



Lehrstuhl für Struktur- und Funktionskeramik

Masterarbeit

Entwicklung eines Prüfaufbaus für additiv
gefertigte Prüfkörper
Entwicklung, Verifikation und Untersuchung der
Festigkeit als Funktion der AM-Druckrichtung

Jürgen Glettler, BSc

August 2023



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN
www.unileoben.ac.at

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 30.08.2023

Unterschrift Verfasser/in
Jürgen Glettler

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meines Masterstudiums sowie bei Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben.

Zu aller erst gebührt ein großer Dank Dipl.-Ing. Maximilian Staudacher sowie Frau Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Tanja Lube für die Betreuung und Begutachtung meiner Masterarbeit. Für die große Unterstützung und zahlreichen Anregungen möchte ich mich recht herzlich bedanken. Weiters möchte ich mich beim gesamten Team des Lehrstuhls für Struktur- und Funktionskeramik, vor allem bei Univ.-Prof. Dr. Raul Bermejo, für die Möglichkeit und die Betreuung während der Masterarbeit bedanken. Zusätzlich möchte ich meinen Dank an Herrn Ing. Ronald Binder für die zahlreichen praktischen Hilfestellung in der Werkstätte aussprechen.

Ich möchte mich auch noch bei meiner Familie bedanken, vor allem bei meinen Eltern Maria und Franz sowie meinen Bruder Bernd. Erst durch ihre Unterstützung und ihren Rückhalt war es möglich dieses Studium zu absolvieren.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Weggefährten und Kommilitoninnen Manuel, Richard und Christopher für die unvergessliche Studienzeit bedanken. Erst die Zeit abseits des Lernens, während einiger „Festl“ und anderen Erlebnissen, schafften unvergessliche Momente.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei all meinen Freunden, meiner Familie sowie meiner Freundin für den starken emotionalen Rückhalt und positive Ablenkung während meines Studiums bedanken.

Abstract

Additive manufacturing offers the possibility of manufacturing complex structures due to its freedom of design and generative structure. In the field of high-performance ceramics, the LCM process (“Lithography-based Ceramic Manufacturing”), established by Lithoz GmbH, is among the most established manufacturing methods. Its primary field of application is in the medical and aerospace industry. In this work, a testing setup and testing procedure for a novel testing body, consisting of an array of cantilever specimens, is developed and its applicability to the LCM process is shown.

More specifically, the aim of this work was to develop and build a universal testing procedure which takes the special design of this testing body into account. The basic requirements for the testing setup was its implementation with a universal testing machine. Furthermore, each cantilever has to be loaded individually at the intended point of applied load. An additional condition was the parallel and central mounting of the test specimen, with the option to easily change the specimens' position during testing.

The strength of testing bodies was successfully evaluated as a function of their printing-direction. The different directions are realized by three different types of samples, each representing a different incline. The evaluation of the materials strength was carried out based on Weibull-theory.

Additionally, the testing procedure was investigated with respect to geometrical deviations from the ideal geometry and alignment issues during testing. The margin of error for the accuracy of stress determination was analysed and methods for a more precise evaluation were suggested. With the rather time-consuming methods used to determine the individual specimen geometry used in this work, the testing method has a margin of error of approximately 8.5% underestimation of strength. Strength variations between testing bodies manufactured in different printing jobs or with different printing directions could be distinguished.

Keywords: Additive manufacturing, LCM, Strength testing, Weibull-theory

Kurzfassung

Die additive Fertigung bietet aufgrund ihrer Gestaltungsfreiheit und durch den generativen Aufbau die Möglichkeit der Herstellung komplexer Strukturen. Im Bereich der Hochleistungskeramiken zählt das LCM-Verfahren („Lithography-based Ceramic Manufacturing“), entwickelt von Lithoz GmbH, zu den am häufigsten eingesetzten Verfahren. Die Hauptanwendungen liegen in der Medizin- und Luftfahrtindustrie. In dieser Arbeit wird ein Testaufbau und Testverfahren für einen neuartigen Prüfkörper, aufgebaut aus einer Vielzahl von Biegebalken, entwickelt und die Anwendbarkeit am Beispiel des LCM-Verfahrens gezeigt.

Das Ziel dieser Arbeit war, ein universelles Prüfverfahren zu entwickeln und aufzubauen, mit Berücksichtigung des speziellen Designs des Prüfkörpers. Grundvoraussetzung für den Prüfaufbau war die Umsetzung der Testmethode mit einer Universalprüfmaschine. Weiters muss jeder Biegebalken einzeln am konstruierten Kraftangriffspunkt belastet werden. Eine zusätzliche Bedingung war die parallele und zentrale Montage des Prüfkörpers, mit der Möglichkeit, die Position des Prüfkörpers während der Prüfung zu verändern.

Die Festigkeit der Biegebalken wurden erfolgreich in Abhängigkeit der Druckrichtung ausgewertet. Die Druckrichtungen werden durch drei verschiedene Arten von Prüfkörpern realisiert, die jeweils eine andere Orientierung darstellen. Die statistische Auswertung der Festigkeiten erfolgte nach der Weibull-Theorie.

Zusätzlich wurde das Prüfverfahren hinsichtlich geometrischer Abweichungen der tatsächlich gedruckten Prüfkörper von der Idealgeometrie und Ausrichtungsproblemen während des Testens untersucht. Der Gesamtfehler der Spannungsauswertung wurde analysiert und Maßnahmen zur genaueren Bewertung werden vorgeschlagen. Die in dieser Arbeit verwendeten Methoden zur Fehlerbestimmung der individuellen Probengeometrie erwiesen sich als zeitaufwendig. Der Gesamtfehler mit diesem Prüfverfahren stellt eine Unterschätzung der Festigkeit dar und liegt bei ca. 8,5%. Unterschiede in der Festigkeitsauswertung unter den verschiedenen Druckrichtungen konnten bestimmt werden.

Schlagwörter: Additive Fertigung, LCM, Festigkeitsbestimmung, Weibull-Theorie

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Problemstellung	1
2.	Theoretische Grundlagen	2
2.1.	Additive Fertigung von Keramiken und das LCM-Verfahren (Lithography-based Ceramic Manufacturing)	2
2.2.	Festigkeitsverhalten von Keramiken	8
2.2.1.	Defektkontrolliertes Versagen	9
2.2.2.	Bruchstatistik und Weibull-Verteilung	10
2.3.	Prüfmethoden für die Festigkeit von Keramiken	15
2.3.1.	Einachsige Biegeversuche	15
2.3.2.	Zweiachsige Biegeversuche: Kugel auf 3 Kugel (B3B)-Versuch	16
2.3.3.	AM-spezifischer Prüfkörper	17
3.	Herstellung der Prüfkörper	23
3.1.	Verwendetes Probenmaterial	23
3.2.	Druckvorgang (CeraFab 7500)	24
3.3.	Post-Processing der Prüfkörper	26
3.3.1.	Pre-Conditioning und Entbinderungsprozess	26
3.3.2.	Vorsintern und Sintervorgang	27
4.	Prüfaufbau und Messung der Festigkeit	31
4.1.	Entwicklung und Anforderungen an den Prüfaufbau	31
4.2.	Prüfaufbau und Prüfablauf	33
4.2.1.	Prüfmaschine	33
4.2.2.	Prüfablauf	34
4.2.3.	Spannungsberechnung	36
4.3.	Vermessung der Biegebalken	38
4.3.1.	Vermessung der Bruchlänge l_B	38
4.3.2.	Vermessung von Winkel α (Steigung k)	39
4.3.3.	Vermessung der Bruchflächen	39
5.	Ergebnisse	42
5.1.	Abmessungen der Proben	42
5.2.	Weibull-Auswertung	45
5.3.	Weibull-Parameter in Abhängigkeit des Post-Processings	55
6.	Diskussion	57
6.1.	Weibull-Parameter in Abhängigkeit von Druckjob und Orientierung	57
6.2.	Bedeutung der Prüfkörpergeometrie	59
6.3.	Bedeutung der Probengeometrie	61

6.3.1.	Streuung der Probenabmessungen	61
6.3.2.	Fehler in der Spannungsberechnung	63
6.3.3.	Ungenauigkeit des Kraftangriffspunktes	64
6.3.4.	Nicht-rechteckiger Probenquerschnitt.....	69
6.4.	Zusammenfassende Bewertung möglicher Fehler	70
7.	Zusammenfassung und Ausblick	71
8.	Literaturverzeichnis	73
Anhang A: Spannungsberechnung für Proben mit konstantem Querschnitt		76
Anhang B: Drucken mit CeraFab 7500		79
B1.	Parameter-Sheets	79
B2.	Druckablauf.....	79
B3.	Druckergebnisse	84
Anhang C: Post-Processing (Pre-Conditioning, Entbinderungsprozess, Vorsintern und Sintern)		86
C1.	Durchführung der Post-Processing-Schritte	86
C2.	Ergebnisse des Post-Processings	92
Anhang D: Ergebnisse.....		96
D1.	Auswertung der Gültigkeit der Biegebalken.....	96
D2.	Weibull-Auswertungen	101
D3.	Zusammenhang h_{max} mit l_B	104
Anhang E: Ermittlung des Flächenträgheitsmomentes		109
E1.	Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes mit CATIA V5R19.....	109

Verwendete Symbole und Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CharAM	FFG Projekt "Charakterisierung der realen mechanischen Eigenschaften von keramischen AM-Bauteilen"
ISFK	Lehrstuhl für Struktur- und Funktionskeramik
LCM	Lithography-based Ceramic Manufacturing
AF	Additive Fertigung
AM	Additive Manufacturing
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
3D	3-dimensional
MJT	Material Jetting
MEX	Material Extrusion
DED	Direct Energy Deposition
SHL	Sheet Lamination
BJT	Binder Jetting
PBF	Powder Bed Fusion
VPP	Vat-Photopolymerization
SLA	Stereolithography
CAD	Computer Aided Design
LED	Light Emitting Diode
DMD	Digital Micro-mirror Device
LEBM	Linear-elastische Bruchmechanik
B3B	Kugel auf 3-Kugel Versuch (Ball-on-Three-Balls)
SARL	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
.stl	Standard Triangle Language (File extension)
KAP	Kraftangriffspunkt
DLP	Digital Light Processing
P	Prüfkörper
D	Druck(-job)
IKTS	Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme
CATIA	Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application
FTM	Flächenträgheitsmoment
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
UHC	Wannentyp
HV	Härtevermittler

Symbol	Einheit	Bedeutung
R_a	[μm]	Mittenrauwert
B	[m]	Weite einer prismatischen Probe
W	[m]	Dicke einer prismatischen Probe
a	[m]	Risslänge
a_c	[m]	Kritische Risslänge
K_I	[$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	Spannungsintensitätsfaktor
K_{Ic}	[$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	kritischer Spannungsintensitätsfaktor
Y	[-]	Geometriefaktor
$P(\sigma)$	[-]	Wahrscheinlichkeitsverteilung
$P_f(\sigma)$	[-]	Versagenswahrscheinlichkeit
$P_S(\sigma)$	[-]	Probenwahrscheinlichkeit
m	[-]	Weibull-Modul
$V(V_0, V_1, V_2)$	[m^3]	Volumen
s_1, s_2	[m]	Auflagerabstände (4-Punkt-Biegung)
F	[N]	Kraft
F_H	[N]	Kraft bis zum Bruch der Biegebalken
l_B	[m]	gemessene Bruchlänge
M	[m^4]	Hauptträgheitsmoment
W	[m^3]	Widerstandsmoment
I	[m^4]	Flächenträgheitsmoment
r	[m]	Randfaserabstand
W_b	[m^3]	Widerstandsmoment (Biegung)
h_{max}	[m]	Maximale Querschnittshöhe der gebrochenen Biegebalken
$b(x)$	[m]	Biegebalkenbreiten (abhängig von der Ortsvariable x)
x	[-]	Ortsvariable
b_1	[m]	Kleinere Breite für die Bestimmung der Steigung (Messschieber)
b_2	[m]	Größere Breite für die Bestimmung der Steigung (Messschieber)
L	[m]	Abstand der zwei Messpunkte von b_1 und b_2
k	-	Steigung
t_1	[m]	Höhe ab dem die Abrundung an den Querschnittsecken beginnt
t_2	[m]	$t_2 = h_{max}$
b	[m]	Maximale Querschnittsbreite der gebrochenen Biegebalken
a_P	[m]	Abstand vom idealen KAP zum tatsächlichen KAP)
N	[-]	Anzahl der Stichproben
i	[-]	Nummerierung für Weibull-Auswertung
C_u	[-]	obere Grenze des Konfidenzintervalls für σ_0
C_l	[-]	untere Grenze des Konfidenzintervalls für σ_0
t_u, t_l	[-]	Koeffizienten für das Konfidenzintervall für σ_0
G_u	[-]	obere Grenze des Konfidenzintervalls für m
G_l	[-]	untere Grenze des Konfidenzintervalls für m
l_u, l_l	[-]	Koeffizienten für das Konfidenzintervall für m

Inhaltsverzeichnis & Abkürzungsverzeichnis

s	[mm]	Prüfweg
v	$\left[\frac{mm}{min}\right]$	Prüfgeschwindigkeit
σ	[MPa]	Spannung
τ	[MPa]	Scherspannung
α	[°]	Öffnungswinkel
β	[-]	Vertrauensniveau für das Konfidenzintervall
μ	[-]	Poissonzahl
σ_{max}	[MPa]	Maximale auftretende Spannung (B3B)
σ_f	[MPa]	Kritische Spannung (LEBM)
σ_b	[MPa]	Biegespannung
σ_0	[MPa]	charakteristische Festigkeit
$\Delta\sigma$	[MPa]	Fehlerabschätzung Spannung
ΔF	[N]	Fehlerabschätzung Kraft
Δk	[-]	Fehlerabschätzung Steigung
Δh_{max}	[mm]	Fehlerabschätzung max. Querschnittshöhe

1. Einleitung und Problemstellung

Der Beginn des Zeitalters der 3D-Herstellungsverfahren liegt in den späten 1980er Jahren [1]. Eingeführt als „Rapid Prototyping“, konnten bereits damals Kosten und Zeit eingespart werden, um einzelne Bauteile und Kleinserien herzustellen. Ziel heutiger Forschungsaktivitäten ist es, einerseits komplexe Bauteile herzustellen und andererseits eine Kostenersparnis durch Optimierung der Herstellungsverfahren zu erreichen [1]. Charakteristisch für 3D-Herstellungsverfahren ist das Herstellen von geometrisch komplexen Bauteilen durch ein diskontinuierliches generatives Verfahren [1]. Der Aufbau des Bauteils erfolgt durch den Schicht-für-Schicht Auftrag des Baumaterials auf einer Bauplattform [1].

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem additiven Fertigungsverfahren „Lithography-based Ceramics Manufacturing“ (LCM). Das LCM-Verfahren ist ein indirektes additives Fertigungsverfahren für Keramiken und zählt zur Gruppe der Vat-Photopolymerisation (VPP). Allgemein wird unter VPP die selektive Aushärtung eines flüssigen Photopolymers in einer Wanne bezeichnet [2]. Mit dem LCM-Verfahren, das von der Firma Lithoz GmbH (Mollardgasse 85A, 1060 Wien, Österreich) entwickelt wurde, ist es möglich geometrisch komplexe keramische Bauteile mit einer hohen örtlichen Auflösung herzustellen, indem ein geeignetes Keramikpulver mit dem Photopolymer gemischt wird. Einsatz finden diese Bauteile beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt, sowie in der Medizin- und Dentaltechnik [3].

Aufgrund der speziellen Eigenschaften des LCM-Verfahrens ist die Probenherstellung für reguläre ein- und zweiachsige Festigkeitsproben zeit- und materialintensiv. Um diese Probleme zu umgehen, wurde im Rahmen eines FFG-Projekts („CharAM“, Nr. 877684 des COIN/IraSME Programms) ein neuartiger Prüfkörper entwickelt, auf dem mehrere (48) einzelne Proben gedruckt sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Prüfkörper im LCM-Verfahren herzustellen, einen Prüf-ablauf zu entwickeln und diesen durchzuführen. In weiterer Folge wird die Festigkeit der getesteten Proben statistisch auf Basis der Weibull-Theorie ausgewertet. Weiters wird eine Analyse des Versuches im Hinblick auf Messfehler unter Berücksichtigung der tatsächlichen Probengeometrie sowie die Untersuchung der Druckrichtungsabhängigkeit der Festigkeit durchgeführt.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Additive Fertigung von Keramiken und das LCM-Verfahren (Lithography-based Ceramic Manufacturing)

Hochleistungskeramiken werden heutzutage in der Automobil-, Luftfahrt-, Militär- und Medizinindustrie aufgrund ihrer außerordentlichen Eigenschaften eingesetzt. Diese sind unter anderem eine hohe Korrosionsbeständigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit, hohe Härte und Verschleißbeständigkeit [4]. Aufgrund der Eigenschaften von Hochleistungskeramiken hat die additive Fertigung (AF) den Vorteil der Herstellung von sogenannten „near-net-shaped“-Bauteilen. Durch diese endformnahe Herstellung besteht die Möglichkeit, sich die teilweise teuren Nachbearbeitungen zu ersparen oder zu minimieren. Weiters können durch diese Verfahren effizient Prototypen und Kleinserien hergestellt werden [5]. Der Begriff additive Fertigung ist in der Norm ISO/ASTM 17296 zusammengefasst und beschreibt „den Prozess des Zusammenfügens von Materialien zur Herstellung von Objekten aus dreidimensionalen (3D) Modelldaten, normalerweise Schicht für Schicht, also als generatives Fertigungsverfahren.“ [2]-[6]. Ausgangspunkt für die Generierung dieser Schichten ist ein CAD-Modell. Das Erzeugen der Daten für jede einzelne Schicht auf Grundlage dieses Modells wird mit der Methode des „Slicings“ durchgeführt [1]. Die AF erzeugt demnach die gewünschte Form des Bauteils durch Materialzugabe in Form von übereinander gestaffelten Konturschichten [1]. Daraus ergibt sich die Möglichkeit komplexe Bauteile mit hoher Designfreiheit herzustellen [5]. Eine Auswahl an generativen Fertigungsverfahren, die sich für die Herstellung von keramischen Bauteilen eignen, sind Material jetting (MJT), Material extrusion (MEX), Direct energy deposition (DED), Sheet lamination (SHL), Binder jetting (BJT), Powder bed fusion (PBF) und VAT Photopolymerization (VPP)/Stereolithography (SLA) [2]-[7]. In Tabelle 1 sind die verschiedenen AF-Methoden nach ISO/ASTM 17296 aufgelistet.

Tabelle 1: Klassifizierung der AF-Methoden für Keramiken nach ISO/ASTM 17296 [2]

Single-Step		Multi-Step				
Gerichtete Energiedeposition (DED)	Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen (PBF)	Vat-Photopolymerisation (VPP)	Freistrahldrucken (MJ)	Materialextrusion (MEX)	Schichtlaminierung (SHL)	Freistrahlschichtauftrag (BJ)

Laut dieser Norm gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Kategorien, in die AF-Methoden eingeteilt werden können. „Single-Step“-Methoden werden auch direkte Verfahren genannt, wohingegen „Multi-Step“-Methoden indirekte Prozesse bezeichnet. Indirekt bedeutet in diesem Fall, dass nach dem Druckvorgang weitere Schritte für die Fertigstellung des Bauteils notwendig sind, wie z.B. Wärmebehandlungen in Form von Entbinderungsprozessen oder Sintern. Das bedeutet, dass der 3D-Druck selbst der formgebende Schritt ist und die weiteren Schritte, hier als Post-Processing bezeichnet, die Materialeigenschaften einstellen. Die meisten AF-Methoden bei Keramiken sind indirekte Verfahren. Für die Formgebung werden bei keramischen Bauteilen organische Binder verwendet, die im Entbinderungsprozess nach dem Drucken entfernt werden müssen [2]. Dies ist der kritischste Schritt des Post-Processings, da die verdampften Binder einen Druck im Inneren des Bauteils erzeugen und dieser zu Rissen oder zur Zerstörung des Bauteils führen kann [8]. Zusätzlich weisen die Bestandteile der Binder oft unterschiedliche Verdampfungs- oder Zersetzungstemperaturen auf, wodurch sich unterschiedliche Dampfdrücke je nach Temperatur ergeben [9]. Daraus resultieren Gewichts- und Dimensionsreduktionen [9]. Die wichtigsten Einflussparameter in diesem Arbeitsschritt sind die Partikelgröße sowie die Größenverteilung des Pulvers. Wichtig ist es, einen optimierten Entbinderungszyklus für jede Geometrie zu verwenden, um eine rissfreie Oberfläche sicherzustellen [9]. Nach der Entbinderung und der Erzeugung des Weißkörpers folgt der finale thermische Arbeitsschritt, das Sintern. Durch das Sintern kommt es zu einer Steigerung der Festigkeit des Weißkörpers durch Verdichtung des zuvor entbinderten Bauteils [10]. Für das Sintern gibt es verschiedene Definitionen, wie jene von „Oel & Tomandl“, „Hausner“ oder „Schatt“ [10]. Alle Definitionen eint die Partikelpackung als Ausgangsform, die für den Stoffaustausch erforderliche thermische Behandlung, und die auftretende Schrumpfung, die aus dem Auffüllen der Porenräume resultiert [10]. Die treibende Kraft des Sinterns ist die Verringerung der freien Enthalpie, in dem die Oberflächenenergie des Pulvers verringert wird. Dadurch verdichtet sich das Bauteil und die Porosität wird reduziert. Die beim Sintern auftretende Veränderung der Dimension des Bauteils wird Schwindung genannt [10]. Der dazu notwendige Materialtransport wird durch Diffusions- und Umlagerungsprozesse ermöglicht, siehe Abbildung 1. Der Materialtransport kann zusätzlich durch Anwendung von Druck und Spannungen beschleunigt werden. Grundsätzlich wird zwischen Fest- und Flüssigphasensintern unterschieden. Unter Flüssigphasensintern versteht man die Verdichtung des Pulvers durch auftretende Kapillarkräfte in der Schmelze. Im Gegensatz dazu wird beim Festphasensintern auch beim Erreichen der maximalen Sintertemperatur nie der schmelzflüssige Zustand erreicht [10].

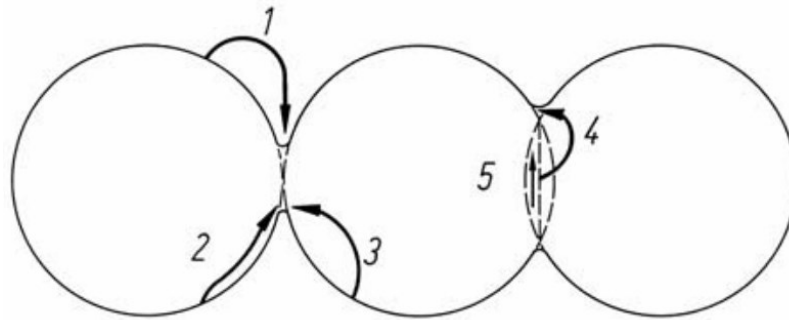


Abbildung 1: Transportwege beim Sintern [10]

- 1) Verdampfung-Kondensation
- 2) Oberflächendiffusion
- 3) Volumendiffusion, von der Oberfläche ausgehend
- 4) Volumendiffusion, von den Korngrenzen ausgehend
- 5) Grenzflächendiffusion entlang der Korngrenze

In Abbildung 2 sind zusammenfassend die Schritte der Nachbehandlung (Post-Processing) des Grünkörpers dargestellt. Gezeigt sind die Schritte vom gedruckten Grünkörper über die Trocknung, dem Entbinderungsprozess und dem Sintern zum fertigen, dichten Keramikbauteil [11].

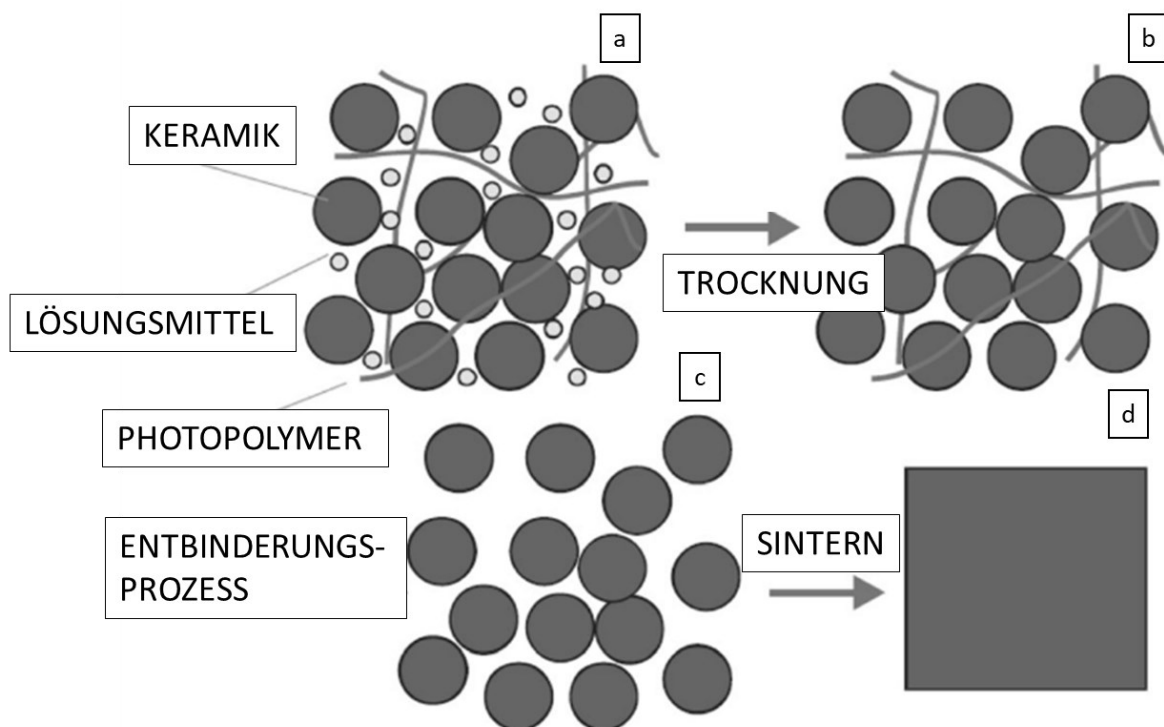


Abbildung 2: Zusammenfassung der Nachbehandlung des Grünkörpers bis zum fertig gesinterten Bauteil. In **a**) ist das gedruckte Bauteil gezeigt (durch die Linien wird der Binder dargestellt, mit den grauen Kreisen wird das Lösungsmittel dargestellt), in **b**) wird der getrocknete Grünling dargestellt, gefolgt von **c**) indem das entbinderte Bauteil zu sehen ist. Zuletzt **d**) indem das finale gesinterte Bauteil dargestellt wird. [11]

Laut Tabelle 1 kann das LCM-Verfahren als indirektes Verfahren und weiters in die Gruppe der Vat-Photopolymerisation eingeordnet werden. Allgemein wird unter Vat-Photopolymerisation die selektive Aushärtung eines flüssigen Photopolymers in einer Wanne bezeichnet [2]. Im Falle der Vat-Photopolymerisation bei Keramiken beinhaltet das Photopolymer zusätzlich keramische Pulver [12]. Für Keramiken wurde dieses Verfahren vom Unternehmen Lithoz GmbH (Mollardgasse 85A, 1060 Wien, Österreich), folgend als Lithoz bezeichnet, entwickelt. In Abbildung 3 ist das von Lithoz entwickelte Gerät „CeraFab 7500“ zum Druck von präzisen Keramikbauteilen abgebildet. Der LCM-Prozess bietet die Möglichkeit dichte keramische Bauteile mit ähnlichen Eigenschaften wie bei herkömmlicher Herstellung zu produzieren. Es können dadurch komplexe Designs verwirklicht werden, die mit konventionellen Verfahren nicht herstellbar wären. Da Nachbearbeitungsschritte eingespart werden können, ermöglicht dieser Prozess sowohl Zeit- als auch Kosteneinsparungen [4].



Abbildung 3: Verwendeter LCM-Drucker von Lithoz (CeraFab 7500) am ISFK [13]

In Abbildung 4a ist eine schematische Skizze des LCM-Verfahrens und in Abbildung 4b der Innenraum des CeraFab 7500 von Lithoz dargestellt. Der Schlicker aus der Kartusche **(4)** wird in eine Wanne **(1)** dosiert und durch eine Rakel **(2)** gleichmäßig in dieser verteilt. Dadurch kann eine gleichmäßige Dicke der aufgetragenen Schlickerschicht gewährleistet werden. Nach dem Absenken der Bauplattform **(3)** und dem Eintauchen dieser in den Schlicker kann mit dem Belichtungsprozess begonnen werden. Die Bestrahlung erfolgt auf Basis von Leuchtdioden (LEDs) und einem digitalen Mikroskopgerät (DMD). Die Aushärtung basiert auf dem Prinzip der Photopolymerisation indem der flüssige Schlicker durch selektiv orts aufgelöste Belichtung härtet. Der Initiation der Photopolymerisationsreaktion geht die Anregung des Photoinitiators durch Absorption des Lichtes voraus [12]. Durch die Aushärtung haftet die Schicht auf der Bauplattform, die dann wieder nach oben bewegt wird. Danach kann eine neue Schlickerschicht aufgetragen werden und mit der nächsten Schicht begonnen werden. Durch Wiederholung

dieses generativen Verfahrens kann die gewünschte Geometrie erzeugt und der Grünkörper hergestellt werden [4].

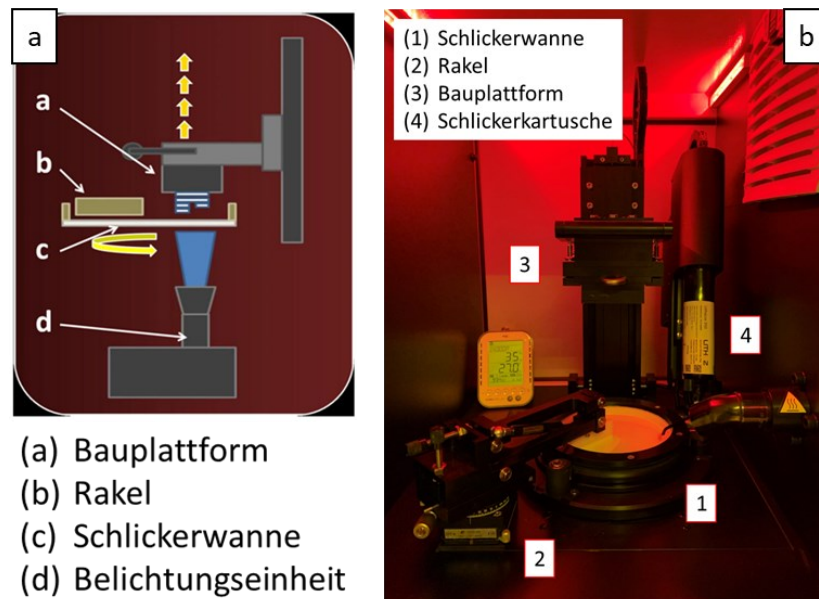


Abbildung 4: **a)** zeigt eine schematische Skizze des LCM-Verfahrens mit den Bestandteilen: **(a)** Bauplattform, **(b)** Rakel, **(c)** Schlickerwanne und **(d)** Belichtungseinheit [12]. **b)** zeigt eine Aufnahme des Innenraums des CeraFab 7500 mit den Bestandteilen: **(1)** Wanne, **(2)** Rakel, **(3)** Bauplattform und **(4)** Schlickerkartusche

In Tabelle 2 werden die technischen Parameter für den LCM-Prozess im CeraFab 7500 zusammengefasst:

Tabelle 2: Technische Parameter für den LCM-Prozess im CeraFab 7500 [14]

Bauvolumen (x/y/z) [12]	76,8 mm x 43,2 mm x 170 mm
Laterale Auflösung	40 μm (x- und y-Richtung) [15]
Schichtdicke	10 – 100 μm
Baugeschwindigkeiten	150 Schichten je Stunde

Während des Drucks gibt es viele Parameter, die die späteren Bauteileigenschaften beeinflussen. Dazu zählen unter anderem die rheologischen Eigenschaften des Schlickers und sein Verhalten während der Polymerisation, sowie die Anteile an Binder und keramischem Pulver in der Suspension [16]. Im LCM-Prozess werden photopolymerisierbare Schlicker gefüllt mit Keramikpartikel verwendet, die später über eine LED-Quelle belichtet und ausgehärtet werden. Kommerziell verfügbare Materialien für den Schlicker sind unter anderem Al_2O_3 , ZrO_2 und $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Ausgehend von den Eigenschaften des Schlickers werden nicht nur die Qualität des Drucks, sondern auch die Parameter aller folgender Prozessschritte bestimmt. Wichtige Eigenschaften des Schlickers sind die dynamische Viskosität, also die Fließeigenschaften, sowie der

Anteil an Binder im Schlicker. Je höher der Anteil der Keramikpartikel im Schlicker, desto höher ist die Viskosität [15]. Typische Anteile an Keramikpartikeln im Schlicker sind 75-80 Massenprozent [17]. Die besten Eigenschaften der Grünkörper können mit einem Schlicker bei einer Viskosität im Prozessfenster von 0,1 bis 30 Pa * s bei einer Scherrate von ca. 50 s^{-1} erreicht werden [15]. Als Binder werden Monomere mit unterschiedlichen Funktionalitäten verwendet: di-funktionale Monomere, die offene Polymer-Netzwerke produzieren, und multi-funktionale Monomere, die ein starkes Polymer-Netzwerk während der Polymerisation im Druckprozess produzieren [18]. Ein weiterer wichtiger Einflussparameter ist die Reinigung. Wichtige Parameter der Reinigung sind die Dauer dieses Prozessschrittes, die Wahl des Reinigungsmittels und der Zeitpunkt der Reinigung. Die besten Ergebnisse werden durch Entfernung des überschüssigen Schlickers direkt nach dem Druck erreicht [15].

Zusätzlich werden die mechanischen Eigenschaften signifikant durch die Oberflächeneigenschaften des gedruckten Bauteils beeinflusst. Um diese Einflüsse zu beschreiben, ist es notwendig eine allgemeine Definition des Koordinatensystems in der AF zu definieren, siehe Abbildung 5.

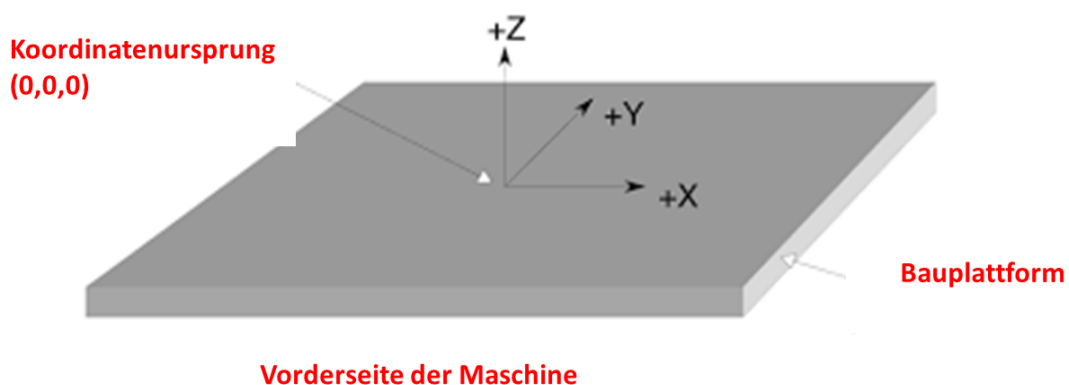


Abbildung 5: Allgemeine Definition des Koordinatensystems für die Beschreibung unterschiedlicher Oberflächeneinflüsse in der AF [19]

In dieser Definition wird die z-Richtung als die Aufbaurichtung bezeichnet. Die besten Oberflächeneigenschaften, also geringste Rauigkeit und Welligkeit, wird in der Einzelschicht (x-y-Ebene) erreicht. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus können an allen anderen Oberflächen des Bauteils Rillen an den jeweiligen Schichtgrenzen entstehen. Wird die Oberfläche in z-Richtung analysiert, werden schlechtere Oberflächeneigenschaften im Vergleich zu x-y-Ebene festgestellt [12]. In Bezug auf die Oberflächeneigenschaften muss auch der sogenannte „stair-step-Effekt“ berücksichtigt werden. Dieser Effekt entsteht dadurch, dass die Schichtdicke indirekt proportional zur Druckzeit ist und dadurch die Schichtdicke die Qualität der Oberfläche beeinflusst [20].

Weitere Einflüsse auf die Oberflächeneigenschaften sind die Orientierungsabhängigkeit durch das Pixelraster („Aliasing“) sowie die Überpolymerisation. Beim Aliasing werden schräge Linien durch eine abgestufte Folge von Quadraten wiedergegeben. Diese Quadrate sind abhängig von der Orientierung des Bauteils und erzeugen somit zusätzlich einen weiteren „stair-step-Effekt“ in der Ebene der Einzelschicht [21]. Die Überpolymerisation führt dazu, dass sich die Kanten auswölben, resultierend aus der Lichtstreuung durch die Keramikpartikel im Schlicker. Dadurch entstehen wellige Oberflächen durch die nach außen gewölbten Querschnitte [21]. Diese Effekte auf die Oberflächeneigenschaften sind in Abbildung 6 visualisiert.

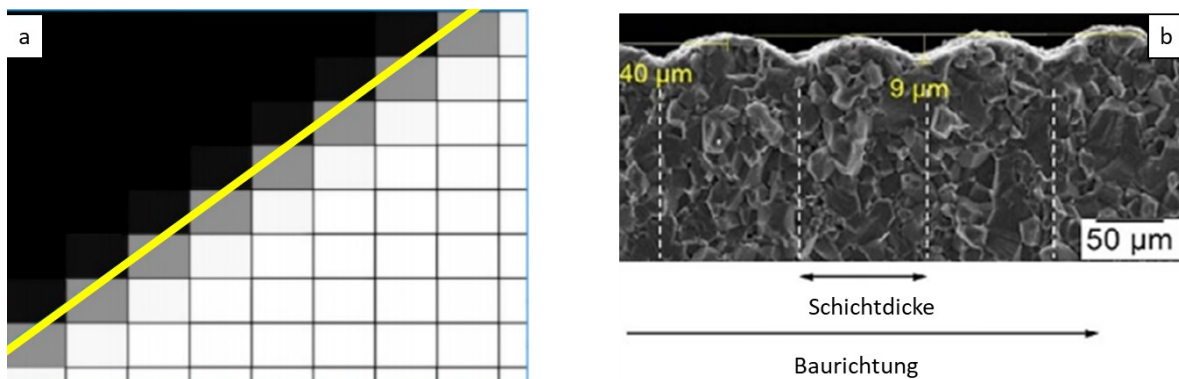


Abbildung 6: In **a)** wird Aliasing schematisch gezeigt, die gelbe schräge Linie wird durch die grauen Quadrate wiedergegeben [22]. In **b)** ist eine wellige Oberfläche resultierend aus der Überpolymerisation dargestellt [21].

2.2. Festigkeitsverhalten von Keramiken

Keramische Werkstoffe weisen eine niedrige Plastizität bei Raumtemperatur auf. Dies bedeutet, dass ein Versagen ohne signifikante plastische Verformung eintritt. Dies liegt an den starken Atombindungen (vorwiegend ionische-kovalente Mischbindungen), wodurch sich hohe notwendige Spannungen für die Bewegungen von Versetzungen ergeben. Versagen tritt an Stellen mit hohen lokalen Spannungen, wie z.B. in Kerben oder Defekten im Material, auf. Da diese Defekte zufällig in Form, Größe und Orientierung im Material verteilt sind, zeigen keramische Werkstoffe auch eine Streuung in den Festigkeitswerten. Letzteres fordert eine statistische Beschreibung der Festigkeitswerte. Hochleistungskeramiken haben einen geringen Widerstand gegen Rissausbreitung, welche durch die Bruchzähigkeit gekennzeichnet ist [23]. Infolge dieser Tatsachen reagieren Keramiken empfindlich auf Zugbelastungen, ertragen aber Druckbelastungen besser [24].

2.2.1. Defektkontrolliertes Versagen

Das defektkontrollierte Versagen von Keramiken lässt sich mithilfe der Bruchmechanik beschreiben [25]. Das Grundprinzip der linear elastischen Bruchmechanik (LEBM) wurde von George Irwin basierend auf den Ergebnissen von Griffith und Orowan beschrieben [26]. Diese Theorie befasst sich mit planaren Defekten und geht von einer unendlich scharfen Risspitze aus. Die Grundlagen der LEBM werden anhand einer Platte mit der Dicke B und Weite W beschrieben, wie in Abbildung 8 gezeigt. Die Risslänge wird als a bezeichnet. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen drei Moden, die in Tabelle 3 beschrieben werden [23]:

Tabelle 3: Beschreibung der unterschiedlichen Moden der linear elastischen Bruchmechanik (LEBM), Keramiken können am besten mit Mode I beschrieben werden. [23]

Mode I	Spannung senkrecht zur Rissebene	σ_y
Mode II	Schubbelastung in Rissrichtung	τ_{xy}
Mode III	„Out-of-plane“ Schubbelastung	τ_{yz}

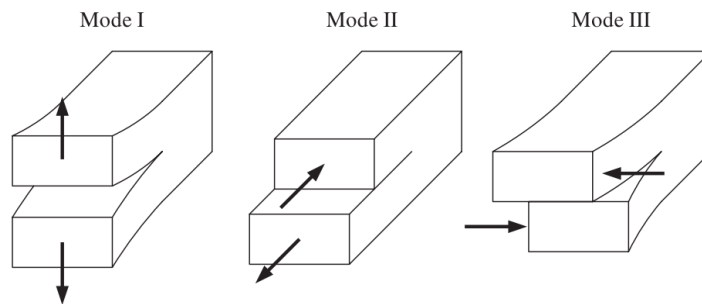


Abbildung 7: Visuelle Darstellung der unterschiedlichen Moden der linear elastischen Bruchmechanik [25]

Spröde Materialien, wie keramische Werkstoffe, sind aufgrund ihrer Eigenschaften besonders empfindlich auf Mode I-Belastungen und können daher damit am besten beschrieben werden [26].

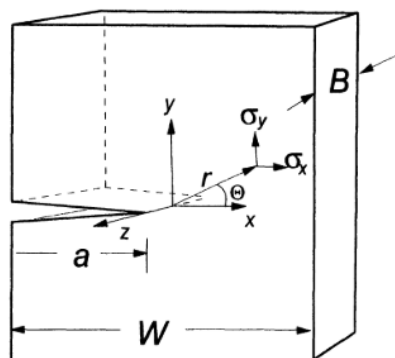


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Platte für die Beschreibung der LEBM mit a als Risslänge, W als Weite und B als Dicke des Körpers [23]

Der Spannungsintensitätsfaktor K_I hängt von der Spannung σ , der Risslänge a und dem Geometriefaktor Y ab und wird mit Gleichung 1 beschrieben:

$$K_I = \sigma * \sqrt{a} * Y \left(\frac{a}{W} \right) \quad (1)$$

Spannungen in der Nähe der Rissspitze und damit das Rissausbreitungsverhalten können mithilfe des Spannungsintensitätsfaktors K_I beschrieben werden. Der Geometriefaktor Y hängt von der charakteristischen Abmessung W des Bauteils ab, auf die die Risslänge a normiert ist [23]. In der Theorie der LEBM gibt es eine kritische Spannung σ_f , welche bei der Risslänge a_c das Versagen des Bauteils verursacht [27]. Bei dieser Kombination aus Risslänge und Spannung wird die Spannungsintensität K_I gleich dem materialspezifischen kritischen Wert des Spannungsintensitätsfaktors, der Bruchzähigkeit K_{Ic} (Gleichung 2) [25]. Wird dieser Wert erreicht, tritt spontanes Versagen durch instabiles Risswachstum auf. Die Spannung σ_f ist die Festigkeit des Bauteils.

$$K_{Ic} = \sigma_f * \sqrt{a_c} * Y \left(\frac{a}{W} \right) \quad (2)$$

2.2.2. Bruchstatistik und Weibull-Verteilung

Festigkeitswerte einer Messreihe können durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(\sigma)$ beschrieben werden. Man kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(\sigma)$ auch durch eine kumulative Verteilung für das Versagen $P_f(\sigma)$ beschreiben (die Wahrscheinlichkeit, das bei σ Versagen eintritt) und daraus die Wahrscheinlichkeit $P_s(\sigma)$ ermitteln [25], gezeigt in Gleichung 3.

$$P_s(\sigma) = 1 - P_f(\sigma) \quad (3)$$

Es hat sich gezeigt, dass die Weibull-Verteilung das Festigkeitsverhalten von Keramiken gut beschreiben kann. Die Weibull-Verteilung wurde von Waloddi Weibull bereits in den 1930er-Jahren entwickelt und findet heute in einem breiten Feld Anwendung [28]. Nach anfänglicher guter empirischer Übereinstimmung konnte auch analytisch gezeigt werden, dass die Weibullverteilung für die dem Versagen zugrundeliegenden Defektverteilungen geeignet ist [28]. Bei der Weibull-Verteilung gibt es die Unterscheidung der 2- und 3-Parameter-Verteilung, im Folgenden wird die 2-Parameter-Verteilung genauer beschrieben. Die 2-Parameter-Verteilung ist für die auftretende Spannung σ , mit dem Weibull-Modul m sowie der charakteristischen Festigkeit σ_0 beschrieben durch [25]:

$$P_f(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{V_0} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (4)$$

Die charakteristische Festigkeit σ_0 ist ein Skalierungsparameter und ist als Zentrum der Verteilung anzusehen [25]. σ_0 ist jener Spannungswert, bei dem $1 - e^{-1} \approx 63,2\%$ aller Proben versagen [29]. Je größer der Weibull-Modul m ist, desto geringer ist die Variation der Bruchspannung. m ist damit ein Maß für die Streuung der Festigkeit [29]. Für technische Keramiken werden typischerweise Werte für den Weibull-Modul m von 5-20 ermittelt [30]. Da bei keramischen Werkstoffen das Versagen durch zufällig verteilte Defekte auftritt, muss auch der Effekt der Probengrößen, der sogenannte Volumeneffekt, berücksichtigt werden. Die Bruchfestigkeit von Keramiken zeigt aufgrund dieses Effektes eine Volumenabhängigkeit, da die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines bruchauslösenden Defektes für ein größeres Volumen zunimmt [31]. Wenn Probe 1, belastet mit σ_1 und effektivem Probenvolumen V_1 , dieselbe Versagenswahrscheinlichkeit $P_f(\sigma)$ wie Probe 2, belastet mit σ_2 und effektivem Probenvolumen V_2 , hat, kann aus Gleichung 4 folgender Zusammenhang abgeleitet werden [25]:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5)$$

Diese Gleichung gilt für beliebige Versagenswahrscheinlichkeiten. Das Ergebnis aus Gleichung 5 bedeutet, dass die erlaubte Belastung für eine bestimmte Versagenswahrscheinlichkeit für Proben mit geringeren effektivem Volumen größer ist, als für Proben mit größerem Probenvolumen [25].

Im folgenden Abschnitt folgt die schrittweise Beschreibung der Bestimmung der Weibull-Parameter und die Konstruktion eines Weibull-Diagramms. Zur Bestimmung der Weibull-Parameter σ_0 und m von N Proben werden die zugehörigen Spannungswerte herangezogen. Schätzwerte für die Parameter der Weibullverteilung können mit der „Maximum-Likelihood-Methode“ bestimmt werden [32]. Die Eingabedaten für diese Gleichung sind, wie bereits definiert, die gemessenen Festigkeiten σ_i und die Anzahl der Proben N . Der Weibull-Modul ergibt sich durch numerisches Lösen von Gleichung 6 nach m .

$$\frac{\sum_{i=1}^N [\ln(\sigma_{B,i}) * \sigma_{B,i}^m]}{\sum_{i=1}^N \sigma_{B,i}^m} - \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \ln(\sigma_{B,i}) - \frac{1}{m} = 0 \quad (6)$$

Mit Gleichung 7 kann die charakteristische Festigkeit σ_0 einer Messreihe ermittelt werden [33].

$$\sigma_0 = \left[\frac{1}{N} * \left(\sum_{i=1}^N \sigma_{B,i}^m \right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

Ausgangspunkt für die Weibull-Darstellung sind die gemessenen Bruchkräfte F , aus denen die zugehörigen Spannungswerte berechnet werden. Die Spannungswerte werden aufsteigend sortiert und einer Versagenswahrscheinlichkeit $P(\sigma_{B,i})$ mithilfe einer Schätzfunktion (Gleichung 8) zugeordnet, wobei $1 \leq i \leq N$ ist.

$$P(\sigma_{B,i}) = \frac{i - 0,5}{N} \quad (8)$$

Aus den Versagenswahrscheinlichkeiten sowie den Bruchspannungen werden mit Gleichung 9 und Gleichung 10 die Wertepaare für eine linearisierte Darstellung in einem Weibull-Diagramm erstellt:

y-Achse: $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - P(\sigma_{B,i})} \right) \right]$ (9)

x-Achse: $\ln(\sigma_{B,i})$ (10)

Aus der Likelihood-Methode können Verteilungsparameter mit dem kleinsten Koeffizienten an Variation, also dem Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert ermittelt werden. Durch eine iterative Lösung der impliziten Gleichung 6 kann m ermittelt werden [33]. Die linearisierte Darstellung der Zwei-Parameter-Weibullverteilung leitet sich wie folgt her:

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

$$\frac{1}{1 - P} = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

$$\ln \left(\frac{1}{1 - P} \right) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m$$

$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - P} \right) \right) = m * \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \quad (11)$$

$$y = k * x \quad (12)$$

Ein beispielhaftes Weibull-Diagramm aus einer der Versuchsreihen dieser Arbeit ist in Abbildung 9 dargestellt.

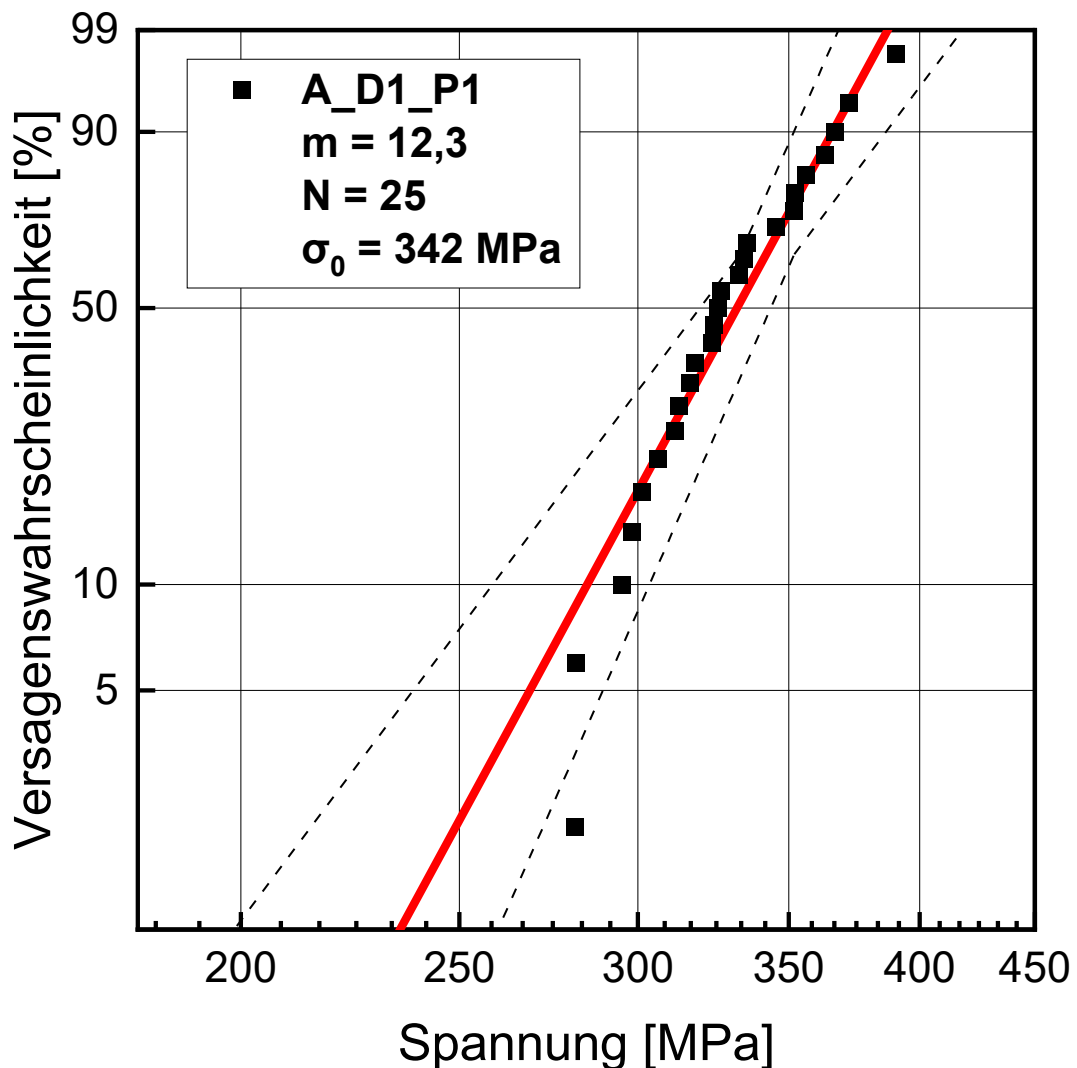


Abbildung 9: Beispielhaftes Weibull-Diagramm eines Prüfkörpers des Prüfkörpertyps A. In Rot ist die Weibull-Gerade dargestellt und in schwarz strichliert wird der Bereich der Konfidenzintervalle definiert. In der Legende ist mit N die Anzahl der gültig gebrochenen Biegebalken dargestellt, zusätzlich sind dort der ermittelte Weibull-Modul m , sowie die charakteristische Festigkeit σ_0 dargestellt.

Da es sich bei σ_0 und m um Schätzwerte einer Verteilung auf Basis einer Stichprobe handelt, werden zusätzlich Konfidenzintervalle angegeben. Unter einem Konfidenzintervall, oder auch Vertrauensbereich, versteht man einen Unsicherheitsbereich, um einen gewünschten Parameter abschätzen zu können [34]. Als Vertrauensniveau β wurde für diese Arbeit $\beta = 0,1$ gewählt. Das Konfidenzniveau ist gegeben durch:

$$\text{Konfidenzniveau} = 1 - \beta \quad (13)$$

Die Konfidenzintervalle werden folgendermaßen für die charakteristische Spannung σ_0 mit

$$C_u = \sigma_0 * \exp\left(-\frac{t_u}{m}\right) \quad (14)$$

$$C_l = \sigma_0 * \exp\left(-\frac{t_l}{m}\right) \quad (15)$$

berechnet, mit C_u als obere und C_l als untere Grenze des Konfidenzintervalls für σ_0 . Die Werte für t_u und t_l werden den Tabellen der Norm EN 843-5 entnommen [35]. Die Konfidenzintervalle für den Weibull-Modul m werden durch:

$$G_u = \frac{m}{l_u} \quad (16)$$

$$G_l = \frac{m}{l_l} \quad (17)$$

berechnet, mit G_u als obere und G_l als untere Grenze des Konfidenzintervalls für m . Die Werte für l_u und l_l sind wieder den Tabellen der Norm EN 843-5 entnommen [35].

2.3. Prüfmethode für die Festigkeit von Keramiken

Im kommenden Kapitel werden die gängigsten Methoden zur Prüfung von Keramiken beschrieben. Da die Standardmethoden (ein- und zweiachsige Biegeversuche) für 3D-gedruckte Proben sehr zeitaufwendig sind, wurde in dieser Arbeit ein anderer Prüfaufbau konzipiert und konstruiert. Die Festigkeiten von Keramiken werden oft in Biegeversuchen ermittelt [24].

2.3.1. Einachsige Biegeversuche

Die einachsigen Biegeversuche stellen eine der am weitesten verbreiteten Prüfmethode für die Festigkeit keramischer Werkstoffe dar. Diese Tests werden an quaderförmigen Proben durchgeführt. In Abbildung 10 ist ein 4-Punkt-Biegeversuch dargestellt. Es gibt weiters noch den 3-Punkt-Biegeversuch, bevorzugt durchgeführt wird aber der dargestellte Versuch, da zwischen den Rollen ein ausgedehnter Bereich mit konstantem Biegemoment herrscht [23]. Durchgeführt werden diese Biegeversuche nach DIN EN 843-1 [35].

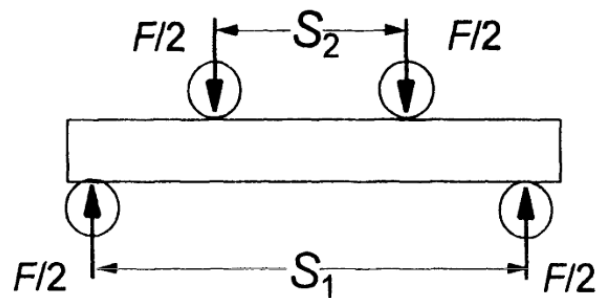


Abbildung 10: Experimenteller Aufbau des 4-Punkt-Biegeversuchs mit F (Prüfkraft), S_1 und S_2 (Auflagerabstände) [23]

Berechnet wird die Biegespannung σ mit folgender Gleichung (gilt nur für einen rechteckigen Querschnitt) [23]:

$$\sigma = \frac{3 * (S_1 - S_2)}{2 * W^2 * B} * F \quad (18)$$

Dabei sind S_1 und S_2 die Auflagerabstände, W und B die Weite sowie die Breite der Prüfkörper und F die Prüfkraft [23]. Da bei einer Biegebeanspruchung die maximalen Spannungen an der Oberfläche entstehen ist zu berücksichtigen, dass vor allem an der Zugseite der Probe keine Defekte oder scharfe Kanten vorhanden sind. Ein Abfasen der Kanten hilft, die Gefahr von Versagen durch Kantendefekte zu minimieren [35].

4-Punkt-Biegeproben wurden beispielsweise von Schlacher et al. [36] oder auch von Kammler et al. mit dem LCM-Verfahren hergestellt [37]. Für diese Prüfkörpertypen war es möglich bis zu 32 Prüfkörper mit 2 unterschiedlichen Orientierungen in einem Druckjob herzustellen. Ähnliches wurde in der Arbeit von Grillitsch dargelegt [38]. In dieser Arbeit konnten maximal 44

Prüfkörper pro Druckjob hergestellt werden. Für geneigte Proben musste zusätzlich eine Stützstruktur konstruiert werden.

2.3.2. Zweiachsige Biegeversuche: Kugel auf 3 Kugel (B3B)-Versuch

Beim B3B-Versuch wird eine scheibenförmige oder quadratische Platte von drei Kugeln in einer Ebene getragen und von einer vierten Kugel in der Mitte der gegenüberliegenden Ebene belastet. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Biegeversuchen sind insbesondere die gut definierte Lastübertragung und die hohe Toleranz gegenüber Abweichungen von der idealen Probengeometrie. Dies macht es möglich, gesinterte Proben, die uneben sein können, unbearbeitet zu testen. Die ermittelten Festigkeitsdaten aus den B3B-Versuchen können mithilfe von Gleichung 5 mit anderen Biegeversuchsergebnissen verglichen werden [39]. In Abbildung 11 ist der Versuchsaufbau für die B3B-Prüfmethode dargestellt.

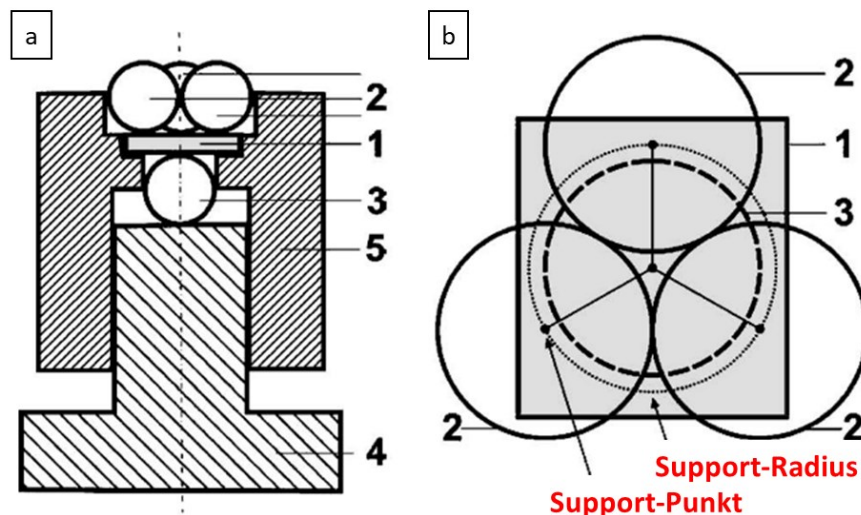


Abbildung 11: Experimenteller Aufbau des B3B-Versuchs mit den Bestandteilen: (1) Probenkörper, (2) Support-Kugel, (3) Belastungskugel, (4) Stempel und (5) Führung
In Abbildung a) ist der Querschnitt und in b) ist die Draufsicht des Versuchsaufbaus gezeigt [39]

Die Spannung im B3B-Versuch kann mit folgender Gleichung ermittelt werden [40].

$$\sigma_{max} = f(\text{Probengeometrie}, \mu) * \frac{F}{t^2} \quad (19)$$

σ_{max} ist hier die maximale Spannung im Zentrum der Zugseite, μ ist die Poissonzahl des geprüften Materials und F die Prüfkraft.

B3B-Proben in verschiedenen Orientierungen wurden beispielsweise von Schlacher et al. [36] oder Essmeister et al. [41] mit dem LCM-Verfahren hergestellt. Osman et al. [42] verwendeten einen ähnlichen biaxialen Festigkeitstest. Pro Druckjob können jeweils einige Prüfkörper hergestellt werden. Zusätzlich wird bei diesen Prüfkörper ein Stützstruktur benötigt.

2.3.3. AM-spezifischer Prüfkörper

Aufgrund der speziellen Eigenschaften des LCM-Verfahrens ist die Probenherstellung für reguläre ein- und zweiachsige Proben zeit- und materialintensiv. Daher wurden im Rahmen eines FFG-Projekts („CharAM“, Nr. 877684 des COIN/IraSME Programms) ein neuartiger Prüfkörper entwickelt [43], der 48 Einzelproben auf einer Grundplatte enthält. Der Sinn des Prüfkörpers besteht darin, die Orientierungsabhängigkeit von LCM-gedruckten Bauteilen zu untersuchen. Die Prüfkörper werden in drei verschiedene Prüfkörpertypen eingeteilt, diese sind in Abbildung 12 dargestellt. Typ A, mit einer Orientierung von 0° der Biegebalken, ist parallel zur Druckrichtung ausgerichtet. Typ B1 und Typ B2 sind jeweils um 15° geneigt zur Druckrichtung ausgerichtet. Diese zwei Prüfkörpertypen unterscheiden, dass beim Prüfkörpertyp B2 die Biegebalken im Vergleich zum Typ B1 um 180° entlang ihrer Längsachse rotiert sind. Mit dem CeraFab 7500 LCM-Drucker können zwei dieser Prüfkörper in einem Druckjob hergestellt werden.

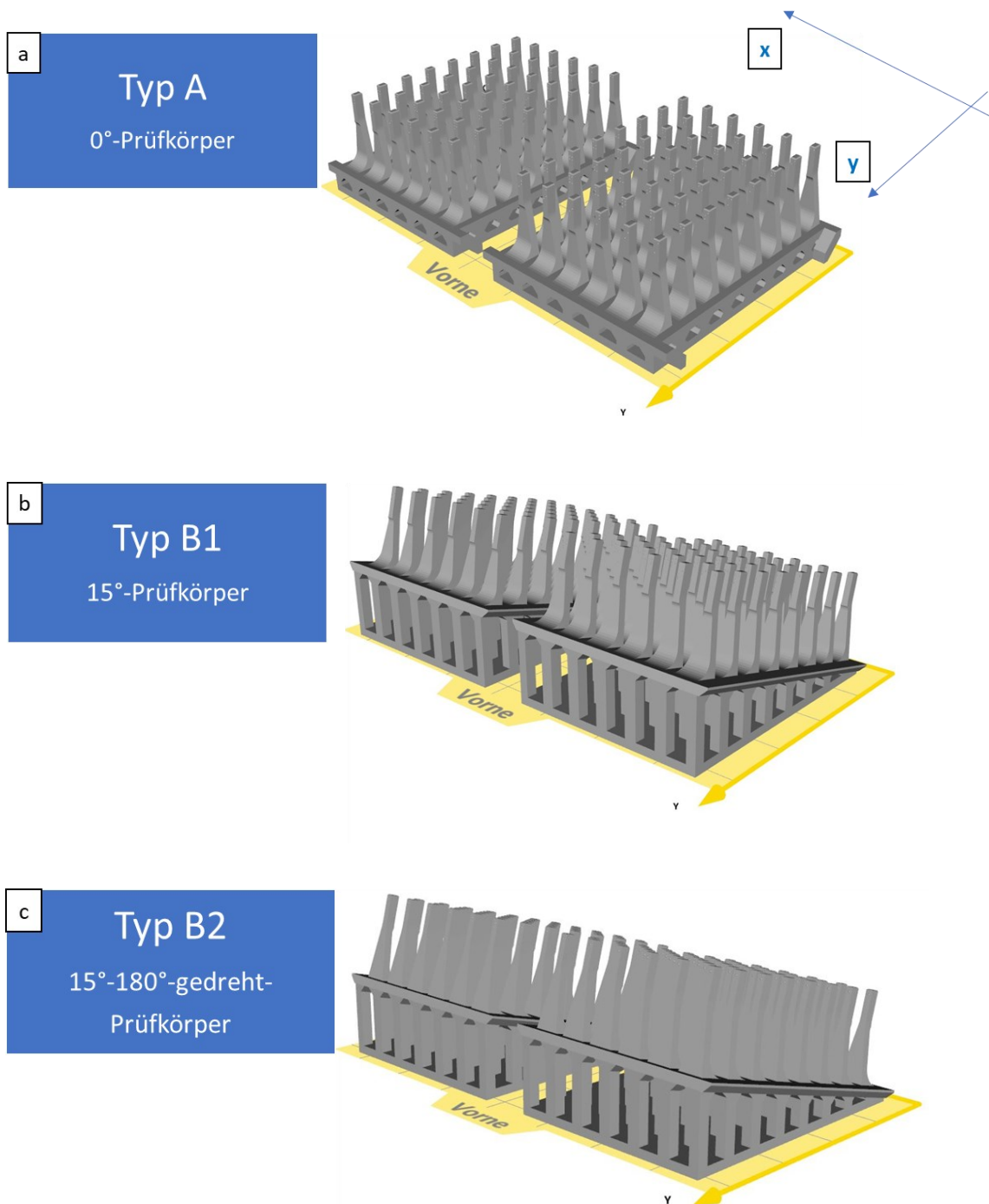


Abbildung 12: Darstellung der verschiedenen CharAM Prüfkörpertypen eingeteilt in **a)** 0°-Prüfkörper (Prüfkörpertyp **A**), **b)** 15°-Prüfkörper (Prüfkörpertyp **B1**), man sieht die Druckseite der Biegebalken und **c)** 15°-gedreht-Prüfkörper (Prüfkörpertyp **B2**), man sieht die Zugseite der Biegebalken.

Alle Prüfkörper bestehen aus einer Grundplatte auf der 48 einzelne Biegebalken angebracht sind. Alle Biegebalken sind ident konstruiert und so ausgelegt, dass über den gesamten Prüfbereich (grün umrandet und schraffiert in Abbildung 13) eine konstante Biegespannung herrscht [43].

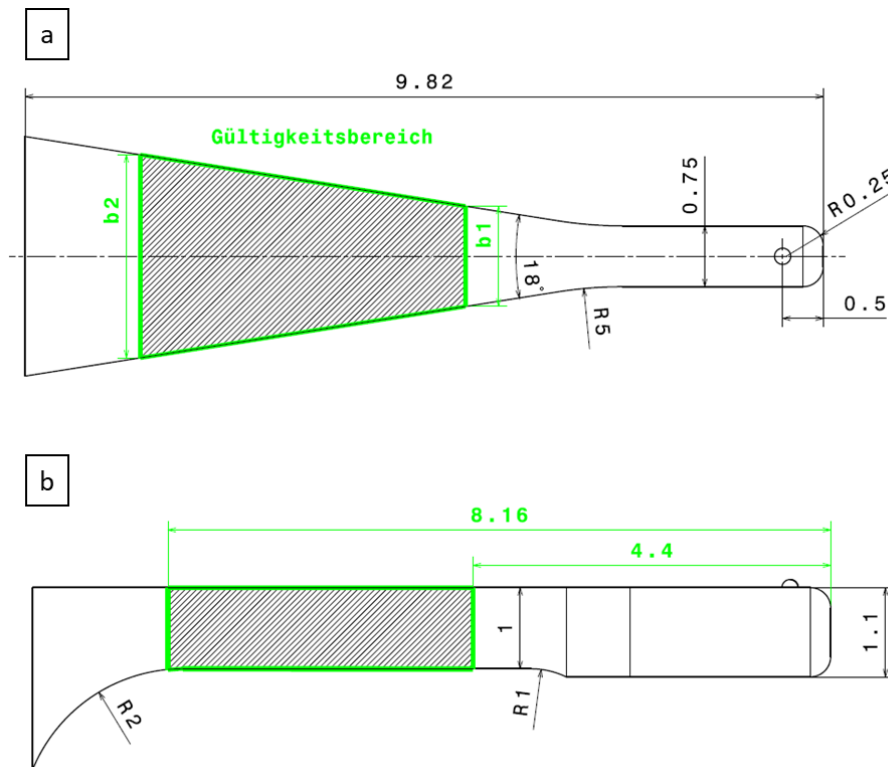


Abbildung 13: Darstellung eines konstruierten Biegebalkens. Die Konstruktion ist so ausgelegt, dass über den gesamten Prüfbereich (grün umrandet und schraffiert) des Biegebalkens eine konstante Spannung σ herrscht.

Mithilfe der Universalprüfmaschine und eines dünnen Prüfdorns wird jeder Biegebalken einzeln belastet (siehe Abbildung 14) und dadurch einer uniaxialen Biegebeanspruchung ausgesetzt. Die maximalen Zugspannungen beim Bruch für den CharAM-Prüfkörper wird durch Gleichung 20 berechnet, die Herleitung befindet sich in Anhang A. F_H ist in dieser Gleichung die Kraft beim Bruch, k ist die Steigung der beiden Flanken des Biegebalkens (ergibt sich aus dem Öffnungswinkel α), siehe Abbildung 13, und h_{max} ist die maximale Querschnittshöhe im Prüfbereich.

$$\sigma_B = \frac{6 \cdot F_H}{k \cdot h_{max}^2} \text{ mit} \quad (20)$$

$$k = 2 * \tan \frac{\alpha}{2}$$

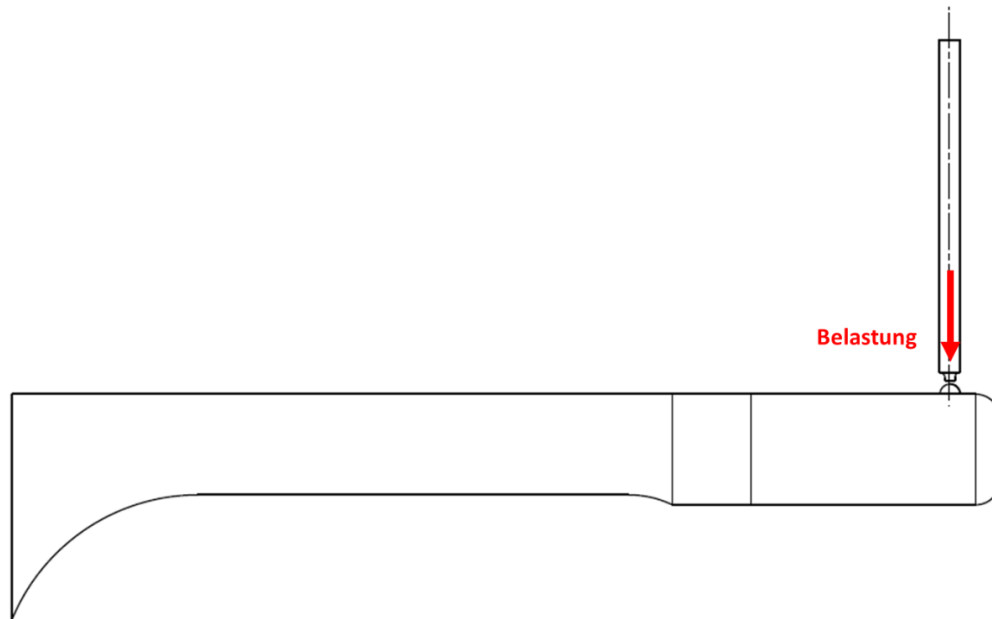


Abbildung 14: Skizzierte Darstellung der Prüfmethode für die CharAM-Prüfkörper. Der Biegebalken wird mit dem Prüfdorn bis zum Bruch belastet.

Jeder gültig geprüfte (d.h. im Prüfbereich gebrochene) Biegebalken wird in die Weibull-Auswertung miteinbezogen. Damit die Auswertung für jeden einzelnen Biegebalken besser nachvollziehbar ist, wurde ein Bezeichnungssystem für diese Prüfkörper und Biegebalken entwickelt, siehe Abbildung 15.

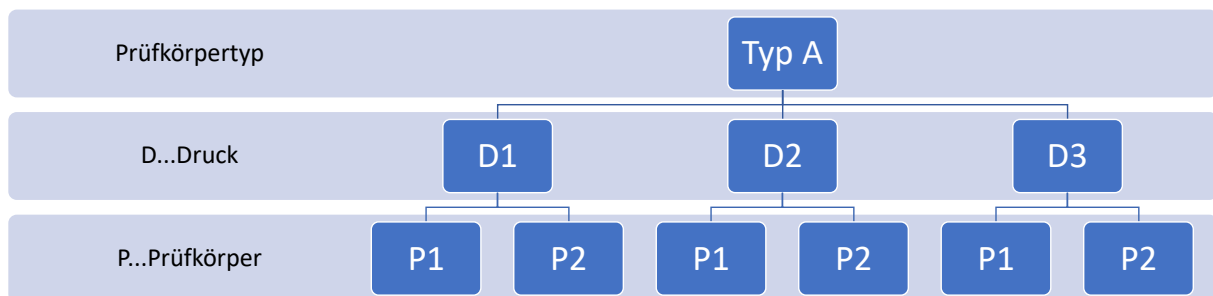


Abbildung 15: Bezeichnungssystem der Prüfkörper, beispielhaft für den Prüfkörpertyp A (0°-Prüfkörper). Jeder Prüfkörpertyp wird in drei Druckjobs (D1-D3) hergestellt und für jeden Druckjob können jeweils zwei Prüfkörper (P1 und P2) gedruckt werden.

Dieses Bezeichnungssystem ist für alle drei Prüfkörpertypen gleich, es werden jeweils drei Druckjobs (D) durchgeführt. Für jeden Druckjob werden zwei Prüfkörper (P) hergestellt.

Die zugrundeliegenden CAD-Daten der Prüfkörper für den Druckvorgang wurden von den Projektpartnern (IKTS Dresden) zur Verfügung gestellt. Die Benennung der einzelnen Biegebalken wird durch Abbildung 16a) erklärt. Die einzelnen Reihen werden mit den Buchstaben A bis F und die Zeilen mit den Nummern von 1 bis 8 bezeichnet. Damit gebrochene Biegebalken dem Prüfkörper zugeordnet werden können, ist jeder Biegebalken mit einem binären System aus Punkten versehen. In Abbildung 16b) ist beispielhaft ein Biegebalken mit diesem binären System dargestellt, in diesem Fall ist es der Biegebalken Reihe A, Zeile 8 (kurz A8).

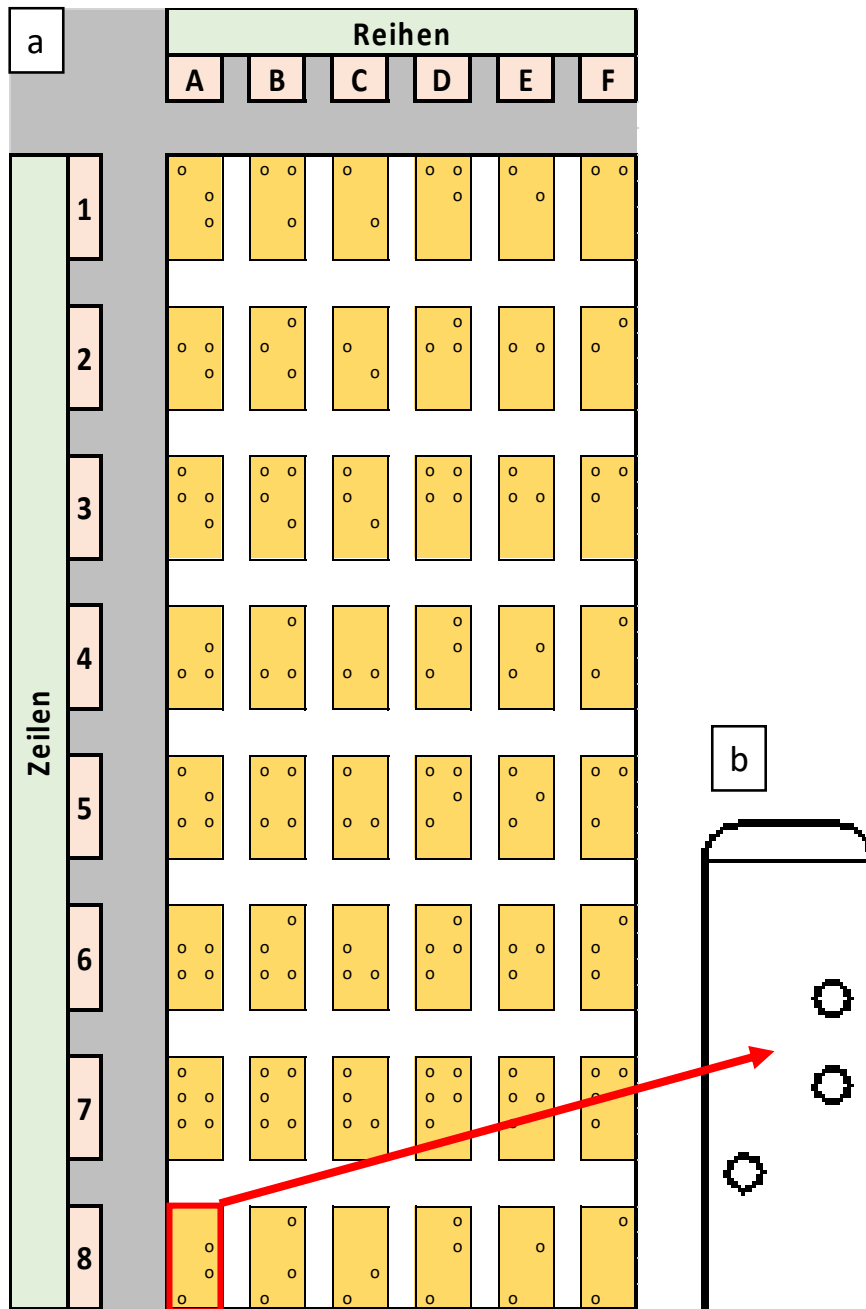


Abbildung 16: In a) ist die Anordnung der einzelnen Biegebalken eines Prüfkörpers dargestellt (mit Symbol „o“ dargestellt ist das binäre System aus Punkten zur Bezeichnung der Biegebalken). In b) ist in Detail das binäre System eines Biegebalkens dargestellt (in diesem Fall ist es der Biegebalken Reihe A, Zeile 8, in Abbildung a) mit dem roten Kasten und Pfeil gekennzeichnet)

Zum besseren Verständnis folgt ein Beispiel für die Bezeichnung eines Prüfkörpers für den zweiten Prüfkörper des ersten Druckjobs für den Prüfkörpertyp B2. Die Bezeichnung ist nun folgendermaßen unterteilt: „**Prüfkörpertyp_Druckjob_Prüfkörper**“. Dieser Prüfkörper wird als „**B2_D1_P2**“ bezeichnet.

3. Herstellung der Prüfkörper

3.1. Verwendetes Probenmaterial

Für das Drucken der unterschiedlichen Prüfkörpertypen wurden bei jedem Druckjob der Schlicker LithaLox 350 von Lithoz verwendet. In folgender Tabelle sind die Eigenschaften des Schlickers und des fertig gesinterten keramischen Werkstoffs aufgelistet:

Tabelle 4: Eigenschaften des Schlickers LithaLox 350 für den Druck im CeraFab 7500 von Lithoz und Eigenschaften für die gesinterte Keramik [44]

Pulver	LithaLox 350
Reinheit [%]	99,8
Gesinterte Keramik	
Theoretische Dichte [g/cm ³]	3,99
Relative Dichte [%]	98,4
4-Punkt-Biegefestigkeit [MPa]	400
Oberflächenrauheit [µm]	0,9
Relative Permittivität (Gemessen bei 7,5 GHz)	9,5
Dielektrischer Verlustfaktor tan(δ) (Gemessen bei 7,5 GHz)	8*10 ⁻⁵
Typische Werte	
E-Modul [GPa]	300
Bruchzähigkeit [$MPa\sqrt{m}$]	4-5
Härte HV10	1450
Max. Anwendungstemperatur [K]	1650
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [ppm/K]	7-8
Thermische Leitfähigkeit [W/(m*K)]	37
Spezifischer elektrischer Widerstand [Ω*m]	≈10 ¹⁴

Im Fall des Schlickers LithaLox 350 handelt es sich bei den keramischen Partikeln um Aluminiumoxid Al₂O₃, auch Alumina genannt. Dieses Material sticht durch seine hohe Härte, gute korrosive Eigenschaften sowie gute Temperaturbeständigkeit hervor und wird unter anderem in der Medizintechnik und Automobilindustrie eingesetzt. Dieser Schlicker ist besonders für den Druck von Bauteilen mit hoher örtlicher Auflösung entwickelt worden [44]. Zur Reinigung der gedruckten Prüfkörper (Abtragen des überschüssigen unpolymersierten Schlickers), wurde das Lösungsmittel LithaSol 20, ebenfalls entwickelt von Lithoz, verwendet.

3.2. Druckvorgang (CeraFab 7500)

Für das Drucken der Bauteile wurde der 3D-Drucker CeraFab 7500 von Lithoz mit der Software „Lithoz CeraFab Control“ verwendet. Der Druckvorgang, sowie der Schlicker und das Lösungsmittel, sind für alle drei Varianten der gedruckten Prüfkörper (siehe Abbildung 12) ident. Zur Vermessung der Schlickerhöhe des vorgelegten Materials in der Wanne wurde ein Filmdickenmessgerät von mtv Messtechnik (Justus-von-Liebig-Straße 17A, 50374 Erftstadt, Deutschland) verwendet. Zur Reinigung der Prüfkörper mit dem Lösungsmittel und in weiterer Folge zur Trocknung mit Druckluft wurde ein Kompressor FD-196A von Fengda (Reichenbergerstr. 39, 02763 Zittau, Deutschland) benutzt. Der Trocknungsvorgang wurde in einem Trocknungs-Ofen von Binder GmbH (Im Mittleren Ösch 5, 78532 Tuttlingen, Deutschland) durchgeführt. Die detaillierte Beschreibung des Druckvorgangs befindet sich in Anhang B. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Druckparameter zusammengefasst und dargestellt.

In Tabelle 5 werden die Maschinenspezifikationen, die Maschinenvorbereitung sowie die Druckspezifikationen für jeden Prüfkörpertyp aufgelistet.

Tabelle 5: Maschinenspezifikationen, Maschinenvorbereitung und Druckspezifikationen für alle drei Prüfkörpertypen

Maschinenspezifikationen	
Bauplatzform [mm]	76,8 x 43,2
Laterale Auflösung [μm]	40
Software	CeraFab Control
Maschinentyp	CF7500
Maschinenvorbereitung	
Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	25
Schlickerhöhe [μm]	225-250
Wannentyp	UHC
Haftvermittler / Folie	kein HV
Druckspezifikationen (Typ A – 0°-Prüfkörper)	
Schichtzeit [s]	ca. 53
Schichtanzahl	686
Schlickerverbrauch [g]	34,5
Druckspezifikationen (Typ B1 – 15°-Prüfkörper)	
Schichtzeit [s]	ca. 60
Schichtanzahl	947
Schlickerverbrauch [g]	36,5
Druckspezifikationen (Typ B2 – 15°-180°-gedreht-Prüfkörper)	
Schichtzeit [s]	ca. 50
Schichtanzahl	969
Schlickerverbrauch [g]	36,5

3 Herstellung der Prüfkörper

In Tabelle 6 werden die Druckparameter, welche mittels der Maschinen-Software eingestellt werden, aufgelistet. Der Druckvorgang selbst ist in Dosieren, Kontaktieren, Belichten und Trennen unterteilt. Diese Druckparameter sind für alle drei Prüfkörpertypen dieselben.

Tabelle 6: Parameter und Korrekturen für die Geometrie der Prüfkörper und Druckparameter für die einzelnen Druckschritte (Dosieren, Kontaktieren, Belichten und Trennen) aus den Parameter-Sheets.

Parameter	Verwendeter Wert
Geometrie	
Schichthöhe [μm]	25
Geometriekorrekturen	
Ausrichten am Pixelraster	Ja
Z-Durchhärttiefen-Kompensation	Ja
Z-Durchhärttiefen-Kompensation: Schichten	3
Dosieren	
Dosier-Korrekturfaktor	1,25
Beschichten	
Drehwinkel [$^{\circ}$]	720
Drehgeschwindigkeit [$^{\circ}/\text{s}$]	120
Kontaktieren	
Setzzeit Startschichten [s]	45
Setzzeit Hauptschichten [s]	10
Rückkippen Startschichten [$^{\circ}/\text{s}$]	15
Rückkippen Hauptschichten [$^{\circ}/\text{s}$]	18
Belichten	
Rückwärtsbelichtungszeit [s]	1,8
Setzzeit Rückwärtsbelichtung [s]	120
DLP-Energie Startschichten [mJ/cm^2]	150
DLP-Energie Hauptschichten [mJ/cm^2]	150
Trennen	
Abkippsgeschwindigkeit Startschichten [$^{\circ}/\text{s}$]	9
Abkippsgeschwindigkeit Hauptschichten [$^{\circ}/\text{s}$]	12

3.3. Post-Processing der Prüfkörper

In diesem Kapitel werden die Post-Processing-Schritte beschrieben:

- Pre-Conditioning
- Entbinderungsprozess
- Vorsintern
- Sintervorgang

3.3.1. Pre-Conditioning und Entbinderungsprozess

Für das Pre-Conditioning und den Entbinderungsprozess wurde jeweils der Umluftofen ThermConcept KU15/65 (Friedrich-List-Straße 17, 28309 Bremen, Deutschland) verwendet. Zur Steuerung und Einstellen der Ofenprogramme wurde eine Steuerungseinheit von Eurotherm (Ottostraße 1, 65549 Limburg an der Lahn, Deutschland) benutzt. Weiters wird für jedes Programm des Post-Processings eine Sinterplatte verwendet. Das verwendete Ofenprogramm für das Pre-Conditioning war Programm 2 („Pre-Conditioning“), für den Entbinderungsprozess wurde das Programm 3 („Entbindern Lithalox 350“) eingestellt.

Der Entbinderungsprozess wird nicht exakt nach den Vorgaben der Parameter-Sheets von Lithoz durchgeführt. Der Grund dafür ist, dass der verwendete Umluftofen nicht in der Lage ist, auf über 1100°C aufzuheizen und dies präzise zu steuern. Es wurde daher entschieden, das Aufheizen auf 1100°C in den Hochtemperaturofen zu verlegen. Dies entspricht dem zusätzlichen Post-Processing-Schritt „Vorsintern“. Da der Prüfkörper nach dem Entbindern nur mehr aus Keramikpartikeln besteht, ist dieser sehr fragil. Die Prüfkörper werden daher nach dem Entbinderungsprozess auf der entsprechenden Sinterplatte belassen und in den Hochtemperaturofen verlagert, ohne die gedruckten Prüfkörper direkt zu berühren. Das Pre-Conditioning und der Entbinderungsprozess wurden laut Herstellerangaben durchgeführt.

3.3.2. Vorsintern und Sintervorgang

Für das Durchführen des Vorsinterns sowie des Sinterns selbst wurde der Hochtemperaturofen ThermConcept HTL 10/17 verwendet. Als Steuerungseinheit dient wieder eines der Firma Eurotherm. Zusätzlich wird das Sintergranulat von Almatix GmbH (Giulinistraße 2, 67065 Ludwigshafen am Rhein, Deutschland) und weiters die Prozess-Temperatur-Kontrollringe von Ferro France SARL (43 Rue Jeanne d'Arc, 52100 Saint-Dizier, Frankreich) für das Sintern benötigt. Zur Vermessung der Prozess-Temperatur-Kontrollringe wird der Messschieber „Absolute Digimatic“ von Mitutoyo Austria GmbH (Salzburger Straße 260 / 3, 4600 Wels, Österreich) verwendet. Das Ofenprogramm für das Vorsintern war Programm 6 („Vorsintern“) und jenes für den Sintervorgang Programm 4 („Sintern LithaLox 350“).

Das Vorsintern wurde, wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, nicht nach den Parameter Sheet durchgeführt, der eigentliche Sintervorgang wird jedoch nach den Vorgaben durchgeführt. In Tabelle 7 und Abbildung 17 sind die Temperatur-Zeit-Verläufe des Vorsinterns aufgelistet und dargestellt.

Tabelle 7: Auflistung der thermischen Parameter für den Post-Processing-Schritt „Vorsintern“

Vorsintern (Gesamtdauer Temperaturbehandlung: 1,5 Tage)					
Aufheizdauer [h]	Aufheizdauer [hh:mm]	Heizrate [K/min]	Temperatur [°C]	Haltezeit [h]	Gesamtdauer [h]
			25		
17,92	17:55	1	1100	0	
17,92	17:55	-1	25		
					35,84 (1,5 Tage)

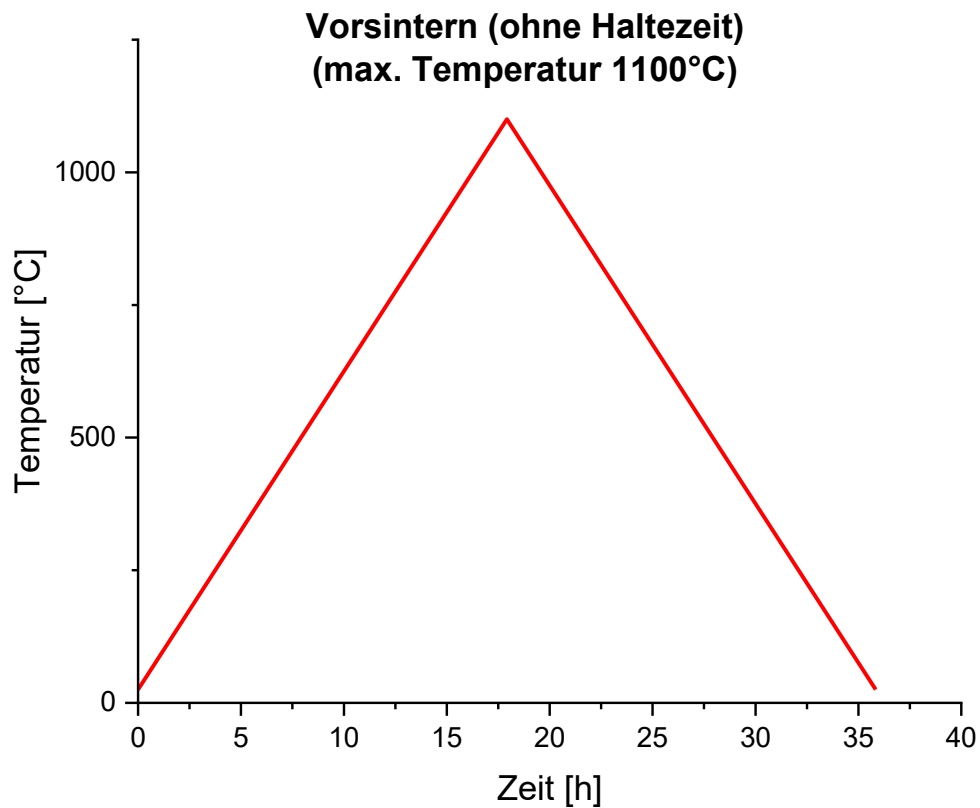


Abbildung 17: Temperatur-Zeit-Verlauf für den Post-Processing-Schritt „Vorsintern“ mit einer maximalen Temperatur von 1100°C und einer Gesamtdauer von ca. 36 Stunden.

Um den Sintervorgang zu dokumentieren, wurden Prozess-Temperatur-Kontrollringe der Firma Ferro France eingesetzt. In Abbildung 18 sind Prozesstemperatur-Kontroll-Ringe von Ferro France gezeigt. Durch das Verwenden dieser Ringe und das anschließende Vermessen dieser mit einem Messschieber, kann der gesamte Wärmeeintrag jedes Sintervorgangs dokumentiert und verglichen werden. Um eine repräsentative und konsistente Messung der Wärmemenge zu garantieren, wurden diese Ringe immer mittig im Hochtemperaturofen platziert.



Abbildung 18: Darstellung der Prozess-Temperatur-Kontrollringe von Ferro France SARL [45]

3 Herstellung der Prüfkörper

Zusätzlich wurde Sintergranulat der Firma Almatix GmbH verwendet, um das „Ansintern“ der Prüfkörper an der Sinterplatte zu verhindern. Der Grund, warum kein Granulat beim Vorsintern verwendet wird, ist, dass die Temperaturen beim Vorsintern von maximal 1100°C nicht ausreichen, um ein „Ansintern“ auszulösen. In Abbildung 19 wird das Sintergranulat sowie ein Prozess-temperatur-Kontrollring im Hochtemperaturofen gezeigt.



Abbildung 19: Darstellung des Sintergranulats und des Prozess-Temperatur-Kontrollrings im Hochtemperaturofen für den Post-Processing-Schritt „Sintern“. Zusätzlich erkennt man die Sinterkeile mit einer Neigung von 15° für das Sintern der Prüfkörpertypen B1 und B2.

Bei den Prüfkörper von Typ B1 und Typ B2 müssen aufgrund der Neigung von 15° zusätzlich Sinterkeile verwendet werden. Dadurch wird ein starkes Verbiegen der Prüfkörper während des Sinterns durch ihr Eigengewicht vermieden. Diese Keile werden mit den entsprechenden Prüfkörpern in Abbildung 20 gezeigt.

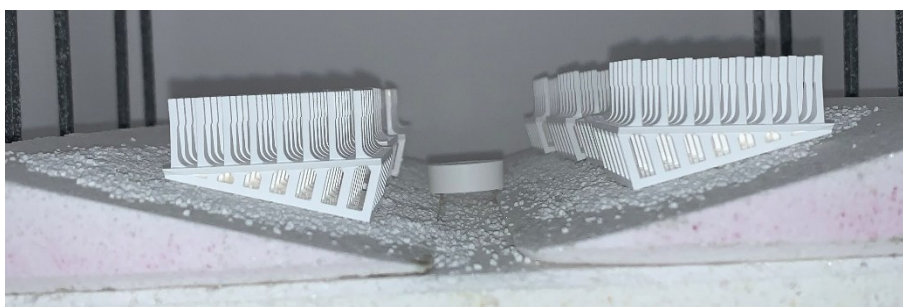


Abbildung 20: Darstellung des Innenraums des Hochtemperaturofens mit den Prüfkörpertypen B2 und den 15°-Sinterkeilen nach dem Sintervorgang. In der Mitte des Hochtemperaturofens ist der Prozess-Temperatur-Kontrollring und das Sintergranulat zu sehen.

In Tabelle 8 und Abbildung 21 werden die Parameter für den Sintervorgang aufgelistet und dargestellt.

Tabelle 8: Auflistung der thermischen Parameter für den finalen Post-Processing-Schritt „Sintern“

Sintern (Gesamtdauer Wärmebehandlung: 2 Tage)					
Aufheizdauer [h]	Aufheizdauer [hh:mm]	Heizrate [K/min]	Temperatur [°C]	Haltezeit [h]	Gesamtdauer [h]
			25		
1,01	01:00	2,90	200	0	
10	09:59	0,67	600	0	
6	06:00	1,53	1150	0	
9,5	09:30	0,87	1650	2	
9	09:00	-0,83	1200	0	
10,47	10:28	-1,83	50	0	
					47,98 (2 Tage)

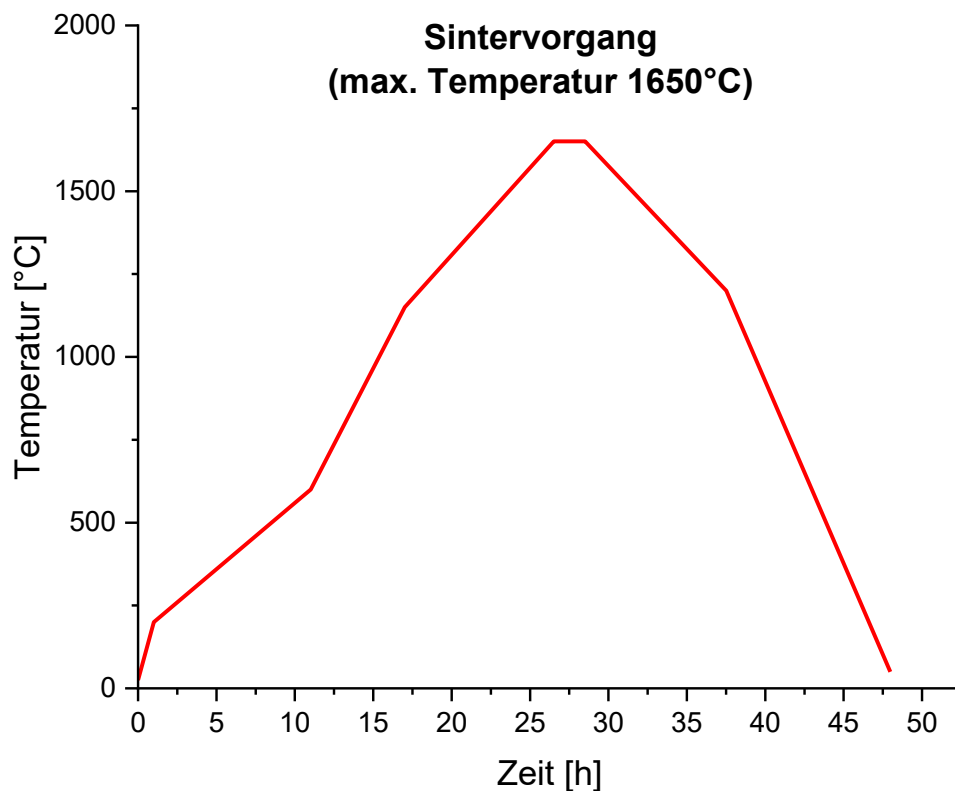


Abbildung 21: Temperatur-Zeit-Verlauf für den finalen Post-Processing-Schritt „Sintern“ mit einer maximalen Temperatur von 1650°C und einer Gesamtdauer von ca. 48 Stunden.

In Anhang C werden die Positionierungen der einzelnen Prüfkörpertypen in den entsprechenden Öfen während des jeweiligen Post-Processing-Schrittes aufgelistet und dargestellt.

4. Prüfaufbau und Messung der Festigkeit

4.1. Entwicklung und Anforderungen an den Prüfaufbau

Für die Entwicklung des Prüfaufbaus standen im Vorhinein einige Anforderungen fest. Für die Prüfung der Prüfkörper selbst war die Voraussetzung, diese mit einer geeigneten Prüfmaschine am ISFK mit einer zugehörigen Kraftmessdose zu messen. Jeder Biegebalken muss einzeln bis zum Bruch belastet werden können. Die Einleitung der Kraft im Kraftangriffspunkt (KAP) erfolgt über einen selbstkonstruierten Prüfdorn. Um ein Umspannen oder Versetzen der Prüfkörper während des Prüfvorgangs zu vermeiden, wurde ein Stelltisch in den Prüfaufbau integriert. Auf diesem Stelltisch wird ein Schraubstock montiert, in den der Prüfkörper eingespannt werden kann. Dieser Aufbau ermöglicht eine schnelle Veränderung der Position des Prüfkörpers in der X-Y-Ebene (normal zur Krafteinleitung). Der Stelltisch wurde von der Firma Paulitschek Maschinen- und Warenvertriebsgesellschaft mbH (Zeppelinstraße 3, 89231 Neu-Ulm, Deutschland) hergestellt und ist in Abbildung 22a und b gezeigt.

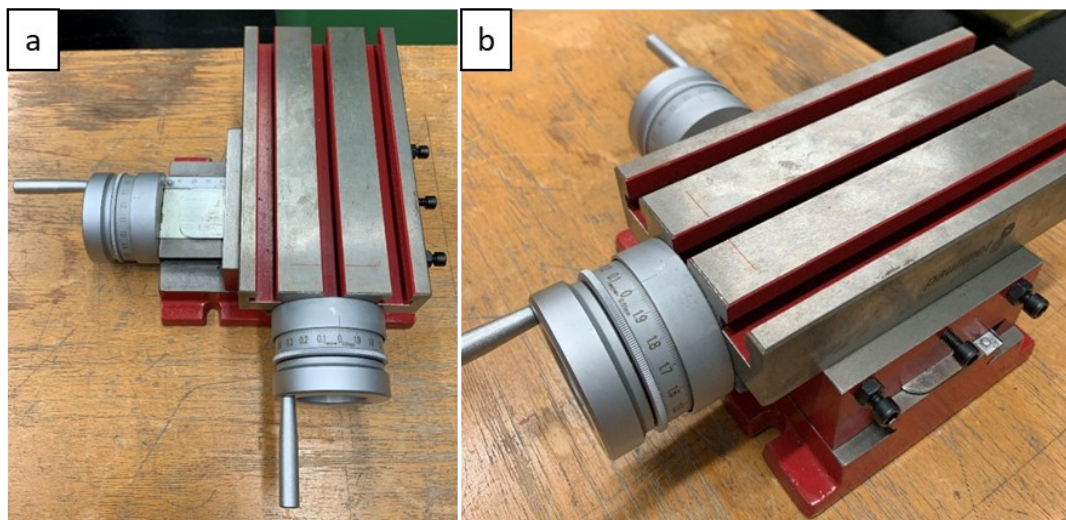


Abbildung 22: In a) und b) ist der verwendete Stelltisch für die Positionierung der Prüfkörper in x-y-Ebene gezeigt.

Damit der Prüfkörper normal zum Maschinentisch eingespannt ist, musste zusätzlich eine Aluminium-Anschlagplatte (siehe Abbildung 23) am Schraubstock montiert werden.

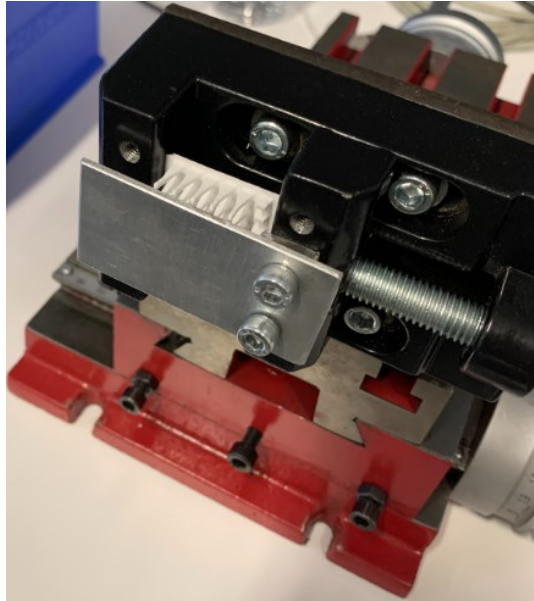


Abbildung 23: Darstellung der Aluminium-Anschlagplatte für die Positionierung der Prüfkörper normal zum Maschinentisch. Die Anschlagplatte kann wie in der Abbildung gezeigt mit zwei Schrauben am Schraubstock montiert werden.

Um die korrekte Positionierung des Prüfkörpers zu gewährleisten wurde zwischen dem Schraubstock und dem Stelltisch ein Metallplättchen zur parallelen Ausrichtung eingelegt, wie in Abbildung 24 im roten Kreis dargestellt.

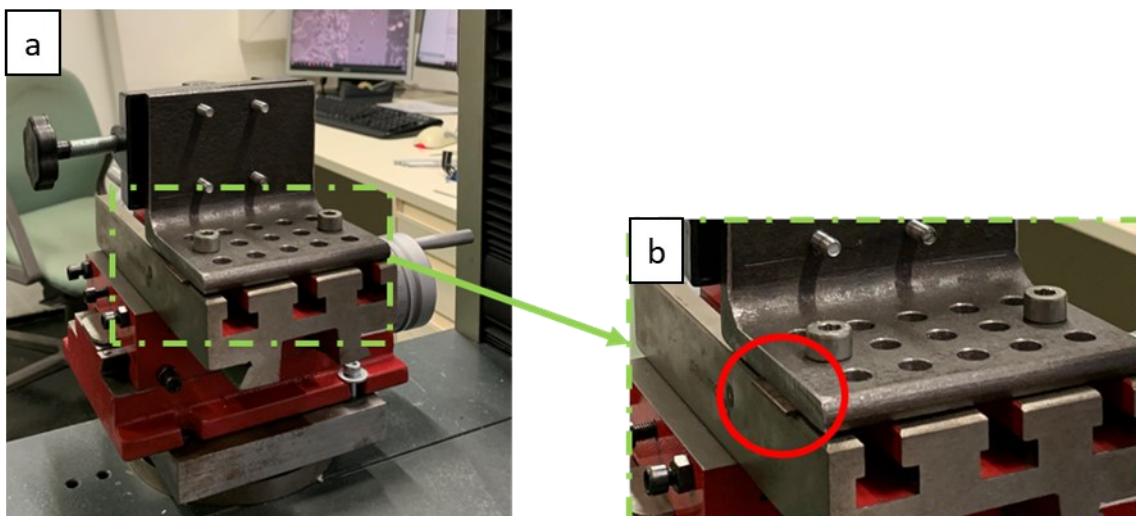


Abbildung 24: In **a**) ist die Rückseite des Schraubstockes mit der Befestigung durch Schrauben in den Nuten des Stelltisches gezeigt. In **b**) ist die parallele Ausrichtung des Schraubstockes durch ein dünnes Metallplättchen dargestellt.

Voraussetzung für den Prüfdorn war, jede Reihe einzeln testen zu können. Dazu musste er dünn und lang genug sein, um andere Reihen nicht zu berühren. Zusätzlich musste der Prüfdorn in der bereits vorhandenen Vorrichtung an der Kraftmessdose eingespannt werden können. Der für diese Arbeit konstruierte und verwendete Prüfdorn ist in Abbildung 25 dargestellt.



Abbildung 25: Darstellung des Prüfdorns, das rechte Ende dieses Dorns wurde für die Belastung der einzelnen Biegebalken verwendet. Der hintere Teil wurde so gefertigt, dass der Prüfdorn in die vorhandene Vorrichtung der Kraftmessdose integriert werden kann.

4.2. Prüfaufbau und Prüfablauf

4.2.1. Prüfmaschine

Alle Prüfkörper wurden mit der Universal-Prüfmaschine ZwickRoell Z010 der Firma ZwickRoell (August-Nagel-Straße 11, 89079 Ulm, Deutschland) mit der Kraftmessdose KAP-S der Firma A.S.T. - Angewandte System Technik GmbH, Mess- und Regeltechnik (Marschnerstraße 26, 01307 Dresden, Deutschland) (Maximallast 200 N) geprüft. Abbildung 26a und b zeigt die Prüfmaschine mit dem gesamten Versuchsaufbau.

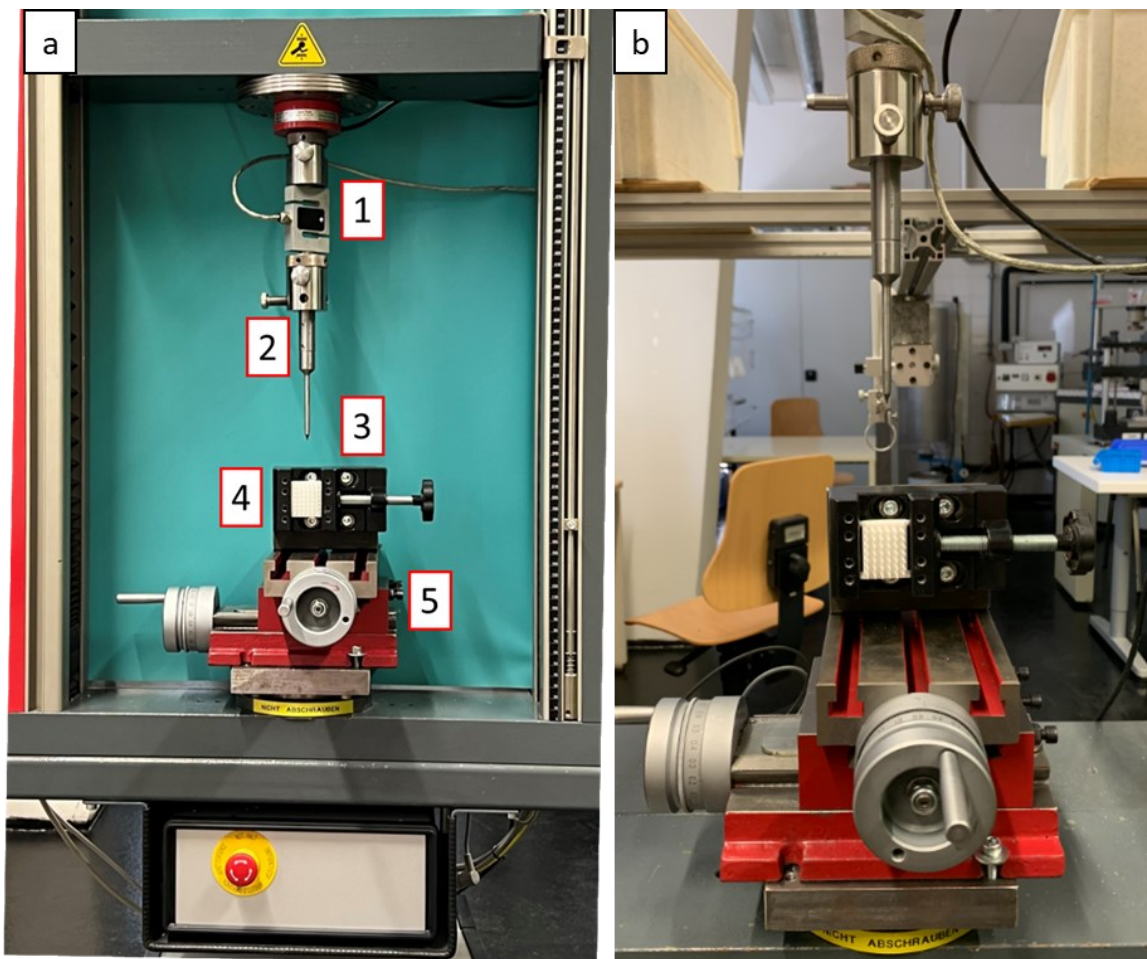


Abbildung 26: In **a**) ist der gesamte Prüfaufbau dargestellt, mit den Komponenten: **(1)** Kraftmessdose, **(2)** Prüfdorn, **(3)** Schraubstock, **(4)** Prüfkörper und **(5)** Stelltisch In **b**) ist dieser Prüfaufbau nochmals dargestellt.

4.2.2. Prüfablauf

Alle Prüfkörpertypen wurden nach dem gleichen Schema geprüft. Verwendete Software ist „DOLI Test & Motion“ der DOLI Elektronik GmbH (Adi-Maislinger-Straße 7, 81373 München, Deutschland). Zu Beginn wird der erste Biegebalken (Biegebalken A1, siehe Abbildung 16) mit dem Prüfdorn manuell angefahren. Der Prüfdorn wird so positioniert, dass sich dieser im Lot des aufgedruckten Kraftangriffpunktes (KAP) des Biegebalkens befindet. In dieser Position wird mithilfe der Software die Position und die Prüfkraft auf 0 tariert. Der Prüfablauf wird gestartet und der Biegebalken wird mit dem Prüfdorn bis zum Bruch belastet. Dabei ist die Prüfgeschwindigkeit $v = 1 \frac{mm}{min}$. Die Software zeichnet automatisch den Prüfkraftverlauf auf, siehe Abbildung 27. Aufgrund dieser langsamen Prüfgeschwindigkeit folgt der „Vorversuch“, der das Überbrücken der Abstände zwischen den Biegebalken regelt. In diesem Bereich wird die Geschwindigkeit auf $v = 20 \frac{mm}{min}$ für einen Weg $s = 3mm$ erhöht. Anschließend kann der Prüfdorn erneut im Lot des KAP positioniert werden und die Position wird auf 0 tariert. Der Prüfablauf wird gestartet und der nächste Biegebalken wird bis zum Bruch belastet.

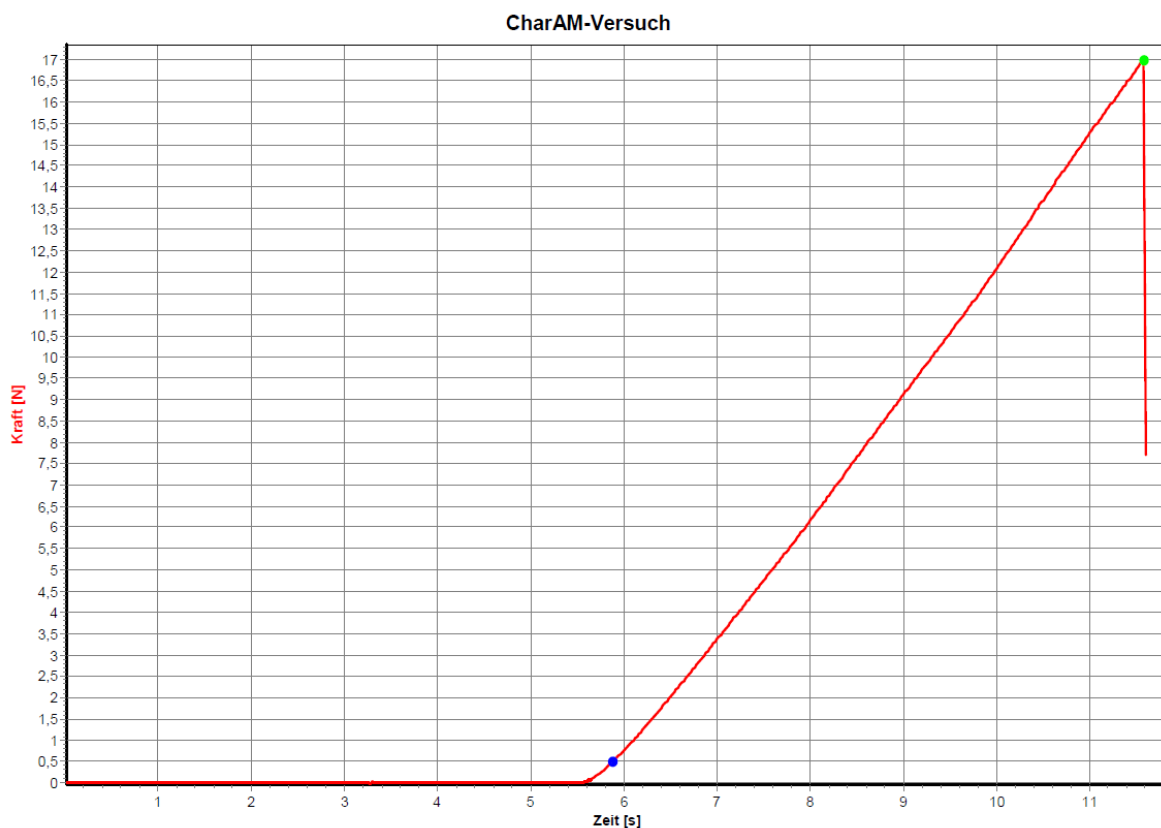


Abbildung 27: Darstellung eines gültigen linearen Kraft-Zeit-Verlaufs eines Biegebalkens bis zum Bruch. Der grüne Punkt kennzeichnet den Zeitpunkt des Bruches. Der blaue Punkt befindet sich bei 10% der maximalen Prüfkraft und kennzeichnet den Beginn der Zeitmessung. Die gültige Prüfdauer liegt zwischen dem blauen und dem grünen Punkt und soll zwischen 5 bis 15 Sekunden betragen.

4 Prüfaufbau und Messung der Festigkeit

Die gültige Prüfdauer für die einzelnen Biegebalken liegen zwischen 5 und 15 Sekunden [32]. Zusätzlich muss auch ein linearer Kraft-Zeit-Verlauf von der Belastung bis zum Bruch gegeben sein. Ein gültiger Kraft-Zeit-Verlauf ist in Abbildung 27 gezeigt. Zwei ungültige Verläufe sind in Abbildung 28 dargestellt.

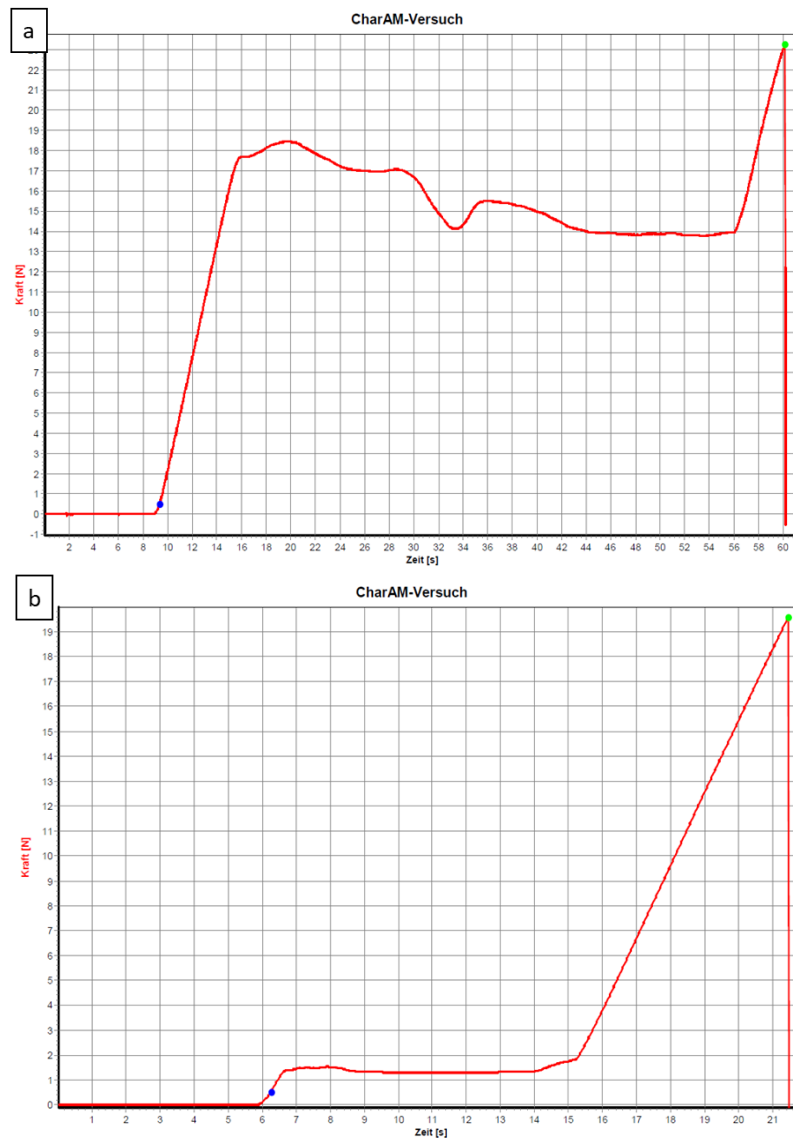


Abbildung 28: In **a**) ist der ungültige Kraft-Zeit-Verlauf auf einen falsch eingespannten Prüfkörper im Schraubstock zurückzuführen. Erst als sich dieser mit dem Schraubstock verkantet hatte, konnte bis zum Bruch belastet werden. In **b**) ist der ungültige Kraft-Zeit-Verlauf auf einen gelockerten Prüfdorn zurückzuführen. Der Prüfdorn ist erst dann in der Lage Last zu übertragen, wenn er am Anschlag der Prüfvorrichtung ist. Dies ist durch den konstanten Verlauf der Prüfkraft bei 7-15 Sekunden gekennzeichnet. Danach wird der Biegebalken bis zum Bruch belastet.

4.2.3. Spannungsberechnung

Um eine konsistente Auswertung zu gewährleisten, ist es notwendig nur gültig gebrochene Biegebalken in die Auswertung einzubeziehen. Für die Bewertung von gültig gebrochenen Biegebalken gibt es mehrere Kriterien, die erfüllt werden müssen. Ein gebrochener Biegebalken gilt als gültig, wenn er im Prüfbereich mit konstanter Spannung gebrochen ist, d.h. wenn sich die Bruchlänge in einen vorgegebenen Bereich befindet. Wie in Abbildung 13 gezeigt, ist der gültige Bereich (gekennzeichnet durch den schraffierten Bereich), jener Bereich mit konstanter Dicke des Biegebalkens. Die gültigen Bruchlängen l_B für die Prüfkörpertypen sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Auflistung der gültigen Bruchlängen in mm, diese Bruchlänge befinden sich im Bereich konstanter Dicke des Biegebalkens, dargestellt in Abbildung 13.

Prüfkörpertypen	Gültige Bruchlänge l_B [mm]
Prüfkörpertyp A (0°-Prüfkörper)	4,4 – 8,16
Prüfkörpertyp B1 (15°-Prüfkörper)	4,4 – 8,16
Prüfkörpertyp B2 (15°-gedreht-Prüfkörper)	4,4 – 8,16

4 Prüfaufbau und Messung der Festigkeit

Es ergeben sich weitere Kriterien zur Beurteilung der Gültigkeit jedes einzelnen Bruchversuches. In Abbildung 29 sind die gültigen Biegebalken für den Prüfkörper B2_D2_P2 beispielhaft dargestellt. Die Auswertungen für die Gültigkeit jedes einzelnen Biegebalkens befinden sich in Anhang D. In Tabelle 10 ist die Farbcodierung der unterschiedlichen Kriterien aufgelistet. Die Farbcodierungen bedeuten:

- **Blau:** ungültiger Kraft-Zeitverlauf (siehe Abbildung 28)
- **Orange:** die Prüfdauer wurde über- oder unterschritten
- **Rot:** die gültige Bruchlänge liegt nicht im geforderten Bereich (siehe Tabelle 9)
- **Gelb:** zerstörte Biegebalken durch gelockerten Prüfdorn (gilt nur für Prüfkörper B2_D2_P2)
- **Grau:** Biegebalken wurde nicht geprüft

Tabelle 10: Farbcodierung für die Gültigkeitskriterien der gebrochenen Biegebalken.

SV	Spannungsverlauf
t	Prüfdauer
BL	Bruchlänge
*	Prüfdorn
-	Keine Probe vorhanden

B2_D2_P1						B2_D2_P2 (Gültig=29)					
A1	B1	C1	D1	E1	F1	A1 SV	B1	C1	D1 BL	E1 *	F1 BL
A2	B2	C2	D2	E2	F2	A2 SV	B2	C2	D2	E2 *	F2
A3	B3	C3	D3	E3	F3	A3	B3	C3	D3	E3 *	F3 BL
A4	B4	C4	D4	E4	F4	A4	B4	C4	D4	E4 *	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5	A5	B5	C5	D5	E5 *	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6	A6	B6	C6	D6 *	E6 *	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7	A7 BL	B7	C7 BL	D7 *	E7 *	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8	A8	B8 BL	C8	D8 *	E8 *	F8

Abbildung 29: Auswertung der Gültigkeit der einzelnen Biegebalken des Prüfkörpers B2_D2_P2. In dieser Abbildung ist durch die Farbcodierung zu erkennen, welches Gültigkeitskriterium nicht erreicht wurde. **Blau:** ungültiger Spannungsverlauf, **Rot:** ungültige Bruchlänge und **Weiß:** gültige Biegebalken. Bei dieser Probe gibt es zusätzlich die **gelbe** Farbcodierung: Prüfdorn gelockert. Der Prüfkörper B2_D2_P1 wurde nicht geprüft und ist deshalb **grau** schattiert.

Die gelbe Farbcodierung stellt bei diesem Prüfkörper eine Besonderheit dar, da diese Biegebalken bei der Prüfung durch einen gelockerten Prüfdorn zerstört wurden und daher nicht gültig sind (Biegebalken D6-E8).

4.3. Vermessung der Biegebalken

4.3.1. Vermessung der Bruchlänge l_B

Für die Vermessung der Proben wurde das Stereomikroskop Olympus SZH10 „Research Stereo“ mit den Belichtungseinheiten Highlight 3001 und KL 2500 LCD verwendet. Als Objektiv wurde das DF PLANAPO 1x verwendet. Die Software Stream Motion wurde zur Auswertung und Bearbeitung der aufgenommenen Bilder verwendet. Alle Geräte und die verwendete Software sind von der Olympus Austria GesmbH (Shuttleworthstrasse 25, 1210 Wien, Österreich) hergestellt.

Um die Gültigkeit der Versuche auf Basis der Bruchlänge bestimmen zu können, war es notwendig, alle gebrochenen Biegebalken mithilfe des Stereomikroskops zu untersuchen. Jene Biegebalken, die offensichtlich zu lang oder zu kurz gebrochen sind, wurden bereits im Vorhinein als ungültig eingestuft. In Abbildung 30 ist eine Auswertung der Bruchlänge dargestellt, als Tool in der Software wurde der Lotabstand gewählt.

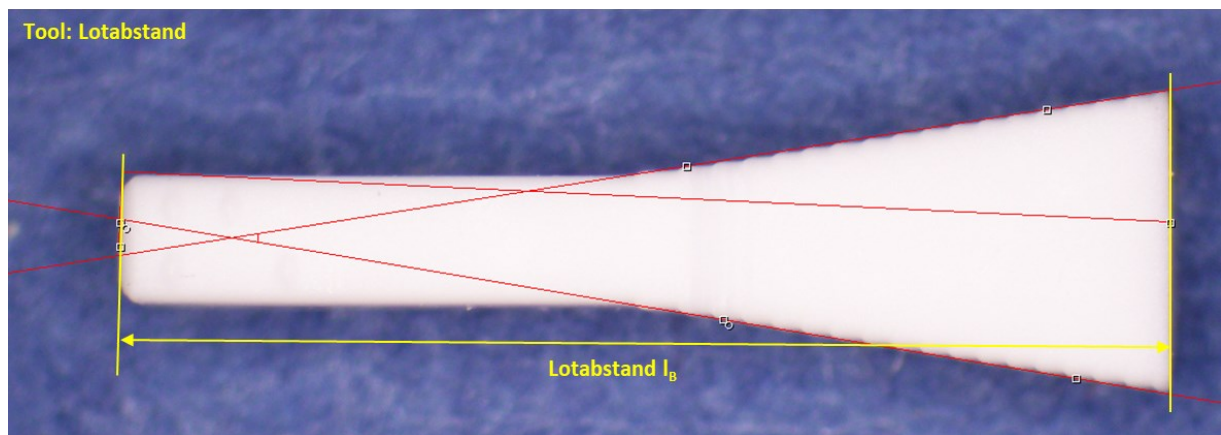


Abbildung 30: Vermessung der Bruchlänge l_B mit dem Tool „Lotabstand“ in Stream Motion. Der Lotabstand ist mit der gelben Bemessungslinie gekennzeichnet.

4.3.2. Vermessung von Winkel α (Steigung k)

Die Messung des Winkels α wurde an abgebrochenen Probenstücken mit dem Stereomikroskop durchgeführt, indem der Öffnungswinkel des Prüfbereichs der Biegebalken bestimmt wurde, dargestellt in Abbildung 31. Als Vermessungstool in Stream Motion wurde der 4-Punkt-Winkel verwendet.

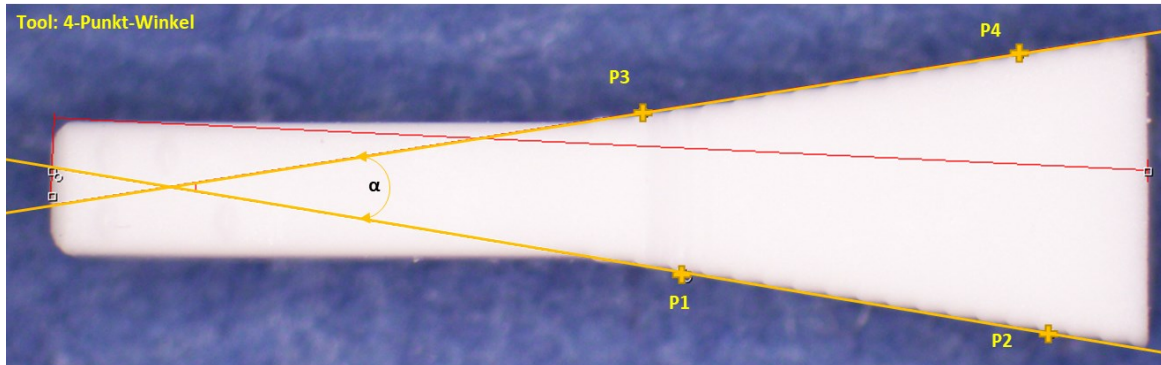


Abbildung 31: Vermessung von Winkel α mit dem Tool „4-Punkt-Winkel“ in Stream Motion. Die vier Punkte P1-P4 sind mit orangen Kreuzen gekennzeichnet.

4.3.3. Vermessung der Bruchflächen

Die Aufnahmen der Bruchflächen wurden mit Stream Motion durchgeführt. Eine beispielhafte Aufnahme einer Bruchoberfläche ist in Abbildung 32 dargestellt. Um einen besseren Kontrast zur Bodenplatte des Prüfkörpers zu erzeugen wurde eine Schablone angefertigt. Man erkennt diese Schablone in Abbildung 32 als unscharfen, grünen Hintergrund.

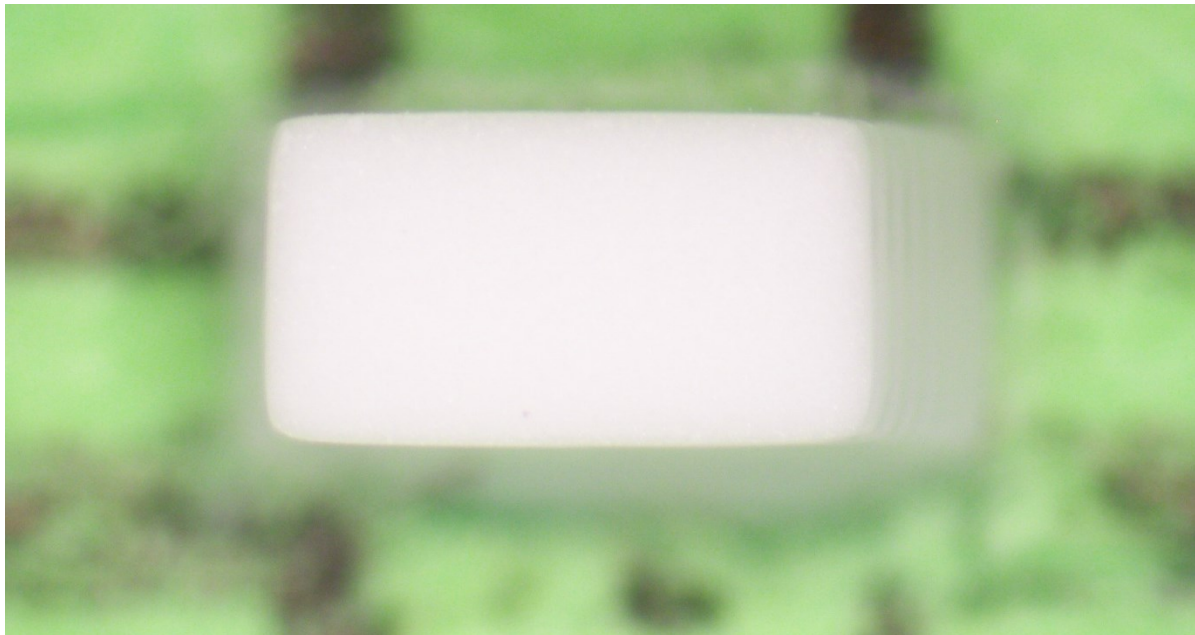


Abbildung 32: Aufnahme einer Bruchoberfläche in Stream Motion. Im Hintergrund erkennt man die grüne Schablone.

Die Vermessung der Bruchflächen wurde durchgeführt, um die Breite b und maximale Höhe h_{max} der Querschnitte der Biegebalken zur Spannungsberechnung zu bestimmen. Aus den Werten von b und h_{max} kann mit Gleichung 21 das Flächenträgheitsmoment (FTM) für einen rechteckigen Querschnitt bestimmt werden. In Abbildung 33 sind die notwendigen Abmessungen für die Berechnung des FTM mit der analytischen Gleichung dargestellt.

$$I_{ideal} = \frac{b * h_{max}^3}{12} \quad (21)$$

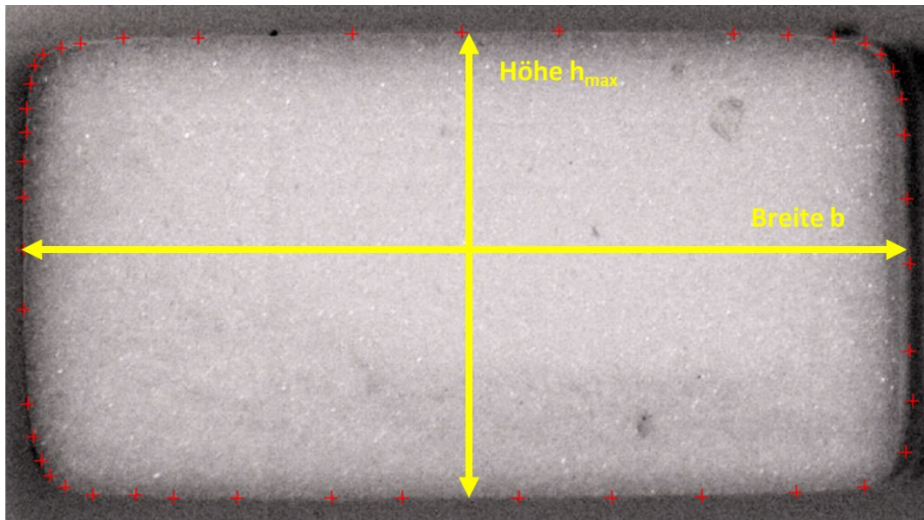


Abbildung 33: Abmessungen Höhe h_{max} und Breite b für die Berechnung des FTM

Wie in Anhang E gezeigt, kann mithilfe der CAD-Konstruktionssoftware CATIA V5R19 (Dassault Systèmes, 10, Rue Marcel Dassault, Vélizy-Villacoublay 78140, Frankreich) das FTM numerisch bestimmt werden. Damit nun eine entsprechende Fläche in CATIA erzeugt werden kann, muss die der Umfang der Bruchfläche mit Punkte konstruiert werden, dargestellt in Abbildung 34.

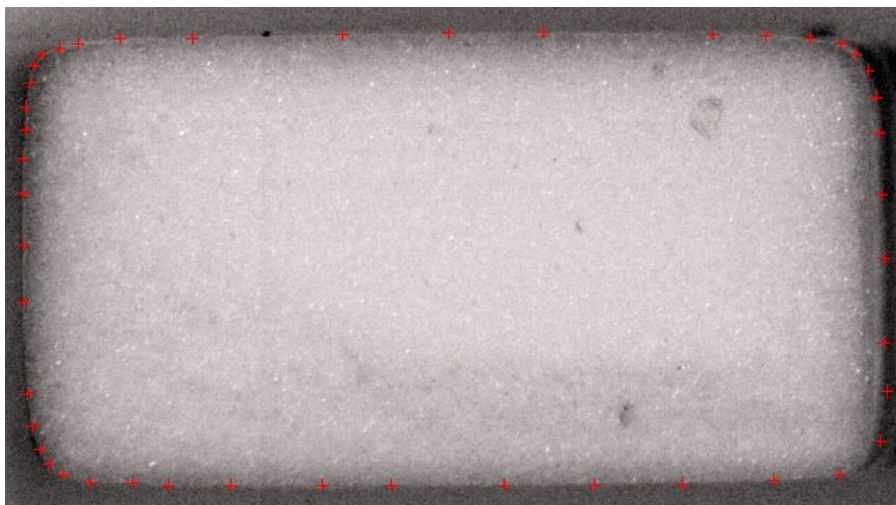


Abbildung 34: Gewählte Punkte in Stream Motion für die Übertragung dieser Koordinaten nach Excel für das „Generative Shape Design“.

Die in Stream Motion aufgenommenen Punkte können in Excel exportiert werden. Mit einem geeigneten Makro („Generative Shape Design“) ist es möglich die Punkte direkt in CATIA zu übertragen und mit dem Spline-Modus eine Fläche zu erzeugen, dargestellt in Abbildung 35.

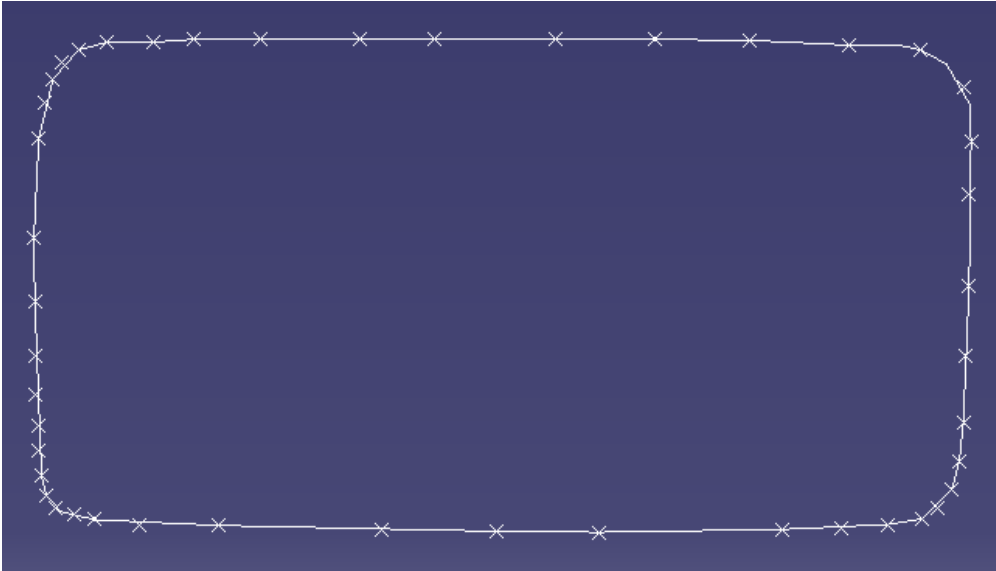


Abbildung 35: Erzeugte Fläche durch das Makro „Generative Shape Design“ und dem Spline-Modus in CATIA.

Wie in Anhang E beschrieben kann das FTM dieser Fläche bestimmt und mit dem FTM aus Gleichung 21 verglichen werden.

5. Ergebnisse

5.1. Abmessungen der Proben

Zur Berechnung der Biegespannung σ_B mit Gleichung 20 sowie der Bestimmung der Gültigkeit der Biegebalken in Bezug auf die Bruchlänge ist es notwendig k , h_{max} und l_B zu bestimmen. Abbildung 36 - Abbildung 38 zeigen „Box-Plots“ dieser Variablen, in denen die statistischen Verteilungen der Messwerte dargestellt werden. In Abbildung 36 sind die Bruchlängen l_B aller gültigen Biegebalken dargestellt.

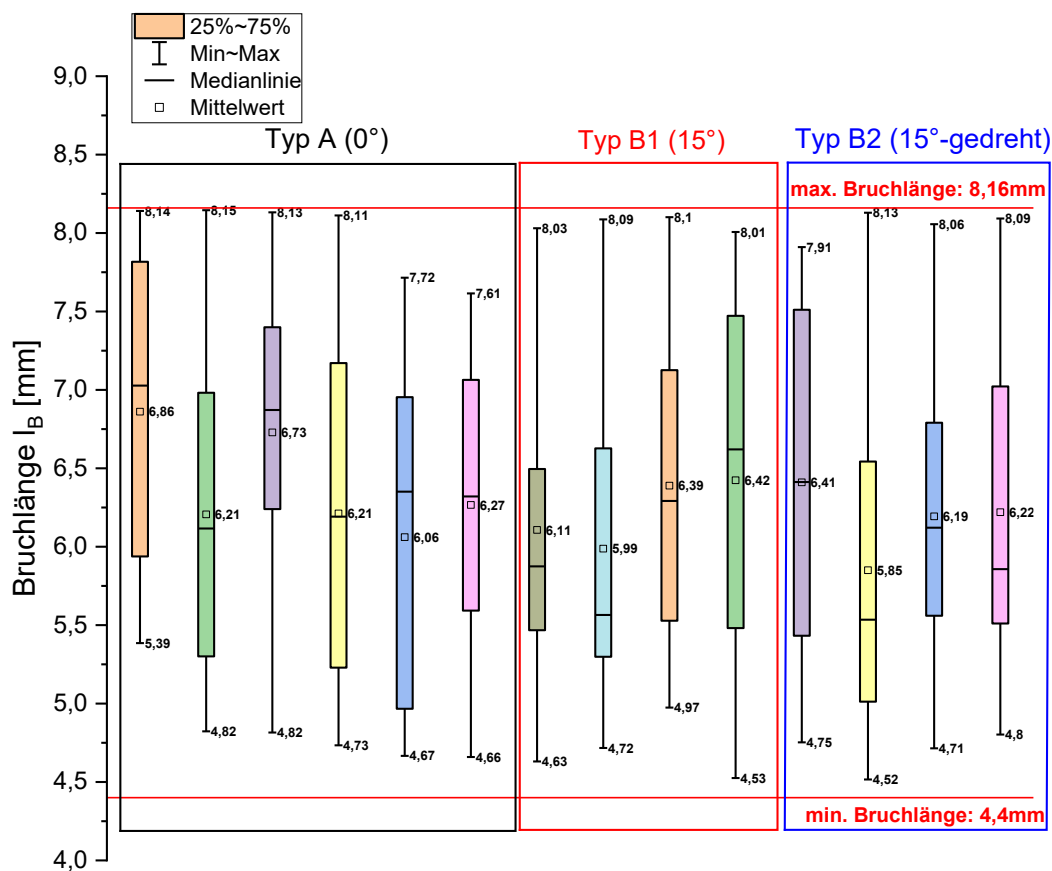


Abbildung 36: Darstellung der gültigen Bruchlängen aller drei Prüfkörpertypen. Dargestellt sind die Maxima und Minima sowie der Mittelwert, gekennzeichnet durch das Viereck. Weiters zeigen die eingefärbten Boxen den Bereich in dem sich 25 - 75% der Messergebnisse befinden. Die Ergebnisse von Typ A sind im **schwarzen** Kasten, jene von Typ B1 im **roten** Kasten und jene vom Typ B2 in einem **blauen** Kasten hervorgehoben. Durch die roten horizontalen Linien wird die maximale und minimale gültige Bruchlänge dargestellt.

In Abbildung 36 erkennt man, dass die maximalen und minimalen Bruchlängen in einem ähnlichen Bereich liegen. Die Mittelwerte variieren von 5,85 – 6,86 mm und befinden sich für alle Prüfkörpertypen in einem ähnlichen Bereich.

In Abbildung 37 ist der Box-Plot für h_{max} dargestellt. Es sei erwähnt, dass nur jene h_{max} ausgewertet wurden, bei denen die Biegebalken im Bereich der gültigen Bruchlängen liegen.

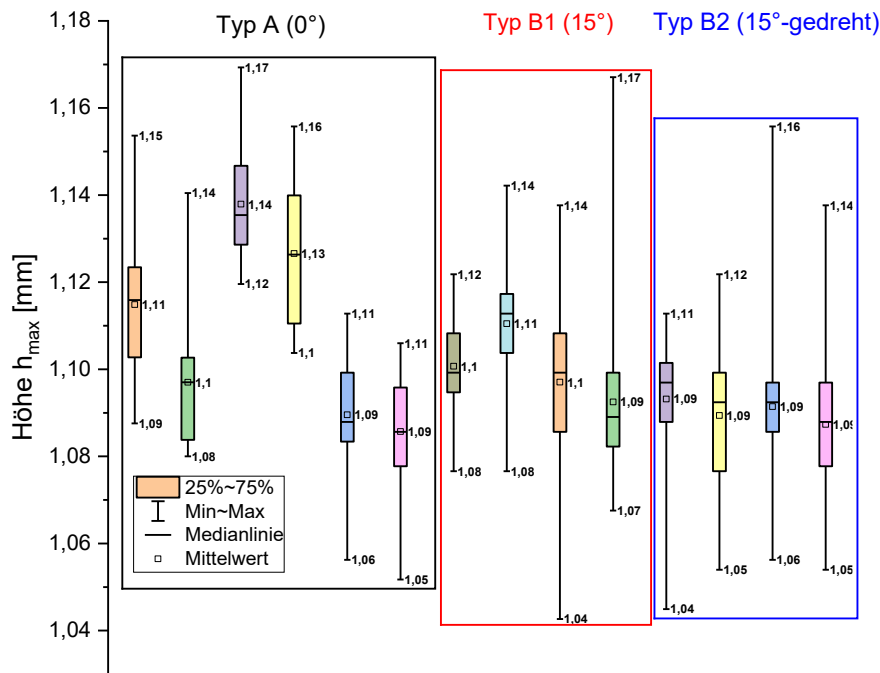


Abbildung 37: Darstellung von h_{max} aller drei Prüfkörpertypen. Dargestellt sind die Maxima und Minima sowie der Mittelwert, gekennzeichnet durch das Viereck. Weiters zeigen die eingefärbten Boxen den Bereich in dem sich 25 - 75% der Messergebnisse befinden. Die Ergebnisse von Typ A sind im **schwarzen** Kasten, jene von Typ B1 im **roten** Kasten und jene vom Typ B2 in einem **blauen** Kasten hervorgehoben.

In Abbildung 37 ist eine Streuung innerhalb der Messdaten des Prüfkörpertyps A zu erkennen, vor allem für die Mittelwerte des zweiten Druckjobs. Für die Prüfkörpertypen B1 und B2 sind die Mittelwerte sehr ähnlich. Die maximalen und minimalen h_{max} liegen für die Prüfkörpertypen B1 und B2 in einem ähnlichen Bereich, für Prüfkörpertyp A liegen die Werte für den zweiten Druckjob höher als für die anderen Druckjobs.

In Abbildung 38 ist der Box-Plot für den Winkel α dargestellt. Es sei erwähnt, dass nur jene α ausgewertet wurden, bei denen die Biegebalken im Bereich der gültigen Bruchlängen liegen.

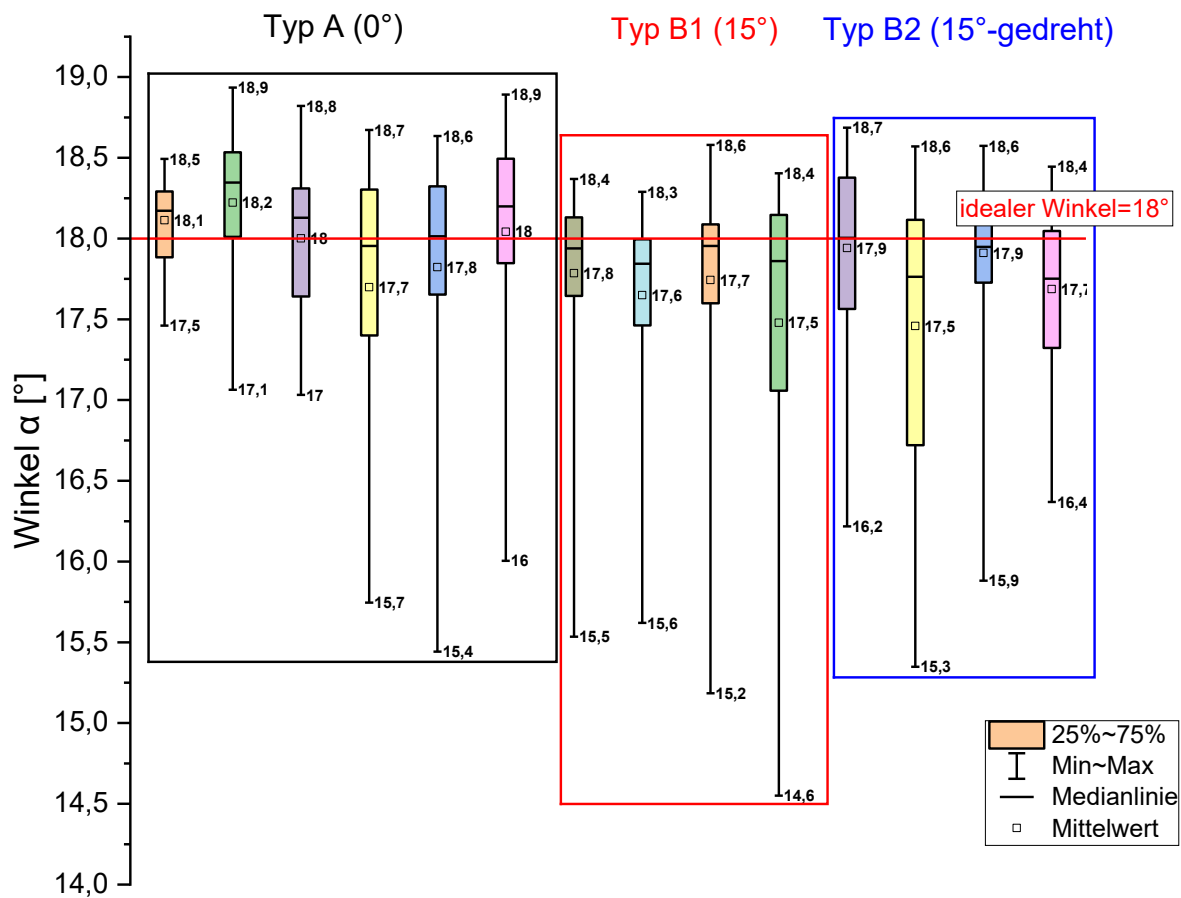


Abbildung 38: Darstellung des Winkels α aller drei Prüfkörpertypen. Dargestellt sind die Maxima und Minima sowie der Mittelwert, gekennzeichnet durch das Viereck. Weiters zeigen die eingefärbten Boxen den Bereich in dem sich 25 - 75% der Messergebnisse befinden. Die Ergebnisse von Typ A sind im **schwarzen** Kasten, jene von Typ B1 im **roten** Kasten und jene vom Typ B2 in einem **blauen** Kasten hervorgehoben. Durch die rote horizontale Linie wird der ideale Winkel $\alpha=18^\circ$ dargestellt.

In Abbildung 38 erkennt man eine starke Streuung der maximalen und minimalen Werte des Winkels. Die Mittelwerte hingegen liegen für alle drei Prüfkörpertypen in einem ähnlichen Bereich. Die Winkel liegen eher im Bereich unterhalb des idealen (konstruierten) Winkels $\alpha = 18^\circ$.

5.2. Weibull-Auswertung

Die Weibull-Diagramme werden für jeden Prüfkörper ausgewertet. Es folgen Weibull-Plots für jeden Prüfkörpertyp. Die gesammelten Diagramme befinden sich in Anhang D. Beginnend mit dem Prüfkörpertyp A, ist in Abbildung 39 der Prüfkörper A_D3_P1 dargestellt.

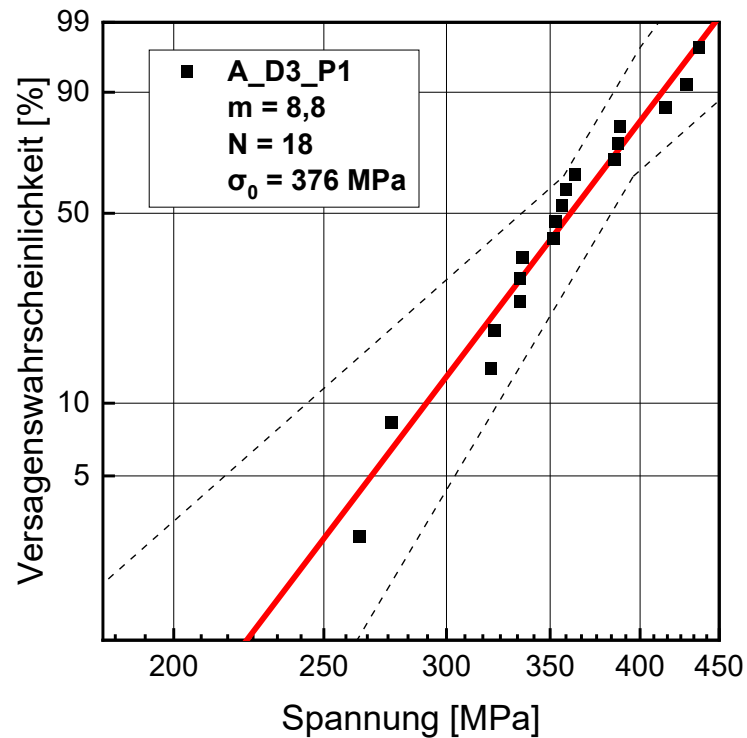


Abbildung 39: Weibull-Diagramm für den Prüfkörper A_D3_P1. Dieser Prüfkörper zeigt die höchste charakteristische Festigkeit σ_0 und die geringste Anzahl an gültigen Biegebalken.

In Abbildung 40 ist das Weibull-Diagramm des Prüfkörpers B1_D3_P2 dargestellt.

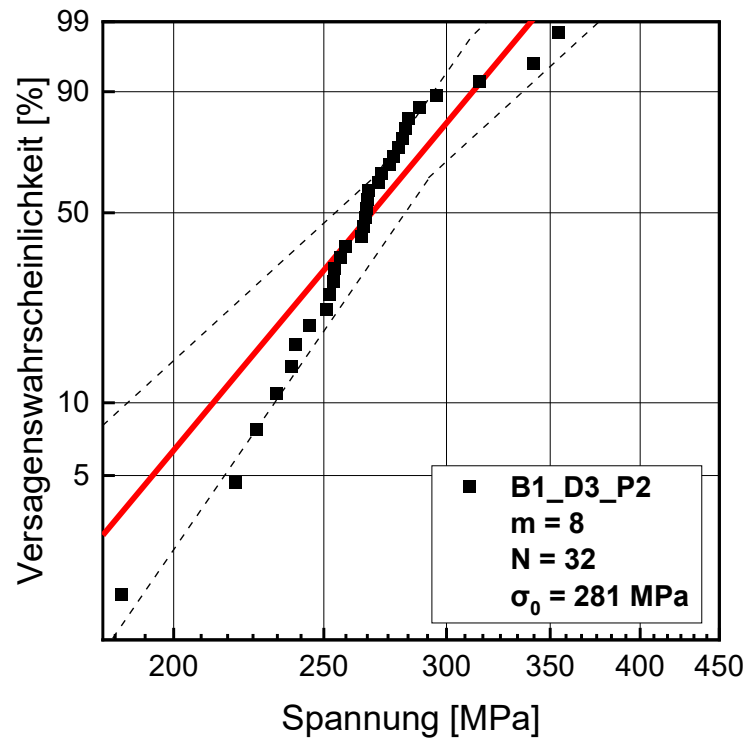


Abbildung 40: Weibull-Diagramm für den Prüfkörper B1_D3_P2. Dieser Prüfkörper zeigt die niedrigste charakteristische Festigkeit σ_0 .

In Abbildung 41 ist der Prüfkörper B2_D2_P2 dargestellt.

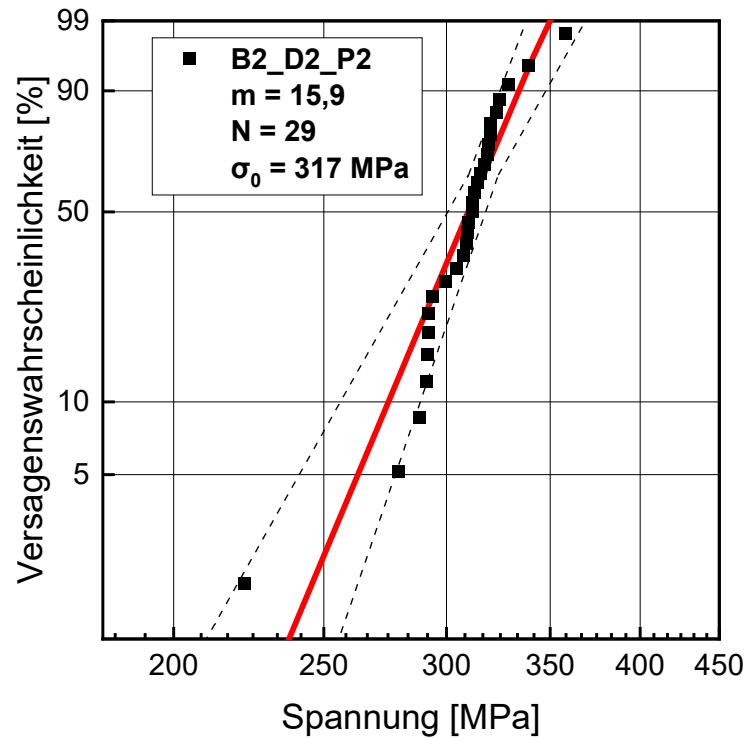


Abbildung 41: Weibull-Diagramm für den Prüfkörper B2_D2_P2. Bei diesem Prüfkörper wurden einzelne Biegebalken (D6-E8) durch den gelockerte Prüfdorn zerstört.

Um einen Unterschied zwischen den Prüfkörpern feststellen zu können, werden in einem Diagramm Weibull-Modul m über charakteristische Festigkeit σ_0 dargestellt. Jene Prüfkörper, bei denen sich die Konfidenzintervalle von m und σ_0 überschneiden, können zusammen ausgewertet werden. Das Kriterium, damit zwei Prüfkörper zusammen ausgewertet werden können, ist, dass diese im selben Druckjob hergestellt wurden. In Abbildung 42 ist dieses Diagramm für den Prüfkörpertyp A dargestellt.

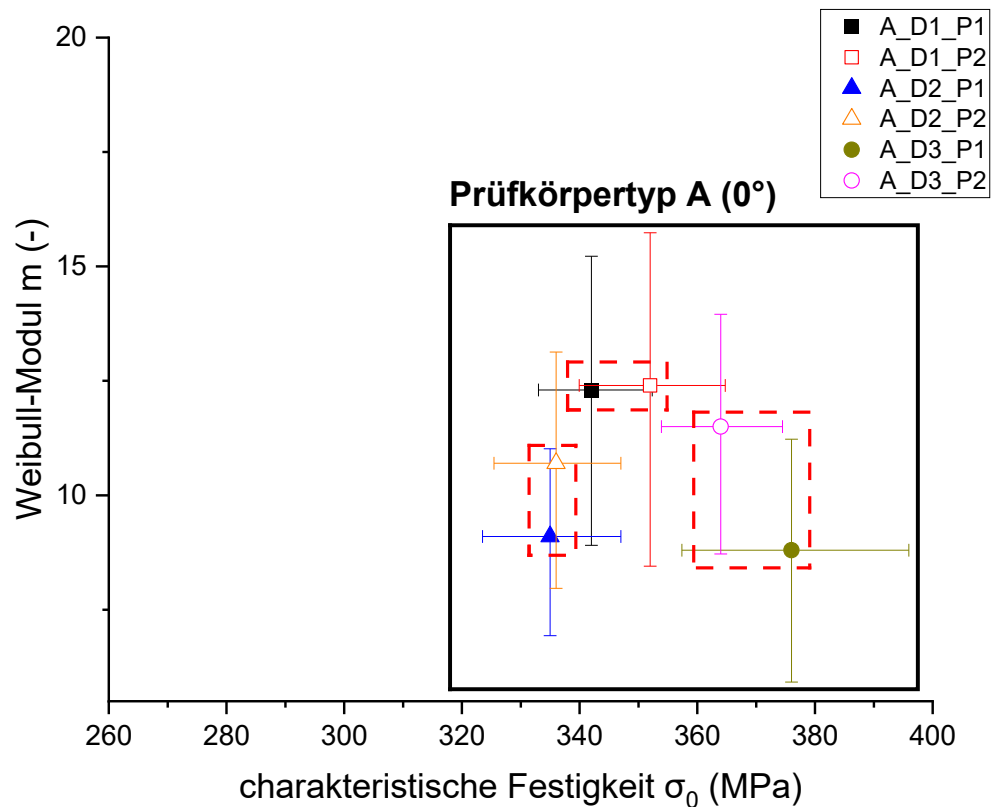


Abbildung 42: Darstellung des Weibull-Moduls m über die charakteristische Festigkeit σ_0 für den Prüfkörpertyp A. Die rot gestrichelten Boxen zeigen die Überlappungen der Konfidenzintervalle an. In diesem Fall können die beiden Prüfkörper der drei Druckjobs jeweils zusammen ausgewertet werden.

In Abbildung 42 erkennt man, dass alle drei Druckjobs zusammengefasst werden können.

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse für den Prüfkörpertyp B1 dargestellt.

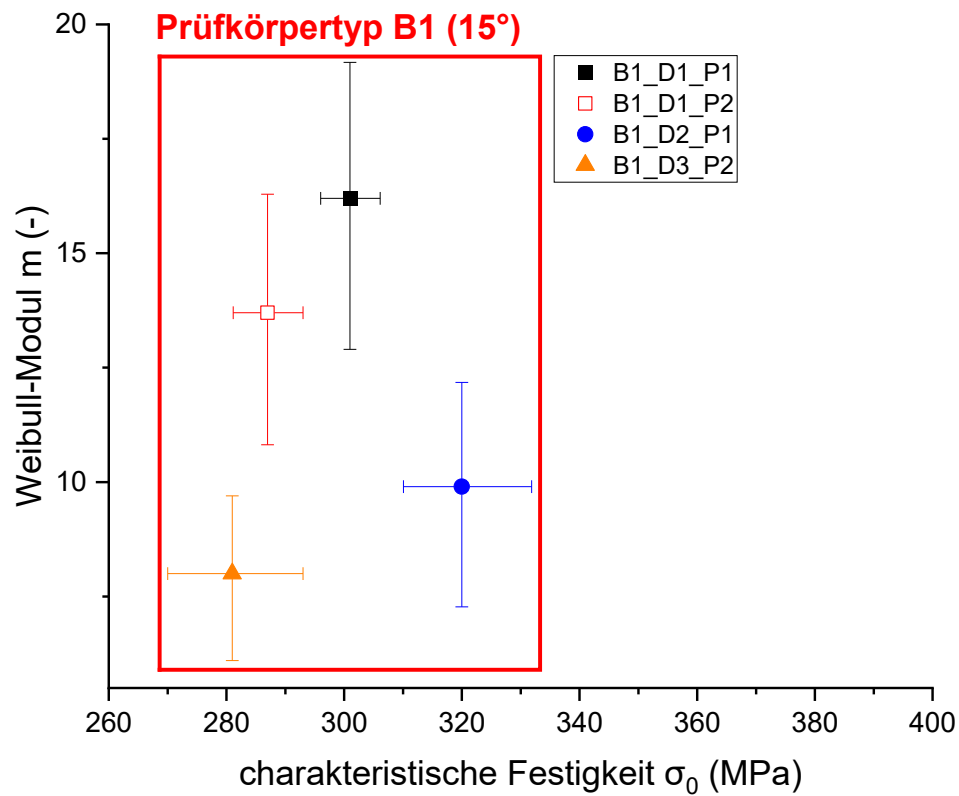


Abbildung 43: Darstellung des Weibull-Moduls m über die charakteristische Festigkeit σ_0 für den Prüfkörpertyp B1, in diesem Fall gibt es keine Überlappung der Konfidenzintervalle.

Es konnten keine Prüfkörper gemeinsam ausgewertet werden. Man erkennt innerhalb eines einzelnen Druckjobs einen Unterschied in den Ergebnissen (schwarzer und roter Datenpunkt).

In Abbildung 44 sind die Ergebnisse für den Prüfkörpertyp B2 dargestellt.

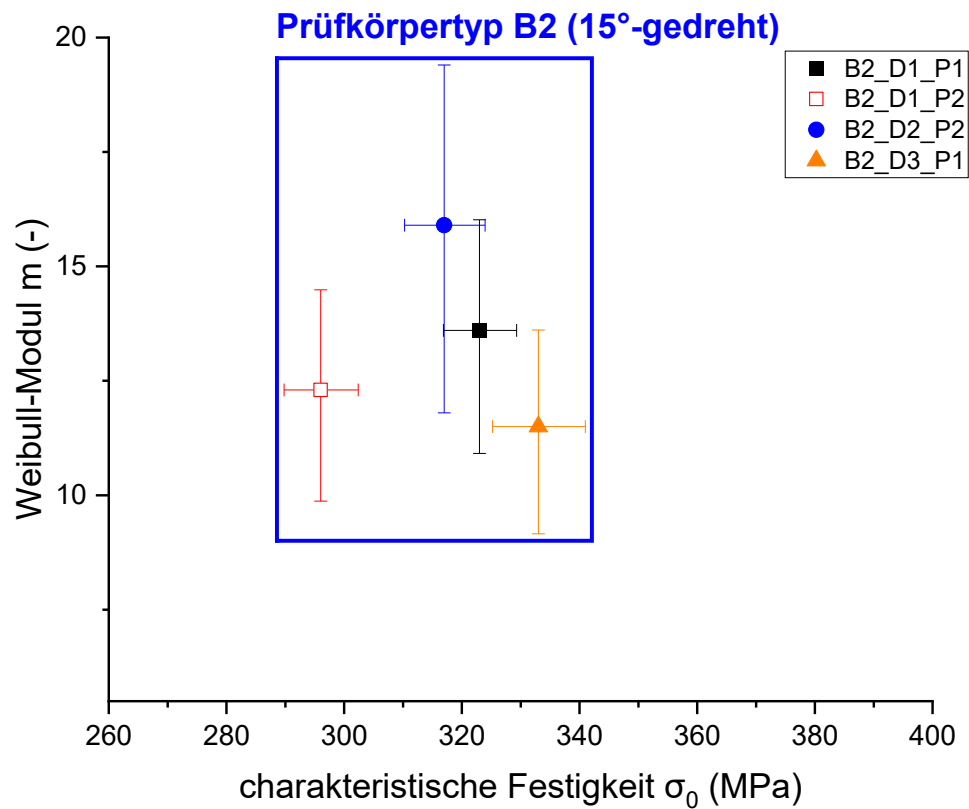


Abbildung 44: Darstellung des Weibull-Moduls m über die charakteristische Festigkeit σ_0 für den Prüfkörpertyp B2, in diesem Fall gibt es keine Überlappung der Konfidenzintervalle.

Es konnten keine Prüfkörper gemeinsam ausgewertet werden. Man erkennt innerhalb eines einzelnen Druckjobs einen Unterschied in den Ergebnissen (schwarzer und roter Datenpunkt).

Damit die Weibull-Moduli und die charakteristischen Festigkeiten der einzelnen Orientierungen miteinander verglichen werden können, werden Weibull-Modul und charakteristische Festigkeit für alle Prüfkörper abgebildet. In Abbildung 45 werden die Weibull-Moduli aller Prüfkörper dargestellt.

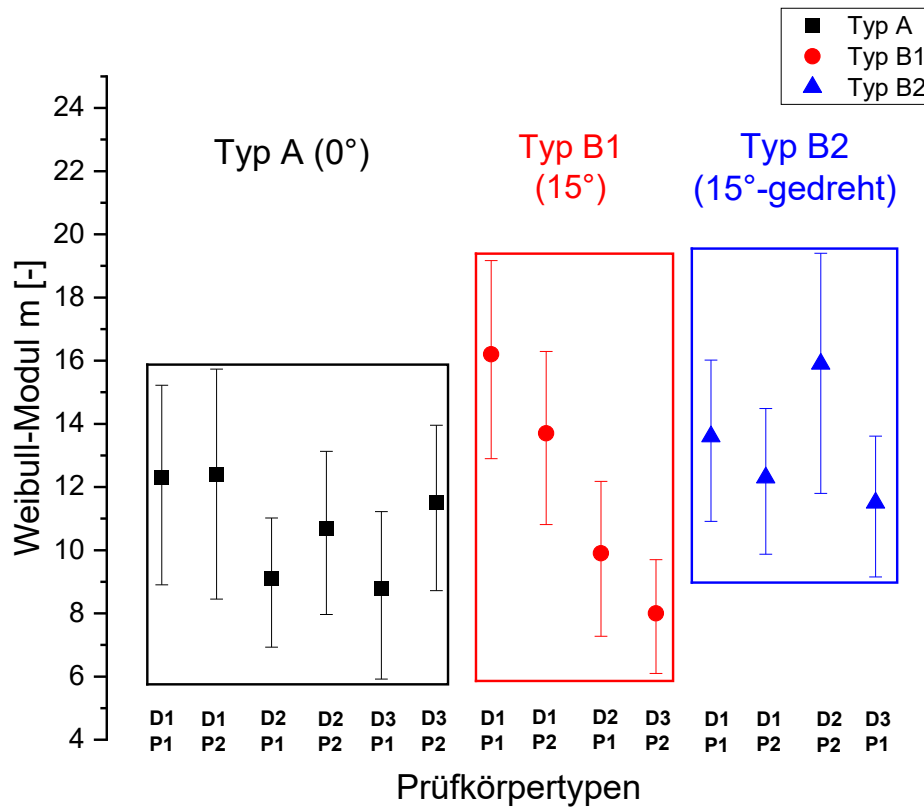


Abbildung 45: Vergleich von m für alle Prüfkörpertypen. In **Schwarz** wird der Prüfkörpertyp A, in **Rot** der Typ B1 und in **Blau** der Typ B2 gekennzeichnet.

In Abbildung 45 erkennt man, dass sich m für alle Druckorientierungen zwischen 8 und etwa 16 bewegt. Für den Prüfkörpertyp A variiert m von 9-12. Beim Prüfkörpertyp B1 erkennt man eine starke Streuung von 8-16,2, wohingegen beim Prüfkörpertyp B2 höhere Werte von 11,5 bis 15,9 resultieren. In Abbildung 46 sind zusätzlich die zusammengefassten Weibull-Moduli für den Prüfkörpertyp A dargestellt.

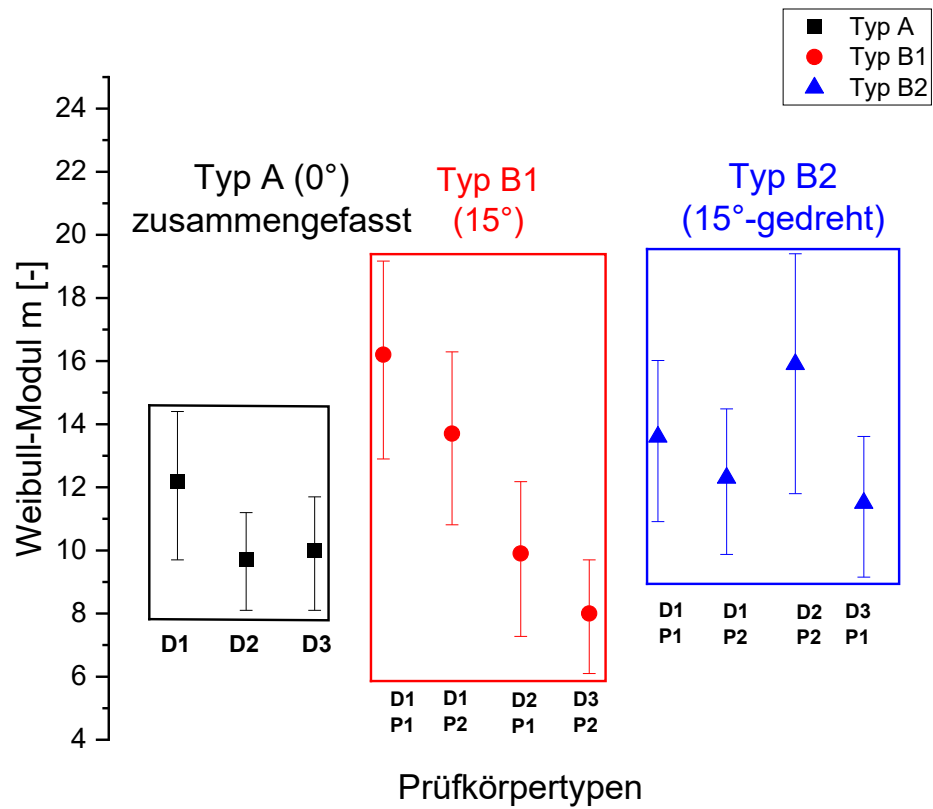


Abbildung 46: Vergleich von m für alle Prüfkörpertypen. In **Schwarz** wird der Prüfkörpertyp A, in **Rot** der Typ B1 und in **Blau** der Typ B2 gekennzeichnet. In diesem Fall sind die Druckjobs des Prüfkörpertyps A zusammengefasst.

In Abbildung 47 werden die charakteristischen Festigkeiten aller Prüfkörper dargestellt.

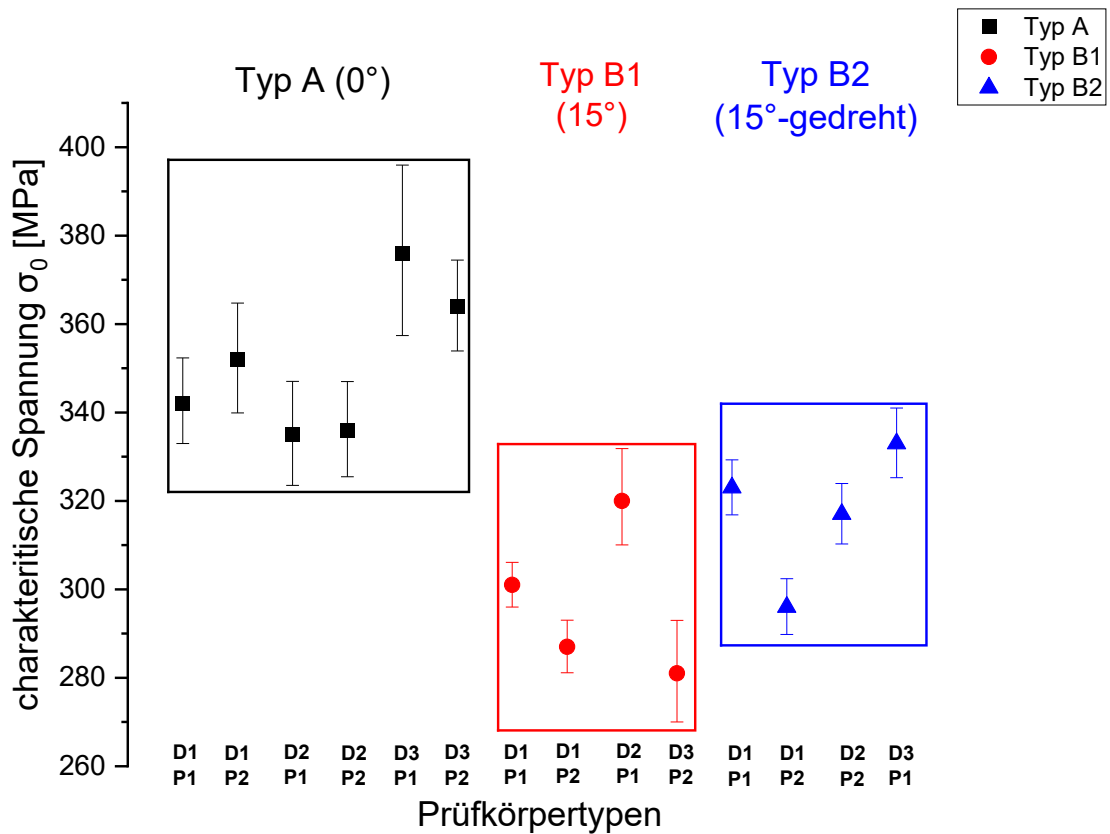


Abbildung 47: Vergleich von σ_0 für alle Prüfkörpertypen. In **Schwarz** wird der Prüfkörpertyp A, in **Rot** der Typ B1 und in **Blau** der Typ B2 gekennzeichnet.

In Abbildung 47 erkennt man, dass sich für den Prüfkörpertyp A höhere charakteristische Festigkeiten ergeben, generell erkennt man aber große Streuungen in den Orientierungen. Die Werte von σ_0 für den Prüfkörpertyp A variieren von 335 bis 376 MPa und erreichen die höchsten Werte aller Prüfkörpertypen. Für den Prüfkörpertyp B1 variiert σ_0 von 281 bis 320 MPa und für den Prüfkörpertyp B2 von 296 bis 333 MPa. Die Werte von σ_0 variieren für alle unterschiedlichen Orientierungen von 281 und 376 MPa. In Abbildung 48 sind die zusammengefassten charakteristischen Festigkeiten von Prüfkörpertyp A dargestellt.

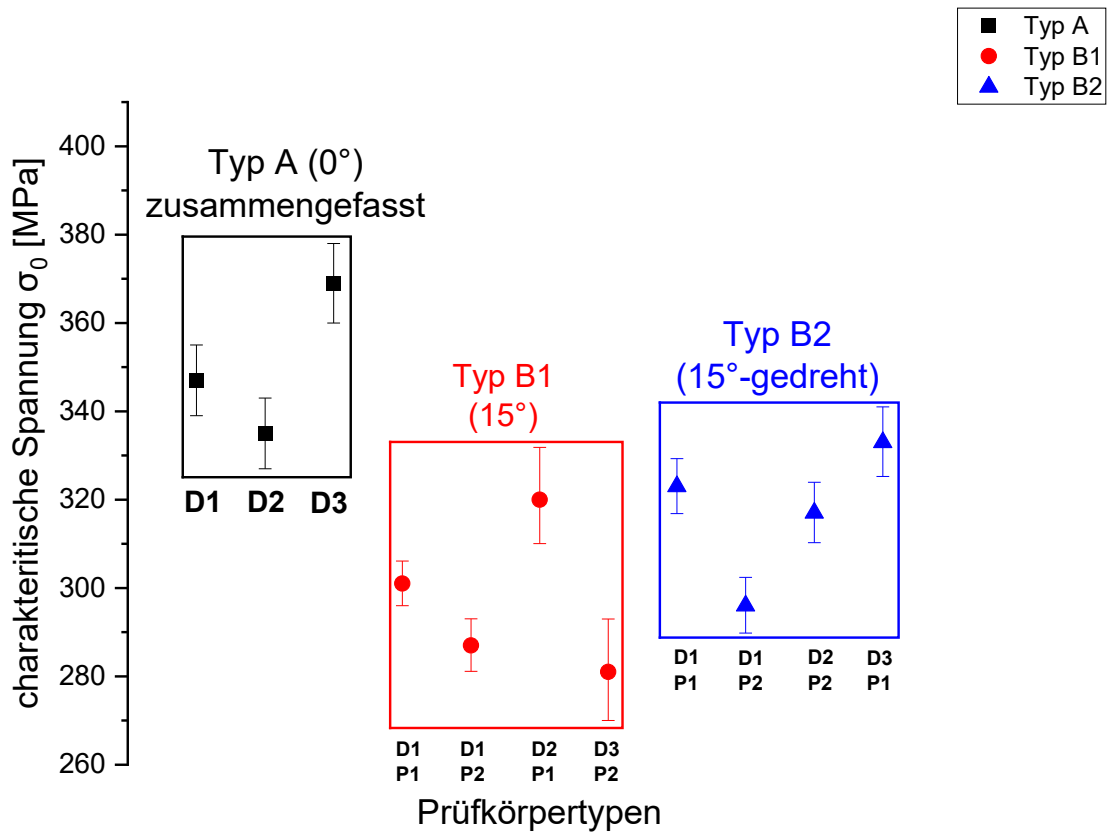


Abbildung 48: Vergleich von σ_0 für alle Prüfkörpertypen. In **Schwarz** wird der Prüfkörpertyp A, in **Rot** der Typ B1 und in **Blau** der Typ B2 gekennzeichnet. In diesem Fall sind die Druckjobs des Prüfkörpertyps A zusammengefasst.

Für eine bessere Übersicht folgt in Tabelle 11 die Zusammenfassung der Weibullparameter für alle Prüfkörper.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Weibull-Auswertungen für alle drei Prüfkörpertypen

Prüfkörper	N [1]	m [1]	G_u [1]	G_l [1]	σ_0 [N/mm ²]	C_u [N/mm ²]	C_l [N/mm ²]
A_D1_P1	25	12,3	15,2	8,9	342	352	333
A_D1_P2	19	12,4	15,7	8,5	352	365	340
A_D2_P1	33	9,1	11,0	6,9	335	347	323
A_D2_P2	29	10,7	13,1	8,0	336	347	325
A_D3_P1	18	8,8	11,2	5,9	376	396	357
A_D3_P2	32	11,5	14,0	8,7	364	374	354
B1_D1_P1	44	16,2	19,2	12,9	301	306	296
B1_D1_P2	41	13,7	16,3	10,8	287	293	281
B1_D2_P1	27	9,9	12,2	7,3	320	332	310
B1_D3_P2	32	8,0	9,7	6,1	281	293	270
B2_D1_P1	47	13,6	16,0	10,9	323	329	317
B2_D1_P2	47	12,3	14,5	9,9	296	302	290
B2_D2_P2	29	15,9	19,4	11,8	317	324	310
B2_D3_P1	44	11,5	13,6	9,2	333	341	325

Zusätzlich sind in Tabelle 12 die zusammengefassten Auswertungen von Prüfkörper A, siehe Abbildung 42, dargestellt.

Tabelle 12: Zusammengefasste Weibull-Auswertungen für den Prüfkörpertyp A

Prüfkörper	N [1]	m [1]	G_u [1]	G_l [1]	σ_0 [N/mm ²]	C_u [N/mm ²]	C_l [N/mm ²]
A_D1_P1 A_D1_P2	44	12,2	14,4	9,7	347	355	339
A_D2_P1 A_D2_P2	62	9,7	11,2	8,1	335	343	327
A_D3_P1 A_D3_P2	50	10,0	11,7	8,1	369	378	360

5.3. Weibull-Parameter in Abhängigkeit des Post-Processings

In diesem Kapitel werden die ermittelten Weibull-Parameter in Bezug auf die Positionen der Prüfkörper in den Öfen dargestellt. Damit soll untersucht werden, ob die Position in den Öfen einen Einfluss auf die Festigkeit der Proben hat. Dazu werden die ermittelten charakteristischen Festigkeiten und Weibull-Moduli jeweils in drei Klassen "niedrig" – "mittel" – "hoch" eingeordnet. Die Kriterien für diese Zuordnung sind in Tabelle 13 definiert.

Bei den Positionierungen in den Öfen werden zwei Fälle unterschieden. **Fall 1**, die Positionen der Prüfkörper während des Pre-Conditionings, Entbinderungsprozesses und des Vorsinterns und **Fall 2**, die Positionen im Hochtemperaturofen während des Sinterns. In Abbildung 49 sind die Positionen des ersten Falls dargestellt.

Tabelle 13: Definition von Klassen für die Beurteilung der Weibullparameter in Abhängigkeit vom Post-Processing.

gültige Proben N	Weibull-Modul m	charakteristische Festigkeit σ_0
1 – hoch (39-47)	1 – hoch (14-16,2)	1 – hoch (336-376)
2 – mittel (29-39)	2 – mittel (11-14)	2 – mittel (303-336)
3 – niedrig (18-29)	3 – niedrig (8-11)	3 – niedrig (281-303)

Positionen: Pre-Conditioning, Entbinderungsprozess und Vorsintern

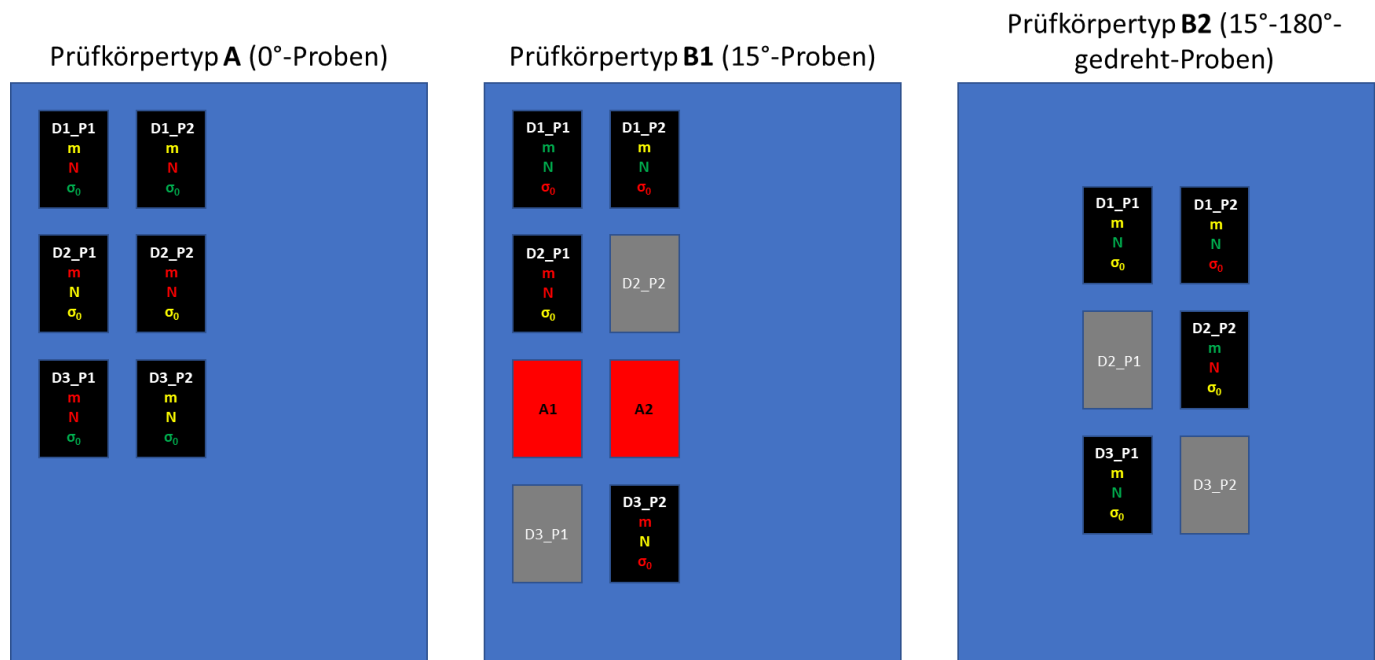


Abbildung 49: Darstellung der Positionen der Prüfkörper während des Pre-Conditionings, des Entbinderungsprozesses und des Vorsinterns. In blau ist die Sinterplatte dargestellt, die mittig im Ofen platziert wurde. Für den Vergleich wurden die Auswertungen für gültige Proben (N), Weibull-Modul (m) und charakteristische Festigkeit (σ_0) in den Boxen der Prüfkörper eingetragen. Die einzelnen Werte sind farbcodiert und in drei Klassen gemäß Tabelle 13 eingeteilt, niedrig, mittel und hoch.

In Abbildung 50 ist der zweite Fall, also die Werte in Abhängigkeit der Position während des Sintervorganges, dargestellt.

Positionen: Sintern

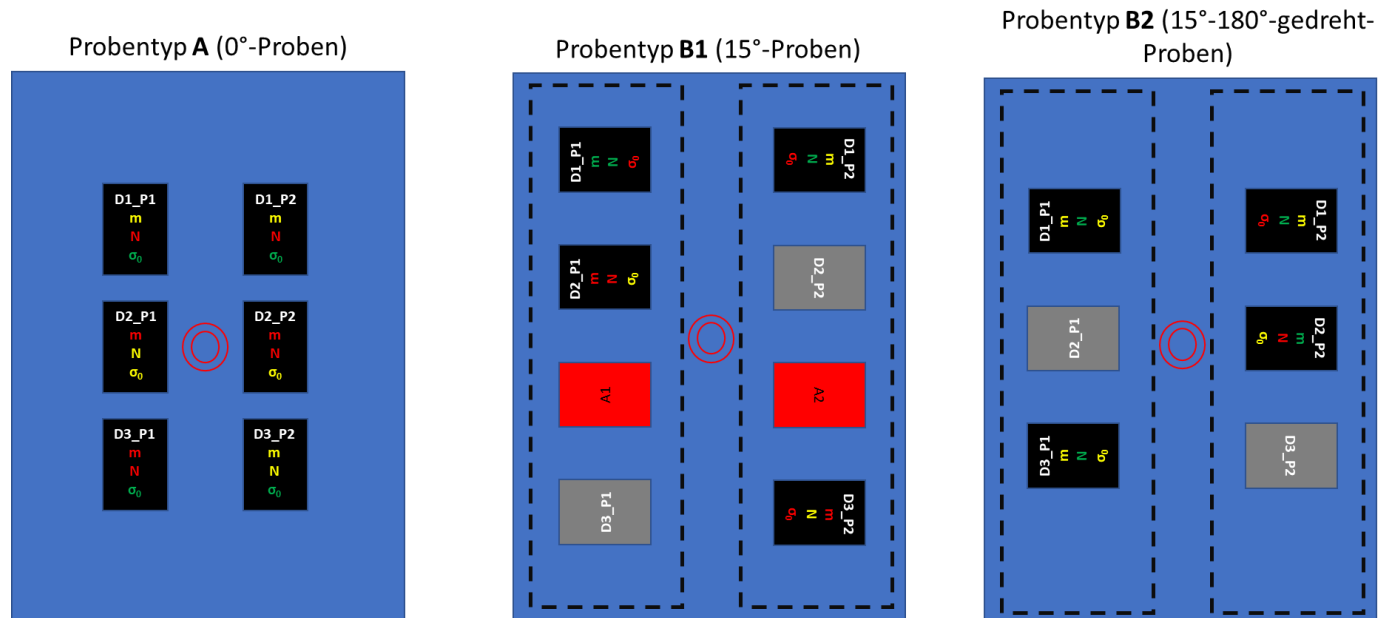


Abbildung 50: Darstellung der Positionen der Prüfkörper während des Sinterns. In blau ist die Sinterplatte, in rot die Prozess-temperatur-Kontrollringe und in schwarz-strichliert die 15°-Sinterkeile dargestellt. Die Sinterplatte wurde mittig im Ofen platziert. Für den Vergleich wurden die Auswertungen für gültige Proben (N), Weibull-Modul (m) und charakteristische Festigkeit (σ_0) in den Boxen der Prüfkörper eingetragen. Die einzelnen Werte sind farbcodiert und in drei Klassen gemäß Tabelle 13 eingeteilt.

Zusätzlich wurde der Außendurchmesser der Prozesstemperatur-Kontrollringe bestimmt und die dazugehörigen Temperaturen ausgewertet, mithilfe der Temperaturtabellen der Firma SCHUPP Industriekeramik GmbH (Neuhausstraße 4-10, 52078 Aachen, Deutschland) [46]. Diese sind in Tabelle 14 für alle drei Prüfkörpertypen zusammengefasst.

Tabelle 14: Außendurchmesser und Temperaturen der Prozesstemperatur-Kontrollringe zur Abschätzung des gesamten Wärmeeintrages während des Sinterns.

Prüfkörpertyp	Außendurchmesser Prozesstemperatur-Kontrollring [mm]	Ringtemperatur [°C] [46]
A	18,20	1671
B1	18,14	1676
B2	18,30	1664

6. Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse gegenübergestellt und diskutiert.

6.1. Weibull-Parameter in Abhängigkeit von Druckjob und Orientierung

Grundsätzlich kann für σ_0 und m zwischen der Druckjobabhängigkeit und der Abhängigkeit der Orientierung bzw. Prüfkörpertypen unterschieden werden.

Anhand der Gültigkeitsauswertungen aus Anhang D (siehe auch Tabelle 11), ausgenommen ist der Prüfkörper B2_D2_P2 (Abbildung 29), erkennt man den Trend, dass die Prüfkörpertypen B1 und B2 mehr gültig gebrochene Biegebalken vorweisen. Es konnten sich keine eindeutigen Ursachen für diesen Zusammenhang finden lassen.

Angesichts der Weibull-Diagramme, dargestellt in Abbildung 39 bis Abbildung 41 und jenen im Anhang E, erkennt man, dass die Festigkeiten der Proben aller Prüfkörper weibullverteilt sind. Die Abweichungen der Datenpunkte vom idealen linearen Trend sind für Stichproben typisch [47]. Es gibt keine auffälligen Unterschiede in den Auswertungen.

Wie man an Abbildung 42 - Abbildung 44 und Tabelle 11 erkennt, streuen die Ergebnisse von σ_0 und m der Prüfkörpertypen deutlich. Anhand des gleichen Herstellungsprozesses erwartet man, dass sich die einzelnen Prüfkörpertypen untereinander nicht stark in m und σ_0 unterscheiden. Die Ergebnisse zeigen aber, dass es nur für die Prüfkörper vom Typ A drei Überlappungen der Konfidenzintervalle gibt, dargestellt in Abbildung 42, und somit die Prüfkörper eines Druckjobs identisch sind. Das trifft für die jeweils zwei Prüfkörper der beiden 15°-Orientierungen, die geprüft wurden, nicht zu. Das bedeutet, dass auch die meisten Prüfkörpertypen, welche im selben Druckjob hergestellt wurden, sich in den Ergebnissen unterscheiden. In Abbildung 45 sind die Weibull-Moduli abgebildet, darin erkennt man keine signifikanten Unterschiede.

Neben der Druckjobabhängigkeit unterscheiden sich m und σ_0 zwischen den Orientierungen bzw. Prüfkörpertypen. Die Werte für σ_0 für den Prüfkörpertyp A liegen signifikant höher als für die Prüfkörpertypen B1 und B2. Eine mögliche Erklärung der Unterschiede zwischen den Prüfkörpertypen kann auf die Welligkeit der Oberfläche der 15°-Prüfkörper zurückgeführt werden. Für die Weibull-Moduli m ergeben sich für den Prüfkörpertyp A niedrigere Werte. Auch die zusammengefassten Auswertungen, gezeigt in Abbildung 46 und Abbildung 48, zeigen die gleichen Ergebnisse von m und σ_0 .

Die unterschiedlichen Ergebnisse und Abhängigkeiten können auf verschiedene Einflüsse zurückgeführt werden. Während des Druckens wurde immer darauf geachtet, dieselbe Schlickerkartusche zu verwenden.

Nach dem Lösen der Prüfkörper von der Bauplattform folgte die Reinigung. Das Aufbringen des Reinigungsmittels und Entfernung des überflüssigen Schlickers erfolgte händisch mit Druckluft. Daher können sich unterschiedliche Reinigungszeiten sowie unterschiedliche Mengen an aufgebrachtem Lösungsmittel bzw. restlicher Schlicker an den getrockneten Prüfkörpern ergeben. In Abbildung 51 ist ein Oberflächenfehler aufgrund von überflüssigem Schlicker erkennbar.

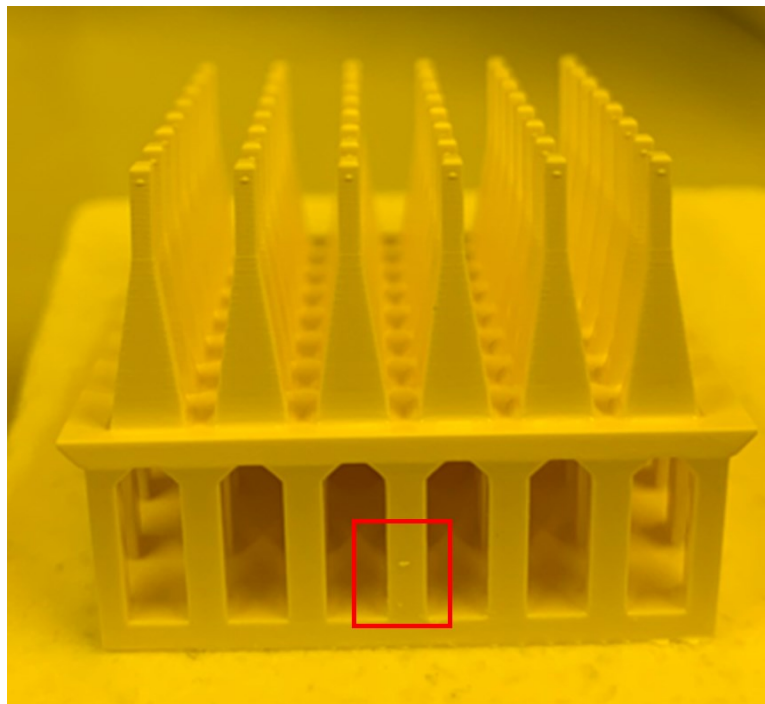


Abbildung 51: Überflüssiger Schlicker erkennbar als Oberflächenfehler, gekennzeichnet durch den roten Kasten.

Der vermutete Einfluss der Positionen während des Post-Processings konnte nicht bestätigt werden. Wie in Abbildung 49 und Abbildung 50 erkennbar ist, ist kein Trend der charakteristischen Festigkeit oder des Weibull-Moduls in Bezug auf die Positionen in den Öfen festzustellen. Auch der Wärmeeintrag der Sinterdurchgänge der einzelnen Prüfkörpertypen unterscheidet sich minimal, wie die Auswertung der Prozesstemperatur-Kontrollringe (Tabelle 14) zeigt. Es ergibt sich eine vernachlässigbare Ringtemperaturdifferenz von 15°C zwischen den drei Prüfkörpertypen während des Sinterns im Hochtemperaturofen.

6.2. Bedeutung der Prüfkörpergeometrie

Wie in Kapitel 5.1 gezeigt wurde, streuen die Abmessungen der einzelnen Proben auf jedem Prüfkörper erheblich. Wie in Abbildung 52 gezeigt wird, weisen auch die Prüfkörper nicht unbedingt die Geometrie auf, die sie gemäß Konstruktion haben sollten. Ob sich der dargestellte Verzug des Prüfkörpers durch das Drucken, Entbindern oder Sintern einstellt, konnte in dieser Arbeit nicht festgestellt werden, sollte aber in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Für solche verzogenen Prüfkörper kann die Festigkeitsprüfung nicht mehr unter idealen Bedingungen durchgeführt werden. Dies macht sich vor allem bei der Positionierung des Prüfdorns im KAP bemerkbar und erfordert mehrmaliges Nachjustieren des Dorns. Zusätzlich erschwert die gewölbte Grundplatte das Einspannen des Prüfkörpers im Schraubstock. Der Verzug ist stärker an den Prüfkörpertypen B1 und B2 ausgeprägt.

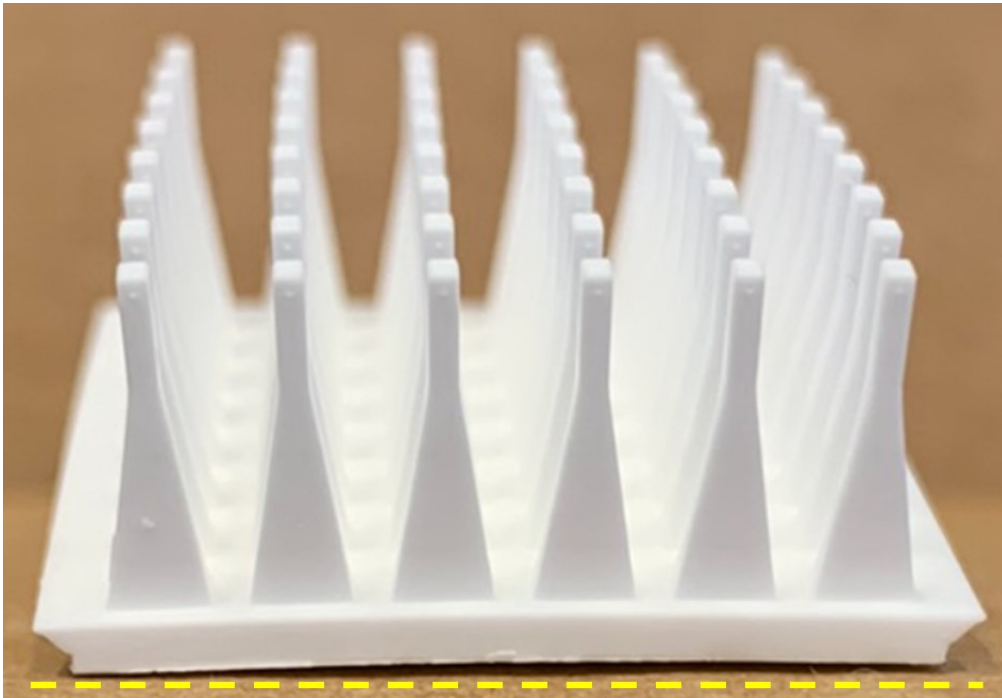


Abbildung 52: Aufgewölbte Proben nach dem Sinterprozess. Die gelb-strichlierte Linie soll den Verzug der Probe an der Vorderkante verdeutlichen.

Einen ähnlichen Effekt wie die Wölbung der Grundplatte der Prüfkörper haben die entstandenen Risse auf der Unterseite der Grundplatte. Durch diese Risse ist die Grundplatte nicht mehr eben und das korrekte Einspannen in den Schraubstock wird erschwert. Ein Beispiel eines solchen Risses in der Grundplatte ist in Abbildung 53 dargestellt.

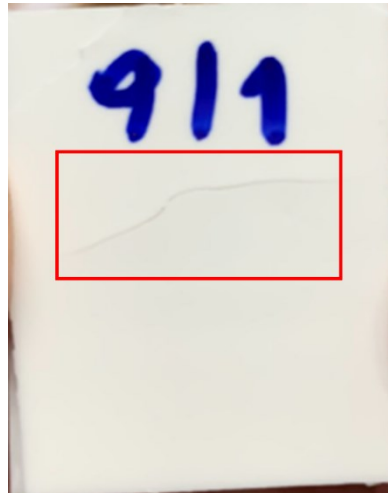


Abbildung 53: Darstellung eines Risses auf der Unterseite der Grundplatte nach dem Sintervorgang. Der Riss ist detailliert im roten Kasten dargestellt.

Abbildung 54 soll die Auswirkung der Verwölbung auf das Einspannen der Prüfkörper im Schraubstock verdeutlichen. In diesem Fall ist zu erkennen, dass der Prüfkörper in Bezug auf die Bodenplatte schief eingespannt wurde.

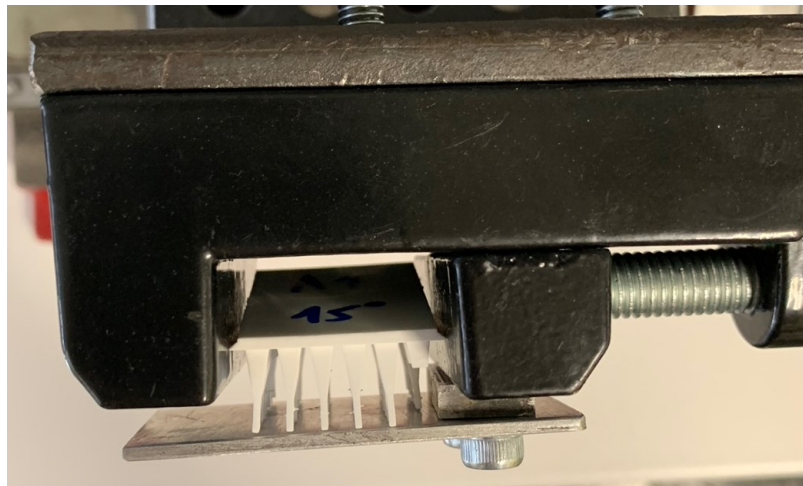


Abbildung 54: Darstellung eines beispielhaft schief eingespannten Prüfkörpers des Typs B1, trotz Verwendung der Anschlagplatte.

Ein weiterer Indikator für schlecht ausgerichtete Proben sind die ungültigen Zeit-Kraft-Verläufe, dargestellt in Abbildung 28 a und b.

6.3. Bedeutung der Probengeometrie

6.3.1. Streuung der Probenabmessungen

In Abbildung 36 erkennt man, dass sich die Mittelwerte aller gültigen Bruchlängen l_B in einem ähnlichen Bereich befinden. Dieser Trend ist für alle drei Prüfkörpertypen erkennbar.

In Abbildung 32 und Abbildung 33 sind beispielhaft die Bruchoberflächen von ausgebauchten Querschnitten gezeigt. Man erkennt, dass die Ecken des Rechtecks abgerundet und die Seitenkanten ausgebaucht sind. Dieser Sachverhalt ist schematisch in Abbildung 34 dargestellt.

Als praktikabel messbar hat sich für solche Probenquerschnitte die maximale Höhe h_{max} erwiesen. Die Mittelwerte der maximalen Probenhöhen h_{max} liegen alle in einem ähnlichen Bereich, in diesem Fall erkennbar für die Prüfkörpertypen B1 und B2, wie Abbildung 37 zeigt. Für Prüfkörpertyp A schwanken die Mittelwerte von h_{max} .

Um zu untersuchen, ob sich die Probenhöhe über die Länge der Proben ändert, wird für jeden die gemessene Höhe h_{max} über der Bruchlänge l_B aufgetragen, wie für die Prüfkörper A_D1_P1 und A_D1_P2 beispielhaft in Abbildung 55 gezeigt. Die restlichen Diagramme für die Prüfkörper sind in Anhang D zu finden. Man erkennt in keinem Fall eine ausgeprägte Korrelation zwischen Bruchposition und Probenhöhe. Es ist davon auszugehen, dass die Probenhöhe über die Probenlänge gleichmäßig, aber nicht für alle Proben gleich ist.

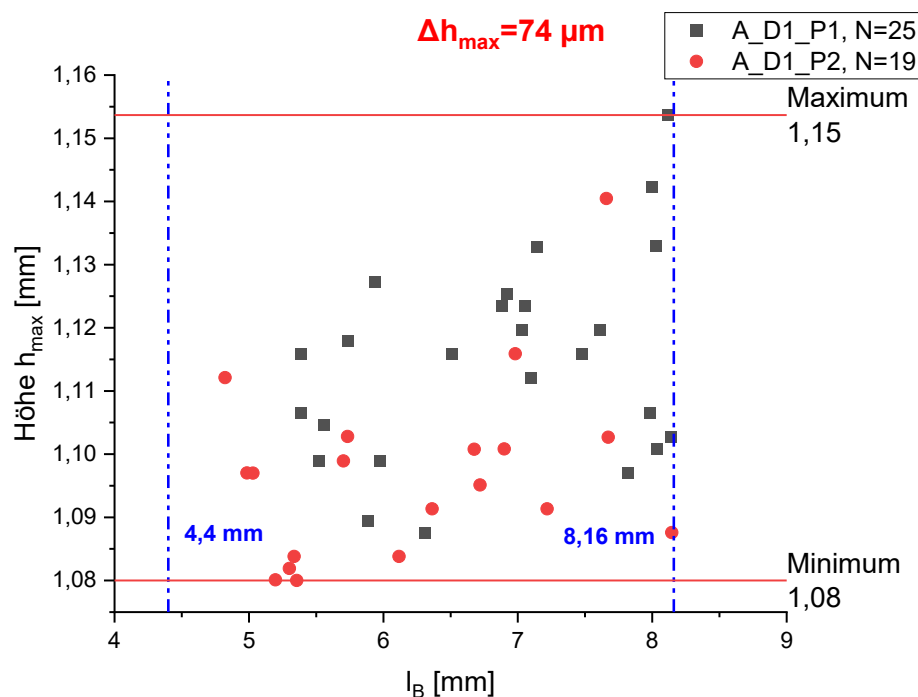


Abbildung 55: Darstellung der Höhe h_{max} in Abhängigkeit der gültigen Bruchlängen l_B von 4,4 bis 8,16 mm. In diesem Diagramm sind die Proben des ersten Druckjobs A_D1_P1 und A_D1_P2 dargestellt. Die Differenz der maximalen und minimalen Höhe wird als Δh_{max} bezeichnet.

In Tabelle 15 sind die Differenzen Δh_{max} , die maximalen und minimalen Querschnittshöhe h_{max} sowie die Standardabweichung dargestellt.

Tabelle 15: Gegenüberstellung von Δh_{\max} für alle Prüfkörpertypen. Man erkennt höhere Werte für die Prüfkörpertypen B1 und B2 im Vergleich zum Prüfkörpertyp A.

Prüfkörper	Δh_{\max} [μm]	Max. [mm]	Min. [mm]	Standardabweichung [μm]
A_D1_P1 A_D1_P2	74	1,15	1,08	18
A_D2_P1 A_D2_P2	66	1,17	1,10	15
A_D3_P1 A_D3_P2	61	1,11	1,05	12
B1_D1_P1 B1_D1_P2	66	1,14	1,08	13
B1_D2_P1	95	1,14	1,04	17
B1_D3_P2	100	1,17	1,07	18
B1_D1_P1 B1_D1_P2	77	1,12	1,04	15
B1_D2_P1	100	1,16	1,06	17
B1_D3_P2	84	1,14	1,05	16

Die höhere Streuung der Querschnittshöhen von Prüfkörpertyp B1 und B2 in Vergleich zum Typ A ist auf die Welligkeit der 15°-Proben zurückzuführen.

Für die Ergebnisse der Winkel, dargestellt in Abbildung 38, erkennt man deutliche Ausreißer. Diese Ausreißer können dadurch erklärt werden, dass die Vermessung der Winkel umso schwieriger wird, je kürzer die Bruchlängen der Biegebalken sind. Vor allem in Prüfkörpertyp B1 sind starke Streuungen der Ergebnisse des Winkels α zu erkennen. Die Mittelwerte der Winkel liegen in einem ähnlichen Bereich.

6.3.2. Fehler in der Spannungsberechnung

Gleichung 20 beschreibt die Berechnung der Biegespannung, siehe auch Anhang A. Um den Einfluss der Messfehler der unterschiedlichen Messgrößen auf die Biegespannung einer einzelnen Probe abzuschätzen, wurde der gesamte Fehler $\Delta\sigma$ bestimmt. Dazu ist es notwendig, die Fehlergrenzen der Eingangsgrößen, Δk , Δh_{max} und ΔF zu kennen.

ΔF ergibt sich aus den Fehlergrenzen der Kraftmessdose, dieser beträgt 1% der angewandten Kraft. Δk und Δh_{max} wurden mit dem Stereomikroskop ermittelt. Die Ermittlung dieser Fehlergrenzen basierte darauf, dass vom selben Biegebalken jeweils 3 Messwerte unabhängig voneinander bestimmt wurden. Aus diesen drei Werten wurde der Mittelwert gebildet und daraus die Fehlergrenzen abgeschätzt. Für Δh_{max} ergibt sich daraus ein Fehler von $10 \mu m$ und für Δk von 0,0052. Aus Gleichung 20 ergibt sich folgende Bestimmungsgleichung für die Fehlerfortpflanzung [48]:

$$\Delta\sigma = \sqrt{\left(\frac{6}{k * h_{max}^2} * \Delta F\right)^2 + \left(\frac{-6 * F}{k^2 * h_{max}^2} * \Delta k\right)^2 + \left(\frac{-12 * F}{k * h_{max}^3} * \Delta h_{max}\right)^2} \quad (22)$$

Daraus lässt sich der Fehler $\Delta\sigma$ auf $\pm 8 MPa$ abschätzen. Daraus ergibt sich ein prozentualer Fehler von etwa $\pm 2 \%$.

6.3.3. Ungenauigkeit des Kraftangriffspunktes

Die einzelnen Biegebalken wurden auf der Basis konstruiert, dass über den gesamten Prüfbereich ein konstantes Biegemoment herrscht. Die Voraussetzung dafür ist, dass der Kraftangriffspunkt (KAP) sich immer am Schnittpunkt der Seitenflächen der Biegeprobe befindet. Genau an dieser Stelle der Proben wurde eine Erhebung konstruiert, damit dieser Punkt bei der Versuchsdurchführung jedenfalls einfach zu belasten ist. Da aber die Geometrie vom idealen Fall durch den Druck und die weiteren Post-Processing-Schritten abweicht, kommt es zu einer Abweichung des Seitenflächen-Schnittpunktes vom konstruierten KAP. Daher muss diese Veränderung in Bezug auf die Spannungsauswertung berücksichtigt werden. In Abbildung 56 ist im oberen Bild zu erkennen, dass es sich beim idealen KAP um jenen Punkt handelt, indem sich die Seitenkanten schneiden.

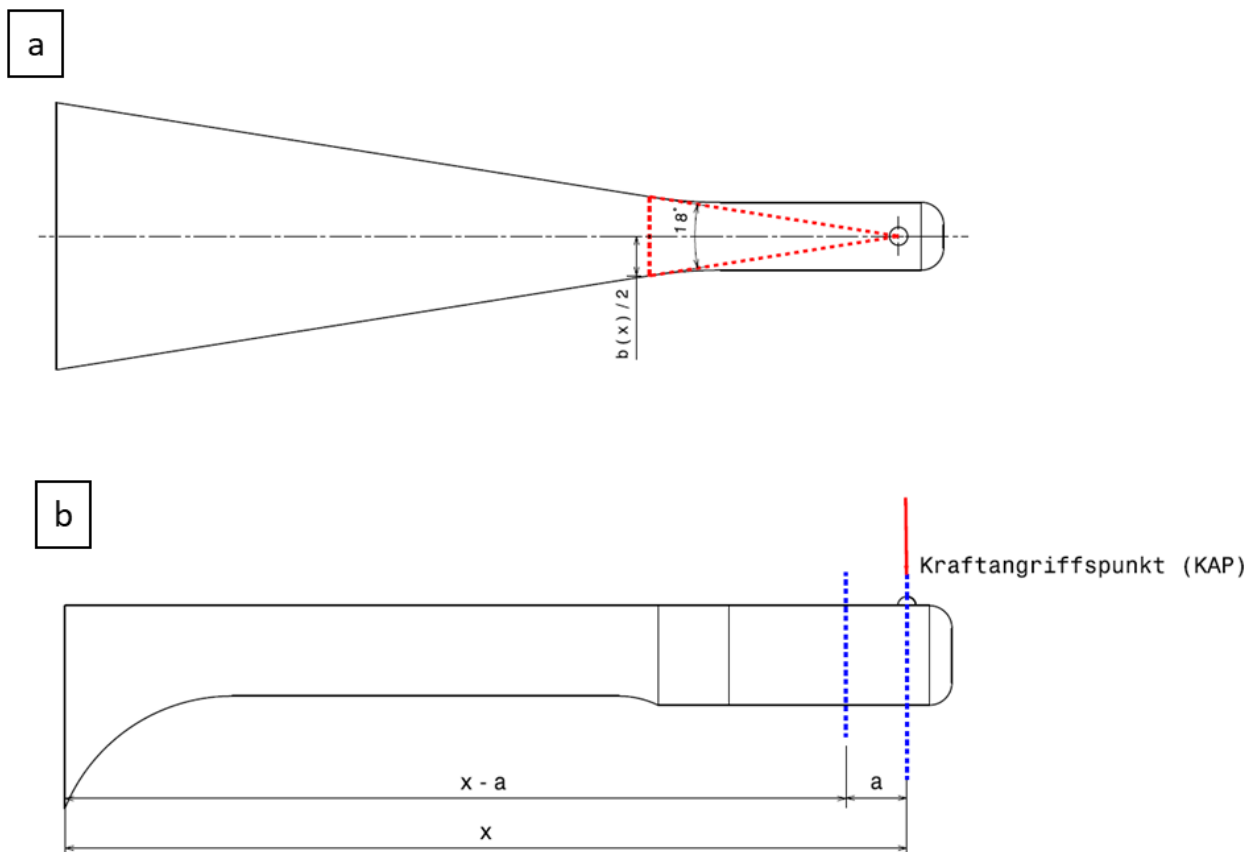


Abbildung 56: In **a**) ist die Draufsicht eines Biegebalkens gezeigt, das rot-strichlierte Dreieck kennzeichnet den Schnittpunkt im Kraftangriffspunkt. In **b**) ist die Seitenansicht eines Biegebalkens gekennzeichnet, mit der Abmessung a ist der Abstand vom idealen zum tatsächlichen Kraftangriffspunkt gekennzeichnet.

Um diesen Sachverhalt der Verschiebung des KAP um die Länge a besser ersichtlich zu machen sei auf Abbildung 57 verwiesen. In rot-strichlierter Linie ist der ideale KAP mit einem Winkel $\alpha = 18^\circ$ dargestellt. Weicht dieser Winkel vom Ideal ab, wie durch die blauen Linien dargestellt, erkennt man die Abweichung des KAP um die Länge a . Der neue KAP wird durch den blauen Kreis dargestellt. Die Kraft wird aber konstruktionsbedingt immer an der Stelle des schwarzen Kreises eingeleitet.

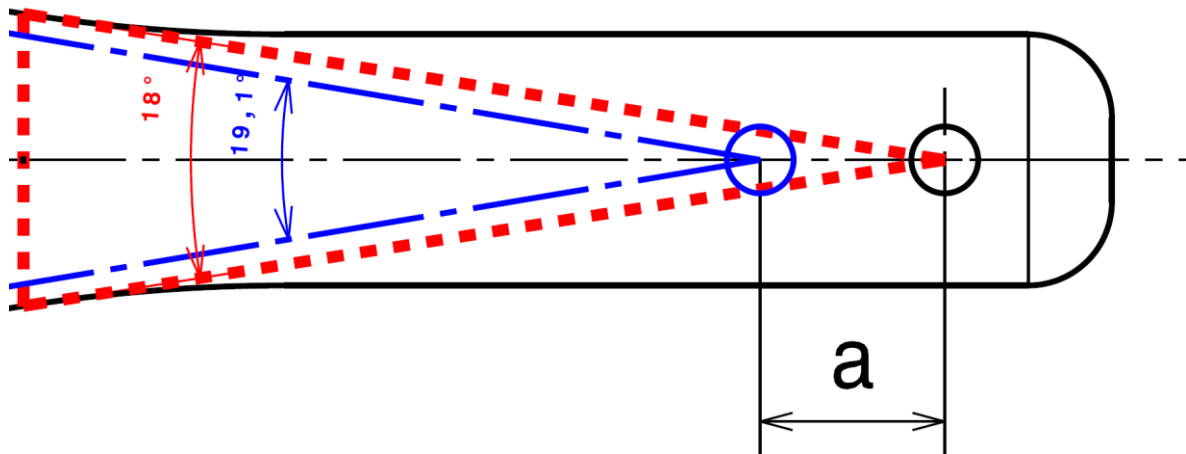


Abbildung 57: Detailansicht der Verschiebung des KAP um Länge a . Mit dem blau-strichlierten Dreieck wird ein Winkel abweichend von den idealen 18° gekennzeichnet. Der blaue Kreis stellt den tatsächlichen KAP dar.

Der Einfluss von a auf die maximale Zugspannung lässt sich analytisch wie folgt herleiten:

$$\sigma_b(x) = \frac{6 * F * (x - a)}{h_{max}^2 * b(x)}$$

$$b(x) = 2 * x * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$\sigma_b(x) = \frac{6 * F * (x - a)}{h_{max}^2 * b(x)} =$$

$$\sigma(x) = \frac{3 * F_H * (x - a)}{h_{max}^2 * x * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (23)$$

Der Abstand a wurde experimentell mit dem Stereomikroskop ermittelt. Dies wird beispielhaft anhand eines Biegebalkens in Abbildung 58 und Abbildung 59 dargestellt.

Die Methode zur Bestimmung des Abstand a besteht darin, zuerst den Endabstand zum idealen KAP zu bestimmen, im Detail dargestellt in Abbildung 58. Nächster Schritt ist die Bestimmung des Endabstands zum Schnittpunkt der beiden Seitenkanten. Dieser Schnittpunkt stellt den tatsächlichen KAP dar, dargestellt in Abbildung 59. Der Abstand a kann aus der Differenz dieser beiden Abmessungen bestimmt werden.



Abbildung 58: Ermittlung des idealen KAP mit der Vermessung in Stream Motion. Die gelbe Bemessung kennzeichnet den Abstand zwischen der Vorderkante des Biegebalkens zum gedruckten KAP.

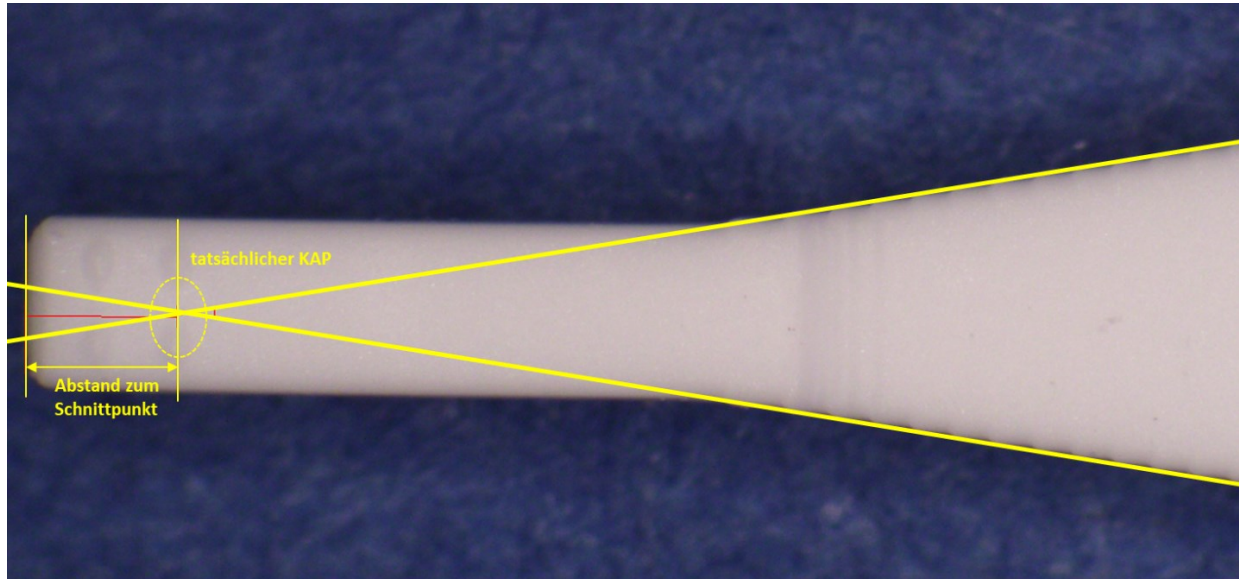


Abbildung 59: Ermittlung des tatsächlichen KAP mit der Vermessung in Stream Motion. Die gelbe Bemessung kennzeichnet den Abstand zwischen Schnittpunkten der gelben Linien zur Vorderkante des Biegebalkens. Der Schnittpunkt kennzeichnet den tatsächlichen KAP am Biegebalken.

In Abbildung 60 sind die Differenzen des tatsächlichen KAP zum idealen KAP für alle drei Prüfkörpertypen als Boxplot dargestellt.

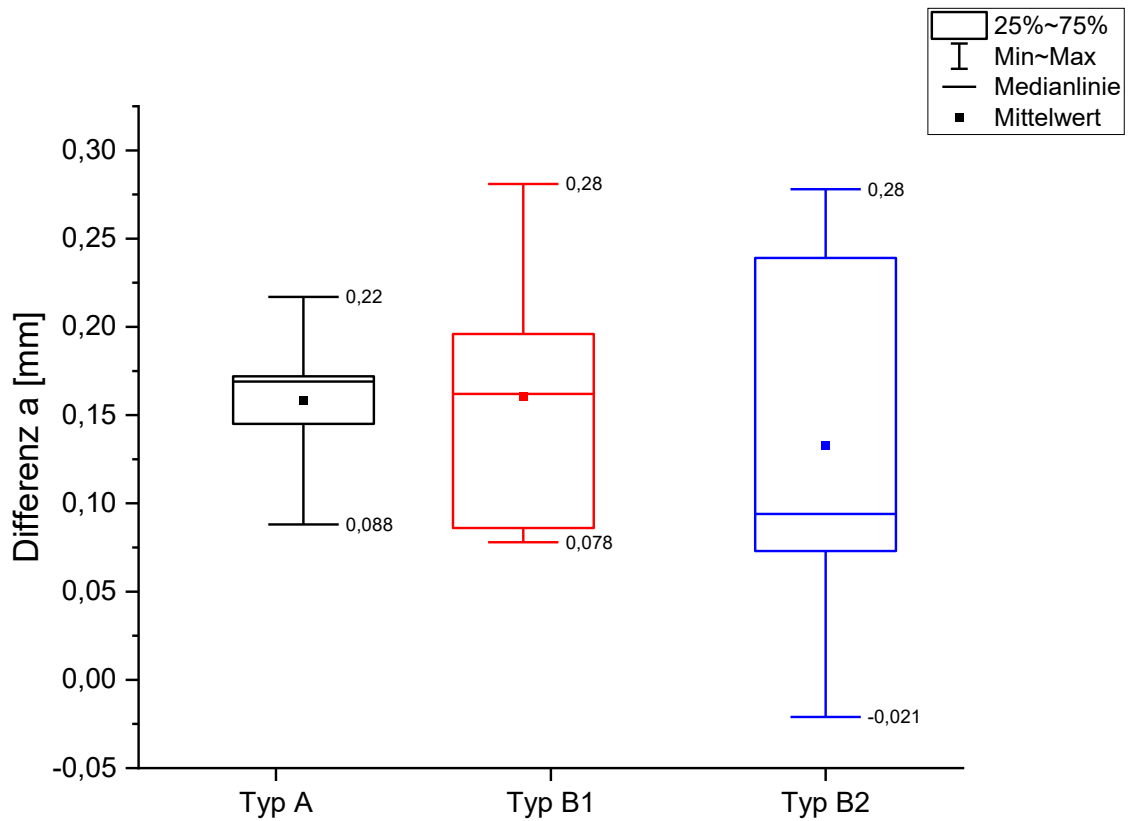


Abbildung 60: Darstellung der Differenzen a des tatsächlichen KAP zum idealen KAP. Ausgewertet wurden jeweils fünf beliebige Biegebalken jedes Prüfkörpertyps. Die Maxima und Minima sowie der Mittelwert, gekennzeichnet durch das gefüllte Viereck, sind dargestellt. Zusätzlich zeigen die Boxen den Bereich in dem sich 25 - 75% der Messergebnisse befinden. Die Ergebnisse von Typ A sind in **schwarz**, jene von Typ B1 in **rot** und jene vom Typ B2 in **blau** hervorgehoben.

Man erkennt an Abbildung 60, dass die Mittelwerte der Differenzen a für die drei Prüfkörpertypen in einem ähnlichen Bereich liegen, aber jede Messreihe Ausreißer aufweist, vor allem Prüfkörpertyp B2.

Berechnet man die relativen Abweichungen der maximalen Zugspannung in Abhängigkeit dieser Differenz aus Gleichung 23 ergibt sich folgende Gleichung:

$$\text{relative Abweichung (KAP)} = \left(1 - \frac{x - a}{x}\right) * 100\% \quad (24)$$

mit x als Bruchlänge und a als Differenz des KAP. Der relative Fehler für die minimale Bruchlänge (4,4 mm) und die maximale Bruchlänge (8,16 mm) ist in Abbildung 61 dargestellt. Der negative Wert der Differenz a vom Prüfkörpertyp B2 wurde für diese Auswertung nicht berücksichtigt, siehe Abbildung 60.

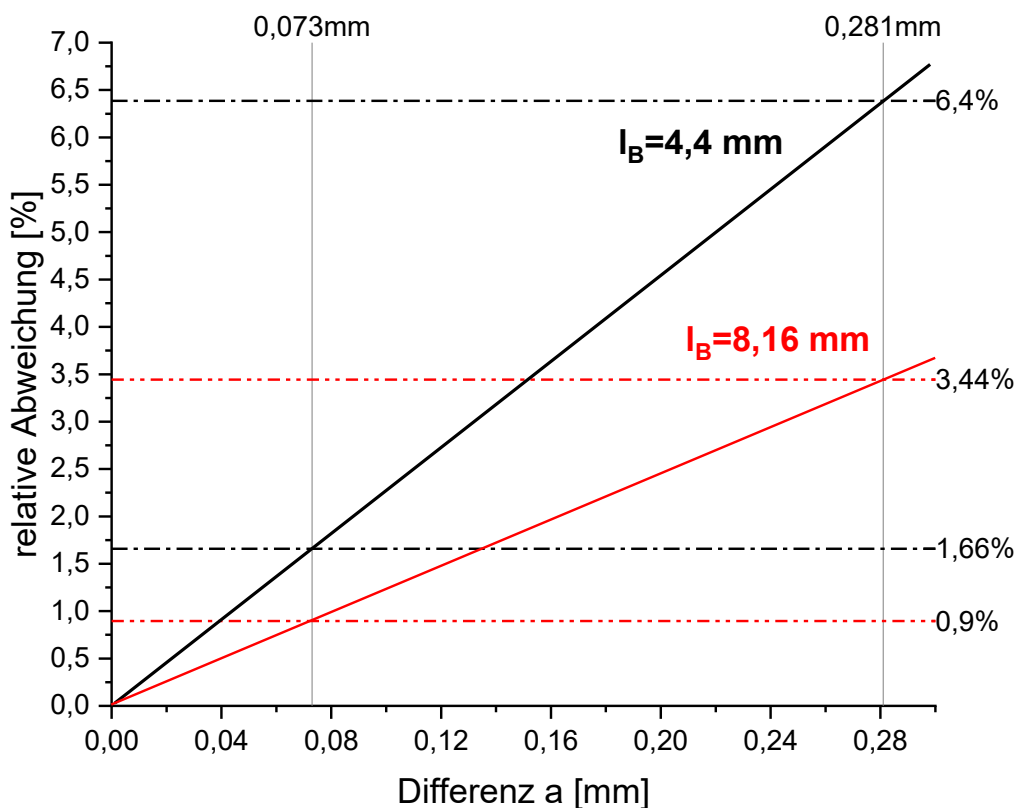


Abbildung 61: Darstellung des relativen Fehlers für die maximale Zugspannung im gültigen Prüfbereich in Abhängigkeit von a , für die maximale und minimale Bruchlänge x der Biegebalken. Durch die schwarze Linie wird die minimale Bruchlänge und durch die rote Linie die maximale Bruchlänge dargestellt (siehe Gleichung 21). 0,073 mm entspricht der kleinsten Abweichung und 0,281 mm entspricht der größten Abweichung des KAP.

Aus Abbildung 61 erkennt man, dass der relative Fehler bei kleinere Bruchlängen größer ist. Grund dafür ist, dass der resultierende Fehler des Biegemoments bei Abweichung des KAP für kleine Bruchlängen einen größeren Anteil hat. Für die experimentell ermittelten Abweichungen des KAP von der Idealposition (vergl. Abbildung 56) ergibt sich für die maximalen Bruchlängen ein Fehler in der berechneten Spannung von 0,9 - 3,4% und für die minimalen Bruch-

längen von 1,7 - 6,4%. Die relative Abweichung des KAP führt im Allgemeinen zu einer Unterschätzung der Festigkeit. Grund dafür ist, dass in Wirklichkeit mehr Belastung am Biegebalken auftritt als berechnet, im Detail in Abbildung 57 dargestellt.

6.3.4. Nicht-rechteckiger Probenquerschnitt

Eine weitere Fehlerquelle in der Spannungsberechnung stellt der bauchige Querschnitt der Proben dar. Bei einer Spannungsberechnung mit der Messgröße h_{\max} (siehe Abbildung 33) wird das Flächenträgheitsmoment (FTM) der Proben systematisch überschätzt. Wie in Anhang E beschrieben, wurden die tatsächlichen Querschnitte mithilfe von CATIA V5R19 ermittelt, und mit analytisch bestimmten Werten verglichen. Die FTM wurden analytisch mit Gleichung 21 bestimmt. Grundlage für diese Auswertung sind jeweils zehn Bruchflächen von je einem Prüfkörper aller drei Prüfkörpertypen. In Abbildung 62 sind die Abweichungen gemäß Gleichung 25 des mit CATIA V5R19 bestimmten FTM zu dem analytisch bestimmten FTM dargestellt.

$$\text{relative Abweichung}(FTM) = \left(\frac{FTM(\text{ideal}) - FTM(\text{real})}{FTM(\text{ideal})} \right) * 100\% \quad (25)$$

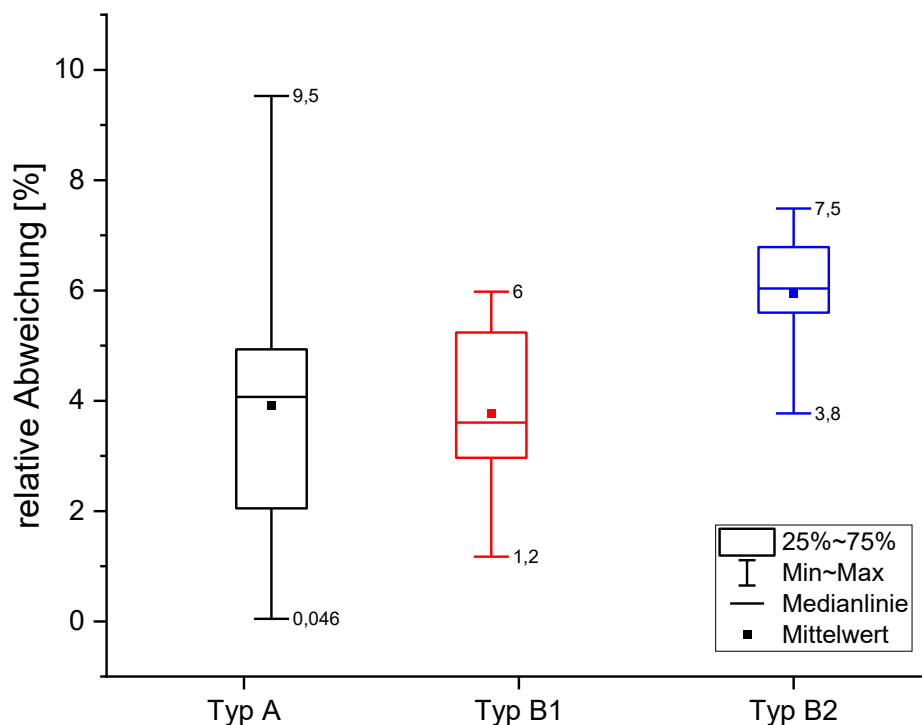


Abbildung 62: Darstellung der Abweichung des numerisch bestimmten FTM zum analytischem FTM. Ausgewertet wurden jeweils zehn beliebige Biegebalken jedes Prüfkörpertyps, jeweils vom ersten Druckjob des Prüfkörpertyps. Dargestellt sind die Maxima und Minima sowie der Mittelwert, gekennzeichnet durch das eingefärbte Viereck. Weiters zeigen die Boxen den Bereich in dem sich 25 - 75% der Messergebnisse befinden. Die Ergebnisse von Typ A sind im **schwarzen** Kasten, jene von Typ B1 im **roten** Kasten und jene vom Typ B2 in einem **blauen** Kasten hervorgehoben.

Man erkennt an Abbildung 62, dass die Mittelwerte der Abweichungen für alle Prüfkörpertypen in einem Bereich von 3,8 - 6% liegen. Der Zusammenhang des FTM mit der Spannung ergibt sich durch folgende Gleichung:

$$\sigma = \frac{F * \chi}{\frac{h_{max}}{2}} \quad (26)$$

Anhand von Abbildung 62 erkennt man, dass die Abweichungen nie negativ werden. Bei der Berechnung mit Gleichung 26 und h_{max} wird also die Festigkeit unterschätzt. Man kann mit einer Spannungsberechnung wie in dieser Arbeit durchgeführt zwar die Festigkeit nicht exakt bestimmen, wird aber durch die positiven Abweichungen des FTM sowie die Unterschätzung der Spannung durch den Kraftangriffspunkt, die Festigkeit nicht überschätzen. Für eine Bauteilauslegung nach bruchstatistischen Prinzipien führt das zu konservativen Aussagen.

6.4. Zusammenfassende Bewertung möglicher Fehler

Der Gesamtfehler des Versuches setzt sich aus den Fehlern der Messungenauigkeiten (Kapitel 6.3.2), der Abweichung des KAP (Kapitel 6.3.3) und der Abweichung des FTM (Kapitel 6.3.4) zusammen. Für die Messungenauigkeiten ergibt sich ein Fehler von $\pm 2\%$. Für die Abweichungen des KAP ergeben sich im Mittel ein Fehler von $-3,5\%$ (-1 bis $-6,5\%$), die Spannung wird dabei unterschätzt. Für die Abweichungen des Querschnittes ergeben sich im Mittel ein Fehler von -5% (-2 bis -10%), ebenfalls wieder eine Unterschätzung der Spannung.

Betrachtet man nun den Gesamtfehler, ergibt sich ein Mittelwert von $-8,5\%$. Der „worst case“ beläuft sich von $-18,5$ bis -1% . Mit dieser Kenntnis der mittleren Gesamtabweichung, kann man davon ausgehen, dass die Aussagen zur Festigkeitstendenz der Druckorientierungen valide sind.

Die Reproduzierbarkeit der Herstellung, Reinigung, Post-Processing und des Prüfablaufs weist Verbesserungspotential auf. Bei der Herstellung und Reinigung kann durch einen standardisierten Ablauf, also definierte Trocknungszeiten, Menge an verbrauchten Lösungsmitteln, frischen Schlicker usw. die Reproduzierbarkeit gesteigert werden. Gleiches gilt für die Post-Processing-Schritte durch eine gleichbleibende Positionierung der Prüfkörper in den Öfen. Weiters kann durch die gezielte Wahl von Sinterplatten und -keile der Wärmeeintrag optimiert werden. Durch diese Optimierung kann auch der Verzug der Proben reduziert werden.

Abhilfemaßnahmen bei der Bestimmung der Spannungswerte, ist die Verbesserung der Messmethodik der einfließenden Variablen aus Gleichung 20. Hier sei erwähnt, dass die präzisere Auswertung der einzelnen Querschnitte das größte Verbesserungspotential hat. Zum Beispiel kann der Querschnitt durch einen 3D-Scan der Bruchflächen genauer bestimmt und automatisiert ausgewertet werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, für die CharAM-Prüfkörper einen geeigneten Prüfaufbau und -ablauf zu entwickeln und durchzuführen. Dieser CharAM-Prüfkörper besteht aus 48 Biegebalken, die jeweils eine gültige Stichprobe darstellen. Es wurden insgesamt 18 Prüfkörper, aufgeteilt auf 3 Prüfkörpertypen (d.h. Typ A – 0°, Typ B1 – 15° und Typ B2 – 15°-180°-gedreht), hergestellt. Durchgeführt wurde die Prüfkörperherstellung mit dem am ISFK vorhandenen CeraFab 7500 aus dem Schlicker LithaLox 350 der Lithoz GmbH. Nach dem Drucken folgten die Reinigung und das Post-Processing der Prüfkörper. Für den Prüfaufbau und Prüfablauf wurden bereits vorhandene Komponenten und Geräte am ISFK verwendet. Nachdem erfolgreichen Prüfablauf wurden Weibull-Auswertungen für jeden Prüfkörper durchgeführt.

Grundsätzlich sei erwähnt, dass durch diese Prüfmethode für jeden Druckjob bis zu zweimal 48 Biegebalken hergestellt und geprüft werden können. Vergleicht man dies mit herkömmlichen Biegeproben, können mit dem LCM-Verfahren je nach Ausrichtung auf der Bauplattform insgesamt 44 Einzelproben für den 4 Punktbiegeversuch hergestellt werden [38]. Dies zeigt, dass deutlich mehr Proben mit den gleichen Herstellungsmerkmalen hergestellt und verglichen werden können.

Weiters wird das Risiko des Druckabbruchs durch die Beschaffenheit des CharAM-Prüfkörpers im Vergleich zu den klassischen Biegeproben minimiert, wodurch die Gefahr von Ausschuss gesenkt wird, und mehr gültige Prüfkörper resultieren. Zudem wird für den Druck des CharAM-Prüfkörpers keine zusätzliche Stützstruktur benötigt.

Der präsentierte Prüfaufbau und Prüfablauf bieten eine einfache Methode, diese Prüfkörper zu testen. Die Beschaffenheit des gedruckten Prüfkörpers selbst stellt jedoch einige Herausforderungen für den Prüfablauf und für die Auswertung der Biegebalken dar. Durch das Post-Processing der Prüfkörper, vor allem durch das Sintern, resultieren verzogene Prüfkörper, besonders bei den Probentypen B1 und B2. Dies erfordert das mehrmalige Nachjustieren des Prüfdorns um den Kraftangriffspunkt verlässlich zu belasten. Der ideale Kraftangriffspunkt wird nicht nur durch das Aufwölben des Prüfkörpers verschoben, sondern variiert auch auf Grund des Druckergebnisses. Weiters entstehen durch den Druck Querschnitte, die von der idealen rechteckigen Geometrie abweichen. Der Querschnitt, besonders die maximale Höhe h_{max} , hat einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Biegespannung. Folgend mussten die Querschnitte an den gebrochenen Biegebalken im Stereomikroskop vermessen werden, um die Bruchspannung exakt bestimmen zu können. Gleiches gilt für den Winkel α . Die Vermessung dieser Parameter im Stereomikroskop stellt einen erhöhten Zeitaufwand dar. Auch durch den Prüfaufbau selbst kann es zu Abweichungen kommen. Bei der Einspannung des Prüfkörpers ist

darauf zu achten, dass dieser fest und parallel zur Anschlagplatte eingespannt wird. War dies nicht der Fall, konnten Abweichungen im Kraft-Zeit-Verlauf in der Prüfsoftware festgestellt werden.

Aus den Messungenauigkeiten der Biegespannung lässt sich mit einer Fehlerabschätzung $\Delta\sigma$ bestimmen. Dieser Fehler beträgt bei einer durchschnittlichen Festigkeit von $452 \text{ MPa} \pm 8 \text{ MPa}$, also $\pm 2\%$. Weiters beeinflusst auch der Kraftangriffspunkt das Ergebnis der Biegespannung mit einer Unterschätzung der Festigkeit. Dieser Fehler beträgt im Mittel $-3,5\%$. Vergleicht man den tatsächlichen Querschnitt einer Bruchfläche mit dem verwendeten Ansatz in der Spannungsberechnung, ergibt sich immer eine positive Abweichung im Flächenträgheitsmoment. Durch diesen Ansatz wird die Festigkeit konsequent unterschätzt. Der Fehlereinfluss des Querschnittes beträgt im Mittel -5% . Es ergibt sich dadurch ein mittlerer Gesamtfehler von $-8,5\%$.

Anhand der Ergebnisse der Weibull-Auswertungen erkennt man, dass die mechanischen Eigenschaften der Prüfkörpertypen stark von den einzelnen Druckjobs abhängen. Daher eignet sich diese Prüfmethode für den Vergleich einzelner Druckjobs zueinander.

Theoretische Überlegungen sagen einen Trend zwischen den Prüfkörper-Orientierungen und den gemessenen mechanischen Eigenschaften voraus. Im Verlauf der charakteristischen Spannung σ_0 zwischen den Orientierungen konnten höhere Werte für den Prüfkörpertyp A festgestellt werden, wie auch aus den theoretischen Überlegungen vorhergesagt wurde. Für den Weibull-Modul m erkennt man größere Streuungen in den Ergebnissen der Prüfkörpertypen B1 und B2. Es konnte kein Trend zwischen den Positionen der Prüfkörper in den Öfen und den Messergebnissen der Prüfkörper festgestellt werden.

Die Optimierung des Herstellungs- und Post-Processing-Ablaufs kann durch einen standardisierten Prozess vorgenommen werden. Weiters kann durch die Anpassung der Sinterunterlagen der Verzug der Biegebalken minimiert werden. Eine Erhöhung der Genauigkeit der Spannungsbestimmung kann durch die Verbesserung der Messmethodik erreicht werden.

8. Literaturverzeichnis

- [1] A. Gebhardt and J.-S. Hötter, *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016.
- [2] J. Deckers, J. Vleugels, and J.-P. Kruth, "Additive manufacturing of ceramics: A review," *J. Ceram. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 4, pp. 245–260, 2014.
- [3] "LCM-Verfahren, Firma Lithoz GmbH," 19.04.2022. <https://www.lithoz.com/3D-Druck/lcm-technologie>.
- [4] M. Schwentenwein, P. Schneider, and J. Homa, "Lithography-based ceramic manufacturing: a novel technique for additive manufacturing of high-performance ceramics," in *Advances in Science and Technology*, 2014, vol. 88, pp. 60–64.
- [5] N. Travitzky *et al.*, "Additive manufacturing of ceramic-based materials," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 16, no. 6, pp. 729–754, 2014.
- [6] ISO-Standard, "ISO 17296: Additive manufacturing — General principles," 2015.
- [7] ISO/ASTM, "ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary," 2021.
- [8] S. Manotham, S. Channasanon, P. Nanthananon, S. Tanodekaew, and P. Tesavibul, "Photosensitive binder jetting technique for the fabrication of alumina ceramic," *J. Manuf. Process.*, vol. 62, pp. 313–322, 2021.
- [9] M. Trunec and J. Cihlář, "Thermal debinding of injection moulded ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 17, no. 2–3, pp. 203–209, 1997.
- [10] H. Salmang and H. Scholze, *Salmang scholze keramik*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [11] A. de Blas Romero *et al.*, "Lithography-based additive manufacture of ceramic biodevices with design-controlled surface topographies," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 5, pp. 1547–1555, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8856-1.
- [12] M. Schwentenwein and J. Homa, "Additive manufacturing of dense alumina ceramics," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1111/ijac.12319.
- [13] "CeraFab 7500, Firma Lithoz GmbH," 22.04.2022. <https://isfk.unileoben.ac.at/nachrichtenarchiv#c23453>.
- [14] Lithoz GmbH, "technische Parameter, CeraFab 7500," 30.10.2022, 2022. .
- [15] E. Schwarzer, M. Götz, D. Markova, D. Stafford, U. Scheithauer, and T. Moritz, "Lithography-based ceramic manufacturing (LCM)—Viscosity and cleaning as two quality influencing steps in the process chain of printing green parts," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 16, pp. 5329–5338, 2017.
- [16] E. Schwarzer *et al.*, "Process development for additive manufacturing of functionally graded alumina toughened zirconia components intended for medical implant application," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 39, no. 2–3, pp. 522–530, 2019.
- [17] J. Homa and M. Schwentenwein, "A novel additive manufacturing technology for high-performance ceramics," in *Advanced Processing and Manufacturing Technologies for Nanostructured and Multifunctional Materials: A Collection of Papers Presented at the 38th International Conference on Advanced Ceramics and Composites January 27–31, 2014 Daytona Beach, Florida*, 2014, vol. 35, pp. 33–40.
- [18] A. Hofer *et al.*, "Effect of binder system on the thermophysical properties of 3D-printed zirconia ceramics," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 174–180, 2022.
- [19] A. I. A. 29211-11e3, "Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies." ASTM International West Conshohocken, PA, 2011.
- [20] A. A. Altun, F. Ertl, M. Marechal, A. Makaya, A. Sgambati, and M. Schwentenwein,

- “Additive manufacturing of lunar regolith structures,” *Open Ceram.*, vol. 5, p. 100058, 2021.
- [21] T. Lube, M. Staudacher, A.-K. Hofer, J. Schlacher, and R. Bermejo, “Stereolithographic 3D printing of ceramics: challenges and opportunities for structural integrity,” *Adv. Eng. Mater.*
- [22] D. Dempsey, S. McDonald, and D. Masato, “Characterization of Stereolithography Printed Soft Tooling for Micro Injection Molding. *Micromachines* (Basel) 11.” 2020.
- [23] D. Munz and T. Fett, *Ceramics: mechanical properties, failure behaviour, materials selection*, vol. 36. Springer Science & Business Media, 1999.
- [24] J. Fischer, “Mechanische Eigenschaften metallischer und keramischer Werkstoffe,” *Quintessenz Zahntechnik*, vol. 35, no. 12, pp. 1540–1549, 2009.
- [25] J. B. Wachtman, W. R. Cannon, and M. J. Matthewson, *Mechanical properties of ceramics*. John Wiley & Sons, 2009.
- [26] J. J. Mecholsky Jr, “Fracture mechanics principles,” *Dent. Mater.*, vol. 11, no. 2, pp. 111–112, 1995.
- [27] G. R. Egan, “Compatibility of linear elastic (K_{1c}) and general yielding (COD) fracture mechanics,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 5, no. 1, pp. 167–185, 1973.
- [28] W. Weibull, “A Statistical Distribution Function of Wide Applicability,” *J. Appl. Mech.*, vol. 103, pp. 293–297, 1951.
- [29] A. E. Lupercio *et al.*, “Ball-on-ring test validation for equibiaxial flexural strength testing of engineered ceramics,” *Int. J. Ceram. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 128–139, 2021.
- [30] J. Gong and Y. Li, “Relationship between the estimated Weibull modulus and the coefficient of variation of the measured strength for ceramics,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 82, no. 2, pp. 449–452, 1999.
- [31] C. Neusel, H. Jelitto, D. Schmidt, R. Janßen, F. Felten, and G. A. Schneider, “Thickness-dependence of the breakdown strength: Analysis of the dielectric and mechanical failure,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 35, no. 1, pp. 113–123, 2015.
- [32] “Advanced technical ceramics-Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature Part 5: Statistical analysis,” 2006. [Online]. Available: www.on-norm.at/shop.
- [33] C. Lu, R. Danzer, and F. D. Fischer, “Fracture statistics of brittle materials: Weibull or normal distribution,” *Phys. Rev. E*, vol. 65, no. 6, p. 67102, 2002.
- [34] R. Bender and S. Lange, “Was ist ein Konfidenzintervall?,” *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, vol. 132, no. S 01, pp. e17–e18, 2007.
- [35] DIN, “DIN EN 843-1:2008-08: Hochleistungskeramik - Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur - Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit,” 2008.
- [36] J. Schlacher *et al.*, “Strength of additive manufactured alumina,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 40, no. 14, pp. 4737–4745, 2020.
- [37] D. R. Kammler *et al.*, “Flexural strength of a conventionally processed and additively manufactured debased 94% alumina,” *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 1640–1649, 2022.
- [38] J. Grillitsch, *Orientation dependent strength and fracture behavior of additively manufactured alumina*. Montanuniversität Leoben, 2022.
- [39] R. Danzer, P. Supancic, and W. Harrer, “Biaxial tensile strength test for brittle rectangular plates,” *J. Ceram. Soc. Japan*, vol. 114, no. 1335, pp. 1054–1060, 2006.
- [40] M. Staudacher, T. Lube, and P. Supancic, “The Ball-on-Three-Balls strength test for discs and plates: Extending and simplifying stress evaluation,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 43, no.

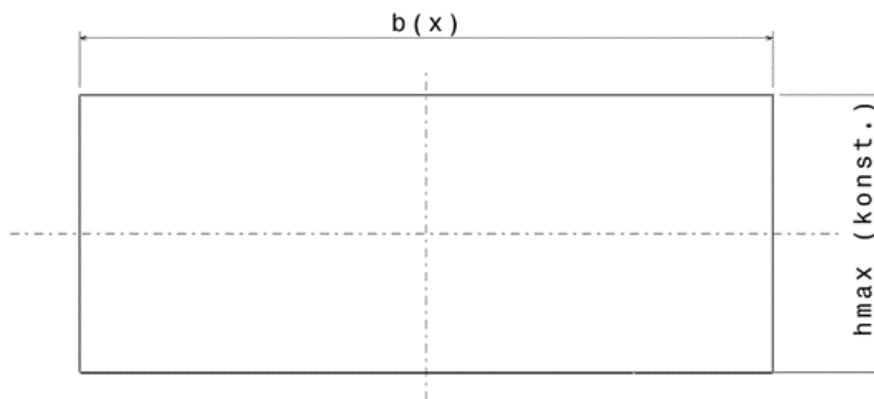
- 2, pp. 648–660, 2023.
- [41] J. Essmeister, A. A. Altun, M. Staudacher, T. Lube, M. Schwentenwein, and T. Konegger, “Stereolithography-based additive manufacturing of polymer-derived SiOC/SiC ceramic composites,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 42, no. 13, pp. 5343–5354, 2022.
- [42] R. B. Osman, A. J. van der Veen, D. Huiberts, D. Wismeijer, and N. Alharbi, “3D-printing zirconia implants; a dream or a reality? An in-vitro study evaluating the dimensional accuracy, surface topography and mechanical properties of printed zirconia implant and discs,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 75, pp. 521–528, 2017.
- [43] A. L. Gebhard, *Diplomarbeit: Prüfkörperauslegung und Ergebnisinterpretation für die Festigkeitsbewertung gedruckter filigraner Keramikstrukturen*. Technische Universität Dresden, 2020.
- [44] Lithoz GmbH, “MATERIALÜBERSICHT LCM-TECHNOLOGIE,” 19.09.2022. https://lithoz.com/wp-content/uploads/2022/04/LITHOZ_Materialfolder_DE_web.pdf.
- [45] “Process temperature controll rings, FERRO France Sarl,” 22.06.2022. <https://www.ferro.com/products/product-category/industrial-specialty-materials/process-temperature-control-rings/process-temperature-control-rings/process-temperature-control-rings-ptcr>.
- [46] S. I. GmbH, “TEMPERATURE-TABLE for PTCR,” 2021. .
- [47] R. Danzer, T. Lube, and P. Supancic, “Monte Carlo Simulations of Strength Distributions of Brittle Materials – Type of Distribution, Specimen and Sample Size,” *Int. J. Mater. Res.*, vol. 92, no. 7, pp. 773–783, 2001, doi: doi:10.1515/ijmr-2001-0143.
- [48] L. Papula and L. Papula, “„Fehlerfortpflanzung “nach Gauß,” *Math. für Ingenieure und Naturwissenschaftler Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Math. Stat. Fehler- und Ausgleichsrechnung*, pp. 674–689, 1997.

Anhang A: Spannungsberechnung für Proben mit konstantem Querschnitt

$$\sigma_b(x) = \frac{M_b(x)}{w_b(x)}$$

Das Biegemoment kann über den gesamten Querschnitt als konstant angenommen werden!

$$I = \frac{h_{\max}^3 * b(x)}{12}$$



gilt für rechteckige Querschnitte!

$$r = \frac{h_{\max}}{2}$$

Randfaserabstand kann als konstant angenommen werden!

$$w_b(x) = \frac{I}{r} = \frac{\frac{h_{\max}^3 * b(x)}{12}}{\frac{h_{\max}}{2}} = \frac{h_{\max}^2 * b(x)}{6}$$

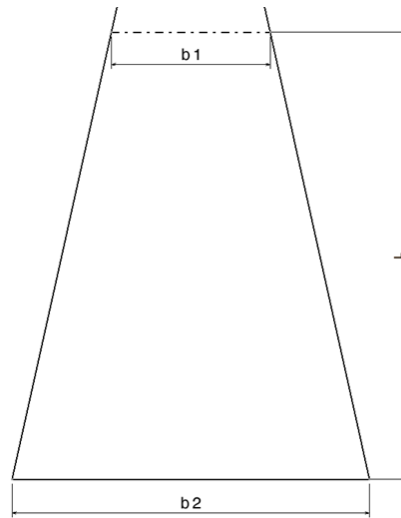
$$M_b(x) = F * x$$

$$x = L$$

$$\sigma_b(x) = \frac{M_b(x)}{w_b(x)} = \frac{F * x}{\frac{h_{\max}^2 * b(x)}{6}} = \frac{6 * F * x}{h_{\max}^2 * b(x)}$$

$$\sigma_b(x) = \frac{6 * F * L}{h_{\max}^2 * b(x)}$$

$$k = \frac{b_1 - b_2}{L} = \frac{b(x)}{L}$$



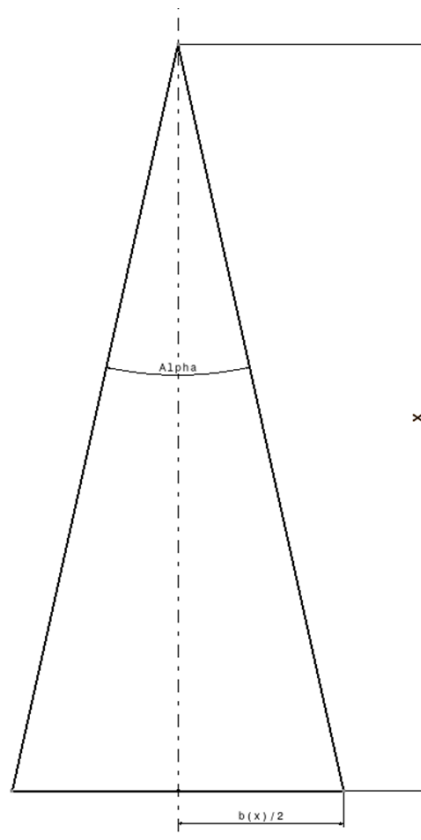
Zusammenhang Steigung k und Winkel α :

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{b(x)}{2 * L}$$

$$b(x) = k * L$$

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{k * L}{2 * L} = \frac{k}{2}$$

$$k = 2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$



$$\sigma_b(x) = \frac{6 * F * L}{h_{max}^2 * b(x)} = \frac{6 * F * L}{h_{max}^2 * k * L} = \frac{6 * F}{h_{max}^2 * k}$$

$$\sigma_b(x) = \frac{6 * F}{h_{max}^2 * k} = \frac{6 * F}{h_{max}^2 * 2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{3 * F}{h_{max}^2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

$$\sigma_b(x) = \frac{6 * F}{h_{max}^2 * k}$$

$$\sigma_b(x) = \frac{3 * F}{h_{max}^2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Anhang B: Drucken mit CeraFab 7500

B1. Parameter-Sheets

Die Parameter-Sheets sind spezielle Herstelleranweisungen von Lithoz zur Herstellung der Prüfkörper im Drucker, sowie die Anleitungen für die Reinigung und das Post-Processing.

B2. Druckablauf

Vor Beginn jedes Druckvorganges muss der Drucker vorbereitet werden. Dafür muss in den Drucker die zuvor mit Ethanol und Druckluft gereinigte Schlickerwanne (1), sowie die Rakel (2) eingesetzt und mit dem Magnetschieber befestigt werden, wie in Abbildung 63 gezeigt.

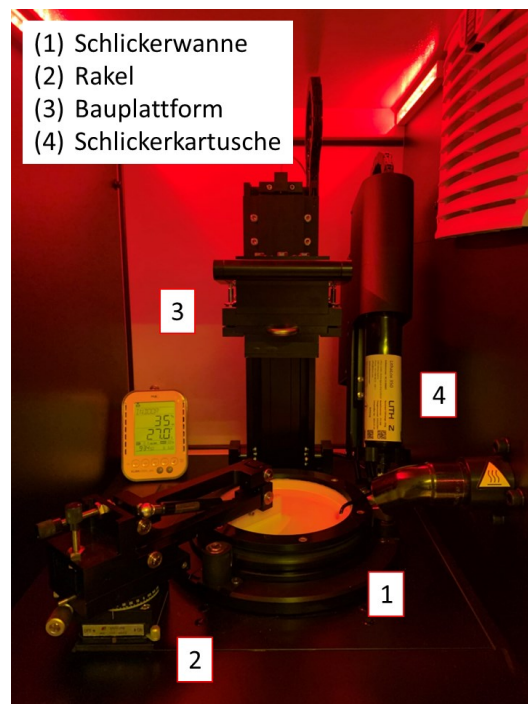


Abbildung 63: Darstellung des Innenraums des CeraFab 7500 von Lithoz am ISFK gezeigt mit den Bestandteilen: (1) Wanne, (2) Rakel, (3) Bauplattform und (4) Schlickerkartusche

Danach muss die Bauplattform (3) eingesetzt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Ränder der Bauplattform bis zum Rand mit Isolierband abgeklebt werden (siehe Abbildung 64 und Abbildung 65) um alle Einflüsse des einfallenden Lichtes zu minimieren. In Abbildung 64 ist der nicht abgeklebte Zustand dargestellt, in der deutlich der grau-weiße Spalt zu erkennen ist, wodurch Lichtstrahlen abgelenkt werden könnten. In Abbildung 65 ist der abgeklebte Zustand der Bauplattform dargestellt.

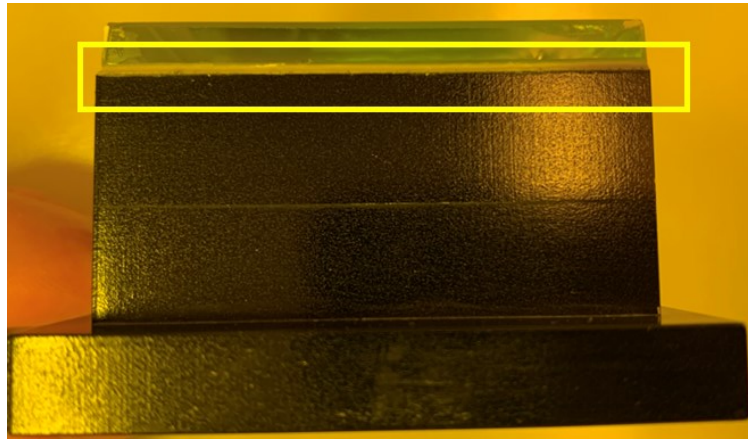


Abbildung 64: Nichtabgeklebter Zustand der Bauplattform. Im gelben Kasten ist der hellgraue Bereich gekennzeichnet, wodurch Lichtstrahlen abgelenkt werden können.

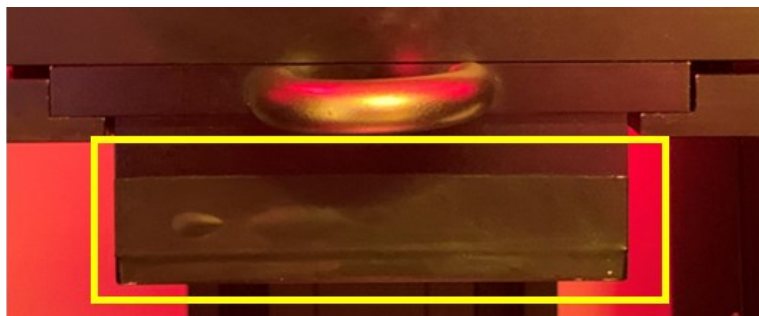


Abbildung 65: Abgeklebter Zustand der Bauplattform. Im gelben Kasten erkennt man den Bereich des schwarzen Isolierbandes, wodurch der hellgraue Bereich aus Abbildung 64 verschwindet.

Schließlich wird noch die Schlickerkartusche (4) eingesetzt. Bei der Kartusche ist darauf zu achten, dass diese noch ausreichend Schlicker für den gesamten Druck enthält. Bei der 1. Dosierung ist darauf zu achten, dass genügend Schlicker in der Wanne vorhanden ist.



Abbildung 66: Darstellung der Dosierung des Schlickers in der Schlickerwanne. Im linken Teil des Bildes erkennt man die Rakel, welche ein gleichmäßiges Schlickerbad erzeugt.

Vor Beginn jedes Drucks, ist darauf zu achten, dass die Parallelität der Oberflächen der Bauplattform und der Wanne gegeben ist. Dazu ist es notwendig, die Bauplattform bis zu einem „Referenzpunkt“ zu senken. Anschließend wird diese wieder angehoben, es sollte sich dann ein Abdruck mit geraden Kanten zeigen. Nach diesem Schritt wird die Bauplattform wieder auf „Parkposition“ eingestellt und mit der Rakel in der Wanne wieder ein gleichmäßiger Schlickerfilm erzeugt.

Die Höhe des Schlickerbades soll beim Auftragen der 1. Druckschicht ca. 150 μm betragen. Gemessen wird diese Höhe mit einem sogenannten Filmdickenmessgerät, siehe Abbildung 67. Dazu wird eine Schlickerhöhe mit der Rakel eingestellt, das Messgerät in den Schlicker gehalten und durch Ablesen der benetzten und nicht benetzten Prüfstege die Dicke des Films beurteilt. Bei Bedarf wird die Schlickerhöhe durch Änderung der Rakelposition korrigiert.

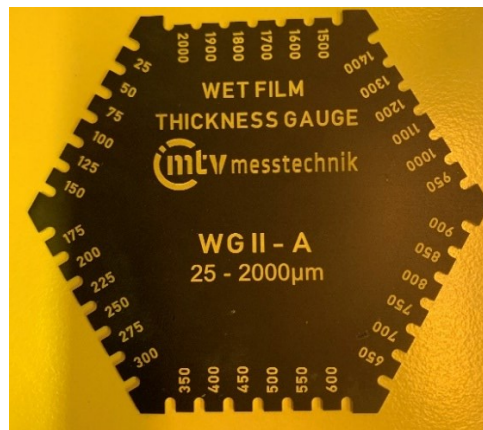


Abbildung 67: Darstellung des Filmdickenmessgerätes zur Abschätzung der Höhe des Schlickerbades. An den Seitenkanten erkennt man die Prüfstege zur Abmessung und die Zahlen an diesen Stegen geben die Höhe in μm wieder.

Anschließend wird der Druckvorgang gestartet und die 1. Schicht gedruckt. Danach wird der Vorgang manuell pausiert, um die Schlickerhöhe zu korrigieren. Für alle folgenden Schichten wird die Schlickerhöhe auf ca. 225 μm eingestellt, wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Der Grund für das Einstellen der Schlickerschicht auf diese Höhe hängt mit der 0-Position der Bauplattform zusammen. Im vorherigen Schritt wird mit einer Höhe von 150 μm ein Zustand in der Wanne erreicht in dem die Bauplattform vollständig eintaucht. Durch die Erhöhung der Schlickerhöhe in der Wanne auf 225 μm wird sichergestellt, dass die Bauplattform garantiert vollständig eintaucht. Anschließend wird der Druck wieder aufgenommen. Während des Druckens ist immer wieder zu überprüfen, ob sich genügend Schlicker in der Wanne befindet, ist das nicht der Fall, ist eine weitere Dosierung über die Schlickerkartusche vorzunehmen. Nach dem Druck müssen die Prüfkörper vorsichtig mit einer Reinigungsklinge von der Bauplattform gelöst werden. In Abbildung 68 werden Prüfkörper auf der Bauplattform gezeigt.

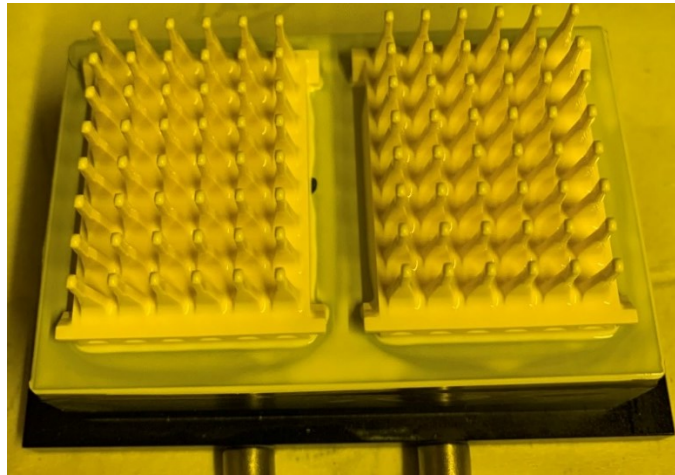


Abbildung 68: Prüfkörper direkt nach dem Drucken

Nach dem Lösen müssen die Prüfkörper in der Reinigungskabine mit dem Lösungsmittel LithaSol 20 gründlich gereinigt und getrocknet werden. Während des Reinigungsvorganges ist darauf zu achten, dass keiner der Prüfkörper mit Ethanol in Berührung kommt, da dies das Bauteil beschädigen kann. Alle Reinigungsvorgänge, sowohl mit dem Lösungsmittel als auch mit der Druckluft, werden in der Reinigungskabine, in Abbildung 69 gezeigt, durchgeführt.



Abbildung 69: Reinigungskabine für das Reinigen der Prüfkörper mit Lösungsmittel sowie mit Druckluft

Zu Beginn der Reinigung müssen die Kanten der Prüfkörper vorsichtig mit der Reinigungsklinge entgratet werden. Danach werden die Prüfkörper großflächig mit dem Lösungsmittel mit Hilfe eines Kompressors eingesprüht. Unmittelbar nach dem Einsprühen wird das Lösungsmittel durch Abblasen entfernt, da auch das Lösungsmittel die Oberfläche der Prüfkörper angreifen und beschädigen kann. Der Prüfkörper wird mit Luft aus dem Kompressor abgeblasen, bis sich keine Rückstände des überflüssigen Schlickers und des Lösungsmittels auf dem Prüfkörper befinden (siehe Abbildung 70).

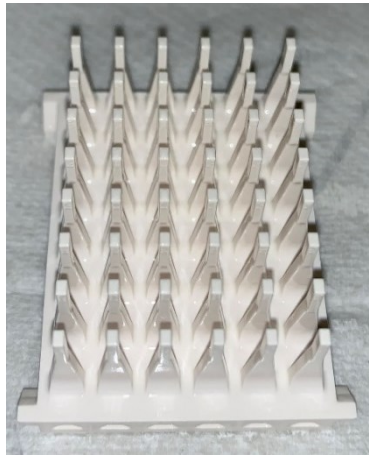


Abbildung 70: In dieser Abbildung wird ein Prüfkörper von Typ A nach der Reinigung und vor der Trocknung gezeigt. Man erkennt noch das Spiegeln des Prüfkörpers im Licht am Film des Lösungsmittels, welches im Trocknungsprozess verdunstet.

Anschließend werden die Prüfkörper zur weiteren Trocknung bei ca. 40°C in einen Trocknungs-ofen gelagert. Danach wird die Bauplattform mit Ethanol gereinigt, bis keine Schlickerrückstände und Schlieren mehr vorhanden sind. Für einen Druckjob, also einen Prüfkörpertyp, wird immer die gleiche Wanne und gleiche Bauplattform verwendet.

Das Abrüsten beginnt mit dem Herausnehmen der Bauplattform und dem Entfernen des Klebebandes um eine vollständige Reinigung dieser durchzuführen. Anschließend wird die Schlickerkartusche aus der Halterung entfernt, sollte diese Kartusche nicht vollständig verbraucht worden sein, wird der restliche Schlicker in einem Kühlschrank gelagert. Danach wird die Rakel mit dem Magnetschieber gelockert und aus dem Bauraum des Druckers entfernt und mit Ethanol gereinigt. Der letzte Schritt ist das Ausbauen der Wanne und ihre Reinigung mit Ethanol und Druckluft. Wichtig ist, die Wanne als letztes zu entfernen, da rückständiger Schlicker auf der Bauplattform oder sonstige Verunreinigungen in den Drucker gelangen und diese beschädigen können.

Der Ablauf des Druckvorgangs, der Reinigung, sowie dem Auf- und Abrüsten ist für alle drei Prüfkörpertypen derselbe.

B3. Druckergebnisse

In Tabelle 16 ist das Druckprotokoll für alle Prüfkörpertypen aufgelistet.

Tabelle 16: Auflistung des Druckprotokolls für alle Prüfkörpertypen. In den Tabellen sind die Daten des Druckstarts und der Reinigung aufgelistet. Zusätzlich sind das verwendete Probenmaterial und Lösungsmittel dargestellt.

Druckprotokoll		
Prüfkörperbezeichnung	Datum (Druckstart)	Datum (Reinigung)
A_D1_P1	04.05.22	05.05.22
A_D1_P2	04.05.22	05.05.22
A_D2_P1	05.05.22	06.05.22
A_D2_P2	05.05.22	06.05.22
A_D3_P1	06.05.22	09.05.22
A_D3_P2	06.05.22	09.05.22
B1_D1_P1	11.05.22	12.05.22
B1_D1_P2	11.05.22	12.05.22
B1_D2_P1	12.05.22	13.05.22
B1_D2_P2	12.05.22	13.05.22
A1	13.05.22	14.05.22
A2	13.05.22	14.05.22
B1_D3_P1	14.05.22	15.05.05
B1_D3_P2	14.05.22	15.05.05
B2_D1_P1	18.05.22	19.05.22
B2_D1_P2	18.05.22	19.05.22
B2_D2_P1	19.05.22	20.05.22
B2_D2_P2	19.05.22	20.05.22
B2_D3_P1	20.05.22	23.05.22
B2_D3_P2	20.05.22	23.05.22

Verwendete Schlicker: LithaLox 350
Verwendetes Lösungsmittel: LithaSol 20

Für den Prüfkörpertyp A und Prüfkörpertyp B2 wurden jeweils 6 Prüfkörper gedruckt. Für den Prüfkörpertyp B1 wurden 8 Prüfkörper gedruckt, da sich während des dritten Druckjobs dieses Prüfkörpertyps, ein Prüfkörper frühzeitig von der Bauplatzform gelöst hat. Diese Prüfkörper werden als A1 und A2, also als Ausschuss, bezeichnet und werden für die weiteren Ergebnisse und Diskussionen nicht herangezogen.

Anhang

Während der Auswertung der Proben wurde das Benennungssystem der Prüfkörper verändert. Um Missverständnisse zu vermeiden folgt in Tabelle 17 die Gegenüberstellung der „neuen“ mit den „alten“ Bezeichnung.

Tabelle 17: Gegenüberstellung "alte" mit "neuer" Prüfkörperbezeichnung

„alte“ Bezeichnung	„neue“ Bezeichnung
C1_P1/1	A_D1_P1
C1_P1/2	A_D1_P2
C1_P2/1	A_D2_P1
C1_P2/2	A_D2_P2
C1_P3/1	A_D3_P1
C1_P3/2	A_D3_P2
C2_P4/1	B1_D1_P1
C2_P4/2	B1_D1_P2
C2_P5/1	B1_D2_P1
C2_P5/2	B1_D2_P2
C2_P6/1	B1_D3_P1
C2_P6/2	B1_D3_P2
C3_P7/1	B2_D1_P1
C3_P7/2	B2_D1_P2
C3_P8/1	B2_D2_P1
C3_P8/2	B2_D2_P2
C3_P9/1	B2_D3_P1
C3_P9/2	B2_D3_P2

Anhang C: Post-Processing (Pre-Conditioning, Entbinderungsprozess, Vorsintern und Sintern)

C1. Durchführung der Post-Processing-Schritte

Aufgrund des positionsabhängigen Wärmeflusses durch das Post-Processing in den Öfen ist es wichtig, die Positionen der Prüfkörper auf der Platte zu kennen, um später Rückschlüsse auf die Eigenschaften einzelner Prüfkörper ziehen zu können. Die Positionen auf der Sinterunterlage werden beim Pre-Conditioning, dem Entbinderungsprozess und dem Vorsintern durchgehend beibehalten. Bei der Vorbereitung für den Sintervorgang, müssen die Prüfkörper nochmals hochgehoben werden, um das Sintergranulat zwischen die Sinterplatte und den Prüfkörper zu verteilen. Dadurch kann es sein, dass sich die Positionierungen beim Sintern zu den vorhergehenden Post-Processing-Schritten leicht unterscheiden. Die Sinterplatte wurde immer in der Mitte der Öfen positioniert. Abbildung 71 zeigt die Positionen der Prüfkörper des Typs A während des Pre-Conditionings, des Entbinderungsprozesses und des Vorsinterns. Die Bezeichnungen der Prüfkörper sind Kapitel 2.3.3 zu entnehmen.

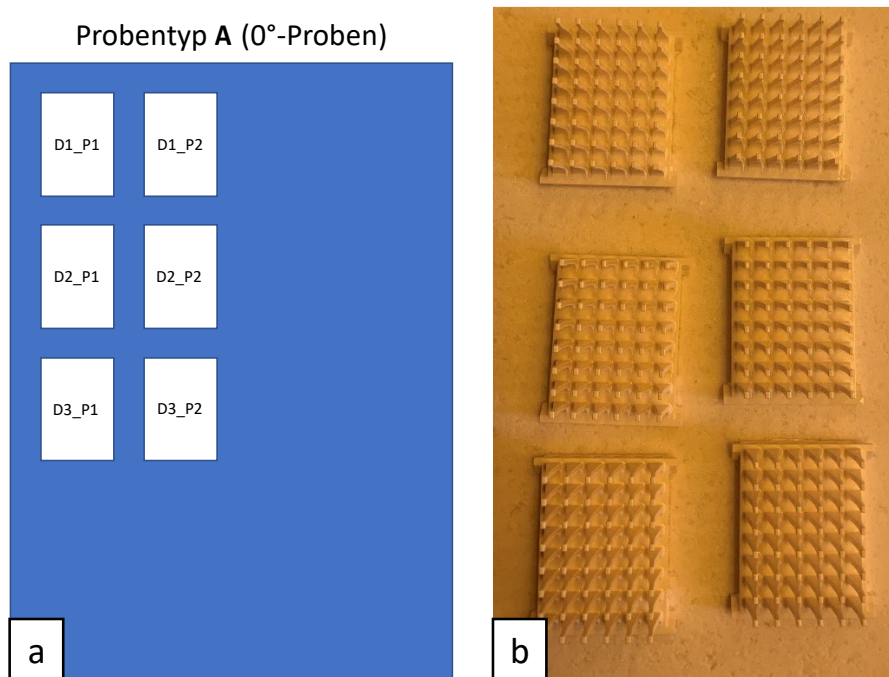


Abbildung 71: In **a**) wird die schematische Positionierung der Prüfkörper vom Typ A während des „Pre-Conditionings“, „Entbinderungsprozesses“ und dem „Vorsintern“ gezeigt, in blau ist schematisch die Sinterplatte dargestellt. In **b**) ist die tatsächliche Positionierung dargestellt.

Abbildung 72 zeigt die Positionierung der Prüfkörper des Prüfkörpertyps B1 während des Pre-Conditionings, des Entbinderungsprozesses und des Vorsinterns. In Rot sind die beiden Ausschuss-Prüfkörper A1 und A2 dargestellt.

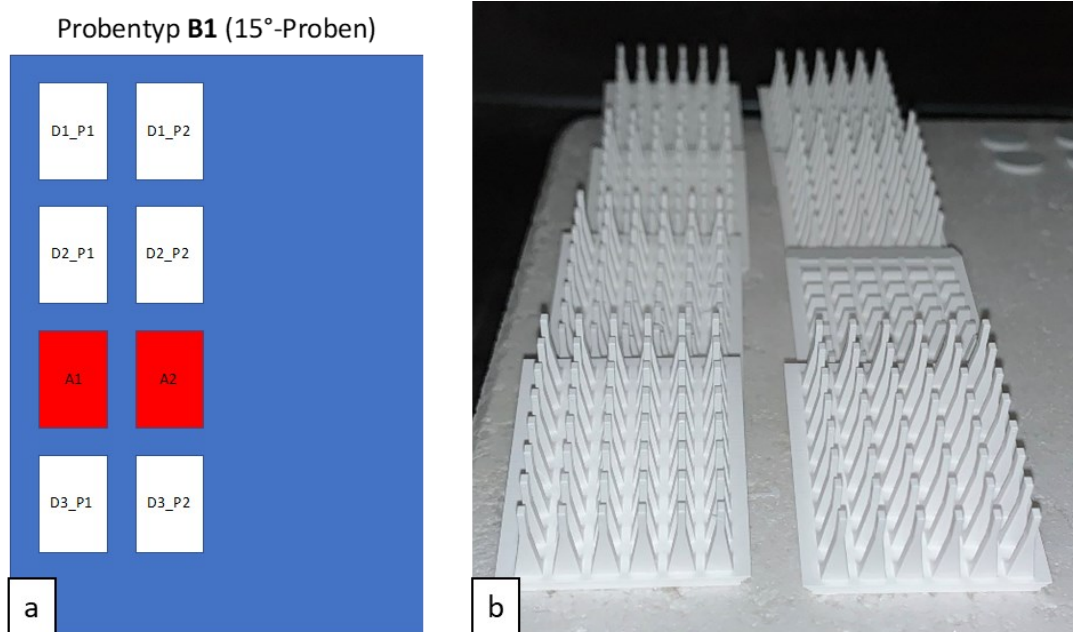


Abbildung 72: In **a**) wird die schematische Positionierung der Prüfkörper vom Typ B1 während des „Pre-Conditionings“, „Entbinderungsprozesses“ und dem „Vorsintern“ gezeigt, in blau ist schematisch die Sinterplatte dargestellt. In Rot schattiert dargestellt, die beiden Ausschuss-Prüfkörper A1 und A2. In **b**) ist die tatsächliche Positionierung dieses Prüfkörpertyps dargestellt. Die Ausschuss-Prüfkörper erkennt man in der zweiten Reihe von vorne.

In Abbildung 73 sind die Prüfkörper vom Typ B2 nach dem Pre-Conditioning und dem Entbinderungsprozess gezeigt.

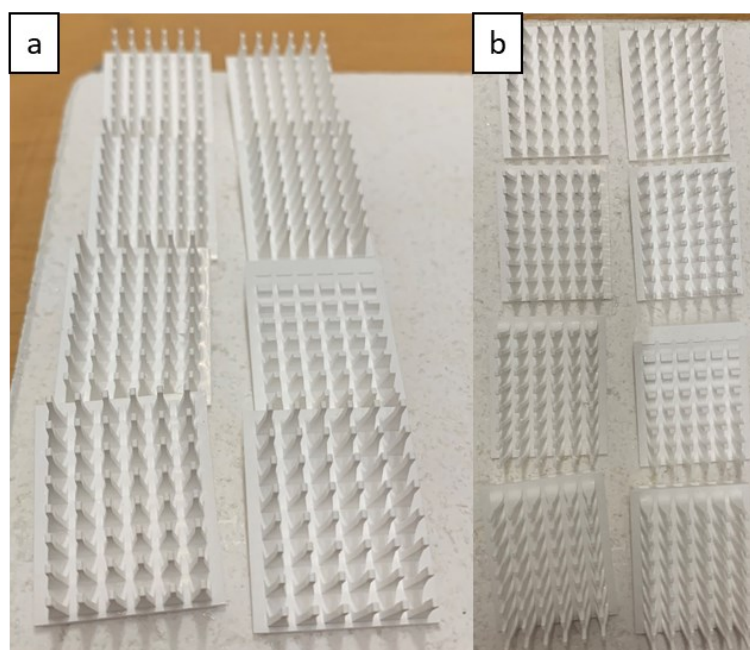


Abbildung 73: In **a**) und **b**) werden die tatsächlichen Ansichten der Prüfkörper vom Prüfkörpertyp B1 nach dem Pre-Conditioning und dem Entbinderungsprozess gezeigt.

Abbildung 74 zeigt die Positionierung der Prüfkörper des Prüfkörpertyps B2 während des Pre-Conditionings, des Entbinderungsprozesses und des Vorsinterns.

Probentyp **B2** (15°-180°-gedreht- Proben)

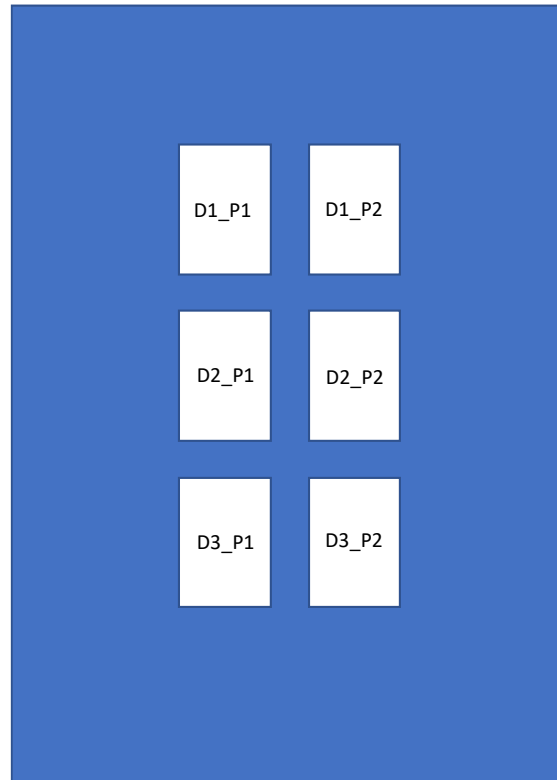


Abbildung 74: In dieser Abbildung wird die schematische Positionierung der Prüfkörper vom Typ B2 während des „Pre-Conditionings“, „Entbinderungsprozesses“ und dem „Vorsintern“ gezeigt, in blau ist schematisch die Sinterplatte dargestellt.

Abbildung 75 zeigt die Positionierung der Prüfkörper während des Sinterns. Der Prozess-Temperatur-Kontrollring ist schematisch in Rot dargestellt.

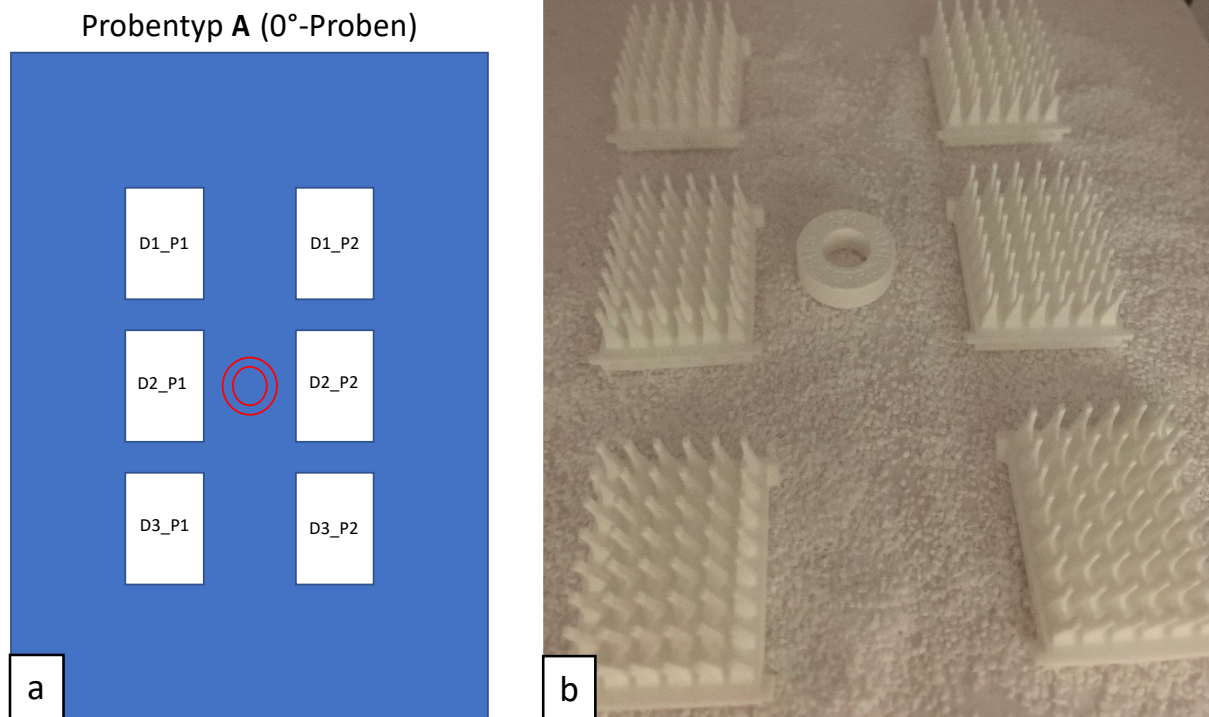


Abbildung 75: In **a)** wird die schematische Positionierung der Prüfkörper vom Typ A während des „Sinterns“ gezeigt, in blau ist schematisch die Sinterplatte dargestellt. Der rote Kreisring symbolisiert den Prozess-Temperatur-Kontrollring. In **b)** ist die tatsächliche Positionierung dieses Prüfkörpertyps dargestellt, zusätzlich mit dem Prozess-Temperatur-Kontrollring und dem Sintergranulat zwischen Sinterplatte und Prüfkörper.

Die Positionierung der Prüfkörper des Prüfkörpertyps B1 während des Sinterns ist in Abbildung 76 dargestellt. In schwarz strichliert werden die 15°-Sinterkeile dargestellt.

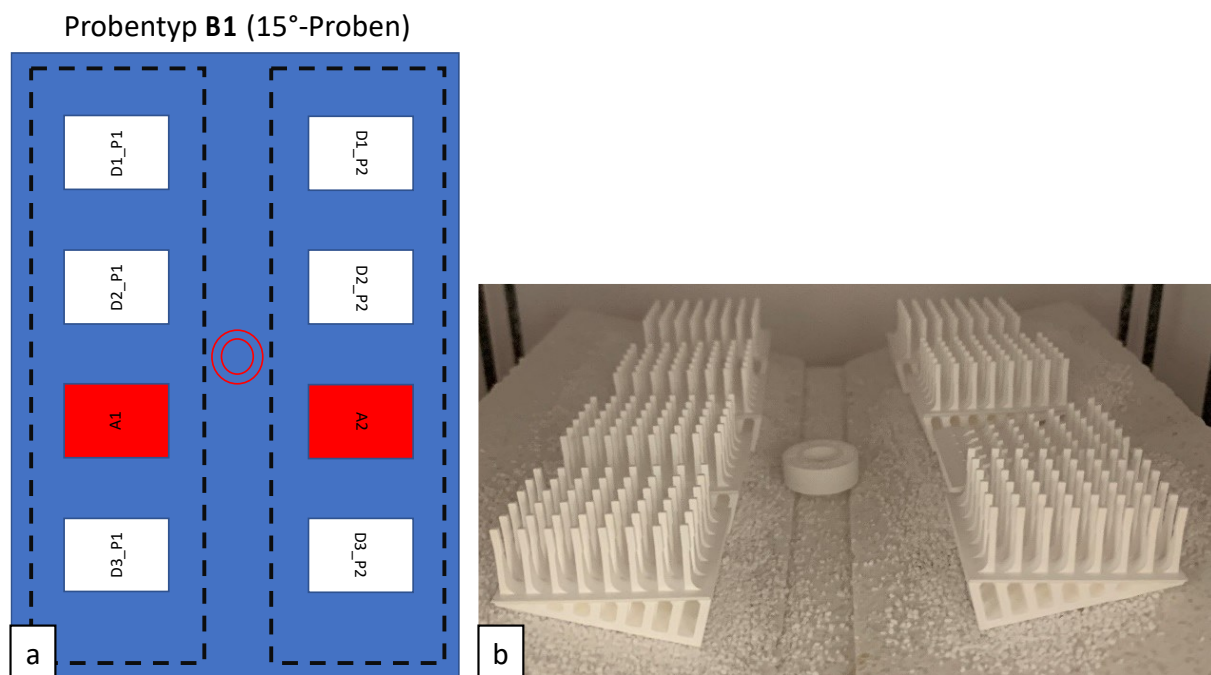


Abbildung 76: In **a)** wird die schematische Positionierung der Prüfkörper vom Typ B1 während des „Sinterns“ gezeigt, in blau ist schematisch die Sinterplatte dargestellt. Der rote Kreisring symbolisiert den Prozess-Temperatur-Kontrollring. In Rot schattiert dargestellt, wieder die beiden Ausschuss-Prüfkörper A1 und A2 und in schwarz-strichliert sind die 15°-Sinterkeile dargestellt. In **b)** ist die tatsächliche Positionierung dieses Prüfkörpertyps dargestellt, zusätzlich mit dem Prozess-Temperatur-Kontrollring und dem Sintergranulat zwischen Sinterplatte und Prüfkörper. Man erkennt die Ausrichtung der Prüfkörper auf den 15°-Keilen für die Ausrichtung der Biegebalken normal zur Sinterplatte, um den Verzug durch das Eigengewicht vorzubeugen.

Die Positionierung der Prüfkörper des Prüfkörpertyps B2 während des Sinterns ist in Abbildung 77 dargestellt.

Probentyp **B2** (15°-180°-gedreht- Proben)

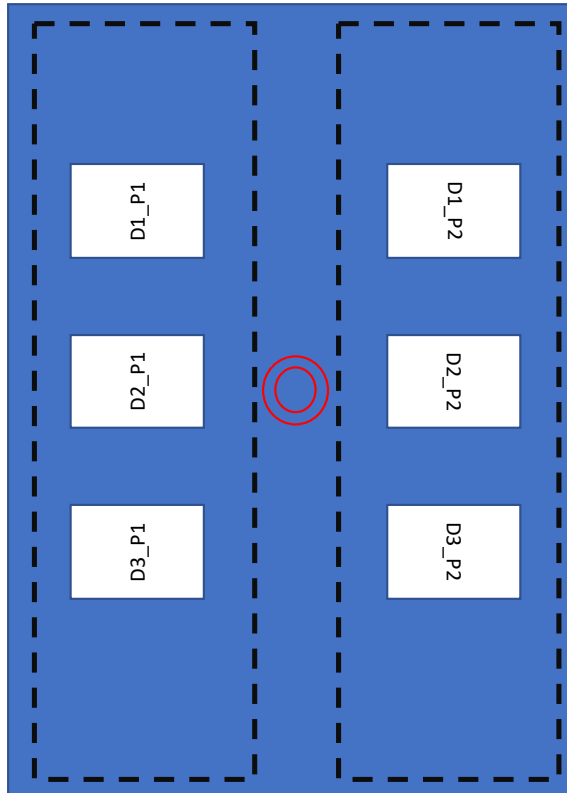


Abbildung 77: In dieser Abbildung wird die schematische Positionierung der Prüfkörper vom Typ B2 während des „Sinterns“ gezeigt, in blau ist schematisch die Sinterplatte dargestellt. Der rote Kreisring symbolisiert den Prozess-Temperatur-Kontrollring. In schwarz-strichliert sind die 15°-Sinterkeile dargestellt.

C2. Ergebnisse des Post-Processings

In Tabelle 18 ist das Protokoll des Pre-Conditionings aufgelistet.

Tabelle 18: Auflistung des Post-Processing-Protokolls für das „Pre-Conditioning“ aller Prüfkörpertypen. In den Tabellen sind Daten des Starts und des Endes des Post-Processing-Schrittes sowie der verwendete Ofen und das verwendete Ofenprogramm dargestellt.

Pre-Conditioning		
Prüfkörperbezeichnung	Datum (Start)	Datum (Ende)
A_D1_P1	09.05.22	12.05.22
A_D1_P2	09.05.22	12.05.22
A_D2_P1	09.05.22	12.05.22
A_D2_P2	09.05.22	12.05.22
A_D3_P1	09.05.22	12.05.22
A_D3_P2	09.05.22	12.05.22
B1_D1_P1	15.05.22	18.05.22
B1_D1_P2	15.05.22	18.05.22
B1_D2_P1	15.05.22	18.05.22
B1_D2_P2	15.05.22	18.05.22
A1	15.05.22	18.05.22
A2	15.05.22	18.05.22
B1_D3_P1	15.05.22	18.05.22
B1_D3_P2	15.05.22	18.05.22
B2_D1_P1	27.05.22	30.05.22
B2_D1_P2	27.05.22	30.05.22
B2_D2_P1	27.05.22	30.05.22
B2_D2_P2	27.05.22	30.05.22
B2_D3_P1	27.05.22	30.05.22
B2_D3_P2	27.05.22	30.05.22

Verwendeter Ofen: Thermconcept Umluftofen

Verwendetes Programm: 2-Pre-Conditioning

Dauer des Pre-Conditionings: 2 Tage

In Tabelle 19 ist das Protokoll des Entbinderungsprozesses aufgelistet.

Tabelle 19: Auflistung des Post-Processing-Protokolls für den „Entbinderungsprozess“ aller Prüfkörpertypen. In den Tabellen sind Daten des Starts und des Endes des Post-Processing-Schrittes sowie der verwendete Ofen und das verwendete Ofenprogramm dargestellt.

Entbinderungsprozess		
Prüfkörperbezeichnung	Datum (Start)	Datum (Ende)
A_D1_P1	12.05.22	15.05.22
A_D1_P2	12.05.22	15.05.22
A_D2_P1	12.05.22	15.05.22
A_D2_P2	12.05.22	15.05.22
A_D3_P1	12.05.22	15.05.22
A_D3_P2	12.05.22	15.05.22
B1_D1_P1	18.05.22	21.05.22
B1_D1_P2	18.05.22	21.05.22
B1_D2_P1	18.05.22	21.05.22
B1_D2_P2	18.05.22	21.05.22
A1	18.05.22	21.05.22
A2	18.05.22	21.05.22
B1_D3_P1	18.05.22	21.05.22
B1_D3_P2	18.05.22	21.05.22
B2_D1_P1	31.05.22	03.06.22
B2_D1_P2	31.05.22	03.06.22
B2_D2_P1	31.05.22	03.06.22
B2_D2_P2	31.05.22	03.06.22
B2_D3_P1	31.05.22	03.06.22
B2_D3_P2	31.05.22	03.06.22

Verwendeter Ofen: Thermconcept Umluftofen

Verwendetes Programm: 3-Entbindern

Dauer des Entbinderungsprozesses: 3,5 Tage

In Tabelle 20 ist das Protokoll des Vorsinterns aufgelistet.

Tabelle 20: Auflistung des Post-Processing-Protokolls für das „Vorsintern“ aller Prüfkörpertypen. In den Tabellen sind Daten des Starts und des Endes des Post-Processing-Schrittes sowie der verwendete Ofen und das verwendete Ofenprogramm dargestellt.

Vorsintern		
Prüfkörperbezeichnung	Datum (Start)	Datum (Ende)
A_D1_P1	16.05.22	18.05.22
A_D1_P2	16.05.22	18.05.22
A_D2_P1	16.05.22	18.05.22
A_D2_P2	16.05.22	18.05.22
A_D3_P1	16.05.22	18.05.22
A_D3_P2	16.05.22	18.05.22
B1_D1_P1	27.05.22	29.05.22
B1_D1_P2	27.05.22	29.05.22
B1_D2_P1	27.05.22	29.05.22
B1_D2_P2	27.05.22	29.05.22
A1	27.05.22	29.05.22
A2	27.05.22	29.05.22
B1_D3_P1	27.05.22	29.05.22
B1_D3_P2	27.05.22	29.05.22
B2_D1_P1	07.06.22	09.06.22
B2_D1_P2	07.06.22	09.06.22
B2_D2_P1	07.06.22	09.06.22
B2_D2_P2	07.06.22	09.06.22
B2_D3_P1	07.06.22	09.06.22
B2_D3_P2	07.06.22	09.06.22

Verwendeter Ofen: Thermconcept Hochtemperaturofen

Verwendetes Programm: 6-Vorsintern

Dauer des Vorsinterns: 2 Tage

In Tabelle 21 ist das Protokoll des Sinterns aufgelistet.

Tabelle 21: Auflistung des Post-Processing-Protokolls für das „Sintern“ aller Prüfkörpertypen. In den Tabellen sind Daten des Starts und des Endes des Post-Processing-Schrittes sowie der verwendete Ofen und das verwendete Ofenprogramm dargestellt. Zusätzlich ist das verwendete Sinterpulver aufgelistet.

Sintern		
Prüfkörperbezeichnung	Datum (Start)	Datum (Ende)
A_D1_P1	18.05.22	20.05.22
A_D1_P2	18.05.22	20.05.22
A_D2_P1	18.05.22	20.05.22
A_D2_P2	18.05.22	20.05.22
A_D3_P1	18.05.22	20.05.22
A_D3_P2	18.05.22	20.05.22
B1_D1_P1	31.05.22	02.06.22
B1_D1_P2	31.05.22	02.06.22
B1_D2_P1	31.05.22	02.06.22
B1_D2_P2	31.05.22	02.06.22
A1	31.05.22	02.06.22
A2	31.05.22	02.06.22
B1_D3_P1	31.05.22	02.06.22
B1_D3_P2	31.05.22	02.06.22
B2_D1_P1	09.06.22	11.06.22
B2_D1_P2	09.06.22	11.06.22
B2_D2_P1	09.06.22	11.06.22
B2_D2_P2	09.06.22	11.06.22
B2_D3_P1	09.06.22	11.06.22
B2_D3_P2	09.06.22	11.06.22

Verwendeter Ofen: Thermconcept Hochtemperaturofen

Verwendetes Programm: 4-Sintern

Dauer des Sinterns: 2 Tage

Sinterzusatz: Almatix Premium Alumina-Pulver

Anhang D: Ergebnisse

D1. Auswertung der Gültigkeit der Biegebalken

In diesem Kapitel befinden sich die Auswertungen der Gültigkeit der Biegebalken. Die Bedeutungen der Farbcodierungen sind:

- **Blau:** ungültiger Kraft-Zeitverlauf (siehe Abbildung 28)
- **Orange:** die Prüfdauer wurde über- oder unterschritten
- **Rot:** die gültige Bruchlänge liegt nicht im geforderten Bereich (siehe Tabelle 9)
- **Gelb:** zerstörte Biegebalken durch gelockerten Prüfdorn (nur für Prüfkörper B2_D2_P2 relevant)
- **Grau:** Biegebalken wurde nicht geprüft

SV	Spannungsverlauf
t	Prüfdauer
BL	Bruchlänge
*	Prüfdorn
-	Keine Probe vorhanden

Prüfkörpertyp A:

A_D1_P1 (Gültig=25)

A1 SV	B1	C1	D1	E1	F1
A2	B2 BL	C2	D2	E2 BL	F2 BL
A3 BL	B3	C3 BL	D3	E3 BL	F3 BL
A4	B4	C4 BL	D4 BL	E4 BL	F4 BL
A5	B5	C5 BL	D5	E5 BL	F5 BL
A6	B6	C6	D6 BL	E6 BL	F6 BL
A7	B7	C7	D7 BL	E7 BL	F7 BL
A8	B8 BL	C8	D8	E8	F8 keine Probe

A_D1_P2 (Gültig=19)

A1 SV	B1 SV	C1	D1 BL	E1	F1
A2 BL	B2	C2 BL	D2	E2 BL	F2 BL
A3 BL	B3 BL	C3 BL	D3 BL	E3 BL	F3
A4	B4 SV	C4 SV	D4 SV	E4 BL	F4
A5	B5	C5 t	D5 BL	E5 BL	F5 SV
A6	B6	C6	D6 SV	E6 t	F6 SV
A7	B7 BL	C7	D7 BL	E7	F7
A8	B8	C8 SV BL	D8 t	E8 BL	F8 keine Probe

Anhang

A_D2_P1 (Gültig=33)

A1	B1	C1 BL	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3 SV	B3	C3	D3	E3 BL	F3 BL
A4 BL	B4	C4	D4	E4 BL	F4
A5 BL	B5	C5	D5	E5 BL	F5 BL
A6 SV	B6	C6	D6	E6	F6
A7 T	B7 BL	C7	D7	E7	F7
A8 BL	B8	C8 BL	D8	E8 T	F8

A_D2_P2 (Gültig=29)

A1	B1 SV	C1 BL	D1 BL	E1	F1
A2 BL	B2 BL	C2	D2	E2 BL	F2
A3	B3 BL	C3	D3 BL	E3	F3 BL
A4	B4 BL	C4	D4 BL	E4 SV	F4 BL
A5 BL	B5	C5 BL	D5	E5	F5
A6	B6	C6 BL	D6 BL	E6	F6 BL
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8 BL	D8	E8	F8

A_D3_P1 (Gültig=18)

A1 BL	B1	C1 BL	D1 BL	E1 BL	F1
A2 BL	B2	C2 BL	D2 BL	E2 BL	F2 BL
A3	B3 BL	C3	D3	E3 BL	F3 BL
A4	B4 BL	C4 BL	D4 BL	E4 BL	F4 BL
A5 BL	B5 BL	C5 BL	D5 BL	E5 BL	F5 BL
A6 BL	B6 BL	C6 BL	D6	E6	F6 BL
A7 BL	B7 BL	C7	D7 BL	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8

A_D3_P2 (Gültig=32)

A1	B1	C1 BL	D1	E1	F1 BL
A2	B2	C2	D2 BL	E2 BL	F2
A3	B3 T	C3	D3	E3 BL	F3
A4	B4 BL	C4 BL	D4 BL	E4 BL	F4 BL
A5	B5	C5	D5	E5 BL	F5
A6	B6	C6	D6 BL	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8 BL	D8	E8 BL	F8 BL

Prüfkörpertyp B1:

B1_D1_P1 (Gültig=44)

A1 SV	B1	C1	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3	B3	C3	D3 BL	E3	F3
A4 BL	B4 BL	C4	D4	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8

B1_D1_P2 (Gültig=41)

A1 SV	B1	C1	D1	E1	F1
A2 BL	B2	C2	D2	E2	F2
A3 BL	B3	C3 BL	D3 BL	E3 BL	F3
A4	B4	C4	D4 BL	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8

B1_D2_P1 (Gültig=27)

A1 SV	B1 BL	C1	D1	E1	F1 SV
A2 BL	B2 BL	C2 BL	D2 BL	E2	F2
A3	B3 BL	C3 BL	D3	E3	F3
A4 BL	B4 BL	C4 BL	D4 BL	E4	F4 BL
A5	B5	C5	D5	E5 BL	F5 BL
A6	B6	C6	D6	E6 BL	F6 BL
A7	B7	C7	D7 BL	E7	F7
A8 BL	B8	C8	D8	E8 BL	F8

B1_D2_P2

A1	B1	C1	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3	B3	C3	D3	E3	F3
A4	B4	C4	D4	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8

Anhang

B1_D3_P1

A1	B1	C1	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3	B3	C3	D3	E3	F3
A4	B4	C4	D4	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8

B1_D3_P2 (Gültig=32)

A1 SV	B1 L	C1 BL	D1	E1	F1
A2 L	B2	C2	D2	E2	F2
A3 BL	B3 BL	C3 BL	D3	E3	F3
A4	B4	C4	D4	E4 BL	F4 BL
A5 SV	B5	C5	D5	E5	F5
A6 SV	B6	C6 BL	D6 BL	E6 BL	F6
A7	B7 BL	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8 BL	F8

Prüfkörpertyp B2:

B2_D1_P1 (Gültig=47)

A1 SV	B1	C1	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3	B3	C3	D3	E3	F3
A4	B4	C4	D4	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8

B2_D1_P2 (Gültig=47)

A1	B1	C1	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3	B3	C3	D3	E3	F3
A4	B4	C4	D4	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8 BL

B2_D2_P1

A1	B1	C1	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3	B3	C3	D3	E3	F3
A4	B4	C4	D4	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8

B2_D2_P2 (Gültig=29)

A1 SV	B1	C1	D1 BL	E1 *	F1 BL
A2 SV	B2	C2	D2	E2 *	F2
A3	B3	C3	D3	E3 *	F3 BL
A4	B4	C4	D4	E4 *	F4
A5	B5	C5	D5	E5 *	F5
A6	B6	C6	D6 *	E6 *	F6
A7 BL	B7	C7 BL	D7 *	E7 *	F7
A8	B8 BL	C8	D8 *	E8 *	F8

B2_D3_P1 (Gültig=44)

A1	B1 BL	C1	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3	B3	C3	D3	E3	F3
A4	B4	C4	D4	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6 BL	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8 BL	E8	F8 BL

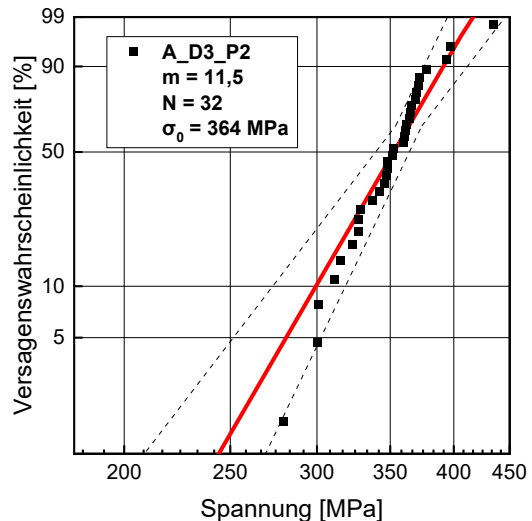
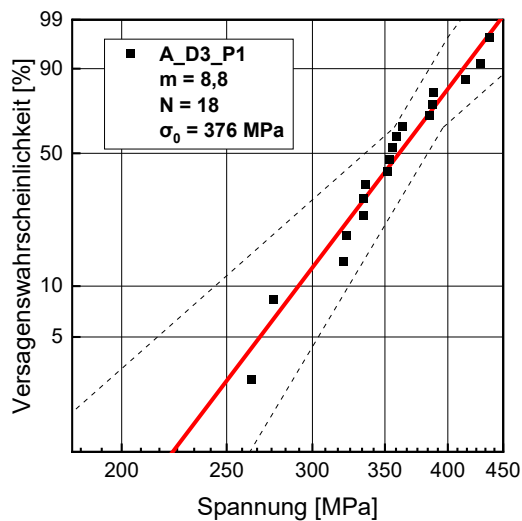
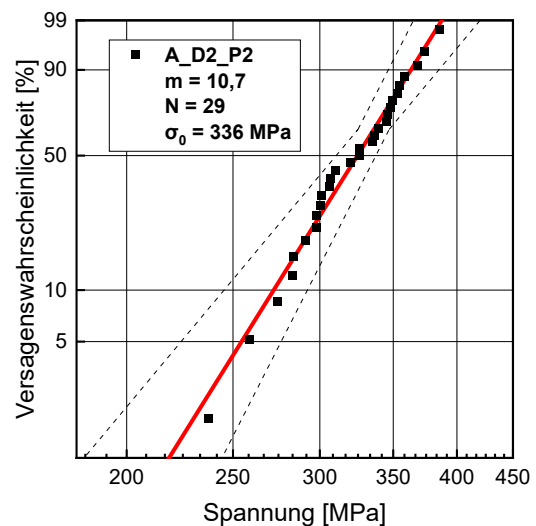
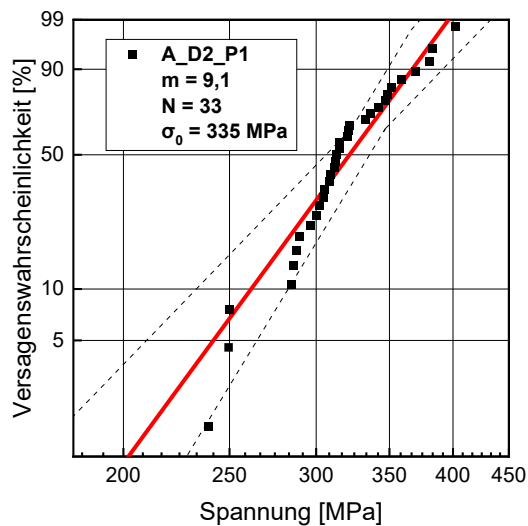
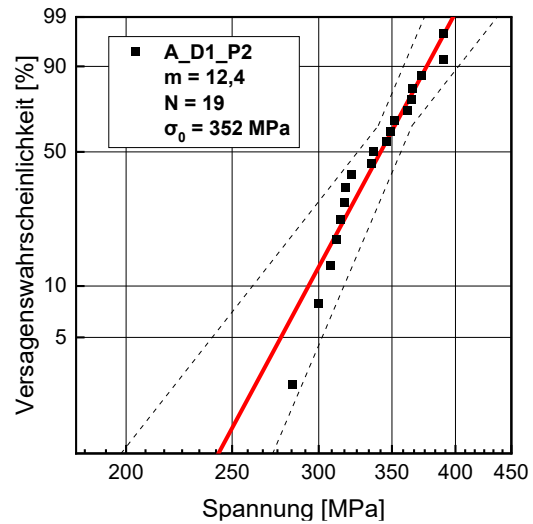
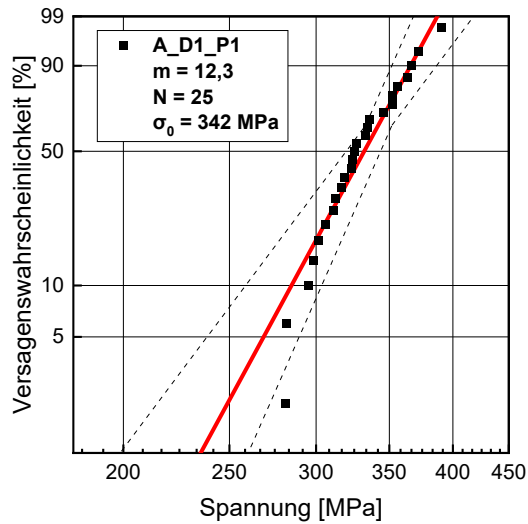
B2_D3_P2

A1	B1	C1	D1	E1	F1
A2	B2	C2	D2	E2	F2
A3	B3	C3	D3	E3	F3
A4	B4	C4	D4	E4	F4
A5	B5	C5	D5	E5	F5
A6	B6	C6	D6	E6	F6
A7	B7	C7	D7	E7	F7
A8	B8	C8	D8	E8	F8

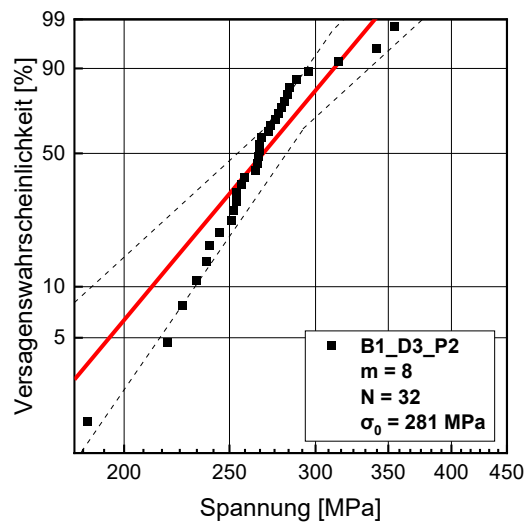
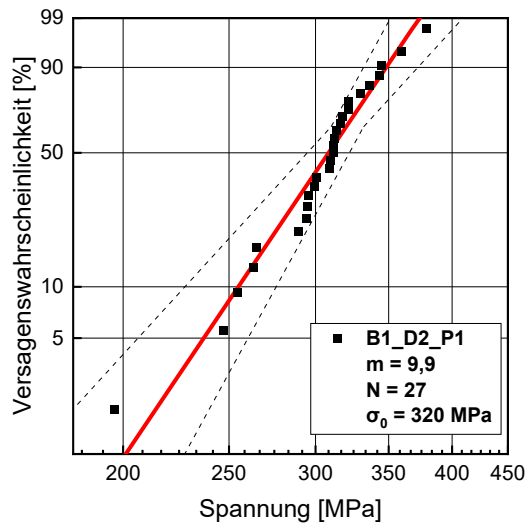
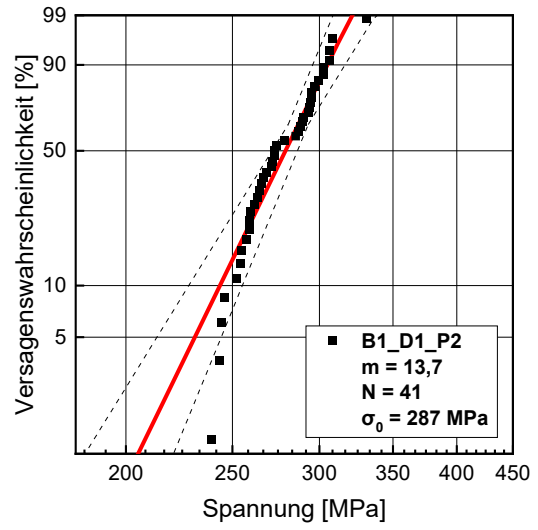
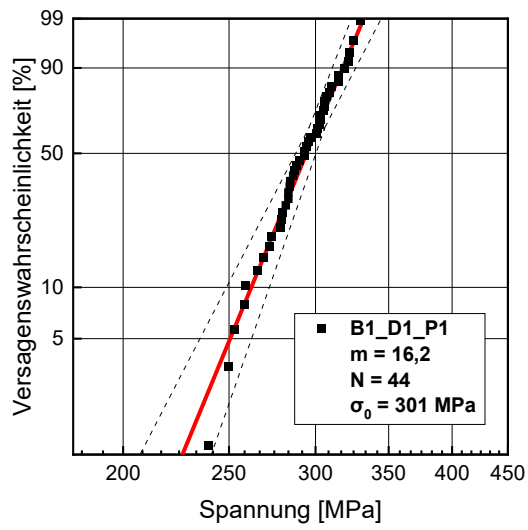
D2. Weibull-Auswertungen

In diesem Kapitel befinden sich die Weibull-Auswertungen aller Prüfkörpertypen.

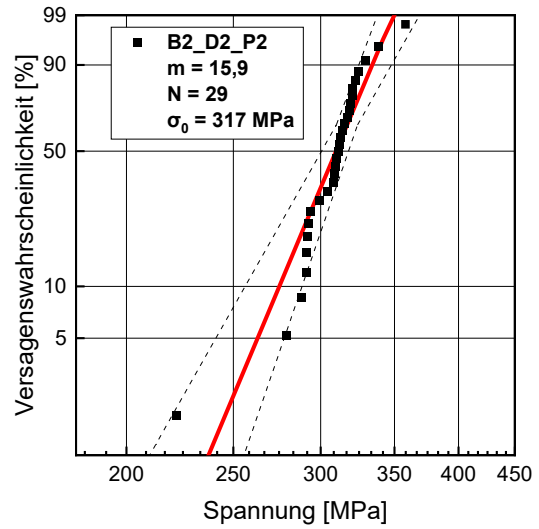
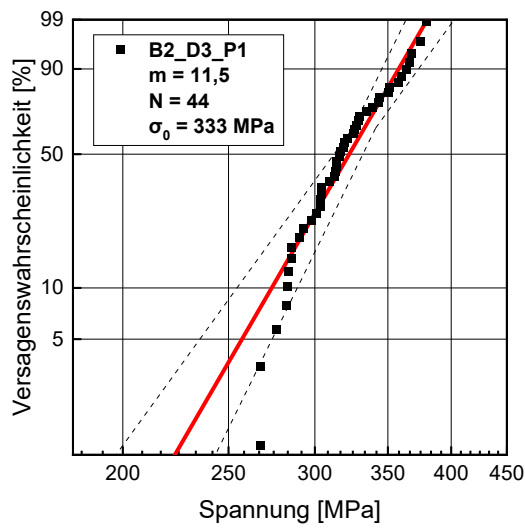
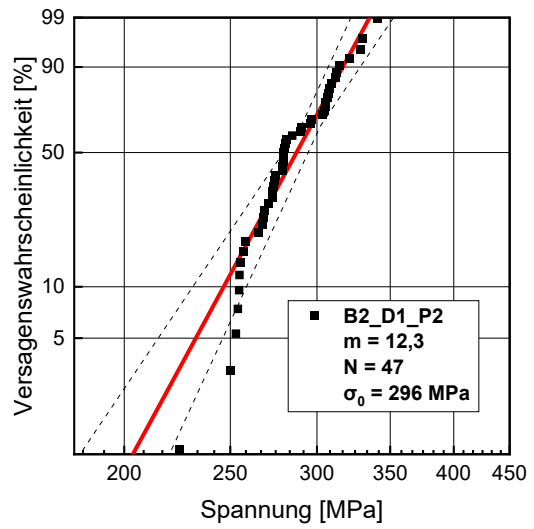
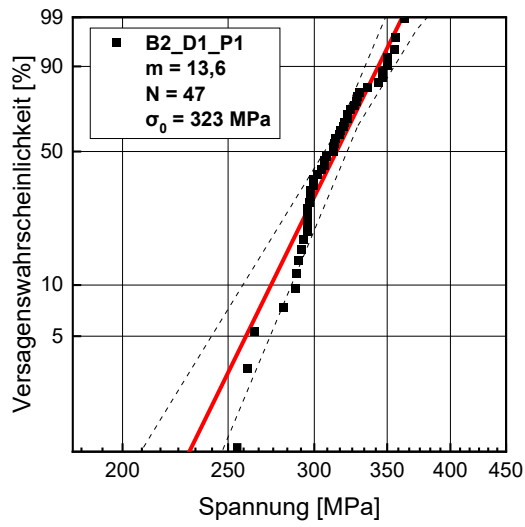
Prüfkörpertyp A:



Prüfkörpertyp B1:



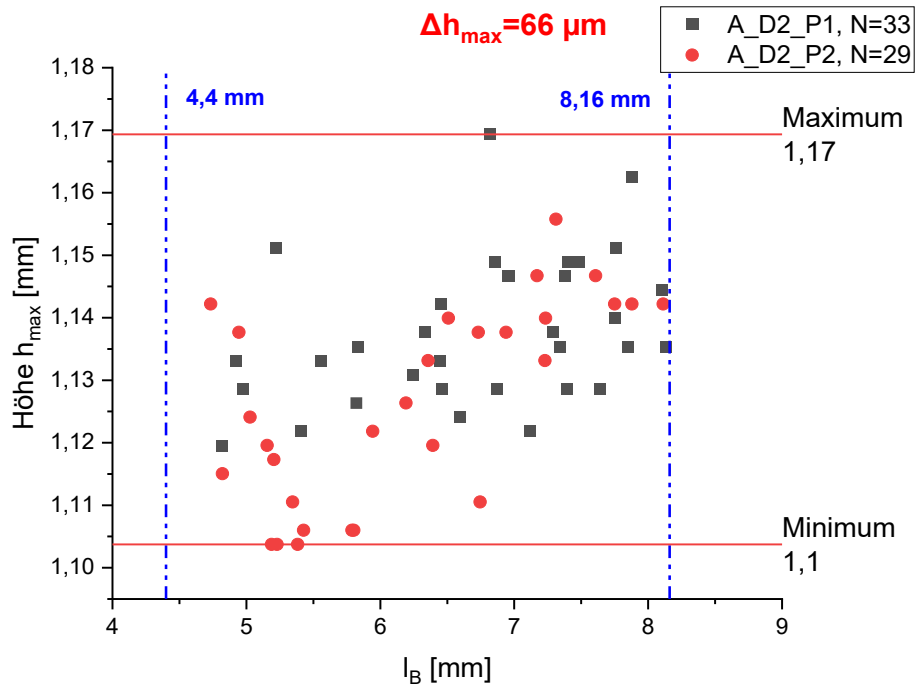
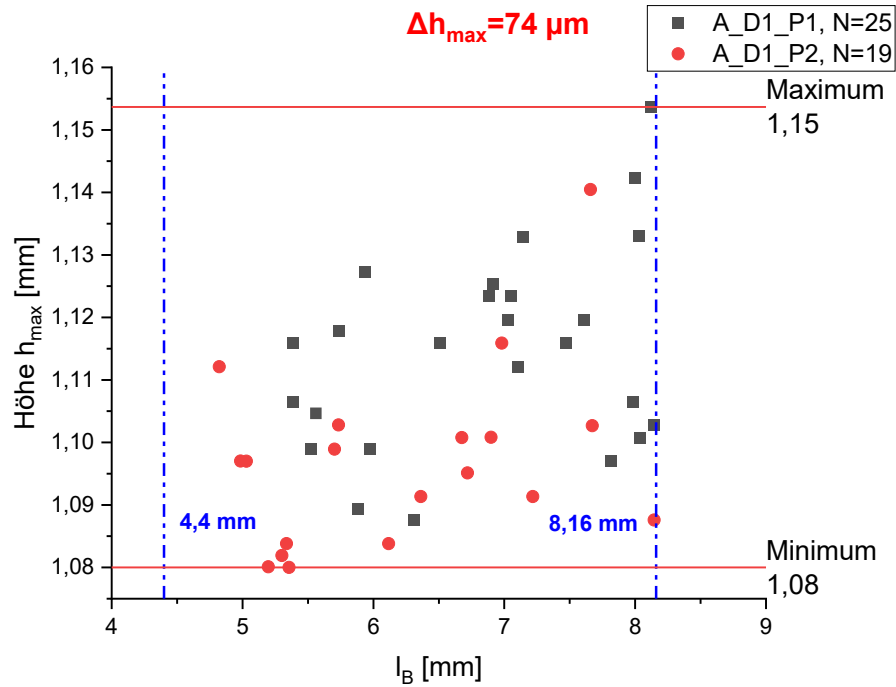
Prüfkörpertyp B2:

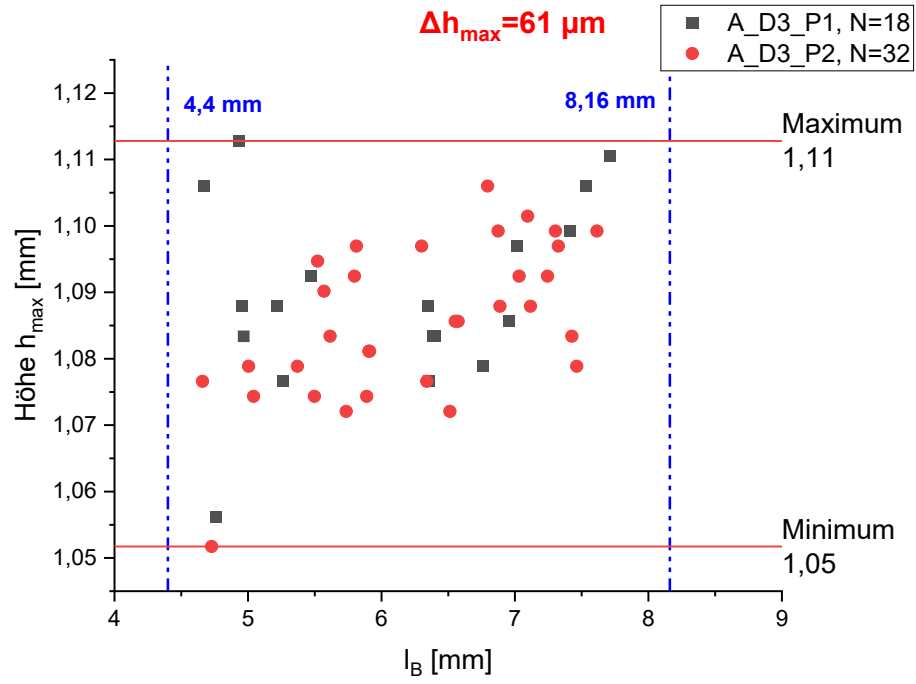


D3. Zusammenhang h_{max} mit l_B

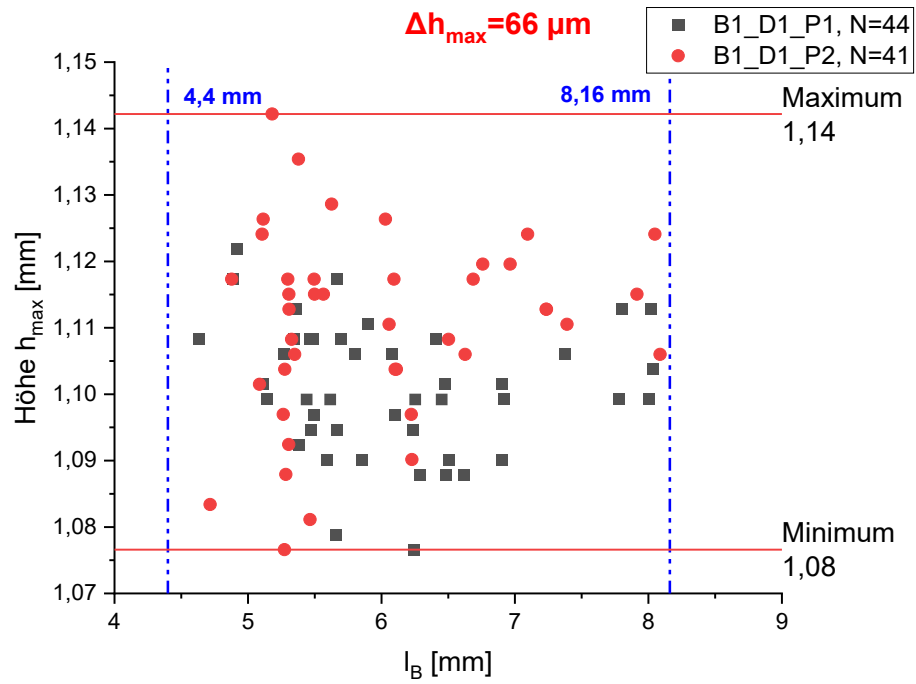
In diesem Kapitel werden die Diagramme der unterschiedlichen Höhen h_{max} in Abhängigkeit der Bruchlängen l_B abgebildet.

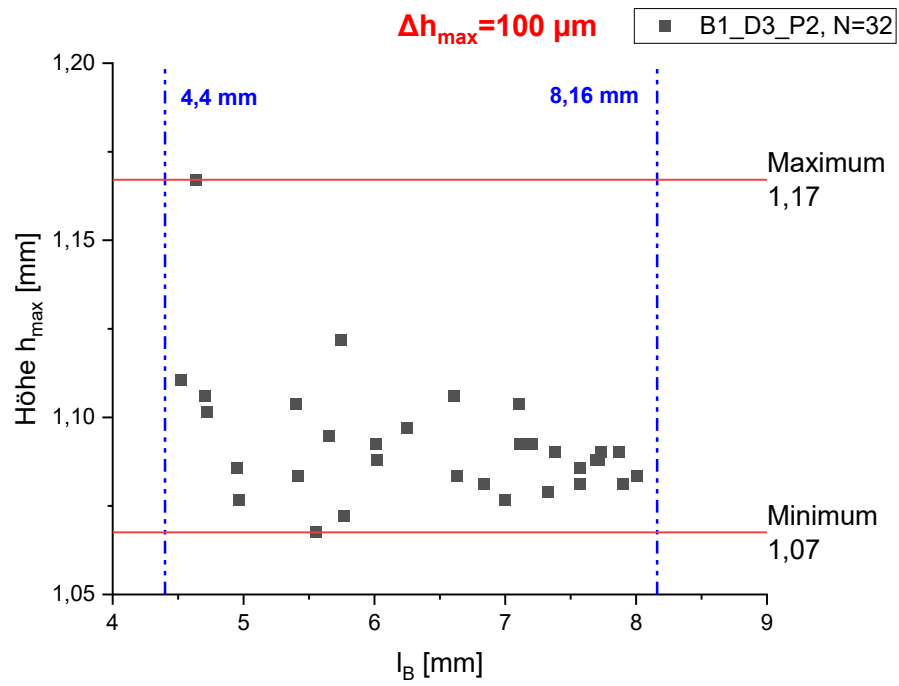
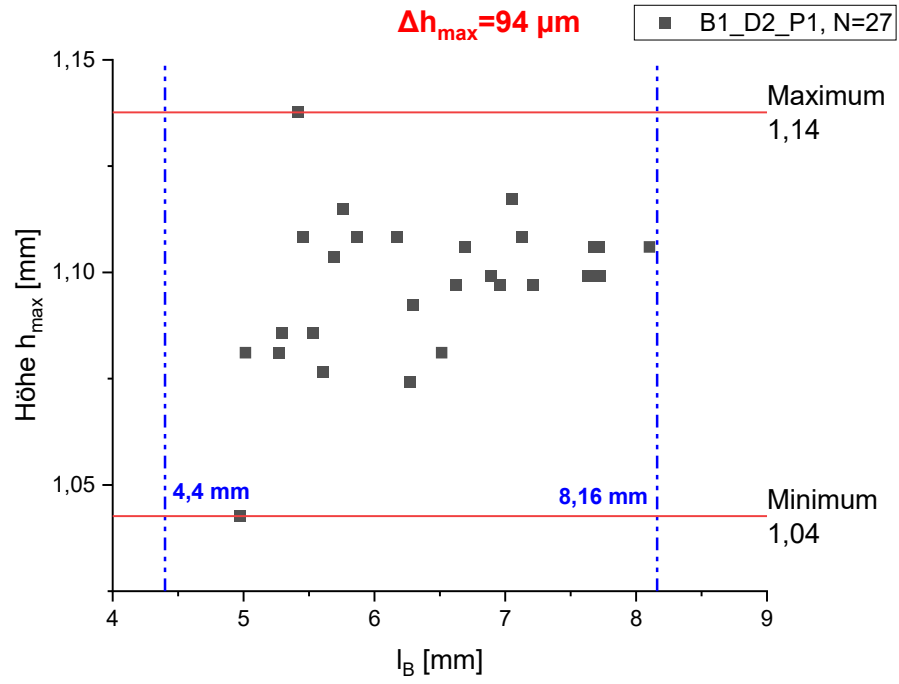
Prüfkörpertyp A:



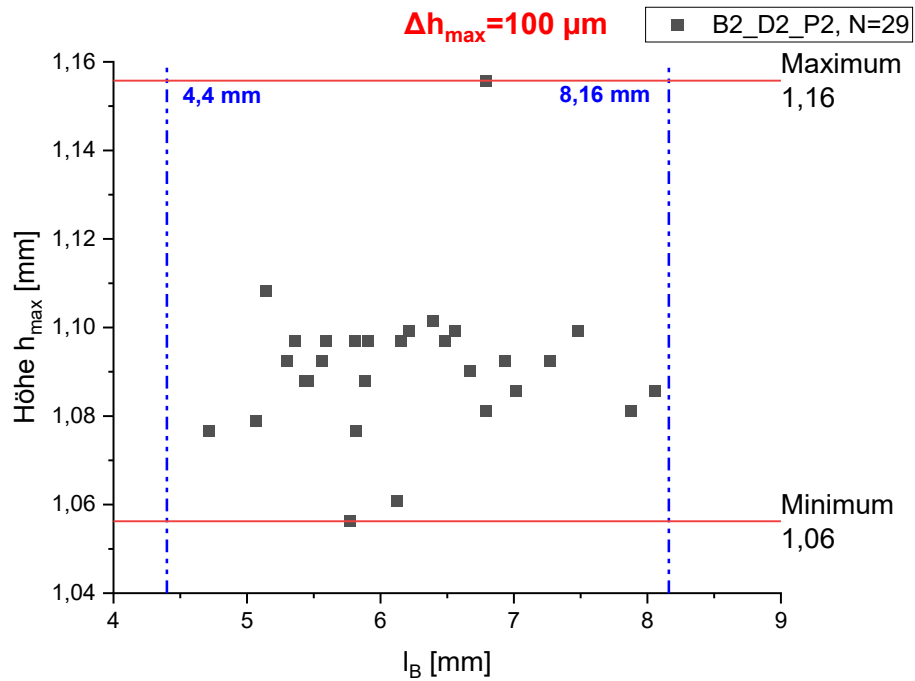
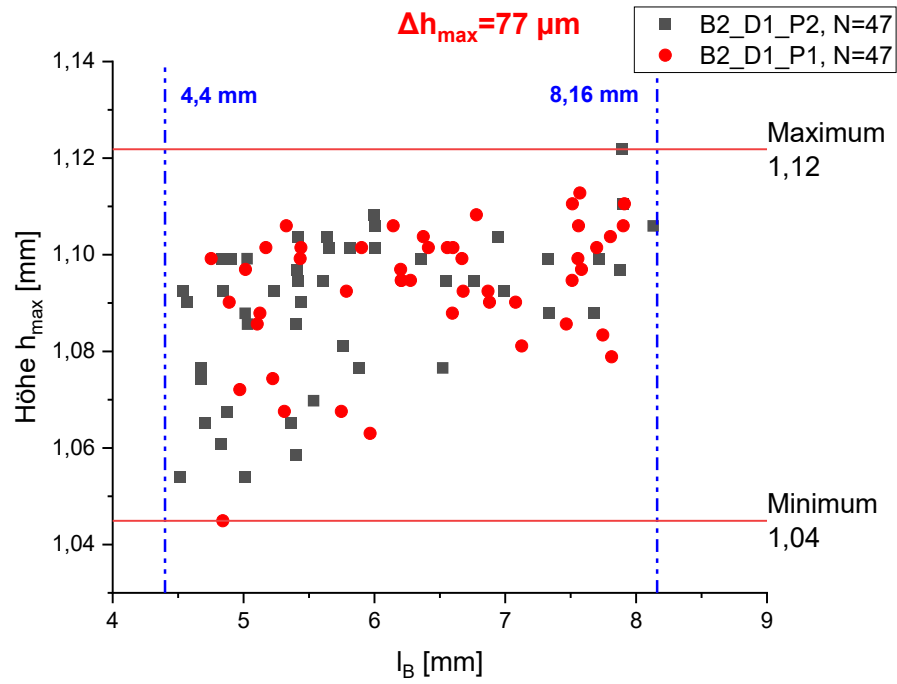


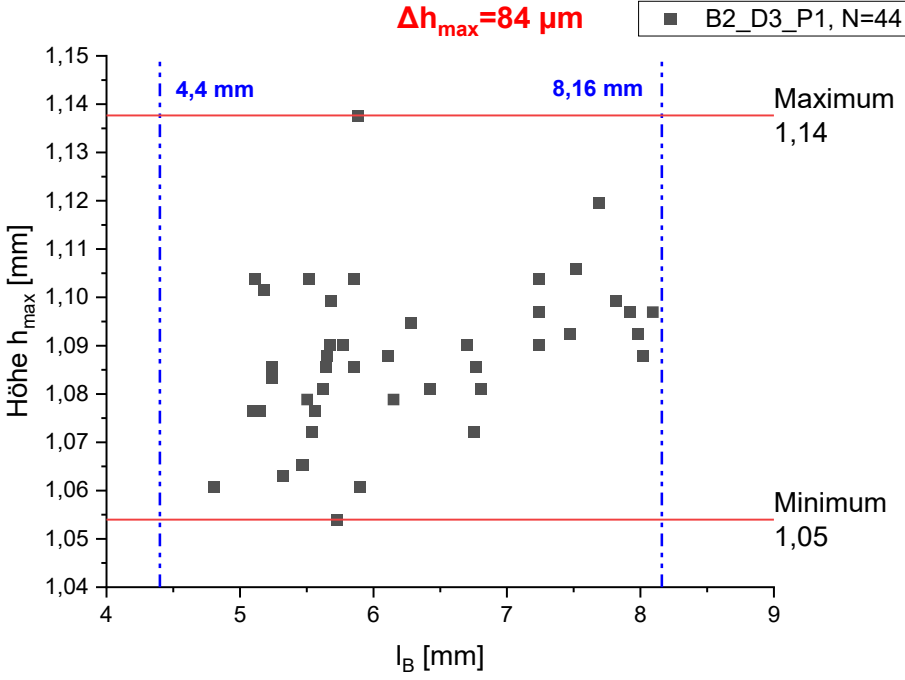
Prüfkörpertyp B1:





Prüfkörpertyp B2:





Anhang E: Ermittlung des Flächenträgheitsmomentes

Aus dem CAD-File wird für den Druck ein idealer rechteckiger Querschnitt vorgegeben. Dieser wird dann in weitere Folge aber nicht ideal gedruckt und weicht von der idealen geometrischen Form ab. Um nun den Unterschied zwischen diesen „idealen“ und „gedruckten“ Flächen zu beschreiben, wurden unterschiedliche Querschnitte ausgewertet.

Die Methode zur Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes (FTM) mit dem CAD-Programm CATIA V5R19 bietet eine schnelle Möglichkeit, um die unterschiedlichen Einflüsse der Geometrie und daraus den Einfluss auf die Biegespannung bewerten zu können.

E1. Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes mit CATIA V5R19

Die Beschreibung der Bestimmung des FTM in CATIA wird im folgenden Abschnitt anhand eines Beispiels erklärt.

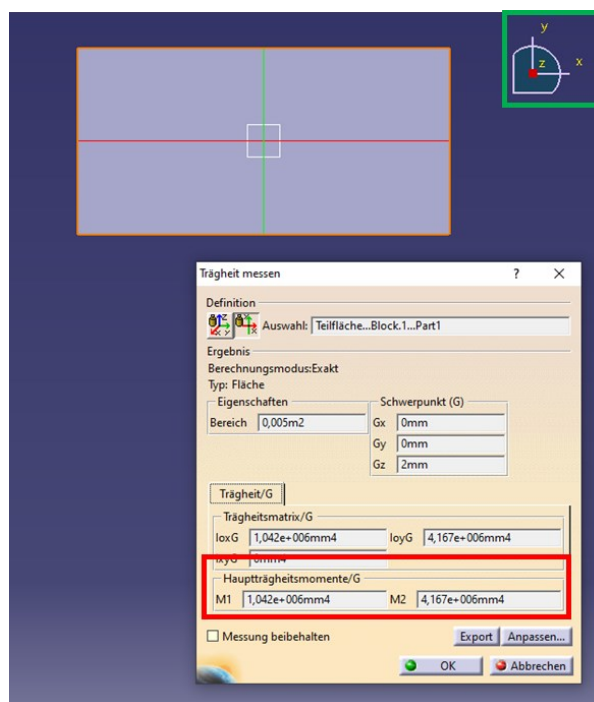


Abbildung 78: Beispielhafte Darstellung der Ermittlung des Flächenträgheitsmomentes mit CATIA, im roten Kasten sind die Hauptträgheitsmomente M1 und M2 und im grünen Kasten ist das verwendete Koordinatensystem dargestellt

In Abbildung 78 ist die Ermittlung des FTM beispielhaft an einem rechteckigen Querschnitt mit 100 mm x 50 mm dargestellt. Mit der Funktion „Trägheit messen“ kann man die zwei Hauptträgheitsmomente M1 und M2 (im roten Kasten gekennzeichnet) auswerten. Diese Hauptträgheitsmomente beziehen sich auf das verwendete Koordinatensystem (im grünen Kasten dargestellt).