

FORSCHUNGSBERICHT

Anforderungsgerechte Gestaltung von Fügezonen mit Inserts in additiv gefertigten Bauteilen

AM-Sert

Irena Heuzeroth, Christian Vogel, Prof. Dr.-Ing. Niels Modler

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Herausgeber)

Anforderungsgerechte Gestaltung von Fügezonen mit Inserts in additiv gefertigten Bauteilen

1. Auflage

Autoren:

Irena Heuzeroth, Christian Vogel

Beteiligte:

- Federführende Forschungseinrichtung:
SKZ - KFE gGmbH
Friedrich-Bergius-Ring 22
97076 Würzburg
- Leiter der Forschungseinrichtung: Dr. rer. Nat. Benjamin Baudrit
Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian
Dr. rer. Nat. Benjamin Baudrit

Kooperationspartner:

- kooperative Forschungseinrichtung:
Technische Universität Dresden
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik
Holbeinstraße 3
01307 Dresden
- Leiter der Forschungseinrichtung:
Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude
Prof. Dr.-Ing. Niels Modler

Printed in Germany

Copyright 2025 by

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Danksagung

Das Vorhaben 01IF22674N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süd-deutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über den Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Der projektbegleitende Ausschuss hat durch seine engagierte Unterstützung und wertvollen Beiträge maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen. Die eingebrachte Expertise, konstruktiven Anregungen und kontinuierliche Begleitung waren von großer Bedeutung. Die vertrauensvolle Zusammenarbeit wird sehr geschätzt und bildet eine wichtige Grundlage für zukünftige gemeinsame Schritte.

Unser Dank geht an:

ARBURG GmbH & Co. KG, Dr. Ing. Michael Salinas
Gallo Print, Julian Hahn (GalloPrint)
Schmidt Ges. für Werkzeug und Formentechnik mbH, Roland Schmidt
Fiberthree GmbH, Felix Wendt
SCHUNK Carbon, Gotthard Nauditt
Stratasys Ltd, Björn Richter
HAGE3D GmbH, Matthias Katschnig
Schmalz Greifer, Markus Vagt
PriMax 3D GmbH, Tom Fahsel
Rampa GmbH & Co.KG, Christopher Brandt
Rapidobject GmbH, Sophia Röder
Gerken Konstruktionsbüro, Ulrich Gerken
Weber Ultrasonics AG, Simon Kirchenbauer
Headmade Materials GmbH, Christian Staudigel
MTplus advanced mechatronics, Philipp Schlautmann

Kurzfassung

Im Projekt „Anforderungsgerechte Gestaltung von Fügezonen mit Inserts in additiv gefertigten Bauteilen“ wird zunächst die Auswahl geeigneter Kunststoffe wie PLA, ABS, PA und PC getroffen und deren Eigenschaften umfassend charakterisiert, um die Basis für die additive Fertigung und die Integration von Inserts zu schaffen. Darauf aufbauend werden Prüfkörper entwickelt, die unterschiedliche Druckparameter, Baurichtungen und Geometrien berücksichtigen. Parallel dazu erfolgt die Integration handelsüblicher Inserts mit verschiedenen Einbringmethoden wie Ultraschall, Warmeinbetten, Selbstschneiden und Expansionsverankerung. Für alle Varianten werden geeignete Prozessparameter ermittelt, um reproduzierbare Ergebnisse sicherzustellen.

Die gefertigten Prüfkörper werden anschließend mechanisch geprüft, um Zugfestigkeiten, Drehmomente und Belastungsgrenzen zu bestimmen. Ergänzend werden Struktur- und Schädigungsanalysen mittels Schlifffbildern und Computertomographie durchgeführt, um die Qualität der Fügezonen sowie mögliche Schädigungen zu bewerten. Die Erkenntnisse fließen in simulationsgestützte Optimierungen ein, die eine effiziente Gestaltung der Fügezonen ermöglichen und den praktischen Versuchsaufwand reduzieren. Zusätzlich werden Vergleichsuntersuchungen mit Granulatdruck und Spritzgießverfahren durchgeführt, um die Ergebnisse einzuordnen und eine fundierte Basis für Gestaltungsrichtlinien zu schaffen.

Abschließend werden alle gewonnenen Daten und Zusammenhänge aufbereitet und in Form von Richtlinien für die Konstruktion und Auslegung von Fügezonen mit Inserts in additiv gefertigten Bauteilen zusammengefasst. Diese Richtlinien sollen Unternehmen, insbesondere KMU, eine sichere und wirtschaftliche Anwendung ermöglichen und gleichzeitig die Grundlage für Normungsaktivitäten und zukünftige Standards bilden.

Abstract

The project “Requirements-based design of joining zones with inserts in additively manufactured components” will first select suitable plastics such as PLA, ABS, PA, and PC and comprehensively characterize their properties in order to create the basis for additive manufacturing and the integration of inserts. Building on this, test specimens will be developed that take into account different printing parameters, build directions, and geometries. At the same time, commercially available inserts will be integrated using various insertion methods such as ultrasound, hot embedding, self-cutting, and expansion anchoring. Suitable process parameters will be determined for all variants to ensure reproducible results.

The manufactured test specimens will then be mechanically tested to determine tensile strengths, torques, and load limits. In addition, structural and damage analyses are performed using micrographs and computed tomography to evaluate the quality of the joint zones and possible damage. The findings are incorporated into simulation-based optimizations, which enable efficient design of the joint zones and reduce the amount of practical testing required. In addition, comparative studies with granulate pressure and injection molding processes are carried out in order to classify the results and create a sound basis for design guidelines.

Finally, all data and correlations obtained will be processed and summarized in the form of guidelines for the design and layout of joining zones with inserts in additively manufactured components. These guidelines are intended to enable companies, especially SMEs, to use the technology safely and economically, while also forming the basis for standardization activities and future standards.

Abkürzungsverzeichnis	II
1 Einleitung	2
2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	5
Arbeitspaket 1: Präzisierung der Anforderungen sowie der Materialauswahl.....	5
Arbeitspaket 2: Entwicklung und Fertigung	8
Arbeitspaket 2a: Entwicklung Prüfkörper und Prüftechnik sowie Herstellung gedruckter Prüfkörper	8
Arbeitspaket 2b: Inserteinbringung in gedruckte Prüfkörper.....	16
Arbeitspaket 3: Charakterisierung.....	23
Arbeitspaket 3a: Analyse der Verbindungseigenschaften	23
Arbeitspaket 3b: Struktur- und Schädigungsanalyse.....	46
Arbeitspaket 4: Evaluierung und Optimierung.....	57
Arbeitspaket 4a: Vergleichsuntersuchungen Granulatdruck und Spritzgießen	57
Arbeitspaket 4b: Simulationsgestützte Fugestellenoptimierung.....	69
Arbeitspaket 5: Anwendungsrichtlinien und Abschlussbericht.....	70
3 Zusammenfassung	73
4 Abbildungsverzeichnis	74
5 Tabellenverzeichnis	78
6 Literatur	79

Abkürzungsverzeichnis

AF:	Additive Fertigungsverfahren
AKF:	Arburg-Kunststoff-Freiformen
ASA:	Acrylnitril-Styrol-Acrylat
DOE:	Design of Experiments
DSC:	Differential-Scanning-Kalorimetrie
FGF:	Fused Granular Fabrication
FLM:	Fused Layer Modeling
HKR:	Hochdruckkapillarrheometers
KMU:	kleine und mittelständische Unternehmen
PA:	Polyamid
PbA:	Projektbegleitender Ausschuss
PET-G:	Polyethylenterephthalat mit Glykol
PP-GF:	Polypropylen mit 25% Glasfasern
TGA:	Thermogravimetrische Analyse

1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren (AF) – insbesondere das extrusionsbasierte Fused Layer Modeling (FLM) – haben sich in den vergangenen Jahren von reinen Prototyping-Werkzeugen hin zu relevanten Fertigungstechnologien für individualisierte Produkte, Kleinserien und funktionale Bauteile entwickelt. Für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) stellt FLM aufgrund geringer Investitionskosten, breiter Materialverfügbarkeit und hoher Prozessrobustheit eine besonders attraktive Technologie dar. Gleichzeitig wachsen die Anforderungen an funktionsintegrierte Bauteile sowie an die strukturelle Leistungsfähigkeit additiv hergestellter Komponenten kontinuierlich, insbesondere in Bereichen wie Medizintechnik, Automobilbau und Ersatzteilmanagement.

Ein wesentlicher Engpass für den industriellen Einsatz von FLM in strukturelevanten Anwendungen ist jedoch die fehlende Übertragbarkeit etablierter Verbindungstechnologien aus dem Spritzguss auf additiv gefertigte Kunststoffbauteile. Metallische Gewindeinserts bieten zwar grundsätzlich eine sichere und wiederlösbare Methode zur Kraftübertragung und Montage, doch unterscheiden sich FLM-Bauteile aufgrund ihrer

schichtweisen Fertigung und anisotropen Materialstruktur grundlegend von spritzgossenen Bauteilen. Dies führt dazu, dass bestehende Konstruktionsrichtlinien, Dimensionierungsansätze und Fügetechnologien nicht ohne Weiteres anwendbar sind.

Für KMU ergeben sich daraus erhebliche Herausforderungen:

- fehlende technische Kennwerte für die Auslegung von Inserts,
- keine standardisierten Gestaltungsrichtlinien für Fügezonen,
- begrenzte Prozessüberwachung speziell für FLM,
- sowie ein erhöhtes Qualitäts-, Entwicklungs- und Haftungsrisiko.

Dies bremst die Nutzung additiver Fertigung als vollwertiges Fertigungsverfahren, obwohl der Markt mit hohen Wachstumsraten ein enormes wirtschaftliches Potenzial verspricht.

Vor diesem Hintergrund besteht ein dringender Bedarf nach fundierten wissenschaftlich-technischen Grundlagen zur anforderungsgerechten Gestaltung von Insertverbindungen in FLM-Bauteilen. Denn erst durch eine verlässliche und reproduzierbare Lasteinleitung können additiv gefertigte Komponenten als funktional belastbare Teile in Baugruppen integriert und wirtschaftlich in KMU umgesetzt werden.

Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung umfassender Richtlinien und Auslegungsgrundlagen für die Gestaltung von Lasteinleitungszonen in FLM-Bauteilen mit integrierten metallischen Inserts. Damit sollen die Tragfähigkeit, Zuverlässigkeit und industrielle Einsatzfähigkeit solcher Verbindungen deutlich gesteigert und die Nutzung der Technologie in strukturelevanten Anwendungsfeldern ermöglicht werden.

Zur Erreichung dieses Ziels verfolgt das Projekt die folgenden Kernansätze:

1. Systematische Analyse des Einflusses von Druckparametern und Fügezonengestaltung
2. Bewertung etablierter Inserttechnologien für additiv gefertigte Strukturen
3. Entwicklung geeigneter Prüfkörper, Prüfmethoden und charakteristischer Kennwerte

4. Vergleichsuntersuchungen mit spritzgegossenen und Arburg-Kunststoff-Freifor-
men (AKF)-/ Fused Granular Fabrication (FGF)-Strukturen
5. Ableitung von Richtlinien und Handlungsempfehlungen

Durch das Vorhaben werden KMU in die Lage versetzt, FLM-Technologien wirtschaftlich,
sicher und normgerecht einzusetzen. Dies ermöglicht:

- eine deutliche Reduzierung von Entwicklungs- und Fertigungskosten,
- geringeren Materialeinsatz und weniger Ausschuss,
- schnellere Produktentwicklungen,
- die Integration neuer Funktions- und Leichtbaukonzepte,
- sowie den Zugang zu neuen Geschäftsfeldern im Bereich additiver Fertigung.

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Präzisierung der Anforderungen sowie der Materialauswahl

Im Rahmen der ersten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PbA) wurden Kriterien für die Auswahl der Granulate und Filamente diskutiert. Auf dieser Basis wurden schließlich vier Materialien für den FLM-Prozess (Fused-Layer-Modelling) definiert:

- Polypropylen mit 25% Glasfasern (PP-GF),
- Polyethylenterephthalat mit Glykol (PET-G),
- Polyamid (PA) und
- Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA).

Für das Arburg Kunststoff Freiformen (AKF) wurde Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) im Rahmen der Sitzung festgelegt.

Zur Bestimmung der Schmelztemperaturen der untersuchten Kunststoffe wurden die Thermogravimetrische Analyse (TGA) und die Differential-Scanning-Kalorimetrie (DSC) eingesetzt. Mit der DSC kann entweder die Glasübergangstemperatur oder die Schmelztemperatur des Kunststoffes bestimmt werden. Die TGA erlaubt eine Aussage über die thermischen Einsatzgrenzen und die thermische Zersetzung des Kunststoffes. Mittels rheologischer Untersuchungen ist eine Aussage über die Viskosität und damit das Fließverhalten des Kunststoffes in etwaige Hinterschnitte der metallischen Gewindeeinsätze möglich. Dies sind wichtige Kenndaten, die insbesondere auch für die Einbringung der metallischen Gewindeeinsätze relevant sind, um Degradationen durch lange Standzeiten und Temperaturpeaks zu vermeiden.

Materialqualifizierung

Durch den Einsatz von TGA, DSC und Rheometrie konnte ein klar definiertes Prozessfenster für die Verarbeitung im FLM-Verfahren sowie im nachfolgenden Druckprozess der untersuchten Kunststoffe eingegrenzt werden und wird nachfolgend am Beispiel des untersuchten PA6 dargestellt. Die Analyse diente primär der Absicherung des Einbringprozesses der Inserts, da die Verarbeitungstemperaturen für die Filamente bereits bekannt sind. Dennoch ermöglicht die kombinierte Charakterisierung eine präzisere Festlegung der thermischen und rheologischen Randbedingungen für den gesamten Prozess.

Thermogravimetrische Analyse

Die Untersuchung erfolgte in Anlehnung an die Norm DIN ISO EN 11358-1. Dabei wird die Probe in einem geschlossenen Ofen unter definierter Atmosphäre auf eine Waagschale gelegt und mit einer konstanten Aufheizrate von 10 K erwärmt. Das permanent durch den Ofen strömende Gas bestimmt die Art der Zersetzung. In diesem Fall wurde ein inertes Spülgas (Stickstoff) gewählt, um oxidative Zersetzung zu vermeiden. Durch die Verwendung einer Stickstoffatmosphäre konnten oxidative Einflüsse gezielt ausgeschlossen werden, sodass ausschließlich die thermische Zersetzung des Materials analysiert werden konnte. Dies ermöglicht eine klare Bewertung der thermischen Stabilität sowie eine gezielte Trennung der zugrunde liegenden Zersetzungsmechanismen. Die Messkurve in *Abbildung 1* zeigt, dass die ersten Zersetzungserscheinungen und damit ein Abfall der Masse des Kunststoffes bei 300 °C auftreten. Bei 636,23 °C ist der Kunststoff vollständig abgebaut. Die obere Temperaturgrenze für das Verarbeitungsfenster wurde daher auf 300 °C festgelegt.

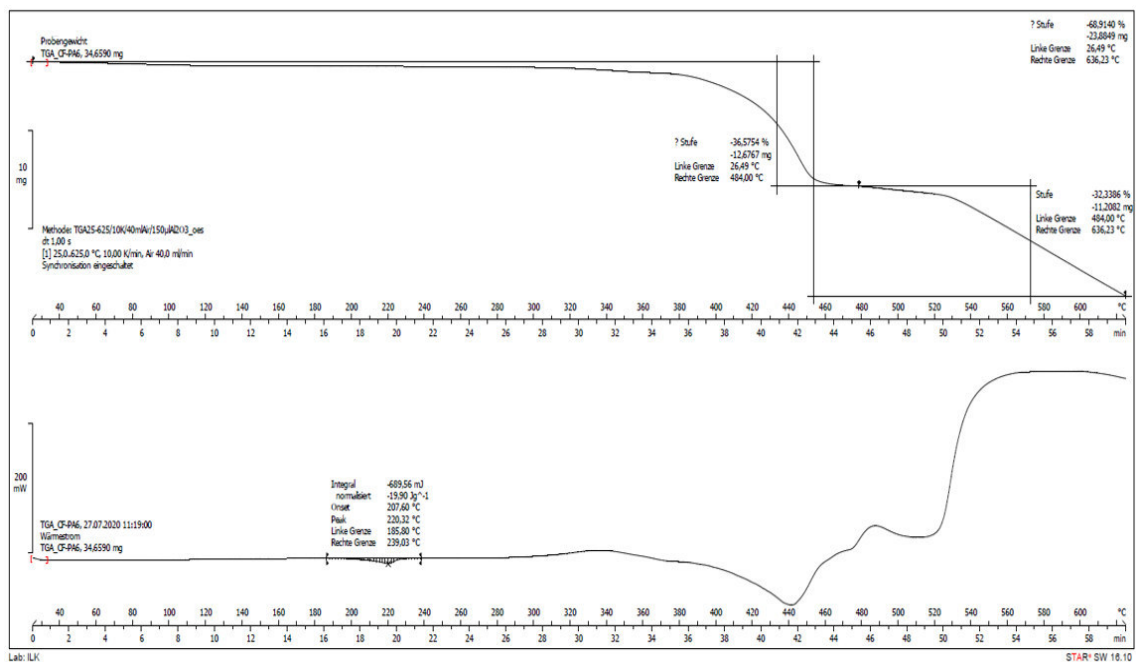


Abbildung 1: Ergebnisse der TGA für das untersuchte PA6.

Differential-Scanning-Kalorimetrie (DSC)

Die DSC-Tests wurden auf Basis von DIN EN ISO 11357-1 durchgeführt. Zu Beginn der Prüfung wird die Messkammer auf Betriebstemperatur vortemperiert und der Spülgasstrom (Stickstoff) eingestellt. Dies ist notwendig, um eine Zersetzung der Probe durch Oxidation oder Hydrolyse während des Tests zu verhindern. Anschließend wird befüllte gewogene Probenziegel und Referenzziegel eingesetzt. Nach der Einstellung des Messprogramms startet die Messung. Um die

Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wurde die Messung zwei Mal durchgeführt, d.h. der Tiegel wird abwechselnd zweimal aufgeheizt und abgekühlt. Aus der DSC-Messkurve in [Abbildung 2](#) lässt sich die Glasübergangstemperatur für den untersuchten Kunststoff bei ca. 45,47 °C im ersten Peak der Kurve ableiten. Danach fällt die Kurve bis zu einem Peak von 218,67 °C ab, bei dem der Kunststoff vollständig aufgeschmolzen ist. Die untere Temperaturgrenze für das Verarbeitungsfenster wurde damit für dieses PA 6 auf 220 °C festgelegt.

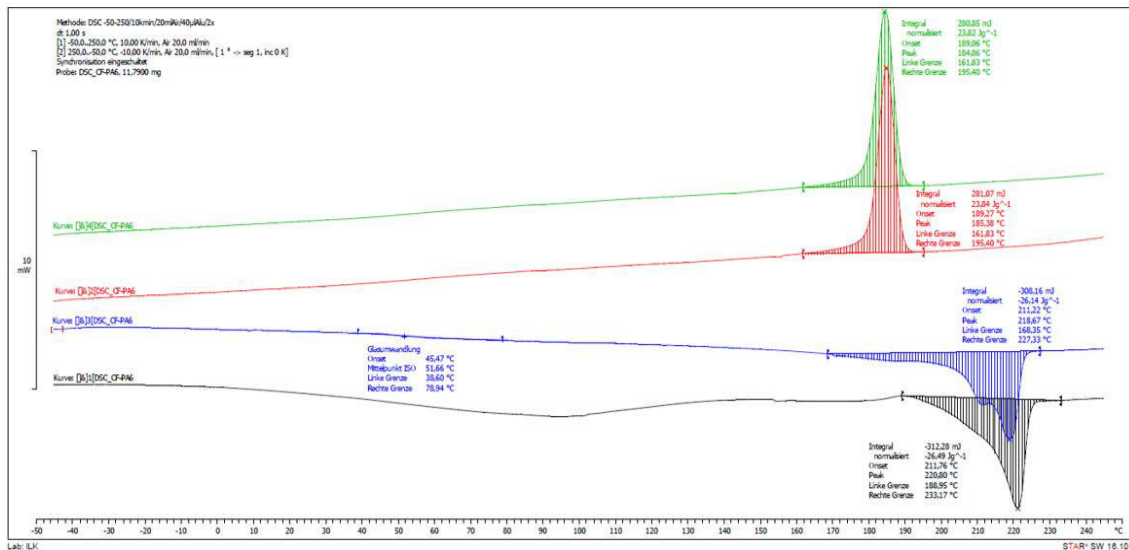


Abbildung 2: Ergebnisse der DSC für das untersuchte PA6.

Rheometrie

Zur Bestimmung des Fließverhaltens des untersuchten Kunststoffs wurde ein Scherrheometer eingesetzt. Während der Messung wird die Probe zwischen dem schwingenden und dem ruhenden Teil des Messaufbaus gesichert. Die Scherrate ergibt sich aus der Geometrie der Messanordnung und der Geschwindigkeit des bewegten Teils. Das zur Aufrechterhaltung der Bewegung erforderliche Drehmoment wird gemessen, woraus die Scherspannung und die Viskosität bestimmt werden können. Die in [Abbildung 3](#) dargestellte Messkurve stellt das temperaturabhängige Fließverhalten des untersuchten PA6 dar. Sie zeigt, dass die Viskosität des Kunststoffs mit steigender Temperatur stark abfällt. Zwischen 210 °C und 260 °C ist die Viskosität von PA6 am geringsten, so dass eine optimale Verarbeitung im FLM möglich ist. Um einen möglichen thermooxidativen Abbau zu vermeiden und gleichzeitig die Viskosität für eine optimale Verarbeitbarkeit ausreichend niedrig zu halten, wurde die Prozesstemperatur des PA6 für die Verarbeitung im FLM und die anschließende Einbringung von metallischen Gewindeeinsätzen auf 250 °C eingestellt.

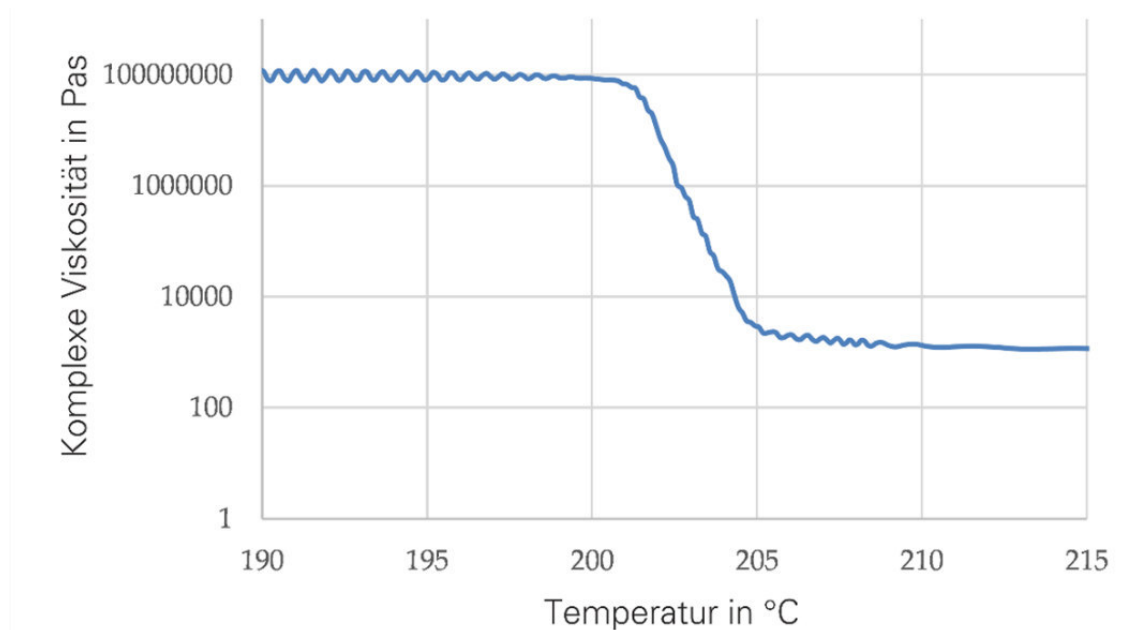


Abbildung 3: Ergebnisse der Rheometrie für das untersuchte PA6.

Arbeitspaket 2: Entwicklung und Fertigung

Arbeitspaket 2a: Entwicklung Prüfkörper und Prüftechnik sowie Herstellung gedruckter Prüfkörper

Für die Untersuchung der Verbindungseigenschaften in AP3a sind geeignete Prüfkörper zu entwerfen. Hierfür wurden die folgenden Anforderungen und Randbedingungen für den Prüfkörper definiert. Diese wurden im PbA zur Diskussion gestellt und ergänzt.

- Je eine Prüfkörpergeometrie für Zug- und Druckbeanspruchung
- Fertigbar in den Strangablegeverfahren, ohne Stützmaterial
- Fertigbar in unterschiedlichen Baurichtungen (liegend und stehend)
- Variables Dicken- bzw. Schichtverhältnis
- Minstdicken der Materialien für eine sichere, reproduzierbare Prüfung
- Spannbarkeit/Fixierung der Prüfkörper
- Gesamtgröße der Prüfkörper muss für gängige Drucker bzw. Druckverfahren geeignet sein
- Variable Aufnahmebohrung für handelsübliche Gewindeinserts (M4 und M6)

Für die Einbringung metallischer Gewindeinsätze und deren Bewertung konnten verschiedene Konzepte möglicher Probekörpergeometrien hinsichtlich der geplanten Prüfmethode erarbeitet werden (*Abbildung 4*).

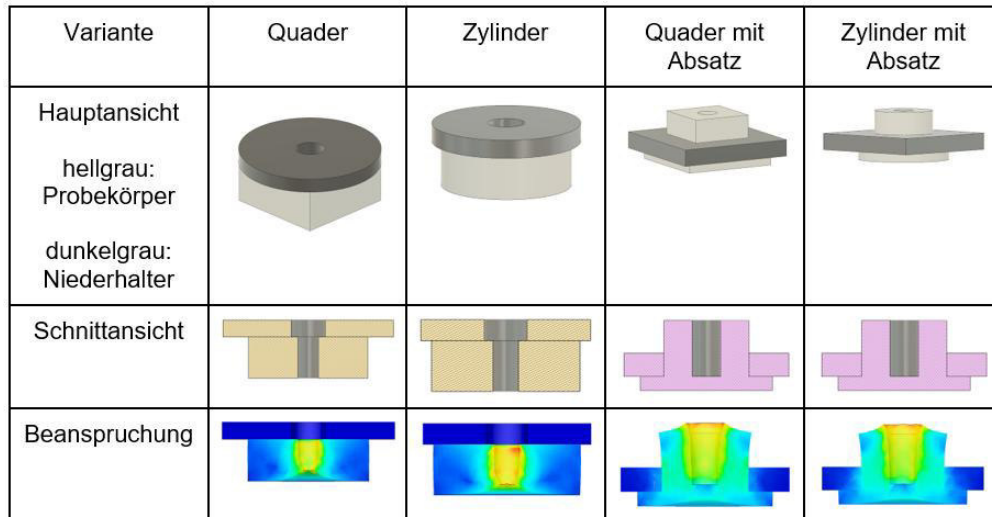


Abbildung 4: Darstellung und Vergleich der Probekörperkonzepte.

Durch die Bewertung der Konzepte anhand der festgelegten Kriterien hinsichtlich zu benötigender Ressourcen (Druckzeit, -material, etc.), geometrischer Komplexität (Anzahl Parameter), gleichmäßiger Beanspruchung sowie flexibles Design (unterschiedliche Insertgrößen und Druckparameter) konnte eine Vorzugsvariante für die nachfolgenden Untersuchungen definiert werden (*Abbildung 5*).

Variante / Kriterium	Quader	Zylinder	Quader mit Absatz	Zylinder mit Absatz
a * 1	1	2	2	3
b * 2	2	3	1	1
c * 2	2	3	1	3
d * 3	3	1	2	1
Summe	18	17	12	14

Abbildung 5: Bewertung der Varianten, 1 = schlecht bis 3 = gut.

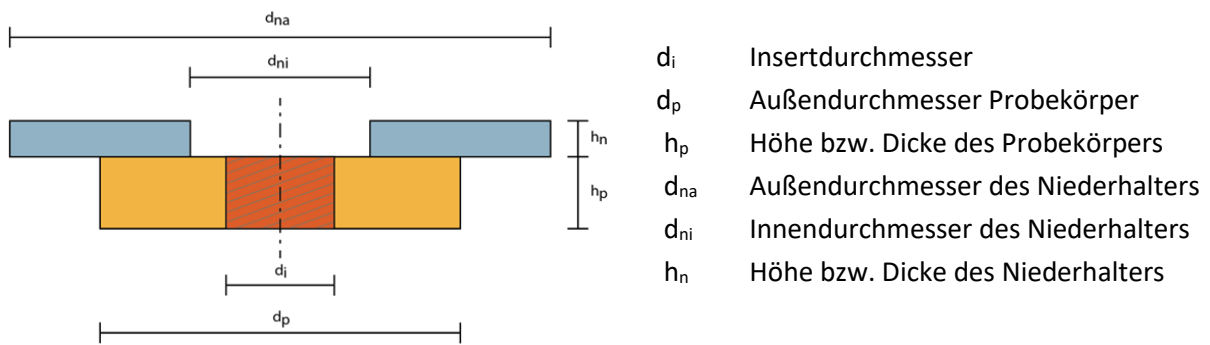


Abbildung 6: Darstellung der erarbeiteten Probekörpernennmaße.

Als Ergebnis aus Konzeption und Bewertung steht eine Probekörpergeometrie mit den in [Abbildung 6](#) dargestellten Parametern zur Verfügung. Für die jeweiligen Typen an zu untersuchenden metallischen Gewindeeinsätzen wurden somit die Verhältnisse d_i zu $d_{ni} = 1$ zu 4 sowie d_i zu $d_p = 1$ zu 6 für die Abmessungen der Probekörper gewählt.

In [Tabelle 1](#) ist die schematische Übersicht der zu untersuchenden Konfigurationen dargestellt. Aus der Vielzahl von variierenden Parametern werden zunächst die Druckparameter anhand eines Insertdurchmessers variiert und untersucht. Für die Versuchsdurchführung ist die Ausarbeitung eines Sternversuchs mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments - DOE) vorgesehen. Mittels Modifikation der einzelnen Parameter, ausgehend von der Mittelstellung, entsteht ein „Stern“. Durch das Variieren der Parameter, beginnend von der Mitte, jeweils nach oben und unten ergibt sich ein zweistufiger Versuchsplan.

Tabelle 1: Zu untersuchende Konfigurationen von Druckparametern und Inserts.

Druckparameter	
Druckrichtung (Ausrichtung)	liegend, stehend
Schichtdicke	0,2 mm
Anzahl der Außenbahnen (Insert und Außenwand des Probekörpers)	2 / 4
Düsendurchmesser	0,4
Füllgrad	20 % / 50 % / (90%) 100 %
Füllstruktur	Gyroid / $\pm 45^\circ$
Insert	
Einbringungsart	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ultraschalleinbettung ▪ Warmeinbetten
Insertdurchmesser	M4, (M6)*

Bohrung	
Geometrie	zylindrisch

* Best of Versuche aus M4

Daraus ergeben sich für jede Druckrichtung Versuchsreihen (vgl. [Tabelle 2](#)). Die Anzahl der zu druckenden Proben pro Versuchsreihe beträgt 5 Stück. Daraus ergibt sich eine Gesamtprobekörperanzahl von 240 Stück.

Tabelle 2: Statistischer Versuchsplan.

Versuchsreihe (VR)	Anzahl der Außenbahnen	Insert	Füllstruktur	Infill in %	Insertform	Druckrichtung
VR 01	2 / 4	M4	Gyroid	20	gerade	liegend / stehend
VR 02	2 / 4	M4	Gyroid	50	gerade	liegend / stehend
VR 03	2 / 4	M4	Gyroid	90	gerade	liegend / stehend
VR 04	2 / 4	M4	± 45 °C	20	gerade	liegend / stehend
VR 05	2 / 4	M4	± 45 °C	50	gerade	liegend / stehend
VR 06	2 / 4	M4	± 45 °C	100	gerade	liegend / stehend
VR 07	2 / 4	M4	Gyroid	20	gerade	liegend / stehend
VR 08	2 / 4	M4	Gyroid	50	gerade	liegend / stehend
VR 09	2 / 4	M4	Gyroid	90	gerade	liegend / stehend
VR 10	2 / 4	M4	± 45 °C	20	gerade	liegend / stehend
VR 11	2 / 4	M4	± 45 °C	50	gerade	liegend / stehend
VR 12	2 / 4	M4	± 45 °C	100	gerade	liegend / stehend

Der Druck der Probekörper erfolgte seriell auf einem Prusa i3 MK2 der Firma Prusa, vgl. [Abbildung 7](#).

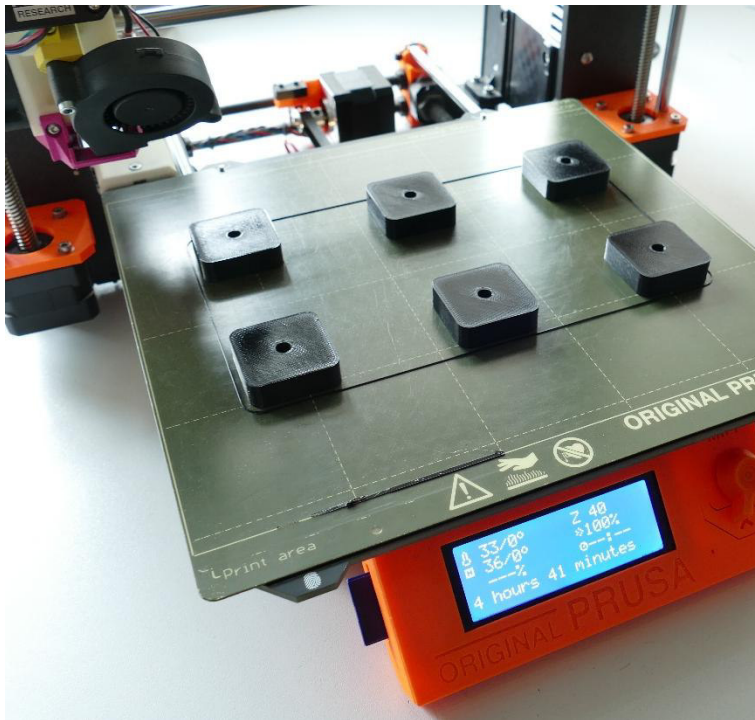


Abbildung 7: Probekörperdruck M4 PET-G.

Anhand der Ergebnisse aus den Versuchsreihen M4 erfolgte die Zusammenstellung des Versuchsplans zum Druck der Probekörper für den Insertdurchmesser M6. Die Parameter werden daher nicht weiterverfolgt. Anzahl der Außenbahnen als auch der prozentuale Anteil vom Füllgrad haben erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse und werden bei den Best Practice Untersuchungen (M6) Probekörper eingehender betrachtet.

Daraus ergibt sich folgender Versuchsplan:

Tabelle 3: Versuchsplan Best Practice.

	Infill	Muster	Schichtdicke	Außenbahnen	Insert
V01	20	+45°	0,2	2	M6
V02	50	+45°	0,2	2	M6
V03	100	+45°	0,2	2	M6
V04	20	+45°	0,2	4	M6
V05	50	+45°	0,2	4	M6
V06	100	+45°	0,2	4	M6

Darüber hinaus wurden Probekörper für Vergleichszwecke in M4 und M6 mittels Laser Sintern (LS) hergestellt, *Abbildung 8*. Die Herstellung erfolgte aus PA 12 (50% Neupulver und 50% Altpulver) sowohl liegend und stehend mit dem Parametersatz „JointUD“ gedruckt auf der P110 der Firma EOS. Der Parametersatz „JointUD“ ist ein von EOS bereitgestellter Prozessparameter für die FORMIGA P110, der speziell für PA12-Materialien optimiert ist. Er definiert alle relevanten Einstellungen für das Lasersintern, um eine hohe Maßhaltigkeit und gute mechanische Eigenschaften zu erzielen.

- Laserleistung: 25 W (CO₂-Laser 10,6 µm Wellenlänge)
- Scangeschwindigkeit: 3000 mm/s für den Infill (3300 mm/s für upskin und 3600 mm/s für downskin)
- Layerhöhe: 0,1 mm
- Prozeßtemperatur: 169 °C für PA2200
- N₂-Atmosphäre

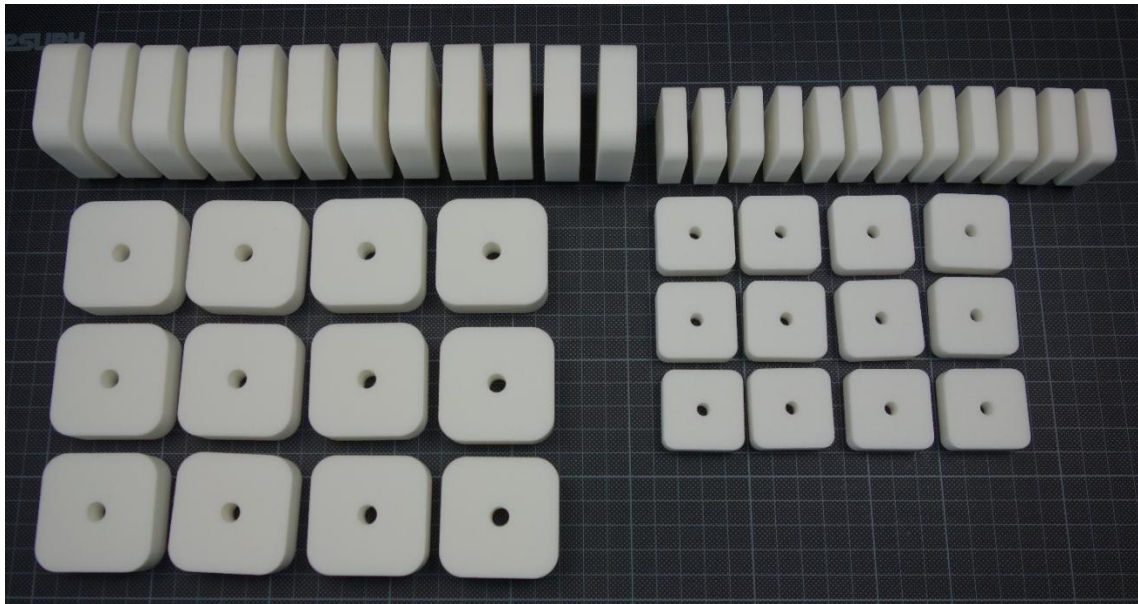


Abbildung 8: Probekörper Laser Sintern.

Vergleichsuntersuchung AKF und Spritzgießen

Granulatbasierte 3D-Drucker werden industriell immer relevanter, da der Materialbezug deutlich günstiger ist und die erneute Zertifizierung von bereits zugelassenen Materialien entfällt. Für Vergleichsuntersuchungen werden mittels AKF ebenfalls Probekörper zur Einbringung der Inserts hergestellt. Der Freeformer der Firma Arburg verarbeitet Standardgranulate, wie sie auch beim Spritzgießen Anwendung finden. Ähnlich dem Spritzgießprozess erfolgt die Plastifizierung und Homogenisierung in einem Schneckenaggregat, wobei der Materialaustrag über eine mit Piezotechnik getaktete Verschlussdüse tröpfchenweise erfolgt. Seitens Arburg gibt es bereits ein

qualifiziertes Materialprofil, was direkt genutzt werden kann. Dieses beinhaltet folgende Parameter:

- Düsentemperatur: 260 °C
- Bauraumtemperatur: 90 °C
- Druckgeschwindigkeit: 65 mm/s
- Austragsfrequenz: 60 Hz
- Formfaktor (Verhältnis von Tropfenbreite zu Tropfenhöhe): 1,32
- Austrag (100 % Austrag = maximale Tropfengröße): 70%
- Schichtdicke: 0,2 mm

Der AKF extrudiert einen pulsierenden Strang (Perlenkette), was einen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte hat. Dies soll stichprobenartig an den Versuchsreihen mit den höchsten Festigkeiten aus AP2a geprüft werden.

Wie in *Tabelle 4* zu sehen, wurden zunächst der Infillanteil, die Anzahl der Außenbahnen, der Insertdurchmesser, sowie die Druckrichtung variiert. Daraus ergeben sich 60 liegend und 60 stehend gedruckte Probekörper.

Tabelle 4: Versuchsplan AKF.

Versuch	Infillmuster	Infillanteil (in %)	Anzahl Außenbahnen	Insert-durchmesser	Insertform	Druckrichtung
V01	45/45	100	2	M4	gerade	liegend / stehend
V02	45/45	50	2	M4	gerade	liegend / stehend
V03	45/45	20	2	M4	gerade	liegend / stehend
V04	45/45	100	4	M4	gerade	liegend / stehend
V05	45/45	50	4	M4	gerade	liegend / stehend
V06	45/45	20	4	M4	gerade	liegend / stehend
V07	45/45	100	2	M6	gerade	liegend / stehend
V08	45/45	50	2	M6	gerade	liegend / stehend
V09	45/45	20	2	M6	gerade	liegend / stehend
V10	45/45	100	4	M6	gerade	liegend / stehend
V11	45/45	50	4	M6	gerade	liegend / stehend
V12	45/45	20	4	M6	gerade	liegend / stehend

Im Spritzgießprozess ist die After-Moulding-Technik für die Montage von Gewindeeinsätzen nach der Entformung des Kunststoffbauteils sehr verbreitet und mit Kennwerten zur Tragfähigkeit der Fügezonen untersetzt. Neben der Validierung des Prüfverfahrens mit additiv gefertigten Probekörpern soll daher eine vergleichende Überprüfung der Ergebnisse mit spritzgegossenen Probekörpern erfolgen. Bauteile, welche aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften oder Anforderungen nicht ausschließlich durch die additive Fertigung herstellbar sind, werden durch die Kombination mit anderen Fertigungsverfahren ermöglicht. So können beispielsweise an Spritzgussbauteilen, welche lokal unterschiedliche Eigenschaften (bspw. Faserverstärkung) aufweisen müssen, 3D-gedruckte Komponenten angebracht werden [1]. Hierzu muss eine zuverlässige Verbindung zwischen den Bauteilen bestehen.

Der Vergleich dient als Grundlage zur Erstellung der Gestaltungsrichtlinien in AP5. Zur Auslegung des Spritzgießprozesses und Ermittlung eines geeigneten Prozessfensters soll mithilfe des Hochdruckkapillarrheometers (HKR) die temperatur- und schergeschwindigkeitsabhängige Viskosität ermittelt sowie ein p vT-Diagramm erstellt werden. Hierzu wird eine Formplatte für das Spritzgießwerkzeug mit unterschiedlichen Lochdurchmessern zum Einbringen der Inserts genutzt. Die Inserts werden analog zu AP2b eingebracht und entsprechend nach AP3a und AP3b geprüft. Zudem wird vergleichend eine Literaturlauswertung zu den Verbindungseigenschaften von Inserts in Spritzgießbauteilen erstellt (siehe etwa [2], [3], [4] und für die Gestaltungshinweise in AP5 genutzt.

Die Herstellung der Probekörper mittels der Spritzgießmaschine von KraussMaffei 160 erfolgt zur Evaluierung der mechanischen Eigenschaften verschiedener Kunststoffmaterialien. Im vorliegenden Fall wurden Probekörper zur Inserteinbringung (M4 und M6) aus den Materialien ABS (Terluran GP 35), PA6 GF30 (ALTECH PA6 A 2030/319 GF30), PP 30LGF (BOREALIS Fibermod GB303 HP) und ASA (Ineos Styrolution SGM-11-ASA) gefertigt, *Abbildung 9*.

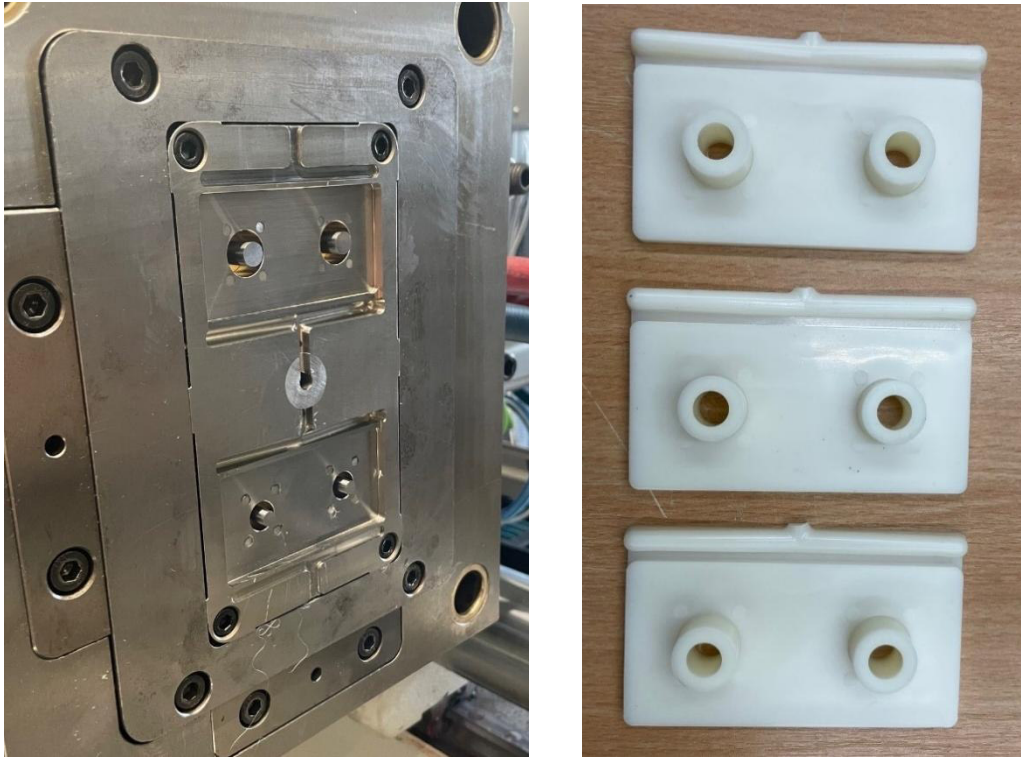


Abbildung 9: Formplatte Spritzgießwerkzeug (links) und gespritzte Probekörper aus ABS (rechts).

Arbeitspaket 2b: Inserteinbringung in gedruckte Prüfkörper

Zur Inserteinbringung standen am ILK verschiedene Fügeanlagen zur Verfügung, welche die vorgesehenen Einbringmethoden abdecken (vgl. Tabelle 2). In Abhängigkeit von den in AP2a entwickelten Prüfkörpergeometrien wurden geeignete Einspannvorrichtungen und Adapter konstruiert, um eine wiederholgenaue und reproduzierbare Inserteinbringung zu gewährleisten. Für jede der betrachteten Inserttechnologien wurden auf Basis von Voruntersuchungen die geeigneten Prozessparameter für die jeweiligen Materialien ermittelt. Beim Wärmeinbetten erfolgte zusätzlich eine Temperaturüberwachung im Bereich der Fügezone mittels Infrarotkamera, um die Größe der Wärmeeinflusszone im Lochrandbereich des Prüfkörpers während des Einbringprozesses quantifizieren zu können.

Hierfür wurden angepasste Probekörpergeometrien entwickelt, die durch unterschiedliche Öffnungswinkel von 30°, 60° und 90° im Seitenbereich eine gute Sichtbarkeit der Wärmeeinbringung mit der Thermografiekamera ermöglichen (vgl. *Abbildung 10*). Auf dieser Grundlage konnten die thermischen Effekte während des Einbettvorgangs detailliert erfasst und die Prozessparameter weiter optimiert werden.

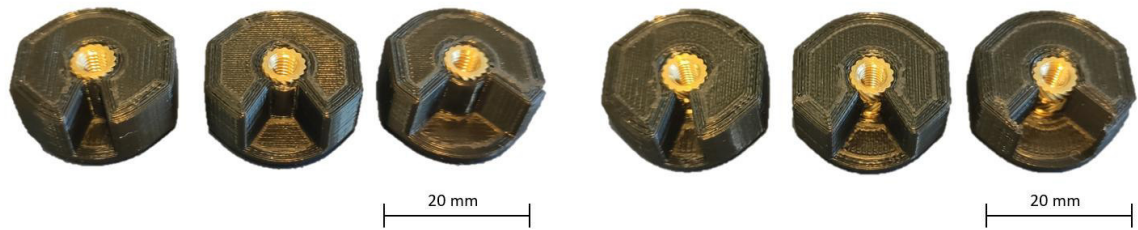


Abbildung 10: Darstellung der Öffnungswinkel (links: 30°, mitte: 60°, rechts: 90°) mit verschiedenen Reflexionsbarrieren für die Thermografiemessungen: geschlossene Fügezone (links) und vorgelagerte Reflexionsbarriere bei einem offenen Fügezonenbereich.

Aufbauend auf den mit dem PbA abgestimmten Einbringmethoden und den definierten Prüfkörpergeometrien wurden anschließend verschiedene Inserttypen für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Nach der Konfiguration der Fügeanlagen und der Festlegung der Prozessparameter konnten erste Prüfkörper mit integrierten Inserts hergestellt werden, die als Grundlage für die nachfolgenden mechanischen Untersuchungen in den Arbeitspaketen AP3a und AP3b dienen.

Bei den Untersuchungen wurden die Öffnungswinkel mit unterschiedlichen Reflexionsbarrieren getestet, wobei die Variante mit einem offenen Bereich am Insert und einer vorgelagerten Reflexionsbarriere die besten Infrarotaufnahmen erstellt werden konnten (Abbildung 11).

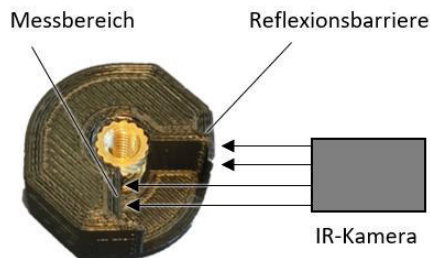


Abbildung 11: Darstellung des Funktionsprinzips einer vorgelagerten Reflexionsbarriere und einem offenen Fügezonenbereich für die Thermografiemessungen.

Bei den Untersuchungen hat sich bei allen Probekörpern in den jeweiligen Öffnungswinkelkonfigurationen gezeigt, dass der Wärmeeintrag, in den das Insert umgebenden Kunststoff sehr gering ist und über den direkten Kontaktbereich des Inserts kaum hinaus geht (Abbildung 12).

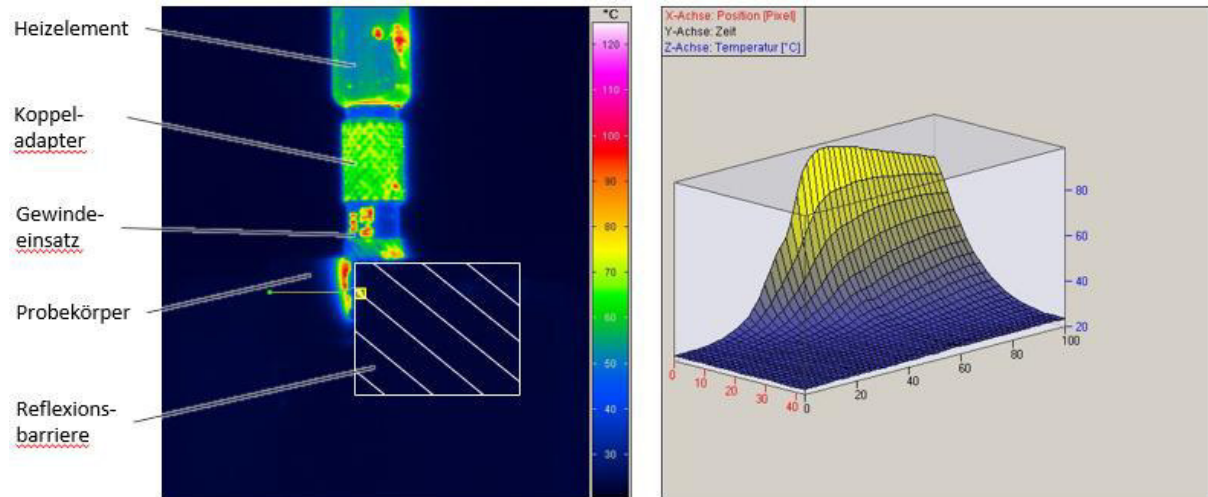


Abbildung 12: Thermografieaufnahme eines Probekörpers mit 90° Öffnungswinkel und vorgelagerter Reflexionsbarriere (links) und Wasserfalldiagramm zur Darstellung des Wärmeeinflussbereichs (rechts).

Das Prinzip zur Ermittlung der Wärmeeinflusszone wurde erfolgreich validiert. Anschließend wurden diejenigen Probekörpervarianten ausgewählt, bei denen die Messung die zuverlässigsten Ergebnisse lieferte (Abbildung 13). Für die ausgewählten Materialien erfolgte daraufhin ein Vergleich verschiedener Stufen der Eindringtiefe des Inserts, wobei in Abstimmung mit dem pbA insbesondere die Tiefen von 50 % und 100 % untersucht wurden.

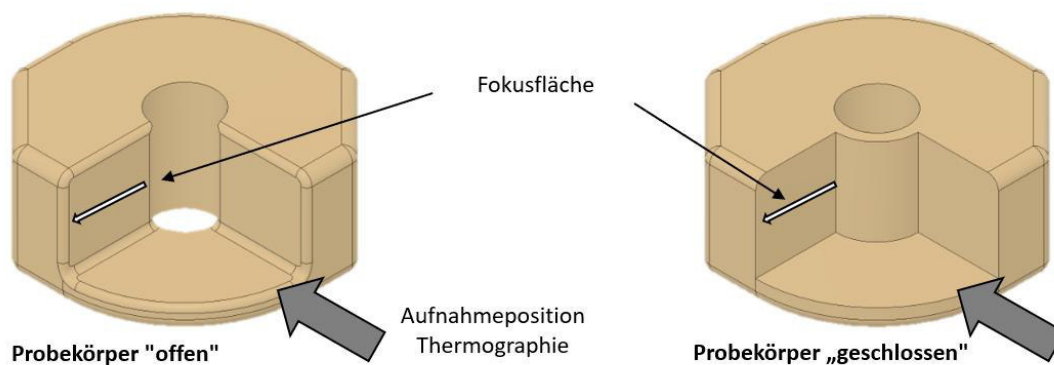


Abbildung 13: Darstellung der Probekörper für die thermographischen Untersuchungen (links: offen, rechts: geschlossen)

Der Prüfaufbau (Abbildung 14) wurde so gewählt, dass die thermographischen Aufnahmen konsistent senkrecht zur Fokussfläche durchgeführt werden konnten.

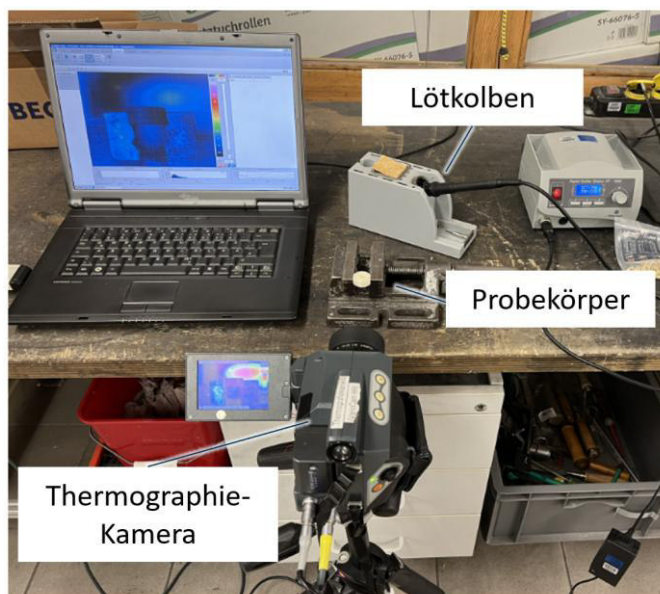


Abbildung 14: Prüfaufbau für die thermographischen Untersuchungen zur Bestimmung des Wärmeeinflussbereichs

Die Versuchsergebnisse zeigen einen geringen Wärmeeinfluss innerhalb der Fokusfläche, sowohl bei einer Eindringtiefe des Inserts von 50 % als auch von 100 %. Der in

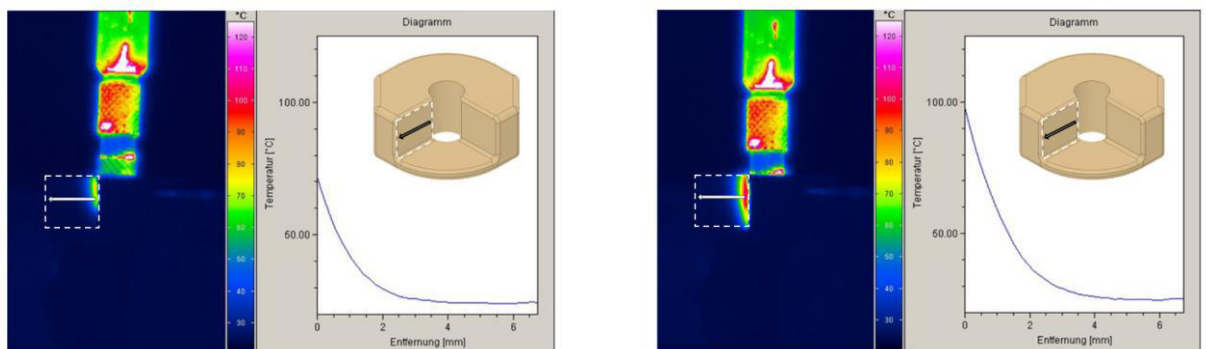


Abbildung 15 dargestellte Pfeil auf der Fokusfläche entspricht dem in der thermographischen Aufnahme markierten Pfeil und ist im zugehörigen Diagramm als Entfernung auf der x-Achse aufgetragen. Insgesamt bestätigt sich, dass die gemessene Wärmeeindringtiefe gering ist.

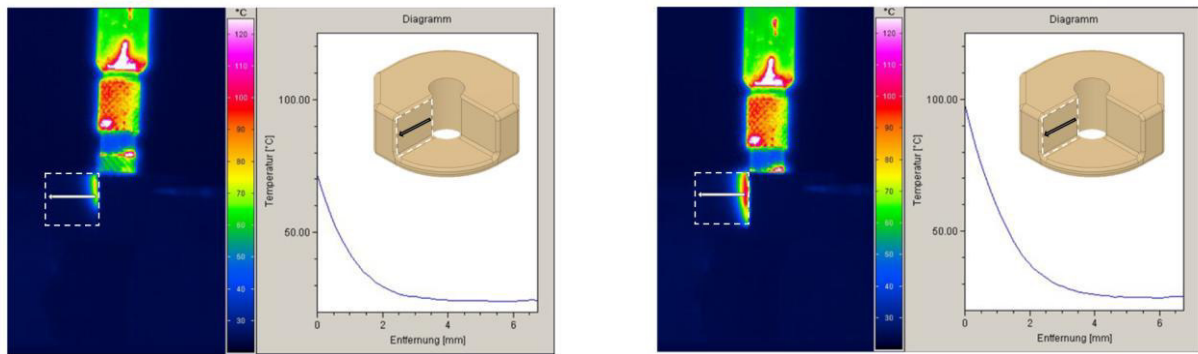


Abbildung 15: Darstellung der thermographischen Aufnahmen für offene Probekörper bei unterschiedlichen Eindringtiefen des Inserts von 50 % (links) und 100 % (rechts)

Ein Wärmeverlust über die offene Seite des Inserts kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden, da dieser Bereich aufgrund des angepassten Emissionsgrades während der thermographischen Messung nicht erfasst werden konnte. Aus diesem Grund wurden ergänzend Aufnahmen der geschlossenen Seite angefertigt, wie in

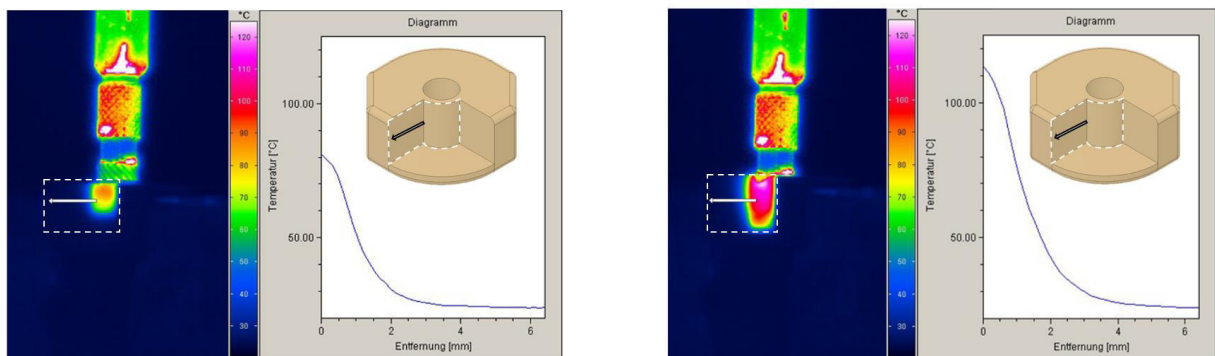


Abbildung 16 dargestellt. Auch hier zeigen die Aufnahmen, dass der Wärmeeinfluss des aufgeheizten Inserts sowohl bei 50 % als auch bei 100 % Eindringtiefe gering ist und vor allem im Bereich der Wandlinien des Vorlochs im Probekörper liegt.

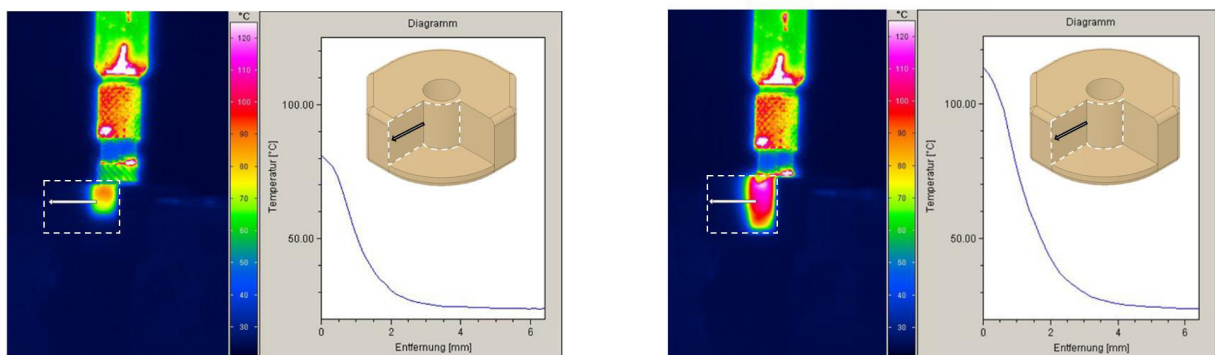


Abbildung 16: Darstellung der thermographischen Aufnahmen für geschlossene Probekörper bei unterschiedlichen Eindringtiefen des Inserts von 50 % (links) und 100 % (rechts)

Warmeinbetten

Für jede Inserttechnologie wurden für die ausgewählten Materialien anhand von Voruntersuchungen geeignete Prozessparameter bestimmt. Für die Variante des Warmeinbettens wurde ein kollaborativer Roboter UR10e der Firma Universal Robot befähigt, da mit diesem die Einbringung der Inserts gesteuert bei gleicher Geschwindigkeit und Kraft und insbesondere mit hoher Wiederholgenauigkeit möglich ist. Dafür wurde ein roboterseitiger Leichtbauadapter entwickelt und im Selective Laser Sintering Verfahren aus Alumide hergestellt (*Abbildung 17*).

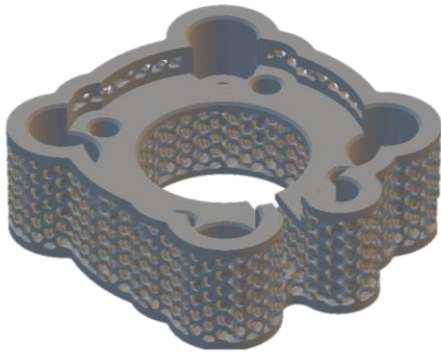


Abbildung 17: Darstellung des mittels Lattice-Strukturen angepassten Leichtbauadapters für die Aufnahme des Warmeinbettungswerkzeugs am kollaborativen Roboter UR10e Versuchsaufbau am UR10e für die Inserteinbringung.

Auf dieser Basis wurde ein temperaturgeregelter LötKolben mit einem pneumatischen Werkzeugwechselsystem und eigens dafür entwickelten Adaptern am Roboter befestigt (*Abbildung 18*). Die einzubringenden Inserts wurden auf einem angepassten Einbringwerkzeug aufgesetzt, entsprechend ihrer ermittelten Einbringtemperatur aufgeheizt und anschließend in den Probekörper mit 2 mm/s und einer maximalen Setzkraft von 250 N eingebracht.

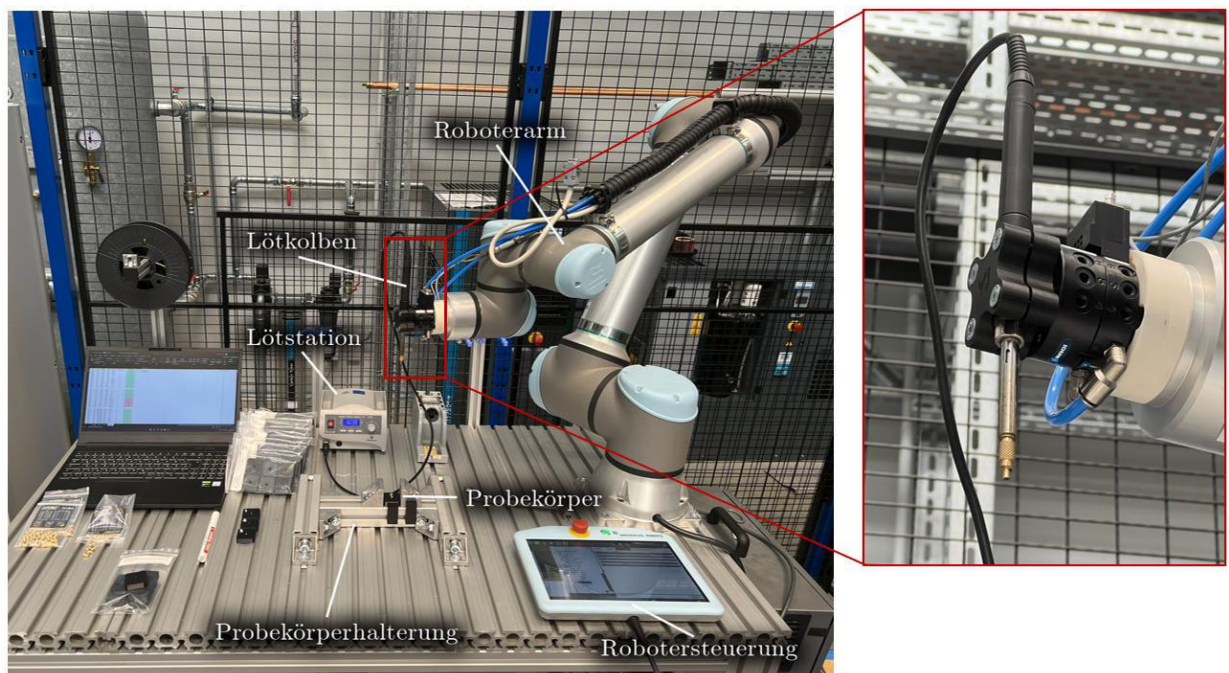


Abbildung 18: Versuchsaufbau zur Warmeinbettung von metallischen Gewindeeinsätzen mit einem kollaborativen Roboter UR10e.

Ultraschalleinbetten

Für die Variante des Ultraschalleinbettens wurde basierend auf einer Ultraschallschweißeinheit von Weber Ultrasonics diese entsprechend angepasst und mit einem für den Einbringprozess konzipierten Endeffektor aus Booster und Sonotrode adaptiert. Die Geometrie der Sonotrode wurde dabei so gewählt, das unterschiedliche Insertdurchmesser (M3 – M8) verarbeitet werden können (Abbildung 19).

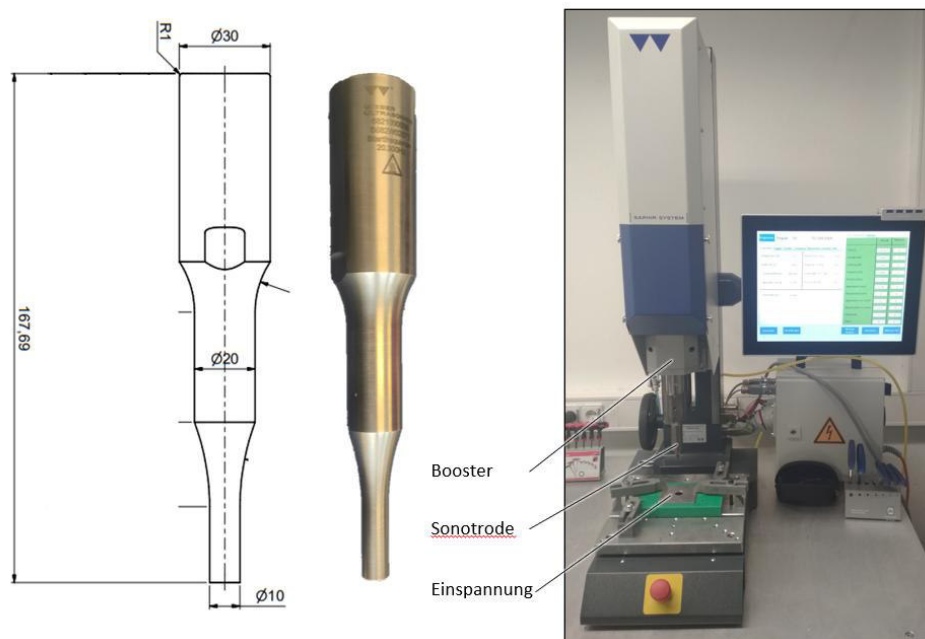


Abbildung 19: Darstellung der entwickelten Ultraschall-Sonotrode für den ultraschallbasierten Einbringungsprozess und servopneumatische US-Fügeanlage.

Die Ultraschalleinbettung verlief wie folgt: Der Grundkörper wird direkt unter der Sonotrode positioniert und das Insert in die Aufnahmebohrung des Grundkörpers gesteckt. Danach wird das computergesteuerte Programm der Maschine gestartet. Die Sonotrode fährt nach unten, bis sie das Insert kontaktiert. Erreicht sie den festgelegten Triggerpunkt, wird der Ultraschallgenerator aktiviert und die Sonotrode beginnt mit einer Amplitude von 20 kHz zu schwingen. Gleichzeitig übt die Maschine eine Normalkraft von 250 N aus. Das Insert wird so innerhalb von drei Sekunden in den Grundkörper eingebettet. Anschließend wird eine Haltekraft von 200 N für zwei Sekunden gehalten, bevor die Maschine auf ihre Anfangsposition zurückfährt. Dies dient dazu, ein Rückfedern des Inserts entgegen der Fügerichtung zu verhindern. Der Prüfaufbau für das Ultraschalleinbetten umfasste eine Adapterplatte mit einem anpassbaren Spannsystem, das einen einfachen Wechsel der Probekörper ermöglichte. Die Ausrichtung erfolgte über eine

zentriert kugelgelagerte Schwenkplatte, wodurch sichergestellt wurde, dass die Inserts vertikal eingebracht und ein Abrutschen der Sonotrode verhindert wurde, *Abbildung 20*.

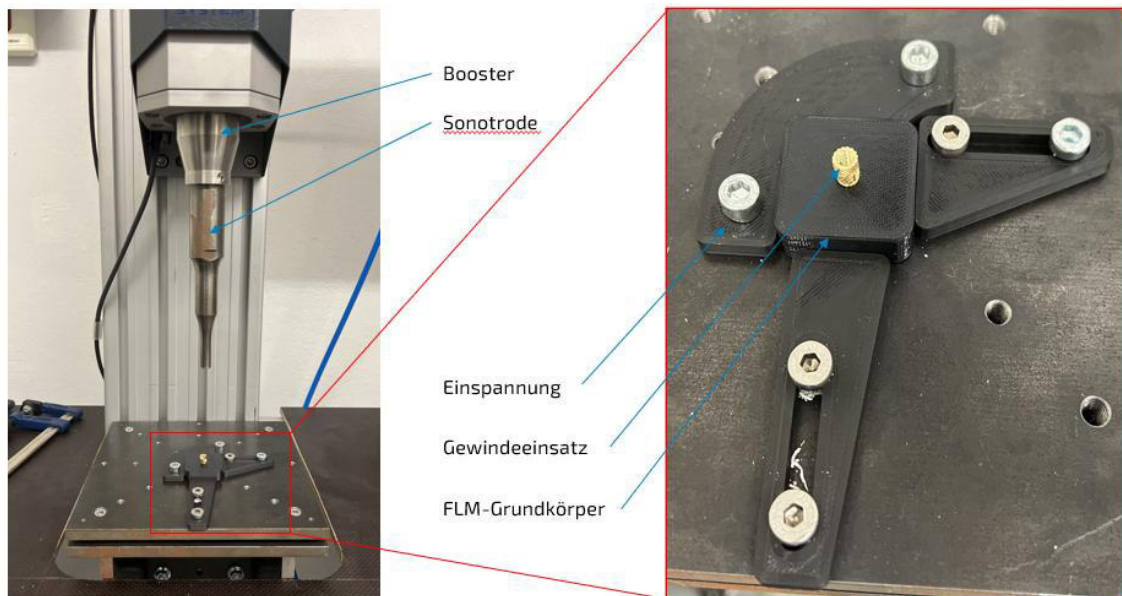


Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Ultraschalleinbettung.

Arbeitspaket 3: Charakterisierung

Arbeitspaket 3a: Analyse der Verbindungseigenschaften

Die in AP2b hergestellten Prüfkörper mit integrierten Inserts wurden hinsichtlich ihrer mechanischen Kennwerte der Zugprüfung zur Ermittlung der maximalen Auszugskräfte unterzogen. Des Weiteren wurde das maximale Drehmoment zum Einbringen des Gewindeeinsatzes ermittelt und mit den in der DVS 2240 beschriebenen Methoden zur Bestimmung der Belastungsgrenzen von Insertverbindungen verglichen (vgl. *Abbildung 21*).

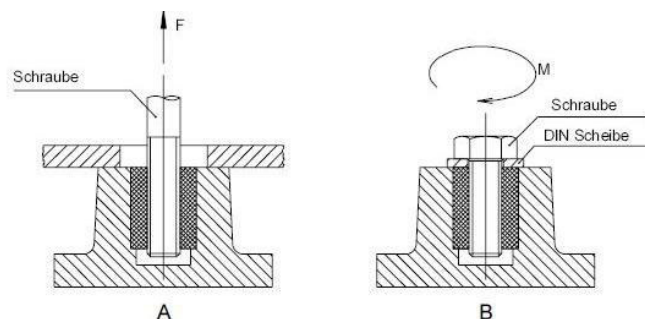


Abbildung 21: Methoden zur Bestimmung der Belastungsgrenzen von Insertverbindungen [5].

Dabei definiert (A) die axiale Zugbelastung und (B) das Weiterdreh-/Versagensdrehmoment.

Zugversuche

Die in AP2b erzeugten Prüfkörper mit integrierten Inserts wurden hinsichtlich ihrer mechanischen Kennwerte mit der Zugprüfung (*Abbildung 22*) auf einer Zugprüfmaschine vom Typ Zwick/Roell 1465 bei einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min und einer Vorkraft von 10 N untersucht.

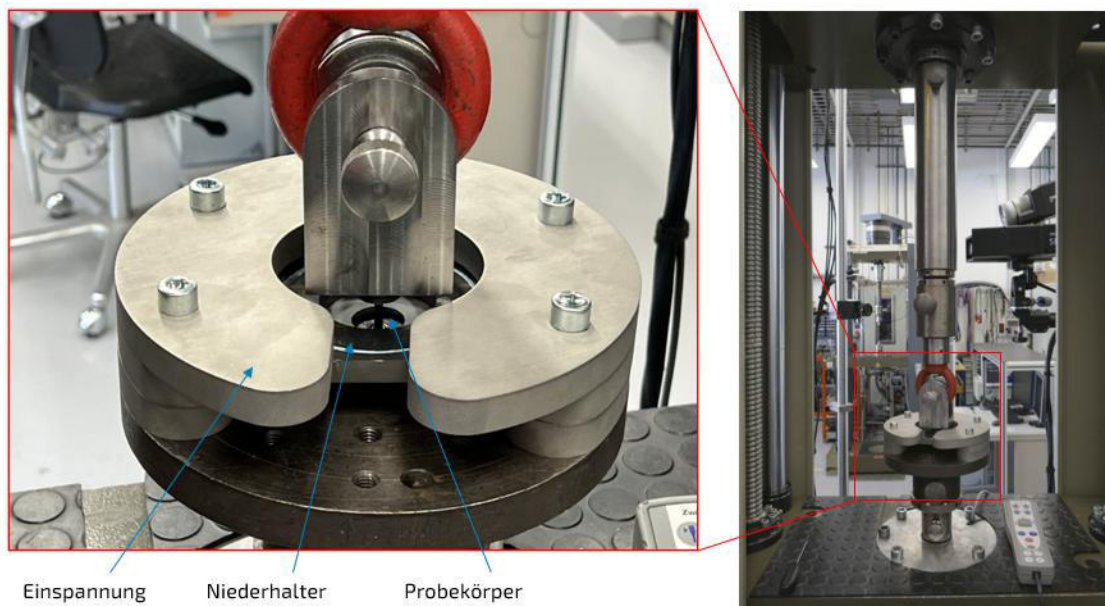


Abbildung 22: Prüfaufbau für die Zugversuche.

Der Prüfaufbau wurde so gewählt, dass bei der großen Anzahl an Probekörpern ein einfaches und schnelles Ein- und Ausspannen der Probekörper ermöglicht wird. Zur Bewertung der Versuchsergebnisse und der ermittelten Einflussfaktoren wurde eine Varianzanalyse durchgeführt. Dabei dienen der P-Wert, die Effektgröße sowie das Bestimmtheitsmaß (r^2) als zentrale Kennwerte zur quantitativen Beschreibung der statistischen Zusammenhänge zwischen den untersuchten Faktoren und den Zielgrößen. Der P-Wert beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass der beobachtete Effekt zufällig auftritt. Ein niedriger P-Wert ($\leq 0,05$) weist darauf hin, dass der Effekt statistisch signifikant ist und ein realer Zusammenhang zwischen Faktor und Zielgröße besteht. Ein hoher P-Wert ($> 0,05$) hingegen deutet darauf hin, dass der beobachtete Unterschied auch zufällig entstanden sein könnte und keine signifikante Aussagekraft besitzt. Die Effektgröße quantifiziert die Stärke des Zusammenhangs zwischen einem Faktor und der Zielgröße. Sie ergänzt den P-Wert, indem sie nicht nur anzeigt, ob ein signifikanter Unterschied besteht, sondern auch, wie ausgeprägt dieser ist. Hohe Effektgrößen (nahe 1) zeigen eine starke Korrelation zwischen Faktor und Zielgröße, während niedrige Werte (nahe 0) auf einen geringen oder nicht vorhandenen Zusammenhang hinweisen. Das Bestimmtheitsmaß r^2 beschreibt, welcher Anteil der Gesamtvarianz der Zielgröße durch die berücksichtigten Faktoren erklärt werden kann. Ein

Wert von $r^2 = 1$ steht für eine vollständige Erklärung der Varianz durch das Modell, während $r^2 = 0$ bedeutet, dass die Faktoren keinen erklärenden Einfluss haben. Das Bestimmtheitsmaß dient somit als Maß für die Güte der Modellanpassung und zeigt, wie gut die untersuchten Parameter die beobachteten Ergebnisse abbilden.

In Tabelle 5 *Tabelle 5: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Zugversuche an M4-Probekörpern.* sind die zugehörigen P-Werte, Effektgrößen und Korrelationskoeffizienten für die Zugversuche zusammengefasst. Als Signifikanzgrenze wurde ein P-Wert von 0,05 festgelegt.

Tabelle 5: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Zugversuche an M4-Probekörpern.

Faktor	P-Wert	Effektgröße	r	r ²
Material	$1,7 \cdot 10^{-84}$	0,54	0,75	0,57
Infillanteil	$2,8 \cdot 10^{-30}$	0,35	0,49	0,24
Außenbahnen	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,10	0,14	0,02
Methode der Einbettung	0,12	0,05	0,07	< 0,01
Orientierung	0,16	0,05	0,06	< 0,01
Infillmuster	0,57	0,02	0,03	< 0,01

P-Wert-Grenze = 0,05

Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigen, dass insbesondere die Faktoren Material und Infillanteil einen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Zielgrößen ausüben. Beide Parameter weisen niedrige P-Werte ($P < 0,05$) und vergleichsweise hohe Effektgrößen auf, was auf einen starken und statistisch gesicherten Zusammenhang hinweist. Das Material erklärt mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,57$ mehr als die Hälfte der beobachteten Varianz, während der Infillanteil mit $r^2 = 0,24$ ebenfalls einen relevanten Beitrag leistet. Der Faktor Außenbahnen zeigt mit einem P-Wert von $2,5 \times 10^{-3}$ ebenfalls einen signifikanten, wenn auch schwächeren Einfluss. Dagegen konnten für die Faktoren Einbettungsmethode, Orientierung und Infillmuster keine signifikanten Zusammenhänge festgestellt werden ($P > 0,05$). Ihre Effektgrößen und Bestimmtheitsmaße liegen im sehr niedrigen Bereich, was auf einen geringen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hinweist. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Materialwahl den größten Einfluss auf das mechanische Verhalten der Prüfkörper hat, gefolgt vom Infillanteil. Prozessparameter wie Einbettungsmethode oder Orientierung wirken sich dagegen im Rahmen der untersuchten Konfigurationen nicht signifikant aus. Vor diesem Hintergrund wurden in den anschließenden Auswertungen die Parameter hinsichtlich des Materials ausgewertet.

Infillanteil

Abbildung 23 zeigt den Verlauf der ermittelten Auszugskräfte in Abhängigkeit vom Infillanteil für die untersuchten Materialien ABS, ASA, PA6/CF, PET-G und PP-GF, wobei die ABS-Proben mittels Freeformer gefertigt wurden.

- ABS: Mit steigendem Infillanteil nimmt die maximale Zugkraft stark zu. Der Medianwert steigt von 10 % auf 100 % Infill um insgesamt +386 %, wobei der stärkste Anstieg zwischen 30 % und 70 % Infill (+154 %) auftritt. Dies weist auf eine deutliche Verbesserung der strukturellen Steifigkeit und der Kraftübertragung hin.
- ASA: Auch ASA zeigt eine deutliche Zunahme der Zugkraft. Zwischen 10 % und 70 % Infill beträgt der Anstieg +109 %, zwischen 70 % und 100 % nochmals +40 %. Ab hohen Füllgraden tritt eine Sättigungstendenz auf, die auf eine weitgehend geschlossene Struktur hinweist.
- PA6/CF: Der faserverstärkte Werkstoff zeigt ebenfalls einen klaren Anstieg, jedoch in geringerem Umfang. Zwischen 30 % und 70 % Infill erhöht sich die Zugkraft um +96 %, gefolgt von +37 % zwischen 70 % und 100 %. Dies verdeutlicht, dass auch bei faserverstärkten Materialien der Füllgrad einen wesentlichen Beitrag zur Verbundfestigkeit leistet.
- PET-G: Bei PET-G steigt die maximale Zugkraft zunächst um +88 % von 20 % auf 50 % Infill, anschließend um weitere +16 % bis 100 %. Der Effekt ist weniger ausgeprägt, zeigt aber ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit von der inneren Dichte.
- PP-GF: Der glasfaserverstärkte Polypropylen weist insgesamt geringere absolute Kraftwerte auf, zeigt aber einen relativen Anstieg um +60 % zwischen 20 % und 50 % sowie um +69 % zwischen 50 % und 100 % Infill.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Infillanteil einen signifikanten Einfluss auf die Verbundfestigkeit der eingebetteten Inserts hat. Mit zunehmendem Füllgrad verbessert sich die Kraftübertragung zwischen Insert und Matrixmaterial durch höhere lokale Steifigkeit und reduzierte Porosität im Bauteilinneren.

Zwischen den Materialien bestehen jedoch deutliche Unterschiede: Amorphe Thermoplaste (ABS, ASA) reagieren besonders stark auf den Infillanstieg, während faserverstärkte Materialien (PA6/CF, PP-GF) eine geringere, aber dennoch signifikante Abhängigkeit zeigen. Dies ist auf deren ohnehin höhere Grundfestigkeit und Steifigkeit zurückzuführen, wodurch die relative Wirkung der Füllstruktur reduziert wird.

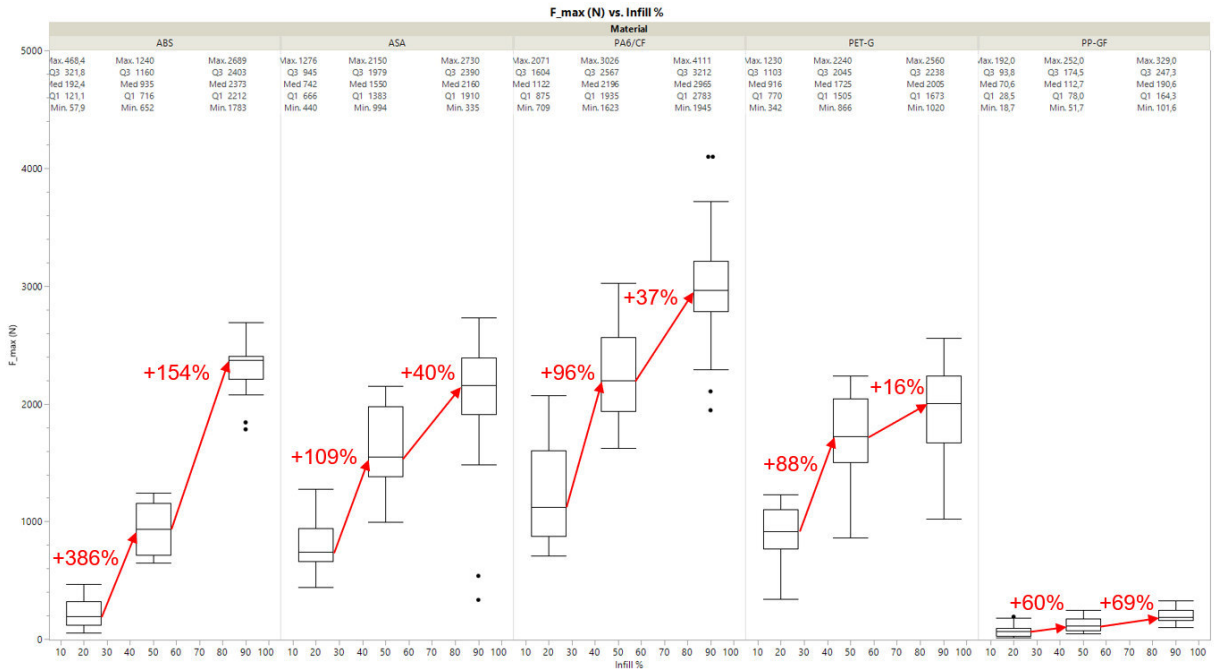


Abbildung 23: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich des Infillanteils

Die Untersuchung verdeutlicht, dass eine Erhöhung des Infillanteils die Verbundfestigkeit unabhängig vom Materialtyp signifikant steigert, wenngleich der Effekt je nach Material unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Bei additiv gefertigten Bauteilen ist der Füllgrad somit ein zentraler Parameter zur Optimierung der mechanischen Performance von Inserts, insbesondere bei amorphen Thermoplasten.

Außenbahnen

Neben dem Infillanteil wurde der Einfluss der Anzahl der Außenbahnen (Perimeter) auf die Verbundfestigkeit der eingebetteten Inserts untersucht. Die Außenbahnen bilden die geschlossene Kontur um das Loch, in das das Insert eingebracht wird, und beeinflussen dadurch maßgeblich die lokale Stabilität sowie die Kraftübertragung in der Fügezone.

Abbildung 24 zeigt die maximalen Zugkräfte für Probekörper mit zwei bzw. vier Außenbahnen in Abhängigkeit vom verwendeten Material, auch in diesem Fall sind die ABS-Proben mittels Freeformer gefertigt.

- ABS: Eine Erhöhung der Außenbahnen von 2 auf 4 führt zu einem deutlichen Anstieg der maximalen Zugkraft um +61 %. Dieser starke Effekt verdeutlicht die Bedeutung der Wandstabilität für die Lastaufnahme im Bereich des Inserts.
- ASA: Auch ASA zeigt eine Verbesserung um +15 %, wobei die Steigerung moderater ausfällt. Dies weist darauf hin, dass der Effekt der Außenbahnen bei zäheren, weniger spröden Werkstoffen geringer ausgeprägt ist.

- PA6/CF: Der faserverstärkte Werkstoff zeigt einen deutlichen Anstieg um +27 %. Hier verbessert die zusätzliche Wandstärke die Kraftübertragung, reduziert lokale Spannungsspitzen und verhindert das Aufreißen der Matrix in der unmittelbaren Umgebung des Inserts.
- PET-G: Bei PET-G steigt die maximale Zugkraft um +40 %, was auf eine erhöhte Stabilität und eine gleichmäßigere Kraftverteilung bei höherem Wandanteil hinweist.
- PP-GF: Der glasfaserverstärkte Polypropylen zeigt mit +69 % den höchsten relativen Zugewinn. Dies deutet darauf hin, dass bei duktilen, faserverstärkten Materialien die lokale Verstärkung durch zusätzliche Außenbahnen besonders wirksam ist.

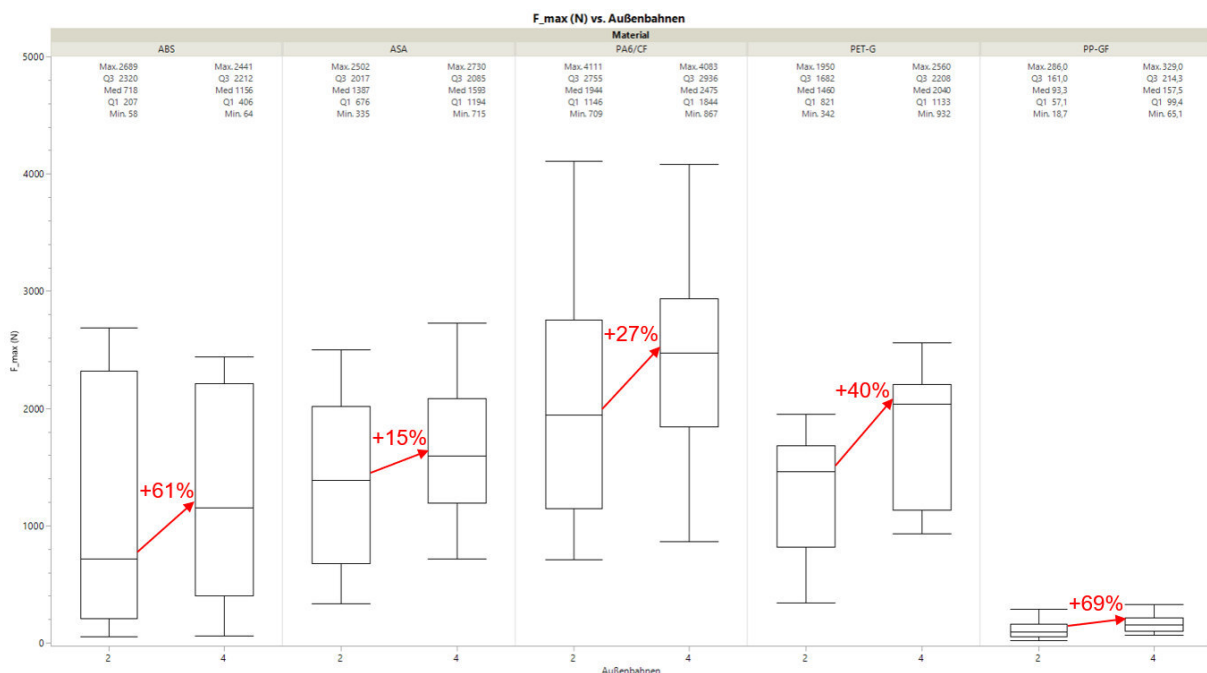


Abbildung 24: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Außenbahnen

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung der Anzahl der Außenbahnen die Verbundfestigkeit signifikant verbessert. Durch die zusätzlichen Perimeter wird die lokale Steifigkeit und Druckfestigkeit im Bereich des Inserts erhöht, wodurch sich die Kraft homogener in das umgebende Material einleiten kann. Die Ausprägung des Effekts hängt jedoch vom Materialverhalten ab:

- Bei amorphen Thermoplasten wie ABS und ASA führt eine höhere Anzahl an Außenbahnen zu einer deutlichen Verbesserung der Zugfestigkeit, wobei der Effekt bei ABS stärker ausgeprägt ist.
- Bei faserverstärkten Materialien (PA6/CF, PP-GF) wirkt die äußere Verstärkung besonders effektiv, da sie die Faserausrichtung unterstützt und lokale Rissbildung reduziert.

Die Untersuchung zeigt, dass die Außenbahnen einen entscheidenden Einfluss auf die Verbundfestigkeit der Inserts haben. Eine Erhöhung von zwei auf vier Außenbahnen führt in allen untersuchten Materialien zu höheren maximalen Zugkräften, wobei die Steigerung zwischen +15 %

und +69 % liegt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass durch eine gezielte Anpassung der Außenwandkonfiguration die mechanische Stabilität der Fügezone wesentlich verbessert werden kann. In Kombination mit den Ergebnissen zum Infillanteil lässt sich festhalten, dass sowohl die innere Bauteildichte als auch die äußere Wandstruktur entscheidende Parameter für die Optimierung der Insertintegration in additiv gefertigten Komponenten darstellen.

Einbettungsmethode

Nachdem zuvor der Einfluss des Infillanteils und der Anzahl der Außenbahnen auf die Verbundfestigkeit untersucht wurde, wird im Folgenden die Wirkung der Einbettungsmethode betrachtet. Während Infill und Außenbahnen primär den strukturellen Aufbau und die lokale Stabilität des Bauteils bestimmen, beeinflusst die Einbettungsmethode die Art der stoff- und formschlüssigen Verbindung zwischen Insert und Matrixmaterial. Ziel dieser Untersuchung war es, zu bewerten, inwieweit sich Wärmeinbetten und Ultraschalleinbetten hinsichtlich der erzielten mechanischen Festigkeit und Prozessstabilität unterscheiden.

Abbildung 25 zeigt die maximalen Zugkräfte in Abhängigkeit von der Einbettungsmethode.

- ABS: Beim Ultraschalleinbetten steigt der Medianwert der maximalen Zugkraft um etwa +54 % gegenüber dem Wärmeinbetten. Der Effekt deutet auf eine effektivere Verbindung zwischen Insert und Matrix hin, wobei die hohe Streuung der Werte auf prozessbedingte Schwankungen und lokale Inhomogenitäten im Bauteilaufbau zurückzuführen ist.
- ASA: Die gemessenen Zugkräfte zeigen nur einen geringen Anstieg um +5 % beim Ultraschalleinbetten. Die Unterschiede liegen hier im Bereich der experimentellen Unsicherheit.
- PA6/CF: Der Medianwert steigt um +12 %, was auf eine geringfügige Verbesserung der Verbundfestigkeit durch Ultraschalleinbetten hinweist. Allerdings ist die Streuung der Ergebnisse auch hier vergleichsweise hoch, was auf mögliche Unterschiede in der Faserverteilung oder lokale Fehlstellen schließen lässt.
- PET-G: Ein ähnlicher Trend ist bei PET-G zu beobachten, wo das Ultraschalleinbetten zu einer +10 % höheren maximalen Kraft führt.
- PP-GF: Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse für PP-GF eine minimale Abnahme der maximalen Zugkräfte um -2 %, womit keine signifikante Beeinflussung durch die Einbettungsmethode festgestellt werden kann.

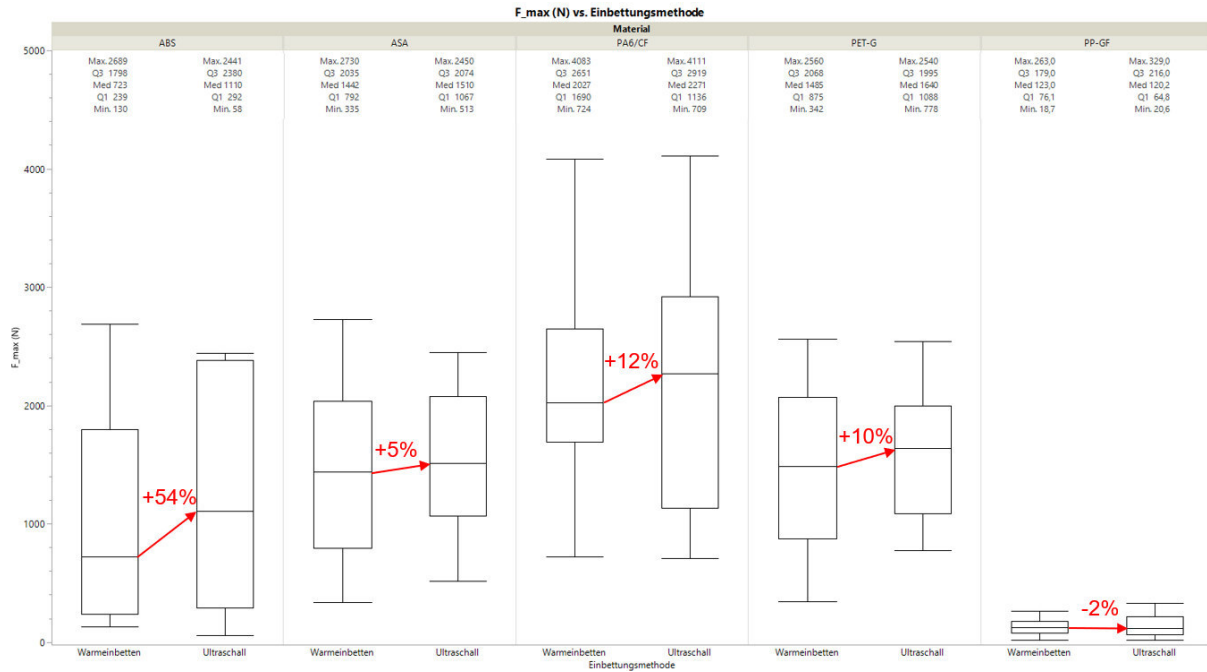


Abbildung 25: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Einbettungsmethode auf die Verbundfestigkeit insgesamt gering und materialspezifisch ist. In den meisten Fällen werden durch das Ultraschalleinbetten leicht höhere Zugkräfte erzielt, was auf eine verbesserte stoffschlüssige Verbindung und erhöhte lokale Dichte im Fügebereich hindeutet. Die hohen Ausreißer, die insbesondere bei amorphen Werkstoffen wie ABS auftreten, lassen sich auf prozessbedingte Unterschiede im Probekörperaufbau zurückführen – etwa variierende Schichtanbindungen, lokale Porositäten oder unvollständige Einbettungstiefen. Diese Effekte beeinflussen die Messwerte stärker als die eigentliche Einbettungsmethode selbst. Die Gesamtstreuung der Ergebnisse und die geringen relativen Unterschiede zwischen den Methoden deuten darauf hin, dass die Wahl der Einbettungsmethode keinen dominanten Einflussfaktor auf die mechanische Verbundfestigkeit darstellt, sofern die Prozessparameter korrekt eingestellt sind. Die Untersuchung bestätigt, dass Wärmeinbetten und Ultraschalleinbetten vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der erzielten Zugfestigkeiten liefern. Leichte Vorteile des Ultraschalleinbettens sind in einzelnen Materialien erkennbar, liegen jedoch meist im Bereich der statistischen Unsicherheit. Ausschlaggebender für die Verbundqualität scheinen Bauteilaufbau, Materialwahl und Prozessstabilität zu sein, während die Einbettungsmethode selbst nur einen untergeordneten Einfluss auf die mechanische Performance zeigt.

Bauteilorientierung

Nach der Betrachtung der strukturellen Parameter Infillanteil und Außenbahnen sowie der Einbettungsmethode wurde im nächsten Schritt der Einfluss der Bauteilorientierung auf die Verbundfestigkeit untersucht. Dabei wurde der Infillrichtung im Verhältnis zur Einfügerichtung des Inserts variiert, um zu bewerten, ob die Druckorientierung und die damit verbundene Faserausrichtung der additiv gefertigten Struktur einen Einfluss auf die maximalen Zugkräfte haben.

Abbildung 27 zeigt die maximalen Zugkräfte für flach liegend und stehend gedruckte Probekörper mit M4-Inserts in fünf verschiedenen Materialien (ABS, ASA, PA6/CF, PET-G und PP-GF).

- ABS: Bei ABS steigt der Medianwert beim stehenden Aufbau leicht um +3 %, was auf einen geringen, aber messbaren Einfluss der Schichtorientierung hindeutet. Die große Streuung deutet darauf hin, dass lokale Materialunterschiede oder Einbettungsabweichungen den Effekt überlagern.
- ASA: Im Gegensatz dazu zeigt ASA eine Reduktion der Zugkraft um –24 % bei stehender Orientierung. Dies lässt darauf schließen, dass die Lagenhaftung in vertikaler Druckrichtung eine schwächere Verbindung zwischen den Schichten aufweist und somit die Kraftübertragung auf das Insert beeinträchtigt wird.
- PA6/CF: Beim faserverstärkten Polyamid sinkt der Medianwert um –10 %. Die Faserausrichtung in Schichtrichtung wirkt sich hier nachteilig aus, da weniger Fasern parallel zur Zugrichtung wirken und damit die Lastübertragung zwischen Insert und Matrix verringern.
- PET-G: PET-G konnte nicht ausgewertet werden, weil die Qualität der Probekörper unzureichend war und sich für die stehende Variante keine geometrisch konsistenten Vorlöcher erzeugen ließen, wodurch die Inserts sowohl beim Warmeinbetten als auch beim US-Einbetten zum Verkappen neigten (siehe *Abbildung 26*).
- PP-GF: Der glasfaserverstärkte Polypropylen zeigt mit –49 % die deutlichste Reduktion. Dies verdeutlicht die hohe Empfindlichkeit faserverstärkter Strukturen gegenüber der Druckorientierung und eine starke Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften.

Im Vergleich zu den zuvor untersuchten Parametern zeigt die Bauteilorientierung einen deutlich geringeren Einfluss auf die Verbundfestigkeit der eingebetteten Inserts. Zwar lassen sich zwischen flach liegenden und stehenden Proben Unterschiede feststellen, diese bleiben jedoch überwiegend im Bereich kleiner relativer Änderungen. Die beobachteten Abweichungen sind eher auf lokale Schwankungen in der Bauteilqualität, leichte Unterschiede in der Schichthftung oder prozessbedingte Streuungen zurückzuführen als auf einen systematischen Orientierungseffekt. Bei amorphen Thermoplasten (z. B. ABS, ASA) ist der Einfluss minimal oder nicht eindeutig erkennbar, während faserverstärkte Materialien (z. B. PA6/CF, PP-GF) etwas empfindlicher reagieren. Dennoch bleibt die absolute Auswirkung auch hier moderat.

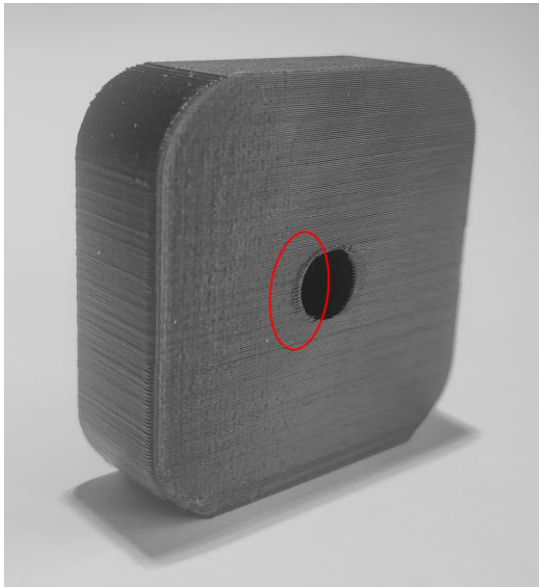


Abbildung 26: Darstellung eines Randbereichs mit Fehlerbild der Überextrusion an einem PET-G Probekörper

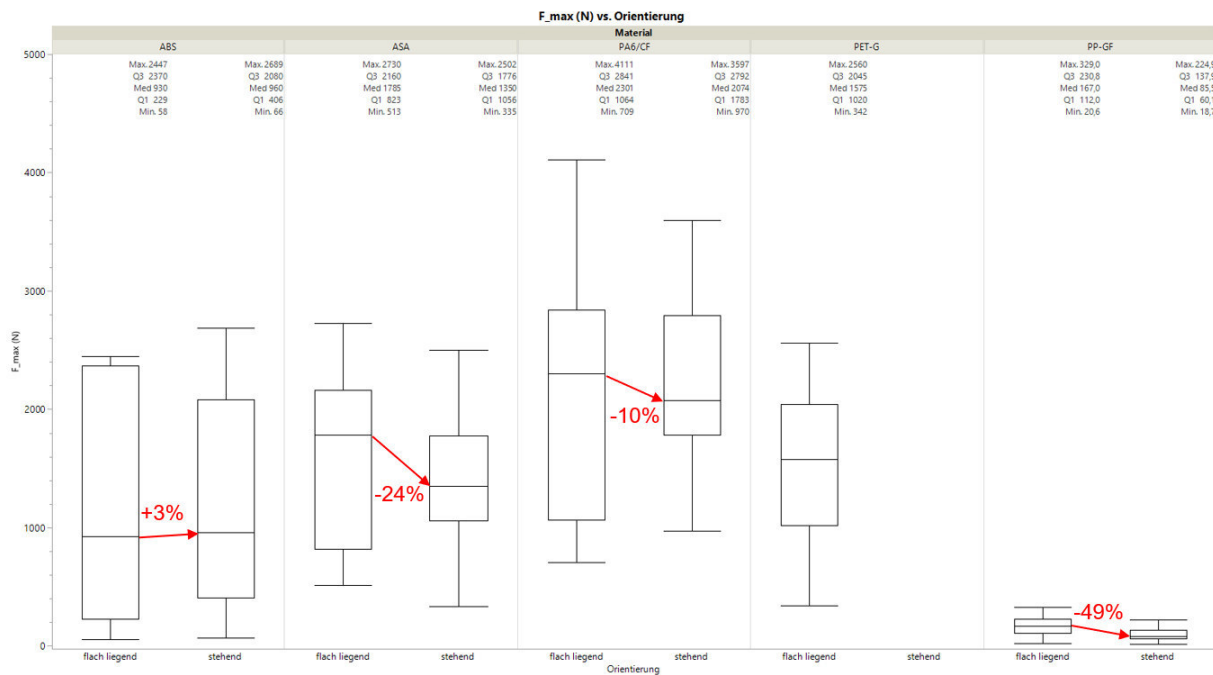


Abbildung 27: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Probekörperorientierung

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Orientierung der Druckrichtung zwar die lokale Kraftübertragung beeinflusst, ihr Effekt auf die maximalen Zugkräfte jedoch deutlich geringer ausfällt als der von strukturellen Parametern wie Infillanteil oder Außenbahnen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bauteilorientierung des Infillanteils nur einen begrenzten Einfluss auf die erzielte Verbundfestigkeit besitzt. Unterschiede zwischen flach liegender und stehender Orientierung liegen meist im unteren zweistelligen Prozentbereich und werden häufig durch Streuungen

überlagert. Im Vergleich zu den zuvor betrachteten Parametern (Infillanteil, Außenbahnen, Einbettungsmethode) stellt die Orientierung damit keinen dominanten Faktor dar. Für die Auslegung additiv gefertigter Fügestellen kann sie daher als sekundärer Einflussparameter betrachtet werden, dessen Wirkung im Wesentlichen von Materialeigenschaften und Prozessstabilität abhängt.

Infillmuster

Abschließend wurde der Einfluss des Infillmusters auf die maximalen Auszugkräfte der eingebetteten Inserts untersucht. Nach den zuvor betrachteten Parametern – Infillanteil, Außenbahnen, Einbettungsmethode und Orientierung – soll hier bewertet werden, ob sich die interne Strukturgeometrie des additiv gefertigten Probekörpers merklich auf die Kraftübertragung und den Versagensmechanismus auswirkt. Untersucht wurden zwei Infillmuster: das 45°-Rastermuster und das Gyroid-Muster. Aufgrund softwareseitiger Einschränkungen (AKF-Slicer) konnte das Gyroid-Muster bei ABS nicht erzeugt werden.

Abbildung 28 zeigt die maximalen Zugkräfte für Probekörper mit den beiden Infillmustern über die Materialien ASA, PA6/CF, PET-G und PP-GF, wobei die ABS-Proben mittels Freeformer gefertigt wurden.

- ASA: Der Medianwert der maximalen Zugkraft liegt beim Gyroid-Muster um –6 % unterhalb des 45°-Rasters. Der Unterschied ist gering und liegt innerhalb der Messstreuung.
- PA6/CF: Für das faserverstärkte Polyamid ergibt sich ein ähnlicher Trend mit einer leichten Abnahme der Zugkraft um –9 % beim Gyroid-Muster.
- PET-G: Im Gegensatz dazu zeigt PET-G eine geringfügige Zunahme der maximalen Zugkräfte um +10 %, was auf eine etwas homogenere Spannungsverteilung beim Gyroid-Muster hindeuten könnte.
- PP-GF: Hier ist eine Reduktion der maximalen Zugkräfte um –21 % zu beobachten. Aufgrund der insgesamt niedrigen absoluten Kraftwerte ist der Effekt jedoch statistisch wenig signifikant.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Infillmuster nur einen sehr geringen Einfluss auf die mechanische Verbundfestigkeit der eingebetteten Inserts hat. Die Unterschiede zwischen 45°-Raster und Gyroid-Muster bleiben in allen untersuchten Materialien im Bereich von $\pm 10\%$, mit Ausnahme von PP-GF, das aufgrund seiner geringen Grundfestigkeit empfindlicher auf geometrische Unterschiede reagiert. Im Vergleich zu den zuvor analysierten Parametern (Infillanteil, Außenbahnen, Einbettungsmethode und Orientierung) ist der Einfluss des Infillmusters klar untergeordnet. Die

innere Geometrie scheint zwar die lokale Kraftverteilung leicht zu verändern, die Gesamtkraftübertragung auf das Insert wird jedoch primär durch Makroparameter wie Dichte, Wandstärke und Fügequalität bestimmt. Die Untersuchung bestätigt, dass das Infillmuster keinen signifikanten Einfluss auf die erzielte Verbundfestigkeit hat. Unterschiede zwischen 45°-Raster und Gyroid-Struktur liegen überwiegend im Bereich der Messstreuung und sind materialspezifisch schwach ausgeprägt. Damit kann das Infillmuster im Rahmen der Insertintegration als sekundärer Gestaltungsparameter betrachtet werden, dessen Einfluss auf die mechanische Performance im Vergleich zu strukturellen Parametern (z. B. Infillanteil oder Außenbahnen) vernachlässigbar ist.

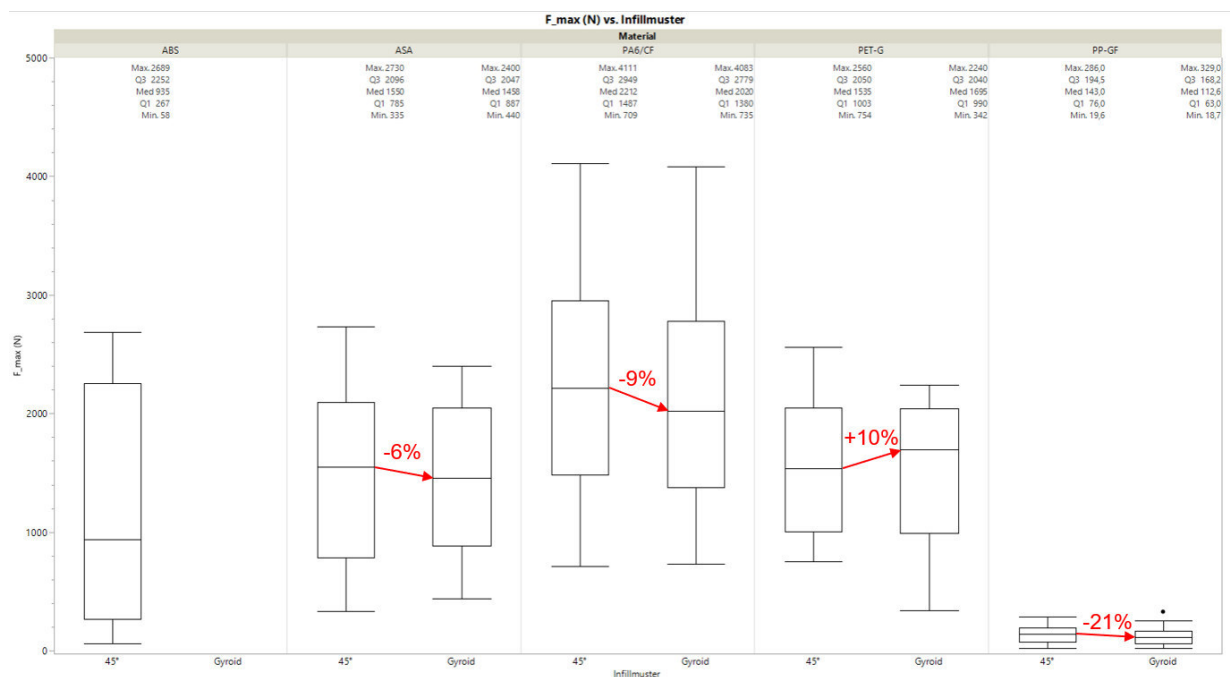


Abbildung 28: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich des Infillmusters

Die Untersuchungen zeigen, dass die erzielten Auszugkräfte der eingebetteten Inserts maßgeblich von den strukturellen Parametern des additiv gefertigten Probekörpers abhängen. Der Infillanteil und die Anzahl der Außenbahnen haben den größten Einfluss auf die Verbundfestigkeit, da sie die lokale Steifigkeit und die Kraftübertragung im Bereich des Inserts direkt bestimmen. Eine Erhöhung dieser Parameter führt in allen untersuchten Materialien zu deutlich höheren Auszugkräften.

Die Einbettungsmethode (Wärmeinbetten vs. Ultraschall) zeigt dagegen nur geringe Unterschiede, wobei Ultraschalleinbetten tendenziell leicht höhere Auszugkräfte ermöglicht, sofern die Prozessführung stabil ist.

Die Orientierung des Infillanteils sowie das Infillmuster haben sich hingegen als untergeordnete Einflussgrößen erwiesen. Beide Parameter führen nur zu geringen Abweichungen der Auszugswerte und zeigen keine systematische Beeinflussung der Verbundfestigkeit.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die mechanische Performance der Insertanbindung primär durch Bauteildichte, Wandstärke und Prozessstabilität bestimmt wird, während geometrische Muster und Orientierungen nur eine sekundäre Rolle spielen.

Überdrehmoment

Für die Untersuchung der Überdrehmomente wurde ein kollaborativer Roboter in Kombination mit einem digitalen Drehmomentschlüssel eingesetzt. Dabei erfolgte eine integrierte Messung der im Roboter wirkenden Kräfte bei konstanter Drehgeschwindigkeit von 3 mm/s. Die mit dem kalibrierten Drehmomentschlüssel erfassten Momente wurden anschließend mit den aus den im Roboter gemessenen Kräften rechnerisch bestimmten Momenten abgeglichen, siehe [Abbildung 29](#).

Analog zu den zuvor durchgeführten Zugversuchen wurden für die Torsionsversuche dieselben Parameter – Material, Infillanteil, Außenbahnen, Einbettungsmethode, Orientierung und Infillmuster – untersucht. Ziel war es, den Einfluss dieser Faktoren auf die maximale übertragbare Torsionsbelastung zu bestimmen und zu bewerten, inwieweit sich die Einflussgrößen unter Schubbeanspruchung von denen unter Zugbeanspruchung unterscheiden.



Abbildung 29: Prüfaufbau für die Überdrehmomentuntersuchungen.

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse des Zielgrößen screenings für die Torsionsversuche mit M4-Inserts. Zur Bewertung der Signifikanz wurden P-Wert, Effektgröße, Korrelationskoeffizient (r) und Bestimmtheitsmaß (r^2) herangezogen. Die Auswertung zeigt deutlich, dass vor allem die Faktoren Material und Infillanteil einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Torsionsmomente haben:

Tabelle 6: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Torsionsversuche an M4-Probekörpern.

Faktor	P-Wert	Effektgröße	r	r ²
Material	$5,0 \cdot 10^{-121}$	0,59	0,86	0,73
Infillanteil	$2,5 \cdot 10^{-8}$	0,18	0,26	0,07
Außenbahnen	0,08	0,06	0,08	< 0,01
Methode der Einbettung	0,07	0,06	0,25	< 0,01
Orientierung	0,07	0,06	0,25	< 0,01
Infillmuster	0,76	0,01	0,01	< 0,01

P-Wert-Grenze = 0,05

Die Auswertung zeigt deutlich, dass vor allem die Faktoren Material und Infillanteil einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Torsionsmomente haben:

- **Material:** Mit einem P-Wert und einer hohen Effektgröße von 0,59 ist das Material der mit Abstand dominierende Faktor. Das Bestimmtheitsmaß von 0,73 zeigt, dass rund 73 % der Streuung der Messergebnisse auf das Material zurückzuführen sind.
- **Infillanteil:** Auch der Infillanteil weist mit einem P-Wert von und einer moderaten Effektgröße (0,18) eine signifikante Korrelation auf. Damit bestätigt sich, dass die Bauteildichte einen direkten Einfluss auf die Torsionsfestigkeit hat – ähnlich wie bereits bei den Zugversuchen beobachtet.
- **Außenbahnen, Einbettungsmethode und Orientierung:** Diese Faktoren zeigen P-Werte leicht oberhalb der Signifikanzgrenze (0,07–0,08) und nur geringe Effektgrößen (~0,06). Dies deutet auf einen schwachen, nicht signifikanten Einfluss hin.
- **Infillmuster:** Mit einem P-Wert von 0,76 und einer vernachlässigbaren Effektgröße (0,01) zeigt sich hier kein signifikanter Zusammenhang.

Im Vergleich zu den Zugversuchen zeigen die Torsionsversuche ein deutlich klareres Bild hinsichtlich der dominierenden Einflussgrößen: Der Faktor Material hat einen überragenden Effekt auf die maximalen Drehmomente, während der Infillanteil ebenfalls einen, wenn auch schwächeren, signifikanten Beitrag leistet. Die übrigen Parameter – insbesondere Außenbahnen, Einbettungsmethode, Orientierung und Infillmuster – zeigen dagegen nur geringe bis keine statistische Relevanz. Dies deutet darauf hin, dass bei Torsionsbelastung die Materialeigenschaften selbst (z. B. Steifigkeit, Zähigkeit, Faserverstärkung) eine wesentlich größere Rolle spielen als

geometrische Strukturparameter. Im Gegensatz zu den Zugversuchen, bei denen auch die Bauteilgeometrie (z. B. Infillanteil, Außenbahnen) einen deutlichen Einfluss zeigte, steht bei den Torsionsversuchen die werkstoffspezifische Schubfestigkeit im Vordergrund. Die Einbettungsmethode und Druckorientierung wirken sich hier kaum aus, da die Schubbeanspruchung überwiegend durch das Materialgefüge und weniger durch die Schichtstruktur getragen wird. Vor diesem Hintergrund wurden in den anschließenden Auswertungen die Parameter hinsichtlich des Materials ausgewertet.

Infillanteil

Zur Untersuchung des Einflusses der inneren Bauteilstruktur auf die Torsionsfestigkeit wurden Torsionsversuche an additiv gefertigten Probekörpern mit M4-Inserts durchgeführt. Analog zu den zuvor betrachteten Zugversuchen wurde der Infillanteil zwischen 10 % und 100 % variiert, um den Zusammenhang zwischen der Bauteildichte und dem maximal übertragbaren Drehmoment zu analysieren. *Abbildung 30* zeigt die Entwicklung des maximalen Torsionsmoments in Abhängigkeit vom Infillanteil für die untersuchten Materialien ABS, ASA, PA6/CF, PET-G und PP-GF, wobei die ABS-Proben mittels Freeformer gefertigt wurden.

- ABS: Mit zunehmendem Infillanteil steigt das maximale Drehmoment stark an. Zwischen 10 % und 40 % Infill erhöht sich um +250 %, und von 40 % auf 70 % nochmals um +122 %. Dies zeigt eine sehr deutliche Verbesserung der Torsionsfestigkeit bei höherer innerer Dichte.
- ASA: Auch bei ASA ist ein signifikanter Anstieg zu beobachten. Von 30 % auf 50 % Infill steigt das Drehmoment um +37 %, und zwischen 50 % und 100 % um weitere +21 %. Der Effekt ist etwas schwächer ausgeprägt als bei ABS, zeigt aber denselben Trend.
- PA6/CF: Der faserverstärkte Werkstoff weist eine gleichmäßig steigende Torsionsfestigkeit auf. Zwischen 30 % und 50 % Infill steigen die maximalen Torsionsmomente um +40 %, und zwischen 50 % und 100 % um +11 %. Aufgrund der hohen Grundfestigkeit des Materials fällt der relative Anstieg geringer aus.
- PET-G: Bei PET-G wird eine moderate Zunahme beobachtet. Von 20 % auf 50 % Infill beträgt der Anstieg +23 %, und zwischen 50 % und 100 % +13 %.
- PP-GF: Der glasfaserverstärkte Polypropylen zeigt den geringsten relativen Effekt. Zwischen 20 % und 50 % steigen die maximalen Torsionsmomente um +26 %, und zwischen 50 % und 100 % um +31 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Infillanteil einen signifikanten Einfluss auf die maximalen Torsionsmomente der eingebetteten Inserts besitzt. Mit zunehmendem Füllgrad steigt das übertragbare Drehmoment über alle Materialien hinweg deutlich an. Ursache hierfür ist die erhöhte strukturelle Steifigkeit und der verringerte Anteil an Hohlräumen, wodurch die

Kraftübertragung auf die Insert-Matrix-Fügezone verbessert wird. Im Vergleich zu den Zugversuchen ist der Einfluss des Infillanteils zwar weiterhin deutlich, jedoch insgesamt etwas weniger stark ausgeprägt, insbesondere bei faserverstärkten Werkstoffen. Hier wird die Torsionsfestigkeit stärker durch die Schubfestigkeit des Materials als durch die innere Struktur bestimmt. Die stärksten relativen Anstiege zeigen amorphe Materialien wie ABS und ASA, bei denen die Strukturverdichtung durch höheren Infillanteil direkt zu einer verbesserten Torsionsbelastbarkeit führt. Gründe dafür könnten sein, dass durch ihre ungeordnete Struktur, eine gute Schichthaftung und duktilen Verhalten zu einer besseren Verteilung und Aufnahme von Torsionskräften führen kann. Faserverstärkte Materialien (PA6/CF, PP-GF) zeigen dagegen geringere Steigerungen, da ihre höhere Grundsteifigkeit bereits eine effektivere Drehmomentübertragung ermöglicht.

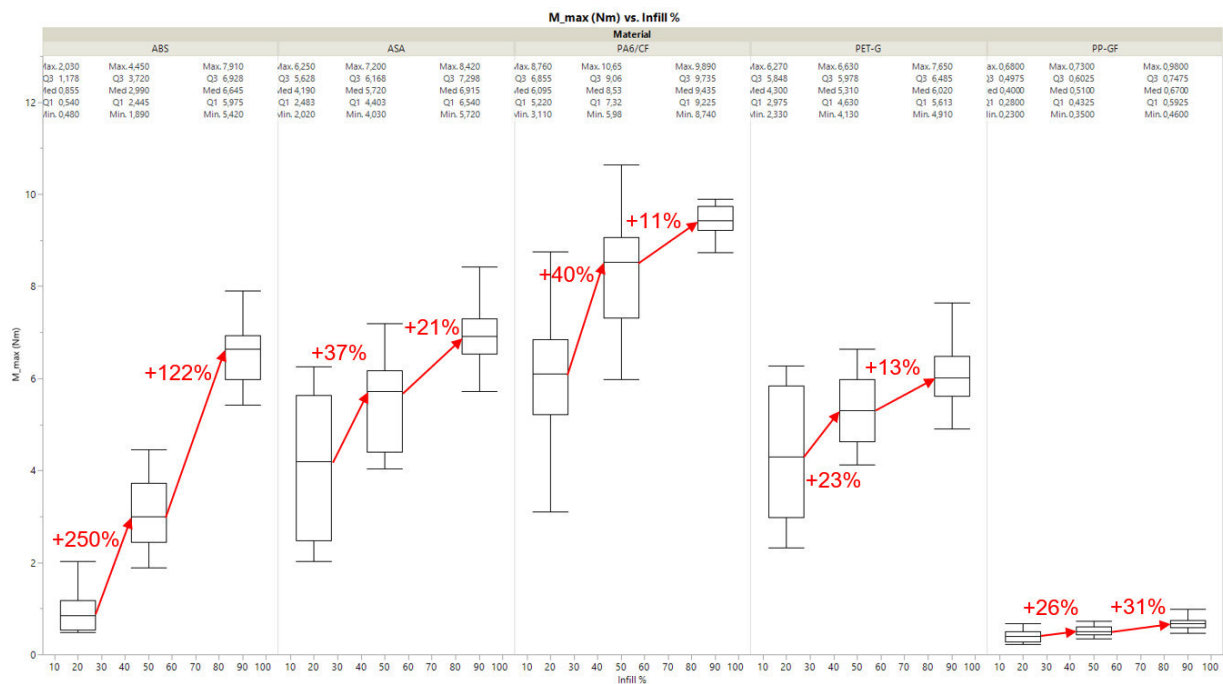


Abbildung 30: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich des Infillanteils

Außenbahnen

In Ergänzung zur Untersuchung des Infillanteils wurde der Einfluss der Anzahl der Außenbahnen auf die übertragbare Torsionsfestigkeit analysiert. Da die Außenbahnen den äußersten Bereich des additiv gefertigten Probekörpers bzw. des Inserts umgebenden Bereiches am Vorloch bilden, tragen sie maßgeblich zur Schubübertragung und Stabilität der Insert-Matrix-Verbindung bei. Ziel dieser Untersuchung war es zu bewerten, inwieweit eine Erhöhung der Außenbahnen die Torsionsbelastbarkeit verbessert und ob der Effekt mit dem zuvor beobachteten Verhalten unter Zugbelastung vergleichbar ist.

Abbildung 31 zeigt das maximale Torsionsmoment in Abhängigkeit von der Anzahl der Außenbahnen (2 bzw. 4) für die untersuchten Materialien ABS, ASA, PA6/CF, PET-G und PP-GF, wobei die ABS-Proben mittels Freeformer gefertigt wurden.

- ABS: Eine Erhöhung der Außenbahnen von 2 auf 4 führt zu einem Anstieg des maximalen Drehmoments um +35 %. Dies deutet auf eine verbesserte Schubübertragung an der Probenoberfläche hin.
- ASA: Auch ASA zeigt eine deutliche Steigerung um +40 %, was auf eine erhöhte strukturelle Stabilität durch zusätzliche geschlossene Randbahnen schließen lässt.
- PA6/CF: Der faserverstärkte Werkstoff zeigt einen moderaten Anstieg um +23 %, wobei die ohnehin hohe Grundfestigkeit des Materials den relativen Effekt begrenzt.
- PET-G: Bei PET-G steigen die maximalen Torsionsmomente um +28 %, was einen ähnlichen Trend wie bei den amorphen Kunststoffen widerspiegelt.
- PP-GF: Der glasfaserverstärkte Polypropylen-Typ zeigt ebenfalls einen Zuwachs um +30 %, wenngleich das absolute Drehmomentniveau im Vergleich niedrig bleibt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung der Außenbahnen grundsätzlich zu einer Steigerung der maximalen Torsionsmomente führt. Durch die größere Wandstärke entsteht eine stabilere Hülle, die bei der Schubbeanspruchung höhere Spannungen aufnehmen und gleichmäßiger verteilen kann. Dieser Effekt ist besonders bei amorphen Materialien (ABS, ASA) ausgeprägt, während faserverstärkte Werkstoffe aufgrund ihrer intrinsischen Steifigkeit geringere relative Verbesserungen zeigen. Im Vergleich zu den Zugversuchen fällt der Einfluss der Außenbahnen auf die Torsionsfestigkeit jedoch insgesamt moderat aus. Unter Torsion wird die Belastung über das gesamte Volumen verteilt, während unter Zug die Außenstruktur einen direkteren Beitrag zur Lastaufnahme leistet. Daher wirken sich zusätzliche Außenbahnen bei Torsionsbelastung weniger stark auf den Bruchmomentwert aus.

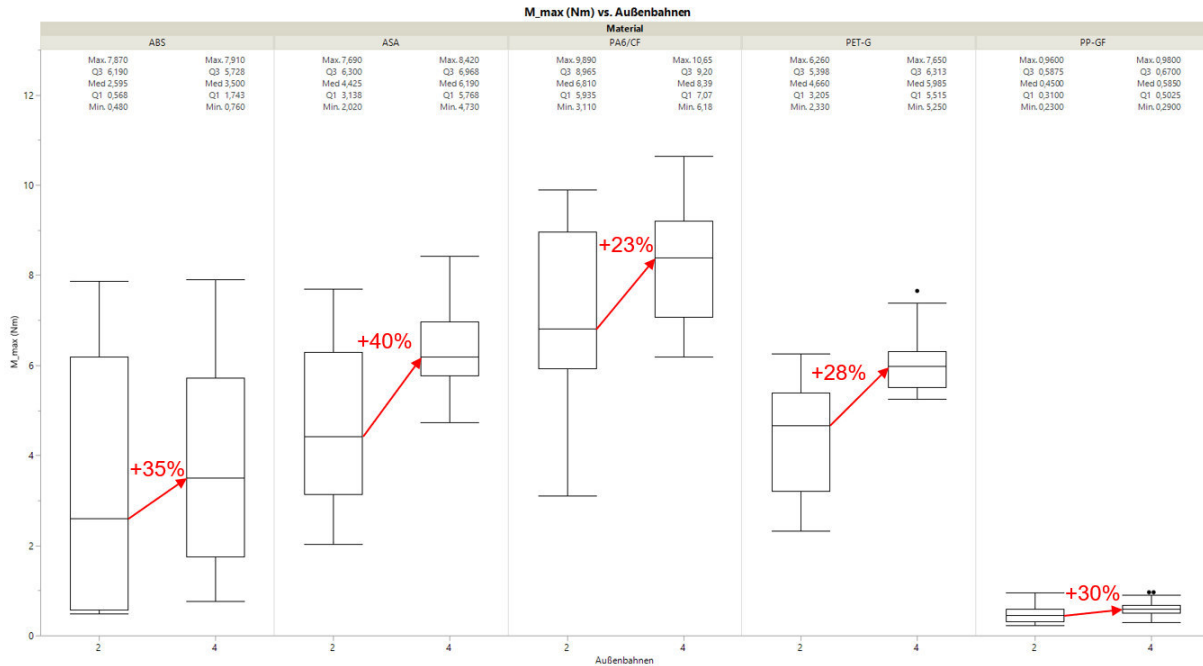


Abbildung 31: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Außenbahnen

Damit kann festgehalten werden, dass die Erhöhung der Außenbahnen die strukturelle Integrität verbessert, jedoch kein dominanter Parameter für die Torsionsfestigkeit ist. Der Einfluss bleibt sekundär gegenüber den Parametern Material und Infillanteil, die bereits im Zielgrößencreening als signifikant identifiziert wurden.

Einbettungsmethode

In Ergänzung zu den vorherigen Untersuchungen wurde der Einfluss der Einbettungsmethode auf die Torsionsfestigkeit der eingebetteten Inserts analysiert. Dabei wurden die Methoden Warmeinbetten und Ultraschalleinbetten gegenübergestellt. Ziel war es, zu prüfen, ob sich Unterschiede in der Verbindungsgüte zwischen Insert und Matrix auch unter Schubbelastung bemerkbar machen und ob sich die Trends aus den Zugversuchen bestätigen.

Abbildung 32 zeigt die maximal erreichten Drehmomente in Abhängigkeit von der Einbettungsmethode für die untersuchten Materialien ABS, ASA, PA6/CF, PET-G und PP-GF, wobei die ABS-Proben mittels Freeformer gefertigt wurden.

- ABS: Das Ultraschalleinbetten führt hier zu einer Reduktion des maximalen Drehmoments um –33 % gegenüber dem Warmeinbetten. Dies deutet auf eine schwächere Anbindung zwischen Insert und Matrix hin, die möglicherweise durch ungleichmäßige Wärmeeinleitung oder lokale Schmelzdefekte verursacht wurde.
- ASA: Der Unterschied ist gering und liegt bei –3 %, was innerhalb der Streuung liegt. Beide Einbettmethoden zeigen vergleichbare Ergebnisse.

- PA6/CF: Auch bei diesem faserverstärkten Material fällt das Torsionsmoment beim Ultraschalleinbetten leicht geringer aus (−10 %). Die Differenz bleibt jedoch moderat und deutet eher auf zufällige Schwankungen als auf systematische Einflüsse hin.
- PET-G: Hier ergibt sich eine Abnahme um −11 %, was auf einen leichten Nachteil der Ultraschalleinbettung hinweist, ohne dass ein signifikanter Effekt vorliegt.
- PP-GF: Mit einer Reduktion von −7 % zeigt sich ebenfalls ein geringer Einfluss, der innerhalb des experimentellen Streubereichs liegt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse (*Abbildung 32*), dass die Einbettungsmethode nur einen geringen Einfluss auf die Torsionsfestigkeit der Probekörper ausübt. Anders als bei den Zugversuchen, bei denen lokale Unterschiede in der Anbindung teils zu messbaren Änderungen der maximalen Auszugkräfte führten, wirkt sich die Einbettmethode unter Torsionsbelastung nur schwach aus. Jedoch zeigt die Auswertung einen größeren Einfluss bei den ABS-Proben. Dies kann im direkten Zusammenhang mit dem Herstellungsprozess stehen, da diese mittels Freeformer gefertigt wurden. Die beobachteten Unterschiede bewegen sich größtenteils im Bereich der statistischen Streuung, was auch durch das Zielgrößenscreening bestätigt wird, in dem die Einbettungsmethode keine signifikante Relevanz ($P\text{-Wert} > 0,05$) zeigte. Ein möglicher Grund liegt in der Art der Belastung: Während bei Zugversuchen die Insert-Matrix-Grenzfläche direkt in axialer Richtung beansprucht wird, erfolgt die Belastung unter Torsion überwiegend über Schubspannungen, die großflächiger verteilt sind. Dadurch wirken lokale Unterschiede in der Einbettqualität weniger stark. Damit bestätigen die Ergebnisse die Erkenntnisse aus dem Zielgrößenscreening: Die Einbettungsmethode ist unter Torsionsbelastung kein entscheidender Parameter. Im Gegensatz zu den Zugversuchen, bei denen einzelne Materialien auf das Verfahren sensibler reagierten, zeigt sich hier ein weitgehend gleichbleibendes Verhalten unabhängig von der Einbettungsart.

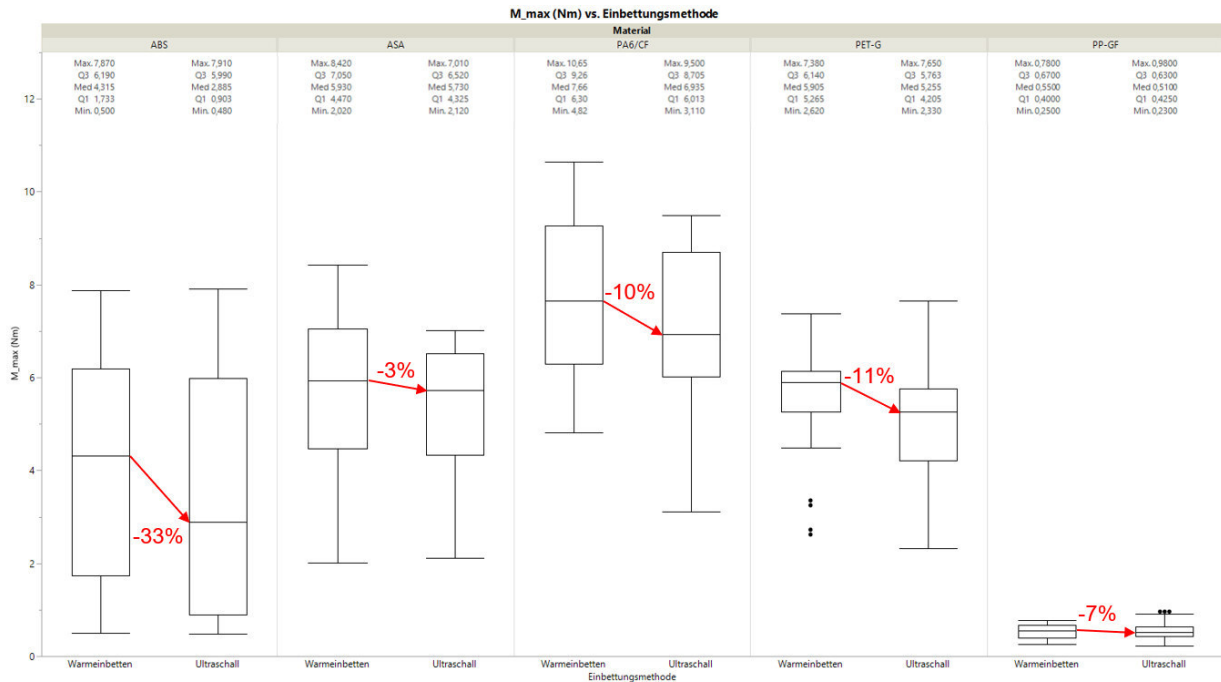


Abbildung 32: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode

Bauteilorientierung

Analog zu den zuvor betrachteten Zugversuchen wurde auch im Rahmen der Torsionsuntersuchungen der Einfluss der Bauteilorientierung (flach liegend vs. stehend) auf die maximale Torsionsfestigkeit analysiert. Durch die Orientierung ändert sich der Verlauf der gedruckten Schichten relativ zur Belastungsrichtung, was potenziell die Schubspannungsverteilung und somit das maximale übertragbare Drehmoment beeinflussen kann.

Abbildung 33 zeigt die gemessenen maximalen Drehmomente in Abhängigkeit der Bauteilorientierung für die untersuchten Materialien ABS, ASA, PA6/CF, PET-G und PP-GF, wobei die ABS-Proben mittels Freeformer gefertigt wurden.

- ABS: Eine Orientierung der Proben in stehender Position führt zu einer Reduktion des maximalen Drehmoments um -27% , was auf eine ungünstigere Schichtausrichtung und erhöhte Spannungskonzentration entlang der Schichtgrenzen hindeutet.
- ASA: Mit einem Unterschied von lediglich -1% zeigt ASA nahezu kein Orientierungseinfluss, was auf eine isotropere Materialstruktur und geringere Anisotropie schließen lässt.
- PA6/CF: Der faserverstärkte Werkstoff weist eine moderate Abnahme um -20% auf. Die Orientierung der Fasern in Relation zur Belastungsrichtung beeinflusst hier deutlich die Schubübertragung im Bauteil und durch die Fasern weniger Matrix vorhanden ist und deshalb die Schichthaftung tendenziell schlechter sein könnte.
- PET-G: PET-G konnte nicht ausgewertet werden, weil die Qualität der Probekörper unzureichend war und sich für die stehende Variante keine geometrisch konsistenten

Vorlöcher erzeugen ließen (siehe Bauteilorientierung in Arbeitspaket 3: Charakterisierung)

- PP-GF: Der glasfaserverstärkte Polypropylen-Typ zeigt ebenfalls eine geringe Reduktion von -11 %, ohne signifikante Auswirkung auf die Gesamtfestigkeit.

Im Gegensatz zu den Zugversuchen, bei denen die Orientierung der Drucklagen eine deutlichere Auswirkung auf die maximalen Auszugkräfte zeigte, ist der Einfluss auf die Torsionsfestigkeit insgesamt als gering einzustufen. Die beobachteten Abweichungen liegen größtenteils innerhalb des experimentellen Streubereichs. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Torsionsbelastung primär Schubspannungen über den gesamten Querschnitt erzeugt und nicht ausschließlich entlang der Schichtgrenzen wirkt. Dadurch werden Unterschiede in der Schichtausrichtung weniger stark wirksam. Lediglich bei ABS und PA6/CF zeigen sich erkennbare Orientierungseinflüsse, was auf deren anisotrope Struktur und die faserverstärkte Ausrichtung zurückzuführen ist. Bei den übrigen Materialien bleibt die Festigkeit weitgehend unabhängig von der Bauteilorientierung. Damit bestätigt sich, dass die Orientierung des Infillanteils im Vergleich zu Parametern wie Materialwahl oder Infillanteil eine untergeordnete Rolle bei der Bestimmung der Torsionsfestigkeit spielt.

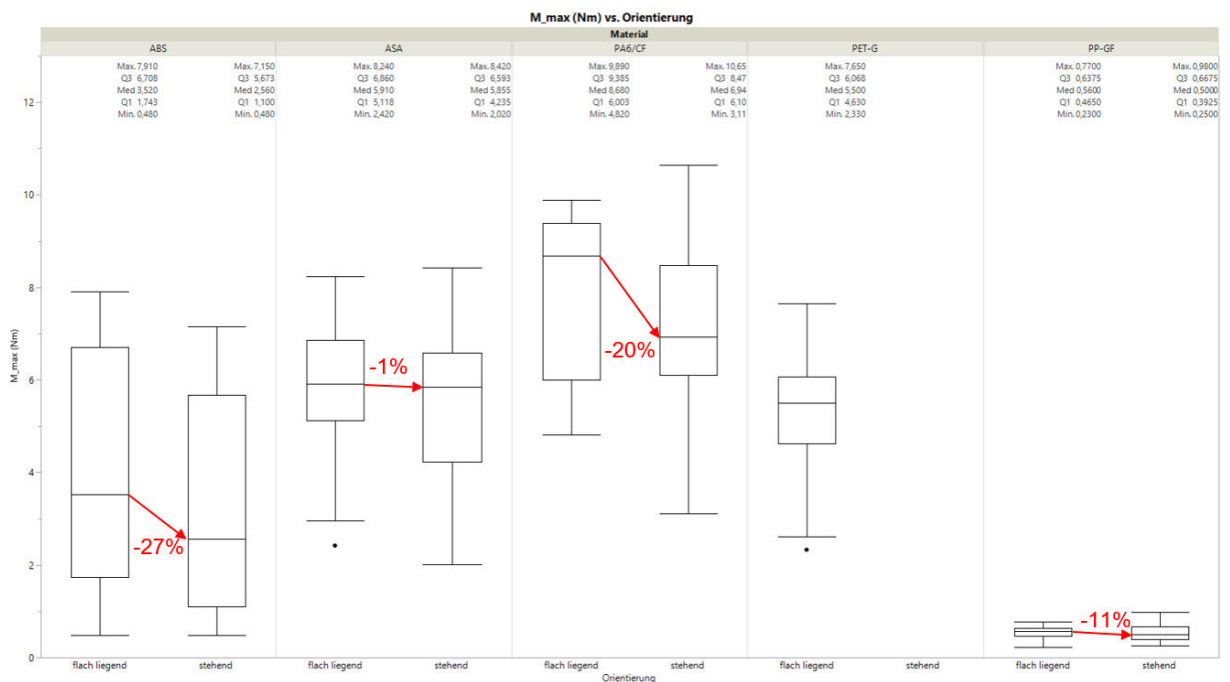


Abbildung 33: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Probekörperorientierung

Infillmuster

Abschließend wurde der Einfluss des Infillmusters auf die maximale Torsionsfestigkeit untersucht. Verglichen wurden dabei Proben mit 45°-Raster und Gyroid-Infill, um zu bewerten, inwieweit das innere Füllmuster die Schubübertragung im Probekörper beeinflusst. Da die Torsionsbeanspruchung vorwiegend durch Schubspannungen bestimmt wird, könnte die Geometrie des inneren Gitters eine Rolle für die Energieaufnahme und Rissinitiierung spielen.

Abbildung 33 zeigt die gemessenen maximalen Drehmomente in Abhängigkeit vom Infillmuster für die untersuchten Materialien ABS, ASA, PA6/CF, PET-G und PP-GF, wobei die ABS-Proben mittels Freeformer gefertigt wurden.

- ABS: Für ABS konnte kein Gyroid-Infill hergestellt werden, da dieses Muster vom verwendeten AKF-Slicer nicht unterstützt wurde.
- ASA: Der Unterschied zwischen 45°-Raster und Gyroid beträgt $\pm 0\%$, was auf ein vollständig vergleichbares Verhalten der beiden Strukturen hinweist.
- PA6/CF: Bei PA6/CF wurde eine geringe Reduktion um -4% beobachtet. Diese Differenz liegt im Bereich der Messstreuung und ist nicht signifikant.
- PET-G: Das Gyroid-Muster führt hier zu einer leicht niedrigeren Torsionsfestigkeit (-7%), was eventuell auf die komplexere Struktur und leicht veränderte Schichtverteilung zurückzuführen sein könnte.
- PP-GF: Auch hier zeigen sich keine signifikanten Unterschiede ($\pm 0\%$) zwischen den beiden Füllmustern.

Insgesamt zeigt sich, dass das Infillmuster einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Torsionsfestigkeit hat. Die Unterschiede zwischen 45°-Raster und Gyroid liegen bei allen untersuchten Materialien innerhalb der experimentellen Streuung. Dieser Befund deckt sich mit den Ergebnissen aus dem Zielgrößenscreening, bei dem der Parameter „Infillmuster“ mit einem hohen P-Wert (0,76) und geringer Effektgröße bewertet wurde. Die Torsionsbelastung verteilt sich über den gesamten Probenquerschnitt, wodurch lokale Strukturunterschiede im Inneren der Probe kaum ins Gewicht fallen. Während das Infillmuster bei Zugbelastung in einzelnen Fällen zu messbaren Unterschieden führte, ist der Effekt unter Torsion aufgrund der überwiegend schubbeanspruchten Volumenbereiche vernachlässigbar. Damit bestätigt sich, dass das Infillmuster unter Torsionsbelastung keinen entscheidenden Beitrag zur strukturellen Festigkeit leistet.

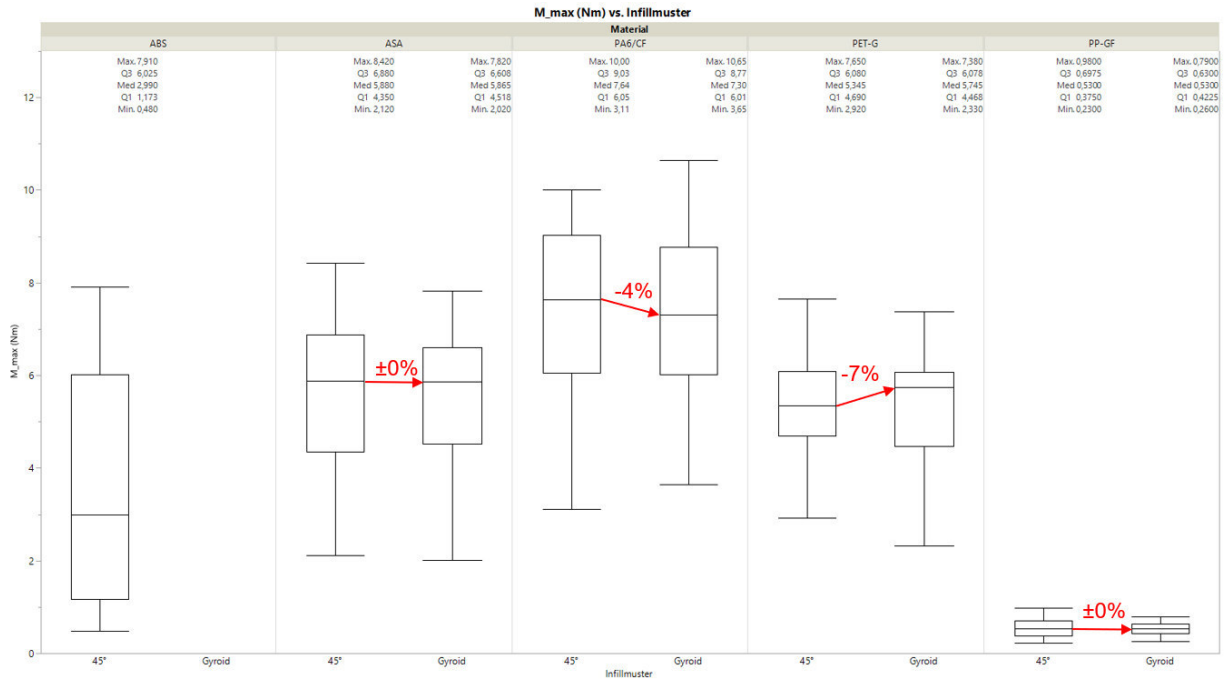


Abbildung 34: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich des Infillmusters

Im Rahmen der Torsionsversuche wurden die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die maximale Torsionsfestigkeit untersucht. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede in der Relevanz der einzelnen Faktoren. Das Material erwies sich als dominanter Einflussfaktor auf die Torsionsfestigkeit. Werkstoffe mit höherer Steifigkeit und Faserverstärkung (z. B. PA6/CF) erreichten die höchsten Drehmomentwerte, während amorphe Polymere geringere Werte zeigten. Der Infillanteil zeigte – analog zu den Zugversuchen – einen signifikanten Einfluss. Mit zunehmender Füllrate stieg das übertragbare Drehmoment kontinuierlich an, was auf die höhere Materialdichte und verbesserte Schubübertragung innerhalb der Struktur zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu hatten die Parameter Außenbahnen, Einbettungsmethode, Orientierung und Infillmuster nur einen geringen bis vernachlässigbaren Einfluss auf die Torsionsfestigkeit. Eine Erhöhung der Außenbahnen führte zu moderaten Verbesserungen, während sich die Einbettungsmethode und Orientierung lediglich in Einzelfällen leicht auswirkten. Unterschiede zwischen 45°-Raster und Gyroid-Infill lagen vollständig innerhalb der Messstreuung.

Insgesamt bestätigt sich damit das Ergebnis des Zielgrößenscreenings: Unter Torsionsbelastung bestimmen Material und Infillanteil maßgeblich die Festigkeit, während alle weiteren Prozessparameter nur einen untergeordneten oder statistisch nicht signifikanten Einfluss zeigen.

Arbeitspaket 3b: Struktur- und Schädigungsanalyse

Zur Qualitätsbewertung der Fügezonen erfolgte eine qualitative und mikroskopische Untersuchung der in AP2b hergestellten Verbindungsmuster mittels Schlifffbildanalyse und Computertomographie (CT). Ziel dieser Analysen war es, die Ausbildung der Hinterschnitte sowie die Füllung der Gewindestrukturen der Inserts mit dem umgebenden Kunststoffmaterial zu bewerten. Darüber hinaus stand die Detektion potenzieller Schädigungen im Fokus, insbesondere von Rissbildungen, Poren oder lokalen Materialablösungen im Bereich des Lochrands, die durch den Einbettprozess entstehen können. Neben der Bewertung mikroskopischer Merkmale wurden auch makroskopische Effekte untersucht, um Rückschlüsse auf das Gesamtverhalten der Fügezone unter mechanischer Belastung zu ziehen. Hierzu zählten insbesondere die Beobachtung von Materialverdrängungen, unvollständiger Hinterschnittfüllung sowie lokaler Überhitzungen infolge des Einbringprozesses. Diese Effekte können die Kraftübertragung zwischen Insert und Matrix signifikant beeinflussen und stehen häufig im Zusammenhang mit charakteristischen Versagensarten, wie z. B. dem Ausreißen des Inserts, Abscheren der Gewindegänge oder Rissinitiierung im Randbereich der Bohrung.

Abbildung 35 zeigt exemplarisch das typische Versagensverhalten der Zugproben aus ASA nach den mechanischen Prüfungen. Das beobachtete Schadensbild trat bei allen untersuchten Proben in gleichartiger Form auf und lässt auf eine charakteristische Versagensart des Werkstoffs und der Fügezone schließen. Das Versagen initiierte an der Oberseite des Prüfkörpers im Bereich des Insertkopfes und manifestierte sich durch eine ausgeprägte radiale Rissbildung, die sich ringförmig um das Insert ausbreitete. Diese Rissbildung deutet auf lokale Spannungsüberhöhungen infolge der Kraftübertragung zwischen Insert und Matrixmaterial hin. Im weiteren Verlauf kam es zu einer Ablösung der Außenbahnen vom Infillvolumen, was auf eine unzureichende Stranghaftung im Bereich der größten Zugspannungen schließen lässt. Das Schadensbild zeigt, dass das Versagen primär im Matrixmaterial und nicht im Insert oder in der Fügezone selbst auftritt. Dies weist darauf hin, dass die Verbindung zwischen Insert und Kunststoffmaterial mechanisch hinreichend tragfähig ist, während die Materialstruktur des 3D-gedruckten ASA die kritische Schwachstelle bildet. Die Kombination aus anisotropem Schichtaufbau und eingeschränkter interlaminaer Festigkeit führt zu einer spröden, schlagartigen Rissausbreitung, die typisch für ASA unter Zugbelastung ist.

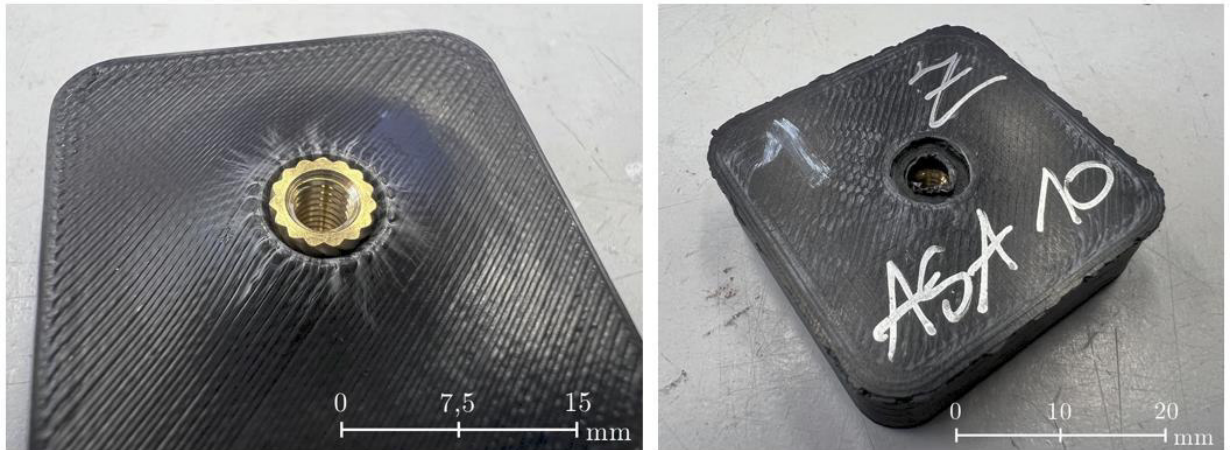


Abbildung 35: Darstellung der exemplarischen Versagensart für ASA-Probekörper nach der Zugprüfung mit Ansicht von oben (links) und unten (rechts)

Abbildung 36 zeigt zwei typische Versagensarten der untersuchten PETG-Zugproben in Abhängigkeit vom Infillanteil. Das linke Bild veranschaulicht das Versagen zwischen Insert und den Außenbahnen des Probekörpers (Versagensart 1), während das rechte Bild eine Ablösung zwischen den Außenbahnen und dem Infillvolumen (Versagensart 2) zeigt.

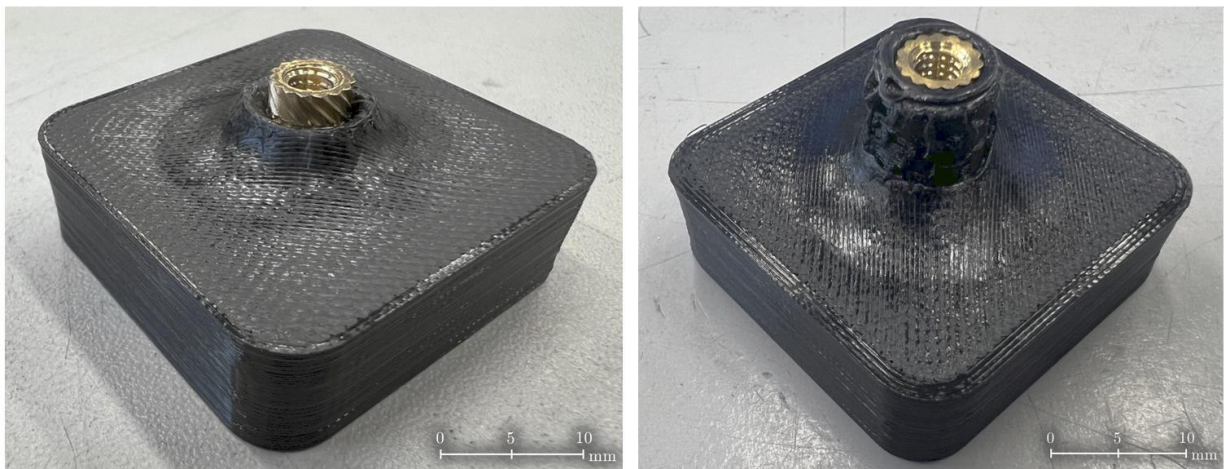


Abbildung 36: Darstellung der exemplarischen Versagensarten für PETG-Probekörper nach der Zugprüfung: Versagensart 1 (links) und 2 (rechts)

Die Versagensart 1 trat überwiegend bei Probekörpern mit einem Infillanteil von 20 % auf. In diesen Fällen erfolgte die Rissinitiierung an der Grenzfläche zwischen Insert und den angrenzenden Außenbahnen. Das deutet auf eine unzureichende Kraftübertragung vom Insert in das Infillvolumen hin, wodurch sich die äußeren Schichten unter Zugbelastung ablösen konnten. Die geringere innere Strukturunterstützung bei niedrigem Füllgrad begünstigt dieses Verhalten zusätzlich. Die Versagensart 2 hingegen wurde vorwiegend bei Probekörpern mit höheren Infillanteilen von 50 % und 90 % beobachtet. Hier blieb die Verbindung zwischen Insert und Außenbahnen weitgehend intakt, während es zu einer Ablösung zwischen den Außenbahnen und dem inneren

Füllvolumen kam. Dieses Schadensbild weist auf eine stärkere Kohäsion im Insertbereich, jedoch auf eine Schwächung der interlaminaren Verbindung zwischen Außen- und Infillstrukturen hin. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass der Infillanteil einen wesentlichen Einfluss auf die Lage der Versagenszone hat. Bei geringer innerer Dichte verlagert sich das Versagen an die Insert-Grenzfläche, während bei dichterer Struktur das interne Delaminieren zwischen den Druckschichten dominiert. Dies unterstreicht die Bedeutung einer optimierten Infill-Anbindung für die mechanische Leistungsfähigkeit der additiv gefertigten Verbundproben.

Abbildung 37 zeigt zwei charakteristische Versagensarten der Zugproben aus PP-GF. Die dargestellten Schadensbilder unterscheiden sich hinsichtlich der Lage der Versagenszone und treten mit unterschiedlicher Häufigkeit auf.

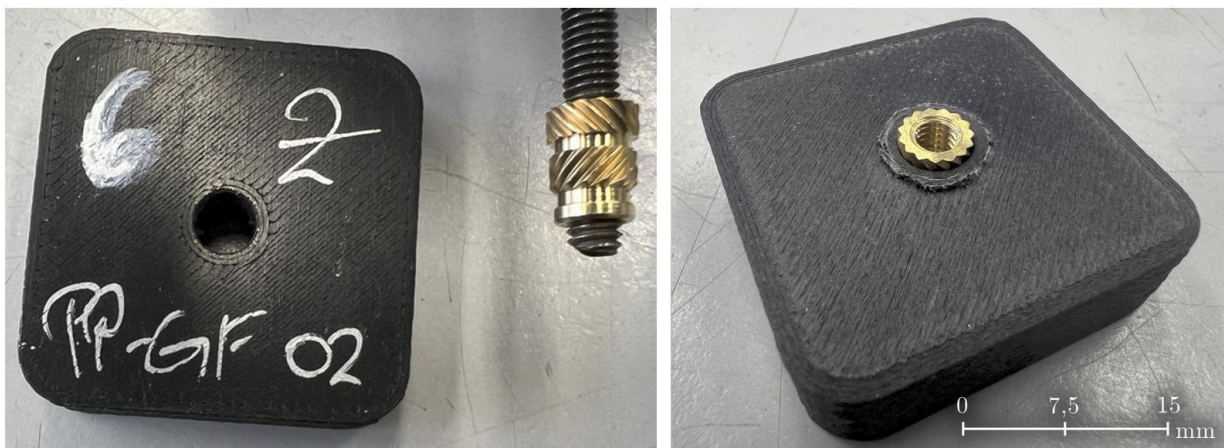


Abbildung 37: Darstellung der exemplarischen Versagensarten für PP/GF-Probekörper nach der Zugprüfung: Versagensart 1 (links) und 2 (rechts)

Das linke Bild zeigt den dominierenden Versagenstyp 1, der bei der Mehrzahl der untersuchten Probekörper beobachtet wurde. Das Versagen erfolgt hierbei zwischen dem Insert und den angrenzenden Außenbahnen. Diese Trennung weist auf eine unzureichende Kraftübertragung zwischen metallischem Insert und Kunststoffmatrix hin. Mögliche Ursachen sind lokale Haftungsdefizite infolge unvollständiger Hinterschnittfüllung oder geringe Faserbeteiligung in der unmittelbaren Kontaktzone, was sich auch in den computertomographischen Untersuchungen erkennen lässt (vgl. [Abbildung 43](#)). Der Rissverlauf folgt dabei typischerweise der Grenzfläche zwischen Insert und Matrixmaterial, was auf ein adhäsives Versagen hindeutet. Der seltener auftretende Versagenstyp 2 (rechtes Bild) zeigt dagegen eine Ablösung zwischen den Außenbahnen und dem inneren Infillvolumen. Diese Schadensform trat nur in Einzelfällen auf, hauptsächlich bei Probekörpern mit einem Infillanteil von 20 % und vier Außenbahnen. Hierbei bleibt die Verbindung zwischen Insert und den äußeren Schichten stabil, während sich die innere Struktur unter Last ablöst. Dieses Verhalten deutet auf ein kohäsives Versagen innerhalb des Matrixmaterials und

auf eine Schwächung der interlaminaren Bindung hin. Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Material PP-GF überwiegend durch Grenzflächenversagen im Bereich Insert–Matrix bricht, was die Bedeutung der lokalen Faserorientierung und Prozessbedingungen im Fügebereich unterstreicht.

Abbildung 38 zeigt das typische Versagensverhalten der Torsionsproben aller untersuchten Materialsysteme. In sämtlichen Fällen trat ein gleichartiges Versagen zwischen Insert und den angrenzenden Außenbahnen des FLM-Grundkörpers auf. Dabei versagte die Verbindung nicht innerhalb der Matrix oder im Infillbereich, sondern entlang der Grenzfläche zwischen metallischem Gewindeeinsatz und Kunststoffmatrix.



Abbildung 38: Darstellung der exemplarischen Versagensarten für Probekörper aller untersuchten Materialsysteme nach der Torsionsprüfung (links) und freigelegte Fügezone mit erkennbaren „überdrehten“ Hinterschnittbereichen (rechts)

Während der Torsionsbelastung kam es zu einer relativen Drehbewegung des Inserts, wodurch die ausgeprägten Hinterschnittstrukturen des Gewindeeinsatzes mechanisch aus dem umgebenden Kunststoff herausgeschnitten bzw. abgedreht wurden. Dieses Verhalten weist auf ein adhäsives Versagen hin, das durch lokale Schubüberlastung in der Kontaktzone verursacht wird. Der Lastpfad konzentriert sich dabei auf die oberen Hinterschnittbereiche, wo die maximale Schubspannung auftritt. Das Schadensbild zeigt, dass die Verbindungskraft primär durch Formschlussmechanismen bestimmt wird und dass unter torsionaler Beanspruchung die Haftung zwischen Insert und Matrix nicht ausreicht, um den auftretenden Drehmomenten standzuhalten. Eine signifikante Beteiligung des Infillvolumens oder der Schichthaftung konnte hingegen nicht beobachtet werden. Insgesamt lässt sich das Versagensverhalten als einheitlich insertdominiert beschreiben.

Um mögliche Streuungen aus den zuvor durchgeführten Charakterisierungsversuchen zu erklären, wurden zunächst Untersuchungen zur Geradheit des Vorlochs in den Probekörpern durchgeführt, in welches die Inserts im weiteren Prozess eingebracht werden. Eine exakte und gleichmäßige Ausrichtung des Vorlochs ist entscheidend, um eine reproduzierbare Einbettung sowie eine gleichmäßige Belastungsverteilung im Verbundbereich zu gewährleisten. *Abbildung 39* zeigt exemplarisch eine CT-Aufnahme eines PA6-Probekörpers ohne Insert. Der rot markierte Bereich wurde nachträglich eingefügt und verdeutlicht den untersuchten Abschnitt des Vorlochs. Die Darstellung zeigt, dass das Vorloch über die gesamte Tiefe hinweg geradlinig und symmetrisch verläuft, wodurch eine präzise und senkrechte Einbringung der Inserts ermöglicht wird. Somit kann ausgeschlossen werden, dass Abweichungen in den mechanischen Versuchsergebnissen auf geometrische Ungenauigkeiten der Vorlochgeometrie zurückzuführen sind.

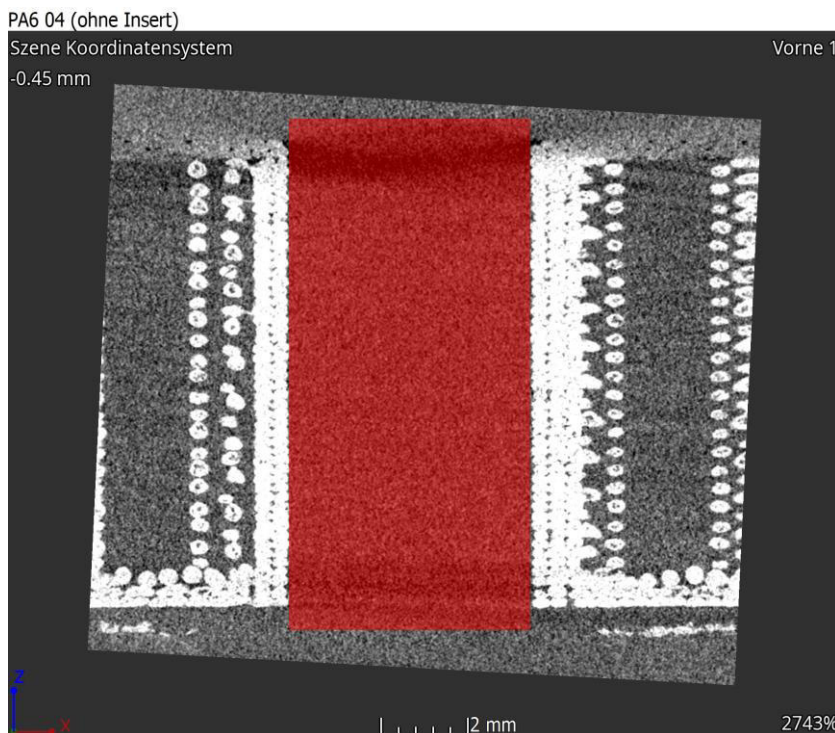


Abbildung 39: CT-Aufnahme zur Prüfung der Geradheit des Vorlochs und eingepasster Prüffläche (rot)

Anschließend wurden die verschiedenen Probekörpervarianten mittels Computertomographie (CT) untersucht. Beispielhaft sind in *Abbildung 43 – 46* die CT-Aufnahmen der Materialien PETG, ASA, PA6 und PPGF dargestellt. Die Aufnahmen dienen dem Vergleich der beiden Einbettungsmethoden sowie der Analyse ihres Einflusses auf die Ausbildung der Hinterschnitte. Ziel dieser Untersuchungen war es, zu bewerten, welches Einbettverfahren sich besonders gut für das Einbringen der Inserts eignet und bei welchen Verfahren potenzielle prozessbedingte Einschränkungen oder Fehlstellen auftreten können.

Abbildung 40 zeigt exemplarisch die CT-Aufnahmen der PETG-Probekörper mit vier Außenbahnen, einem Füllgrad von 90 % und einem Füllmuster von 45°. Links ist ein Probekörper dargestellt, der mittels Wärmeinbettung, rechts einer, der mittels Ultraschalleinbettung hergestellt wurde. In beiden Fällen sind die Hinterschnitte klar und gleichmäßig ausgebildet, was auf eine stabile Prozessführung und eine gute Reproduzierbarkeit der Einbettung hinweist. Zwischen den beiden Verfahren sind keine signifikanten Unterschiede in der Form oder Ausprägung der Fügezone zu erkennen. Die Wärmeeinflusszone erstreckt sich lediglich geringfügig in die äußeren Schichten, bleibt jedoch auf den unmittelbaren Kontaktbereich um das Insert begrenzt. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sowohl beim Wärme- als auch beim Ultraschalleinbetten eine saubere Einformung des Inserts in das PETG-Material erzielt werden konnte, ohne dass strukturelle Beeinträchtigungen oder übermäßige thermische Schädigungen der Außenbahnen auftraten. Damit bestätigen die Aufnahmen eine hohe Prozessqualität und Materialintegrität für beide Einbettungsmethoden unter den gewählten Prozessparametern.

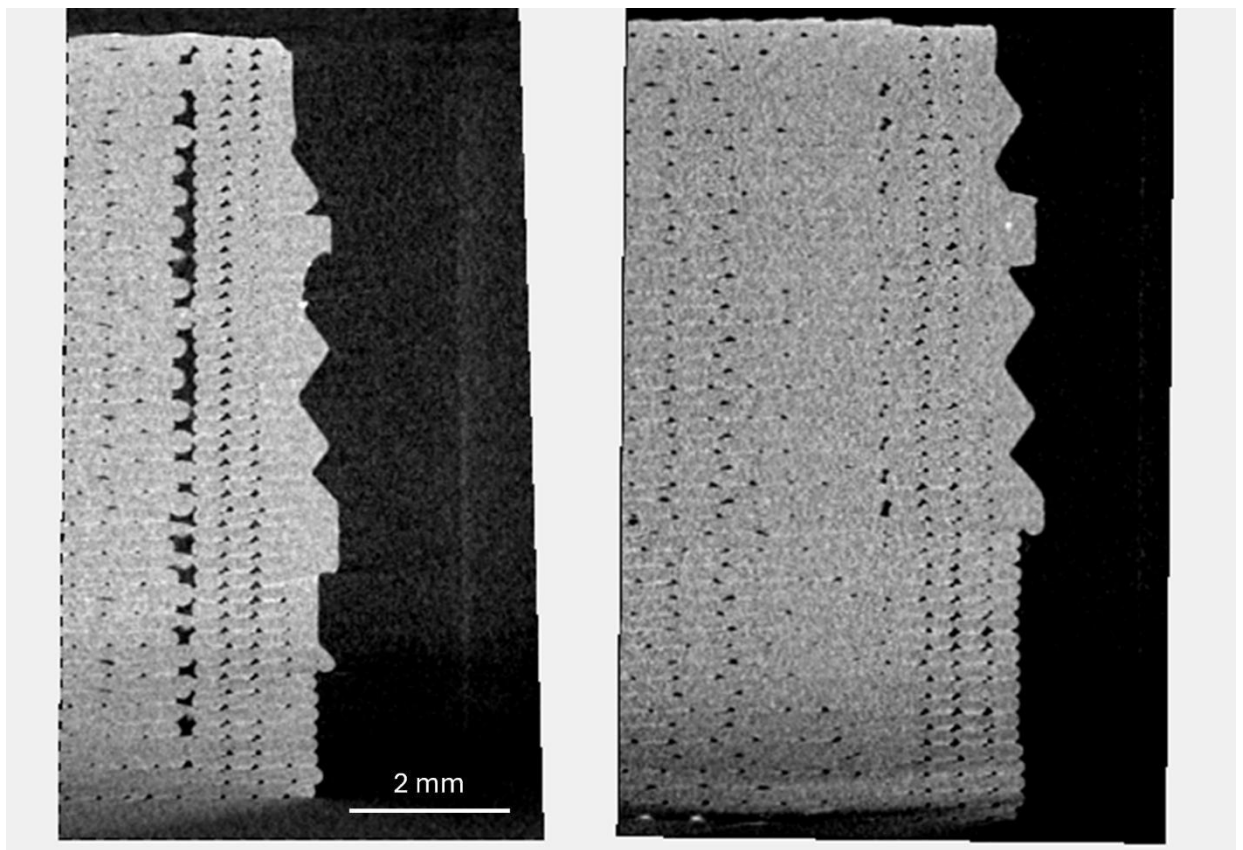


Abbildung 40: CT-Aufnahmen von PETG-Probekörpern (4 Außenbahnen, 90 % Füllgrad und 45°-Füllmuster) hergestellt mittels Wärmeinbetten (links) und Ultraschalleinbetten (rechts) nach dem Herauslösen der Inserts

Abbildung 41 zeigt die CT-Aufnahmen der ASA-Probekörper mit zwei Außenbahnen, einem Füllgrad von 90 % und einem Gyroid-Füllmuster. Links ist ein Probekörper nach Wärmeinbettung, rechts nach Ultraschalleinbettung dargestellt.

Zwischen den beiden Einbettungsverfahren sind keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Struktur oder der Ausprägung der Hinterschnitte erkennbar. Die Wärmeeinflusszone erstreckt sich lediglich geringfügig in die äußeren Schichten, ohne die innere Infill-Struktur sichtbar zu beeinflussen. Sowohl die Hinterschnittausbildung als auch die Materialhomogenität sind in beiden Fällen gut ausgeprägt, was auf eine stabile Prozessführung und eine ausreichende thermische Kontrolle beim Einbettvorgang hinweist.

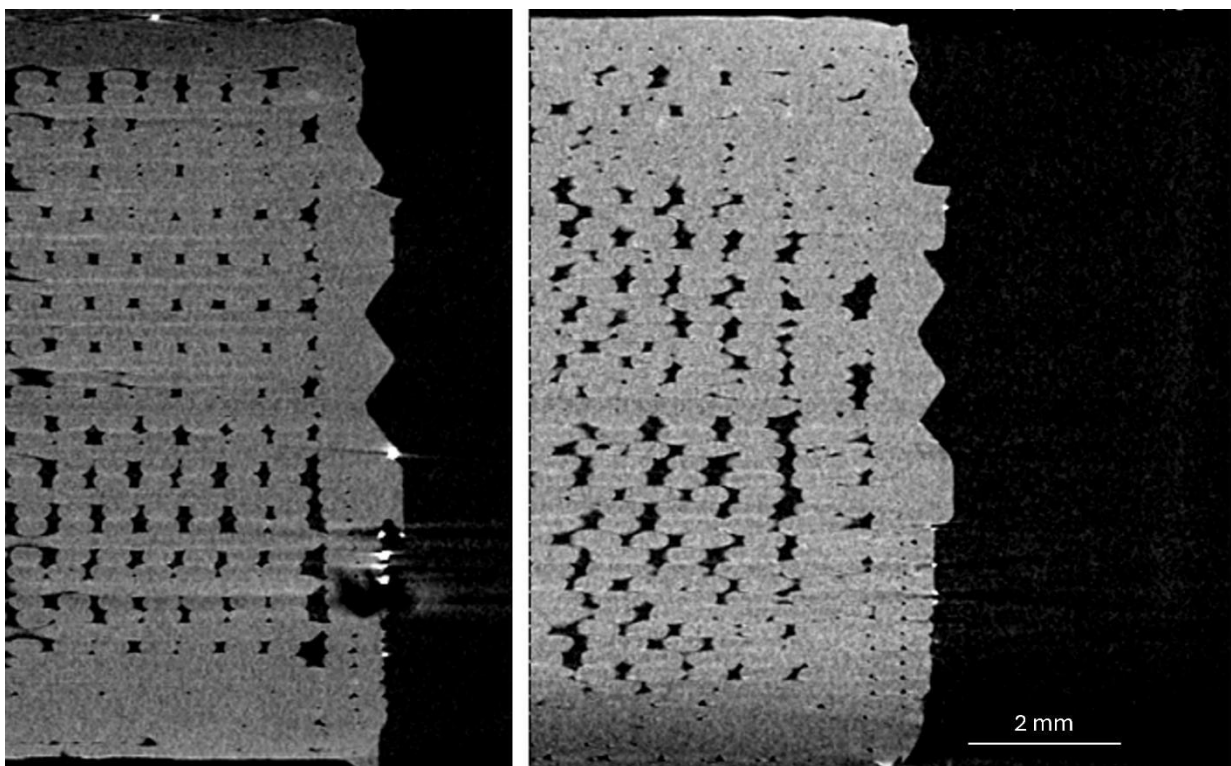


Abbildung 41: CT-Aufnahmen von ASA-Probekörpern (2 Außenbahnen, 90 % Füllgrad und Gyroid-Füllmuster) hergestellt mittels Wärmeinbetten (links) und Ultraschalleinbetten (rechts) nach dem Herauslösen der Inserts

Abbildung 42 zeigt die CT-Aufnahmen der PA6-Probekörper mit zwei Außenbahnen, einem Füllgrad von 20 % und einem 45°-Füllmuster. In den Aufnahmen sind prozessbedingte Poren erkennbar, die auf den additiven Fertigungsprozess zurückzuführen sind. Diese treten in ähnlicher Ausprägung auch bei den anderen untersuchten Materialien auf. Zwischen Wärme- und Ultraschalleinbettung sind keine deutlichen Unterschiede in der Ausbildung der Hinterschnitte oder der Fügezone festzustellen. Die Wärmeeinflusszone bleibt auf den unmittelbaren Bereich um das Insert beschränkt und dringt nur geringfügig in die Außenbahnen ein. Auffällig ist, dass sich Poren teilweise im Bereich der Fügezone ansammeln. Beim Ultraschalleinbetten scheinen sich

diese Poren bevorzugt im oberen Insertbereich zu konzentrieren (im Bild unten dargestellt), was auf eine lokale Umverteilung der Lufteinschlüsse durch die US-Schwingungen hindeuten könnte. Insgesamt zeigt sich jedoch eine gute Ausbildung der Hinterschnitte und eine homogene Einförmung des Inserts in das Matrixmaterial.

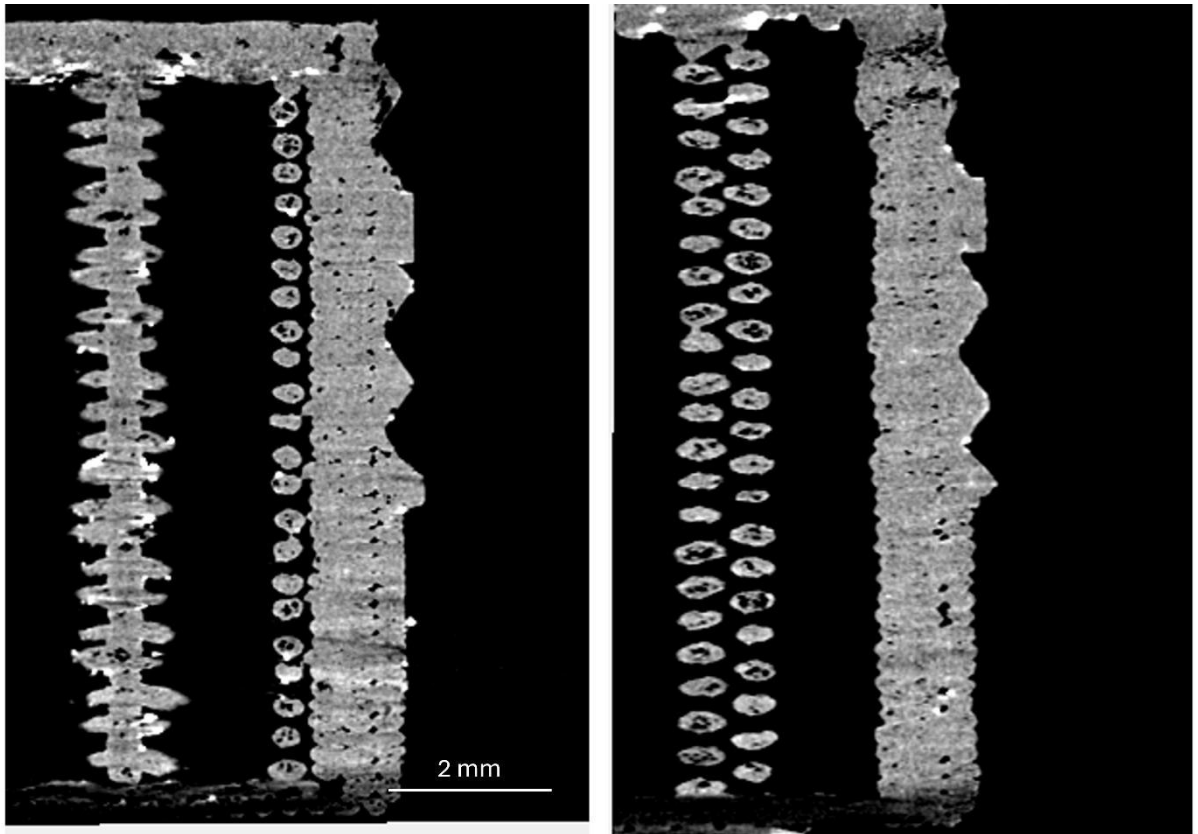


Abbildung 42: CT-Aufnahmen von PA6-Probekörpern (2 Außenbahnen, 20 % Füllgrad und 45°-Füllmuster) hergestellt mittels Warmeinbetten (links) und Ultraschalleinbetten (rechts) nach dem Herauslösen der Inserts

Abbildung 43 zeigt die CT-Aufnahmen der PP/GF-Probekörper mit vier Außenbahnen, einem Füllgrad von 50 % und einem Gyroid-Infillmuster. Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Materialien sind hier deutliche Unterschiede zwischen den Einbettungsverfahren erkennbar.

Beim Ultraschalleinbetten lässt sich eine Umverteilung der Glasfasern erkennen, die vermutlich durch die mechanischen Schwingungen während des Prozesses verursacht wurde. Dabei zeigen die Glasfasern im Kontaktbereich zum Insert eher eine Ausrichtung in Einbringrichtung des Inserts. Zudem kommt es zu einer Umverteilung über mehrere Schichten hinweg. Diese Umverteilung führt zu lokalen Inhomogenitäten im Verbundbereich und einer reduzierten Ausbildung der Hinterschnitte, da sich die Fasern nicht mit dem Matrixmaterial vertikal verteilen. Beim Warmeinbetten hingegen bleiben die Fasern größtenteils innerhalb der Schichten, wobei auch hier keine optimale Ausprägung der Hinterschnitte erkennbar ist.

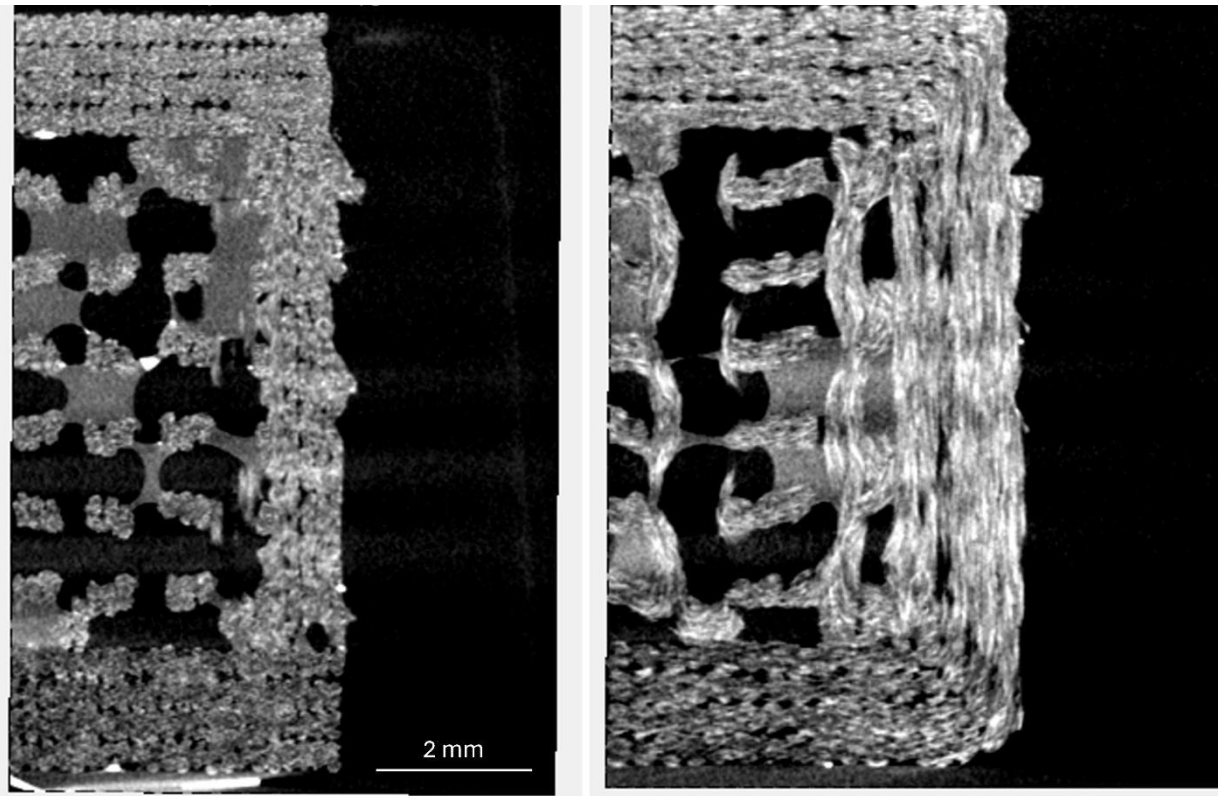


Abbildung 43: CT-Aufnahmen von PP/GF-Probekörpern (4 Außenbahnen, 50 % Füllgrad und Gyroid-Füllmuster) hergestellt mittels Wärmeinbetten (links) und Ultraschalleinbetten (rechts) nach dem Herauslösen der Inserts

Im Vergleich dazu zeigt der mittels Wärmeinbettung hergestellte Probekörper eine gleichmäßigere Fügezone mit klarer Kontur der Hinterschnitte. Die beobachteten Unterschiede korrelieren mit den Ergebnissen der mechanischen Untersuchungen, bei denen die PPGF-Probekörper nach Ultraschalleinbettung geringere Zug- und Torsionsfestigkeiten aufwiesen. Dies deutet auf eine prozessbedingte Beeinträchtigung der Fügequalität durch den Einfluss der Ultraschallschwingungen hin.

Der Vergleich der CT-Aufnahmen der untersuchten Materialien PETG, ASA, PA6 und PP/GF zeigt, dass sich die Einbettungsmethoden Wärmeinbetten und Ultraschalleinbetten hinsichtlich der Geometrieausbildung der Fügezone und der Hinterschnittform überwiegend ähnlich verhalten. Bei PETG, ASA und PA6 sind die Hinterschnitte in beiden Verfahren gleichmäßig ausgebildet, und die Wärmeeinflusszone bleibt auf den unmittelbaren Kontaktbereich um das Insert begrenzt. Eine Beeinträchtigung der Außenbahnen oder der Infill-Struktur konnte nicht festgestellt werden. Lediglich bei PPGF zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren. Hier führt das Ultraschalleinbetten zu einer lokalen Umverteilung der Glasfasern sowie zu einer unvollständigen Ausbildung der Hinterschnitte. Diese Beobachtungen korrespondieren mit den reduzierten Festigkeitswerten aus den mechanischen Versuchen und deuten auf eine prozessbedingte Beeinträchtigung der Fügequalität hin.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass beide Einbettungsverfahren bei den untersuchten thermoplastischen Materialien eine ausreichende geometrische Integrität und gute Formtreue der Fügezone gewährleisten. Für faserverstärkte Werkstoffe wie PP-GF sollte der Einsatz des Ultraschalleinbettens jedoch kritisch bewertet werden, da die Prozessschwingungen die Faserorientierung und damit die lokale Festigkeit negativ beeinflussen können.

Beobachtete Fehlstellen

Bei der Fertigung der Probekörper konnten verschiedene Fehlstellen beobachtet werden, *Abbildung 44*. Beim Einbringen der Inserts in die PA12-Probekörper trat ein Materialverlust in der Fügezone auf, verursacht durch den Auswurf einer Art Kragen an der Einbringstelle. Dies ist insofern ungünstig, als das dieses Material in der Fügezone nicht mehr zur Verfügung steht und somit die lokale Verbindung beeinträchtigt.



Abbildung 44: Darstellung des Fehlerbildes eines ausgeworfenen Materialzylinders nach der Ultraschalleinbettung an SLS-Probekörpern aus PA12

Darüber hinaus zeigen CT-Aufnahmen verfahrensbedingte Lufteinschlüsse im PA12-Material, insbesondere im Bereich der Hinterschnitte der Inserts. Sowohl beim Warmeinbetten als auch beim Ultraschalleinbetten konnten größere Lufteinschlüsse identifiziert werden, die potenziell zu einer Schwächung des Verbunds führen können, *Abbildung 45*. Aufgrund dieser Lufteinschlüsse kann es zu den bereits beschriebenen Materialverlusten geführt haben, da das sonst beim Einbringen des Inserts radial verdrängte Material aufgrund der Poren nicht ausreichend Verbindung zum Probekörper hatte. Ein weiterer kritischer Punkt war das dadurch bedingte Verrutschen der Inserts während des Einbettprozesses, da das Material durch die Poren nicht ausreichend Stützwirkung geboten hat, wodurch zahlreiche Probekörper nicht für die Auswertung herangezogen werden konnten und nachgefertigt werden mussten.

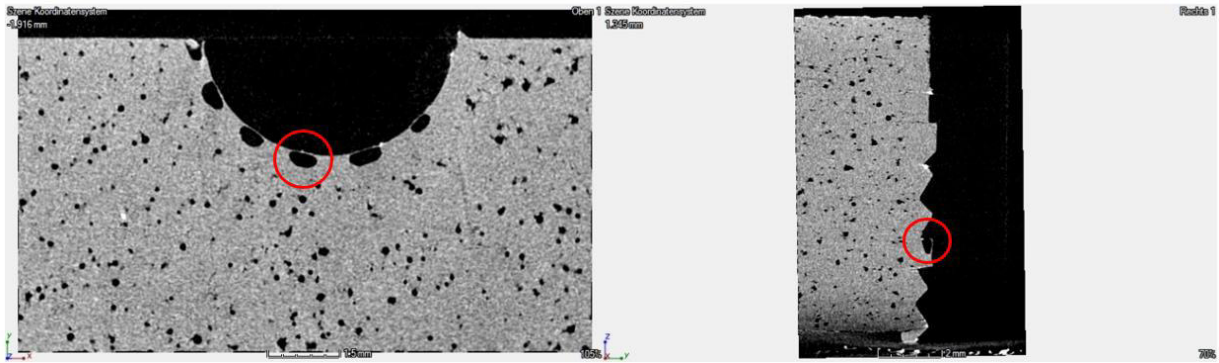


Abbildung 45: CT-Aufnahme von SLS-Probekörpern aus PA12 mit Lufteinschlüssen im gesamten Probekörper verteilt sowie im Bereich der Fügezone zwischen Insert und Probekörper (rot)

Zusätzlich zu den Untersuchungen an geprüften Probekörpern wurden in-situ CT-Untersuchungen durchgeführt, um das Verformungs- und Versagensverhalten innerhalb der Probekörper zu beobachten. Hierbei wurden CT-Scans während der quasistatischen Zugprüfung des Probekörpers durchgeführt.



Abbildung 46: In-situ CT-Prüfkomplex FCTS 160-IS mit einer maximalen Auflösung von $10\ \mu\text{m}$

Um bei den In-situ-CT-Untersuchungen (Abbildung 46) der Multi-Material-Strukturen mit deutlich unterschiedlichen Werkstoffdichten eine Artefaktbildung zu vermeiden, wurden alternative Insertmaterialien aus Aluminium untersucht. Diese Versuche erwiesen sich jedoch als nicht zielführend. Aufgrund der abweichenden Wärmeleitfähigkeit und Oberflächenbeschaffenheit war der Kraftaufwand beim Warmeinbetten deutlich höher, sodass der UR10-Roboter seine maximalen Kraftgrenzen erreichte und die Inserts nicht vollständig eingebracht werden konnten. Ein vollständiges Einformen war lediglich mittels Ultraschalleinbetten möglich, wofür neue Prozessparameter definiert wurden.

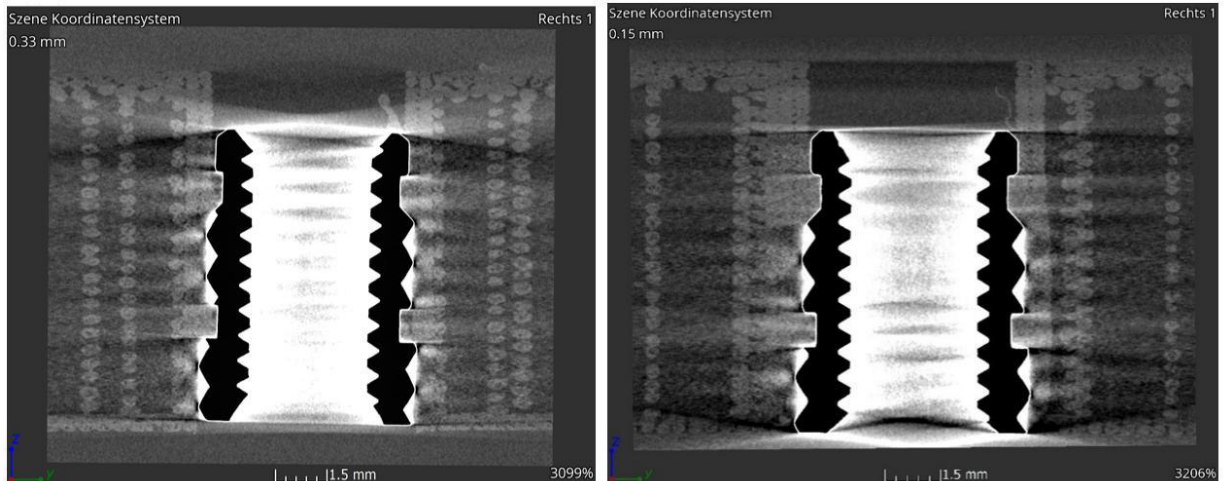


Abbildung 47: Darstellung der Insitu-CT-Aufnahmen von Aluminiuminserts eingebettet mittels Ultraschall in PA6-Probekörpern mit einem Infillanteil von 50 % (links) und 20 % (rechts), wobei sich die Oberseite des Inserts aufnahmebedingt im Bild unten befindet

Die Aufnahmen der auf diese Weise hergestellten Probekörper zeigten jedoch, dass die Verwendung von Aluminiuminserts die Artefaktbildung nicht vollständig verhindern konnte. Insbesondere in den Bereichen der Hinterschnitte traten weiterhin Artefakte auf, wodurch eine Bewertung der Materialverdrängung sowie eine Analyse potenzieller Rissentstehungen nicht möglich war. Weitere Untersuchungen sind daher erforderlich, insbesondere im Hinblick auf die Verwendung alternativer Insertmaterialien, *Abbildung 47*.

Arbeitspaket 4: Evaluierung und Optimierung

Arbeitspaket 4a: Vergleichsuntersuchungen Granulatdruck und Spritzgießen

Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften wurden Vergleichsuntersuchungen an additiv gefertigten AKF-Probekörpern aus ABS durchgeführt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Auswertung in das Kapitel 1.3 integriert. In Rücksprache mit dem PbA wurde zudem das selektive Lasersintern als Herstellungsverfahren für Probekörper aufgrund von Praxisrelevanz der Industrie herangezogen.

Vergleichsuntersuchung SLS (PA12)

Die lasergesinterten Proben wurden aus PA 12 (50% Neupulver und 50% Altpulver) auf einer P110 der Firma EOS hergestellt. Dabei wurden die Einbettungsmethode sowie die Druckrichtung als variable Parameter betrachtet, um deren Einfluss auf das Verbund- und Festigkeitsverhalten systematisch mittels Zug- und Torsionsversuchen zu analysieren. Dabei dienten die Messgrößen der maximalen Auszugskraft sowie des maximalen Torsionsmoments zur quantitativen Beurteilung der Fügequalität und Verbundfestigkeit zwischen Insert und Matrixmaterial.

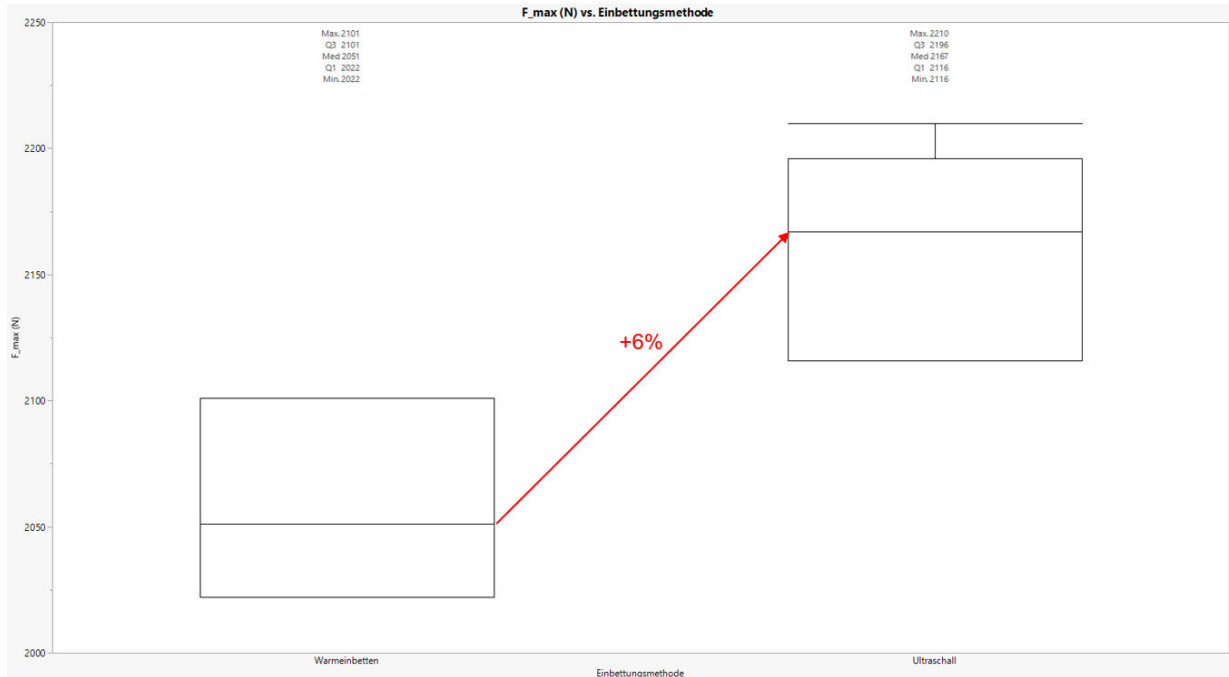


Abbildung 48: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode

In *Abbildung 48* sind die maximalen Auszugkräfte für beide Einbettungsmethoden dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die mittels Ultraschall eingebetteten Inserts im Mittel höhere maximale Kräfte aufweisen. Der Medianwert steigt von etwa 2050 N beim Warmeinbetten auf rund 2170 N beim Ultraschalleinbetten, was einer Erhöhung um etwa 6 % entspricht. Die insgesamt höheren Auszugkraft-Werte deuten auf eine verbesserte Kraftübertragung und Adhäsion zwischen Insert und Matrix hin, was auf die kombinierte Wirkung von mechanischer Schwingung und lokaler Wärmeentwicklung beim Ultraschalleinbetten zurückgeführt werden kann.

In *Abbildung 49* sind die maximalen Torsionsmomente der Inserts im Probekörper dargestellt. Auch hier zeigt sich ein Vorteil des Ultraschalleinbettens: Der Medianwert steigt von 5,81 Nm beim Warmeinbetten auf 6,08 Nm beim Ultraschalleinbetten, was einer Zunahme von etwa 5 % entspricht.

Die Messwertstreuung ist bei der Ultraschallmethode geringer, was auf eine höhere Prozessstabilität schließen lässt. Der beobachtete Anstieg des maximalen Torsionsmoments deutet darauf hin, dass durch das Ultraschalleinbetten eine festere und homogenere Verbindung zwischen Insert und umgebendem Material entsteht. Diese verbesserte Anbindung erhöht die Widerstandsfähigkeit gegenüber torsionalen Belastungen und spricht für eine insgesamt höhere Verbundqualität.

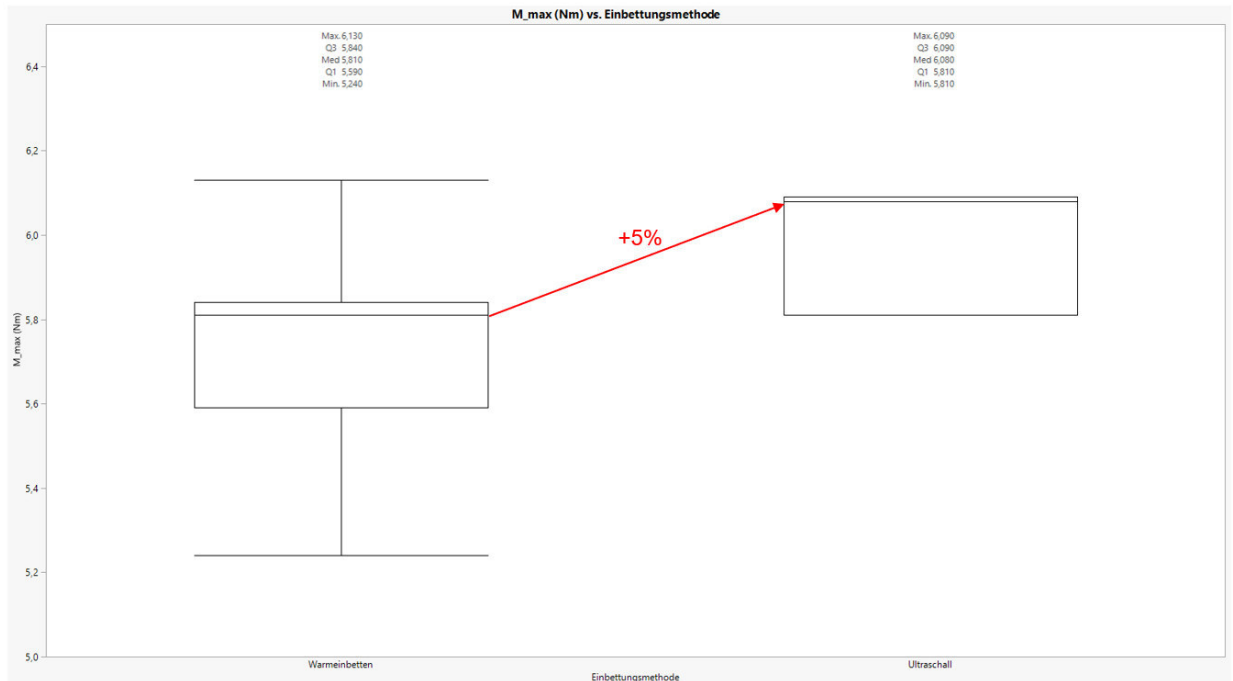


Abbildung 49: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode

Sowohl die Zug- als auch die Torsionsversuche zeigen konsistent, dass das Ultraschalleinbetten gegenüber dem Wärmeinbetten leichte mechanische Vorteile bietet. Die Kombination aus lokaler Erwärmung und mechanischer Schwingung führt zu einer verbesserten Fügequalität, was sich in höheren Kraft- und Momentenwerten sowie einer stabileren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse widerspiegelt. Damit stellt das Ultraschalleinbetten eine vielversprechende Methode zur Herstellung leistungsfähiger Multi-Material-Verbindungen dar, insbesondere vor dem Hintergrund der Automatisierbarkeit.

Zur Untersuchung des Einflusses der Bauteilorientierung auf die mechanische Leistungsfähigkeit der Inserts wurden sowohl Torsions- als auch Zugversuche an Probekörpern aus PA12 mit M4-Inserts durchgeführt. Dabei wurden zwei Orientierungen verglichen: flach liegend und stehend gedruckte Probekörper. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in [Abbildung 50](#) dargestellt. Hier zeigt sich ein entgegengesetzter Trend: Der Medianwert der maximalen Auszugskraft sinkt von etwa 2170 N bei flach liegender Orientierung auf rund 2130 N bei stehender Orientierung, was einer Abnahme von etwa 2 % entspricht. Die größere Streuung der Werte bei der flach liegenden Orientierung deutet auf eine höhere Varianz in der Haftung oder in der Materialhomogenität hin. Insgesamt ist der beobachtete Einfluss der Orientierung jedoch gering.

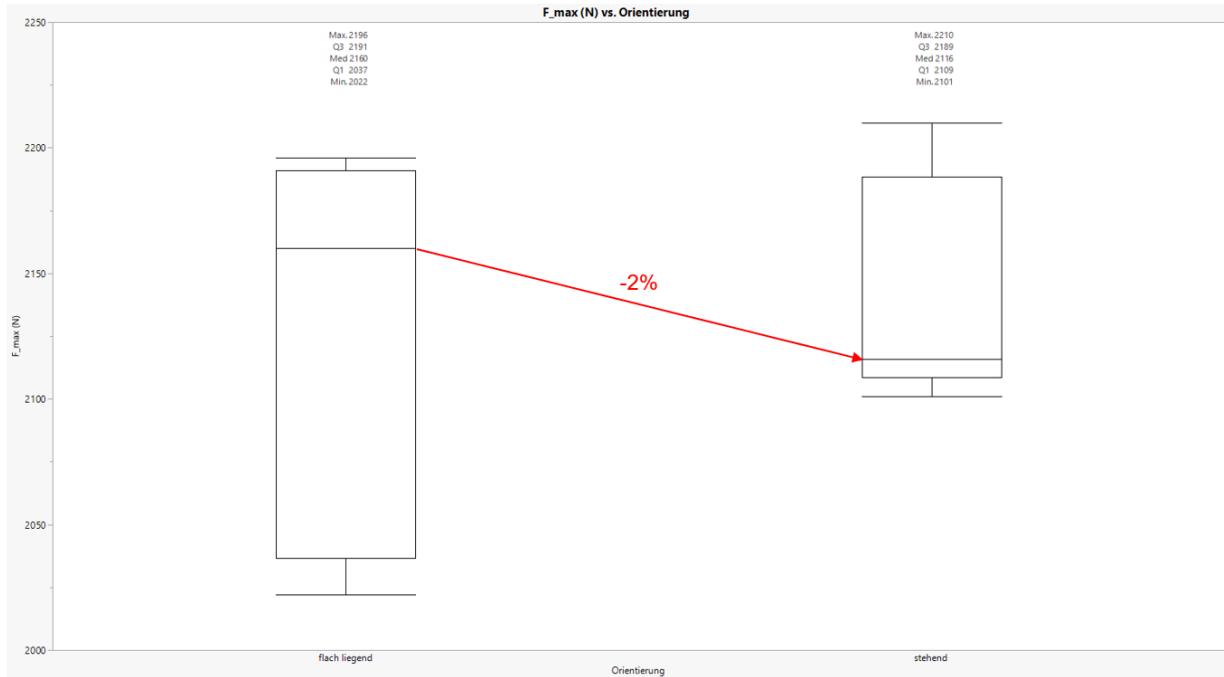


Abbildung 50: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Probekörperorientierung

In *Abbildung 51* sind die maximalen Torsionsmomente für beide Orientierungen dargestellt. Es zeigt sich lediglich ein geringer Unterschied zwischen den beiden Varianten: Der Medianwert steigt von etwa 5,83 Nm bei flach liegender Orientierung auf rund 5,89 Nm bei stehender Orientierung, was einer Erhöhung von etwa 1 % entspricht. Die Messwerte beider Orientierungen liegen innerhalb vergleichbarer Streubereiche (ca. 5,2–6,2 Nm), was darauf hindeutet, dass die Bauteilorientierung nur einen geringen Einfluss auf das Torsionsverhalten der Inserts hat.

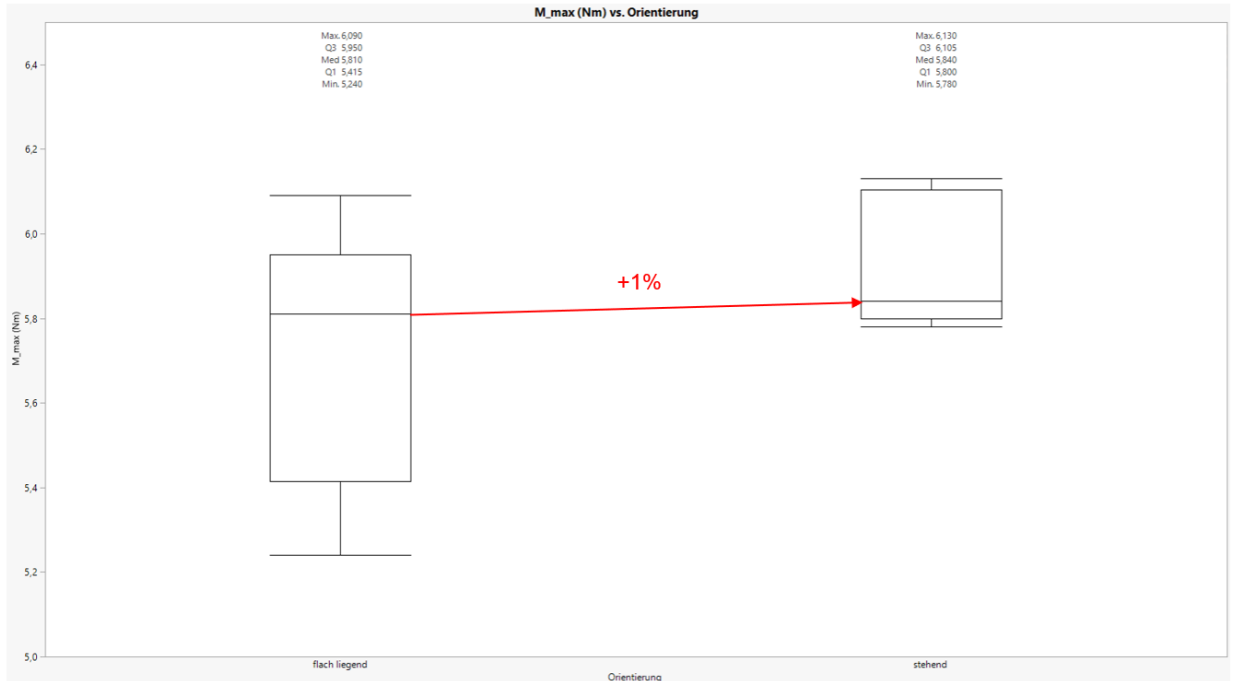


Abbildung 51: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Probekörperorientierung

Sowohl die Torsions- als auch die Zugversuche zeigen, dass die Bauteilorientierung im additiven Fertigungsprozess von PA12 nur einen geringen Einfluss auf die mechanische Performance der eingebetteten Inserts hat. Während unter Torsionsbelastung eine minimale Verbesserung bei stehender Orientierung festgestellt werden konnte, zeigen die Zugversuche eine leichte Reduktion der maximalen Kräfte. Die Unterschiede liegen jedoch im Bereich der Messunsicherheit, sodass von einer insgesamt orientierungsunabhängigen Verbundfestigkeit ausgegangen werden kann.

Faktor	P-Wert	Effektgröße	r	r ²	
Methode der Einbettung	3,6 * 10 ⁻³	0,66	0,82	0,68	Zug
Orientierung	0,66	0,13	0,16	0,03	
Faktor	P-Wert	Effektgröße	r	r ²	
Methode der Einbettung	0,19	0,43	0,46	0,21	Torsion
Orientierung	0,20	0,44	0,44	0,20	

P-Wert-Grenze = 0,05

Abbildung 52: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Zug- und Torsionsversuche an PA12-Probekörpern hergestellt im SLS-Verfahren

Zur quantitativen Bewertung des Einflusses der Einbettungsmethode und der Bauteilorientierung auf die mechanischen Eigenschaften wurden die Versuchsdaten einer Varianzanalyse (ANOVA) unterzogen. In *Abbildung 52* sind die zugehörigen P-Werte, Effektgrößen und Korrelationskoeffizienten für die Zug- und Torsionsversuche zusammengefasst. Als Signifikanzgrenze wurde ein P-Wert von 0,05 festgelegt.

Für die Zugversuche zeigt sich ein signifikanter Einfluss der Einbettungsmethode auf die maximale Kraft ($P = 3,6 \times 10^{-3} < 0,05$). Die berechnete Effektgröße von 0,66 sowie der hohe Korrelationskoeffizient $r = 0,82$ bestätigen einen starken Zusammenhang zwischen der Einbettungsmethode und der erzielten Zugfestigkeit. Das zugehörige Bestimmtheitsmaß $r^2=0,68$ verdeutlicht, dass etwa 68 % der Varianz in den Messergebnissen durch die Wahl der Einbettungsmethode erklärbar sind. Dagegen weist die Bauteilorientierung mit einem P-Wert von 0,66 keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis auf. Dies bestätigt die zuvor beobachteten geringen Unterschiede in den Boxplots der Zugversuche, bei denen lediglich eine minimale Abweichung von etwa 2 % zwischen den Orientierungen festgestellt wurde.

Für die Torsionsversuche zeigen weder die Einbettungsmethode ($P = 0,19$) noch die Orientierung ($P = 0,20$) einen signifikanten Einfluss auf das maximale Torsionsmoment. Die Effektgrößen liegen mit 0,43 bzw. 0,44 im mittleren Bereich, und die Bestimmtheitsmaße von rund 0,2 deuten darauf hin, dass nur etwa 20 % der Varianz durch diese Faktoren erklärbar sind. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den experimentellen Beobachtungen, wonach die Unterschiede der Mittelwerte (ca. +1 % bei stehender Orientierung und +5 % beim Ultraschalleinbetten) zwar vorhanden, aber statistisch nicht signifikant sind.

Die statistische Auswertung bestätigt, dass die Einbettungsmethode einen signifikanten und deutlichen Einfluss auf die Zugfestigkeit, jedoch keinen signifikanten Einfluss auf das Torsionsverhalten hat. Die Bauteilorientierung wirkt sich auf beide mechanischen Kenngrößen nicht signifikant aus. Damit unterstreichen die Ergebnisse die Relevanz der Ultraschalleinbettung als zentralen Prozessparameter zur Verbesserung der mechanischen Leistungsfähigkeit, während die Orientierung des additiv gefertigten Grundmaterials für die hier untersuchten Geometrien von untergeordneter Bedeutung ist.

Zur Validierung der zuvor beschriebenen Ergebnisse wurde die Untersuchung der Einbettungsmethoden zusätzlich mit einer größeren Insertgröße (M6) durchgeführt. *Abbildung 53* zeigt beispielhaft die maximalen Zugkräfte für beide Verfahren – Warmeinbetten und Ultraschalleinbetten – für PA12 im Vergleich.

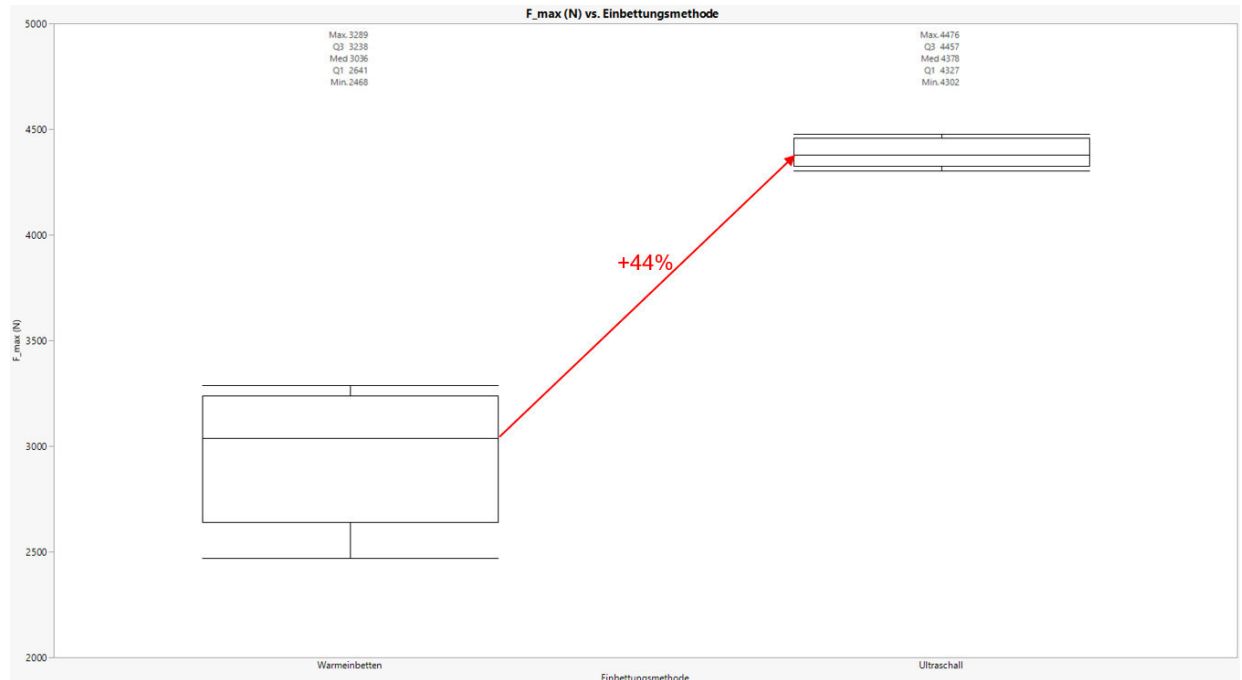


Abbildung 53: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M6-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode

Es ist deutlich zu erkennen, dass das Ultraschalleinbetten zu signifikant höheren maximalen Kräften führt. Der Medianwert steigt von etwa 3036 N beim Warmeinbetten auf rund 4378 N beim Ultraschalleinbetten, was einer Erhöhung um etwa 44 % entspricht. Diese deutliche Steigerung bestätigt den bereits bei den kleineren Inserts (M4) beobachteten Trend und unterstreicht die höhere Effektivität des Ultraschalleinbettens.

Während die Werte beim Warmeinbetten eine größere Streuung aufweisen, zeigen die Ergebnisse des Ultraschalleinbettens eine engere Verteilung, was auf eine höhere Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität hinweist. Die insgesamt höheren Kraftwerte deuten auf eine verbesserte stoff- und formschlüssige Verbindung zwischen Insert und Matrixmaterial hin, die durch die Kombination aus lokaler Erwärmung und mechanischer Schwingung während des Einbettprozesses erzielt wird.

Die Ergebnisse mit M6-Inserts bestätigen die zuvor gewonnenen Erkenntnisse der M4-Versuchsreihe: Das Ultraschalleinbetten ermöglicht eine signifikant höhere Verbundfestigkeit zwischen Insert und Matrix als das Warmeinbetten. Mit zunehmender Insertgröße wird dieser Effekt sogar noch deutlicher, was auf eine skalierbare und prozesssichere Anwendung des Ultraschalleinbettens auch bei größeren Verbindungselementen hinweist. Damit wird die Eignung des Ultraschalleinbettens für den Einsatz in strukturell hochbelasteten Multi-Material-Systemen eindeutig validiert.

Vergleichsuntersuchung Spritzgießen

Zur Beurteilung der Übertragbarkeit der zuvor an additiv gefertigten Probekörper gewonnenen Erkenntnisse wurden ergänzend Versuche an spritzgegossenen M4-Probekörpern durchgeführt. Dabei erfolgte das Einfügen der Inserts sowohl durch Warmeinbetten als auch durch Ultraschalleinbetten. Anschließend wurden die Zug- und Torsionsfestigkeiten untersucht, um den Einfluss der Einbettungsmethode auf die Verbundqualität in unterschiedlichen thermoplastischen Matrixmaterialien zu bewerten.

Abbildung 54 zeigt die maximalen Zugkräfte für vier verschiedene Spritzgussmaterialien (ABS, ASA, PA6/CF und PP-GF). Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Einfluss der Einbettungsmethode stark vom jeweiligen Werkstoff abhängt:

- ABS: Zwischen Warmeinbetten und Ultraschalleinbetten konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($\Delta \approx \pm 0\%$).
- ASA: Das Ultraschalleinbetten führte zu einer leichten Erhöhung der maximalen Kraft um etwa 4 %.
- PA6/CF: Hier zeigte sich ein entgegengesetzter Trend – die maximalen Kräfte sanken beim Ultraschalleinbetten um etwa 25 %, was auf eine ungünstige Wechselwirkung zwischen der kohlefaserverstärkten Matrix und der Ultraschallschwingung hindeutet.
- PP-GF: Es wurde nahezu kein Unterschied beobachtet ($\Delta \approx -1\%$).

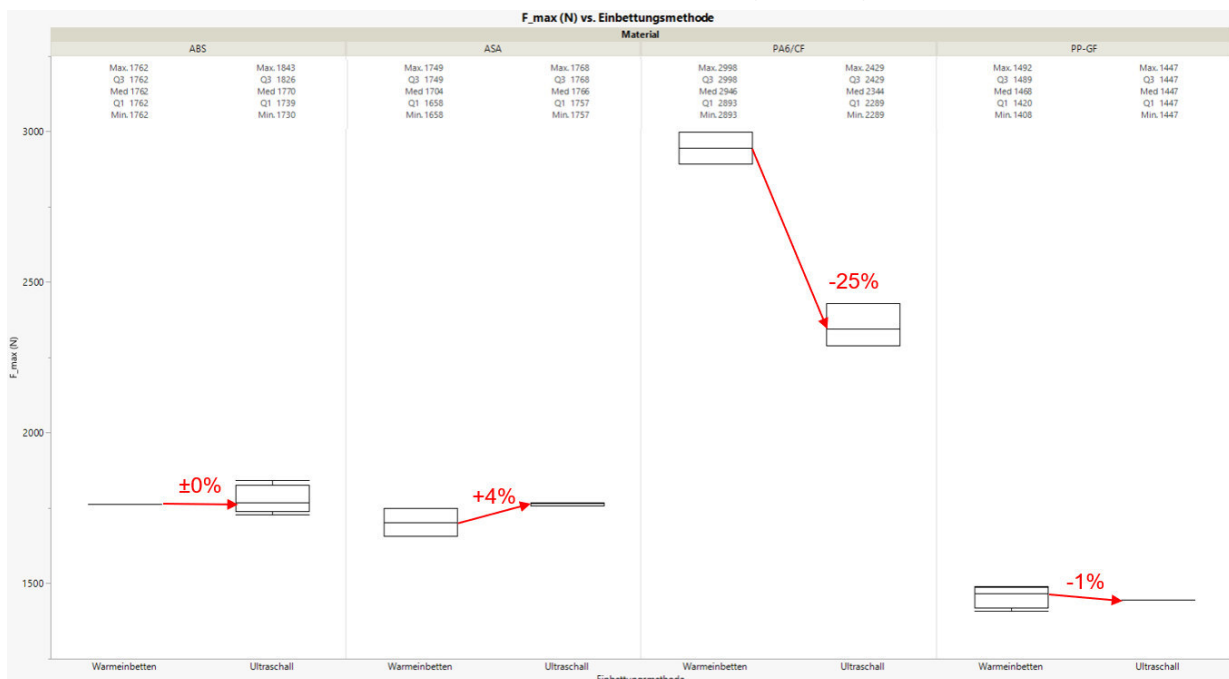


Abbildung 54: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts in spritzgegossenen Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode

Insgesamt zeigt sich, dass bei amorphen Thermoplasten (ABS, ASA) der Einfluss des Ultraschalleinbettens gering bis leicht positiv ist, während bei teilkristallinen, faserverstärkten Materialien (PA6/CF, PP-GF) keine Verbesserung und teils sogar eine Verringerung der Zugfestigkeit auftritt.

In *Abbildung 55* sind die maximalen Torsionsmomente für dieselben Materialien dargestellt. Auch hier zeigen sich materialabhängige Unterschiede zwischen den beiden Einbettungsverfahren:

- ABS: Das Ultraschalleinbetten führt zu einer Erhöhung des maximalen Moments um etwa 7 %, was auf eine verbesserte formschlüssige Verbindung hindeutet.
- ASA: Im Gegensatz dazu sinkt der Medianwert beim Ultraschalleinbetten leicht um 4 %.
- PA6/CF: Wie bereits bei den Zugversuchen, ist auch hier eine deutliche Reduktion von etwa 25 % zu beobachten, was eine negative Beeinflussung des Fügeprozesses durch die Faserverstärkung vermuten lässt.
- PP-GF: Hier zeigt sich ein gegenteiliger Effekt – das Ultraschalleinbetten führt zu einer Erhöhung des maximalen Moments um etwa 11 %, was auf eine stabilere Verbindung unter Torsionsbelastung hinweist.

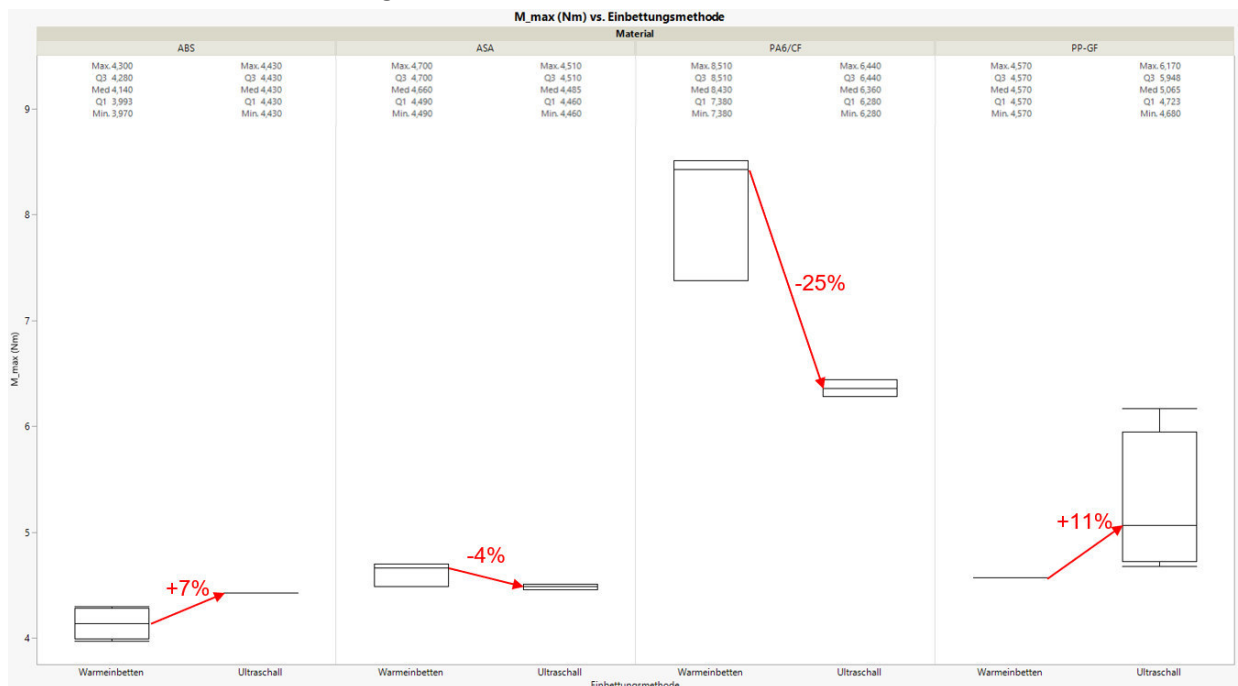


Abbildung 55: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts in spritzgegossenen Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirksamkeit des Ultraschalleinbettens bei spritzgegossenen Probekörpern stark vom verwendeten Polymer und seiner Füllstoffart abhängt. Während bei amorphen Thermoplasten (ABS, ASA) keine signifikanten Unterschiede oder leichte Verbesserungen beobachtet wurden, führen faserverstärkte, teilkristalline Materialien (insbesondere PA6/CF) zu einem deutlichen Abfall der Verbundfestigkeit. Dieser Effekt kann auf die erhöhte Steifigkeit und Dämpfung der Schwingungsenergie durch die Faseranteile zurückgeführt werden, wodurch die

plastische Verformung und lokale Verschmelzung zwischen Insert und Matrix eingeschränkt wird. Das Ultraschalleinbetten erweist sich in diesen Fällen als prozessstabiler. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Ultraschalleinbetten bei spritzgegossenen, unverstärkten Thermoplasten eine gleichwertige oder leicht verbesserte Fügequalität erzielen kann, während bei faserverstärkten Materialien die Prozessparameter angepasst werden müssen, um eine vergleichbare Verbundfestigkeit zu gewährleisten. Zur quantitativen Bewertung der Einflussfaktoren Material und Einbettungsmethode auf die mechanischen Kennwerte wurden Varianz- und Korrelationsanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse für die Zielgrößen Zugkraft und Torsionsmoment sind in *Abbildung 56* dargestellt.

Faktor	P-Wert	Effektgröße	r	r ²	
Material	8,4 * 10 ⁻⁸	0,89	0,94	0,89	Zug
Methode der Einbettung	0,91	0,02	0,03	< 0,01	
Faktor	P-Wert	Effektgröße	r	r ²	
Material	2,1 * 10 ⁻⁶	0,93	0,91	0,83	Torsion
Methode der Einbettung	0,81	0,06	0,06	< 0,01	

P-Wert-Grenze = 0,05

Abbildung 56: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Zug- und Torsionsversuche von Probekörpern hergestellt im Spritzguss-Verfahren

Die statistische Auswertung zeigt, dass der Faktor Material einen hochsignifikanten Einfluss auf die maximale Zugkraft besitzt. Mit einer Effektgröße von 0,89 und einem Korrelationskoeffizienten $r=0,94$ erklärt das Material etwa 89 % der beobachteten Varianz der Zugfestigkeiten. Damit bestätigt sich, dass die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Polymere den dominanten Einfluss auf das Kraftniveau haben. Die Einbettungsmethode hingegen zeigt mit einem p-Wert von 0,91 keinen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit. Die Effektgröße von 0,02 sowie das sehr geringe Bestimmtheitsmaß belegen, dass Unterschiede zwischen Warmeinbetten und Ultraschalleinbetten im Mittel statistisch nicht relevant sind. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den experimentellen Beobachtungen, wonach die Einbettungsmethode je nach Material nur geringe oder richtungsabhängige Effekte zeigte.

Auch in den Torsionsversuchen bestätigt sich der starke Einfluss des Materials. Die Effektgröße von 0,93 und das Bestimmtheitsmaß von 0,83 unterstreichen, dass das Materialverhalten maßgeblich die maximale Drehmomentaufnahme bestimmt. Die Einbettungsmethode zeigt dagegen erneut keine statistische Signifikanz ($p=0,81$) und nur eine minimale Effektgröße von 0,06. Damit lässt sich auch für die Torsionsversuche schließen, dass die Einbettungsmethode

– innerhalb der untersuchten Parameterbereiche – keinen dominanten Einfluss auf das Torsionsverhalten hat.

Die statistische Auswertung bestätigt die zuvor beschriebenen experimentellen Trends:

- Der Materialeinfluss ist sowohl für Zug- als auch Torsionsbelastung der entscheidende Faktor für die mechanische Performance der eingebetteten Inserts.
- Die Einbettungsmethode wirkt sich nur sekundär aus und zeigt keine statistisch signifikanten Unterschiede, wenngleich bei bestimmten Materialgruppen (z. B. PA6/CF, PP-GF) qualitative Abweichungen beobachtet wurden.

Zur Überprüfung der zuvor dargestellten Ergebnisse mit M4-Inserts wurden ergänzend Zugversuche an spritzgegossenen Probekörpern mit M6-Inserts durchgeführt. Ziel war es, den Einfluss der Einbettungsmethode (Wärmeinbetten vs. Ultraschalleinbetten) in Abhängigkeit vom verwendeten Matrixmaterial auch für größere Verbindungselemente zu validieren.

Abbildung 57 zeigt die maximalen Zugkräfte für vier untersuchte Materialien (ABS, ASA, PA6/CF und PP-GF).

- ABS: Der Medianwert der maximalen Zugkraft steigt beim Ultraschalleinbetten um etwa 3 %. Dieser geringe Anstieg bestätigt die zuvor bei M4-Inserts beobachtete Tendenz, dass amorphe Materialien wie ABS auf Ultraschallschwingungen nur leicht positiv reagieren.
- ASA: Hier wurde ebenfalls eine moderate Steigerung von rund 4 % festgestellt, was mit den M4-Ergebnissen übereinstimmt und auf eine stabile Verbindungsqualität unabhängig von der Insertgröße hinweist.
- PA6/CF: Im Gegensatz dazu zeigt sich bei dem kohlefaserverstärkten Polyamid erneut eine deutliche Reduktion der maximalen Kraft um etwa 12 % beim Ultraschalleinbetten. Dieses Verhalten entspricht dem bereits für M4 beobachteten Trend, wonach die Faserverstärkung die Effektivität der Ultraschallschwingung reduziert und lokale Entkopplungen an der Grenzfläche begünstigt.
- PP-GF: Bei dem glasfaserverstärkten Polypropylen ist eine leichte Verbesserung von rund 6 % zu erkennen, was auf eine geringfügig bessere Kraftübertragung beim Ultraschalleinbetten hinweist.

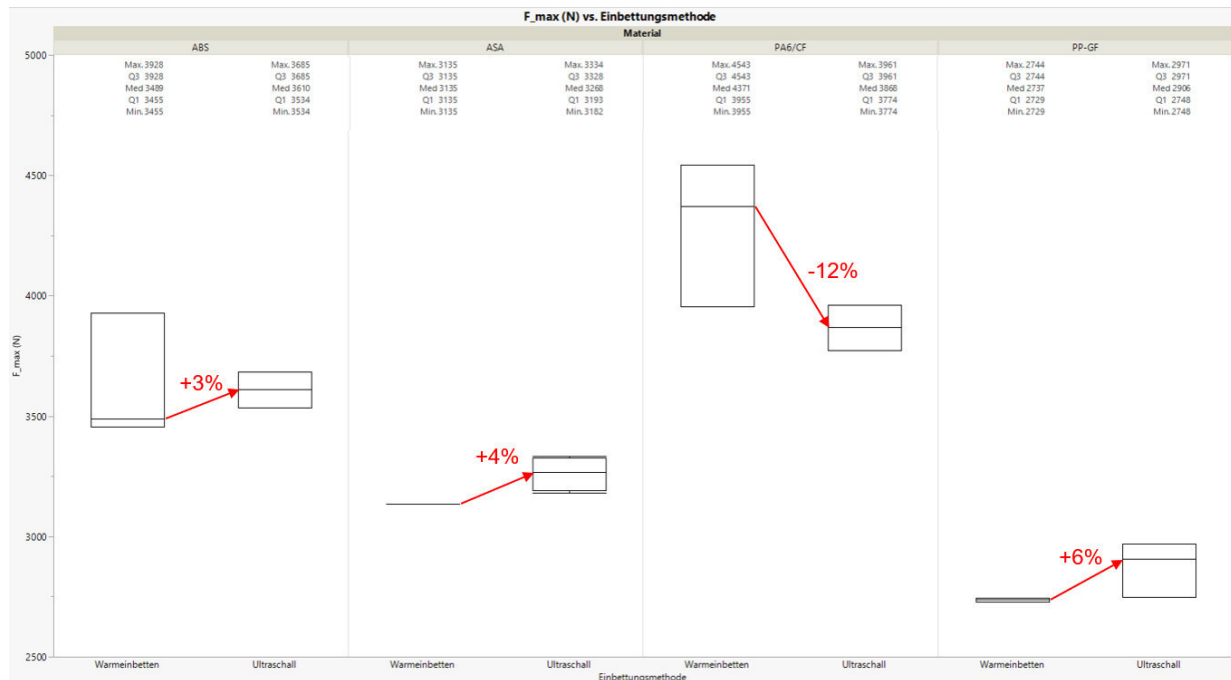


Abbildung 57: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M6-Inserts in spritzgegossenen Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode

Der Vergleich zwischen den M4- und M6-Inserts zeigt eine hohe Übereinstimmung der materialabhängigen Trends:

- Bei amorph thermoplastischen Materialien (ABS, ASA) führt das Ultraschalleinbetten zu leicht erhöhten Zugfestigkeiten.
- Bei faserverstärkten, teilkristallinen Systemen (PA6/CF, PP-GF) bleibt der Einfluss stärker materialspezifisch – PA6/CF zeigt erneut eine deutliche Verschlechterung, während PP-GF eine leichte Verbesserung erfährt.
- Die Insertgröße beeinflusst somit nicht grundlegend den beobachteten Trend, sondern verstärkt lediglich die Unterschiede zwischen den Materialien, d.h. mit steigender Insertgröße der Einfluss auf die mechanischen Kennwerte steigt.

Die Ergebnisse der M6-Versuche bestätigen die zuvor für M4 gewonnenen Erkenntnisse und zeigen, dass der Einfluss der Einbettungsmethode materialabhängig und nicht maßgeblich von der Insertgröße bestimmt wird. Das Ultraschalleinbetten kann bei amorphen Werkstoffen eine gleichwertige oder leicht verbesserte Fügequalität erzielen, während bei faserverstärkten Materialien – insbesondere bei PA6/CF – eine Anpassung der Prozessparameter erforderlich ist, um eine vergleichbare Verbundfestigkeit zu gewährleisten. Damit werden die Ergebnisse der Spritzgussreihe mit M4-Inserts durch die M6-Versuche inhaltlich und statistisch validiert, wodurch die Aussagekraft der Trends hinsichtlich des Materialeinflusses und der Einbettungsmethode weiter gestützt wird.

Zusammenfassend stellt die Werkstoffwahl die entscheidende Stellgröße für die Verbundfestigkeit dar, während die Einbettmethode insbesondere bei spritzgegossenen Probekörpern nur eine untergeordnete Rolle spielt. Für eine weitergehende Optimierung der Fügestellen erscheint daher eine materialspezifische Prozessanpassung zielführender als eine reine Variation der Einbettmethode.

Arbeitspaket 4b: Simulationsgestützte Fügestellenoptimierung

Im Rahmen des Projekts wurden umfassende numerische Untersuchungen zur Abbildung der lokal anisotropen Fügestellenstruktur in additiv gefertigten Bauteilen durchgeführt. Ausgangspunkt war ein Materialmodell in Kombination mit einer sequentiellen Simulationsmethodik, wie sie bereits im Vorgängervorhaben beim Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) Dresden formuliert worden war. Ziel war es, die in AP3b ermittelte lokale Struktur (z. B. aus Infill und Außenbahnen) in einer FE-Simulation nachzubilden. Anschließend wurden Modelle auf Basis der im AM-Sim-Projekt (IGF-Nr. 20727 N) erstellten Materialkarten für Abaqus aufgebaut, wobei der Grundwerkstoff als isotrop angenommen wurde und das resultierende anisotrope Verhalten aus der additiven Strangverbundstruktur modelliert werden sollte.

Im Modellaufbau wurden Grenzschichtelemente (interface elements) und Kohäsivzonenansätze (cohesive zone modeling, CZM) eingesetzt, um insbesondere das Delaminationsversagen zwischen Infillstruktur und Außenbahnen abzubilden. Allerdings zeigte sich, dass die im realen Aufbau vorhandene Anisotropie – hervorgerufen durch die maschinenseitigen Aufbaudaten der Probekörper – nicht wie geplant im Modell abgebildet werden konnte. Die Ursache liegt in der Struktur der Probekörper, da die im AM-Sim-Vorhaben genutzte Strategie auf vollflächige bzw. durchgehende Kontaktzonen zwischen Stranglagen ausgelegt war. Im aktuellen Aufbau wiesen die Fügestellen jedoch im Bereich der Übergänge zwischen Infill und Außenbahnen unterbrochene Kontakte bzw. nicht geschlossene Haftflächen auf. Infolgedessen ließen sich die Kohäsivzonen/Kontaktmodelle im Netz nicht stabil lösen. Im weiteren Verlauf der Arbeiten wurden mehrere alternative Modellierungsstrategien umgesetzt, um die im Modell aufgetretenen Konvergenz- und Abbildungsprobleme zu adressieren. Zunächst wurde versucht, eine lokal variable Kohäsivzonenendarstellung zu implementieren, bei der die Kontaktflächen gezielt partiell definiert wurden, um die im realen Bauteil vorhandenen unterbrochenen Haftflächen zwischen Infillstruktur und Außenbahnen zu berücksichtigen. Diese Erweiterung führte jedoch aufgrund der stark nichtlinearen Kopplungseffekte zwischen den einzelnen Kontaktzonen weiterhin zu instabilem Konvergenzverhalten und somit zu keiner belastbaren Lösung. Darüber hinaus wurde ein

Phasenfeld-reguliertes Kohäsivzonenmodell (PF-CZM) getestet, welches die Simulation von Riss- und Delaminationsvorgängen auch bei diskontinuierlichen Kontaktflächen ermöglicht. Durch die Kombination von Phasenfeld- und Kohäsivzonenansätzen sollte das Versagensverhalten anisotroper Polymerstrukturen realistischer beschrieben werden können. Ein vergleichbarer Ansatz wird von Ruan et al. (2025) [6] vorgestellt, der die Robustheit der Methode insbesondere für komplexe Materialübergänge hervorhebt. In der praktischen Umsetzung innerhalb des Projekts zeigte sich jedoch, dass die erforderliche feine Netzauflösung und der hohe Rechenaufwand zu langen Simulationszeiten und numerischen Instabilitäten führten, sodass dieser Ansatz im Rahmen der vorhandenen Ressourcen nicht weiterverfolgt werden konnte. Ergänzend wurde ein homogenisierter Multi-Skalen-Ansatz untersucht, bei dem die reale Mikrostruktur der Fügestelle – einschließlich Stranggeometrie und lokaler Kontaktunterbrechungen – in effektive anisotrope Materialparameter überführt und auf Makroskala verwendet werden sollte. Ziel war es, das lokale Strukturverhalten über eine geeignete Homogenisierung in das Gesamtmodell zu integrieren. Ein ähnliches Vorgehen beschreiben Ghandriz et al. (2021) [7], die anisotrope Bruchmechanismen in additiv gefertigten Polymerstrukturen über eine mehrskalige Materialbeschreibung erfassen. Auch dieser Ansatz zeigte methodisches Potenzial, konnte jedoch aufgrund des hohen modellierungstechnischen Aufwands und der notwendigen experimentellen Mikrostrukturdaten im Projektzeitraum nicht abgeschlossen werden.

Trotz dieser Versuche zeigte sich, dass der vollständige Modellaufbau zwar prinzipiell denkbar und technisch umsetzbar ist, jedoch im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens nicht weiterverfolgt werden kann, da er einen Umfang und Entwicklungsaufwand erfordert, der über die zur Verfügung stehenden Ressourcen und Zeit hinausgeht. Es bleibt somit festzuhalten, dass die Modellierung der realen Anisotropie und Kontaktunterbrechungen eine weitergehende Entwicklung bedarf.

Für zukünftige Arbeiten empfiehlt sich insbesondere eine gezielte Erweiterung der Modellierungsmethodik – beispielsweise durch adaptiv verknüpfte Kohäsivzonen mit variabler Haftsteifigkeit und eine systematische, wenn auch umfangreiche, experimentelle Erfassung der Mikrostrukturen zur Parametrierung anisotroper Materialarten.

Arbeitspaket 5: Anwendungsrichtlinien und Abschlussbericht

Diese Richtlinie fasst die wesentlichen Erkenntnisse zur Gestaltung, Auslegung und Prozessführung von Insertverbindungen in additiv gefertigten Kunststoffbauteilen zusammen. Sie dient als

praxisorientierte Handlungsempfehlung für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). In *Tabelle 7* sind alle relevanten Einflussfaktoren sowie deren Bedeutung gegenübergestellt.

Tabelle 7: Zusammenfassung

Einflussfaktor	Bedeutung	Wirkung Zug	Wirkung Torsion	Empfehlung
Material	Höchster Einflussfaktor	Stark signifikant ($r^2=0,57$)	Dominant	Werkstoffauswahl nach Steifigkeit und Haftfähigkeit
Infillanteil	Strukturparameter mit großem Effekt	+ bis zu 70% Festigkeitssteigerung	Signifikant, aber geringer	Füllgrad $\geq 70\%$
Außenbahnen	Verstärkung der Fügezone	+15 – 69% Zugkraftsteigerung	Moderater Effekt	Mind. 4 Außenbahnen im Insertbereich
Einbettungsmethode	Prozessabhängig	Signifikant bei Zug (Ultraschall vorteilhaft)	Kein signifikanter Einfluss	Ultraschall für amorphe, Wärme für faserverstärkte Materialien
Bauteilorientierung	Sekundärparameter	Keine signifikante Änderung	Keine signifikante Änderung	Entsprechend der Bauteilorientierung wählbar
Infillmuster	Geometrisch untergeordnet	$\pm 10\%$ Unterschied	Keine Relevanz	Wählbar zwischen Gyroid und 45°

Gestaltungshinweise

- **Fügezonengestaltung:** Hoher Infillanteil ($>70\%$), ≥ 4 Perimeter, reduzierte Porosität.
- **Materialwahl:** Amorphe Thermoplaste bevorzugt für Ultraschallverfahren; faserverstärkte für Wärmeverfahren.
- **Prozessparameter:** Ultraschalleinbetten für amorphe, Wärmeeinbetten für faserverstärkte Materialien.
- **Orientierung & Infillmuster:** Geringer Einfluss, sekundäre Parameter.

Handlungsempfehlungen für KMU

- Fokus auf Material und Strukturparameter (Materialwahl, Füllgrad, Wandstärke).
- Verfahren materialspezifisch wählen (Ultraschalleinbetten für amorphe, Wärmeeinbetten für faserverstärkte Werkstoffe).
- Prozessparameter standardisieren zur Streuungsreduktion.
- Konstruktion mit verstärkter Insertumgebung und lokaler Verdichtung.
- Skalierbarkeit prüfen (Ergebnisse von M4 auf M6 übertragbar).
- Qualitätssicherung über Zug- und Torsionsversuche mit statistischer Auswertung.
- Angaben der Hersteller von metallischen Gewindeeinsätzen im Zusammenhang mit Vorlochdurchmesser beachten

Schlussfolgerungen

- Die Verbundfestigkeit wird primär durch Materialwahl, Infillanteil und Außenwandstruktur bestimmt.
- Einbettungsmethoden wirken materialspezifisch, Orientierung und Infillmuster sind nachrangig.
- Eine materialspezifische Prozessführung ist zielführender als reine Methodenvariation.

3 Zusammenfassung

Der Schlussbericht zum IGF-Vorhaben „Anforderungsgerechte Gestaltung von Fügezonen mit Inserts in additiv gefertigten Bauteilen“ beschreibt die Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien und Prozessstrategien für die Integration metallischer Gewindeeinsätze in Kunststoffbauteile, die mittels additiver Verfahren wie FLM, AKF und LS hergestellt werden. Ziel war es, die mechanische Performance der Verbindungen zu verbessern und praxisnahe Empfehlungen für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bereitzustellen.

Zu Beginn wurden geeignete Materialien ausgewählt und umfassend charakterisiert. Thermische und rheologische Analysen (TGA, DSC, Rheometrie) definierten die Prozessfenster für die Verarbeitung von PP-GF, PET-G, PA, ASA sowie ABS. Darauf aufbauend wurden Prüfkörper entwickelt, die für Zug- und Torsionsversuche geeignet sind. Über 240 Probekörper wurden mit variierenden Parametern wie Infillanteil, Anzahl der Außenbahnen, Orientierung und Infillmuster gefertigt. Die Einbringung der Inserts erfolgte durch Warmeinbetten und Ultraschalleinbetten, wobei die Prozessparameter mittels Thermografie optimiert wurden. Die mechanische Charakterisierung zeigte, dass die Materialwahl und der Infillanteil die dominanten Einflussgrößen auf die Verbundfestigkeit sind. Höhere Füllgrade ($\geq 70\%$) und min. vier Außenbahnen steigern die Zugfestigkeit signifikant. Bei Torsionsbelastung bleibt das Material der entscheidende Faktor. Orientierung und Infillmuster erwiesen sich als sekundäre Parameter. Struktur- und Schadensanalysen mittels CT und Schliffbildern bestätigten, dass Versagen meist an der Insert-Matrix-Grenzfläche oder durch Delamination bei niedrigen Füllgraden auftritt. Bei PP-GF beeinträchtigt Ultraschall die Faserorientierung. Vergleichsuntersuchungen mit spritzgegossenen Probekörpern bestätigten die Trends und zeigten die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Inserts (M6). Simulationen zur Abbildung anisotroper Fügezonen wurden begonnen, erfordern jedoch weiterführende Forschung.

Die erarbeiteten Richtlinien empfehlen für die Fügezonengestaltung einen hohen Infillanteil und mindestens vier Perimeter. Die Materialwahl sollte sich an der Einbettungsmethode orientieren: amorphe Thermoplaste für Ultraschall, faserverstärkte für Wärmeverfahren. Orientierung und Infillmuster sind nachrangig. Für KMU ergeben sich klare Handlungsempfehlungen: Fokus auf Material und Strukturparameter, materialspezifische Prozessführung, Standardisierung der Parameter zur Streuungsreduktion sowie Qualitätssicherung über Zug- und Torsionsversuche.

Das Projekt liefert einen hohen wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzen, insbesondere für KMU. Die Ergebnisse ermöglichen eine sichere und effiziente Integration von Inserts in additiv gefertigte Bauteile, reduzieren Entwicklungsrisiken und stärken die Wettbewerbsfähigkeit. Der Wissenstransfer erfolgt über Fachveranstaltungen, Publikationen, Seminare und die Integration in akademische Lehre.

4 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Ergebnisse der TGA für das untersuchte PA6.....	6
Abbildung 2: Ergebnisse der DSC für das untersuchte PA6.	7
Abbildung 3: Ergebnisse der Rheometrie für das untersuchte PA6.	8
Abbildung 4: Darstellung und Vergleich der Probekörperkonzepte.....	9
Abbildung 5: Bewertung der Varianten, 1 = schlecht bis 3 = gut.....	9
Abbildung 6: Darstellung der erarbeiteten Probekörpernennmaße.	10
Abbildung 7: Probekörperdruck M4 PET-G.....	12
Abbildung 8: Probekörper Laser Sintern.....	13
Abbildung 9: Formplatte Spritzgießwerkzeug (links) und gespritzte Probekörper aus ABS (rechts).	16
Abbildung 10: Darstellung der Öffnungswinkel (links: 30°, mitte: 60°, rechts: 90°) mit verschiedenen Reflexionsbarrieren für die Thermografiemessungen: geschlossene Fügezone (links) und vorgelagerte Reflexionsbarriere bei einem offenen Fügezonbereich.....	17
Abbildung 11: Darstellung des Funktionsprinzips einer vorgelagerten Reflexionsbarriere und einem offenen Fügezonbereich für die Thermografiemessungen.	17
Abbildung 12: Thermografieaufnahme eines Probekörpers mit 90° Öffnungswinkel und vorgelagerter Reflexionsbarriere (links) und Wasserfalldiagramm zur Darstellung des Wärmeeinflussbereichs (rechts).	18
Abbildung 13: Darstellung der Probekörper für die thermographischen Untersuchungen (links: offen, rechts: geschlossen)	18
Der Prüfaufbau (Abbildung 14) wurde so gewählt, dass die thermographischen Aufnahmen konsistent senkrecht zur Fokusfläche durchgeführt werden konnten. Abbildung 14: Prüfaufbau für die thermographischen Untersuchungen zur Bestimmung des Wärmeeinflussbereichs.....	18
Abbildung 15: Darstellung der thermographischen Aufnahmen für offene Probekörper bei unterschiedlichen Eindringtiefen des Inserts von 50 % (links) und 100 % (rechts) ..	20

Abbildung 16: Darstellung der thermographischen Aufnahmen für geschlossene Probekörper bei unterschiedlichen Eindringtiefen des Inserts von 50 % (links) und 100 % (rechts).....	20
Abbildung 17: Darstellung des mittels Lattice-Strukturen angepassten Leichtbauadapters für die Aufnahme des Warmeinbettungswerkzeugs am kollaborativen Roboter UR10e Versuchsaufbau am UR10e für die Inserteinbringung.....	21
Abbildung 18: Versuchsaufbau zur Warmeinbettung von metallischen Gewindeeinsätzen mit einem kollaborativen Roboter UR10e.....	22
Abbildung 19: Darstellung der entwickelten Ultraschall-Sonotrode für den ultraschallbasierten Einbringungsprozess und servopneumatische US-Fügeanlage.....	22
Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Ultraschalleinbettung.....	23
Abbildung 21: Methoden zur Bestimmung der Belastungsgrenzen von Insertverbindungen [5].....	23
Abbildung 22: Prüfaufbau für die Zugversuche.....	24
Abbildung 23: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich des Infillanteils.....	27
Abbildung 24: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Außenbahnen.....	28
Abbildung 25: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode.....	30
Abbildung 26: Darstellung eines Randbereichs mit Fehlerbild der Überextrusion an einem PET-G Probekörper.....	32
Abbildung 27: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Probekörperorientierung.....	32
Abbildung 28: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich des Infillmusters.....	34
Abbildung 29: Prüfaufbau für die Überdrehmomentuntersuchungen.....	35
Abbildung 30: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich des Infillanteils.....	38

Abbildung 31: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Außenbahnen	40
Abbildung 32: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode	42
Abbildung 33: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich der Probekörperorientierung	43
Abbildung 34: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts und Vergleich hinsichtlich des Infillmusters.....	45
Abbildung 35: Darstellung der exemplarischen Versagensart für ASA-Probekörper nach der Zugprüfung mit Ansicht von oben (links) und unten (rechts)	47
Abbildung 36: Darstellung der exemplarischen Versagensarten für PETG-Probekörper nach der Zugprüfung: Versagensart 1 (links) und 2 (rechts).....	47
Abbildung 37: Darstellung der exemplarischen Versagensarten für PP/GF-Probekörper nach der Zugprüfung: Versagensart 1 (links) und 2 (rechts).....	48
Abbildung 38: Darstellung der exemplarischen Versagensarten für Probekörper aller untersuchten Materialsysteme nach der Torsionsprüfung (links) und freigelegte Fügezone mit erkennbaren „überdrehten“ Hinterschnittbereichen (rechts)	49
Abbildung 39: CT-Aufnahme zur Prüfung der Geradheit des Vorlochs und eingepasster Prüffläche (rot)	50
Abbildung 40: CT-Aufnahmen von PETG-Probekörpern (4 Außenbahnen, 90 % Füllgrad und 45°-Füllmuster) hergestellt mittels Warmeinbetten (links) und Ultraschalleinbetten (rechts) nach dem Herauslösen der Inserts	51
Abbildung 41: CT-Aufnahmen von ASA-Probekörpern (2 Außenbahnen, 90 % Füllgrad und Gyroid-Füllmuster) hergestellt mittels Warmeinbetten (links) und Ultraschalleinbetten (rechts) nach dem Herauslösen der Inserts	52
Abbildung 42: CT-Aufnahmen von PA6-Probekörpern (2 Außenbahnen, 20 % Füllgrad und 45°-Füllmuster) hergestellt mittels Warmeinbetten (links) und Ultraschalleinbetten (rechts) nach dem Herauslösen der Inserts	53

Abbildung 43: CT-Aufnahmen von PP/GF-Probekörpern (4 Außenbahnen, 50 % Füllgrad und Gyroid-Füllmuster) hergestellt mittels Warmeinbetten (links) und Ultraschalleinbetten (rechts) nach dem Herauslösen der Inserts.....	54
Abbildung 44: Darstellung des Fehlerbildes eines ausgeworfenen Materialzylinders nach der Ultraschalleinbettung an SLS-Probekörpern aus PA12	55
Abbildung 45: CT-Aufnahme von SLS-Probekörpern aus PA12 mit Luftpfehlungen im gesamten Probekörper verteilt sowie im Bereich der Fügezone zwischen Insert und Probekörper (rot).....	56
Abbildung 46: In-situ CT-Prüfkomplex FCTS 160-IS mit einer maximalen Auflösung von 10 µm	56
Abbildung 47: Darstellung der Insitu-CT-Aufnahmen von Aluminiuminserts eingebettet mittels Ultraschall in PA6-Probekörpern mit einem Infillanteil von 50 % (links) und 20 % (rechts), wobei sich die Oberseite des Inserts aufnahmebedingt im Bild unten befindet	57
Abbildung 48: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode.....	58
Abbildung 49: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode.....	59
Abbildung 50: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Probekörperorientierung	60
Abbildung 51: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Probekörperorientierung	61
Abbildung 52: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Zug- und Torsionsversuche an PA12-Probekörpern hergestellt im SLS-Verfahren.....	61
Abbildung 53: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M6-Inserts in PA12 Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode.....	63
Abbildung 54: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M4-Inserts in spritzgegossenen Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode.	64
Abbildung 55: Darstellung der ermittelten Überdrehmomente für M4-Inserts in spritzgegossenen Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode.	65

Abbildung 56: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Zug- und Torsionsversuche von Probekörpern hergestellt im Spritzguss-Verfahren	66
Abbildung 57: Darstellung der ermittelten Auszugkräfte für M6-Inserts in spritzgegossenen Probekörpern und Vergleich hinsichtlich der Einbettungsmethode .	68

5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zu untersuchende Konfigurationen von Druckparametern und Inserts.	10
Tabelle 2: Statistischer Versuchsplan.....	11
Tabelle 3: Versuchsplan Best Practice.....	12
Tabelle 4: Versuchsplan AKF.	14
Tabelle 5: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Zugversuche an M4-Probekörpern.....	25
Tabelle 6: Übersicht der statistischen Kenngrößen für die Auswertung der Torsionsversuche an M4-Probekörpern.	36
Tabelle 7: Zusammenfassung.....	71

6 Literatur

- [1] Spirol International Corporation, "Warmeinbetten vs. Ultraschallschweißen," 2019.
- [2] KVT-Fastening. "Tappex® Gewindeeinsätze: Präzise und widerstandsfähig in leichten Werkstoffen."
- [3] Böllhoff. "AMTEC® - Präzisionsgewindeeinsätze zum nachträglichen Fügen in Kunststoffbauteilen."
- [4] Kerb Konus. "Gewindeeinsätze für Kunststoffe und Holz." Zugriff am: 30. März 2022. [Online.] Verfügbar: <https://www.kerbkonus.de/proddb/pdf/de.ds.30.pdf>
- [5] *Gewindeeinsätze zum Fügen von Formteilen aus Kunststoffen*, DVS 2240-1, Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V., Mai. 2005.
- [6] X.-L. P. Hui Ruan, "Phase-field modeling of anisotropic fracture of additively manufactured parts," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794425003613?via%3Dihub>
- [7] Computational modeling of anisotropic fracture, "Computational modeling of anisotropic fracture in 3D printed polymers and patterned structures: a dissertation in Engineering and Applied Science," [Online]. Verfügbar unter: <https://repository.lib.umassd.edu/esploro/outputs/doctoral/Computational-modeling-of-anisotropic-fracture-in/9914424877801301/filesAndLinks?index=0>