

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18959 N/1

Thema

Fertigung von Aluminiumprofilen mit kontinuierlicher Verstärkung

Berichtszeitraum

01.12.2015 - 31.05.2018

Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL), Dortmund

Dortmund, 16.11.2018

Ort, Datum



Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum.....	3
1.1 Auslegung des Demonstratorprofils mit Verstärkungselementen und Bewertung des Leichtbaupotenzials.....	3
1.2 Charakterisierung des Verstärkungselementwerkstoffes.....	3
1.3 Konzeptionierung von Werkzeugen unter industrierelevanten Gesichtspunkten.....	4
1.4 Weiterentwicklung der Analyse- und Optimierungsmethoden für die industrielle Anwendung.....	5
1.5 Anwendung der Analyse- und Optimierungsmethoden.....	6
1.6 Experimentelle Erprobung des Verfahrens und Parametervariation.....	10
1.7 Mechanische Charakterisierung der Bauteile.....	12
1.8 Analyse der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.....	20
2. Verwendung der Zuwendung.....	20
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	20
4. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Fortschritt.....	21
4.1 Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	21
5. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	21
5.1 Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzepts.....	22
6. Literaturverzeichnis.....	22

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.1. Auslegung des Demonstratorprofils mit Verstärkungselementen und Bewertung des Leichtbaupotenzials / Arbeitspaket 1

▪ Durchgeführte Arbeiten

Die beteiligten Unternehmen der Automobilindustrie einigten sich auf einen Seitenaufprallträger als Referenzgeometrie, bei der die Verstärkungselemente auf der Flanschseite eingebracht werden sollen (Abbildung 1). Die minimale Wandstärke des Profils beträgt 2,6 mm. Die Anzahl der Verstärkungselemente wurde auf vier festgelegt. Zusätzlich wurde festgelegt ein Doppelwerkzeug für die Versuche in der Industrie auszulegen, sodass die gleichzeitige Herstellung von zwei Profilen erfolgt. Für die Experimente am Institut soll hingegen nur ein einsträngiges Werkzeug verwendet werden.

Der Verstärkungselementwerkstoff wurde auf die Stahllegierung 1.4310 festgelegt. Dieser wird in drei verschiedenen Durchmessern (0,5 mm; 0,8 mm; 1,0 mm) verwendet, da der Draht mit geringer werdendem Querschnitt eine höhere Festigkeit aufweist. Nach erfolgreicher Einbettung der verschiedenen Drähte mit unterschiedlichen Durchmessern wurde im Projektverlauf vom projektbegleitenden Ausschuss festgelegt, dass nur noch Drähte mit einem Durchmesser von 1 mm verwendet werden, da diese den höchsten Verstärkungsanteil erzielen. Zusätzlich zum Stahldraht wurden sogenannte Formgedächtnisdrähte verwendet, die eine sehr hohe Duktilität aufweisen und aus einer Nickel-Titan-Legierung bestehen.

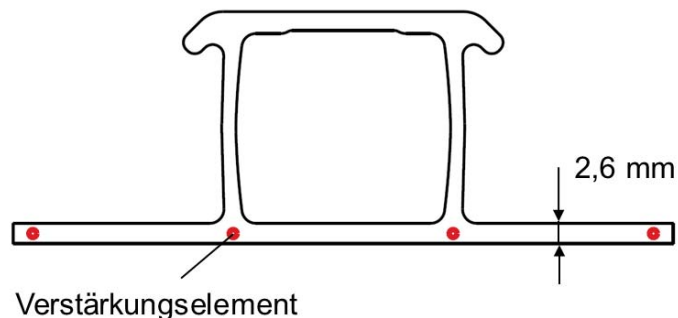


Abbildung 1: Seitenaufprallträger als Referenzgeometrie mit vier Verstärkungselementen

1.2. Charakterisierung des Verstärkungselementwerkstoffes / Arbeitspaket 2

▪ Durchgeführte Arbeiten

Die Verstärkungselemente werden beim Verbundstrangpressen durch das beheizte Werkzeug, durch den vorgewärmten Basiswerkstoff sowie durch die entstehende Umformwärme bei der Einbettung in der Verbundentstehungszone erwärmt. Da eine Erwärmung mit einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften einhergeht, wurde der Einfluss der Temperatur auf die Zugfestigkeit der eingesetzten Verstärkungselemente untersucht. Dazu wurden Warmzugversuche bei Temperaturen von 450°C, 500 °C und 550°C durchgeführt.

▪ Erzielte Ergebnisse

Die Ergebnisse (Abbildung 2) zeigen eine Abnahme der Werte auf Grund der Temperatur im Vergleich mit den Herstellerangaben bei Raumtemperatur: Ø 1 mm: 1884 MPa, Ø 0,8 mm: 2253, Ø 0,5 mm: 2244 MPa. Ebenfalls ist ein Abfall der Festigkeiten bei der Temperaturerhöhung von 450 °C auf 500 °C festzustellen. Eine Zunahme der Festigkeiten erfolgt bei einer weiteren Erhöhung der

Versuchstemperatur auf 550 °C. Mögliche Einflüsse können eine Phasenumwandlung innerhalb des Werkstoffes im vorhandenen Temperaturbereich oder Ungenauigkeiten bei der Messwertaufzeichnung sein. Insgesamt können die Ergebnisse jedoch für eine Abschätzung des prozesstechnischen Versagens der Verstärkungselemente während der Zuführung des Strangpressprozesses anhand von Finite-Element-Simulationen verwendet werden (AP 5).

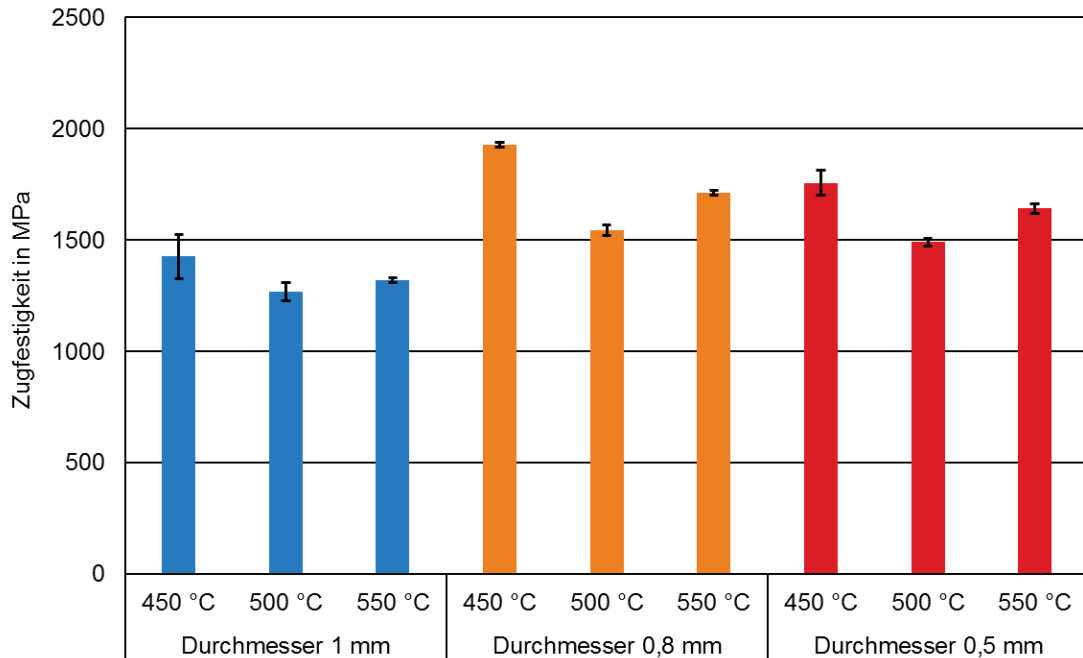


Abbildung 2: Ergebnisse der Warmzugversuche der Stahldrähte (Werkstoff 1.4310)

1.3. Konzeptionierung von Werkzeugen unter industrierelevanten Gesichtspunkten / Arbeitspaket 3

▪ Durchgeführte Arbeiten

Die Herausforderungen bei der Umsetzung des Werkzeugkonzeptes für das in AP 1 festgelegte Demonstratorprofil sind neben der Dimensionierung und der Anordnung der Werkzeugeinläufe, der Schweißkammergestaltung sowie der Gestaltung der Führungsflächengeometrie auch der im industriellen Umfeld vorhandene begrenzte Bauraum und die eingeschränkte Zugänglichkeit der Pressen und Werkzeuge. Deshalb wurde zunächst festgelegt, dass die Zuführung der Verstärkungselemente in das Werkzeug nur von einer Seite erfolgen soll. Die Umsetzung zweier unterschiedlicher Werkzeugkonzepte wurde folgendermaßen festgelegt: Zunächst soll ein Werkzeug mit einer variablen Gestaltung der Verbundentstehungslänge zur Erzeugung guter Verbundeigenschaften für die Erprobung auf der Institutspresse am IUL konzipiert werden. Um eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens im Sinne einer hohen Produktivität zu realisieren soll später ein zweisträngiges Werkzeug zur Erprobung bei der Firma Brökelmann konstruiert werden.

▪ Erzielte Ergebnisse

Das für die Institutspresse ausgelegte Werkzeugkonzept (Abbildung 3) besteht aus einer Abdeckplatte in welche die Zuführkassette eingesetzt wird, dem Dornteil mit vier austauschbaren Zuführstiften und der Matrize. Innerhalb der Zuführkassette wird die einseitige Zuführung der Verstärkungselemente und die Umlenkung innerhalb des

Werkzeuges realisiert. Innerhalb des Dornteils erfolgt der Übergang der Drähte von der Zuführkassette in die Zuführstifte.

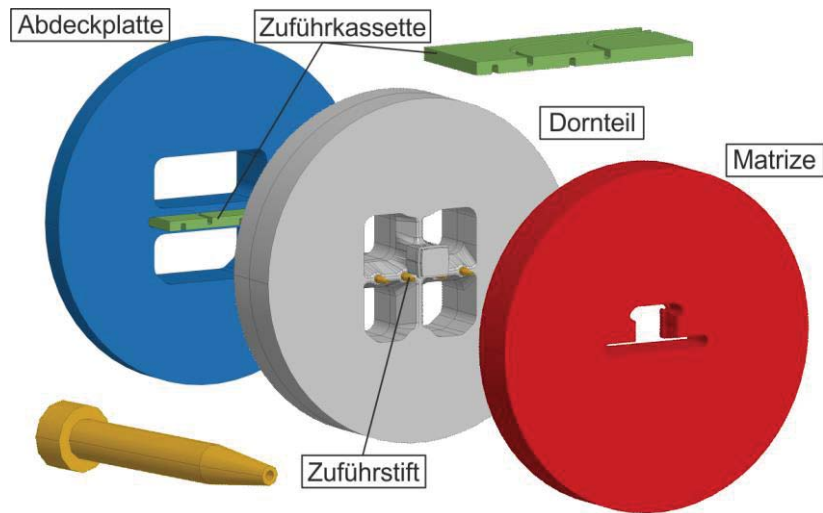


Abbildung 3: Werkzeugkonzept für die Erprobung mit der Institutspresse

Im Gegensatz zu bisherigen Verbundwerkzeugen werden die Zuführstifte anstelle eines Zuführdornes verwendet, um einen verbesserten Materialfluss des Aluminiums zu erhalten und eine flexible Gestaltung der Verbundentstehungslänge zu ermöglichen. Dadurch kann auf eine unvollständige Einbettung oder ein Abreißen der Verstärkungsdrähte reagiert werden, indem eine Verlängerung oder Verkürzung der Zuführstifte erfolgt. Zusätzlich können die Zuführstifte ausgetauscht und somit den verwendeten Drahtdurchmessern angepasst werden. Die Verbundentstehungslänge wurde zunächst kurz ausgelegt, um die resultierenden Spannungen auf die Drähte während der Einbettung zu reduzieren.

1.4. Weiterentwicklung der Analyse- und Optimierungsmethoden für die industrielle Anwendung / Arbeitspaket 4

▪ Durchgeführte Arbeiten

Die im Rahmen der Grundlagenentwicklung entwickelte Analyse- und Optimierungssoftware wurde bisher lediglich für akademische Profile mit einfachen Querschnitten eingesetzt. Hierbei wurden Elementanzahlen von 250.000 bis 750.000 verwendet. Für die industriellen Prozesse und damit verbundenen komplexeren Profilgeometrien wurde eine Erhöhung der Anzahl der Elemente vorgenommen. So können innerhalb der Software bis zu 4.000.000 Elemente für ein vernetztes Kontinuum verwendet werden. Dadurch ist es möglich komplexere Profile mit einer höheren Anzahl an Längspressnähten zu simulieren. Aufgrund der hohen Elementanzahl können so auch kleine und filigrane Profile simuliert werden, da es möglich ist feinere Netze sowohl für den Materialfluss als auch beispielsweise die Matrize zu verwenden. Ein weiterer Aspekt ist die Abbildung der Verstärkungselemente während des Verbundstrangpressprozesses. Mit Hilfe der Partikelverfolgung kann der Verlauf des Drahtes und somit eine Ablenkung und die finale Position im Profil bestimmt werden. Die Partikelbahn kann dabei sowohl in Werkstoffflussrichtung als auch entgegengesetzt berechnet werden, sodass eine Werkzeugoptimierung möglich ist. Zusätzlich wurde die Option zur Berechnung eines

Temperaturgradienten implementiert (Abbildung 4). Damit kann berücksichtigt werden, dass der Block im Container ungleichmäßig an Temperatur verliert. Dies beeinflusst den Materialfluss im Werkzeug und damit auch die Einbettposition der Verstärkungselemente im Profil.

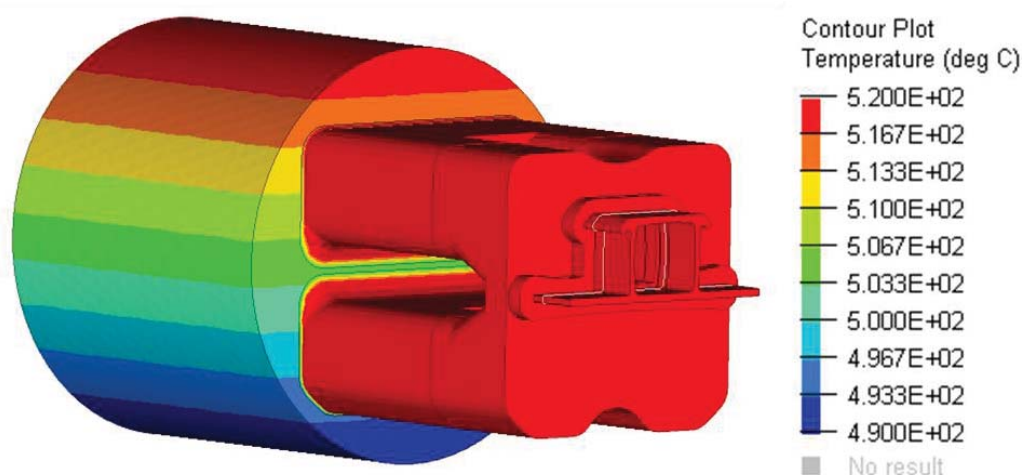


Abbildung 4: Simulation eines Temperaturgradienten

1.5. Anwendung der Analyse- und Optimierungsmethoden / Arbeitspaket 5

▪ Durchgeführte Arbeiten

Eine numerische Analyse mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) wurde für das erstellte Werkzeugkonzept durchgeführt. Dafür wurde die Software HyperXtrude (Version 14.0) von Altair Engineering für die numerische Analyse des Strangpressprozesses verwendet. Aufgrund der symmetrischen Form des Profils konnte ein Halbmodell verwendet werden, um die Rechenzeit zu reduzieren. Mit der numerischen Analyse wurden der Materialfluss und eine damit mögliche Ablenkung der Verstärkungselemente, sowie die daraus resultierenden Zugspannungen in den Drähten untersucht. Als Parameter wurden eine Blocktemperatur von 520 °C, eine Rezipiententemperatur von 450 °C, eine Werkzeugtemperatur von 430 °C und eine Pressgeschwindigkeit von 1 mm/s verwendet. Für das Elementgitter wurde ein Materialmodell einer Aluminiumlegierung des Typs EN AW 6082 verwendet. Das Pressverhältnis des Werkzeugkonzepts ist $R = 37$.

▪ Erzielte Ergebnisse

Ablenkung der Verstärkungselementdrähte

Die Ablenkung der Verstärkungselementdrähte wurde unter Verwendung der Partikelverfolgung in der Software HyperView analysiert. Dabei wird ein Partikel im Austrittspunkt des Zuführstiftes positioniert. Mit Hilfe der Partikelverfolgung ist es möglich, das Verstärkungselement und dessen Ablenkung während des Einbettungsprozesses ohne Modellierung des Drahtes selbst anzuzeigen. Die Bahn des Partikels die er innerhalb des Materialflusses zurücklegt wird dabei berechnet. Bei dieser Partikelverfolgung kann die Ablenkung der Verstärkungsdrähte und die finale Position im Profil analysiert werden. In Abbildung 5 sind die verschiedenen Komponenten des Simulationsmodells, bestehend aus der Schweißkammer, der Führungsfläche und dem Profil und der Partikelbahn für den inneren Verstärkungsdraht, dargestellt. Dafür wurde ein Schnitt durch das Simulationsmodell

an dieser Position (oben rechts dargestellt) erstellt. Für das Simulationsmodell ist die Fließgeschwindigkeit des Aluminiums dargestellt.

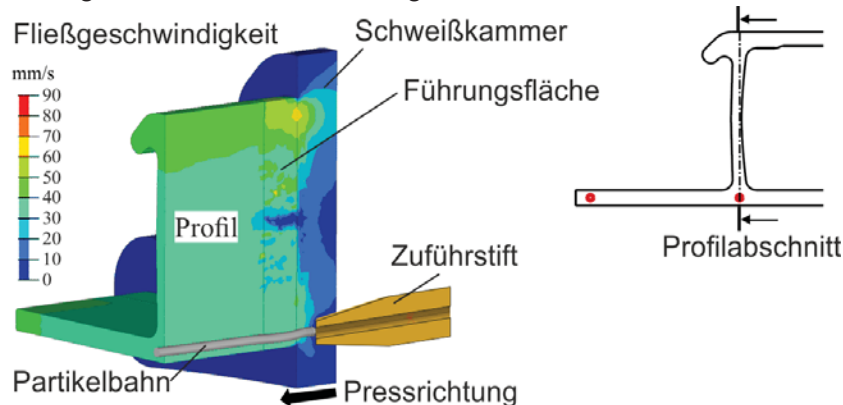


Abbildung 5: Partikelverfolgung zur Bestimmung der Ablenkung der Verstärkungselemente

Um die finale Position des Verstärkungsdrahtes im Profil und die daraus resultierende Ablenkung von der Zuführposition zu bestimmen, wurde eine zweidimensionale Vorderansicht des Profils betrachtet. In Abbildung 6 ist die Bestimmung der Ablenkung des inneren Drahtes dargestellt. Zu diesem Zweck wurde ein Partikel an der Öffnung des Zuführstiftes platziert und bis zu seiner endgültigen Position im Profil verfolgt. Die Eintrittsposition des Drahtes am Ende des Zuführstiftes, die den Beginn der Partikelspur markiert, ist mit einem roten Kreis dargestellt. Die endgültige Position des Drahtes im Profil, die das Ende der Partikelspur markiert, ist mit einem schwarzen Kreis dargestellt. Dazwischen ist der Verlauf der Partikelbahn in grau zu erkennen. Es ist deutlich sichtbar, dass es einen Unterschied zwischen der Eintritts- und der Endposition des Partikels im Profil gibt. Dabei kann eine horizontale Ablenkung von 0,9 mm gemessen werden und auch eine leichte vertikale Ablenkung festgestellt werden (siehe Abbildung 6 links).

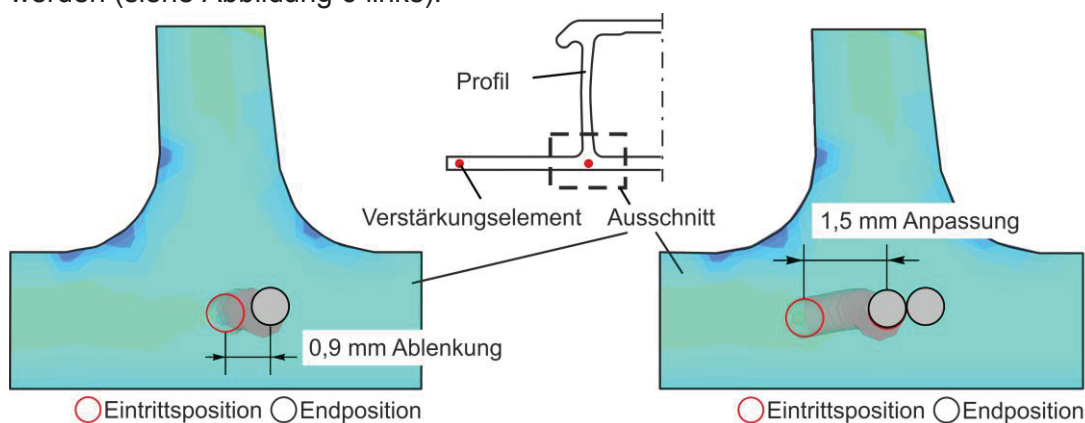


Abbildung 6: Analyse der Ablenkung des inneren Drahtes

Es kann gefolgert werden, dass der Verstärkungsdraht aufgrund des Materialflusses des Aluminiums nicht an der gewünschten Position im Profil eingebettet werden kann. Infolgedessen muss die Zuführposition der Verstärkungsdrähte angepasst werden. Die Anpassung der Zuführposition wurde ebenfalls durch eine Partikelbahn analysiert. In diesem Fall wurde der Partikel an der gewünschten Endposition im Profil platziert und entgegen der Fließrichtung des Aluminiums verfolgt, bis zu der Position, an der die Zuführung der Verstärkungselemente stattfinden sollte, um die genaue

Positionierung der Drähte im Profil zu realisieren. Es konnte festgestellt werden, dass die Position der Zuführstifte in horizontaler Richtung um 1,5 mm verschoben werden muss, um die korrekte Positionierung der Verstärkungsdrähte im Profil zu realisieren (siehe Abbildung 6 rechts).

Parallel wurde der Einfluss des Materialflusses des Aluminiums auf die Ablenkung des äußeren Verstärkungsdrahts mit Hilfe der Partikelverfolgung analysiert. In diesem Abschnitt des Profils wird das Aluminium aufgrund der Reibung an der Führungsfläche der Matrize verlangsamt. In Abbildung 7 ist der Schnitt durch das Simulationsmodell an der Position der Zuführung des äußeren Drahtes und der erzeugten Partikelbahn dargestellt. Darüber hinaus ist die zweidimensionale Vorderansicht des Profils zur Bestimmung der Ablenkung des Verstärkungselements zu sehen. In Abbildung 7 markiert der rote Kreis den Beginn der Partikelbahn und damit die Eintrittsposition des Drahtes und der schwarze Kreis das Ende der Partikelbahn und die finale Position im Profil. Der äußere Draht wird ebenfalls abgelenkt, da zu erkennen ist, dass sich die rote und schwarze Kreisposition unterscheiden.

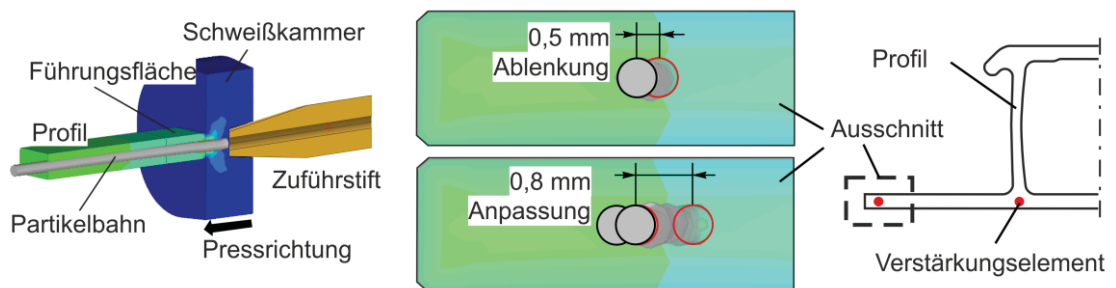


Abbildung 7: Analyse der Ablenkung des äußeren Drahtes

Insgesamt ergibt sich eine horizontale Ablenkung von 0,5 mm in Richtung des Außenrands des Profils. Die Anpassung der Zuführposition wurde analog zum inneren Verstärkungsdraht mit einer Berechnung der Partikelbahn entgegen der Fließrichtung des Aluminiums ermittelt. Für die korrekte Positionierung des äußeren Drahtes im Profil muss die Position des Zuführstiftes um 0,8 mm nach innen verschoben werden. Nach den Anpassungen der Positionen der Zuführstifte wurde das überarbeitete Werkzeugmodell erneut simuliert. Um zu prüfen, ob die neuen Zuführpositionen der Verstärkungsdrähte korrekt sind, wurde sowohl für den inneren als auch den äußeren Draht die Partikelverfolgung wiederholt.

Resultierende Zugspannungen in den Verstärkungsdrähten

Zusätzlich zu der numerischen Auswertung der Ablenkung der Verstärkungsdrähte wurde eine Bewertung der erwarteten Zugspannungen in den Verstärkungsdrähten mittels eines analytischen Modells (s. Dissertation Thomas Kloppenborg [1]) durchgeführt. Aufgrund der Reibung und der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten des Aluminiums und des Verstärkungselements treten Spannungen zwischen beiden Verbundpartnern auf, die zu Zugspannungen in den Verstärkungselementen führen, die während des Einbettungsprozesses ein Abreißen der Drähte verursachen können. Die höchsten Zugspannungen treten beim Übergang zwischen der Schweißkammer und den Führungsflächen aufgrund der

Querschnittsreduktion auf. An diesem Punkt tritt eine hohe Relativgeschwindigkeit zwischen dem Aluminium und dem Verstärkungselement auf. Abbildung 8 zeigt eine Schnittansicht der Schweißkammer, der Führungsfläche und dem Zuführstift für die Verstärkungselemente. Der Abstand zwischen dem Austritt des Zuführstifts und der Querschnittsreduktion am Übergang zwischen Schweißkammer und Führungsfläche beträgt 3 mm. Innerhalb dieser Distanz nimmt die Geschwindigkeit des Aluminiums konstant zu und erreicht ihr Maximum. Im Bereich der Führungsfläche bleibt die Geschwindigkeit bis zum Austritt des Profils konstant. Im Diagramm ist die komplette Verbundentstehungszone mit dem Abstand zwischen dem Ende des Zuführstifts und dem Übergangspunkt zur Führungsfläche markiert. Es wird deutlich, dass der äußere Draht eine höhere Geschwindigkeit als der innere Draht aufweist. Ebenfalls treten die höchsten Zugspannungen in diesem Abschnitt des Werkzeuges auf.

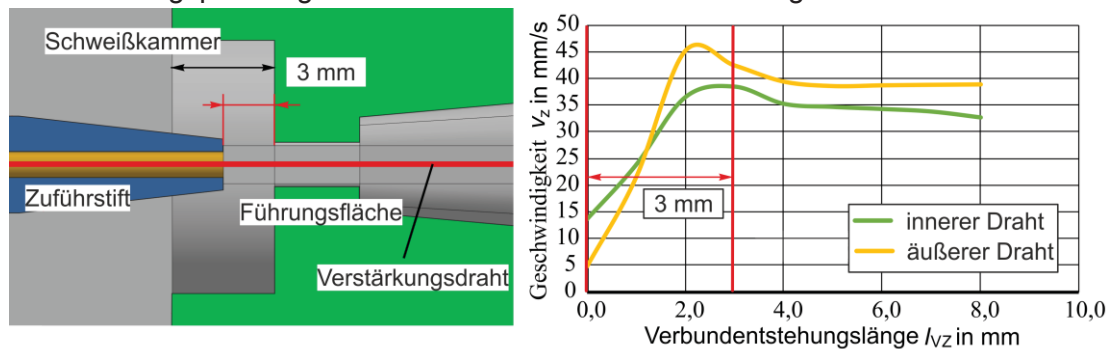


Abbildung 8: Geschwindigkeiten der Verstärkungsdrahte innerhalb der Schweißkammer

Die resultierenden Zugspannungen entlang der Partikelbahn der Verstärkungsdrahte können unter Berücksichtigung der Länge der Verbundentstehungslänge l_{vz} , der Reibung m zwischen dem Aluminium und dem Draht, dem Radius des Drahtes r_{RE} und den auftretenden Fließspannungen k_f berechnet werden (s. Formel in Abbildung 9). In Abbildung 9 sind die resultierenden Zugspannungen in Abhängigkeit von der Länge der Verbundentstehungslänge für den inneren und den äußeren Draht dargestellt.

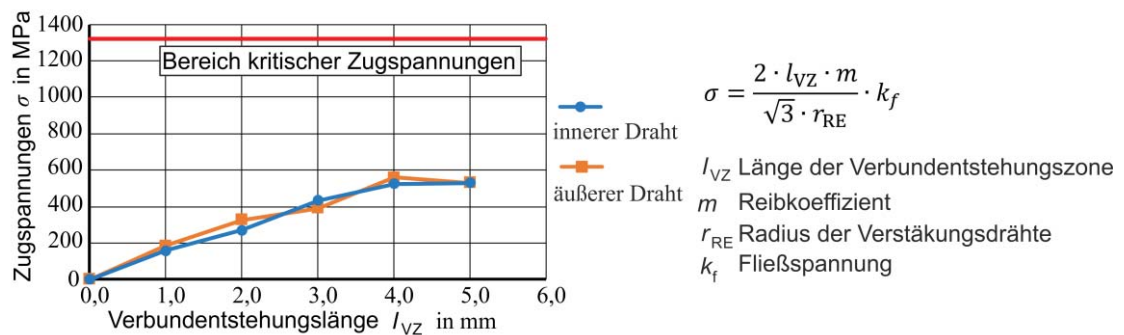


Abbildung 9: Resultierende Zugspannungen in den Verstärkungsdrahten innerhalb der Verbundentstehungszone

Bis zu einer Länge von 4 mm erhöhen sich die Zugspannungen konstant bis zu einem Maximalwert von 560 MPa. Danach bleiben die Werte konstant bzw. nehmen leicht ab. Die rote Linie im Diagramm markiert den Bereich der kritischen Zugspannungen, bei denen die Drähte reißen können. Diese Werte wurden durch die in AS 2 durchgeführten Warmzugversuche ermittelt. Es ist ersichtlich, dass dieser Bereich während der Einbettung der Verstärkungsdrahte nicht erreicht und daher während des Strangpressprozesses kein Versagen der Drähte erwartet wird.

1.6. Experimentelle Erprobung des Verfahrens und Parametervariation/ Arbeitspaket 6

▪ Durchgeführte Arbeiten

Basierend auf dem konzeptionellen Werkzeugentwurf und den Ergebnissen der numerischen Analyse wurde das Werkzeugkonzept wie in Arbeitspaket 3 beschrieben mit den Anpassungen nach den Simulationen umgesetzt. Für die ersten Pressversuche wurden drei verschiedene Aluminiumlegierungen verwendet; Reinaluminium (Al 99,5), EN AW-6060 und EN AW-6082, um den Einfluss verschiedener Fließspannungen auf die Einbettung bzw. die Position der Drähte im Strangpressprofil zu untersuchen. Die Pressversuche wurden auf der institutseigenen Strangpresse mit einer Maximalkraft von 10 MN durchgeführt. Die Pressgeschwindigkeit wurde von 0,5 mm/s über 1 mm/s bis 1,5 mm/s variiert. In der ersten Versuchsreihe wurde zunächst der Stahldraht (1.4310) mit einem Durchmesser von 1 mm verwendet. In weiteren Versuchsreihen wurde der Stahldraht (1.4310) mit einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet. Zusätzlich wurden Drähte aus sogenannten Formgedächtnislegierungen untersucht, um den Einfluss einer hohen Duktilität der Verstärkungselemente auf die Bauteileigenschaften der Profile zu erforschen. Diese Formgedächtnisdrähte bestehen dabei aus einer Nickel-Titan-Legierung und haben einen Durchmesser von 1 mm. Bei den anschließenden Versuchsreihen wurde Stempelgeschwindigkeit auf 1 mm/s festgesetzt und die übrigen Parameter ebenfalls konstant gehalten.

▪ Erzielte Ergebnisse

Die Versuche mit dem für die Institutspresse ausgelegten Werkzeugkonzept konnten erfolgreich durchgeführt werden. In der ersten Versuchsreihe konnten die Drähte in alle drei Legierungen eingebettet werden, ohne dass die Drähte während der Zuführung versagen oder reißen. Eine hohe Qualität der Einbettung konnte sowohl für den äußeren als auch für den inneren Draht erreicht werden. Bei allen weiteren Versuchsreihen wurden ebenfalls die guten Verbundeigenschaften wie nachfolgend beschrieben erzielt. In Abbildung 10 ist die Einbettung des äußeren Drahtes in die drei verschiedenen Legierungen gezeigt. Es ist ersichtlich, dass keine Lücke vorhanden ist und die Drähte vollständig vom Aluminium umschlossen sind.

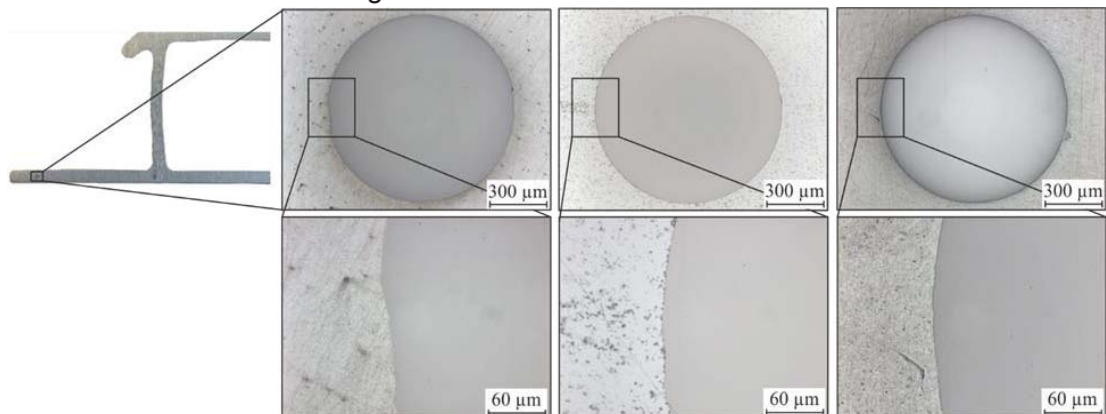


Abbildung 10: Einbettung des äußeren Drahtes in Al 99,5 (links), EN AW 6060 (mitte) und EN AW 6082 (rechts)

In gleicher Weise wurde der innere Draht in das Aluminiumprofil eingebettet. Wie in Abbildung 11 gezeigt, besteht eine vollständige Verbindung zwischen den beiden

Verbundpartnern. Im Hinblick auf Untersuchungen von Weidenmann [2] kann aufgrund des Pressverhältnisses und der Dicke der Drähte von einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen dem Draht und dem Aluminium ausgegangen werden. Weidenmann et al. zeigten, dass während des Verbundstrangpressens Legierungselemente des Stahldrahtes dazu neigen, in das Matrixmaterial zu diffundieren [3].

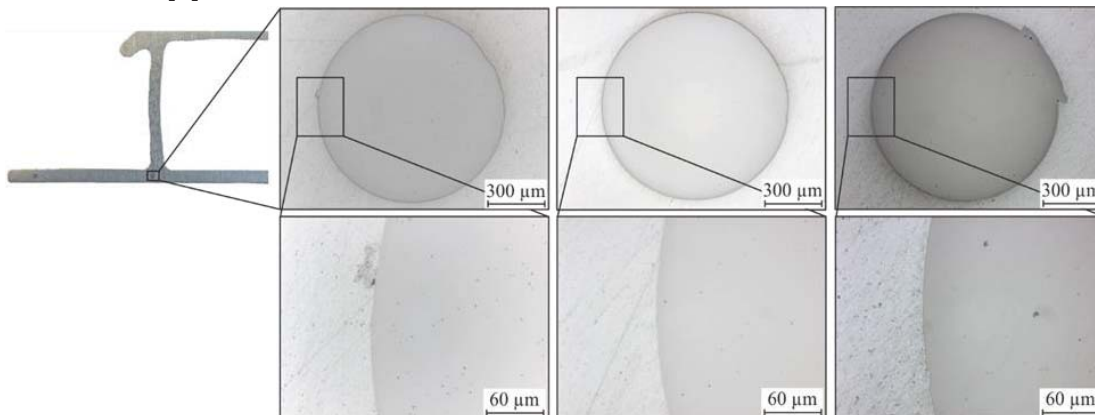


Abbildung 11: Einbettung des inneren Drahtes in Al 99,5 (links), EN AW 6060 (mitte) und EN AW 6082 (rechts)

Um die finale Position der Drähte im Profil zu untersuchen, wurden die Abstände zwischen der Mitte des Drahtes und der Kante des Profils gemessen, um die Ablenkungen in horizontaler oder vertikaler Richtung zu erfassen. Es kann festgestellt werden, dass es einen Einfluss der Matrixaluminiumlegierung auf die endgültige Positionierung des Stahldrahts im Profil gibt. In Abbildung 12 sind die unterschiedlichen Abstände für die Versuchsergebnisse und der Vergleich mit der Simulation für die Legierung EN AW 6082 für den äußeren Draht dargestellt. Die Legierung EN AW-6060 liefert die maximale horizontale Ablenkung, während reines Aluminium (Al 99,5) und die Legierung EN AW-6082 nur eine geringe Ablenkung zeigen.

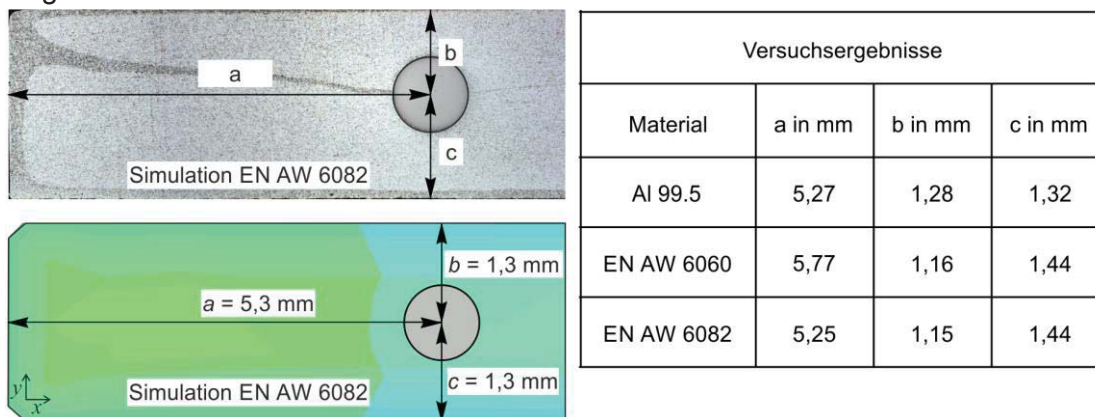


Abbildung 12: Vergleich zwischen Simulation und den Versuchsergebnissen für die Position des äußeren Stahldrahts im Aluminiumprofil.

Da das Profil für eine Automobilanwendung ausgelegt ist, wurde die Legierung EN AW 6082 als Matrixmaterial festgelegt und dementsprechend wurde das Werkzeugkonzept entwickelt und simuliert. Die experimentellen Untersuchungen der Legierung EN AW 6082 zeigen daher eine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen für die horizontale Ablenkung. Im Gegensatz dazu gibt es

eine vertikale Ablenkung für beide Legierungen (EN AW-6060 und EN AW-6082) und nur beim reinen Aluminium (Al 99,5) ist der Draht in der Mitte des Profils eingebettet.

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der zunehmenden Fließspannungen der Legierungen EN AW 6060 und EN AW 6082 die Drähte beim Einbettvorgang leicht nach oben gedrückt werden, was zu einer Auslenkung in y-Richtung führt. In Abbildung 13 ist die Ablenkung des inneren Drahtes gezeigt. Eine Ähnlichkeit kann hinsichtlich der vertikalen Ablenkung erkannt werden. Die Ablenkung erhöht sich mit steigender Fließspannung der Legierungen EN AW 6060 und EN AW 6082 (EN AW 6060: 30 MPa bei 500 ° C; EN AW 6082: 50 MPa bei 500 ° C) [4]. Bei allen Legierungen werden die Drähte in y-Richtung nach oben abgelenkt. Die höchste Ablenkung kann für die Legierung EN AW 6082 ermittelt werden, die von der Simulation etwa 0,5 mm abweicht. Die horizontale Ablenkung unterscheidet sich ebenfalls von der Simulation um 0,34 mm für die Legierung EN AW 6082. Darüber hinaus werden auch bei der Legierung Al 99,5 und der Legierung EN AW 6060 die Drähte horizontal abgelenkt. Insgesamt ergibt sich nur eine geringe horizontale im Vergleich zur vertikalen Ablenkung. Diese Ablenkung kann jedoch mit den Toleranzen der Zuführstifte erklärt werden. Der Durchmesser der Bohrungen in den Stiften ist 50 % größer als der Drahtdurchmesser, um die Zuführung der Drähte prozesssicher zu ermöglichen. Aufgrund dessen hat der Draht ein gewisses Spiel und kann deshalb zu einer Abweichung von der Simulation führen.

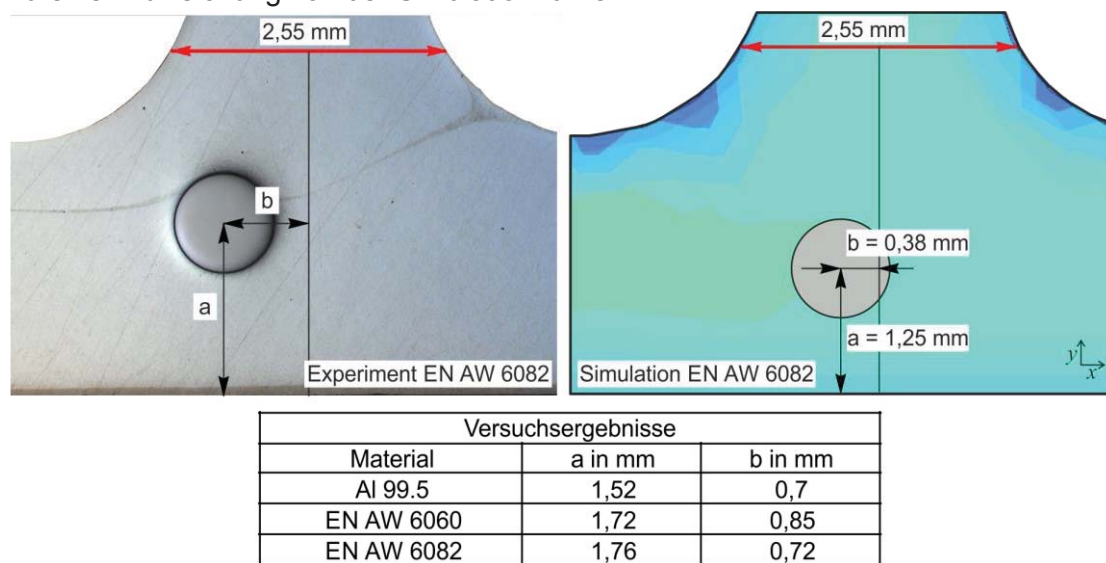


Abbildung 13: Vergleich zwischen Simulation und den Versuchsergebnissen für die Position des inneren Stahldrahts im Aluminiumprofil

1.7. Mechanische Charakterisierung der Bauteile/ Arbeitspaket 7

- Durchgeführte Arbeiten
Einfluss des Reckens auf die Verbundprofile

Die industrielle Herstellung von Aluminiumprofilen durch das Strangpressen umfasst das Recken der Profile, um ein geradliniges Produkt zu erhalten. Während des Reckens werden die Profile plastisch verformt. Übertragen auf den Verbundstrangpressprozess kann dies negative Auswirkungen auf das Verbundprofil haben. Aufgrund der stoffschlüssigen Verbindung zwischen dem Draht und dem Aluminium und den unterschiedlichen Bruchdehnungen von Stahl und Aluminium

kann eine Ablösung zwischen den beiden Komponenten oder sogar ein Bruch des Drahtes auftreten. Um den Einfluss des Reckens auf das Verbundprofil zu untersuchen, wurden Zugproben aus dem Profil entnommen und in einer Zugprüfmaschine gedehnt. Die Proben wurden gestreckt, bis eine definierte plastische Dehnung erhalten blieb. Drei verschiedene bleibende Dehnungen wurden mit einer konstanten Streckgeschwindigkeit von 1 mm/s erzeugt: 1,2 %, 2 % und 3 %. Die gestreckten Zugproben wurden entlang der Längsachse getrennt und ein Längsschliff präpariert. Anschließend wurden Bilder des Drahtes und der Aluminiummatrix mit einem Lichtmikroskop erstellt, um die Grenzfläche zwischen den Verbundpartnern und die Mikrostruktur zu untersuchen.

Mechanische Bauteileigenschaften

Um den Einfluss des Drahtes als Verstärkungselement und damit den Nutzen des Verbundprofils im Vergleich zum unverstärkten Profil zu untersuchen, wurden die mechanischen Eigenschaften untersucht. Zu diesem Zweck wurden Zugversuche an Proben aus unterschiedlichen Profilen durchgeführt. Insgesamt wurden sechs verschiedene Konfigurationen getestet: zwei verschiedene Drähte (1.4310 Stahl Durchmesser 1 mm und NiTi Formgedächtnislegierung Durchmesser 1 mm) und als Referenz Proben aus einem unverstärkten Profil. Zusätzlich wurden diese drei Konfigurationen wärmebehandelt analog zu der Wärmebehandlung, die an industriell hergestellten Profilen durchgeführt wird. Die Seitenaufprallträgerprofile wurden in sogenannten Performance-Tests und 3-Punkt-Biegeversuchen untersucht. Hierbei wurden ebenfalls Profile ohne Verstärkung als Referenz und Profile mit Stahldrähten und Formgedächtnisdrähten getestet.

- Erzielte Ergebnisse

Einfluss des Reckens auf die Verbundprofile

Der Einfluss des Reckens auf die Verbundprofile wurde anhand der Lichtmikroskopaufnahmen bewertet. Abbildung 14 zeigt den eingebetteten Stahldraht in der Aluminiummatrix. Es ist zu sehen, dass der Draht vollständig vom Aluminium umschlossen ist. Die um 1,2 % gedehnte Probe zeigt weder eine Einschnürung des Drahtes noch eine Ablösung vom Aluminium oder gar einen Riss.



Abbildung 14: Eingebetteter Draht in der Aluminiummatrix a) 1,2 % gedehnt und b) ungedehnt

Die Bilder mit einer höheren Auflösung sind in Abbildung 15 für die ungedehnte Probe als Referenz und die Dehnungen von 1,2 %, 2 % und 3 % gezeigt. Die

Lichtmikroskopbilder zeigen eine vollständige Verbindung des Drahtes mit dem Aluminium für alle Proben und somit kein Ablösen aufgrund der Dehnung. Es lässt sich ableiten, dass der Reckprozess keinen negativen Einfluss auf das Verbundprofil hat und die Verbindung zwischen Verstärkungsdraht und Aluminiummatrix nicht beeinflusst wird. Daraus kann geschlossen werden, dass der nachgelagerte Prozess des Reckens keine negativen Auswirkungen auf das Verbundprofil hat.

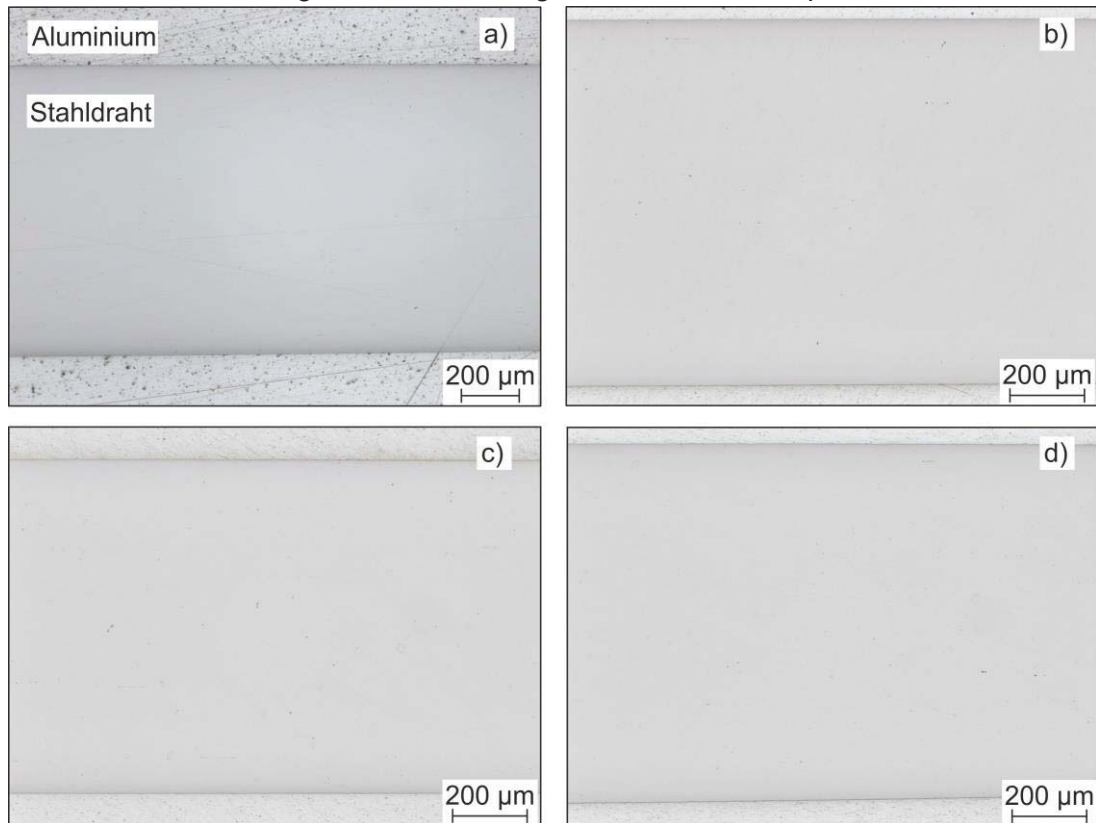


Abbildung 15: Eingebetteter Stahldraht in der Aluminiummatrix: a) ungedehnt, b) 1,2 %, c) 2 % d) 3 %

Mechanische Bauteileigenschaften

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 16 in Form von Spannungsdehnungskurven der sechs verschiedenen Konfigurationen dargestellt. Als erstes ist der Einfluss der Wärmebehandlung (Warmauslagerung 14 Stunden bei 165 ° C) zu beobachten. Aufgrund der Bildung von kleinen, gleichmäßig verteilten Ausscheidungen nimmt die Festigkeit des Aluminiums zu, was für jede Probe, die wärmebehandelt wurde, zu sehen ist, da die Spannungs-Dehnungs-Kurve über der Kurve der Probe liegt, die nicht wärmebehandelt wurde. Abgesehen davon wird die Wirkung der Verstärkungsdrahte deutlich. Der Formgedächtnislegierungsdraht (blau) erhöht die Festigkeit des Profils um 42 % im Vergleich zur unverstärkten Referenzprobe (grau) und der Stahldraht (grün) erhöht die Festigkeit um 65 %. Allerdings werden die Bruchdehnungen der Proben mit zunehmender Verstärkung reduziert. Die Bruchdehnung der Formgedächtnislegierung nimmt dabei nur um 9 % ab, wohingegen der Stahldraht zu einer Abnahme von 51 % führt.

Detaillierter ist der Einfluss in Abbildung 17 zu sehen. Im linken Diagramm ist die Zugfestigkeit für alle Konfigurationen aufgetragen. Der Einfluss der

Wärmebehandlung führt zu einer höheren Zugfestigkeit im Vergleich zur Referenz. Zusätzlich erhöht der Formgedächtnislegierungsdraht die Zugfestigkeit und die höchste Zugfestigkeit kann mit dem Stahldraht erreicht werden. Insgesamt ist eine Steigerung von 130 MPa möglich.

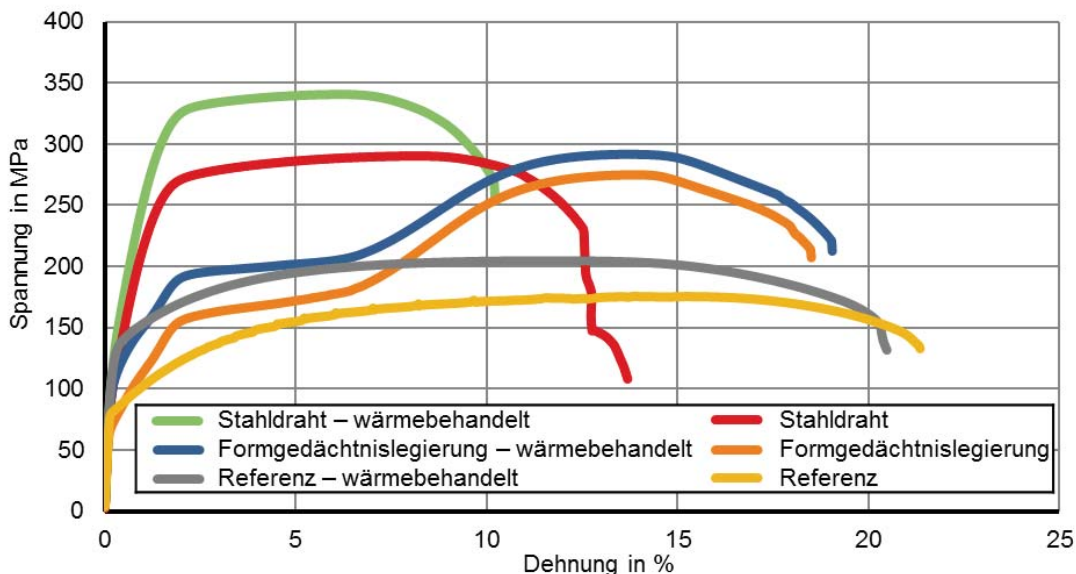


Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Es kann festgestellt werden, dass der Formgedächtnislegierungsdraht, der wärmebehandelt wird, die gleiche Zugfestigkeit wie der Stahldraht erreicht, jedoch im Gegensatz dazu eine höhere Bruchdehnung aufweist. Insgesamt nehmen die Bruchdehnungen (Abbildung 17 rechts) mit zunehmender Zugfestigkeit ab. Daher haben die verstärkten Profile geringere Bruchdehnungen als die unverstärkten Referenzprofile. Die Formgedächtnislegierungsdrähte verringern die Bruchdehnung um nur 9 % bis 12 %, während der Stahldraht zu einem Abfall von 31 % bis 51 % führt.

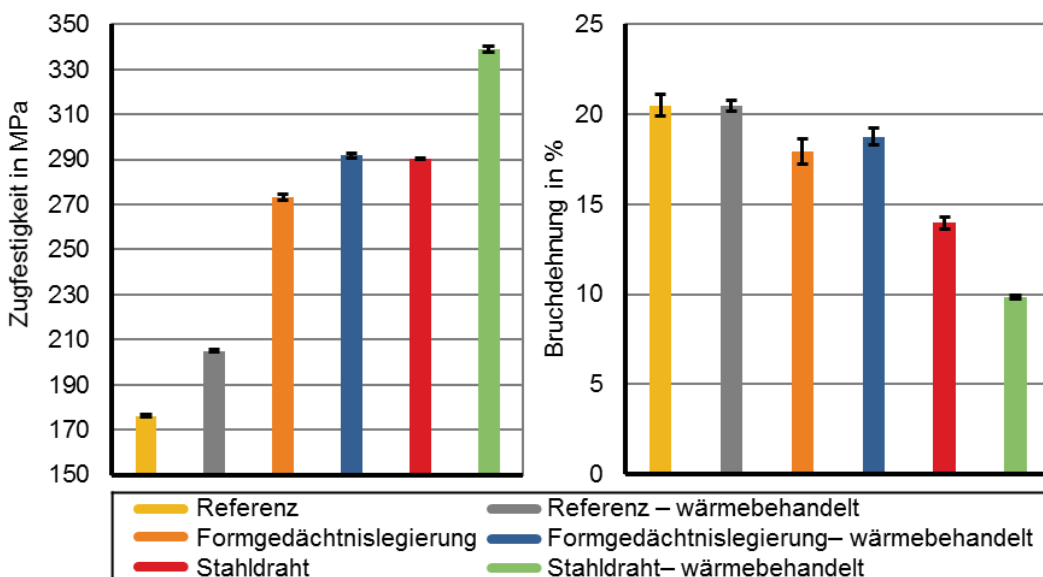


Abbildung 17: Zugfestigkeit und Bruchdehnung

Der entscheidende Faktor für crashrelevante Bauteile wie Seitenaufprallträger ist die Energieaufnahmefähigkeit. Hierbei ist eine hohe Bruchdehnung von Vorteil, da

dadurch sichergestellt wird, dass das Bauteil nicht sofort bricht, sondern möglichst viel Verformungsenergie aufnehmen kann. Entscheidend ist auch der Einfluss der Zugfestigkeit, da die aufgenommene Verformungsenergie im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bis zum Bruch durch die Fläche unter der Kurve bestimmt werden kann. Aufgrund der Dimension der Spannung und Dehnung entspricht die Fläche unter der Kurve der absorbierten Energie pro Materialvolumen. Dies hängt auch von der Höhe des Verstärkungsanteils im Profil ab. Die Zugproben haben einen Verstärkungsanteil von 7,6% für die Drähte mit einem Durchmesser von 1 mm und liegen damit höher als das Seitenaufprallträgerprofil. In Abbildung 18 ist die Energieabsorptionsfähigkeit der verschiedenen Profilkonfigurationen gezeigt. Es wird deutlich, dass das stahldrahtverstärkte Profil (rot) eine 8 % höhere Energieaufnahmefähigkeit als die Referenz (gelb) aufweist. Wenn jedoch die wärmebehandelten Profile verglichen werden, hat das stahldrahtverstärkte Profil (grün) eine um 19 % geringere Energieabsorptionsfähigkeit als die wärmebehandelte Referenz (grau). Nur der Formgedächtnislegierungsdraht kann aufgrund seiner höheren Duktilität die Energieabsorptionsfähigkeit sowohl für das wärmebehandelte Profil (blau 14 % Steigerung) als auch für das im Ausgangszustand befindliche Profil (orange 19 % Steigerung) erhöhen. Insgesamt zeigen diese Ergebnisse das Potential der Profile anhand der Zugproben. Die Leistung des gesamten Seitenaufprallträgerprofils wurde jedoch in einer separaten Reihe von Experimenten untersucht.

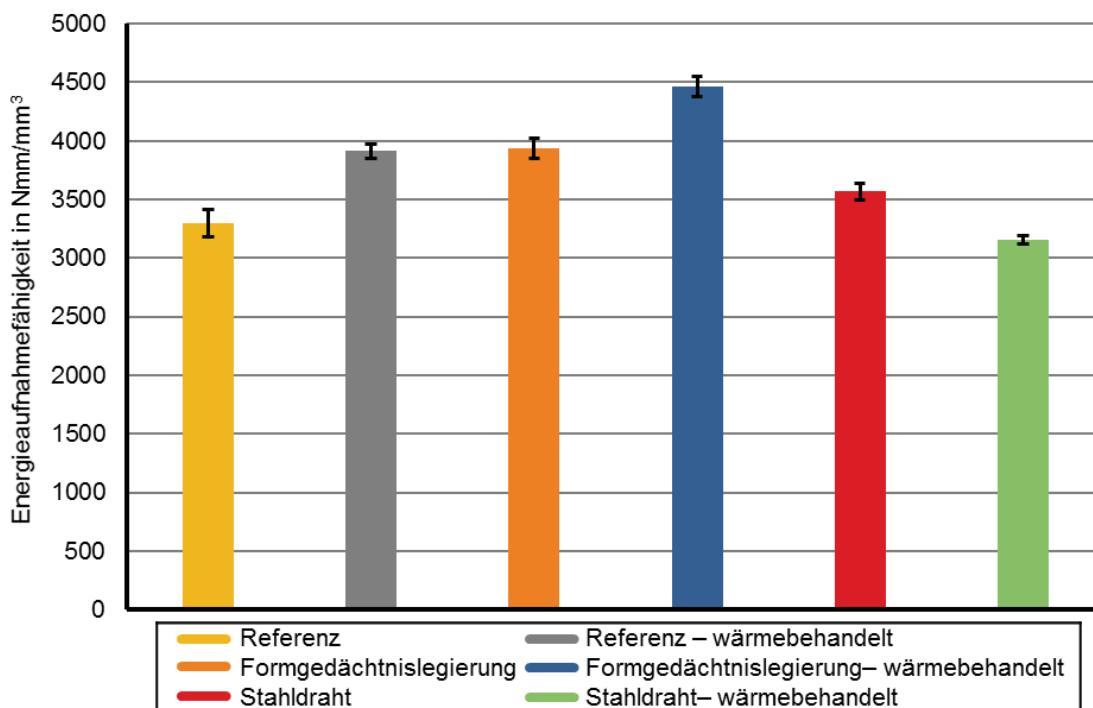


Abbildung 18: Energieaufnahmefähigkeit der Profile

Die Firma Daimler führte sogenannte Performance-Tests durch bei denen sowohl unverstärkte als auch mit Stahldraht (1.4310_2) und Formgedächtnisdraht verstärkte und wärmebehandelte Profile geprüft wurden. Das Seitenaufprallträgerprofil wird bei dem Performance-Test an den Enden fest eingespannt und anschließend mit einem Stempel, der mit einer konstanten Geschwindigkeit einen definierten Weg verfährt, belastet. Das Profil knickt dadurch aus und die benötigte Kraft wird gemessen. In Abbildung 19 ist der schematische Versuchsaufbau und das getestete Profil zu sehen.

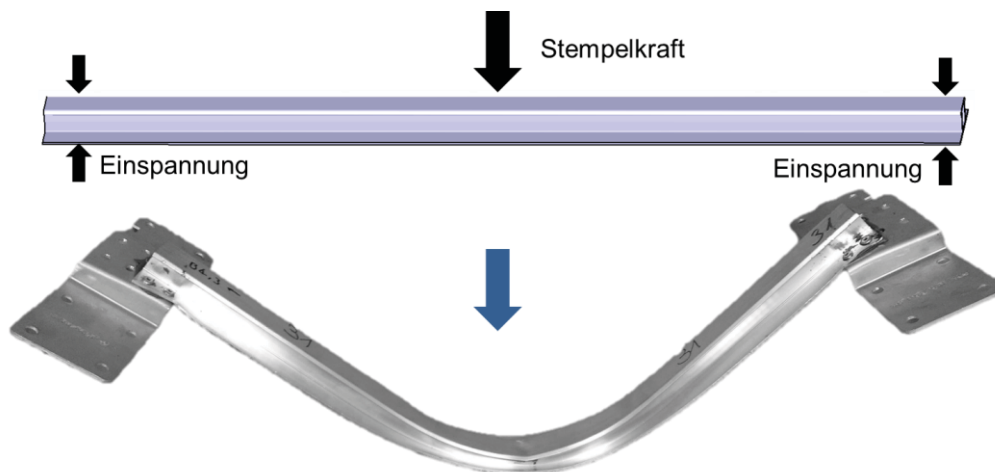


Abbildung 19: Schematischer Versuchsaufbau und geprüftes Profil des Daimler Performance-Tests

Die Ergebnisse der Performance-Tests sind in Abbildung 20 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kurven einen äquivalenten Verlauf zeigen. Die Profile mit Verstärkungselementen jedoch ab einem Stempelweg von 300 mm eine geringere Stempelkraft hervorrufen als die unverstärkten Profile und somit die Kurven unterhalb der Kurve der verstärkten Profile liegen. Dies bedeutet, dass der Effekt einer Verstärkung der Profile und somit eine Erhöhung der mechanischen Eigenschaften, beispielsweise der Steifigkeit nicht erzielt wird.

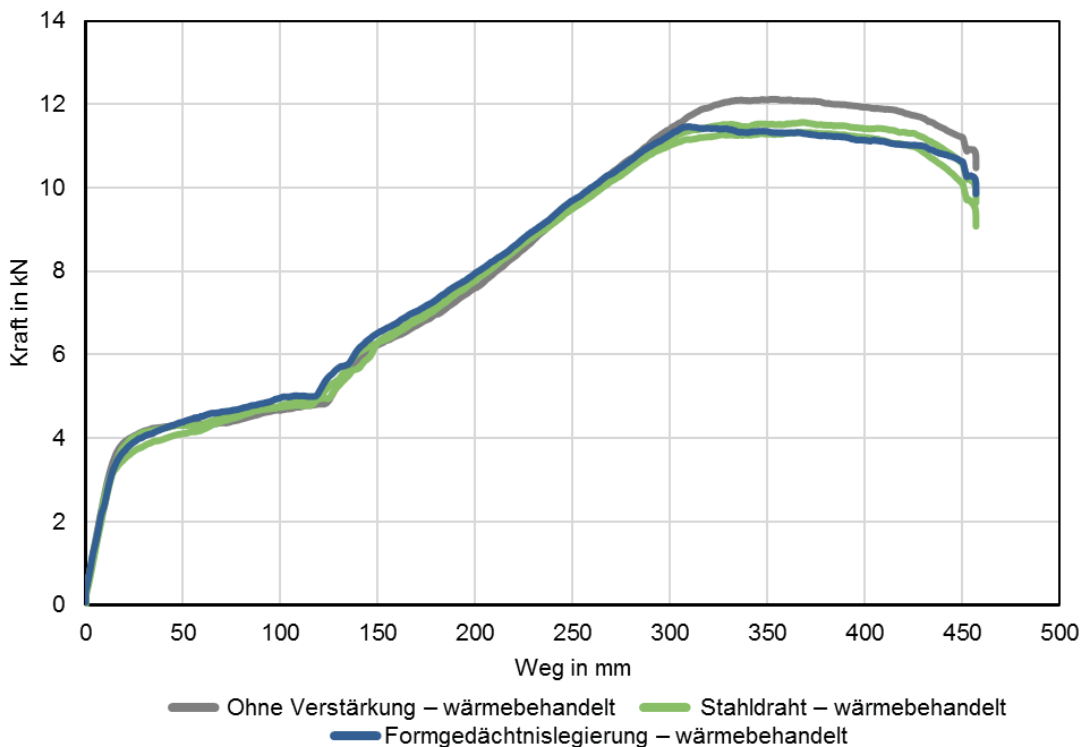


Abbildung 20: Kraft-Weg-Kurve des Daimler Performance Test

Bei von Audi durchgeführten 3-Punkt-Biege-Versuchen an verstärkten und unverstärkten Profilen ist ein ähnliches Ergebnis zu beobachten. Bei den Versuchen wurden die Profile auf zwei Auflager gelegt und mit einem Stempel in der Mitte des Profils mit einer konstanten Stempelgeschwindigkeit belastet. Die Ergebnisse zeigen

auch hier, dass die verstärkten Profile eine geringere Kraft benötigen als die unverstärkten. Zur Erklärung der schlechteren mechanischen Eigenschaften wurden zunächst Lichtmikroskopaufnahmen an den im Performancetest untersuchten Profilen erstellt. Es wurde der am stärksten belastete Bereich in der Profilmitte, der die höchste Biegung erfahren hat untersucht. Sowohl von der inneren als auch von der äußeren Drahtposition wurden Längs- und Querschliffe erstellt. In den Längsschliffen ist zunächst keine Veränderung des Matrix-Verstärkungsverbundes zu erkennen, für beide Drahtpositionen und die verschiedenen Verstärkungselemente. Im Querschliff ist jedoch für die innere Drahtposition zu erkennen, dass es zu einer Ablösung des Drahtes von der Aluminiummatrix kommt (Abbildung 21). An dieser Position ist die Belastung zu hoch, sodass der Verbund zwischen Verstärkungselement und Matrix versagt. Aufgrund der Ablösung des Drahtes und der damit verbundenen geringeren zu belastenden Querschnittsfläche des Profils, wird in den Performance-Tests eine geringere Kraft benötigt. Anhand von mehreren Querschliffen verteilt über die Länge des Profils konnte gezeigt werden, dass die Ablösung des Drahtes von der Aluminiummatrix im gesamten gebogenen Profil stattfindet und dies sowohl beim Stahldraht als auch beim Formgedächtnisdraht erfolgt.

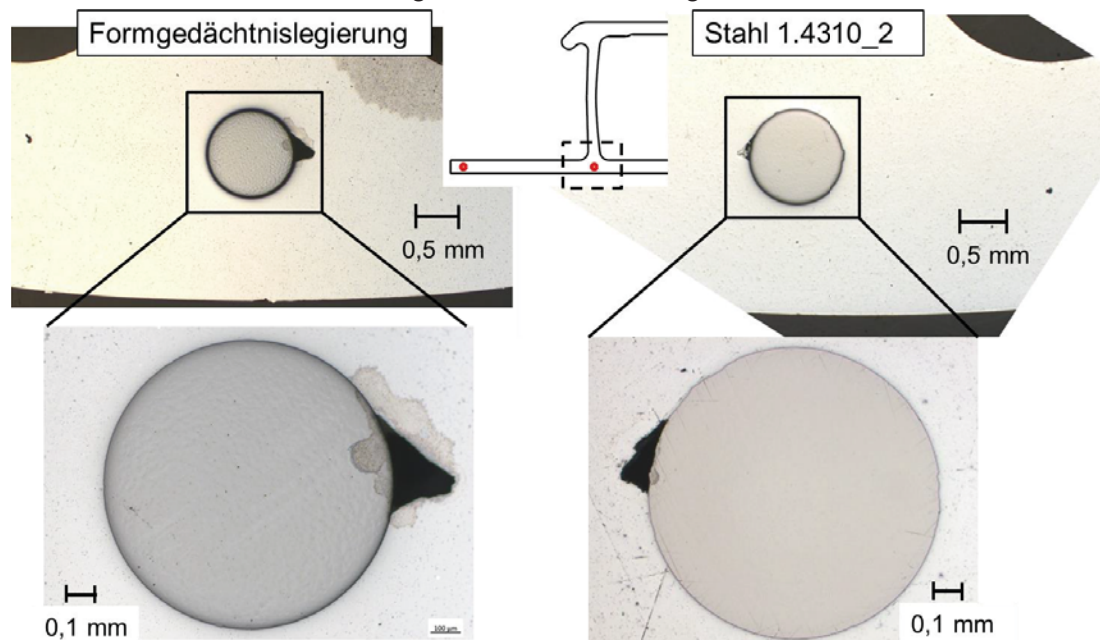


Abbildung 21: Lichtmikroskopaufnahmen der Ablösung des inneren Drahtes im Querschliff

Eine weitere Versuchsreihe mit Zugversuchen an Profilen, die denselben Verstärkungsanteil (0,7 %) haben wie die Seitenaufprallträgerprofile zeigt, dass der Verstärkungsanteil des Profils zu gering ist, um eine signifikante Steigerung der mechanischen Eigenschaften zu erzielen. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven sind nahezu identisch und ein Vergleich der Zugfestigkeit zeigt, dass diese um lediglich 1,2 % gesteigert werden kann durch die Verstärkungselemente (Abbildung 22). Allerdings wird gleichzeitig die Bruchdehnung um 7,6 % verringert, sodass insgesamt auch die Energieaufnahmefähigkeit nicht gesteigert werden kann.

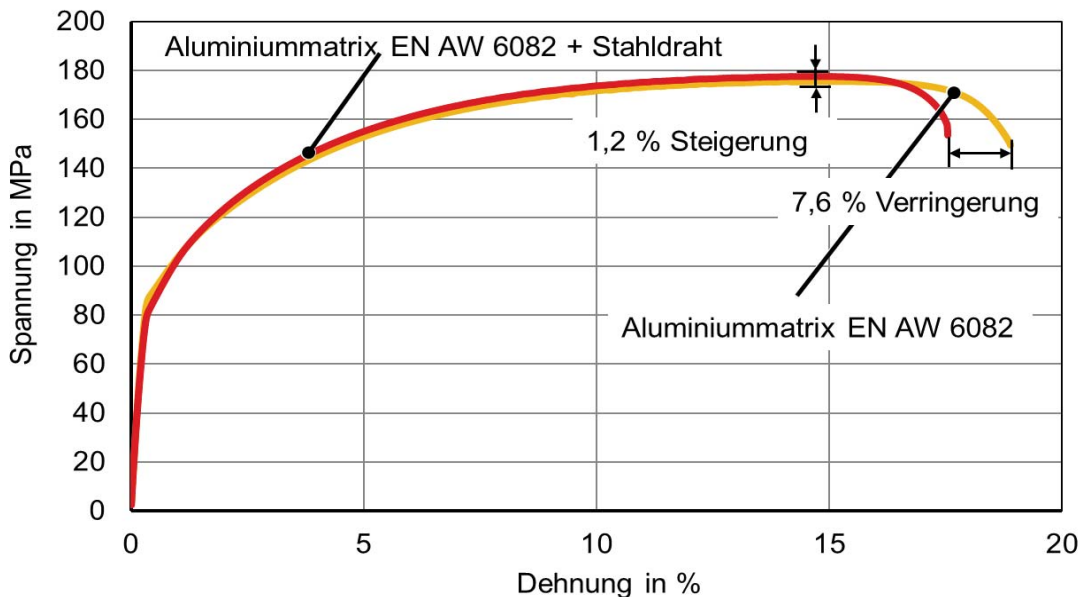


Abbildung 22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben mit geringem Verstärkungsanteil (0,7 %)

Ebenfalls negativ wirken sich durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten des Matrix- und Verstärkungselementwerkstoffs eingebrachte Eigenspannung bei der Abkühlung der Profile aus. Diese führen laut den Arbeiten von Morasch [5] und Wedekind [6] zur Entstehung von Druckeigenspannungen im Verstärkungselement und Zugeigenspannungen im Matrixwerkstoff, wodurch eine Reduktion der Dehngrenze im Bereich des Drahtes entsteht und dieser eher versagt. Aufpralltests an Verbundprofilen zeigen das durch die bereits vorhandene Beanspruchung der Matrix eine Reduktion der Tragfähigkeit entsteht. Simulationen des Performance Tests erklären ebenfalls die Ergebnisse. Hierfür wurde ein Halbmodell des Seitenaufprallträgers sowohl mit als auch ohne Verstärkungselement gerechnet. In Abbildung 23 ist der Spannungszustand in Y-Richtung bei maximaler Belastung für ein verstärktes und ein unverstärktes Profil dargestellt.

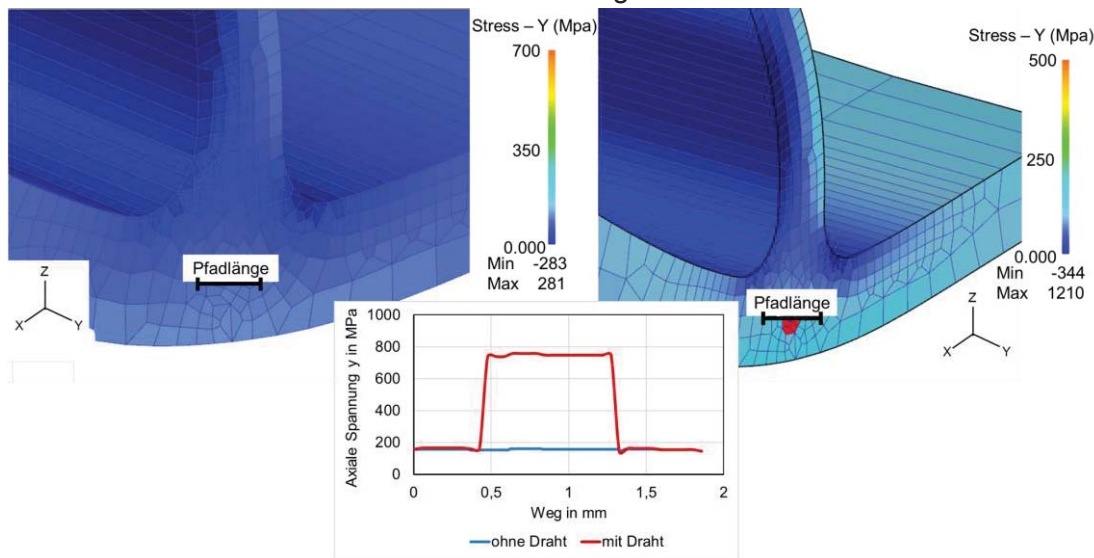


Abbildung 23: Vergleich der Spannungsbelastung im Performance-Test

Zusätzlich ist für einen Pfad im Bereich des inneren Drahtes die Spannung aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass es im Bereich des Drahtes zu einem deutlichen Anstieg der Spannungen kommt. Bei dem unverstärkten Profil sind die Spannungen hier im Vergleich konstant.

Eine Erhöhung des Verstärkungsanteils ist aufgrund der durch die Industrie gegebenen Restriktionen was die Zugänglichkeit der Pressen und Strangpresswerkzeuge betrifft nicht möglich. Ebenfalls würden weitere Zuführkanäle- und Bohrungen zu einem Stabilitätsproblem der Strangpresswerkzeuge führen. Deshalb lässt sich eine wirtschaftliche Produktion kontinuierlich verstärkter Profile mit dem Ziel einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, z.B. der Steifigkeit für dieses Profil nicht realisieren. Eine mögliche Anwendung könnte jedoch in der Verwendung von funktionalen Elementen liegen. So konnten z.B. schon erfolgreich isolierte Nickellitzen in ein Aluminiumprofil eingebettet werden, die zur Übertragung von Strom oder als Signaldatenleiter verwendet werden können.

1.8. Analyse der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens/ Arbeitspaket 8

- Durchgeführte Arbeiten
Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Abschätzung des Potenzials der Verfahrensvariante konnte aufgrund der fehlenden industriellen Realisierung des Prozesses nicht erfolgen. Der Vergleich der konventionellen Fertigung des Profils mit dem Verfahren des Verbundstrangpressens konnte deshalb nicht bewertet werden. Es kann zwar abgeschätzt werden, dass die Kosten für ein Verbundwerkzeug höher sind als die eines konventionellen Strangpresswerkzeuges, inwieweit sich dies durch eine wirtschaftliche Produktion der Bauteile und deren Weiterverarbeitung kompensieren lässt, kann derzeit jedoch nicht abgeschätzt werden.

2. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - wissenschaftliches Personal **24 Monate**
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) **entfällt**
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) **entfällt**

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten wurden gemäß den beantragten Arbeitspaketen durchgeführt. Die Bearbeitung der in den einzelnen Arbeitspaketen vorgesehenen Versuche wurde in erforderlichem Umfang vorgenommen. Die aufgewendeten Mittel dienten zur Finanzierung des wissenschaftlich-technischen Personals sowie diverser Sachmittel. Für die Bearbeitung war ein wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig, zusätzlich war ein technischer Mitarbeiter sowie eine studentische Hilfskraft beschäftigt. Die Aufgaben umfassten im betrachteten Projektzeitraum u. a. Materialbeschaffung, Werkstoffcharakterisierung, Metallografiearbeiten, Aufbau- und Umbauarbeiten an der Presse, Pressversuche sowie FEM-Simulationen. Aus den durchgeführten Arbeiten wurden Informationen für die Analyse- und Optimierungsmethoden und die damit verbundene Simulation des Verbundstrangpressprozesses gewonnen. Um den Prozess realitätsnah abbilden zu können sind Daten für den Materialfluss und den Einfluss der Verstärkungselemente während der Einbettung erforderlich, damit anschließend die Konzeptionierung und Auslegung der Werkzeuge erfolgen und ggf. das Werkzeug überarbeitet werden kann. Mit Hilfe der experimentellen Daten konnte eine Validierung der

numerischen Simulationen erfolgen und die Prozessfähigkeit des Werkzeuges durch die erfolgreiche Einbettung der Drähte in das Profil gezeigt werden. Die Untersuchung nachgeschalteter Prozessschritte sowie die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Verbundprofile ist für eine wirtschaftliche Umsetzung des Verfahrens erforderlich.

4. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Fortschritt

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten Erkenntnisse für eine wirtschaftliche Umsetzung des Verbundstrangpressens gewonnen werden. Die Umsetzung industrieller Profile als Verbundprofile wurde analysiert und bewertet sowie der Einsatz numerischer Analysemethoden zur Abbildung des Verbundstrangpressens validiert. Daraus lassen sich das Potential und die Einsatzmöglichkeiten des Verbundstrangpressens für eine industrielle Nutzung ableiten.

4.1 Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die Forschungsergebnisse können insbesondere in den Wirtschaftszweigen der Aluminiumverarbeitung, vor allem der Herstellung von Aluminiumprofilen, Maschinenbau und Fahrzeugbau, aber auch im Bereich des Werkzeugbaus genutzt werden. Aluminiumprofile finden in den unterschiedlichsten Branchen Anwendung. Unternehmen im Bereich der KMU sind vor allem Softwaredienstleister oder Zulieferbetriebe, die sich trotz der ständig wachsenden Anforderungen mit innovativen Ideen in einem zunehmend komplexeren Umfeld behaupten müssen. Ein direkter Nutzen des Verbundstrangpressens ist auf Grund der Ergebnisse im Bereich Steifigkeitssteigerung bei einer Biegebelastung des Profils zunächst nicht gegeben, die Ergebnisse können jedoch verwendet werden, um beispielsweise funktionale Profile auslegen zu können. Somit kann bei künftigen innovativen Anwendungen beispielsweise im Bereich der Elektromobilität ein Wettbewerbsvorteil im internationalen Vergleich entstehen.

5. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Projekttreffen mit pbA – „Kick Off“ Meeting	Abstimmung weiteres Vorgehen	Dortmund Projektsitzung	15.12.2015
Projekttreffen mit pbA	Abstimmung weiteres Vorgehen	Dortmund Projektsitzung	23.02.2017
Projekttreffen mit pbA	Besprechung der Ergebnisse und Abstimmung des weiteren Vorgehens	Dortmund Projektsitzung	06.07.2018
AK- Strangpressen	Statusbericht und Ergebnisdarstellung	Bad Nenndorf	12.09. – 14.09.2018
Wissenschaftliche Publikation	Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse	Materials Today: Proceedings“	November 2018
Vorträge auf Konferenzen	Ergebnistransfer in die Wissenschaft und Wirtschaft	ICEB 2017	20.06. – 23.06.2017
Vorträge auf Konferenzen	Ergebnistransfer in die Wissenschaft und Wirtschaft	European Aluminium Congress EAC	27.11. – 28.11.2017
Akademische Lehre	Ausbildung von Studenten	Hilfstätigkeiten, Projekt- und Abschlussarbeiten	kontinuierlich

AK- Strangpressen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Düsseldorf	einmalig innerhalb von 12 Monaten nach Abschluss des Projektes
Austausch mit der Industrie	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Treffen und Projekte mit Industriepartnern	kontinuierlich
Publikation in Fachzeitschriften	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Zeitschrift Aluminium	einmalig innerhalb von 12 Monaten nach Abschluss des Projektes
Akademische Lehre	Ausbildung von Studenten	Einbindung der Ergebnisse in Vorlesungen	kontinuierlich
Branchenverbände	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Bericht in GDA Bibliothek	Direkt nach Beendigung des Projektes

5.1 Einschätzung der Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Das Forschungsvorhaben zeigt die Möglichkeiten und Restriktionen einer industriellen Umsetzung des Verbundstrangpressens. Die Maßnahmen zur Konstruktion und Simulation eines Verbundwerkzeugs sind in Kapitel 1.3 und 1.5 zusammengefasst. Diese können bei einer Auslegung eines neuen Werkzeugkonzeptes hilfreich sein, um im Vorfeld kritische Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Durch das Transferkonzept werden die Ergebnisse einem breiten Publikum zur Verfügung gestellt. Durch Präsentationen auf internationalen Konferenzen sowie deren Tagungsbänden wird die anwendende Industrie eingebunden und bei nationalen Sitzungen der Arbeitskreise findet ein direkter Austausch mit Werkzeugmachern sowie Strangpressunternehmen statt. Zur weiteren Einsicht erfolgt eine kontinuierliche Veröffentlichung der Ergebnisse im institutseigenen Tätigkeitsbericht, der ebenso wie der Abschlussbericht über das Institut der Fachwelt zugänglich gemacht wird.

6. Literaturverzeichnis

- [1] T. Kloppenborg: Analyse- und Optimierungsmethoden für das Verbundstrangpressen, Dissertation. Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund, 2012, Shaker Verlag
- [2] K.A. Weidenmann: Werkstoffsysteme für verbundstranggepresste Aluminiummatrixverbunde, Dissertation, Shaker-Verlag, Aachen, 2006
- [3] K.A. Weidenmann, E. Kerscher, V. Schulze, D. Löhe: Characterization of the interfacial properties of compound-extruded lightweight profiles using the push-out-technique, Materials Science and Engineering: A. 424 1–2 (2006) 205–211
- [4] E. Doege, H. Meyer-Nolkemper, I. Saeed: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe, Carl Hanser Verlag München, 1986
- [5] A. Morasch: Mechanical characterization and modeling of extruded and steel-wire-reinforced aluminum sections with respect to impact loading, Dissertation, München, 2016
- [6] M. Wedekind: Charakterisierung von Steifigkeit und Festigkeit heterogen verstärkter Verbundstrangpressprofile, Dissertation, München, 2013