Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66

Laserstrukturen für die Imitation gefräster Oberflächen bei Haftklebstoffen

Oberflächeneinfluss auf die Klebebandhaftung

S. Stribick, W. Schäfer

ZUSAMMENFASSUNG Haftklebstoffe, verwendet in doppelseitigen Klebebändern, werden eingesetzt, um Bauteile großflächig miteinander zu verbinden. Durch die hohe Viskosität der Klebstoffe spielt die Beschaffung der Oberfläche eine entscheidende Rolle bei der Haftung. Gerade unterschiedlich gefräste, nicht reproduzierbare Oberflächen sind für die Qualitätssicherung problematisch. In diesem Beitrag wird überprüft, ob reproduzierbare, laserstrukturierte Oberflächen ein Zusammenhang zwischen Oberfläche und dem Schälwiderstand erkennen lassen.

STICHWÖRTER

Lasertechnik, Fügetechnik, Qualitätssicherung

Influence of the surface on the toughness of pressure sensitive adhesives – Laser surface texturing for imitation of milled surfaces for the usage of pressure sensitives adhesives

ABSTRACT Pressure-sensitive adhesives are used to bond components over a large area. Because of the high viscosity of the adhesive, the surface condition is highly significant for the toughness of the bond. For example, for non-repeatable milled surfaces, quality management is problematic. This article examines whether there is a correlation between repeatable, laser surface-textured surfaces and the toughness of the bond.

1 Motivation

Der Oberflächenzustand und damit die Rauheit beeinflusst die Adhäsion von geklebten Bauteilen. Dazu wurden bereits diverse Untersuchungen durchgeführt, jedoch gibt es bisher keine einheitliche Betrachtung des Phänomens [1–3]. Ursächlich hierfür ist, dass es am Markt nur wenige Methoden gibt, um reproduzierbar Oberflächen herzustellen. Gleichzeitig sind Prüfnormen, etwa im Bereich der Klebebänder, nur für glatte Oberflächen ausgelegt [4].

Klebebänder auf Basis von Haftklebstoffen sind in der Industrie vielseitig einsetzbar und besitzen einige Vorteile: Sie sind schnell und einfach ohne Fixierhilfen und mit hoher Verarbeitungssicherheit und Maßhaltigkeit zu applizieren. Vorgestanzte Klebebänder erlauben eine zielgerichtete Applikation und oftmals ist keine Nachbearbeitung nötig. Es gibt zudem eine klare Trennung zwischen den Prozessschritten Applikation und Klebung. Auch sind Klebebänder keine Gefahrstoffe [5, 6]. Wie für jede Freigabe mit sicherheitsrelevanten Klebungen sind auch hier Bauteilprüfungen nötig, um die Qualität der Bauteile zu bestimmen [7]. Ein entscheidender Faktor für die Qualität von Klebungen mit Klebebändern ist der Oberflächenzustand der Bauteile [5].

Problematisch ist dabei, unter Anlehnung an die Norm, gerade gefräste Oberflächen reproduzierbar herzustellen. Der Werkzeugverschleiß und die große Anzahl unterschiedlicher Werkzeuge und Parameter führt zu großen Schwankungen und es folgen teilweise große Abweichungen. Dies führt zu nicht reproduzierbaren beziehungsweise vergleichbaren Ergebnissen. Innerhalb der Norm zur Prüfung von Klebebändern sind daher enge Vorgaben zum Oberflächenzustand definiert [4]. Auch wenn anwendungsorientierte Versuche durchgeführt werden, ist es sinnvoll sich normorientiert an möglichst enge Vorgaben zu halten.

Eine alternative Möglichkeit reproduzierbare Oberflächen und damit vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist die Herstellung eines definierten Profils mittels Laser. Diese sind reproduzierbar, härte- und werkstoffunabhängig und einfach in die bestehende Prozesskette integrierbar. [8, 9]

Ziel dieses Beitrages ist zu überprüfen, inwieweit es möglich ist, mittels Laser ein gefrästes Rauheitsprofil nachzustellen. Dieses Rauheitsprofil wird dann auf eine Prüfplatte für die Bestimmung des Schälwiderstandes übertragen und damit der Einfluss auf die Haftkraft von Klebebändern überprüft. Im Anschluss wird die Eignung einer Laserbearbeitung für die Substitution von Fräsprozessen zur Herstellung definierter Prüfkörper bewertet. Zudem sollen Empfehlungen für die Oberflächengestaltung erarbeitet werden.

2 Stand der Technik und Forschung

Haftklebstoffe, aufgebracht auf einem Trägermaterial, nehmen in der Gruppe der Klebstoffe eine Sonderstellung ein [5, 10]. Bei Haftklebstoffen handelt es sich um viskoelastische, in der Regel ausreagierte Polymere, die bei Raumtemperatur eine dauerhafte Klebrigkeit aufweisen [6]. Durch die Vielzahl an Basispolymeren und verschiedenen Trägermaterialien gibt es eine große Anzahl unterschiedlicher Anwendungsmöglichkeiten [5]. Die Haftung erfolgt unmittelbar nach dem Kontakt mit der Oberfläche durch zu-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Tabelle 1. Parameter für den vollfaktoriellen Versuchsplan.

	Unterer Wert	Oberer Wert
Laserleistung / W	5	6,5
Verfahrgeschwindigkeit / mm/s	450	600
Grundfrequenz / kHz	1400	2000
Pulsfrequenz / kHz	500	750
Abstand / mm	0,030	0,035
Überfahrten	15	25
Fluenz / J/cm²	3,25	2,82

sätzlichen Druck. Die englische Bezeichnung für Haftklebstoffe „Pressure-Sensitive Adhesive" (PSA) gibt dies treffend wieder.

Für die Klebung ist keine Aktivierung in Form von Wärme, Feuchtigkeit oder Strahlung erforderlich. Die Haftklebeschicht, obwohl scheinbar fest, kann physikalisch als hochviskose Flüssigkeit betrachtet werden, die plastisch und elastisch verformbar ist [10]. Aus diesem Grund kann die Adhäsion sehr stark durch den Anpressdruck, die Zeit und die Temperatur beeinflusst werden. Allerdings kann ein zu hoher Druck, vor allem bei sehr weichen Klebstoffen, zu einer Abnahme der Haftung führen, wenn der Klebstoff aus dem Spalt herausgepresst wird. In der Literatur wird ein Druckbereich für einen Andruck von 10 bis 15 N/cm² empfohlen [11]. Die Fließfähigkeit des Haftklebstoffes führt zu einer zeitlichen Zunahme der Endfestigkeit [10]. Diese wird maßgeblich vom Grundpolymer und dessen Eigenschaften (wie Molmasse, Glasübergangstemperatur, Copolymere) bestimmt [6].

Irmer et al. haben zusätzlich unterschiedliche Einflüsse auf die Haftfestigkeit der Klebebänder untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass vor allem die Wahl der Klebstoffschichtdicke (100–200 µm) und des Materials der Vorbehandlung mittels mechanischen Strahlens signifikanten Einfluss auf die Haftfestigkeit haben. Die Substratrauheit hat in diesen Versuchen dagegen keinen signifikanten Einfluss gezeigt. [12]

Gleichzeitig konnte in einer Untersuchung an Aluminiumsubstraten gezeigt werden, dass die Beschaffenheit des Haftklebstoffes (geschäumt oder kompakt) stark mit der Oberflächenrauheit in Wechselwirkung steht und die resultierende Haftfestigkeit beeinflusst. So reagieren die in dieser Versuchsreihe verwendeten geschäumten Acrylat-Klebstoffe sehr empfindlich auf eine Änderung der Rauheit und niedrige Rauheitswerte beeinflussen die Haftfestigkeit positiv. [13]

Jedoch können zu hohe Rauheiten die Haftfestigkeit negativ beeinflussen, wie *Ortega-Iguna et al.* zeigten. Gleichzeitig konnte nachgewiesen werden, dass eine zusätzliche Oberflächenvorbehandlung durch Auftrag eines Haftvermittlers die Haftfestigkeit der Klebebänder erhöhen kann. [14]

Die Qualität jeder Klebung ist immer stark abhängig von der durchgeführten, substratabhängigen Oberflächenbehandlung [15]. Gerade die Laserstrukturierung kann die Benetzbarkeit und Festigkeit erhöhen sowie ein kohäsives Bruchverhalten begünstigen [16–18]. Grundsätzlich unterscheiden *Demir et al.* in drei geometrische Gestaltungsmöglichkeiten bei der Laserstrukturierung: Gitter, Punkte und chaotische Oberflächenstrukturierung. Allen ist gemeinsam, dass diese die Kontaktfläche vergrößern und damit die Festigkeit erhöhen. Gleichzeitig zeigt sich bei der Gittervorbehandlung, dass aufgrund der größten Belastung vor allem die Breite der Kanäle für die Festigkeit entscheidend ist. Diese müssen so ausgelegt sein, dass Spannungsspitzen vermieden werden. [19]

Die Parameter haben hierbei einen großen Einfluss auf die entstehenden Strukturen sowie auf die statischen und zyklischen Festigkeiten. *Moroni et al.* zeigten in mehreren Untersuchungen die Einflüsse der Laserstrukturierung. Grundsätzlich zeigt sich, dass eine höhere Energie und langsamere Verfahrgeschwindigkeit zu einem höheren Abtrag führen. Es ist jedoch eine minimale Energie notwendig, um zu einem Abtrag zu führen und Oberflächen nicht nur aufzuschmelzen. Weiterhin kann eine zu niedrige Verfahrgeschwindigkeit den Kohäsionsbruch in einen Adhäsionsbruch umwandeln. Ursache hierfür sind die tieferen Kavitäten mit resultierenden Lufteinschlüssen. Aus diesem Grund ist aus der Sicht von *Moroni* die Rauheit kein alleiniger Indikator für die zu erwartende Festigkeit. [20–22]

3 Material, Messmittel und Vorgehen

Die Laserversuche wurden mit einem Laser der Trumpf SE + Co. KG durchgeführt. Es handelt sich um den „TruMicroMark 2030" (Yb:YAG) mit einer mittleren Pulsleistung von 20 W, einer Wellenlänge von 1030 nm und einer Pulsdauer von 900 fs. Verwendet wurde eine F-Theta-Objektiv mit 100 mm Brennweite und einem resultierendem Fokusdurchmesser von 28 µm. Als Prüfkörper wurden Platten mit Abmaßen 125 x 50 x 1,8 mm³ aus dem Edelstahl 1.4301 (2R-Qualität) verwendet. Vor dem Aufkleben des Klebebandes wurde die Oberfläche mit einem sauberen Tuch und Aceton gereinigt und im Anschluss für mindestens 10 min entlüftet.

Die Tests wurden mit einem doppelseitigen Klebeband durchgeführt. Dabei wurde „DuploColl 3605.2" mit Reinacrylat als Klebstoff mit einer Schichtdicke von jeweils 50 µm und einer 12,5 µm dicken PET-Trägerfolie verwendet. Diese wurden dann aufgetragen, mit einer Rolle angepresst und innerhalb von 30 min getestet.

Im Rahmen der Versuche, angelehnt an die Norm DIN EN ISO 29862, wird der Schälwiderstand bestimmt. Die Prüfgeschwindigkeit hierfür sind 300 mm/min.

Für die Nachbildung von gefrästen Oberflächen mittels Laser ist der Beitrag in vier Teile aufgeteilt, auf die im weiteren Verlauf näher eingegangen wird.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

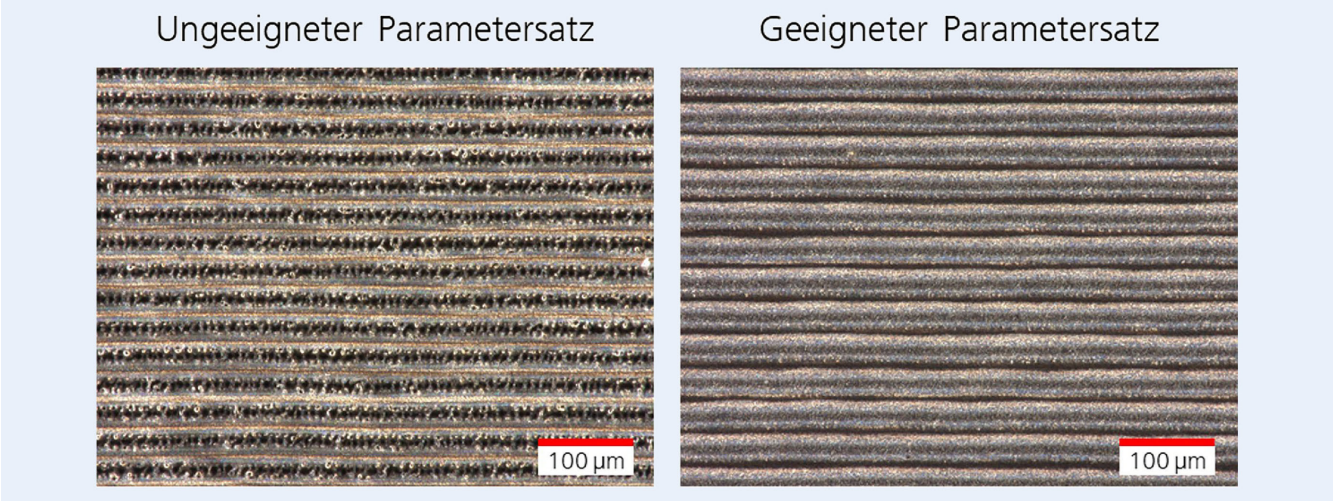

Bild 1. Vergleich einer ungeeigneten Struktur (links) mit einer geeigneten Struktur (rechts). *Foto: Fraunhofer IPA*

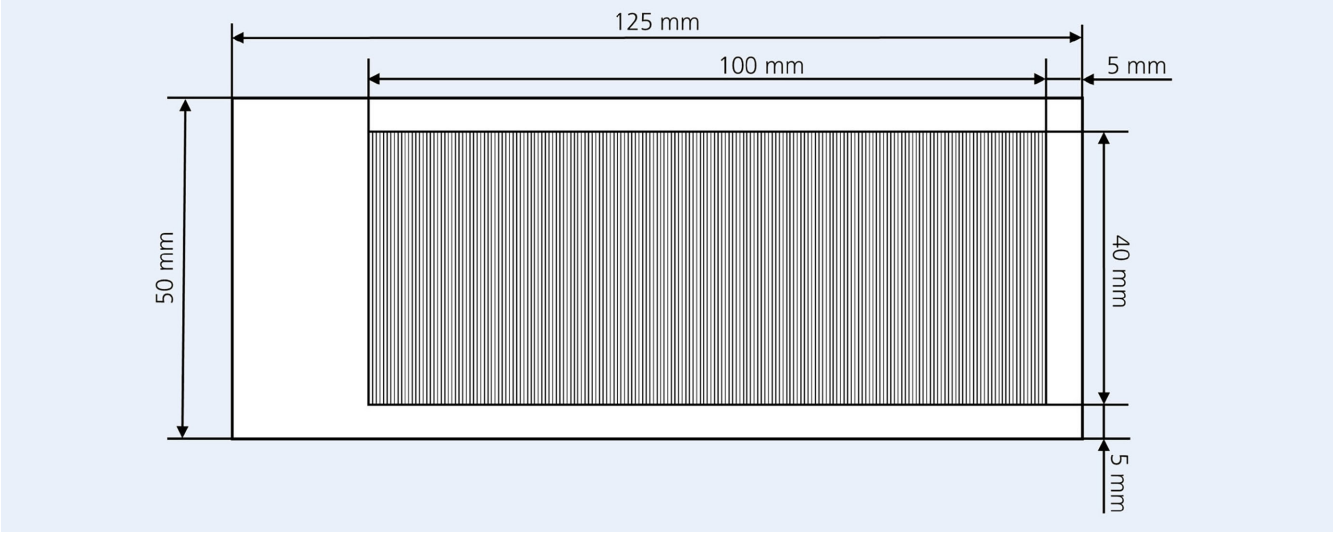

Bild 2. Abmessungen der Laserstruktur auf den Prüfplatten. *Grafik: Fraunhofer IPA*

3.1 Definition der gefrästen Oberfläche

Um die Zielparameter für die gelaserte Oberfläche genau zu kennen, wird eine typische, gefräste Oberfläche analysiert und Merkmale (Linienrauheit, Flächenrauheit, Oberflächenzustand, Profilform) abgeleitet. Für diese Analyse und alle folgenden wird ein „VK-X3000"-Mikroskop von Keyence verwendet, mit einer 20X-Objektivvergrößerung. Anhand der Analyse und den abgeleiteten Merkmalen sind die Zielparameter des Profils für die spätere Laserstrukturierung bekannt.

3.2 Parameteridentifikation für die Laserbearbeitung

Im nächsten Schritt erfolgt eine Parameteruntersuchung verschiedener Laserparameter auf die sich einstellende Oberflächenqualität. Mithilfe eines durch „Minitab" erstellten vollfaktoriellen Versuchsplans erfolgt die Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf die Oberfläche. Die Parametergrenzen für den vollfaktoriellen Versuchsplan mit 64 Einzelstrukturen sind in **Tabelle 1** nachzulesen.

Anschließend werden die Strukturen mit einem Keyence „VHX 7000" optisch auf Verfärbungen und Aufschmelzungen ausgewertet. Dabei ist in **Bild 1** links ein Beispiel mit ungeeigneten Aufschmelzungen und Verfärbungen zu erkennen und rechts eine gewünschte Oberflächenstruktur. Im Anschluss wird die Rauheit Rz mit einem „Alicona Infinite Focus SL" senkrecht zur Laserstruktur bestimmt.

3.3 Einfluss unterschiedlicher gelaserter Oberflächen auf den Schälwiderstand

Auf Basis der untersuchten Parameter werden einige Prüfplatten mit definierter Rauheit hergestellt. Die Abmessungen der gelaserten Fläche sind in **Bild 2** dargestellt. Diese werden danach mit dem Keyence VK-X3000 vermessen, im Anschluss wird der Schälwiderstand bestimmt und der Einfluss bewertet.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

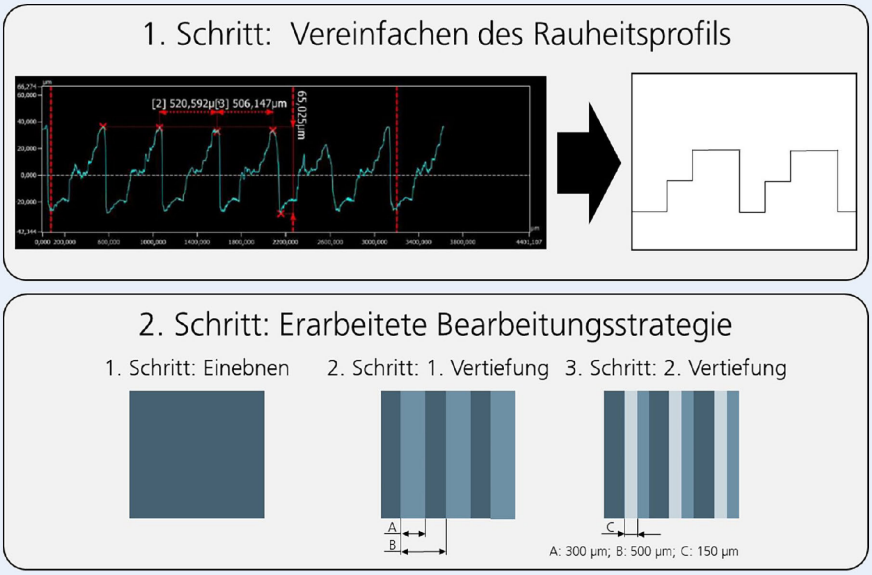

Bild 3. Vorgehen zum Nachlasern des Fräsprofils. *Grafik: Fraunhofer IPA*

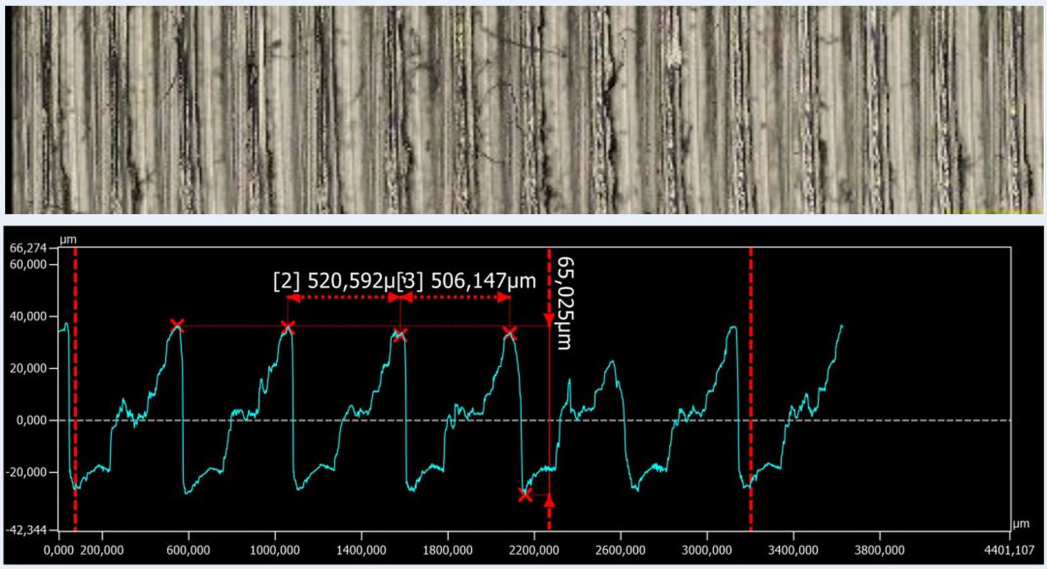

Bild 4. Gefräste Oberfläche mit gemessenen Profil als Basis für die Laserstrukturierung. *Grafik: Lohmann GmbH & Co. KG*

3.4 Nachstellen gefräster Profile mittels Laser und Untersuchung des Schälwiderstandes

Im Anschluss wird mit geeigneten Parametern versucht, die Profilform einer gefrästen Oberfläche nachzustellen. Dafür wird, wie in **Bild 3** zu sehen, ein gefrästes Profil analysiert und unter Zuhilfenahme geeigneter Parameter und einer angepassten Verfahrstrategie nachgearbeitet.

Die Bearbeitungsstrategie teilt sich in drei Schritte: Zuerst eine komplett flächige Bearbeitung, im zweiten Schritt wird ein breiter Kanal auf das erste Bauteil gelasert und im letzten Schritt wird ein schmaler Kanal in den breiten Kanal gelasert. Damit wird die charakteristische Form des Fräsprofils vereinfacht nachgestellt.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Definition der gefrästen Oberfläche

Für die Definition der Zielparameter beim Lasern ist eine geometrische Analyse des Fräsprofils notwendig. Hierfür wird eine gefräste Stahlplatte, ebenfalls aus dem Werkstoff 1.4301 optisch analysiert und geometrische Kenngrößen abgeleitet. Die gefräste Oberfläche ist in **Bild 4** zu sehen

Die erste relevante Kenngröße sind die resultierenden Linien- und Flächenrauheiten der Oberfläche. Hier ergaben sich Werte von 65,31 µm für Sz und 60,70 µm für Rz. Es zeigte sich bei genauer Betrachtung des Linienprofils, dass konstant ein Abstand von etwa 65 µm zwischen dem obersten und untersten Punkt im Rauheitsprofil besteht. Dabei beträgt der Abstand zwischen zwei Spitzen etwas mehr als 500 µm. Das Profil hat drei Stufen: zwischen der ersten (ganz unten) und zweiten Stufe (Mitte) liegt

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Bild 5. Haupteffekte bei der Ausbildung von Aufschmelzungen bei Laserstrukturen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

ein Abstand von 25 µm vor, zwischen der zweiten und dritten Stufe (ganz oben) von 35 µm. Erste und zweite Stufe haben eine Breite von 150 µm, die dritte Stufe von 200 µm. Zusätzlich ist die Oberfläche nach dem Fräsen glänzend. Es sind keine Verfärbungen erkennbar. Diese geometrischen Größen und Oberflächeneigenschaften sind relevant für die finale Laserstrukturierung und werden daher als Merkmale für die weiteren Profile definiert.

4.2 Parameteridentifikation für die Laserbearbeitung

Im Vergleich zu einer gefrästen Oberfläche sind gelaserte Oberflächen durch andere Merkmale gekennzeichnet. So können gelaserte Oberflächen Verfärbungen und Aufschmelzungen aufweisen, welche bei gefrästen Oberflächen in dieser Art nicht vorliegen. Deshalb gilt es bei der Bewertung der Oberflächen, solche Parametersätze zu vermeiden. Dafür erfolgt eine Auswertung und Bewertung der Wirkung mittels mikroskopischer Aufnahmen auf die Struktur. Die Bewertung ist wie folgt: Die Strukturen, die Aufschmelzungen oder Verfärbungen aufweisen, werden je Merkmal mit „1“ bewertet, alle anderen mit „0“. Eine mit Minitab erfolgte Auswertung zeigt **Bild 5**. Zu sehen sind die Haupteffekte der untersuchten Parameter auf die Aufschmelzungen.

Es ist zu erkennen, dass eine steigende Leistung, Pulsfrequenz, Anzahl an Überfahrten und Abstand (minimal) die Entstehung der Aufschmelzungen begünstigen. Bei zunehmender Verfahrgeschwindigkeit und Grundfrequenz nehmen die Aufschmelzungen tendenziell eher ab. Die gleichen Tendenzen zeigen sich bei den Verfärbungen mit dem Unterschied, dass bei zunehmendem Abstand keine Verfärbungen mehr auftreten.

Die Bewertung der Rauheiten erfolgte anhand der gemessenen Kennwerte von Rz und wurde ebenso mittels Minitab ausgewertet. Die Ergebnisse sind in **Bild 6** zusammengefasst. Ein ähnliches Verhalten zeigen die Werte von Sz. Daher wird im Rahmen dieses Beitrages nicht näher darauf eingegangen.

Es zeigt sich, dass bei steigender Pulsfrequenz und Überfahrten die Rauheit stark zunimmt. Bei Laserleistung und Abstand ist ebenfalls eine Zunahme zu erkennen, aber nicht im gleichen Ausmaß. Einen großen Einfluss hat wieder die zunehmende Verfahrgeschwindigkeit, bei der die Rauheit stark abnimmt. Auch nimmt die Rauheit bei zunehmender Grundfrequenz ab.

Grundsätzlich gilt es festzuhalten: Parametersätze mit Aufschmelzungen und Verfärbungen sind für die geplanten Untersuchungen nicht geeignet und werden daher nicht weiter berücksichtigt. Auf Basis der Erkenntnisse erfolgt eine Auswahl geeigneter Oberflächen für die Untersuchung des Schälwiderstandes von Klebebändern.

4.3 Einfluss unterschiedlicher gelaserter Oberflächen auf den Schälwiderstand

Nach Auswertung des vollfaktoriellen Versuchsplans wurden zwei Parametersätze ausgewählt, die im weiteren Verlauf näher untersucht werden. Parametersatz 3 basiert auf Parametersatz 2, allerdings mit doppelter Anzahl an Überfahrten. Eine Übersicht über die Parameter und die sich ergebende Linien- und Flächenrauheit liefert **Tabelle 2**.

Die vermessenen Linienrauheiten sind in **Bild 7** zu sehen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Profile wellenförmig aufgebaut sind. Die Parametersätze 2 und 3 sind dabei symmetrischer und gleichmäßiger als Parametersatz 1.

Die Ergebnisse zur Bestimmung des Schälwiderstandes sind in **Bild 8** zu sehen.

Es ist zu erkennen, dass es eine Abhängigkeit vom Schälwiderstand der Klebebänder zu der Rauheit gibt. Das gleiche Verhalten liegt für Flächen- und Linienrauheit vor. Dabei steigt der Schälwiderstand mit zunehmender Rauheit an. Parametersätze 1 und 2 liefern trotz unterschiedlicher Rauheiten ähnliche Ergebnisse. Die Parametersätze 2 und 3 sind bis auf die unterschiedliche Anzahl an Überfahrten identisch. Dabei steigt der Schälwiderstand mit zunehmender Rauheit an.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Bild 6. Haupteffekte bei der Entwicklung der Linienrauheit Rz bei Laserstrukturen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

Tabelle 2. Parameter und sich einstellende Oberflächenrauheit für die Laserstrukturierung von 1.4301 Prüfplatten.

	Parametersatz 1	Parametersatz 2	Parametersatz 3	Referenz
Laserleistung / W	5	6,5	6,5	geschliffen mit 600er Korn
Verfahrgeschwindigkeit / mm/s	600	600	600	
Grundfrequenz / kHz	1400	2000	2000	
Pulsfrequenz / kHz	500	750	750	
Abstand / mm	0,03	0,035	0,035	
Überfahrten	15	25	50	
Linienrauheit Rz / µm	6,74	15,59	27,94	0,05
Flächenrauheit Sz / µm	13,33	31,76	43,06	8,64
Anzahl Versuche	5	5	1	5

4.4 Nachstellen gefräster Profile mittels Laser und Untersuchung des Schälwiderstandes

Die vermessene Oberfläche des mittels Laser nachgestellten Fräsprofils ist in **Bild 9** zu sehen.

Es ist deutlich erkennbar, dass ebenfalls kleine, wellenförmige Profilbestandteile vorhanden sind. Diese besitzen teilweise unterschiedliche Höhen und stellen somit in einer ersten möglichen Näherung ein gewünschtes Fräsprofil dar. Die grundsätzlichen Kanäle lassen sich erkennen.

Mit dem neu entwickelten Profil hat sich auch die Rauheit der Oberfläche verändert. Das Profil hat eine Linienrauheit Rz von 11,47 µm und Flächenrauheit Sz von 17,977 µm, die geschliffene Referenz eine Rauheit Rz von 0,05 µm sowie Sz von 8,637 µm und das gefräste Profil eine Rauheit Rz von 60,70 µm und Sz von 65,31 µm. Im Anschluss an diese Messung der Oberfläche wurde der Schälwiderstand erneut bestimmt.

Die finalen Ergebnisse zur Bestimmung des Schälwiderstandes sind in **Bild 10** zu sehen.

Es ist zu erkennen, dass der Schälwiderstand bei den gelaserten Proben am höchsten ist. Der Schälwiderstand liegt aber unter den maximalen Ergebnissen von Parametersatz 3. Den geringsten Schälwiderstand zeigt die gefräste Probe auf. Wie bei allen vorangegangenen Proben liegt ein Adhäsionsbruch vor. Eine Anpassung der Laserparameter zur weiteren Annäherung der Topografie an die Fräsplatten ist in zukünftigen Versuchen geplant.

5 Diskussion

Nachfolgend wird auf die Ergebnisse der einzelnen Teile des Beitrages näher eingegangen.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

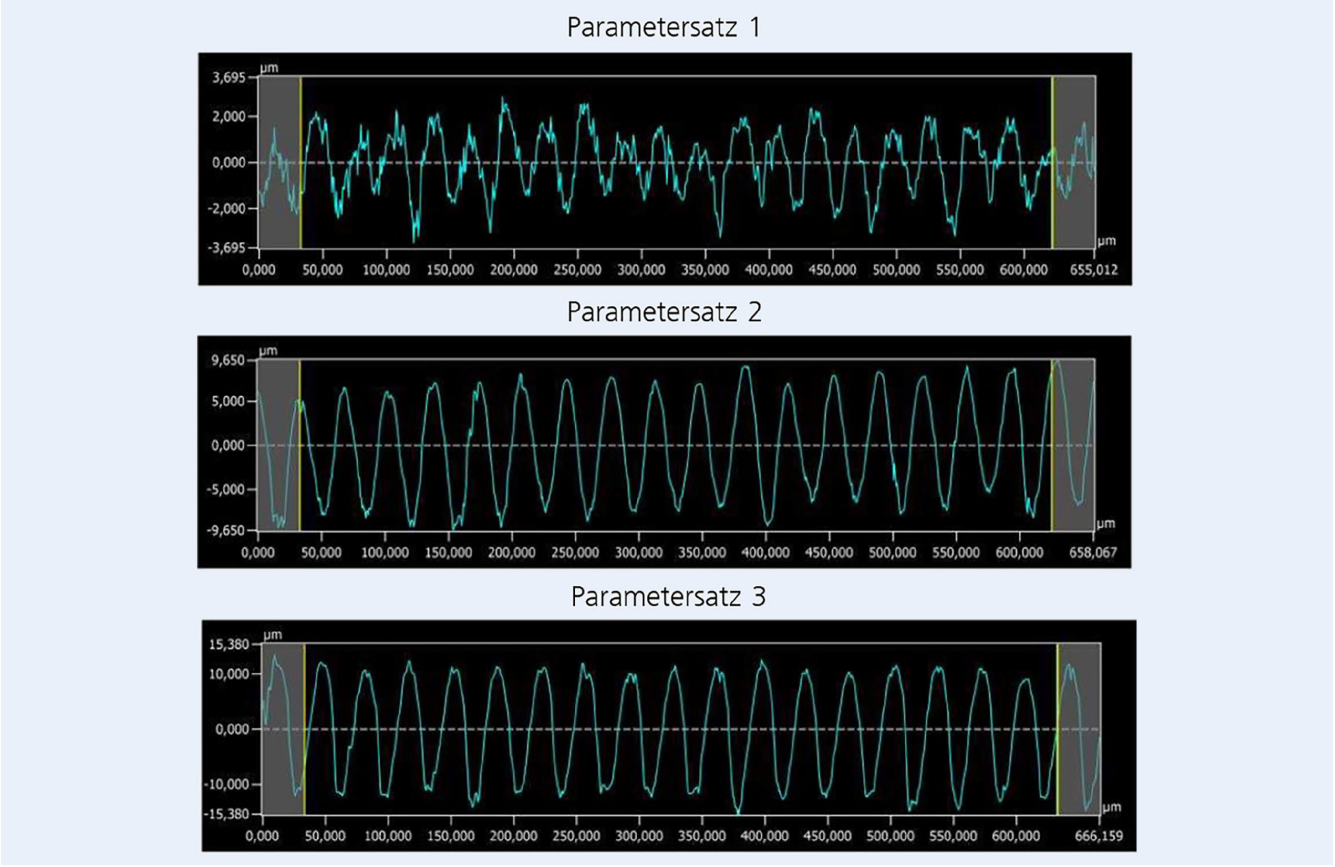

Bild 7. Gemessene Profilform der Linienrauheit. *Grafik: Lohmann GmbH & Co. KG*

5.1 Parameteridentifikation für die Laserbearbeitung

Vergleichbar mit *Moroni et al.* ist die entstehende Oberfläche abhängig von der Laserleistung und Verfahrgeschwindigkeit des Lasers. Dabei konnte hier ebenfalls beobachtet werden, dass eine höhere Leistung einen höheren Abtrag begünstigt und eine höhere Verfahrgeschwindigkeit den Abtrag verringert [21]. Wie stark die Parameter den Abtrag beziehungsweise die im Rahmen des Beitrages betrachtete Rauheit beeinflussen, konnte nicht im Detail gezeigt werden. Hier sind weitere Untersuchungen nötig, um den Einfluss auf die Oberfläche zu bestimmen. Auch ist grundsätzlich denkbar, dass durch eine Anpassung auf höhere Laserleistung und einer gleichzeitig höheren Verfahrgeschwindigkeit vergleichbare Rauheitsprofile hergestellt werden können. Dadurch kann die Produktivität des Prozesses verbessert werden. Jedoch gilt es zu überprüfen, ob auch die gleichen Haftungseigenschaften erreicht werden können.

Bei den beobachteten Verfärbungen handelt es sich wahrscheinlich um Oxidationsprodukte. Diese entstehen beim Lasern durch die erhöhte Temperatur und der damit erhöhten chemischen Reaktivität. Die genaue Zusammensetzung ist nicht bekannt und wurde im Rahmen dieses Beitrages nicht weiter untersucht, da dies nicht im Fokus liegt.

Der Einfluss und die Zusammensetzung dieser Reaktionsprodukte kann in weiteren Untersuchungen bestimmt werden.

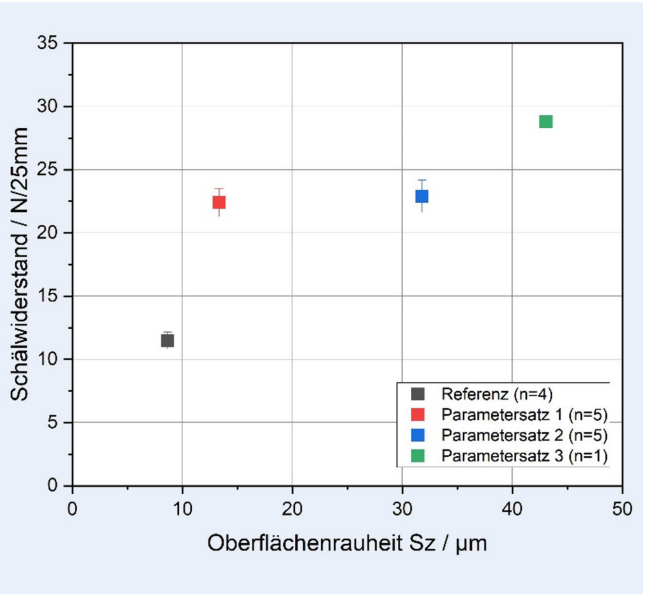

Bild 8. Ergebnisse der Rollenschälversuche abhängig von der Oberflächenrauheit. *Grafik: Fraunhofer IPA und Lohmann GmbH & Co. KG*

5.2 Einfluss unterschiedlicher gelaserter Oberflächen auf die Schälwiderstände

Die ersten Versuche zur Bestimmung des Schälwiderstandes mit gelaserten Oberflächen zeigten folgendes Ergebnis: Die in diesem Maße höhere Rauheit Rz zeigt einen höheren Schälwider-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

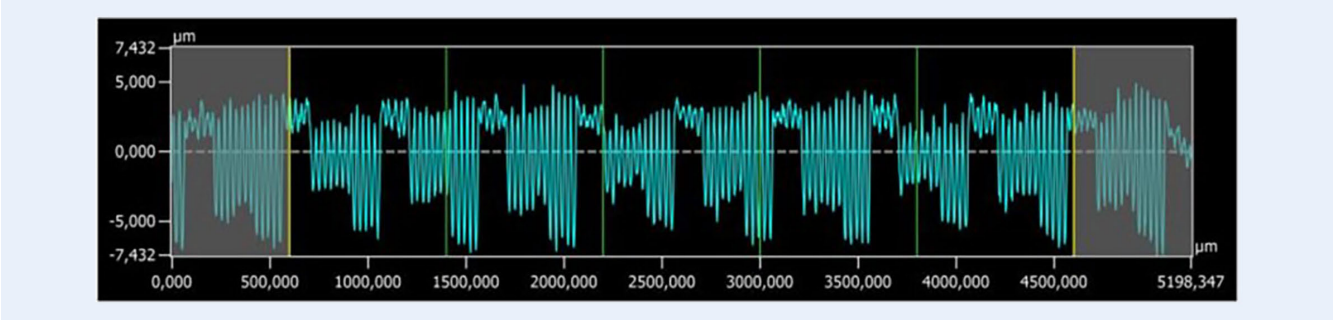

Bild 9. Gemessene Profilform, mittels Laser nachgestelltes Fräsprofil. *Grafik: Lohmann GmbH & Co. KG*

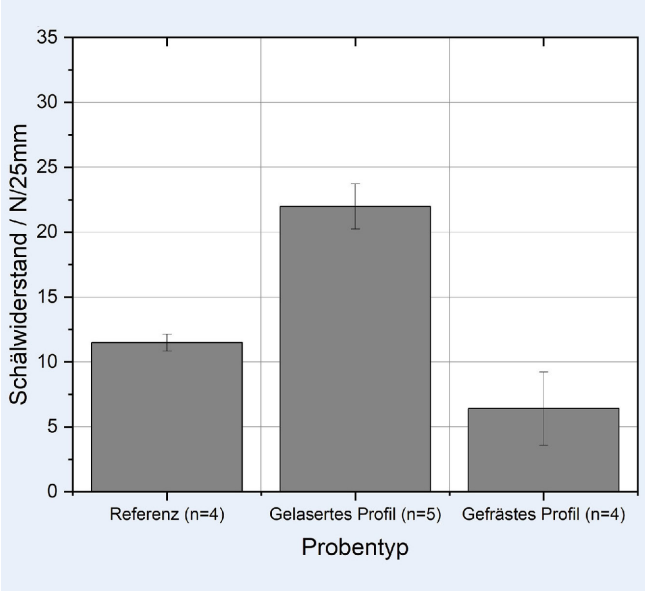

Bild 10. Schälwiderstände bei unterschiedlichen Oberflächenzuständen. *Grafik: Fraunhofer IPA und Lohmann GmbH & Co. KG*

stand. Ursache ist die zunehmende Oberfläche, die mehr Wechselwirkungen zulässt. Ein vergleichbares Verhalten hat *Habenicht* für alle Klebstoffe allgemein beschrieben [5]. Er beschreibt aber auch eine Abnahme bei zu hoher Rauheit. Laut *Moroni* sind Ursachen hierfür Lufteinschlüsse unter der Klebstoffschicht, welche die Oberfläche verringern und damit die Adhäsion herabsetzen [21, 22]. Ein solches Verhalten konnte hier nicht nachgewiesen werden. Die Ursache ist vermutlich, dass die Rauheit den Maximalpunkt noch nicht überschritten hat. Gleichzeitig entsteht durch die Art des Laserprofils eine sehr große Oberfläche mit vielen Kontakten, welche den Schälwiderstand erhöht.

Im Gegensatz zu *Irmer et al.* [12] konnte gezeigt werden, dass die Rauheit den Schälwiderstand mitbestimmt. Ursächlich kann die hier gewählte Laservorbehandlung und die damit verbundene Struktur sein, im Vergleich zum gewählten mechanischen Strahlverfahren von *Irmer et al.*

Auch hat die Art der Laserparameter und damit die entstehende Oberfläche einen Einfluss auf die resultierende Festigkeit. Bei unterschiedlichen Rauheiten Rz zwischen Parametersatz 1 und Parametersatz 2 konnten nur minimale Unterschiede zwischen den Schälwiderständen nachgewiesen werden. Dies stützt die These von *Moroni*, dass die Rauheit allein als Indikator nicht ausreicht, um Festigkeiten beziehungsweise Schälwiderstände zuverlässig vorherzusagen. [22]

5.3 Nachstellen gefräster Profile mittels Laser und Untersuchung des Schälwiderstandes

Der Schälwiderstand der gelaserten Oberflächen ist höher als bei den gefrästen und den Referenzoberflächen. Hierfür wurden vor allem zwei Gründe identifiziert:

- Die gelaserten Oberflächen sind aktiver als vergleichbare Oberflächen. Dies ist erklärbar durch die anderen Abtragsmechanismen im Vergleich zu Fräsen und Schleifen. Gleichzeitig können die definiert eingebrachten Vertiefungen in der Laserstruktur eine Kapillarwirkung auf den Klebstoff haben, sodass ein höherer Schälwiderstand bereits nach kurzer Zeit ermöglicht wird.
- Die Rauheit der gelaserten Oberfläche ist geringer als bei der gefrästen, aber höher als bei den Referenzoberflächen. Der Rauheitswert ist hier also möglicherweise in einem Bereich, der höhere Festigkeiten erzeugt als die beiden vergleichenden Oberflächen, ähnlich wie von *Habenicht* beschrieben [5].

Die Form des gefrästen Profils lässt sich demnach mit einem Laser näherungsweise darstellen. Jedoch müssen zur genauen Nachbildung noch weitere Optimierungsversuche durchgeführt werden, um vor allem die wellenförmigen Bestandteile auf den einzelnen Stufen zu verringern. Dazu müssen wieder entsprechende Parameterkombinationen identifiziert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden unterschiedliche Laserparameter und deren Einfluss auf die entstehende Struktur, den resultierenden Schälwiderstand sowie deren Eignung zur Nachstellung von gefrästen Oberflächen getestet. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Die Laserparameter haben einen Einfluss auf die Tiefe der entstehenden Strukturen sowie die dabei entstehenden Aufschmelzungen und Verfärbungen und damit vermutlich auf die chemischen Reaktionsprodukte auf der Oberfläche.
- Gegenüber geschliffenen Proben kann durch eine Laserstrukturierung der Schälwiderstand erhöht werden. Im Rahmen des betrachteten Rauheitsspektrums konnte bei einer Erhöhung der Rauheit eine Erhöhung des Schälwiderstands gezeigt werden.
- Die Laserstrukturierung kann die beispielhafte Form eines gefrästen Profils grundsätzlich darstellen. Je nach Tiefe des gefrästen Profils kann jedoch die absolute Tiefe nur unter erheblichem Zeitaufwand nachgestellt werden. Sowohl Prozesszeit als auch Profilform müssen zukünftig optimiert werden.
- Der Schälwiderstand ist bei allen Proben deutlich erhöht im Vergleich zu den gefrästen oder polierten Referenzproben.

Grundsätzlich ist es aus Sicht der Autoren möglich, mittels Laser gewünschte Profile vereinfacht nachzubilden. Jedoch ist das Ver-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

halten der gelaserten und der gefrästen Oberfläche nicht vergleichbar.

Gründe werden in der speziellen Struktur der gelaserten Oberfläche gesehen, welche sich signifikant von der gefrästen Oberfläche unterscheidet. Es sind daher weitere Versuche nötig, um das unterschiedliche Verhalten im Detail zu verstehen und zeitlich sowie aufwandstechnisch bessere Oberflächenqualitäten zu erreichen.

Literatur

[1] Rudawska, A.; Danczak, I.; Müller, M. et al.: The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. International Journal of Adhesion and Adhesives 70 (2016), pp. 176–190

[2] Li, J.; Liao, Y.; Bi, R. et al.: Effect of synergistic surface treatment on the bonding strength and durability performance of aluminum-lithium alloy adhesive joints. International Journal of Adhesion and Adhesives 132 (2024), #103721

[3] Kim, A.; Kainuma, S.; Yang, M.: Surface Characteristics and Corrosion Behavior of Carbon Steel Treated by Abrasive Blasting. Metals 11 (2021) 12, #2065

[4] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 29862:2019–09: Klebebänder – Bestimmung der Klebkraft. Deutsche Fassung, Ausgabe September 2019

[5] Habenicht, G.: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Heidelberg: Springer 2008

[6] Brockmann, W.; Geiß, P. L.; Klingen, J. et al.: Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. Weinheim: Wiley-VCH 2005

[7] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 2304–1:2020–04. Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse – Teil 1: Prozesskette Kleben. Ausgabe April 2020

[8] Rechner, R.; Jansen, I.; Beyer, E.: Laseroberflächenvorbehandlung von Aluminium zur Optimierung der Oxidschichteigenschaften für das strukturelle Kleben. 2. Doktorandenseminar Klebtechnik. Vorträge der gleichnamigen Veranstaltung in Dresden 2011. Düsseldorf: DVS Media 2012

[9] Kollenberg, W. (Hrsg.): Technische Keramik. Grundlagen – Werkstoffe – Verfahrenstechnik. Essen: Vulkan Verlag 2018

[10] Krüger, G.: Haftklebebänder, selbstklebende Folien und Etiketten. Entwicklung, Verarbeitung und industrieller Einsatz. München: Hanser Verlag 2012

[11] Lohmann GmbH & Co.KG: Verarbeitungsanleitung für doppelseitige Haftklebebänder. Internet: www.lohmann-tapes.com/de/allgemeine-verarbeitungshinweise__1612/. Zugriff am 24.10.2024

[12] Irmer, M.; Kelm, D.; Marquardt, T. et al.: The performance of a self-adherent foil system for the corrosion protection of steel substrates for offshore wind tower structures. Materials and Corrosion (2024), doi.org/10.1002/maco.202314218

[13] Ortega-Iguña, M.; Chludzinski, M.; Sánchez-Amaya, J. M.: Comparative Mechanical Study of Pressure Sensitive Adhesives over Aluminium Substrates for Industrial Applications. Polymers 14 (2022) 21, #4783, doi.org/10.3390/polym14214783

[14] Ortega-Iguña, M.; Chludzinski, M.; Churiaque, C. et al.: Mechanical behaviour of double side high performance PSA adhesive applied to painted naval structures. Polymer Testing 93 (2021), #106894

[15] Buchman, A.; Rotel, M.; Dodiuk-Kenig, H.: Nd: YAG Laser Surface Treatment of Various Materials to Enhance Adhesion. In: Mittal, K.L.; Bahners, T. (eds.): Laser Surface Modification and Adhesion. Wiley: Hoboken 2014, pp. 1–53, doi.org/10.1002/9781118831670.ch1

[16] Feng, Z.; Zhao, H.; Tan, C. et al.: Modification of surface treatment on the strength of 30CrMnSiA steel adhesively bonded joints. Materials Research Express 6 (2019) 11, doi.org/10.1088/2053–1591/ab4483

[17] Man, H. C.; Zhang, X. M.; Yue, T. M. et al.: Excimer laser surface modification of engineering ceramics for adhesive bonding. Journal of Materials Processing Technology 66 (1997) 1–3, pp. 123–129

[18] Lawrence, J.; Li, L.; Spencer, J. T.: Diode laser modification of ceramic material surface properties for improved wettability and adhesion. Applied Surface Science 138–139 (1999) 1–4, pp. 388–393

[19] Demir, A. G.; Maressa, P.; Previtali, B.: Fibre Laser Texturing for Surface Functionalization. Physics Procedia 41 (2013), pp. 759–768

[20] Moroni, F.; Alfano, M.; Romoli, L.: Fatigue analysis of adhesive joints with laser treated substrates. Procedia Structural Integrity 2 (2016), pp. 120–127

[21] Moroni, F.; Romoli, L.; Khan, M.: Design of laser-textured surfaces to enhance the strength of adhesively bonded joints. International Journal of Adhesion and Adhesives 85 (2018), pp. 208–218

[22] Moroni, F.; Musiari, F.; Favi, C.: Effect of the surface morphology over the fatigue performance of metallic single lap-shear joints. International Journal of Adhesion and Adhesives 97 (2020), #102484

Sascha Stribick, M.Sc.
sascha.stribick@ipa.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-1108
Foto: Fraunhofer IPA/Rainzer Bez
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Wolfgang Schäfer
wolfgang.schaefer@lohmann-tapes.com
Tel. +49 2631 / 34-6929
Foto: Autor
Lohmann GmbH & Co. KG
Irlicher Str. 55, 56567 Neuwied
www.lohmann-tapes.com

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-66 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY