

Beschichten von Faserseilen großen Durchmessers mittels Ultraschalltauchbadverfahren

Ultrasonic dip coating of fibre ropes with high diameters

**David Häser
Klaus Nendel
Christoph Müller
Markus Helbig**

*Professur Fördertechnik - Arbeitsgruppe Textile Maschinenelemente
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Chemnitz*

Fördertechnische windenbasierte Anwendungen im Kran- oder Schiffswesen mit geforderten Nutzlasten von 5t und darüber stellen enorme Anforderungen an Faserseile. Die Applikation verschleißmindernder Ausrüstungen ist daher für solch anspruchsvolle Anwendungen unumgänglich. Aufgrund des strukturellen Aufbaus von Faserseilen mit großem Durchmesser ist eine vollständige Durchdringung der Beschichtungsmedien in das Faserseil mit konventionellen Mitteln nicht möglich. Hierfür bietet das Ultraschallverfahren eine neue Möglichkeit den Beschichtungseintrag zu verbessern.

[Schlüsselwörter: Faserseile großen Durchmessers, Beschichtungseintrag,, Ultraschalltauchbad, Verschleißminderung bei Faserseilen großen Durchmessers]

Conveyor-technical uses like winch based applications in crane or shipbuilding with payloads of 5tons and above put enormous requests on high-strength fibre ropes. The application of wear-reducing coatings is therefore essential. In cause of the structural design of fibre ropes with high diameters, a complete penetration with coatings is not achievable with conventional coating techniques. Therefore, the coating with the help of Ultrasonic is a new way to improve the penetration of fibre ropes with higher diameters.

[Keywords: high diameter, fibre rope, ultrasonic, penetration, wear-reducing coatings]

1 EINLEITUNG FASERSEILE GROßEN DURCHMESSERS IN DER FÖRDERTECHNIK

Textile Maschinenelemente, wie geflochtene Seile aus hochfesten Polymerfasern bieten aufgrund ihrer Eigenschaften wesentliche Vorteile gegenüber dem klassischen Stahldrahtseil gleichen Nenndurchmessers. Neben geringer Eigenmasse bei hoher Festigkeit zeichnen sie

sich durch gute Biegeeigenschaften sowie Korrosionsbeständigkeit aus. Insbesondere in extrem anspruchsvollen fördertechnischen Anwendungen, wie Winden, Kranen, aber auch hochdynamischen Anwendungen wie Shuttle-Systemen und schnellfahrenden Lastaufzügen können so erhebliche Masse und damit Energieeinsparungen erzielt werden.

Aufgrund des geforderten minimalen Sicherheitsfaktors von 8 und mehr für das Zugmittel in kran- und windenbasierten Anwendungen, ergeben sich Bruchlasten von bis zu 400 kN für die Seilkonstruktion. Als Folge daraus sind trotz des Einsatzes von HM-HT-Materialien Faserseildurchmesser von 20 mm und mehr erforderlich. Aufgrund des anspruchsvollen Belastungskollektivs, kommt dem applizierten Verschleißschutz auf und im Fasereil die Rolle zu, die Einsatzfähigkeit bis zur Ablegefreife möglichst weit hinauszuzögern. Die üblichen Verfahren zur Applikation von Verschleißschutzmitteln bei Faserseilen kleiner Durchmesser bis 12 mm, wie z.B. das Tauchbadverfahren, sind bei größeren Durchmessern nicht anwendbar. Damit kann eine vollständige Durchdringung des Zugmittels nicht gewährleistet werden. Stattdessen ist eine aufwändige Nassappretur der einzelnen Garne bzw. Litzen notwendig, die anschließend zum fertigen Seil verflochten werden. Dieser zusätzliche zeit- und kostenaufwändige Fertigungsschritt soll mit der Anwendung von Ultraschall in der Nassappretur für Faserseile großen Durchmessers zukünftig entfallen.

2 PROBLEME BEIM BESCHICHTEN VON FASERSEILEN GROßER DURCHMESSER

Die vollständige Durchtränkung des Seiles mit dem Beschichtungsmedium ist unbedingt notwendig, da dieses neben dem Verschleißschutz weitere Aufgaben wie Hydrophobierung und UV-Schutz erfüllt. Bei der Beschichtung von Faserseilen großer Durchmesser mit konventio-

nellen Beschichtungsverfahren kommt es dazu, dass nur die äußeren Bereiche des Seilquerschnitts beschichtet werden können, der Kern des Zugmittels jedoch nur unzureichenden Beschichtungseintrag erfährt. Dieser unbenetzte Bereich ist gegenüber Verschleißvorgängen im laufenden Betrieb nur unzureichend geschützt. Im Inneren des Seils entsteht vermehrt Faser-Faser-Reibung. Die dadurch aufgrund der erhöhten reibungsinduzierten Wärme überlagert sich mit weiteren tribologischen Effekten und führt zu einer beschleunigten Degradation der Garne und Litzen im Seilkern. Die Ablegereife des Seils wird früher, als dies bei einer optimalen Applikation von Beschichtungsmitteln der Fall wäre, erreicht.

Die Ursachen für die unzureichende Durchdringung von Faserseilen großer Durchmesser liegen unter anderem in der Viskosität der Beschichtungen begründet. Die Viskosität lässt sich beispielsweise über eine Anpassung der Rezepturen der Beschichtungen anpassen (Einsatz von Silica-/Teflonölen). Ein weiterer Grund ist im strukturellen Aufbau von Faserseilen zu finden. Bei einem Anstieg des Seilquerschnitts erhöhen sich die Anzahl der Litzen in der Seilstruktur und somit auch die Zahl der Zwischenräume, welche sich zwischen den Litzen ausbilden. Diese nur wenige hundertstel Millimeter großen Strukturen verhindern, dass Beschichtungen mit hohen Oberflächenspannungen in die Zwischenräume eindringen können. Bei konventionellen wasserbasierten Beschichtungssystemen wirkt die hohe Oberflächenspannung des Wassers der vollständigen Durchdringung der Seilstruktur entgegen. Ein weiterer Effekt kommt bei dem üblichen, kontinuierlichen Beschichtungsverfahren für Faserseile, dem Tauchbadverfahren, zum Tragen. Hierfür werden die Faserseile endlos im Sinne einer hohen Produktivität mit hohen Durchzugsgeschwindigkeiten durch das Tauchbad geführt. Dabei kommt es zur Ausbildung von Strömungseffekten an der Seiloberfläche, welche eine indirekte Proportionalität zwischen Durchzugsgeschwindigkeit und Eindringtiefe der Beschichtungslösung hervorrufen.

Die genannten Effekte wirken einer optimalen Durchdringung der Faserseile mit großen Durchmessern entgegen (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: unzureichender Beschichtungseintrag in PES-Seil (weißer Kern), Ø 20mm

Diesen störenden Effekten kann mit dem Öffnen der Seilstruktur entgegengewirkt werden. Dafür ist die mechanische Wirkung von Ultraschallwellen auf das Seilgut nutzbar. Der Einsatz von Ultraschall kann unter der Berücksichtigung von Frequenz und weiteren Parametern, wie Schalldruck und Lage der Schalldruckmaxima, verschiedene Wirkungen erzielen. So wird beispielsweise im üblichen Frequenzbereich (30 - 35 kHz) eine Reinigungswirkung von Oberflächen durch die mechanische Wirkung der Ultraschallwellen hervorgerufen. Die mechanische Reinigungswirkung von Ultraschall soll nun auf die Beschichtung von Faserseilen übertragen werden. Hierfür wird ein höherer Bereich des Ultraschallfrequenzbereichs (40 - 140 kHz) genutzt, um mit Hilfe der Wirkung von Ultraschall die Grenzflächeneffekte in den Seilzwischenräumen aufzuheben und das Eindringen der Beschichtung auch bis in die inneren Lagen bei großen Seildurchmessern zu ermöglichen.

2.1 STAND DER TECHNIK FÜR DIE BESCHICHTUNG VON FASERSEILEN GROBER DURCHMESSER

Alle Ansätze zur Beschichtung von Faserseilen großer Durchmesser sind mit der in Abschnitt 2 dargestellten Problematik konfrontiert. Neben dem konventionellen Tauchbadverfahren, mit dem bekannten Kompromiss zwischen optimaler Durchdringung des Seilguts und Durchsatz, gibt es weitere Lösungsansätze.

Das Beschichten des gesamten Seilquerschnitts mittels einer Ringschlitzdüse oder eines Saugbalkens ist bei den genannten Seildurchmessern als unzureichend zu bewerten. Beide Verfahren funktionieren über den Aufbau eines definierten Über- oder Unterdrucks direkt am Seilgut. Bei Seildurchmessern von 20 mm und größer, führt deren Oberflächenbeschaffenheit zu Durchmesserdifferenzen von 1,5 mm und mehr über den gesamten Seilquerschnitt. Die Abdichtung und damit Bereitstellung des definierten Druckmilieus ist nicht gewährleistet. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es nach dem derzeitigen Stand der Technik keine verlässliche Methode bzw. Technik gibt, mit deren Hilfe eine optimale Beschichtung von Faserseilen großer Durchmesser sichergestellt werden kann. Die bisherige Herangehensweise umfasst in zusätzlichen Arbeitsschritten die Beschichtung der einzelnen Litzen, bevor diese zu einem Seil verflochten werden. Selbst hier ist ein optimales Ergebnis nicht gewährleistet, denn aufgrund des Zwirnprozesses wird die Beschichtung an den Umlenkpunkten und den Zwirndurchführungen abgerieben. Dies führt zu lokalen Unterbrechungen der Beschichtung und späteren potenziellen Verschleißherden im gefertigten Seil. Weiterhin führt diese Art der Herstellung zu einer erhöhten Prozessdauer. Dabei entsteht das Problem, dass jeder Litzenstrang (jeweils in S- und Z-Richtung gezwirnte Litzen) einzeln beschichtet werden muss. Da technische Seile meist aus 8 bis 12 Litzen geflochten werden, müssen also 2 Litzenstränge mit der vierfachen bis sechsfachen Länge des

endgültigen Seiles beschichtet werden. Dazu kommt der nicht unerhebliche Reinigungsaufwand an den Flechtmaschinen bei einem notwendigen Artikelwechsel.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die bisherigen bekannten Verfahren zur Beschichtung von Faserseilen großer Durchmesser weder im Hinblick auf die Qualität der Beschichtung noch der Produktivität bzw. Kosteneffizienz genügend Potenzial bieten. Mit Hilfe des Einsatzes von Ultraschall, integriert in den Beschichtungsvorgang bereits fertig produzierter Seile, sollen diese Zielkonflikte aufgehoben werden.

2.2 ULTRASCHALLTAUCHBADVERFAHREN

Ziel des Forschungsprojekts ist es, die Beschichtung von Faserseilen mit großem Durchmesser als In-Line-Prozess darstellen zu können. Das bedeutet, dass bereits anwendungsbereite Seile mit hohem Durchsatz beschichtet werden können und zusätzliche Prozesse, wie das beschichten einzelner Litzen entfallen.

Als Ansatz zur Lösung des Problems der Optimierung der Beschichtung bei gleichzeitig möglichst hoher Durchsatzleistung wurde eine konventionelle Beschichtungseinrichtung, das Tauchbad, mit Ultraschallwandlern bestückt. Hierfür wurde im Vorfeld eine Variantenbe-

trachtung durchgeführt und die Variante mit seitlich außen auf der Wanne angebrachten US-Wandlern ausgewählt. Ziel war es, die bestehende Thermofixieranlage MAGEBA RopeLiner möglichst unverändert nutzen zu können und gleichzeitig einen einfachen Wechsel zwischen dem konventionellen und dem Ultraschalltauchbad zu ermöglichen.

Im Wesentlichen besteht das verwendete System aus einer in der Leistung dem Badvolumen angepassten Generatoreinheit (1000 W), einer Edelstahlwanne (35 l Fassungsvermögen) und darauf außen angebrachten, jeweils gegenüberliegenden US-Wandlern. Diese „Bänke“ sind gleichgeschaltet, sodass sich im Tauchbad eine stehende Welle ausbilden kann. Die Anordnung der Schwinger ist dabei so gewählt, dass die gesamte Wanne als Schwingkörper genutzt wird und somit das hindurchgeführte Seil während der Dauer des Tauchbads mit der sich ausbildenden Ultraschallwellen in Wechselwirkung tritt. Eine optimale Wirkung des Ultraschalls auf das Seilgut wird damit erreicht. Die Generatorleistung ist vollvariabel von 0 -100 % einstellbar ausgeführt. Für die ersten Vorversuche wurden die Ultraschallwandler mit einer festen Frequenz von 40 kHz betrieben. Mit Hilfe weiterer Feinabstimmung und Ergänzung einer neuen Generatoreinheit können 4 weitere Frequenzen angesteuert werden (81/94/100/140 kHz).

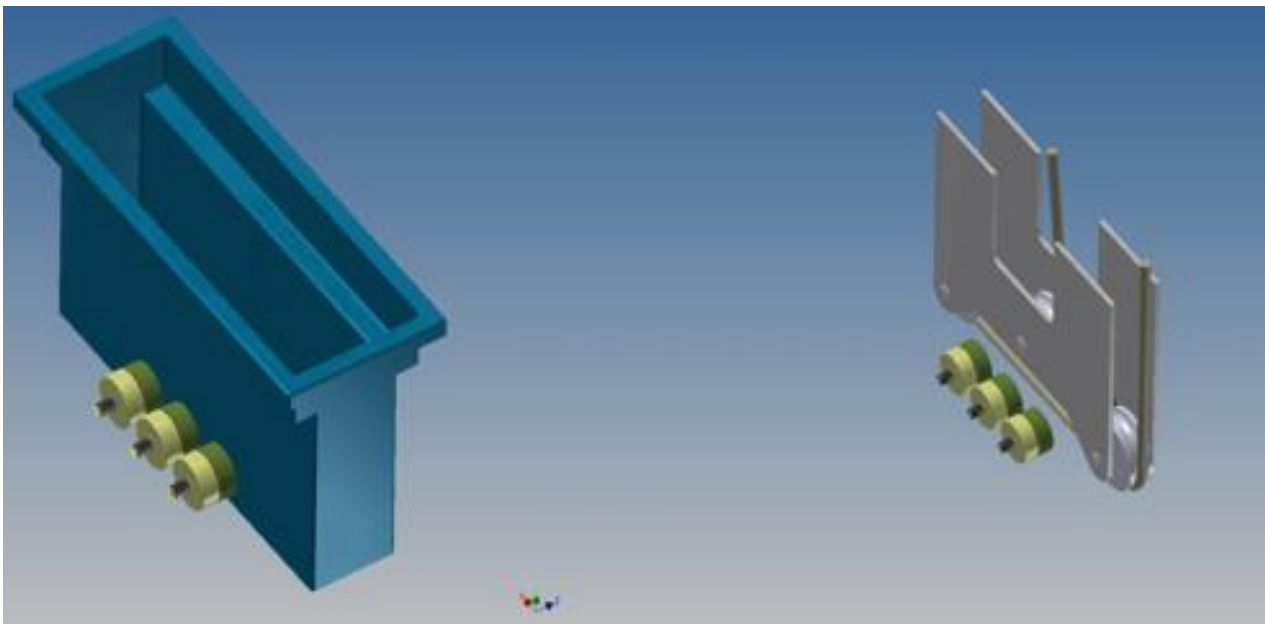


Abbildung 2: links CAD-Entwurf US-Tauchbad, rechts Seilführung mit Seil, Tauchbadwanne ausgeblendet

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Zum Zeitpunkt der hier durchgeführten experimentellen Voruntersuchungen war das System nur in der Lage eine Frequenz von 40 kHz abzubilden. Dennoch ist dies als ausreichend zu betrachten, da hierfür die Wirkung von Ultraschall auf Faserseile untersucht werden soll. Spätere

Anpassungen der Frequenz sind dann für die Optimierung der Beschichtungsleistung zu bewerten.

Für die Untersuchungen wurde die Durchzugsgeschwindigkeit auf der MAGEBA RopeLiner Anlage für jeden Versuch möglichst hoch gewählt. Diese orientiert sich nah am Maximum der Geschwindigkeit der Anlage, um reale Betriebsbedingungen mit kurzen Verweilzeiten des Seilguts im Beschichtungsbecken abzubilden. Das Tauchbad

wurde für jeden Versuch mit der gleichen wasserbasierten Beschichtung befüllt und während der Versuche die Temperatur der Lösung sowie der Füllstand fortwährend kontrolliert. Die Leistung des Generators wurde fortlaufend pro Seilabschnitt in 20 %-Schritten erhöht, um einen Vergleich der Eintragsleistung der Beschichtung zwischen unterschiedlichen Leistungsstufen beurteilen zu können.

Die Bestimmung der Eintragsleistung erfolgte anhand der Wägung der jeweiligen Seilabschnitte im Vergleich zur Nullprobe, das bedeutet das Seil wurde ohne den Einsatz von Ultraschall (Leistung Ultraschall 0 %) beschichtet sowie dem Abgleich mit dem unbeschichteten Seilabschnitt.

Für die Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Faserseilkonstruktionen untersucht. Es handelt sich hier jeweils um Seile mit 20 mm Durchmesser, einem 12-litzigen, gedrehten Polyesterseil sowie einem Seil mit einem Polyesterkern und Polypropylenmantel im 13x9 Wire-lay Design. Als besonders Interessant ist hier vor allem das Mischseil aus PES/PP zu betrachten. Polypropylen neigt aufgrund seiner Eigenschaften zu fast keiner Wasseraufnahme und stellt somit einen besonders schwierigen Fall für die Beschichtung mit wasserbasierten Dispersionen dar.

4 ERGEBNISSE DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN

Nach der erfolgten Beschichtung des Mischseils aus PES/PP und der anschließenden Trocknung wurden die Seilabschnitte mit Hilfe einer Feinwaage mehrmals gemessen. Dabei konnten besonders die Auswirkungen der Effekte, wie bereits in Abschnitt 2 erläutert, auf das Beschichtungsergebnis beobachtet werden.

Der Beschichtungseintrag bewegt sich ohne den Einsatz von Ultraschall am Minimum des zu erwartenden Ergebnisses. Mit Hilfe des Einsatzes von Ultraschall ist jedoch eine Verbesserung der Beschichtungsleistung nachweisbar.

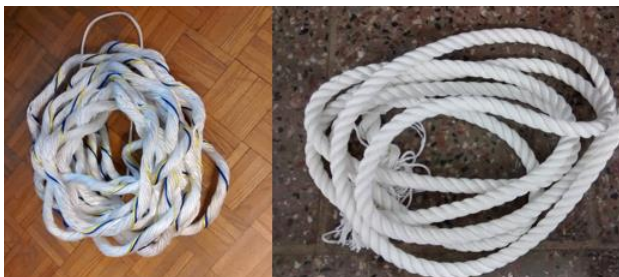


Abbildung 3: links Mischseil aus PES-PP, rechts reines PES-Seil

Die Ergebnisse für das Mischseil aus Polyesterkern und Polypropylenmantel im 13x9 Wire-lay-Design sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse Beschichtungsversuche mit PES-PP-Mischseil

Leistung Ultraschall [%]	Gewicht Seilprobe [g]	Veränderung ggü. Nullprobe [%]	Veränderung ggü. Gewicht unbeschichtetes Seil [%]
Nullprobe	782,5	-	6,02
20	808,6	3,23	9,05
40	796,6	1,77	7,68
60	812,1	3,64	9,44
80	799,1	2,08	7,97
100	797,9	1,93	7,83

Gewicht unbeschichtetes Seil: 735,4 g

Der Hersteller der Beschichtung gibt einen Beschichtungseintrag von 6 – 10 % zusätzlich zum Gewicht der Polyesterfaser an. Vergleicht man die Ergebnisse mit dem unbeschichteten Seilabschnitt, ist trotz des Einsatzes des Ultraschalltauchbads keine weitere Verbesserung gegenüber dem erwarteten Beschichtungseintrag zu erkennen. Allerdings handelt es sich hierbei um ein Mischseil mit Polypropylenkern. Dieses Material neigt aufgrund seiner Eigenschaften generell zu keiner Wasser- und damit Beschichtungsaufnahme. Somit ist eine Verbesserung der Beschichtungsaufnahme nur im 13-litzigen Polyesterseil möglich. Der Seilkern, welcher nur rund 60 % der Seilmasse ausmacht, konnte trotz der bewusst nicht ideal gehaltenen Parameter (großer Seildurchmesser, hohe Durchzugsgeschwindigkeit) nahe am Optimum des erwarteten Beschichtungseintrags beschichtet werden. Weiterhin ist zu erkennen, dass die besten Ergebnisse in der Beschichtungsleistung offenbar nicht mit dem Leistungseintrag in das Ultraschallbad korrelieren. Die besten Ergebnisse konnten bei 20 % und 60 % US-Leistung erzielt werden, während sich die übrigen Leistungsstufen ähnlich im Beschichtungseintrag verhalten. Die während der Beschichtungsversuche kontinuierlich erfolgten Temperaturmessungen im Tauchbad belegen auch einen Temperaturanstieg der Beschichtungslösung, welcher jedoch bei den Leistungsstufen 20 % und 60 % in geringerem Maße erfolgt. Das bedeutet, dass bei den besten Beschichtungseinträgen auch die geringste Ultraschalleistung in Form von Wärme in das Tauchbad abgegeben wurde.

Anschließend konnten die Versuche mit dem reinen, gedrehten Polyesterseil fortgeführt werden. Analog zu den Herstellerangaben sind hier Beschichtungseinträge von 6 – 10 % zusätzlich zum Fasergewicht zu erwarten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse Beschichtungsversuche reines PES-Seil

Leistung Ultraschall [%]	Gewicht Seilprobe [g]	Veränderung ggü. Null- probe [%]	Veränderung ggü. Gewicht unbeschichtetes Seil [%]
Nullprobe	1490,6	-	5,89
20	1492,5	0,13	6,01
40	1494,5	0,26	6,14
60	1504,5	0,92	6,76
80	1498,2	0,51	6,37
100	1562,2	4,58	10,20

Gewicht unbeschichtetes Seil: 1402,8g

Die Versuche mit dem reinen Polyesterseil zeigen ein differenziertes Verhalten gegenüber den Versuchen mit dem Mischseil. Der erwartete Beschichtungseintrag wird bei dem konventionellen Tauchbad leicht unterschritten. Dies stellt einen Beleg für die schwierigen Bedingungen des Beschichtungseintrags bei großen Seildurchmessern in Verbindung mit hoher Durchzugsgeschwindigkeit dar.

Weiterhin ist zu erkennen, dass der Einsatz von Ultraschall nur einen geringen Anteil zur Verbesserung der Eintragsleistung liefert, solange die Leistung des Ultraschallsystems heruntergeregt ist. Die besten Ergebnisse sind hier bei 60% und 100% US-Leistung zu sehen, wobei sich eine deutliche Verbesserung erst bei vollem Leistungseintrag in das Tauchbad einstellt. Die Verbesserung der Eintragsleistung gegenüber der Nullprobe beträgt rund 4,6 %, was trotz der gegebenen Systemgrenzen (Ultraschallfrequenz fest auf 40 kHz eingestellt) und der schwierigen Bedingungen innerhalb des Tauchbads eine bedeutende Verbesserung des Beschichtungsergebnisses darstellt.

Auffällig sind die geringen Unterschiede der Eintragsleistung in den niedrigeren Leistungsstufen. Der starke Anstieg der Eintragsleistung bei 100 % Ultraschalleistung deutet darauf hin, dass die Grenzflächeneffekte, welche dem Beschichtungseintrag entgegenwirken, erst damit überwunden werden können. Die Ergebnisse in der Eintragsleistung in das Seil decken sich auch mit den Temperaturmessungen des Tauchbads während der Versuchsdurchführung. Eine Übersicht der während der Versuchsreihen erfolgten Temperaturmessungen zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Temperatur US-Tauchbad während der Versuche

Leistung Ultraschall [%]	gemessene Temp. Tauch- bad Mischseil PES/PP [°C]	gemessene Temp. Tauch- bad PES-Seil [°C]
0	22,5	22,7
20	23,0	23,6
40	23,3	23,6
60	23,0	23,4
80	23,4	23,6
100	23,4	23,3

höchster Beschichtungseintrag erreicht:

Trotz der unterschiedlichen Ergebnisse für das Mischseil sowie das reine Polyesterseil, ist ein Zusammenhang zwischen dem bestmöglichen Eintrag in das Seil und der Temperaturentwicklung im Tauchbad erkennbar. Es folgt daraus, dass umso geringer die Temperaturentwicklung im Tauchbad ausfällt, eine höhere Eintragsleistung in die Seilstruktur zu erwarten ist. In weiteren, zukünftig noch folgenden Versuchen mit variablen Frequenzen ist dieser hier erkennbare Zusammenhang weiter zu verifizieren und zu differenzieren.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Mit den durchgeführten Versuchen ist es gelungen, die Wirksamkeit von Ultraschall auf den Beschichtungseintrag in Faserseile nachzuweisen. Der dafür genutzte Versuchsaufbau ist trotz der Systemgrenzen bereits in der Lage, die Eintragsleistung in Faserseile großer Durchmesser im besten Fall bereits um fast 5 % zu verbessern. Mit einer Erweiterung des Frequenzbands sind hier noch zukünftig weitere Verbesserungen zu erwarten.

Ziel ist es, mit Hilfe umfangreicher Versuchsreihen einen optimierten Beschichtungseintrag für verschiedene Faserseilkonstruktionen großer Durchmesser zu erreichen und somit ein zukünftiges In-Line fähiges System für Seilbeschichtungsanlagen bereitzustellen.

