

Integration und Charakterisierung von Lasteinleitungspunkten in recycelte Faservlieslamine zum Einsatz im Sportgerätebereich

– M.Sc. Martin Zießler –

Kurzfassung

Verbindungen faserverstärkter Kunststoffe werden in der Regel mit Lasteinleitungselementen in Form von Inserts oder Onserts realisiert. Recycelte Wirrfasermatten bieten im Gegensatz zu klassischen endlosfaserverstärkten Laminaten den Vorteil eines nahezu isotropen Werkstoffverhaltens, das die direkte Integration von Gewindegängen zulässt. In der vorliegenden Arbeit werden die Potenziale solcher Verbindungen am Beispiel von Board-Sportgeräten aufgezeigt und eingehend diskutiert. Verschiedene Konzepte zur Integration wurden erarbeitet und nach der Probekörperherstellung einer makroskopischen und mikroskopischen Beurteilung unterzogen. Zur mechanischen Charakterisierung der Lasteinleitungspunkte wurden im Anschluss Auszugsversuche und Untersuchungen zum Überdrehmoment unter Berücksichtigung verschiedener Faservolumenanteile, Probendicken und Einschraubängen durchgeführt. Die integrierten Gewinde zeigten eine sehr gute Formgebung und die mechanischen Kennwerte liegen grundsätzlich auf dem Niveau klassischer Board-Sportgeräte. Sowohl die optischen, als auch die mechanischen Versuchsreihen beweisen im Wesentlichen die Prinziptauglichkeit und Leistungsfähigkeit der Prozessintegration von Lasteinleitungen in Wirrfaserlaminaten für den Sportgerätebereich. Daraus resultierend leisten die durchgeführten Untersuchungen einen Beitrag zur Verbreiterung der Anwendungsfelder von recycelten Fasermaterialien und nachhaltigen Reduktion des CO₂-Fußabdrucks faserverstärkter Kunststoffe.

Stichwörter

Kohlefaser-Vlies, Gewindeintegration, Recycling

Einleitung

Zum Verbinden von Strukturen verschiedener oder gleicher Art kommen im Wesentlichen drei unterschiedliche Verbindungstechniken zur Anwendung, die je nach Einsatzbedingungen und Anforderungen ihre Daseinsberechtigung besitzen. Neben einem Kraftschluss (z.B. Klemmen) stellen der Formschluss (z.B. Bolzen, Schlaufenanschluss) und der Stoffschluss (Kleben, Schweißen) die Hauptgruppen der Verbindungstechnik dar [1]. Insbesondere wenn Bauteile beispielsweise zu Reparaturzwecken oder zum Austausch von Komponenten wieder demontiert werden sollen oder zum Fügen ungleicher Werkstoffe, bilden klassische Schraubenverbindungen (Kombination aus Kraft- und Formschluss) die am häufigsten eingesetzte Verbindungsart [2], [3]. Im Bereich der Faserverbundkunststoffe (FVK) wird die Lastübertragung bei dicken, flächigen Bauteilen

mittels Krafteinleitungselementen aus Stahl, Aluminium oder Titan vorgenommen [1]. Alternativ kann, bei geringeren Belastungen der Fügepartner, das Gewinde auch direkt in den Verbund geschnitten werden [4]. Wesentliche Vorteile liegen dabei in den reduzierten Teilekosten, der kürzeren Fertigungsdauer und des geringeren Recyclingsaufwands. Als Nachteil sind hingegen die, im Vergleich zur Inserttechnologie, reduzierte Remontagefähigkeit und die höhere Vorspannkraftrelaxation anzusehen [2], [5]. Unabhängig der eingesetzten Methode stellt diese Art der Lasteinleitung eine Schwächung des Verbundes dar, da zum einen Endlosfasern zerteilt werden und zum anderen Rissbildung oder Delaminationen des Verbundes aufgrund ihrer Belastung in Dickenrichtung bei der Fertigung oder im Betrieb auftreten können [5], [6]. Untersuchungen von Weinert [7] zufolge stellt dabei die Qualität der

Kernlochbohrung den größten Einfluss auf die Vorschädigung der Gewindeflanken dar. Neben Faserissen und -ausbrüchen sind bei der Gewindefertigung je nach Gewindetiefe mit Temperaturen des Schneidwerkzeugs von bis zu 400 °C zu rechnen. Zwar kann die Wärme aufgrund der hohen Leitfähigkeit der Kohlefasern schnell abgeführt werden, eine lokale Schädigung der Matrix im Gewindebereich ist jedoch nicht vollends auszuschließen [8]. Des Weiteren geht die nachträgliche Erzeugung des Gewindes mit einer Freilegung der Faserenden einher. Insbesondere bei kohlenstofffaserverstärkten Laminaten führt dies aufgrund der hohen Potentialdifferenz im Vergleich zu den meisten metallischen Werkstoffen bei Vorhandensein eines Elektrolyts zur elektrochemischen Korrosionsreaktion [4], [6].

Um dem Leichtbau- und dem immer stärker in den Vordergrund rückenden Nachhaltigkeitsgedanken gerecht zu werden, wurde in Zusammenarbeit mit der High Tech Sport Goods (HTSG) GmbH im Rahmen des von der AiF Projekt GmbH geförderten Forschungsprojektes „Herstellung von Sportgeräten aus Sekundärwerkstoffen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz und Verringerung des CO₂-Fußabdrucks von Faserverbundmaterialien“ die Funktionsintegration von Gewindegängen in Kohlefaservlieswerkstoffe untersucht. Zur Vermeidung der dargestellten Problematiken in Bezug auf Delamination beim Gewindeschneiden, Recyclingfähigkeit und Korrosion, wurde die Erzeugung der Gewinde direkt in den Fertigungsprozess integriert. Insbesondere die Verwendung von recycelten Vlieswerkstoffen ist aufgrund des nahezu isotropen Werkstoffverhaltens für eine direkte Gewindeintegration gegenüber klassischen endlosfaserverstärkten Materialien mit deren limitierten mechanischen Eigenschaften senkrecht zur Laminebene überlegen. In dieser Veröffentlichung werden verschiedene Konzepte zur Gewindeintegration aufgezeigt und hinsichtlich fertigungstechnischer, mechanischer und wirtschaftlicher Aspekte untersucht sowie miteinander verglichen. Eine Bewertung der Ergebnisse und der Anwendbarkeit speziell im

Board-Sportgerätebereich findet im letzten Teil der vorliegenden Schrift mit einer eingehenden Erläuterung und Diskussion statt.

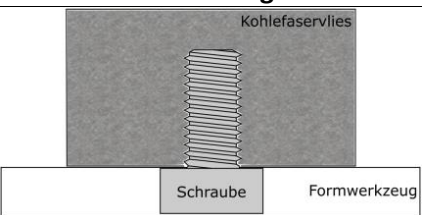
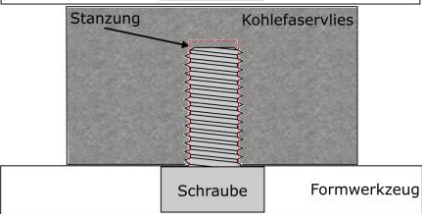
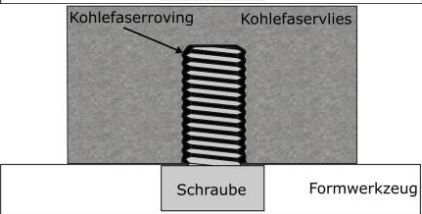
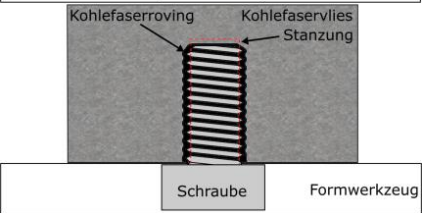
Konzepte der prozessseitigen Gewindeintegration in Faservlieswerkstoffe

Im Rahmen der Untersuchungen zur Prozessintegration von Gewindegängen in faserverstärkte Vlieswerkstoffe wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und unter mechanischen, fertigungstechnischen und großserientauglichen Gesichtspunkten bewertet. Grundlegend ist bei allen Varianten ein möglichst hoher Faservolumengehalt im Gewindegang anzustreben, damit die Eigenschaften des Vlieswerkstoffes nahezu vollständig ausgenutzt werden können. Den Ansatz aller in Betracht gezogenen Konzepte bildet das Abformen einer konventionellen, metrischen Schraube direkt im Laminierprozess. Hierbei sind unterschiedliche Variationen denkbar, die unter theoretischen Überlegungen die gegebenen Anforderungen erfüllen. Eine erste Methode bildet das Laminieren der Kohlefaservlieslagen direkt um das Gewinde. Dies bietet den wesentlichen Vorteil, dass die Fasern in ihrer Länge nicht beeinflusst werden und um die Schraube herumlaufen. Aus fertigungstechnischer Sicht ist jedoch jede Lage einzeln über die Schraube zu führen, was eine erhöhte Fertigungsdauer mit sich bringt. Diesem Effekt kann mit einer Stanzung der Faserlagen auf das Kernlochmaß des Gewindes vorgebeugt werden. Daraus folgt zum einen eine Verkürzung des Fertigungsprozesses und zum anderen laufen die entstandenen Faserenden direkt in den Gewindegang hinein. Bei beiden Konzepten ist der Faservolumengehalt jedoch werkstoffbedingt auf ca. 30 % limitiert. Eine Umwicklung mit einem Kohlefaserroving kann beispielsweise zur lokalen Erhöhung des Faservolumengehalts im Gewindegang dienen. Die zusätzliche Ablage des Rovings erfordert zwar einen weiteren Arbeitsschritt, daraus sollten jedoch bessere mechanische Eigenschaften des Lasteinleitungspunktes resultieren. Problematisch ist bei diesem Konzept hingegen die Ablage der Vlieslagen anzusehen, da dies zu einem Herunterschieben des

Rovings von der Schraube führen kann. Daher finden zur Überprüfung der Machbarkeit bei diesem Konzept für die weiteren Untersuchungen grundsätzlich beide zuvor dargestellten Varianten mit und ohne Stanzung des Rohmaterials Anwendung.

Die beschriebenen Konzepte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammenfassend schematisch dargestellt.

Tabelle 1: Konzeptübersicht

Konzept	Abbildung
K1	
K2	
K3	
K4	

Experimenteller Ansatz

Die Charakterisierung der Lasteinleitungspunkte wurde im Rahmen des Projektes anhand qualitativer und quantitativer Methoden an generischen Probekörpern durchgeführt. Makroskopische und mikroskopische Aufnahmen dienten dabei im ersten Schritt zur Bewertung der Abformgenauigkeit, auftretenden Schädigungen und des Faservolumengehalts des erzeugten Gewindes. Im Anschluss wurden Auszugsversuche und Versuche zur Ermittlung des Überdrehmoments vorgenommen.

Als Fasermaterial kam für alle Untersuchungen das isotrope, unvernadelte Kohlefaservlies C N450-IS/NF der Firma SGL Technologies GmbH mit einem Flächengewicht von 450 g/m² und einer durchschnittlichen Faserlänge von 40 mm zum Einsatz. Die Matrix für die Versuchskörper bildete das Epoxidharz-L mit EPH 161 Härter der R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. Als Lasteinleitungspunkt kam ein M6 Gewinde zur Anwendung, da dies einen Standard für die meisten Anbindungen im Board-Sportgerätebereich darstellt. Die Probenherstellung erfolgte in einem kombinierten Nasslaminier-Pressprozess im Tauchkantenwerkzeug (Abbildung 1). Dieser Werkzeugtyp bietet den Vorteil, dass das Vlies während des Pressvorgangs in der Kavität gehalten und somit ein möglichst hoher Faservolumengehalt des Probekörpers sichergestellt wird.



Abbildung 1: Tauchkantenwerkzeug mit eingelegten Faserlagen

Die Bewertung der Ausformung und des Faservolumengehalts des Gewindes bzw. Gewindegangs erfolgte mittels mikroskopischer Aufnahmen des Probenquerschnitts. Zur Charakterisierung der Auszugswerte wurde im Rahmen des Projektes eine Auszugsvorrichtung nach Vorgaben des „Insert Design Handbook“ der European Cooperation for Space Standardization [9] entwickelt (Abbildung 2).

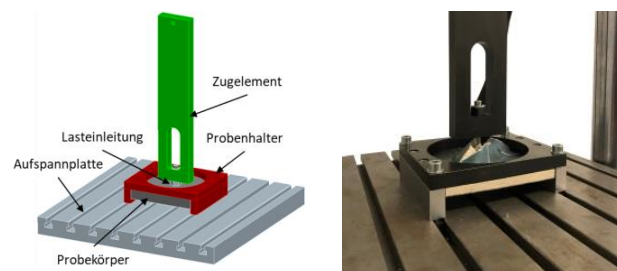


Abbildung 2: Auszugsvorrichtung mit eingespannter Probe

Die aus dem Probenhalter des Prüfstands resultierende Probengröße beträgt 135 mm x 135 mm mit einer Lasteinleitung im Zentrum des Versuchskörpers. Die Probendicke wurde auf eine für Board-Sportgeräte typische Wandstärke von 10 mm festgelegt und die Tiefe des Gewindes beträgt 7 mm. Darüber hinaus wurden der Einfluss des Faservolumengehalts (K1.3, K3.3), der Probendicke (K1.2, K3.2) und der Einschraublänge auf die Auszugskraft untersucht. Probekörper von konventionellen Board-Sportgeräten dienen als Referenzmessung für die Vliesproben mit prozessintegrierter Lasteinleitung. Sowohl Snow-, als auch Kite- und Wakeboards wurden in die Betrachtung mit einbezogen. Aus den dargelegten Ausführungen ergibt sich der folgende Versuchsplan zur Bestimmung der Auszugswerte.

Tabelle 2: Versuchsplan Charakterisierung Auszugskraft

Nr.	Probe	Abmessungen [mm]	FVG [%]	Anzahl
1	Kiteboard	135x135x10	-	3
2	Wakeboard	135x135x10	-	3
3	Snowboard	135x135x10	-	3
4.1	K1.1	135x135x10	15	3
4.2	K1.2	135x135x8	15	3
4.3	K1.3	135x135x8	20	3
5.1	K2.1	135x135x10	15	3
5.2	K2.2	135x135x10	15	3
6.1	K3.1	135x135x10	15	3
6.2	K3.2	135x135x8	15	3
6.3	K3.3	135x135x8	20	3
7	K4	135x135x10	15	3

Abschließende Untersuchungen zum maximalen Anzugs- bzw. Überdrehmoment wurden mit einem Drehmomentschlüssel und stufenweiser Steigerung des Moments bis zum Versagen des Gewindes durchgeführt.

Ergebnisse der qualitativen Bewertung der Lasteinleitungselemente

Grundsätzlich weisen alle untersuchten Konzepte bei Betrachtung der makroskopischen Aufnahmen eine sehr gute Abformung des Gewindes auf (Abbildung 3). Es sind weder Abplatzungen, noch

Risse oder andere Schädigungen des Gewindegangs zu beobachten. Lediglich kleinere Poren oder Luft einschlüsse traten sehr vereinzelt in den Gewindegängen auf. Des Weiteren führen die Stanzungen des Vliesmaterials bei K2 und K4 zu geringeren Faserumlenkungen bei steigender Probendicke im Bereich der Lasteinleitung.

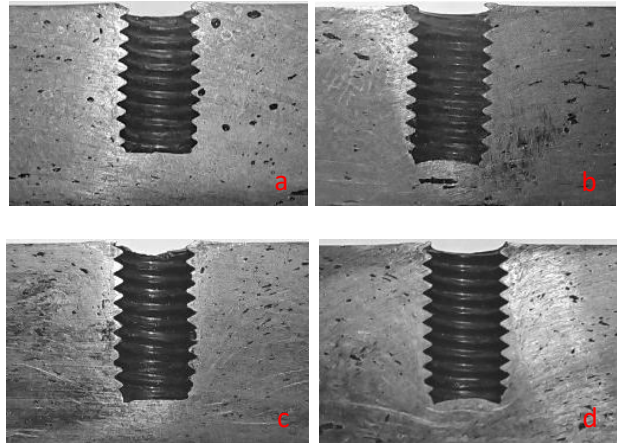


Abbildung 3: makroskopische Aufnahme K1 (a), K2 (b), K3 (c), K4 (d)

Der durchschnittliche Faservolumengehalt der Proben zur qualitativen Charakterisierung der Lasteinleitung beträgt ca. 15 % mit einem Porengehalt von maximal 3 %. Demgegenüber steht ein Faservolumengehalt von 20 % bei den Probennummern 4.3 und 6.3. Mit der Erhöhung des Faservolumengehalts geht gleichermaßen eine Verringerung des Porengehalts einher. Bei Betrachtung der mikroskopischen Aufnahmen stellt sich bei allen Proben ohne zusätzliche Rovingumwicklung der Schraube ein geringer Faservolumenanteil im Gewindegang ein. Insbesondere bei K1 bestehen die Gewindegänge nahezu ausschließlich aus Matrixwerkstoff (Abbildung 4 a). Bei den Versuchskörpern K2 sind hingegen Gewindebereiche zu beobachten bei denen der Faservolumengehalt in etwa dem der Probe entspricht (Abbildung 4 b). Die Umwicklung der Schraube aus K3 und K4 erbrachte eine Steigerung der Faseranteils auf bis zu 40 % (Abbildung 4 c).

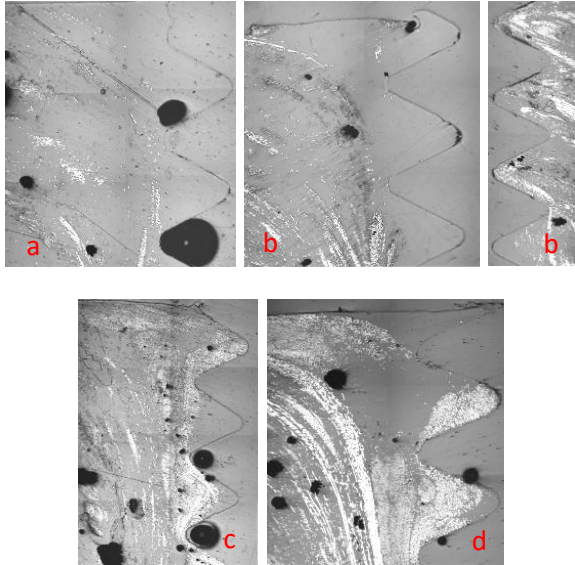


Abbildung 4: Mikroskopische Aufnahme K1 (a), K2 (b), K3 (c), K4 (d)

Ergebnisse der quantitativen Bewertung der Lasteinleitungselemente

Die Auszugskräfte der Referenzproben weisen grundsätzlich für die verschiedenen Board-Sportgeräte unterschiedliche Werte auf. Während das erste Versagen der Lasteinleitung des Kiteboards schon bei durchschnittlich 2,5 kN ($\sigma = 0,34$ kN) liegt, wurden Auszugskräfte von 3,2 kN ($\sigma = 0,17$ kN) für das Snowboard und 4,8 kN ($\sigma = 0,21$ kN) für das Wakeboard ermittelt. Die Auszugswerte aller Recycling-Vliesproben liegen mindestens auf einem ähnlichen Niveau, wie die des Kiteboards. Für K1.1 konnte ein durchschnittlicher Auszugswert von 4,6 kN ($\sigma = 0,49$ kN) gemessen werden, der näherungsweise im Bereich des Wertes der getesteten Wakeboardproben liegt. K3.1 und K4 sind mit Auszugswerten um 3,6 kN im Bereich des Snowboards anzusiedeln. Die Verringerung der Plattendicke führt bei K1.2 zu einer Abnahme des Auszugswertes um 33 % auf 3 kN ($\sigma = 0,21$ kN) und bei K3 um 35 % auf 2,5 kN ($\sigma = 0,2$ kN). Für erhöhte Faservolumenanteile (K1.3 und K3.3) konnte keine signifikante Änderung des Auszugswertes festgestellt werden. Die Erhöhung der Einschraubtiefe (K2.2) erbrachte hingegen eine Steigerung von rund 33 % der Auszugskraft von 2,7 kN ($\sigma = 0,61$ kN) auf 3,6 kN ($\sigma =$

0,65 kN). Alle Ergebnisse der Auszugsversuche sind zusammenfassend in Abbildung 5 dargestellt.

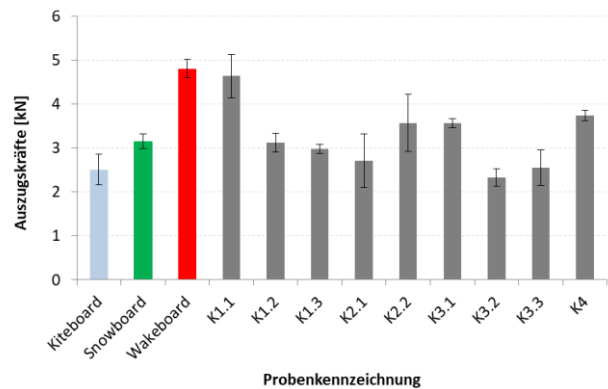


Abbildung 5: Auszugskräfte generische Probekörper

In Abbildung 6 ist beispielhaft der Kraft-Weg-Verlauf einer Kiteboardprobe mit seinen charakteristischen Punkten dargestellt. Alle weiteren Kraft-Weg-Verläufe der getesteten Referenzboard-Sportgeräte besitzen einen ähnlichen Verlauf, der sich lediglich durch die Position der spezifischen Punkte unterscheidet. Der erste Punkt (P1) kennzeichnet das Anreißen der Deckschicht mit einem Schubversagen der Polyurethan-Einbettmasse des Inserts unter 45°.

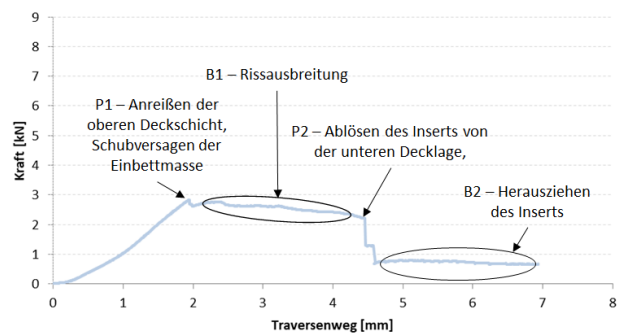


Abbildung 6: Auszug Kiteboard

Das Schubversagen geht dabei stets von Stellen mit hoher Kerbwirkung und damit verbunden hohen Spannungsspitzen an der Rondenkante oder des Übergangs von Insert zu Ronde aus. Das sich daran

anschließende Kraftplateau (B1) ist durch die Rissausbreitung der oberen Lage und Durchbiegen der Versuchsprobe gekennzeichnet. Im zweiten charakteristischen Punkt (P2) löst sich das Insert von der unteren Deckschicht, woraus ein abrupter Lastabfall resultiert. Die fehlende Anbindung von Insert und umgebenden Material führt zum charakteristischen Bereich (B2), in dem das Lasteinleitungselement aus der Probe herausgezogen wird. Dabei verformt sich die Blechrolle des Inserts plastisch, da in diesem Bereich lediglich die obere Decklage eine tragende Wirkung besitzt.

Ähnlich den Referenzproben der Board-Sportgeräte, weisen alle Recycling-Vliesproben eine vergleichbare Kraft-Weg-Kurve auf. Exemplarisch ist der charakteristische Verlauf eines Versuchskörpers aus der Reihe K1.1 in Abbildung 7 dargestellt.

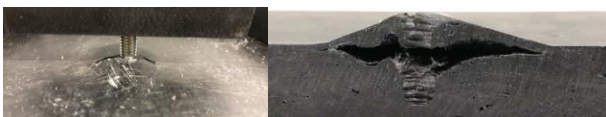
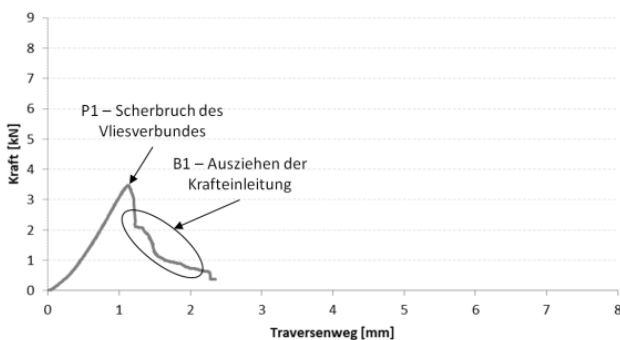


Abbildung 7: Auszug Recyclingvlies

Bei Beobachtung der Kurve wird deutlich, dass sie durch lediglich zwei wesentliche Bereiche gekennzeichnet ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich hierbei um eine monolithische Struktur von Lasteinleitung und Grundmaterial handelt. Im ersten Punkt (P1) versagt das Vlieslaminat am Schraubende unter einem Winkel von 45°. Der weitere Verlauf des Versagens hängt maßgeblich von der Anordnung des Wirrfaservlieses in der Probe ab. Bei einigen Proben läuft der Riss ausgehend vom Schraubende unter 45° bis zur Oberfläche aus

und bei anderen flacht der Versagenswinkel nach dem ersten Riss entlang einer Wirrfaserverlage bis zur Oberfläche ab. Der anschließende Bereich (B1) ist stets durch das Ausziehen des Lasteinleitungselements und den weiteren Rissfortschritt bis zum vollständigen Versagen geprägt. Des Weiteren ist zu beobachten, dass der Weg bis zum ersten Versagen (P1), bei gleichzeitig steilerem Anstieg der Kraft-Weg-Kurve der Recycling-Vliesproben im Vergleich zu den Board-Sportgeräten, deutlich geringer ist. Während sich das vollständige Versagen der Referenzproben je nach Einbettung des Lasteinleitungselements zwischen 2,5 mm und 4,5 mm einstellt, tritt das Versagen für die Vliesproben nach maximal 1,5 mm auf. Die höhere Steifigkeit des Auszugsverhaltens der Vliesproben kann mit dem steiferen Werkstoff um die Lasteinleitung begründet werden.

Das Überdrehmoment wurde exemplarisch an den Konzepten K1.1 und K3.1 mit und ohne Unterlegscheibe ermittelt. Alle Varianten weisen ein Überdrehmoment von ca. 4 kNm auf. Bei Beobachtung der Versuchsergebnisse (Abbildung 8) wird deutlich, dass insbesondere die ermittelten Werte für K3.1 eine hohe Streuung ($\sigma = 4,32$ kNm) aufweisen. Weiterhin kann sowohl für K1.1 als auch K3.1 eine Abnahme des durchschnittlichen Überdrehmoments von 10 % bzw. 47 % des Moments bei der Prüfung mit Unterlegscheibe festgestellt werden.

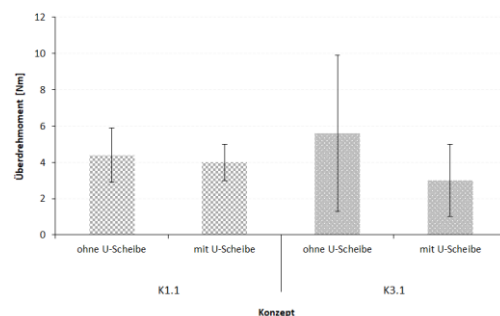


Abbildung 8: Überdrehmoment Konzept K1.1 und K3.1

Darüber hinaus sind bei den Untersuchungen zum Ein- und Ausschraubverhalten bei allen Konzepten keine optischen Schädigungen des Gewindengangs nach 50 Zyklen aufgetreten.

Diskussion

Die Abformung der Gewindegänge ist für alle Probestkörper als sehr gut anzusehen. Kleinere Fehlstellen am Gewindeeinlauf resultierten zum einen aus der Vielzahl an Abformungen und zum anderen aus der Qualität des Tauchkantenwerkzeugs. Bei Verwendung eines Metallwerkzeugs im Rahmen einer Serienfertigung ist von einer fehlerfreien Abformung auszugehen. Fehlstellen im Gewindegang sind hingegen fertigungstechnischer Natur. Es konnten vereinzelt immer wieder kleinere Lufteinschlüsse im Gewindegang beobachtet werden, die das Tragverhalten reduzieren. Daher ist grundsätzlich große Sorgfalt bei der Integration der Lasteinleitungen bereits bei der Fertigung und höchstmögliche Faservolumengehalte unabdingbar.

Die Tragfähigkeit der Gewinde sind nach Hoppmann [1] ein wesentliches Qualitätsmerkmal für die Lasteinleitungsintegration. Grundsätzlich liegen alle Auszugswerte mindestens über denen des Kiteboards (2,5 kN) und erreichen sogar die des Wakeboards (4,8 kN). Die zum Teil große Streuung der Auszugskraft ist mit einem starken fertigungspezifischen Einfluss zu begründen. Dieser Aspekt wird durch die mikroskopischen Aufnahmen bestätigt, indem der Faservolumengehalt in den Gewindegängen mitunter stark variiert. Trotzdem konnten unter Berücksichtigung der Standardabweichung die Auszugsanforderungen an das Kiteboard mindestens erreicht werden.

Aus fertigungstechnischen Gesichtspunkten erleichtert die Stanzung des Vlieses den Ablageprozess der Einzellagen im Fertigungsprozess. Damit verbunden ist jedoch bei Betrachtung der Versuchsergebnisse für K1.1 und K2.1 eine Abnahme der Auszugskraft um 38 %. Als Ursache könnte ein geringerer Faservolumengehalt in den Gewindegängen aufgeführt werden, da sich die Stanzung des unvernadelten Vlieses schon unter kleinstem Kraftaufwand weitet. Der Vergleichsweise geringere Faservolumengehalt in den Gewindegängen von K2.1 widerspricht zwar im ersten Moment den mikroskopischen Untersuchungen, ist aber durch das mögliche Aufziehen der

Stanzung im Laminier- oder Pressprozess durchaus nachvollziehbar. Bei den mit Roving (K3.1, K4) umwickelten Proben hingegen konnte kein Unterschied zwischen den gestanzten (K3.1) und ungestanzten (K4) Versuchskörpern festgestellt werden, da hier ein gleichbleibender Faservolumengehalt durch den Roving sichergestellt wird.

Weiterhin führt eine Erhöhung des Faservolumengehalts der Probe nicht zu höheren Auszugswerten. Daraus folgt die Annahme, dass sich trotz der räumlich höheren Wirrfaserdichte nicht mehr der freiliegenden Fasern in die Gewindegänge legen. Bedingt durch die begrenzte Höhe des Versuchswerkzeugs war es nicht möglich weitere Untersuchungen zum Einfluss des Faservolumengehalts durchzuführen. Im Laminierprozess muss mit einem deutlichen Harzüberschuss gearbeitet werden, um eine gleichmäßige Durchtränkung der Vlieslagen sicherzustellen. Daraus resultierend bauen die Einzellagen sehr stark auf, wodurch die maximale Werkzeughöhe schnell erreicht wurde. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch eine weitere Erhöhung des Faservolumengehalts nicht mehr Fasern im Gewindegang vorzufinden sind, was wiederum zu höheren Auszugskräften führt. Der Faseranteil kann demnach für reine Wirrfaservlieslamine ohne Rovingverstärkung nur über nachträglich zum Fertigungsprozess eingebrachte Gewinde erreicht werden. Vergleichsuntersuchungen zeigten trotz der in der Einleitung beschriebenen Nachteile, wie Ausbrüche der Gewindeflanken oder lokale Überhitzung des Matrixwerkstoffs im Kernlochbereich, bei gleicher Einschraublänge um bis zu 30 % höhere Auszugswerte.

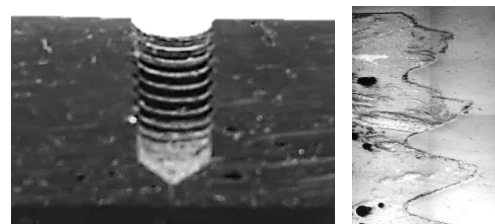


Abbildung 9: Makroskopische und mikroskopische Aufnahme eines mechanisch eingebrachten Gewindes

Die höheren Auszugskräfte der Proben mit größerer Einschraublänge (K2.2) sind mit den im Eingriff befindlichen Gewindegängen zu begründen. Grundsätzlich tragen die Gewindeflanken bei in Kunststoffen integrierten Lasteinleitungen aufgrund des im Vergleich zum Schraubenwerkstoff niedrigeren E-Moduls, nahezu gleichmäßig die aufgebracht Lasten. Ergänzende, am Institut durchgeführte, FEM-Simulationen unterstützen diese Aussage (Abbildung 10). Insbesondere bei fortschreitender Auszugsbewegung verteilen sich die anfangs lokalen Spannungen von den oberen Gewindegängen auf den gesamten Bereich des Gewindes.

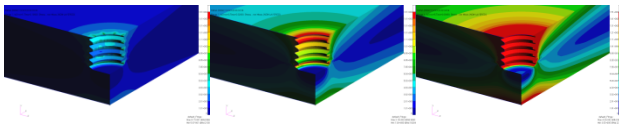


Abbildung 10: Spannungplots des Gewindes mit fortschreitender Auszugsbewegung (von links nach rechts)

Nach Onasch [10] besteht ein linearer Zusammenhang sowohl zwischen der Auszugskraft, als auch zwischen dem Eindrehmoment und der Schraubenslänge.

Das Überdrehmoment erfüllt im Gegensatz zur Auszugskraft für eine Einschraublänge von 6 mm die in der Norm DIN ISO 10958-1 (minimales Anzugsmoment 5 Nm) für Snowboards festgelegten Werte. Auch an dieser Stelle sind der fehlende bzw. unterschiedliche Faservolumengehalt in den Gewindegängen und der damit einhergehende fertigungstechnische Einfluss für das schlechte Überdrehmoment und die mitunter hohen Streuung der Werte anzuführen. Zwar liegt das Überdrehmoment weit über dem eines reinen Matrixgewindes (<1 Nm), erfüllt die Anforderungen der Norm jedoch nur vereinzelt. Vergleichsuntersuchungen an nachträglich eingebrachten Gewinden erbrachten ein Überdrehmoment von 12 Nm und liegen damit bei geringerer Streuung um den Faktor 2,8 höher als die direkt eingebrachten Lasteinleitungen. Die Reduzierung des Überdrehmoments mit Unterlegscheibe ist mit der gleichzeitigen Reduktion der im Eingriff

befindlichen Gewindegänge zu erklären. Der genaue Einfluss der Einschraublänge wurde in den durchgeführten Untersuchungen nicht betrachtet. Auf Grundlage der in der Literatur zugänglichen Publikationen und den erbrachten Ergebnissen in Bezug auf die Auszugskraft ist allerdings eine Erhöhung des Überdrehmoments mit größerer Einschraublänge zu erwarten.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt im Board-Sportbereich ist das Auszugsverhalten der Lasteinleitung. Während bei den Untersuchungen der Referenzproben ein zum Teil sehr gutmütiges bzw. tolerables Versagensverhalten mit langem Auszugsweg des Inserts zu beobachten ist, ist bei den integrierten Gewinden eher ein abrupter Abfall der Kurve durch die fehlende Abstützung der versagenden Gewindegänge charakteristisch. Das Aufreißen der Faserlage führt zwar nach dem anfänglich sprunghaften Abfall der Kraft um ca. 40 % zu einer über den Weg näherungsweise gleichmäßigen Senkung der Kraft, inwiefern das Resttragverhalten im Versagensfall noch tolerabel ist, müssen die Versuche prozessintegrierter Lasteinleitungen unter Realbedingungen zeigen.

Fazit und Ausblick

Grundsätzlich konnte mit den durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, dass die prozessseitige Integration von Gewindegängen in Faservlieswerkstoffe möglich ist und den Anforderungen an Board-Sportgeräte genüge trägt. Insbesondere in Bezug auf die Auszugswerte konnte das Niveau von klassisch aufgebauten Sportgeräten erreicht werden. Kritisch ist hingegen das mit der untersuchten Einschraublänge erbrachte Überdrehmoment anzusehen, da es nur vereinzelt die Norm DIN 10958-1 erfüllt. Wie bereits vom vorangegangenen Kapitel beschrieben korreliert die Erhöhung des Überdrehmoments mit einer Erhöhung der Einschraublänge und ist dadurch mit gleichzeitiger Änderung der Auszugskraft unter Berücksichtigung der für den Anwendungsfall geltenden geometrischen Rahmenbedingungen anpassbar. Doch nicht nur für den Board-Sportbereich könnten in Wirrfaservliese di-

rekt integrierte Gewinde Anwendung finden. Sowohl in der Automobil-, als auch in der Flugzeugindustrie oder im Maschinenbau im Allgemeinen ist der Einsatz von Faservlieslaminaten mit hoher Funktionsintegration denkbar. Als Beispiele seien hierbei Abdeckungen, Kfz-Sitzrückwände, Heckspoiler oder Maschinentraversen aufgeführt.

Das Fertigungsverfahren bietet nach wie vor noch nicht erschöpfte Potenziale, da ein hoher Faservolumengehalt in den Gewindegängen nicht gleichmäßig und reproduzierbar sichergestellt werden konnte. Hierzu sind weitere Versuchsreihen erforderlich, da dies eine Grundvoraussetzung für den Serieneinsatz darstellt. Darüber hinaus muss ein innovatives Werkzeugkonzept für die Gewindeintegration entwickelt werden, welches eine Serienfertigung zulässt. Einen alternativen Ansatz bildet an dieser Stelle auch eine teilweise Prozessintegration der Lasteinleitung, indem nur das Kernloch des angestrebten Gewindes im Bauteil abgeformt wird. Hierdurch kann der auftretenden Schädigung des Kernlochbohrens und den damit verbundenen Faserissen und Ausbrüchen an den Gewindeflanken bei gleichzeitiger Reduktion der Fertigungsschritte entgegengewirkt werden. Weitere Untersuchungen sollen zeigen welche Auszugskräfte und Überdrehmomente mit einem solchen Verfahren erreicht werden können. Darüber hinaus sind Versuche zum Korrosionsverhalten der Lasteinleitungspunkte zum Einsatz in feuchten Umgebungen durchzuführen.

In den Untersuchungen fand bisher nur die Betrachtung unter statischen Lastbedingungen statt, die die Basis für dynamische Versuchsreihen bilden. Dabei stellen zum einen das Hysteresis Messverfahren und zum anderen der Laststeigerungs- und Einstufendauerschwingversuch geeignete Verfahren zur Ermittlung der dynamischen Grenzlasten und Charakterisierung der Entwicklung des Schädigungsverhaltens bis zum endgültigen Versagen dar.

Für den Einsatz prozessintegrierter Lasteinleitungen wurde mit den dargelegten Untersuchungen ein wesentlicher Grundstein gelegt, der als Basis für

weiterführende Versuchsreihen dient und die hohen Potenziale der Funktionsintegration recycelter Faservlieswerkstoffe aufzeigt. Hierdurch können neue Anwendungsfelder erschlossen und der CO₂-Fußabdruck faserverstärkter Kunststoffe nachhaltig gesenkt werden.

Danksagung

Die vorliegenden Arbeiten wurden von der AiF Projekt GmbH im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand finanziell gefördert und in Zusammenarbeit mit der High Tech Sports GmbH erstellt. Ihnen gilt unser ausdrücklicher Dank.

Quellen

- [1] C. Hoppmann, M. L. Fecher, L. Linnemann, R. Bastian, T. Gris, A. Schnalbel und C. Greb, „Vergleich der Eigenschaften von Onserts und Inserts für eine Großserienfertigung von FVK-Strukturbaureilen,“ *Zeitschrift Kunststofftechnik* 9, pp. 179-206, 2 April 2013.
- [2] G. W. Ehrenstein, „Verbindungstechnik,“ *Kunststoffe*, pp. 28-34, Juli 2004.
- [3] F. Dratschmidt, Zur Verbindungstechnik von galsfaserverstärktem Polyamid, Erlangen-Nürnberg: Universität Erlangen-Nürnberg - Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT), 1999.
- [4] H. Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [5] T. J. Noll, Beitrag zur Entwicklung punktueller Lasteinleitungen und Verbesserung der Versagensanalyse für Faser-Kunststoff-Verbund-Strukturen unter zyklischer Belastung, Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2008.
- [6] baier & michels GmbH & Co. KG, *Verbindungstechnik für CFK-Werkstoffe*, 2018.

- [7] K. Weinert und C. Kempmann,
„Gewindefertigung in faserverstärkten
Kunststoffen,“ *Kunststoffe*, pp. 44-48, Juli 2004.
- [8] C. Kempmann, F. Brinkel und K. Weinert,
„Temperaturbelastung beim Bohren,“
Kunststoffe, pp. 72-77, Dezember 2006.
- [9] European Cooperation For Space
Standardization, Space engineering - Insert
design handbook, Noordwijk, Niederlande: ESA
Requirements and Standards Division, 2011.
- [10] J. Onasch, „Zum Verschrauben von Bauteilen
aus Polymerwerkstoffen mit
gewindeformenden Metallschrauben,“
Universität Gesamthochschule Kassel - Institut
für Werkstofftechnik, Kassel, 1983.
- [11] G. W. Ehrenstein, Handbuch Kunststoff -
Verbindungstechnik, Carl Hansa Verlag, 2004.