

Titel

Lösen von geklebten Segmenten an Diamant-Schleifwerkzeugen und Aushärten der Klebezone bei der Neubewehrung mittels Laserstrahlung

IGF-Nr.: 17120 N

Forschungsstellen

Forschungsstelle 1:

Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe, Remscheid (IFW)

Forschungsstelle 2:

Laser Zentrum Hannover LZH, Hannover (LZH)



Ansprechpartner beim IFW-Remscheid:

Dipl.-Ing. Helmut Brand, 02191 / 5921-0, brand@fgw.de

Ansprechpartner beim LZH:

Dr. rer. nat. Michael Hustedt, 0511 / 2788-0, m.hustedt@lzh.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 17120 N der Forschungsvereinigung Werkzeuge und Werkstoffe wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Ausgangssituation

Heutzutage werden bei Diamant-Schleifwerkzeugen, die bei der Verarbeitung von Naturstein wie Marmor oder Granit eingesetzt werden, in Abhängigkeit von den technischen Anforderungen und den marktspezifischen Randbedingungen die Fügeprozesse Laserstrahlschweißen oder Induktivlöten für das Aufbringen der Schneidsegmente auf das Stammblatt verwendet. Auf dem nordamerikanischen Markt wird aufgrund der Sicherheit und der Zuverlässigkeit in der Produktion trotz der einmaligen Verwendbarkeit primär das Laserstrahlschweißen eingesetzt. Die Wiederbestückung bzw. Instandsetzung spielt dort aufgrund der teilweise enormen Entfernungen zwischen Einsatzort und geeigneter Werkstatt nur eine untergeordnete Rolle. Auf dem europäischen Markt ist das Löten aufgrund wirtschaftlicher Faktoren, verbunden mit der Möglichkeit der Werkzeuginstandsetzung, weit verbreitet. Jedoch ist dieses Fügeverfahren mit einem im Vergleich zum Laserstrahlschweißen deutlich stärkeren Wärmeeintrag verbunden, welcher sich nachteilig auf die Werkzeugeigenschaften auswirkt. Abgesehen von der Bestückung mit neuen Schneidsegmenten muss das Sägeblatt im Zuge der Instandsetzung in der Regel auch neu vorgespannt werden. In Abbildung 1 ist der Einfluss des starken Wärmeeintrags auf das Stammblatt beim Löten anhand von Anlauffarben gut zu erkennen.

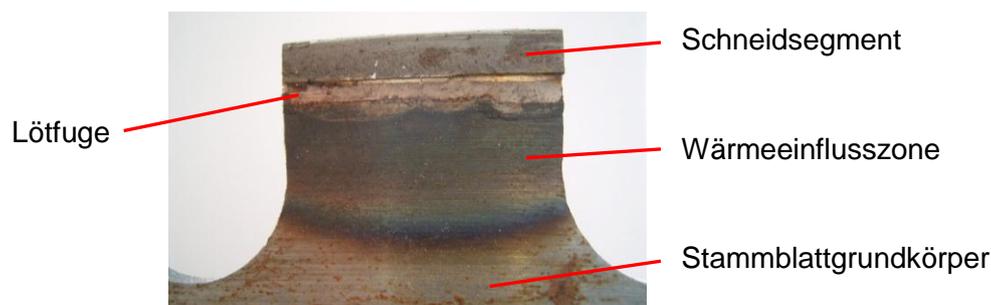


Abbildung 1: An das Stammblatt angelötetes Diamantschneidsegment

Eine Alternative zum Löten bildet die Klebtechnik als wärmearmes Fügeverfahren sowohl zur Erst- als auch zur Wiederbestückung von Sägeblättern mit Diamant-Schleifsegmenten. Die Vorteile des Klebens sind allgemein die fehlende thermische Gefügebeeinflussung, die homogene Spannungsverteilung in der Fügezone, die hohe dynamische Festigkeit und Schwingungsdämpfung, die Möglichkeit der Verbindung von wärmeempfindlichen Werkstoffen und der geringe bzw. fehlende Verzug durch die Herstellung der Verbindung. In vorangegangenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich das Kleben für die Bestückung von Stammblättern im Hinblick auf die Qualität und die Zuverlässigkeit der Verbindung eignet (siehe z.B. [1]). Sowohl die durchgeführten numerischen Berechnungen als auch die experimentelle Validierung belegten, dass die anliegenden Prozesskräfte von der Klebeverbindung weitestgehend schadlos aufgenommen werden können. Ein positiver Nebeneffekt ist, dass die Dämpfungseigenschaften der Klebefuge bei thermisch nicht belasteten Schleifwerkzeugen besser sind als die einer Lötfläche. Dabei ist die Festigkeit einer Klebstoffverbindung außer von der Kohäsionsfestigkeit des Klebstoffes (Anziehungskräfte der Klebstoffmoleküle untereinander) vor allem von der Adhäsionsfestigkeit (Anziehungskräfte zwischen der Fügefläche und dem Klebstoff) abhängig. Daher sind eine gute Benetzung der zu fügenden Flächen durch den Klebstoff, eine optimale Aushärtung des Klebstoffs und eine ausreichende Kohäsionsfestigkeit Voraussetzungen für eine gute Verbindung der Fügepartner. Zu berücksichtigen ist, dass eine Verbindung umso fester werden kann, je gründlicher die Fügeflächen zuvor gereinigt bzw. vorbereitet wurden.

Das Vorhandensein einer möglichst glatten Oberfläche ist hingegen keine Anforderung. Im Gegenteil begünstigt eine raue Oberfläche die Bindeneigung zum Klebstoff.

Forschungsziel

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens war es, im Rahmen der Erst- und Wiederbestückung von Diamant-Schleifwerkzeugen unter Verwendung der Lasertechnik in Verbindung mit der Klebstofftechnologie eine vollständige Prozesskette zu realisieren. Diese umfasst das Lösen der verschlissenen Segmente (1), das Reinigen der Oberfläche von Klebstoffresten (2), die Oberflächenpräparation (3) und das Aushärten des Klebstoffes nach dem Aufsetzen des neuen Schneidsegments (4). In Abbildung 2 sind die einzelnen Schritte der Prozesskette schematisch dargestellt.

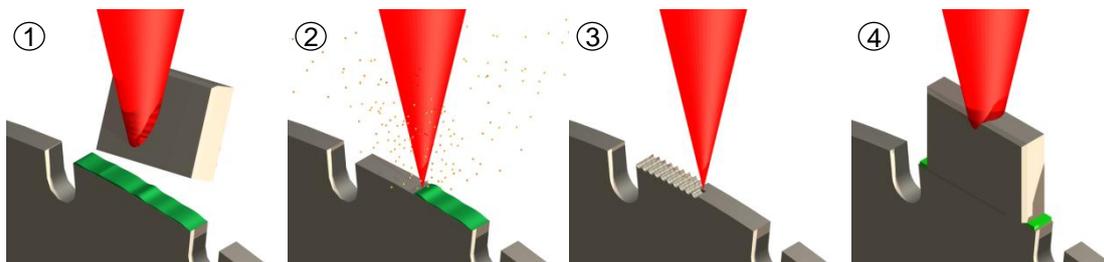


Abbildung 2: Schematische Darstellung der vollständigen Prozesskette für die Wiederbestückung von Stammblechtern mit Schneidsegmenten mit Hilfe mehrerer Laserprozesse (Erläuterungen im Text).

Werkstoffe und Klebstoff

Als Fügepartner wurde ein Stahl der Güte C75, entsprechend einem gängigen Stammblechtmaterial, eingesetzt. Dieser Stahl verändert seine metallurgischen Eigenschaften (Gefügestruktur) ab einer Temperatur von 210°C. Hierbei kann eine aus einer thermischen Belastung resultierende Veränderung des Gefüges vom Schneidsegment bis maximal zur Steghöhe des Stammblechtes toleriert werden. Verwendet wurden diamantbestückte Schneidsegmente mit Abmessungen von etwa 20 x 5,5 x 8 mm³ („kleine Segmente“) bzw. 40 x 7 x 9 mm³ („große Segmente“). Eine begrenzte Temperaturerhöhung bei der Bearbeitung der Schneidsegmente ist nicht relevant, da diese ohnehin bei höheren Temperaturen hergestellt und bearbeitet werden.

Als Klebstoff wurde ein spezielles warmaushärtendes 1-Komponenten-Epoxidharz verwendet. Der Klebstoff weist aufgrund seiner Netzwerkstruktur eine hohe Zugfestigkeit von 64 MPa bei statischer Belastung sowie eine Glasübergangstemperatur von 130°C auf. Weiterhin besitzt der Klebstoff eine gute Warmfestigkeit von 25 MPa bei einer Betriebstemperatur von 100°C. Die Abbindezeit des Klebstoffs gemäß DIN 16 920 verringert sich mit zunehmender Temperatur, wie es für 1-Komponenten-Epoxidharzklebstoffe typisch ist. Gemäß Herstellerangaben liegt die optimale Aushärtetemperatur zwischen 130°C und 180°C. Dabei ist anzumerken, dass die Festigkeit der Klebeverbindung ebenfalls von der Aushärtetemperatur abhängt.

Forschungsergebnisse

Für die avisierte Anwendung wurde die o.g. laserbasierte Prozesskette entwickelt und demonstriert. Dabei werden die Vorteile des Lasers wie die hohe Intensität und die räumlich eng begrenzbare Wechselwirkungszone sowie die sich daraus ergebende geringe ther-

mische Belastung der Umgebung der Prozesszone im Hinblick auf eine geringe Materialschädigung und ein verzugsfreies Lösen bzw. Aushärten des Klebstoffes ausgenutzt. Im Vergleich zu den konventionellen Fügeverfahren Induktivlöten und Laserstrahlschweißen wird ein flexibleres System konzipiert, womit vor Ort beim Anwender die Wiederbestückung bzw. Instandsetzung des Sägeblatts durchgeführt werden soll. Wie oben schon angedeutet müssen die Sägeblätter derzeit in der Regel zum Werkzeughersteller zurückgeschickt und dort instandgesetzt werden.

Lösen der Schneidsegmente

Das Lösen verschlissener Schneidsegmente vom Stammbblatt kann mittels Laserstrahlung generell nach zwei verschiedenen Ansätzen erfolgen: Das direkte Durchtrennen der schmalen Klebefuge mit einer Dicke von etwa 200 μm stellte sich hauptsächlich aufgrund der hohen Anforderungen an die Positionierung als nicht industrietauglich heraus. Mittels schneller kontinuierlicher laserbasierter Erwärmung des Schneidsegments auf Temperaturen über 290°C konnte hingegen eine Zersetzung des Klebstoffs an der Kontaktfläche zum Schneidsegment initiiert werden, worauf reproduzierbar die Abtrennung bei lediglich geringer äußerer Krafteinwirkung gelang. Die Erwärmung fand dabei über die Absorption der Laserstrahlung am vergleichsweise temperaturunempfindlichen Schneidsegment statt. Am Stammbblatt kam es laut der durchgeführten thermographischen Messung lediglich zu einer Temperaturerhöhung auf etwa 100°C, gemessen in einem Abstand von 30 mm von der Klebefläche, was nachweislich nicht zu thermischem Verzug oder zu Gefügeveränderungen des Stammbblattwerkstoffs in den kritischen Bereichen führte.

Im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen wurde zum Lösen der kleinen Schneidsegmente vom Stammbblatt eine Mindestlaserleistung von etwa 80 W ermittelt, um die notwendige Temperatur zu erzeugen. Für das Lösen der großen Segmente in vergleichbarer Zeit war aufgrund der unterschiedlichen Segmentvolumina eine etwa zum Volumen proportional höhere Laserleistung von ungefähr 220 W erforderlich. Durch die einseitige Erwärmung über das Segment erfolgte der Lösevorgang erwartungsgemäß an der Grenzschicht zwischen dem Segment und der Klebstoffschicht. Der Klebstoff verblieb somit fast vollständig am Stammbblatt (siehe Abbildung 3).

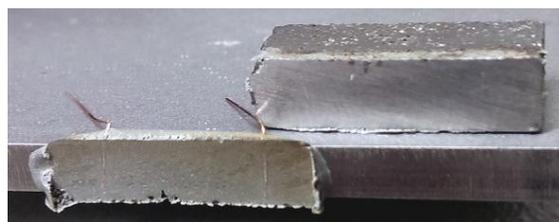


Abbildung 3: Lichtbild eines vom Stammbblatt gelösten Diamant-Schneidsegments.

Reinigen der Fügeflächen

Das Reinigen der Fügeflächen dient zur Entfernung von Klebstoffresten am Stammbblatt und auch von sonstigen Verschmutzungen wie Fetten und Ölen.

Für diesen Prozess wird ein gepulstes Lasersystem (Pulslänge 110 ns und Pulsfrequenz bis 120 kHz) mit Scanneroptik eingesetzt, mit welchem die Energie sehr konzentriert und schnell ohne größere Wärmeentwicklung in der Umgebung der bestrahlten Zone eingebracht werden kann. Idealerweise werden die Prozessparameter dabei so gewählt, dass es zu keiner Veränderung der Oberflächenmorphologie kommt. Abhängig von der Anzahl der Wiederholungen des programmierten flächigen Abtrags bis zur vollständigen Reinigung musste eine Pulsspitzenleistung von > 50 kW eingestellt werden.

Exemplarisch ist das Ergebnis einer Probenreinigung in Abbildung 4 anhand eines Lichtbildes (links), einer lichtmikroskopischen Aufnahme (Mitte) und einer REM-Aufnahme (rechts) dargestellt. Eine Beeinflussung der Oberfläche in Form einer Wärmeeinflusszone (WEZ) ist hier nicht erkennbar.

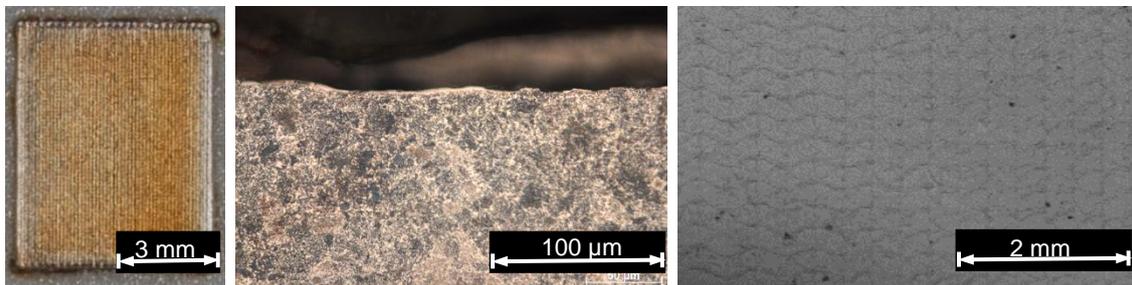


Abbildung 4: Lichtbild- (links) und lichtmikroskopische Aufnahme (Mitte) eines Querschliffs (WEZ) sowie REM-Aufnahme (rechts) der Oberfläche einer mit Hilfe von Laserstrahlung gereinigten Probe.

Oberflächenpräparation

Wie oben beschrieben ist für die optimale Ausnutzung der Eigenschaften von Klebeverbindungen und die Erzielung hoher Verbindungsfestigkeiten eine geeignete Oberflächenvorbereitung des Fügepaars Stammblatt und Schneidsegment erforderlich. So wird speziell für die Erstbestückung eines Stammblatts ein gezieltes Aktivieren der Klebeflächen durchgeführt. Je nach Anforderung kann dieser Prozess nach dem Reinigen während der Neubestückungsphase mehrfach wiederholt werden.

Für das erfolgreiche Aktivieren der Stahloberfläche kam ein Ultrakurzpuls-Lasersystem (UKP-Laser) mit einer Pulsspitzenleistung von mindestens 65 kW sowie eine Scanneroptik zum Einsatz. Durch gezielte Anpassung der Prozessparameter ließen sich unterschiedliche Rauheiten (R_{z5}) erzeugen (siehe Abbildung 5).

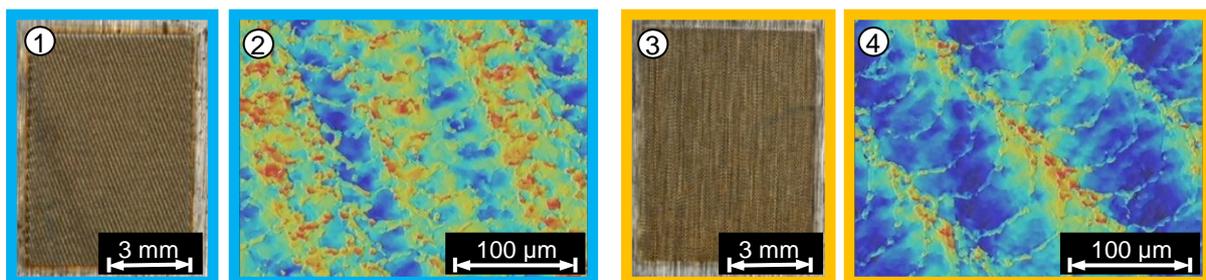


Abbildung 5: 3D-Topographie von Oberflächenstrukturen mit verschiedenen Rauheiten auf einem Stahlwerkstoff, erzeugt mittels UKP-Laserbestrahlung und vermessen mit einem konfokalen Mikroskop (2 und 4), Lichtbildaufnahmen der bearbeiteten Proben zur Erläuterung (1 und 3).

Auch bei den Prozessen des Reinigens und Aktivierens der Oberfläche wurden keine bis sehr geringe Wärmeeinflusszonen mit nur wenigen Mikrometern Tiefe ermittelt.

Anlauffarben, welche sich bedingt durch gebildete Oxidschichten negativ auf die Verbindungsfestigkeiten auswirken könnten, ließen sich mittels Argon als Schutzgas vollständig vermeiden oder mittels nachgeschalteter UKP-Laserbestrahlung ohne signifikante strukturelle Veränderung der Oberfläche weitestgehend beseitigen.

Aushärtung der Klebeverbindung

Für die Aushärtung des Klebstoffes wird im Fall eines 1-Komponenten-Epoxidharzes eine definierte Wärmezufuhr benötigt. Die erforderliche Wärmemenge wird dem Klebstoff durch Absorption der einfallenden Laserstrahlung am Schneidsegment und nachfolgende Wärmeleitung durch das Segment zugeführt.

Das im Rahmen der hier dargestellten Arbeiten eingesetzte Lasersystem erlaubte eine wohldefinierte Energiezufuhr und damit eine präzise Einhaltung des Temperatur-Zeit-Regimes für eine optimale Verbindungsfestigkeit. So wurde letztlich analog zum Lösen der Klebstoffaushärteprozess über eine Erwärmung des Schneidsegments auf etwa 180°C realisiert. Die Temperatur musste für mindestens 15 Minuten gehalten werden, um optimale Festigkeitswerte zu erzielen. Anschließend musste der Klebstoff mindestens 24 Stunden nachhärten, um die volle Festigkeit tatsächlich zu erreichen. Analog zum Lösen war auch für das Aushärten ein cw-Lasersystem (Amplitude und Frequenz konstant) am besten geeignet. Für eine gleichmäßige Temperaturverteilung wurden eine langsame Pendelbewegung und ein defokussierter Laserstrahl eingestellt.

Für das Erreichen der zum Aushärten erforderlichen Temperatur war je nach Strahlquelle und Oberflächenzustand der kleinen Segmente eine Mindestlaserleistung von etwa 55 W erforderlich. Weiterhin zeigte sich, dass sich bei konstanter Leistungsabgabe des Lasers die Temperatur nach einer gewissen Zeit auf einen nahezu konstanten Wert einpendelte.

Hilfreich für eine gezielte Temperatureinstellung war ein pyrometerbasiertes Regelsystem. In Abbildung 6 ist die Temperatur, die nahe der Klebefläche eines großen Schneidsegments gemessen wurde, gegen die Zeit aufgetragen, während das Schneidsegment mit einem Diodenlaser bestrahlt wurde. Eine Laserausgangsleistung von maximal 80 W wurde zunächst ohne Regelung eingesetzt (rote Kurve). Im darauf folgenden Experiment wurde die Soll-Temperatur von 180°C mittels Leistungsregelung erreicht und gehalten (grüne Kurve).

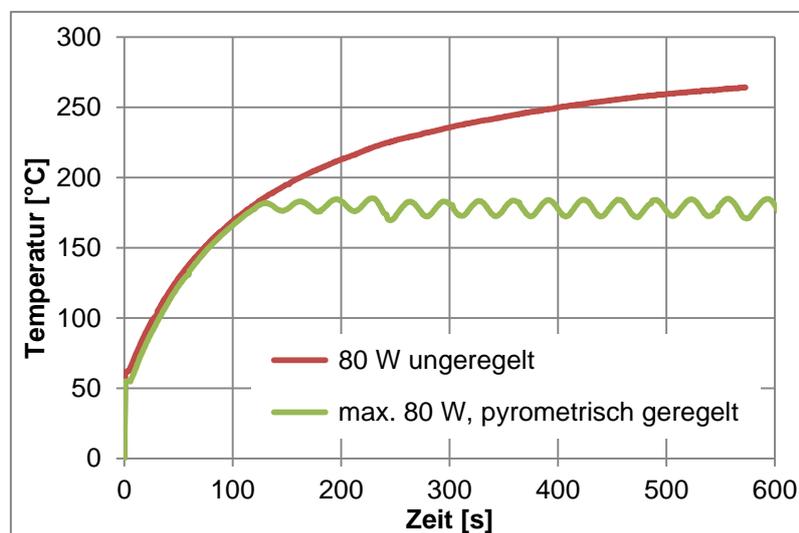


Abbildung 6: Temperatur-Zeit-Diagramm für eine ungeregelte (rote Kurve) sowie eine pyrometerbasierte geregelte Erwärmung (grüne Kurve) eines Schneidsegments mittels Diodenlaserstrahlung.

Charakterisierung der geklebten Schneidsegmente

Um die Prozessergebnisse speziell hinsichtlich der Festigkeiten der Klebeverbindungen qualifizieren zu können, wurden Zugversuche durchgeführt und die Ergebnisse mit den Festig-

keiten von gelöteten Proben verglichen. Die Festigkeitswerte von gelöteten Proben liegen demnach im Scherzugversuch bei etwa 120 N/mm^2 .

Die Ergebnisse für die Verbindungsfestigkeiten von geklebten, konventionell ausgehärteten Proben liegen bislang mit etwa 50 N/mm^2 bei etwa 50% der Festigkeit von gelöteten Proben. Dies entspricht Maximalkräften zwischen 17 und 21 kN (siehe Abbildung 7). Die Klebefläche im Überlappstoß betrug in allen Fällen $40 \times 7,8 \text{ mm}^2$.

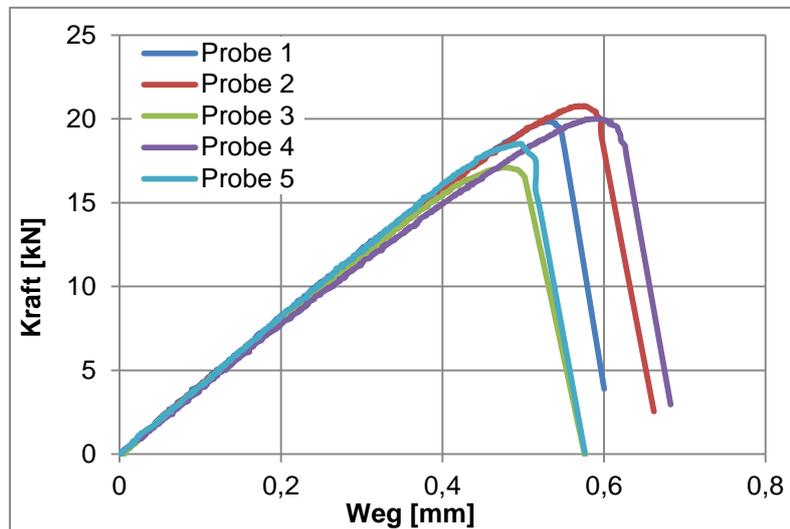


Abbildung 7: Kraft-Weg-Diagramme von Scherzugversuchen an geklebten, mittels Laserstrahlung ausgehärteten Proben (weitere Erläuterungen im Text).

Demonstrationseinheit

Auf Basis der erzielten Ergebnisse wurde eine Demonstrationseinheit entwickelt, die die generelle Machbarkeit der laserbasierten Erst- und Wiederbestückung von Sägeblättern für die gesamte Prozesskette aufzeigt (siehe Abbildung 8). Alle erforderlichen Prozesse können erfolgreich unter Nutzung dieser Einheit durchgeführt werden. Hierfür wird das Sägeblatt in die Vorrichtung eingesetzt. Anschließend erfolgt die Bearbeitung segmentweise bei orthogonaler Einstrahlung auf die Segmentoberseite bzw. auf die Klebefläche. Geplant ist für den späteren Einsatzfall ein fasergekoppeltes Lasersystem, das sowohl eine gepulste Strahlquelle für die Prozesse Reinigen und Oberflächenmodifikation als auch eine cw-Diodenlaserquelle für die Prozesse Lösen und Aushärten beinhaltet. Für den hier beschriebenen Demonstrator wurden im Rahmen des Projektes zwei separate Lasersysteme verwendet.



Abbildung 8: Demonstrationseinheit im Einsatz bei der lasergestützten (Wieder-)Bestückung von Sägeblättern im Labor (links) und beim mobilen Einsatz vor Ort (rechts).

Für das Reinigen und Aufräumen der Klebefläche am Stammblatt werden eine seitliche Luftzufuhr und ein hier nicht dargestelltes Absaugsystem eingesetzt, da es während der Laserbearbeitung zur Freisetzung von Prozessemissionen (anorganische und organische Gase sowie Partikel) kommt. Das neue Schneidsegment wird mit Hilfe von Magneten gehalten und gleichzeitig durch die verstellbaren Haltebacken derart an das Sägeblatt angepresst, dass die Klebefuge stets eine wohldefinierte Dicke erhält und alle Segmente einheitlich positioniert sind.

Zusammenfassung

Das Kleben von Diamantschneidsegmenten an Sägeblätter konnte in Kombination mit dem Werkzeug Laser zu einem konkurrenzfähigen Verfahren im Vergleich zum etablierten Lötprozess entwickelt werden. Die aktuellen Ergebnisse liefern die Grundlagen, um mittels Laserprozessen Wiederbestückungen von Stammblättern zu realisieren und die Festigkeiten der Klebstoffverbindungen zu optimieren.

Durch Verknüpfung der Klebetechnologie mit der Lasertechnik kann ein neues Marktsegment im Bereich der Sägeblattherstellung und -instandhaltung erschlossen werden. Das Abbilden der gesamten Prozesskette mit dem Lösen der verschlissenen Segmente, dem Reinigen der Oberfläche am Stammblatt, der Vorbereitung der Klebeflächen und dem Aufkleben der Schneidsegmente mit nur einem Werkzeug, dem Laser, ist hierfür vorgesehen. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass durch die langen Prozesszeiten zum Aushärten des Klebstoffs der Laserprozess zunächst unwirtschaftlich wird und somit für diesen Prozessschritt eine Alternative wie z.B. der Induktion verwendet werden sollte, solange kein Klebstoff mit wesentlich kürzerer Aushärtezeit zur Verfügung steht.

Vorteilhaft ist allerdings, dass die Anzahl der möglichen Neubestückungen vermutlich nicht limitiert ist, solange das Stammblatt (kein Gefügeeinfluß) nicht signifikant geschädigt wird. Weiterhin soll dieses Verfahren auch vor Ort beim Endanwender einsetzbar sein.

Als Strahlquelle wird eine Kombination aus einem cw- und einem gepulsten Lasersystem erforderlich sein, um die Prozesse zielgerichtet umsetzen zu können. Zunächst ist anhand einer Demonstrationseinheit die praktische Umsetzbarkeit für den industriellen Einsatz erfolgreich gezeigt worden.

Die Optimierung der Klebeverbindungen durch eine formschlüssige Verbindung zwischen Stammblatt und Segmenten, bei welcher der Klebstoff keine Scherkräfte aufnehmen muss, ist ein weiterer essenzieller Teil zukünftiger Forschungsarbeiten. Durch ein Umdenken bei der Sägeblattkonstruktion können erhebliche Festigkeitssteigerungen erreicht werden, indem gezielt die Fügegeometrien angepasst und somit die Belastungszustände der Klebeverbindungen optimiert werden.

[1] Stehr, G.C.: Entwicklung einer wärmearmen Füge-technik für das Bewehren von Stammblättern mit Schneidsegmenten. Schlussbericht, AiF-Vorhaben 12792 N, FGW, 2004

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Herrn Dipl.-Ing. Helmut Brand unter 02191 / 5921-0.