand zum Druckkopf ebenfalls zu Abweichungen führen kann.

Die Zugproben werden daher auf Maßhaltigkeit untersucht. Damit kann die Effektivität der Anpassungen der Druckparameter überprüft, ein mögliches materialspezifisches Wölbungsverhalten festgestellt und das Ausmaß der Abweichungen dokumentiert werden.

Um die Maßhaltigkeit zu untersuchen, werden die Gesamtlänge, die Breite und die Dicke der 90 Zugproben, wie in **Abbildung 16** und **17** dargestellt, vermessen. Die Breite des engen Teils und des breiteren Teils wird für jede Probe zweimal gemessen. Die Gesamtlänge wird pro Probe nur einmal gemessen und die Höhe der einzelnen Proben sowohl an den Enden als auch in der Mitte.

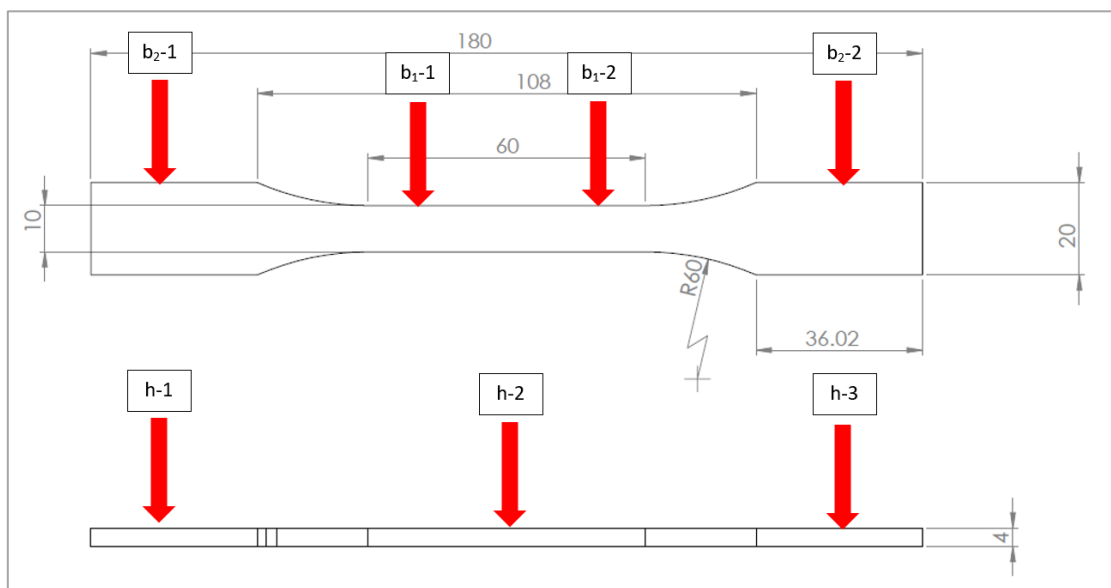


Abbildung 17: Messpunkte der Zugprobe (rote Pfeile)



Abbildung 18: Messmethodik Zugproben

Aus den erhaltenen Längendaten (siehe **Anhang F**) wird mit Hilfe von **Formel (1)** der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) für jeweils ein Maß aller Proben des gleichen Fasergehaltes und Füllgrades gebildet.

$$MAPE := \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{l_{i,gemessen} - l_{i,CAD-Modell}}{l_{i,CAD-Modell}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

n = Anzahl der Proben eines Fasergehaltes und Füllgrades (= 6)

$l_{i,gemessen}$ = Länge des real gemessenen Maßes

$l_{i,CAD-Modell}$ = Länge des Maßes im CAD-Modell

Die aus den Berechnungen erhaltenen Werte sind in **Tabelle 12** abgebildet. Die Zahlen hinter den Abkürzungen für das Material (bspw. F1_80) stehen für den gedruckten Füllgrad der Proben. Dabei weisen die Gesamtlänge aller Proben (aller Fasergehalte und Füllgrade) fast keine (<1 %) Abweichungen auf. Die Enden der Zugproben (b₂-1 und b₂-2) bleiben, bis auf F4_80, unter 2 % Abweichung. Das Maß des engeren Teils (b₁-1 und b₁-2) zeigt prozentuale Abweichungen von weniger als 4 % für alle Zugproben.

Auffallend sind die Abweichungen bei den gemessenen Höhen der Zugproben. Die Maße der Höhe h-2 (Mitte des Zugstabes) zeigen keine Abweichungen über 5 % und bleiben damit nahe an den konstruierten Maßen des CAD-Modells. Die Enden der Zugproben (h-1 und h-3) weisen hingegen häufig prozentuale Abweichungen von über 5 % auf. Für die Proben der Filamente und Füllgrade F1_80 und F4_100 sind es Abweichungen von über 10 %.

Die niedrigen (<5 %) prozentualen Abweichungen der Längen und Breiten der Zugproben deuten darauf hin, dass mit der Auswahl und Optimierung der Druckparameter die unterschiedlichen Filamentdurchmesser und das eventuell auftretende Schwindungsverhalten der Proben kompensiert wird. Die starken Abweichungen der Höhen an den Enden der Zugprobe (h-1 und h-3) bestätigen die zu Beginn getätigte Vermutung, dass Warping-Verhalten unter den gegebenen Bedingungen einen großen Einfluss auf die Maßhaltigkeit der gedruckten Teile hat. Dadurch, dass sich die Zugproben während der Drucke an den Enden nach oben wölben, verringert sich der Abstand zum Extrusionskopf und infolgedessen wird eine untermaßige Probe erzeugt. Der Unterschied der Abweichungen der Höhe h-2 zu den Höhen h-1 und h-3 bestätigt ebenfalls das Wölbungsverhalten an den Enden und zeigt zusätzlich auf, dass die Unebenheit der *Arburg*-Platten einen geringen Einfluss auf das Endmaß hat.

Ein Zusammenhang zwischen Füllgraden/Fasergehalten und der Häufigkeit von Abweichungen über bspw. 5 % lässt sich nicht erkennen.

Tabelle 12: Mittlere absolute prozentuale Abweichungen der Zugproben

Maß Material	l3 [%]	b2-1 [%]	b2-2 [%]	b1-1 [%]	b1-2 [%]	h-1 [%]	h-2 [%]	h-3 [%]
F1_80	0,16	0,63	0,73	2,05	1,82	10,21	2,17	7,75
F1_90	0,11	0,8	1,78	2,5	1,43	5,0	1,67	9,71
F1_100	0,16	0,97	0,69	2,1	3,2	1,29	1,92	1,33
F2_80	0,17	0,83	1,0	1,8	2,07	3,5	4,5	1,67
F2_90	0,15	0,88	0,87	2,68	2,07	7,63	1,0	5,46
F2_100	0,17	1,58	1,26	3,3	3,25	2,21	4,04	4,29
F3_80	0,12	0,47	0,36	1,07	0,7	4,83	1,38	5,92
F3_90	0,09	0,59	0,53	1,83	1,65	1,33	3,0	1,88
F3_100	0,09	0,63	0,59	1,72	1,05	4,92	3,25	7,42
F4_80	0,02	1,62	2,05	3,15	3,77	5,75	3,54	6,38
F4_90	0,12	1,09	1,13	2,38	2,73	2,96	3,04	5,29
F4_100	0,02	1,05	1,12	2,35	2,18	11,21	2,88	8,88
F5_80	0,07	1,38	1,58	3,07	2,73	1,08	0,62	1,75
F5_90	0,05	1,46	1,37	2,93	2,67	3,25	0,62	3,42
F5_100	0,06	1,98	1,44	3,53	3,38	6,71	1,04	5,5

4.5 Flüssigkeitsdurchlässigkeit

Der Zustand der Proben des ersten Zeitabschnittes (2 Stunden) sind in **Abbildung 18** dargestellt. Auf den ersten Blick fällt auf, dass sich auf den Proben F1_80 - F2_90 (außer F1_100) auf allen Abschnitten keine Kaffeelösung mehr befindet. Die Flecken, die sich auf der Oberseite der Proben (F1_80, F1_90 und F2_90) gebildet haben, sind deutlich größer als die initial aufgetropften Kaffeelösungen. Nach dem Abtupfen und Entfernen der Probekörper von dem Zellstoffpapier der in der **Abbildung 18** ganz links zu sehenden Versuchsreihe, sind die Flecken in **Abbildung 19** erkennbar. Auf dem Zellstoffpapier sind nur Kaffeeflecken mit einem Durchmesser von ca. 3,5 cm der Probekörper F2_80 zu erkennen. Das Ergebnis des ersten Zeitabschnittes zeigt damit nur eine Durchlässigkeit des Filamentes F2 (8,66 % Fasergehalt) und ein Füllgrad von 80 %.

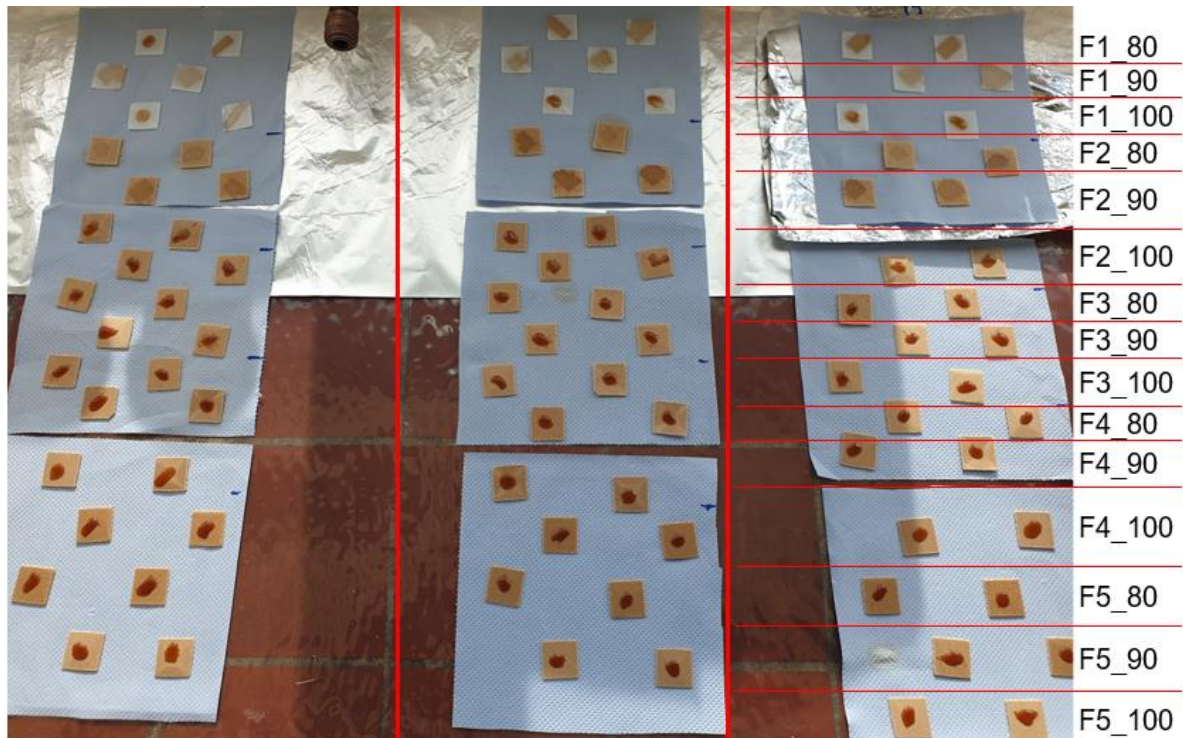


Abbildung 19: Versuchsabschnitt I des Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches (2 Stunden)

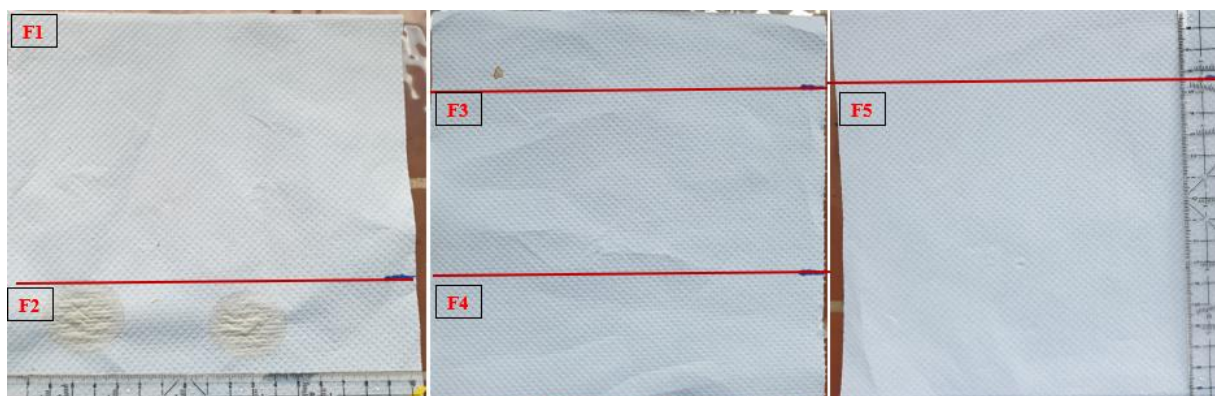


Abbildung 20: Ergebnisse auf dem Zellstoffpapier

Bei der Betrachtung der Ergebnisse nach 4 Stunden in **Abbildung 20**, ist erkennbar, dass die Tropfen der Kaffeelösung bereits nach 4 Stunden auf allen restlichen Proben verschwunden sind.

Die Zellstoffpapiere (rechts in **Abbildung 20**) des 4 Stunden Versuchsabschnittes zeigen, wie der 2-Stunden-Versuchsabschnitt, keine Kaffeeplecken auf dem Zellstoffpapier bis auf die Proben F2_80 in der gleichen Größe. Die durchgestrichenen Flecken sind ungültig. Diese zwei Beobachtungen lassen den Rückschluss zu, dass die Kaffeelösung auf den Proben hauptsächlich verdampft ist. Dadurch folgt die Vermutung, dass die Durchlässigkeit der Materialien/Proben unter den gegebenen Voraussetzungen wenig bis keine Abhängigkeit gegenüber der Zeit zeigt

oder die Proben nicht mit ausreichend Lösung betropft werden (aufgrund einer evtl. sehr langsamen Permeation) und die Lösung vorzeitig verdampft. Um diese Annahme zu untersuchen, wird der 6-Stunden-Zeitabschnitt des Versuches erneut mit der gleichen Menge Kaffeelösung betropft.

Zusätzlich wird zu diesem Zeitpunkt die Vermutung angestellt, dass durch ein Anfeuchten/Einweichen der Probe von der anderen Seite eine erhöhte Durchlässigkeit erreicht werden könnte. Deshalb werden vier Proben aus F4_90 der vorherigen Versuche mit der „unbenutzten“ trockenen Seite ebenfalls mit Kaffeelösung befeuchtet.

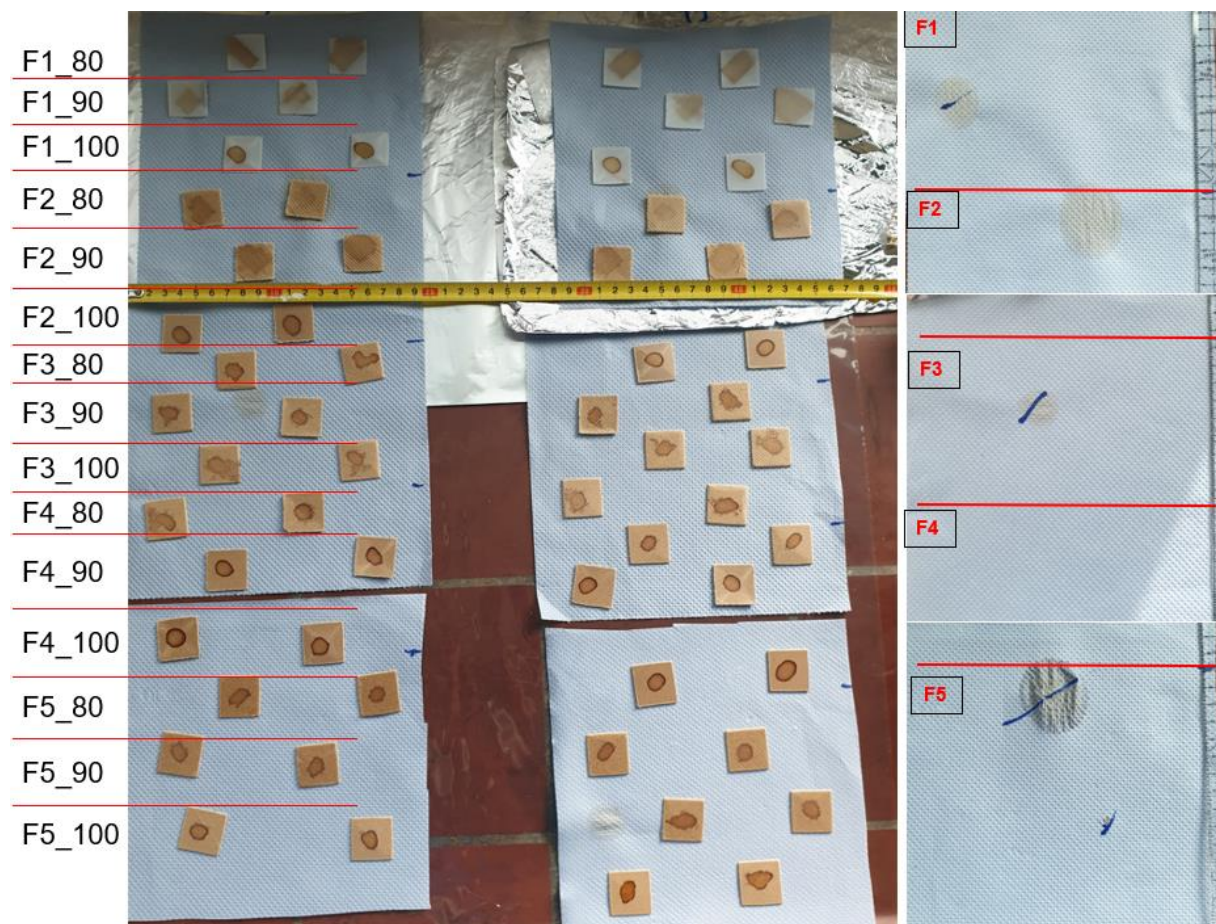


Abbildung 21: Versuchsabschnitt II des Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches (4 Stunden)

Die Ergebnisse des 6-Stunden-Versuches, dargestellt in **Abbildung 21**, belegen eine Durchlässigkeit der Probe/n F1_90 (6cm Kaffeeleck), F2_80, F2_90 und F3_80. Damit zeigen mehr Proben eine Durchlässigkeit gegenüber der Kaffeelösung als die vorherigen Versuchsabschnitte und die Vermutung des frühzeitigen Verdampfens der Kaffeelösung bzw. nicht ausreichende Auftropfmenge aus dem vorherigen Versuchsabschnitt bestätigt sich damit. Die vier extra getesteten Proben weisen, im Gegensatz zum normalen Versuchsablauf (einseitiges Betropfen), eine Durchlässigkeit auf und bestätigen damit ebenfalls die vorher angestellte Vermutung der

höheren Durchlässigkeit bei vorherigem Einweichen der anderen Seite. Die Zellstofftücher zeigen für die Probe F1_90 einen 6 cm großen ovalen, für die Probe F2_80 einen 4,5 cm runden, für die Probe F2_90 einen 6,5 cm runden und für die Probe F3_80 einen 5,5 cm ovalen Kaffeefleck. Aufgrund der unterschiedlichen Auftropfmenge sind diese Kaffeeflecken nicht mit den anderen Versuchsabschnitte vergleichbar und auch innerhalb des Abschnittes ist dies aufgrund der Ungewissheit, wieviel bei welcher Probe an Flüssigkeit verdampft ist, sehr schwierig.

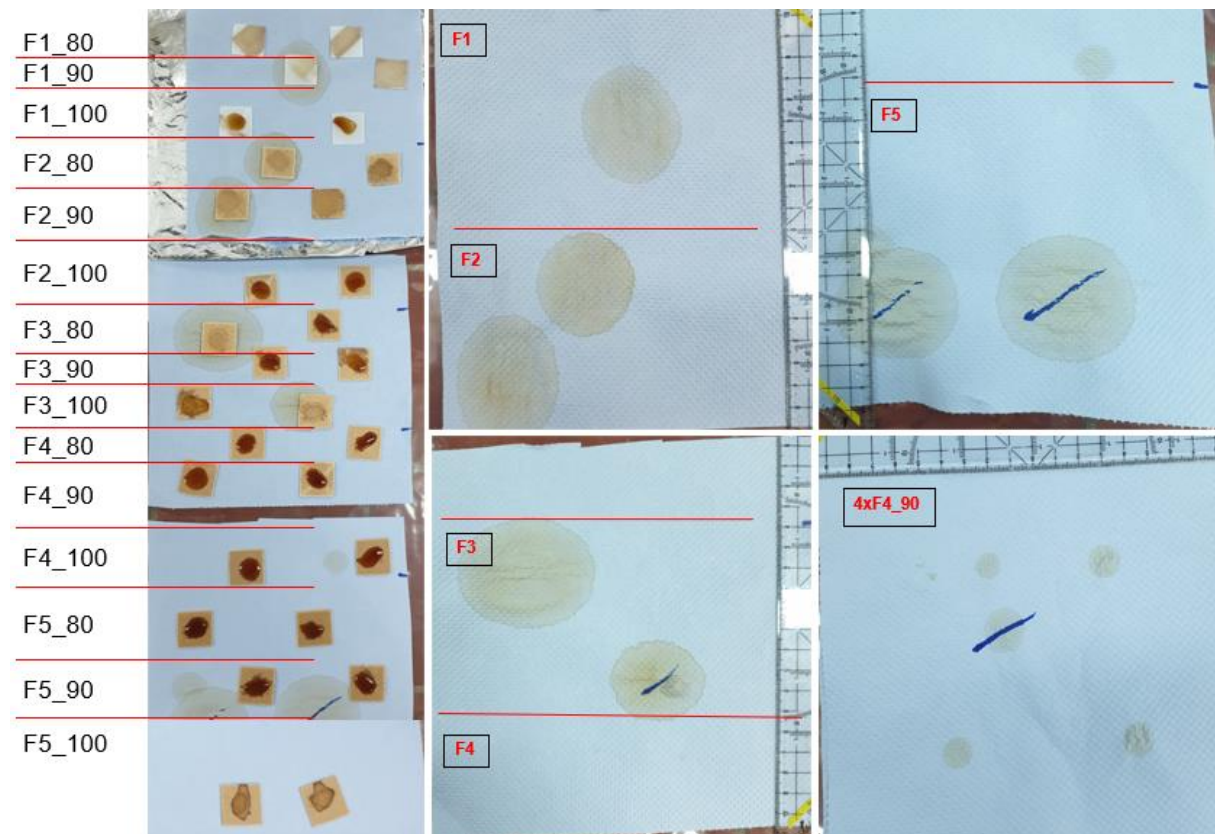


Abbildung 22: Versuchsabschnitt III des Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches (6 Stunden)

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird eine weitere Versuchsreihe angelegt, in der die vorher genutzten Proben (aus Versuchsabschnitt „6 Stunden“) mit der zuvor unbetroffenen Seite über einen Zeitraum von 10 Stunden alle 2 Stunden mit 3 Tropfen der Kaffeelösung betropft werden. Die erste Reihe jedes Zellstoffpapiers mit Proben in **Abbildung 22** weist mindestens einen Kaffeefleck auf. Damit lässt sich in dieser Versuchsausführung eine Durchlässigkeit der Proben F1-F5 mit einem Füllgrad von 80 % feststellen. Auffallend ist, dass einige Proben in den vorherigen Versuchsausführungen mit einem Füllgrad von 90 % ebenfalls eine Durchlässigkeit zeigten, in diesen Ausführungen jedoch nicht. In Kombination mit den in **Abschnitt 4.4** gemachten Beobachtungen lässt sich die Theorie aufstellen, dass in Folge der Unregelmäßigkeit der *Arburg*-Druckplatte, Teilflächen (der Unterseite) der gedruckten Platten entstanden sind,

die eine für Kaffeelösung unter diesen Versuchsbedingungen undurchdringliche Schicht darstellen.

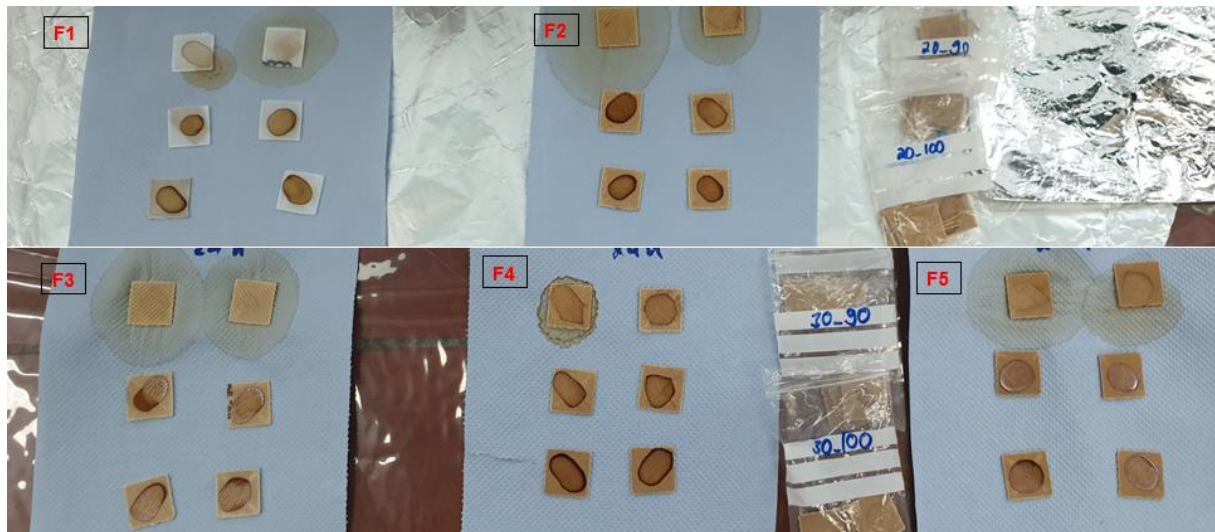


Abbildung 23: Ergebnisse des 10 Stunden Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches

Um die vorangegangene Theorie zu bestätigen und einen Einblick zu bekommen, welche weiteren Kombinationen aus Fasergehalt und Füllgrad für Flüssigkeiten permeabel sind, wird ein weiterer Versuch durchgeführt. Der Versuch wird mit den Überresten der Proben des Zugversuches durchgeführt, da diese aufgrund einer Materialstärke von 4 mm mechanisch bearbeitbar sind. Der Grundgedanke des Versuches ist es, die oberste Schicht der glatten Unterseite der Probenreste zu entfernen und den Versuch im bereits geschilderten Ablauf (3 Tropfen/2 Stunden, 10 Stunden Laufzeit) zu wiederholen. Für den Versuch werden jeweils 2 Endstücke der Zugproben eines Fasergehaltes und der Füllgrade 90- und 100 % mit Hilfe einer CNC-Fräse bearbeitet, sodass 1 mm der soliden Unterseite entfernt wird. Die Proben werden zunächst von der abgefrästen Seite angefeuchtet und dann oberflächlich trocknen gelassen, um keine Verfälschungen auf dem Zellstoffpapier zu verursachen.

Das Zellstoffpapier zeigt, wie in **Abbildung 23** erkennbar, Kaffeeflecken für mindestens jeweils eine der Proben mit den Zusammensetzungen F1-F4 mit einem Füllgrad von 90 %. Die Kaffeeflecken der Proben F5_90, F2_100 und F3_100 sind so schwach, dass diese auch auf die Anfeuchtung der anderen Seite zurückführen sein könnten, sodass diese als nicht bestätigt gelten. Die Proben mit einem Füllgrad von 100 % zeigen keine Durchlässigkeit.

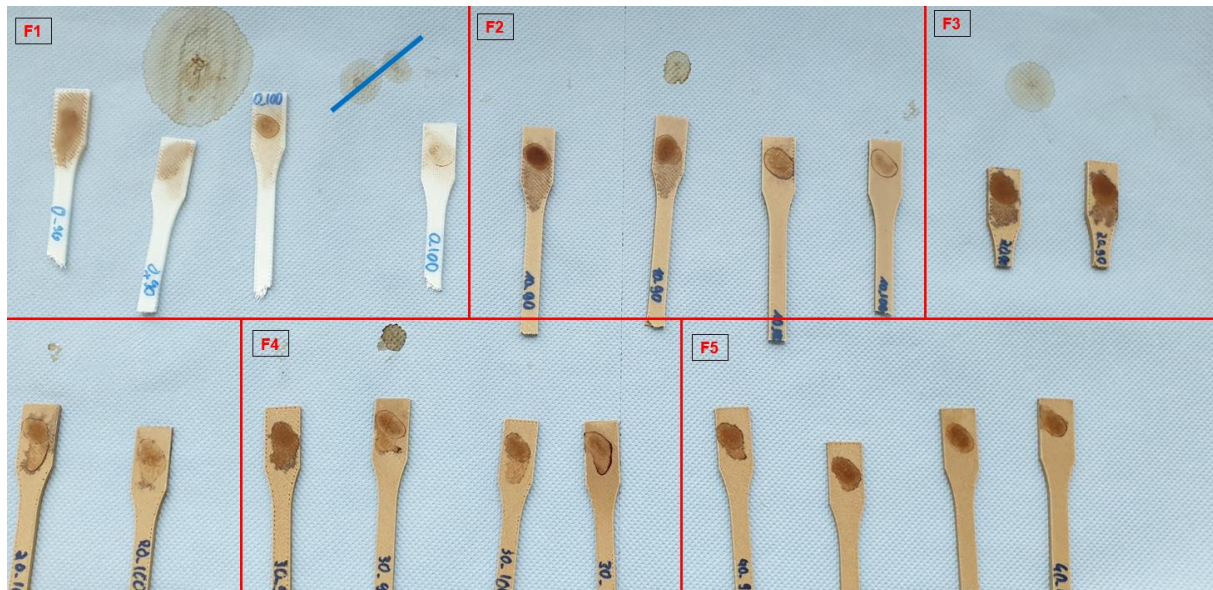


Abbildung 24: Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuch mit Zugproben

Zusammenfassend lässt sich unter den in diesem Abschnitt genannten Bedingungen feststellen:

1. Die Materialien mit den Zusammensetzungen F1-F4 und einem Füllgrad von 80- und 90 % zeigen eine Durchlässigkeit für Kaffeelösung. In allen Versuchen sind die Proben (der Zusammensetzungen F1-F5) mit einem Füllgrad von 100 % undurchlässig.
 ➔ Damit lässt sich die Durchlässigkeit des Materials auf die Lücken bzw. Spalten in den Proben, die aufgrund des Füllgrades zustande kommen, zurückführen. Eine mögliche Durchlässigkeit durch die Bildung von Kanälen auf Basis der Cellulosefasern bestätigt sich nicht.
2. Nur mit Hilfe des Wechsels auf andere Proben und dessen mechanischer Bearbeitung zeigt sich eine Durchlässigkeit der Proben mit einem Füllgrad von 90 %.
3. Die Proben gleicher Zusammensetzungen zeigen innerhalb einer Versuchsreihe zum Teil unterschiedliche Durchlässigkeit.
 ➔ Die Beobachtungen 2 und 3 beruhen auf der in **Abschnitt 4.4** gemachten Beobachtung der soliden Unterseite aufgrund der Verwendung einer *Arburg*-Druckplatte im Druckprozess. Die Permeation der Kaffeelösung ist damit stark von der Oberflächenstruktur der Proben abhängig und die hergestellten Proben eignen sich nur sehr bedingt für die Untersuchung der Durchlässigkeit.
4. Bei dem Vergleich der Versuchsausführung der ersten Versuche (einmaliges/zweimaliges Betropfen) mit den späteren Versuchsreihen (fünfmaliges Betropfen), ist ein höherer Durchdringungserfolg bei insgesamt höherer Flüssigkeitsauftropfmenge und Versuchszeit/Flüssigkeitsaussetzungszeit festzustellen.

5. Bei dem Vergleich der Versuchsreihen miteinander, fällt auf, dass die Kaffeeflecken im letzten Versuch trotz gleicher Auftropfmenge/-intervall deutlich kleiner sind.
- ➔ Die Permeation der Proben benötigt Zeit und wird maßgeblich von der Dicke der Proben beeinflusst.

4.6 Zugeigenschaften

4.6.1 Allgemeines

Neben den allgemeinen, bereits in **Abschnitt 2.1** genannten, Einflussparametern (Werkstoff, Volumenverhältnis, Faserlänge, Faserorientierung, Faser-Matrix-Haftung, Faserverteilung, Fehlstellen und Eigenspannungen) auf die mechanischen Eigenschaften von FVK gibt es weitere spezifische verfahrensbedingte Einflussgrößen.

Alle im FDM-Verfahren gedruckten Teile zeigen eine fertigungsbedingte Abhängigkeit gegenüber dem Zusammenhalt der abgelegten Filamentstränge zueinander. Die Strang- bzw. Schichthaftung untereinander wird hauptsächlich thermisch durch die Interdiffusion der Polymerketten an den Berührungsflächen bestimmt. [Ahn, 2002, Bräuer, 2021, Costa, 2017, Popescu, 2018, Spoerk, 2017]

Einstellbare Parameter wie der Luftspalt (zwischen den einzelnen Strängen einer Lage), der Rasterwinkel (Orientierung der abgelegten Filamentstränge), die Schichthöhe, der Füllgrad und die Baurichtung im FDM-Verfahren können ebenfalls einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Die genannten Parameter beeinflussen zudem direkt oder indirekt die bereits genannte Kohäsion der Filamentstränge. Aufgrund der unterschiedlichen Testmethoden, Materialien, Materialherstellern, Vielfalt der verwendeten 3D-Drucker, Slicerssoftwares und anderer Prozessparameter in den verschiedenen Studien ist eine generelle Aussage zu bspw. der Größe/Höhe des Einflusses oder der Übertragbarkeit auf andere Systeme schwierig. [Popescu, 2018, Wu, 2015]

Aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge wird bei der Auswertung bzw. Interpretation des durchgeführten Zugversuches zusätzlich zu den zwei Hauptvariablen (Materialzusammensetzung/Fasergehalt und Füllgrad) die je nach Material geänderten Düsentemperatur mit einbezogen. Der Vergleich der Zugversuche bzw. Zugeigenschaften der Materialien findet mit Hilfe der ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramme und der Kennwerte Elastizitätsmodul (E-Modul) und Zugfestigkeit statt.

4.6.2 Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Bruchbilder

Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Diagramme wird exemplarisch anhand der Zusammensetzung F1_80 in **Abbildung 24** beschrieben. Die Diagramme und Bruchbilder der anderen Zusammensetzungen sind dem **Anhang G** beigelegt.

Das Diagramm der Proben F1_80 zeigt für die geprüften Proben 1-3 einen in der Norm beschriebenen (DIN EN ISO 527-1:2019-12 Bild 1 Kurventyp 1) typischen Spannungs-Dehnungskurvenverlauf, der für ein sprödhartes Werkstoffverhalten steht, da er bei geringerer Dehnung bricht, ohne dass eine Streckdehnung erreicht wird. Der charakteristische Verlauf der Proben 4-6 weist, ähnlich dem in der Norm dargestellten Kurventyp 3, auf ein zähhartes Werkstoffverhalten hin. Nach Beanspruchung der Proben (4-6) oberhalb der Streckspannung kommt es zum Fließen bis zum Erreichen der Bruchspannung.

Die gemachten Beobachtungen spiegeln sich im Bruchverhalten der Probekörper wider. Die in **Abbildung 25** dargestellten Probekörper zeigen für die Proben 1-3 einen charakteristischen Sprödbbruch der Proben (körnige-zackige Bruchfläche, Bruchfläche senkrecht zur dominanten Normalspannung). Im Gegensatz dazu ist bei den Proben 4-6 beobachtbar, dass diese in einigen Lagen direkt gerissen und andere Lagen nach dem Bruch teilweise noch durch einige Materialstränge verbunden sind. Dies deutet auf eine deutlich stärkere Lagenhaftung der Proben 1-3 im Gegensatz zu den anderen Proben hin. Aufgrund dessen, dass sowohl die Druckparameter als auch Prüfeinstellungen innerhalb der Probenreihe nicht verändert wurden, ist dieses widersprüchliche Werkstoffverhalten innerhalb einer Probenreihe der gleichen Zusammensetzung auf Druckfehler, Inhomogenität des Materials oder Fehler beim Einspannen der Proben zurückzuführen.

Die Verläufe und das Materialverhalten bzw. Bruchverhalten der Füllgrade 90- und 100 % des Materials F1 (**Anhang G.3.1-G.3.2**) sind sehr ähnlich zu dem der Proben 4-6 in **Abbildung 25**. Die Proben 1-3 dagegen sind repräsentativ für die Materialien F2-F5 aller Füllgrade (**Anhang G.3.3-G.3.14**), da diese ausschließlich im Kurventyp a verlaufen und Sprödbbruchverhalten zeigen.

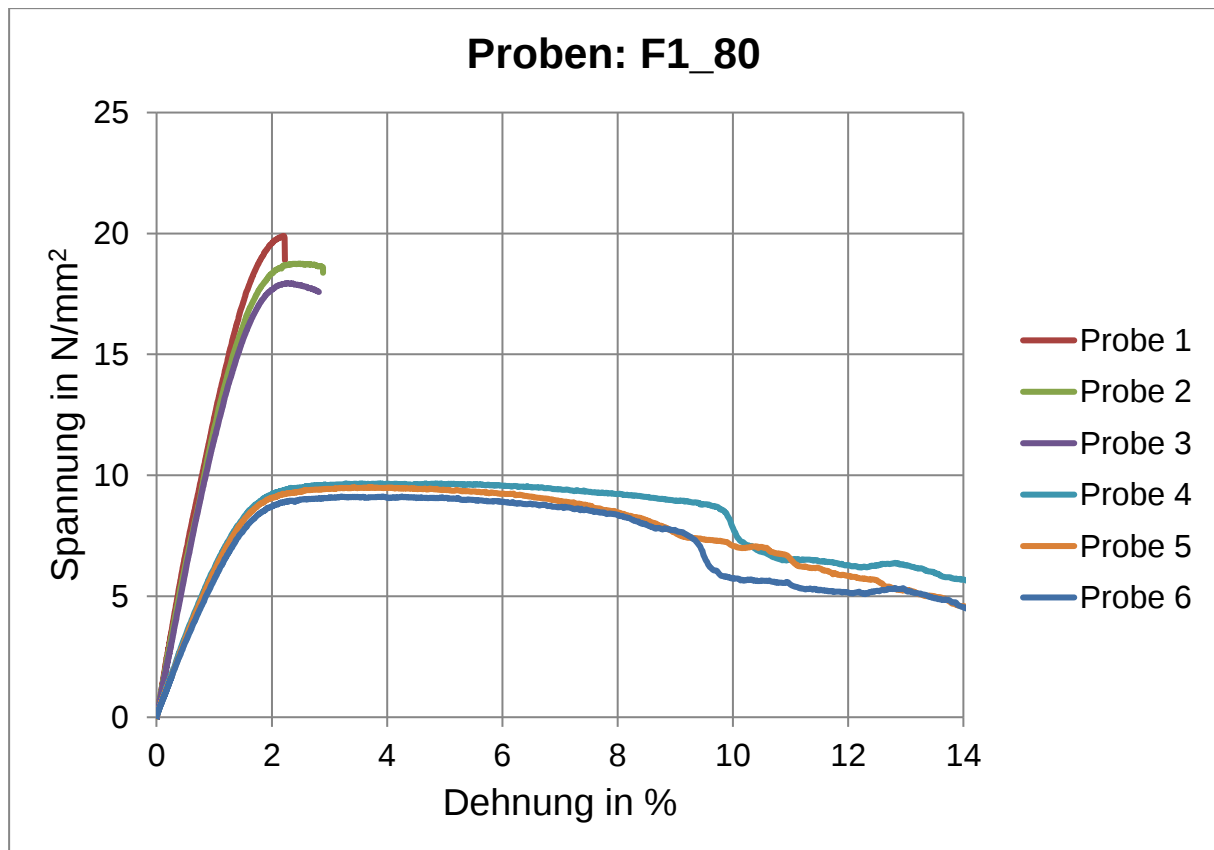


Abbildung 25: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F1_80



Abbildung 26: Bruchstellen der Proben F1_80 nach der Zugprüfung

4.6.3 Vergleich der Kennwerte

Für den Vergleich der verschiedenen Probenreihen bzw. Materialien und deren Füllgrade wird für jeden Kennwert einer Probenreihe der empirische Mittelwert und die Standardabweichung aus den im **Anhang G.1** beigefügten Messdaten nach den folgenden Formeln bestimmt:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

$\bar{x}$ = Empirischer Mittelwert

s = Empirische Standardabweichung

n = Anzahl gemachter Messungen (eines Füllgrades und Filamentes)

x_i = gemessener Wert

Die folgenden Beobachtungen in **Tabelle 12** beruhen auf den in **Abbildung 26** und **27** dargestellten Diagrammen des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit.

Tabelle 13: Beobachtungen zu den Abbildungen 26 und 27

Beobachtung	Elastizitätsmodul	Zugfestigkeit
1)	Im Diagramm ist beobachtbar, dass für jedes Material (außer F4) mit der Zunahme des Füllgrades (80 % → 90 % → 100 %) eine Steigerung des Elastizitätsmoduls einhergeht. Die Proben mit einem Füllgrad von 100 % können damit mehr Widerstand gegen eine Verformung in Form von Zug entgegensetzen als die Proben mit 90- und 80 % Füllgrad.	Analog zu den Beobachtungen des Elastizitätsmoduls gilt auch für die Zugfestigkeit der verschiedenen Probenzusammensetzungen, dass mit einem steigendem Füllgrad die Probenkörper mehr Zugspannung ertragen können, ohne dass ein Materialversagen eintritt.
2)	Durch den Vergleich der erreichten Höchstwerte eines jeden Materials ist folgende absteigende Reihenfolge ablesbar: F2, F5, F1, F4 und F3. Damit zeigt das Material F2 mit einem Fasergehalt von 8,66 wt-% den höchsten Widerstand gegen eine Zugverformung und das Material F3 mit dem nächsthöheren Fasergehalt von 18,01 wt-% den niedrigsten E-Modul.	Die höchste Zugfestigkeit wird vom Material F1 (ohne Faserteil) erreicht. Danach folgen die Materialien F2, F3, F3 und F4. Auch hier zeigt ein Vergleich des Kennwertes der Materialien den größten Sprung zwischen dem Material F2 und F3. Ab einem Fasergehalt von 18,01 wt-% (F3) bis zu einem Fasergehalt von 29,15 wt-% (F5) steigt

Beobachtung	Elastizitätsmodul	Zugfestigkeit
		die ertragbare Zugspannung wieder leicht.
3)	Bei dem Vergleich der Standardabweichungen (Fehlerindikatoren im Diagramm) der Materialien, ist erkennbar, dass bei den drei Materialzusammensetzungen F1_80, F1_90 und F4_90 die Standardabweichung sehr hoch ist. Der Variationskoeffizient beträgt in der genannten Reihenfolge 38,64 %, 28,91 % und 20,58 %. Alle anderen Materialzusammensetzungen haben einen Variationskoeffizienten unter 10 % (siehe Anhang G.2).	Die größten Standardabweichungen des Kennwertes sind erneut den Materialien F1_80, F1_90 und F4_90 zuzuordnen. Der Variationskoeffizient beträgt für die drei größten genannten Abweichungen 36,79 %, 31,8 % und 22,58 %.
4)	Im Vergleich zu den anderen Materialien zeigt das verarbeitete Filament F4 sowohl bei der Zugfestigkeit als auch beim E-Modul kaum Unterschiede bei der Erhöhung des Füllgrades. Die Proben mit einem Füllgrad von 80 % haben im Durchschnitt ein höheres E-Modul als die Proben mit einem Füllgrad von 100%.	

Mit Hilfe der ersten Beobachtungen beider Diagramme lässt sich folgern, dass ein erhöhter Bauteilfüllgrad und dementsprechend weniger Abstand der einzelnen Filamentstränge zueinander zu einem erhöhten Widerstand gegen Verformung führt. Durch den geringeren Abstand der Filamentstränge kommt es zu mehr Berührungsfläche, die zu einer verbesserten Haftung der extrudierten Stränge untereinander führt.

Die Vermutung, dass mit steigendem Fasergehalt eine generelle Verstärkung bzw. erhöhte Festigkeit der Probe eintritt, wird durch die zweiten Beobachtungen (**Tabelle 13**) widerlegt. Unter den gegebenen Bedingungen und auf Basis der erhaltenen Versuchsergebnisse kann ab einem Fasergehalt von 18,01 % (F3) von einer festigkeitssteigernden Wirkung eines steigenden Fasergehalts (von F3 zu F5) ausgegangen werden. Wird der genannte Zusammenhang aus **Abschnitt 4.6.1** berücksichtigt und ebenfalls die Tatsache, dass mit steigendem Fasergehalt die Düsentemperaturen gesteigert werden, könnte die leichte Steigerung der mechanischen Eigenschaften (oder ein Teil dieser) auch auf die erhöhte Verschlaufungsmöglichkeit der Polymerketten (aufgrund der erhöhten Temperatur) und der damit erhöhten Stranghaftung zurückzuführen sein.

Die Beobachtung der hohen Standardabweichungen der Zusammensetzungen F1_80 und F1_90 stimmen mit den beschriebenen Verarbeitungsproblemen und den damit einhergehenden Fehl- drucken überein. Über den Grund der unterschiedlichen Messwerte der Probenreihe und der

damit hohen Standardabweichung kann, aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs, nur spekuliert werden. Der Elastizitätsmodul der Probenreihe F1_100 lässt sich mit bereits in der Literatur vorhandenen Daten vergleichen. Die Untersuchungen von Ou-Yang [2018] zeigen für das gleiche Material (PLA/PBS im Verhältnis 8:2) mit dem gleichen Füllgrad (100 %) ein vergleichbares E-Modul zu dieser Materialprüfung von 2150 ± 177 MPa. Die Zugfestigkeit lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Probenformen nicht vergleichen. Gleichzeitig führt in der genannten Arbeit die Materialzusammensetzung mit höherem PBS Anteil zu niedrigerer Zugfestigkeit und einem deutlich niedrigeren Elastizitätsmodul. Inhomogenität bei den hergestellten Filamenten/Prüfkörpern könnte daher zu drastischen Abweichungen der untersuchten Kennwerte führen und die hohen Standardabweichungen der genannten Probenreihen erklären.

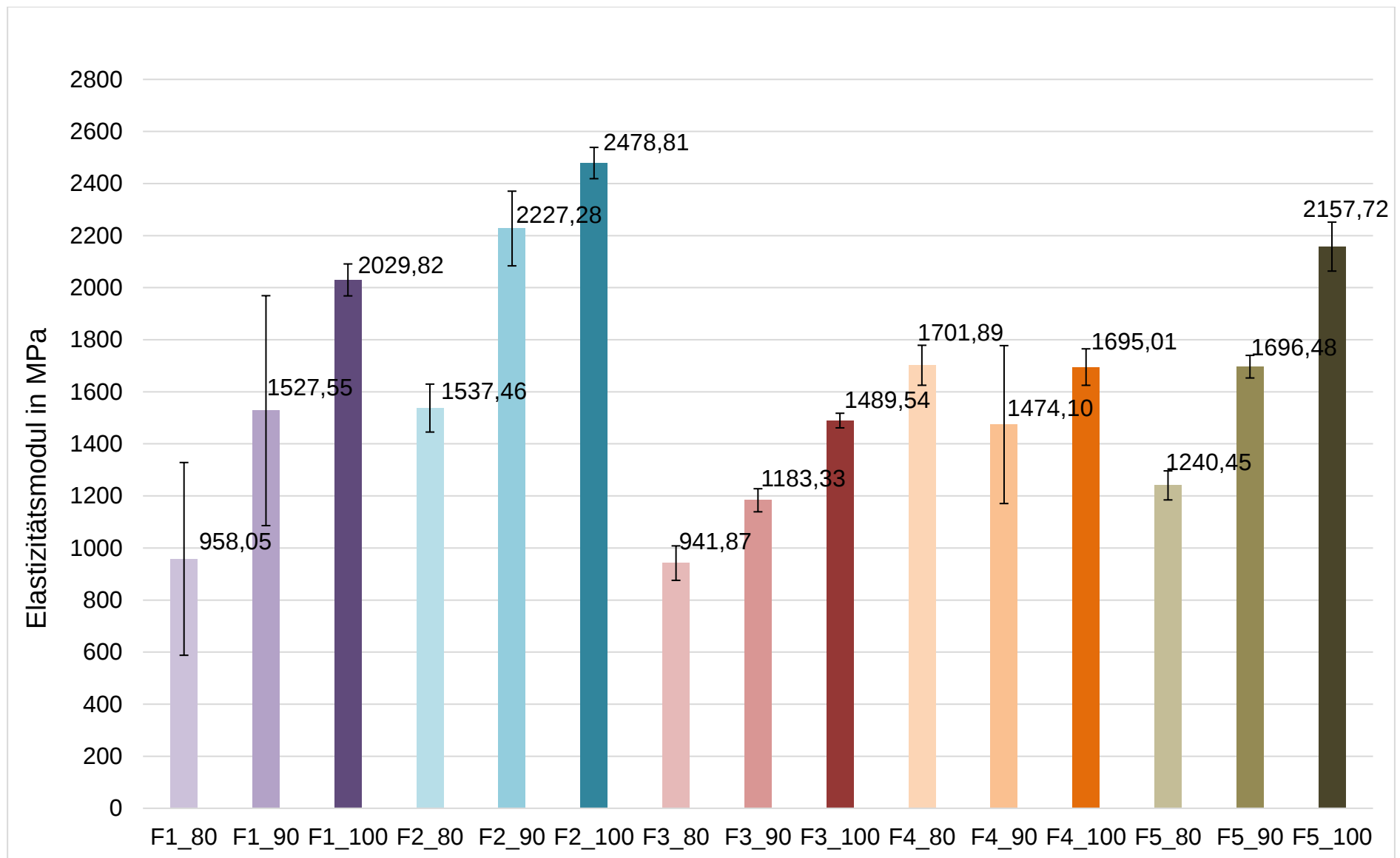


Abbildung 27: Mittleres Elastizitätsmodul der Materialien (F1-F5 in den Füllgraden 80-100 %)

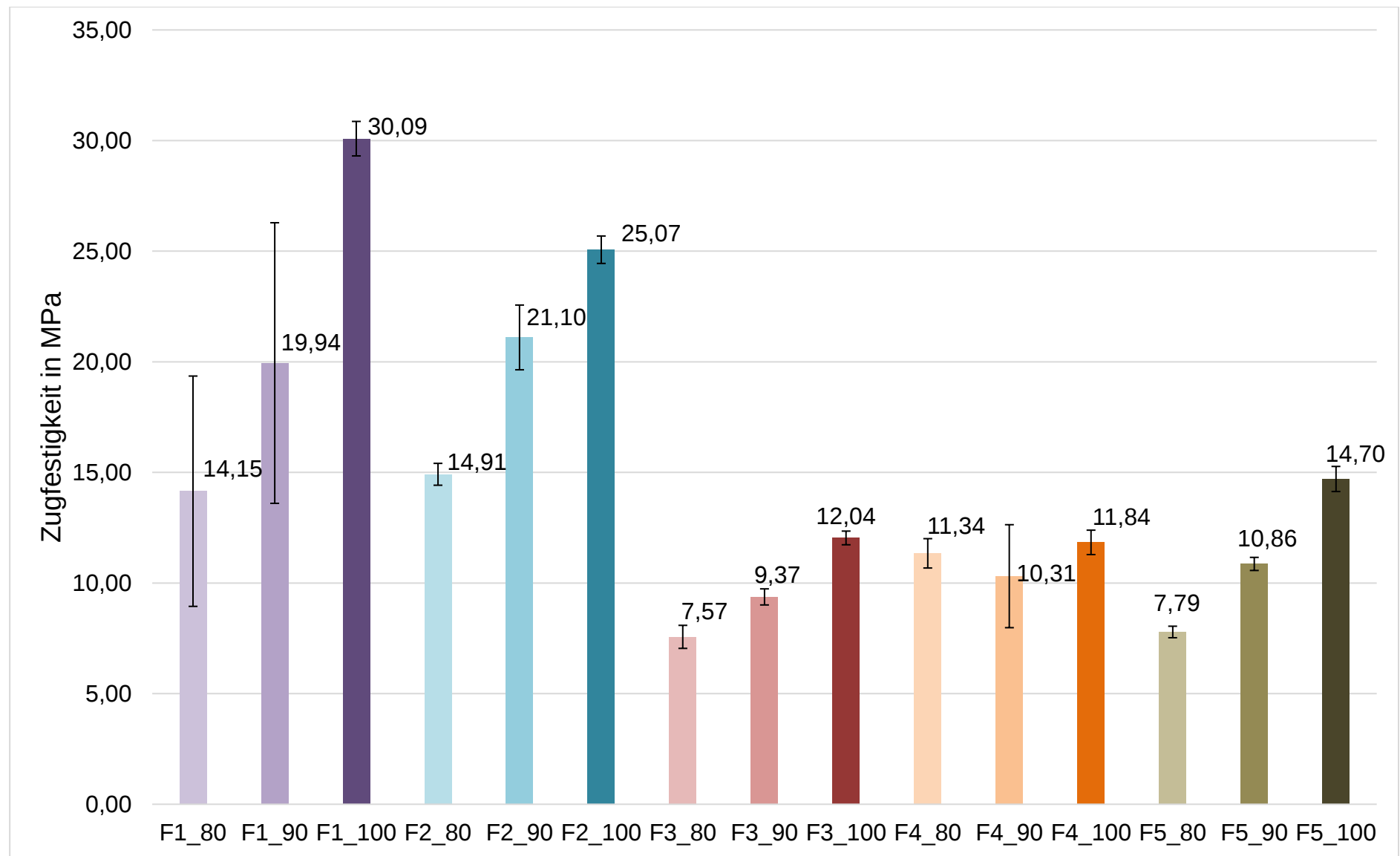


Abbildung 28: Mittlere Zugfestigkeit der Materialien (F1-F5 in den Füllgraden 80-100 %)

4.7 Diffusionskoeffizient

Der Diffusionskoeffizient ist ein Maß für die Beweglichkeit eines diffundierenden Stoffes (Feststoff, Gas oder Flüssigkeit) und dessen Diffusionsgeschwindigkeit. Dabei ist der Diffusionskoeffizient von vielen Faktoren abhängig. Die größte Abhängigkeit besteht zur Molekülgröße des eindiffundierenden Stoffes und dem inneren Aufbau, in den der genannte Stoff eindiffundiert. Weitere Abhängigkeiten bestehen zu einer erhöhten Temperatur, zu Rissen (zusätzliche Diffusionswege), zu Lufteinschlüssen und eventuellen Zugspannungen im Probenkörper. In den Fällen, in denen der Diffusionskoeffizient nicht konstant ist, ist dieser zusätzlich von der Feuchtekonzentration abhängig. [Schürmann, 2007]

Der Feuchtegehalt der Proben steigt am Anfang der Einlagerung linear mit der Quadratwurzel der Zeit. Der Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes wird anschließend exponentiell geringer und nähert sich einem Sättigungswert $M_{\max}$. Die verschiedenen Materialien F1-F5 unterscheiden sich, wie in **Abbildung 28** beispielhaft dargestellt, in der Höhe des Anstieges des Feuchtigkeitsgehaltes über die Zeit und der maximal aufgenommenen Menge Feuchtigkeit nach einer Zeit von 2 Stunden und 30 Minuten. Die Abbildung zeigt repräsentativ, dass mit einem steigendem Faseranteil im Material ($F1 < F2 < F3 < F4 < F5$) sowohl die Geschwindigkeit der Feuchtaufnahme als auch der maximale Feuchtegehalt steigt.

Das generelle Verhalten der Feuchtaufnahme bzw. der Einfluss des Fasergehaltes auf die Feuchtaufnahme lässt sich durch die hydrophilen Eigenschaften der Cellulosefaser erklären. Die hydrophile Eigenschaft ist auf die funktionellen OH-Gruppen (Hydroxygruppen) der Glucoseeinheiten der Cellulose und deren Fähigkeit zur Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zurückzuführen. [Uma Devi, 2004]

Die für dieses Diagramm ausgewählten Verläufe (F1-F5 Füllgrad 90 %) der Materialien sind nur die Aufnahmen einzelner Proben, weshalb der Vergleich anderer Proben zu weniger stark differierender Werte führen kann. Die Rohdaten des Versuches und die daraus entwickelten Diagramme der jeweiligen Materialien sind dem **Anhang H** beigelegt.

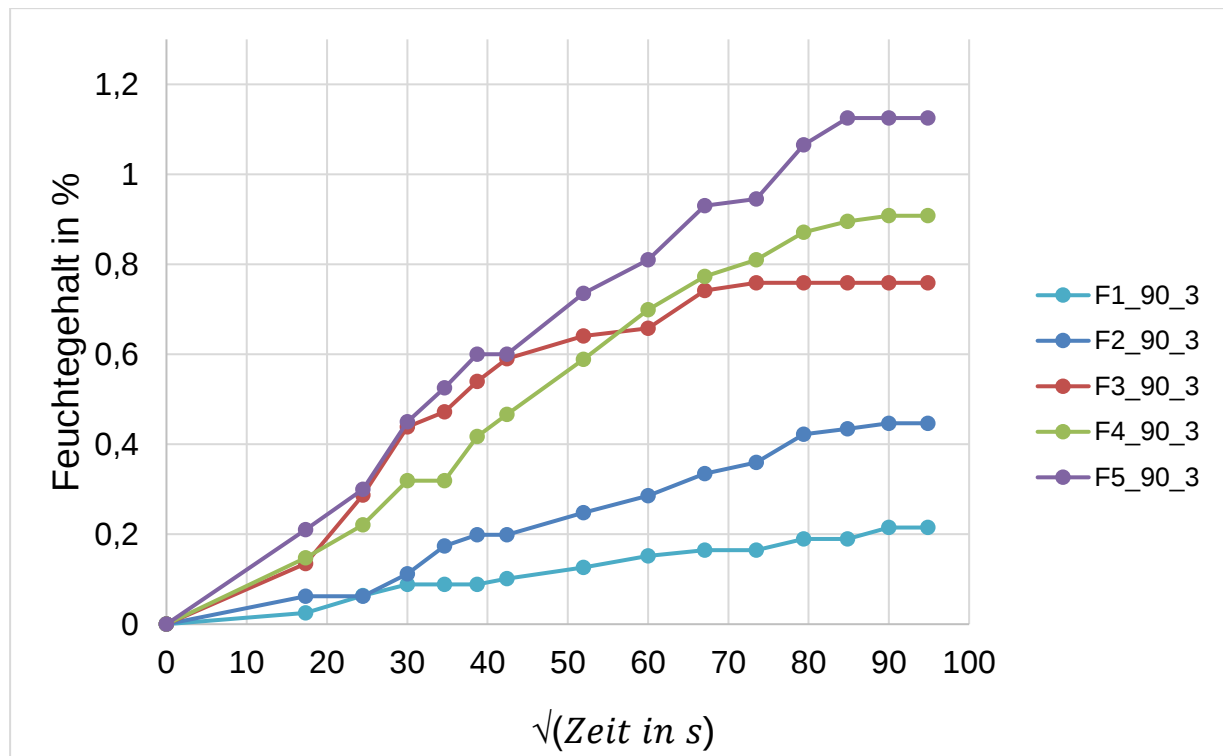


Abbildung 29: Zeitlicher Verlauf der Feuchtigkeitsaufnahme der Proben F1-F5 (90 % Füllgrad)

Der zu ermittelnde Diffusionskoeffizient lässt sich anhand der Steigung aus dem linearen Anfangsbereich nach der folgenden Formel berechnen. [Schürmann, 2007]

$$D = \frac{\pi}{16} \times \left(\frac{F_2 - F_1}{F_{max} - F_0} \right)^2 \times \left(\frac{d}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (4)$$

d = Wanddicke der Probe

F_2, F_1 = Feuchtegehalt der Proben zu verschiedenen Zeiten t_2 und t_1 , wobei:

$$F = \frac{\Delta M}{M_0}$$

ΔM = Masse der aufgenommenen Feuchte

M_0 = Masse des trockenen Materials

F_0 = Feuchtegehalt der Probe zu Beginn des Versuchs

F_{max} = Sättigungsgehalt

Aufgrund der Trocknung der Probe von über 72 Stunden kann von einer völlig trockenen Probe ausgegangen werden. In diesem Fall vereinfacht sich Formel (4) aufgrund der Anfangsbedingungen $F_0 = 0$ und $t = 0$ zu:

$$D = \frac{\pi}{16} \times \left(\frac{F_1 * d}{F_{max}} \right)^2 \times \frac{1}{t_1} \quad (5)$$

Der Zeitpunkt t_1 und der dementsprechende Feuchtegehalt für die Berechnung des Diffusionskoeffizienten wurde mit Hilfe der erstellten Diagramme (siehe **Anhang H.1**) festgelegt. In den Diagrammen lässt sich für fast alle Verläufe ein relativ linearer Verlauf im Bereich 0-25 (Messpunkt im Diagramm bei $38,73 \sqrt{s}$) feststellen, weshalb die genannten Werte für diesen Zeitpunkt ausgewählt wurden. Anschließend wird für jedes Material und jeden Füllgrad der Mittelwert des Diffusionskoeffizienten analog zu den Berechnungen der Zugeigenschaften (**Formel 2 und 3**) bestimmt. Die erhaltenen Werte wurden zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit in das Balkendiagramm in **Abbildung 29** eingetragen.

Das Material F3 zeigt in allen Füllgraden im Vergleich zu den anderen Materialien und Füllgraden mit Abstand den größten Diffusionskoeffizienten. Den niedrigsten Diffusionskoeffizienten hat das Material F4 mit einem Füllgrad von 90 %. Auffallend ist dabei, dass der Diffusionskoeffizient bei einem Füllgrad von 80 % des gleichen Materials einen mehr als doppelt so großen Diffusionskoeffizienten hat. Aufgrund der allgemeinen Eigenschaften der Cellulosefaser und der Untersuchung von Uma Devi [2004] (untersucht wurde ein Ananasfaser-Polyester-Verbundwerkstoff mit unterschiedlichen Faseranteilen) wäre ein Anstieg des Diffusionskoeffizienten mit steigendem Faseranteil zu vermuten gewesen. Dies lässt sich durch die eben beschriebene Datenlage nur für die maximale Sorption und Geschwindigkeit (s. **Abbildung 28**) der Wasseraufnahme (steigend bei höherem Faseranteil) und nicht für den Diffusionskoeffizienten feststellen.

Bei der Betrachtung der dargestellten Füllgrade der Materialien ist erkennbar, dass diese sich sehr unterschiedlich verhalten. Der Diffusionskoeffizient zeigt keine Regelmäßigkeiten für einen steigenden oder fallenden Füllgrad und die ermittelten Versuchsergebnissen zeigen damit keinen Einfluss des Füllgrades auf den Diffusionskoeffizienten.

Für den Vergleich der gleichen Füllgrade bei einem steigendem Fasermassenanteil (bspw. F1_80, F2_80, F3_80...) ist ebenfalls kein Zusammenhang mit dem Diffusionskoeffizienten dokumentierbar.

Aufgrund der gemachten Beobachtungen, den allgemeinen Versuchsbedingungen und den zu Beginn des Kapitels genannten Abhängigkeiten (Risse, Lufteinschlüsse, Zugspannung, etc.) des Diffusionskoeffizienten, müssen die erhaltenen Ergebnisse detailliert betrachtet werden.

Eine Analyse der Versuchsbedingungen führt zu folgenden kritischen Faktoren:

1. Die gemessenen Proben sind sowohl durch den 3D-Druck als auch das Stanzverfahren nicht gleich und haben eine unterschiedliche Anzahl und Ausprägung an Rissen, Druckfehlern, Lufteinschlüssen. D. h. die gemessenen Werte werden fertigungsbedingt verfälscht und geben nur eingeschränkt Rückschluss auf die Materialeigenschaften.

2. Die Grundlage der Berechnung des Diffusionskoeffizienten bildet das gemessene Gewicht bzw. die Gewichtszunahme der Probe. Eine Änderung des Gewichts ist für die meisten Messungen nur in der letzten messbaren Ziffer der Waage festzustellen (0,1 mg). Gleichzeitig sind die Proben z. T. porös oder neigen zur Delamination einzelner Stränge und könnten daher durch kleinste Absplitterungen schon zur Verfälschung von Messergebnissen geführt haben.
3. Bei dem Vergleich des Versuchszeitraums der durchgeführten Messung (2,5 Stunden) mit den Messungen von bspw. Uma Devi [2004] (3 Wochen), erscheint der gewählte Endpunkt der Messung zu kurz bemessen. Eine ergänzende Überprüfungsmessung nach 24 Stunden könnte zusätzliche Sicherheit geben.

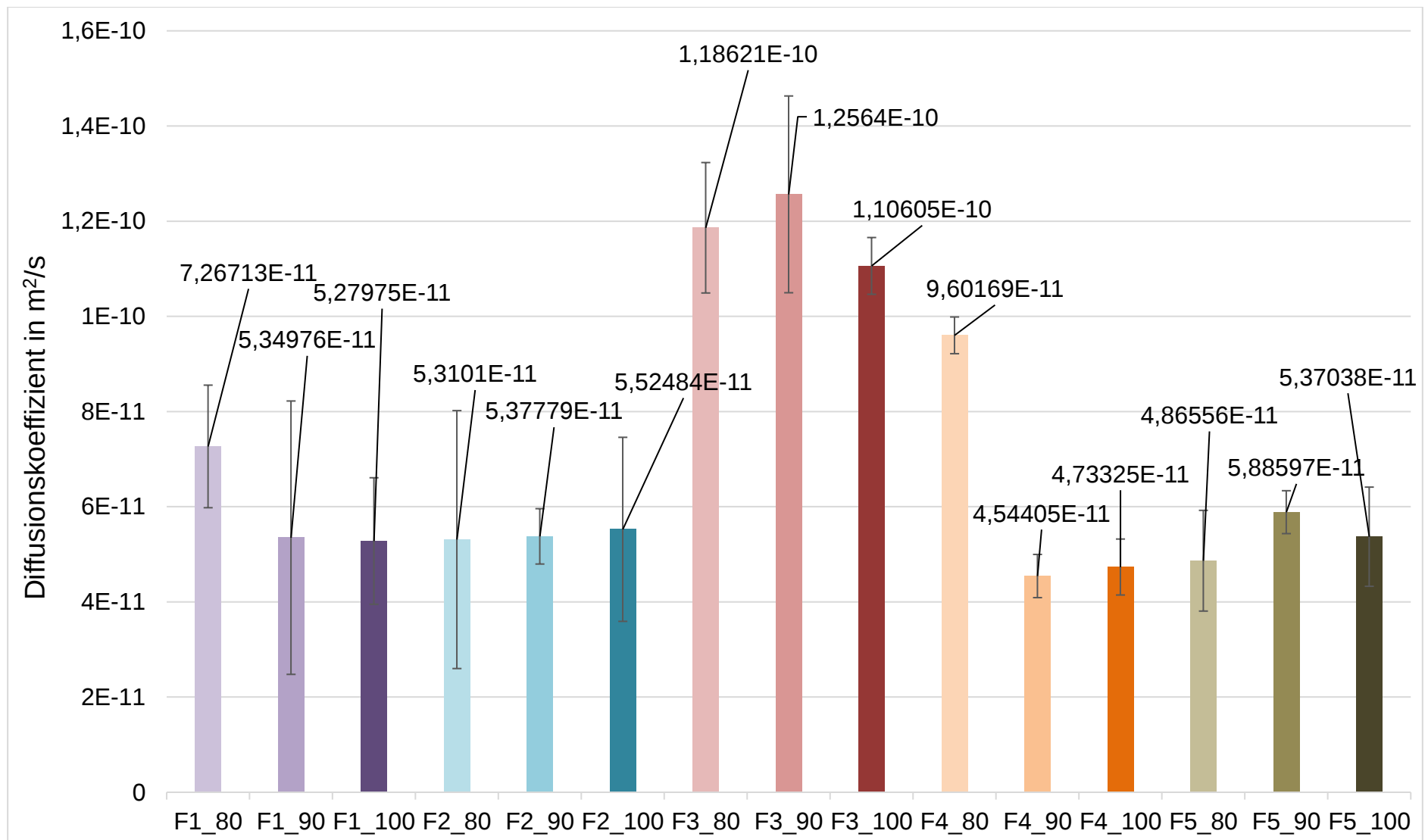


Abbildung 30: Mittlerer Diffusionskoeffizient der Materialien (F1-F5 in den Füllgraden 80-100 %)

4.8 Dynamisch-mechanische Eigenschaften

4.8.1 Allgemeines

Die in der DMA ermittelten und im Folgenden erläuterten Kennwerte sind der Speichermodul E' , der Verlustmodul E'' und der Verlustfaktor $\tan \delta$.

Der Speichermodul E' stellt ein Maß für die reversibel gespeicherte Deformationsenergie bzw. Steifigkeit des Materials dar und ist in etwa äquivalent zum Elastizitätsmodul. Dabei spiegelt der Speichermodul die elastischen Eigenschaften des Materials wider. Beispielsweise verformen sich Materialien mit einem niedrigem E' -Wert bereits bei geringer Belastung. Der Verlustmodul E'' beschreibt das Dämpfungsverhalten des Materials und ist proportional zu der durch Belastung zugeführten Energie, die z. B. durch innere Reibung in Wärme dissipiert wird. Damit ist der Verlustmodul ein Maß für die nichtwiedergewinnbare, umgewandelte Schwingungsenergie und kann zur Beurteilung der viskosen Eigenschaften genutzt werden. Der Verlustfaktor $\tan \delta$ stellt das Verhältnis von Verlust- zu Speichermodul dar und kennzeichnet damit das Verhältnis von elastischem zu plastischem Materialverhalten. Ein niedriger $\tan \delta$ -Werte ist charakteristisch für ein elastisches Material bzw. einen hohen elastischen Verformungsanteil. [Ehrenstein, 2003, Fleischmann, 2010, Zosel, 1996]

Die beschriebenen Kennwerte der DMA werden mit Hilfe der Software Universal Analysis 2000 (TA Instruments Inc.©) dargestellt und ausgewertet. Der Verlustmodul E' der Materialien (thermoplastisches System), wie beispielhaft in **Abbildung 30** durch die Probe F5_90_1 veranschaulicht, durchläuft drei verschiedene Bereiche:

1. Glaszustand/energieelastischer Bereich: Die Moleküle des Materials sind bei niedrigen Temperaturen unbeweglich und können der schwingenden Belastung nicht folgen und bleiben daher steif. Es sind keine Gestaltänderungen von Makromolekülabschnitten möglich und Molekülverschlaufungen (bei amorphen Thermoplasten) haben einen ähnlichen Effekt wie Vernetzungspunkte.
2. Glasübergangsbereich: Bei steigender Temperatur bzw. hohen Temperaturen werden die Molekülabschnitte leichter beweglich. Das macht eine Umlagerung von Seitengruppen und Seitenketten oder Mikrobrownschen Bewegungen möglich. Die Moleküle können durch die verbesserte Beweglichkeit der Belastung folgen und die Verschlaufungen bleiben, bis auf vereinzelt Verrutschen und Lösen, fest. Im Anfangsbereich, in dem die Moleküle durch den Erweichungsvorgang (durch erhöhte Temperatur) das erste Mal der schwingenden Belastung folgen können, ist der nichtelastische Verformungsanteil

und die in innere Reibung umgewandelte Energie am größten, d. h. der Verlustmodul erreicht zu diesem Zeitpunkt ein Maximum.

3. Gummielastischer/entropieelastischer Bereich: Bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur geht das Material in einen gummiartigen bis zähflüssigen Zustand über und kann aufgrund der Beweglichkeit der Moleküle/-ketten kaum Spannung aufnehmen. Das Verhältnis zwischen aufnehmbarer Spannung und Dehnung ist nicht linear. Dabei bezeichnet die Eigenschaft der Gummielastizität die Fähigkeit eines Materials, nach Verformung (bspw. Streckung von ganzen Makromolekülen oder Molekülsegmenten) wieder in einen entropischen günstigen Knäuelzustand zurückzukehren. [Ehrenstein, 2003, Fleischmann, 2010, Grellmann, 2015, Schmiedel, 1992]

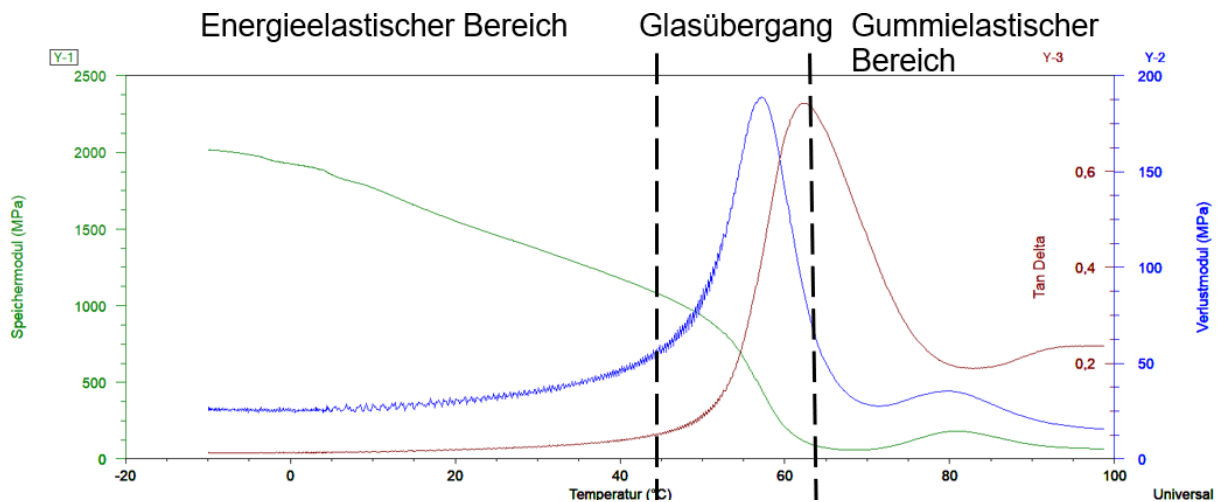


Abbildung 31: Ergebnisse der DMA des Materials F5_90_1 - Verlauf des Speichermoduls (grün), des Verlustmodules (blau) und des Verlustfaktors (rot)

Für die untersuchten Materialien/ Proben ergeben sich drei grundsätzlich verschiedene Kurventypen des Speichermoduls:

- Kurventyp (a), repräsentativ dargestellt in **Abbildung 30**, sinkt bis zum Glasübergangsbereich fast linear. Im Bereich des Glasübergangs fällt der Speichermodul deutlich stärker bis teilweise auf ein Tausendstel ab.
- Kurventyp (b) zeigt, wie in **Abbildung 31** (oben), vor dem Glasübergangsbereich ein Anstieg der Speichermoduls. Der Anstieg des Speichermoduls beträgt, je nach Probe, von wenigen MPa bis hin zu maximal 280 MPa.
- Kurventyp (c) ist, wie ebenfalls in **Abbildung 31** (unten) ersichtlich, ein Mischfall der Kurventypen (a) und (b) und zeigt vor dem Glasübergangsbereich einen Temperaturbereich, in dem der Speichermodul konstant bleibt.

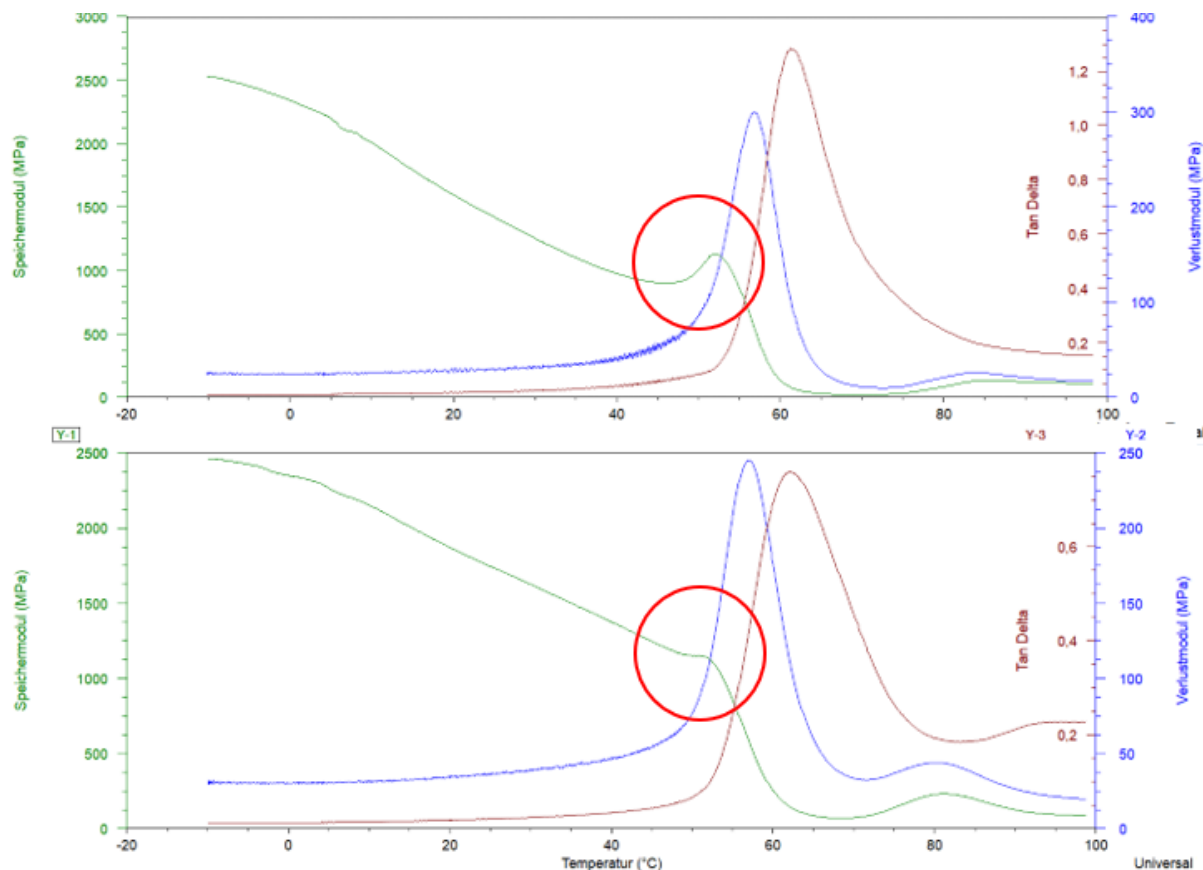


Abbildung 32: Ergebnisse der DMA der Materialien F1_100_3 und F5_100_1 - Anstieg des Speichermoduls (F1_100_3, oben) und konstanter Speichermodul (F5_100_1, unten)

Eine Auswertung der Speichermodulverläufe der getesteten Proben, wie in **Tabelle 14** zusammengefasst, zeigt keine eindeutige Verteilung der Kurventypen auf bestimmte Füllgrade oder Faseranteile. Kurventyp (a) und (c) sind die in der Literatur erwarteten Verläufe für amorphe oder teilkristalline Kunststoffsysteme. Ein Verlauf, wie durch Kurventyp (b) dargestellt, ist der in der Literatur beschriebenen Nachhärtreaktion eines Harzsystems sehr ähnlich. Daher ist zu

vermuten, dass der Kurventyp (b) bzw. die untersuchten Proben mit diesem Verlauf durch Inhomogenität bzw. den Probenzustand verursacht wird. Die Diagramme aller Proben sind dem **Anhang I.1** beigelegt.

Tabelle 14: Kurventypverläufe aller getesteten Proben

Probe	Kurventyp	Probe	Kurventyp
F1_80_1	c	F4_80_1	c
F1_80_2	b	F4_80_2	a
F1_90_1	b	F4_90_1	c
F1_90_2	a	F4_90_2	a
F1_90_3	b	F4_90_3	b
F1_100_1	a	F4_90_4	a
F1_100_2	b	F4_90_5	b
F1_100_3	b	F4_100_1	b
F2_80_1	b	F4_100_2	b
F2_80_2	b	F4_100_3	b
F2_90_1	b	F5_80_1	c
F2_90_2	b	F5_80_2	a
F2_100_1	b	F5_80_3	c
F2_100_2	b	F5_90_1	c
F3_80_1	a	F5_90_2	a
F3_80_2	a	F5_90_3	b
F3_90_1	a	F5_90_4	c
F3_90_2	a	F5_100_1	c
F3_100_1	c	F5_100_2	b
F3_100_2	c		

4.8.2 Vergleich der Kennwerte

Für den Einfluss des Fasergehaltes und des Füllgrades werden daher folgende Daten der Materialien verglichen:

- Speichermodul bei den Temperaturen 0 °C, 21 °C und 42 °C
- Verlustfaktor $\tan \delta$ an den eben genannten Temperaturen (0 °C, 21 °C und 42 °C)

Aus den Versuchsdaten der einzelnen Proben wird, analog zu **Abschnitt 4.6.3** mit den **Formeln (2) und (3)**, der empirische Mittelwert des jeweiligen Materials bzw. Füllgrades mit Standardabweichung gebildet.

Abbildung 32 und **33** zeigen die zuvor berechneten Mittelwerte der verschiedenen Materialien und Füllgrade zur besseren Vergleichbarkeit in einem Balkendiagramm. Die exakten Datenwerte können dem **Anhang I.2** entnommen werden.

Es lassen sich folgende Beobachtungen in **Abbildung 32** machen:

1. Das Diagramm zeigt, entsprechend den E-Moduln aus dem Zugversuch, für jedes Material einen Anstieg des Speichermoduls bei steigendem Füllgrad der Probestrukturen.
2. Im Diagramm ist ebenfalls ersichtlich, dass der Wert des Speichermoduls für jedes Material und Füllgrad bei steigender Temperatur, aufgrund des in **Abschnitt 4.8.1** beschriebenen Verhaltens bei steigender Temperatur (mehr Beweglichkeit der Moleküle = weniger aufnehmbare Spannung), sinkt.
3. Für die Höhe der Werte des Speichermoduls lassen sich die in **Tabelle 14** zusammengefassten von der Temperatur und dem Füllgrad abhängigen Reihenfolgen (von hohem zu niedrigem Wert) feststellen. Auffällig ist, dass zu jeder Temperatur und jedem Füllgrad das Material F4 den höchsten Speichermodul besitzt. Das Material F2 hat für die Füllgrade 80- und 90 % bei allen Temperaturen den niedrigsten Speichermodul, wohingegen bei einem Füllgrad von 100 % das Material den zweiten Platz belegt. Die Materialien F1 und F5 liegen sowohl bei den verschiedenen Füllgraden als auch bei den unterschiedlichen Temperaturen meist im Mittelfeld. Material F3 zeigt bei einem Füllgrad von 100 % bei allen Temperaturen den niedrigsten und bei allen anderen Füllgraden den zweitniedrigsten Speichermodul.

Tabelle 15: Reihenfolge der Materialien des Speichermoduls (geordnet nach der Höhe des Wertes, groß nach klein)

Füllgrade	0 °C	21 °C	42 °C
80 %	F4, F1, F5, F3, F2		
90 %	F4, F1, F5, F3, F2		F4, F5, F1, F3, F2
100 %	F4, F2, F1, F5, F3	F4, F2, F5, F1, F3	

Bei dem Vergleich der Speichermodule der Materialien bei einer Temperatur von 21°C (Versuchstemperatur des Zugversuchs) mit den Elastizitätsmodulen des Zugversuchs, wie in **Tabelle 16** dargestellt, ist erkennbar, dass die Materialien F2_80, F2_90, F4_90 und F4_100 Abweichungen von über 500 MPa zeigen. Interessant ist dabei, dass Material F2 im Zugversuch die deutlich höheren Werte aufweist und Material F4 in der DMA den höheren Modul zeigt. Dementsprechend ergeben sich beim Vergleich beider Versuche für die angegebene Reihenfolge (Höhe der Kennwerte) der Materialien starke Unterschiede.

Dies lässt den Rückschluss zu, dass das Materialverhalten (steigender Fasergehalt) aufgrund der Verfälschung durch den Probenzustand (Inhomogenität, Druckfehler, etc.) nicht korrekt durch die gemachten Messungen/Versuche wiedergegeben werden kann.

Tabelle 16: Vergleich des Elastizitätsmoduls mit dem Speichermodule

Materialien	Speichermodule (DMA) [MPa]	Elastizitätsmodule (Zugversuch) [MPa]
F1_80	1125,0795	958,05
F1_90	1341,16567	1527,55
F1_100	1694,911	2029,82
F2_80	557,0515	1537,46
F2_90	809,7779	2227,28
F2_100	2219,0065	2478,81
F3_80	622,21845	941,87
F3_90	1000,5759	1183,33
F3_100	1150,9645	1489,54
F4_80	1378,4175	1701,89
F4_90	2000,657	1474,10
F4_100	2413,06933	1695,01
F5_80	773,992933	1240,45
F5_90	1246,08833	1696,48
F5_100	1726,948	2157,72

Die in **Abbildung 33** dargestellten Verlustfaktoren geben Rückschluss, wie bereits in **Abschnitt 4.8.1** beschrieben, auf den elastischen/nichtelastischen Verformungsanteil bzw. auf die mechanische Dämpfung des Materials bei der jeweiligen angegebenen Temperatur.

Anhand des Diagramms lassen sich folgende Beobachtungen machen:

1. Grundsätzlich steigt, im Gegensatz zum Speichermodule in **Abbildung 32**, der Verlustfaktor der untersuchten Materialien mit steigender Temperatur. Damit ist der Anteil nichtelastischer Verformung bei einer höheren Temperatur größer als bei einer niedrigeren Temperatur. Die bessere Beweglichkeit der Moleküle bei höheren Temperaturen

begünstigt eine mögliche Relativverschiebung von Struktureinheiten des Materials und dadurch ein viskoses Materialverhalten. [Grellmann, 2015]

2. Bei dem Vergleich der Werte des Verlustfaktors bei 42 °C, 21 °C und 0 °C, fällt auf, dass sich der Anteil nichtelastischer Verformung bei den ersten beiden Temperaturen (42 °C → 21 °C) deutlich mehr verringert als bei der Gegenüberstellung der Verformungsanteile von 21 °C auf 0 °C.
3. Bei der Betrachtung der Verlustmoduln aller untersuchten Materialien und Füllgrade der Temperatur 42 °C, ist erkennbar, dass die Werte sich um den Wert 0,04 herum befinden. Das gleiche Verhalten (alle Verlustmodulwerte einer Temperatur befinden sich mehr oder weniger nah aneinander), ist ebenfalls für die beiden anderen Temperaturen beobachtbar. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sowohl der Füllgrad als auch der Fasergehalt der Proben kaum Einfluss auf den Anteil des elastischen bzw. nichtelastischen Verformungsverhaltens haben.

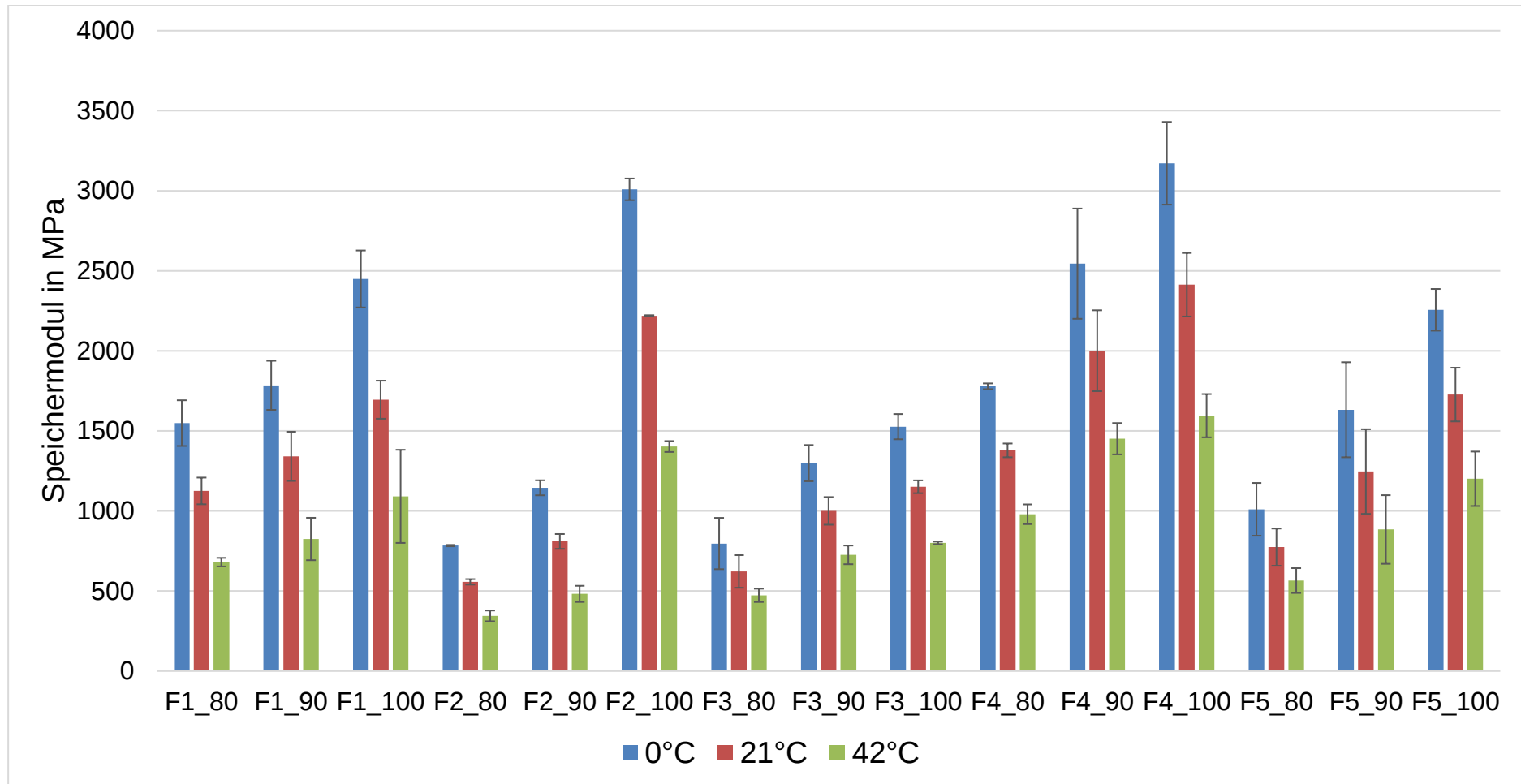


Abbildung 33: Mittlere Speichermodule bei den Temperaturen 0-, 21-, 42 °C (der Materialien F1-F5 in den Füllgraden 80-100%)

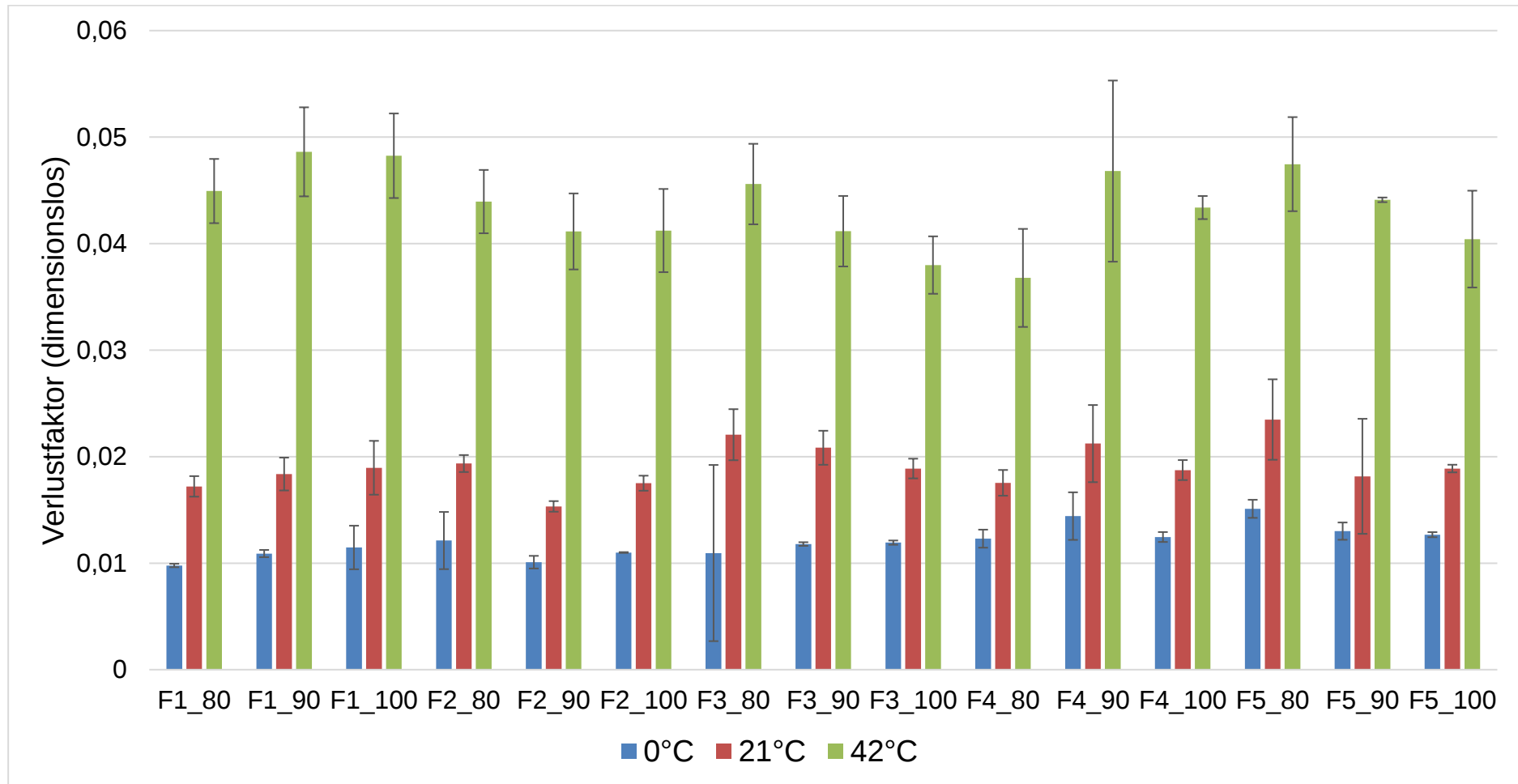


Abbildung 34: Mittlerer Verlustfaktor bei den Temperaturen 0-, 21-, 42 °C (der Materialien F1-F5 in den Füllgraden 80-100%)

5 Fazit

Die zu Beginn geplanten unterschiedlichen Fasermassenanteile in den Schritten 0-, 10-, 20-, 30-, 40 % der Filamente können unter den gegebenen Bedingungen dieser Arbeit in den abweichenden Fasergehalten 0-, 8,66-, 18,01-, 25,74-, 29,15 wt-% hergestellt werden. Aus den verschiedenen Fasergehalten ergibt sich eine beobachtbare unterschiedliche Verarbeitbarkeit der Materialien. Sowohl für die Filamentherstellung als auch die Probenkörperherstellung lässt sich unter den gegebenen Bedingungen dieser Arbeit eine höhere Prozessstabilität, auf Basis eines steigenden Fasergehalts und einer damit einhergehenden höheren Viskosität, beobachten. Die Bewertung der Verarbeitungseigenschaften beruht z. T. auf subjektiven Eindrücken während der Filament- und Probenkörperherstellung. In beiden Herstellungsschritten ist Prozess- und Materialerfahrung ein sehr großer Einflussfaktor, weshalb die genannten Eigenschaften nur bedingt auf weitere Versuchsreihen mit dem gleichen Material übertragbar sind. Zudem werden für die Verarbeitung der unterschiedlichen Filamentdurchmesser und höheren Fasergehalte der Filamente bauliche Anpassungen vorgenommen.

Mit Hilfe der genannten Anpassungen und der über die Slicing-Software steuerbaren Düsentemperatur, Extrusionsbreite, Fördergeschwindigkeit, Druckbetttemperatur und Druckgeschwindigkeit des 3D-Druckers können die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen (Durchmesser) und das materialspezifische Schwindungsverhalten erfolgreich kompensiert werden. Die Maßhaltigkeit der Probenkörper (Zugproben) zeigt fast ausschließlich große Abweichungen aufgrund von Warping-Fehlern.

Die untersuchte Flüssigkeitsdurchlässigkeit beruht, wie die Versuche dieser Arbeit gezeigt haben, auf den Materiallücken der Proben, die durch den Füllgrad zustande kommen. D. h. umso geringer der erwähnte Füllgrad, umso größer sind die Lücken der einzelnen abgelegten Stränge und umso größer ist dementsprechend die Durchlässigkeit der Proben. Zusätzlich wird gezeigt, dass die Durchlässigkeit stark von der Oberflächenstruktur abhängig ist. Eine solide Oberfläche der Proben, hervorgerufen durch die Verwendung einer *Arburg*-Druckplatte und infolgedessen geringem Startabstand der Druckdüse zur genannten Platte, kann zur kompletten Undurchlässigkeit auch bei niedrigen Füllgraden von Probenkörpern führen.

Die Untersuchungen zur Zugfestigkeit dieser Arbeit bestätigen die in der Literatur genannte hohe Abhängigkeit von hergestellten Bauteilen im 3D-Druck hinsichtlich der Kohäsion der Filamentstränge bzw. Schichthaftung. Die Probenkörper mit niedrigeren Füllgraden zeigen daher i. d. R. niedrigere Kennwerte im Vergleich zu Proben mit einem höheren Füllgrad. Für den Einfluss des Fasergehaltes lässt sich kein einheitliches Verhalten beschreiben. Die Versuche

zeigen bspw. für Proben bis zu einem Faseranteil von 8,66 wt-% (inkl.) ein steigendes E-Modul. Für die Zugfestigkeit ist bereits im ersten Sprung von 0-wt-% auf 8,66 wt-% Faseranteil ein leichter Rückgang feststellbar. Grundsätzlich lässt sich für beide Kennwerte ab einem Faser-massenanteil von 18,01 % für die Zugfestigkeit und den Elastizitätsmodul stark verminderte Werte beobachten, die für höhere Fasergehalte (25,74- und 29,15 wt-%) wieder (z. T. leicht) ansteigen.

Ein höherer Faseranteil im Material führt, wie die Versuche zum Diffusionskoeffizienten zeigen, zu einer Steigerung der maximalen Feuchtigkeitssorption aus der Umgebungsluft. Zusätzlich sorgt ein steigender Faseranteil dafür, dass die Feuchtigkeit schneller aufgenommen wird bzw. der Feuchtegehalt der Proben schneller steigt. Ein Zusammenhang zwischen dem Faser-gehalt und dem Diffusionskoeffizienten bzw. dem Füllgrad und dem Diffusionskoeffizienten kann nicht hergestellt werden.

Die DMA der Materialien zeigt für den Speichermodul der Proben hinsichtlich des Füllgrades allgemein das gleiche Verhalten (höherer Füllgrad = höheres Speichermodul bei vergleichener Temperatur) wie im Zugversuch. Aufgrund unterschiedlicher Reihenfolgen (für die Höhe des Speichermodules) abhängig von der jeweiligen verglichenen Temperatur lässt sich kein Ein-fluss des Fasergehaltes feststellen. Neben dem grundsätzlichen Verhalten der Materialien bei steigender Temperatur (zunehmender nichtelastischer Verformungsanteil), ablesbar am Ver-lustfaktor, bleiben die Werte des Faktors für einen steigenden Fasergehalt oder steigenden Füll-grad relativ gleich und zeigen damit ebenfalls keine erkennbare Abhängigkeit.

Für alle durchgeführten Versuche bzw. Versuchsergebnisse gilt eine generelle eingeschränkte Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit des beobachteten Materialverhaltens. Einer der Gründe dafür sind die unterschiedlichen Fertigungsparameter, die aufgrund der unterschiedlichen Ver-arbeitbarkeit, hervorgerufen durch die unterschiedlichen Faseranteile, nötig sind. Beispiels-weise gilt für die Kohäsion der Filamentstränge (die eine große Rolle bei den Zugeigenschaften und auch dem Speichermodul aus der DMA spielt) eine starke thermische Abhängigkeit bzw. die Temperaturgeschichte des Materials hat direkte Auswirkungen auf die Filamenthaftung. Der genannte Parameter wird jedoch für jedes/n Material/Fasergehalt geändert. Die unter-schiedlichen Ergebnisse der DMA, des Einlagerungsversuches oder die Schwierigkeiten wäh-rend des Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuches untermauern, dass für den Vergleich von Mate-rialien bzw. Materialeigenschaften die Probenähnlichkeit und der Probenzustand eine essenti-elle Rolle spielen und diese nur eingeschränkt durch die unterschiedlichen Fertigungsparameter (Düsentemperatur, Fördergeschwindigkeit) und Fertigungsverfahren (FDM, Probenstanzen) für diese Arbeit gegeben sind. Der direkte Vergleich des Speichermoduls mit dem E-Modul

(vgl. Kapitel 4.8.2) macht ebenfalls deutlich, dass der untersuchte Einfluss der Materialparameter durch die Fertigungsbedingungen verfälscht wird.

Die nachfolgende **Tabelle 16** fasst den beschriebenen Einfluss der Materialparameter auf die Materialeigenschaften zusammen.

Tabelle 17: Einfluss der Materialparameter auf die Materialeigenschaften

Materialparameter \ Untersuchte Eigenschaft	Steigender Fasergehalt (F1<F2<F3<F4<F5)	Steigender Füllgrad (80 %→90 %→100 %)
Verarbeitbarkeit	↑ Prozessstabilität ↑ Druckbetthftung ↑ weniger Waring-Fehler, die zum kompletten Abbruch des Druckes führen	
Maßhaltigkeit	→ Kein beobachtbarer Einfluss des Fasergehaltes und des Füllgrades	
Flüssigkeitsdurchlässigkeit	→ Kein unter den gegebenen Versuchsbedingungen erkennbarer Einfluss des Fasergehaltes	↓ Sinkende Durchlässigkeit bzw. Undurchlässigkeit bei hohen Füllgraden (100%)
Zugeigenschaften	↑ Sprödigkeit (Spröbruchverhalten) ↓ Zugfestigkeit F1-F4, für F4-F5 ↑ ↑ E-Modul F1-F2, für F2-F3 ↓ und für F3-F5 ↑	↑ Elastizitätsmodul ↑ Zugfestigkeit
Diffusionskoeffizient	↑ Maximale Feuchtigkeitssorption ↑ Geschwindigkeit der Feuchtaufnahme	
	→ Kein beobachtbarer Einfluss des Fasergehaltes und des Füllgrades	
Dynamisch-Mechanische Eigenschaften	→ Kein erkennbarer Einfluss auf den Speichermodul und den Verlustfaktor	↑ Speichermodul → Kein erkennbarer Einfluss auf den Verlustfaktor

6 Ausblick

Grundsätzlich, wie im Fazit bereits beschrieben, könnte mehr Erfahrung im Herstellungsprozess der Filamente oder auch der Einsatz einer Vakuumpumpe zu einem deutlich besseren Ausgangsmaterial für das FDM-Verfahren führen. Die Einhaltung des Standarddurchmessers der Filamente, auf die der 3D-Drucker vom Hersteller ausgelegt ist, oder eine deutlich höhere Filamentqualität durch Entgasung während des Extrusionsvorgangs (Vakuumpumpe) könnte die Qualität der hergestellten Proben im FDM-Verfahren verbessern und damit die untersuchten Eigenschaften beeinflussen. Mit Hilfe der genannten Maßnahmen könnte ebenfalls die Herstellung eines Filamentes mit höherem Fasergehalt ($>30\%$) und dem FDM-Druck geeigneter Proben möglich sein.

Einige der untersuchten Proben/Materialien im Zugversuch, Einlagerungsversuch und der dynamisch-mechanischen Analyse zeigen große Standardabweichungen, die sich im Rahmen dieser Arbeit nicht qualitativ beantworten lassen. Beispielsweise zeigen, wie in **Kapitel 4.6.3** bereits erläutert, andere Untersuchungen für geänderte Zusammensetzungen des Ausgangsmaterials (größeres PBS Verhältnis) stark abweichende (sinkende) Zugeigenschaften. Inhomogenität des Materials bzw. der Proben könnte daher einer der Gründe für die hohen Abweichungen sein und in weiteren Untersuchungen durch zusätzliche Extrusionsvorgänge beseitigt werden. Eine Anpassung der Versuchsparameter hinsichtlich der Zeit könnte ebenfalls geänderte Erkenntnisse für den Flüssigkeitsdurchlässigkeitsversuch und Einlagerungsversuch zeigen. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen kann weder für den Durchlässigkeitsversuch eine Durchlässigkeit bei längerer (24 h, 36 h,...) Penetrationszeit der Kaffeelösung noch eine vermehrte Feuchtigkeitsaufnahme der Proben im Einlagerungsversuch nach längerer Zeit ausgeschlossen werden.

Interessant sind ebenfalls die unterschiedlichen erhaltenen Kurventypen in der DMA. Der beschriebene Kurventyp (b), der normalerweise nur bei Nachhärtereaktionen von nicht vollständig ausgehärteten Harzen beobachtbar ist, könnte, genauso wie die anderen beschriebenen Unregelmäßigkeiten durch eine verbesserte Probenherstellung oder einen erneuten Abkühl-/Aufheizvorgang nachvollzogen werden.

7 Literaturverzeichnis

- [Ahn, 2002] Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P. K., *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*, *Rapid Prototyping Journal*, 8 (4), 248–257, 2002, DOI: 10.1108/13552540210441166
- [Bräuer, 2021] Bräuer, G., *Prozesstechnische und Werkstoffliche Einflüsse auf die Interfilamentbindung im Fused Filament Fabrication-Verfahren*, *Dissertation*, Johannes Kepler Universität, 2021
- [Chalgham, 2021] Chalgham, A., Ehrmann, A., Wickenkamp, I., *Mechanical Properties of FDM Printed PLA Parts before and after Thermal Treatment*, *Polymers*, 13 (8), 2021, DOI: 10.3390/polym13081239
- [Costa, 2017] Costa, S. F., Duarte, F. M., Covas, J. A., *Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition techniques*, *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 167–179, 2017, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.02.026
- [Crump, 1989] Crump, S. S., *Apparatus and Method for creating three-dimensional Objects*, *US5121329 (A)*, **1989**
- [Deckard, 1989] Deckard, C. R., *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*, United States Patent and Trademark Office
- [Domininghaus, 2005] Domininghaus, H., Hirth, T., *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, VDI-Buch, 2005, ISBN 9783540264330
- [Domm, 2020] Domm, M., *Additive Fertigung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste mittels 3D-Extrusion*, *Dissertation*, Technischen Universität Kaiserslautern, 2020
- [Ehrenstein, 2003] Ehrenstein, G. W., Riedel, G., Trawiel, P., *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*, 2.Aufl., Hanser, München, 2003, ISBN 978-3-446-22340-0
- [Ehrenstein, 2006] Ehrenstein, G. W., *Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*, 2.Aufl., Hanser, München, Wien, 2006, ISBN 978-3-446-22716-3
- [Endres, 2009] Endres, H.-J., Siebert-Raths, A., *Technische Biopolymere, Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften*, Hanser, München, 2009, ISBN 978-3-446-41683-3
- [Erdmann, 2017] Erdmann, J., *Biobasierte Kunststoffe mit Cellulosefaserverstärkung - Zusammenhänge zwischen Struktur, Haftung und mechanischen Eigenschaften*, *Dissertation*, Martin-Luther-Universität, 2017
- [Fastermann, 2016] Fastermann, P., *3D-Drucken, Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*, 2.Aufl., Technik im Fokus,

- Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016, ISBN 978-3-66249865-1
- [Fleischmann, 2010] Fleischmann, V., *Dynamisch-Mechanische Analyse an dentalen kunststoffbasierten Werkstoffen*, Dissertation, Universität Regensburg, 2010
- [FNR, 2015] FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., *Bioverbundwerkstoffe, Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC)*, Vol. 227, Rostock, 2015
- [Gao, 2015] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C., Shin, Y. C., Zhang, S., Zavattieri, P. D., *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*, *Computer-Aided Design*, 69, 65–89, 2015, DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001
- [Gebhardt, 2012] Gebhardt, A., *Understanding additive manufacturing, Rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing*, Hanser, Munich, 2012, ISBN 978-1-56990-507-4
- [Gebhardt, 2016a] Gebhardt, A., Kessler, J., Thurn, L., *3D-Drucken, Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*, 2.Aufl., Hanser, München, 2016, ISBN 9783446446724
- [Gebhardt, 2016b] Gebhardt, A., *Additive Fertigungsverfahren, Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, 5.Aufl., Hanser; Ciando, München, 2016, ISBN 9783446445390
- [Gebhardt, 2016c] Gebhardt, A., Hötter, J.-S., *Additive manufacturing, 3D printing for prototyping and manufacturing*, Hanser Publications; Hanser Publishers, Cincinnati, OH, Munich, Cincinnati, 2016, ISBN 9781569905821
- [Gibson, 2015] Gibson, I., *Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2.Aufl., Springer eBook Collection Engineering, Springer, New York, NY, 2015, ISBN 9781493921133
- [Grellmann, 2015] Grellmann, W., Seidler, S., *Kunststoffprüfung*. 3. Auflage, Hanser eLibrary, Hanser, München, 2015, ISBN 9783446443907
- [Grund, 2015] Grund, M., *Implementierung Von Schichtadditiven Fertigungsverfahren, Mit Fallbeispielen Aus der Luftfahrtindustrie und Medizintechnik*, Light Engineering Für Die Praxis Ser, Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015, ISBN 978-3-662-44265-4

- [Hornbogen, 2019] Hornbogen, E., *WERKSTOFFE, Aufbau und Eigenschaften von Keramik, Metall, Polymer und Verbundwerkstoffen*, 12.Aufl., MORGAN KAUFMANN, [Place of publication not identified], 2019, ISBN 9783662588475
- [Klemm, 1998] Klemm, D., *Comprehensive cellulose chemistry, Vol. 1: Fundamentals and analytical methods*, Wiley-VCH, Weinheim, 1998, ISBN 9783527601929
- [Klook, 2008] Klook, M., *Kompositwerkstoffe auf Basis von Cellulosen, Cellulosefasern, Zucker und Ausschnitten aus Silikaten, Dissertation*, Universität des Saarlandes, 2008
- [DIN EN ISO 62:2008-05] Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 83.080.01 (62:2008-05)
- [DIN EN ISO 527-1:2019-12] Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 83.080.01 (527-1:2019-12)
- [DIN EN ISO 527-2:2012-06] Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 83.080.01 (527-2:2012-06)
- [DIN EN ISO 6721-1:2019] Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 83.080.01 (6721-1:2019)
- [DIN EN ISO 291:2008-08] Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 83.080.01 (291:2008-08)
- [Meiners, 1996] Meiners, W., Wissenbach, K., Gasser, A., *Shaped body especially prototype or replacement part production, DE19649865 (C1)*, **1996**
- [Neitzel, 2014] Neitzel, M., Mitschang, P., Breuer, U., *Handbuch Verbundwerkstoffe, Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung ; [Manfred Neitzel zum 80. Geburtstag gewidmet]*, 2.Aufl., Hanser, München, 2014, ISBN 978-3-446-43696-1
- [Ostrowska, 2019] Ostrowska, J., Sadurski, W., Paluch, M., Tyński, P., Bogusz, J., *The effect of poly(butylene succinate) content on the structure and thermal and mechanical properties of its blends with polylactide*, *Polym. Int.*, 68 (7), 1271–1279, 2019, DOI: 10.1002/pi.5814
- [Ou-Yang, 2018] Ou-Yang, Q., Guo, B., Xu, J., *Preparation and Characterization of Poly(butylene succinate)/Polylactide Blends for Fused Deposition Modeling 3D Printing*, *ACS omega*, 3 (10), 14309–14317, 2018, DOI: 10.1021/acsomega.8b02549
- [Parlevliet, 2007] Parlevliet, P. P., Bersee, H. E., Beukers, A., *Residual stresses in thermoplastic composites – a study of the literature. Part III: Effects of thermal residual stresses*,

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 (6), 1581–1596, 2007, DOI: 10.1016/j.composesa.2006.12.005
- [Popescu, 2018] Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., Marinescu, R., *FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review*, *Polymer Testing*, 69, 157–166, 2018, DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020
- [Qiu, 2016] Qiu, T. Y., Song, M., Zhao, L. G., *Testing, characterization and modelling of mechanical behaviour of poly (lactic-acid) and poly (butylene succinate) blends*, *Mech Adv Mater Mod Process*, 2 (1), 2016, DOI: 10.1186/s40759-016-0014-9
- [Rath, 1952] Rath, H., *Lehrbuch der Textilchemie einschl. textilmischer Technologie*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1952, ISBN 978-3-642-53160-6
- [Richard, 2017] Richard, H. A., Schramm, B., Zipsner, T., *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*, SpringerLink Bücher, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017, ISBN 9783658177805
- [Schmidt, 2013] Schmidt, F., *Defekteinflüsse bei Faser-Kunststoff-Verbunden unter multiaxialer Belastung*, 1.Aufl., Cuvillier Verlag, Göttingen, 2013, ISBN 9783736943537
- [Schmiedel, 1992] Schmiedel, H., *Handbuch der Kunststoffprüfung, Mit 52 Tabellen*, Hanser, München, Wien, 1992, ISBN 3-446-16336-0
- [Schürmann, 2007] Schürmann, H., *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Mit 39 Tabellen*, 2.Aufl., VDI-/Buch], Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, ISBN 3540721894
- [Spoerk, 2017] Spoerk, M., Arbeiter, F., Cajner, H., Sapkota, J., Holzer, C., *Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly(lactic acid)*, *J. Appl. Polym. Sci.*, 134 (41), 45401, 2017, DOI: 10.1002/app.45401
- [Spoerk, 2018] Spoerk, M., Gonzalez-Gutierrez, J., Sapkota, J., Schuschnigg, S., Holzer, C., *Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication*, *Plastics, Rubber and Composites*, 47 (1), 17–24, 2018, DOI: 10.1080/14658011.2017.1399531
- [Steffen, 2019] Steffen, M., *Synthese und Charakterisierung von biobasierten Polyalkylsuccinaten zur Anwendung in Schmelzklebstoffen*, *Dissertation*, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, 2019

- [Su, 2019] Su, S., Kopitzky, R., Tolga, S., Kabasci, S., *Poly(lactide (PLA) and Its Blends with Poly(butylene succinate) (PBS): A Brief Review*, *Polymers*, 11 (7), 2019, DOI: 10.3390/polym11071193
- [Türk, 2014] Türk, O., *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe Grundlagen - Werkstoffe - Anwendungen*, Bücher | Life Science and Basic Disciplines, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, ISBN 9783834821997
- [Uma Devi, 2004] Uma Devi, L., Joseph, K., Manikandan Nair, K. C., Thomas, S., *Ageing studies of pineapple leaf fiber-reinforced polyester composites*, *J. Appl. Polym. Sci.*, 94 (2), 503–510, 2004, DOI: 10.1002/app.20924
- [VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2014] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, *Additive Fertigungsverfahren, Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen basics, definitions, processes = Additive manufacturing processes, rapid manufacturing*, 2014.Aufl., VDI-Richtlinien, Vol. 3405, Beuth, Berlin
- [Wirth, 2017] Wirth, M., *Additive Fertigung - Technologie, Markt und Innovation*, *Dissertation*, Julius-Maximilians-Universität, 2017
- [Witten, 2014] Witten, E., *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites, Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, ISBN 1306704227
- [Wu, 2015] Wu, W., Geng, P., Li, G., Di Zhao, Zhang, H., Zhao, J., *Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS*, *Materials (Basel, Switzerland)*, 8 (9), 5834–5846, 2015, DOI: 10.3390/ma8095271
- [Yao, 2020] Yao, Y., Li, M., Lackner, M., Herfried, L., *A Continuous Fiber-Reinforced Additive Manufacturing Processing Based on PET Fiber and PLA*, *Materials (Basel, Switzerland)*, 13 (14), 2020, DOI: 10.3390/ma13143044
- [Zhang, 2018] Zhang, X., Liu, Q., Shi, J., Ye, H., Zhou, Q., *Distinctive Tensile Properties of the Blends of Poly(l-lactic acid) (PLLA) and Poly(butylene succinate) (PBS)*, *J Polym Environ*, 26 (4), 1737–1744, 2018, DOI: 10.1007/s10924-017-1064-8
- [Zosel, 1996] Zosel, A., Barwich, J., *UV-vernetzbare Acrylat-Schmelzhaftklebstoffe, Mechanische Eigenschaften und Adhäsionsverhalten*, Farbe & Lack, Vol. 6, 1996

8 Anhangsverzeichnis

Anhang A: Aufwickereinheit	72
Anhang B: Technische Zeichnung des Zugprüfkörpers	73
Anhang C: Gemessene Werte der Fasergehalts-Analyse	74
Anhang D: Gedruckte Vergleichsstrukturen	75
Anhang D.1: Filament F1	75
Anhang D.2: Filament F2	75
Anhang D.3: Filament F3	76
Anhang D.6: Filament F4	76
Anhang D.5: Filament F5	77
Anhang E: Gefertigte Prüfkörper	78
Anhang E.1: Filament F1	78
Anhang E.2: Filament F2	79
Anhang E.3: Filament F3	80
Anhang E.4: Filament F4	81
Anhang E.5: Filament F5	82
Anhang F: Maße der Zugproben	83
Anhang G: Messergebnisse des Zugversuches	85
Anhang G.1: Kennwerte des Zugversuches.....	85
Anhang G.2: Berechnete Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten	87
Anhang G.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Bruchbilder.....	88
Anhang G.3.1: Proben F1_90.....	88
Anhang G.3.2: Proben F1_100.....	89
Anhang G.3.3: Proben F2_80.....	90
Anhang G.3.4: Proben F2_90.....	91
Anhang G.3.5: Proben F2_100.....	92
Anhang G.3.6: Proben F3_80.....	93
Anhang G.3.7: Proben F3_90.....	94
Anhang G.3.8: Proben F3_100.....	95
Anhang G.3.9: Proben F4_80.....	96
Anhang G.3.10: Proben F4_90.....	97
Anhang G.3.11: Proben F4_100.....	98

Anhang G.3.12: Proben F5_80.....	99
Anhang G.3.13: Proben F5_90.....	100
Anhang G.3.14: Proben F5_100.....	101
Anhang H: Messdaten des Einlagerungsversuch	102
Anhang H.1: Zeitlicher Verlauf der Feuchtigkeitsaufnahme	102
Anhang H.1.1: Proben F1.....	102
Anhang H.1.2: Proben F2.....	102
Anhang H.1.3: Proben F3.....	103
Anhang H.1.4: Proben F4.....	103
Anhang H.1.5: Proben F5.....	104
Anhang H.2: Gewichte der Proben über die Einlagerungszeit	104
Anhang H.3: Mittlerer Diffusionskoeffizient	107
Anhang I: Messdaten Dynamisch-Mechanischer-Analyse.....	108
Anhang I.1: Diagramme	108
Anhang I.1.1: F1_80	108
Anhang I.1.1: F1_90	109
Anhang I.1.1: F1_100	110
Anhang I.1.1: F2_80	111
Anhang I.1.1: F2_90	112
Anhang I.1.1: F2_100	113
Anhang I.1.1: F3_80	114
Anhang I.1.1: F3_90	115
Anhang I.1.1: F3_100	116
Anhang I.1.1: F4_80	117
Anhang I.1.1: F4_90	118
Anhang I.1.1: F4_100	120
Anhang I.1.1: F5_80	121
Anhang I.1.1: F5_90	122
Anhang I.1.1: F5_100	124
Anhang I.2: Mittlerer Speichermodul und mittlerer Verlustfaktor	125

9 Anhang

Anhang A: Aufwickereinheit

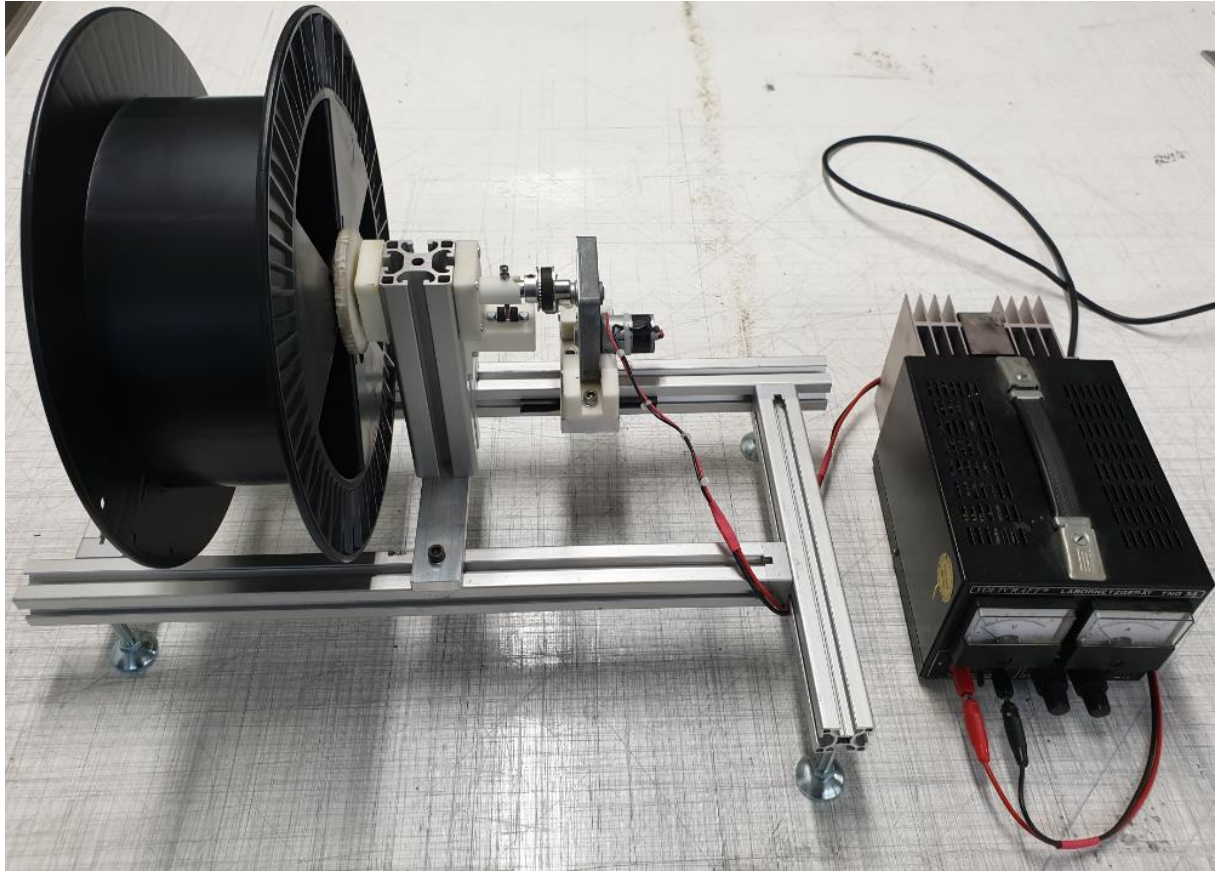


Abbildung 35: Aufwickereinheit der Filamentspulen (212 mm Wickeldurchmesser)

Anhang B: Technische Zeichnung des Zugprüfkörpers

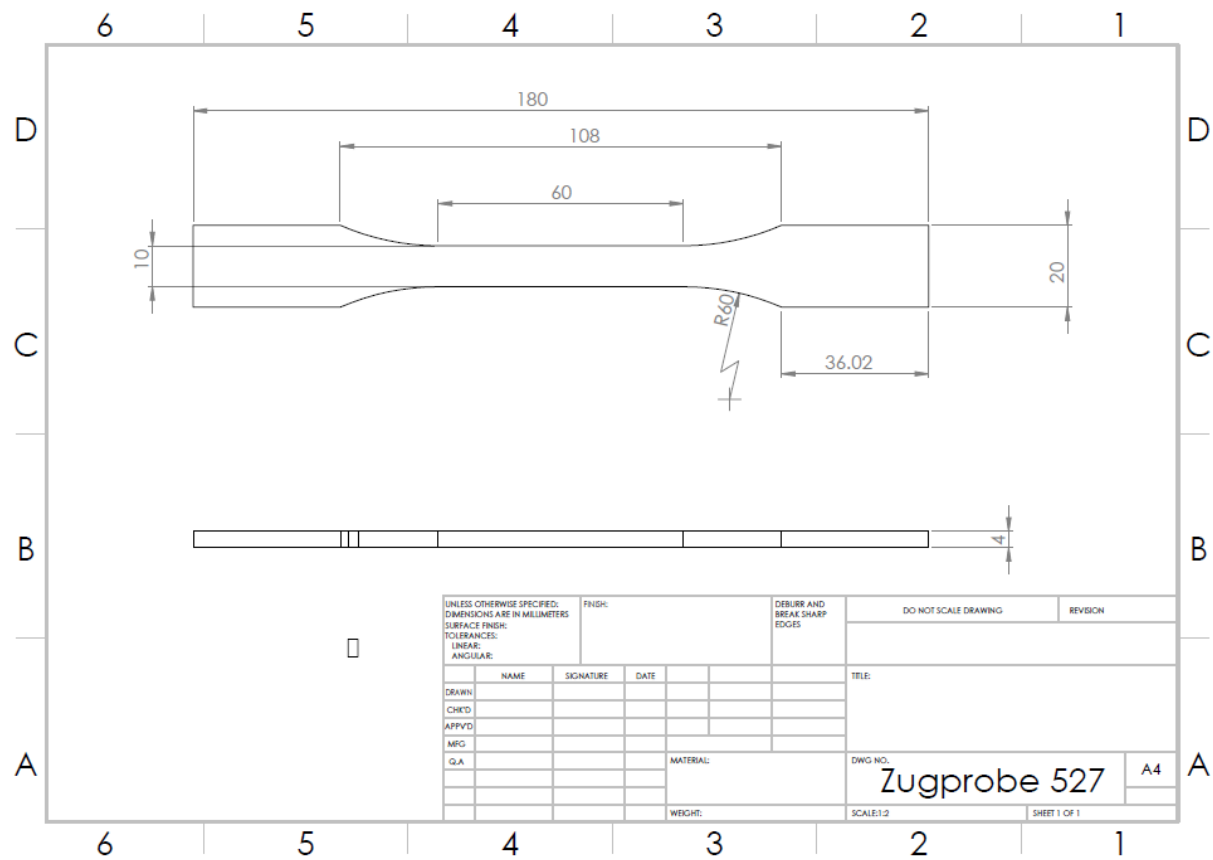


Abbildung 36: Technische Zeichnung der Zugprobe

Anhang C: Gemessene Werte der Fasergehalts-Analyse

Tabelle 18: Messprotokoll der Fasergehaltsanalyse

Filament, Messung = n	Gewicht zu lösender Probe = M_{Probe} [g]	Filtertiegel leer = M_{leer} [g]	Filtertiegel voll = M_{voll} [g]	Gewicht Faser in der Probe $M_{Faser} = M_{voll} - M_{leer}$ [g]	Realer Faser- gehalt = $w_i = \frac{M_{Faser}}{M_{Probe}}$ [wt-%]	Mittelwert $= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i$ [wt-%]
F1, 1	1.0181	49.4933	49.5691	0.0758	7.4452	8.659502325
F1, 2	1.0337	49.5781	49.6715	0.0934	9.0355	
F1, 3	1.0055	49.5842	49.6797	0.0955	9.4978	
F2, 1	1.0087	29.9264	30.1058	0.1794	17.7853	18.01391687
F2, 2	1.0453	49.4739	49.6691	0.1952	18.6741	
F2, 3	1.0829	49.486	49.6764	0.1904	17.5824	
F3, 1	1.0057	49.4845	49.7378	0.2533	25.1864	25.73591561
F3, 2	1.047	49.4797	49.7539	0.2742	26.1891	
F3, 3	1.0274	49.4717	49.7371	0.2654	25.8322	
F4, 1	1.0371	49.4696	49.7806	0.311	29.9875	29.1475318
F4, 2	1.0841	49.4819	49.7945	0.3126	28.835	
F4, 3	1.0262	49.5781	49.8718	0.2937	28.6202	

Anhang D: Gedruckte Vergleichsstrukturen

Anhang D.1: Filament F1

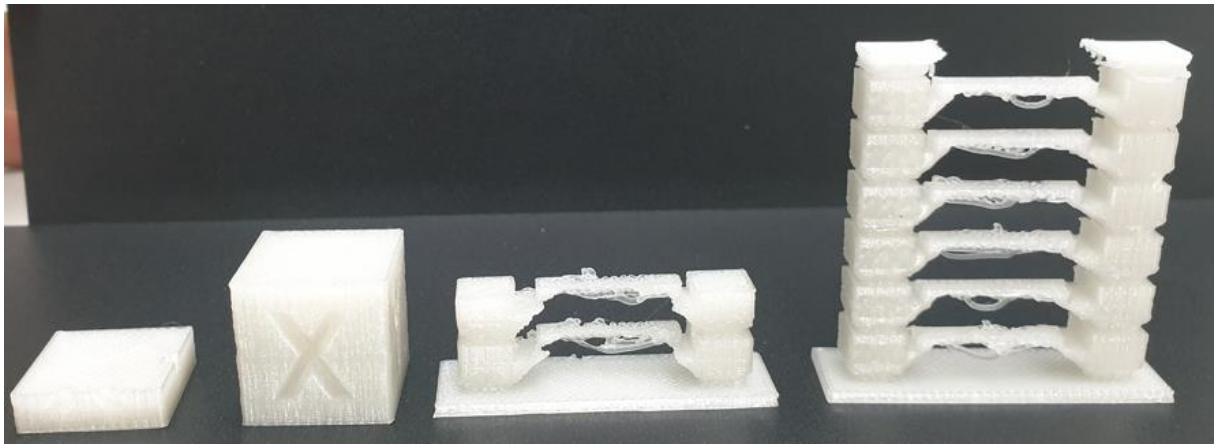


Abbildung 37: Evaluationsstrukturen des Materials F1

Anhang D.2: Filament F2

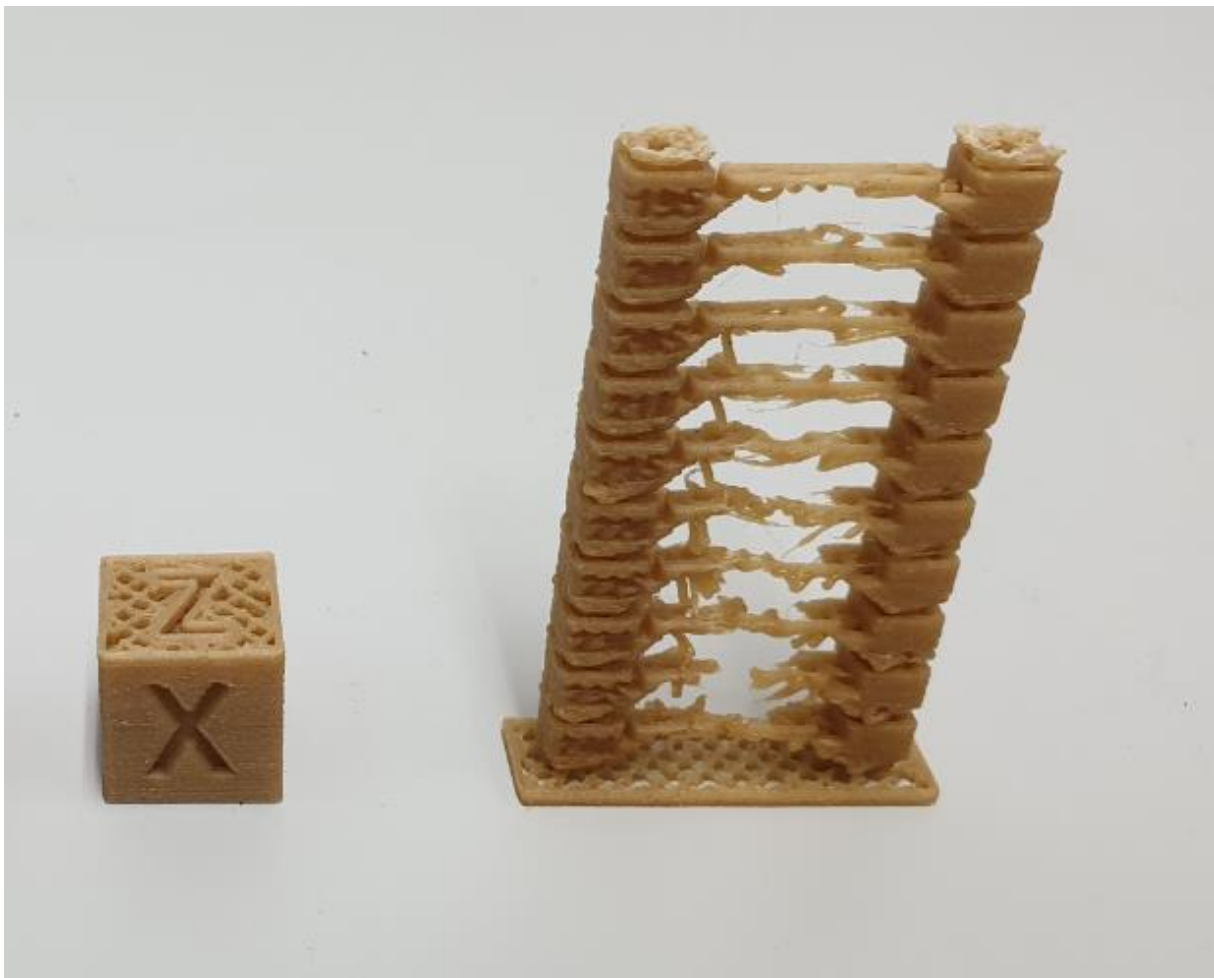


Abbildung 38: Evaluationsstrukturen des Materials F2

Anhang D.3: Filament F3

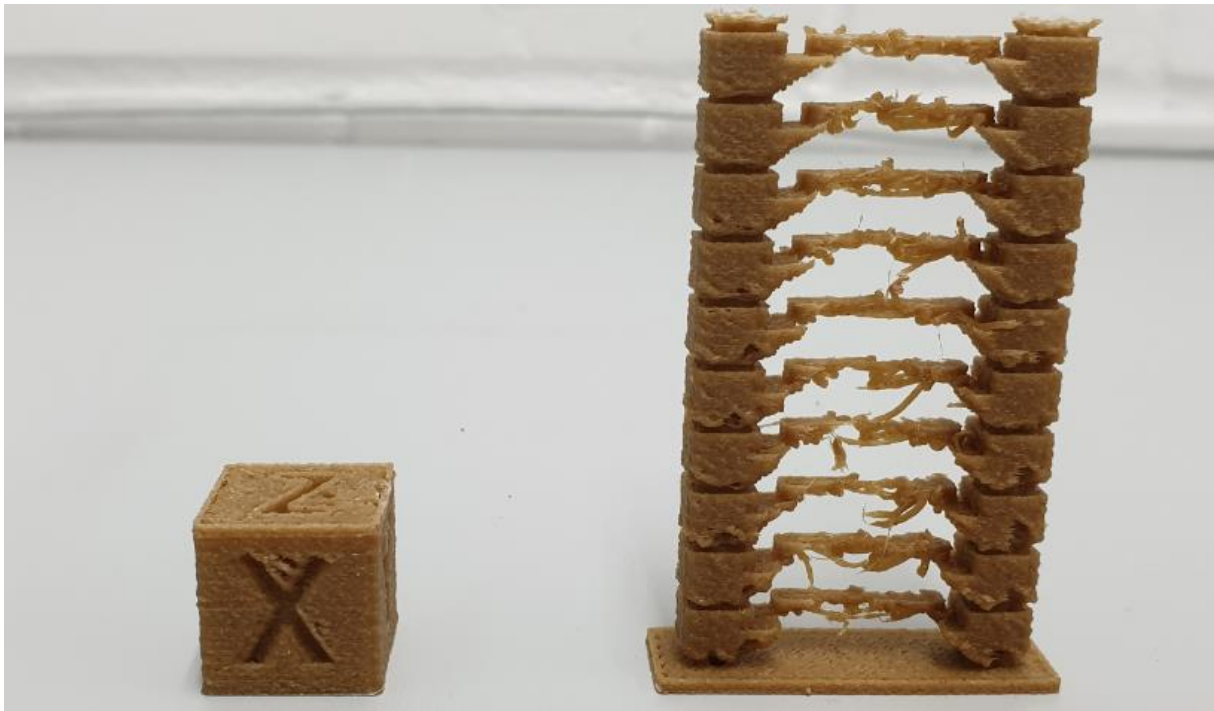


Abbildung 39: Evaluationsstrukturen des Materials F3

Anhang D.6: Filament F4

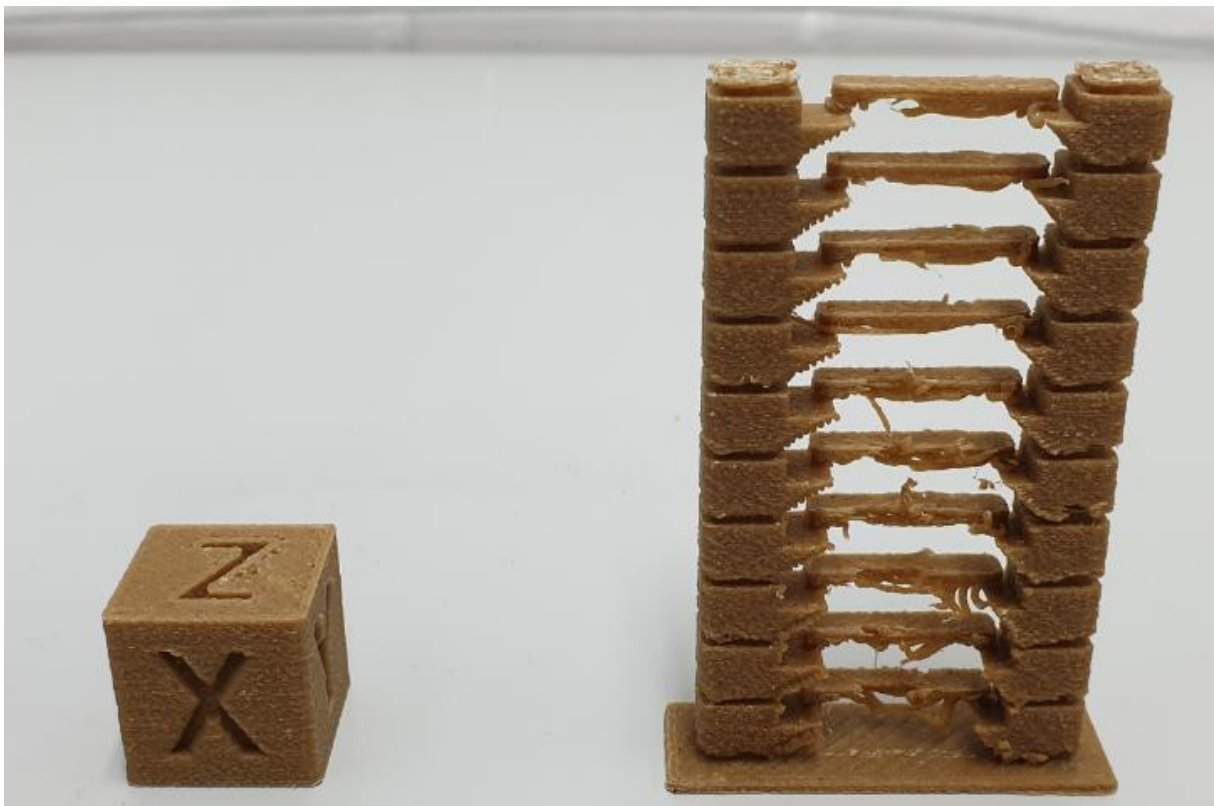


Abbildung 40: Evaluationsstrukturen des Materials F4

Anhang D.5: Filament F5

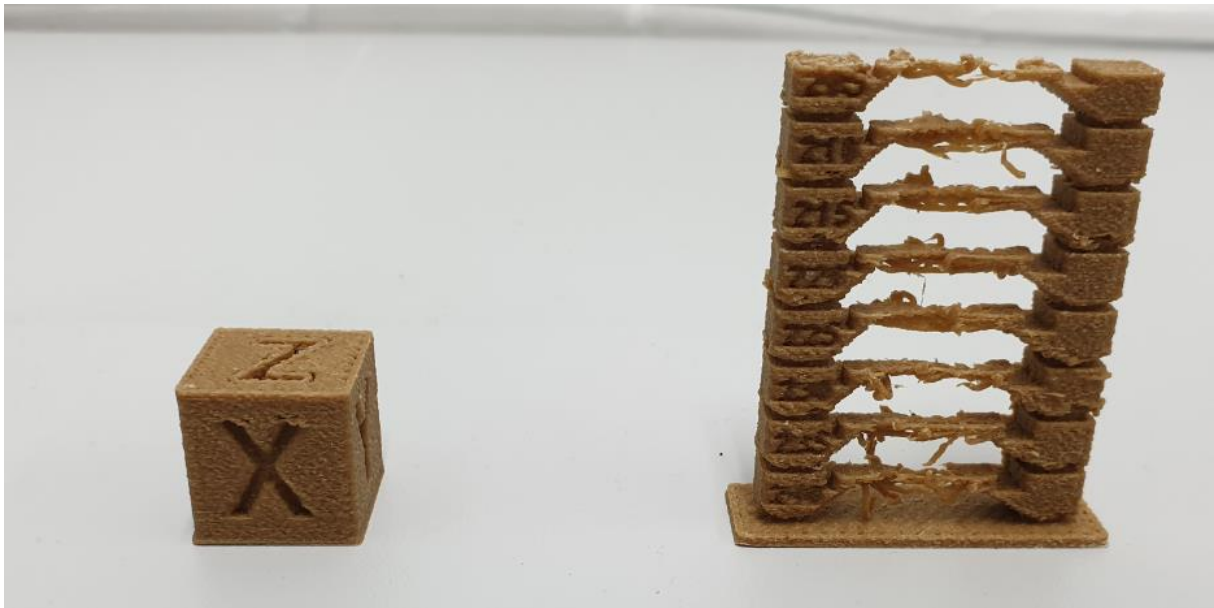


Abbildung 41: Evaluationsstrukturen des Materials F5

Anhang E: Gefertigte Prüfkörper

Anhang E.1: Filament F1



Abbildung 42: Gefertigte Prüfkörper des Materials F1

Anhang E.2: Filament F2

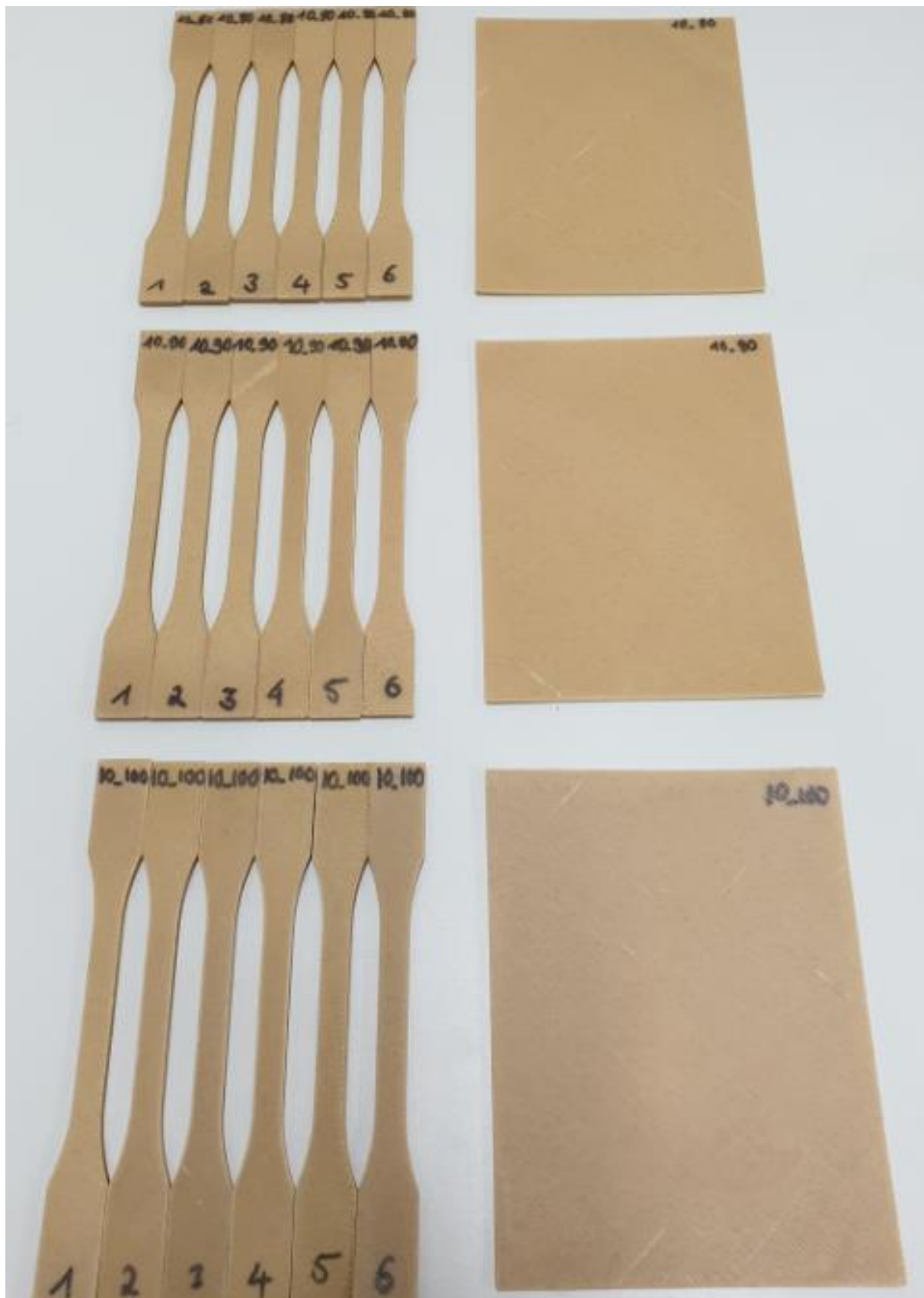


Abbildung 43: Gefertigte Prüfkörper des Materials F1

Anhang E.3: Filament F3

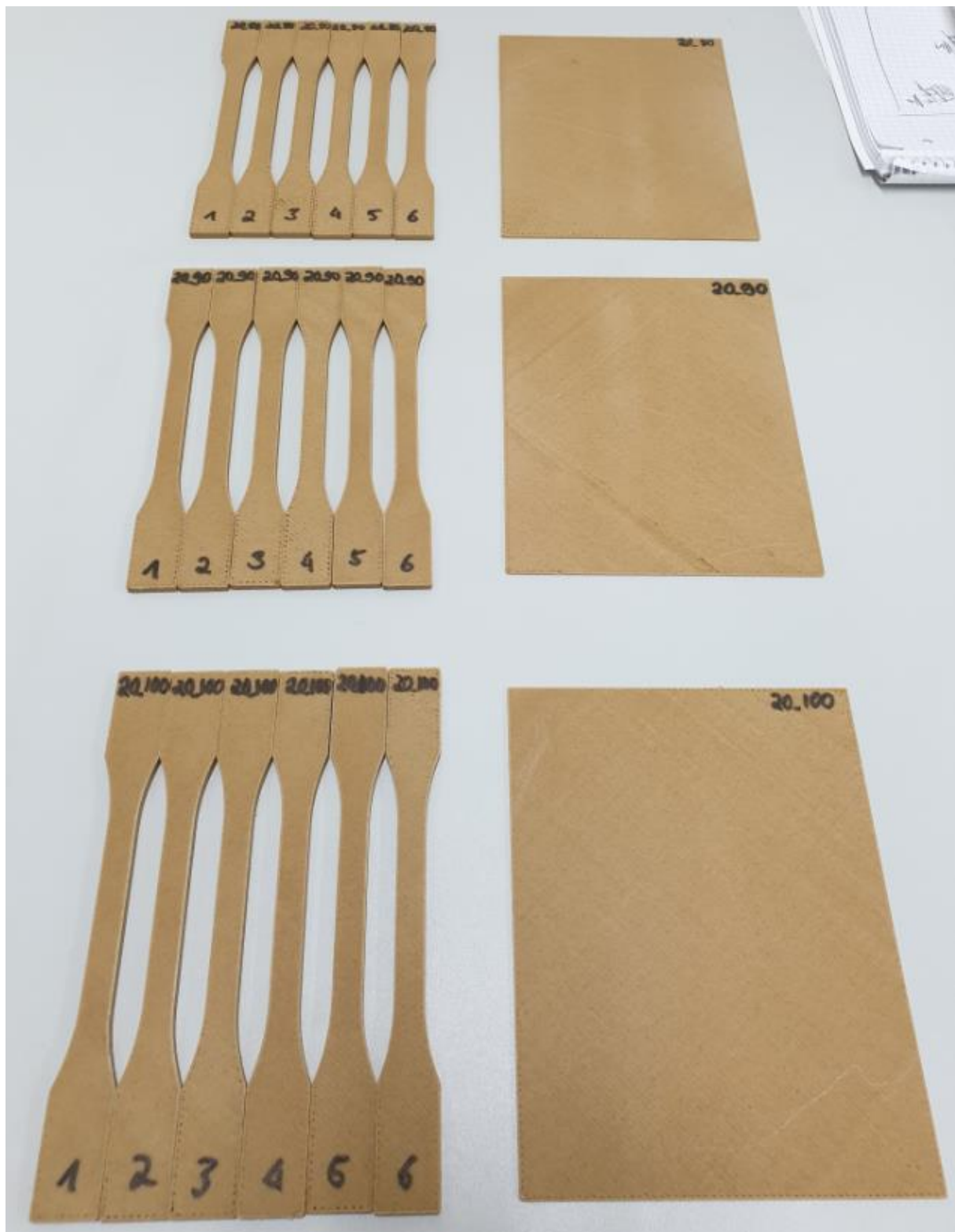
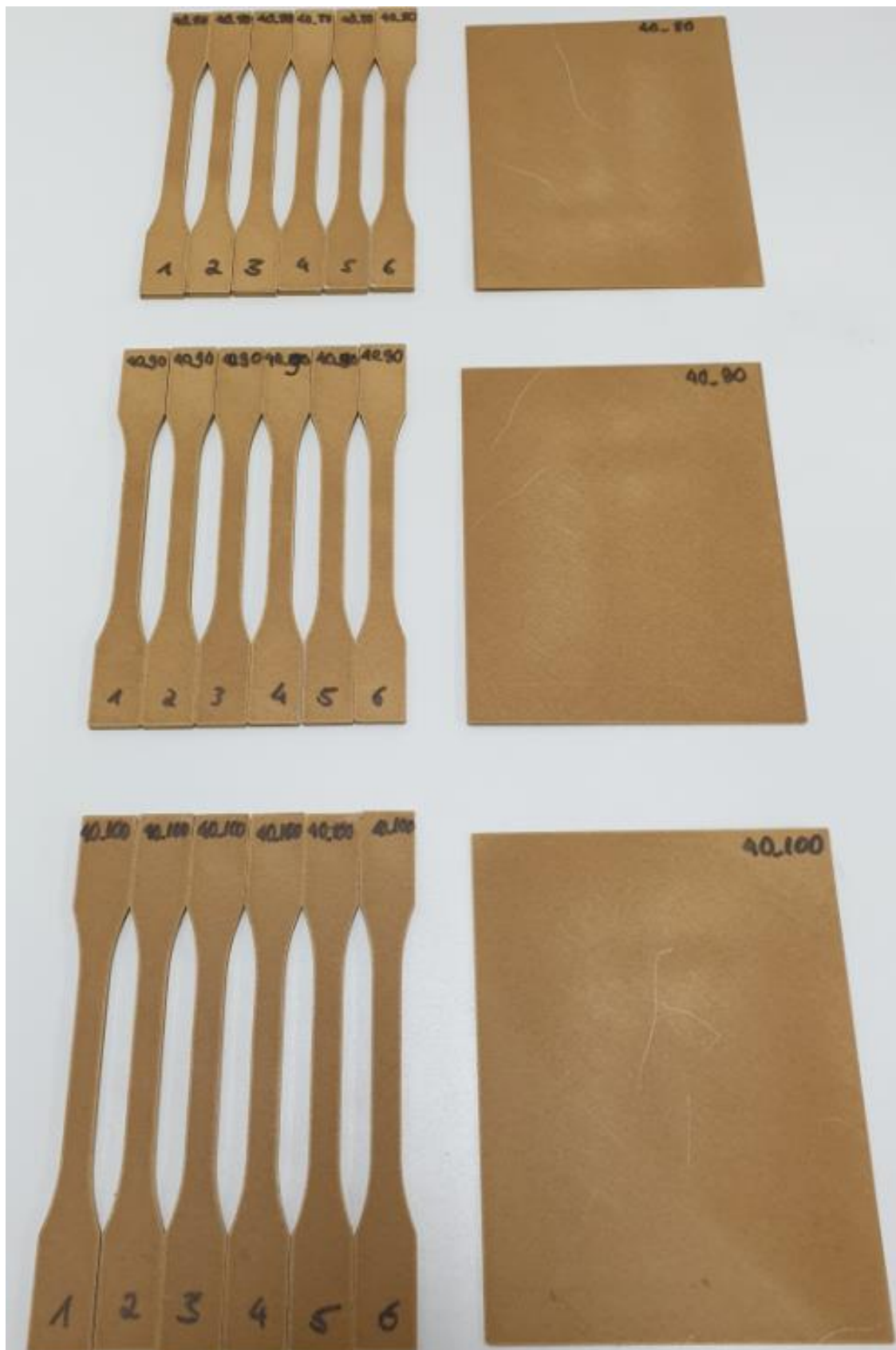


Abbildung 44: Gefertigte Prüfkörper des Materials F3

Anhang E.4: Filament F4**Abbildung 45: Gefertigte Prüfkörper des Materials F4**

Anhang E.5: Filament F5**Abbildung 46: Gefertigte Prüfkörper des Materials F5**

Anhang F: Maße der Zugproben

Tabelle 19: Maße der Zugproben (zur Berechnung des MAPE)

Probe	l ₃ [mm]	b ₂₋₁ [mm]	b ₂₋₂ [mm]	b ₁₋₁ [mm]	b ₁₋₂ [mm]	h-1 [mm]	h-2 [mm]	h-3 [mm]
F1/80/1	179,55	20,05	20,11	10,33	10,28	3,44	4,09	3,73
F1/80/2	179,9	20,14	20,06	10,2	10,27	3,29	4,11	3,76
F1/80/3	179,55	20,23	20,06	10,12	10,07	3,88	4,09	3,42
F1/80/4	179,75	20,02	20,21	9,75	9,85	3,85	3,81	3,57
F1/80/5	179,8	20,24	20,26	9,8	9,86	3,52	4	3,84
F1/80/6	179,7	20,08	20,18	9,87	9,82	3,57	3,96	3,82
F1/90/1	179,7	20,38	20,47	10,03	9,95	3,83	4,04	3,06
F1/90/2	179,9	20,13	20,44	10,36	10,23	4,09	4,1	4,13
F1/90/3	179,9	20,33	20,5	9,87	9,99	3,22	4,07	2,82
F1/90/4	179,8	20,05	20,02	10,31	10,12	4,09	4,08	4,01
F1/90/5	179,75	20,06	20,15	10,25	10,22	3,96	4,05	4,04
F1/90/6	179,8	20,01	20,55	10,42	10,23	4,03	4,06	3,97
F1/100/1	179,75	20,1	20,07	10,28	10,31	3,94	4,06	3,96
F1/100/2	179,7	20,35	20,11	10,14	10,4	3,95	4,09	3,88
F1/100/3	179,65	20,15	20,31	10,28	10,25	4,05	4,04	4,02
F1/100/4	179,6	20,18	19,99	10,18	10,25	4,02	4,1	4,04
F1/100/5	179,8	20,23	20,06	10,21	10,35	3,95	4,07	3,94
F1/100/6	179,8	20,15	20,27	10,17	10,36	3,92	4,1	4,04
F2/80/1	179,5	20,19	20,21	10,07	10,12	3,88	4,25	3,92
F2/80/2	179,65	20,16	20,2	10,25	10,26	3,86	4,19	3,94
F2/80/3	179,6	20,19	20,32	10,17	10,19	3,61	4,22	3,92
F2/80/4	179,75	20,14	20,14	10,1	10,19	4,05	4,18	4,02
F2/80/5	179,7	20,14	20,18	10,13	10,09	3,91	4,16	4,05
F2/80/6	179,95	20,17	20,15	10,36	10,39	4,05	4,08	3,89
F2/90/1	179,75	20,19	20,18	10,26	10,18	3,47	4,09	3,84
F2/90/2	179,75	20,23	20,12	10,29	10,25	3,61	3,96	3,85
F2/90/3	179,8	20,32	20,26	10,32	10,1	3,82	3,97	3,51
F2/90/4	179,75	20,1	20,23	10,28	10,4	3,57	4,02	3,9
F2/90/5	179,65	20,14	20,11	10,21	10,23	3,89	4,05	3,71
F2/90/6	179,7	20,07	20,14	10,25	10,08	3,81	4,01	3,88
F2/100/1	179,8	20,23	20,21	10,25	10,28	3,79	4,08	3,94
F2/100/2	179,85	20,21	20,24	10,29	10,24	4,04	4,08	3,89
F2/100/3	179,85	20,24	20,21	10,4	10,36	3,91	4,06	3,88
F2/100/4	179,65	20,34	20,22	10,44	10,39	4,04	4,22	3,91
F2/100/5	179,5	20,42	20,32	10,39	10,41	3,89	4,29	3,67
F2/100/6	179,5	20,46	20,31	10,21	10,27	3,96	4,24	3,68
F3/80/1	179,8	20,05	20,08	10,09	10,04	4,03	4,05	3,94
F3/80/2	179,75	20,06	20	10,1	10,07	3,97	4,07	3,91
F3/80/3	179,8	20,06	20,02	9,92	10,02	3,97	4,1	4,11
F3/80/4	179,8	20,08	20,07	10,06	10,06	3,72	4,07	3,48
F3/80/5	179,7	20,24	20,11	10,11	10,07	3,5	4,02	3,7
F3/80/6	179,85	20,08	20,15	10,2	10,16	3,71	3,98	3,66
F3/90/1	179,8	20,03	20,06	10,12	10,08	4,02	4,02	3,95
F3/90/2	179,9	20,09	20,17	10,24	10,23	4,07	4,1	3,91
F3/90/3	179,95	20,08	20,08	10,27	10,14	3,97	4,14	3,84
F3/90/4	179,8	20,13	20,12	10,13	10,13	4,08	4,22	3,92
F3/90/5	179,85	20,18	20,08	10,21	10,14	4,09	4,11	4,05
F3/90/6	179,75	20,2	20,13	10,13	10,27	4,03	4,13	4,02
F3/100/1	179,9	20,11	20,18	10,12	10,09	3,92	4,13	3,6
F3/100/2	179,8	20,16	20,13	10,17	10,13	3,34	4,14	3,8
F3/100/3	179,9	20,09	20,16	10,29	10,12	3,91	4,15	3,5

Probe	l_3 [mm]	b_2-1 [mm]	b_2-2 [mm]	b_1-1 [mm]	b_1-2 [mm]	$h-1$ [mm]	$h-2$ [mm]	$h-3$ [mm]
F3/100/4	179,75	20,09	20,1	10,16	10,09	3,92	4,14	3,56
F3/100/5	179,85	20,16	20,13	10,16	10,11	3,77	4,12	4
F3/100/6	179,8	20,15	20,014	10,13	10,09	4,04	4,1	3,76
F4/80/1	180,02	20,38	20,41	10,34	10,51	3,83	4,12	3,81
F4/80/2	180,05	20,27	20,44	10,28	10,35	4,17	4,12	4,16
F4/80/3	180,05	20,25	20,66	10,27	10,24	4,05	4,1	4,05
F4/80/4	180	20,44	20,3	10,32	10,31	3,91	4,11	3,76
F4/80/5	179,9	20,31	20,33	10,32	10,46	3,42	4,2	3,31
F4/80/6	180	20,29	20,32	10,36	10,39	3,68	4,2	3,8
F4/90/1	179,95	20,21	20,23	10,21	10,23	4,19	4,22	3,26
F4/90/2	180,05	20,15	20,16	10,22	10,31	4,12	4,05	4,11
F4/90/3	180,1	20,22	20,22	10,2	10,21	4,15	4,11	4,13
F4/90/4	180,95	20,23	20,32	10,25	10,15	3,87	4,23	4,21
F4/90/5	180	20,21	20,24	10,25	10,42	4,02	4,02	4,07
F4/90/6	180,1	20,29	20,19	10,3	10,32	4,1	4,1	4,01
F4/100/1	180	20,26	20,27	10,27	10,25	3,43	4,11	3,79
F4/100/2	180	20,24	20,29	10,27	10,3	3,47	4,16	3,6
F4/100/3	180,05	20,26	20,27	10,3	10,23	3,13	4,14	3,19
F4/100/4	180	20,19	20,1	10,15	10,2	3,59	4,12	3,65
F4/100/5	180,1	20,18	20,25	10,22	10,18	3,88	4,07	3,81
F4/100/6	180,1	20,13	20,16	10,2	10,15	3,81	4,09	3,83
F5/80/1	180,1	20,25	20,46	10,39	10,31	4,04	4,06	3,93
F5/80/2	180,1	20,21	20,39	10,4	10,17	4,06	4,01	3,9
F5/80/3	180,15	20,24	20,28	10,18	10,19	4,09	4,05	4,1
F5/80/4	180,15	20,24	20,24	10,2	10,26	4,05	4	4,09
F5/80/5	180,2	20,35	20,26	10,36	10,39	3,99	4,01	4,05
F5/80/6	180,1	20,37	20,26	10,31	10,32	4,01	4,02	4,01
F5/90/1	180,05	20,24	20,27	10,24	10,17	3,9	3,99	3,88
F5/90/2	180,1	20,24	20,22	10,22	10,24	3,99	4,07	3,96
F5/90/3	180,1	20,3	20,22	10,34	10,32	3,8	4,01	3,97
F5/90/4	180,1	20,43	20,26	10,31	10,24	3,75	4,01	3,82
F5/90/5	180,05	20,22	20,43	10,4	10,26	3,84	4,02	3,72
F5/90/6	180,15	20,32	20,24	10,25	10,37	3,94	4,03	3,83
F5/100/1	180	20,42	20,31	10,45	10,35	3,76	3,94	3,85
F5/100/2	180,1	20,4	20,22	10,43	10,43	3,72	4,02	3,79
F5/100/3	180,1	20,36	20,26	10,26	10,37	3,69	3,93	3,83
F5/100/4	180,2	20,38	20,42	10,33	10,23	3,74	3,95	3,77
F5/100/5	180,15	20,41	20,24	10,37	10,32	3,67	4,03	3,65
F5/100/6	180,15	20,4	20,28	10,28	10,33	3,81	4,02	3,79

Anhang G: Messergebnisse des Zugversuches

Anhang G.1: Kennwerte des Zugversuches

Tabelle 20: Kennwerte der Einzelmessung aus dem Zugversuch

Material	Probe	Kurve	E [MPa]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	b [mm]	h [mm]
F1_80	1	Typ a	1390,29	19,90	2,20	9,97	4,07
	2	Typ a	1297,38	18,75	2,48	9,95	4,08
	3	Typ c	1183,35	17,95	2,25	10,00	4,10
	4	Typ c	656,26	9,67	3,55	9,70	3,86
	5	Typ c	607,77	9,51	3,71	9,78	3,98
	6	Typ c	613,27	9,12	3,92	9,74	3,94
F1_90	1	Typ c	1008,55	13,32	2,43	9,80	4,00
	2	Typ c	1646,94	22,92	2,38	10,01	4,07
	3	Typ c	945,08	12,85	2,48	9,76	4,05
	4	Typ c	1756,76	25,59	2,46	9,90	4,08
	5	Typ c	1813,35	25,03	2,15	9,94	4,05
	6	Typ c	1994,61			9,97	4,05
F1_100	1	Typ c	1971,53	30,36	2,56	10,00	4,03
	2	Typ c	2115,87	30,42	2,55	9,89	4,07
	3	Typ c	2022,58	31,10	2,61	9,88	4,09
	4	Typ c	1953,95	29,02	2,43	9,92	4,11
	5	Typ c	2076,04	30,32	2,43	9,96	4,05
	6	Typ c	2038,98	29,29	2,46	10,03	4,09
F2_80	1	Typ a	1409,33	14,42	1,65	10,23	4,25
	2	Typ a	1572,50	14,87	1,68	10,11	4,13
	3	Typ a	1436,15	14,66	1,70	10,23	4,26
	4	Typ a	1623,06	14,84	1,60	10,08	4,16
	5	Typ a	1566,79	14,83	1,52	10,13	4,14
	6	Typ a	1616,93	15,86	1,53	10,06	4,08
F2_90	1	Typ a	2366,70	22,15	1,36	10,21	4,11
	2	Typ a	2288,19	22,14	1,43	10,18	4,01
	3	Typ a	2342,87	22,39	1,34	10,15	4,03
	4	Typ a	2204,88	21,08	1,32	10,07	4,03
	5	Typ a	2187,28	20,22	1,47	10,08	4,11
	6	Typ a	1973,75	18,63	1,51	10,08	4,03
F2_100	1	Typ a	2447,23	24,50	1,73	10,10	4,04
	2	Typ a	2576,77	24,71	1,74	10,02	4,07
	3	Typ a	2485,60	26,10	1,75	10,12	4,00
	4	Typ a	2396,22	24,52	1,74	10,14	4,20
	5	Typ a	2466,92	25,19	1,53	10,14	4,26
	6	Typ a	2500,14	25,38	1,77	10,17	4,19
F3_80	1	Typ a	961,12	7,57	1,20	10,13	4,10
	2	Typ a	920,64	7,26	1,29	10,04	4,17
	3	Typ a	826,02	6,84	1,21	10,12	4,13
	4	Typ a	936,04	7,63	1,22	10,05	4,11
	5	Typ a	1000,92	7,69	1,11	10,08	4,06
	6	Typ a	1006,46	8,41	1,31	10,27	4,01
F3_90	1	Typ a	1156,38	9,60	1,52	10,18	4,11
	2	Typ a	1227,51	9,84	1,32	10,09	4,04
	3	Typ a	1196,10	9,13	1,26	10,11	4,12
	4	Typ a	1108,16	8,81	1,31	10,06	4,19
	5	Typ a	1218,55	9,34	1,18	10,07	4,10
	6	Typ a	1193,29	9,52	1,25	10,10	4,12
F3_100	1	Typ a	1500,19	11,78	1,28	10,12	4,10

Material	Probe	Kurve	E [MPa]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	b [mm]	h [mm]
	2	Typ a	1441,38	12,10	1,40	10,04	4,11
	3	Typ a	1486,27	12,31	1,46	10,03	4,13
	4	Typ a	1480,91	11,69	1,36	10,16	4,12
	5	Typ a	1504,38	12,47	1,45	10,07	4,07
	6	Typ a	1524,13	11,88	1,31	10,12	4,09
F4_80	1	Typ a	1756,54	12,32	1,18	10,24	4,26
	2	Typ a	1799,59	11,93	1,03	10,29	4,24
	3	Typ a	1582,58	10,58	1,00	10,23	4,11
	4	Typ a	1699,65	10,89	0,98	10,30	4,23
	5	Typ a	1719,89	10,98	1,05	10,31	4,19
	6	Typ a	1653,09	11,36	1,09	10,31	4,18
F4_90	1	Typ a	1638,72	11,53	1,23	10,17	4,25
	2	Typ a	1074,74	7,19	1,09	10,07	3,99
	3	Typ a	1104,42	7,47	0,99	10,16	4,07
	4	Typ a	1623,68	11,74	1,24	10,23	4,22
	5	Typ a	1775,59	12,36	1,03	10,19	4,03
	6	Typ a	1627,45	11,57	1,02	10,28	4,08
F4_100	1	Typ a	1661,80	11,29	0,93	10,25	4,15
	2	Typ a	1615,43	11,38	1,06	10,34	4,13
	3	Typ a	1711,44	11,96	1,09	10,25	4,15
	4	Typ a	1807,18	12,23	1,21	10,18	4,07
	5	Typ a	1732,49	12,69	1,15	10,11	4,03
	6	Typ a	1641,70	11,48	0,98	10,21	4,10
F5_80	1	Typ a	1204,98	7,52	0,85	10,23	4,10
	2	Typ a	1226,39	7,72	0,88	10,27	4,01
	3	Typ a	1179,41	7,55	1,05	10,27	4,10
	4	Typ a	1212,85	7,77	0,96	10,23	4,12
	5	Typ a	1316,18	8,21	0,97	10,23	4,04
	6	Typ a	1302,87	7,94	0,86	10,24	4,07
F5_90	1	Typ a	1661,03	10,40	0,90	10,28	4,11
	2	Typ a	1705,90	11,17	1,08	10,24	3,99
	3	Typ a	1752,30	11,19	1,02	10,24	4,03
	4	Typ a	1684,33	10,76	0,94	10,26	4,09
	5	Typ a	1735,87	10,91	0,95	10,23	4,10
	6	Typ a	1639,46	10,76	1,05	10,21	4,06
F5_100	1	Typ a	2089,03	14,14	1,01	10,25	4,01
	2	Typ a	2167,19	14,39	0,99	10,25	4,00
	3	Typ a	2007,39	14,08	1,10	10,23	4,01
	4	Typ a	2251,08	15,14	1,09	10,21	3,97
	5	Typ a	2189,95	15,37	1,08	10,23	4,02
	6	Typ a	2241,69	15,11	0,95	10,26	4,01

Anhang G.2: Berechnete Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten

Tabelle 21: Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Materialien

Material	Kennwert	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit σ_m [MPa]
F1_80	Mittelwert $\bar{x}$	958,05	14,15
	Standardabweichung s	370,24	5,21
	Variationskoeffizient n [%]	38,64	36,79
F1_90	$\bar{x}$	1527,55	19,94
	S	441,65	6,34
	n [%]	28,91	31,80
F1_100	$\bar{x}$	2029,82	30,09
	S	61,37	0,78
	n [%]	3,02	2,59
F2_80	$\bar{x}$	1537,46	14,91
	S	92,10	0,49
	n [%]	5,99	3,31
F2_90	$\bar{x}$	2227,28	21,10
	S	143,45	1,46
	n [%]	6,44	6,93
F2_100	$\bar{x}$	2478,81	25,07
	S	60,10	0,62
	n [%]	2,42	2,47
F3_80	$\bar{x}$	941,87	7,57
	S	66,24	0,52
	n [%]	7,03	6,88
F3_90	$\bar{x}$	1183,33	9,37
	S	44,34	0,36
	n [%]	3,75	3,88
F3_100	$\bar{x}$	1489,54	12,04
	S	28,05	0,31
	n [%]	1,88	2,57
F4_80	$\bar{x}$	1701,89	11,34
	S	76,78	0,66
	n [%]	4,51	5,85
F4_90	$\bar{x}$	1474,10	10,31
	S	303,33	2,33
	n [%]	20,58	22,58
F4_100	$\bar{x}$	1695,01	11,84
	S	70,05	0,55
	n [%]	4,13	4,66
F5_80	$\bar{x}$	1240,45	7,79
	S	55,81	0,26
	n [%]	4,50	3,34
F5_90	$\bar{x}$	1696,48	10,86
	S	43,39	0,30
	n [%]	2,56	2,72
F5_100	$\bar{x}$	2157,72	14,70
	S	94,04	0,57
	n [%]	4,36	3,86

Anhang G.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramme und Bruchbilder

Anhang G.3.1: Proben F1_90

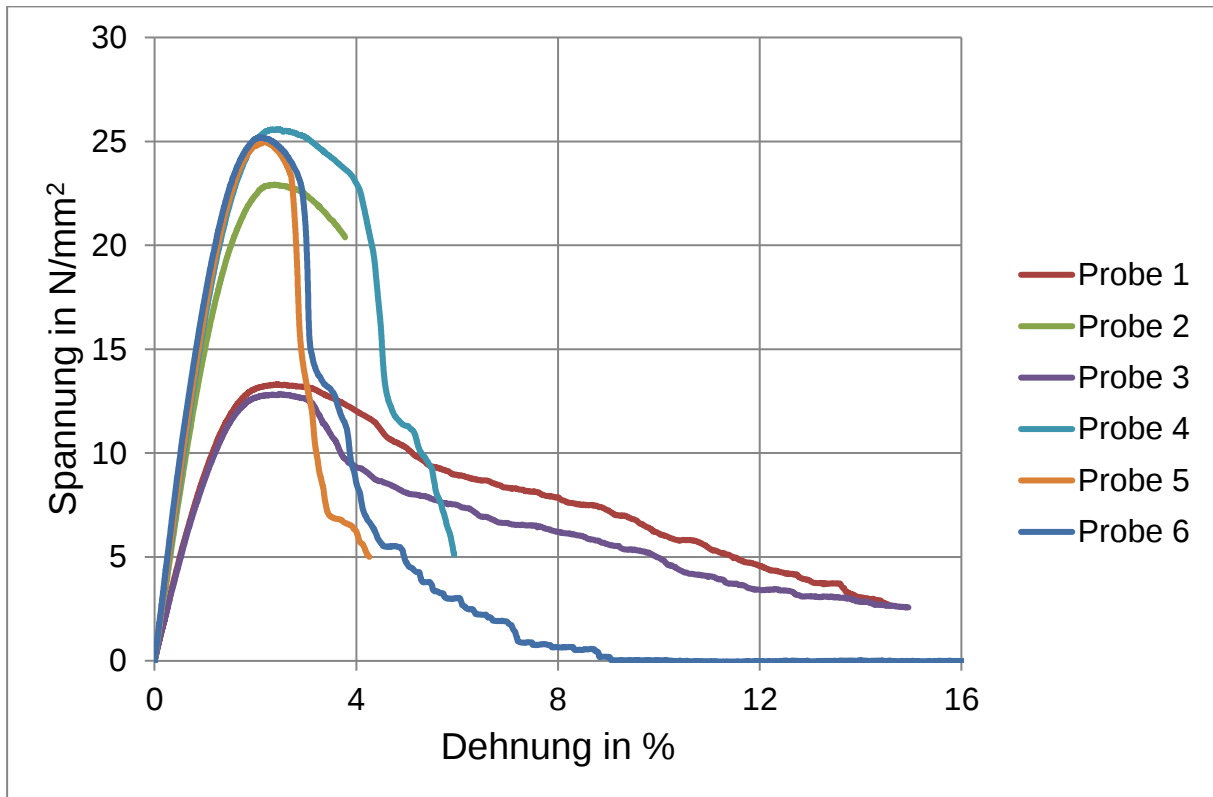
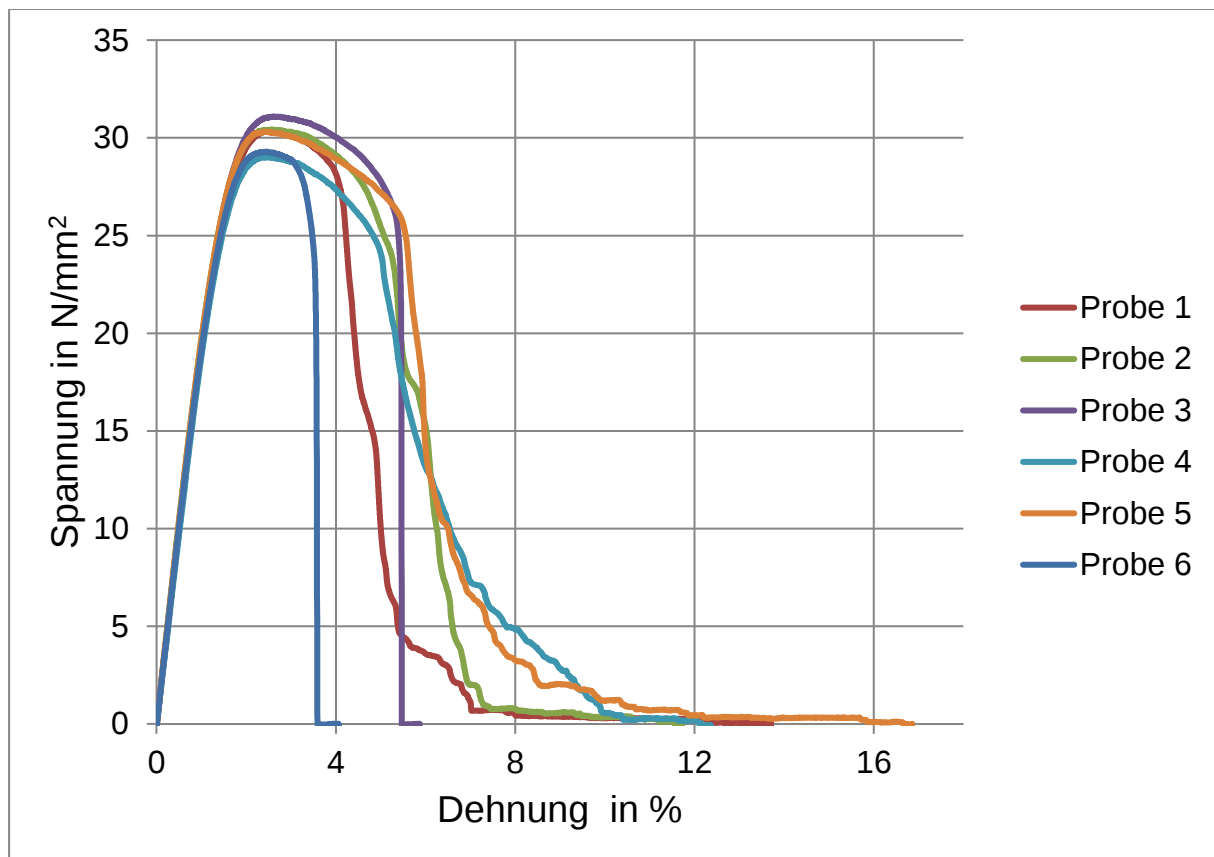
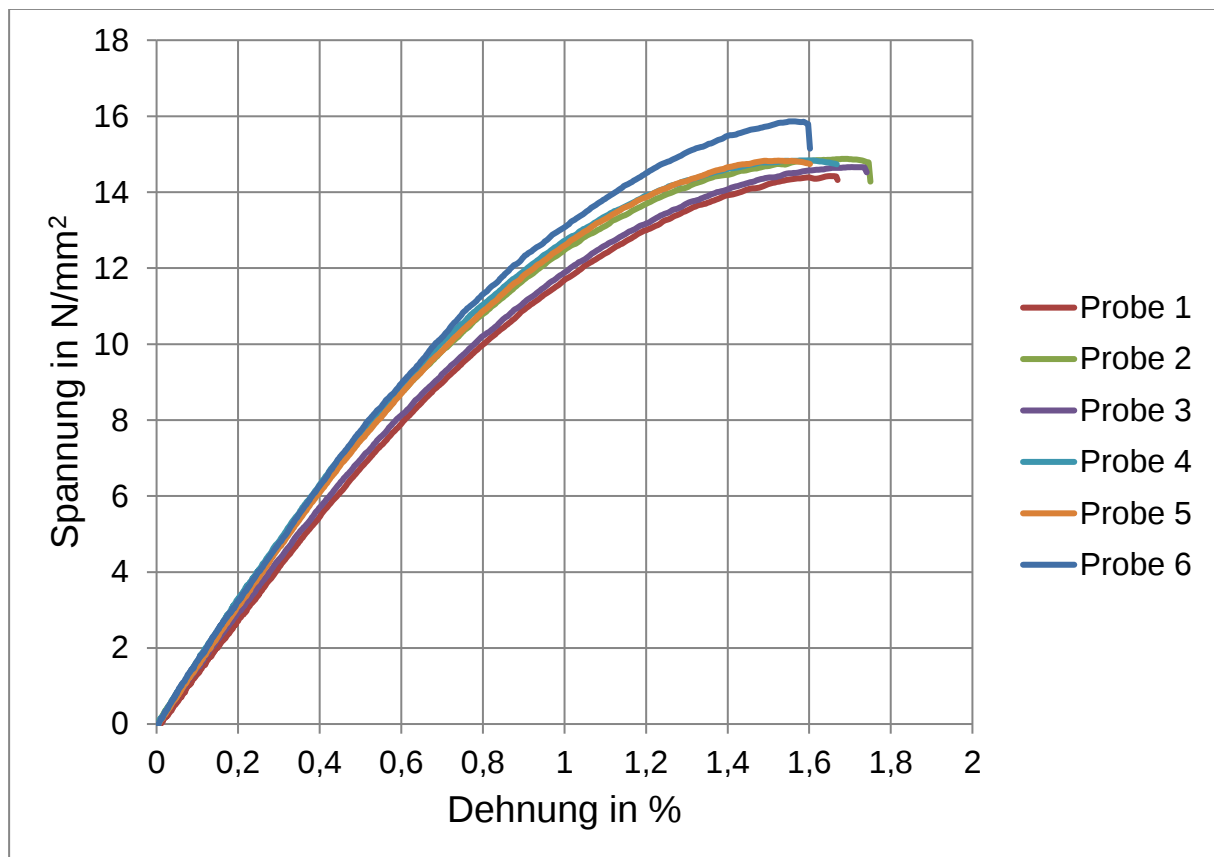
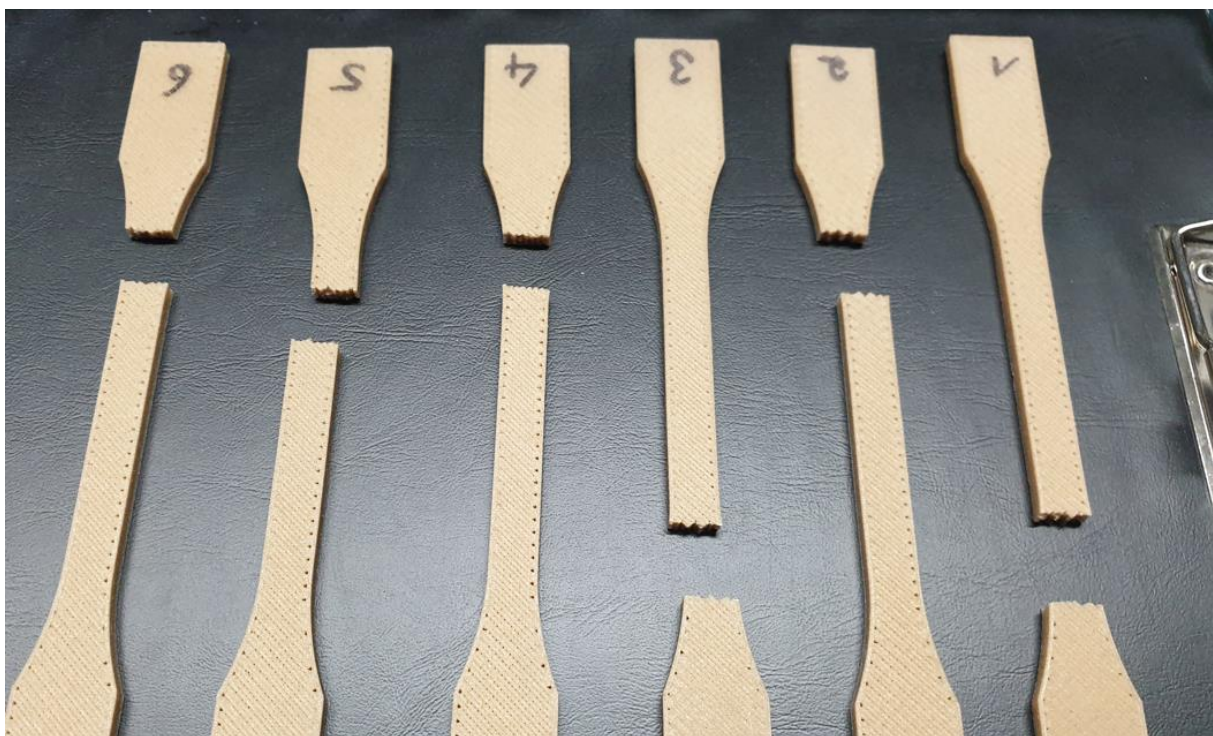


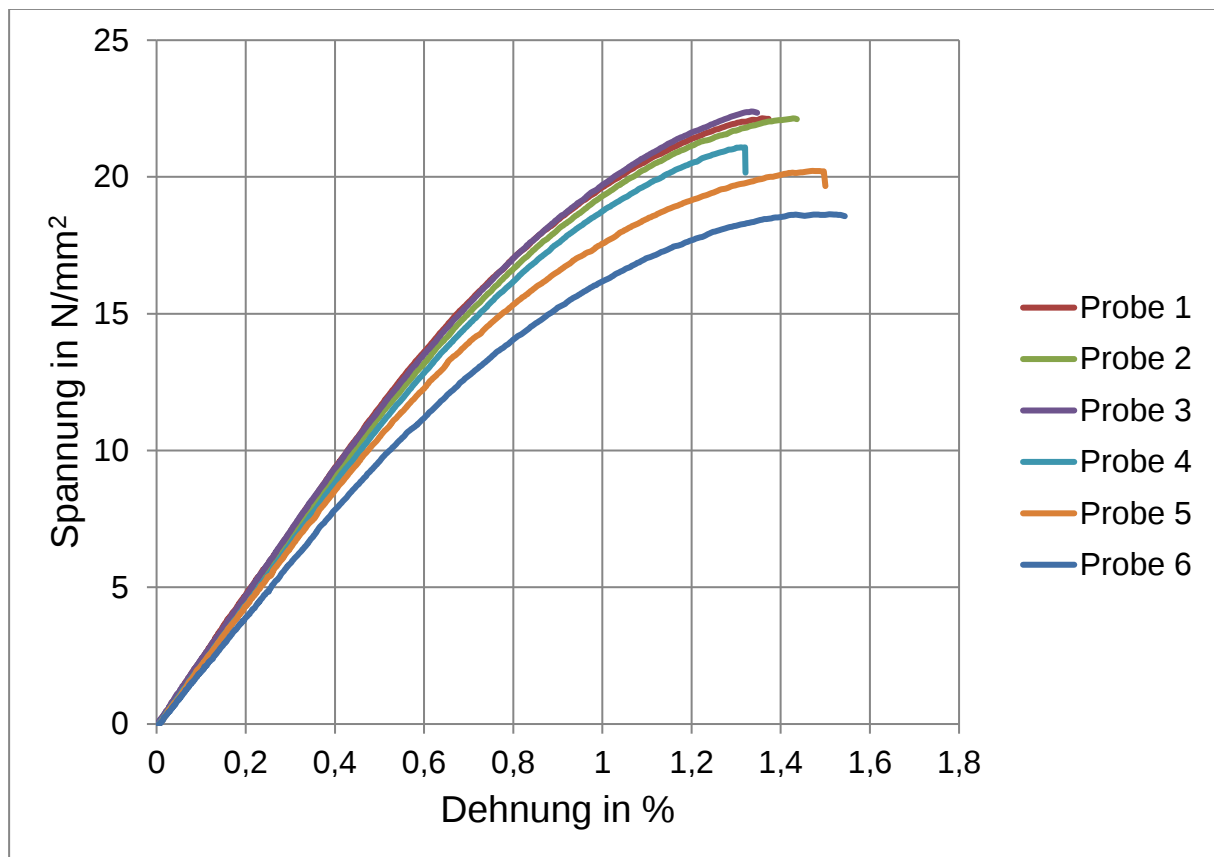
Abbildung 47: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F1_90

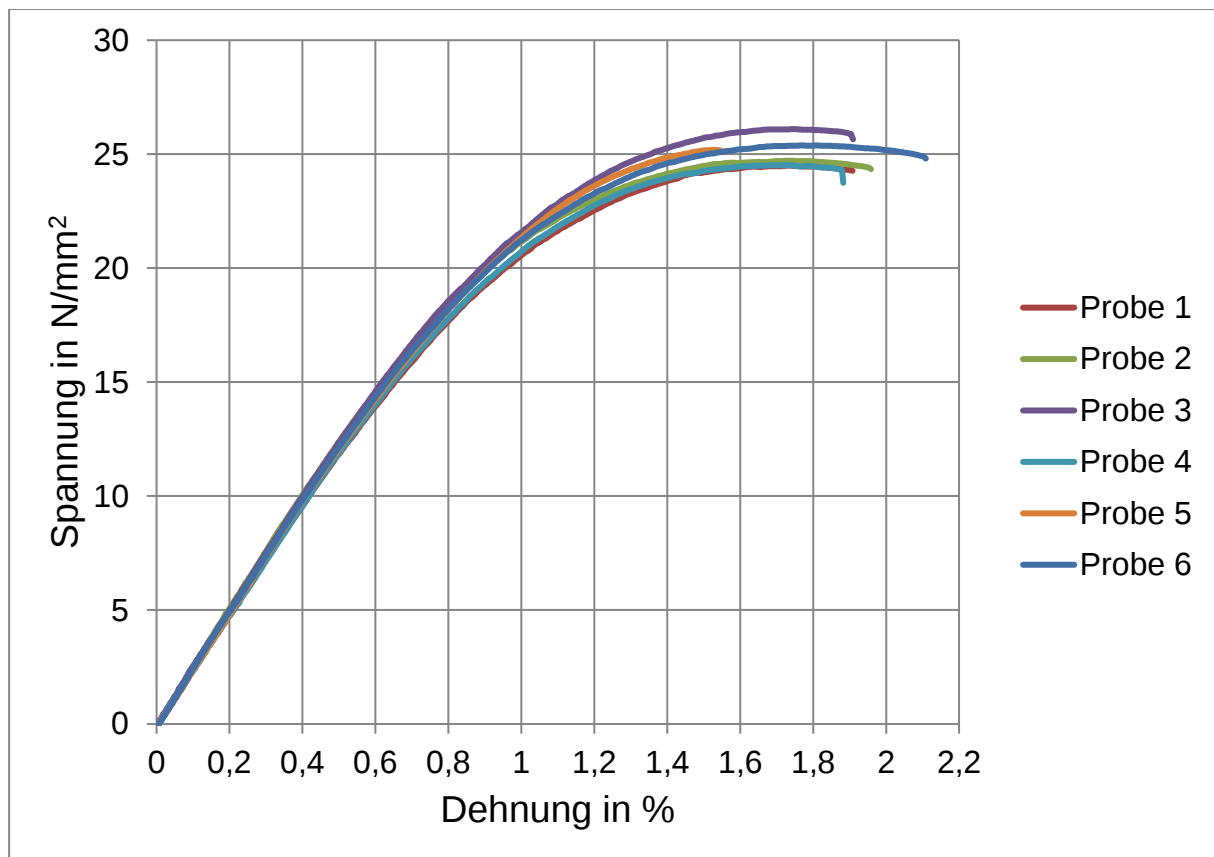


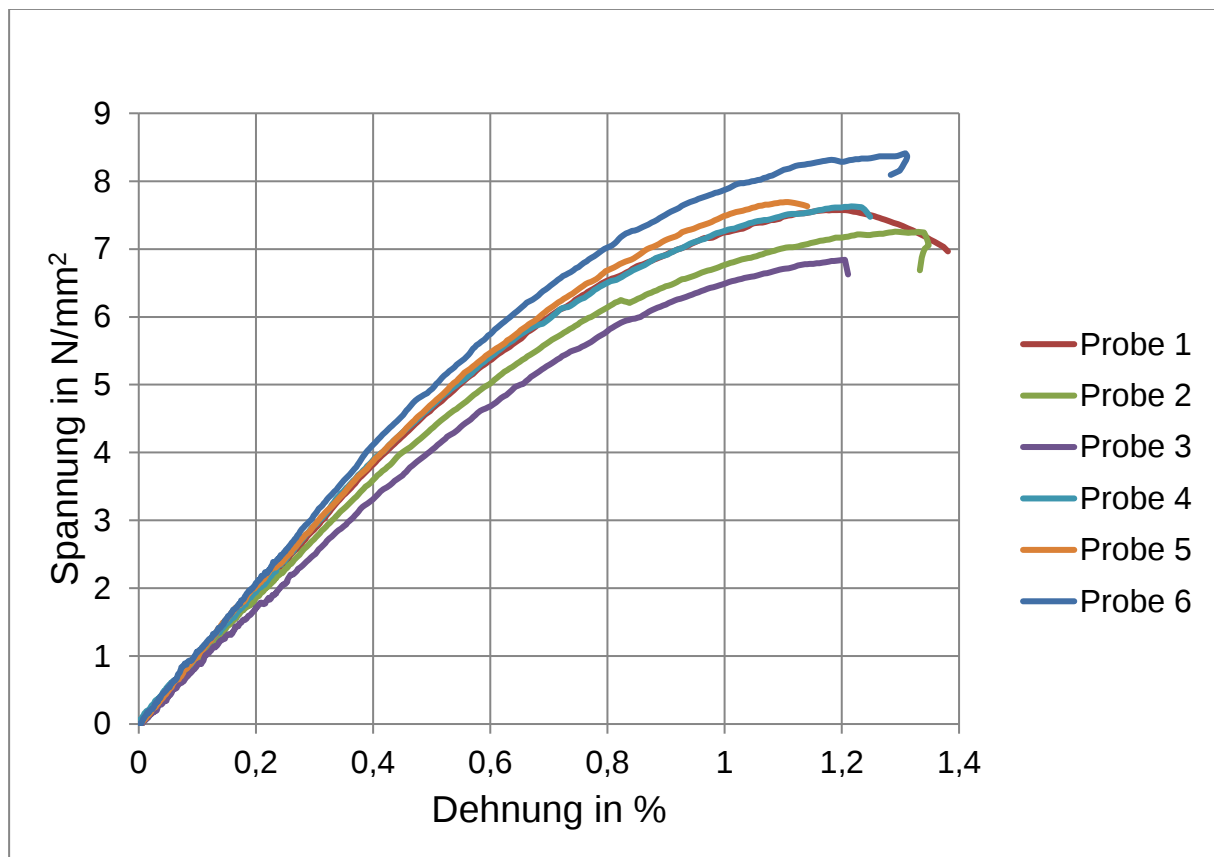
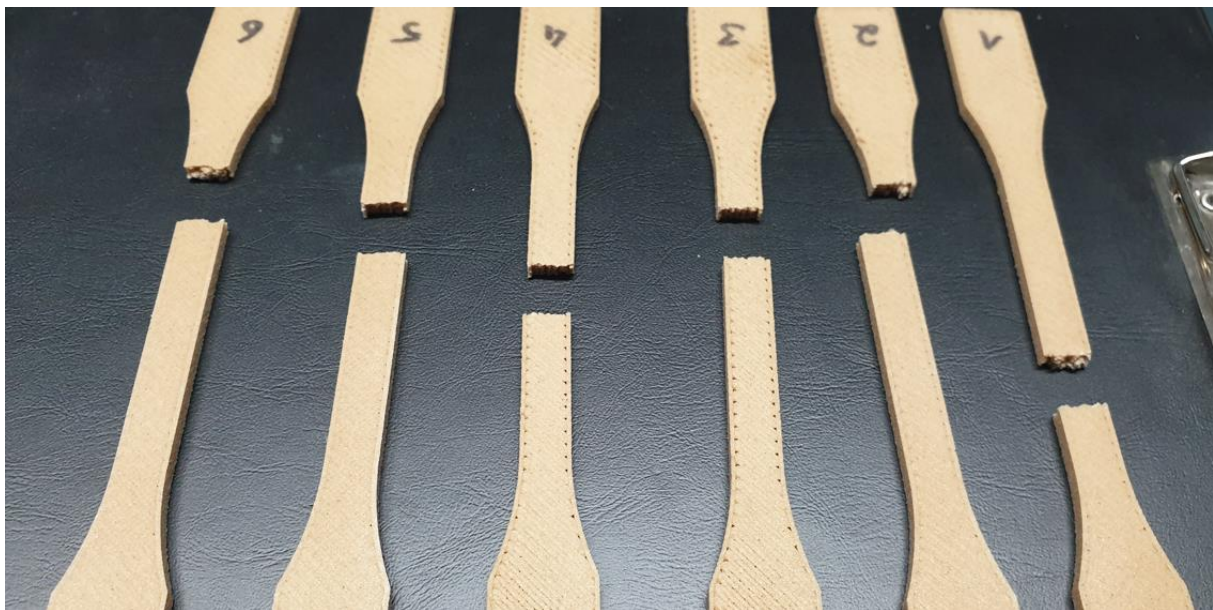
Abbildung 48: Bruchbilder der Proben F1_90

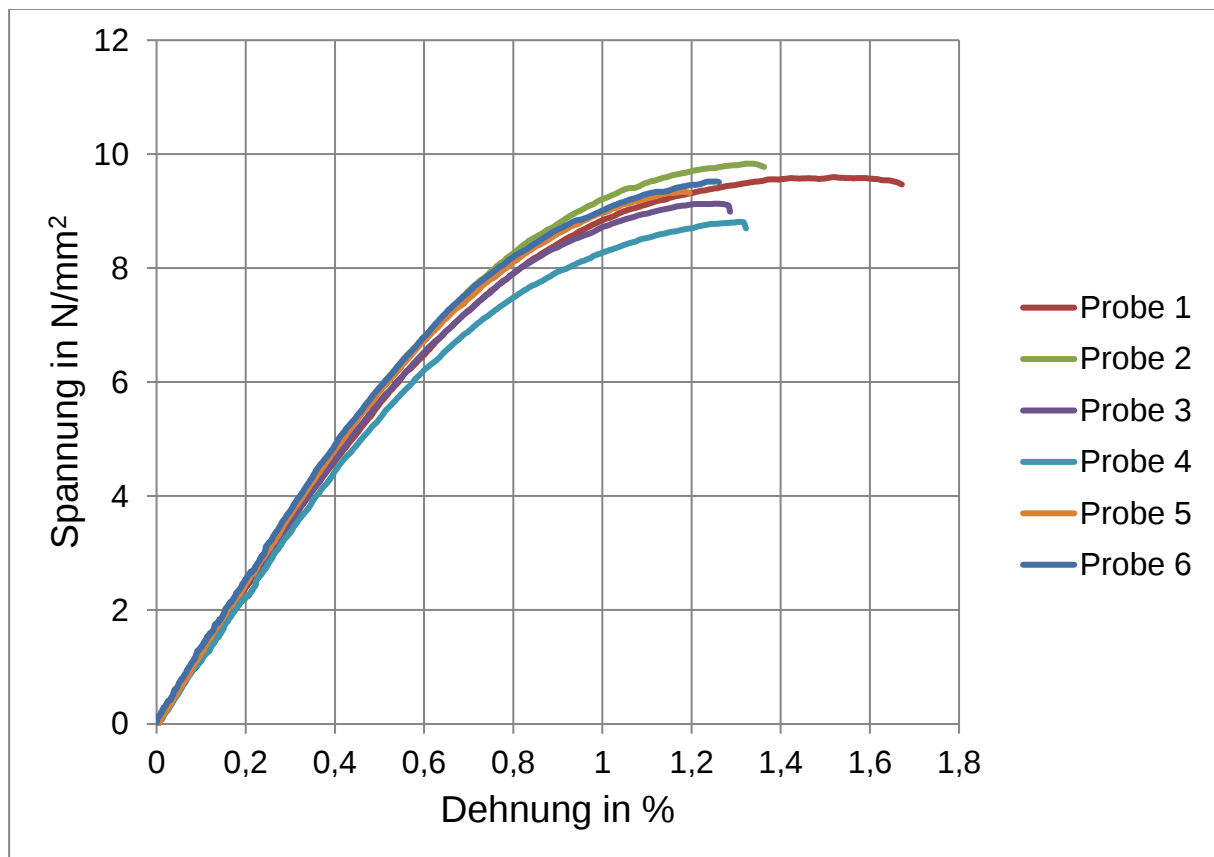
Anhang G.3.2: Proben F1_100**Abbildung 49: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F1_100****Abbildung 50: Bruchbilder der Proben F1_100**

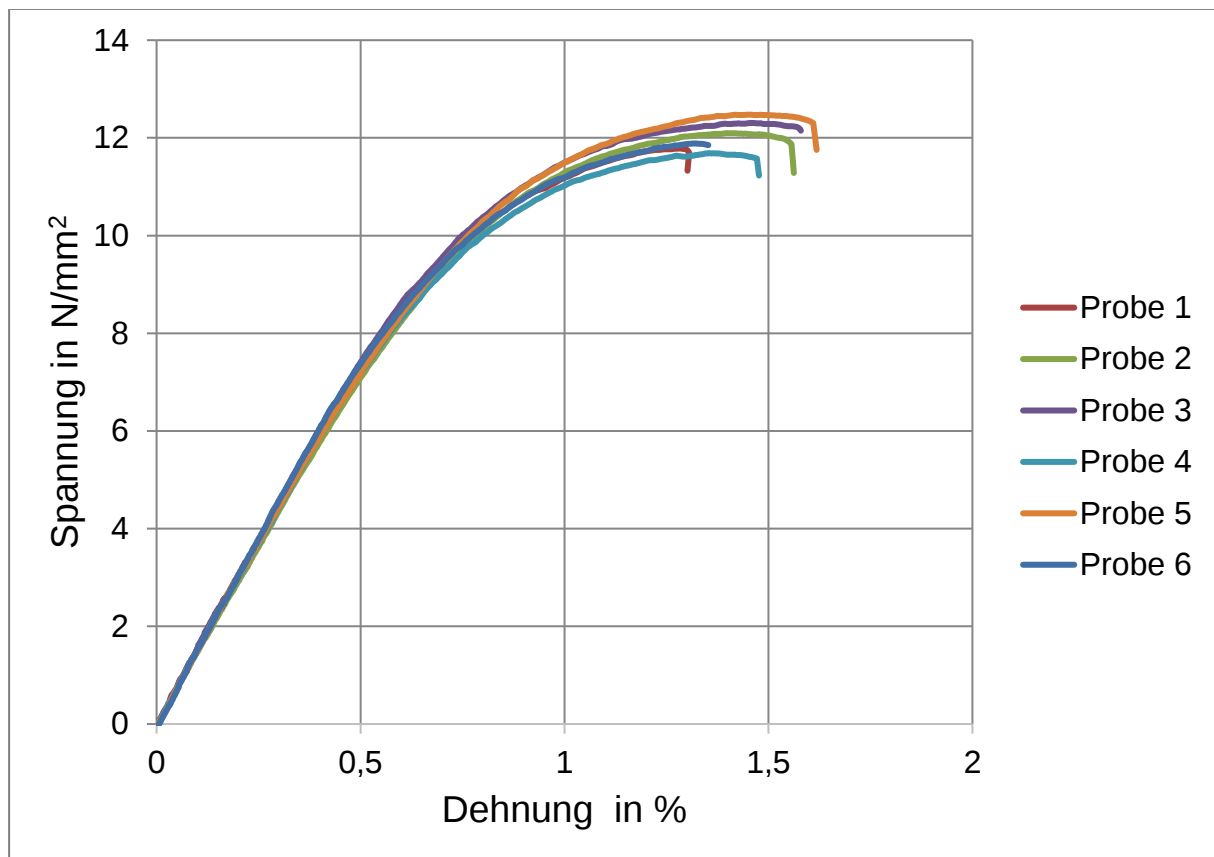
Anhang G.3.3: Proben F2_80**Abbildung 51: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F2_80****Abbildung 52: Bruchbilder der Proben F2_80**

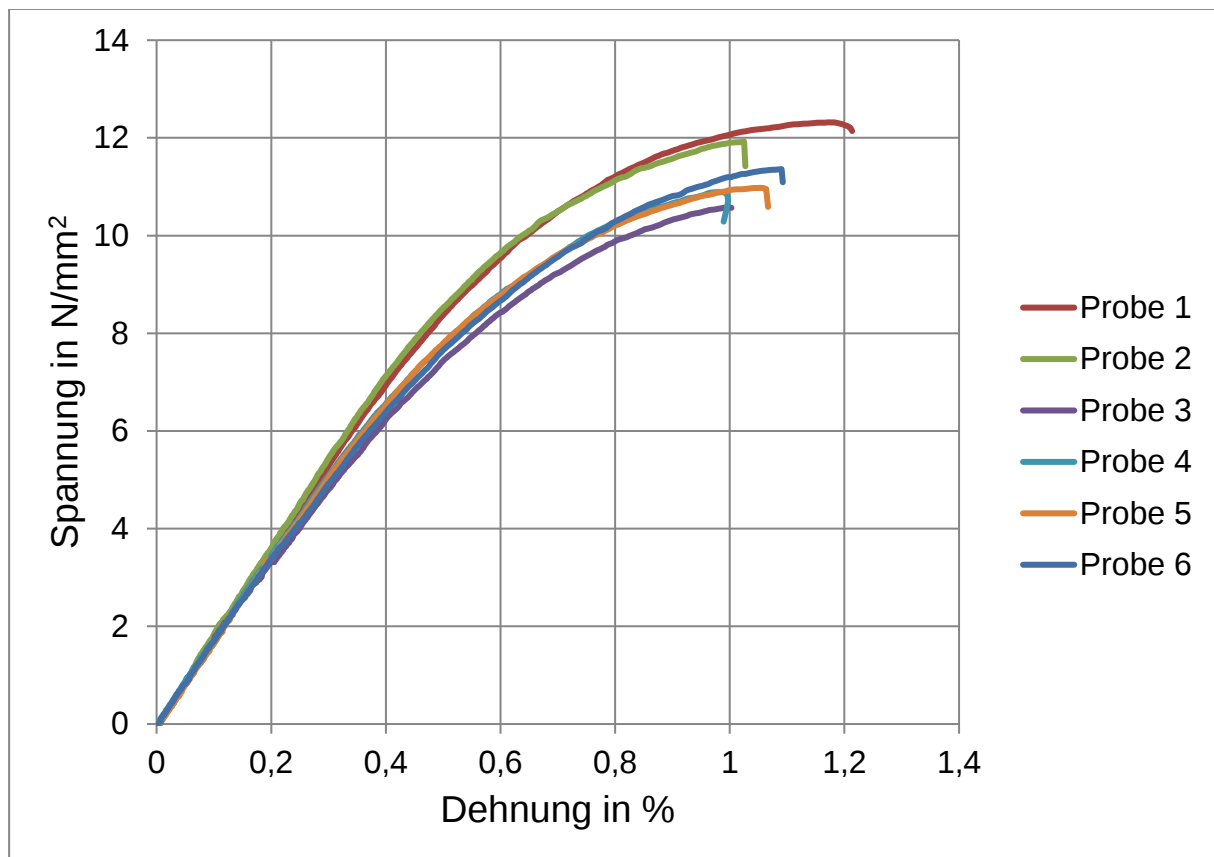
Anhang G.3.4: Proben F2_90**Abbildung 53: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F2_90****Abbildung 54: Bruchbilder der Proben F2_90**

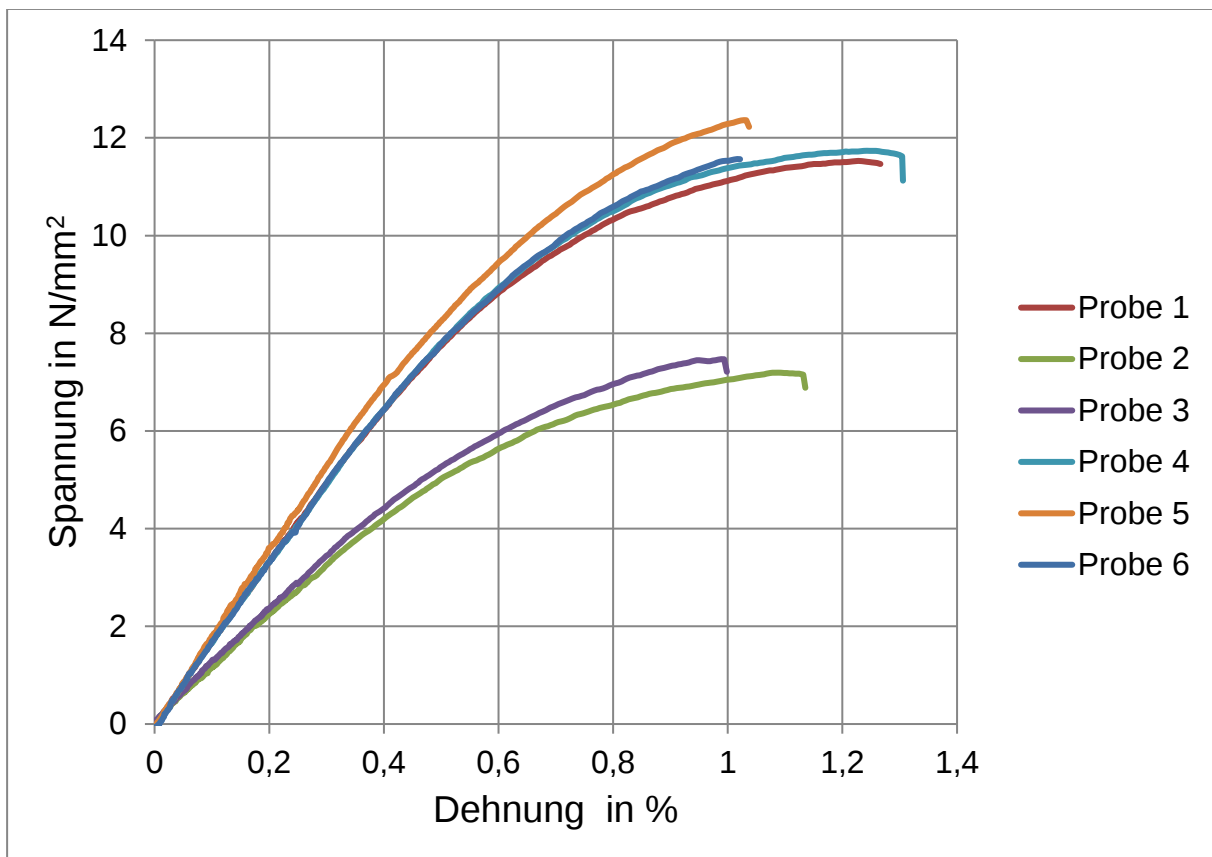
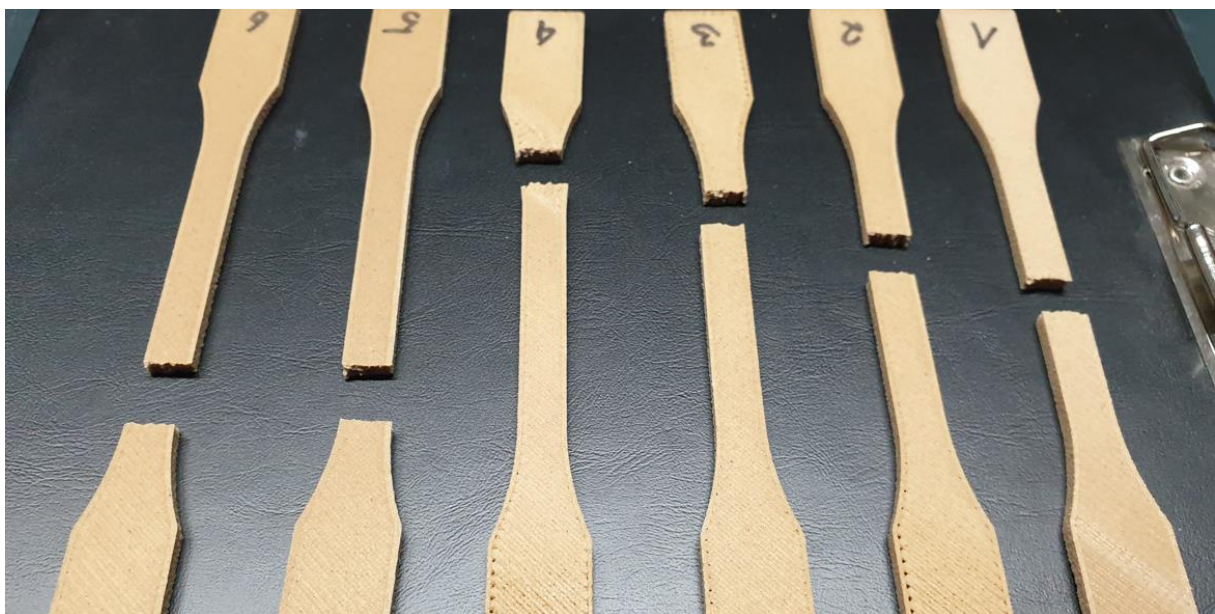
Anhang G.3.5: Proben F2_100**Abbildung 55: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F2_100****Abbildung 56: Bruchbilder der Proben F2_100**

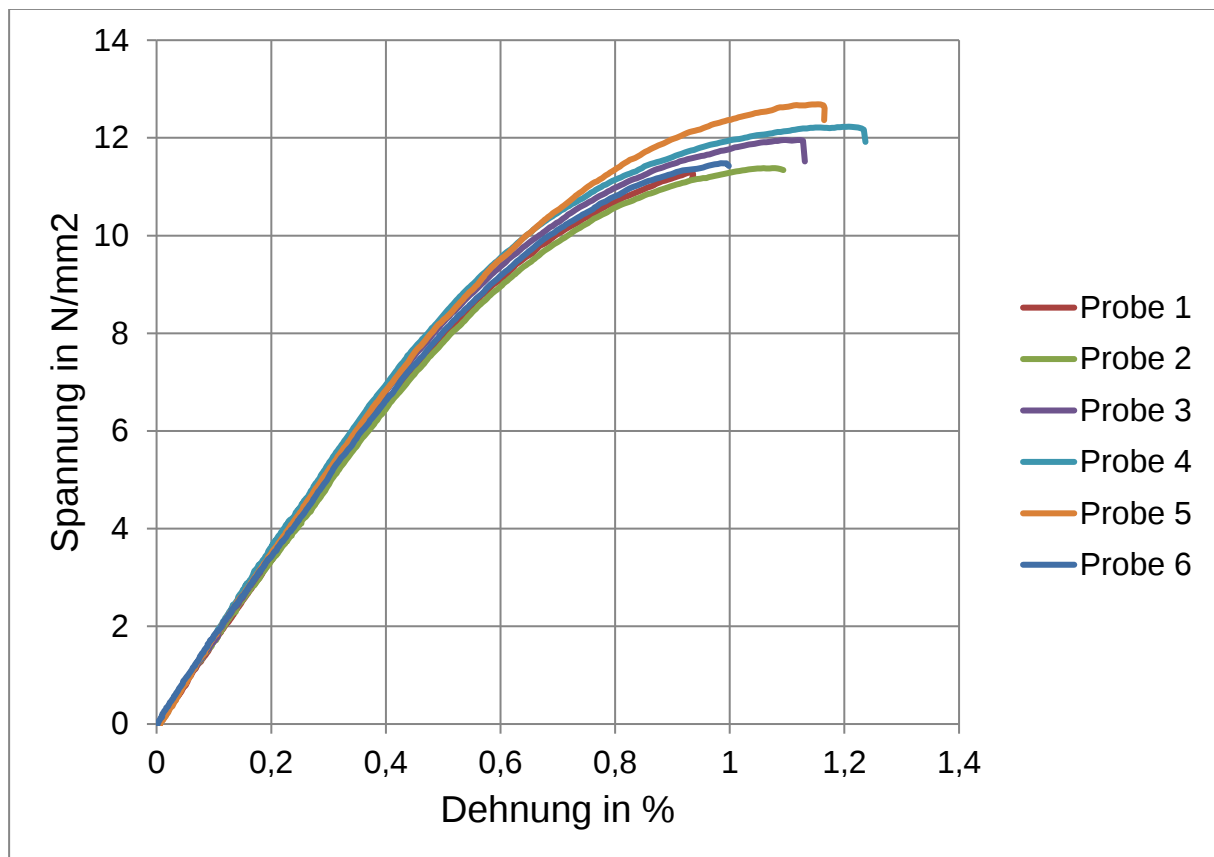
Anhang G.3.6: Proben F3_80**Abbildung 57: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F3_80****Abbildung 58: Bruchbilder der Proben F3_80**

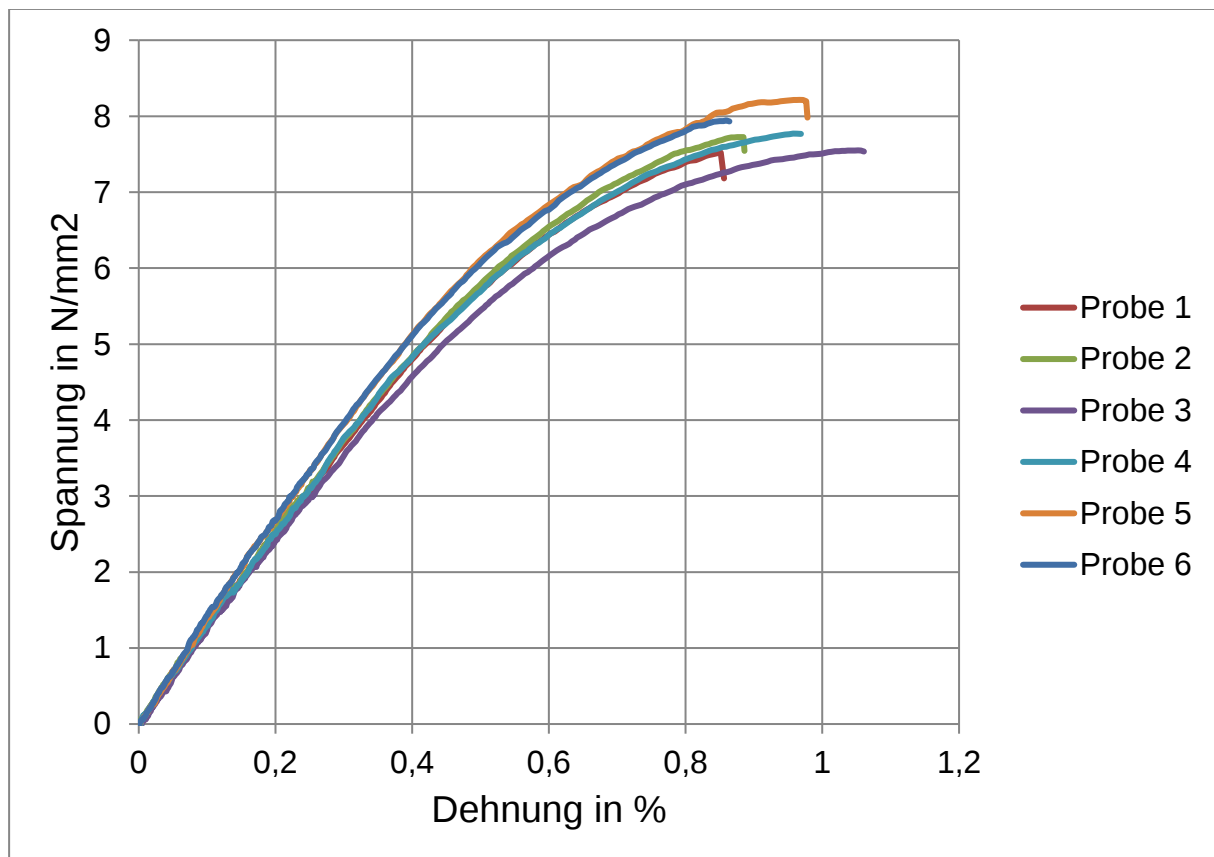
Anhang G.3.7: Proben F3_90**Abbildung 59: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F3_90****Abbildung 60: Bruchbilder der Proben F3_90**

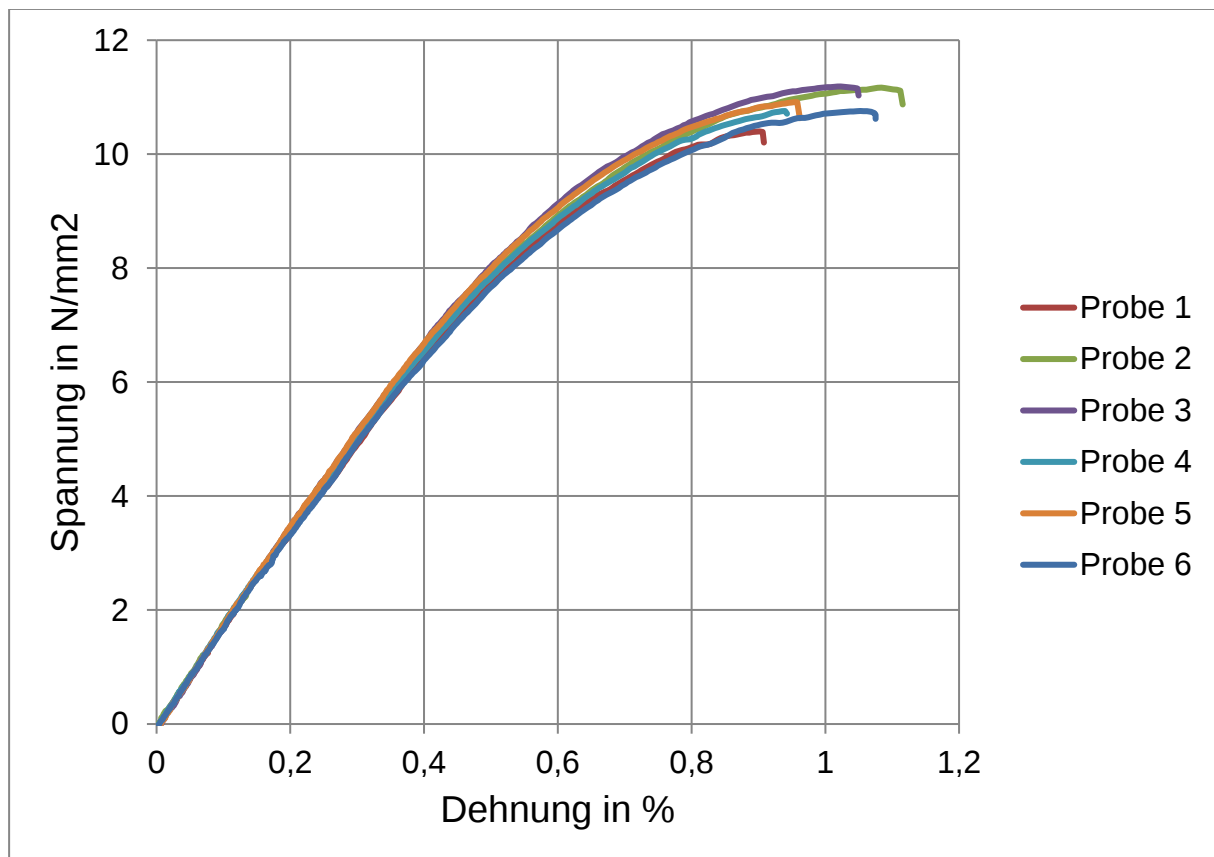
Anhang G.3.8: Proben F3_100**Abbildung 61: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F3_100****Abbildung 62: Bruchbilder der Proben F3_100**

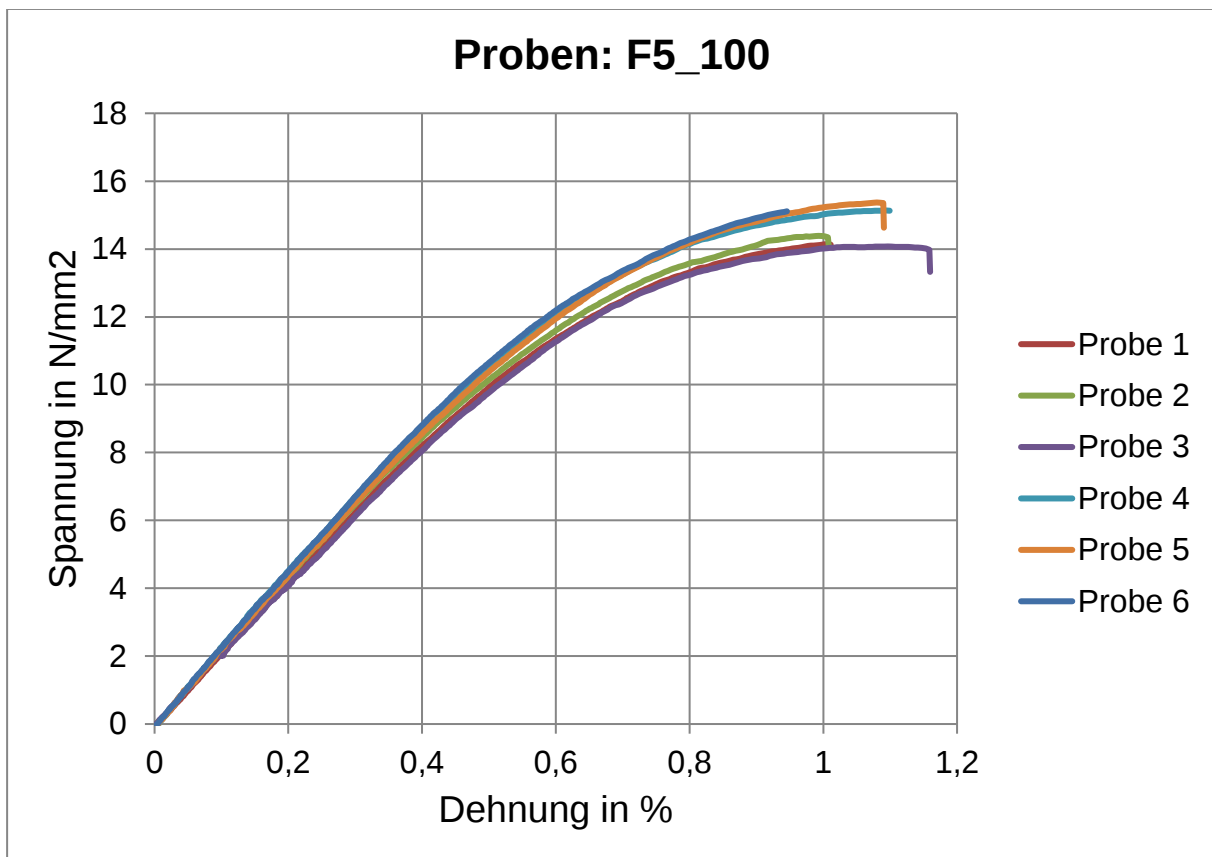
Anhang G.3.9: Proben F4_80**Abbildung 63: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F4_80****Abbildung 64: Bruchbilder der Proben F4_80**

Anhang G.3.10: Proben F4_90**Abbildung 65: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F4_90****Abbildung 66: Bruchbilder der Proben F5_90**

Anhang G.3.11: Proben F4_100**Abbildung 67: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F4_100****Abbildung 68: Bruchbilder der Proben F4_100**

Anhang G.3.12: Proben F5_80**Abbildung 69: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F5_80****Abbildung 70: Bruchbilder der Proben F5_80**

Anhang G.3.13: Proben F5_90**Abbildung 71: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F5_90****Abbildung 72: Bruchbilder der Proben F5_90**

Anhang G.3.14: Proben F5_100**Abbildung 73: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben F5_100****Abbildung 74: Bruchbilder der Proben F5_100**

Anhang H: Messdaten des Einlagerungsversuch

Anhang H.1: Zeitlicher Verlauf der Feuchtigkeitsaufnahme

Anhang H.1.1: Proben F1

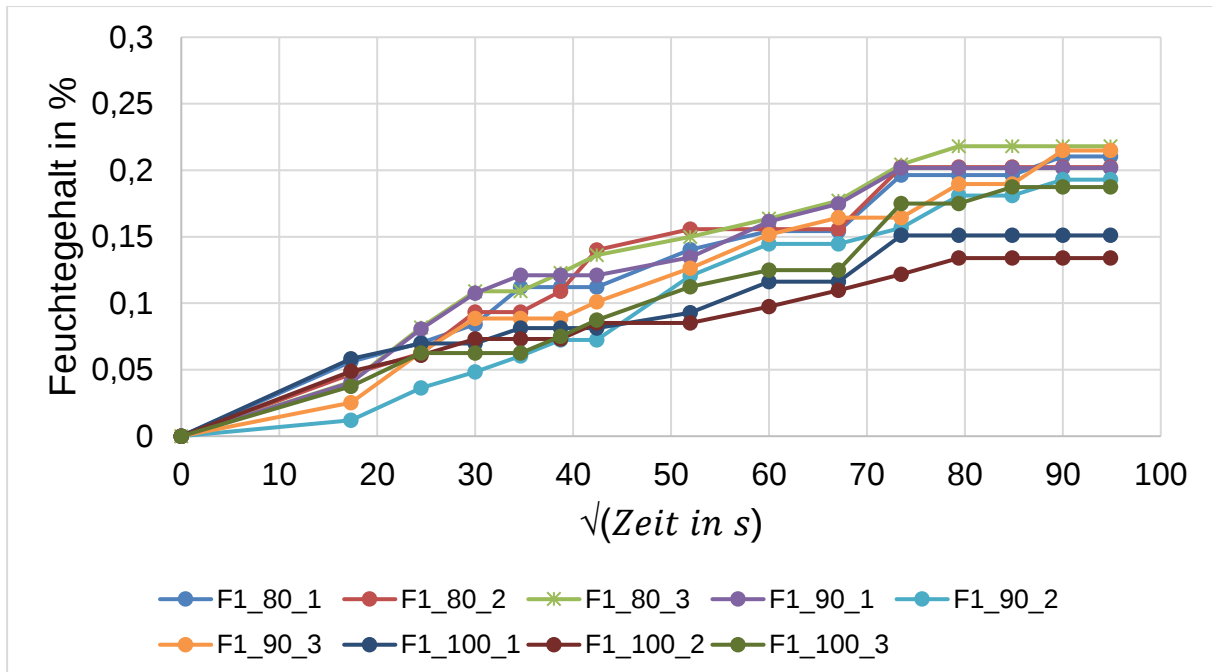


Abbildung 75: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F1

Anhang H.1.2: Proben F2

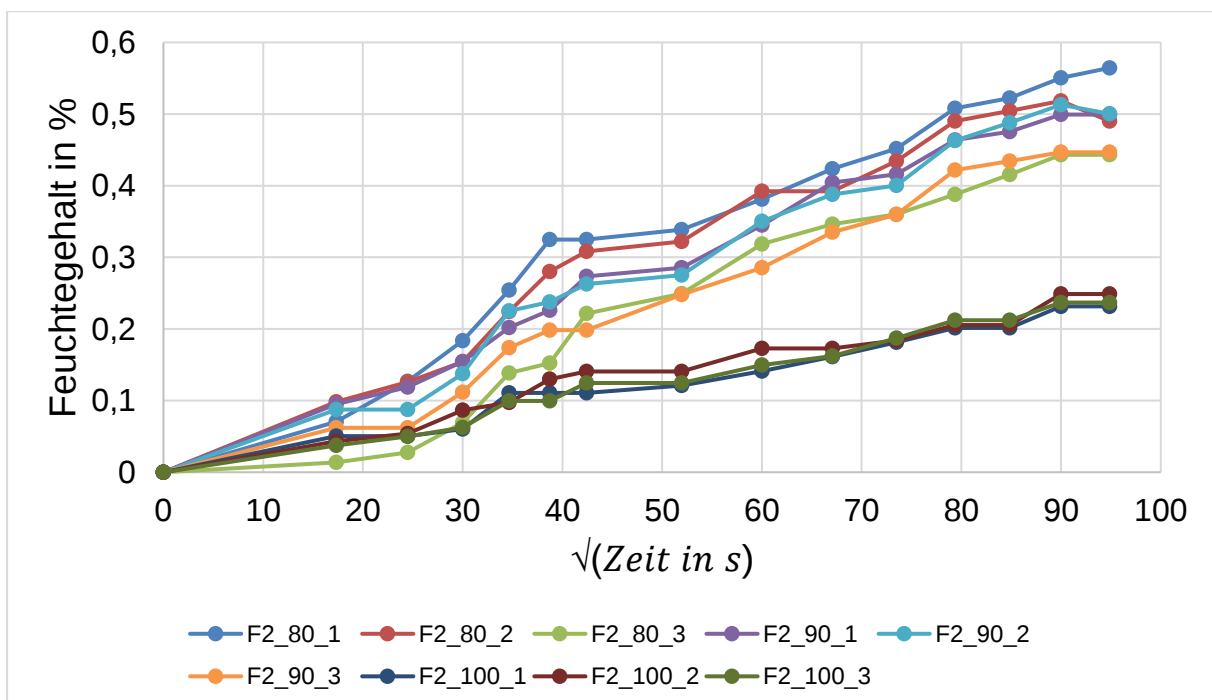


Abbildung 76: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F2

Anhang H.1.3: Proben F3

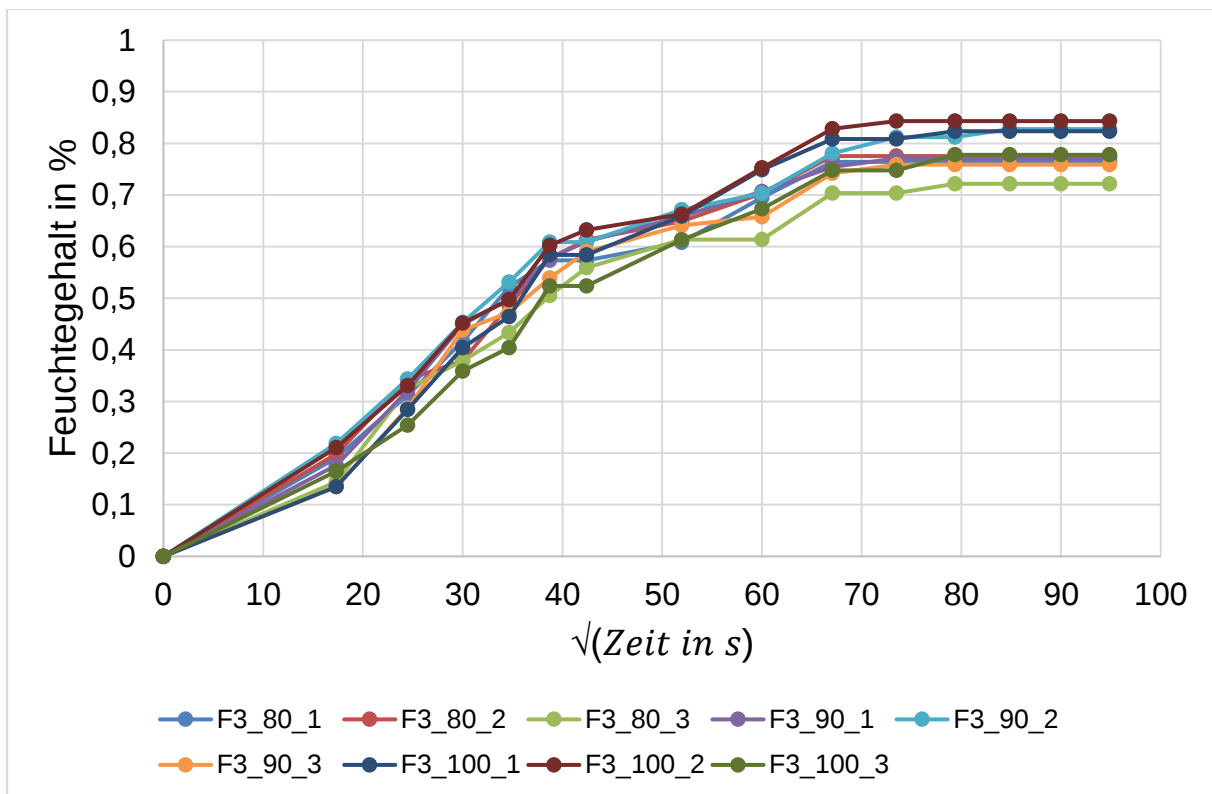


Abbildung 77: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F3

Anhang H.1.4: Proben F4

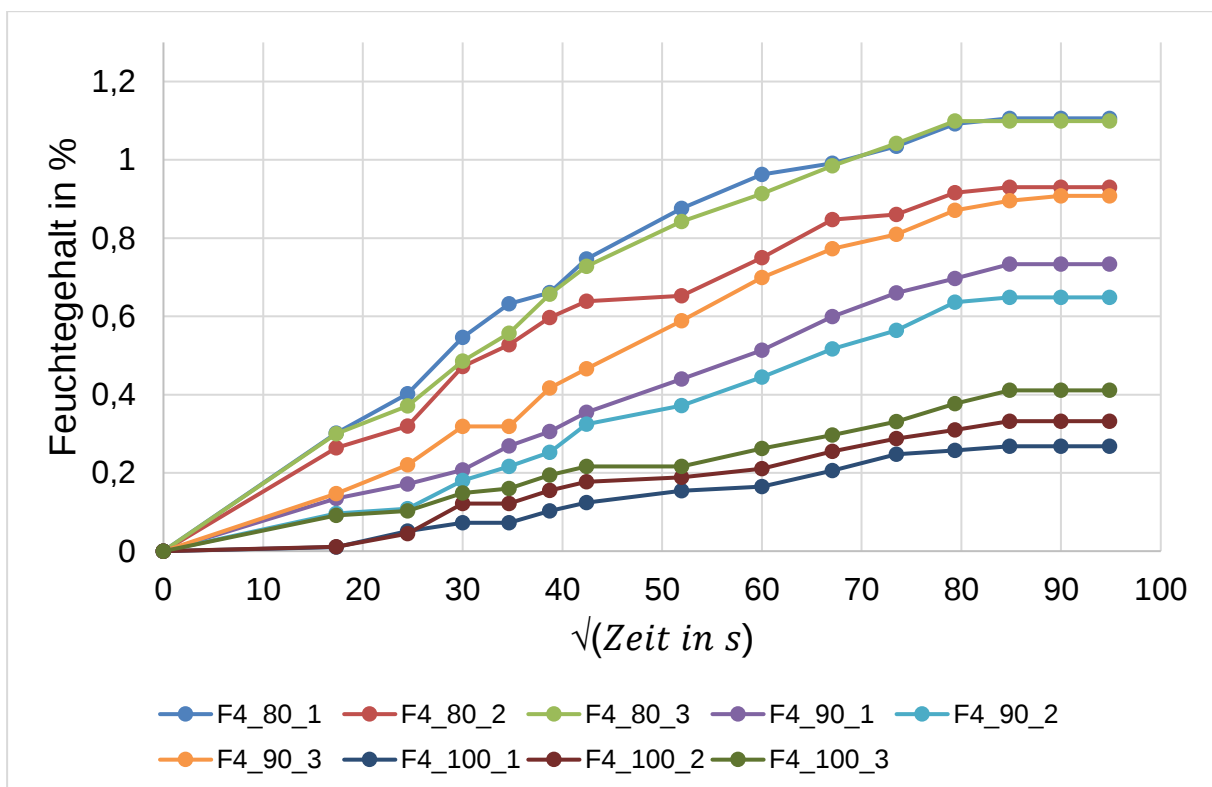


Abbildung 78: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F4

Anhang H.1.5: Proben F5

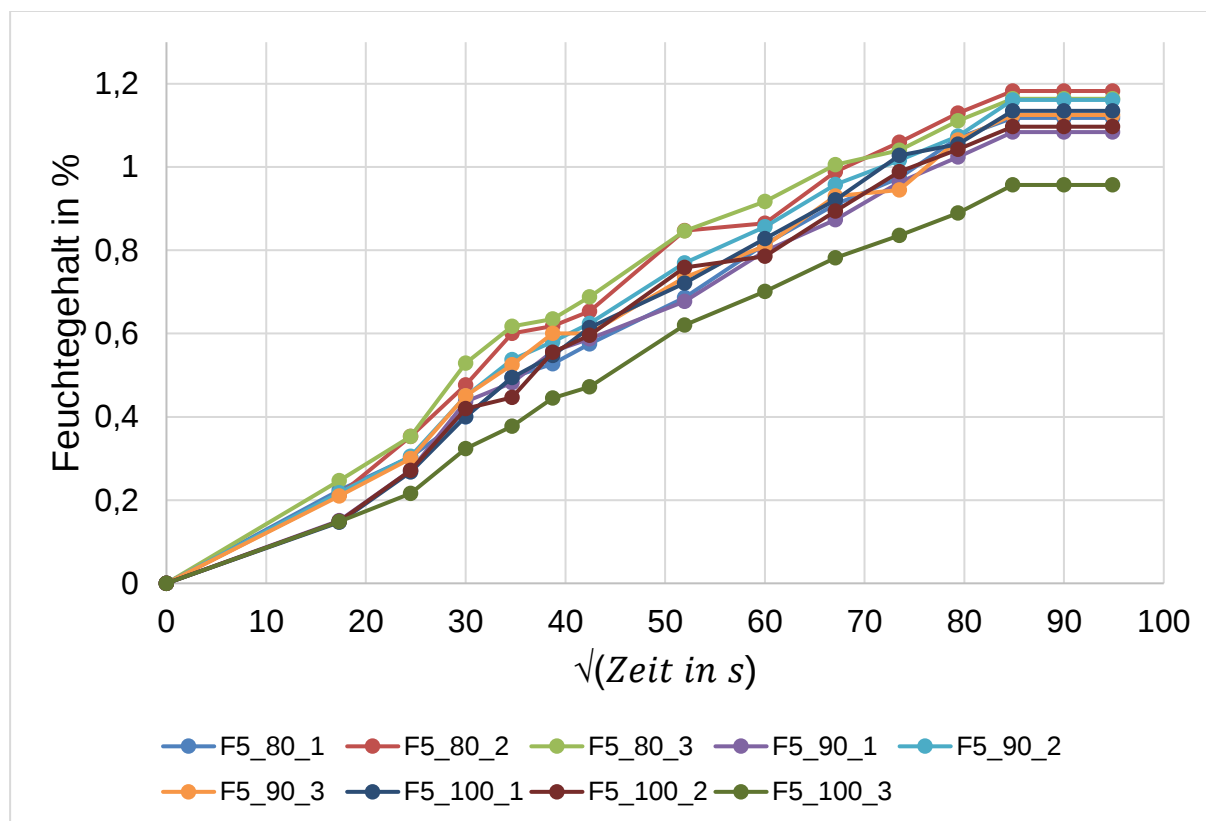


Abbildung 79: Feuchtigkeitsaufnahme des Materials F5

Anhang H.2: Gewichte der Proben über die Einlagerungszeit

Tabelle 22: Messprotokoll Einlagerungsversuch

Filament F1									
	80			90			100		
Wanddicke [mm]	1,4	1,5	1,2	1,35	1,3	1,4	1,3	1,2	1,35
Probe	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Zeit in s	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
0	0,7131	0,6425	0,7338	0,7438	0,8294	0,7913	0,861	0,8213	0,8007
300	0,7135	0,6428	0,7341	0,7441	0,8295	0,7915	0,8615	0,8217	0,801
600	0,7136	0,6429	0,7344	0,7444	0,8297	0,7918	0,8616	0,8218	0,8012
900	0,7137	0,6431	0,7346	0,7446	0,8298	0,792	0,8616	0,8219	0,8012
1200	0,7139	0,6431	0,7346	0,7447	0,8299	0,792	0,8617	0,8219	0,8012
1500	0,7139	0,6432	0,7347	0,7447	0,83	0,792	0,8617	0,8219	0,8013
1800	0,7139	0,6434	0,7348	0,7447	0,83	0,7921	0,8617	0,822	0,8014
2700	0,7141	0,6435	0,7349	0,7448	0,8304	0,7923	0,8618	0,822	0,8016
3600	0,7142	0,6435	0,735	0,745	0,8306	0,7925	0,862	0,8221	0,8017
4500	0,7142	0,6435	0,7351	0,7451	0,8306	0,7926	0,862	0,8222	0,8017
5400	0,7145	0,6438	0,7353	0,7453	0,8307	0,7926	0,8623	0,8223	0,8021
6300	0,7145	0,6438	0,7354	0,7453	0,8309	0,7928	0,8623	0,8224	0,8021
7200	0,7145	0,6438	0,7354	0,7453	0,8309	0,7928	0,8623	0,8224	0,8022

8100	0,7146	0,6438	0,7354	0,7453	0,831	0,793	0,8623	0,8224	0,8022
9000	0,7146	0,6438	0,7354	0,7453	0,831	0,793	0,8623	0,8224	0,8022
Filament F2									
	80			90			100		
Wanddicke [mm]	1,15	1,35	1,25	1,45	1,4	1,35	1,35	1,45	1,25
Probe Zeit in s	1 [g]	2 [g]	3 [g]	1 [g]	2 [g]	3 [g]	1 [g]	2 [g]	3 [g]
0	0,7086	0,7139	0,7222	0,8411	0,7993	0,806	0,9931	0,9244	0,802
300	0,7091	0,7146	0,7223	0,8419	0,8	0,8065	0,9936	0,9248	0,8023
600	0,7095	0,7148	0,7224	0,8421	0,8	0,8065	0,9936	0,9249	0,8024
900	0,7099	0,715	0,7227	0,8424	0,8004	0,8069	0,9937	0,9252	0,8025
1200	0,7104	0,7155	0,7232	0,8428	0,8011	0,8074	0,9942	0,9253	0,8028
1500	0,7109	0,7159	0,7233	0,843	0,8012	0,8076	0,9942	0,9256	0,8028
1800	0,7109	0,7161	0,7238	0,8434	0,8014	0,8076	0,9942	0,9257	0,803
2700	0,711	0,7162	0,724	0,8435	0,8015	0,808	0,9943	0,9257	0,803
3600	0,7113	0,7167	0,7245	0,844	0,8021	0,8083	0,9945	0,926	0,8032
4500	0,7116	0,7167	0,7247	0,8445	0,8024	0,8087	0,9947	0,926	0,8033
5400	0,7118	0,717	0,7248	0,8446	0,8025	0,8089	0,9949	0,9261	0,8035
6300	0,7122	0,7174	0,725	0,845	0,803	0,8094	0,9951	0,9263	0,8037
7200	0,7123	0,7175	0,7252	0,8451	0,8032	0,8095	0,9951	0,9263	0,8037
8100	0,7125	0,7176	0,7254	0,8453	0,8034	0,8096	0,9954	0,9267	0,8039
9000	0,7126	0,7174	0,7254	0,8453	0,8033	0,8096	0,9954	0,9267	0,8039
Filament F3									
	80			90			100		
Wanddicke [mm]	1,35	1,25	1,3	1,4	1,35	1,25	1,3	1,25	1,4
Probe Zeit in s	1 [g]	2 [g]	3 [g]	1 [g]	2 [g]	3 [g]	1 [g]	2 [g]	3 [g]
0	0,5757	0,5545	0,5542	0,6227	0,6403	0,593	0,6678	0,6641	0,6685
300	0,5768	0,5556	0,555	0,6238	0,6417	0,5938	0,6687	0,6655	0,6696
600	0,5775	0,5564	0,556	0,6247	0,6425	0,5947	0,6697	0,6663	0,6702
900	0,5781	0,5566	0,5563	0,6255	0,6432	0,5956	0,6705	0,6671	0,6709
1200	0,5787	0,5572	0,5566	0,6258	0,6437	0,5958	0,6709	0,6674	0,6712
1500	0,579	0,5577	0,557	0,6263	0,6442	0,5962	0,6717	0,6681	0,672
1800	0,579	0,5579	0,5573	0,6265	0,6442	0,5965	0,6717	0,6683	0,672
2700	0,5792	0,5581	0,5576	0,6268	0,6446	0,5968	0,6722	0,6685	0,6726
3600	0,5797	0,5584	0,5576	0,6271	0,6448	0,5969	0,6728	0,6691	0,673
4500	0,5801	0,5588	0,5581	0,6274	0,6453	0,5974	0,6732	0,6696	0,6735
5400	0,5801	0,5588	0,5581	0,6275	0,6455	0,5975	0,6732	0,6697	0,6735
6300	0,5801	0,5588	0,5582	0,6275	0,6455	0,5975	0,6733	0,6697	0,6737
7200	0,5801	0,5588	0,5582	0,6275	0,6456	0,5975	0,6733	0,6697	0,6737
8100	0,5801	0,5588	0,5582	0,6275	0,6456	0,5975	0,6733	0,6697	0,6737
9000	0,5801	0,5588	0,5582	0,6275	0,6456	0,5975	0,6733	0,6697	0,6737

Filament F4									
	80			90			100		
Wanddicke [mm]	1,45	1,35	1,4	1,35	1,5	1,35	1,45	1,35	1,3
Probe Zeit in s	1 [g]	2 [g]	3 [g]	1 [g]	2 [g]	3 [g]	1 [g]	2 [g]	3 [g]
0	0,6962	0,7204	0,7007	0,8182	0,8328	0,8151	0,9702	0,9032	0,8764
300	0,6983	0,7223	0,7028	0,8193	0,8336	0,8163	0,9703	0,9033	0,8772
600	0,699	0,7227	0,7033	0,8196	0,8337	0,8169	0,9707	0,9036	0,8773
900	0,7	0,7238	0,7041	0,8199	0,8343	0,8177	0,9709	0,9043	0,8777
1200	0,7006	0,7242	0,7046	0,8204	0,8346	0,8177	0,9709	0,9043	0,8778
1500	0,7008	0,7247	0,7053	0,8207	0,8349	0,8185	0,9712	0,9046	0,8781
1800	0,7014	0,725	0,7058	0,8211	0,8355	0,8189	0,9714	0,9048	0,8783
2700	0,7023	0,7251	0,7066	0,8218	0,8359	0,8199	0,9717	0,9049	0,8783
3600	0,7029	0,7258	0,7071	0,8224	0,8365	0,8208	0,9718	0,9051	0,8787
4500	0,7031	0,7265	0,7076	0,8231	0,8371	0,8214	0,9722	0,9055	0,879
5400	0,7034	0,7266	0,708	0,8236	0,8375	0,8217	0,9726	0,9058	0,8793
6300	0,7038	0,727	0,7084	0,8239	0,8381	0,8222	0,9727	0,906	0,8797
7200	0,7039	0,7271	0,7084	0,8242	0,8382	0,8224	0,9728	0,9062	0,88
8100	0,7039	0,7271	0,7084	0,8242	0,8382	0,8225	0,9728	0,9062	0,88
9000	0,7039	0,7271	0,7084	0,8242	0,8382	0,8225	0,9728	0,9062	0,88
Filament F5									
	80			90			100		
Wanddicke [mm]	1,2	1,1	1,25	1,25	1,35	1,3	1,25	1,4	1,3
Probe Zeit in s	1 [g]	2 [g]	3 [g]	1 [g]	2 [g]	3 [g]	1 [g]	2 [g]	3 [g]
0	0,6261	0,5665	0,567	0,6642	0,6889	0,6666	0,7489	0,7384	0,7419
300	0,6275	0,5677	0,5684	0,6652	0,6904	0,668	0,75	0,7395	0,743
600	0,628	0,5685	0,569	0,666	0,691	0,6686	0,7509	0,7404	0,7435
900	0,6286	0,5692	0,57	0,6671	0,692	0,6696	0,7519	0,7415	0,7443
1200	0,6292	0,5699	0,5705	0,6674	0,6926	0,6701	0,7526	0,7417	0,7447
1500	0,6294	0,57	0,5706	0,6679	0,6929	0,6706	0,753	0,7425	0,7452
1800	0,6297	0,5702	0,5709	0,6681	0,6932	0,6706	0,7535	0,7428	0,7454
2700	0,6304	0,5713	0,5718	0,6687	0,6942	0,6715	0,7543	0,744	0,7465
3600	0,6312	0,5714	0,5722	0,6695	0,6948	0,672	0,7551	0,7442	0,7471
4500	0,6318	0,5721	0,5727	0,67	0,6955	0,6728	0,7558	0,745	0,7477
5400	0,6322	0,5725	0,5729	0,6706	0,6959	0,6729	0,7566	0,7457	0,7481
6300	0,6328	0,5729	0,5733	0,671	0,6963	0,6737	0,7568	0,7461	0,7485
7200	0,6331	0,5732	0,5736	0,6714	0,6969	0,6741	0,7574	0,7465	0,749
8100	0,6331	0,5732	0,5736	0,6714	0,6969	0,6741	0,7574	0,7465	0,749
9000	0,6331	0,5732	0,5736	0,6714	0,6969	0,6741	0,7574	0,7465	0,749

Anhang H.3: Mittlerer Diffusionskoeffizient

Tabelle 23: Mittelwerte der Diffusionskoeffizienten

Material	Diffusionskoeffizient [m ² /s]	Standardabweichung [m ² /s]
F1_80	7,2671E-11	1,2879E-11
F1_90	5,3498E-11	2,8723E-11
F1_100	5,2798E-11	1,3293E-11
F2_80	5,3101E-11	2,7103E-11
F2_90	5,3778E-11	5,8154E-12
F2_100	5,5248E-11	1,9337E-11
F3_80	1,1862E-10	1,3704E-11
F3_90	1,2564E-10	2,0673E-11
F3_100	1,1061E-10	5,9643E-12
F4_80	9,6017E-11	3,8556E-12
F4_90	4,544E-11	4,5393E-12
F4_100	4,7332E-11	5,8812E-12
F5_80	4,8656E-11	1,0583E-11
F5_90	5,886E-11	4,5071E-12
F5_100	5,3704E-11	1,0419E-11

Anhang I: Messdaten Dynamisch-Mechanischer-Analyse

Anhang I.1: Diagramme

Anhang I.1.1: F1_80

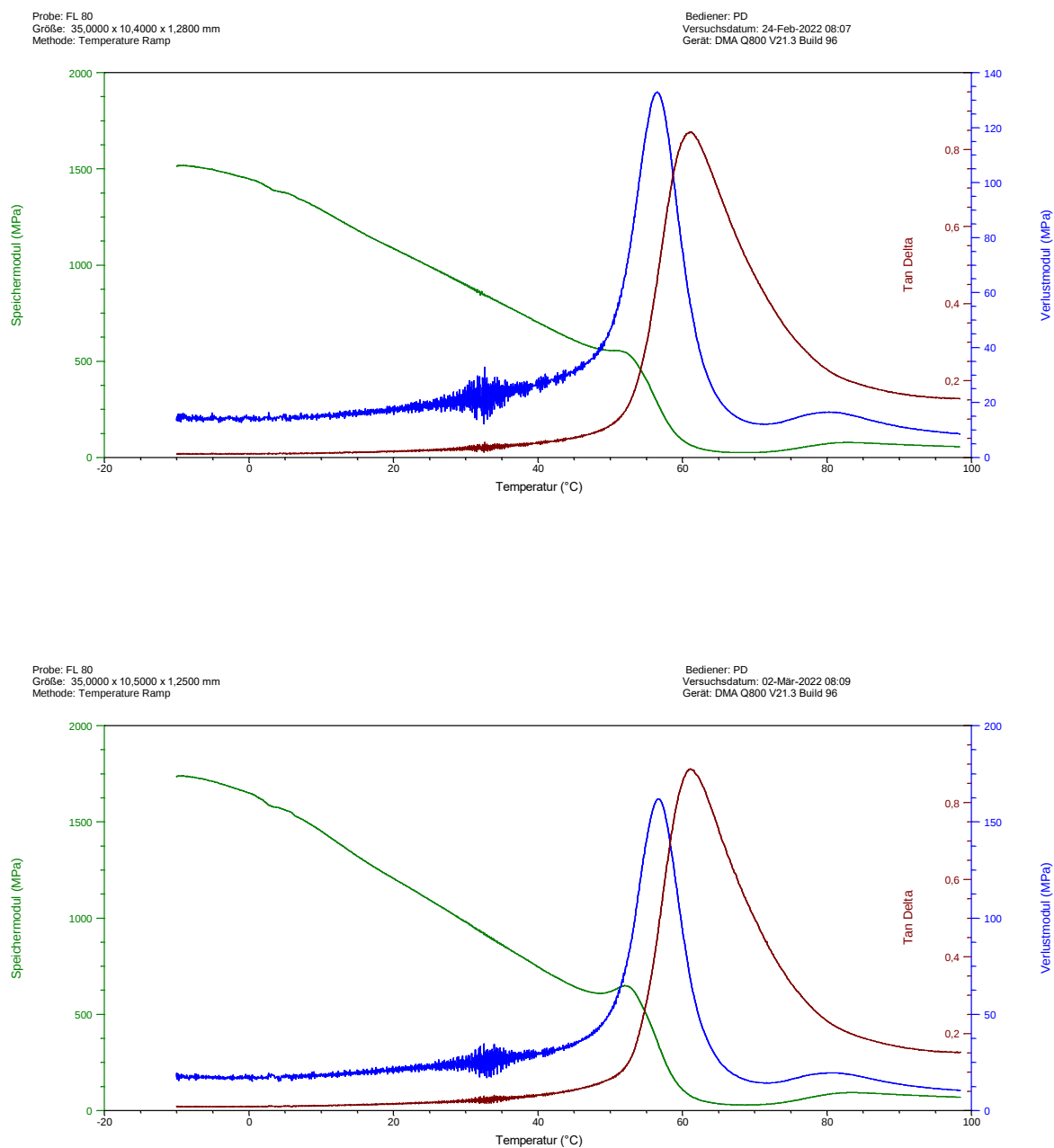
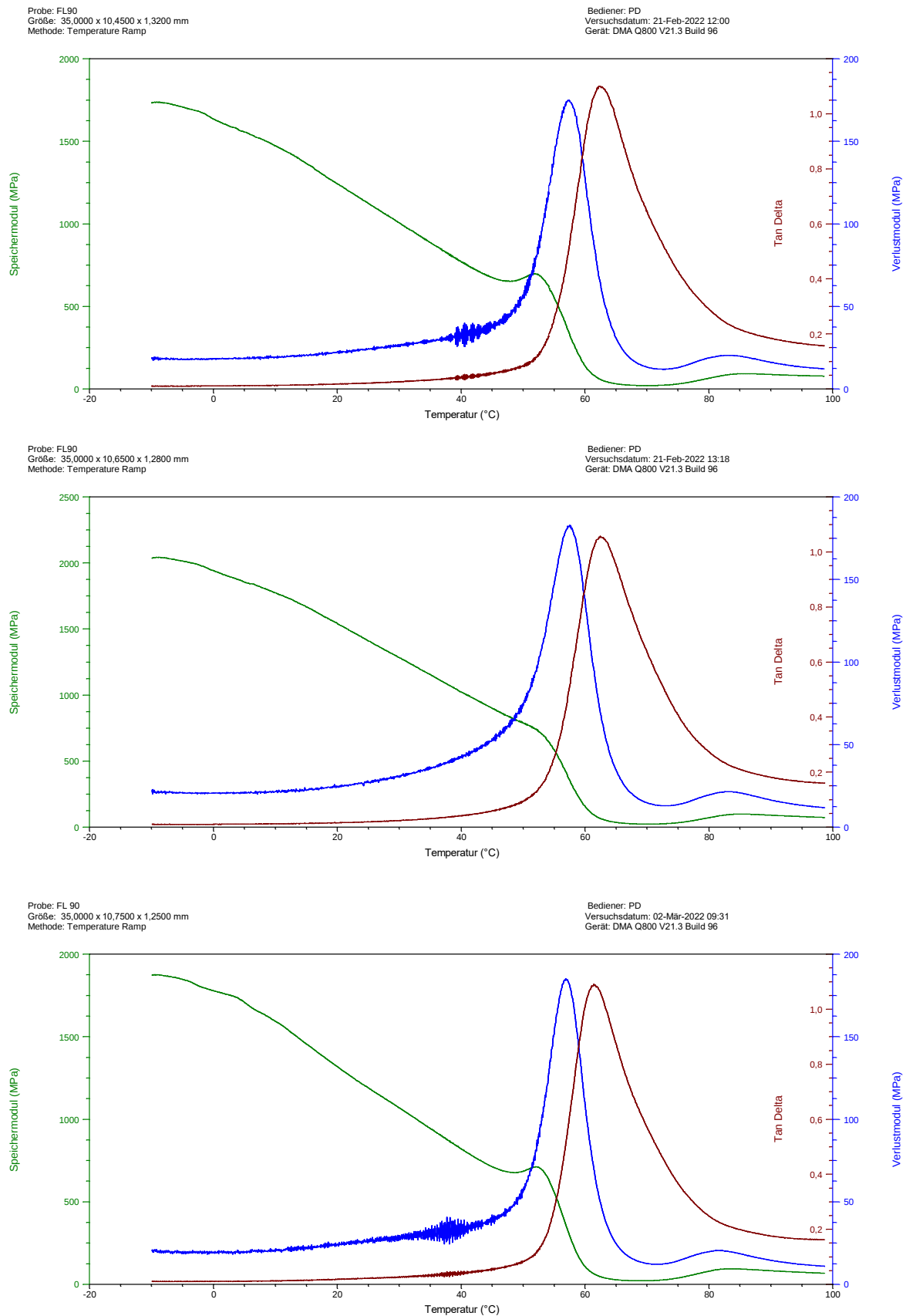


Abbildung 80: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F1_80

Anhang I.1.1: F1_90

Abbildung 81: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F1_90

Anhang I.1.1: F1_100

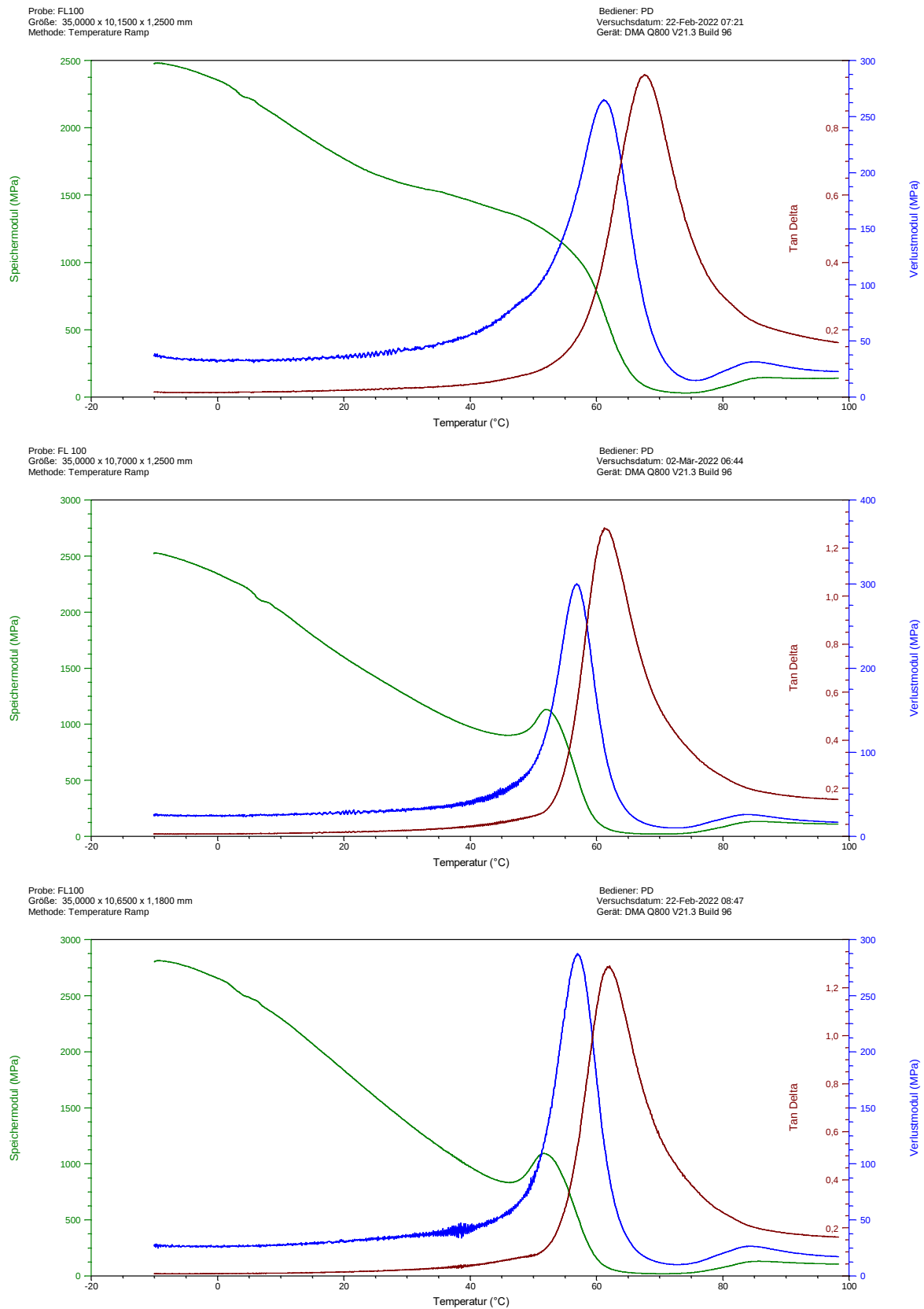
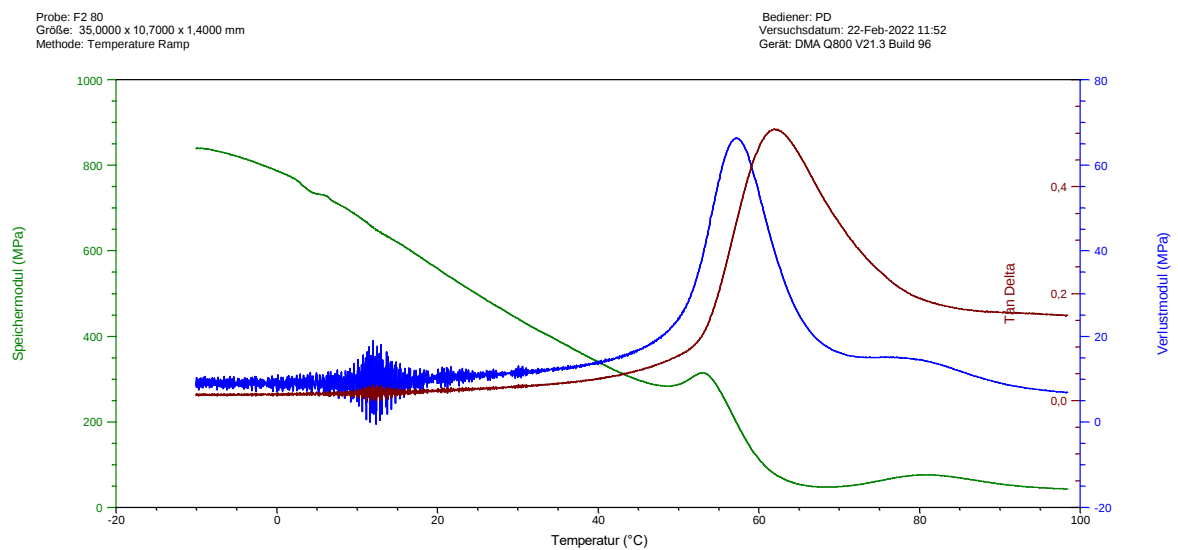
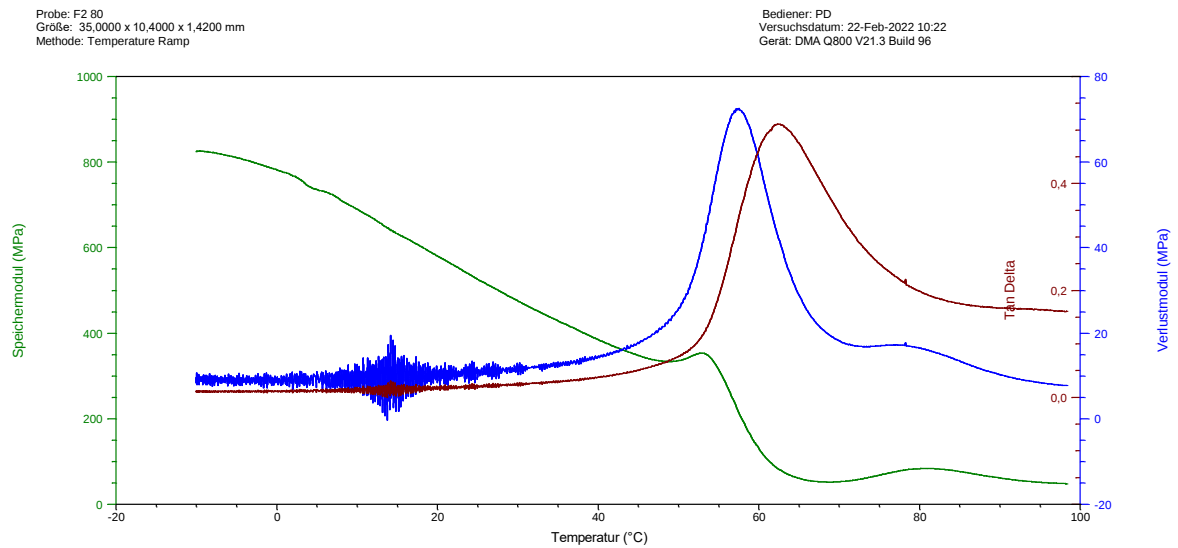
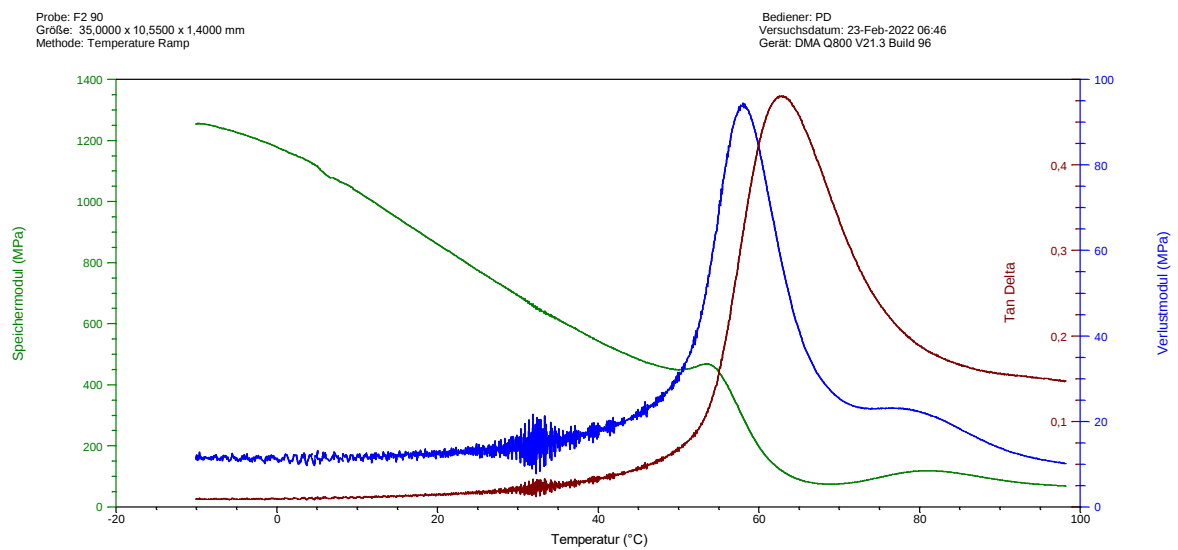
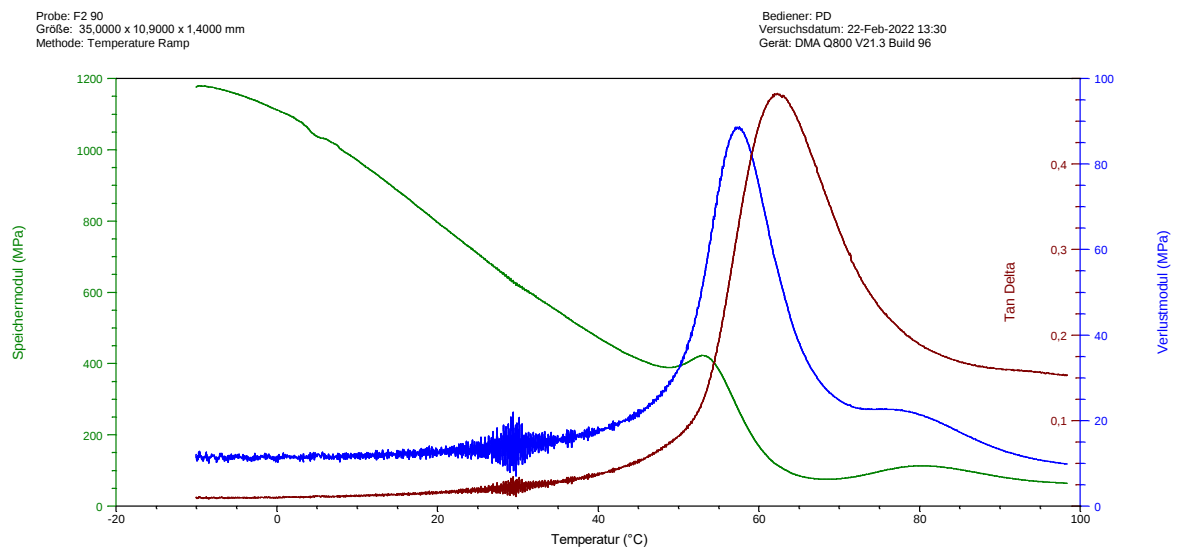


Abbildung 82: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F1_100

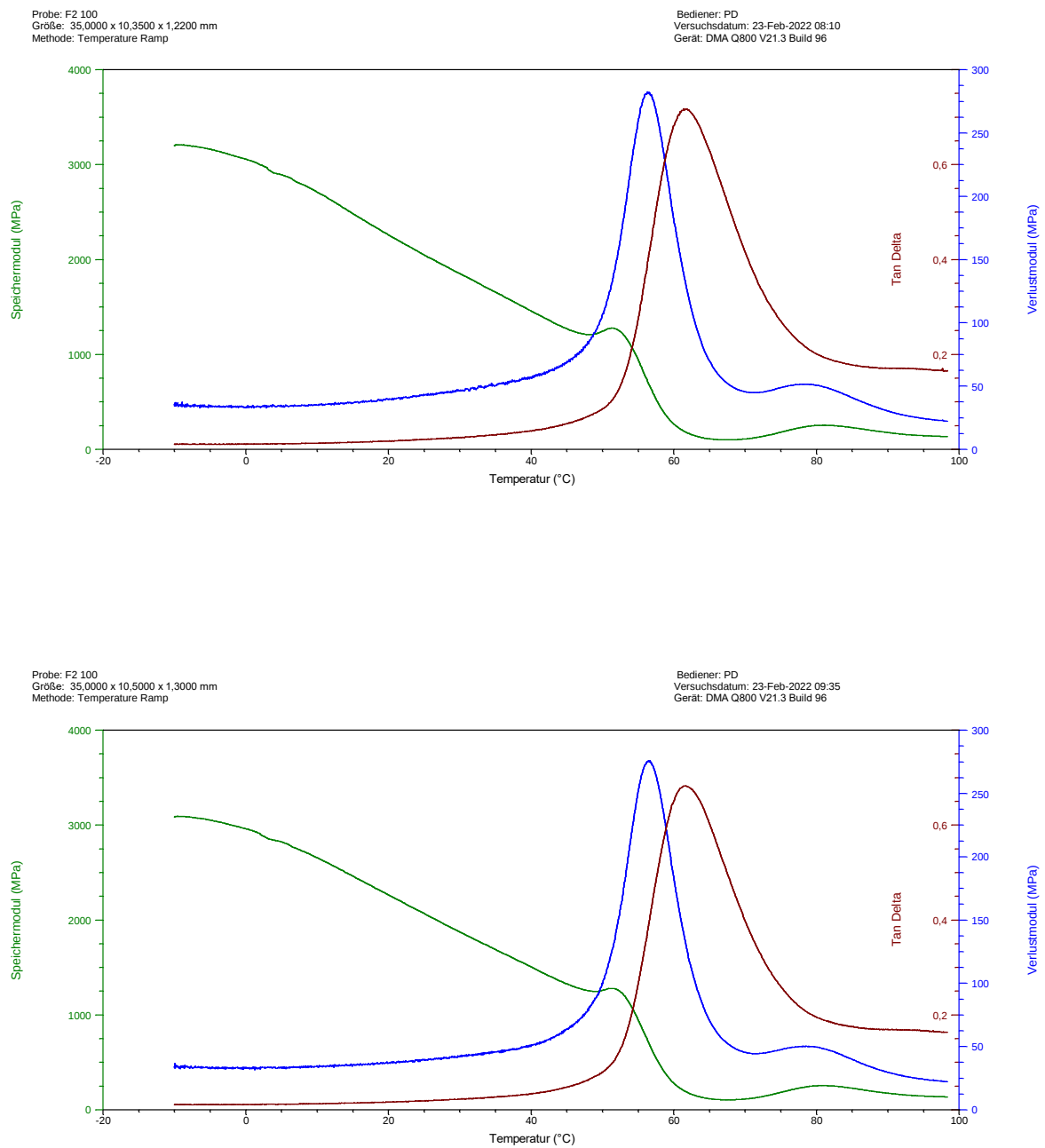
Anhang I.1.1: F2_80

Abbildung 83: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F22_80

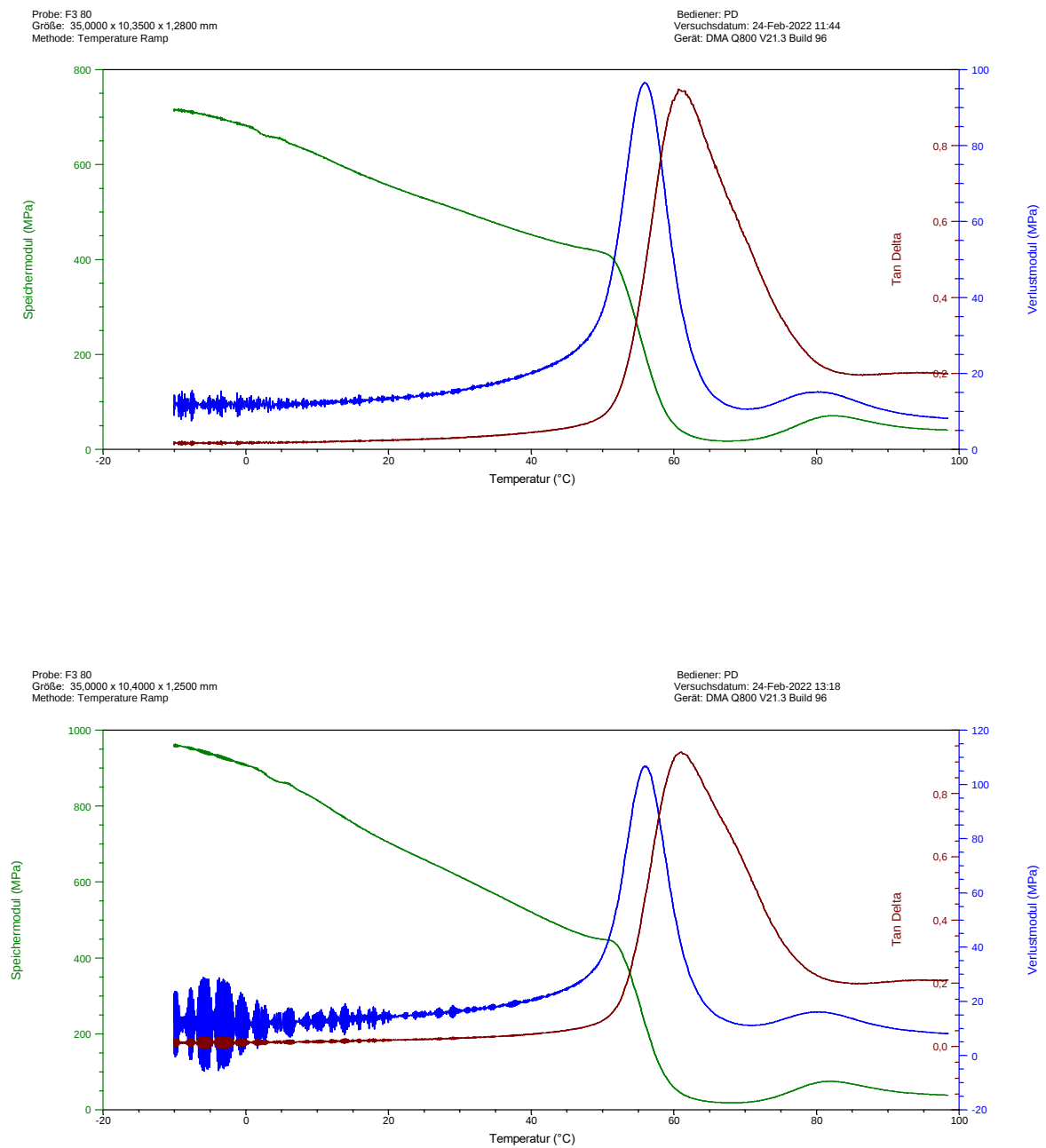
Anhang I.1.1: F2_90

Abbildung 84: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F2_90

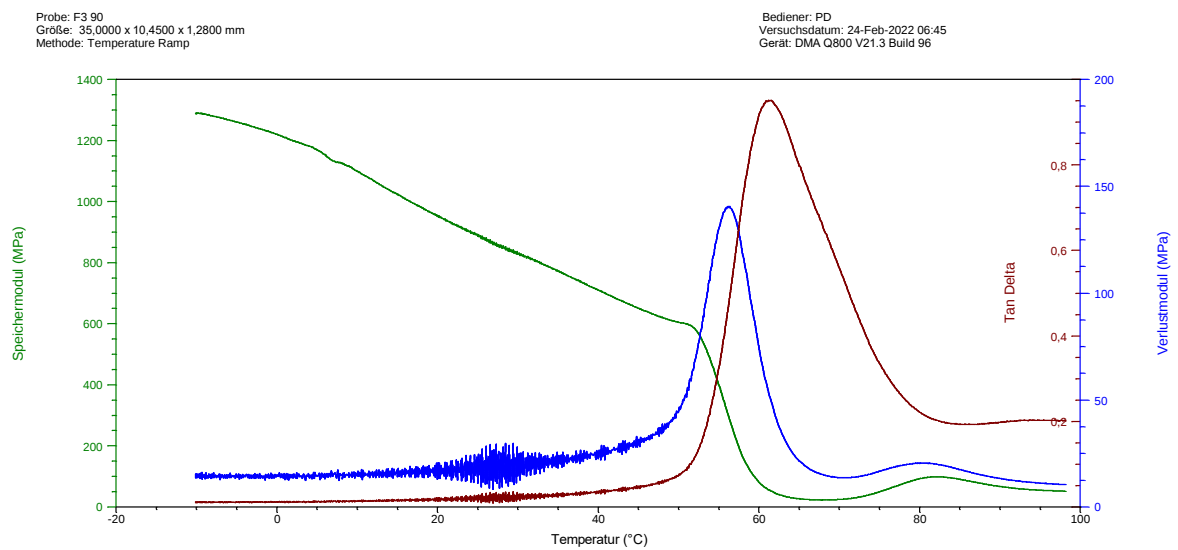
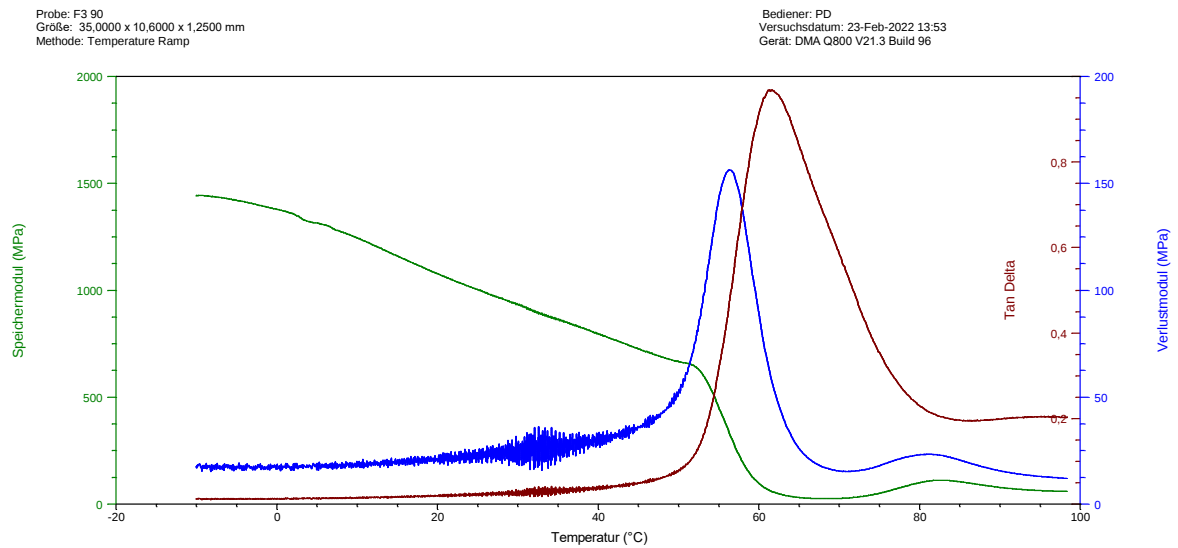
Anhang I.1.1: F2_100

Abbildung 85: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F2_100

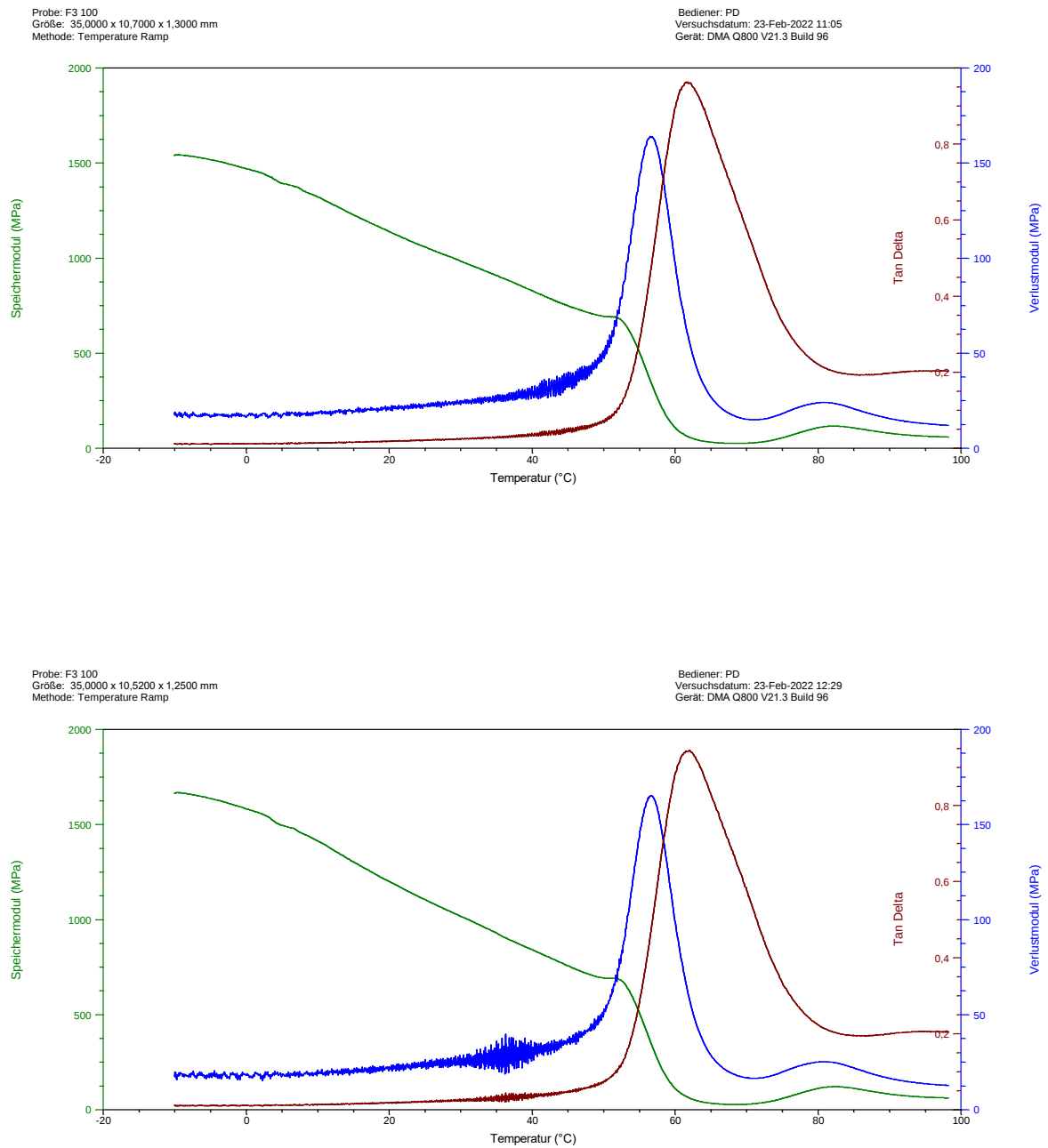
Anhang I.1.1: F3_80

Abbildung 86: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F3_80

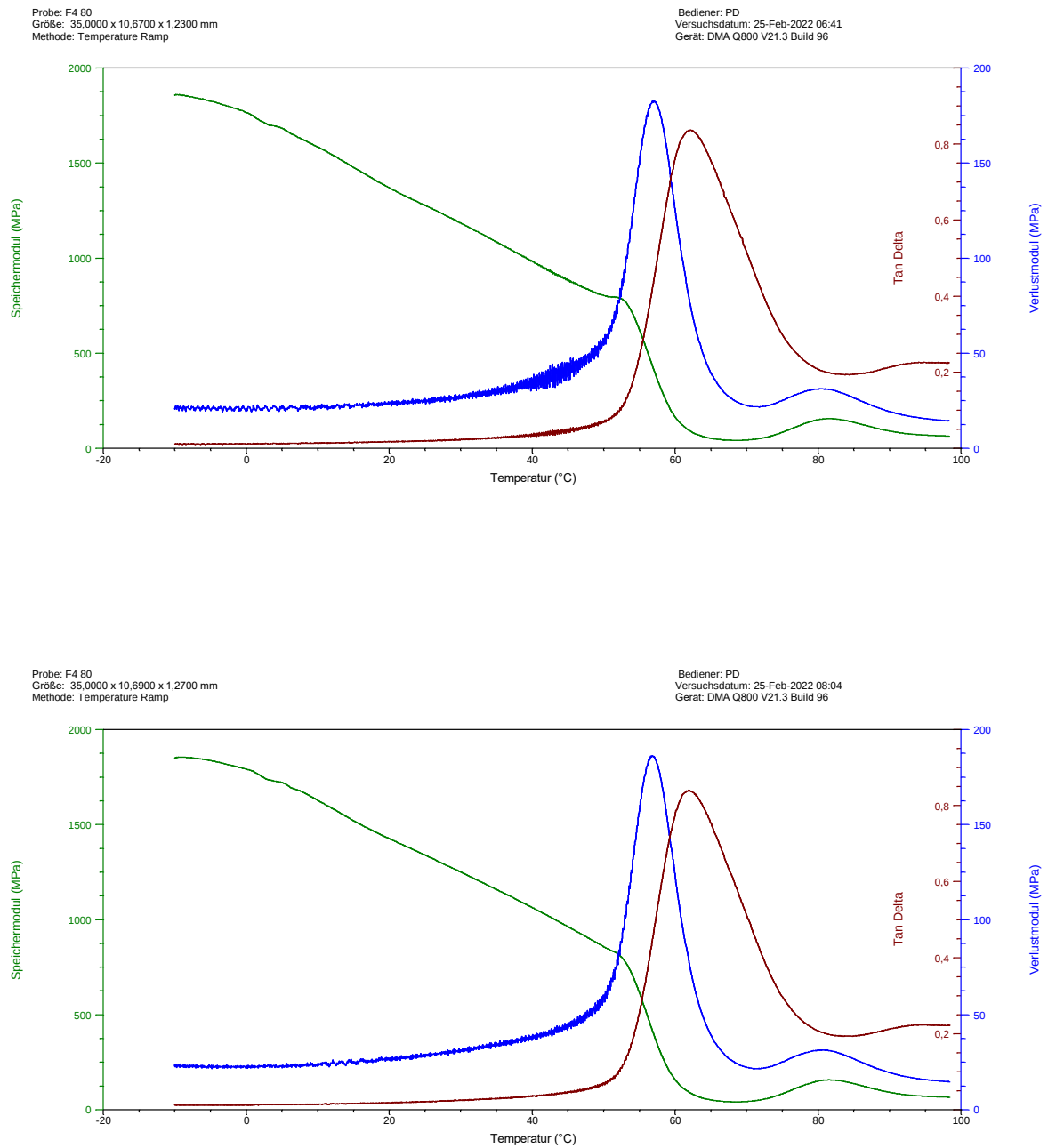
Anhang I.1.1: F3_90

Abbildung 87 Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F3_90

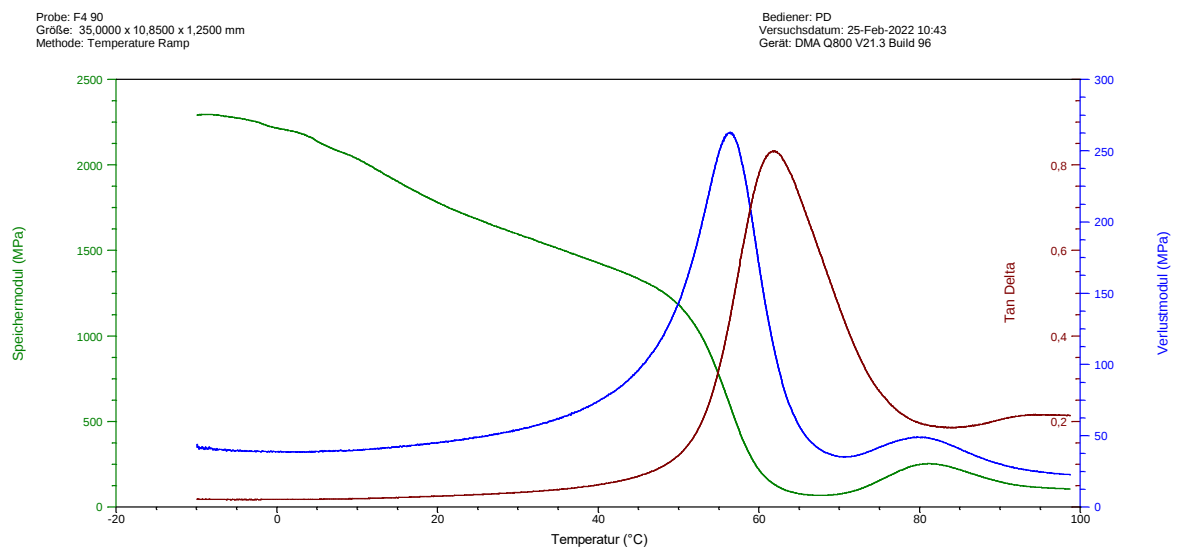
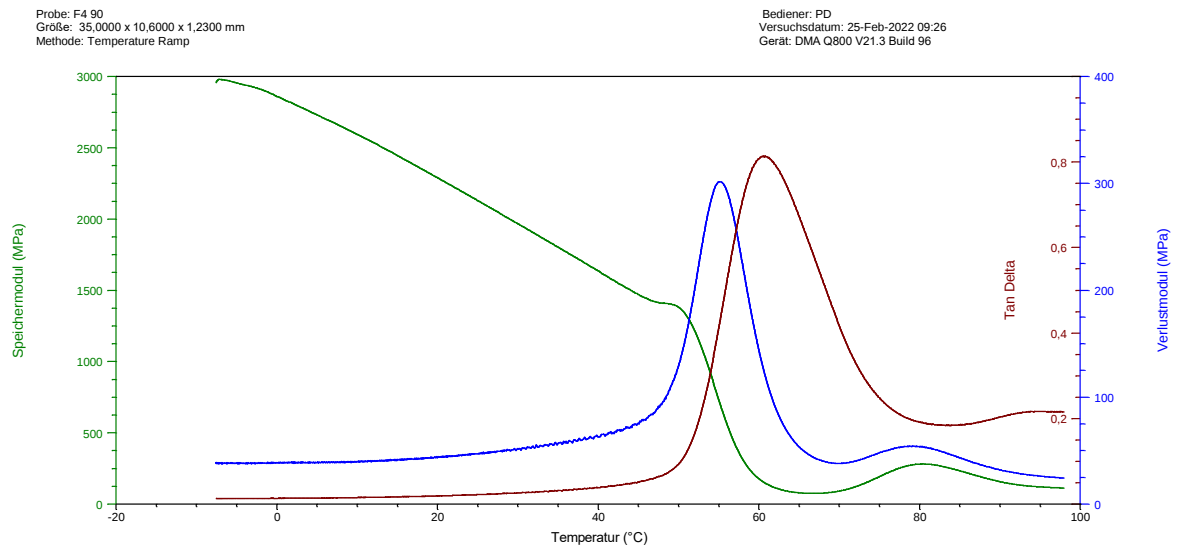
Anhang I.1.1: F3_100

Abbildung 88: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F3_100

Anhang I.1.1: F4_80

Abbildung 89: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F4_80

Anhang I.1.1: F4_90

Abbildung 90: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F4_90_1 und F4_90_2

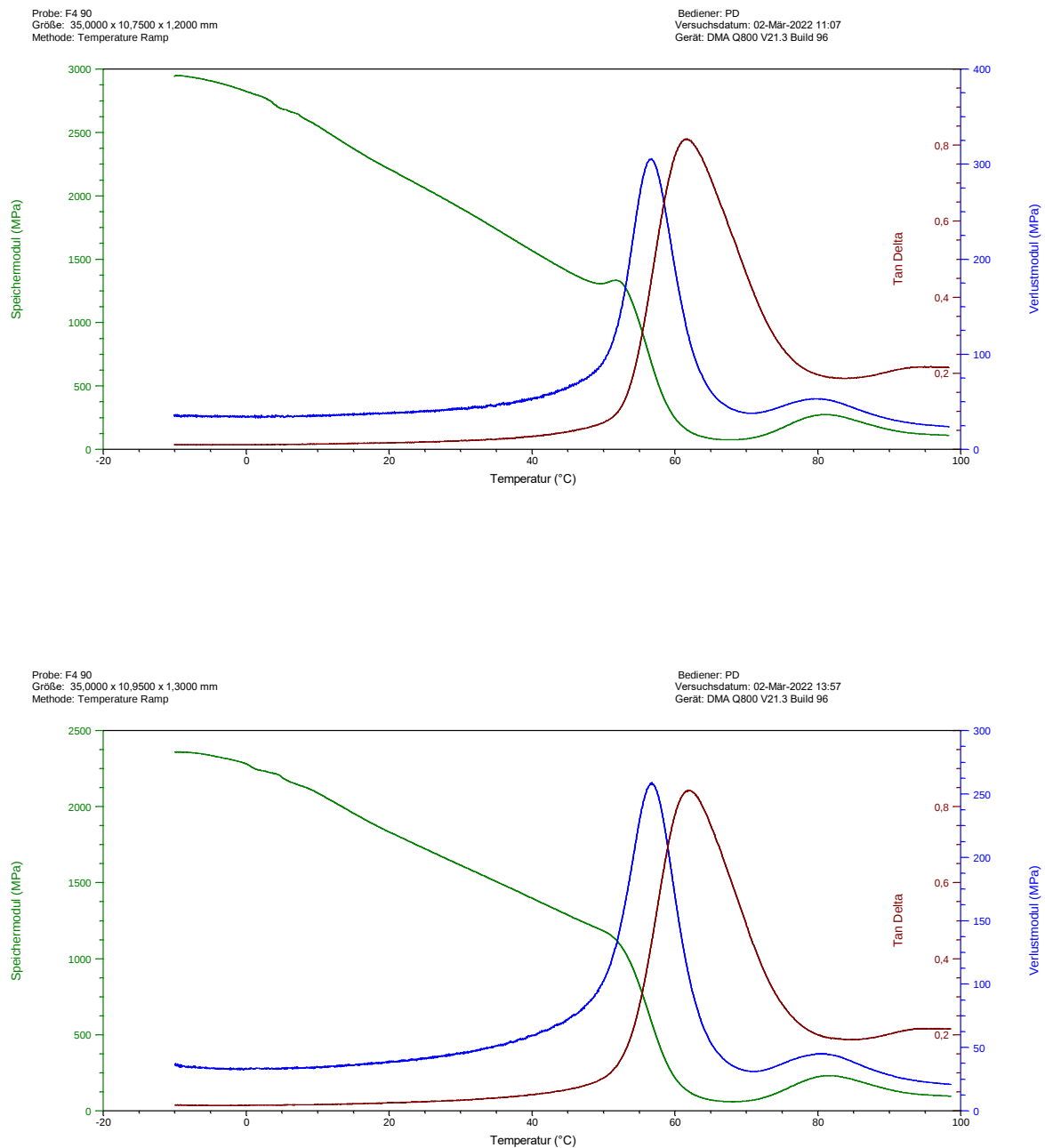


Abbildung 91: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F4_90_3 und F4_90_4

Anhang I.1.1: F4_100

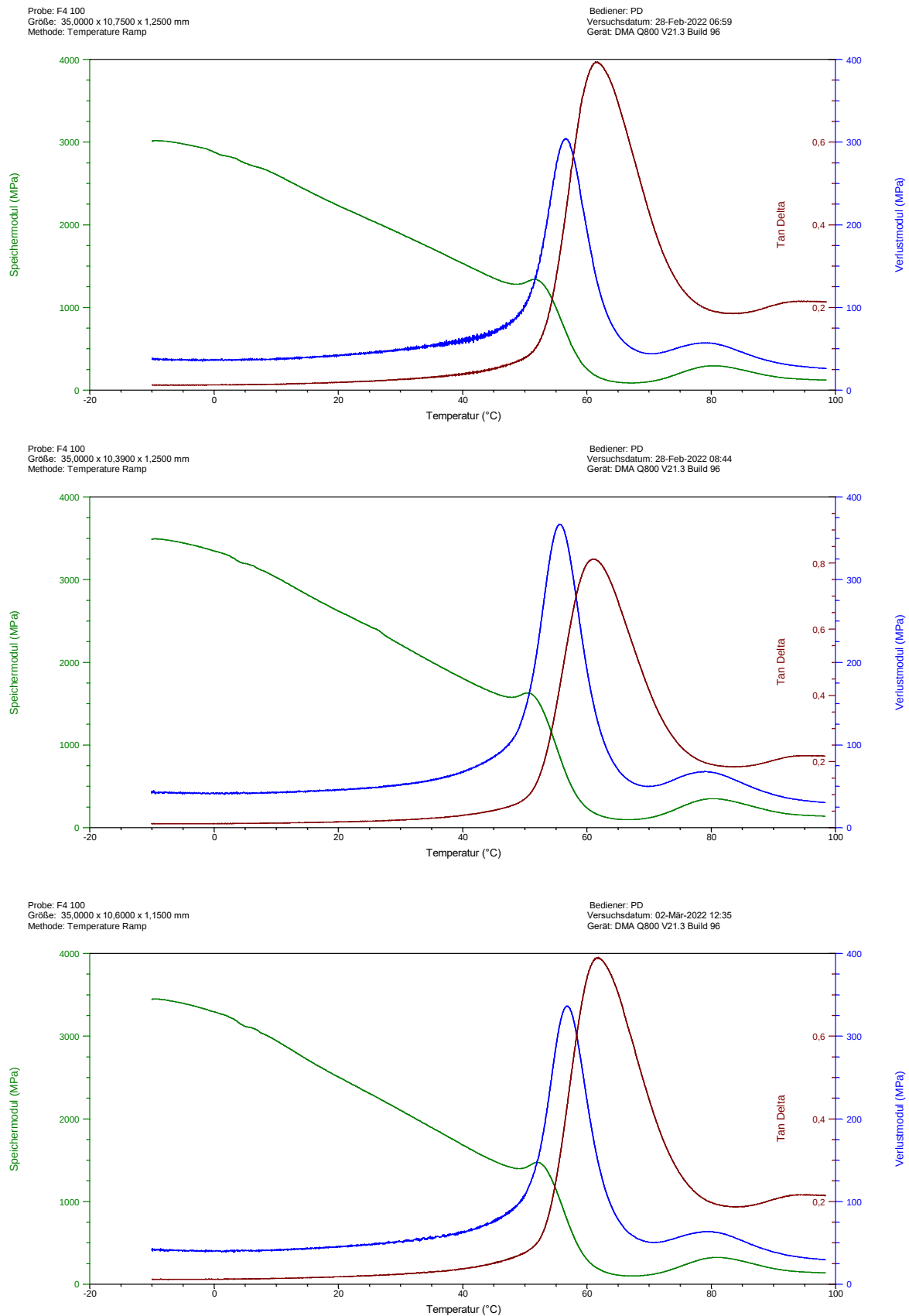


Abbildung 92: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F4_100

Anhang I.1.1: F5_80

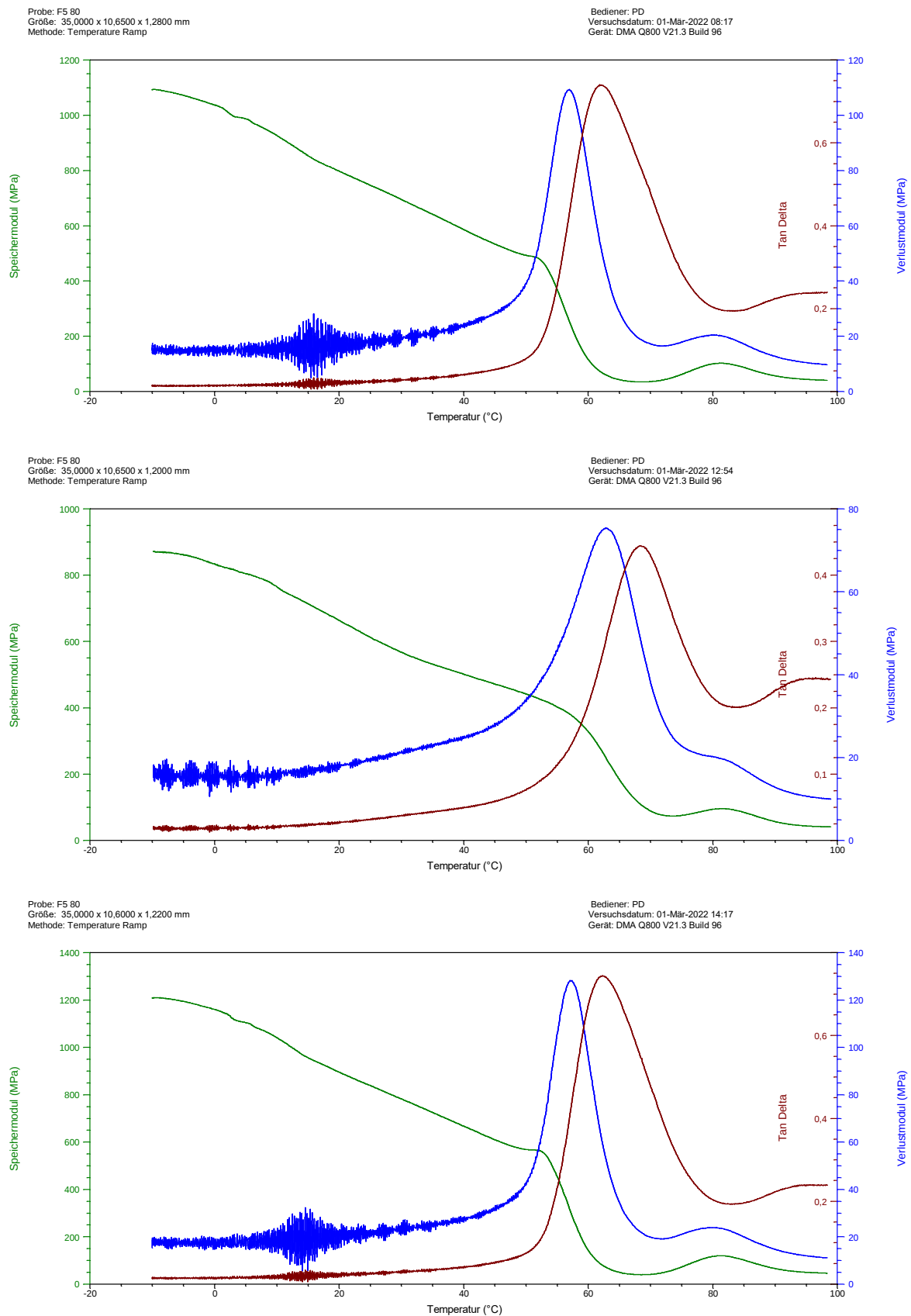
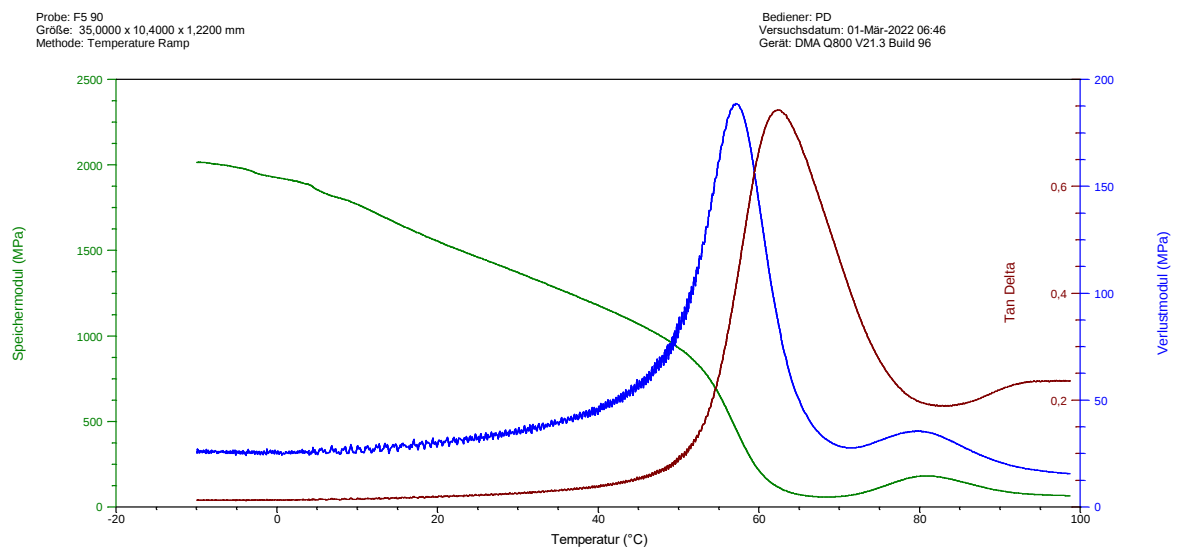
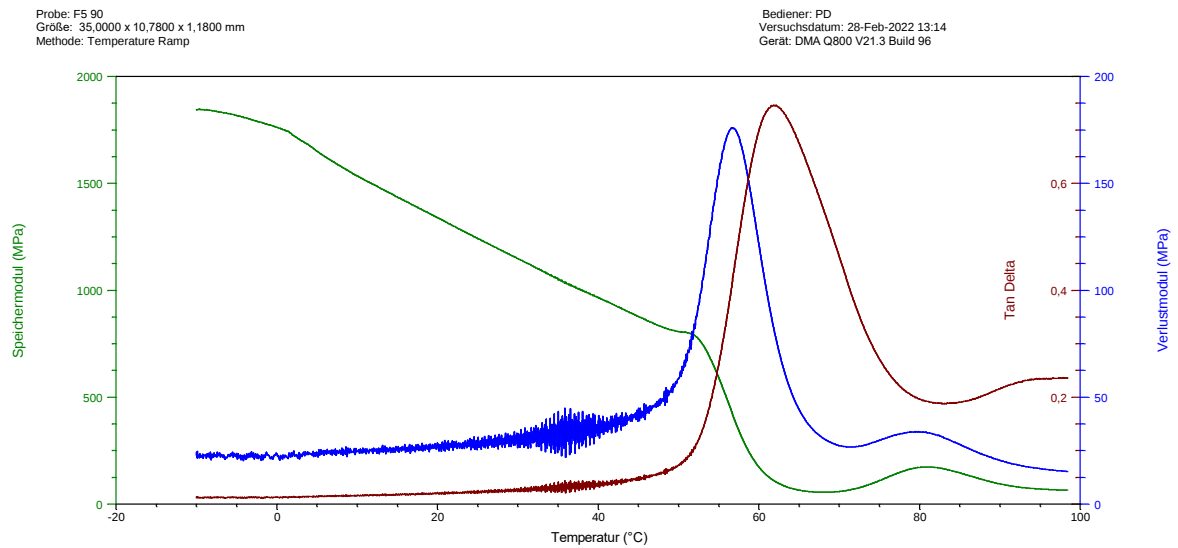


Abbildung 93: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F5_80

Anhang I.1.1: F5_90

Abbildung 94: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F5_90_1 und F5_90_2

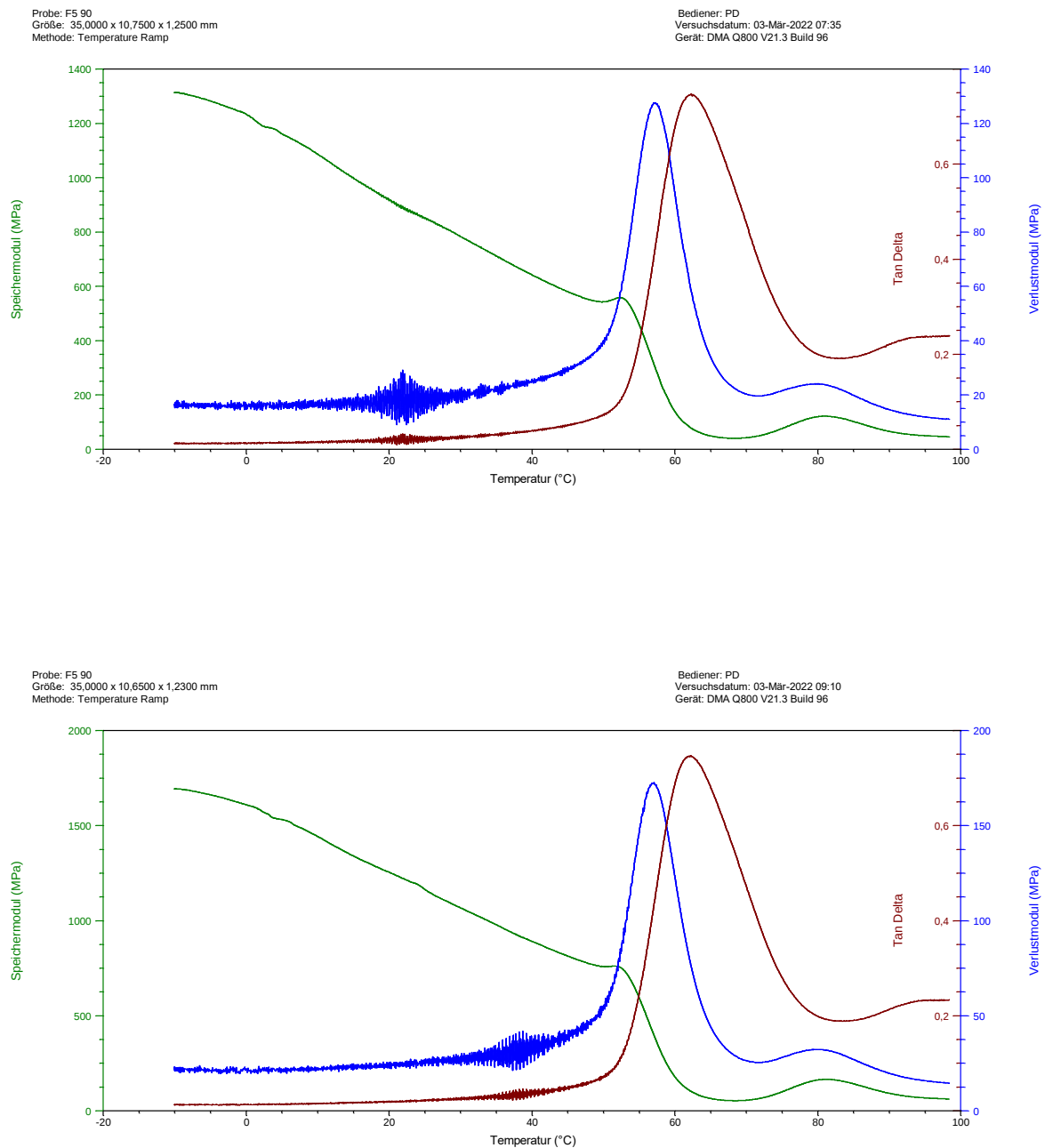
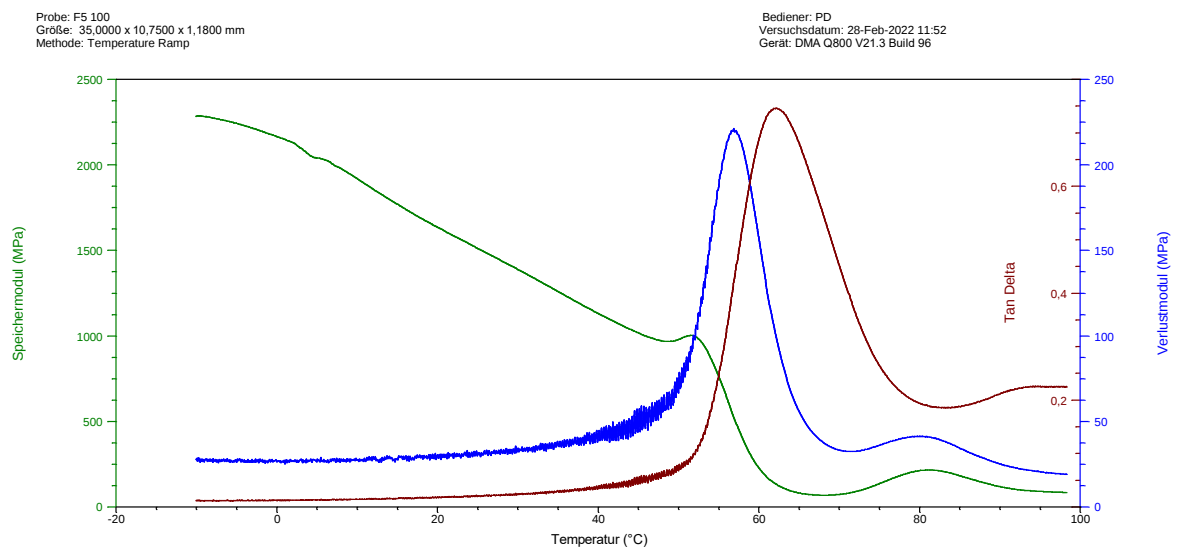
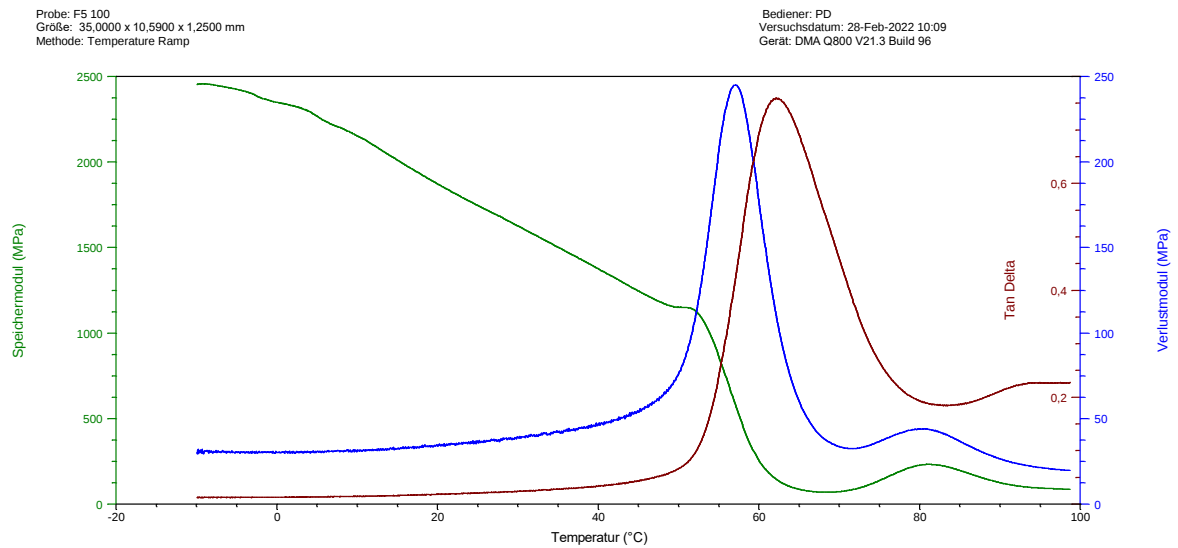


Abbildung 95: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F5_90_3 und F5_90_4

Anhang I.1.1: F5_100

Abbildung 96: Verlauf von E' , E'' und $\tan \delta$ der Proben F5_100

Anhang I.2: Mittlerer Speichermodul und mittlerer Verlustfaktor

Tabelle 24: Mittlerer Speichermodul und mittlerer Verlustfaktor der Materialien

0 °C				
Probe	Speichermodul		Verlustfaktor	
	Mittelwert [MPa]	Standardabweichung [MPa]	Mittelwert [MPa]	Standardabweichung [MPa]
F1_80	1548,653	142,6870774	0,00977999	0,000162206
F1_90	1784,69933	153,3014746	0,01090048	0,000340003
F1_100	2449,09033	177,976286	0,01147047	0,002044457
F2_80	783,8004	4,336968732	0,01212264	0,002683902
F2_90	1144,7915	46,73339428	0,01009147	0,000593154
F2_100	3008,6395	67,88861495	0,01099903	3,78939E-05
F3_80	796,482	160,2875308	0,01094753	0,00827026
F3_90	1298,7535	112,9921281	0,01179487	0,000170144
F3_100	1526,5065	78,98029192	0,01192708	0,000199362
F4_80	1778,708	17,99162494	0,01229854	0,000846096
F4_90	2544,71075	344,4907647	0,01441761	0,002233785
F4_100	3171,76933	258,0716339	0,01245548	0,000465253
F5_80	1010,19333	164,7971324	0,0150999	0,0008483
F5_90	1632,2095	296,731289	0,01300542	0,00081156
F5_100	2256,4015	130,2526046	0,01267292	0,000236711
21 °C				
F1_80	1125,0795	83,4619347	0,01720622	0,000963723
F1_90	1341,16567	153,5352965	0,01836649	0,001541932
F1_100	1694,911	118,7401353	0,01895523	0,002527331
F2_80	557,0515	17,04339475	0,01935252	0,000797206
F2_90	809,7779	46,19076053	0,01532807	0,000496764
F2_100	2219,0065	3,714431922	0,01750625	0,000706548
F3_80	622,21845	101,7774853	0,02206052	0,002395218
F3_90	1000,5759	86,3166662	0,02083381	0,001597828
F3_100	1150,9645	40,01587985	0,01888232	0,000926246
F4_80	1378,4175	42,89946131	0,01753951	0,001207456
F4_90	2000,657	252,7033679	0,02122456	0,003621191
F4_100	2413,06933	198,4307039	0,01873853	0,000937628
F5_80	773,992933	116,33729	0,02348213	0,003777066
F5_90	1246,08833	264,3527068	0,01815374	0,00539864
F5_100	1726,948	167,8600788	0,01888215	0,000358567
42 °C				
F1_80	680,3143	26,78138649	0,04493534	0,003014736
F1_90	824,9972	132,4058564	0,04861699	0,004181159
F1_100	1091,32983	290,8081958	0,0482486	0,003969584
F2_80	344,64385	33,63798882	0,04394345	0,002973165
F2_90	482,19955	50,59723786	0,04114289	0,003567849
F2_100	1402,447	34,05850522	0,04122478	0,003905881
F3_80	472,9734	41,48906612	0,0455903	0,00377892
F3_90	725,65155	58,52362203	0,04116572	0,003310094

F3_100	800,383	8,231288618	0,037986	0,002697209
F4_80	979,3288	61,44644791	0,03678006	0,004602791
F4_90	1451,11475	97,94638028	0,04680651	0,008504347
F4_100	1594,94867	135,1242689	0,04338522	0,00108374
F5_80	565,3454	77,45768564	0,04746061	0,00441643
F5_90	884,380075	214,3015619	0,04411001	0,000219276
F5_100	1200,948	170,033725	0,04042465	0,004544363