

Abschlussbericht der Untersuchung:

Einsatz faserverstärkter Verbundmaterialien als Armierungswerkstoffe in der Kaltmassivum- formung

Finanziert vom

Arbeitskreis für Entwicklung und Erforschung des Kaltfließpressens

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

Nikola Nezic, M. Sc.

Tahsin Deliktas, M. Sc.

Stuttgart, März 2025

Inhalt

1	Einleitung	3
1	Stand der Technik	4
1.1	Armierungssysteme für die Massivumformung	4
1.2	Faserverbundwerkstoffe	6
1.3	Bisherige nationale und internationale Forschung zu Armierungssystemen	7
1.3.1	Patent für eine Faserarmierung (Fa. Felss Systems GmbH)	7
1.3.2	Fallstudie der Ege Universität, Izmir, Türkei	8
2	Zielsetzung und Motivation	9
3	Konzeption des Faserarmierungsringes	10
3.1	Konzept: Aufbau und Vorspannung des Faserarmierungsringes	10
3.1.1	Anforderungsliste an den Armierungsring aus Faserverbundwerkstoff:	10
3.1.2	Auswahl von Faser und Matrixwerkstoff	11
3.1.3	Fügetechnik zum Armieren	11
3.2	Fertigung der Armierungsringe aus Faserverbundwerkstoff	12
3.2.1	Faserarmierung mit kegelförmiger Innenkontur	12
3.2.2	Faserarmierung mit zylindrischer Innenkontur	13
4	Experimentelle Versuchsergebnisse	14
4.1	Erste experimentelle Armierungsversuche	14
4.2	Anpassung der Versuchsdurchführung	15
4.3	Experimentelle Armierungsversuche mit reduziertem Haftmaß	15
4.4	Adaption des Faserarmierungssystems	17
4.5	Experimentelle Armierungsversuche mit axialer Vorspannung	17
5	Zusammenfassung	18
6	Literaturverzeichnis	19
7	Anhang	21
7.1	Technische Zeichnungen	21

1 Einleitung

In der Kaltmassivumformung sind Armierungssysteme erforderlich, um die formgebende Mat-
rize elastisch vorzuspannen und dadurch ein Versagen unter Belastung zu verhindern. Durch
diese Vorspannung werden während des Umformprozesses auftretende Zugspannungen in der
Matrize reduziert, wodurch deren Standzeit erhöht wird. Zudem kann durch eine geeignete Ar-
mierung eine höhere Vorspannung erzeugt werden, wodurch der zulässige Innendruck im Pro-
zess gesteigert und die Umformeigenschaften verbessert werden.

Derzeit existieren zwei etablierte Armierungssysteme im Stand der Technik: Zum einen Armie-
rungsringe aus Stahl, die mit einem Übermaß über einen Kegel miteinander gefügt werden, und
zum anderen Bandwickelarmierungen aus hochfestem Stahlblech, die unter Vorspannung um die
Matrize gewickelt werden. Beide Systeme haben sich in der Industrie als robust und zuverlässig
bewährt. Doch Bandwickelarmierungen sind aufgrund ihres hohen Materialaufwands teuer und
weisen hinsichtlich der erreichbaren Bauteilsteifigkeit eine Begrenzung auf, die bei etwa 400 GPa
liegt. Diese Steifigkeit von Bandarmierungen wird durch die mechanischen Werkstoffeigenschaften
der Stahlbänder beziehungsweise der Armierungsringe beschränkt.

Eine Steigerung der Bauteilsteifigkeit könnte durch den Einsatz von Werkstoffen mit höheren Stei-
figkeiten, wie etwa faserverstärkten Kunststoffen, erzielt werden. Insbesondere Hochmodulfaser-
werkstoffe bieten das Potenzial, die mechanischen Eigenschaften der Armierungssysteme signifi-
kant zu verbessern und so höhere Vorspannungen sowie optimierte Umformprozesse zu ermögli-
chen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Arbeitskreis zur Erforschung und Entwicklung des Kaltpressens
des Instituts für Umformtechnik der Universität Stuttgart eine Studie initiiert, die sich mit dem Ein-
satz von faserverstärkten Armierungsringen aus Kunststoff beschäftigt. Ziel der Studie war es, neue
Möglichkeiten zur Verbesserung der Armierungssysteme in der Kaltmassivumformung zu erfor-
schen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden zunächst aktuelle Forschungsergebnisse und ähn-
liche Vorhaben recherchiert. Daraufhin wurden Fertigungsstrategien für faserverstärkte Armie-
rungsringe konzipiert, Armierungssysteme numerisch ausgelegt und schließlich die Fertigung so-
wie der experimentelle Aufbau des Armierungssystems durchgeführt.

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse der durchgeführten Studie zusammen und diskutiert die gewon-
nenen Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen als Ar-
mierungswerkstoffe in der Kaltmassivumformung.

1 Stand der Technik

1.1 Armierungssysteme für die Massivumformung

Die Armierung von Matrizen stellt in der Massivumformung eine zentrale Technologie dar, die entscheidend zur Erhöhung der Belastbarkeit und Lebensdauer von Werkzeugen beiträgt. Sie ist darauf ausgelegt, die Formstabilität der Matrize zu gewährleisten und Schäden, die durch Zugspannungen während des Umformprozesses entstehen, zu verhindern. Die Auswahl und Auslegung geeigneter Armierungssysteme hängt in erheblichem Maße von den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Umformprozesses, den verwendeten Werkstoffen sowie den Belastungsgrenzen der Matrizen ab. Insbesondere in der Kaltmassivumformung ist der Einsatz von Armierungen erforderlich, um das Risiko von Materialversagen der Matrize aufgrund hoher Prozessbelastungen zu minimieren. Durch die Armierung werden gezielt elastische Druckspannungen in die Matrize induziert, die den während des Umformprozesses entstehenden Zugspannungen entgegenwirken und deren potenziell schädigende Auswirkungen reduzieren. Diese Zugspannungen entstehen insbesondere bei höheren Innendrücken, die im Verlauf des Umformprozesses auftreten. Tabelle 1 zeigt die Kategorien von Armierungssystemen die abhängig von Innendrücken im Prozess eingesetzt werden sollten [1].

Tabelle 1: Grenzwerte für armierte Matrizen, nach [1]

Armierungssystem	Innendruck p_i [MPa]
Nicht armierte Matrizen	< 1.000
Einfach armierte Matrizen	< 1.600
Doppelt armierte Matrizen mit Stahlkern	< 2.160
Doppelt armierte Matrizen mit Hartmetallkern	< 2.000
Bandwickelarmierung	> 2.160

In der Industrie werden durchaus Matrizen ohne Armierung eingesetzt, sofern Prozessinnendrucke unterhalb von 1.000 MPa auftreten. Derart niedrig belastete Kaltumformprozesse sind bspw. bei der Aluminiumumformung vorzufinden. Matrizen ohne Armierungen werden meist einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen, um einen gezielten Härteverlauf zu erzeugen, welcher ausgehend von der Matrizenbohrung radial nach außen hin abnimmt. Durch diesen Härteverlauf in der Matrize kann eine ausreichende Oberflächenhärte an der formabbildenden Matrizeninnenfläche bei hinreichend hoher Zähigkeit des Matrizengrundkörpers erreicht werden. Bei nicht armierten Matrizen tritt bei Beaufschlagung mit Innendruck eine maximale tangentielle Zugspannung am Innenrand der Bohrung auf, die zum Ringaußenrand abnimmt. In radiale Richtung ergeben sich dagegen Druckspannungen, die ebenfalls zum Ringaußenrand überproportional abnehmen. Die Vergleichsspannung am Innenrand der Matrizenbohrung darf die Streckgrenze des Matrizenwerkstoffs nicht übersteigen, um eine plastische Deformation zu vermeiden [2]. Im Stand der Technik existieren zwei Hauptarten von Armierungssystemen für die Massivumformung: monolithische Armierungsringe und Bandwickelarmierungen.

Monolithische Armierungsringe

Monolithische Armierungsringe aus Stahl gehören zu den klassischen Armierungssystemen und werden häufig in der Praxis verwendet. Diese Armierungsringe werden mit einem Übermaß

über einen Kegel miteinander gefügt, wodurch eine elastische Druckvorspannung auf den Matrizenkern erzeugt wird. Der harte Matrizenkern kann hierbei mit einem oder mehreren zähen Armierungsringen vorgespannt werden, um damit höhere Innendrucke zu ertragen. Besonders wichtig ist die Wahl des Übermaßes (bzw. Haftmaßes) bei Auslegung des Armierungssystems, da damit die radiale Druckvorspannung eingestellt werden kann. Ein zu hohes Übermaß kann zu einer Rissbildung im Armierungsring durch zu hohe tangentielle Zugspannungen oder zu Rissen an der Matrizeninnenfläche bedingt durch zu hohe tangentielle Druckspannungen führen [1]. Insbesondere bei nicht rotationssymmetrischen Matrizengravuren ist der Armierungsvorgang kritisch, da Spannungsspitzen Mikrorisse an der Matrizeninnenfläche zur Folge haben können [3]. Grundsätzlich ist das Armierungssystem so auszulegen, dass die Druckvorspannung auf den Matrizenkern so groß ist, dass im Umformprozess möglichst keine Zugspannungen in der Matrice auftreten [1].

Die Beanspruchungszustände für einfach und doppelt armierte Matrizen sind in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.

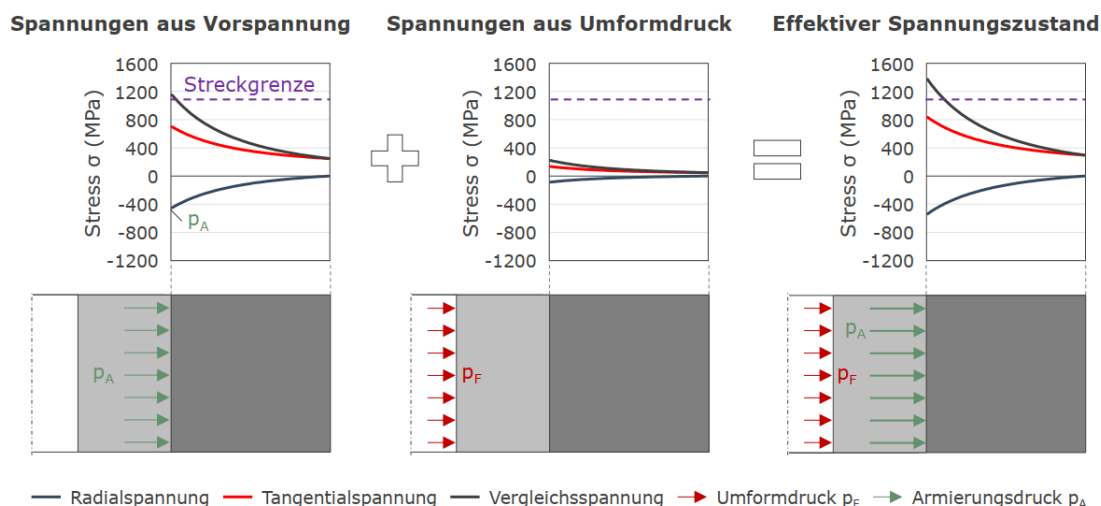


Abbildung 1: Beanspruchungszustand eines Einringsystems (einfach armierte Matrice)

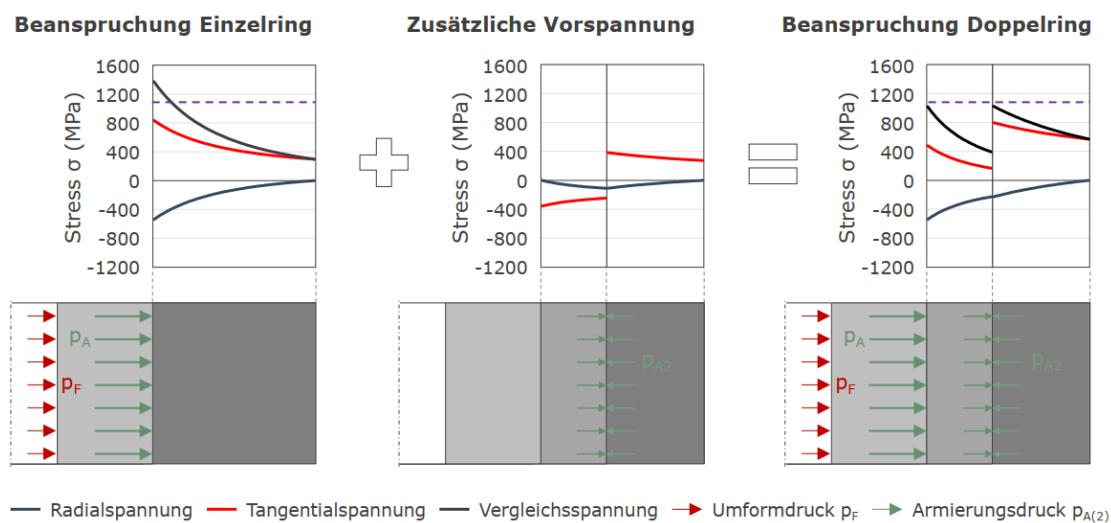


Abbildung 2: Beanspruchungszustand eines Doppelringsystems (zweifach armierte Matrice)

Monolithische Armierungsringe gelten als robust sowie zuverlässig und haben sich deshalb auch über Jahre in der industriellen Anwendung bewährt. Allerdings ist der Einsatz monolithischer Armierungsringe kostspielig und ihre Bauteilsteifigkeit begrenzt, die in der Regel bei 225 GPa liegt [4]. Diese Begrenzung resultiert aus den mechanischen Eigenschaften der verwendeten Stahlwerkstoffe, die bei höheren Belastungen oder höheren Anforderungen an die Bauteilsteifigkeit an ihre Grenzen stoßen.

Bandwickelarmierungen

Bandwickelarmierungen bestehen aus hochfesten Stahlblechen (meist Federstahl), die unter Vorspannung um die Matrize gewickelt werden. Diese Armierungen haben sich als sehr effektiv erwiesen, da sie eine höhere Vorspannung erzeugen können als monolithische Armierungsringe. Bandwickelarmierungen erlauben eine Steigerung der Bauteilsteifigkeit und der Belastbarkeit der Matrize, insbesondere bei höheren Innendrüken oberhalb 2.000 MPa. Zudem ermöglichen Bandwickelarmierungen es Matrizen mit höherfesten Werkstoffen zu verwenden und dabei gleichzeitig den Außendurchmesser des armierten Werkzeugsystems um 25 – 40 % zu reduzieren. Es kann durch Einsatz einer Bandarmierung der Innendruck im Prozess um 40 – 60 % erhöht werden, im Vergleich zu einer, mit einem monolithischen Armierungsring, konventionell vorgespannten Matrize mit vergleichbarem Außendurchmesser. Zwischen Matrizenkern und Bandwickelarmierung wird meist ein Hartmetallzwischenring (E-Modul von ca. 410 GPa) eingesetzt, um damit einerseits die Auffederung der Matrize zu reduzieren und um ein wiederholtes Ein- und Auspressen der Matrizenkerne zu ermöglichen. Der Nachteil dieser Armierungen ist der hohe Materialaufwand, der zu erheblichen Kosten führt. Zudem sind Bandwickelarmierungen in Bezug auf die erreichbare Bauteilsteifigkeit ebenfalls begrenzt, da die Werkstoffeigenschaften der Stahlbänder oder Armierungsringe eine mechanische Obergrenze darstellen [2, 4].

1.2 Faserverbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe bestehen stets aus mindestens zwei verschiedenen Komponenten: einem Matrixwerkstoff und einem Verstärkungswerkstoff. Beide Komponenten erfüllen dabei unterschiedliche Funktionen. Der Matrixwerkstoff sorgt für die stoffliche Zusammenhalt des Verbundmaterials, indem er die einzelnen Phasen miteinander verbindet und gleichzeitig für zusätzliche Eigenschaften wie Zähigkeit, Wärmeleitfähigkeit oder Korrosionsbeständigkeit sorgt. Im Gegensatz dazu übernehmen die Verstärkungswerkstoffe den Großteil der mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs, insbesondere die Festigkeit und Steifigkeit [5].

Faserverbundwerkstoffe stellen die bedeutendste und industriell relevanteste Klasse von Verbundwerkstoffen dar. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass als Verstärkungswerkstoff Faserwerkstoffe eingesetzt werden. Die eingesetzten Faserwerkstoffe besitzen eine extrem hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit, weshalb Faserverbundwerkstoffe häufig für Leichtbauanwendungen verwendet werden. Übliche Faserwerkstoffe die zur Fertigung von Faserverbundwerkstoffen eingesetzt werden sind vor allem Glas- und Kohlefaser. Geringere Verwendung finden Aramid-, Bor-, Polyethylen- und Siliziumfasern. Einzelne Fasern haben meist einen runden Querschnitt und sind mit einem Durchmesser von ca. 10 µm. Einzelfasern lassen sich schwer handhaben, weshalb Fasern stets in verarbeiteter Form als Roving, Gewebe, Gelege,

Matte oder Prepreg vertrieben werden. Rovings sind unidirektionale Faserbündel, die nicht versponnen sind und einen Durchmesser von etwa 1,0 mm aufweisen. Matten bestehen aus gepressten, unverwebten Fasern, deren Orientierung zufällig ist. Gelege setzen sich aus Rovings zusammen, die durch dünne Fäden in einer oder mehreren Lagen miteinander verbunden sind. Gewebe stellen eine textile Struktur dar, bei der Faserbündel miteinander verwebt sind, und zählen zu den wichtigsten textilen Halbzeugen. Prepregs sind eine besondere Handelsform von Faserwerkstoffen. Es handelt sich um Gewebe oder Gelege die mit einem Duroplast-Harz vorimprägniert sind und ein optimiertes Harz-Faser-Verhältnis aufweisen [5–7]

Tabelle 2: Zugfestigkeit verschiedener Fasermaterialien bei 20 °C [6]

Faserwerkstoff	Zugfestigkeit R_m [GPa]	E-Modul [GPa]	Dichte ρ [g/cm ³]
Sodaglas	4,6	98	2,5
Kieselglas	10,0	105	2,5
Bor	10,0	550	2,3
Stahl mit 0,9 Gew.-% C	5,0	210	7,9
Wolfram	5,5	360	19,3
Kohle	5,0	525	1,8
Aramid	3,0	125	1,4

Als Matrixwerkstoff für Faserverbundwerkstoffe werden hauptsächlich Kunststoffe eingesetzt. Es existieren zudem Faserverstärkte Keramiken und Faserverstärkte Metalle (Metall-Matrix-Composites).

1.3 Bisherige nationale und internationale Forschung zu Armierungssystemen

1.3.1 Patent für eine Faserarmierung (Fa. Felss Systems GmbH)

Am 09.08.2017 wurde durch die Firma Felss Systems GmbH eine Patentanmeldung beim Europäischen Patentamt eingereicht, um eine neue Erfindung zu beschreiben. Der offizielle Hinweis auf die Patenterteilung wurde am 09.10.2019 veröffentlicht. In der Erfindung wird eine innovative Umformmatrize für das Druckumformen von Werkstücken beschrieben, die mit einem Armierungskörper aus faserverstärktem Kunststoff ausgestattet ist. Durch diesen Armierungskörper wird eine hohe Lastaufnahmefähigkeit mit geringem Volumen und Gewicht kombiniert, wodurch eine platzsparende Installation an Umformmaschinen ermöglicht wird. Zudem wird der Umgang, insbesondere beim Werkzeugwechsel, durch die reduzierte Masse erleichtert, während die Kosten im Vergleich zu herkömmlichen Umformmatrizen gesenkt werden. Die Kernarmierung besteht aus einer Kunststoffmatrix mit eingebetteter Verstärkungsfaserverstruktur und umschließt den Matrizenkern vollständig in Umfangsrichtung entlang der Arbeitsbewegungsachse. Sie ist radial vorgespannt, um Verformungen durch die während des Umformprozesses auftretenden Radialkräfte zu verhindern [8].

Das Herstellungsverfahren der Umformmatrize basiert auf zwei Ansätzen. Im ersten Ansatz wird der faserverstärkte Kunststoff im noch nicht ausgehärteten Zustand auf die Außenseite des Matrizenkerns aufgebracht. Der Matrizenkern befindet sich in einem vorgespannten Zustand, wodurch sich der Kernquerschnitt verkleinert. Nach dem Aushärten erfolgt eine Vergrößerung des Kernquerschnitts, wodurch eine radiale Vorspannung der Armierung gegen den Kern erzeugt wird. Dieser Ansatz ermöglicht eine präzise Anpassung sowie eine dauerhafte Haftung der Armierung. Beim zweiten Ansatz wird der Armierungskörper als bereits ausgehärteter

Hohlkörper mit einer Kernaufnahme für den Matrizenkern gefertigt. Der Kern wird durch eine Kernaufnahmeöffnung eingeführt, und durch eine abschließende Querschnittsverkleinerung des Armierungskörpers wird die erforderliche radiale Vorspannung erzeugt. Beide Verfahren gewährleisten eine stabile Verbindung zwischen Kern und Armierung und stellen sicher, dass die Umformmatrize selbst hohen mechanischen Belastungen standhält [8].

Das Patent wurde inzwischen zurückgezogen, und es gibt keine Veröffentlichung seitens Felss über eine experimentelle Umsetzung dieser Idee.

1.3.2 Fallstudie der Ege Universität, Izmir, Türkei

In einer Studie der Ege Universität in Izmir, Türkei wurden Kohlefaser-Verbundwerkstoffe (Tenax-E IMS65 und Tenax-J UMS40) anstelle des herkömmlichen Werkzeugstahls (H13) als Armierungswerkstoff eingesetzt, um erhöhte Druckspannungen auf die Oberfläche der Matrize auszuüben. Der Vergleich der Werkzeuglebensdauer zwischen konventionell armierten Matrizen und solchen mit Verbundwerkstoffarmierung bei der Kaltumformung eines Bolzens zeigte durch den Einsatz der Verbundwerkstoffe eine signifikante Verbesserung [9].

Numerische Analysen der Kaltumformung mithilfe der Programme ABAQUS und SIMUF-ACT wurden durchgeführt, um die optimale Faserausrichtung für industrielle Anwendungen zu bestimmen. Dabei wurde eine Orientierung von $[90/\pm 45/\pm 15/90]_n$ als optimal ermittelt. Die Herstellung der Verbundwerkstoffarmierung erfolgte mittels des Filamentwickelverfahrens (siehe Abbildung 3), bei dem Fasern auf einen Dorn aufgewickelt und zuvor in erhitztes Harz getaucht wurden. Durch Anpassung des Wicklungswinkels konnten die gewünschten mechanischen Eigenschaften der faserverstärkten Verbundwerkstoffe gezielt eingestellt werden.

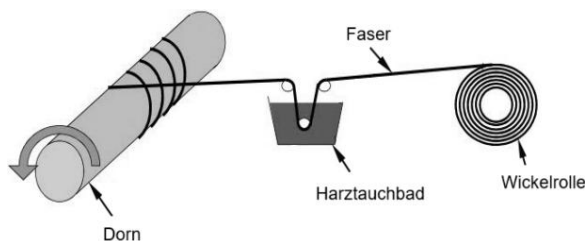


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Filamentwickelverfahrens [9]

Der Produktionsprozess wurde durch das Aufbringen einer ausreichenden Anzahl von Fasern abgeschlossen, gefolgt von einem Trocknungs- oder Aushärtungsprozess, der entweder bei Raumtemperatur oder in Öfen bei höheren Temperaturen durchgeführt wurde. Diese Methode erwies sich als wirtschaftlich effizient und ermöglichte eine präzise Kontrolle der Harzmenge sowie eine gezielte Anpassung der Faserausrichtung in jeder Schicht, um die mechanische Festigkeit in den gewünschten Richtungen zu optimieren [10, 11].

Vor dem Einsatz der Verbundwerkstoffmatrizen wurde die Lebensdauer herkömmlicher Matrizen untersucht und mit etwa 500.000 geformten Teilen pro Matrize bestimmt. Die experimentelle Untersuchung ergab, dass die Matrize mit Armierungsringsen aus UMS40 die höchste Werkzeuglebensdauer aufwies, wobei ein Versagen durch Faserbruch nach 625.000 geformten Teilen beobachtet wurde. Dies entspricht einer um 25 % verlängerten Lebensdauer im Vergleich zu herkömmlichen Stahlarmierungen. Während des Umformprozesses wurde ein Teil der Verformungsenergie in Wärme umgewandelt, was zu einem Temperaturanstieg im Material

führte. Infolgedessen wurde die Glasübergangstemperatur des Harzes während des Kaltumformens überschritten, wodurch Abrasionen an der Oberfläche der Kohlefaserarmierung entstanden. Dies führte zu Verformungen der Matrize, die letztlich zu einem Nachlassen des Übermaßes und schließlich zu ihrem Versagen beitrugen. [9]

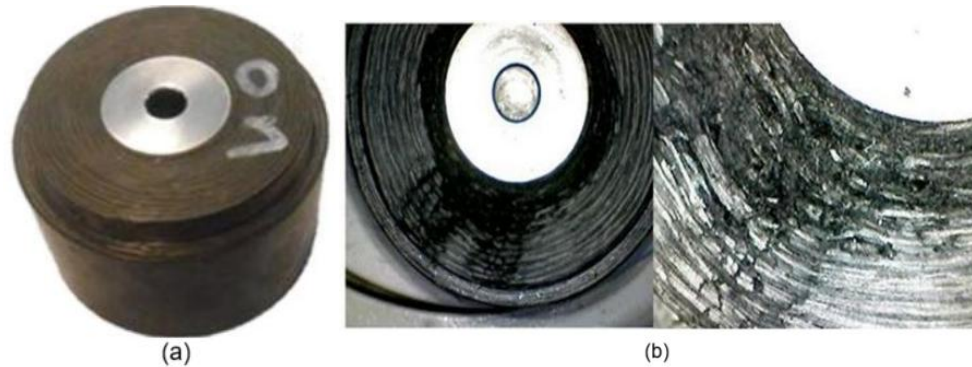


Abbildung 4: Faserarmierung der Ege Universität aus UMS40 Karbonfasern, a) vor Dauerlaufuntersuchung, b) nach Dauerlaufuntersuchung mit Detailansicht vom Versagensbild

2 Zielsetzung und Motivation

Konventionelle Armierungssysteme, die in der Umformtechnik zur Steigerung der Belastbarkeit von Matrizen eingesetzt werden, stoßen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit an physikalische Grenzen. Die Effizienz dieser Systeme hängt maßgeblich vom verwendeten Werkstoff des Armierungsrings sowie dessen Steifigkeit ab. In der industriellen Praxis kommen hierfür nahezu ausschließlich hochfeste Stähle wie 1.2379, 1.2369, 1.2767 oder 1.3343 zum Einsatz. Diese Stähle sind jedoch durch ihren Elastizitätsmodul von etwa 210.000 MPa limitiert und bieten somit nur begrenzte Möglichkeiten zur weiteren Leistungssteigerung.

Aufgrund steigender Anforderungen an die Bauteilgenauigkeit umformtechnisch hergestellter Bauteile sowie wachsender Umweltauflagen, insbesondere hinsichtlich der CO₂-Emissionen, besteht die Notwendigkeit, bestehende Armierungssysteme weiterzuentwickeln. Eine Leistungssteigerung kann in diesem Anwendungsfall primär durch den Einsatz von Werkstoffen mit einer höheren Steifigkeit realisiert werden. Moderne faserverstärkte Verbundwerkstoffe auf Basis von Glas- oder Kohlenstofffasern bieten hier entscheidende Vorteile, da sie über deutlich höhere mechanische Eigenschaften verfügen. Verfügbare Faserwerkstoffe erreichen Zugfestigkeiten von bis zu 6.000 MPa sowie Elastizitätsmoduli von bis zu 900 GPa und stellen damit eine vielversprechende Alternative zu Stahl dar.

Vor diesem Hintergrund soll am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart ein neuartiges Armierungssystem auf Basis von Faserverbundwerkstoffen entwickelt und experimentell untersucht werden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit sollen verschiedene Faserarten, geeignete Herstellungsverfahren zur Fertigung eines Armierungsrings aus Faserverbundwerkstoffen sowie unterschiedliche Fügeverfahren systematisch analysiert und bewertet werden. In experimentellen Armierungsversuchen sollen die unterschiedlichen Armierungssysteme aus Faserverbundwerkstoff erprobt werden. Die experimentellen Ergebnisse werden abschließend mit einer baugleichen, konventionellen Stahlarmierung verglichen. Dieser Vergleich ermöglicht

eine quantitative Beurteilung der Leistungsänderung bzw. Leistungssteigerung des neu entwickelten Armierungssystems aus Faserverbundwerkstoffen und liefert wertvolle Erkenntnisse für zukünftige industrielle Anwendungen.

3 Konzeption des Faserarmierungsringes

3.1 Konzept: Aufbau und Vorspannung des Faserarmierungsringes

Die Entwicklung des Faserarmierungsringes wurde mit der systematischen Erarbeitung einer Anforderungsliste begonnen. Diese diente als Grundlage für die Auswahl geeigneter Materialien sowie für die konstruktive Gestaltung des Armierungsringes. Die Anforderungen an den Faserverbundwerkstoff in dieser speziellen Anwendung wurden aus mechanischen, thermischen, fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten abgeleitet.

3.1.1 Anforderungsliste an den Armierungsring aus Faserverbundwerkstoff:

1. Mechanische Eigenschaften

- Faser mit hoher Zugfestigkeit (von mind. 2.500 MPa) um Belastungsspitzen beim Fügevorgang oder während des Umformprozesses ohne Versagen ertragen zu können
- Erhöhte Steifigkeit im Vergleich zu Stahlarmierungen. Der Faserverbundwerkstoff sollte ein Elastizitätsmodul aufweisen, das mindestens doppelt so hoch ist wie das von Stahl, um eine erhöhte Steifigkeit zu gewährleisten.
- Hohe Dauerfestigkeit von mind. 50% von R_m

2. Thermische Stabilität

- Eine hohe Temperaturbeständigkeit wird vorausgesetzt, um thermische Materialdegradation zu vermeiden.
- Eine geringe thermische Ausdehnung wird benötigt, um zusätzliche Spannungen im Betrieb zu reduzieren.

3. Fertigungstechnische Anforderungen

- Eine homogene Faser-Matrix-Verbindung ist zu gewährleisten.
- Eine wirtschaftliche Fertigung wird angestrebt.
- Ein maximaler Faservolumengehalt wird angestrebt.
- Gute fertigungstechnische Verarbeitbarkeit, um bspw. hochpräzise Zentrierflächen mit kleinen Fertigungstoleranzen realisieren zu können.

4. Wiederverwendbarkeit

- Der Faserarmierungsring muss mehrfach ein- und ausgepresst werden können, ohne strukturelle Schäden zu erleiden.
- Eine hohe Verschleißbeständigkeit der Oberflächen ist erforderlich, um eine langlebige Nutzung zu ermöglichen.

5. Kleiner Bauraum

- Die Geometrie des Armierungsrings muss optimiert werden, um eine Integration in kompakte Baugruppen zu ermöglichen.

6. Niedrige Kosten

- Wirtschaftliche Rohstoffe und effiziente Fertigungsmethoden sind auszuwählen.
- Der Material- und Produktionsaufwand muss reduziert werden, um die Gesamtkosten zu senken.

3.1.2 Auswahl von Faser und Matrixwerkstoff

Seit Beginn der Studie wurde eine enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart sowie der Firma Crosslink-Murtfeldt Composites GmbH & Co. KG gepflegt. Die Auswahl der Werkstoffkombination für den Faserverbundwerkstoff erfolgte in enger Abstimmung mit diesen Partnern.

Unter Berücksichtigung von Abbildung 5 zeigt sich, dass Glas- und Kohlenstofffasern erheblich höhere mechanische Eigenschaften als Stahl aufweisen können. Aufgrund der guten Verarbeitbarkeit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit wurde eine UHM/UHS-Faserwerkstoff aus Pech ausgewählt. Diese Pechfaser besitzt ein E-Modul von 620 GPa und eine Zugfestigkeit von 3.430 MPa.

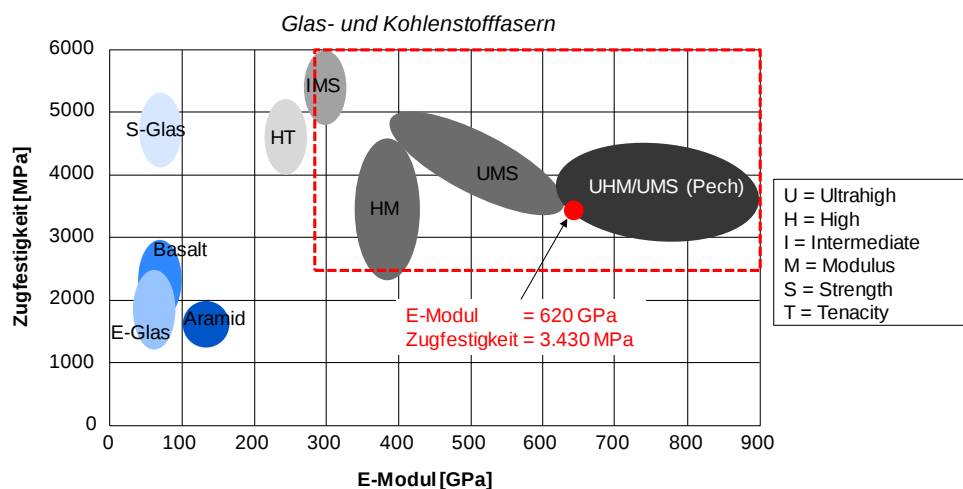


Abbildung 5: Mechanische Eigenschaften von Glas- und Kohlenstofffasern im Überblick

Als Matrixwerkstoff wurde ein duromeres Epoxidharz bestimmt. Die Firma Crosslink Murtfeldt Composites bietet verschiedene Matrixmaterialien an, darunter Epoxidharze, UP-Harze und Phenolharze. Für diese Anwendung wurde ein Epoxidharz gewählt, das durch seine hervorragenden mechanischen Eigenschaften, geringe Schrumpfung während der Aushärtung und exzellente Klebeeigenschaften überzeugt. Diese Eigenschaften sind entscheidend für die Herstellung von hochbelastbaren Faserverbundbauteilen.

3.1.3 Fügetechnik zum Armieren

Das Fügen sowie die Fügereihenfolge zwischen Matrize und Armierungssystem können die Vorspannung und den Spannungszustand des Armierungsverbunds erheblich beeinflussen.

Eine ungleichmäßige Verteilung der Vorspannung oder die Entstehung von Spannungsspitzen können die mechanischen Eigenschaften des gesamten Systems beeinträchtigen und zu einer verringerten Lebensdauer des Werkzeugs führen. Je nach angewandter Fügemethodik können außerdem Spannungskonzentrationen in den Werkzeugkomponenten entstehen, die insbesondere bei einer derartigen Neuentwicklung zu einem vorzeitigen Versagen führen können.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Studie zwei verschiedene Fügekonzepte in Betracht gezogen, die in Abbildung 6 dargestellt sind. Das erste Konzept orientiert sich an konventionellen Armierungssystemen und nutzt einen mechanischen Fügevorgang über eine kegelförmige Fügefläche mit Übermaß. Dieses Verfahren gewährleistet eine präzise Passung, kann jedoch zu lokalen Spannungen führen, die die Langzeitstabilität des Armierungsverbunds beeinträchtigen. Zudem ist es bei dieser Variante erforderlich eine Faserarmierung mit kegeliger Innenfläche fertigungstechnisch umzusetzen.

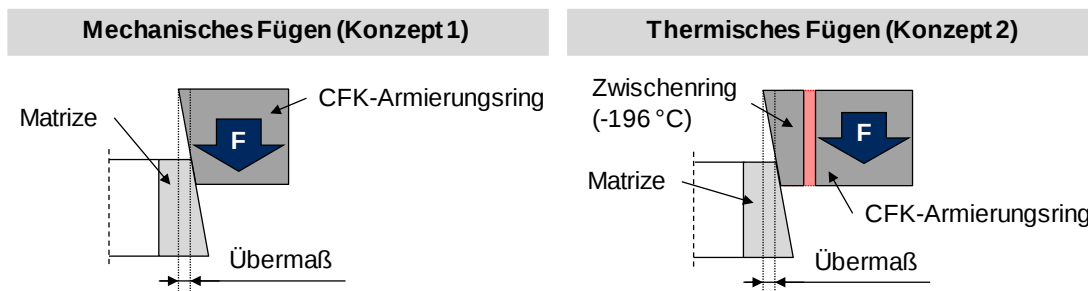


Abbildung 6: Prinzipielle Darstellung der zwei Konzepte zum Fügen des Faserarmierungsringes

Das zweite Konzept basiert auf dem thermischen Fügen eines Zwischenrings aus Werkzeugstahl, der eine kegelartige Innenfläche aufweist. Dies ermöglicht die Herstellung einer Faserarmierung mit einer zylindrischen Innen- und Außenkontur. Die daraus resultierenden Vorteile liegen in einer besseren Fertigungsgenauigkeit sowie in wirtschaftlichen und fertigungstechnischen Aspekten, da der Armierungsring effizienter gefertigt werden kann. Darüber hinaus bietet dieses Konzept den Vorteil, dass der Faserarmierungsring bei Bedarf durch ein- und auspressen von Matrizen wiederverwendet werden kann.

Beide Konzepte wurden im Rahmen der Studie umgesetzt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die mechanische Leistung und die Fertigungseffizienz untersucht.

3.2 Fertigung der Armierungsringe aus Faserverbundwerkstoff

3.2.1 Faserarmierung mit kegeliger Innenkontur

Die Fertigung des Armierungsringes mit kegeliger Innenkontur erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart. Für diesen Fertigungsprozess wurde ein Dorn aus Stahl entwickelt, der eine kegelige Fläche zum Aufwickeln der Fasern bietet. Die stirnseitigen Enden der Dornfläche wurden mit Kunststoffkappen abgeschlossen, um eine stabile und präzise Wicklung zu gewährleisten.

Das Aufwickeln erfolgte mit vorimprägnierten Fasern, sogenannten TPregs, die am Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart entwickelt wurden. Bei dem verwendeten Faserwerkstoff handelte es sich um hochmodulige Kohlefasern (Tenax), die eine hohe Festigkeit und Steifig-

keit aufwiesen, um den Anforderungen an die Armierung gerecht zu werden. Der Matrixwerkstoff bestand aus einem 2-Komponenten Epoxidharz, das für seine exzellenten mechanischen Eigenschaften und seine Eignung in Faserverbundsystemen bekannt ist.

Der Wickelprozess wurde an einer Drehbank durchgeführt, wobei der Dorn in Rotation versetzt wurde, um eine gleichmäßige und kontrollierte Wicklung der Fasern zu gewährleisten. Dieser Prozess ist in Abbildung 7 c) dargestellt. Vor dem Aufwickeln wurde der Wickeldorn (siehe Abbildung 7 a)) mit einem Trennmittel besprüht und die Kunststoffkappen montiert. Das Aufwickeln erfolgte manuell unter Aufbringung einer leichten Vorspannung auf das Faserbündel. Nach Abschluss des Wickelprozesses wurde das Werkstück bei einer Temperatur von 60 °C für 12 h ausgelagert und nachfolgend bei 110 °C für 12 h getempert. Das ausgehärtete Bauteil wurde im letzten Fertigungsschritt spanend nachbearbeitet, um die maßlichen Vorgaben zu erfüllen.

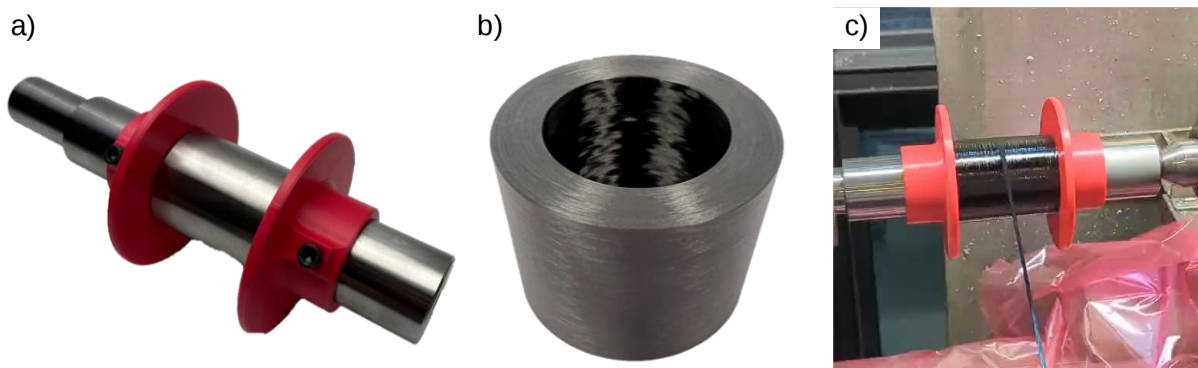


Abbildung 7: a) Wickeldorn mit Kunststoffkappen, b) finaler Faserarmierungsring, c) Wickelprozess auf einer Drehbank am Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart

Der finale Armierungsring mit kegeliger Innenkontur ist in Abbildung 7 b) zu erkennen. Die Herstellung des Armierungsrings verursachte Kosten in Höhe von etwa 250 €. Die technischen Zeichnungen des kegeligen Armierungsrings aus Faserverbundwerkstoff sowie des Dorns zum Wickeln der Fasern sind dem Anhang beigelegt (siehe Kapitel 7.1, Abbildung 20).

3.2.2 Faserarmierung mit zylindrischer Innenkontur

Der Armierungsring mit zylindrischer Innenkontur wurde von der Firma Crosslink Murtfeldt Composites GmbH gefertigt. Die Auswahl sowohl des Faser- als auch des Matrixwerkstoffs erfolgte in enger Abstimmung mit dem externen Teilefertiger, um eine optimale Materialkombination hinsichtlich mechanischer Eigenschaften und thermischer Beständigkeit zu gewährleisten.

Als Faserwerkstoff wurde eine UHM/UHS-Pechfaser des Herstellers Nippon Graphite Fiber Corporation mit der Bezeichnung Granoc XN-60-60S verwendet. Für die Matrix empfahl Crosslink ein Epoxidharz, das sich durch hohe mechanische Eigenschaften und eine vergleichsweise hohe thermische Beständigkeit auszeichnet.

Die Fertigung des Armierungsrings erfolgte mittels Pultrusion, einem kontinuierlichen Herstellungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffe. Dabei werden die Fasern zunächst mit der flüssigen Harzmatrix benetzt und anschließend durch eine beheizte Form gezogen, in der die Aushärtung erfolgt.

In diesem spezifischen Prozess wurden die harzgetränkten Fasern auf einen zylindrischen Stahlkern unter einem Winkel von 1° radial aufgewickelt. Anschließend erfolgte die Aushärtung in einem Ofen, wobei das Bauteil weiterhin auf dem Dorn verblieb, um die gewünschte Formstabilität sicherzustellen. Nach der vollständigen Aushärtung wurde das dickwandige CFK-Rohr in sechs Segmente zerlegt, sodass jede Einheit eine eigenständige Faserarmierung darstellt.

Für eine präzise Passform wurden die ausgehärteten CFK-Faserarmierungen innen und außen durch Rundschleifen nachbearbeitet. Die Kosten für diese Fertigungsverfahren setzen sich wie folgt zusammen:

- Wickeldorn (einmalige Kosten): 483 €
- CFK-Armierungsring: 96 €
- Eine Charge (6 CFK-Armierungsringe): 576 €

Der zugehörige Zwischenring mit kegelförmiger Innenkontur, welcher für die Faserarmierungsvariante erforderlich ist (siehe Abbildung 6, Thermisches Fügen), wurde bei dem externen Teilefertiger I. Penkert Metallbearbeitungs GmbH gefertigt.

Die technischen Zeichnungen der Faserarmierung und des Zwischenrings sind dem Anhang beigelegt (siehe Kapitel 7.1).

4 Experimentelle Versuchsergebnisse

4.1 Erste experimentelle Armierungsversuche

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit beider Faserarmierungen wurden experimentelle Armierungsversuche durchgeführt. Dabei wurde eine Matrize zum Voll-Vorwärts-Fließpressen jeweils basierend auf beiden vorgestellten Konzepten (siehe Abbildung 8) in die Faserarmierungsringe eingepresst.

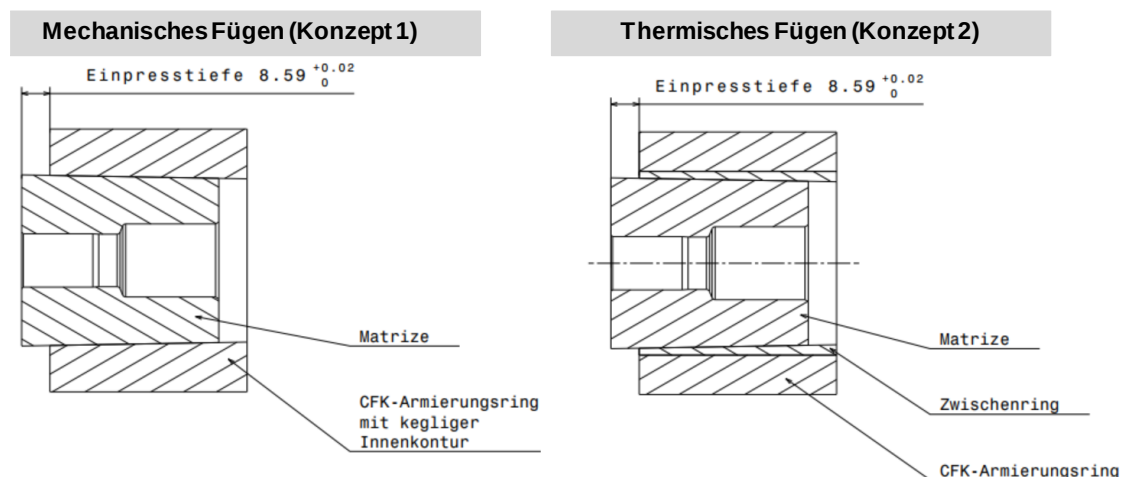


Abbildung 8: Faserarmierung vor dem Einpressen der Matrize, links: Konzept 1, rechts: Konzept 2

Die Erfassung der Vorspannung des Matrizenkerns erfolgte durch Konturmessungen am Innen- und Außendurchmesser des Gesamtsystems vor und nach dem Einpressen. Dazu wurden der Innendurchmesser der Matrize sowie der Außendurchmesser der Faserarmierung vermessen. Für beide Konzepte wurde ein Übermaß von 0,3 mm auf den Durchmesser gewählt, was einer

Vorspannung von 6 ‰ entspricht. Das Einpressen der Matrize erfolgte unter kontrollierten Bedingungen auf einer hydraulischen Werkstattpresse.

Das Versuchsergebnis war für beide Varianten identisch: Die durch das Einpressen erzeugte Vorspannung führte zu einem Längsriss in der Faserarmierung, welcher auf zu hohe tangential Zugspannungen zurückzuführen ist.

4.2 Anpassung der Versuchsdurchführung

Aufgrund des Versagens beider Faserarmierungen im Armierungsversuch wurde die Versuchsdurchführung angepasst und fortgesetzt. Besonders vielversprechend erwies sich Konzept 2, da es durch die Integration eines Zwischenrings aus der Stahllegierung 1.2343 die Möglichkeit bietet, die Matrize kontrolliert ein- und auszupressen. Durch diese Modifikation kann die Faserarmierung bei Ersatz der Matrize einfach wiederverwendet werden.

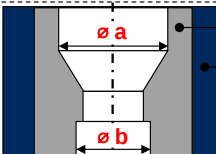
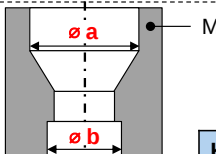
Die Herstellung der Faserarmierung mit zylindrischer Innenkontur für das Konzept 2 erfolgte durch einen spezialisierten Hersteller für Kompositbauteile (Fa. Crosslinkt Murtfeldt), der hochpräzise Fertigungstechnologien anwendet und strenge Qualitätsanforderungen erfüllt. Durch diese Maßnahme kann eine gleichbleibende Bauteilqualität sichergestellt werden. Beim am Institut für Flugzeugbau angewandten Herstellungsverfahren zur Fertigung der Faserarmierung für Konzept 1 bestehen hingegen noch Optimierungspotenziale in Bezug auf die Prozessstabilität.

Aus diesem Grund wurde die Versuchsdurchführung unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte fortgesetzt:

- Das Haftmaß wurde von 0,3 mm (auf den Durchmesser) auf 0,1 mm (entspricht 2 ‰) und 0,2 mm (entspricht 4 ‰) angepasst.
- Eine Referenzarmierung aus der Stahllegierung 1.2343 mit identischen Dimensionen und einem Haftmaß von 0,2 mm wurde aufgebaut.
- Die Armierungsversuche wurden mit den angepassten Haftmaßen sowie der Referenzarmierung erneut durchgeführt.

4.3 Experimentelle Armierungsversuche mit reduziertem Haftmaß

Im zweiten Armierungsversuch konnte ein erfolgreiches Einpressen der Matrizen bei allen Varianten an Armierungssystemen erreicht werden. Die Messergebnisse der Innenkonturen der Matrizen vor und nach dem Einpressen in die jeweiligen Armierungsvarianten sind in Abbildung 9 zusammengestellt. Es erfolgte eine Messung mittels eines Koordinatenmessgeräts an zwei verschiedenen Innendurchmessern der Matrize, wobei die Messpunkte in der Höhe also entlang der Matrizenachse auf jeweils 3 Positionen variiert wurden. Anhand der finalen Ergebnisse aus Abbildung 9 lässt sich entnehmen, dass die konventionelle Armierung aus Werkzeugstahl 1.2343 im zweiten Armierungsversuch die höchste Vorspannung erzielt hat. Während die konventionelle Armierung eine Vorspannung der Matrize um 0,054 mm am großen Durchmesser und um 0,036 mm am kleinen Durchmesser erzielen konnte, erreichte die Faserarmierung mit gleichem Haftmaß (0,2 mm) lediglich die Hälfte dieser Vorspannleistung. Zudem erreichte die Faserarmierung bei einem Haftmaß von 0,1 mm nur 10 % der Vorspannleistung der konventionellen Armierung.

Vermessung der Matrice eingepresst					Vermessung der Matrice auspresst				
		Matrize Armierung					Matrize		
ø a [mm]	1.	Konv.-0,2	CFK-0,1	CFK-0,2	ø a [mm]	1.	Konv.-0,2	CFK-0,1	CFK-0,2
	2.	22,238	22,243	22,248		2.	22,291	22,249	22,278
	3.	22,232	22,241	22,246		3.	22,288	22,247	22,278
	1.	22,233	22,243	22,245		1.	22,287	22,250	22,276
	2.	16,256	16,25	16,259		2.	16,293	16,254	16,272
	3.	16,261	16,249	16,255		3.	16,297	16,254	16,276
ø b [mm]	1.	16,264	16,249	16,256	ø b [mm]	1.	16,299	16,254	16,276
					</				

4.4 Adaption des Faserarmierungssystems

Zur Verbesserung der Vorspannleistung der Faserarmierung wurde eine axiale Vorspannung durch Verschraubung zwischen zwei Deckplatten aus Werkzeugstahl implementiert (siehe Abbildung 11 a)). Die Deckplatten stehen ausschließlich in Kontakt mit der Faserarmierung und werden mittels zwölf M10-Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 verschraubt. Durch diese Konstruktion soll die Höhenzunahme der Faserarmierung beim Einpressen der Matrize kompensiert bzw. reduziert werden. Es wurde lediglich die Variante der Faserarmierung mit einem Übermaß von 0,2 mm axial vorgespannt. Durch die axiale Vorspannung mit einer berechneten Vorspannkraft von ca. 200 kN verringerte sich der Innendurchmesser der Matrize, wodurch die ursprüngliche Einpresstiefe von 5,73 mm auf 6,62 mm erhöht wurde. Die Höhe des Faserarmierungsrings konnte durch diese Vorspannkraft um 0,5 mm reduziert werden. Ein Foto der vorgespannten Faserarmierung ist in Abbildung 11 b) dargestellt.

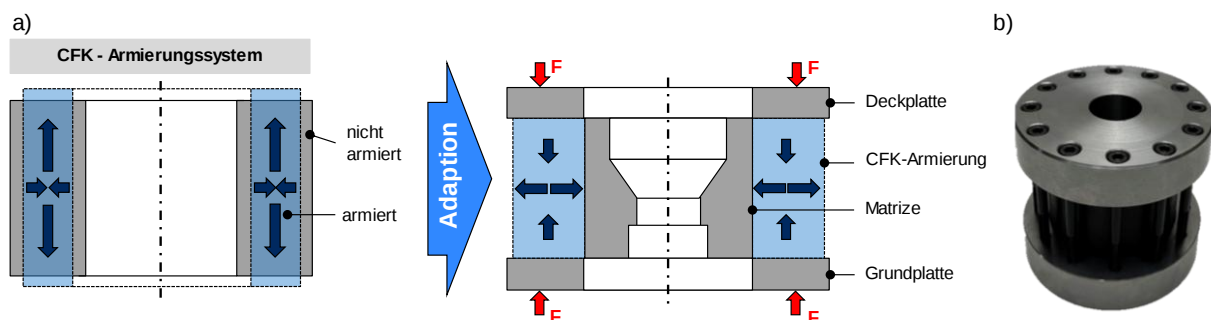


Abbildung 11: a) Adaption des Faserarmierungssystems durch eine axiale Verschraubung zwischen zwei Flanschen, b) vorgespanntes Faserarmierungssystem

4.5 Experimentelle Armierungsversuche mit axialer Vorspannung

Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein weiterer experimenteller Armierungsversuch mit der Faserarmierung bei einem Haftmaß von 0,2 mm durchgeführt. Zur Analyse der Einflüsse der axialen Vorspannung wurden erneut Messungen des Innendurchmessers der Matrize vor und nach dem Einpressen vorgenommen. Die Messungen erfolgten mit einem Koordinatenmessgerät an denselben Punkten wie in Kapitel 4.3 (siehe Abbildung 9). Die in Abbildung 12 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass die axiale Vorspannung des Faserarmierungsrings die Leistungsfähigkeit des Armierungssystems nur geringfügig steigern konnte. Durch die Vorspannung wurde an der Matrize eine Durchmesserreduktion von 0,037 mm am großen Durchmesser und 0,025 mm am kleinen Durchmesser erzielt. Im Vergleich zur nicht vorgespannten Variante derselben Faserarmierung führte die axiale Vorspannung zu einer Leistungssteigerung von 16 % am kleinen Durchmesser und 28 % am großen Durchmesser. Dennoch konnte das Leistungsniveau der Stahlarmierung nicht erreicht werden.

Der Grund, warum die axiale Vorspannung mittels Verschraubung keinen Erfolg hatte, liegt darin, dass das E-Modul der Schrauben deutlich niedriger ist als das der Faserarmierung,

wodurch die Schrauben unter Belastung stärker nachgeben und die aufgebrachte Vorspannkraft nicht effizient auf die Faserarmierung übertragen wird.

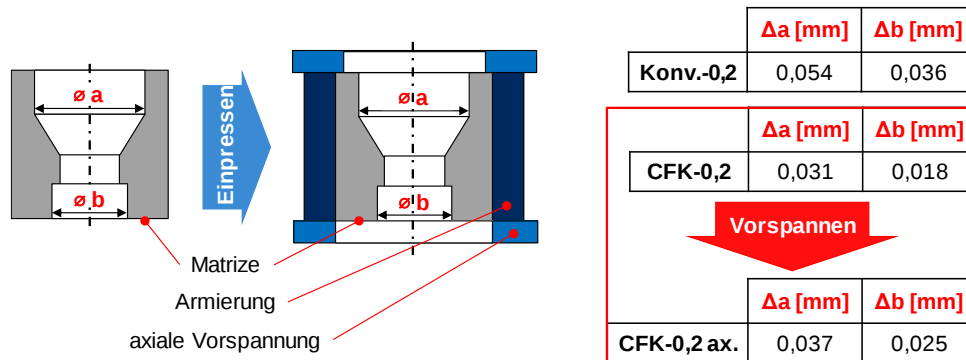


Abbildung 12: Änderung der Innendurchmesser der Matrice beim experimentellen Armierungsversuch mit axialer Vorspannung

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie beschäftigte sich mit der Entwicklung eines neuartigen Armierungssystems auf Basis von Faserverbundwerkstoffen, das für den Einsatz in der Massivumformung zur Steigerung der Belastbarkeit von Matrizen zum Kaltfließpressen konzipiert wurde. Konventionelle Armierungssysteme, die auf Stahllegierungen wie 1.2379, 1.2369, 1.2767 oder 1.3343 beruhten, stießen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit aufgrund des begrenzten Elastizitätsmoduls von etwa 210.000 MPa an physikalische Grenzen. Um diesen Einschränkungen entgegenzuwirken und den wachsenden Anforderungen an Bauteilgenauigkeit sowie Umweltauflagen gerecht zu werden, wurde der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen als vielversprechende Alternative in Betracht gezogen. Diese Werkstoffe, die insbesondere auf Glas- oder Kohlenstofffasern basierten, boten deutlich höhere mechanische Eigenschaften, mit Zugfestigkeiten bis zu 6.000 MPa und Elastizitätsmodulen von bis zu 900 GPa.

Das Ziel der Studie bildete die Entwicklung eines Faserarmierungsringes und die experimentelle Untersuchung seiner Leistungsfähigkeit. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden verschiedene Faserarten sowie geeignete Herstellungs- und Fügeverfahren für den Armierungsring systematisch analysiert. Als Materialkombination wurde eine UHM/UHS-Faser aus Pech gewählt, die mit einem Elastizitätsmodul von 620 GPa und einer Zugfestigkeit von 3.430 MPa eine hohe mechanische Leistungsfähigkeit aufwies. Diese Faser wurde mit einem Epoxidharz als Matrixmaterial kombiniert, das hervorragende mechanische Eigenschaften aufwies und eine geringe Schrumpfung während der Aushärtung zeigte.

Die Fertigung des Armierungsringes erfolgte in zwei Varianten:

1. Mechanischer Fügeprozess: Bei dieser Methode wurde eine kegelartige Innenfläche erzeugt, um den Armierungsring zu formen.
2. Thermisches Fügen: Hierbei wurde ein Zwischenring aus Werkzeugstahl verwendet, der eine zylindrische Innenkontur ermöglichte, was eine alternative Fertigungsoption darstellte.

Diese unterschiedlichen Fertigungsmethoden ermöglichten es, die Eigenschaften des Faserarmierungsringes unter verschiedenen Bedingungen zu testen und zu optimieren.

Die experimentellen Versuche zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Faserarmierungen ergaben, dass bei einem Übermaß von 0,3 mm auf den Durchmesser, was einer Vorspannung von 6 % entsprach, beide Armierungen versagten. Der Längsriss in der Faserarmierung wurde durch übermäßige tangentielle Zugspannungen verursacht. Aufgrund dieses Ergebnisses wurde das Haftmaß in den folgenden Versuchen auf 0,1 mm und 0,2 mm angepasst. Diese Anpassung führte zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Vorspannung der Matrizenkerne. Während die konventionelle Armierung aus Werkzeugstahl 1.2343 eine höhere Vorspannung erzielte, erreichte die Faserarmierung mit einem Haftmaß von 0,2 mm nur etwa die Hälfte der Vorspannleistung der Stahlarmierung.

Zur weiteren Optimierung wurde eine axiale Vorspannung durch Verschraubung des Armierungsrings zwischen zwei Deckplatten aus Werkzeugstahl eingeführt. Diese Maßnahme führte zu einer Reduzierung der Höhe des Armierungsrings und einer Verbesserung der Vorspannleistung, wobei die Matrizie eine höhere Einpresstiefe erreichte. Allerdings konnte auch hier das Leistungsniveau der Stahlarmierung nicht erreicht werden. Die axiale Vorspannung erwies sich als ineffizient, da das Elastizitätsmodul der verwendeten Schrauben deutlich niedriger war als das der Faserarmierung, was dazu führte, dass die aufgebrachte Vorspannkraft nicht effizient übertragen wurde.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das neue Faserarmierungssystem in Bezug auf die Steifigkeit und Wiederverwendbarkeit keine signifikanten Verbesserungen im Vergleich zu den konventionellen Stahlarmierungen erreichen konnte. Auch hinsichtlich der erzielten Vorspannkraft blieb die Faserarmierung hinter den konventionellen Systemen zurück. Die experimentellen Ergebnisse zeigten, dass die Faserarmierung die erwartete Leistungsfähigkeit nicht erreichte. Dennoch konnten methodisch wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, insbesondere in Bezug auf das atypische Deformationsverhalten der Faserarmierungsringe. Diese Erkenntnisse bieten wertvolle Ansatzpunkte für zukünftige Optimierungen in der Fertigung und Materialwahl, um die Leistungsfähigkeit der Faserarmierung weiter zu steigern.

6 Literaturverzeichnis

- [1] *Lange, K.*: Fließpressen – Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke. Springer, Berlin, 2008.
- [2] *Killmann, M.*: Grundlagen der Vorspannungstechnologie. STRECON A.S., Seminar: Vorspannen von Umformwerkzeugen, Erlangen, 2025.
- [3] *Killmann, M.; Merklein, M.*: Prestressing of cold forging tools for parts with functional elements. In: Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, Martin Stockinger (Hrsg.): XL. Colloquium on Metal Forming, XL. Colloquium on Metal Forming, 2022, S. 39-44.
- [4] *STRECON A.S. (Hrsg.)*: Datenblatt STRECON SC200plus - SC400plus, 2024.
- [5] *Arnold, B.; Kern, K.*: Werkstofftechnik für das Wirtschaftsingenieurwesen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2024.
- [6] *Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.*: Werkstoffe. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.

-
- [7] *Roos, E.; Maile, K.; Seidenfuß, M.: Werkstoffkunde für Ingenieure.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2022.
 - [8] Verfahren zur Herstellung einer Umformmatrize zum Druckumformen von Werkstücken. Erfinder: D. BEIHOFFER, T. LUTHER, M. MARRE, H. WAGNER UND W. MICHI. Anmeldung: 9. August 2017, EP 3441156 B1.
 - [9] *Yurtdaş, S.; İnce, U.; Kılıçaslan, C. et al.: A case study for improving tool life in cold forging: Carbon fiber composite reinforced dies. In: Research on Engineering Structures and Materials (2016).* <https://doi.org/10.17515/resm2016.24me2902>.
 - [10] *Shakelly, N.: Characterization of Carbon Fiber-Epoxy Composite Materials.* West Lafayette, Indiana, Purdue University, Master Thesis, 2020.
 - [11] *Strong, A.B.: Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications.* Society of Manufacturing Engineers, Publications Development Department, Reference Publications Division, 1989.

7 Anhang

7.1 Technische Zeichnungen

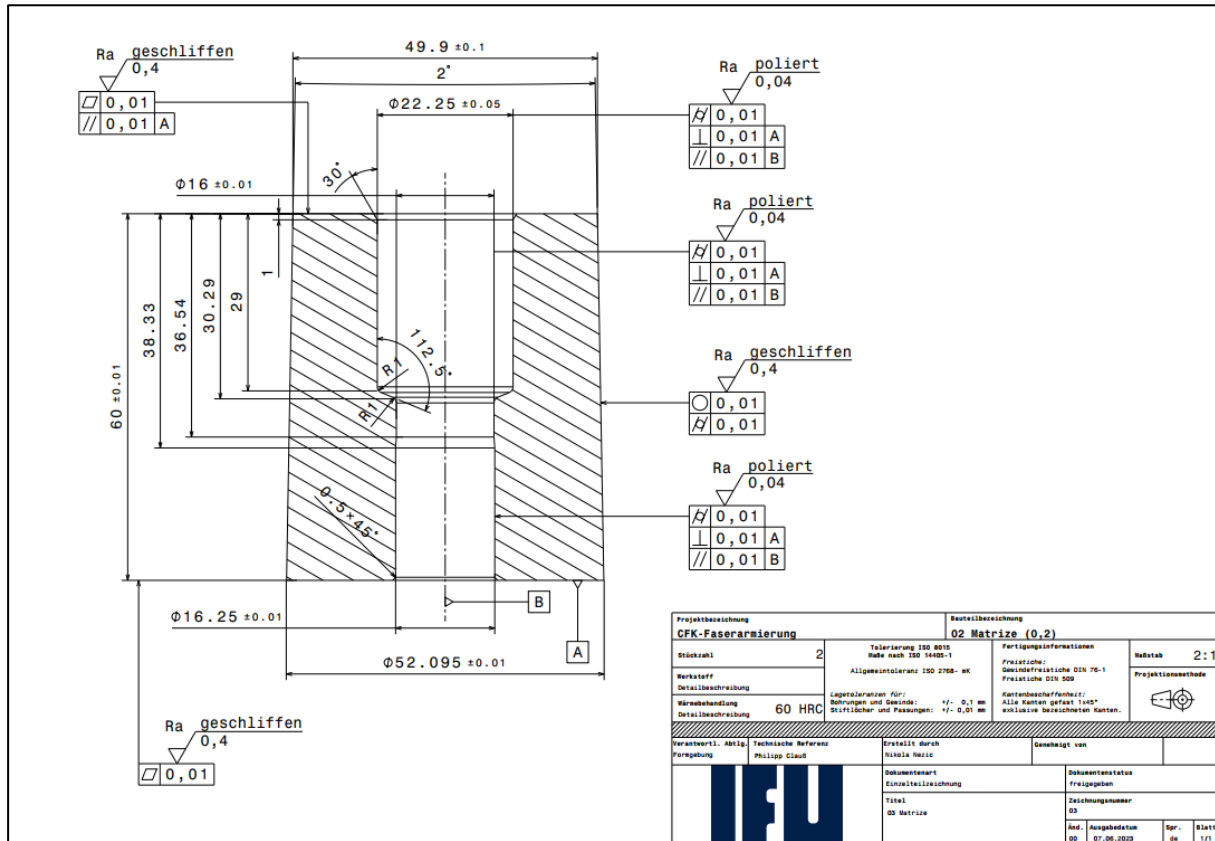
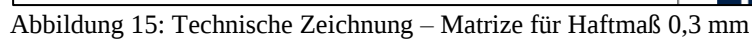
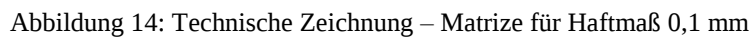


Abbildung 13: Technische Zeichnung – Matrice für Haftmaß 0,2 mm



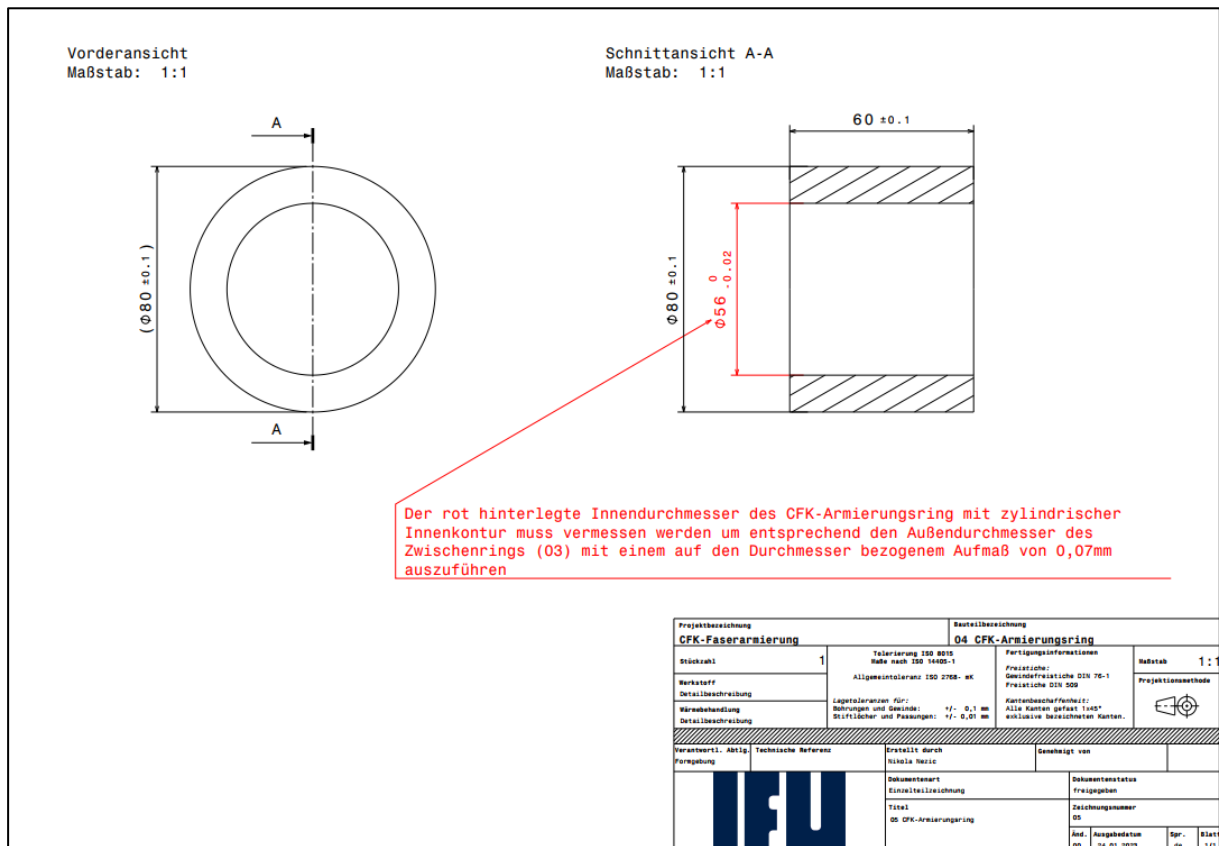


Abbildung 16: Technische Zeichnung – Faserarmierung mit zylindrischer Innenkontur

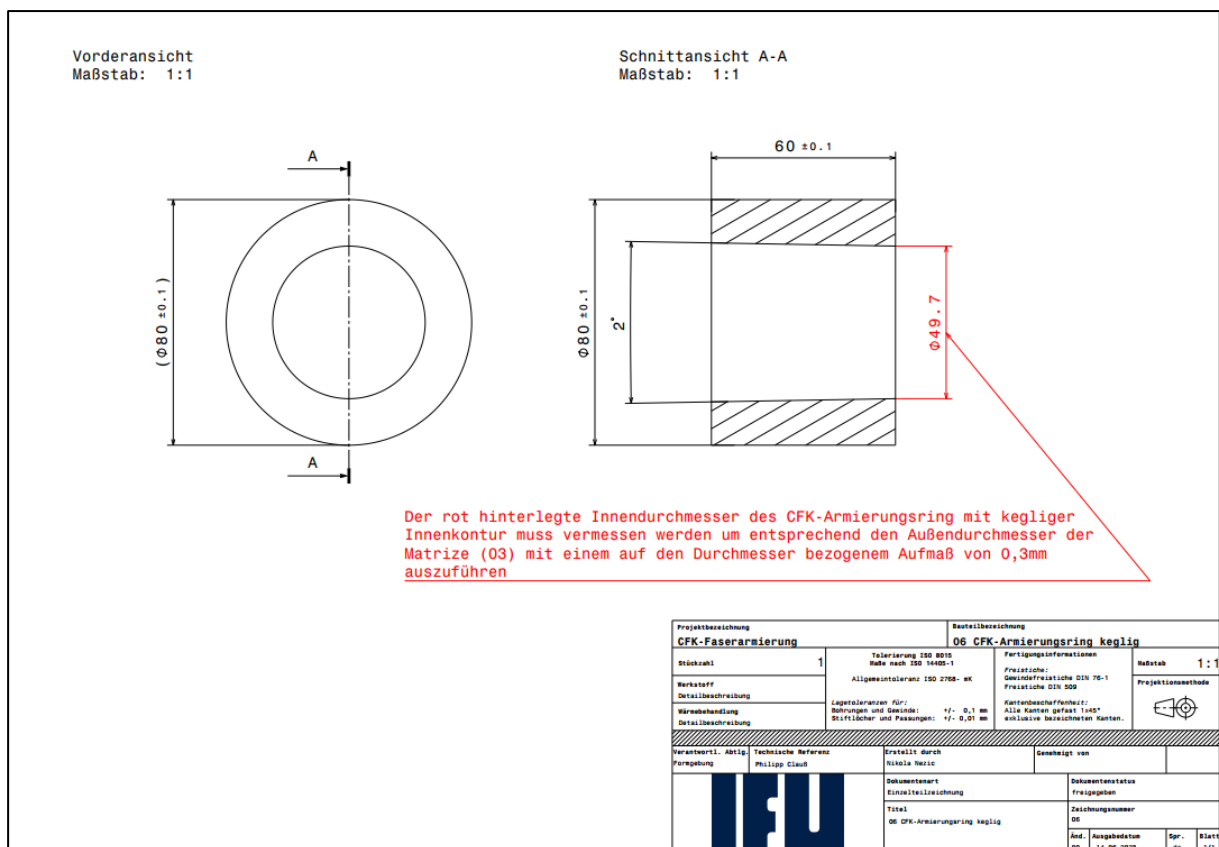


Abbildung 17: Technische Zeichnung – Faserarmierung mit keglicher Innenkontur

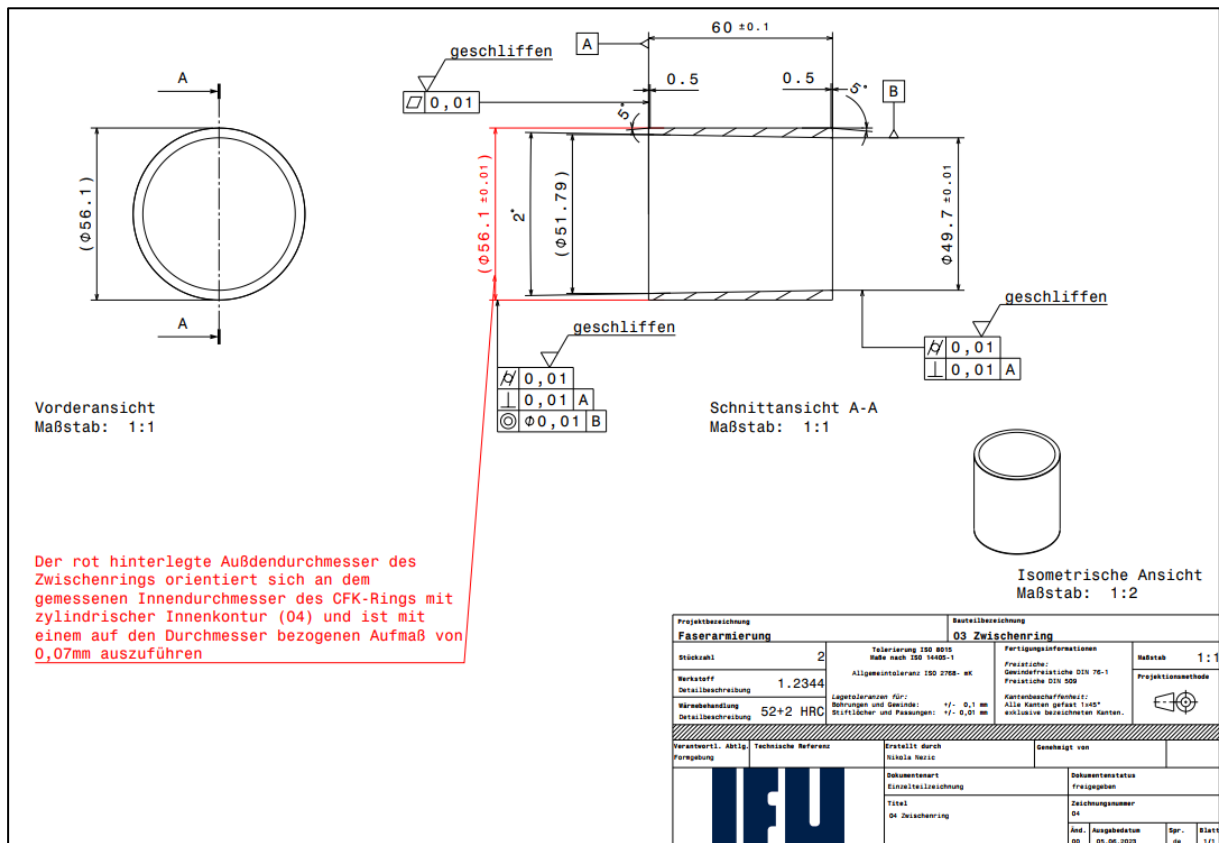


Abbildung 18: Technische Zeichnung – Zwischenring

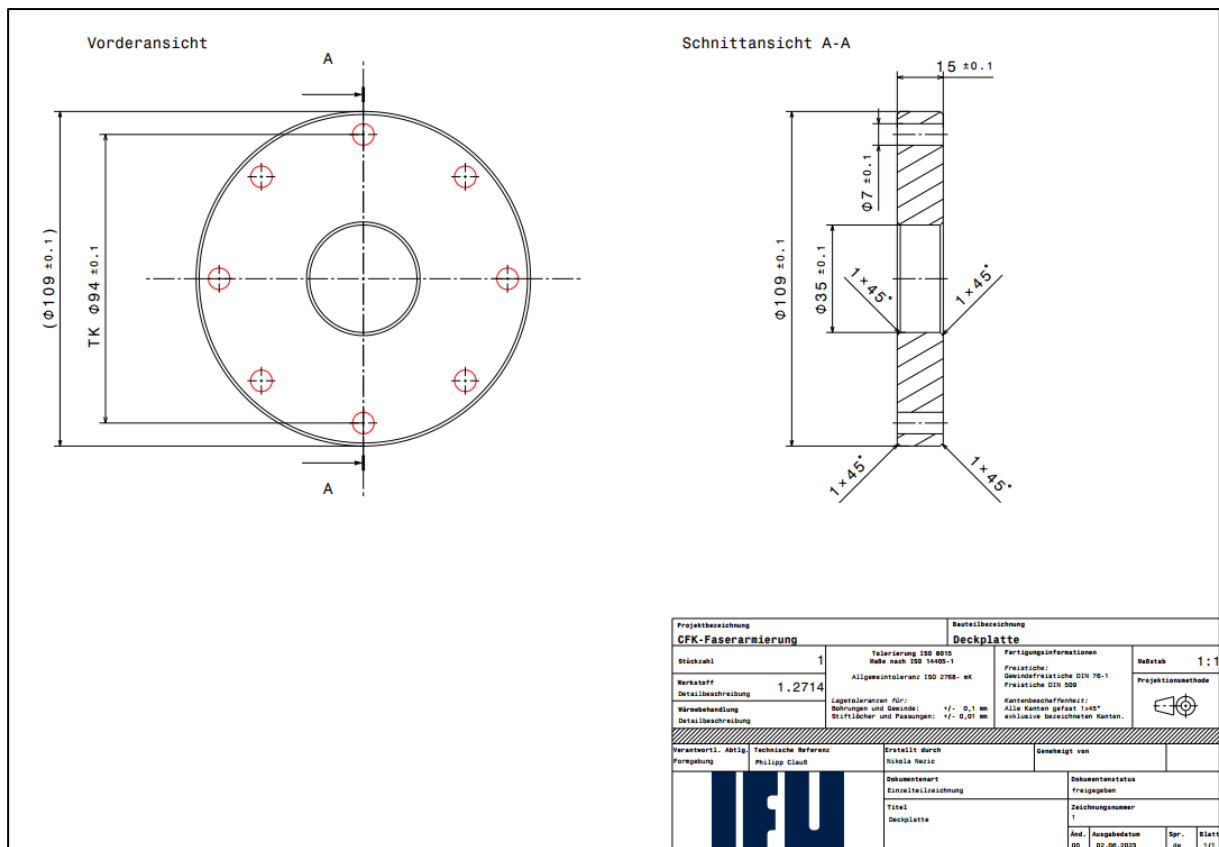


Abbildung 19: Technische Zeichnung – Deckplatte für axiale Vorspannung

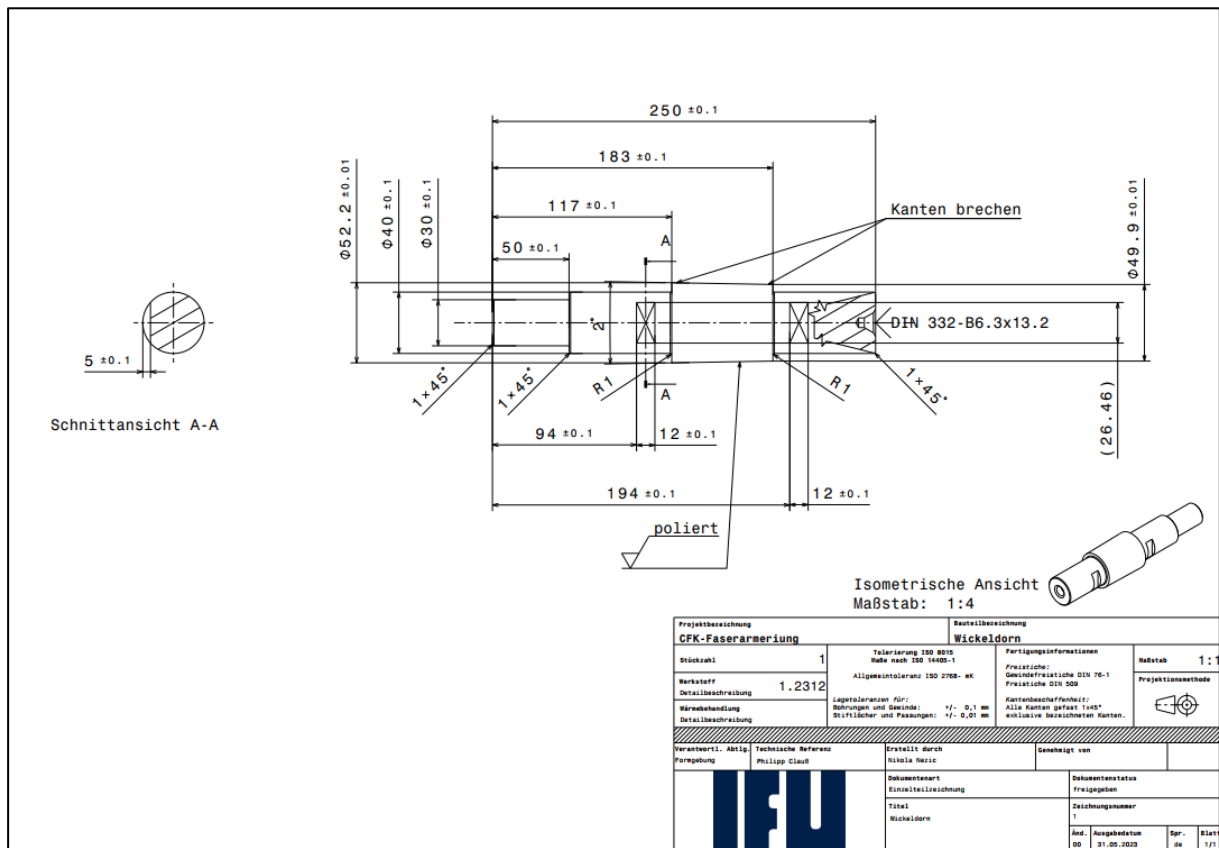


Abbildung 20: Technische Zeichnung – Wickeldorn