



## Projekt-Sachbericht: Teil 1

WIR! „Mikrostrukturierte Faserverbundlaminat als Kernelement leichter, effizienterer Brennstoffzellen für aeronautische und mobile Anwendungen“ (StruBiPlate)

Teilvorhaben 4: Struktur- und Prozessvorgaben für die funktionsgerechte Strukturierung von Faserverbundmaterialien

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03WIR2017D
Projektlaufzeit:	01.08.2023 bis 31.10.2025
Berichtslaufzeit:	01.08.2023 bis 31.10.2025

Berichtspflichtiger: Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.  
Dr. Simon Hamblyn und Prof. Dr. Lutz Engisch

Ziel des Projekts war es, Fertigungsansätze für strukturierte Bipolarplatten für Brennstoffzellenanwendungen zu untersuchen, wobei der Schwerpunkt auf Prägeverfahren und der Entwicklung von Vorhersagemodellen für realisierbare Kanalgeometrien lag. Das ursprüngliche Konzept basierte auf dem Prägen von Kanalstrukturen direkt in Kohlefaser-Prepregs. Dieser Ansatz baut auf etablierten Bipolarplatten-Technologien auf, die auf Graphit und Verbundwerkstoffen basieren und bei denen Strömungsfeldstrukturen typischerweise durch Zerspanung oder Formpressen hergestellt werden. Das Prägen von faserverstärkten duroplastischen Systemen stellt jedoch eine weniger erforschte Alternative dar, die potenzielle Vorteile hinsichtlich der Fertigungseffizienz bietet.

In einer ersten Phase wurde die Machbarkeit des Einprägens von Kanalstrukturen in vorgehärtete Kohlefaser-Prepregs untersucht. Aufgrund der duroplastischen Eigenschaften des Matrixmaterials konnte selbst unter erhöhten Temperaturbedingungen kein ausreichender Materialfluss erreicht werden. Daher war dieser Ansatz nicht geeignet, um definierte Kanalgeometrien herzustellen. Alternative Ansätze auf Basis von ungehärteten Prepregs wurden in Betracht gezogen, konnten aber mit der vorhandenen Prozessanordnung nicht umgesetzt werden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse verlagerte sich der Schwerpunkt der Arbeit in der zweiten Projektphase auf die Verwendung dünner Metallfolien als funktionale Strukturierungselemente. Als Referenzmaterial wurde Aluminiumfolie ausgewählt, um eine systematische Untersuchung der Struktur-Prozess-Beziehungen zu ermöglichen. Es wurden verschiedene Folienstärken untersucht, um deren Einfluss auf das Prägevorgang zu bewerten.

Es wurden Teststrukturen mit Serpentinakanälen unter Verwendung konventioneller Prägeverfahren hergestellt und bewertet. Diese zeigten, dass zwar Kanalstrukturen gebildet werden konnten, der Prozess jedoch durch Faltenbildung, unkontrollierten Materialfluss und lokale Risse eingeschränkt war, insbesondere bei schmalen und tiefen Geometrien.

Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurden modifizierte Prozessstrategien entwickelt. Der Einsatz eines nachgiebigen Niederhalters reduzierte die Faltenbildung deutlich und verbesserte die Strukturstabilität. Weitere Verbesserungen wurden durch weiche Prägeansätze erzielt, bei denen Elastomerelemente starre Werkzeugkomponenten ersetzen. Insbesondere die konvexe weiche Prägung zeigte die vielversprechendsten Ergebnisse und ermöglichte reproduzierbare Kanalstrukturen mit Tiefen von bis zu ca. 300  $\mu\text{m}$ , je nach Geometrie.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Prägequalität stark von der Kanalgeometrie und der Materialdicke abhängt. Schmale Kanäle führen zu einer höheren lokalen Dehnung und einem erhöhten Versagensrisiko, während breitere Kanäle eine stabilere Verformung und eine verbesserte Geometrieübertragung ermöglichen. Darüber hinaus schränken prozessbedingte Einschränkungen, insbesondere aufgrund der Nachgiebigkeit der Werkzeuge, die erreichbare Strukturtiefe ein.

Um diese Effekte zu beschreiben, wurde ein vereinfachtes analytisches Modell entwickelt, das auf der Abschätzung der Biegebeanspruchung basiert. Die lokale Beanspruchung während des

Prägevorgangs lässt sich als Funktion der Kanaltiefe, -breite und der Foliendicke approximieren. Anhand experimenteller Zugversuche wurde ein kritischer Beanspruchungswert für die Aluminiumfolie ermittelt, der die Vorhersage eines Versagens durch Reißen ermöglicht. Es wurde ein kombiniertes Vorhersagemodell formuliert, das sowohl materialbasierte als auch prozessbezogene Einschränkungen berücksichtigt.

Auf Systemebene wurde ein Hybridkonzept identifiziert, bei dem geprägte Metallfolien die funktionalen Kanalstrukturen bilden, während Verbundwerkstoffe für die mechanische Stabilität sorgen. Die Integration dieser Komponenten erfordert zusätzliche Strukturierungsschritte, zum Beispiel durch Zerspanung oder Laserbearbeitung. Es wurden auch alternative Ansätze auf Basis der additiven Fertigung untersucht, die zwar eine größere Designflexibilität bieten, aber im Vergleich zu Verbundsystemen derzeit nur eine begrenzte Materialeistung aufweisen.

Zudem wurde die Integration mikrostrukturierter Oberflächenmerkmale als funktionale Erweiterung in Betracht gezogen. Es wird erwartet, dass solche Strukturen das Benetzungsverhalten verbessern, indem sie die Oberflächenrauheit erhöhen, entsprechend dem Wenzel-Modell.

Die Arbeit wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern durchgeführt, wobei sich die Beiträge in der Materialentwicklung und der Bewertung auf Systemebene ergänzten. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für den Entwurf und die Bewertung strukturierter Bipolarplatten und tragen zur weiteren Forschung im Bereich Prägung und funktionale Materialien bei. Die Erkenntnisse werden in zukünftigen Forschungsaktivitäten, einschließlich der Verfeinerung von Vorhersagemodellen, genutzt und in Lehr- und Schulungsformate übertragen.

## **Projekt-Sachbericht: Teil 2**

WIR! „Mikrostrukturierte Faserverbundlamine als Kernelement leichter, effizienterer Brennstoffzellen für aeronautische und mobile Anwendungen“ (StruBiPlate)

Teilvorhaben 4: Struktur- und Prozessvorgaben für die funktionsgerechte Strukturierung von Faserverbundmaterialien

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03WIR2017D
Projektlaufzeit:	01.08.2023 bis 31.10.2025
Berichtslaufzeit:	01.08.2023 bis 31.10.2025

Berichtspflichtiger: Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.

Dr. Simon Hamblyn und Prof. Dr. Lutz Engisch

Projektleitung: Prof. Dr. rer. nat. Lutz Eng

# 1. Durchgeführte Arbeiten

Die im Rahmen dieses Teilprojekts durchgeführten Arbeiten werden als Abfolge von Entwicklungsphasen dargestellt, die den iterativen Verlauf von der ersten Konzeptbewertung über die Prozessentwicklung und Modellierung bis hin zu Überlegungen auf Systemebene widerspiegeln.

## 1.1 Ausgangskonzept und Rahmenbedingungen

Ziel der Arbeit war es, Fertigungsansätze für strukturierte Bipolarplatten zu untersuchen, wobei der Schwerpunkt auf prägebasierten Verfahren lag. Das ursprüngliche Konzept basierte auf der Prägung von Kanalstrukturen direkt in Carbonfaser-Prepregs, mit dem Ziel, leichte, strukturell integrierte Bipolarplatten herzustellen.

Dieser Ansatz baut auf etablierten Technologien für Bipolarplatten auf, die auf Graphit und Verbundwerkstoffen basieren, wobei Strömungsfeldstrukturen typischerweise durch Zerspanung oder Formpressen hergestellt werden. Das Prägen wurde als potenziell effizientere Alternative angesehen, vorausgesetzt, es lässt sich eine ausreichende Formbarkeit des Materials erzielen.

Eine Literaturübersicht wurde durchgeführt, um die Typen von Strömungsfeldgeometrien in bipolaren Platten und deren Einfluss auf die Leistung der Brennstoffzellen zu verstehen. Ziel war es, die strukturellen Anforderungen zu identifizieren, die später aus der Perspektive der Prägungs- und Formtechnik betrachtet werden müssten.

Die Übersicht zeigte, dass mehrere typische Strömungsfeldesigns in PEM-Brennstoffzellen verwendet werden, darunter:

- Serpentin-Strömungsfelder
- Parallelströmungsfelder
- Interdigitierte Strömungsfelder
- Pin-Typ-Strukturen

Jede dieser Geometrien bietet unterschiedliche Vor- und Nachteile hinsichtlich Druckabfalls, Reagentverteilung, Wasserentfernung und Wärmemanagement. Die Überprüfung bestätigte außerdem, dass die Abmessungen der Kanäle, wie Breite, Tiefe, Rippenbreite und Flankengeometrie, einen erheblichen Einfluss auf die elektrochemische Leistung der Brennstoffzelle haben.

Aus Sicht der Prägungstechnologie zeigte die Übersicht, dass die folgenden Geometriebereiche besonders relevant sind:

- Kanalbreite: ca. 0,8–1,2 mm
- Kanaltiefe: ca. 0,3–1,0 mm

Diese Maße wurden daher bei der Planung experimenteller Prägungswerkzeuge und späteren Prozessbewertungen berücksichtigt.

Die Literaturübersicht zeigte außerdem, dass neben der Strömungsfeldgestaltung auch die Querschnittsgeometrie der Kanäle für die Gesamtfunktion bipolarer Platten von großer Bedeutung ist. Aus Prägungssicht sind trapezförmige Kanalquerschnitte realistischer als ideale rechteckige Querschnitte, da letztere in einem Umformungsprozess ohne Materialfluss-, Rücksprung- oder Rundungseffekte schwer nachzubilden sind.

Die Ergebnisse deuteten daher darauf hin, dass die folgenden strukturellen Aspekte für spätere Experimente besonders relevant sein würden:

- Kanalbreite
- Kanaltiefe
- Rippenbreite
- Flankenwinkel
- Radius an der Kanalbasis

Diese Aspekte bildeten die Grundlage für das spätere Design von Teststrukturen und Prägungswerkzeugen.

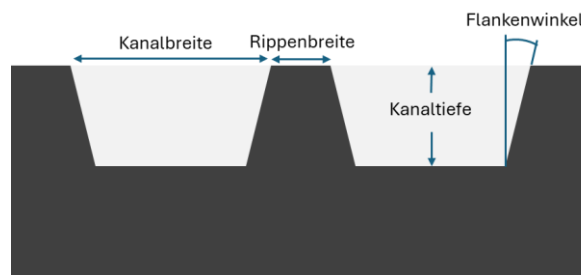


Abbildung 1 – Geometrieüberlegungen für die Auslegung von Prägwerkzeugen auf Basis des Kanalquerschnitts

## 1.2 Phase 1: Bewertung der Prägung von Prepregs

Zu Beginn des Projekts lag der Hauptfokus auf der direkten Prägung von Kanalstrukturen in vorgefertigte Vorausgehärtetes Kohlefaser-Prepreg. Da in der Literatur keine direkt vergleichbaren Studien zum Prägieren Vorausgehärtetes Prepregs identifiziert werden konnten, wurden verwandte Arbeiten zur Bildung von Prepregs durch Bändigen und andere thermoformähnliche Methoden überprüft.

Die Literatur deutete darauf hin, dass die Formbarkeit von CFK-Preps stark beeinflusst wird von:

- Faserorientierung
- Biegesteifigkeit
- Matrixverhalten bei erhöhter Temperatur
- elastische Erholung nach dem Entladen
- mögliche Delamination oder lokale Faser-/Matrixschäden

Diese Ergebnisse wurden verwendet, um ein vorläufiges Prozessmodell zu erstellen. Zusätzlich wurde eine metrologische Bewertungsstrategie entwickelt, die 3D-optische Oberflächenmessungen und Querschnittsprofilanalyse verwendet. Die Hauptparameter, die auf geprägten Strukturen gemessen werden sollten, wurden wie folgt definiert:

- Kanaltiefe
- obere und untere Kanalbreite
- Flankenwinkel
- Radien
- Deformation in angrenzenden flachen Bereichen

Diese Parameter bildeten die Grundlage für alle späteren geometrischen Auswertungen.

Erste Prägungsexperimente wurden an Vorausgehärteten Kohlefaser-Prepregs mit erhitzten Werkzeugen durchgeführt. Ziel war es zu bestimmen, ob die Prepreg-Oberfläche über der Glasübergangstemperatur der Epoxidmatrix plastisch verformt werden kann.

Die Experimente zeigten:

- nur sehr flache Verformungen konnten erzeugt werden
- Die maximalen Kanaltiefen lagen im Allgemeinen unter 20  $\mu\text{m}$  (Abbildung 2)
- Das Zentrum der geprägten Kanäle war oft flacher als die Ränder
- Nacherhitzen nach dem Prägen verringerte die verbleibende Kanaltiefe weiter

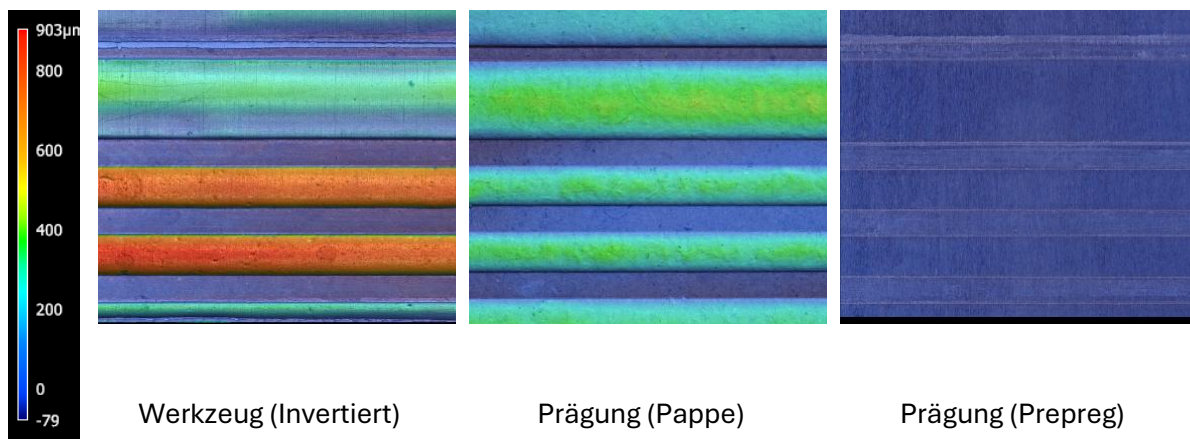


Abbildung 2 – Vergleich eines Prägewerkzeugs mit Prägungen, die auf einer Pappe und einem Prepreg unter den gleichen Bedingungen mit Vollprägungen hergestellt wurden

Diese Beobachtungen deuteten darauf hin, dass das Erhitzen der Schwangerschaft allein nicht ausreichte, um dauerhafte Prägung zu ermöglichen. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass das Material entweder während des Prozesses zu steif blieb oder dass die geformten Strukturen teilweise durch elastische Rückgewinnung und/oder Haftung zwischen der weichen Polymermatrix und dem Werkzeug beim Abformen verloren gingen.

Um dies zu verbessern, wurden mehrere Heizkonzepte untersucht, darunter:

- Widerstandsheizung der Prepreg über Kupfersammelschienen
- PTC-Heizplatten
- kombinierte Heizanordnungen, integriert in das Zwick-Prägungsmodul

Obwohl in einigen Voruntersuchungen Oberflächentemperaturen im erforderlichen Bereich erreicht werden konnten, blieb die Erhitzung schwer zu kontrollieren, und während des

Prägungsprozesses im eigentlichen Prägungsaufbau konnten ausreichend hohe und homogene Temperaturen nicht gehalten werden. Es konnten keine dauerhaften Kanalstrukturen von praktischer Bedeutung hergestellt werden. Daher wurde geschlossen, dass das Prägen ausgehärteter Thermoset-Preps innerhalb der praktischen Ausrüstungs- und Prozessbedingungen des Projekts nicht machbar war.

### 1.3 Phase 2: Übergang zu Metallfolien

Angesichts der beim Prägen von Prepregs festgestellten Einschränkungen wurde der Schwerpunkt der Arbeit auf alternative Materialien verlagert. In dieser Phase wird der Einsatz von Metallfolien als Modellsystem für die systematische Untersuchung von Prägeprozessen vorgestellt.

Aluminiumfolie wurde als Referenzmaterial für weitere Studien ausgewählt. Dies ermöglichte eine konsistente und systematische Untersuchung der Struktur-Prozess-Beziehungen unter Verwendung eines gut definierten und reproduzierbaren Materialsystems. In diesem Rahmen wurden Aluminiumfolien unterschiedlicher Dicke untersucht, um den Einfluss der Materialdicke auf das Prägungsverhalten zu bewerten. Dieser Ansatz ermöglichte es der Studie, sich auf den Einfluss von:

- Geometrie
- Prozessparameter
- Werkzeugkonzepte

wobei relevante Variationen in der Materialantwort erfasst werden, insbesondere in Bezug darauf:

- Biegeverhalten
- Stammentwicklung
- Empfindlichkeit gegenüber Rissen

Die Beziehungen zwischen Geometrie, Dehnung und Prozessverhalten sind im Allgemeinen auf andere Metallfolien übertragbar, wobei die spezifischen Prozessfenster von den Materialeigenschaften abhängen.

### 1.4 Phase 3: Grundlegende Untersuchungen zur Prägung

Diese Phase schafft ein grundlegendes Verständnis des Prägeverstärkungsverhaltens von Metallfolien unter Verwendung herkömmlicher Prozesskonfigurationen. Ziel war es, die grundlegenden Einschränkungen des Prozesses und den Einfluss grundlegender geometrischer Parameter zu identifizieren. Aluminiumfolie wurde als konsistentes Referenzmaterial verwendet, wobei verschiedene Foliendicken untersucht wurden, um ihren Einfluss auf das Prägungsverhalten zu bewerten.

Die untersuchten Strukturen bestanden aus vereinfachten, serpentinenförmigen Elementen, die typische Strömungsfeldstrukturen darstellten. Es wurden verschiedene Werkzeuge hergestellt,

die unterschiedliche Geometrien der Serpentinekanäle mit einem breiten Spektrum an Breiten und Tiefen aufwiesen.

Die Prägungsqualität wurde in Bezug darauf:

- erreichbare Strukturtiefe
- Formbindung nach dem Entladen
- Auftreten von Falten oder Falten
- Auftreten von Rissen
- Deformation der umliegenden flachen Flächen

Die resultierenden Strukturen wurden sowohl visuell und, wo möglich, mit einem Keyence VR-3100 3D-Mikroskop und anschließender Profilanalyse bewertet.

### Bewertung von Aluminiumfolie in konventioneller Reliefprägung

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung des konventionellen Prägeverfahrens. Die Matrize- und Patrize-Prägungswerkzeuge wurden mit einem *Formlabs Form2* Stereolithografie-3D-Drucker mit dem *Formlabs GreyPro* Harz hergestellt.

Die zunehmende Prägungskraft führte zu einer deutlichen Zunahme der geprägten Tiefe, was bestätigte, dass die Folie zumindest teilweise der Werkzeuggeometrie folgen konnte. Trotz dieser grundlegenden Formbarkeit zeigte der konventionelle starre Prägeprozess jedoch auch mehrere wesentliche Einschränkungen. Das bedeutendste Problem war das Auftreten von **Falten und Falten** um die geprägten Strukturen (Abbildung 3). Dieses Verhalten war besonders in den angrenzenden Bereichen an den Kanälen ausgeprägt und wurde mit zunehmender Strukturtiefe und Prägungskraft stärker.

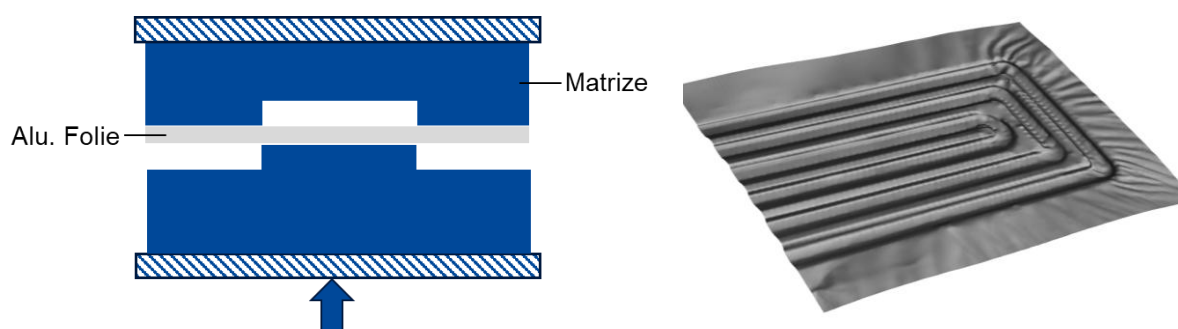


Abbildung 3 – Schematische Darstellung des konventionellen Prägeverfahrens (links) und der daraus resultierenden geprägten Probe mit Falten (rechts)

Die Falten werden als Folge von Druckspannungen in der Folie während der lokalen Formung interpretiert. Wenn das Material in die Höhle gezogen wird, wird die umgebende Folie gezwungen, die lokale Verformung aufzunehmen. Da das Material nicht gleichmäßig in alle Richtungen fließen kann, tritt eine Druckinstabilität auf und es entstehen Falten in den nicht gestützten Bereichen rund um die geprägten Strukturen.

Neben Falten wurde bei höheren Prägungslasten auch Risse beobachtet. Das Reißen trat typischerweise am Boden der geprägten Strukturen auf, was darauf hindeutet, dass die lokale Zugspannung in diesen Bereichen die Formbarkeit der Folie überstieg.

Die Experimente zeigten daher, dass herkömmliche Reliefprägungen zwar messbare Kanalstrukturen erzeugen konnten, die resultierende Strukturqualität jedoch für einen kontrollierten und reproduzierbaren Prozess nicht ausreichte. Die Kombination aus Falten, unkontrolliertem Materialfluss und lokalem Reißen stellte eine wesentliche Einschränkung des ursprünglichen Prägungskonzepts dar.

## Einfluss der Strukturgeometrie auf den Baseline-Prozess

Selbst innerhalb des konventionellen starren Prägungsprozesses zeigten die Experimente bereits, dass das Prägungsergebnis stark von der Kanalgeometrie abhängt.

Insbesondere wurden folgende Trends beobachtet:

- schmalere Kanäle waren schwieriger zu formen
- Tiefere Strukturen führten zu stärkeren Falten und einer stärkeren Neigung zu Reißen
- Breitere Strukturen konnten im Allgemeinen erfolgreicher geprägt werden

Diese Beobachtungen zeigten, dass der Prägungsprozess stark geometrieabhängig ist und die erfolgreiche Reproduktion von Kanalstrukturen nicht nur ausreichende Umformkraft, sondern auch geeignete strukturelle Planung und Prozesssteuerung erfordert. In dieser Phase der Arbeit wurde klar, dass der konventionelle Prägungsweg allein nicht ausreichen würde, um die gewünschte Strukturqualität für bipolare Plattenanwendungen zu erreichen.

## 1.5 Phase 4: Entwicklung verbesserter Prägeverfahren

Ziel dieser Phase war es, die Beziehung zwischen Strukturgeometrie, Prozessparametern und Prägungsqualität zu bestimmen und verbesserte Prozesskonzepte zu entwickeln, die die in den Basisprägungsexperimenten identifizierten Einschränkungen überwinden können. Aufgrund der Ergebnisse mit konventioneller Prägung wurde deutlich, dass die größte Herausforderung beim Prägen von Metallfolien nicht einfach darin bestand, eine lokale Verformung zu erreichen, sondern dies auf kontrollierte und reproduzierbare Weise zu tun, ohne dass Falten oder Risse entstehen. Aus diesem Grund konzentrierte sich die Arbeit in dieser Phase auf die Entwicklung und Bewertung alternativer Prägungsstrategien, die darauf abzielen, die Folie während der Formung zu stabilisieren und die Übertragung der Kanalgeometrie zu verbessern.

Die untersuchten Ansätze umfassten:

- konventionelle Prägung mit einem konformen Niederhalter
- Weichprägung mit Elastomeren Gegenflächen
- verschiedene Weichprägung-Prägungsvarianten mit modifizierten Werkzeugkonfigurationen

Diese Untersuchungen ermöglichten es, die wichtigsten Struktur-Prozess-Abhängigkeiten zu identifizieren, die das Prägungsergebnis bestimmen.

## Konventionelle Prägung mit Niederhalter

Als ersten Schritt zur Verbesserung des konventionellen Prägungsprozesses wurde ein konformer Niederhalter eingeführt, um die Folie zu fixieren und Falten während der Formung zu unterdrücken. In dieser Konfiguration wurde eine 0,3 mm dicke Silikonschicht als nachgiebiges Klemmelement verwendet. Der Niederhalter hielt die Folie gleichmäßiger im Bereich um die Prägungsstruktur herum und ermöglichte dennoch eine lokale Verformung im Kanalbereich. Die Höhe des Prägungselements am Werkzeug wurde leicht erhöht, um die Dicke des Niederhalters zu berücksichtigen. Diese Konfiguration wird in Abbildung 4.

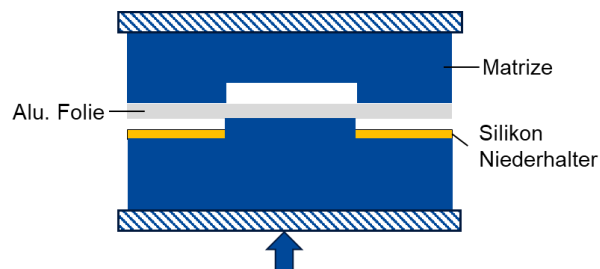


Abbildung 4 – Schematische Darstellung des konventionellen Prägung mit einem Niederhalter

Die Experimente zeigten, dass diese Modifikation das Formverhalten im Vergleich zum ungebundenen konventionellen Prozess signifikant verbesserte.

Die wichtigsten beobachteten Effekte waren:

- eine deutliche Reduzierung von Falten und Falten
- verbesserte Flachheit der umliegenden Folienbereiche
- Regelmäßigere und reproduzierbarere Kanalbildung

Der Einsatz des Niederhalters bestätigte daher, dass ein wesentlicher Teil des Problems im ursprünglichen Prägungsprozess mit unkontrollierter Materialbewegung und lokaler Druckinstabilität zusammenhing. Die Experimente zeigten jedoch auch, dass die Einführung des Niederhalters das Verformungsverhalten der Folie veränderte. Obwohl die resultierenden Strukturen stabiler und von besserer Qualität waren, nahm die erreichbare Kanaltiefe nicht weiter auf die gleiche Weise an wie beim uneingeschränkten Prägungsprozess. Dies deutet darauf hin, dass die Folienbeschränkung die Prozessstabilität verbesserte, aber auch das Ausmaß einschränkte, in dem das Material in die Struktur aufgenommen werden konnte. In der Praxis lagen die maximal erreichbaren geprägten Tiefen in dieser Konfiguration in der Regel bei etwa 300  $\mu\text{m}$ , abhängig von der genauen Strukturgeometrie und der Prägungskraft. Jenseits dieses Verbreitungsradius wurde lokale Risse erneut immer wahrscheinlicher.

Die Niederhalter-Experimente stellten daher einen wichtigen Zwischenschritt dar: Sie zeigten, dass Falten weitgehend durch Stabilisierung der Folie unterdrückt werden können, zeigten aber auch, dass eine verbesserte Prozessstabilität allein nicht ausreicht, um eine vollständige Geometrieübertragung zu erreichen.

## Einführung der weichen Prägung (Gummi-Matte Prägung)

Um die Einschränkungen der starren Prägung grundlegender zu überwinden, wurde ein weiches Prägungskonzept entwickelt, bei dem einer der starren Werkzeugpartner durch ein konformes Elastomerelement ersetzt wurde. Ziel dieses Ansatzes war es, der Folie eine allmählichere Verformung in die Struktur zu ermöglichen, während lokale Spannungskonzentrationen reduziert und die Druckinstabilitäten, die für Falten verantwortlich sind, vermieden werden. Die Experimente zeigten sofort, dass die Verwendung einer konformen Elastomer-Gegenfläche das Prozessverhalten signifikant veränderte.

Die wichtigsten beobachteten Vorteile waren:

- Fast vollständige Unterdrückung von Falten
- eine glattere lokale Verformung der Folie
- verbesserte geometrische Regelmäßigkeit der geprägten Strukturen
- bessere Reproduzierbarkeit im Vergleich zu starrer Prägung

Diese Ergebnisse bestätigten, dass der Einsatz konformer Werkzeuge ein vielversprechender Weg zur Herstellung strukturierter Folienelemente für Anwendungen mit bipolaren Platten darstellt.

Gleichzeitig zeigten die Experimente auch, dass das Prägungsergebnis nun zunehmend von der detaillierten Wechselwirkung zwischen folgenden Faktoren abhängig wurde:

- Strukturgeometrie
- Foliendicke
- Prägungskraft
- Elastomersteifigkeit und -konfiguration

Dies machte es notwendig, verschiedene weiche Prägungskonfigurationen genauer zu vergleichen.

## Konvexe weiche Prägung

Beim konvexen, weichen Prägungsansatz wurde ein starres männliches Prägungswerkzeug in die Folie gegen eine flache Elastomer-Gegenfläche gedrückt. Dies wird schematisch zusammen mit einer geprägten Probe in Abbildung 5 gezeigt.

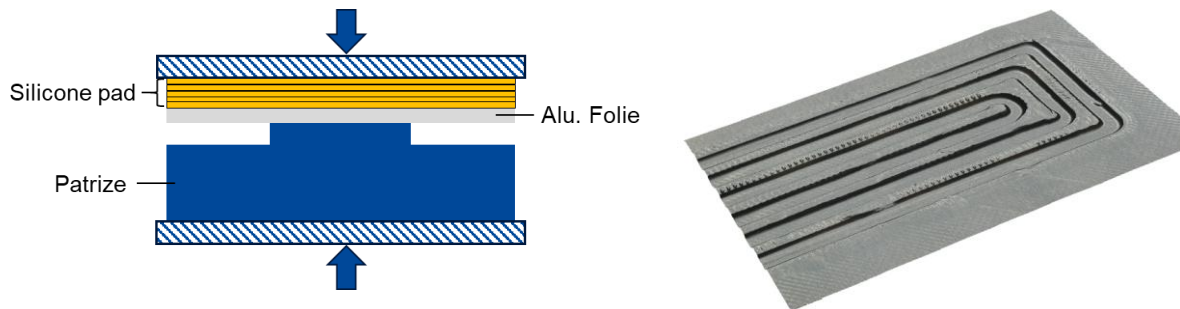


Abbildung 5 – Schematische Darstellung der konvexen weichen Prägung (Links) mit einer Beispielprägung (rechts)

Für die konvexe weiche Prägung wurden mehrere verschiedene Matten untersucht. Diese reichten von einem 8 mm Polyurethan-Elastomer (85 Shore A) über zwei verschiedene Silikontypen (50 Shore A und 60 Shore A) mit Dicken von 3 mm, 5 mm und 8 mm sowie 8 mm Silikonschaum (30 Shore A). Diese Konfiguration erzielte die besten Gesamtergebnisse aller im Projekt untersuchten Prägungsvarianten.

Der Prozess ermöglichte:

- Gute geometrische Wiedergabe der Kanäle
- Geringe Faltenneigung
- relativ hoch erreichbare geprägte Tiefen
- Gute Gesamtoberflächenqualität in den umliegenden Florettbereichen

Für Strukturen mit einer nominellen Werkzeuttiefe von 400  $\mu\text{m}$  konnten geprägte Tiefen von etwa 300  $\mu\text{m}$  in günstigen Fällen ohne Zerreißen erreicht werden. Dies galt besonders für breitere Kanäle und geeignete Elastomerkonfigurationen.

Die Ergebnisse zeigten auch eine klare Abhängigkeit von der Strukturgeometrie.

## Einfluss der Kanalbreite

Eine der wichtigsten Ergebnisse der Experimente war der starke Einfluss der Kanalbreite auf das Prägungsergebnis.

Insbesondere:

- **1 mm breite Kanäle** erwiesen sich als äußerst kritisch
- **1,5 mm breite Kanäle** zeigten ein verbessertes Verhalten
- **2 mm breite Kanäle** zeigten das stabilste Prägungsverhalten

Dieser Trend wurde über verschiedene Kraftstufen und Werkzeugvarianten hinweg konsistent beobachtet.

Schmalere Kanäle waren verbunden mit:

- höhere lokale Krümmung der Folie
- Erhöhte Wahrscheinlichkeit von Reißen
- Schlechtere Geometrieübertragung

Breitere Kanäle hingegen konnten im Allgemeinen erfolgreicher und reproduzierbarer geprägt werden.

## Einfluss der Kanaltiefe

Auch die nominale Kanaltiefe hatte einen starken Einfluss. Strukturen mit einer Nenntiefe von **400  $\mu\text{m}$**  konnten im Allgemeinen innerhalb des Prozessfensters erfolgreich geprägt werden, insbesondere für breitere Kanäle. Strukturen mit einer Nenntiefe von **800  $\mu\text{m}$**  überschritten jedoch in den meisten Fällen die praktischen Prozessgrenzen. Die beobachteten Schwierigkeiten umfassten:

- Reißen der Folie
- Unvollständiger Geometrietransfer
- Unfähigkeit des Elastomers, die Folie vollständig in den Hohlraum zu drücken

Dies zeigte, dass eine Vergrößerung der Strukturtiefe sowohl die Materialdehnung als auch den Prozessbedarf am Elastomersystem erhöht. Die Silikonschaummatte erzeugte insgesamt die tiefste Prägung, besonders in den 1 mm breiten Kanälen. Allerdings enthielt dies auch eine Mikrotextrur auf der Oberfläche, die in die Aluminiumoberfläche geprägt war. Die besten Oberflächenoberflächen wurden erzielt, wenn der Silikonschaum mit 0,3 mm Silikonplatten kombiniert wurde, was jedoch auch die Tiefe der Kanäle verringerte.

## Konkave Weichprägung

Beim konkaven, weichen Prägungsansatz wurde eine starre Matrize verwendet, wobei das Elastomer als Gegenform diente. Eine schematische Darstellung der konkave Weichprägung ist in Abbildung 6 dargestellt.

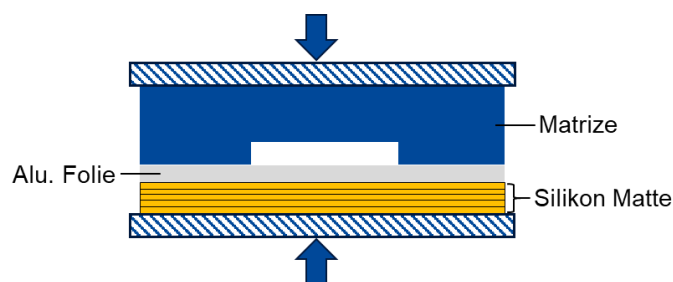


Abbildung 6 – Schematische Darstellung der konkaven weichprägung

Dieser Prozessweg unterdrückte auch Falten effektiv, aber die erreichbaren Kanaltiefen waren deutlich geringer als bei der konvexen weichen Prägungskonfiguration. Typische maximale geprägte Tiefen lagen im Bereich von etwa 150  $\mu\text{m}$ . Dies deutet darauf hin, dass der Prozess stärker durch die Fähigkeit des Elastomers begrenzt war, sich lokal in die Matrizenhöhle zu verformen und ausreichenden Druck in die schmalen Kanalstrukturen zu übertragen. Die Ergebnisse zeigten daher, dass, obwohl der Einsatz von konformen Werkzeugen im Allgemeinen vorteilhaft ist, die genaue Anordnung starrer und konformer Werkzeugkomponenten einen großen Einfluss auf die erreichbare Geometrie hat.

## Strukturiertes weiches Prägen

Ein weiteres Verfahren zur weichen Prägung umfasste die Verwendung eines strukturierten Elastomerelements in Kombination mit einer starren Matrize vor. Eine schematische Darstellung davon ist in Abbildung 7 zu sehen.

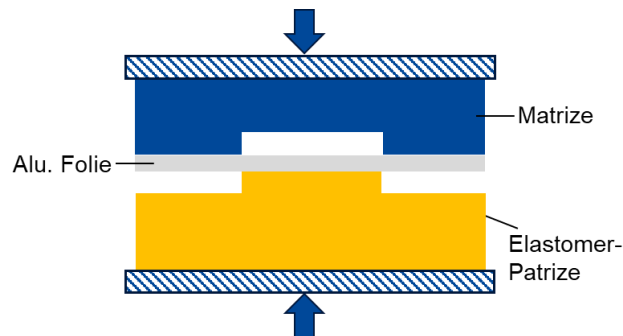


Abbildung 7 – Schematische Darstellung der strukturierten weichen Prägung

Das strukturierte Element wurde mit Formlabs Elastic Harz hergestellt, mit einer nominalen Shore A-Härte von 50. Dieser Ansatz war ein Versuch, die lokale Übertragung der Struktur zu verbessern und gleichzeitig die vorteilhafte Faltenunterdrückung konformer Werkzeuge beizubehalten. Die Ergebnisse dieser Variante waren gemischt. Ohne zusätzliche Einschränkungen kann in manchen Fällen dennoch Falten auftreten. In Kombination mit einem Niederhalter verbesserte sich das Faltenverhalten. Die erreichbaren Kanaltiefen blieben jedoch unterhalb der der konvexen weichen Prägungskonfiguration. Typische geprägte Tiefen bei diesem Ansatz betragen etwa 200  $\mu\text{m}$ , bevor Tearing oder Prozessinstabilität zur Begrenzung wurden. Dies zeigt, dass die Einführung von Struktur in das Elastomer allein nicht ausreicht, um eine verbesserte Prägungsqualität zu gewährleisten, und dass die allgemeine Werkzeugcompliance und die Kraftübertragung weiterhin entscheidend bleiben.

## Einfluss der Foliendicke

Neben den strukturellen und werkzeugbezogenen Abhängigkeiten zeigten die Experimente auch, dass die Foliendicke das Prozessverhalten beeinflusst.

Die Verwendung von 40  $\mu\text{m}$  Aluminiumfolie stellte einen praktischen Kompromiss zwischen folgenden Punkten dar:

- ausreichende Flexibilität für lokale Umformung
- ausreichende Robustheit für die Probenhandhabung und Prozessstabilität

Dünnere Folien (z. B. 30  $\mu\text{m}$  und darunter) könnten prinzipiell eine größere lokale Verformung aufgrund der geringeren Biegebelastung für eine gegebene Geometrie ermöglichen. Diese führten jedoch zu Reißen während des Prägungsprozesses, was die erreichbaren Kanaltiefen

stark eingeschränkt. Diese waren zudem sehr empfindlich gegenüber Unfallschäden und schwerer reproduzierbar zu handhaben. Die verfügbaren Ergebnisse zeigen daher, dass die optimale Foliendicke nicht nur von der theoretischen Formbarkeit, sondern auch von der praktischen Robustheit des Prozesses abhängt.

## 1.6 Phase 5: Struktur-Prozess-Beziehungen

In dieser Phase werden die Versuchsergebnisse zusammengefasst und die Zusammenhänge zwischen Strukturgeometrie, Materialeigenschaften und Prozessbedingungen analysiert. Ziel ist es, die maßgeblichen Parameter zu ermitteln, die die Prägequalität bestimmen.

Die durchgeführten Experimente haben eindeutig gezeigt, dass das Prägeergebnis von einer Kombination aus geometrie- und prozessbezogenen Faktoren abhängt. Die wichtigsten identifizierten Abhängigkeiten waren:

- Schmalere Kanäle sind wichtiger als breitere Kanäle
- Tiefere Strukturen sind schwerer zu reproduzieren als flachere Strukturen
- Falten können stark reduziert werden, indem man die Folie fixiert oder stützt
- konforme Werkzeuge verbessern die Prozessstabilität erheblich
- Die Konstruktion und Kompressibilität der Elastomerwerkzeuge beeinflussen die erreichbare Tiefe stark

Ausgewählte Ergebnisse aus den Experimenten für 1 mm breite Kanäle mit verschiedenen Arten von Prägungsprozess-Setups sind in Abbildung 8.

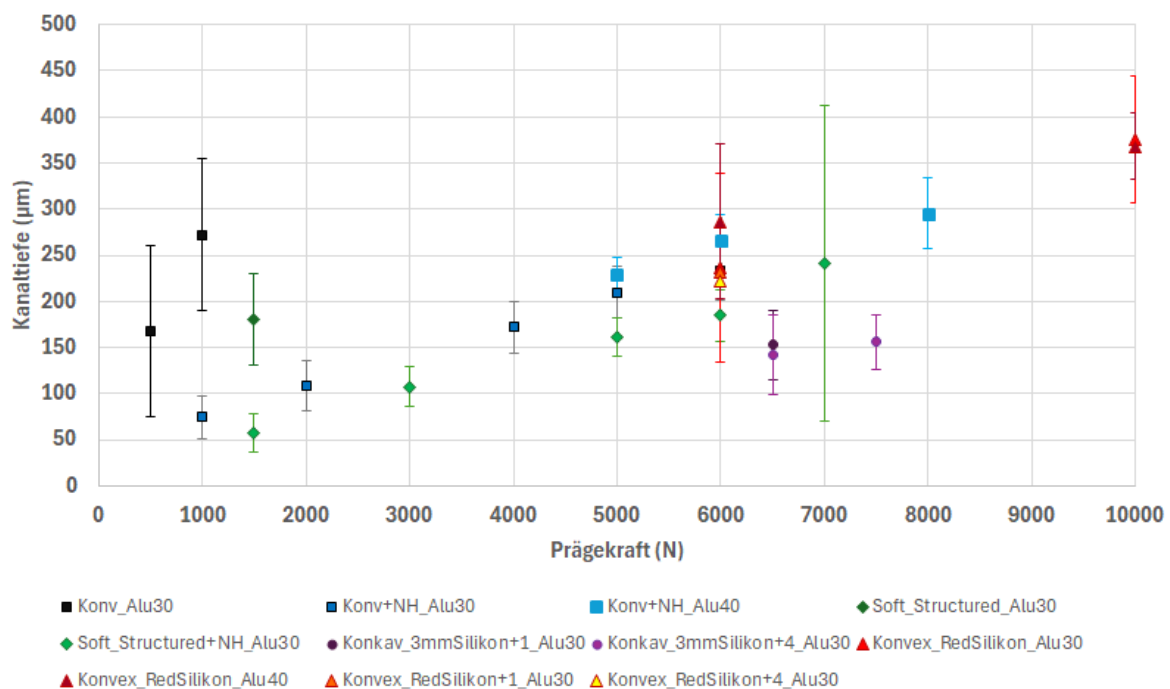


Abbildung 8 – Ausgewählte Ergebnisse der geprägten Kanaltiefe für verschiedene Prozessaufstellungen und Aluminiumfoliendicke für 1 mm breite Kanäle mit 0,8 mm Tiefe

Die Ergebnisse zeigen die unterschiedlichen Beziehungen zwischen der Prägungskraft und der durchschnittlichen Tiefe der Kanäle aus den verschiedenen Setups. Die maximal angezeigten Werte für jedes Setup waren die maximal erreichten Tiefen, die vor dem Tearing erreicht wurden. Dies war höher bei dickeren Aluminiumfolien.

Insgesamt war der in dieser Phase identifizierte beste Prozessweg **konvexe weiche Prägen** mit dem Silikonschaumpad, das die günstigste Kombination aus geometrischer Genauigkeit, geringer Faltenneigung, praktisch erreichbarer Tiefe und Prozessstabilität bot. Die Ergebnisse zeigten auch, dass die maximal erreichbare geprägte Tiefe nicht nur von der Dicke der Folie und der Geometrie der Kanalstrukturen bestimmt wird, sondern auch von der Fähigkeit des gewählten Prozessroutes, die erforderliche Verformung zu übertragen.

Neben den Experimenten mit flacher Prägung wurden ergänzende Experimente auch mit Rotationsprägung mit einem ähnlichen weichen konvexen Prägungsprozess wie zuvor beschrieben durchgeführt. Diese Experimente wurden in Zusammenarbeit mit SWG durchgeführt. Im Vergleich zum flachen Prägen ermöglicht das Rotationsprägung die Strukturierung größerer Flächen, da der Prozess Kräfte schrittweise entlang eines Linienkontakts statt über eine gesamte Oberfläche auf einmal ausübt. Beim Flachprägen nehmen die erforderlichen Kräfte mit der Fläche zu und sind letztlich durch die Kapazität der Prüfausrüstung begrenzt. Für diese Experimente wurden eine 80 mm x 80 mm Serpentin-Kanalstruktur und eine 115 mm x 80 mm Kühlkanalstruktur verwendet; eine Probe jeder der Präge ist dargestellt in Abbildung 9.

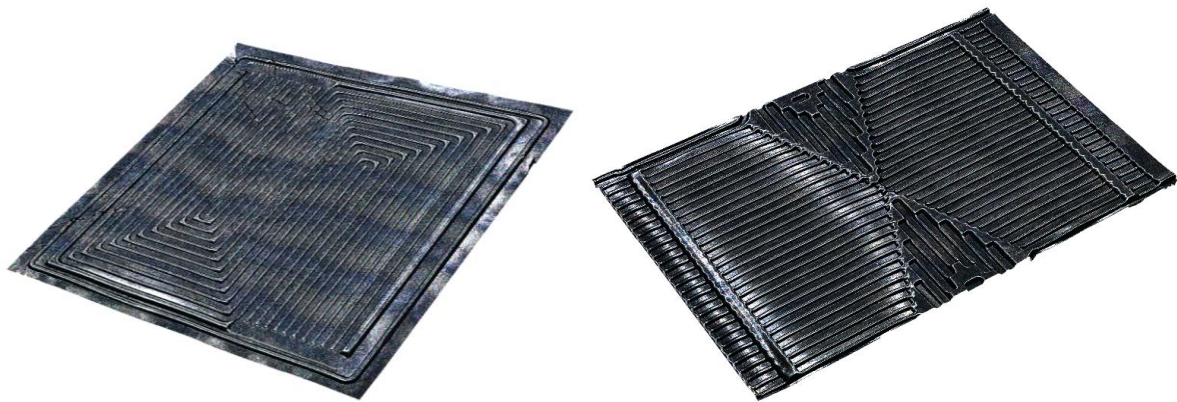


Abbildung 9 - Probe der konvexen, weichen, rotierenden geprägten Serpentin- und Kühlkanäle in 40  $\mu\text{m}$  Aluminium

Ein Ausschnitt aus einer 80 mm x 80 mm großen Serpentinprobe, gemessen mit dem Keyence 3D-Mikroskop, ist in Abbildung 10. Die Kanalgeometrien des Zylinders basierten auf dem Prozessfenster, das während der flachen Prägungsexperimente bestimmt wurde.

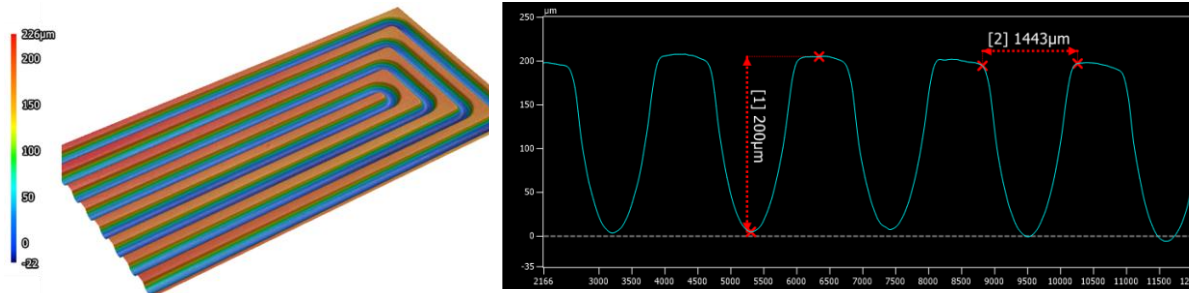


Abbildung 10 – Eine 3D-topografische Messung der rotierend geprägten Serpentinäle in 40 µm Aluminiumfolie

Die durch den Rotationsprozess entstandenen Rillen lagen näher am Werkzeugprofil als die durch den Flachprägungsprozess erzeugten. Zwar kam es zu einigen Faltenbildungen, doch lag dies an einer unzureichenden Spannung der Aluminiumfolie am Ein- und Ausgang des Walzspalts, was auf die bei den Versuchen verwendete Einzelblattzuführung zurückzuführen war – ein Problem, das bei einem Bahnzuführungsprozess nicht auftreten würde.

## 1.7 Phase 6: Modellierung und Vorhersage

In dieser Phase werden die experimentellen Beobachtungen in analytische und empirische Modelle umgesetzt. Ziel ist es, Prognoseinstrumente zu entwickeln, mit denen sich die Machbarkeit von Kanalgeometrien und das Auftreten von Materialversagen bewerten lassen. Bei den Weichprägen Versuchen war der relevanteste Versagensmodus nicht das globale Falten, sondern das lokale Reißen der Aluminiumfolie. Das in den Experimenten beobachtete Reißverhalten war sehr charakteristisch. In den meisten Fällen trat ein Versagen auf:

- am unteren Rand der geprägten Kanäle
- Entlang der Kanalrichtung
- nachdem die Folie in tiefere oder schmalere Strukturen gezwungen worden war

Dies deutete darauf hin, dass das Versagen hauptsächlich durch die lokale Zugverformung der Folie während der Formung bestimmt wurde. Da die Folie durch die nachgiebige Platte in die Kanalgeometrie gebogen wird, wird das Material an der Außenseite der Biegung einer Zugspannung ausgesetzt. Überschreitet diese Dehnung die Formbarkeitsgrenze des Materials, kommt es zu einem Reißen.

Um die beim Prägen in die Folie eingebrachte Dehnung zu schätzen, wurde ein vereinfachtes Biegemodell verwendet. Das Kanalprofil wurde als Kreisbogen angenähert, wodurch der lokale Krümmungsradius  $R$  aus der Kanalbreite  $w$  und der geprägten Höhe  $h$  geschätzt werden kann:

$$R \approx \frac{w^2}{8h} \quad \text{Gleichung 1}$$

Für eine gebogene dünne Platte kann die maximale Zugspannung an der äußeren Faser wie folgt approximiert werden:

$$\varepsilon_{bend} = \frac{t}{2R} \quad \text{Gleichung 2}$$

Das Einsetzen von R in Gleichung 2 ergibt:

$$\varepsilon_{bend} \approx \frac{4ht}{w^2} \quad \text{Gleichung 3}$$

Dieser Ausdruck wurde als ingenieurwissenschaftliche Approximation erster Ordnung des dominanten Dehnungsbeitrags während der Prägung verwendet. Diese Beziehung erfasst die wichtigsten geometrisch beobachteten Trends, die experimentell beobachtet wurden:

- Eine Erhöhung der Kanaltiefe erhöht die Dehnung
- Eine abnehmende Kanalbreite erhöht die Dehnung
- Zunehmende Foliendicke erhöht die Dehnung

Die analytischen Dehnungsschätzungen boten daher eine Methode, um die Dehnungsnachfrage zu beschreiben, die durch eine gegebene geprägte Geometrie auf das Material ausgeübt wird.

Um die tatsächlichen Dehnungsgrenzen der Materialien zu bestimmen, wurden Zugtests an 15-mm-Streifen der Folien mit einem Zwick Universal Materials Tester durchgeführt. Ein Beispiel für ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm für eine Probe der 40 µm dicken Aluminiumfolie ist in Abbildung 11.

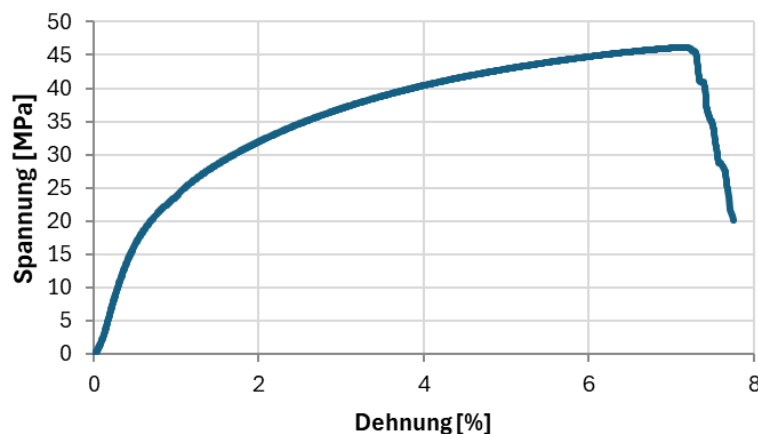


Abbildung 11 – Spannung-Dehnungs-Diagramm für 40 µm Aluminium Folie

Die Zugversuche wurden an 40 µm großen Aluminiumfolienstreifen mit einer Breite von 15 mm durchgeführt. Die Tests ergaben folgende Durchschnittswerte:

- Endzuchfestigkeit = 45,6 MPa
- Dehnung bei Bruch = 7,6 % (±0,5 %)

Um die statistische Variabilität zu berücksichtigen, wurde die kritische Dehnung für das nachfolgende Modell (in AP 4.6.7) auf 7,1 % geschätzt – was die mittlere Dehnung am Bruch minus einer Standardabweichung darstellt.

Die experimentellen Ergebnisse wurden verwendet, um prädiktive Modelle in Python zu formulieren, um die Machbarkeit geprägter Kanalgeometrien mittels flacher und rotierender weicher konkaver Prägung zu bewerten. Die Modelle basierten auf linearer Regression, wobei die

Werkzeugkanalbreite und -tiefe zur Vorhersage der geprägten Kanaltiefe verwendet wurden. Zusätzlich wurde der aus den Zugtests ermittelte kritische Dehnungswert verwendet, um anhand eines Biegedehnungsmodells vorherzusagen, ob ein Reißen auftreten würde.

## 1.8 Phase 7: Funktionale Erweiterungen (Mikrostrukturen und Benetzung)

Zusätzlich zu den makromaßstäblichen Kanalstrukturen wurde die Einführung mikrostäblicher Oberflächenmerkmale auf Basis des Wenzel-Modells untersucht, um das Benetzungsverhalten und damit den Durchfluss innerhalb der Kanäle zu verbessern. Mehrere Mikrostrukturgeometrien wurden untersucht, darunter parallele Rillen, Riblet-(Haihaut-)Strukturen, runde Säulen und runde Gruben mit charakteristischen Abmessungen von etwa 10 µm Höhe und 50 µm seitlicher Abstand. Die Experimente zeigten, dass rillenbasierte (parallele Rillen und Rippen) Geometrien mit guter Genauigkeit durch konvexe weiche Prägung auf den Kanalbodenflächen reproduziert werden können. Isolierte Merkmale wie Säulen wurden nur teilweise aufgrund von Einschränkungen im lokalen Materialfluss und der Elastomer-Compliance gebildet. Die Grubenstrukturen waren in begrenztem Maße reproduzierbar, wiesen jedoch eine geringere Tiefe im Vergleich zur Werkzeuggeometrie auf und führten oft zu Rissen. Die Reproduktion der Mikrostrukturen war nur mit breiteren (d. h. 2 mm und mehr), flacheren Kanälen (d. h. 400 µm und weniger) möglich. Erste Beobachtungen zeigten, dass die Hinzufügung dieser Strukturen zu einer verstärkten Benetzung im Kanal führte, doch der Einfluss auf den Durchfluss durch den Kanal konnte nicht charakterisiert werden.

## 1.9 Phase 8: Überlegungen auf Systemebene

In der letzten Phase werden die entwickelten Verfahren und Erkenntnisse in einen breiteren systemischen Kontext gestellt. Dazu gehören Überlegungen zur Integration der Komponenten, zu alternativen Fertigungsansätzen und zu möglichen Anwendungsbereichen der Ergebnisse.

### Konzept für hybride bipolare Plattenstrukturen

Basierend auf den experimentellen Ergebnissen der vorherigen Phasen wurde ein hybrider Ansatz für die Herstellung von bipolaren Platten in Betracht gezogen, bei dem die **geprägte Aluminiumfolie** die funktionale Strömungsfeldstruktur liefert und die **Vorausgehärtetes Kohlefaser-Prepreg** die mechanische Stabilität und strukturelle Integrität gewährleistet. Beide Komponenten würden durch ein Laminieren oder Verbinden miteinander verbunden. Der Prepreg muss **vorstrukturiert sein**, um die geprägte Kanalgeometrie zu berücksichtigen, was entweder durch mechanische Bearbeitung oder durch Laserablation erreicht werden kann. Diese zusätzlichen Prozessschritte in der Fertigungskette müssen bei der Bewertung der industriellen Skalierbarkeit berücksichtigt werden.

## Bewertung alternativer Herstellungsansätze

Um alternative Ansätze zur Herstellung strukturierter bipolarer Platten zu erforschen, wurden vorläufige Untersuchungen mit **additiver Pulverbettfusion (PBF) durchgeführt**. Mit polymerbasierten Systemen wie PA12 war es möglich, Strukturen mit integrierten Kanalgeometrien direkt zu erzeugen, ohne nachfolgende Prägungs- oder Laminierungsschritte. Dieser Ansatz bietet:

- Hohe Designflexibilität
- Direkte Erzeugung komplexer dreidimensionaler Strömungsfeldstrukturen
- Reduzierung von Prozessschritten

Zusätzlich wurden fasergefüllte Materialien wie kohlefaserverstärkte Polyamidpulver (z. B. PA11-basierte Systeme wie *PA11-01-CF* von *AM Powders*) als mögliche Erweiterung dieses Ansatzes identifiziert. Diese Materialien bieten:

- erhöhte Steifigkeit im Vergleich zu ungefüllten Polymeren
- Verbesserte Wärmeleitfähigkeit
- Verbesserte strukturelle Leistung

Die Verstärkung in solchen Materialien besteht jedoch aus kurzen, zufällig orientierten Fasern und erreicht nicht das Niveau der Verstärkung oder das anisotrope Verhalten kontinuierlicher Faserverbundwerkstoffe. Die additive Fertigung mit fasergefüllten Polymeren stellt daher einen ergänzenden Entwicklungsweg dar, insbesondere für Prototyping und komplexe Geometrien, und nicht als direkter Ersatz für verbundbasierte bipolare Plattenkonzepte. Zukünftige Entwicklungen in der hochgefüllten oder kontinuierlichen Faserfertigung könnten diese Lücke weiter verringern.

## Bewertung thermisch leitfähiger Klebstoffe

Im Rahmen der systembezogenen Überlegungen wurden thermisch leitfähige Klebstoffe hinsichtlich ihrer Eignung für das Kleben und die Integration strukturierter Komponenten bewertet. Die untersuchten Klebstoffsysteme wiesen Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von 1–12 W/(m.K.) auf. Neben der Wärmeleitfähigkeit wurden auch andere Aspekte wie die Aushärtungsbedingungen und die Aushärtungszeit berücksichtigt. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass geeignete Klebstoffsysteme verfügbar sind, die sowohl mechanische Verklebungen als auch das Wärmemanagement unterstützen können. Die Klebstoffschicht bleibt jedoch eine kritische Grenzfläche, da sie sowohl im Hinblick auf den Gesamtwärmetransport als auch aus Behandlungssicht einen limitierenden Faktor darstellen kann, bedingt durch eine Kombination aus langen Aushärtungszeiten (typischerweise zwischen 90 Minuten und mehreren Stunden) und hohen Aushärtungstemperaturen (typischerweise zwischen 80 °C und 150 °C).

## Beitrag zum Wissenstransfer

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse wurden für die Übertragung in Bildungs- und Ausbildungsformate im Rahmen der GRAVOacademy vorbereitet. Insbesondere eignen sich folgende Aspekte gut für die Integration in Trainingsmodule:

- Struktur-Prozess-Beziehungen im Prägen (einschließlich weicher Prägungstechniken)
- Materialbeschränkungen beim Dünnschichtenformen
- Vereinfachte Modellierungsansätze zur Bewertung der Prägbarkeit
- Wechselwirkung zwischen Materialverhalten und Prozessbeschränkungen

## 2. Verwertungsplan

Das Projekt hat das Fachwissen zur Strukturierung dünner Metallfolien und Verbundwerkstoffsysteme für funktionale Anwendungen erheblich erweitert. Die Ergebnisse liefern ein tieferes Verständnis der Struktur-Prozess-Zusammenhänge beim Prägen, einschließlich des Einflusses von Geometrie, Materialdicke und Werkzeugnachgiebigkeit, und ermöglichen die Entwicklung Vorhersagemodelle zur Bewertung der Prägefähigkeit.

Kurzfristig werden die Ergebnisse des Projekts im Rahmen studentischer Forschungsprojekte weiterentwickelt. Eine geplante Bachelorarbeit wird sich auf die Verfeinerung und Validierung der in dieser Arbeit entwickelten Ansätze zur Vorhersagemodellierung konzentrieren. Dazu gehören die systematische Erweiterung des experimentellen Datensatzes, die Verbesserung empirischer Regressionsmodelle zur Vorhersage der Prägekanaltiefe sowie die Validierung dehnungsbasierter Versagenskriterien. Ziel ist es, die Robustheit und Anwendbarkeit des Modells als praktisches Konstruktionswerkzeug zur Bewertung prägbarer Geometrien zu verbessern. Dieser Ansatz unterstützt sowohl die weitere wissenschaftliche Entwicklung des Themas als auch die Integration aktueller Forschungsergebnisse in die akademische Ausbildung.

Mittelfristig bilden die Ergebnisse die Grundlage für Folgeforschungsprojekte und gemeinsame Entwicklungen mit Industriepartnern, insbesondere in den Bereichen funktionale Oberflächen, Mikrostrukturierung und fortschrittliche Fertigung. Der Vergleich mit additiven Fertigungsansätzen eröffnet zudem Möglichkeiten für hybride oder alternative Produktionswege.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden in Lehr- und Ausbildungsformate übertragen, darunter die GRAVOacademy und relevante Studiengänge. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse durch wissenschaftliche Publikationen und Vorträge verbreitet werden, um die Weiterentwicklung und Anwendung der untersuchten Technologien zu unterstützen.

## 3. Finanzen

Die Projektmittel fließen hauptsächlich in Personalkosten und Material für die Durchführung der Experimente. Es wurden keine größeren Anschaffungen von Ausrüstung getätigt.