

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

(1) Leibniz Universität Hannover, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA)

(2) Leibniz Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde (IW)

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **19262 N/1**

***Entwicklung einer automatisierbaren Methode zur Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-
Fördergurten mittels Strahlverfahren***

(Bewilligungszeitraum: Januar 2017 - März 2019)

der AiF-Forschungsvereinigung

IFL

Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer (ITA)

Prof. Dr.-Ing. H.J. Maier (IW)

Ort, Datum

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Aus logistischen Gründen werden Fördergurte segmentweise zur Anlage transportiert und erst vor Ort zu einem Endlosgurt verbunden. Die Verbindungsstellen stellen die Schwachpunkte eines Fördergurtes dar, da hier die Zugkräfte über das Zwischengummi übertragen werden. Aus diesem Grund sind Fördergurtverbindungen ein zentraler Forschungsschwerpunkt am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA). Die Erfahrung aus über 40 Jahren und mehr als 1.000 Einzelprüfungen von Fördergurtverbindungen gemäß DIN 22110-3 haben gezeigt, dass die Qualität der Verbindungen stark von dem Ausbildungsgrad der Monteure abhängt, was wiederum auf die Tatsache zurück zu führen ist, dass die einzelnen Prozessschritte bei der Verbindungsherstellung manuell durchgeführt werden. Speziell die Verbindungsvorbereitung ist geprägt vom Einsatz einfacher Schneidwerkzeuge, was neben einer gewissen Qualitätsschwankung auch sehr zeitintensiv ist. Das im Folgenden vorgestellte Forschungsprojekt zur Entwicklung einer automatisierbaren Methode zur Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten mittels Wasserstrahl wird in Kooperation zwischen ITA und dem Institut für Werkstoffkunde durchgeführt, das über weitreichende Expertise auf dem Gebiet der Hochdruck-Wasserstrahltechnik verfügt. Mit Hilfe des Wasserstrahlprozesses sollen alle manuell ausgeführten Arbeiten der Verbindungsvorbereitung ersetzt und so die damit verbundenen Nachteile gelöst werden.

Abstract

Due to logistic reasons, conveyor belts are transported segmentally. To form an endless belt, the individual segments are spliced at the system. In the splice, the tension force of the belt is only transferred via core rubber, which makes splices the weakest points of a conveyor belt. Therefore, conveyor belt splices are a major research focus at the Institute of Transport and Automation Technology (ITA), formerly known as IFH, which has been testing conveyor belt splices for over 40 years. With a total amount of over 1,000 tested splices according to DIN 22110-3, it is evident that the quality of splices depends on the experience of technicians. The reason for this are the mainly manually performed working steps using simple cutting tools,

such as knives or piano wires. The hand-operated techniques not only result in a varying quality but also make the procedure very time-consuming. Therefore, the ITA and the Institute of Materials Science (IW) are cooperating in the development of an automatable splicing method for steel cord conveyor belts using high-pressure water jet technology for the preparation process to ensure a constant splice quality and to achieve a measurable time reduction as expedient benefit. The water jetting process shall replace all manually performed working steps and solve the ongoing disadvantages.

Inhaltsverzeichnis

1	Projektbegleitender Ausschuss	1
2	Ausgangssituation	3
2.1	Forschungsziel	4
2.2	Lösungsansatz	5
2.3	Stand der Technik	7
3	Projektergebnisse	11
3.1	Qualifizierung von Strahlverfahren zur Verbindungsvorbereitung	11
3.1.1	Trockeneisstrahlen	12
3.1.2	Wasserstrahlen.....	15
3.2	Analyse der Oberflächenzustände von Elastomer und Zugträger sowie der Übergangszonen	23
3.3	Nutzung von FEM-Simulation zur Optimierung der Haftung zwischen Stahlseil und Zwischengummi	26
3.4	Untersuchungen zur Verbindungsvorbereitung	32
3.5	Anforderung an ein Wasserstrahlsystem.....	57
4	Zusammenfassung und Ausblick	60
5	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	62
6	Nutzen für KMU	64
7	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	66
8	Verwendung der Zuwendung	67
9	Veröffentlichungen	68
10	Literaturverzeichnis	71
11	Anhang	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Verbindungsvorbereitung eines Stahlseil-Fördergurtes [Quelle: ContiTech].....	3
Abbildung 2-2: Aufbau eines Stahlseil-Fördergurtes	4
Abbildung 2-3:Freilegen von Stahlseilen im Fördergurt durch Strahlverfahren im 2D- (A) und 3D- (B) Bereich	5
Abbildung 2-4: Falschfarbendarstellung der Verbindungsstelle für unterschiedliche Reparaturvorbereitungsarten bei einem Stahlseilfördergurt. Freilegen der Zugträger (A), Belassen einer Restgummischicht auf den Zugträgern (B), Gezieltes Strukturieren der Restgummischicht (C und D)	6
Abbildung 2-5: Mögliche Umsetzung durch die Erweiterung einer konventionellen Vulkanisationspresse durch ein Strahlsystem mittels adaptiven Portalaufbau	7
Abbildung 2-6: Haftungstheorie zwischen Gummi und Stahlseil [Röt06].....	9
Abbildung 3-1: Buse Booster 20 DP am Institut für Werkstoffkunde	13
Abbildung 3-2: Oberfläche eine Stahlseilfördergurts nach Trockeneisstrahlbearbeitung	14
Abbildung 3-3: Schnittfläche eines WAIS Schnitts eines Stahlseilfördergurts	17
Abbildung 3-4: Kerbtiefe in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit bei Wasserdrücken von 175, 200, 225 und 250 MPa.....	19
Abbildung 3-5: Zeitspanvolumen in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wasserdrücken.....	20
Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der tragseitigen Fördergurtbearbeitung mittels Wasserflachstrahl.....	22
Abbildung 3-7: Mittels Modellparameter und Reinwasserflachstrahlbearbeitung freigelegte Stahlseil	23
Abbildung 3-8: Lichtmikroskopaufnahmen eines mittels Reinwasserflachstrahlbearbeitung freigelegten Stahlseilquerschnitts	24
Abbildung 3-9: REM-Aufnahme der Stahlseiloberfläche	25
Abbildung 3-10: EDX-Analyse der Oberfläche eines wassergestrahlten Stahlseils	25
Abbildung 3-11: Elementbilder der Seiloberfläche.....	26
Abbildung 3-12: Kraftübertragung in einer 7-Seilprobe nach Keller [Kel01]	27

Abbildung 3-13: Einspannvorrichtung 5-Seilproben.....	28
Abbildung 3-14: Verlauf der Reaktionskräfte der einzelnen Seile während des Zugversuchs	29
Abbildung 3-15: Prüfkörper nach DIN ISO 1827 [DIN1827].....	30
Abbildung 3-16: FEM-Simulation einer 5-Seilprobe.....	31
Abbildung 3-17: Spannungsverteilung über den Seilumfang des mittleren Stahlseils (links: FEM-Simulation; rechts: normierte Darstellung)	32
Abbildung 3-18: Zugprüfstand mit eingespannter 3-Seilprobe.....	33
Abbildung 3-19: Mittels Wasserstrahl freigelegtes blankes Stahlseil	33
Abbildung 3-20: Ergebnisse der Ausreißversuche der, mit blanken Stahlseilen, hergestellten 3-Seilproben.....	34
Abbildung 3-21: Stahlseil vor Vulkanisation (oben) und nach Ausreißversuch (unten)	34
Abbildung 3-22: Ergebnisse der Ausreißversuche (2. Messreihe).....	36
Abbildung 3-23: Probengeometrien mit Restgummischicht (links: konstant 1 mm Restgummi; rechts: profilierte Restgummischicht).....	37
Abbildung 3-24: Vergleich der Ausreißversuche mit blanken und mit Restgummi behafteten Stahlseilen	38
Abbildung 3-25: Ergebnisse der Ausreißversuche (Restgummischicht)	39
Abbildung 3-26: RWS-Schnitt zur Flankenbearbeitung (links) und Stahlseil mit strukturierter Restgummischicht (rechts)	41
Abbildung 3-27: Abgleitende Anordnung der restgummibehafteten Stahlseilzugträger mit Sägezahnprofil	41
Abbildung 3-28: Ineinandergreifende Anordnung der restgummibehafteten Stahlseilzugträger mit Sägezahnprofil	42
Abbildung 3-29: Ergebnisse der Ausreißversuche mit Restgummischicht (mit und ohne Profilierung)	42
Abbildung 3-30: Belastungsprinzip der Zugschwellprüfung nach DIN 22131-3	44
Abbildung 3-31: Erster Bearbeitungsschritt bei der einseitigen automatisierbaren Verbindungsvorbereitung mittels Reinwasserstrahlschnitt	48
Abbildung 3-32: Zweiter Bearbeitungsschritt bei der einseitigen automatisierbaren Verbindungsvorbereitung mittels Reinwasserstrahlschnitt	49

Abbildung 3-33: Querschnitt der mittels RWS Schnitten für die Verbindungsherstellung vorbereiteten Stahlseilzugträger	50
Abbildung 3-34: Tagebau Hambach.....	54
Abbildung 3-35: Detektion der Stahlseile mit Hilfe eines elektromagnetischen Sensors (links: Versuchsaufbau; rechts: farbcodierte Darstellung der Messwerte zur Visualisierung der Lage der Stahlseile)	59
Abbildung 5-1: Arbeitsplan gemäß Antrag.....	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für die Versuche zur automatisierbaren Verbindungsvorbereitung verwendeten Komponenten.....	16
Tabelle 2: Versuchsergebnisse der Ausreißversuche mit blanken Stahlseilen	35
Tabelle 3: Versuchsergebnisse der Ausreißversuche mit blanken Stahlseilen und mit Restgummischicht	40
Tabelle 4: Ergebnisse der mechanischen Prüfung auf die statische Seilausreißkraft nach DIN EN ISO 15236	43
Tabelle 5: Ergebnisse Ausreißversuch für RWS	55

1 Projektbegleitender Ausschuss

Projektpartner aus dem Bereich Fördertechnik:

	Takraf Tenova	Anlagenbauer
	Thyssen Krupp	Anlagenbauer
	FLSmidth	Anlagenbauer
	Continental ContiTech CBG	Gurthersteller
	Phoenix CBS	Gurthersteller
	Altenhofen Fördertechnik	Vulkaniseur (KMU)
	Eilhauer Maschinenbau	Maschinenbauer (KMU)

Projektpartner aus dem Bereich Strahltechnik:

	ASCO	Anlagenbauer
	BFT	Pumpenhersteller
	EKOWA	Ingenieurbüro
	Hammelmann	Pumpenhersteller
	StM Waterjet GmbH Germany	Anlagenbauer
	Resato	Anlagenbauer
	Ingenieurbüro Dr. Weide	Ingenieurbüro

2 Ausgangssituation

Fördergurtverbindungen stellen den Schwachpunkt eines Gurtes dar, was durch den Aufbau begründet ist, da hier die Zugkräfte nicht wie im ungestörten Fördergurt durch den Zugträger, sondern ausschließlich durch Schubkräfte im Zwischengummi übertragen werden [Zil10]. Für die Auslegung einer Verbindung spielen sowohl die Beanspruchung und der Kraftfluss eine tragende Rolle, als auch die Haftung zwischen dem Zugträger und dem Zwischengummi, besonders bei der Neuvulkanisation. Aktuell wird die Herstellung einer Fördergurtverbindung zum größten Teil manuell von Vulkanisierern realisiert, vgl. Abbildung 2-1. Dies hat zur Folge, dass die Qualität einer Verbindung sehr stark von der Erfahrung dem Ausbildungsgrad des Vulkanisierers abhängt, und somit nicht konstant ist. Durch die manuell durchgeführten Prozessschritte, ist die Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten außerdem sehr zeitaufwendig.



Abbildung 2-1: Verbindungsvorbereitung eines Stahlseil-Fördergurtes [Quelle: ContiTech]

Stahlseil-Fördergurte gehören zu den hochfesten Gurten und können eine nominelle Festigkeit von bis zu 10.000 N/mm erreichen. Der generelle Aufbau ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

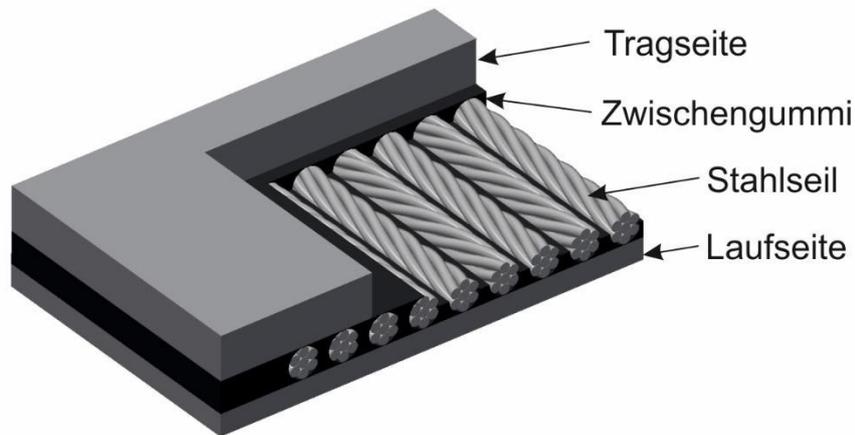


Abbildung 2-2: Aufbau eines Stahlseil-Fördergurtes

2.1 Forschungsziel

Im beantragten Forschungsvorhaben sollte eine automatisierbare Methode zur Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten mittels Strahlverfahren entwickelt werden, vgl. Skizze Abbildung 1. Ziel war es, durch die Herstellung definierter, für die Neuansbindung optimierter, Oberflächen in der Verbindungszone eine Verbesserung der Verbindungsfestigkeit bei hohem Automatisierungsgrad zu erreichen. Dies beinhaltet sowohl die Auslegung und das Design der Verbindungsstelle, als auch die strahlgestützte Vorbereitung, Prüfung und Charakterisierung der umgesetzten Verbindungen. Das große Automatisierungspotenzial in der Verbindungsherstellung von Fördergurten begründet sich durch die ausschließlich manuell durchgeführten Tätigkeiten in der konventionellen Herstellungsmethode.

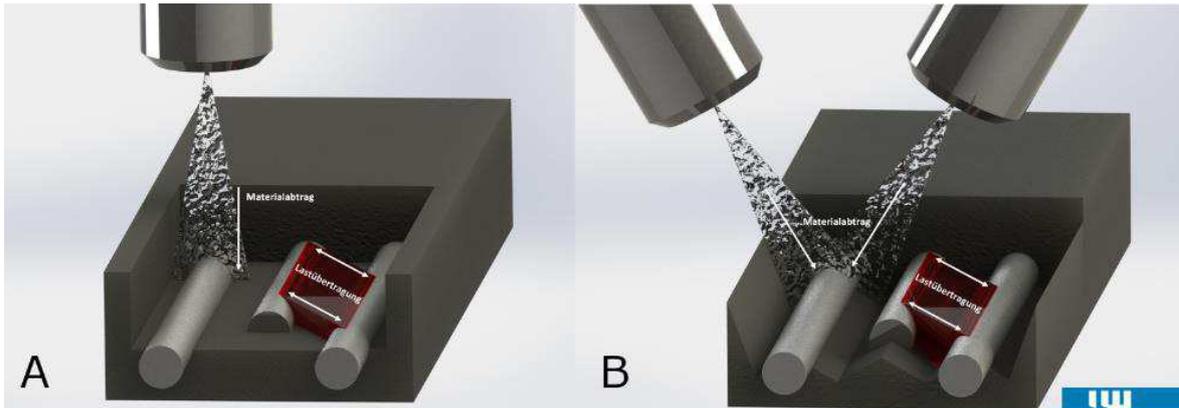


Abbildung 2-3: Freilegen von Stahlseilen im Fördergurt durch Strahlverfahren im 2D- (A) und 3D- (B) Bereich

Für die Verbindungsvorbereitung werden CO₂- und Wasserstrahlverfahren adaptiert, um einen Abtrag des Gummis und das Freilegen der Zugträger zu erreichen (Abbildung 2-3). Hier soll unter anderem die Beschaffenheit der entstehenden Oberflächen sowie die Selektivität des Abtrags in Hinsicht auf Matrixwerkstoff (Elastomer) und Zugträger untersucht werden, aber auch das Belassen einer definierten Schicht Restgummi auf der Armierung mit betrachtet werden. Beim Freilegen der Zugträger soll des Weiteren die darauf aufgebraachte Zinkschicht nicht geschädigt werden. Die durch die Strahlbearbeitung erzeugten Oberflächen werden so ausgelegt, dass durch ein hohes Anbindungspotential eine bestmögliche Neuanbindung bei der erneuten Vulkanisation erfolgen kann.

2.2 Lösungsansatz

Konventionelle Verbindungskonzepte sollen durch die Anwendung moderner Strahlverfahren verbessert und automatisiert werden. Industriell sind je nach Hersteller bei der Verbindungsherstellung sowohl das vollständige Freilegen der Stahlarmierung, als auch das Belassen von Restgummi auf den Seilen (vgl. Abbildung 2-4) üblich. Diese Vorgehensweisen beruhen auf Erfahrungen der einzelnen Her-

steller und nicht auf unabhängiger Forschung hinsichtlich der Anbindungsmechanismen. In Anlehnung an diese industriellen Herstellungsweisen werden beide Methoden berücksichtigt und hinsichtlich ihres Anbindungspotentials untersucht. Hinsichtlich der neuen Gummi-anbindung unterscheiden sich diese beide verbreiteten Methoden. Während im Fall A die vollständige Neuanbindung von Zink zu Gummi erfolgt, ist dies im Fall B nicht erforderlich. Unter Verwendung der Zink/Gummi-Erstverbindung wird in diesem Fall eine Gummi-Gummi-Verbindung auf einer größeren zylindrischen Oberfläche hergestellt. Aufgrund der verschiedenen Anbindungsmechanismen und sich unterscheidenden Vulkanisationsparameter sind Unterschiede hinsichtlich der Verbindungsqualität zu erwarten.

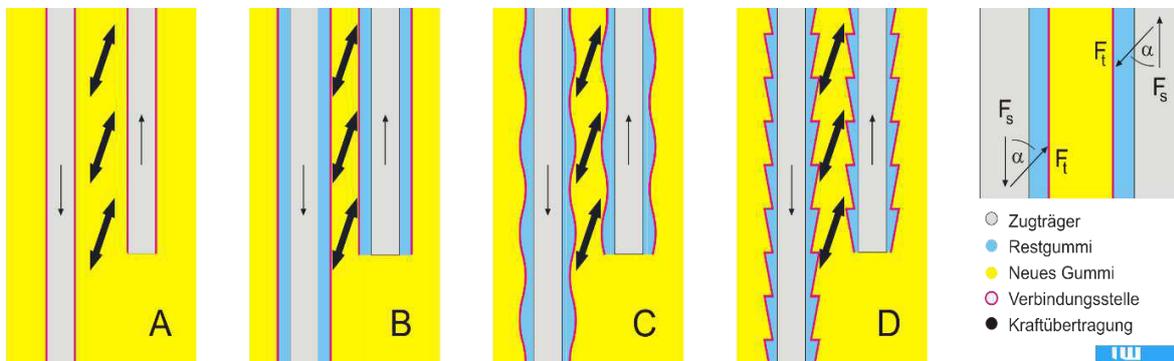


Abbildung 2-4: Falschfarbendarstellung der Verbindungsstelle für unterschiedliche Reparaturvorbereitungsarten bei einem Stahlseilfördergurt. Freilegen der Zugträger (A), Belassen einer Restgummischicht auf den Zugträgern (B), Gezieltes Strukturieren der Restgummischicht (C und D)

Des Weiteren werden für die genannten Verbindungs- und Reparaturstellen Konzepte entwickelt, welche eine Festigkeitssteigerung durch neuartige Oberflächengeometrien und das auf diesen Anwendungsfall neu angewendete Strahlverfahren zur Folge haben. Ziel ist das gezielte Strukturieren der Restgummihülle, wobei vor allem Automatisierbarkeit und verfahrensspezifische Vorteile, wie selektiver Materialabtrag und freie Werkzeugmanipulation ohne direkten Werkstoffkontakt, der neuen Bearbeitungstechniken ausgenutzt werden. Nutzbare Effekte sind hier zum einen die Vergrößerung der verbindungsrelevanten aktivierbaren Oberfläche, zum

anderen ein Interlocking der verschiedenen Elemente. Berücksichtigung finden dabei der strukturelle Aufbau der Gurte und ihr Lastübertragungsverhalten, aber auch die Beschaffenheit der Oberflächen. Einige Beispiele mit strukturierter Randzone sind in Abbildung 2-4 C und D dargestellt.

Die Ableitung eines Automatisierungskonzeptes soll abschließend erarbeitet werden. Hierzu werden zum einen die technische Umsetzung und zum anderen die Wirtschaftlichkeit analysiert. Eine erste Idee eines Funktionsmusters ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

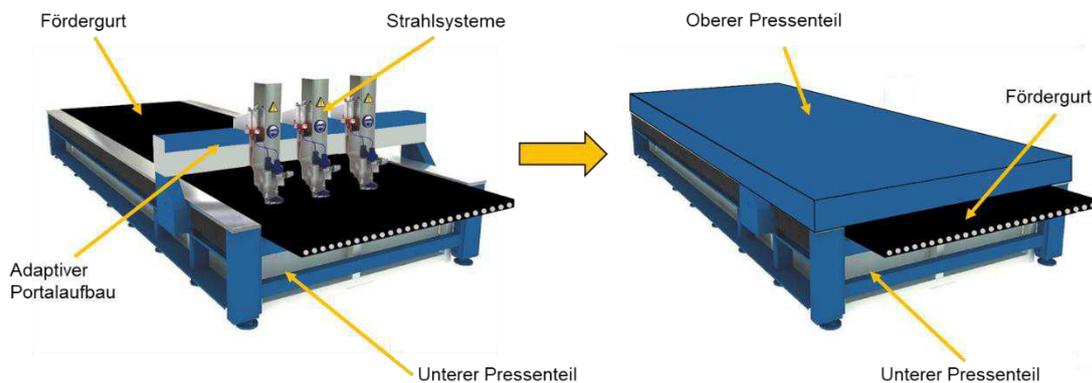


Abbildung 2-5: Mögliche Umsetzung durch die Erweiterung einer konventionellen Vulkani-sationspresse durch ein Strahlsystem mittels adaptiven Portalaufbau

2.3 Stand der Technik

In der Praxis gibt es eine Vielzahl an Methoden zur manuellen Vorbereitung der beiden zu verbindenden Gurtenden bzw. von Reparaturstellen. Beispielsweise sind für das Vorbereiten der Seile für die Verbindung die Bearbeitung unter Nutzung von „Pianowire“ und „Strippingmaschine“ zu nennen. Die Zugträger können dabei abhängig von der Unternehmensstrategie komplett vom zuvor umgebenen Gummi befreit sein oder noch eine geringe Restgummischicht aufweisen.

Das Freilegen der Seile mit einem „Pianowire“ geschieht mittels einer Drahtschlaufe, die um ein einzelnes Seil herumgelegt wird und zum Seilende hin-gezogen wird. Das Seil wird in seiner Geometrie nicht verändert, der zurückblei-bende Gummimantel ist oval und entspricht nicht dem Seilquerschnitt. An der Über-lappungsstelle der beiden Drahtenden bleibt etwas Gummi stehen. Bei der Bearbeitung mit einer „Strippingmaschine“ tritt dieser Nachteil nicht auf. Bei beiden Verfahren sind große Kräfte aufzubringen, was die Herstellung aufwändig und lang-wierig gestaltet. Generell wird mit allen gängigen Verfahren das Gummi mechanisch vom Stahl geschnitten. Beim Schneiden kann aufgrund fehlender Führung und Kon-trolle auch die Oberfläche der Stahlseile mechanisch verletzt werden. Die am Stahl-seil aufgetragenen Zinkschichten, die der Steigerung der Verbindungsfestigkeit die-nen, können in Teilen beschädigt werden. Die Güte der vulkanisierten Verbindung wird durch die Größe der aktivierten Oberfläche bestimmt. Daher ist die aktuelle Vorbereitung durch Schneiden, welche geometrisch die geringste aktive Oberfläche bringt, nicht optimal. Eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit ist durch das gezielte Strukturieren von zu verbindenden Flächen oder das Versehen der Seilenden mit formschlüssigen Profilen theoretisch möglich, wurde in der Praxis allerdings bis-lang aufgrund fehlender Fertigungstechnologie noch nicht untersucht. Auch die Oberflächen für Reparaturstellen können ebenso strukturiert oder profiliert werden um eine zur weiteren Verbindung geeignetere Oberflächen zu schaffen.

Des Weiteren ist die Erstellung von Verbindungen zeitaufwändig, sie muss derzeit manuell von mehreren Vulkanisatoren durchgeführt werden und ist damit kostenin-tensiv. Unabhängig ob es sich um eine Erstinstallation oder eine Reparatur handelt, gilt es die Dauer der Verbindungsherstellung grundlegend zu verringern.

Zum Verbinden von Stahlseil-Fördergurten werden die Stahlseile an den Enden ausgefingert und anschließend in einer Ebene nach einem bestimmten Schema ne-beneinandergelegt. Die Zwischenräume füllt ein spezielles Zwischengummi. Im nächsten Schritt wird die Verbindung unter Anwendung von Druck und Temperatur vulkanisiert. Beim Vulkanisationsprozess wird das neu eingelegte Rohgummi mit den freigelegten Zugträgern verbunden. Die noch reaktionsfähigen Reststellen des

bereits vulkanisierten Originalfördergurts gehen mit dem unvulkanisierten Material über Schwefelbrücken die festigkeitsrelevante Bindung ein. Im Fall von komplett freigelegten Stahlseilen muss die Bindung mit dem Rohgummi über die Korrosionsschutzschicht Zink eingegangen werden. Die Güte der freigelegten Zinkschicht definiert dann die Verbindungsfestigkeit. Die Haftung beruht auf zwei unterschiedlichen Effekten. Zum einen kommt es durch den Aufbau der Stahlseile zu einer mechanischen Umklammerung der Seile durch das Gummi und zum anderen zu einer chemischen Bindung zwischen den beiden Komponenten. Die Stahlseile werden in einem abschließenden Herstellungsprozess feuerverzinkt. Die dabei entstehende Zinkschicht erfüllt zwei Anforderungen. Sie schützt die Seile vor Korrosion und kann zusätzlich bei der Vulkanisation eines Fördergurtes eine chemische Bindung zwischen dem Schwefel der Gummimischung und der Zinkschicht des Stahlseils eingehen. Hierbei entsteht eine neue Zinksulfidschicht, die über Disulfidbrücken eine chemische Haftung zwischen Stahlseil und Gummi generiert, vgl. Abbildung 2-6.

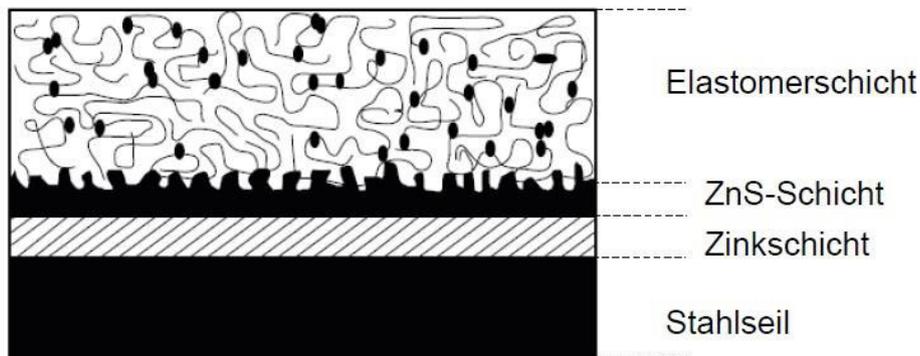


Abbildung 2-6: Haftungstheorie zwischen Gummi und Stahlseil [Röt06]

Die Reaktionen werden zusätzlich durch Vulkanisationslösungen beschleunigt [Zil10]. Die Kraftübertragung in der realisierten Verbindung geschieht durch die Scherkräfte des Gummis zwischen den Zugträgern der beiden Gurtstücke. Aus diesem Grund stellt die Verbindung eine der wesentlichen Schwachstellen in Fördergurtanlagen dar.

Die Dauer für die Erstellung einer Verbindung ist stark abhängig von der Festigkeit der Gurte, des Verbindungslayouts (inkl. der Verbindungslänge) sowie der Routine der Vulkaniseure. Neben der Prozesszeit ist auch die Qualität und damit die Festigkeit abhängig von den Erfahrungen der Monteure. Bei den durchgeführten Prüfungen von Fördergurtverbindungen an den Umlaufständen am ITA waren bei Gurten vom selben Hersteller und gleichem Vulkaniseur Abweichungen in der Verbindungsgüte zu erkennen. Dieses Thema beschäftigt auch die Unternehmen weltweit. So wird auf der von der Conveyor Manufacturers Association (CMA) neu ins Leben gerufenen internationalen SafeCon-Konferenz in Südafrika die Verbindungsfestigkeit, -Methoden und -Designs in Hinblick auf die Gefahren, die schwache Verbindungen für Mensch und Maschine mit sich bringen, explizit diskutiert.

Eine detaillierte Untersuchung der Haftmechanismen zwischen Stahlseil und Gummi wurde in [Ste91] und [Fun72] durchgeführt. Hierbei wird aber nur auf die Erstverbindung eingegangen, wodurch die Haftungsmechanismen zwischen alt- und neuvulkanisiertem Gummi, sowie der Einfluss der geometrischen Vorbereitung vernachlässigt werden. Untersuchungen zum Kraftfluss wurden in [vdW91] durchgeführt, wobei erstmals die FEM-Simulation eingesetzt wurde. Zur weiteren Unterstützung zur Simulation von Fördergurtverbindungen wurde das Kraftübertragungsverhältnis zwischen den Stahlseilen in [Kel01] ermittelt. Diese Ergebnisse wurden in [Ove12] und [Ove14] für weiterführende FEM-Untersuchungen von Stahlseil-Fördergurtverbindungen angewandt.

3 Projektergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit einem Stahlseil-Fördergurt des Typs St 4500 16:8 der Firma ContiTech CBG durchgeführt. Dieser Gurttyp wird unter anderem im Braunkohletagebau Hambach eingesetzt. Der von der RWE Power AG betriebene Tagebau ist mit einer jährlichen Förderleistung von 40 Mio. Tonnen Braunkohle und einer Fläche von 8.500 Hektar der Größte in Deutschland. Die Förderbandanlage umfasst eine Gesamtgurtlänge von 115 km. Bei Wartungs- und Reparaturarbeiten werden jährlich ca. 250 Verbindungen hergestellt. [Quelle: RWE]

3.1 Qualifizierung von Strahlverfahren zur Verbindungsvorbereitung

Zu Beginn der Untersuchungen stand die Auswahl eines geeigneten Strahlverfahrens. Gemäß dem Inhalt des Forschungsantrags wurden dabei das Trockeneis- sowie das Wasserstrahlen untersucht. Beide Verfahren eignen sich grundsätzlich für eine automatisierbare Verbindungsvorbereitung, da ihr Schädigungspotential bezogen auf die Stahlseilzugträger als gering einzustufen ist und eine mechanisierte Prozessführung bereits eingesetzt wird. Weitere kommerziell eingesetzte Strahlverfahren, wie beispielsweise das Sandstrahlen, das Glasperlenstrahlen oder das Stahlkugelstrahlen wurden bereits im Vorfeld von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Sie bringen verfahrensbedingte Nachteile für die Anwendung für die Verbindungsvorbereitung mit sich. So wirken die genannten Strahlverfahren zum Teil zu abrasiv und weisen somit ein hohes Schädigungspotential für die Stahlseilzugträger auf. Zusätzlich besteht eine erhöhte Gefahr von Strahlmittelrückständen an der Verbindungsstelle, welche das Ergebnis der Verbindungsherstellung durch die Vulkanisation neuen Elastomermaterials maßgeblich verschlechtert. Das Trockeneisstrahlen arbeitet hingegen vollständig rückstandsfrei, beim Wasserstrahlen ist nach der Verbindungsvorbereitung lediglich eine Trocknung durchzuführen.

Maßgeblich für die Übertragbarkeit der Untersuchungen in die industrielle Anwendung ist neben der grundlegenden Machbarkeit auch eine ausreichende Produktivität des Prozesses. Bei der Qualifikation der Strahlverfahren werden Parameter für eine Abschätzung der Prozessproduktivität daher bereits diskutiert.

3.1.1 Trockeneisstrahlen

Der Begriff Trockeneisstrahlen bezeichnet ein Druckluftstrahlverfahren, bei dem als Strahlmittel pelletiertes, festes CO₂ verwendet wird. Das Verfahren wird vorrangig zur Entfernung von Beschichtungen oder für Reinigungsanwendungen eingesetzt. Es zeichnet sich durch die rückstandsfreie Prozessführung aus. Die als Strahlmittel verwendeten CO₂ Pellets fallen nach der Verwendung zunächst als sich sammelnder Rückstand an. Sie sublimieren unter atmosphärischen Bedingungen und gehen so als gasförmiges CO₂ in die Luft über.

Das Trockeneisstrahlen beruht auf insgesamt drei Wirkmechanismen: Dem mechanischen, dem thermischen und dem Sublimationseffekt. Der mechanische Effekt unterscheidet sich nicht wesentlich von den Wirkmechanismen anderer Druckluftstrahlverfahren. Durch die Beschleunigung des Strahlmittels im Luftstrom erhält dieses einen Impuls, welcher beim Auftreffen auf das Werkstück übertragen wird und so eine Kraft auf die Oberfläche bewirkt. Zusätzlich spielt beim Trockeneisstrahlen die Temperatur des Strahlmittels von $T = -78,5 \text{ °C}$ unter atmosphärischen Bedingungen eine wichtige Rolle. Dieser thermische Effekt wirkt besonders bei der Bearbeitung von Beschichtungen aus. Durch das Auftreffen der Trockeneispellets wird das Werkstück in der Prozesszone stark abgekühlt. Durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Grundmaterial und Beschichtung wird dadurch eine Spannung induziert, welche wiederum zum Abplatzen der Beschichtung führt. Das wird zusätzlich durch den Sublimationseffekt begünstigt. Ein Teil der Pellets sublimiert beim Auftreffen auf das Werkstück. Das geht mit einer Volumenzunahme einher, die ein Absprengen der Beschichtung verursacht.

Für die Qualifizierung des Trockeneisstrahlens wurde eine Strahlanlage der Firma Buse KSW GmbH & Co. KG vom Typ Booster 20 DP verwendet. Die Anlage kann

mit 14,5 kg Trockeneispellets bestückt werden und arbeitet mit einem Betriebsdruck von bis zu 16 bar (vgl. Abbildung 3-1).



Abbildung 3-1: Buse Booster 20 DP am Institut für Werkstoffkunde

10 mm. Zu Beginn der Versuche wurde eine Vorschubgeschwindigkeit von 100 mm/min, ein Arbeitsdruck von 0,8 MPa und ein Trockeneismassenstrom von 60 kg/h gewählt.

Nach Bearbeitung des Fördergurts wies die Gummioberfläche Vereisungen auf. Neben Trockeneisrückständen war auch kondensierte und gefrorene Feuchtigkeit auf der Luft zu beobachten. Die Gurtprobe wies eine sichtbare bearbeitete Spur auf (vgl. Abbildung 3-2).

Der Trockeneismassenstrom kann stufenlos im Bereich 0-60 kg/h variiert werden. Zur Untersuchung des Abtrageffekts durch das Trockeneisstrahlen wurde ein Teilstück eines Stahlseilfördergurts vom Typ Conti-Tech CBG St 4500 16:8 verwendet. Der Gurt wurde fest auf einer Trägerplatte eingespannt. Die Versuche fanden in einer schallisolierten Kabine statt um die Belastung durch Emissionen jedweder Art gering zu halten.

Der Düsendurchmesser des Trockeneisstrahlgeräts betrug 16 mm. Die Düse wurde durch ein Achssystem mit entsprechender CNC-Steuerung manipuliert und entlang einer geraden Bahn über das Werkstück geführt. Der Düsenabstand betrug

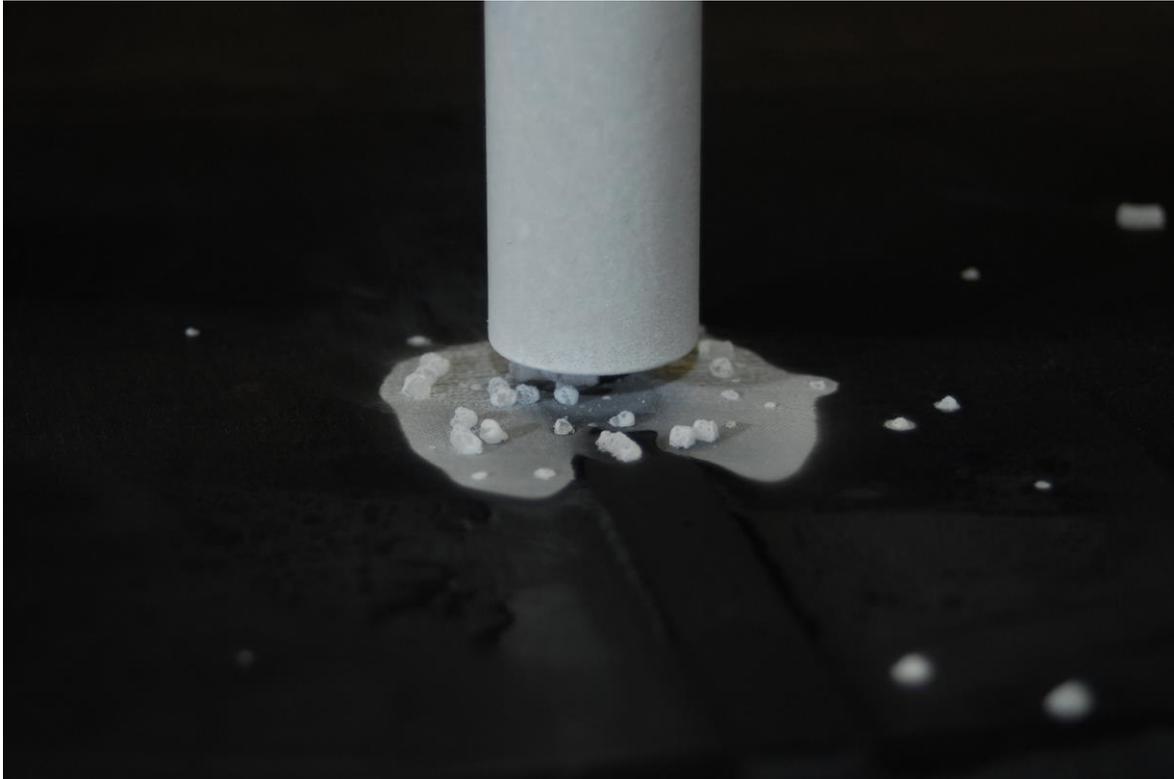


Abbildung 3-2: Oberfläche eine Stahlseilfördergurts nach Trockeneisstrahlbearbeitung

Die bearbeitete Oberfläche wurde jedoch nicht im messbaren Bereich gekerbt, so dass keine bzw. keine relevante Abtragtiefe entstanden ist. Es werden unterschiedliche Ursachen für das Ausbleiben des gewünschten Abtrags vermutet. Die erhoffte Versprödung bei der Kühlung des Materials durch die Trockeneisbearbeitung versprödet das Gummi nicht im notwendigen Maß. Das führt dazu, dass die Strahlenergie und damit das Schädigungspotential der Pellets nicht ausreichend zur Zerstörung des Materialzusammenhalts ist. Die Strahlleistung kann durch Verwendung leistungsfähigerer Anlagentechnik gesteigert, der Vorschub weiter verringert werden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich der Gummiabtrag auch bei einer Vervielfachung der Kerbtiefe nicht im für industrielle Anwendungen relevanten Bereich bewegt. Von weiteren Versuchen wurde daher abgesehen.

3.1.2 Wasserstrahlen

Das Wasserstrahlen unterscheidet sich grundlegend vom Trockeneisstrahlen. Unter dem Überbegriff „Wasserstrahlen“ existieren unterschiedliche Verfahrensvarianten, deren Auswahl die Einsatzmöglichkeiten des Prozesses bestimmen. Allen Verfahrensvarianten gemein ist, dass als Arbeitsfluid Wasser verwendet wird. Abhängig von der Strahlzusammensetzung wird zwischen Reinwasserstrahl (RWS), Wasserabrasivinjektorstrahl (WAIS) und Wasserabrasivsuspensionsstrahl (WASS) unterschieden. Der WASS unterscheidet sich in den Anforderungen an die benötigte Anlagentechnik sowie in den Anwendungsgebieten und kommt daher für eine automatisierte Verbindungsvorbereitung nicht in Frage. Er wird daher auch nicht weiter beschrieben.

RWS und WAIS unterscheiden sich maßgeblich durch die Strahlzusammensetzung. Dem WAIS werden nach der Entspannung des Arbeitsfluids ein Abrasivmittel in Form eines rieselfähigen Feststoffs zugeführt. Meistens findet dafür in der Wasserstrahltechnik Granatsand Verwendung. Durch den Zusatz der Abrasivpartikel können mit dem WAIS nahezu alle Materialien getrennt werden. Der RWS eignet sich zum Trennen von weichen Materialien, wie z.B. Gummi.

Beide Verfahrensvarianten benötigen für eine Strahlerzeugung druckbeaufschlagtes Wasser. Der verbreitete Industriestandard ist die Verwendung von 400 MPa Technik, d.h. alle Komponenten und Rohrleitungen sowie die verwendete Pumpe sind auf einen maximalen Arbeitsdruck von 400 MPa ausgelegt. Alternativ ist auf dem Markt auch kommerzielle 600 MPa zu finden. Diese ist jedoch i. d. R. nur für Sonderanwendungen wirtschaftlich. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde daher die 600 MPa Technik im Vorfeld ausgeschlossen. An die Druckerzeugung in der Pumpe und an das entsprechende Rohrleitungssystem ist am Schneidkopf eine Wasserdüse angeschlossen. Es wird hierbei zwischen Rund- und Flachstrahldüsen unterschieden, welche sich in ihrem Aufbau, ihrer Funktionsweise und ihren Anwendungen unterscheiden.

Grob lassen sich die unterschiedlichen Düsentypen in Reinigungs- bzw. Abtragdüsen und Schneiddüsen unterteilen. Für Schneidaufgaben werden ausschließlich Rundstrahldüsen, für Reinigungs- und Abtragenwendungen vorrangig Flachstrahldüsen oder auf größeren rotierenden Köpfen angeordnete Rundstrahldüsen eingesetzt. Für die automatisierbare Verbindungsvorbereitung ist eine schädigungsfreie Freilegung der Stahlseilzugträger unerlässlich. Es wurde für den Elastomerabtrag daher das Reinwasserstrahlen ausgewählt. Um das Abtragverhalten mit den Prozessparametern korrelieren zu können wurde für die Durchführung der Laborversuche von der Verwendung von rotierenden Düsenköpfen abgesehen. Durch die sich überlagernden Vorschubvektoren ergeben sich komplexe Bahnkurven für die einzelnen Düsen. Es daher wurden für die Versuche zum Gummiabtrag Flachstrahldüsen mit einem Äquivalenzdurchmesser von $d = 0,5 \text{ mm}$ und 10° Strahlwinkel verwendet (Hammelman GmbH, Typ R).

Neben dem Gummiabtrag ist für die Verbindungsvorbereitung der Zuschnitt der Gurtenden notwendig. Hierbei müssen Gummi und Stahlseilzugträger sicher getrennt werden können. Daher wurde für den Zuschnitt der Gurtenden das Wasserabrasivinjektorstrahlschneiden ausgewählt. Der Wechsel vom RWS auf das WAIS ist vergleichsweise einfach zu realisieren, da Komponenten, wie Pumpe, Rohrleitungen etc. für beide Verfahrensvarianten eingesetzt werden können. Lediglich der Schneidkopf selbst muss angepasst werden. Das kann entweder durch einen manuellen Wechsel oder durch das Umschalten zwischen zwei vormontierten Köpfen realisiert werden.

In Tabelle 1 sind die für die Versuche verwendeten Komponenten dargestellt.

Tabelle 1: Für die Versuche zur automatisierbaren Verbindungsvorbereitung verwendeten Komponenten

Hochdruckpumpe	Hammelman HDP 11F
Hochdruckschlauch	Spir Star 5mmUHP, 15 m, 9/16"-18 UNF LH (ES) NW5 Serie
Verrohrung	SITEC 720.2120 9/16"

Fittinge	SITEC 720.1512 & 720.1513
Druckschrauben	SITEC 720.0110 M26 x 1,5
Druckringe	SITEC 720.0120 9/16"-18 UNF LH
Düsenhalter	Hammelmann 00.01599.0294 M14 x 1,5 LH
Düsen	Hammelmann Typ R, d = 0,5 mm, a = 10 °
Schaltventile	2 Stk. Absperrventil 00.05861.0015
Achssystem	3-Achs Gantry Portal (Fa. Stein-Moser GmbH)
Steuerung	Eigenbau IW

Der Zuschnitt der Gurtenden wurde testweise mit einem WAIS Schneidkopf durchgeführt. Der in Abbildung 3-3 gezeigte Schnitt wurde mit einem Wasserdruck von 330 MPa und einem Abrasivmassentrom von 400 g/min bei Verwendung einer 0,3 mm Rundstrahldüse in Kombination mit einem 0,8 mm Fokussierrohr durchgeführt.



Abbildung 3-3: Schnittfläche eines WAIS Schnitts eines Stahlseilfördergurts

Zu erkennen ist eine glatte Schnittfläche oberhalb und zwischen den Stahlseilzugträgern. Unterhalb der Stahlseile sind Verschleppungen des Wasserstrahls zu erkennen. Diese resultieren aus der beim Durchtrennen der Stahlseile verrichteten Arbeit und der daraus resultierenden verminderten kinetischen Energie des Wasserstrahls. Durch eine Verringerung der Schnittgeschwindigkeit lässt sich dieser Effekt vermindern. Das ist in diesem Fall jedoch nicht notwendig, da das Gummi in weiteren Arbeitsschritten abgetragen wird. Der Gurtendenzuschnitt nimmt gemessen an der Gesamtprozessdauer einen verhältnismäßig kleinen Zeitbedarf in Anspruch. Die Untersuchungen zum Gurtendenzuschnitt wurden daher nicht über den reinen Nachweis der Machbarkeit weitergeführt.

Für eine schädigungsfreie Freilegung der Stahlseilzugträger ist ein möglichst zielgenauer Abtrag bis in eine definierte Tiefe erforderlich. Zu diesem Zweck wurde aus den Versuchen die erzielte Kerbtiefe in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Wasserdruck ermittelt und daraus ein Modell des Reinwasserprozesses abgeleitet. In Abbildung 3-4 ist der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Kerbtiefe bei unterschiedlichen Drücken dargestellt. Es ist eine Abnahme der Kerbtiefe mit steigender Vorschubgeschwindigkeit zu erkennen. Gleichzeitig erhöht sich die Abtragtiefe bei steigendem Wasserdruck.

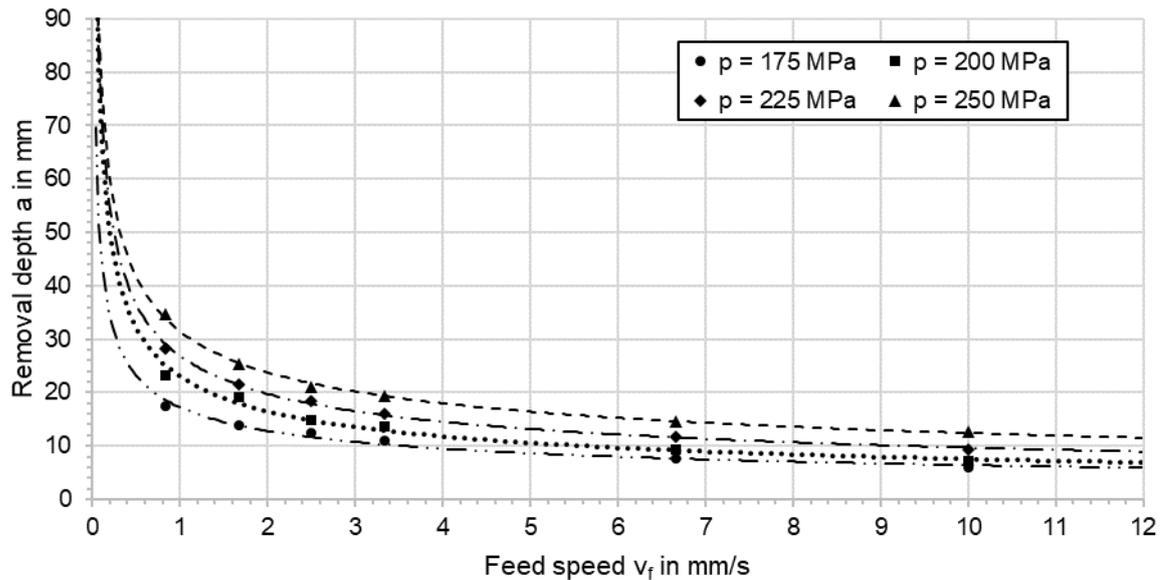


Abbildung 3-4: Kerbtiefe in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit bei Wasserdrücken von 175, 200, 225 und 250 MPa

In Abbildung 3-5 ist das aus der Spurgeometrie und der Kerbtiefe errechnete Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wasserdrücken dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Einfluss des Wasserdrucks analog zur Kerbtiefe ist. Es ist darüber hinaus zu erkennen, dass neben dem Wasserdruck auch die Vorschubgeschwindigkeit das Zeitspanvolumen und somit die Gesamtproduktivität des Prozesses erhöht. Das Zeitspanvolumen läuft gegen keinen Grenzwert.

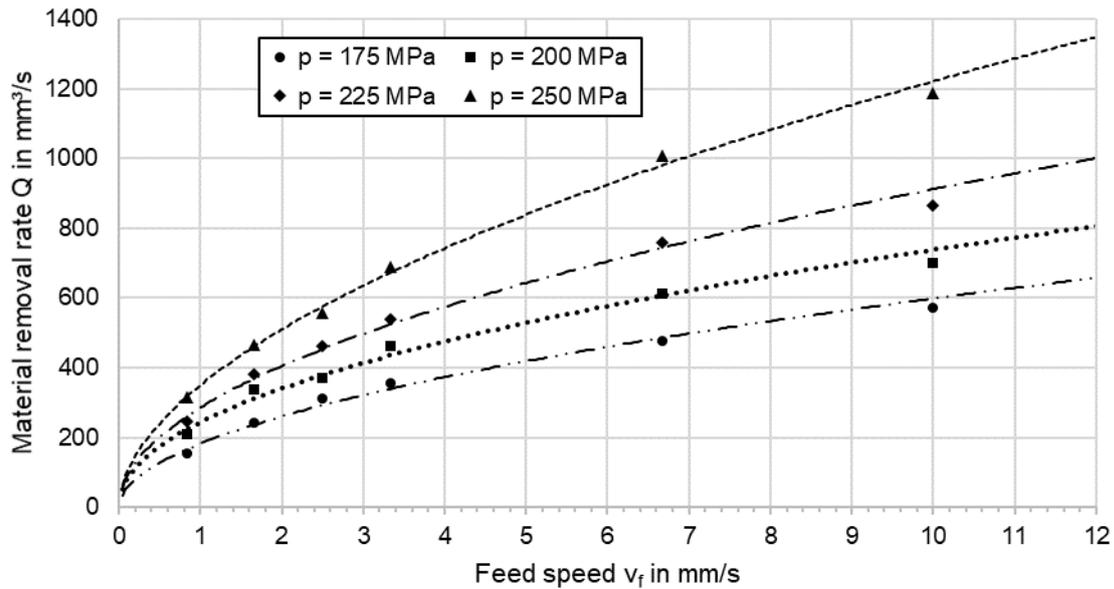


Abbildung 3-5: Zeitspanvolumen in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Wasserdrücken

Für die Prozessauslegung hinsichtlich einer möglichst hohen Produktivität ist somit eine möglichst hohe Achsgeschwindigkeit anzustreben. Der Arbeitsdruck ist entsprechend der vorhandenen Anlagentechnik maximal zu wählen. Die maßgeblichen Randbedingungen dafür sind der verwendete Düsendurchmesser sowie die Charakteristik und Leistung der Pumpe. Der Wasservolumenstrom ist abhängig von Druck und Düsendurchmesser.

$$Q_w = v * A = \frac{\pi * d^2}{4} * 6 * 10^{-2}$$

Q_w Wasservolumenstrom in l/min

v Strahlgeschwindigkeit in m/s

A Düsenaustrittsfläche in mm²

d Düsendurchmesser in mm

Der errechnete Wasservolumenstrom muss unterhalb der maximalen Förderleistung der verwendeten Pumpe liegen. Bei paralleler Verwendung mehrerer Düsen

wird der benötigte Volumenstrom entsprechend mit der Anzahl der Düsen multipliziert. Für die sich ergebenden hohen Wasservolumenströme bei Verwendung von Flachstrahldüsen ist die Verwendung von Plungerpumpen üblich.

Aus den Kerbversuchen wurde ein empirisches Modell des Abtragprozesses abgeleitet. Dieses ist nachfolgend dargestellt.

$$a(p, v_f) = 2,6 \times e^{9,4 \times 10^{-3} p - 0,086 v_f}$$

<i>a</i>	<i>Kerbtiefe in mm</i>
<i>p</i>	<i>Wasserdruck in MPa</i>
<i>v_f</i>	<i>Vorschubgeschwindigkeit in mm/s</i>

Zur Validierung des Modells wurden aus dem Modell Prozessparameter zur Bearbeitung eines Fördergurteilstücks generiert. Die geforderte Abtragtiefe wurde aus der gegebenen Gurtgeometrie abgeleitet und berechnet sich zu:

$$a_{\text{gefordert}} = (a_{\text{Deckplatte}} + a_{\text{Kerngummi}} + r_{\text{Stahlseil}}) * S = 22,8 \text{ mm}$$

Die geforderte Abtragtiefe ergibt sich aus der Deckplattenstärke, der Stärke des Kerngummis, sowie dem Radius der Stahlseilzugträger. Der sich ergebene Abstand von Fördergurtoberseite zum Zugträgermittelpunkt wird mit einem Faktor S multipliziert, um die Abtragtiefe auch innerhalb statistischer Schwankungen sicher zu gewährleisten. Der Faktor S wurde auf S = 1,1 festgelegt. Einsetzen in das Modell und Auflösen nach der Vorschubgeschwindigkeit v_f liefert dann:

$$v_f(a, p) = 109 * 10^{-3} p - 11,63 * \ln\left(\frac{a}{2,6}\right) = 2 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

<i>a</i>	<i>Kerbtiefe in mm</i>
<i>p</i>	<i>Wasserdruck in MPa</i>
<i>v_f</i>	<i>Vorschubgeschwindigkeit in mm/s</i>

In Abbildung 3-6 ist schematisch die einseitige Bearbeitung eines Fördergurtsegments dargestellt. Die Bearbeitung wurde mit entsprechend angepassten Parame-

tern nach manuellem Drehen der Probe auf der Unterseite wiederholt. Die entstandenen freigelegten Zugträger wurden anschließend lichtmikroskopisch sowie im Rasterelektronenmikroskop auf Schädigungen untersucht. Dabei liegt das Augenmerk neben einer möglichen Schädigung des Stahlseils selbst vor Allem auf der Zinkschicht, welche für die Korrosionsbeständigkeit und die Gummieuanbindung von großer Bedeutung ist. Zudem ist es bei der Vulkanisation von entscheidender Bedeutung, dass das komplette Stahlseil von Gummi durchdrungen ist. Um das zu gewährleisten, ist der Prozess der automatisierbaren Verbindungsvorbereitung so auszulegen, dass ein Auswaschen des Gummis zwischen den Drähten nicht auftritt.

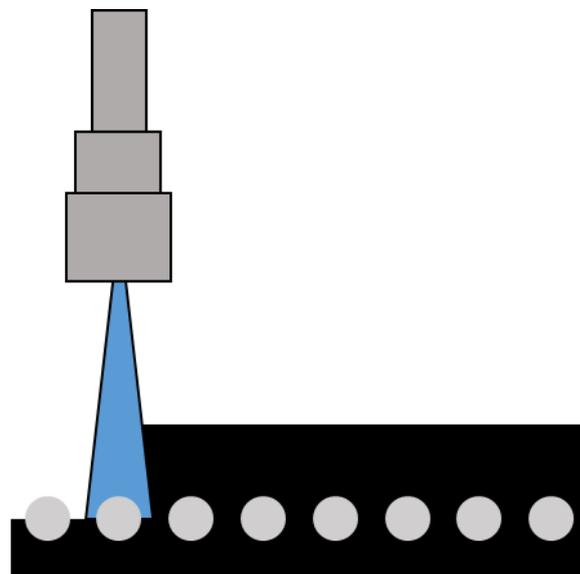


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der tragseitigen Fördergurtbearbeitung mittels Wasserflachstrahl

3.2 Analyse der Oberflächenzustände von Elastomer und Zugträger sowie der Übergangszonen

Als nächsten Arbeitsschritt galt es die freigelegten Stahlseile hinsichtlich der Gummidurchdringung und der Oberflächenqualität zu analysieren. Abbildung 3-7 zeigt ein mittels Wasserstrahlbearbeitung freigelegtes Stahlseilteilstück. Es ist zu erkennen, dass der äußere Umfang vollständig von Gummiresten befreit ist. Zwischen den einzelnen Drähten sind noch Gummireste sichtbar, was dazu führt, dass das Stahlseil matt-gräulich erscheint.



Abbildung 3-7: Mittels Modellparameter und Reinwasserflachstrahlbearbeitung freigelegtes Stahlseil

In Abbildung 3-8 ist zu erkennen, dass die Bereiche zwischen den Drähten bis in die Tiefe vollständig mit Gummi gefüllt sind. Bei einer Neuvulkanisation besteht somit kein erhöhtes Risiko von Wasser- oder Lufteinschlüssen. In der Fluoreszenzaufnahme in Abbildung 3-8 ist zudem in Gelb eine geschlossene Zinkschicht um die einzelnen Drähte zu erkennen. Durch den Wasserstrahlprozess sind somit keine Schädigungen entstanden, die sich negativ auf die Neuanbindung des Gummis auswirken.

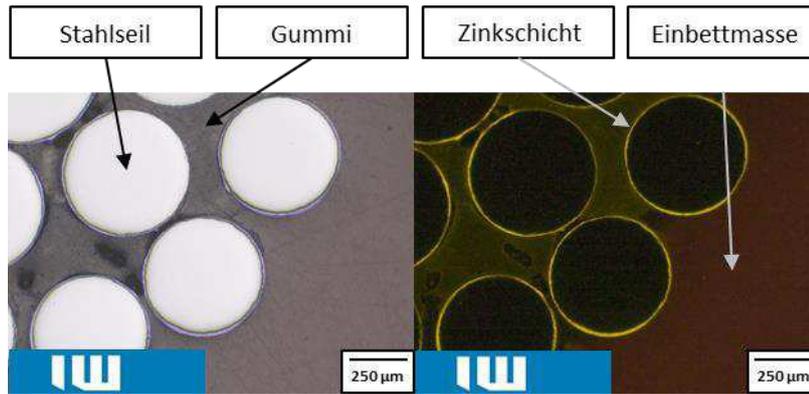


Abbildung 3-8: Lichtmikroskopaufnahmen eines mittels Reinwasserflachstrahlbearbeitung freigelegten Stahlseilquerschnitts

Zur weiteren Analyse wurden die Stahlseiloberflächen mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht. Abbildung 3-9 zeigt die Stahlseiloberfläche eines mit Wasserstrahl (Druck = 250 MPa) bearbeiteten Stahlseils. Die grün markierte Stelle wurde mithilfe einer EDX Analyse (Abbildung 3-10) genutzt, um die vorhandenen Elemente zu bestimmen. Das Ergebnis zeigt, dass der Anteil von Zink deutlich überwiegt, was zusätzlich durch das Element Mapping in Abbildung 3-11 aufgezeigt wird. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Zinkschicht (hier farblich pink dargestellt) an der Oberfläche nach der Bearbeitung erhalten bleibt. Die REM-Aufnahmen zeigen also, dass die Zinkschicht noch intakt ist. Somit ist der Korrosionsschutz des Stahlseils weiterhin gewährleistet. Mithilfe der Aufnahmen können allerdings nur die Elemente bestimmt werden. Es ist nicht möglich zu unterscheiden, ob es sich bei der verbleibenden Zinkschicht um die Hart- oder Weich-Zinkschicht handelt. Zudem gibt es keine belegbaren Quellen, die angeben, inwieweit die Weich-Zinkschicht schon bei der Erstvulkanisation verbraucht wird, um eine Verbindung zwischen Stahlseiloberfläche und Zwischengummi einzugehen über die entstehende Zinksulfidschicht. Aus diesem Grund wird die erzielbare Haftung im weiteren Verlauf experimentell überprüft, um eine konkrete Aussage, ob die Verbindungsvorbereitung mittels Wasserstrahl erfolgreich ist, treffen zu können.

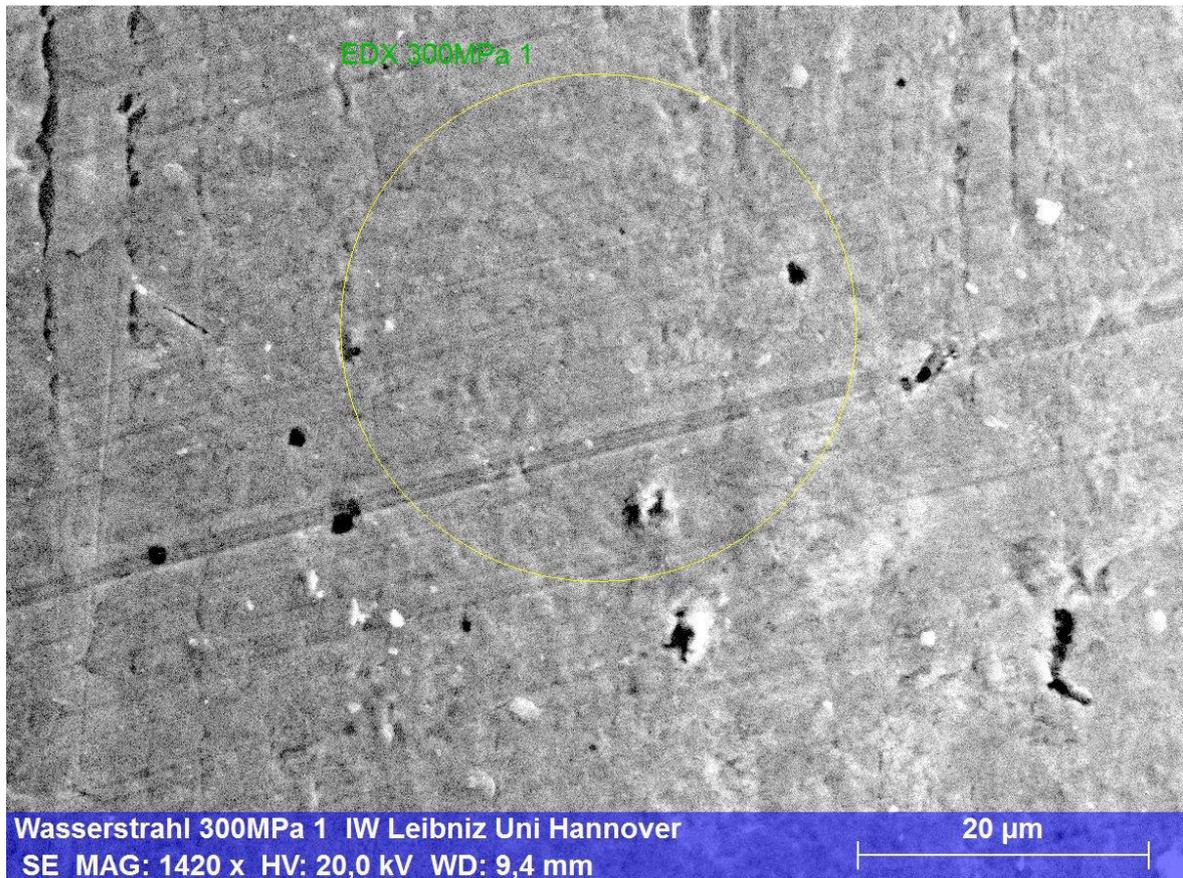


Abbildung 3-9: REM-Aufnahme der Stahlseiloberfläche

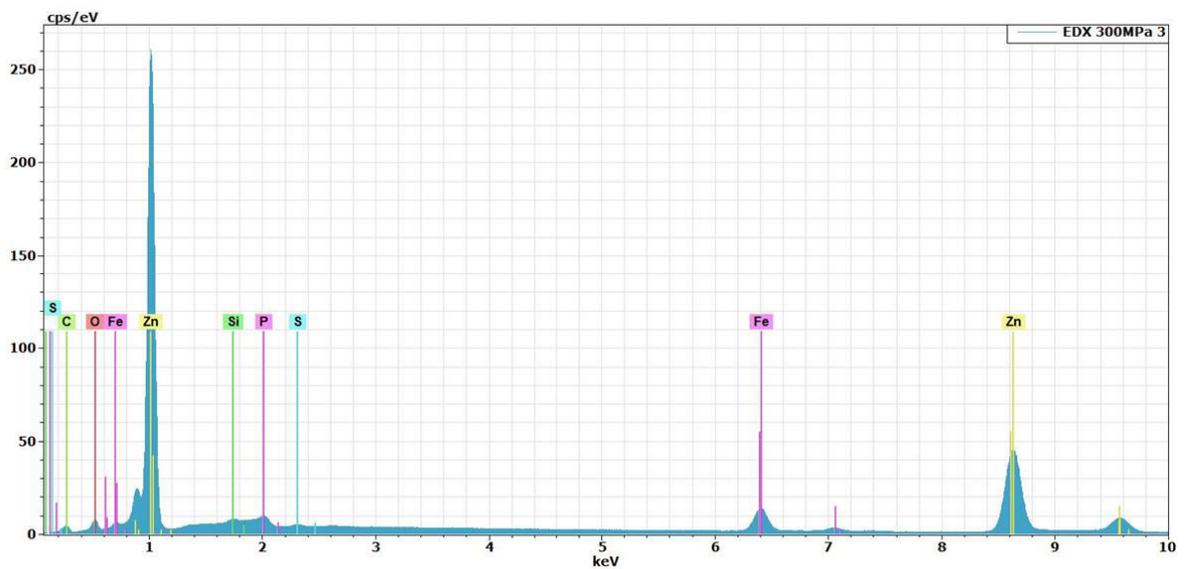


Abbildung 3-10: EDX-Analyse der Oberfläche eines wassergestrahnten Stahlseils

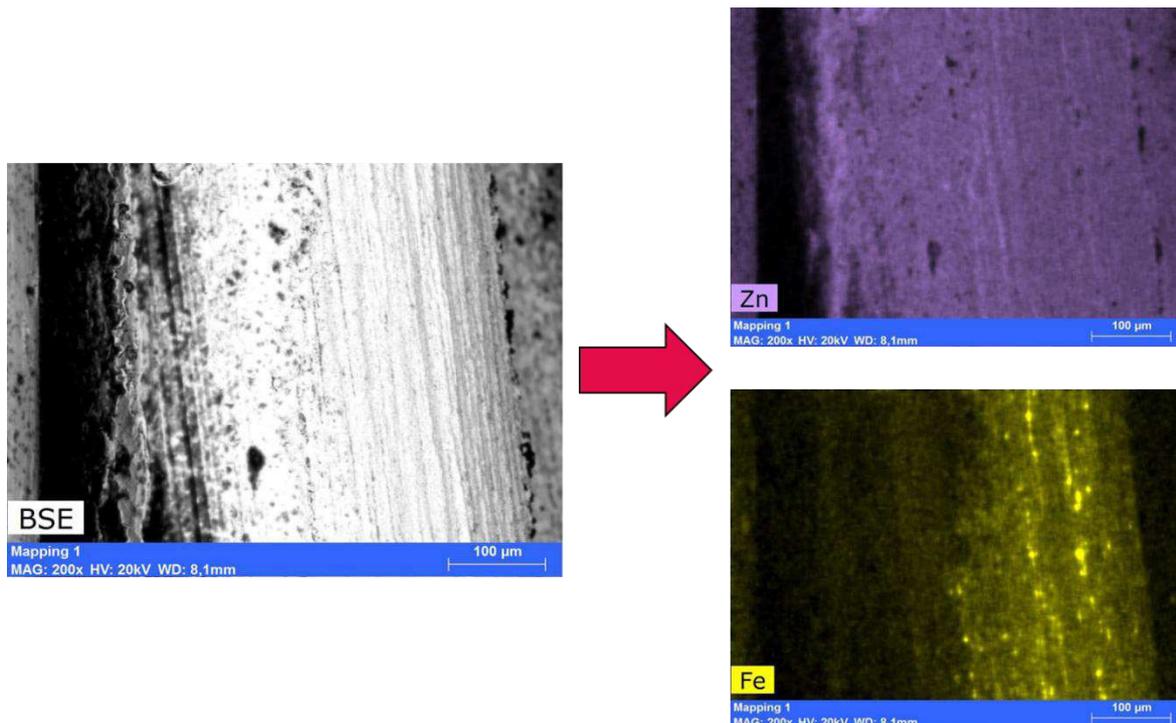


Abbildung 3-11: Elementbilder der Seiloberfläche

3.3 Nutzung von FEM-Simulation zur Optimierung der Haftung zwischen Stahlseil und Zwischengummi

Die in AP2 durchgeführten Untersuchungen der Anbindungsmechanismen sollte mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) unterstützt und weiterentwickelt werden, um im weiteren Verlauf ein Optimum der herzustellenden Oberflächenvorbereitung zu erzielen. Die Einstufung erfolgt experimentell anhand der in AP2 entwickelten Prüfgeometrie. Abbildung 2-4 zeigt mögliche Bearbeitungsszenarien der Oberflächenbeschaffenheit für die Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten. Der Fall A und B wurde bereits in AP2 untersucht und hinsichtlich des Anbindungspotentials experimentell geprüft. Eine weitere im Antrag beschriebene Idee war die gezielte Strukturierung der Restgummischicht in der Verbindungsstelle, vgl. C und D. Ein entscheidender Punkt für eine gezielte Strukturierung der Restgummischicht ist der Kraftfluss innerhalb einer Verbindung. Theoretisch wurde der Kraftfluss in Stahlseil-Fördergurten zuerst von Oehmen [Oeh77] behandelt. Zur Analyse wurden

bereits sogenannte Schubfederzahlen genutzt, die den Kraftfluss zwischen den einzelnen Stahlseilen beschreiben. Weiterführende Untersuchungen wurden von der Wroge [Wro91] und Keller [Kel01] durchgeführt. Mit dem von Oehmen aufgestellten Berechnungsmodell kann die Beanspruchung innerhalb einer Verbindungsstelle numerisch ermittelt werden. Hierzu zählen insbesondere die Seildehnung und die Schubspannung im Zwischengummi. Mit Hilfe der Schubfederzahlen wird auch die Kraftübertragung über die Deckplatten erfasst. So kann auch die Kraftübertragung zu nicht unmittelbar benachbarten Seilen ermittelt werden.

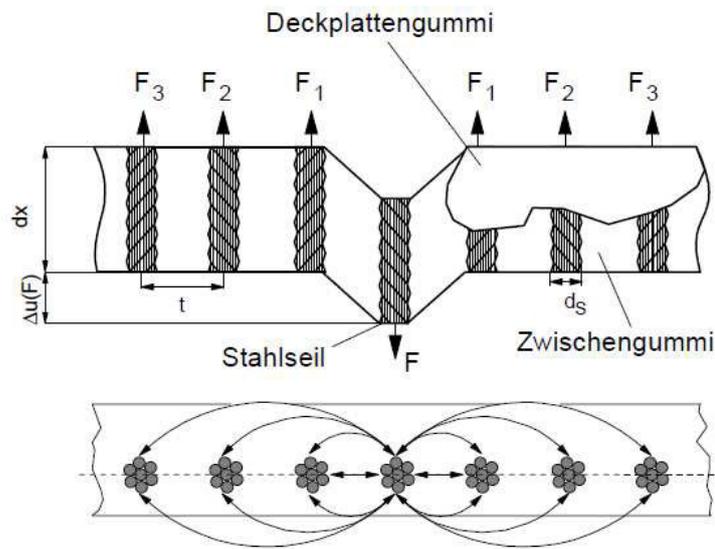


Abbildung 3-12: Kraftübertragung in einer 7-Seilprobe nach Keller [Kel01]

Verschiedene Untersuchungen zeigten jedoch, dass die Kraftübertragung zum direkten Nachbarseil am größten ist und ab dem vierten Nachbarseil vernachlässigt werden kann. Mathematisch kann die Kraftübertragung mit Hilfe der Schubfederzahl

$$q_i = \frac{F_i}{G * \Delta u * l_{Anb}}, \text{ mit } i = 1, 2, 3$$

ausgedrückt werden, wobei l_{Anb} die Anbindungsfläche in einer n-Seilprobe darstellt und Δu die Verschiebung des Mittelseils der Probe. Weitere theoretische Untersuchungen zur Kraftübertragung sind bei Tappeiner [Tap93] zu finden. Er zeigte mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen, dass ca. 95 % der Kraftübertragung innerhalb einer Verbindungsstelle zwischen direkt benachbarten Seilen stattfindet.

Für eine gezielte Bearbeitung mittels Wasserstrahl ging es darum, die Effekte der Kraftübertragung zu untersuchen und im Hinblick auf die Komplexität der Bearbeitung abzuwägen, ob eine Profilierung der Restgummischicht mittels Wasserstrahl zielführend ist. Um eine exakte Aussage über die Kraftübertragung zu machen wurden im Folgenden die 5-Seilproben zunächst experimentell untersucht und anschließend in der FEM modelliert.

Zur experimentellen Bestimmung der Kräfte an den einzelnen Seilen wurde eine spezielle Einspannvorrichtung konstruiert, die jedes einzelne Seil mit einem zusätzlichen Kraftaufnehmer verbindet, so dass die Zugkraft für jedes Seil einzeln gemessen werden kann (Abbildung 3-13).

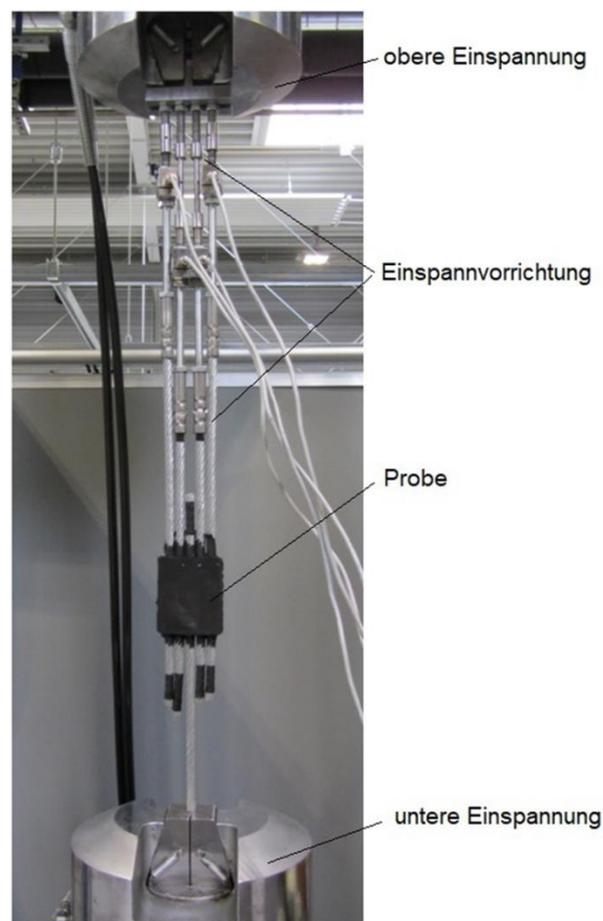


Abbildung 3-13: Einspannvorrichtung 5-Seilproben

Das Ergebnis eines Zugversuchs ist in Abbildung 3-14 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Zugkraft des Mittelseils (Seil 3) sich auf die benachbarten Seile gleichmäßig, je nach Nachbarschaftsgrad unterschiedlich, aufteilt.

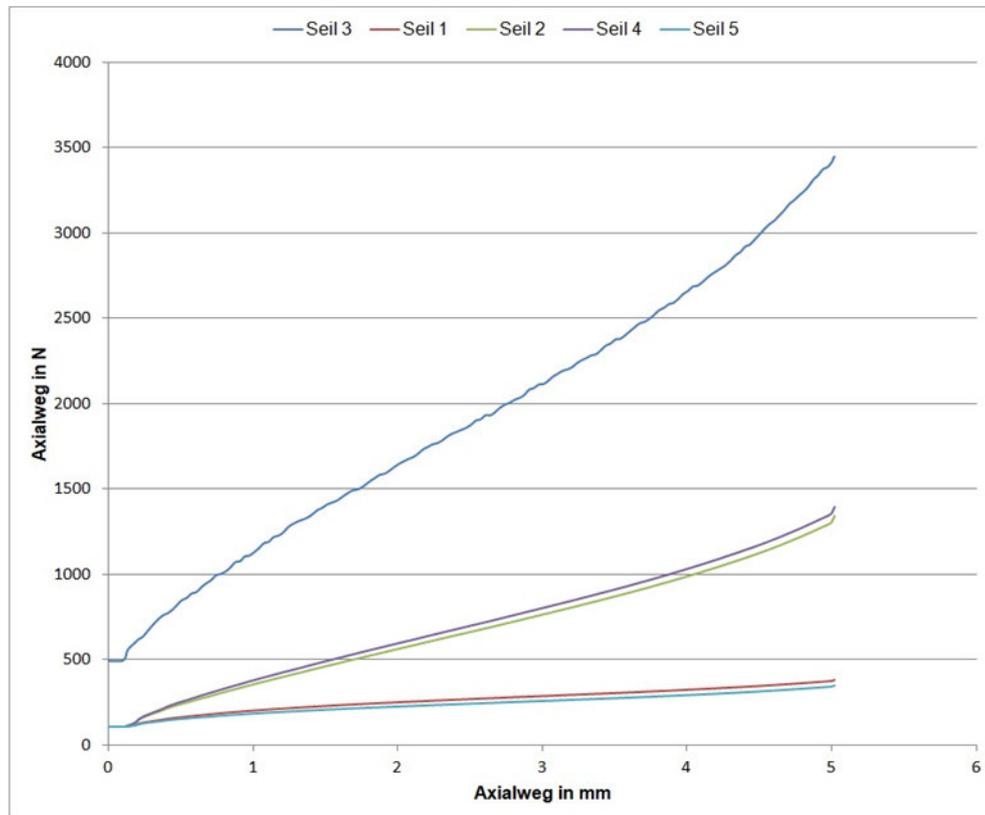


Abbildung 3-14: Verlauf der Reaktionskräfte der einzelnen Seile während des Zugversuchs

Zur Überführung der Prüfgeometrie in die FEM galt es zunächst geeignete Materialparameter für das Elastomer und die Stahlseile zu generieren. Als numerisches Materialmodell für das Elastomer (Gummi) wurde das Modell nach Mooney-Rivlin gewählt, da dieses eine Gültigkeit bis zu einer maximalen Dehnung von 100 % aufweist und sich bereits für die numerische Berechnung von Fördergurten bewährt hat. Die Parameter können mit Hilfe des genormten Prüfverfahrens DIN ISO 1827 [DIN1827] ermittelt werden. Hierzu müssen sogenannte Quadrupel-Proben angefertigt werden, siehe Abbildung 3-15. Bei der Prüfung wird die Probe zyklisch mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 mm/min bis zu einer maximalen Auslenkung von 30 % Scherung belastet.

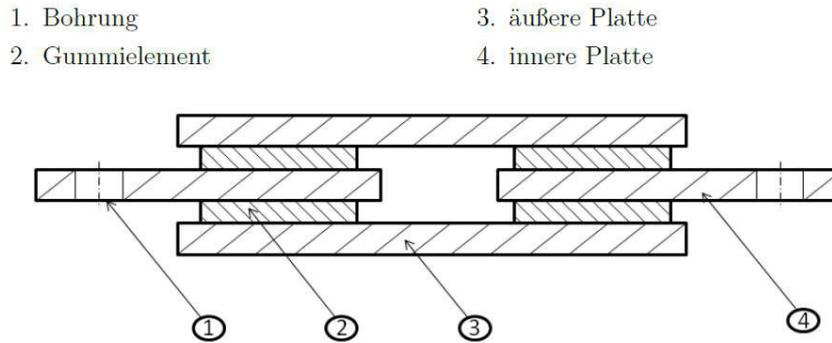


Abbildung 3-15: Prüfkörper nach DIN ISO 1827 [DIN1827]

Durch die Anordnung der Gummielemente zwischen den Stahlplatten ist gewährleistet, dass das Gummi auf Scherung belastet wird. Über die aufgebrachte Verformung und die resultierende Kraft kann der Schubmodul G des Gummis berechnet werden. Dieser ist laut Norm bei einer Schubverformung von 25 % zu bestimmen.

$$G = \frac{\tau_{25}}{\gamma_{25}}$$

die Scherung γ ergibt sich aus den geometrischen Abmessungen der Gummielemente

$$\gamma = \frac{d}{2 * c}$$

wobei d die Auslenkung des Probekörpers und c die Dicke eines Gummielementes darstellt. Die Scherspannung τ wird mittels der resultierenden Kraft F und der Anbindungsfläche A ermittelt.

$$\tau = \frac{F}{2 * A}$$

Zur Überführung in die FEM gilt es anschließend das numerische Materialmodell anzupassen. Hierfür wird der Probekörper modelliert, vgl. Abbildung 3-15 und die experimentell ermittelten Parameter angepasst. Die Ausgangsparameter lassen sich aus dem Schubmodul G über

$$G = 2 * (C_{10} + C_{01})$$

und den Zusammenhang

$$C_{01} = \frac{1}{5} * C_{10}$$

berechnen. Die Materialparameter für die Stahlseile bilden sich aus den Eigenschaften von Stahl angepasst durch einen Füllfaktor. Dieser Faktor wird aus dem Querschnittsanteil der einzelnen Stahldrähte vom Gesamtumfang des Seils abgeleitet. Zur Bestimmung werden die bereits angefertigten Schliffbilder herangezogen. Hieraus ergibt sich ein Füllfaktor von $f = 0,6$ für das Simulationsmodell.

Das Ergebnis der modellierten 5-Seilprobe bei Zugbelastung ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine gleichmäßige Verteilung der Spannung innerhalb der Seile wie in den experimentellen Untersuchungen auftreten.

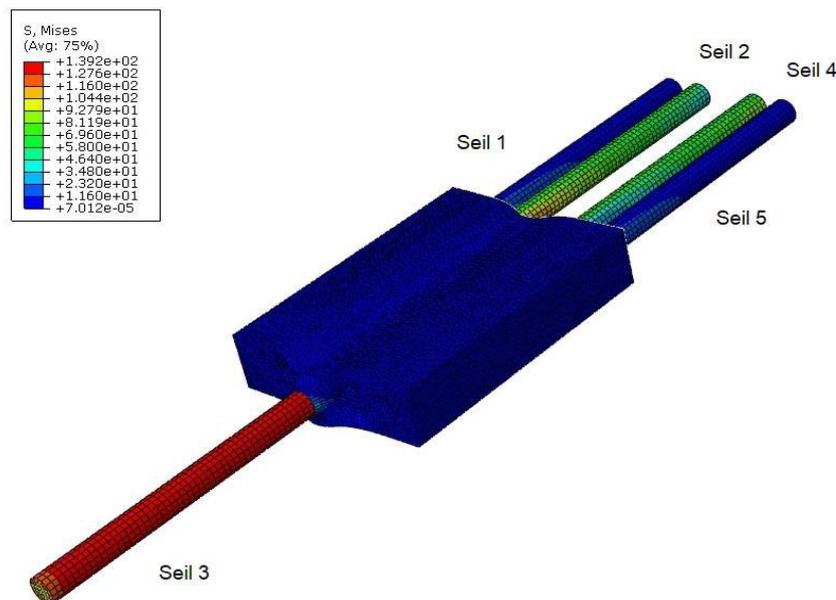


Abbildung 3-16: FEM-Simulation einer 5-Seilprobe

Bei einer genaueren Betrachtung der der Spannung im Gummi in den Kontaktzonen, vgl. Abbildung 3-17 (links), sind die Eigenschaften der Spannungsverteilung

deutlich zu erkennen. So tritt die größte Spannung zwischen den Stahlseilen auf, was gleichbedeutend mit dem höchsten Kraftübertrag ist. Das Ergebnis zeigt, dass nur ca. 20 % der normierten Spannung ober- und unterhalb des Stahlseils auftreten.

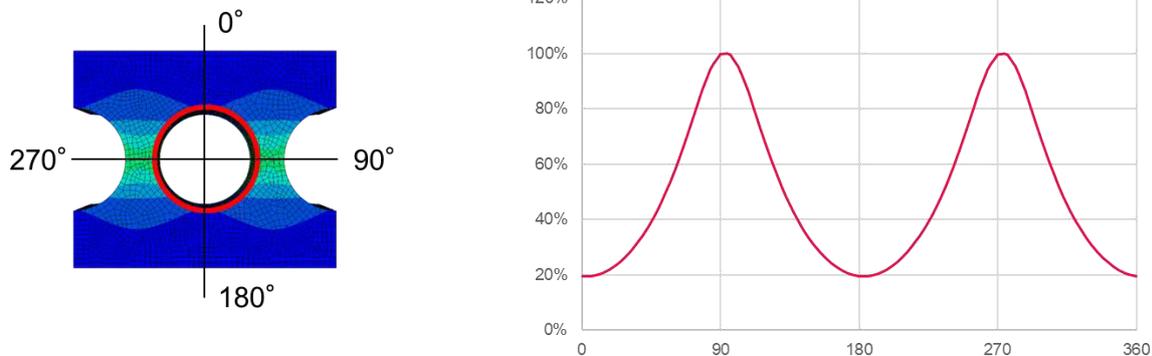


Abbildung 3-17: Spannungsverteilung über den Seilumfang des mittleren Stahlseils (links: FEM-Simulation; rechts: normierte Darstellung)

Aus den experimentellen und FEM Ergebnissen lässt sich eine gezielte Strukturierung an den Seilflanken ableiten, da hier der größte Kraftanteil übertragen wird. Aus diesem Grund gilt es die Flanken der Stahlseile so zu präparieren, dass das Anbindungspotenzial an diesen Stellen des Seils verbessert wird.

3.4 Untersuchungen zur Verbindungsvorbereitung

Zur Validierung des wasserstrahlgestützten Prozesses zur Verbindungsvorbereitung wurde die maximal erzielte Haftung der Neuverbindung zwischen Gummi und Stahlseil als Bewertungskriterium herangezogen. Die mithilfe des Abtragmodells freigelegten Zugträger wurden für die Herstellung von 3-Seilproben in neues Gummi eingebettet und zunächst auf ihre statische Seilausreißkraft geprüft. Gemäß DIN EN ISO 15236-1 [DIN15236] berechnet sich die geforderte Seilausreißkraft zu:

$$F_V = 15 * d + 5 \left[\frac{N}{mm} \right]$$

Unter Verwendung der Fördergurtsegmente vom Typ St 4500 ergibt sich aus dem Durchmesser der Stahlseilzugträger von $d = 9,3 \text{ mm}$ somit eine geforderte statische Seilausreißkraft von $144,5 \text{ N/mm}$. Bei einer Probenlänge von 100 mm ist somit eine statische Seilausreißkraft von 14.450 N gefordert. Die Versuche wurden mit einer herkömmlichen servohydraulischen Zugprüfmaschine durchgeführt. Abbildung 3-18 zeigt den Versuchsaufbau mit einer eingespannten 3-Seilprobe.



Abbildung 3-18: Zugprüfstand mit eingespannter 3-Seilprobe

In der ersten Versuchsreihe wurden komplett mittels Wasserstrahl freigelegte Stahlseile verwendet und auf ihre Haftfestigkeit überprüft. Die Oberflächenanalyse hat bereits gezeigt, dass die Zinkschicht der Seile weiterhin intakt ist. Es konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, ob es sich dabei nur noch um die Hart-Zinkschicht handelt, oder ebenfalls um die haftungsfördernde Weich-Zinkschicht. Abbildung 3-19: Mittels Wasserstrahl freigelegtes blankes Stahlseil zeigt ein bearbeitetes blankes Stahlseil.



Abbildung 3-19: Mittels Wasserstrahl freigelegtes blankes Stahlseil

Diese Stahlseile wurden für die Herstellung von 3-Seilproben genutzt, um die zu erzielende Festigkeit zu überprüfen. Die Ergebnisse der dazugehörigen Ausreißversuche sind in Abbildung 3-20 dargestellt. Der Graph stellt die auftretende Reaktionskraft über dem Verfahrweg der Zugprüfmaschine während des Ausreißversuchs dar. Daraus ergibt sich eine gemittelte maximale Ausreißkraft von 11,3 kN.

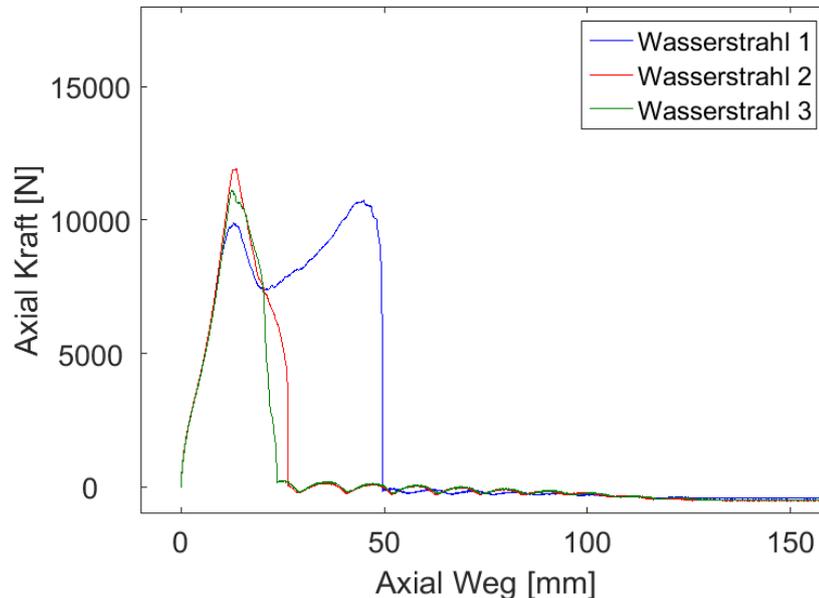


Abbildung 3-20: Ergebnisse der Ausreißversuche der, mit blanken Stahlseilen, hergestellten 3-Seilproben

Aus den Messwerten geht hervor, dass die Anforderungen der Norm somit nicht erfüllt wurden. Auf den Ausreißbildern in Abbildung 3-21 ist zu erkennen, dass zwischen Gummi und Stahlseil annähernd keine Haftung aufgebaut werden konnte.



Abbildung 3-21: Stahlseil vor Vulkanisation (oben) und nach Ausreißversuch (unten)

Als Gründe hierfür konnten zunächst Fehler bei der Probenherstellung nicht ausgeschlossen werden. Das Einbringen von Verschmutzungen kann das Vulkanisationsergebnis jedoch negativ beeinflussen. Die Seile wurden nach der Wasserstrahlbearbeitung mit Druckluft getrocknet und anschließend bis zur Probenherstellung an Luft gelagert. Die in der Druckluft enthaltenen Ölbestandteile können einen Film auf der Stahlseiloberfläche bilden und verhindern somit eine Anbindung des neuen Gummis. Zusätzlich kann sich bei der Lagerung Öl oder Schmutz aus der Luft auf die blanken Stahlseile abgesetzt haben.

Um die tatsächlich erzielbare Haftung zwischen blankem Stahlseil und Gummi zu untersuchen, wurde der Störeinfluss Öl in der Luft durch die Verwendung von Stickstoff zum Trocknen der Seile ausgeschlossen. Nach der Trocknung wurden die Seile luftdicht in PE-Folie verpackt, sodass sich auch aus der Umgebungsluft keine Schmutzbestandteile niederschlagen konnten. Die ohne Störeinflüsse erzielten statischen Seilausreißkräfte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Versuchsergebnisse der Ausreißversuche mit blanken Stahlseilen

	Blanke Stahlseile (1. Messreihe)	Blanke Stahlseile (2. Messreihe)
Probe 1	10.735 N	11.326 N
Probe 2	11.927 N	12.960 N
Probe 3	11.137 N	12.072 N
Mittelwert	11.267 N	12.119 N
Relative Festigkeit nach DIN EN ISO 15236-1	78 %	84 %

Gegenüber den zuvor freigelegten Stahlseilen ist eine leichte Verbesserung der statischen Seilausreißkräfte zu erkennen. Diese konnte von 78 % relativer Festigkeit

auf 84 % gesteigert werden. Die Norm wird jedoch weiterhin nicht erfüllt. Die Ergebnisse weisen auch diesmal nur eine geringe Gummihaftung auf, vgl. Abbildung 3-22.



Abbildung 3-22: Ergebnisse der Ausreißversuche (2. Messreihe)

In Relation mit den Ergebnissen aus den Lichtmikroskop- bzw. den REM-Untersuchungen spricht das ebenfalls für das Fehlen der Reinzinkschicht. Die noch vorhandene Fe-Zn-Legierungsschicht ist nicht in der Lage eine ausreichende Haftung mit dem Gummi einzugehen.

Bei Betrachtung der lichtmikroskopischen Aufnahmen ist zu erkennen, dass die Zinkschicht auf dem gesamten Drahtumfang gleichmäßig ist. Auch im Inneren des Stahlseils, wo keine Wasserstrahlbearbeitung stattgefunden hat. Es ist daher davon auszugehen, dass die Reinzinkschicht nicht durch die Wasserstrahlbearbeitung abgetragen, sondern bei der Erstvulkanisation für die Gummianbindung verbraucht wird. Der Zinkanteil reagiert bei der Vulkanisation mit dem Gummi wird damit in dieses eingebaut. Es ist daher auf den Mikroskopaufnahmen nicht zu erkennen. Die Zinkbestandteile werden an der Außenseite zusammen mit dem restlichen Gummi abgetragen.

Eine Steigerung der Haftung zwischen Stahlseil und neuem Gummimaterial scheint nicht ohne vertretbaren Aufwand möglich. Es werden daher im folgendem Ansätze betrachtet, das Gummi für die Verbindungsvorbereitung nicht vollständig abzutragen, sondern die durch die Erstvulkanisation angebondenen Bereiche auf dem Stahlseil zu belassen. Das neue Gummimaterial wird dann an das alte angebunden. Neben der chemischen Haftung soll dabei der Effekt einer gezielten Strukturierung der Restgummischicht untersucht werden. Es wurden die folgenden Probengeometrien gefertigt (Abbildung 3-23):

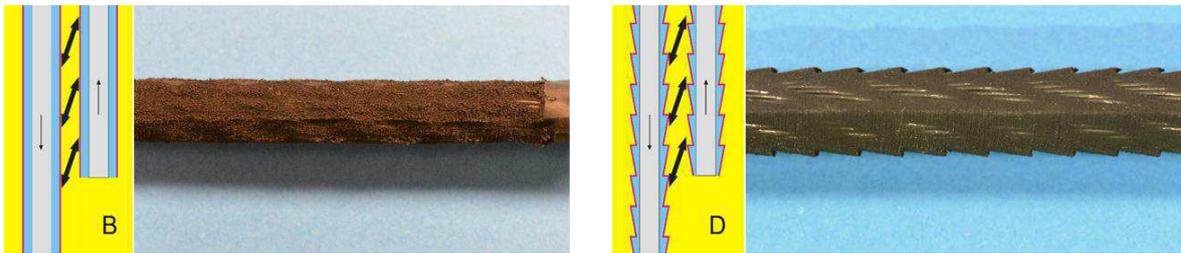


Abbildung 3-23: Probengeometrien mit Restgummischicht (links: konstant 1 mm Restgummi; rechts: profilierte Restgummischicht)

Die Geometrien wurden in Hinblick auf unterschiedliche, zu untersuchende Effekte ausgewählt. Es gilt zunächst den grundlegenden Unterschied zwischen Stahlseilen, die blank gestrahlt wurden und solchen, die eine dünne, gleichmäßige Restgummischicht aufweisen zu untersuchen. Dazu wurden die bereits zuvor gefertigten blanken Stahlseile mit einer weiteren Vergleichsgruppe verglichen. Die Zugträger der Gruppe 2 wurden nicht aus vollen Gurtsegmenten herausgetrennt und der automatisierbaren Verbindungsvorbereitung unterzogen. Es wurden stattdessen von der Firma ContiTech bereitgestellte Seile mit einer ca. 2 mm starken zylindrischen Gummischicht verwendet. Diese wurden unter Verwendung möglichst geringer hydraulischer Leistung mittels Wasserflachstrahl bearbeitet. Die Gummischicht wurde dadurch auf eine Stärke von ca. 1 mm angetragen und entsprechend angeraut. Nach der Bearbeitung wurden die Seile mit Stickstoff getrocknet und luftdicht verpackt.

Analog zu den blanken Seilen wurden auch die Seile der Gruppe 2 zu Dreiseilproben weiterverarbeitet. Diese wurden ebenfalls auf ihre statische Seilausreißkraft untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-24 dargestellt. Zum Vergleich wurden die Ergebnisse der zweiten Messreihe der mit blanken Stahlseilen hergestellten 3-Seilproben ergänzt. Hierbei ist eine deutliche Festigkeitssteigerung zu erkennen.

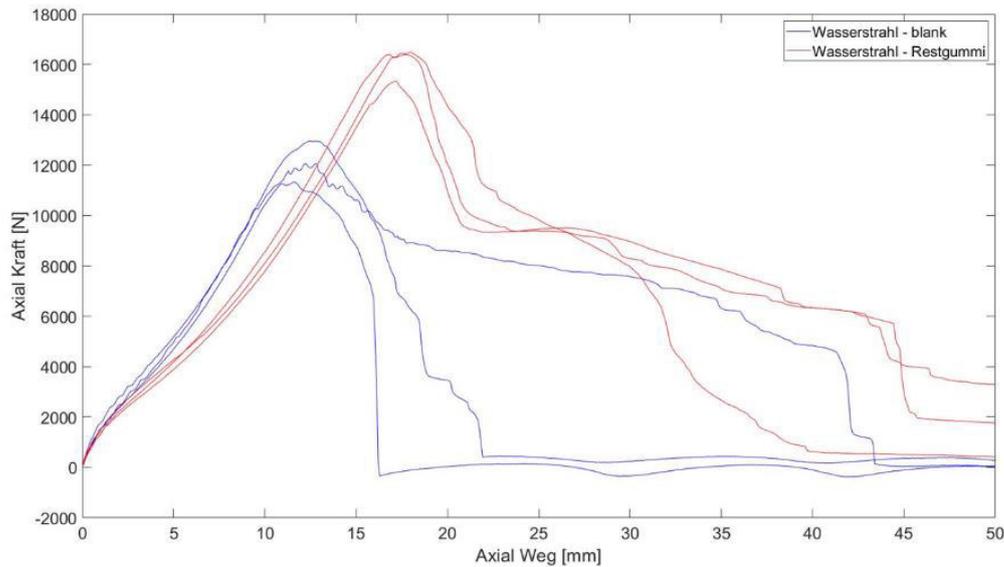


Abbildung 3-24: Vergleich der Ausreißversuche mit blanken und mit Restgummi behafteten Stahlseilen

Die Seile mit Restgummischicht erreichen im Gegensatz zu den blanken Seilen die nach Norm geforderte statische Seilausreißkraft. Die höhere Festigkeit zeigt sich auch in den Ausrissbildern der Seile. Es ist darauf zu erkennen, dass der Bruch nicht an der Verbindungsfläche zwischen Seil und Gummi, sondern weiter im Gummigrundmaterial auftritt (vgl. Abbildung 3-25).



Abbildung 3-25: Ergebnisse der Ausreißversuche (Restgummischicht)

Das Auftreten solcher Gewaltbrüche im Gummigrundmaterial ist ein Indikator für eine ausreichende Haftung zwischen Gummi und Stahlseil. Sie gilt als ausreichend, sobald die Haftkraft die Festigkeit des Gummigrundmaterials überschreitet. Der Vergleich mit den Ausreißversuchen der mit blanken Stahlseilen hergestellten 3-Seilproben zeigt, dass das Belassen einer Restgummischicht auf den Stahlseilen eine deutliche Festigkeitssteigerung hervorruft und die geforderte Festigkeit laut Norm mit 111 % klar erfüllt, siehe Tabelle 3.

Um die Verbindungsstelle weiter zu optimieren wurden die in Abbildung 3-23 (rechts) abgebildete Geometrie in die Restgummischicht geschnitten. Die Seile wurden gefertigt, indem Sie mit der bereits montierten Flachstrahldüse aus einem Fördergurtsegment herausgetrennt wurden. Das Gummi der Deckschichten wurde tangential zum Seilumfang abgetragen, bis der Zugträger lediglich an seinen Flanken Restgummi aufwies. In das verbliebene Gummi wurde dann mit einem Reinwasser-Rundstrahl die dargestellte Sägezahnkontur geschnitten. Für diesen Bearbeitungsschritt wurde das Probenmaterial auf eine andere Anlage umgespannt, welche mit

einem Reinwasserschneidkopf ausgerüstet war. Grundsätzlich lassen sich aber auch beide Bearbeitungsschritte in einer Anlage integrieren.

Tabelle 3: Versuchsergebnisse der Ausreißversuche mit blanken Stahlseilen und mit Restgummischicht

	Blanke Stahlseile (2. Messreihe)	Stahlseile mit Restgummi- schicht
Probe 1	11.326 N	15.336 N
Probe 2	12.960 N	16.392 N
Probe 3	12.072 N	16.482 N
Mittelwert	12.119 N	16.070 N
Relative Festigkeit nach DIN EN ISO 15236-1	84 %	111 %

Abbildung 3-26 zeigt den Herstellungsprozess (links) und die entstandenen Zugträger mit Sägezahnprofil in der restgummibehafteten Seilflanke (rechts). Es wurden zwei mögliche Effekte auf die Anbindung des neuen Gummis vermutet.

1. Die Anbindungsfläche
2. Formschluss zwischen den Seilflanken



Abbildung 3-26: RWS-Schnitt zur Flankenbearbeitung (links) und Stahlseil mit strukturierter Restgummischicht (rechts)

Um beide Einflussfaktoren getrennt voneinander zu untersuchen wurde die Seile wie in Abbildung 3-27 und Abbildung 3-28 dargestellt angeordnet. Seile mit der gleichen Sägezahngeometrie wurden einmal abgleitend (vgl. Abbildung 3-27) und einmal ineinandergreifend (vgl. Abbildung 3-28) angeordnet. Bei beiden Proben ist die Anbindungsfläche gleich, sie unterscheiden sich lediglich in ihren geometrischen Bedingungen.

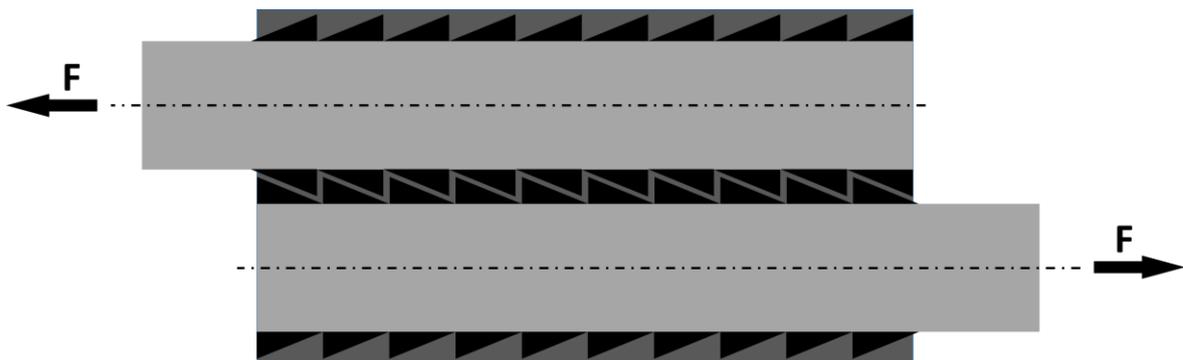


Abbildung 3-27: Abgleitende Anordnung der restgummibehafteten Stahlseilzugträger mit Sägezahnprofil

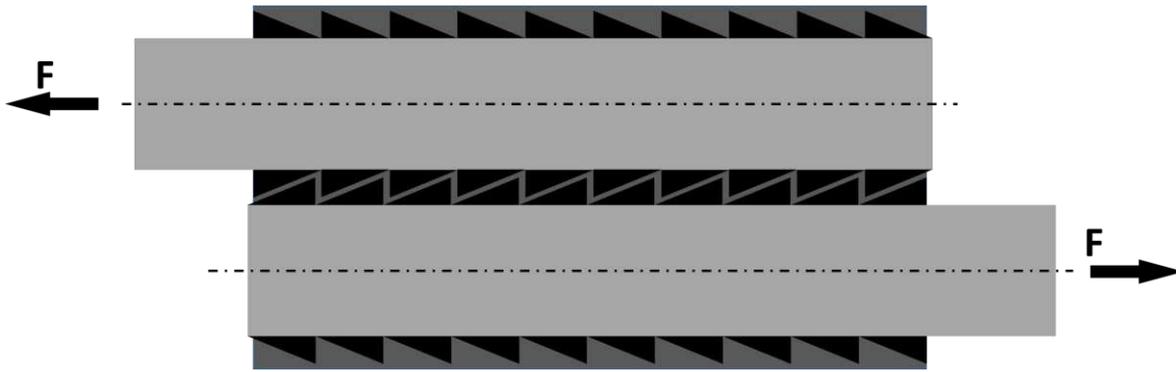


Abbildung 3-28: Ineinandergreifende Anordnung der restgummibehafteten Stahlseilzugträger mit Sägezahnprofil

Die Ergebnisse der Ausreißversuche mit Restgummischicht sind in dem Kraft-Weg-Diagramm in Abbildung 3-29 dargestellt.

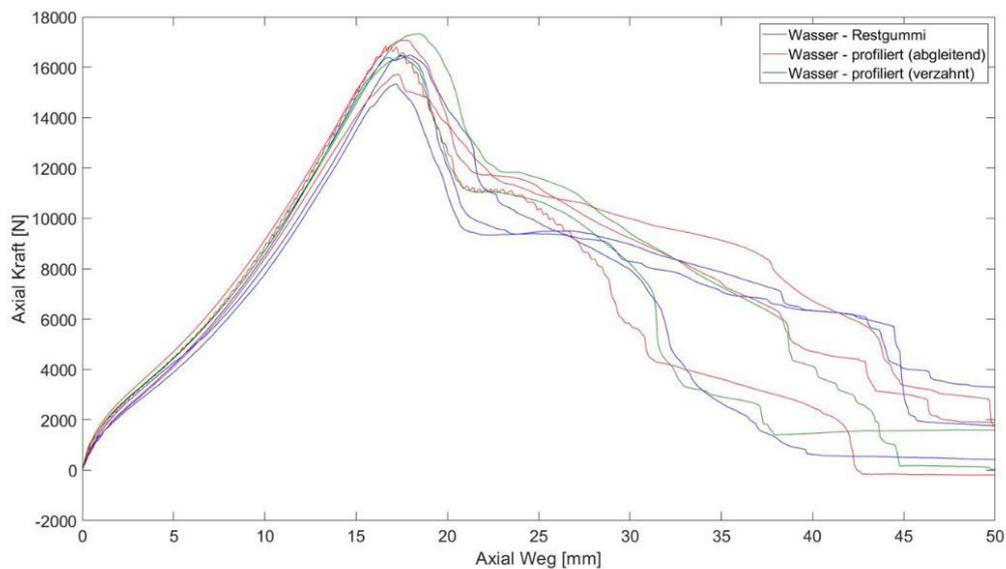


Abbildung 3-29: Ergebnisse der Ausreißversuche mit Restgummischicht (mit und ohne Profilierung)

Die in Tabelle 4: Ergebnisse der mechanischen Prüfung auf die statische Seilausreißkraft nach DIN EN ISO 15236 dargestellten Versuche zur Bestimmung der statischen Seilausreißkraft zeigen, dass beide Anordnungen der strukturierten Restgummischicht die nach Norm geforderte statische Seilausreißkraft erfüllen. Im Vergleich zu den Zugträgern mit zylindrischer Restgummischicht ist jedoch kein signifikanter Anstieg der Verbindungsfestigkeit zu erwarten.

Tabelle 4: Ergebnisse der mechanischen Prüfung auf die statische Seilausreißkraft nach DIN EN ISO 15236

	Statische Seilausreißkraft nach DIN EN ISO 15236			
Bearbeitungsstrategie	blank	zylindrisch	Sägezahn (abgleitend)	Sägezahn (ineinander- greifend)
Probe 1	11.326 N	15.336 N	16.876 N	15.265 N
Probe 2	12.960 N	16.392 N	17.075 N	17.330 N
Probe 3	12.072 N	16.482 N	15.726 N	16.469 N
Arithmetischer Mittelwert	12.119 N	16.070 N	16.559 N	16.335 N
Abs. Standardabweichung	668 N	520 N	595 N	847 N
Geforderte statische Seilausreißkraft	14.450 N			
Relative Festigkeit	84 %	111 %	115 %	113 %

Im nächsten Schritt wurden dann die Stahlseile mit Restgummischicht zusätzlich einer Zugschwellprüfung nach DIN 22131-3 [DIN22131] unterzogen. Hierbei wird die 3-Seilprobe zyklisch mit einer Geschwindigkeit von 150 mm/min zwischen einer Unter- (F_u) und einer Oberlast (F_o) geprüft, vgl. Abbildung 3-30. Zwischen jedem Lastwechsel wird eine Haltezeit t_1 von einer Sekunde veranschlagt. Die von der Norm geforderten 10.000 Lastzyklen bei einer Last von 35 %, ausgehend von der statischen Seilausreißkraft F_v , wurden von den Proben ausnahmslos erreicht. Somit konnte gezeigt werden, dass die Verbindungsvorbereitung mittels Wasserstrahl die Festigkeitsanforderungen auch an dieser Stelle erfüllt.

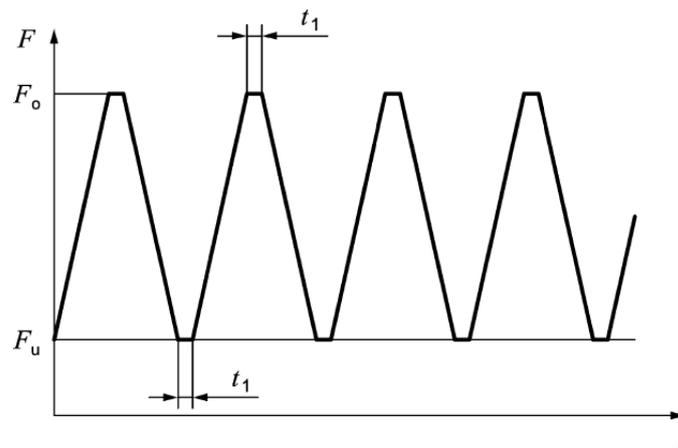


Abbildung 3-30: Belastungsprinzip der Zugschwellprüfung nach DIN 22131-3

Aus den Ergebnissen lassen sich Annahmen über den Haftungsmechanismus des neuen Gummimaterials ableiten. Die Anbindung von neuem Gummimaterial an Stahlseile, welche zuvor mittels Wasserstrahlverfahren vollständig freigelegt wurden erfüllt nicht die Norm und ist damit erheblich schlechter als die Anbindung des Gummis bei der Erstvulkanisation. Der Grund dafür ist die Reaktion der Reinzinkschicht mit dem Gummimaterial bei der Erstvulkanisation und der anschließende Abtrag zusammen mit dem Gummi. Für eine erneute Vulkanisation steht kein Zink mehr zur Bildung von Schwefelbrücken zwischen dem Schwefel der Zinksulfidschicht und dem Schwefel des Gummis zur Verfügung, da sich nun auf dem Stahlseil lediglich noch eine Eisen-Zink-Legierungsschicht befindet.

Die Anbindung von neuem auf altem Gummimaterial hingegen führt zu einer normgerechten Anbindung. Es ist daher anzustreben, bei der Verbindungsvorbereitung von einer vollständigen Freilegung der Zugträger abzusehen und stattdessen eine definierte Restgummischicht zu belassen. Dabei spielt die Geometrie der Restgummischicht nach den im Rahmen dieses Vorhabens gewonnenen Erkenntnissen nur eine untergeordnete Rolle. Im Hinblick auf eine hohe Produktivität des Prozesses zur automatisierbaren Verbindungsvorbereitung ist das von entscheidender Bedeutung.

Die Fertigung einer definierten Geometrie der Restgummischicht geht mit zusätzlichen Bearbeitungsschritten einher. Das schlägt sich neben der verlängerten Prozessdauer auch in der Komplexität der notwendigen Anlagentechnik nieder. Es wurde im Rahmen dieses Vorhabens im Anschluss an die grundlegenden Untersuchungen zur Verbindungsvorbereitung ein Wasserstrahlprozess entwickelt, welcher neben der Reduktion der Anlagenkomplexität auch die benötigte Pumpenleistung verringert und dabei gleichzeitig die Prozessdauer um ein Vielfaches verkürzt. Die Grundlage der entwickelten Bearbeitungsstrategie ist dabei der Einfluss der Struktur der Restgummischicht auf den Stahlseilzugträgern. Die Untersuchungen haben zum einen gezeigt, dass sich das Belassen einer Restgummischicht positiv auf die Verbindungsfestigkeit auswirkt und dass auch nur mit einer Restgummischicht die nach DIN EN ISO 15236 geforderte statische Seilausreißkraft erreicht werden kann. Die Beschaffenheit der Restgummischicht spielt für das Erreichen der geforderten Festigkeit jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Die Anbindung von neuem an altes Gummi übersteigt die Festigkeit des Gummigrundmaterials, weshalb beim Versagen der Verbindungsstelle die Brüche statistisch verteilt in der gesamten Probe auftreten. Als bestimmender Haftmechanismus wurde dabei die chemische Bindung der beiden Gummischichten bestimmt. Der vermutete Einfluss einer mechanischen, z. T. formschlüssigen Verklammerung von Gummi und Stahlseil bzw. von neuem und alten Gummi konnte nicht nachgewiesen werden.

Als Ziel einer optimierten Bearbeitungsstrategie wurde die Fertigung von restgummibehafteten Stahlseilzugträgern mit nicht näher spezifizierter Gummioberfläche bei gleichzeitig hoher Produktivität definiert. Eine Erhöhung der Produktivität ist bei Beibehaltung des Reinwasserflachstrahlprozesses für den Gummiabtrag entweder durch die Verwendung größerer Düsen oder die parallele Verwendung mehrerer Düsenköpfe zu realisieren, wobei die Verwendung von rotierenden Mehrfachdüsenköpfen weiterhin nicht als zielführend eingestuft wird, da diese durch die lokalen Unterschiede der Einzeldüsenbahnen kein gleichmäßiges Abtragergebnis liefern. Das ist insbesondere unter Einbeziehung der Notwendigkeit eines Aufbringens von

neuem Gummimaterial von Bedeutung. Das neue Gummimaterial wird von den Herstellern in seiner Form der Geometrie der vorbereiteten Verbindungsstelle angepasst. Dementsprechend ist eine reproduzierbar gestaltete Verbindungsstelle mit geringen statistischen Schwankungen eine zwingende Voraussetzung für die normgerechte Verbindungsherstellung mit möglichst geringen Fehlerrisiken.

Darüber hinaus geht die Verwendung mehrerer Düsen stets mit einer Erhöhung der hydraulischen Leistung umher. Diese ergibt sich aus dem Produkt von Wasservolumenstrom und Wasserdruck multipliziert mit der Anzahl der Düsen. Bereitgestellt wird diese Leistung von der Pumpe, welche dementsprechend mit steigender Leistung an Baugröße und Investitions- und Wartungskosten gewinnt. Die parallele Verwendung mehrerer Düsenköpfe ist oft sinnvoll und wirtschaftlich. Um die Produktivität des Reinwasserflachstrahlabtrags auf ein marktfähiges Niveau anzuheben wäre jedoch eine Vervielfachung im Vergleich zu den Laborversuchen in der Größenordnung 10 – 20fach notwendig. Die für die Laborversuche verwendete Plungerpumpe weist eine elektrische Anschlussleistung von 110 kW auf. Im Realmaßstab wären somit bereits Pumpenleistungen im Megawattbereich notwendig. Neben den steigenden Kosten steigt zwangsweise der Wasservolumenstrom und damit auch die Spritzwasser- und Lärmemissionen sowie der Entsorgungsaufwand.

Statt die Leistung des Abtragprozesses zu erhöhen, wurde dieser im Rahmen dieses Vorhabens als Ganzes hinterfragt. Versuche zum Wasserstrahlschneiden von Stahlseilfördergurten haben bereits im Rahmen der Voruntersuchungen gezeigt, dass sich ein Wasserstrahlschnitt des Fördergurtverbunds problemlos realisieren lässt. Die Verwendung eines Abrasivmittels sorgt dabei für die benötigte Schneidleistung zum Durchtrennen der Zugträger. Bei Verwendung eines Reinwasserstrahls ist das Trennen der Zugträger nicht möglich.

Für die Verbindungsvorbereitung ist jedoch auch nur das Trennen des Gummimaterials notwendig. Die Zugträger müssen zwingend schädigungsfrei verbleiben. Bei der Durchführung von Wasserstrahlschnitten sind im Vergleich zum Wasserstrahlabtrag erheblich höhere Vorschubgeschwindigkeiten realisierbar, da statt dem gesamten Material nur eine schmale Schnittfuge getrennt werden muss. Die erzielbare

Geschwindigkeit ist zudem nahezu nicht mehr von der Pumpenleistung abhängig. Insgesamt wird aufgrund des feineren Wasserstrahls erheblich weniger Wasser und damit weniger Pumpenleistung benötigt. Neben der Verringerung der Pumpenleistung und den damit verbundenen Kosten ermöglicht eine schnittbasierte Prozessführung auch die Verwendung von Druckübersetzern statt Plungerpumpen. Welcher Pumpentyp sich am besten eignet muss im Einzelfall abhängig von der übrigen Anlagenauslegung betrachtet werden.

Um eine automatisierbare Verbindungsvorbereitung von Stahlseilfördergurten mittels Wasserstrahlschnitten realisieren zu können wurde eine neue Bearbeitungsstrategie entwickelt. Diese ist nachfolgend im Detail beschrieben. Durch den Wechsel vom Wasserflachstrahlabtrag zum Wasserrundstrahlschneiden ergibt sich neben einer erheblichen Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und damit einhergehend eine Verkürzung der Gesamtprozessdauer auch der Vorteil, dass die Bearbeitung des Fördergurts nur einseitig erfolgen kann. Das in den Laborversuchen vorgenommene manuelle Drehen der Fördergurtprobe ist in der Realität nicht möglich, weshalb bei der Wasserflachstrahlbearbeitung eine beidseitige Bearbeitung des Fördergurts von der Trag- und der Laufseite notwendig wäre. Die Bearbeitungsstrategie ist in Abbildung 3-31 und Abbildung 3-32 dargestellt.

Im ersten Bearbeitungsschritt wird das Gummimaterial tragseitig mit einem angestellten Schneidkopf zwischen den Stahlseilzugträgern entlang getrennt. Es wird dabei ein Reinwasserrundstrahl verwendet. Dieser wird tangential an den Zugträgern vorbeigeführt. Der Anstellwinkel des Schneidkopfs ergibt sich aus den vom jeweiligen Gurttyp vorgegebenen geometrischen Bedingungen. Durch die Verwendung des Reinwasserstrahls ist die Schädigung der Stahlseile bei Kontakt mit dem Wasserstrahl ausgeschlossen. Der Kontakt ist dennoch zu vermeiden, da sich durch die Reflexion des Wasserstrahls an den Zugträgern eine ungleichmäßige Schnittfuge ergibt.

Im Anschluss an den ersten Bearbeitungsschritt wird der Schneidkopf um den Winkel $\beta = 180^\circ - \alpha$ gedreht und die Bearbeitung entsprechend in dem geänderten

Anstellwinkel wiederholt. Es ergibt sich das in Abbildung 3-32 dargestellte Schnittmuster. Es ergibt sich nur noch wenig im Wasser gelöster Gummiaustrag. Der Großteil des zu entfernenden Gummis fällt in Form von quader- und prismenförmigen Gummisegmenten an. Diese können nach der Wasserstrahlbearbeitung vom Fördergurt entfernt und entsorgt werden. Die Gummisegmente entstehen durch das Durchschneiden des Wasserstrahls gleichermaßen trag- und laufseitig.

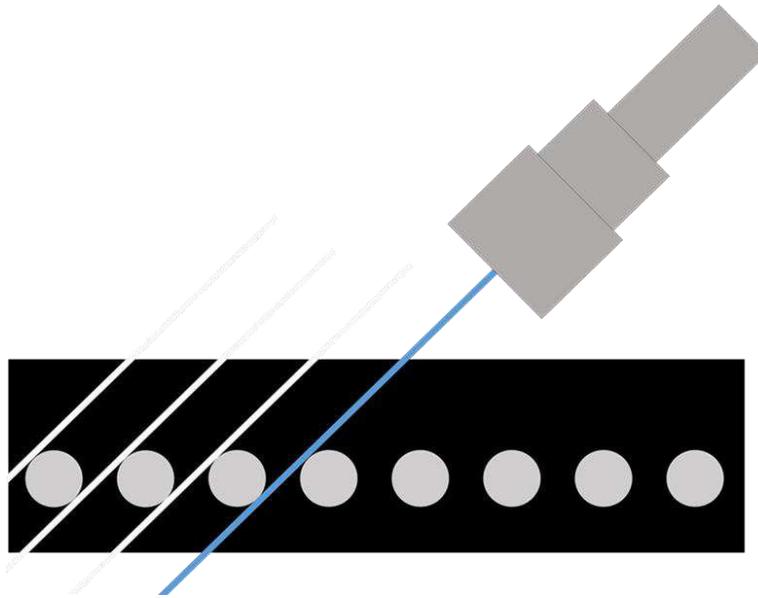


Abbildung 3-31: Erster Bearbeitungsschritt bei der einseitigen automatisierbaren Verbindungsvorbereitung mittels Reinwasserstrahlschnitt

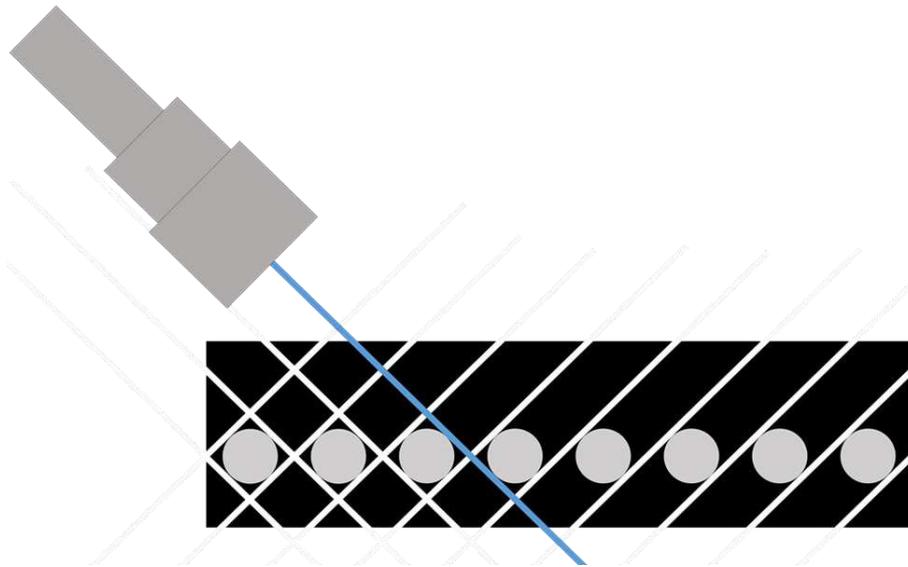


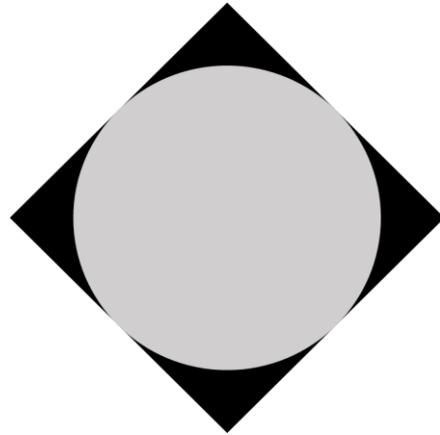
Abbildung 3-32: Zweiter Bearbeitungsschritt bei der einseitigen automatisierbaren Verbindungsvorbereitung mittels Reinwasserstrahlschnitt

Zur Ermittlung der Schnittgeschwindigkeit, mit der das Gummimaterial sicher mit dem Reinwasserstrahl getrennt werden kann, wurden Versuche durchgeführt, bei welchen Fördergurtmaterial mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeit getrennt wurde. Es galt dabei die maximale Schnittgeschwindigkeit, bis ein unvollständiger Schnitt auftritt, zu ermitteln. Bei der Durchführung wurde mit der von den Achsen der verwendeten Wasserstrahlanlage vorgegebenen maximalen Vorschubgeschwindigkeit begonnen. Bei unvollständigem Schnitt wird die Vorschubgeschwindigkeit schrittweise verringert, bis ein sicherer Schnitt gewährleistet werden kann.

Der erste Schnittversuch wurde mit der maximalen Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 1.000 \text{ mm/min}$ durchgeführt. Bereits bei der maximalen Vorschubgeschwindigkeit konnte problemlos ein sicherer Trennschnitt realisiert werden. Es ist ein geringer Nachlauf des Wasserstrahls im unteren Bereich zu erkennen, die Schnittfläche zeichnet sich allgemein durch einen hohen Glattschnittanteil aus. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich die Schnittgeschwindigkeit durch Verwendung von schneller verfahrbaren Achssystemen problemlos um den Faktor 2-3 erhöhen lässt.

Für Berechnungen zur Prozessdauer wird daher eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 2.000 \text{ mm/min}$ angenommen.

Durch die automatisierbare Verbindungsvorbereitung ergibt sich im Querschnitt die in Abbildung 3-33 dargestellte Zugträgergeometrie. Das neue Gummimaterial muss von den Herstellern gemäß der Zugträgergeometrie angepasst werden, sodass ein vollständiger Kontakt des alten und neuen Materials gewährleistet werden kann.



An die ersten beiden RWS Bearbeitungsschritte ist ein weiterer RWS sowie ein WAIS Bearbeitungsschritt angeschlossen. Die Bearbeitungsschritte drei und vier dienen dem Zuschnitt der beiden Enden der Verbindungsstelle. Sie sind nachfolgend dargestellt. Die dargestellte Bearbeitungsreihenfolge berücksichtigt auch die notwendige Fixierung des Fördergurts, um ein Verrutschen während der Wasserstrahlbearbeitung zu verhindern. Die Einspannung hat zusätzlich die Funktion, den Fördergurt definiert auf Zug zu belasten, sodass Ondulationen der Zugträger bei Bearbeitung vermindert werden.

Abbildung 3-33: Querschnitt der mittels RWS Schnitten für die Verbindungsherstellung vorbereiteten Stahlseilzugträger



Ausgangszustand

Loses Ende des für die Verbindung vorzubereitenden Stahlseilfördergurts.



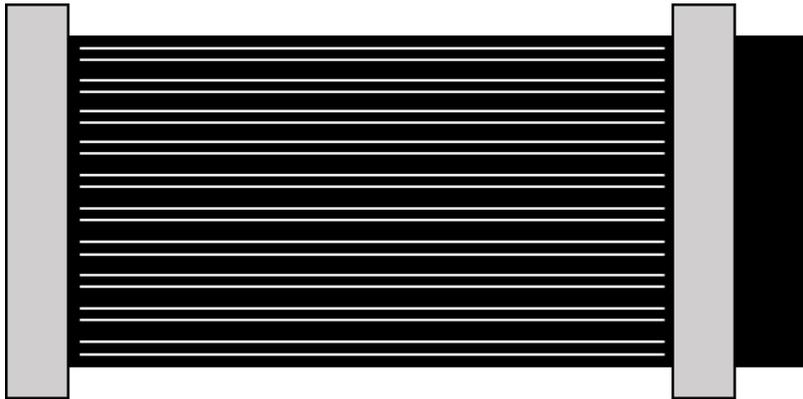
Einspannen des Fördergurts

Das Lose Ende wird manuell eingespannt und auf Zug belastet. Die Zugbelastung verhindert das Ondulieren der Seile bei der Wasserstrahlbearbeitung.



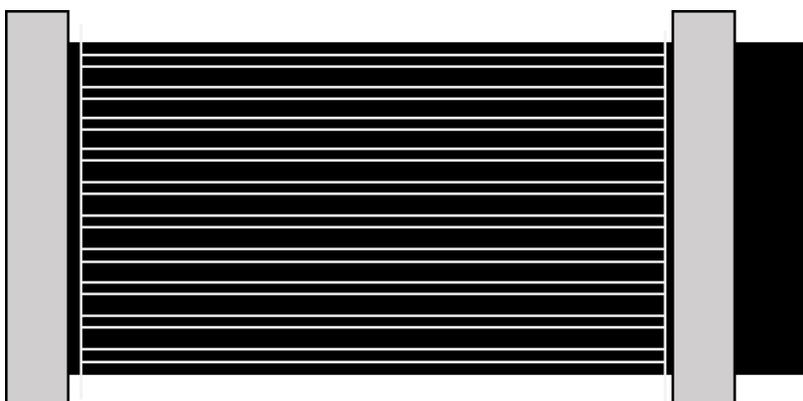
WS-Bearbeitungsschritt 1

Mittels RWS wird entlang der Stahlseilzugträger geschnitten. Der Schneidkopf ist dabei um den Winkel α angestellt.



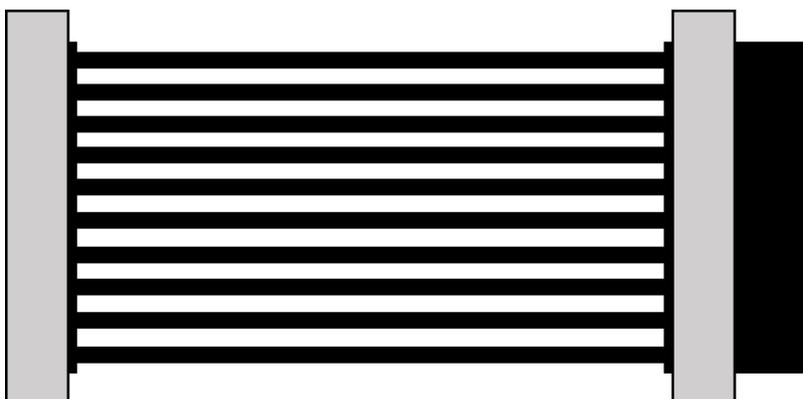
WS-Bearbeitungs-
schritt 2

Der RWS Schneidkopf wird auf den Anstellwinkel $-\alpha$ verstellt und es wird auf der jeweils anderen Seite entlang der Stahlseilzugträger geschnitten.



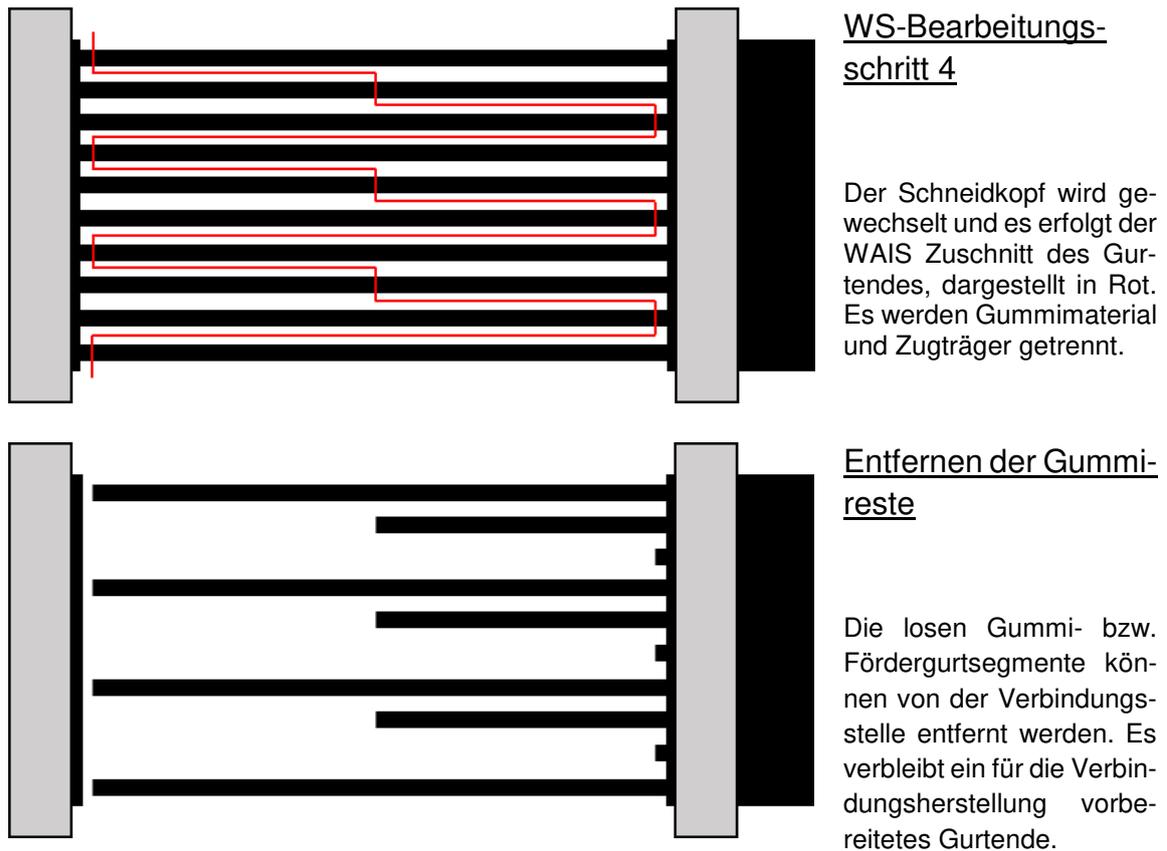
WS-Bearbeitungs-
schritt 3

Der Schneidkopf wird auf 0° eingestellt. Entlang der Einspannungen erfolgt ein gerader RWS Schnitt, um die entstandenen Gummi-segmente von der Kante zu lösen. Zugträger verbleiben schädigungsfrei.



Entfernen der Gummi-
reste und Trocknung
der Zugträger

Die Gummisegmente werden von der Verbindungsstelle entfernt und die Zugträger werden getrocknet, so lange sie noch am losen Ende eingespannt sind.



Beim Zuschnitt der Zugträgerenden wird wieder Feuchtigkeit an die Verbindungsstelle eingebracht. Durch den geraden Durchschnitt verbleibt nur wenig Feuchtigkeit an der Schnittfuge. Möglicherweise ist nach Durchführung der Verbindungsvorbereitung ein weiterer Trocknungsvorgang notwendig. Dieser kann grundsätzlich automatisiert oder manuell ausgeführt werden.

Um eine konkrete Einordnung des Prozesses hinsichtlich einer zukünftigen Anwendbarkeit zu geben, wurde eine Validierung bezüglich Prozesszeit und zu erzielender Verbindungsfestigkeit durchgeführt.

Der Fördergurtyp ST 4500 16:8 wird unter anderem im Tagebau Hambach (siehe Abbildung 3-34) eingesetzt. Die dort installierte Bandanlage umfasst eine Gesamtlänge von 115 km. Nach Angaben der RWE Power AG fallen dort im Jahr ca. 250 Verbindungsherstellungen pro Jahr an. Die angewandte Verbindung weist eine Länge von 2,5 m bei einer Gurtbreite von 2,7 m auf.



Abbildung 3-34: Tagebau Hambach

Für die Verbindungsvorbereitung, also das Ausfingern der Seile und das Rauhen der Restgummischicht (optional), werden vier Vulkaniseure benötigt. Diese konventionelle Methode hat eine Prozessdauer von ca. drei Stunden pro Gurtende. Die Dauer für die Verbindungsvorbereitung mittels Wasserstrahlverfahrens ist stark von der eingesetzten Technik abhängig. Für den einfachsten Fall, mit einem Düsenkopfpaar und einer möglichen Vorschubgeschwindigkeit von 2.000 mm/min, ergibt sich eine Prozessdauer von ca. 130 Minuten für eine laut DIN 22131 geforderte dreistufige Verbindung. In der Wasserstrahltechnik ist es ohne weiteres möglich bei entsprechend vorhandener Anlagenleistung die Anzahl der Düsenköpfe zu erweitern. So kann die Prozessdauer durch eine Erweiterung auf vier Schneidköpfe die Gesamtdauer zur Verbindungsvorbereitung eines ST 4500 auf unter eine Stunde gesenkt (ca. 30 Minuten für das Freilegen der Stahlseile + ca. 10 Minuten zum Kappen der Seile) werden. Daraus würde für den Einsatzfall im Tagebau Hambach eine Zeiterparnis von ca. 530 Stunden bei jährlich anfallenden 250 Verbindungen resultieren. Die Bearbeitung der Stahlseile mittels Reinwasserstrahlschneiden bringt somit eine erhebliche Zeiterparnis bei der Verbindungsvorbereitung mit sich.

Die durch die beschriebene Bearbeitungsstrategie für die Verbindungsherstellung vorbereiteten Stahlseilzugträger wurde außerdem auf ihre Verbindungsfestigkeit geprüft. Hierbei konnte eine ausreichende Festigkeit ermittelt werden, vgl. Tabelle

5. Die Zugschwellprüfungen nach DIN 22131-3 konnten mithilfe dieser Bearbeitungsmethode ebenfalls erfolgreich durchgeführt werden. Die Proben erreichten 10.000 Lastzyklen bei 35 % relativer Festigkeit.

Tabelle 5: Ergebnisse Ausreißversuch für RWS

	Stahlseile mit Restgummischicht	Stahlseile mit Restgummischicht mittels RWS
Probe 1	15.336 N	17.027 N
Probe 2	16.392 N	16.830 N
Probe 3	16.482 N	16.382 N
Mittelwert	16.070 N	16.746 N
Relative Festigkeit nach DIN EN ISO 15236-1	111 %	116 %

Abschließend galt es die unterschiedlichen untersuchten Bearbeitungsprozesse zu bewerten. Als Kriterium wurden hierfür die Komplexität der Bearbeitung, die Bearbeitungsdauer und die Komplexität der Anlage seitens der Wasserstrahlanlage herangezogen. Als gesondertes Kriterium, was alleine über eine mögliche Umsetzung in die Praxis entscheiden kann, ist die erzielte Haftung. Die Bearbeitung mittels Flachstrahl, bei der die Stahlseile komplett freigelegt wurden, ist auf Grund der unzureichenden erzielten Haftung nicht geeignet zur Verbindungsvorbereitung. Dadurch ist eine Bearbeitungsmethode zu wählen, die eine Restgummischicht auf den Stahlseilen belässt. Alle durchgeführten Bearbeitungsmethoden haben hier eine ausreichende Festigkeit bei der Neuansbindung erzielen können. Daher stellt sich an dieser Stelle die Frage, welche Bearbeitungsmethode aus Sicht der Anlagentechnik am besten für eine Umsetzung eignet? Hierbei ist zu erkennen, dass das RWS am besten geeignet ist. Denn sowohl bei der Bearbeitungsdauer als auch

bei der Komplexität der Bearbeitung und erforderlichen Anlage schneidet das Verfahren am besten ab.

Strategie	Komplexität der Bearbeitung	Bearbeitungs-dauer	Komplexität der Anlage	Erzielbare Haftung
Freilegen der Zugträger	--	+/-	++	--
Belassen einer Restgummischicht	+/-	+	++	++
Gezielte Strukturierung der Restgummischicht	++	++	+	++
Freischneiden mittels RWS	-	-	-	++

Bewertungsschüssel: sehr gering (--), gering (-), mittel (+/-), hoch (+), sehr hoch (++)

Die Forschungsergebnisse zeigen also, dass die Verbindungsvorbereitung mittels Reinwasserstrahlschneiden die größten Vorteile, im Vergleich zu den übrigen Bearbeitungsstrategien, mit sich bringt und eine Umsetzung in die Praxis anzustreben ist.

3.5 Anforderung an ein Wasserstrahlsystem

Bei der Umsetzung der Untersuchungen in ein Wasserstrahlsystem zur Verbindungsvorbereitung im Feld sind folgende Punkte zu beachten:

- Mobilität der Anlage
- Spannvorrichtung für Gurtende
- Wasser- und Abwasserversorgung
- Pumpentechnik
- Führungsmaschine für Schneidköpfe
- Steuerung des Prozesses
- Trocknung des Gurtes
- Adaption der Vulkanisierpresse

Zunächst muss die Mobilität der Anlage zum Einsatz im Feld gewährleistet sein. Dies beinhaltet eine zielgerichtete Konstruktion, die es ermöglicht die komplette Wasserstrahlanlage zum Einsatzort zu transportieren zu können, was mithilfe eines modularen Aufbaus erreicht werden kann, der beispielsweise auf einem LKW montiert werden kann. Die Anlage muss dann vor Ort aufgebaut werden. Die technische Voraussetzung hierfür liefert ein geschlossenes Wasser- / Abwassersystem, eine integrierte Entsorgung von Feststoffen wie Abrasivmittel und Gummi sowie die Möglichkeit einer elektrischen Versorgung vor Ort, was z.B. durch einen Generator ermöglicht wird.

Zur Bearbeitung muss das Gurtende fixiert werden. Hierfür ist eine geeignete Spannvorrichtung vorzusehen. Die auftretenden Kräfte sind jedoch gering und erfordern nur ein einfaches System. Hierbei muss der Kraftschluss über die gesamte Gurtbreite erfolgen. Zur zielführenden Bearbeitung müssen beide Seiten der Verbindungsstelle eingespannt und eine leichte Zugbelastung in Laufrichtung aufgebracht werden.

Ein zentraler Punkt der Anlage ist die Wasser- und die Abwasserversorgung. Hierfür sind separate Tanks für Frisch- und Abwasser vorzusehen, was über ein geeignetes Wasserkreislaufsystem möglich ist, welches außerdem eine Dosiereinheit für Wasseradditiv und einen Abscheider für Feststoffe im Abwasser enthalten sollte. Denkbar ist eine zusätzliche Absaugung des RWS nach Austritt.

Die dazugehörige Pumpentechnik muss anwendungsfallsspezifisch und nach der daraus resultierenden benötigten Leistung ausgelegt werden. Diese richtet sich in erster Linie an die Dimensionierung der Schneidköpfe. Die Untersuchungen im Projekt wurden mit einer Pungerpumpe durchgeführt. An dieser Stelle ist es auch denkbar mit einem Druckübersetzer zu arbeiten, wobei die Plungerpumpe in der Regel die kostengünstigere Möglichkeit darstellt. Beide Varianten unterscheiden sich nicht in der Antriebsmöglichkeit. Hier muss eine elektrische Versorgung vorgesehen werden. Die Pumpentechnik kann fest auf einem LKW verbaut werden. Der Anschluss an die Düsenteknik erfolgt über einen Hochdruckschlauch.

Die Schneidköpfe gilt es in eine geeignete Führungsmaschine zu integrieren. Eine Portalanlage erfüllt hierfür alle Voraussetzungen für die Aufnahme der Schneidköpfe und eine automatisierbare Steuerung. Hierfür müssen eine ausreichende Traglast und Vorschubgeschwindigkeit (2.000 mm/min) der Traverse sowie der Schlitten gewählt werden. Zur Einstellung des Schnittwinkels für das RWS ist ein 4-Achssystem unumgänglich. Das Schneiden der Seile erfolgt über separate WAIS-Schneidköpfe. Denkbar ist an dieser Stelle der Einsatz von sogenannten Catchern für das Abrasiv. Mithilfe einer Zusatzachse kann eine geeignete Sensorik an den Schlitten angebracht werden. Diese sind für eine Steuerung unumgänglich. Die Seildetektion wurde im Projekt über elektromagnetische Sensorik erzielt, vgl. Abbildung 3-35. Dies ermöglicht eine online Trajektorienregelung des Prozesses und somit eine vollautomatische Steuerung. Hierfür werden zusätzlich das Gurtspezifische Verbindungslayout und das ermittelte Abtragsmodell benötigt. Der Start des automatisierten Ablaufs erfolgt durch das manuelle Setzen eines Referenzpunktes auf dem Gurt. Um Wasser komplett aus der Verbindungsstelle zu eliminieren, ist eine Trocknung vorzusehen.

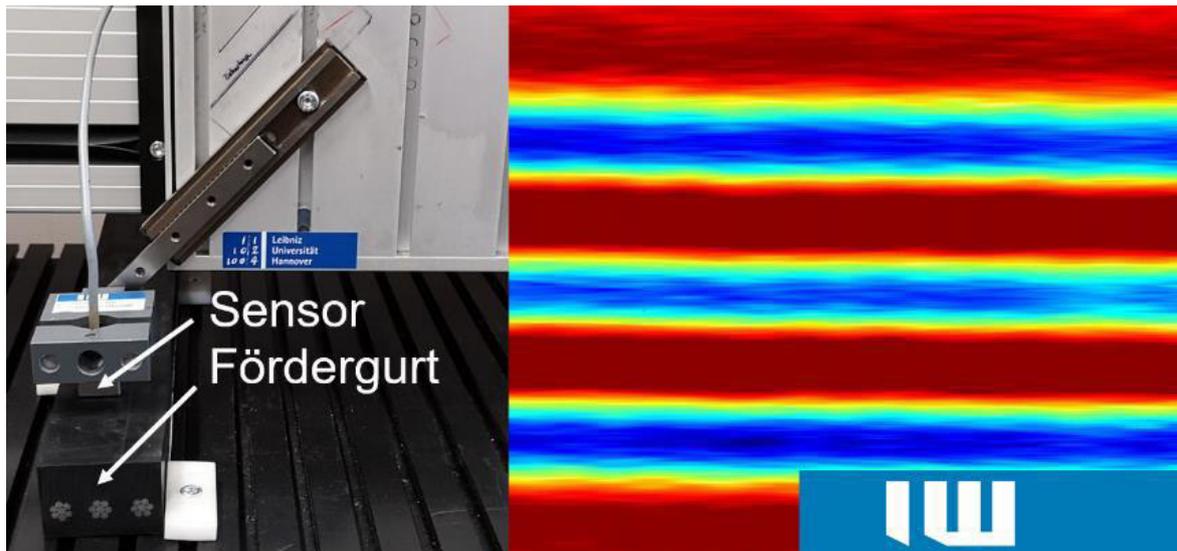


Abbildung 3-35: Detektion der Stahlseile mit Hilfe eines elektromagnetischen Sensors (links: Versuchsaufbau; rechts: farbcodierte Darstellung der Messwerte zur Visualisierung der Lage der Stahlseile)

Für den Aufbau der Wasserstrahlanlage bestehen zwei unterschiedliche Strategien. Es bietet sich zum einen die Möglichkeit den unteren Teil der Vulkanisierpresse als Tisch für die Wasserstrahlbearbeitung zu nutzen, was mithilfe eines adaptiven Portalaufbaus bewerkstelligt werden kann. Zum anderen ist aber auch eine Anordnung von Vulkanisierpresse und Wasserstrahlanlage in Reihe möglich. So kann bei mehreren durchzuführenden Verbindungen das nächste Gurtende bereits vorbereitet werden während die vorangegangene Verbindung neuvulkanisiert wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen eine mögliche Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten mittels Wasserstrahlverfahren. Die nach Norm geforderte statische und dynamische Haftfestigkeit zwischen Gummi und Stahlseil wurde mit Hilfe des Verfahrens erreicht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch Belassen einer Restgummischicht auf der Stahlseiloberfläche eine bessere Haftung erzielt wird im Vergleich zu komplett freigelegten Stahlseilen. Mithilfe einer Profilierung der Restgummischicht konnte jedoch keine signifikante Festigkeitssteigerung erzielt werden. Vereinzelt Proben weisen eine höhere Festigkeit im Vergleich zu einer konstanten Restgummischicht auf, allerdings ist die Standardabweichung der erzielten Ergebnisse deutlich größer, was eine Ungewissheit des Prozesses mit sich bringt und den erheblichen Mehraufwand des Profilierungsprozesses nicht rechtfertigt. Für den Einsatz in der Praxis ist neben der konstanten Festigkeit die Zeit ein erhebliches Kriterium. Mithilfe des Reinwasserstrahlschneidens konnte ein Bearbeitungsprozess entwickelt werden, der beide Kriterien erfüllt. Die nach DIN EN ISO 15236-3 und DIN 22131-3 geforderten Festigkeiten werden mit dieser Bearbeitung erfüllt und auch dem zeitlichen Aspekt konnte genüge getan werden, was das Fallbeispiel Hambach zeigt.

Die Erstellung des Anlagenkonzepts zeigt die Lösungen einzelner Positionen auf, wie z.B. die Seildetektion. Des Weiteren gilt es bei der technischen Umsetzung die Positionierung und die Anzahl der Strahldüsen zu bestimmen, um eine präzise Aussage über die Bearbeitungszeit einer kompletten Fördergurtverbindung treffen zu können.

Das Wasserstrahlverfahren bietet somit die Möglichkeit einer automatisierten Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten. Dies schafft die Voraussetzung für eine konstante Verbindungsfestigkeit, unabhängig von der Qualifizierung der be-

arbeitenden Monteure. Die zeitliche Ersparnis der Bearbeitung bringt außerdem einen finanziellen Vorteil mit sich, da hierdurch Stillstandszeiten der Anlage verkürzt werden.

5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Forschungsprojekt wurde gemäß des im Antrag veranschlagten Arbeitsplans, vgl. Abbildung 5-1, durchgeführt.

Arbeitspaket		2017				2018				
		Quartal	1	2	3	4	1	2	3	4
Projektgrundlagen										
AP 1	Qualifikation von Strahlverfahren zur Verbindungsvorbereitung		IW							
AP 2	Analyse der Oberflächenzustände von Elastomer und Zugträger sowie der Übergangszonen		ITA							
Experimentelle Untersuchungen und Simulation										
AP 3	Untersuchungen zur Verbindungsvorbereitung			IW						
AP 4	FEM-Simulation von Neuverbindungen zur Optimierung einer Verbindung			ITA						
Modellbildung und Validierung										
AP 5	Modellierung des Einflusses der Oberflächen- und Kantenvorbereitung auf Anbindungspotential und Verbindungsfestigkeit						ITA			
							IW			
AP 6	Validierung der Verbindungskonzepte						ITA			
							IW			
AP 7	Ableitung eines Automatisierungskonzeptes und dessen wirtschaftliche Abschätzung							ITA		
								IW		
	Projektmanagement, Berichterstattung, Meilensteine			M1 *			M2 *		M3 *	

*M1, M2, M3: Der Abschluss der Arbeitspakete AP1/2, AP3/4 und AP5/6/7 wird jeweils als Meilenstein definiert.

Abbildung 5-1: Arbeitsplan gemäß Antrag

Mit Hilfe von Arbeitspaket 1 konnte zunächst ein geeignetes Strahlverfahren zur Verbindungsvorbereitung bestimmt werden. Hierbei zeigte das Wasserstrahlverfahren deutliche Vorteile gegenüber dem Trockeneisstrahlen.

Das Wasserstrahlverfahren wurde anschließend genutzt, um Proben herzustellen zur Untersuchung der zu erzielbaren Haftung (AP 2). Diese wurde mit Proben verglichen, die nach der herkömmlichen Verbindungsvorbereitung angefertigt wurde, also mit Schneidwerkzeugen, verglichen. Hierbei ergaben sich geringe Abweichun-

gen von lediglich 1 %. So konnte eine qualitative und quantitative Aussage zur potentiellen Eignung des Wasserstrahlverfahrens zur Verbindungsvorbereitung getroffen werden.

Zur Verbesserung des Strahlprozesses werden in AP 3 weitere Untersuchungen der Prozessparameter gemacht, wie z.B. Strahlwinkel oder Vorschubgeschwindigkeit, um zum einen die Qualität der Stahlseiloberfläche hinsichtlich der Haftungsmöglichkeit zu optimieren und zum anderen die hierfür benötigte Zeit zu verringern.

Zur Qualitätsverbesserung soll zusätzlich die Finite Elemente Methode in AP 4 genutzt werden, um den Kraftfluss in einer Fördergurtverbindung genauer zu untersuchen und darauf aufbauend die Wasserstrahlbearbeitung anzupassen. Hierbei hat sich bereits herauskristallisiert, dass eine mögliche Profilierung der Stahlseilflanken den größten Effekt hat.

AP 3 und AP 4 dienen der Verbesserung des Strahlprozesses und der Steigerung des Haftungspotentials der Stahlseile und sind somit der fundamentale Teil des Forschungsprojekts.

Die Ergebnisse wurden dann genutzt, um eine Prozessmodellierung zu erstellen (AP 5).

Die abschließende Validierung der Verbindungskonzepte (AP 6) wurde anhand experimenteller Versuche bewertet. Hierfür wurden Lebensdauerversuche mittels Zugschwellprüfungen durchgeführt.

6 Nutzen für KMU

Die erzielten Forschungsergebnisse können von KMU auf zwei verschiedene Arten genutzt werden. Zum einen können die Ergebnisse von Anlagenbauern genutzt werden, um Wasserstrahlanlagen zur Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten herzustellen und zu vertreiben und sich somit ein neues Geschäftsfeld erschließen. Zum anderen können Vulkaniseure Wasserstrahlanlagen nutzen, um eine schnellere Verbindungsvorbereitung durchführen zu können.

Ein großer Vorteil für KMU, tätig als Vulkaniseur zur Herstellung oder Reparatur von Stahlseil-Fördergurtverbindungen, besteht darin, dass mittels automatisierbarer Wasserstrahlanlagen mit vergleichsweise kleinem Personaleinsatz in hoher Qualität Verbindungen durchgeführt werden können. Dies birgt zusätzlich das Potenzial, dass KMU auch zur Verbindungsherstellung für größere Anlagen relevant werden. Die Tatsache, dass die Forschungsergebnisse mit einer herkömmlichen Portalanlage erzielt wurden, garantiert eine mögliche Nutzung für KMU und schließt ein Scheitern der Umsetzung durch eine zu komplexe und zu teure Anlage aus. Die notwendigen Arbeitsschritte für eine Umsetzung des Bearbeitungsprozesses wurden anhand der Qualifikation der Wasserstrahlquelle aufgezeigt. Hieraus kann für jegliche Anlage eine Modellierung adaptiert werden.

Aus den durchgeführten Untersuchungen wurde abschließend ein Lasten- und Pflichtenheft zur Anfertigung einer Wasserstrahlanlage, die sich zur Verbindungsvorbereitung eignet, aufgestellt. Hierdurch wurde eine Grundlage für potentielle Anlagenbauer geschaffen. Es werden die erforderlichen Leistungs- und Funktionsmerkmale aufgezeigt. Diese gilt es durch geeignete Anlagenkomponenten abzudecken und zu erfüllen. So können KMU eine Wasserstrahlanlage konzipieren und diese individuelle auf ihren Kunden abstimmen.

Einen indirekten Nutzen durch die erzielten Forschungsergebnisse können KMU als Anlagenbetreiber dadurch erhalten, dass durch eine konstante Verbindungsqualität,

ausgehend von der automatisierten Vorbereitung, der Ausfall einer Anlage und damit die Standzeiten reduziert werden können, was auch durch ein schnelleres Freilegen der Verbindungsstelle erzielt wird. KMUs tragen somit ein geringeres finanzielles Risiko, da Standzeiten besser kalkuliert werden können.

Somit sind die Forschungsergebnisse von KMU aus verschiedenen Geschäftsbereichen rund um die Wasserstrahl- und Fördertechnik nutzbar. Die Ergebnisse können gleichermaßen von Anlagenbauern, oder -betreibern sowie Vulkanisierern genutzt werden.

7 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die Forschungsergebnisse wurden in regelmäßigen Abständen bei den Treffen des projektbegleitenden Ausschusses gezeigt und diskutiert. Zusätzlich wurden sie in Fachzeitschriften und Konferenzen präsentiert, um, auch über den projektbegleitenden Ausschuss hinaus, die Ergebnisse in die Öffentlichkeit zu tragen. Eine detaillierte Aufführung hierzu ist in Kapitel 7 zu finden.

Durchgeführte Treffen des PbA:

Typ	Termin
Kick-Off Treffen	27. April 2017
1. Sitzung	04. Dezember 2017
2. Sitzung	15. November 2018
Abschlusstreffen	28. März 2019

Des Weiteren wurde der Kontakt zu der Firma Nilos GmbH & Co. KG, ein Unternehmen im Bereich Förderband-Ausrüstung und -Instandhaltung, hergestellt. Als Vulkaniseur zeigt Nilos großes Interesse an der Umsetzung der erzielten Forschungsergebnisse. Das erste Treffen fand am 4. Juli 2019 statt.

Des Weiteren wurde ein Lasten- und Pflichtenheft zur Umsetzung einer, für die Verbindungsvorbereitung geeigneten, Wasserstrahlanlage angefertigt, welches von Unternehmen genutzt zum Aufbau einer Anlage genutzt werden kann. Hierbei stehen das ITA und das IW jederzeit unterstützend zur Verfügung.

8 Verwendung der Zuwendung

Für die Durchführung des Projektes wurde seitens des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik ein wissenschaftlicher Mitarbeiter (A.1) über 23,5 Monate eingesetzt.

Für die Durchführung des Projektes wurde seitens des Instituts für Werkstoffkunde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter (A.1) über 24 Monate eingesetzt.

Die Fördergurtproben zur Untersuchungen des Materialabtrags mittels Strahlverfahren wurde von der Fa. ContiTech Transportbandsysteme GmbH zur Verfügung gestellt.

Das Material zur Probenherstellung für die Untersuchungen der Haftungseigenschaften zwischen Stahlseil und Elastomer anhand von 5-Seilproben wurde von der Fa. ContiTech Transportbandsysteme GmbH zur Verfügung gestellt.

Genauere Angaben über die Materialmengen sind dem zahlenmäßigen Nachweis (vAW) zu entnehmen.

Für die Wasserstrahlbearbeitung wurden von der Firma Hammelmann GmbH acht 10° Flachstrahldüsen vom Typ R mit Äquivalenzdurchmessern von 0,5 – 0,8 mm zur Verfügung gestellt.

9 Veröffentlichungen

Riemer, P.; Mlinaric, M.; Overmeyer, L.; Hassel, T. (2019): Automatisierung der Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten - Einsatz von Wasserstrahlverfahren, Schüttgut, Ausgabe 2/2019

→ Siehe Anhang

Riemer, P.; Overmeyer, L. (2019): Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten mittels Wasserstrahlverfahren, Haus der Technik, 15. Fachtagung – Gurtförderer und deren Elemente, Essen

Heitzmann, P.; Zaremba, D.; Dittmar, H.; Hassel, T.; Overmeyer, L. (2017): Automatable splicing method for steel cord conveyor belts – Finding a suitable preparation process, AST 2017 – Scientific Symposium on Automated Systems and Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russland.

→ Abrufbar unter: www.ast.uni-hannover.de

Heitzmann, P. (2017): Stahlseil-Fördergurte: Festere Verbindung dank Automatisierung, phi – Produktionstechnik Hannover informiert, 06/2017, ISSN 2198-1922.

→ Abrufbar unter: www.phi-hannover.de

Zaremba, D., Heitzmann, P., Overmeyer, L., Hillerns, L., Hassel, T. (2017): Automatable splicing method for steel cord conveyor belts - Evaluation of water jetting as a preparation process, Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 63

(10), pp. 590-596, Assoc. of Mechanical Eng. and Technicians of Slovenia. DOI: 10.5545/sv-jme.2017.4363

→ Abrufbar unter: www.sv-jme.eu

Mlinaric, M.; Hassel, T. (2017): Untersuchung einer automatisierbaren Methode zur Verbindungsvorbereitung von Stahlseilfördergurten“, Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie, Lübeck

Ausstehend:

Riemer, P.; Mlinaric, M.; Hassel, T.; Overmeyer, L. (2019): Automatable Splicing Method for Steel Cord Conveyor Belts using High-Pressure Water Jetting, ICBMH 2019, 13th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Gold Coast, Australia

→ Noch nicht veröffentlicht

Bereits in der Antragsphase:

Zarembo, D.; Heitzmann, P.; Overmeyer, L.; Hillerns, L.; Hassel, T. (2016): Automatable splicing method for steel cord conveyor belts – Evaluation of water jetting as a preparation process, MIT 2016 – 14th International Conference on Management and Innovative Technologies Laboratory for Alternative Technologies, University of Ljubljana, Slovenia Centre for Research in Innovation Management, University of Brighton, UK, Fiesa, Slovenia, S. 1-7.

→ Siehe Anhang

Studentische Arbeiten:

Grup, C. P.; Diplomarbeit: *Untersuchung des Haftmechanismus zwischen Stahlseil und Elastomer in einer Stahlseil-Fördergurterbindung*; 2017

Giesbrecht, E.; Bachelorarbeit: *Untersuchung der Haftmechanismen innerhalb einer Stahlseil-Fördergurterbindung*, 2018

Fischer, M.; Bachelorarbeit: *Experimentelle und numerische Untersuchung des Kraftflusses in einer Fördergurterbindung anhand kleinskaliger Prüfkörper*, 2018

Mlinaric, M.; Masterarbeit: *Untersuchung einer automatisierbaren Methode zur Verbindungsvorbereitung von Stahlseilfördergurten*, 2017

Bröring, M. J.; Bachelorarbeit: *Aufbau einer Wasserstrahlanlage zur Erhöhung der Produktivität der automatisierbaren Verbindungsvorbereitung von Stahlseilfördergurten*, 2018

Schickedantz, D.; Bachelorarbeit: *Untersuchungen zum Einfluss der Strukturierung von Stahlseilzugträgern mittels Hochdruck-Wasserstrahlen auf die Verbindungsfestigkeit von Stahlseilfördergurten*, 2019

10 Literaturverzeichnis

- [Bac06] Bach, Fr.-W.; Kremer, G.; Peter, D.; Schenk, A.: Investigation on abrasive waterjet cutting for the dismantling of thick-walled and complex structures. Proceedings of the 18th International Conference on Water Jetting, Gdansk, Poland, September 2006
- [Bra00] Brand, S., Louis, H.: Profiling with 400 MPa fine-beam abrasive water jets. Proc. of the 15th International Conference on Jetting Technology (2000). London: Professional Engineering Publishing Ltd., S. 21/34.
- [Bra01] Brandt, S., Louis, H., Milchers, W., Mohamed, M., Pude, F., von Rad, C.: Abrasive waterjets - a multifunctional tool for advanced materials. Proc. of the 7th European Conference on Advanced Materials and Processes (2001). The Federaton of European Materials Societies.
- [DIN1827] DIN ISO 1827 - Bestimmung des Schubmoduls und der Haftung zu starren Platten (Quadrupel-Schermethode ISO 1827:2007). Beuth Verlag, 2010
- [DIN22131] DIN 22131-3 - Stahlseil-Fördergurte für die allgemeine Fördertechnik – Teil 3: Prüfungen, Beuth Verlag, 2016
- [DIN15236] DIN EN ISO 15236-3 - Stahlseil-Fördergurte – Teil 3: Besondere Sicherheitsanforderungen für den Einsatz untertage, Beuth Verlag, 2018
- [Fro10] Froböse, T.; Falkenberg, S.; Overmeyer, L.: „New Dimensions in the Field of Steel Cord Conveyor Belt Splices and Dynamic Test Methods“, Bulk Solids Handling, Bd. Band 30, Nr. Heft 8, pp. 422-426, 2010.
- [Fro12] Froböse, T.; Overmeyer, L.: „Trends in der Zeitfestigkeit und Prüfung von Fördergurtverbindungen,“ VDI-Verlag, 2012, pp. 73-83.

- [Fro13] Froböse, T.; Overmeyer, L.; Wakatsuki, A.: Ermittlung der Materialparameter zur Optimierung von Stahlseil-Fördergurtverbindungen mit Hilfe der FEM, Gurtförderer und ihre Elemente 2013, VDI, 2013.
- [Fro14] Froböse, T.; Heitzmann, P.; Overmeyer, L.: „Entwicklung eines FE-Modells zur Optimierung von Stahlseil-Fördergurtverbindungen,“ in Tagungsband 10. Fachkolloquium Logistik WGTL 2014, neue Ausg Hrsg., Garching b. München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik (fml) TU München, 2014, pp. 17-24.
- [Guo94] Guo, N. S.: Schneidprozess und Schnittqualität beim Wasserabstrahlstrahlschneiden. Dissertation, Leibniz Universität Hannover. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 328. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- [Huf11] Hufenbach, W.; Adam, F.; Heber, T.; Weckend, N.; Bach, Fr.-W.; Hassel, T.; Zaremba, D.: Novel Repair Concept for Composite Materials by Repetitive Geometrical Interlock Elements, Materials 2011, 4; S. 2219-2230.
- [Kel01] Keller, M.: Zur Optimierung hochfester Stahlseilgurtverbindungen, Universität Hannover, Diss., 2001
- [Kos89] Koster, K.: Leichttransport-Bandtechnik, 2. Aufl Hrsg., Essen: Vulkan-Verl, 1989.
- [Lou00] Louis, H., von Rad, C.: Cutting of hollow structures with abrasive water suspension jets. Proc. of the 15th International Conference on Jetting Technology (2000). London: Professional Engineering Publishing Ltd., S. 59/67.
- [Oeh77] Oehmen, Klaus H.: Zur Berechnung des Kraftflusses in Stahlseilgurtverbindungen, Braunkohle Heft 7, 1977
- [Ove12] Overmeyer, L.; Froböse, T.; Radosavac, M. (2012): Trends and Experiences of Testing the Fatigue Strength of more than 1,000 Conveyor

- Belt Splices, XX International Conference on "Material Handling, Constructions And Logistics", Belgrade.
- [Red03] Redeker, C.F.: Abtragen mit dem Trockeneisstrahl, Diss. Universität Hannover, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003, ISBN 3-18-363902-5
- [Röt06] Röthemeyer und Sommer: Kautschuk Technologie – Werkstoffe-Verarbeitung-Produkte, Hanser Verlag, 2006, ISBN: 978-3-446-40480-9.
- [Sch09] Schenk, A.: Schädigungsdatengestütztes Modell des Reinigens und Entschichtens mit dem Reinwasserstrahl. Dissertation, Leibniz Universität Hannover. Berichte aus dem IW, Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2009.
- [Sch12] Schulz, L.; Overmeyer, L.; Ziller, T.: Ermittlung der Materialparameter zur Optimierung von Stahlseil-Fördergurtverbindungen mit Hilfe der FEM, Gurtförderer und ihre Elemente 2013, VDI, 2012.
- [Sch12b] Schulz, L.; Overmeyer, L.; Ziller, T. (2012): Ein neues Verfahren zur Heißvulkanisation von Verbindungen für Stahlseilfördergurte, 9. Fachtagung Schüttgut - fördern und lagern, S. 61-72. Fulda: VDI Wissensforum, 2012.
- [Sch13] Schulz, L.; Overmeyer, L.; Ziller, T. (2013): Optimisation of the vulcanisation process for splicing steel cord conveyor belts using a new heating method. Beltcon 17. IMHC. Johannesburg, 06.08.2013.
- [Spu87] Spur, G.; Stöferle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik. Band 4/1, Abtragen/Beschichten. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1987
- [Tap93] Tappeiner, S.: Zusatzbeanspruchungen an Fördergurten, Universität Hannover, Diss., 1993
- [Wro91] von der Wroge, Henning: Gestaltung und Auslegung der Verbindung hochfester Stahlseil-Fördergurte, Universität Hannover, Diss., 1991

- [Zar11] Zaremba, D.; Biskup, C.; Heber, T.; Weckend, N.; Hufenbach, W.; Adam, F.; Bach, Fr.-W.; Hassel, T. (2011): Experimental evaluation of jetting methods for the surface preparation of fiber-reinforced plastics, 11th International Conference on Management of Innovative Technologies and 2nd International Conference on Sustainable Life in Manufacturing, Fiesca, 25–27 September 2011.
- [Zar12] Zaremba, D.; Biskup, C.; Heber, T.; Weckend, N.; Hufenbach, W.; Adam, F.; Bach, Fr.-W.; Hassel, T. (2012): Repair Preparation of Fiber-Reinforced Plastics by the Machining of a Stepped Peripheral Zone, In: Journal of Mechanical Engineering 58 (10), S. 571–577.
- [Zar14] Zaremba, D.; Wachsmuth, S.; Schneider, P.; Hufenbach, W.; Maier, H. J.; Hassel, T.: Method for the material-specific repair preparation of carbon fiber reinforced plastic structures, 22nd International Conference on Water Jetting, Haarlem, Netherlands, 3-5 September 2014.
- [Zil10] Ziller T.; Hartlieb-Wallthor, P.: Fördergurte in der Praxis, 2. Aufl. Hrsg. Nilos GmbH, Essen: VGE-Verl., p. 379, 2010.

11 Anhang

A. Veröffentlichungen

Schüttgut Ausgabe 2/2019



Automatisierung der Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergeruten

Einsatz von Wasserstrahlverfahren

Die Verbindungsherstellung von Stahlseil-Fördergeruten ist geprägt von zahlreichen manuellen Prozessschritten. Dies ist mit einem hohen Zeitaufwand verbunden und führt dazu, dass die Verbindungsqualität von Ausbildung und Erfahrung der Monteure abhängt. Aus diesem Grund wird in einem, von der IFL geförderten Forschungsprojekt an der Leibniz Universität Hannover eine automatisierbare Methode zur Verbindungsvorbereitung mittels Wasserstrahlverfahren untersucht.

Dipl.-Ing. Patrick Riemer¹, Markus Mlinaric M.Sc.², Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer¹ und Dr.-Ing. Thomas Hassel^{1,2}

Abbildung 1: Verbindungsvorbereitung



Bild: ConTsch
Bild: Uni Hannover - ITA

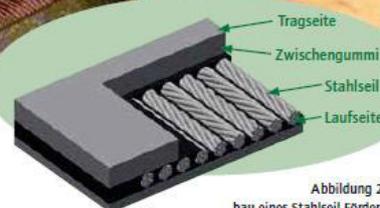


Abbildung 2: Aufbau eines Stahlseil-Fördergerutes

Aus logistischen Gründen werden Fördergerute segmentweise zur Anlage transportiert und erst vor Ort zu einem Endlosgerut verbunden. Die Verbindungsstellen stellen die Schwachpunkte eines Fördergerutes dar, da hier die Zugkräfte über das Zwischengummi übertragen werden. Aus diesem Grund sind Fördergerutverbindungen ein zentraler Forschungsschwerpunkt am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA). Die Erfahrung aus über 40 Jahren und mehr als 1200 Einzelprüfungen von Fördergerutverbindungen haben gezeigt, dass die Qualität der Verbindungen stark von dem Ausbildungsgrad der Monteure abhängt, was wiederum auf die Tatsache zurück zu führen ist, dass die einzelnen Prozessschritte bei der Verbindungsherstellung manuell durchgeführt

werden. Speziell die Verbindungsvorbereitung ist geprägt vom Einsatz einfacher Schneidwerkzeuge (vgl. Abb. 1), was neben einer gewissen Qualitätsschwankung auch sehr zeitintensiv ist. Das im Folgenden vorgestellte Forschungsprojekt zur Entwicklung einer automatisierbaren Methode zur Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergeruten mittels Wasserstrahl wird in Kooperation zwischen ITA und dem Institut für Werkstoffkunde durchgeführt, das über weitreichende Expertise auf dem Gebiet der Hochdruck-Wasserstrahltechnik verfügt.

1) Leibniz Universität Hannover,
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
2) Leibniz Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde

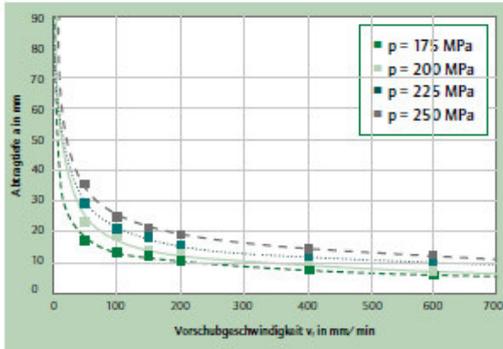


Abbildung 3: Abtragtiefe a in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_f

Stahlseilfördergurte gehören zu den hochfesten Gurten und können eine nominelle Festigkeit von bis zu 10000 N/mm erreichen. Der generelle Aufbau ist in Abb. 2 dargestellt.

Die Stahlseile, die als Zugträger fungieren, sind im Kerngummi eingebettet und bilden zusammen die Karkasse des Gurtes. Diese ist von den Deckplatten umgeben, der Lauf- und Tragseite. Die Tragseite trägt das Schüttgut und schützt die Karkasse beim Materialaufschlag. Über die Laufseite wird die Antriebskraft von der Antriebstrommel in den Gurt übertragen. Um zwei Gurtenden miteinander zu verbinden, muss in der Verbindungszone das gesamte Gummi von den Stahlseilen entfernt werden. Anschließend werden die Stahlseile gemäß des passenden Legeschemas angeordnet und neues Cord Gummi eingebracht. Abschließend wird die Verbindungsstelle erneut vulkanisiert. Die Verbindungsvorbereitung, also der Arbeitsprozess in der das Gummi von den Stahlseilen entfernt wird, ist von zahlreichen manuellen Arbeitsschritten geprägt, die zum Teil mit einfachen Schneidwerkzeug durchgeführt werden. Hierbei werden zunächst die beiden Deckplatten abgeschält. Dies geschieht entweder mit einem Messer, was auch für das weitere Freilegen der Seile genutzt wird, oder eines Schneidgerätes, einem so genannten Cord Stripper. Danach werden die Stahlseile mithilfe einer rotierenden Drahtbürste geraut, um eine größere Haftoberfläche zu erzielen.

Ein wichtiger Punkt für die folgenden Untersuchungen ist das Verständnis der Theorie zum Haftmechanismus zwischen Gummi und Stahlseil. Die Haftung beruht auf zwei unterschiedlichen Effekten. Zum einen kommt es durch den Aufbau der Stahlseile zu einer mechanischen Umklammerung der Seile durch das Gummi und zum anderen zu einer chemischen Bindung zwischen den beiden Komponenten. Die Stahlseile werden in einem abschließenden Herstellungsprozess feuerverzinkt. Die dabei entstehende Zinkschicht erfüllt zwei Anforderungen. Sie schützt die Seile vor Korrosion und kann zusätzlich bei der Vulkanisation eines Fördergurtes eine chemische Bindung zwischen dem Schwefel der Gummimischung und der Zinkschicht des Stahlseils eingehen. Hierbei entsteht eine neue Zinksulfidschicht, die über Disulfidbrücken eine chemische Haftung zwischen Stahlseil und Gummi generiert [Quelle: Röthemeyer und Sommer: Kautschuk Technologie].

Bei der Freilegung der Stahlseile mittels Wasserstrahlverfahren ist somit darauf zu achten, dass die Zinkschicht intakt bleibt, um eine ausreichende Festigkeit bei der Neuverbindung zu gewährleisten.

Die folgenden experimentellen Untersuchungen wurden mit einem Stahlseil-Fördergurt des Typs St 4500 16:8 der Firma Contitech CBG

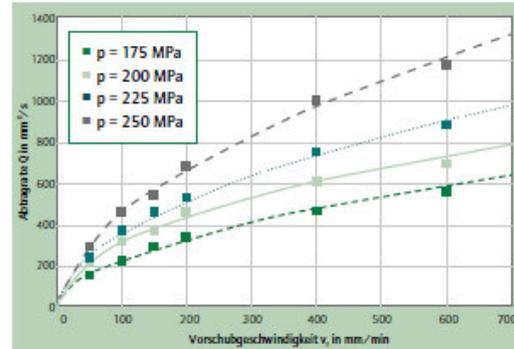


Abbildung 4: Materialabtragrate Q in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_f

durchgeführt. Dieser Gurttyp wird u.a. im Braunkohletagebau Hambach eingesetzt. Der von der RWE Power betriebene Tagebau ist mit einer jährlichen Förderleistung von 40 Millionen Tonnen Braunkohle und einer Fläche von 8500 Hektar der Größte in Deutschland. Die Förderbandanlage umfasst eine Gesamtgurtlänge von 115 km. Bei Wartungs- und Reparaturarbeiten werden jährlich etwa 250 Verbindungen hergestellt [Quelle: RWE].

Auslegung des Wasserstrahlprozesses

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der Reinwasserstrahl (RWS) für den Abtrag des Elastomermaterials eingesetzt. Die Wirkung des Reinwasserstrahls beruht auf seiner erosiven Wirkung auf das Werkstück. Durch den RWS können vorrangig weiche Werkstoffe getrennt werden. Die geringere Festigkeit von Gummi gegenüber Stahlseilen ermöglicht einen selektiven Abtragprozess. Durch die Wahl geeigneter Prozessparameter soll mit dem Reinwasserstrahlverfahren ein präziser und reproduzierbarer Gummiabtrag erzielt werden, ohne die Stahlseile oder deren Zinkschicht zu beschädigen. Hierzu wurden die Kerbtiefe und das resultierende Zeitsparvolumen beim Elastomerabtrag ermittelt. Das gebildete empirische Modell des Prozesses dient im Folgenden zur Ermittlung der benötigten Prozessparameter für die Verbindungsvorbereitung des Fördergurtes. Die folgenden Parameter sind für den Gummiabtrag relevant:

- Wasserdruck p
- Vorschubgeschwindigkeit v_f
- Düsendurchmesser d
- Strahlgeometrie
- Materialeigenschaften

Zur Erstellung eines empirischen Abtragmodells wurden Versuche mit einer Portalanlage durchgeführt. Die verwendete Wasserstrahlanlage ist mit einer Hochdruckpumpe vom Typ HDP 11F (Antriebsleistung 110 kW und max. Betriebsdruck 400 MPa) der Firma Hamelmann und einer Flachstrahldüse des Typs R mit einem Durchmesser von 0,5 mm und einem Strahlwinkel von 10° ausgestattet.

In Abb. 3 ist die ermittelte Abtragtiefe a in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_f bei unterschiedlichen Drücken dargestellt. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug zwischen 50 und 600 mm/min, der Wasserdruck wurde zwischen 175 und 250 MPa variiert. Zu erkennen ist eine schnelle Zunahme der Abtragtiefe bei Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit unterhalb von ca. 100 mm/min. In Relation mit der Deckplattendicke der bei den Versuchen

AUS DER WISSENSCHAFT



Abbildung 5: Bearbeitete Stahlseile (oben: komplett freigelegt; unten: mit ca. 0,5 mm Restgummischicht)

verwendeten Fördergurten von 16 mm sind die Bereiche von 50 mm/min oder weniger in Hinblick auf einen möglichst geringen Energieeintrag in die Zugträger somit nicht relevant. Bei der Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit verringert sich die Steigung der Regressionsfunktion, sodass es zu evaluieren galt, inwiefern sich die Wahl einer hohen Vorschubgeschwindigkeit auf das Zeitsparvolumen und damit auf die Produktivität des Prozesses auswirkt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Abtragtiefe mit der Erhöhung des Drucks ansteigt.

In Abb. 4 ist die Abtragrate Q über der Vorschubgeschwindigkeit dargestellt. Es ist ersichtlich, dass neben einem möglichst hohen Wasserdruck auch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit trotz sinkender Abtragtiefe zu einer Steigerung der Abtragrate führt.

Es kann also durch einen höheren Wasserdruck und eine höhere Vorschubgeschwindigkeit ein höheres Zeitsparvolumen, erzielt werden. Der Druck sollte daher entsprechend der verfügbaren Anlagentechnik maximal gewählt werden. Das erarbeitete empirische Modell wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$v_r(a, p) = 109 \times 10^{-3} \bar{p} - 11,63 \times \ln\left(\frac{a}{2,6}\right)$$

Die erforderliche Abtragtiefe a ergibt sich aus der vorhandenen Gurtgeometrie über die Deckplatten- und die Karkassenstärke.

Zur Validierung des Modells wurden einzelne Stahlseile mit Hilfe der vom Modell ausgegebenen Parameter gefertigt, um diese im nächsten Schritt auf ihre Haftungseigenschaften zu untersuchen. Dazu wurden Stahlseile zum einen vollständig aus dem Gummi freigelegt, zum anderen wurde eine Restgummischicht mit einer Stärke von ca. 0,5 mm auf den Zugträgern belassen. Als Vorschubgeschwindigkeit ergab sich für den vollständigen Gummiabtrag beispielsweise bei dem verwendeten Gurt und einem eingestellten Wasserdruck von 250 MPa eine Vorschubgeschwindigkeit von 120 mm/min. Das Ergebnis des Gummiabtrags mittels Wasserstrahlverfahren ist in Abb. 5 dargestellt.

Durch die Wasserstrahlbearbeitung besteht besonders bei der vollständigen Freilegung neben dem Risiko der Beschädigung der Zinkschicht auch die Möglichkeit des Auswaschens des Gummis mit dem das Stahlseil durchdrungen ist. Zur Untersuchung dieser beiden Aspekte wurden freigelegte Stahlseile metallografisch präpariert und lichtmikroskopisch ausgewertet. Schliffbilder eines vollständig freigelegten Stahlseils sind exemplarisch in Abb. 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Stahlseil auch nach der Bearbeitung vollständig von Gummi durchdrungen ist. Unter fluoreszierendem Auflicht (rechts) ist zudem die intakte Zinkschicht auf jedem einzelnen Draht deutlich in gelb zu erkennen. Somit wurde das erste Teilziel des Forschungsvorhabens – eine vollständige Freilegung der Stahlseilzugträger ohne deren Schädigung mit einem automatisierbaren Verfahren – erreicht. Es galt im nächsten Schritt die mechanischen Kennwerte der Verbindung zu ermitteln.

Experimentelle Untersuchung der Haftung

Zur Validierung des wasserstrahlgestützten Prozesses zur Verbindungsvorbereitung wird die maximal erzielte Haftung der Neuverbindung zwischen Gummi und Stahlseil als Bewertungskriterium

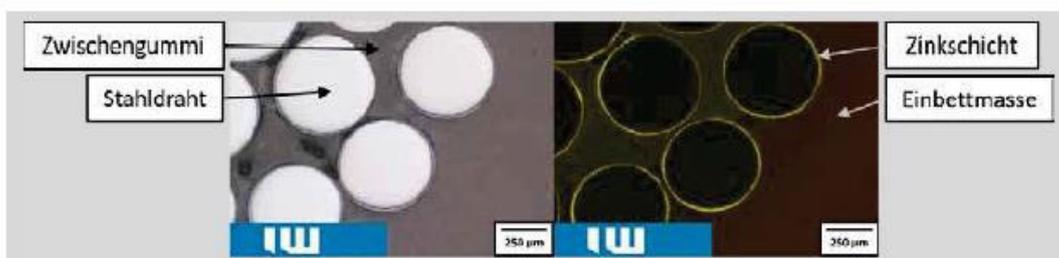


Abbildung 6: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines mittels Wasserstrahl freigelegten Stahlseils; links im Hellfeld, rechts unter Fluoreszenzlicht

Tabelle 1: Ergebnisse der statischen Ausreißversuche

Tabellen Kopf	Stahlseile blank	Stahlseile mit Restgummischicht
Probe 1	11 326 N	15 336 N
Probe 2	12 960 N	16 392 N
Probe 3	12 072 N	16 482 N
Mittelwert	12 119 N	16 070 N
Erzielte Festigkeit von $F_r = 144,5 \text{ N/mm}^2$	84 %	111 %

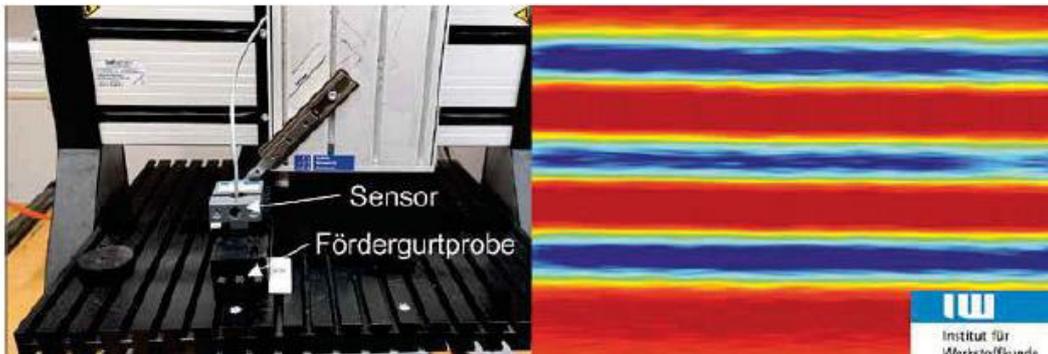


Abbildung 7: Detektion der Stahlseile mit Hilfe eines elektromagnetischen Sensors (links: Versuchsaufbau; rechts: farbcodierte Darstellung der Messwerte zur Visualisierung der Lage der Stahlseile)

herangezogen. Diese Überprüfung erfolgt zunächst statisch nach DIN EN ISO 15236 und anschließend mit einer Zugschwellprüfung nach DIN 22131-3. Hierzu kommen so genannte 3-Seilproben zum Einsatz. Bei den statischen Ausreißversuchen wird ein Stahlseil aus dem Verbund herausgezogen und liefert somit die maximale erzielte Anhaftung zwischen Gummi und Stahlseil. Zusätzlich wird die Kraftübertragung zwischen den Stahlseilen ermittelt, was dem Ver-

halten in einer Fördergurtverbindung entspricht. Die Norm fordert eine maximale Seilaußkraft von

$$F_v = 15 \text{ N} \cdot \text{Seildurchmesser } d + 5 \text{ N/mm}$$

Dies führt zu einer geforderten Verbindungsfestigkeit von 144,5 N/mm für den Gurttyp St 4500 mit einem Seildurchmesser von 9,3 mm. Bei einer Probenlänge von 100 mm ergibt sich eine geforderte Sei-

Schüttgut

ISSN 0946-7939

www.process.de/schuettgut

Kommunikationsdaten unserer Ansprechpartner:
E-Mail-Code (bitte Schreibweise von Umläuten beachten): <vorname><name>@vogel.de; Telefon: +49-931-418-(4-stellige-Durchwahl)

Abonnenten-Service
DataM Services GmbH
Franz-Horn-Str. 2, 97082 Würzburg
Martina Grimm, Tel. +49-931-4170-462,
mgrimmedatam-services.de
www.datam-services.de

Redaktion
Leser-, Redaktionsservice:
Gabriele Ilg (gil)
Tel. +49-931-418-2107
Fax +49-931-418-2750
gabriele.ilg@vogel.de

Redaktionsleitung:
Dipl.-Ing. Sabine Mühlenkamp (msh)
Tel. +49-721-8204118
redaktion.schuettgut@vogel.de

Projektmanager Digital:
Dipl.-Medienw. (FH) Matthias Black (mba), Tel. -2359

Layout:
Ilg, Daniel Grimm, Tel. -2247

Unternehmens- und Produktnamen:
Unternehmens- und Firmennamen schreiben wir gemäß
Duden wie normale Substantive. So entfallen z.B. Groß-
buchstaben und Mittelinitialie in Firmennamen.

Publisher
Gerd Kielburger, Tel. -2536

Sales
Chief Sales Officer:
Matthias Bauer
Sales-Assistance:
Tel. -2215, sales_assistance@vogel.de

Auftragsmanagement:
Tel. -2479, auftragsmanagement@vogel.de

Marketing
Produkt Marketing Manager:
Marlen Wehner, Tel. -2840

Vertrieb
Bezugspreis:
Einzelheft 34,00 €
Abonnement Inland: jährl. 210,00 €
Abonnement Ausland:
jährl. 246,00 € (+ EU-Staaten ggf. 7% Ust.).
Alle Abonnementpreise inklusive Versandkosten.
Bestellungen nehmen der Verlag sowie alle
Buchhandlungen im In- und Ausland entgegen.

Verbreitete Auflage:
Angeschlossen der Informationsgemeinschaft zur Fest-
stellung der Verbreitung von Werbeträgern – Sicherung
der Auflagenwahrheit und EDA, geprüfte Fachzeitschri-
ten Empfänger-Daten-Analyse.

Datenbank:
Die Artikel sind kostenpflichtig über die Wirtschafts-
datenbank GENIOS zu beziehen. www.genios.de

VOGEL COMMUNICATIONS GROUP

Vogel Communications Group GmbH & Co. KG
Max-Planck-Str. 7/9 in 97082 Würzburg
Tel. +49-931-418-0
www.vogel.de

Beteiligungsverhältnisse:
Persönlich haftende Gesellschafterin:
Vogel Communications Group Verwaltungs GmbH
Max-Planck-Str. 7/9 in 97082 Würzburg
Kommanditistin:
Vogel Medien Holding GmbH & Co. KG
Max-Planck-Str. 7/9 in 97082 Würzburg

Geschäftsleitung:
Matthias Bauer (Vorsitz)
Gunter Schönger

Druck:
Vogel Druck und Medienservice GmbH
97204 Hochberg

Copyright:
Vogel Communications Group GmbH & Co. KG

Nachdruck und elektronische Nutzung:
Wenn Sie Beiträge dieser Zeitschrift für eigene
Veröffentlichungen wie Sonderdrucke, Websites,
sonstige elektronische Medien oder Kunden-
zeitschriften nutzen möchten, erhalten Sie
Information sowie die erforderlichen Rechte über
www.mycontentfactory.de oder Manuela Maure,
Tel. +49-931-418-2786.

AUS DER WISSENSCHAFT

lausreißkraft von 14 450 N. Die Ergebnisse der statischen Außerreißversuche sind in Tabelle 1 ausgeführt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass das Belassen einer Restgummischicht zu einer besseren statischen Haftfestigkeit führt und die blanken Stahlseile die geforderte Festigkeit nicht erreichen. Im nächsten Schritt wurden dann die Stahlseile mit Restgummischicht zusätzlich auf ihre dynamische Festigkeit geprüft. Hierbei wird die 3-Seilprobe zyklisch mit einer Geschwindigkeit von 150 mm/min zwischen einer Unter- (F_u) und einer Oberlast (F_o) geprüft. Zwischen jedem Lastwechsel wird eine Haltezeit t_h von einer Sekunde veranschlagt. Die von der Norm geforderten 10 000 Lastzyklen bei einer Last von 35 %, ausgehend von der statischen Festigkeit F_n , wurden von den Proben ausnahmslos erreicht. Somit konnte gezeigt werden, dass die Verbindungsvorbereitung mittels Wasserstrahl die Festigkeitsanforderungen erfüllt. Die

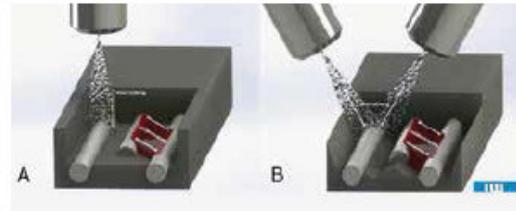


Abbildung 8: Freilegen von Stahlseilen im Fördergurt durch Wasserstrahlen im 2D- (A) und 3D- (B) Bereich

Profilierung der Restgummischicht wurde ebenfalls untersucht, führte jedoch zu keiner nennenswerten Festigkeitssteigerung.

Erstellung eines Anlagenkonzeptes

Die erfolgreiche Verbindungsvorbereitung mittels Wasserstrahl galt es nun, in ein entsprechendes Anlagenkonzept zu überführen. Ein Schwerpunkt ist hierbei die technische Umsetzung zum Detektieren der Stahlseile, um eine automatisierte Prozesssteuerung zu gewährleisten. Erste Voruntersuchungen haben dabei bereits die grundsätzliche Machbarkeit einer Detektion der Zugträger mittels elektromagnetischer Sensorik ergeben (Abb. 7). Das Messverfahren bietet somit die Möglichkeit einer Online-Regelung der Trajektorie.

Um die geforderte Produktivität des Prozesses erreichen zu können, ist die Simultanbearbeitung mit mehreren Düsenköpfen denkbar. Die Verwendung mehrerer Düsen an einer Führungsmaschine ist in der Wasserstrahltechnik gängige Praxis und stellt eine wesentliche Randbedingung für die vorzusehende Pumpentechnik dar. Die Untersuchungen zum Freilegen der Stahlseile wurden mit einer Strahldüse durchgeführt. Die Wasserstrahltechnik bietet sowohl die Möglichkeit der Bearbeitung im 2D- als auch im 3D-Bereich (Abb. 8). Dies kann durch eine gezielte Anordnung der Düsen erfolgen.

Die Ausarbeitung eines vollständigen Anlagenkonzeptes stellt den letzten Arbeitsschritt des Forschungsprojekts dar. Hierbei gilt es zusätzlich eine Absaug- und Trocknungsvorrichtung in das Anlagenkonzept zu integrieren, da verbleibende Feuchtigkeit die erneute Vulkanisierung negativ beeinflusst.

Fazit: Die vorgestellten Ergebnisse zeigen eine mögliche Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten mittels Wasserstrahlverfahren. Die nach Norm geforderte statische und dynamische Haftfestigkeit zwischen Gummi und Stahlseil wurde mithilfe des Verfahrens erreicht. Die Erstellung des Anlagenkonzeptes zeigt die Lösungen einzelner Positionen auf, wie die Seildetektion. Des Weiteren gilt es, die technische Umsetzung der Positionierung und Anzahl der Strahldüsen zu bestimmen, um eine präzise Aussage über die Bearbeitungszeit einer kompletten Fördergurtverbindung treffen zu können. Das Wasserstrahlverfahren bietet die Möglichkeit einer automatisierten Verbindungsvorbereitung von Stahlseil-Fördergurten. Dies schafft die Voraussetzung für eine konstante Verbindungsfestigkeit, unabhängig von der Qualifizierung der bearbeitenden Monteure.

Das IGF-Vorhaben 19262 N der Forschungsvereinigung Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. (FG IFL) wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Autoren



Patrick Riemer: Er schloss 2013 sein Diplomstudium in Maschinenbau an Uni Hannover ab. Seitdem ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Transport und Automatisierungstechnik in der Fachgruppe Transporttechnik. Sein

Forschungsschwerpunkt ist die Auslegung und Optimierung von Fördergurtverbindungen sowohl für Textil- als auch für Stahlseilfördergurte.

Leibniz Universität Hannover
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
An der Universität 2
30823 Garbsen
Tel. +49-511-762-18173
E-Mail: patrick.riemer@ita.uni-hannover.de
Internet: www.ita.uni-hannover.de



Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer: Er ist seit 2001 Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik der Leibniz Universität Hannover.

E-Mail: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de



Markus Mlinaric: Er schloss 2017 sein Masterstudium im Bereich Maschinenbau an der Leibniz-Universität Hannover ab. Seitdem ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Unterwassertechnikum des Instituts für Werkstoffkunde. Sein Schwerpunkt ist das Wasserstrahlschneiden.

E-Mail: mlinaric@iw.uni-hannover.de



Thomas Hassel: Er ist Leiter des Unterwassertechnikums Hannover, welches ein Fachbereich des Instituts für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover ist.

MIT 2016 – 14th International Conference on Management and Innovative Technologies Laboratory for Alternative Technologies, University of Ljubljana, Slovenia

MIT 2016 Conference Proceedings, Fiesca, Slovenia

Automatable splicing method for steel cord conveyor belts – Evaluation of water jetting as a preparation process

D. Zaremba¹, P. Heitzmann², L. Overmeyer², L. Hillems¹ and T. Hassel¹

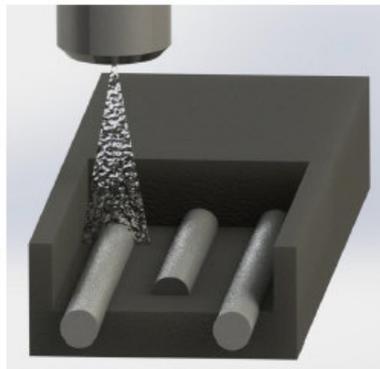
¹ *Institut für Werkstoffkunde (Materials Science), Leibniz Universität Hannover, Germany*

² *Institute of Transport- and Automation Technology, Leibniz Universität Hannover, Germany*

Abstract

The increased demand of mineral resources leads to worldwide application of incessantly longer conveying systems. The length between axes can amount to 15 km and more. Owing to manageable dimensions and weight, appropriate conveyor belts are produced in segments of up to 300 m. Final assembly takes place at the conveyor system, where the multitude of segments is connected to a long conveyor belt. An important point in assembly preparation is the stripping of the steel cords, which is mainly carried out manually using rudimentary techniques. The optimization potential is high, since the adoption of automatable and application-oriented preparation methods can minimize the conveyor downtime and improve the joint quality.

In this study, the application of the pure water jet is investigated, since this selective stripping method offers a lot of potential for automation and the creation of rough surfaces. The objective was to determine if an efficient, homogenous and selective removal of the rubber is possible without damaging the zinc coating of the steel cords. Following a parameter study, the generated kerf geometries and surfaces were investigated. The stripped steel cords and zinc coatings were analyzed through the preparation of micrographs. Concluding, an evaluation about the qualification of water jetting as an automatable method for joint and repair preparation is made.



Keywords:

Steel cord conveyor belts, splicing method, repair preparation, automation, water jetting

1 Steel cord conveyor belt

The belt is one of the most important parts of a conveyor system when it comes to design and investment costs. Due to logistic reasons, the belt can only be transported in segments to the conveyor system, limited by weight or length of the individual segment. The splicing is done directly at the system. In the splice, tensile forces are transferred through the core rubber and not via tension member. This fact makes a splice the weakest point of a conveyor belt. The tension member of a belt can consist of textile fabric or steel cords, depending on the tensile strength of the belt. Steel cord conveyor belts can reach a nominal belt breaking strength up to 10.000 N/mm. Figure 1-1 shows the general structure of a steel cord conveyor belt. [1]

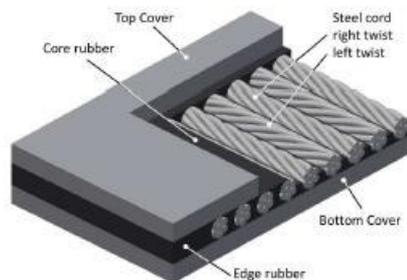


Figure 1-1: Steel cord conveyor belt

The steel cords are covered in core rubber and form the carcass of the belt which is covered by top and bottom cover. The bottom cover transfers the driving forces from drive pulley to the belt. The top cover transports the bulk material and protects the carcass from damages caused by material impacts. The steel cords are right and left twisted and placed alternate next to each. The cords are zinc coated and have a zinc oxide layer on top. Zinc oxide has two effects during the belt fabrication. On the one side, it is a vulcanization accelerator and, on the other hand, it provides the basis for a zinc sulfide layer that occurs during vulcanization process between rubber and steel cords and leads to a better adhesion. [2, 3]

The splicing procedure of a steel cord conveyor belt is performed as follows. First, the splicing area needs preparation. Before assembling the vulcanization press, the new rubber has to be placed into the splice. Then the vulcanization of the splice area completes the splicing procedure. The present preparation process for splicing procedure consists of numerous manually performed steps. The steel cords of both ends of the conveyor belt have to be completely removed from rubber. Therefore, the first step is to remove top and bottom cover with an oscillating cutting edge. To cut the steel cords apart, a stripping machine is used. Then the biggest amount of the core rubber is stripped from the cords with piano wires. As last step, cutting tools are used to remove the remaining amount of rubber and shorten the steel cords to the required length if necessary. Figure 1-2 (A) shows a splicing process. Then the cords have to be placed according to the splice layout, see figure 1-2 (B). Then new core rubber has to be put between the steel cords. The total process is very time consuming due to its low level of automation and considerable number of manual work steps. The splicing quality can be primarily defined through the adhesion between steel cords and core rubber. The fact that the zinc oxide layer of the steel cords is responsible for it, the layer must not be damaged during the preparation of the splicing procedure. To avoid damaging the zinc oxide layer is almost impossible due to the removal of core rubber just by cutting tools. [1]



Figure 1-2: A) Preparation process of a steel cord splice [RI-Belt Sud S.R.L.]; B) Layout of a 3-step steel cord splice

In this study, the application of the pure water jet is investigated, since this selective stripping method offers a lot of potential for automation and the creation of rough surfaces. The objective was to determine if an efficient, homogenous and selective removal of the rubber is possible without damaging the zinc coating of the steel cords.

2 Materials and methods

The investigations were carried out using a segment of an industrial steel cord conveyor belt with a total thickness of $t = 30$ mm. The test material was in new condition. It was vulcanized using "STG type" primer, rubber strips and cover plates (components manufacturer: "Nilos"). The cover plate had a thickness of $t = 15$ mm, the diameter of the subjacent zinc-coated steel cords was $d = 8$ mm. Figure 2-1 shows a sectional view of the test material.



Figure 2-1: Sectional view of the test material

All jetting experiments were carried out using a "Stein Moser WS0707" gantry-style (x, y, z)-guiding machine. The high-pressure pump was a "BFT Servotron 40.37" (max. operating pressure $p_w = 400$ MPa, max. volume flow rate $Q_w = 3.8$ l/min). The high-pressure valve applied was a "BFT WJ070060", modified to include a "Hammelmann" nozzle mount. Three flat-jet nozzles "Hammelmann Type R" with the jet angles $\alpha_1 = 10^\circ$, $\alpha_2 = 20^\circ$ and $\alpha_3 = 30^\circ$ were used alongside with sharp-edged round-jet nozzles "Hammelmann Type I". The nozzle diameter was kept constant with $d_0 = 0.4$ mm. The nozzle coefficients were specified with $k_f = 0.67$ for the flat-jet nozzles and $k_r = 0.70$ for the round-jet nozzle by the manufacturer, respectively. The nozzles allowed for a maximum water pressure of $p = 300$ MPa. Because of the flexible material behavior of the rubber, the achieved kerf-depth- and surface-roughness values were measured optically using fringe projection technology (equipment manufacturer: "GF Messtechnik"), in five positions each respectively.

For a neutral comparison of the material removal profile and -efficiency, the optimum standoff distance was determined for each jet angle α to allow a material removal width of $b = 10$ mm. Following, surface structure and -profile were analyzed. Through different jet disintegration stages are present at the same jet width when using various jet angles, an influence on the material removal profile can be expected. For the round jet nozzle, staggered tool paths were used with variation of the tool path distance. The nozzles with the most promising results were picked for a more detailed parameter investigation, also including multiple material removal iterations. After parameter and procedure optimization, the conveyor belt was stripped down to its steel cords. A micro section was prepared in order to investigate if the formerly applied zinc coating was still intact.

3 Results and discussion

Initial experiments showed that the utilized round jet nozzles did not allow a consistent material removal of the belt rubber. Similar to nozzle types used for cutting applications, they generate a coherent and narrow jet with a characteristically high energy density on a small contact area. Although this kind of nozzle is well suited for precise material removal of other composite materials (e.g. CFRP [4]), the elastic flexibility of the rubber effected a bending of the material away from the jet. This resulted in lamellar surfaces, combined with a comparatively low material removal rate. The results obtained using flat-jet nozzles were considerably better. As expected, different surface profiles were generated dependent on the jet angle. While the flat-jet nozzles with $\alpha_1 = 10^\circ$ and $\alpha_2 = 20^\circ$ produced a straight surface profile with a consistent surface roughness, the surface profile generated by the nozzle with $\alpha_3 = 30^\circ$ was accentuated in the edges and less consistent. Through a furthermore lower material removal rate compared to $\alpha_1 = 10^\circ$ and $\alpha_2 = 20^\circ$, the jet angle of $\alpha_3 = 30^\circ$ did not implicate applicable advantages and was therefore rejected from the following investigations. Figure 3-1 shows a consistent material removal path of a flat jet nozzle with $\alpha_1 = 10^\circ$ and $p = 100$ MPa.

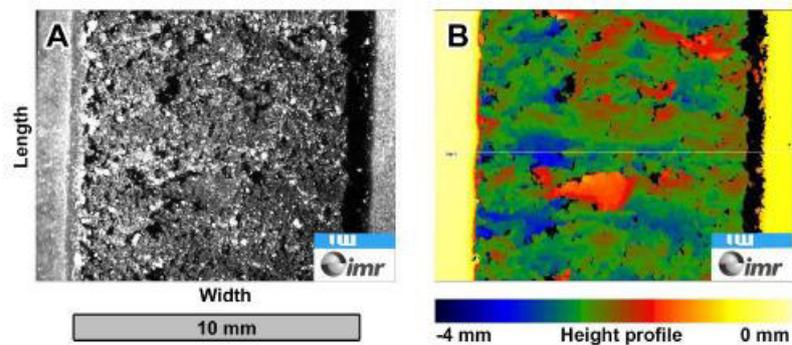


Figure 3-1: Surface topography in camera view (A) and height profile (fringe projection, B) of a material removal path generated by a nozzle with $\alpha_1 = 10^\circ$ and $p = 100$ MPa

As displayed in Figure 3-2, achieved kerf depths for $\alpha_1 = 10^\circ$ were slightly higher than for $\alpha_2 = 20^\circ$. Measured surface roughness was significantly higher for the narrower jet angle. Since higher surface roughness goes along with an increased surface area, this can be advantageous when it comes to priming and splicing. Therefore, a higher surface roughness is generally preferable. A noteworthy fact is that the utilized flat-jet nozzles required a higher water volume flow rate than the stated nozzle coefficient of 0.67 would assume. The available water volume flow rate of $Q_w = 3.8$ l/min was almost consumed at $p = 150$ MPa ($\alpha_1 = 10^\circ$) and $p = 200$ MPa ($\alpha_2 = 20^\circ$). For this reason, the stated pressure levels were set as the maximum values for each test series, respectively. As expected for an appropriate parameter study, kerf depth and surface roughness increase with an elongated contact time (smaller feed rate).

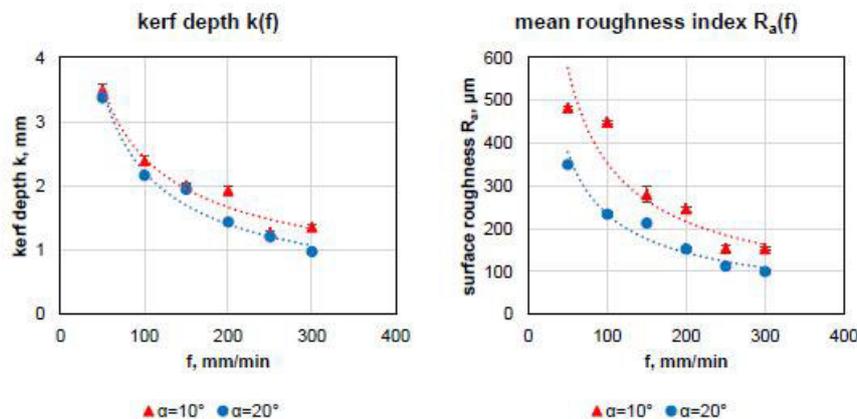


Figure 3-2: Kerf depth k and mean surface roughness index R_a compared to the feed rate f for a kerf width of $b = 10$ mm

As displayed in Figure 3-3 and Figure 3-4, the achievable kerf depth increases straight proportional to the quantity of iterations for both jet angles. Using the test setup, a total of $n = 4$ iterations was necessary to completely remove the top cover and strip the steel cords at a feed rate of $f = 100$ mm/min. For $\alpha_1 = 10^\circ$ a water pressure of $p = 150$ MPa was necessary, for $\alpha_2 = 20^\circ$ a water pressure of $p = 200$ MPa. In both cases, the real water volume flow rate is expected to be similar close to $Q_w = 3.8$ l/min, recognizable by the pump's

maximum workload. Furthermore, it was found that the surface roughness remains constant independent of the iteration quantity. The test equipment allowed for maximum surface roughness values of $R_{a1} = 480.9 \mu\text{m}$ ($\sigma_1 = 5.3 \mu\text{m}$) for $\alpha_1 = 10^\circ$, $p = 150 \text{ MPa}$ and $R_{a2} = 465.7 \mu\text{m}$ ($\sigma_2 = 6.2 \mu\text{m}$) for $\alpha_2 = 20^\circ$, $p = 200 \text{ MPa}$, respectively. Both jet angles were likewise found suitable for the application, with advantages regarding equipment wear which can be expected for the lower necessary pressure at $\alpha_1 = 10^\circ$.

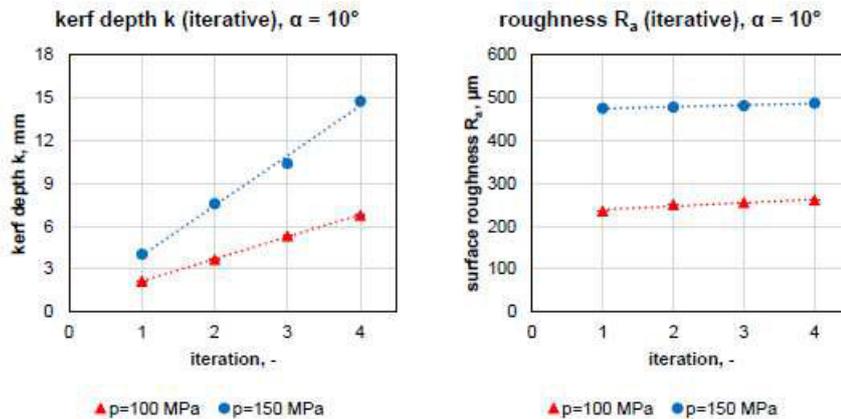


Figure 3-3: Kerf depth k and mean surface roughness index R_a compared to water pressure p for iterative material removal procedure, a jet angle of $\alpha = 10^\circ$ and a feed rate of $f = 100 \text{ mm/min}$

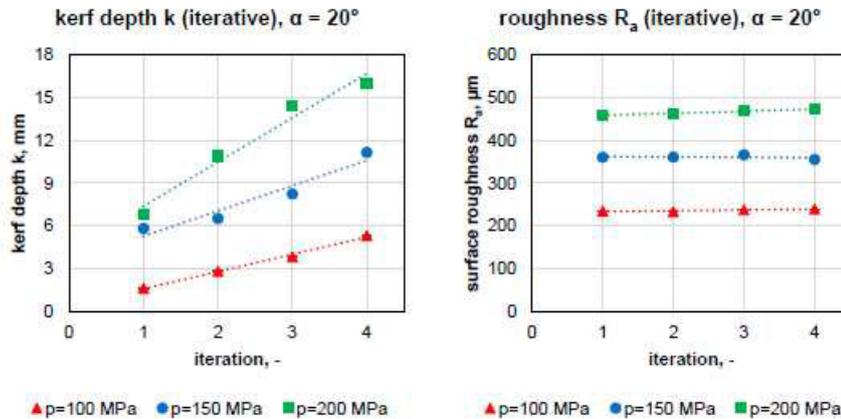


Figure 3-4: Kerf depth k and mean surface roughness index R_a compared to water pressure p for iterative material removal procedure, a jet angle of $\alpha = 20^\circ$ and a feed rate of $f = 100 \text{ mm/min}$

Figure 3-5 shows two photographs after removal of the cover plate and stripping the steel cords by water jetting and following drying by compressed air, as well as a micro-section of a single cord wire. It shows that a deep material removal with sharp, orthogonal and plane-parallel edges is possible with the utilized equipment (Figure 3-5 A). The exposed zinc-coated steel cords do not suffer visible damage (Figure 3-5 B). The prepared micro-section of a stripped cord shows that the galvanized zinc coating is still visible on the waterjet-treated

side (Figure 3-5 C). The thinner coating on the opposite side originates from the wire production method (wire drawing); this appearance can also be found on new condition steel cords.

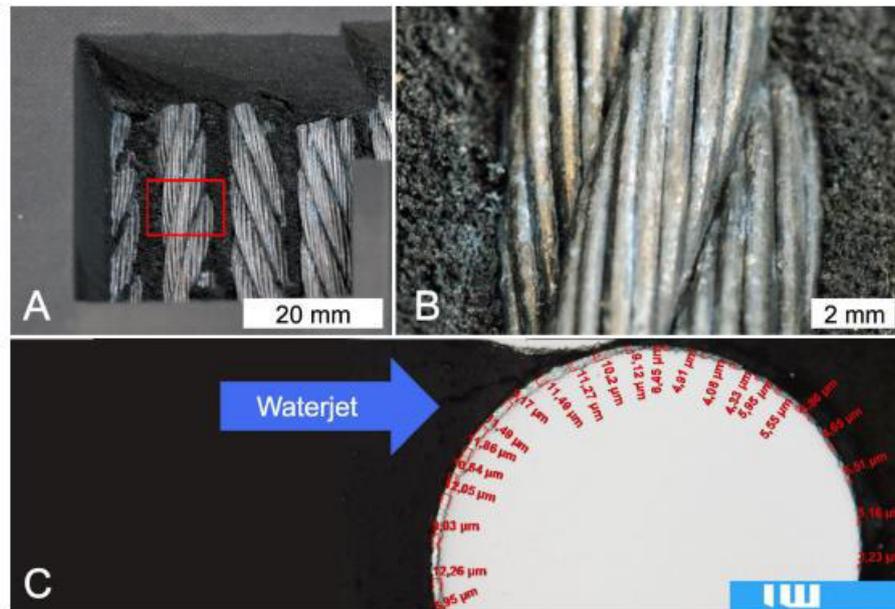


Figure 3-5: Stripped steel cords after iterative removal of the cover plate (A), detail view (B), micro section of a stripped cord with measurements of the zinc coating thickness (C)

4 Conclusions and outlook

Concluded, water jetting is a promising preparation method for the splicing of steel cord conveyor belts that comes along with an excellent potential for automation. Utilizing commercially available pump technology combined with flat-jet nozzles, stripping rubber of the steel cords is easily possible in high quality without visible damage of the zinc coating. The produced rubber surfaces are consistently rough, which comes along with a larger contact surface for following vulcanization processes. Compared to the flat surfaces, which are generated through the conventional preparation techniques as described before, the application of this technology does not only offer a lot of potential to reduce downtime and splicing duration through automation, but also to improve the adhesion quality. The effect on quality and reproducibility of appropriate belt splicing has to be analyzed in further investigations.

Besides the effect on splice quality, the described preparation process offers further improvement opportunities. Material removal rate and surface roughness are further expected to be increased through bigger water volume flow rates, which go along with an increase of hydraulic power. Appropriate technology is available in the market and will be utilized by the authors for further investigations. Considering the behavior of load transmission in a steel cord belt splice, it becomes apparent that it mainly takes place at the lateral cord flanks. Unlike this, the preparation method described in this paper only includes the top- and bottom machining of the belt (cf. Figure 4-1 A). Therefore, future investigations should also include 3D machining processes, cf. Figure 4-1 B. Following the described optimization of the preparation and splicing processes, an application in form of automatable preparation- and splicing machines is likely.

MIT 2016 Conference Proceedings, Fiesa, Slovenia

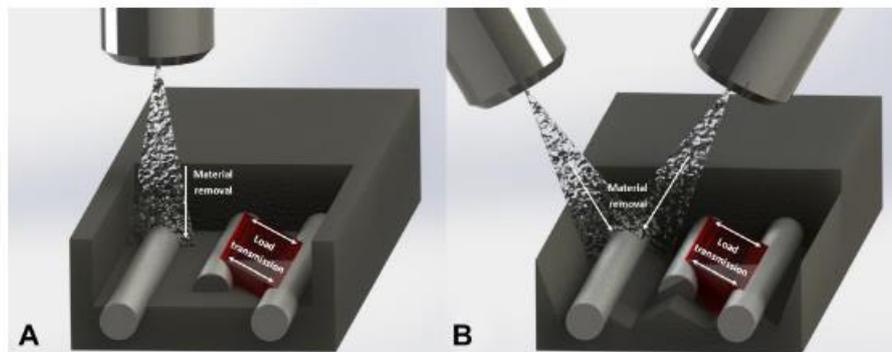


Figure 4-1: Direction of load transmission and material removal for 2D (A) and 3D machining (B)

5 Acknowledgements

The authors thank the Institute of Measurement and Automatic Control (IMR) for providing the fringe projection instrumentation and the German Working Group of Waterjet Technology (AWT) for fruitful discussion.

6 References

- [1] Ziller, T.; Hartlieb, P.: *Fördergurte in der Praxis – Know How and Know Why*, NILOS GmbH & Co. KG, VGE Verlag GmbH, Deutschland, 2010 – ISBN 978-3-86797-105-8
- [2] Sönksen, H.: *Korrosionsschutz von Seilen als Zugträger in Fördergurten*, Dissertation, Universität Hannover, Fakultät für Maschinenbau, 1987
- [3] Rzymiski, W.; Wolska, B.: *Unkonventionelle Vernetzung ausgewählter Elastomere*, GAK – Gummi Fasern Kunststoffe, Dr. Gupta Verlag, 6/2005
- [4] Zaremba, D.; Wachsmuth, S.; Schneider, P.; Hufenbach, W.; Maier, H. J.; Hassel, T.: *Method for the material-specific repair preparation of carbon fiber reinforced plastic structures*. Proceedings of the 22nd International Conference on Water Jetting, Haarlem/NL, Sept. 3-5, 2014
- [5] Spur, G.; Stöferle, T.: *Handbuch der Fertigungstechnik*. Band 4/1, Abtragen/Beschichten. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1987