

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19598 BG

Thema

Lebensdauer und Wickelverhalten kunststoffummantelter Drahtseile

Berichtszeitraum

01.08.2017 bis 31.05.2020

Forschungsvereinigung

Gemeinschaftsausschuss Kaltumformung e.V.

Forschungseinrichtungen

Forschungsstelle 1:

Technische Universität Dresden
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Professur für Technische Logistik
01062 Dresden

Dresden, 30.10.2020

Ort, Datum

Unterschrift Projektleiter der
Forschungseinrichtung

Forschungsstelle 2:

Technische Universität Clausthal
Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen
Robert-Koch-Straße 32
38678 Clausthal-Zellerfeld

Clausthal, 30.10.2020

Ort, Datum

Unterschrift Projektleiter der
Forschungseinrichtung

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	8
Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	9
Einleitung	12
Ergebnisse	14
AP 1: Auswahl und Beschaffung Forschungsstellen 1 & 2.....	14
AP 2: Grundlagenversuche Forschungsstelle 1	15
AP 2.1 Parameter Dauerbiegeversuche.....	16
AP 2.3 Durchführung Dauerbiegeversuche.....	17
AP 2: Grundlagenversuch Forschungsstelle 2.....	33
AP 2.2 Parameter Spulversuche Mehrlagenwicklung.....	33
AP 2.4 Durchführung Spulversuche Mehrlagenwicklung.....	35
AP 3: Modellversuche querbelastetes Seil Forschungsstelle 1	51
AP 3.1 Messung Dehnung, plastische Verformung	51
AP 3: Modellversuch querbelastetes Seil Forschungsstelle 2	54
AP 3.2 Messung Querelastizität, Schädigung Ummantelung	54
AP 4: FE-Modell Forschungsstelle 1.....	65
AP 4.2 Ermittlung Werkstoffkennwerte Draht	66
AP 4.3 Analyse der Seilkonstruktion, Geometriemodell	67
AP 4.4 FE-Modell Beanspruchung	73
AP 4: FE-Modell Forschungsstelle 2.....	76
AP 4.1 Ermittlung Werkstoffkennwerte Ummantelung.....	77
AP 4.3 Analyse der Seilkonstruktion, Geometriemodell	79
AP 4.5 FE-Modell Querelastizitätsbestimmung	82
AP 5: FE-Simulation Forschungsstelle 1	88
AP 5.1 Beanspruchung Seildrähte	88
AP 5: FE-Simulation Forschungsstelle 2	99
AP 5.2 Parametervariation Seilummantelung.....	99
AP 6: Anwendungshinweise Forschungsstelle 1.....	102
AP 6.1 Lebensdauerabschätzung	102
AP 6: Anwendungshinweise Forschungsstelle 2.....	106
AP 6.2 Auslegung Seiltrieb	106
AP 7: Abschlussbericht Forschungsstelle 1 & 2.....	109

Verwendung der Zuwendung.....	110
Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)	110
Geräte	111
Leistungen Dritter	111
Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	111
FST 1: Professur für Technische Logistik der TUD	111
FST 2: Institut für Maschinenwesen der TUC.....	111
Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse	112
Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	114
Literaturverzeichnis	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt der Projektseile.....	14
Abbildung 2: Seilvarianten.....	15
Abbildung 3: Seiltriebsschema des Seilprüfstandes an der TU Dresden.....	15
Abbildung 4: Versuchsplan Dauerbiegewechselversuche TU Dresden.....	16
Abbildung 5: Gemessene Durchmesserreduzierung während des Dauerbiegeversuchs.....	18
Abbildung 6: Gemessene Seildehnung während des Dauerbiegeversuchs.....	19
Abbildung 7: Drahtbruchentwicklung während des Dauerbiegeversuchs.....	19
Abbildung 8: Messdaten der magnet-induktive Seilprüfung.....	21
Abbildung 9: Drahtbruchverteilung Dauerbiegeversuch V18.....	22
Abbildung 10: Vergleich des Zustandes der Kunststoffummantelung.....	22
Abbildung 11: Ergebnisse Lebensdauer $D/d_U = 16$; $S = 15$ kN.....	23
Abbildung 12: Ergebnisse Lebensdauer $D/d_U = 18$; $S = 15$ kN.....	23
Abbildung 13: Ergebnisse Lebensdauer $D/d_U = 20$; $S = 15$ kN.....	24
Abbildung 14: Ergebnisse Lebensdauer $D/d_U = 16$; $S = 22,4$ kN.....	24
Abbildung 15: Ergebnisse Lebensdauer $D/d_U = 18$; $S = 22,4$ kN.....	25
Abbildung 16: Ergebnisse Lebensdauer $D/d_U = 20$; $S = 22,4$ kN.....	25
Abbildung 17: Seilvariante 1 – Vergleich D/d -Verhältnis; $S = 15$ kN.....	26
Abbildung 18: Seilvariante 1 – Vergleich D/d -Verhältnis; $S = 22,4$ kN.....	26
Abbildung 19: Seilvariante 1 – Vergleich Laststufen.....	26
Abbildung 20: Seilvariante 2 – Vergleich D/d -Verhältnis; $S = 15$ kN.....	27
Abbildung 21: Seilvariante 2 – Vergleich D/d -Verhältnis; $S = 22,4$ kN.....	27
Abbildung 22: Seilvariante 2 – Vergleich Laststufen.....	27
Abbildung 23: Seilvariante 3 – Vergleich D/d -Verhältnis; $S = 15$ kN.....	28
Abbildung 24: Seilvariante 3 – Vergleich D/d -Verhältnis; $S = 22,4$ kN.....	28
Abbildung 25: Seilvariante 3 – Vergleich Laststufen.....	29
Abbildung 26: Vergleich Drahtbruchentwicklung bei Seilvariante 2 und 3.....	29
Abbildung 27: Drahtbrüche an den Außenlitzen der Prüfseile.....	30
Abbildung 28: Prozentualer Anteil sichtbarer Drahtbrüche; Laststufe $S = 15$ kN.....	32
Abbildung 29: Prozentualer Anteil sichtbarer Drahtbrüche; Laststufe $S = 22,4$ kN.....	33
Abbildung 30: Versuchsmatrix für den Spulprüfstand.....	34
Abbildung 31: Trommel 1 $D/d = 24$ und Trommel 2 $D/d = 18$	34
Abbildung 32: Anordnung der Kreuzungs- und Parallelbereiche auf einer Seiltrommel.....	35
Abbildung 33: Spulprüfstand mit elektrischen Antrieben.....	36
Abbildung 34: Wickelbilde für Kunststoff 1 und Kunststoff 2.....	36
Abbildung 35: Aufbau des Wickelpaktes bei 25 kN Zugkraft.....	37
Abbildung 36: Deformation der zweiten und der vierten Lage nach zweimaligem spulen auf der Seiltrommel $D/d = 18$	37
Abbildung 37: Schäden im Kreuzungsbereich bei einer Prüflast von 25 kN an Seilvariante 1... 38	38
Abbildung 38: Kunststoffmantel nach 20-maligem spulen bei 25 kN und $D/d = 25$	38
Abbildung 39: Schaden im Kreuzungsbereich bei einer Prüflast von 25 kN an Seilvariante 2... 39	39
Abbildung 40: Offener Kunststoffmantel im Kreuzungsbereich bei Auflage auf der Seiltrommel.....	39
Abbildung 41: Verschiebung des Kreuzungsbereichs bei der Prüflast 25 kN.....	39
Abbildung 42: Deformiertes Prüf- und Faserseil im Parallelbereich der Mehrlagenwicklung.....	40
Abbildung 43: Sechseckig deformierter Kunststoffmantel im Parallelbereich einer höheren Lage.....	40

Abbildung 44: Aufstiegsbereich der 3. in die 4. Lage mit den drei Schädigungsarten an der letzten vollen Umschlingung, am austiegenden Seil und nach der ersten vollen Umschlingung im Kontakt mit dem aufsteigenden Seil.....	41
Abbildung 45: Geschädigtes Seil durch fehlenden Bordscheibenkontakt auf der Trommel.....	42
Abbildung 46: Grat am Seil im Detail und mit Maßstab.....	42
Abbildung 47: Auswirkungen eines Wickelfehlers durch einen Grat in der unteren Lage	43
Abbildung 48: Schädigung des Kunststoffmantels bei 25 kN Prüfkraft durch Wickelfehler	43
Abbildung 49: Maxwell-Modell und Kelvin-Voigt-Modell.....	45
Abbildung 50: Zusammenhang zwischen der Spannung, Dehnung und Beanspruchungsdauer auf PE-HD (Kunststoffvariante 2) bei 20 °C	45
Abbildung 51: Unverformte und theoretisch maximal deformierte Seilquerschnitte im Parallel- und Kreuzungsberiech.....	47
Abbildung 52: Kräfte im Aufstiegsbereich als Ursache für mehrachsigen Spannungszustand ..	48
Abbildung 53: Wickelbild nach 550 Spulvorgängen von Kunststoff 2 bei einem D/d-Verhältnis von 24 und einer Prüflast von 10 kN.....	50
Abbildung 54: Kalibriertes Basisdrahtseil.....	51
Abbildung 55: Querdruckversuche	52
Abbildung 56: Messdaten Querdruckprüfung.....	52
Abbildung 57: Äußerer Zustand nach Querdruckprüfung; Seilvariante 2; F = 75 kN	53
Abbildung 58: Innerer Zustand nach Querdruckprüfung; Seilvariante 2; F = 75 kN.....	53
Abbildung 59: Verlauf der Pressung zwischen Seil und Seilscheibe	54
Abbildung 60: Seilzugprüfstand; Hauptzylinder zur Aufbringung der Seilkraft und zusätzlicher Zylinder zur Aufbringung der Querkraft.....	55
Abbildung 61: Längselastizitätsversuch.....	55
Abbildung 62: Prinzipieller Aufbau des Querelastizitätsversuchs.....	56
Abbildung 63: Pyramidenförmige Anordnung der Seile (Parallelbereich) für zwei Lagen und für drei Lagen rechts.....	56
Abbildung 64: Säulenförmige Anordnung der Seile (Kreuzungsbereich) für zwei Lagen und für drei Lagen rechts.....	57
Abbildung 65: Prinzipieller Versuchsaufbau zur experimentellen Simulation der belasteten Seilkreuzung in der Mehrlagenwicklung.....	57
Abbildung 66: Mobiler Querprüfgerät mit Prüfbacken zur Untersuchung der Widerstandsfähigkeit des Mantels gegen Querdruck	58
Abbildung 67: Querelastizitätsmodul Seilvariante 3, eine Lage.....	59
Abbildung 68: Boxplot des Vergleichs der Querelastizitätsmoduln der verschiedenen Seile.....	60
Abbildung 69: Keilwinkel Gamma	61
Abbildung 70: Boxplot des Vergleichs der Querelastizitätsmoduln der unterschiedlichen Anordnungen in zwei Lagen	62
Abbildung 71: Beschädigungen in Folge des durch die Querkraft belasteten Seil/Seil-Kontakts	63
Abbildung 72: Beschädigungen in Folge des durch relevante Querkraft belasteten Seil/Seil-Kontakts	64
Abbildung 73: Aufnahme Laser-Scanning-Mikroskop von Seilvariante 1	64
Abbildung 74: Höhenprofil der Aufnahme von Seilvariante 1	64
Abbildung 75: Aufnahme Laser-Scanning-Mikroskop von Seilvariante 2	65
Abbildung 76: Höhenprofil der Aufnahme von Seilvariante 2	65
Abbildung 77: Wickelradien Warrington-Seale-Litze	68
Abbildung 78: Diskretisierung des Drahtquerschnittes.....	69

Abbildung 79: Kunststoffummantelung im FE-Modell	69
Abbildung 80: Bereiche der Kontaktdefinition der Drähte einer 26WS-Litze.....	70
Abbildung 81: Bereiche der Kontaktdefinition zwischen Seil und Scheibe	70
Abbildung 82: Querschnitt des Rundlitzenseils mit Verseilarten	71
Abbildung 83: Vollständig diskretisiertes Drahtseilmodell mit strukturiertem Gitter	71
Abbildung 84: Modellierung der Ummantelung für Litzenseil	72
Abbildung 85: Bereiche der Kontaktdefinition im Rundlitzenseil.....	72
Abbildung 86: Wirkung des Schnürdrucks auf ein Seil.....	73
Abbildung 87: Randbedingungen der Seildrähte	74
Abbildung 88: Beanspruchung des Seiles in der Rille.....	75
Abbildung 89: Kraffteinleitung der Streckenlast in die Scheibe	75
Abbildung 90: Einspannung und Zugkraffteinleitung.....	76
Abbildung 91: Querkraffteinleitung	76
Abbildung 92: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungskurven der Kunststoffe 1 und 2 ..	77
Abbildung 93: Spannungs- Dehnungs-Diagramm von Kunststoff 1	78
Abbildung 94: Spannungs- Dehnungs-Diagramm von Kunststoff 2	79
Abbildung 95: Spannungs-Dehnungsverlauf von dem verwendeten Polyurethan	79
Abbildung 96: Definition einer einfachen Helix.....	80
Abbildung 97: Kerndraht mit einem in einer einfachen Helix geschlagenen Draht und Kernlitze mit weiterem Draht in einfacher Helix	80
Abbildung 98: Definition doppelter Helices	81
Abbildung 99: Kernlitze mit weiterem Draht in einfacher Helix und zusätzlichem Draht in doppelter Helix und kompletter Seilkern mit einer Außenlitze	81
Abbildung 100: Vollständiges IWRC Seil und Seil mit Prüfbacken für Querelastizitätsversuch	82
Abbildung 101: Kurzes CAD-Modell des Seils mit Querelastizitätsprüfbacken und vernetztes FE-Modell mit Angabe der aufgebrachtten Randbedingungen.....	82
Abbildung 102: Einzelner vernetzter Draht; Kantenlänge eines Elements ca. 0,1 mm	83
Abbildung 103: Vereinfachtes Modell des Modellversuchs „Querkraft auf Seilkreuzung“	83
Abbildung 104: Längsdeformation in mm unter aufgebrachtter Längslast nach dem ersten Lastschritt und die Gesamtdeformation in mm nach dem zweiten Lastschritt unter Längs- und Querkraft	84
Abbildung 105: Vergleich von Experiment und Simulation der Längsdehnung und der Längssteifigkeit	85
Abbildung 106: Vergleich von Experiment und Simulation der Querdeformation und der Quersteifigkeit E_{SQ}	86
Abbildung 107: Maximale Scherspannung für Kunststoff 1, Kunststoff 2 und thermoplastisches Polyurethan normiert auf die Zugfestigkeit.....	87
Abbildung 108: Druckspannungsvergleich Einfachlitze.....	90
Abbildung 109: Druckspannungsvergleich Parallelschlaglitze 26WS	91
Abbildung 110: Druckspannungsvergleich 6x7-Litzenseil	92
Abbildung 111: Druckspannungsvergleich 6x26WS-Litzenseil.....	93
Abbildung 112: Spannungsverteilung in der Einfachlitze infolge von Zugbelastung	94
Abbildung 113: Spannungsverlauf durch das Modell der Einfachlitze bei Zugbelastung	95
Abbildung 114: Spannungsverteilung in der Einfachlitze infolge von Zug- und Querbeltung .	95
Abbildung 115: Spannungsverlauf durch das Modell der Einfachlitze bei Zug- und Querbeltung.....	96
Abbildung 116: Spannungsverteilung im 6x7-Litzenseil infolge von Zugbelastung.....	97
Abbildung 117: Spannungsverlauf durch das Modell des 6x7-Litzenseiles bei Zugbelastung ...	97

Abbildung 118: Spannungsverteilung im 6x7-Litzenseil infolge von Zug- und Querbelastung...	98
Abbildung 119: Spannungsverlauf durch das Modell des 6x7-Litzenseiles bei Zug- und Querbelastung.....	98
Abbildung 120: Maximale Schubspannungen, Dehnungen und Kontaktbreiten über den Elastizitätsmodul	100
Abbildung 121: Vergleich zwischen der komplexen und der vereinfachten Seilgeometrie	101
Abbildung 122: Kontaktellipse des Außendrahtes im Modell der Einfachlitze	103
Abbildung 123: Äußerer Kontaktbereich im Modell des 6x7-Litzenseiles	104
Abbildung 124: Innerer Kontaktbereich im Modell des 6x7-Litzenseiles.....	104
Abbildung 125: Kreuzungsbereich mit Auflaufkeil zur Unterstützung beim Aufsteigen und Parallelbereich mit Auffüllkeilen zur Abstützung der oberen Lage	107
Abbildung 126: Auflaufkeile für die Unterstützung von Faserseilen	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchgeführte Dauerbiegeversuche an der TU Dresden	17
Tabelle 2: Versuchsergebnisse konventionelle Prüfseile (Seilvariante 3)	20
Tabelle 3: Versuchsergebnisse Seilvariante 1 (Kunststoff transparent)	20
Tabelle 4: Versuchsergebnisse Seilvariante 2 (Kunststoff schwarz)	21
Tabelle 5: Nachuntersuchung Innenschädigung	31
Tabelle 6: Auswertung der Nachuntersuchung für Seilvariante 1	31
Tabelle 7: Auswertung der Nachuntersuchung für Seilvariante 2	31
Tabelle 8: Auswertung der Nachuntersuchung für Seilvariante 3	32
Tabelle 9: Trommeln für mehrlagen Wickelversuch	34
Tabelle 10: Wickelradien für jede Lage	37
Tabelle 11: Anzahl der Spulzyklen für die unterschiedlichen Seiltrommeln und Prüflasten	49
Tabelle 12: Querelastizitätsmodul Seilvariante 3, eine Lage	58
Tabelle 13: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 1 zu Seilvariante 3, eine Lage	59
Tabelle 14: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 2 zu Seilvariante 3, eine Lage	59
Tabelle 15: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 1 Pyramide zu Stapel, zwei Lagen ..	61
Tabelle 16: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 2 Pyramide zu Stapel, zwei Lagen ..	61
Tabelle 17: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 3 Pyramide zu Stapel, zwei Lagen ..	61
Tabelle 18: Materialkenndaten	66
Tabelle 19: Seildaten	67
Tabelle 20: Werkstoffkennwerte der beiden untersuchten Kunststoffe	77
Tabelle 21: maximale Schubspannungen und Festigkeiten bei linearem Materialmodell	87
Tabelle 22: Auftretende Schubspannungen und Dehnungen bei der maximal aufgebracht Querkräften	88
Tabelle 23: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells Einfachlitze	89
Tabelle 24: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells Parallelschlaglitze ..	90
Tabelle 25: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells 6x7-Litzenseiles	91
Tabelle 26: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells 6x26WS-Litzenseiles	92
Tabelle 27: Auswertung der FE-Simulationen der Einfachlitze	96
Tabelle 28: Auswertung der FE-Simulationen des 6x7-Litzenseiles	98
Tabelle 29: Einfluss des E-Moduls auf die Beanspruchung [Neu 20]	100
Tabelle 30: Variierte Manteldicke mit den resultierenden Spannungen und Dehnungen	101
Tabelle 31: Reduktion der maximalen Beanspruchung des Außendrahtes	102
Tabelle 32: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“	103
Tabelle 33: Reduktion der maximalen Spannung am Modell des 6x7-Litzenseiles	104
Tabelle 34: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“ im äußeren Kontaktbereich	105
Tabelle 35: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“ im inneren Kontaktbereich	105

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Bedeutung	Einheit
A	Werkstoffabminderungsfaktor	-
A_{real}	Metallischer Seilquerschnitt	mm^2
d	Nenn Durchmesser Drahtseil	mm
d_{ij}	Einzeldrahtdurchmesser (i = Litzenlage, j = Drahtlage)	mm
d_K	Nenn Durchmesser konventionelles Drahtseil	mm
d_U	Nenn Durchmesser ummanteltes Drahtseil	mm
D	Durchmesser Seilscheibe/Seiltrommel im Rillengrund	mm
D_B	Durchmesser der Bordscheibe	mm
e	Steigung der Rillung	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm^2
E_K	Elastizitätsmodul Kunststoff	N/mm^2
E_S	Elastizitätsmodul Stahl	N/mm^2
E_{SL}	Längselastizitätsmodul des Seiles	N/mm^2
E_{SQ}	Querelastizitätsmodul des Seiles	N/mm^2
F	Kraft	N
F_Q	Seilquerkraft	N
F_S	Seillängskraft	N
g	Streckenlast an der Seilscheibe	N/m
G	Schubmodul	N/mm^2
K	Festigkeitskennwert	-
K_{lp}	Spannungsverhältnis der unterschiedlichen Seilanordnungen	-
k_q	Querspannungsverhältnis	-
l_D	Schlaglänge Draht	mm
l	Lagenanzahl	-
l_{meas}	Messlänge des Prüfaufbaus	mm
l_L	Schlaglänge Litze	mm
L	Länge des Trommelmantels	mm
n_i	Anzahl Außenlitzen	-
N	Biegewechselzahl	-
$N_{ak}^{3\%}$	Biegewechselzahl bis zum Litzenbruch; konventionelles Seil; Außenkontakt	-
$N_{aU}^{3\%}$	Biegewechselzahl bis zum Litzenbruch; ummanteltes Seil; Außenkontakt	-
$N_{ak}^{(Z) 10\%}$	Biegewechselzahl bis zur Ablegereife; konventionelles Seil; Außenkontakt	-
$N_{aU}^{(Z) 10\%}$	Biegewechselzahl bis zur Ablegereife; ummanteltes Seil; Außenkontakt	-
$N_{ik}^{3\%}$	Biegewechselzahl bis zum Litzenbruch; konventionelles Seil; Innenkontakt	-
$N_{iU}^{3\%}$	Biegewechselzahl bis zum Litzenbruch; ummanteltes Seil; Innenkontakt	-
$N_{ik}^{(Z) 10\%}$	Biegewechselzahl bis zur Ablegereife; konventionelles Seil; Innenkontakt	-
$N_{iU}^{(Z) 10\%}$	Biegewechselzahl bis zur Ablegereife; ummanteltes Seil; Innenkontakt	-
r	Rillenradius Seilscheibe	mm

Zeichen	Bedeutung	Einheit
R_d	Radius Draht	mm
R_e	Streckgrenze	N/mm ²
R_L	Radius Litze	mm
R_{ij}	Wickelradius (i = Litzenlage, j = Drahtlage)	mm
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
S	Seilkraft	N
u	Umschlingungsanzahl	-
α	Kreuzungswinkel oder Schlagwinkel Draht	°
β	Schlagwinkel Litze	°
γ	Keilwinkel	°
Δd	Durchmesserreduzierung	mm
ΔF_Q	Kraftdifferenz	N
Δl	Längenänderung	mm
Δr	Wickelradiuszunahme	mm
$\Delta N_a^{3\%}$	Änderung Biegewechselzahl bis Litzenbruch; Außenkontakt	-
$\Delta N_a^{(Z) 10\%}$	Änderung Biegewechselzahl bis Ablegereife; Außenkontakt	-
$\Delta N_i^{3\%}$	Änderung Biegewechselzahl bis Litzenbruch; Innenkontakt	-
$\Delta N_i^{(Z) 10\%}$	Änderung Biegewechselzahl bis Ablegereife; Innenkontakt	-
$\Delta \sigma_3$	Änderung dritte Hauptspannung	N/mm ²
$\Delta \sigma_{da}$	Änderung Druckspannung außen	N/mm ²
$\Delta \sigma_{di}$	Änderung Druckspannung innen	N/mm ²
ε	Dehnung	%
$\dot{\varepsilon}$	Dehnungsgeschwindigkeit	1/s
ε_{ing}	Ingenieursdehnung	%
ε_L	Längsdehnung	%
ε_m	Dehnung bei Zugfestigkeit (Kunststoff)	%
ε_Q	Querdehnung	%
ε_{tb}	Nominelle Bruchdehnung (Kunststoff)	%
μ	Reibwert	-
μ_s	Reibwert Seil/Seil-Kontakt	-
ν_K	Querkontraktionszahl Kunststoff	-
ν_S	Querkontraktionszahl Stahl	-
σ	Spannung	MPa
$\sigma_{1,2,3}$	Hauptspannung	MPa
σ_3	Dritte Hauptspannung	MPa
σ_b	Bruchspannung (Kunststoff)	MPa
σ_{daK}	Druckspannung konventionelles Seil; Außenkontakt	MPa
σ_{daU}	Druckspannung ummanteltes Seil; ; Außenkontakt	MPa
σ_{diK}	Druckspannung konventionelles Seil; Innenkontakt	MPa
σ_{diU}	Druckspannung ummanteltes Seil; Innenkontakt	MPa
σ_{ing}	Ingenieursspannung	MPa
σ_L	Längsspannung	MPa
σ_Q	Querspannung	MPa
σ_V	Vergleichsspannung	MPa
$\sigma_{V,max}$	Maximale Vergleichsspannung	MPa
σ_{zul}	Zulässige Spannung	MPa

Zeichen	Bedeutung	Einheit
φ_D	Umlaufwinkel Draht	°
φ_L	Umlaufwinkel Litze	°

Abkürzung	Bedeutung
2L1	Zweite Drahtlage in Parallelschlaglitze; Drahtdurchmesser 1
2L2	Zweite Drahtlage in Parallelschlaglitze; Drahtdurchmesser 2
3L	Dritten Drahtlage in Parallelschlaglitze
AL	Außenlitze
AP	Arbeitsparket
KB	Kreuzungsbereich
KD	Kerndraht
KL	Kernlitze
KS	Kunststoff
LD	Lagendraht
m	Meter
min	Minute
ML	Mittellage
mm	Millimeter
MBK/MBF/MBL	Mindestbruchkraft
ML	Mittellitze
MPa	Megapascal
N	Newton
PA	Projektbegleitender Ausschuss
PB	Parallelbereich
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte
S	Scheibe
SD	Schnürdruck
TPU	Thermoplastisches Polyurethan

Einleitung

Kunststoffummantelte Drahtseile werden in einigen Anwendungsfällen bereits eingesetzt. Dabei zeichnen sie sich in der Praxis durch eine deutlich höhere Lebensdauer als konventionelle Drahtseile aus. Die Kriterien zur Auswechslung geschädigter konventioneller Drahtseile sind in Normen für die entsprechende Gestaltungsstruktur des Seiles und des Seiltriebs festgelegt. In aktuellen Normen gibt es keine standardisierten Ablege Kriterien für ummantelte Drahtseile. Seilhersteller geben Anwendungshinweise und Bewertungskriterien auf Grundlage eigener Untersuchungen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Untersuchungen zum Einfluss der Kunststoffummantelung auf die Lebensdauer und das Wickelverhalten von Drahtseilen durchgeführt. Experimentelle Dauerbiegeversuche dienten zur praktischen Ermittlung der Lebensdauer bei unterschiedlichen D/d-Verhältnissen und Lasthorizonten. So konnte das Verhalten der Drahtseile für verschiedene Parameter eines realen Seiltriebs überprüft werden. Erweiternd wurden die Versuchsseile in umfangreichen Nachuntersuchungen geöffnet und die Schädigung im Seilinneren analysiert und bewertet. Konventionelle Ablege Kriterien zur zulässigen Anzahl von Drahtbrüchen beziehen sich lediglich auf die äußere Schädigung des Seiles. Der Anteil der inneren Schädigung am Schadenszustand des Gesamtseiles ist nicht zu unterschätzen. Es wurde ein Vergleich der inneren und äußeren Schädigung der konventionellen und kunststoffummantelten Drahtseile durchgeführt.

Die Beanspruchungen der Seildrähte beim Lauf über Seilscheiben wurden mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) untersucht. Mit Hilfe der FE-Simulationen zwei- und dreidimensionaler FE-Modelle der Seilgeometrie konnte die Druckbeanspruchung der Seildrähte infolge der Belastung ermittelt werden. Die Außendrähte der Außenlitzen konventioneller Drahtseile verzeichneten die maximale Beanspruchung im Außenkontakt zur Seilscheibe. Durch die Kunststoffummantelung wurde der Ort und die Größe der maximalen Beanspruchung der Seildrähte verändert. An realen Seilkonstruktionen kann die Veränderung auf Grund der Konstruktionsgestaltung nicht messtechnisch erfasst werden. Der Einsatz der Finite-Elemente-Methode brachte qualitative Erkenntnisse über den Einfluss der Ummantelung auf die Lebensdauer des Drahtseiles.

Wie die Normen zur Bestimmung der Ablegereife besitzen auch rechnerische Methoden zur Abschätzung der Lebensdauer keine Ansätze für kunststoffummantelte Drahtseile. Die Abschätzungsmethode „Leipzig“ basiert auf den einzelnen Zug-, Druck- und Biegespannungen der Seildrähte. Infolge der Kunststoffummantelung des Seiles verschob sich der Ort und die Größe der maximalen Druckspannungsbeanspruchung im Seilverbund. Durch die Erkenntnisse zur Druckspannungsverteilung in ummantelten Seilen aus den FE-Simulationen konnte die Reduzierung der Druckspannung rechnerisch in die Methode „Leipzig“ eingepflegt werden.

Die Belastung einer Seiltrommel ist neben der Seilzugkraft auch von der Seilsteifigkeit, beschrieben durch den Längs- sowie Querelastizitätsmodul, abhängig. Der Querelastizitätsmodul ändert sich im Wickelpaket im Verlauf des Wickelprozesses auf Grund der Mantelverformung sowie der Veränderung des Seilquerschnitts. Die Kunststoffummantelung beeinflusst die Seilelastizität in Längs- und vor allem in Querrichtung und damit direkt die Lastabtragung in den Trommelgrundkörper und auf die Bordscheiben. Der Aufstieg des Seils von der Lage ($m - 1$) in die darüber liegende Lage m belastet die Bordscheibe durch die auftretende Reibung und den sich stetig verringern den Abstand zwischen vorangegangener Windung und Bordscheibe mit einer Axialkraft. Beim Einsatz von Hybrid- und Faserseilen ist bekannt, dass die Längs- und Querelastizität

der Seile sowie die Reibwerte an den Seil/Seil- und Seil/Bordscheiben-Kontakten eine hohe Auswirkung auf die Beanspruchung haben. Das Fehlen abgesicherter Erkenntnisse über die beeinflussenden Eigenschaften von kunststoffummantelten Drahtseilen auf die Trommelbeanspruchung machen eine beanspruchungsgerechte Auslegung derzeit nicht möglich.

Anhand von Spulversuchen wurden die Arten und Orte der Schädigung an kunststoffummantelten Drahtseilen untersucht. Mit Laserprofilscannern wurde dabei das Seilpaket aufgenommen, um das Stapelverhalten beurteilen zu können. Parallel dazu wurden Modellversuche an ummantelten und nicht ummantelten Seilen unter Variation der Längs- und Querlast durchgeführt. Die im Modellversuch bestimmten Parameter – Querelastizität des einzelnen Seiles und eines Seilpaketes sowie die vom Kunststoff maximal ertragbare Querkraft im Kreuzungsbereich – wurden zur Validierung des erstellten Finite-Elemente-Modells genutzt.

Um die zeit-, material- und kostenintensiven Längs- und Querelastizitätsversuche während der Entwicklung neuer Seilkonstruktionen auf ein Minimum zu beschränken, bestand ein Interesse daran, die Steifigkeiten mit FE-Simulationen zu ermitteln. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde die numerische Bestimmung der Querelastizität untersucht. Zusätzlich wurden unter Variation der Werkstoffparameter der Kunststoffummantelung Simulationen mittels FEM durchgeführt, um die Schadensmechanismen in der Mehrlagenwicklung besser zu verstehen. Aus den in Grundlagenversuchen und Simulationen erarbeiteten Erkenntnissen wurden die Einflüsse der Kunststoffummantelung auf die Trommelbeanspruchung bestimmt und daraus Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise abgeleitet.

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse der Arbeitspakete des Forschungsprojektes dargestellt. Zusätzlich erfolgt die vergleichende Einschätzung der Ergebnisse mit dem Zielen des Antrags. Sofern zutreffend wird in der Überschrift die jeweilige Forschungseinrichtung angegeben.

AP 1: Auswahl und Beschaffung Forschungsstellen 1 & 2

Arbeitspaket 1 beinhaltete die abstimme Organisation zwischen den Forschungsstellen sowie mit den Industriepartnern. Die Planung und Beschaffung von Versuchsseilen, Testequipment und die Strukturierung der Abläufe standen im Vordergrund.

Durchgeführte Arbeiten

Es erfolgte die Abstimmung und Einigung zwischen den Forschungsstellen und den Industriepartnern über die Seilgeometrie des konventionellen Drahtseiles, welches zusätzlich mit Kunststoff ummantelt wurde. Des Weiteren wurden die spezifischen Seillängen, welche die Forschungsstellen zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen benötigten, an die Industriepartner übermittelt. Zusätzlich erfolgte die Beschaffung von benötigten Testequipment, z.B. Seilrollen für den Dauerbiegewechselversuch.

Erzielte Ergebnisse

Mit den Industriepartnern wurden drei Seilvarianten umgesetzt. Als Grundkonstruktion diente ein konventionelles 6x26WS-IWRC Drahtseil (Abbildung 1). Das ursprünglich anvisierte Drahtseil hatte einen Nenndurchmesser d von 12,0 mm (plus max. 5 % Toleranz). Nach der Kalibrierung des Durchmessers zur Sicherstellung des erweiterten Durchmessers mit Kunststoffummantelung wurde der Ist-Durchmesser d_k des konventionellen Seiles auf 11,8 mm reduziert. Die kunststoffummantelten Seile hatten einen Nenndurchmesser d_u von 14 mm.

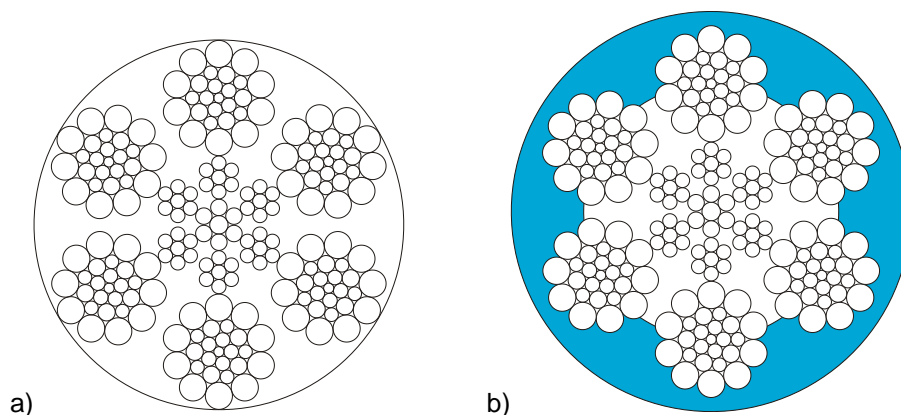


Abbildung 1: Querschnitt der Projektseile; a) konventionelles Drahtseil;
b) kunststoffummanteltes Drahtseil

Zur Ummantelung des konventionellen Drahtseiles wurden zwei verschiedene Polyethylene verwendet. Grundlegend unterscheiden sich die Werkstoffe in ihrer Dichteigenschaften - ein Werkstoff mit hoher und ein Werkstoff mit niedriger Dichte. Optisch waren die Seile auf Grund der Kunststofffarbe zu unterscheiden (Abbildung 2). Die Benennung „Seilvariante 1“ bezeichnet den durchsichtigen/transparenten Kunststoff, „Seilvariante 2“ den schwarzen Kunststoff und „Seilvariante 3“ das nicht-ummantelte konventionelle Seil.

Die Seilvariante 1 mit transparenten Kunststoffmantel sollte auf Eignung zur optischen Begutachtung des Schädigungszustandes geprüft werden. Es galt einzuschätzen, ob äußere Drahtbrüche unter der Kunststoffummantelung erkennbar sind. Diese gelten bei konventionellen Drahtseilen als Ablegekritierium [DIN 4309].



Abbildung 2: Seilvarianten; a) Seilvariante 1 (durchsichtig, transparent); b) Seilvariante 2 (schwarz); c) Seilvariante 3 (konventionell)

Forschungsstelle 1 benötigte zur Durchführung der geplanten Versuchsreihen jeweils 250 m von beiden kunststoffummantelten Seilvarianten sowie 60 m konventionelles Referenzseil. Der Bedarf an weiteren konventionellen Prüfseilen zur Durchführung von Vergleichsversuchen wurde im Bearbeitungszeitraum durch die Bereitstellung verfügbarer Kapazitäten durch die Forschungsstelle 2 gedeckt.

Zur Durchführung der Dauerbiegewechselversuche am Seilprüfstand der Forschungsstelle 1 wurden je zu überprüfendem Durchmesser Verhältnis zwischen Seilscheibe und Seildurchmesser (D/d -Verhältnis) drei gleiche Seilrollen benötigt. Diese wurden bei entsprechenden Fachfirmen in Auftrag gegeben.

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 1 mit dem Ziel

Die durchgeführten Arbeiten und deren Ergebnisse erfüllen die beantragten Ziele. Durch Abstimmung unter den Forschungsstellen sowie mit den Industriepartnern konnten alle organisatorischen Randbedingungen abgesteckt werden. Zusätzlich wurden zu beschaffende Sonderanfertigungen an entsprechende Fachfirmen übergeben.

AP 2: Grundlagenversuche Forschungsstelle 1

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zahlreiche Dauerbiegewechselversuche am Seilprüfstand der Forschungsstelle 1 durchgeführt. Dieser Prüfstand verfügt über drei unabhängige Biegezone, in denen das Versuchsseil über Seilscheiben aus Stahl läuft (Abbildung 3). Die Belastung des Seiles erfolgt über eine hydraulische Spannvorrichtung, welche die variable Einstellbarkeit der Seilkraft S ermöglicht. Im Untersuchungsfall wurde die Einfachbiegung der Versuchsseile betrachtet.

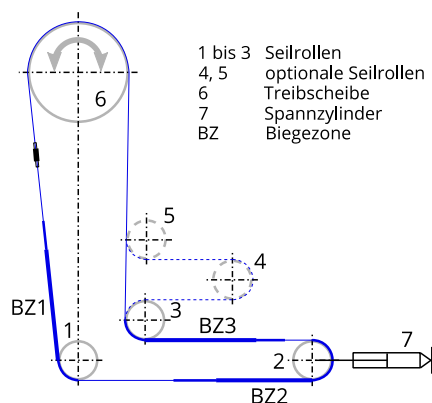


Abbildung 3: Seiltriebschema des Seilprüfstandes an der TU Dresden

AP 2.1 Parameter Dauerbiegeversuche

Zur Sicherstellung einer auswertbaren, breit aufgestellten Ergebnisspanne der zeitaufwendigen Dauerbiegewechselversuche war eine genaue Planung der Untersuchungen notwendig. Die Entscheidungen der Versuchsparameter wurden mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmt.

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des Arbeitspakets 2.1 wurden die Randbedingungen des Versuchsplans zur Durchführung von Dauerbiegeversuchen definiert. Dabei wurden die spezifischen Prüflasten, die zu testenden D/d-Verhältnisse sowie die entsprechende Rillengeometrie bestimmt.

Erzielte Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen der drei Seilvarianten sollten mit zwei Lasthorizonten durchgeführt werden. Dabei waren drei verschiedene D/d-Verhältnisse mit jedem Versuchsseil zu testen. Auf Grund der unterschiedlichen Außendurchmesser der konventionellen und ummantelten Drahtseile unterscheidet sich die normgerechte Gestaltung der Rillengeometrie im entsprechenden Rillenradius r [DIN 15061]. Dies bedeutet, dass jedes zu testende D/d-Verhältnis zwei Rollensätze zu je drei Prüfrollen benötigen würde. In Abstimmung mit den Industriepartnern wurde festgelegt, dass die entsprechende normgerechte Rillengeometrie der Seilscheiben für konventionelle Drahtseile nur bei einem der drei D/d-Verhältnisse zu überprüfen ist. Entsprechend der Literatur ist aus [Fey 00] bekannt, dass geringfügig zu große Rillenradien nur einen geringen negativen Einfluss auf die zu erwartende Biegewechselzahl haben. Die Akzeptanz dieser Anpassung des Versuchsplans sparte Seilressourcen, Seilscheiben und vor allem Versuchszeit. Abbildung 4 zeigt die erstellte Versuchsmatrix zur experimentellen Ermittlung der Lebensdauer konventioneller und kunststoffummantelter Drahtseile.

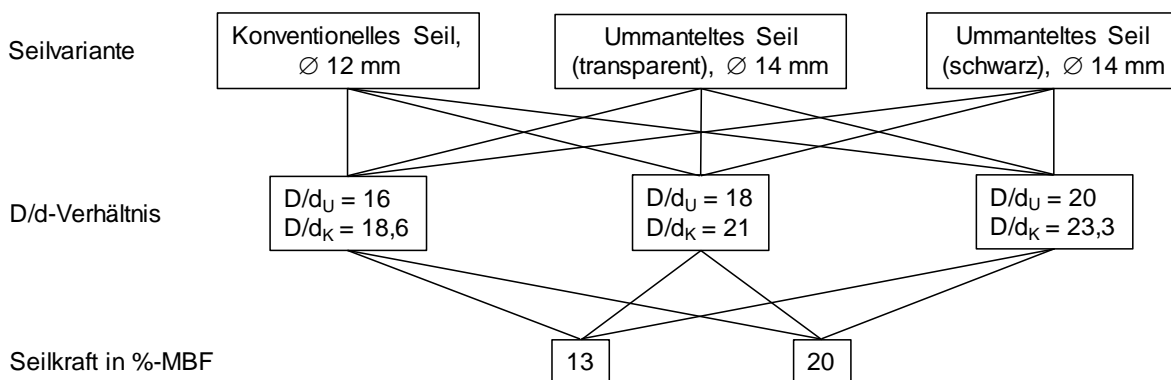


Abbildung 4: Versuchsplan Dauerbiegewechselversuche TU Dresden

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 2.1 mit dem Ziel

Im Rahmen des Arbeitspaketes konnten die notwendigen Ziele erreicht werden. Die Erstellung eines Versuchsplans gelang in Abstimmung mit den Fachfirmen des PA. Die Reduzierung des Versuchsspektrums um die Dauerbiegewechselversuche des konventionellen Drahtseiles in normgerechter Rillengeometrie der Seilscheibe wurde als notwendig eingestuft. Durch diese Anpassung konnten die durchzuführenden Dauerbiegeversuche zeitlich sichergestellt werden.

AP 2.3 Durchführung Dauerbiegeversuche

Insgesamt wurden 29 Dauerbiegeversuche am Seilprüfstand der Forschungsstelle 1 durchgeführt. Davon wurden 20 Untersuchungen, entsprechend der Versuchsmatrix aus Abbildung 4, zur Ermittlung der Lebensdauer der konventionellen und kunststoffummantelten Drahtseile vorgenommen. Die restlichen Dauerbiegeversuche dienten zum ergänzenden Erkenntnisgewinn. So wurden einige Versuche bei einer definierten Grenzbiegezahl gestoppt, um den inneren Schädigungszustand des Seiles zu begutachten.

Durchgeführte Arbeiten

Eine Gesamtübersicht der durchgeführten Dauerbiegeversuche an der Forschungsstelle 1 ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Durchgeführte Dauerbiegeversuche an der TU Dresden

Versuchsnummer	Seilvariante	Durchmesser Verhältnis		Rillradius r	Seilkraft S
		D/d _U	D/d _K		
V1	1	16	18,6	7,5 mm	15,0 kN
V2	1	16	18,6	7,5 mm	15,0 kN
V3	3	-	18,6	7,5 mm	15,0 kN
V4	2	16	18,6	7,5 mm	15,0 kN
V5	2	16	18,6	7,5 mm	15,0 kN
V6	1	16	18,6	7,5 mm	22,4 kN
V7	3	-	18,6	6,5 mm	15,0 kN
V8	3	-	18,6	6,5 mm	22,4 kN
V9	1	16	18,6	7,5 mm	22,4 kN
V10	2	16	18,6	7,5 mm	22,4 kN
V11	2	16	18,6	7,5 mm	22,4 kN
V12	3	-	18,6	6,5 mm	15,0 kN
V13	1	18	21	7,5 mm	15,0 kN
V14	1	18	21	7,5 mm	22,4 kN
V15	2	18	21	7,5 mm	15,0 kN
V16	2	18	21	7,5 mm	22,4 kN
V17	2	20	23,3	7,5 mm	15,0 kN
V18	2	20	23,3	7,5 mm	22,4 kN
V19	1	20	23,3	7,5 mm	15,0 kN
V20	1	20	23,3	7,5 mm	22,4 kN
V21	3	-	23,3	7,5 mm	22,4 kN
V22	3	-	23,3	7,5 mm	15,0 kN
V23	3	-	21	7,5 mm	15,0 kN
V24	3	-	21	7,5 mm	22,4 kN
V25	3	-	21	7,5 mm	15,0 kN
V26	3	-	18,6	7,5 mm	22,4 kN
V27	3	-	18,6	7,5 mm	22,4 kN
V28	2	20	23,3	7,5 mm	22,4 kN
V29	2	20	23,3	7,5 mm	15,0 kN

Während der Versuche wurde der Seilzustand regelmäßig überprüft. Bei konventionellen Drahtseilen wurde die Drahtbruchentwicklung der sichtbaren Drahtbrüche entsprechend über die Versuchsdauer dokumentiert. Zusätzlich wurden die Reduzierung des Seildurchmessers sowie die Seildehnung aufgenommen. Bei Versuchen mit ummantelten Drahtseilen wurde der Zustand des Kunststoffes während des Versuches dokumentiert. Bei allen drei eingesetzten Seilvarianten wurde die magnetinduktive Seilprüfung zur Erkennung von Drahtbrüchen eingesetzt. Im Anschluss an die Versuchsdurchführung wurde jedes Versuchsseil einer detaillierten Nachuntersuchung unterzogen. Dabei wurde die äußere Schädigung unter der ggf. noch vorhandenen Kunststoffhülle begutachtet. Zusätzlich wurden die Seile sukzessive zerlegt, um die Schädigung im Seilinneren bewerten zu können.

Erzielte Ergebnisse

Während der Durchführung jedes Versuches wurde das Seil regelmäßig einer Inspektion unterzogen. Dabei wurde der mittlere Seildurchmesser als Mittelwert aus drei horizontalen sowie drei vertikalen Messungen bestimmt. Bei der Ermittlung der einzelnen Kenngrößen wurde auf die richtige Messung des Seildurchmessers an den Litzenkuppen geachtet. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Durchmesserreduzierung exemplarisch für den Versuch V7 eines konventionellen Seiles beim kleinsten D/d-Verhältnis und mit der niedrigen Laststufe.

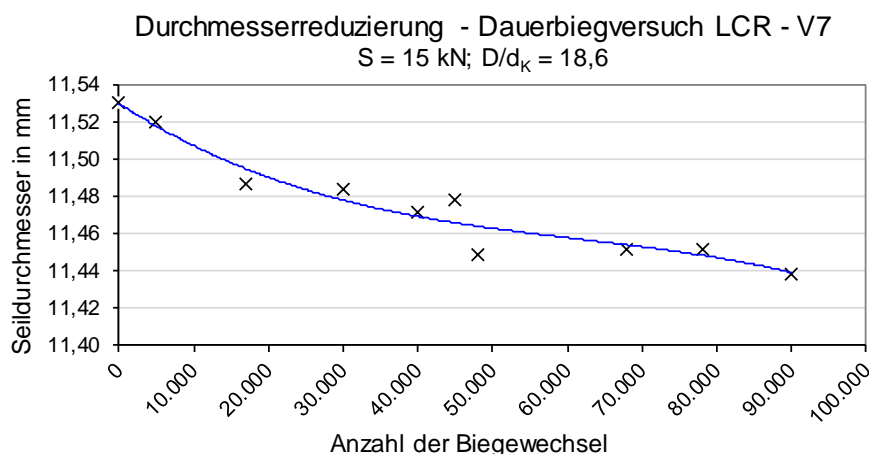


Abbildung 5: Gemessene Durchmesserreduzierung während des Dauerbiegeversuchs

Die Ermittlung des mittleren Seildurchmessers wurde auch bei den Versuchen mit den zwei kunststoffummantelten Seilvarianten durchgeführt. Anfänglich passte sich die Kunststoffummantelung dem vorhandenen Spiel an den Seilscheiben an. Die horizontal gemessenen Durchmesserwerte waren größer als die vertikalen Werte. Dies war auch beim konventionellen Drahtseil der Fall. Die Seilkonstruktion flacht in der geringfügig größeren Seilscheibenrille, mit dem Radius $r = 0,53 \cdot d$, ab. Mit steigender Versuchsdauer ermüdete der Kunststoff zunehmend. Auf Grund von ungleichmäßigen Verformungen sowie Rissen und Ablöseerscheinungen der Ummantelung konnten keine gezielten Erkenntnisse aus der Durchmesserreduzierung der kunststoffummantelten Drahtseile gewonnen werden.

Bei jeder Inspektion des Versuchsseiles wurde die Seildehnung bestimmt. Dazu wurde der Kolbenhub des hydraulischen Spannzylinders zur Aufbringung der Seilkraft gemessen. Dieser regelt bei steigender Versuchsdauer und Längung des Seiles infolge der Ermüdung eine konstante Prüflast. Zusammen mit der Länge der drei Biegezone lässt sich die prozentuale Dehnung des gebogenen Seiles bestimmen. Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Seildehnung während des Dauerbiegeversuches exemplarisch für Versuch V7 des konventionellen Seiles.

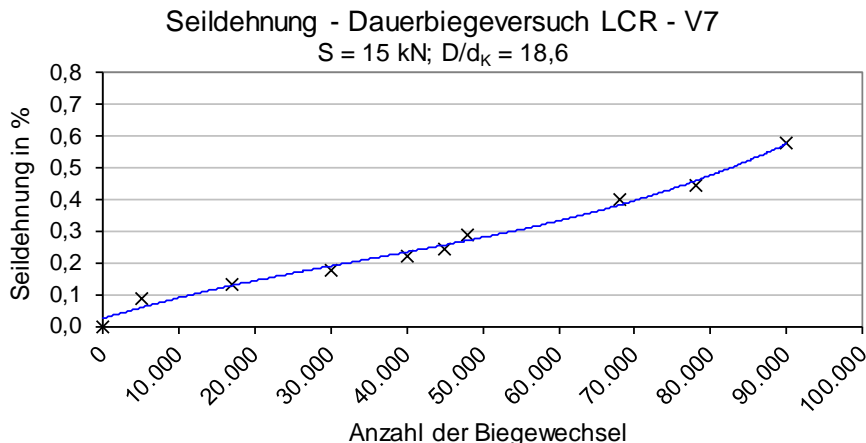


Abbildung 6: Gemessene Seildehnung während des Dauerbiegeversuchs

Infolge der Schädigung der Kunststoffummantelung bis hin zur Ablösung der Ummantelung während der Versuchsdauer wurden die Messungen des Kolbenhubes verfälscht. Somit konnten keine gezielten Erkenntnisse aus der gemessenen Seildehnung beim Dauerbiegeversuch für kunststoffummantelte Drahtseile gewonnen werden.

Die sichtbaren äußeren Drahtbrüche nach [DIN 4309] bildeten das Kriterium zur Bestimmung der Ablegereife der Versuchsseile. Bei jeder Inspektion wurden die Drahtbrüche in den Biegezonen lokalisiert und dokumentiert. Abbildung 7 zeigt die Drahtbruchentwicklung exemplarisch am Versuch V21 mit dem konventionellen Drahtseil beim größten D/d-Verhältnis und der hohen Laststufe.

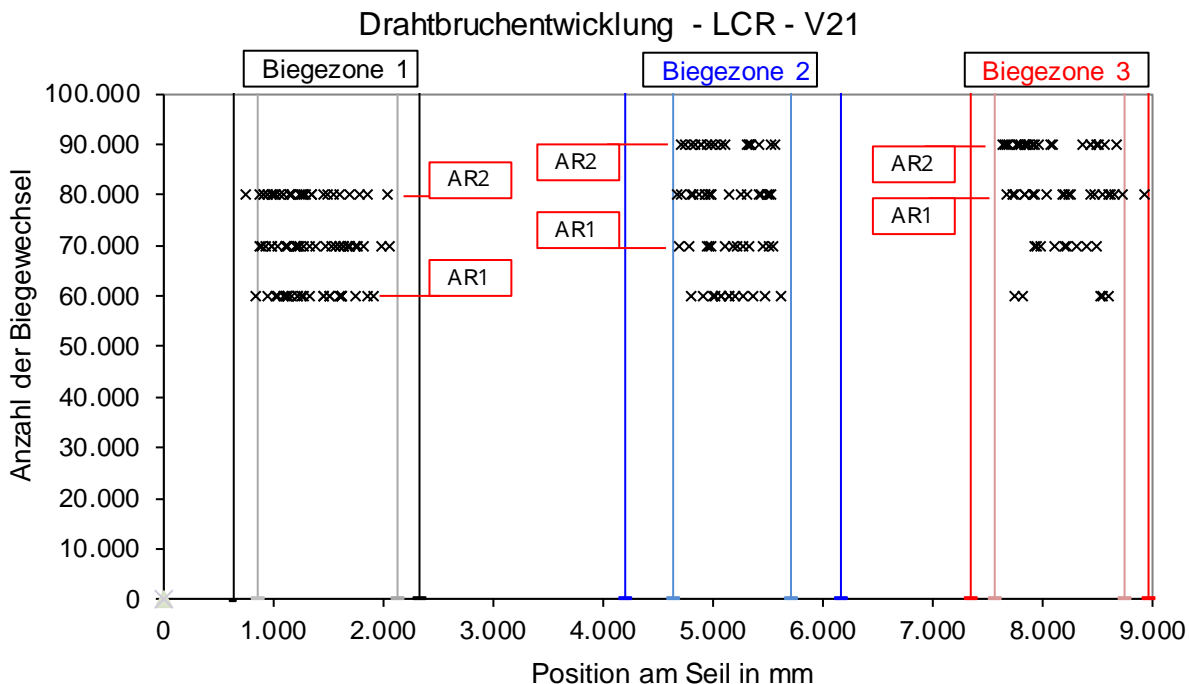


Abbildung 7: Drahtbruchentwicklung während des Dauerbiegeversuchs

Die Norm unterscheidet verschiedene Maschinenklassen je nach Spezifikation der Anwendung des Seiles in der Praxis. In diesem Bericht werden die Ablegekriterien der Maschinenklassen M1-M4 als „Ablegereife 1“ (AR1) bezeichnet. Die Ablegekriterien der Maschinenklassen M5-M8 wer-

den „Ablegereife 2“ (AR2) genannt. Entsprechend der Anzahl der Einzeldrähte in der Außenlitzenlage der Seilkonstruktion wurde das Versuchsseil der Rope Category Number (RCN) 06 zugeordnet. Dies bedeutet, dass das Ablegekriterium AR1 der sichtbaren Drahtbrüche bei sechs Drahtbrüchen auf einer Länge von $6 \cdot d$ bzw. bei 13 Drahtbrüchen auf einer Länge von $30 \cdot d$ erfüllt ist. Das Ablegekriterium AR2 ist definiert als Verdopplung der Anzahl der zulässigen Drahtbrüche von AR1 auf entsprechender Länge.

Tabelle 2: Versuchsergebnisse konventionelle Prüfseile (Seilvariante 3)

Versuchsnummer	D/d _k	Rillenradius r	Seilkraft S	Drahtbruchbeginn	AR1	AR2	Lebensdauer	Bruchzone
V3	18,6	7,5 mm	15,0 kN	35.000	48.000	55.000	88.689	2
V7	18,6	6,5 mm	15,0 kN	30.000	42.000	46.000	106.583	1
V25	21	7,5 mm	15,0 kN	55.000	94.000	120.000	168.925	1
V22	23,3	7,5 mm	15,0 kN	76.000	150.000	169.000	202.557	1
V26	18,6	7,5 mm	22,4 kN	22.000	27.000	31.000	34.589	2
V8	18,6	6,5 mm	22,4 kN	20.000	31.000	37.000	40.871	1
V24	21	7,5 mm	22,4 kN	36.000	44.000	53.000	69.814	1
V21	23,3	7,5 mm	22,4 kN	52.000	70.000	83.000	96.542	1

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse des Dauerbiegeversuches aller konventionellen Prüfseile (Seilvariante 3). Dabei wurden beide Laststufen und drei D/d-Verhältnisse überprüft. Zudem wurde das Referenzseil bei dem kleinsten D/d-Verhältnis sowohl auf der normgerechten Rillengeometrie als auch auf der größeren Rillengestaltung für das kunststoffummantelte Drahtseil getestet. In der Übersicht sind der gemessene Drahtbruchbeginn sowie das Erreichen der Ablegekriterien AR1 und AR2 dargestellt. Auf Grund der Gestaltung des Seilprüfstandes sind hierfür jeweils drei Ergebnisse der drei unabhängigen Biegezone vorhanden. Die Übersicht stellt den gebildeten Mittelwert der drei Teilergebnisse dar. Zudem wird die erreichte Lebensdauer beim Eintreten des Versagenskriteriums sowie die dazugehörige Bruchbiegezone angegeben.

Tabelle 3: Versuchsergebnisse Seilvariante 1 (Kunststoff transparent)

Versuchsnummer	Durchmesserverhältnis		Rillenradius r	Seilkraft S	Ablösung Kunststoff	Lebensdauer	Bruchzone
	D/d _U	D/d _k					
V1	16	18,6	7,5 mm	15,0 kN	121.000	163.005	2
V13	18	21	7,5 mm	15,0 kN	180.000	255.901	1
V19	20	23,3	7,5 mm	15,0 kN	248.000	325.883	1
V9	16	18,6	7,5 mm	22,4 kN	70.000	76.001	2
V14	18	21	7,5 mm	22,4 kN	77.000	104.293	1
V20	20	23,3	7,5 mm	22,4 kN	121.000	148.150	1

Die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche der Seilvariante 1, transparente Kunststoffummantelung des konventionellen Drahtseiles, sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Trotz der transparenten Kunststoffummantelung konnten während der optischen Seilinspektion keine äußeren Drahtbrüche detektiert werden. Durch Rückstände der Schmierung des Seilkerns, aber vor allem durch die Belastungsschädigung des Kunststoffes waren die Einzeldrähte bei intakter Ummantelung nicht zu erkennen. In der Übersicht wird die Biegewechselzahl beim Ablösen des Kunststoffes angegeben. Dieser Wert setzt sich als Mittelwert aus den drei unabhängigen Biegezone zusammen. Des Weiteren werden die erreichte Lebensdauer sowie die Bruchbiegezone angegeben.

Tabelle 4: Versuchsergebnisse Seilvariante 2 (Kunststoff schwarz)

Versuchsnummer	Durchmesser Verhältnis		Rillenradius r	Seilkraft S	Ablösung Kunststoff	Lebensdauer	Bruchzone
	D/d _U	D/d _K					
V4	16	18,6	7,5 mm	15,0 kN	50.000	135.508	2
V15	18	21	7,5 mm	15,0 kN	130.000	181.854	2
V17	20	23,3	7,5 mm	15,0 kN	163.000	242.459	2
V10	16	18,6	7,5 mm	22,4 kN	45.000	63.447	2
V16	18	21	7,5 mm	22,4 kN	65.000	85.140	1
V18	20	23,3	7,5 mm	22,4 kN	97.000	111.634	1

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse der Dauerbiegeversuche für die Seilvariante 2 mit schwarzer Kunststoffummantelung zusammen.

Prüfprotokoll magnet-induktive Seilprüfung
LCR - V18; Biegezone 3; D/d_U = 20; S = 22,4 kN

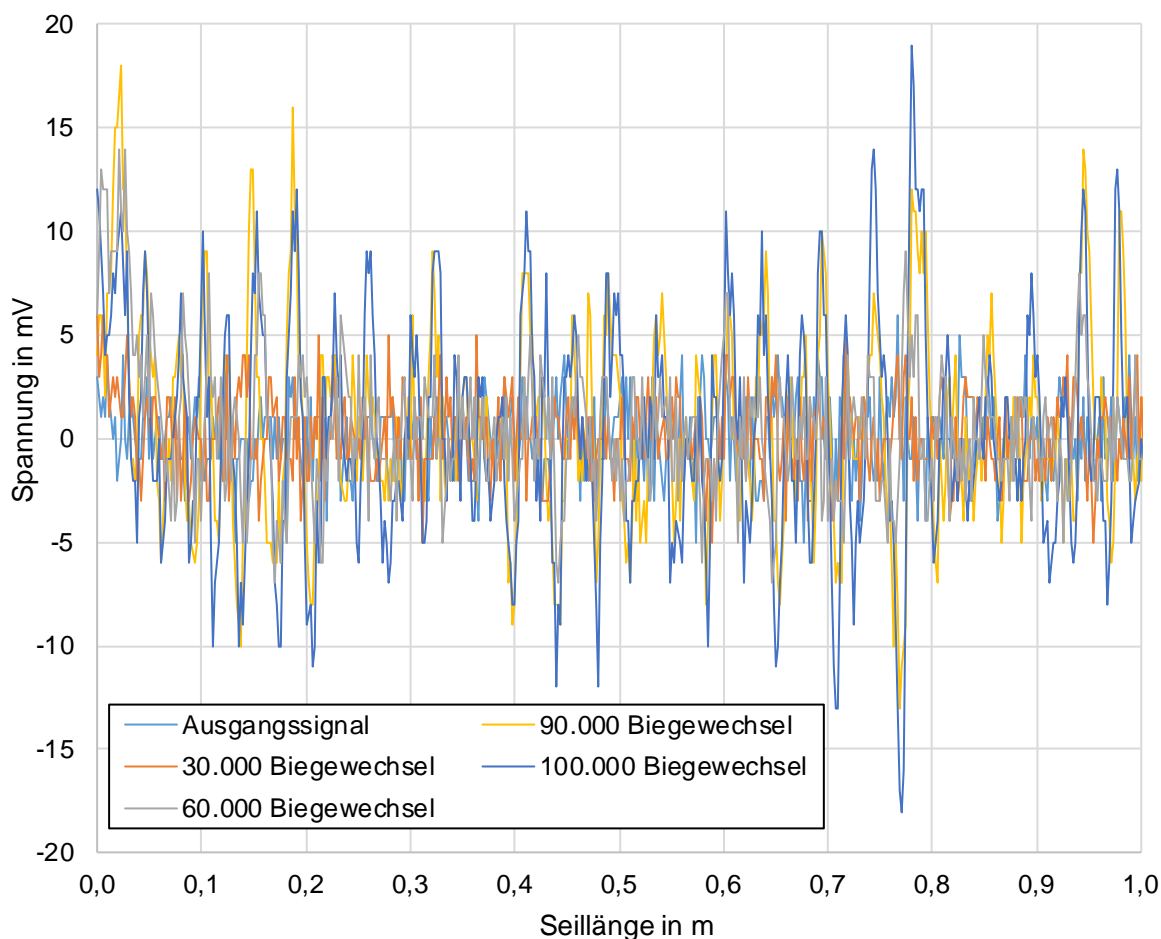


Abbildung 8: Messdaten der magnet-induktive Seilprüfung

Im Rahmen der Seilinspektion der kunststoffummantelten Seilvarianten wurde eine zerstörungsfreie magnetinduktive Seilprüfung durchgeführt. Die Prüfung erfolgte am Seilabschnitt der Biegezone 3, da dieser durch die konstruktive Gestaltung des Prüfstandes am besten mit dem Prüfgerät zu erreichen war. Abbildung 8 zeigt das aufgenommene Messsignal auf einer Länge von ca. 1 m für den Versuch V18 mit Seilvariante 2. Die Ausschläge der Messsignale wurden mit zuneh-

mender Biegewechselzahl größer. Deutliche Ausschläge verweisen auf Drahtbrüche an der Außenseite des Drahtseiles. Auf Grund der Kalibrierung des Ausgangsseiles wurden die sichtbaren Bereiche der Außenlitzen leicht verdichtet. In diesem Bereich entstanden die zu detektierenden und bezüglich der Ablegekriterien entscheidenden Drahtbrüche. Auf Grund der Kalibrierung entstand nur eine geringe Lücke zwischen den Bruchenden eines Einzeldrahtes. Die bereits sehr feine Abtaste des magnetinduktiven Prüfgerätes konnte nicht jeden einzelnen Drahtbruch detektieren. Zudem entstand durch den Abstand infolge der Kunststoffummantelung eine Minderung der Signalgüte. Die detektierten Störstellen waren meist Häufungen von Drahtbrüchen (Drahtbruchnester). Abbildung 9 zeigt die entsprechende Dokumentation der lokalisierten Störstellen am Seilabschnitt. Geringfügig beeinflusste auch die Seilinnenschädigung das Messsignal. Eine quantitative Aussage des Schädigungsgrades des ummantelten Seiles war anhand dieser Detektiermethode nicht möglich. Eine qualitative Aussage ließ dennoch einen Vergleich mit konventionellen Seilen zu. Durch zusätzliche Untersuchungen wird dieser Vergleich später behandelt.

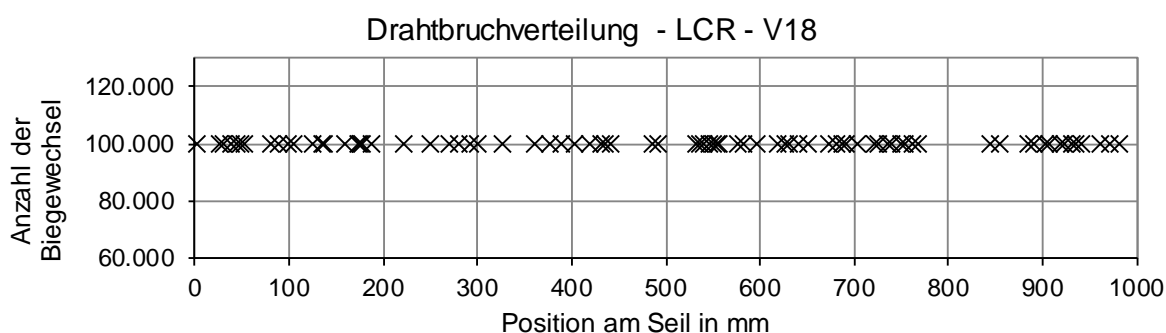


Abbildung 9: Drahtbruchverteilung Dauerbiegeversuch V18

Die Kunststoffummantelungen waren während des Versuches starken Belastungen ausgesetzt. Neben der Biegebelastung beim Lauf über Seilscheiben, wobei der Kunststoff lokal einer Zug- bzw. Druckbeanspruchung ausgesetzt war, wurde das konventionelle Innenseil in den Kunststoff in Richtung der Seilscheibe gedrückt.

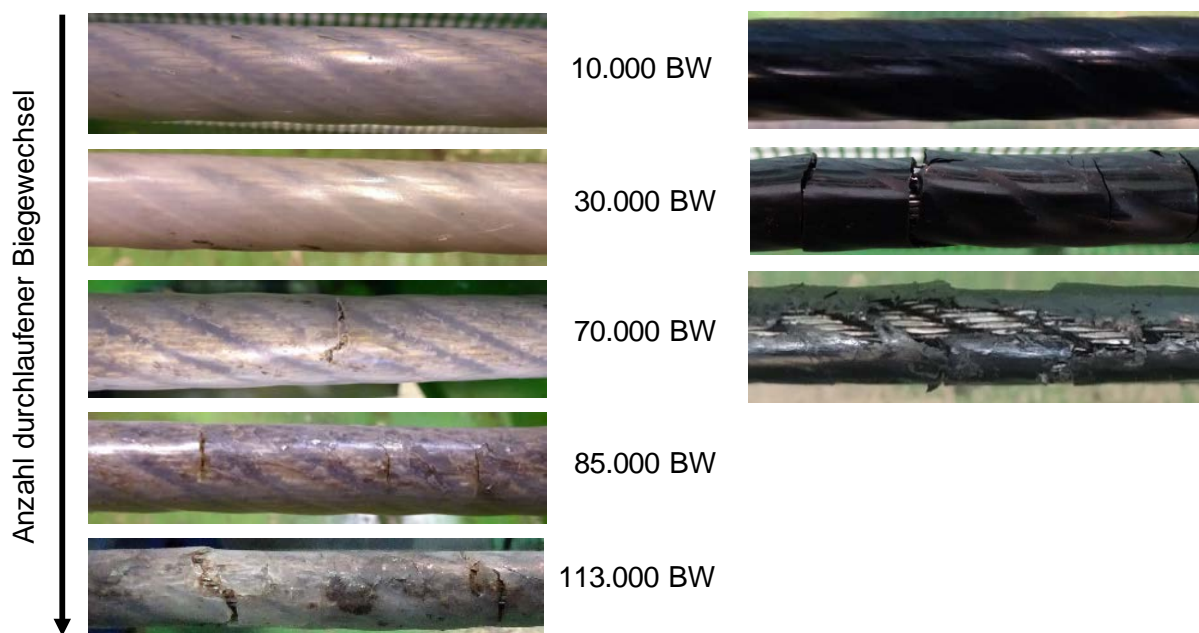


Abbildung 10: Vergleich des Zustandes der Kunststoffummantelung ($D/d_u = 16$; $S = 15$ kN)

Abbildung 10 zeigt die Dokumentation der Abnutzung der Kunststoffummantelung bei gleichen D/d-Verhältnis sowie gleicher Laststufe. Im Verlauf des Dauerbiegeversuches entstanden Risse senkrecht zur Seillängsachse. Die Ummantelung der Seilvariante 1 (Kunststoff transparent) riss nur in den Kontaktbereichen zwischen Seil und Seilscheibe. In diesem Berührungsbereich nutzte sich der Kunststoff ab, bis es zu einem Stahl/Stahl-Kontakt zwischen ursprünglich ummantelten Seil und Scheibe kam. Die Seilvariante 2 (Kunststoff schwarz) bildete Risse ebenfalls senkrecht zur Seillängsachse. Diese Risse zogen sich um den gesamten Umfang des Seiles und bildeten so Kunststoffsegmente, die teilweise auf dem Drahtseil verschiebbar waren. Mit zunehmender Versuchsdauer nutzte sich auch diese Kunststoffvariante ab und die Ummantelungssegmente lösten sich vollständig vom Drahtseil. Allgemein war festzustellen, dass der Kunststoff der Seilvariante 1 länger resistent gegen die Belastungen aus dem Dauerbiegeversuch war. Die entsprechenden Zahlen zum Versagen der Ummantelung sind in Tabelle 3 (transparent) und Tabelle 4 (schwarz) aufgelistet.

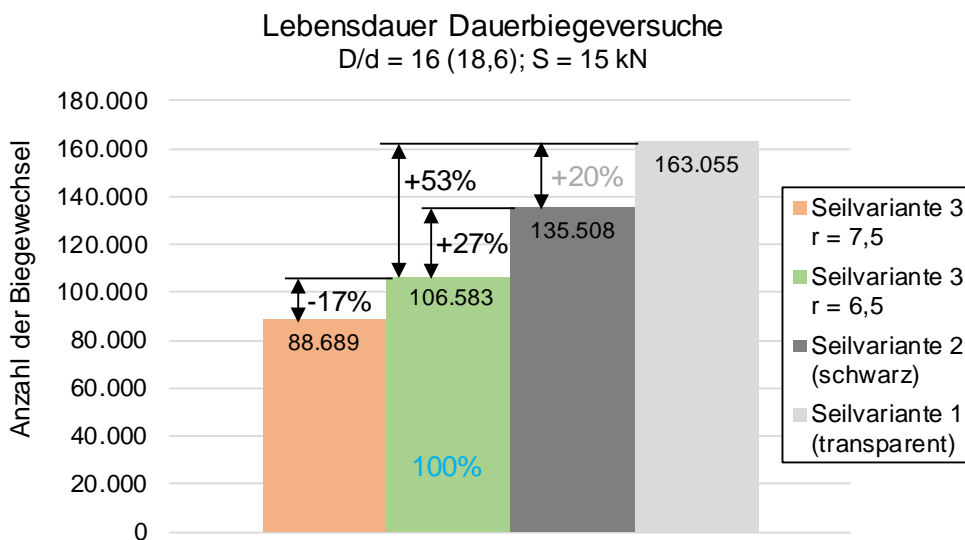


Abbildung 11: Ergebnisse Lebensdauer D/d_U = 16; S = 15 kN

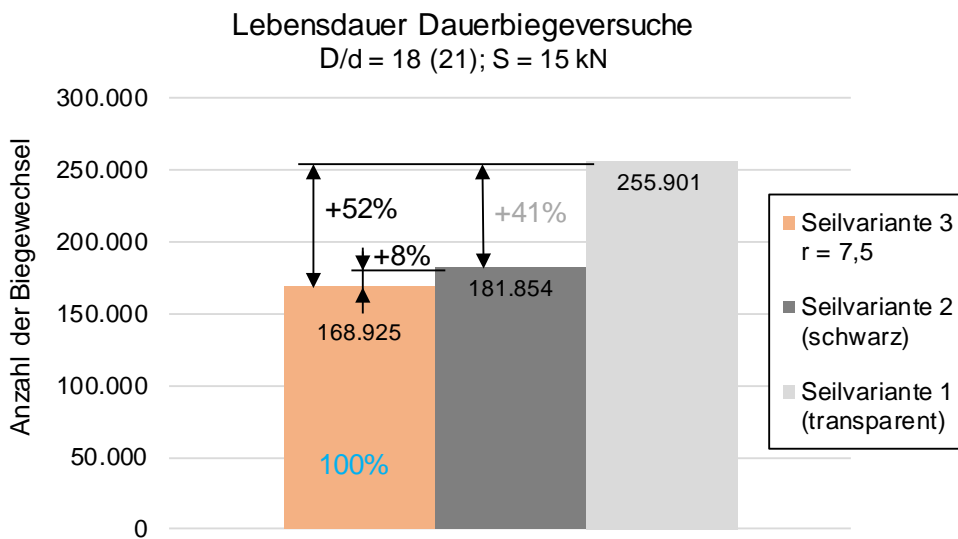


Abbildung 12: Ergebnisse Lebensdauer D/d_U = 18; S = 15 kN

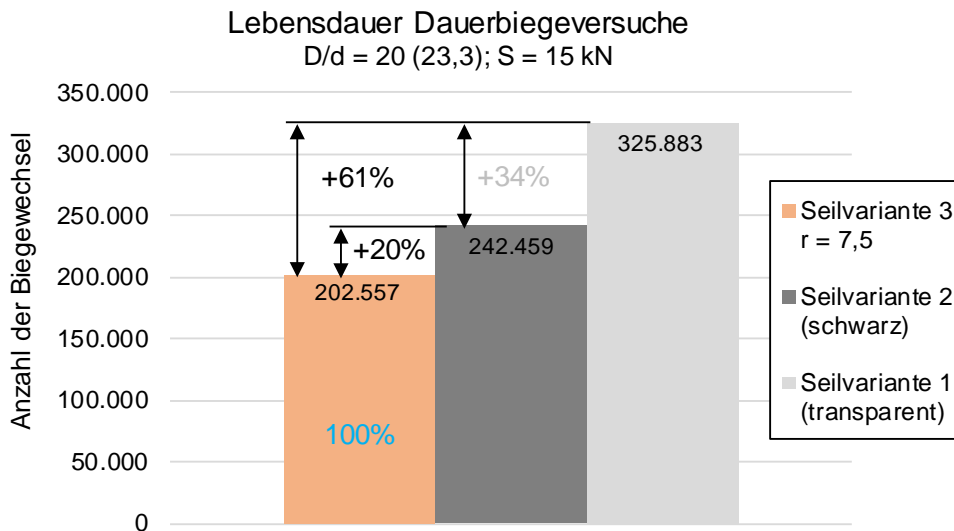


Abbildung 13: Ergebnisse Lebensdauer D/d_U = 20; S = 15 kN

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen aller Seilvarianten bei dem kleinsten D/d-Verhältnis und der niedrigen Laststufe. Dabei war die Lebensdauer des konventionellen Seiles auf der zu großen Rillengeometrie geringfügig kleiner als in der normgerechten Rillengeometrie. Die ummantelten Seilvarianten wiesen einen Lebensdauerzugewinn von +27 % bzw. +53 % verglichen mit der konventionellen Seilvariante 3 auf. Diese Tendenz ließ sich auch für das mittlere D/d-Verhältnis (Abbildung 12) sowie das große D/d-Verhältnis (Abbildung 13) dieser Laststufe abzeichnen. Vereinfachend wurde das Ergebnis der Lebensdauer der Seilvariante 3 auf der zu großen Rillengeometrie als Referenzgröße angenommen. Die Seilvariante 2 erreichte leicht größere Lebensdauern als die konventionelle Variante 3. Ein deutlich höherer Lebensdauerzugewinn zeichnete sich durch die Ummantelung des Drahtseiles mit dem transparenten Kunststoff ab. Für alle Prüfparameter war die Erhöhung der Lebensdauer infolge der Ummantelung größer als 50 %.

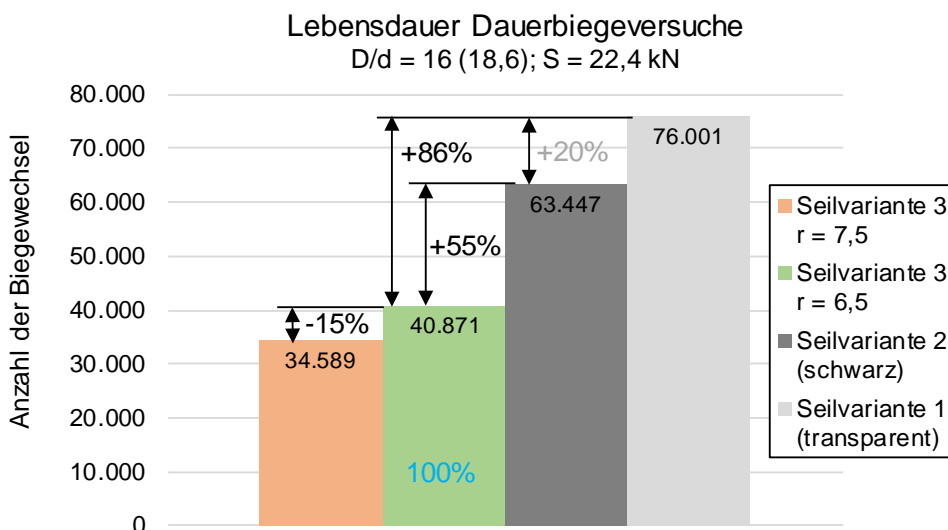


Abbildung 14: Ergebnisse Lebensdauer D/d_U = 16; S = 22,4 kN

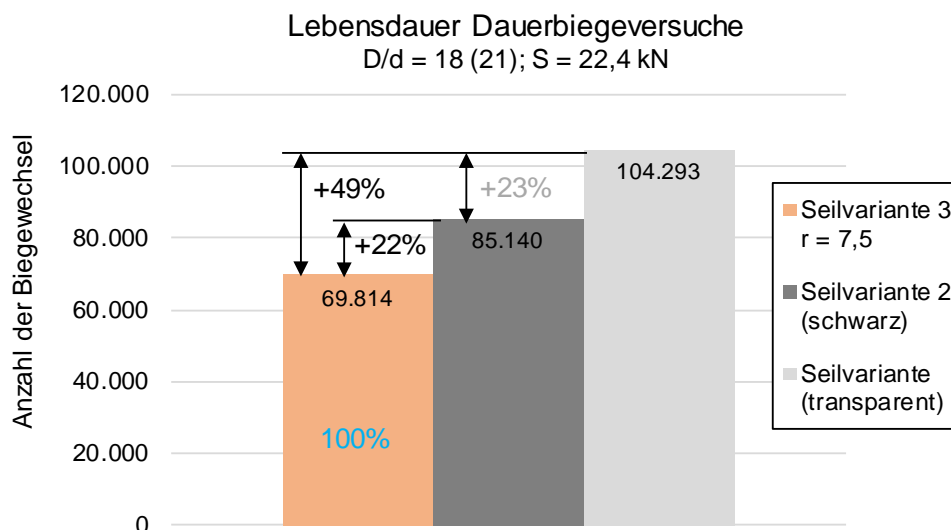


Abbildung 15: Ergebnisse Lebensdauer D/d_U = 18; S = 22,4 kN

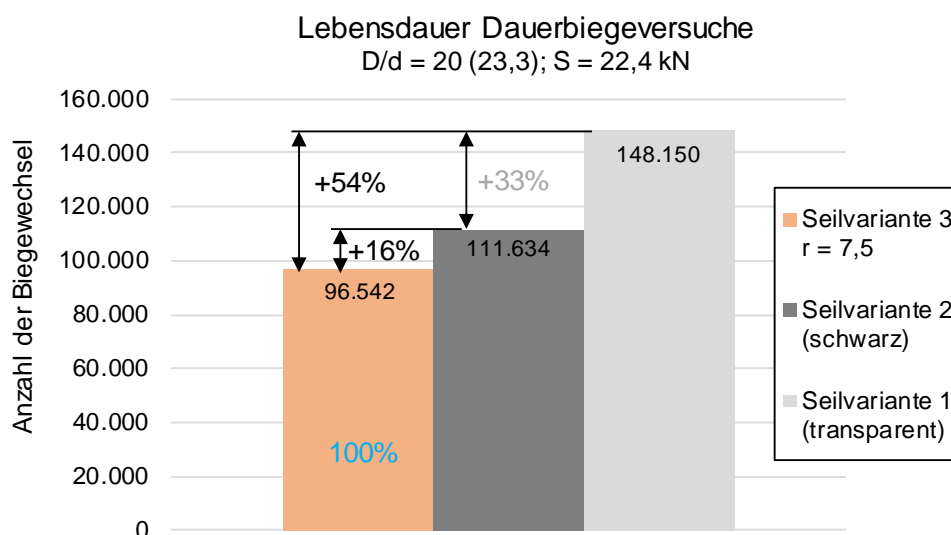


Abbildung 16: Ergebnisse Lebensdauer D/d_U = 20; S = 22,4 kN

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen aller Seilvarianten bei dem kleinsten D/d-Verhältnis und der hohen Laststufe. Auch hier war die Lebensdauer des konventionellen Seiles auf der zu großen Rillengeometrie geringfügig reduziert verglichen mit der normgerechten Gestaltung. Die ummantelten Seilvarianten wiesen eine Lebensdauererhöhung von +55 % bzw. +86 % verglichen mit der konventionellen Seilvariante 3 auf. Auch das mittlere D/d-Verhältnis (Abbildung 15) sowie das große D/d-Verhältnis (Abbildung 16) zeigen diesen Verlauf.

Der Zugewinn der Lebensdauer infolge der Vergrößerung des D/d-Verhältnisses für Seilvariante 1 bei niedriger Laststufe wird in Abbildung 17 dargestellt. Abbildung 18 zeigt diesen Sachverhalt bei der zweiten Laststufe. Die Erhöhung des D/d-Verhältnisses von D/d = 16 zu D/d = 20 brachte eine Verdopplung der Lebensdauer. Dieser Effekt ist bei beiden Laststufen zu sehen. Das mittlere D/d-Verhältnis weist eine größere Spanne zwischen den Lebensdauern der einzelnen Laststufen auf (Abbildung 19). Allerdings ist auch immer zu beachten, dass die experimentellen Untersuchungsergebnisse einer gewissen Streuspanne unterliegen.

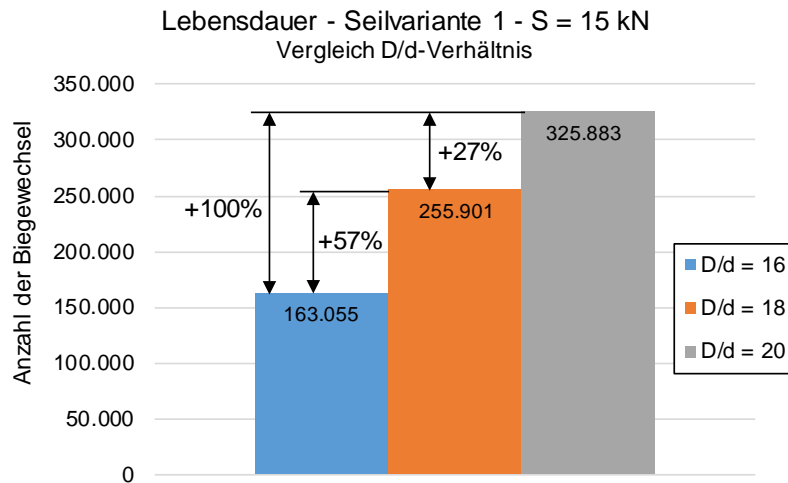


Abbildung 17: Seilvariante 1 – Vergleich D/d-Verhältnis; S = 15 kN

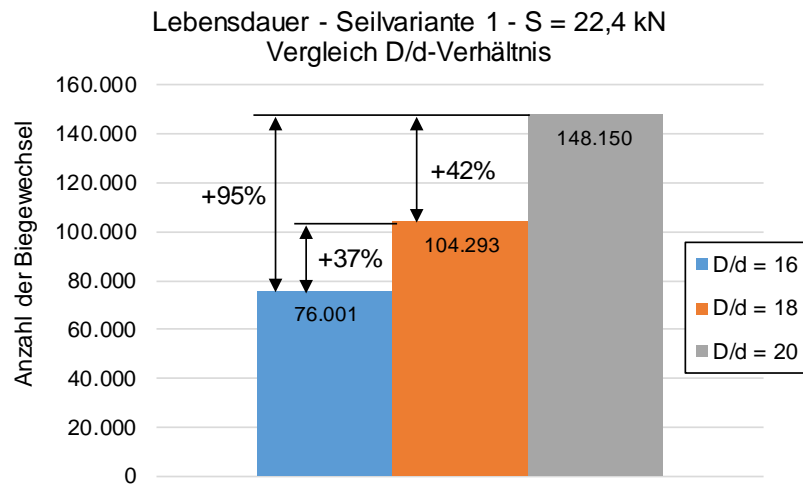


Abbildung 18: Seilvariante 1 – Vergleich D/d-Verhältnis; S = 22,4 kN

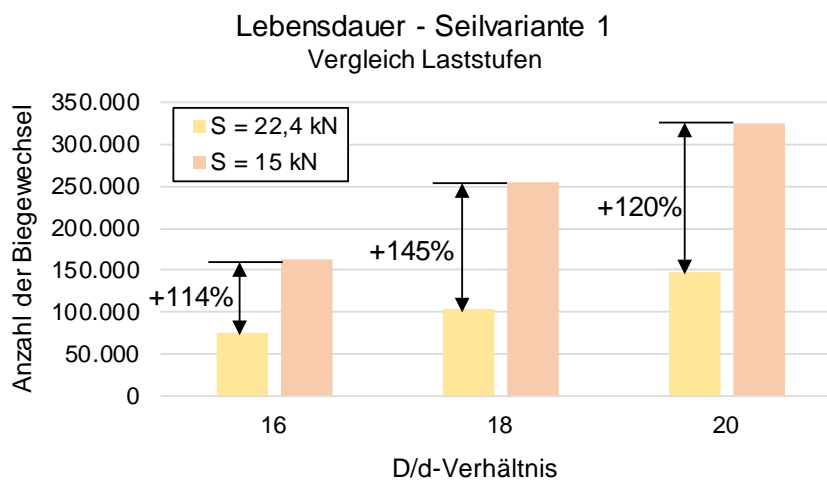


Abbildung 19: Seilvariante 1 – Vergleich Laststufen

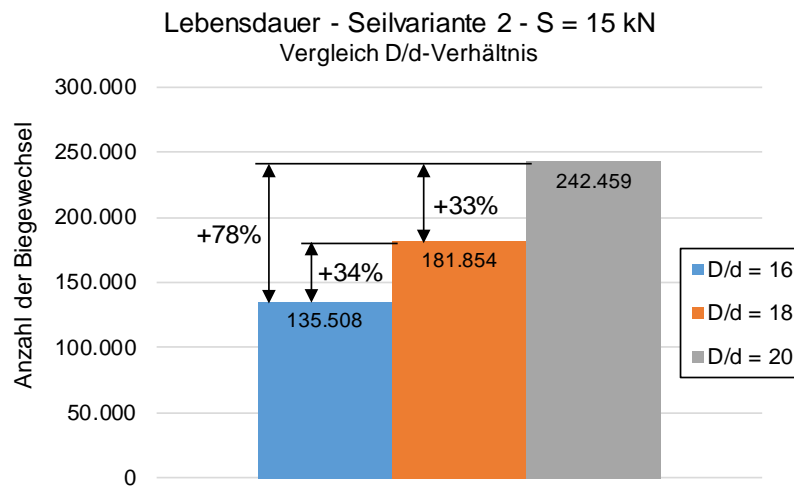


Abbildung 20: Seilvariante 2 – Vergleich D/d-Verhältnis; S = 15 kN

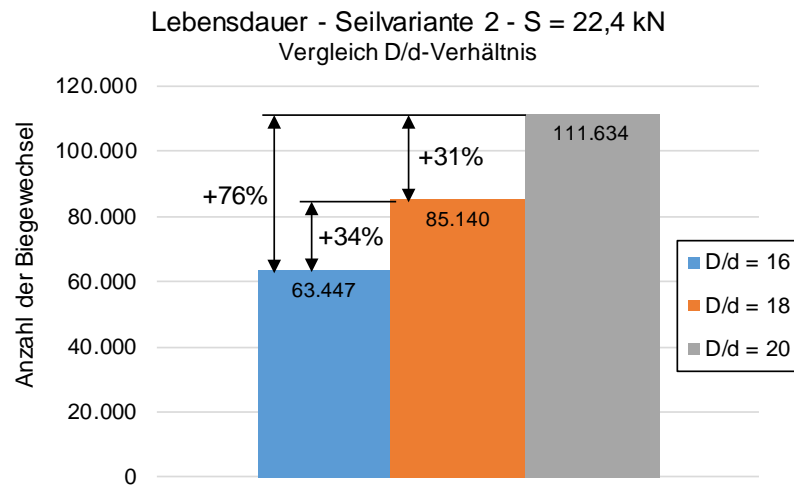


Abbildung 21: Seilvariante 2 – Vergleich D/d-Verhältnis; S = 22,4 kN

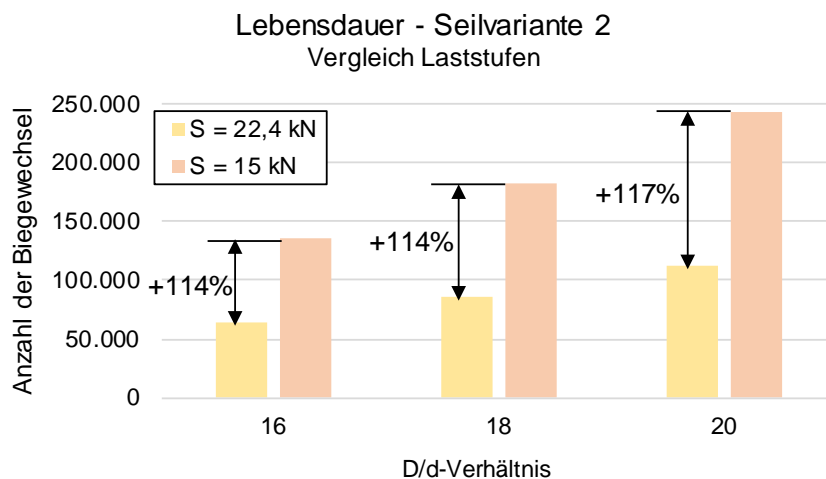


Abbildung 22: Seilvariante 2 – Vergleich Laststufen

Abbildung 20 zeigt den Vergleich der Lebensdauerergebnisse der Dauerbiegeversuche der Seilvariante 2 bei der niedrigen Laststufe. Die Ergebnisse der zweiten Laststufe sind in Abbildung 21

dargestellt. Die Steigerung des D/d-Verhältnisses brachte eine konstante Erhöhung der Lebensdauer um +78 % bzw. +76 %. Es lässt sich eine linear verlaufende Tendenz für die Steigerung der Last bei gleichbleibenden D/d-Verhältnis nachweisen (Abbildung 22).

Die konventionelle Seilvariante 3 wies die größte prozentuale Steigerung der Lebensdauer infolge der Steigerung des D/d-Verhältnis auf. Diese Beobachtung konnte bei beiden Laststufen festgestellt werden. Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die entsprechenden prozentualen Steigerungen grafisch. Die prozentuale Änderung der Lebensdauer infolge der Laständerung bei gleichbleibenden D/d-Verhältnis ist in Abbildung 25 zu sehen. Das mittlere D/d-Verhältnis weist eine größere Spanne zwischen den Lebensdauern der einzelnen Laststufen auf als das niedrige bzw. hohe D/d-Verhältnis. Es gilt weiterhin zu beachten, dass die experimentellen Untersuchungsergebnisse einer gewissen Streuspanne unterliegen. Auf Grund des großen Zeitaufwandes eines Dauerbiegeversuches war im Forschungsprojekt nicht ausreichend Zeit, um die Versuche in ausreichender Anzahl zu wiederholen.

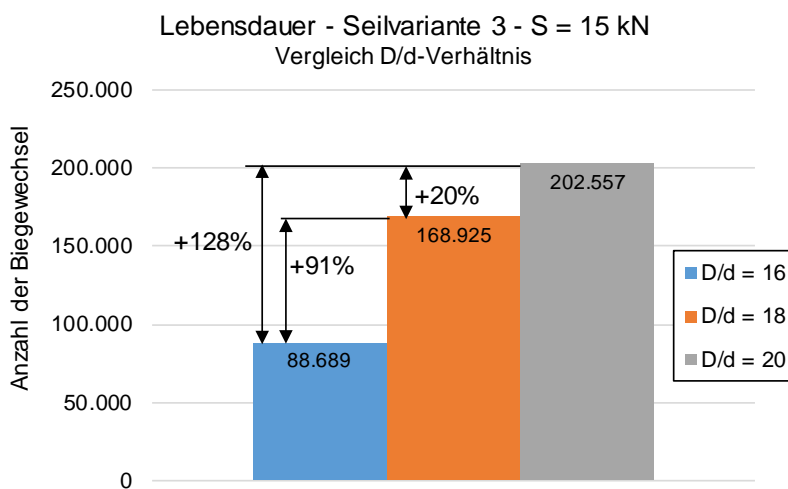


Abbildung 23: Seilvariante 3 – Vergleich D/d-Verhältnis; S = 15 kN

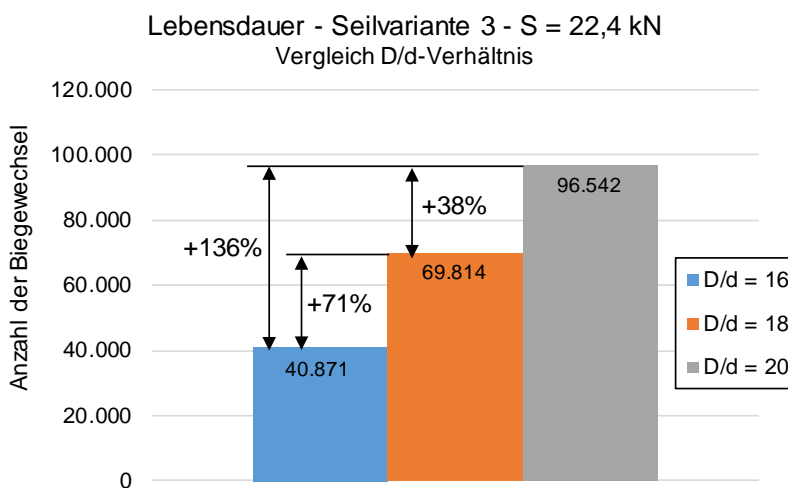


Abbildung 24: Seilvariante 3 – Vergleich D/d-Verhältnis; S = 22,4 kN

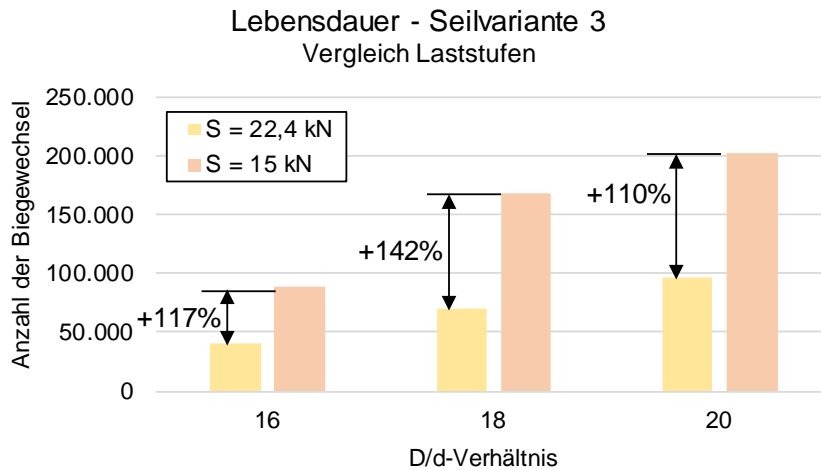


Abbildung 25: Seilvariante 3 – Vergleich Laststufen

Die genaue Lokalisierung und Dokumentation der Drahtbruchentwicklung während des Dauerbiegewechselversuches war nur für die konventionelle Seilvariante 3 exakt durchzuführen. Somit konnte auch die Ablegereife genau bestimmt werden. Die geltenden Ablegekriterien konnten für die Seilvarianten 1 und 2 nach Ablösung der Kunststoffummantelung überprüft werden. Die bis zu diesem Zeitpunkt auftretenden Drahtbrüche konnten dann exakt lokalisiert werden.

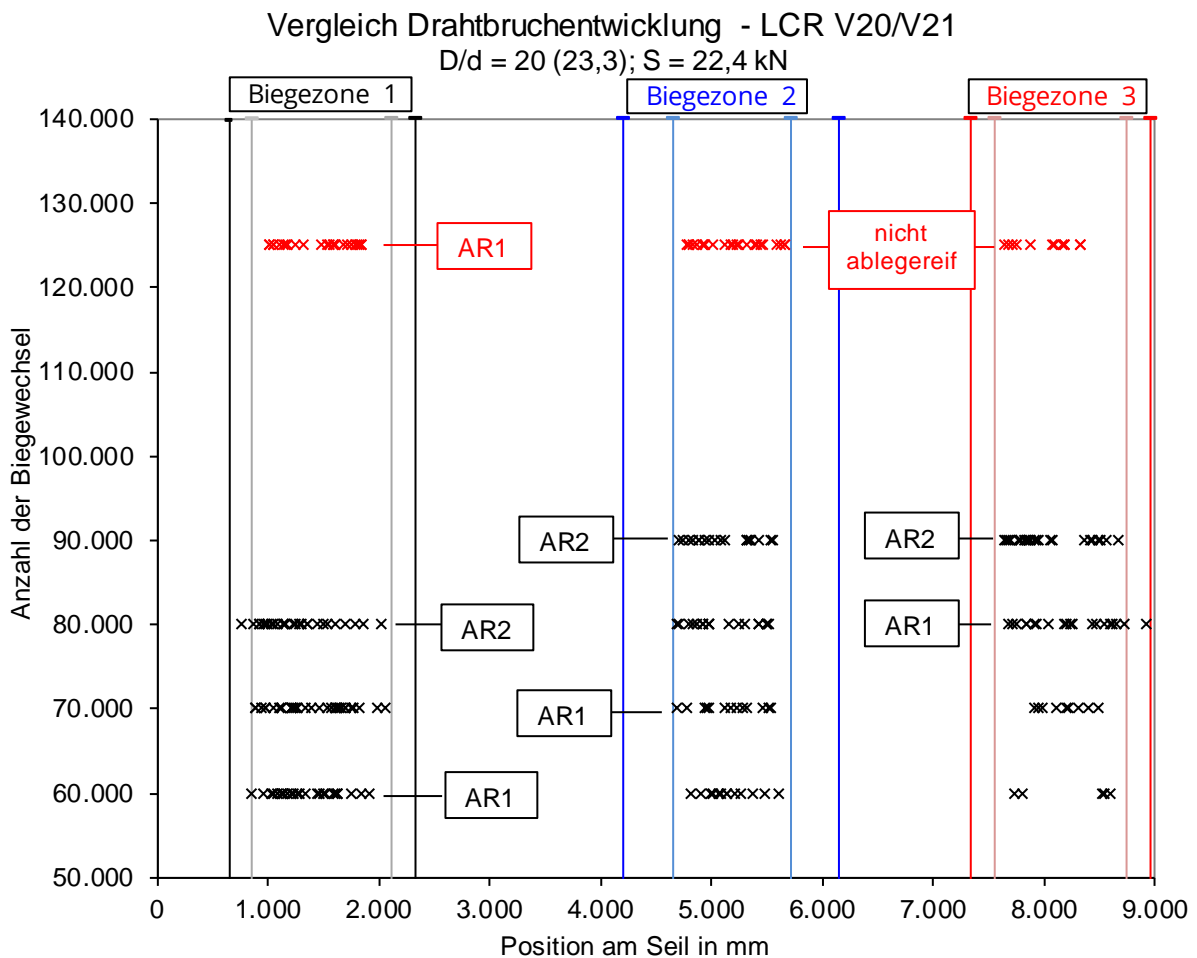


Abbildung 26: Vergleich Drahtbruchentwicklung bei Seilvariante 2 und 3

Abbildung 26 zeigt die Drahtbruchentwicklung des Versuchs V21 des konventionellen Seiles beim großen D/d-Verhältnis und der hohen Laststufe. Die auftretenden Drahtbrüche in den drei Biege-zonen sind mit schwarzen Kreuzen dargestellt. Die Anzahl der durchlaufenden Biegewechsel beim Erreichen der AR1 bzw. AR2 sind im Diagramm markiert. Der Dauerbiegeversuch V20 wurde bei gleichen Parametern mit der Seilvariante 2 durchgeführt. Nach 125.000 Biegewechseln war die Kunststoffummantelung in den drei Biege-zonen vollständig vom Drahtseil gelöst. Zu diesem Zeitpunkt wurde eine Überprüfung der Seilschädigung mit Fokus auf die sichtbaren äußeren Drahtbrüche durchgeführt. Die detektierten Drahtbrüche sind im Diagramm durch rote Kreuze dargestellt. Lediglich die Biegezone 1 hatte die AR1 auf Grund der Überschreitung der maximal zulässigen Anzahl an Drahtbrüchen erreicht. Die anderen beiden Biege-zonen lagen noch unter dem Grenzwert. Ab diesem Zeitpunkt waren die Einzeldrähte dem direkten Stahl/Stahl-Kontakt zwischen Seil und Seilscheibe ausgesetzt. Es wird angenommen, dass das kunststoffummantelte Seil im Inneren deutlich mehr geschädigt ist. Diese nicht sichtbaren Drahtbrüche waren im Rahmen der optischen Seilinspektion nicht erkennbar. Auch die magnetinduktive Seilprüfung konnte diese Schädigung nicht exakt dokumentieren.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2.3 wurden die getesteten Versuchsseile nach dem Versuchsende einer genauen Nachuntersuchung unterzogen. Dabei wurde der äußere Zustand des Draht-seiles betrachtet. Zusätzlich erfolgte die Begutachtung der inneren Seilschädigung durch die Öffnung des Seiles und die Entnahme der Außenlitzen.

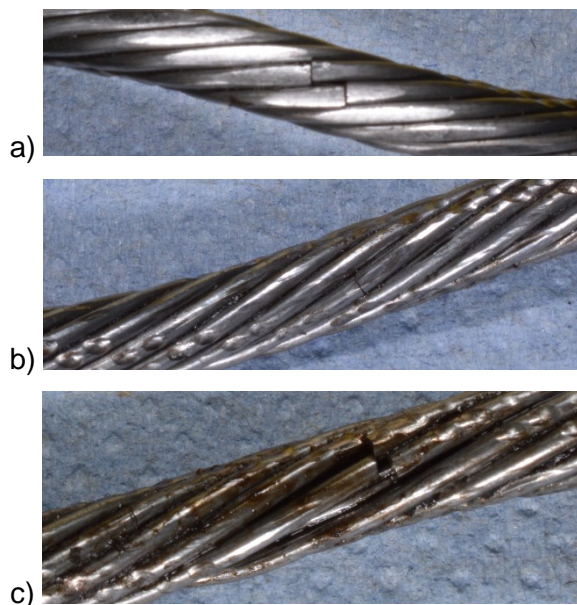


Abbildung 27: Drahtbrüche an den Außenlitzen der Prüfseile; a) äußere sichtbare Drahtbrüche; b) innere nicht sichtbare Drahtbrüche; c) nicht sichtbare Drahtbrüche in den Litzengassen

Als Untersuchungskriterium galten die detektierbaren Drahtbrüche an den Außenlitzen der Versuchsseile. Auf Grund der Kalibrierung des Seiles vor dem Ummantelungsprozess wurde die Außenseite der Außenlitzenlage bereits abgeplattet. Diese Abplattung ist in Abbildung 27a deutlich zu erkennen. Eine plastische Verformung der Drahtkuppen der einzelnen Litzendrähte infolge der Druckbelastung an der Seilscheibe war weder für die ummantelten Seilvarianten noch für die konventionelle Variante erkennbar. Zusätzlich sind zwei äußere sichtbare Drahtbrüche zu sehen. Abbildung 27b zeigt einen inneren nicht sichtbaren Drahtbruch aus dem Kontaktbereich der Außenlitzenlage mit dem Seilkern. Zusätzlich sind Druckstellen links und rechts der inneren Berührungsbereichs zu erkennen. Diese Abdrücke entstanden durch die Kalibrierung des Seiles. Durch

die Durchmesserreduktion wurde die Sperrung der Außenlitzen überwunden. Die Folge ist die Berührung benachbarter Außenlitzen. Dieser Kontakt sollte auf Grund möglicher zusätzlicher Schädigung vermieden werden. Abbildung 27c zeigt Drahtbrüche im Kontaktbereich der benachbarten Außenlitzen. Diese Störstellen wurden als innere nicht sichtbare Drahtbrüche eingestuft.

Tabelle 5: Nachuntersuchung Innenschädigung

V13 - Biegezone 2					
Außenlitze	DB Außen	DB Innen	DB Gasse	Gesamt	Anteil sichtbar
1	10	5	9	24	0,42
2	10	4	21	35	0,29
3	4	9	7	20	0,20
4	2	5	15	22	0,09
5	6	2	21	29	0,21
6	10	6	13	29	0,34
Gesamt	42	31	86	159	0,26

Tabelle 5 zeigt exemplarisch die Auswertung der Nachuntersuchung am getesteten Seil. In diesem Beispiel wurde die Biegezone 2 des Dauerbiegeversuchs V13 betrachtet. Auf Grund der prozentualen Auswertung des Anteiles der sichtbaren Drahtbrüche war die Länge des untersuchten Probestückes nicht relevant. Dennoch wurde die gleiche Probenlänge von ca. 0,5 m bei jeder Untersuchung genutzt. Der Gesamtanteil der sichtbaren Drahtbrüche wurde als Mittelwert der Anteile der sechs Außenlitzen gebildet.

Tabelle 6: Auswertung der Nachuntersuchung für Seilvariante 1

Versuchsnummer	D/d-Verhältnis		Rillradius r	Seilkraft S	Lebensdauer	Anteil sichtbarer Drahtbrüche			
	D/d _U	D/d _K				BZ 1	BZ 2	BZ 3	Mittel
V1	16	18,6	7,5 mm	15,0 kN	163.055	0,55	Riss	0,58	0,57
V13	18	21	7,5 mm	15,0 kN	255.901	Riss	0,26	0,27	0,27
V19	20	23,3	7,5 mm	15,0 kN	325.883	0,04	Riss	0,05	0,05
V9	16	18,6	7,5 mm	22,4 kN	76.001	0,49	Riss	0,54	0,52
V14	18	21	7,5 mm	22,4 kN	104.293	Riss	0,35	0,41	0,38
V20	20	23,3	7,5 mm	22,4 kN	148.150	0,24	Riss	0,13	0,19

Tabelle 6 zeigt die Übersicht der Ergebnisse der Nachuntersuchung für Seilvariante 1 mit dem transparentem Kunststoff. Die Ergebnisse der Seilvariante 2 mit schwarzen Kunststoff sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Auswertung der Nachuntersuchung für Seilvariante 2

Versuchsnummer	D/d-Verhältnis		Rillradius r	Seilkraft S	Lebensdauer	Anteil sichtbarer Drahtbrüche			
	D/d _U	D/d _K				BZ 1	BZ 2	BZ 3	Mittel
V4	16	18,6	7,5 mm	15,0 kN	135.508	0,5	Riss	0,46	0,48
V15	18	21	7,5 mm	15,0 kN	181.854	0,21	Riss	0,28	0,25
V17	20	23,3	7,5 mm	15,0 kN	242.459	0,11	Riss	0,09	0,10
V10	16	18,6	7,5 mm	22,4 kN	63.447	0,63	Riss	0,59	0,61
V16	18	21	7,5 mm	22,4 kN	85.140	0,31	Riss	0,5	0,41
V18	20	23,3	7,5 mm	22,4 kN	111.634	0,17	Riss	0,26	0,22

Beide Seilvarianten mit Kunststoffhülle verzeichneten die Abnahme des Anteils der sichtbaren Drahtbrüche bei steigendem D/d-Verhältnis. Mit steigender Last nahm der Anteil der sichtbaren Drahtbrüche tendenziell zu. Die Innenschädigung war zumeist immer noch dominant.

Tabelle 8: Auswertung der Nachuntersuchung für Seilvariante 3

Versuchsnummer	D/d-Verhältnis		Rillenradius r	Seilkraft S	Lebensdauer	Anteil sichtbarer Drahtbrüche			
	D/d _U	D/d _K				BZ 1	BZ 2	BZ 3	Mittel
V3	-	18,6	7,5 mm	15,0 kN	88.689	0,54	Riss	0,6	0,57
V7	-	18,6	6,5 mm	15,0 kN	106.583	Riss	0,56	0,58	0,57
V23	-	21	7,5 mm	15,0 kN	191.284	0,78	Riss	0,75	0,77
V22	-	23,3	7,5 mm	15,0 kN	202.557	0,45	Riss	0,38	0,42
V26	-	18,6	7,5 mm	22,4 kN	34.589	0,45	Riss	0,51	0,48
V8	-	18,6	6,5 mm	22,4 kN	40.871	Riss	0,39	0,56	0,48
V24	-	21	7,5 mm	22,4 kN	69.814	0,52	Riss	0,43	0,48
V21	-	23,3	7,5 mm	22,4 kN	96.542	0,76	Riss	0,66	0,71

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisübersicht der Nachuntersuchungen für die konventionelle Seilvariante 3. Die Tendenz des abnehmenden Anteils der sichtbaren Drahtbrüche bei steigendem D/d-Verhältnis, wie bei den beiden kunststoffummantelten Seilvarianten, war nicht erkennbar. Auch die dominierende Innenschädigung war bei beiden Laststufen nicht feststellbar. Deutliche Unterschiede zwischen konventionellen Drahtseil und kunststoffummantelten Drahtseil waren zu erkennen. Die verwendete Rillengeometrie schien zumindest bei der geringen Änderung keinen Einfluss auf das Schädigungsverhalten des konventionellen Drahtseiles zu haben.

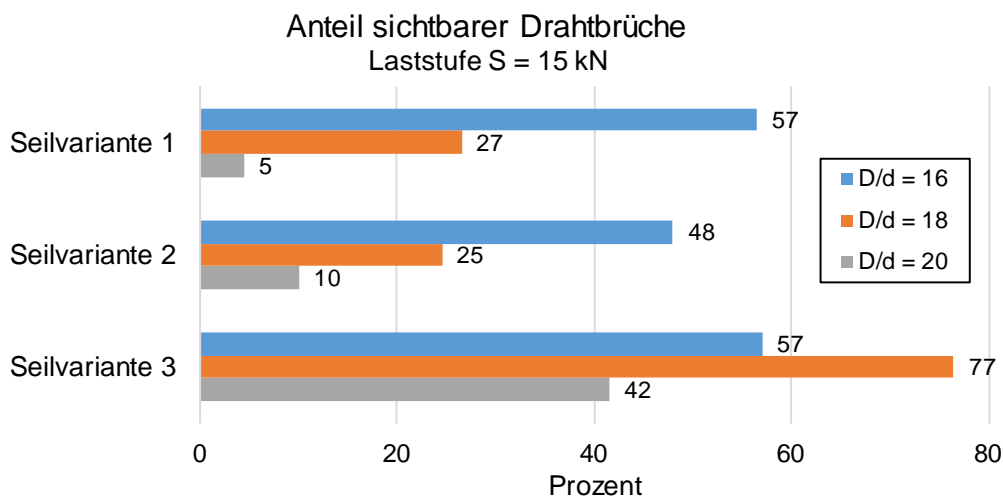


Abbildung 28: Prozentualer Anteil sichtbarer Drahtbrüche; Laststufe S = 15 kN

Der prozentuale Anteil der sichtbaren Drahtbrüche für die drei Seilvarianten bei allen D/d-Verhältnissen und der niedrigen Laststufe ist in Abbildung 28 visualisiert worden. Die Ergebnisse der Nachuntersuchung der Versuchsseile mit hoher Laststufe sind in Abbildung 29 dargestellt. Der qualitative Verlauf des Schädigungsverhaltens war bei den kunststoffummantelten Seilvarianten gleich. Eine quantitative Auswertung hätte jedoch nur mit deutlich mehr Untersuchungen von variantenreich eingesetzten Seilen durchgeführt werden können.

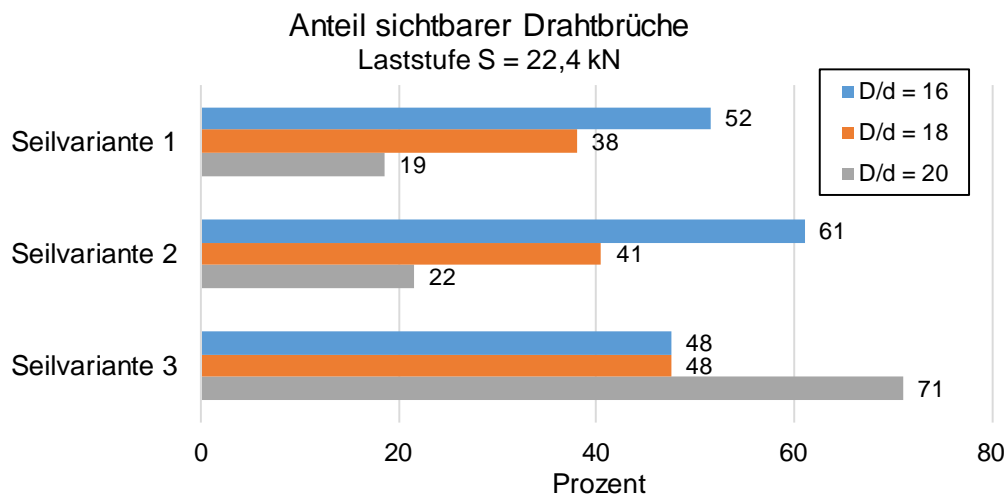


Abbildung 29: Prozentualer Anteil sichtbarer Drahtbrüche; Laststufe S = 22,4 kN

Es wurde angenommen, dass die Innenschädigung bei kunststoffummantelten Drahtseilen überwiegt. Bei gewissen D/d-Verhältnissen trat diese Erscheinung auch auf. Es wurde festgestellt, dass trotz schützender Kunststoffummantelung auch eine deutliche Anzahl Ermüdungsbrüche an der Außenseite der Außenlitzen auftraten.

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 2.3 mit dem Ziel

Im Rahmen des Arbeitspakets konnten die angestrebten Arbeiten durchgeführt werden. Die Dauerbiegeversuche, die regelmäßigen Inspektionen des Seilzustandes sowie die umfangreichen Nachuntersuchungen waren sehr zeitaufwendig. Der Einfluss der Kunststoffummantelung auf die Lebensdauer von Drahtseilen konnte experimentell nachgewiesen werden. Während die Lebensdauer zunahm, stieg auch der Anteil der Innenschädigung verglichen mit der Außenschädigung, welche ein normgerechtes Ablegekriterium darstellt. Das angestrebte Ziel wurde mit den durchgeführten Arbeiten und den gewonnenen Ergebnissen erreicht.

AP 2: Grundlagenversuch Forschungsstelle 2

In dem Grundlagenversuch wurden kunststoffummantelte Stahlseile auf dem institutseigenen Spulprüfstand mit unterschiedlichen Seilzugkräften und D/d-Verhältnissen der Seiltrommeln in mehreren Lagen gewickelt. Ziel der Untersuchung war es, Aussagen zu den Schädigungsarten und den Schädigungsorten der Ummantelung, der Verformung des ummantelten Seils und dem Stapelverhalten zu erhalten.

AP 2.2 Parameter Spulversuche Mehrlagenwicklung

Durchgeführte Arbeiten

In Arbeitspaket 2.2 wurden die Versuchsparameter für die mehrlagigen Spulversuche festgelegt. Dies umfasste die Seilzugkräfte, die D/d-Verhältnisse, die Spulgeschwindigkeit und das Rillungssystem.

Erzielte Ergebnisse

Die Spulversuche wurden mit 10 % und 20 % der Mindestbruchlast bei einer Geschwindigkeit von 15 m/min durchgeführt. Dies entsprach einer Seilzugkraft von 10 kN bzw. 25 kN. Für die Seil-

trommeln wurde ein Verhältnis von Trommelmantel- zum Seildurchmesser von 18 und 24 festgelegt. Um ein gutes Wickelbild zu erreichen, verfügten die Seiltrommeln über eine Lebus-Rillung. Die sich aus den Parametern ergebende Versuchsmatrix ist in Abbildung 30 dargestellt.

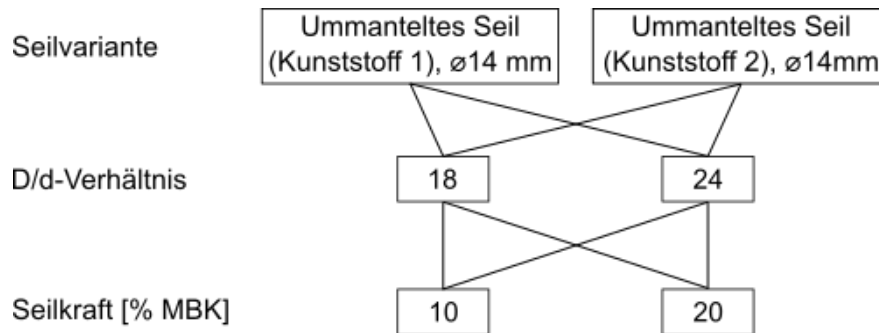


Abbildung 30: Versuchsmatrix für den Spulprüfstand (8 Versuche)

Eine Seiltrommel mit D/d-Verhältnis von 24 befand sich bereits im Bestand der TUC. Die Seiltrommel mit einem D/d-Verhältnis von 18 wurde am Institut selbst ausgelegt und gefertigt. Die wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Trommeln für mehrlagen Wickelversuch

Trommel	d_n in mm	D in mm	D/d	D_B in mm	L in mm	e in mm	u	n
1	14	336	24	520	338,1	14,7	23	5
2	14	252	18	450	330,3	14,7	22	5

Die beiden Seiltrommeln sind in Abbildung 31 dargestellt.

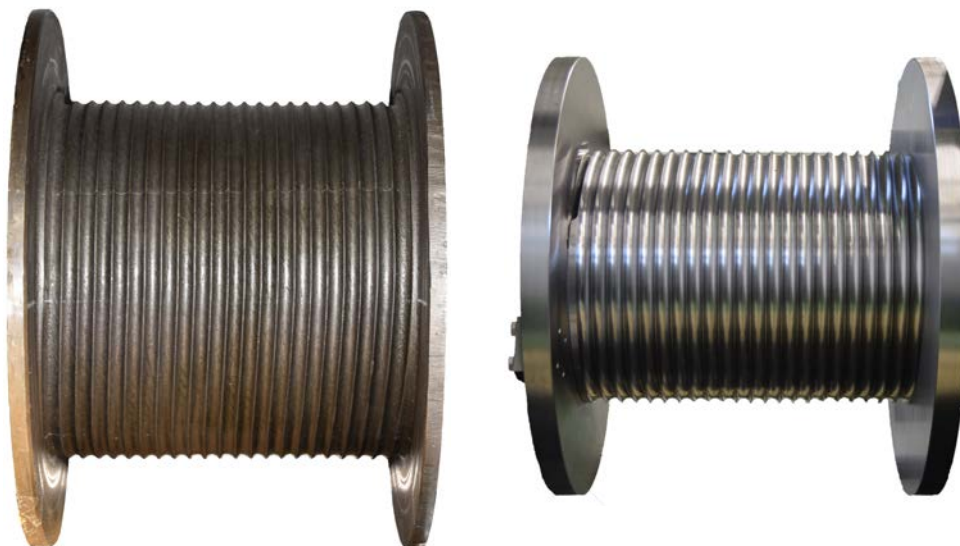


Abbildung 31: Trommel 1 D/d = 24 (links) [Sch 19] und Trommel 2 D/d = 18 (rechts)

Die Lebus-Rillung zeichnet sich durch die Unterteilung des Trommelmantels in jeweils zwei Parallel- und Kreuzungsbereiche aus. In den Parallelbereichen läuft das Seil parallel zur Bordwand, während es in den Kreuzungsbereichen die Hälfte der Seilsteigung zur Seite läuft. Dies ist in Abbildung 32 für drei Lagen dargestellt.

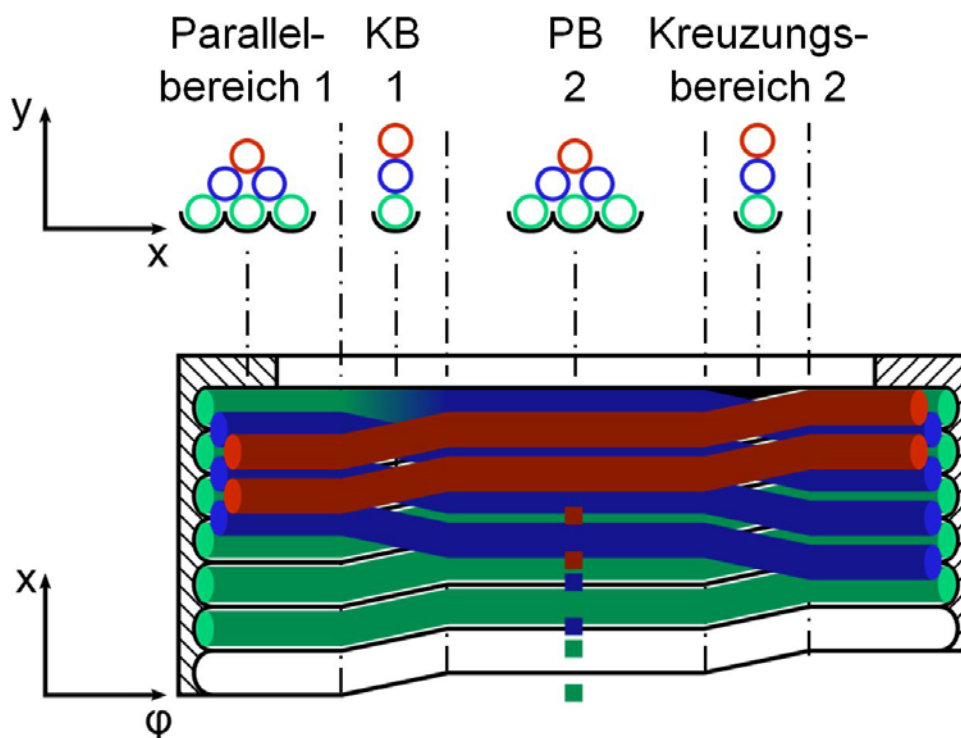


Abbildung 32: Anordnung der Kreuzungs- und Parallelbereiche auf einer Seiltrommel [Sch 18_2]

Bei zwei Kreuzungsbereichen ist das Seil nach einer Umdrehung eine Umschlingung zur Seite gelaufen. Bei mehreren Lagen ist die Laufrichtung in den Kreuzungsbereichen entgegengesetzt. Dies führt zu unterschiedlichen Seilanordnungen je nach Bereich des Trommelmantels. Im Kreuzungsbereich führt dies zu einer Stapelanordnung, während es in den Parallelbereichen zu einer pyramidenförmigen Anordnung der Seile kommt. Die unterschiedlichen Seilanordnungen sind in Abbildung 32 ebenfalls dargestellt.

Übereinstimmung der Ergebnisse aus dem AP 2.2 mit dem Ziel

Der im Arbeitspaket 2.2 aufgestellte Versuchsplan wurde mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmt.

AP 2.4 Durchführung Spulversuche Mehrlagenwicklung

Durchgeführte Arbeiten

Die kunststoffummantelten Seile wurden auf dem Spulprüfstand (Abbildung 33) zwischen den beiden Seiltrommeln mit einer Geschwindigkeit von 15 m/min gespult. Die Versuche wurden mit zwei unterschiedlichen Seilzugkräften bei 10 kN oder 25 kN durchgeführt. Dabei wurden die Seiltrommeln mit den Verhältnissen 18 und 24 vom Seiltrommeldurchmesser zum Seildurchmesser (D/d -Verhältnis) eingesetzt. Auf der oberen Prüftrommel befanden sich Laserprofilscanner, um die Oberseite des Seilpaketes während des Wickelvorgangs zu erfassen. Im Nachgang wurden die Daten genutzt, um das Wickelbild zu berechnen. Zusätzlich wurden Aussagen zur Wickelqualität abgeleitet.



Abbildung 33: Spulprüfstand mit elektrischen Antrieben

Erzielte Ergebnisse

Aus den Wickelversuchen wurden verschiedene Erkenntnisse generiert. Es wurde das Wickelverhalten der kunststoffummantelten Seile, die Schäden am Seil sowie der Schadensort und die Lebensdauer der Ummantelung untersucht. Die Analyse der Schäden und Schadensorte war insbesondere für eine spätere Optimierung des Kunststoffmantels und die Auslegungshinweise in AP 6 von Bedeutung.

Das Wickelverhalten der kunststoffummantelten Drahtseile war bei einem intaktem Mantel sehr gut (Abbildung 34). Die Seile konnten ohne Wickelfehler und Lücken gespult werden.

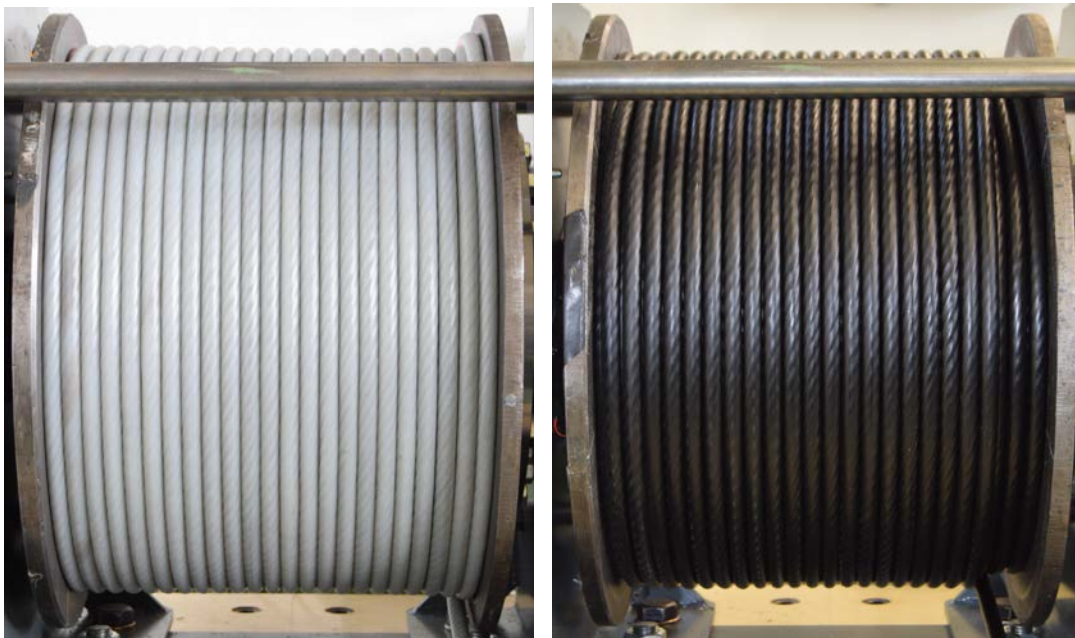


Abbildung 34: Wickelbilde für Kunststoff 1 (links) und Kunststoff 2 (rechts)

Ausgewertet wurden die Wickelradien der einzelnen Lagen des Seilpakets bei einer Zugkraft von 25 kN (Abbildung 35). Mit zunehmender Wickelhöhe wurde die Wickelradiuszunahme Δr geringer, da sich sowohl die Seiltrommel, als auch die unteren Lagen des Seilpakets verformten. Ohne die Verformung würde der Wickelradius aus den geometrischen Verhältnissen um 11,915 mm

zunehmen. Die Zunahme fiel jedoch erheblich geringer aus, da der Kunststoffmantel sich unter dem Druck stark verformte.

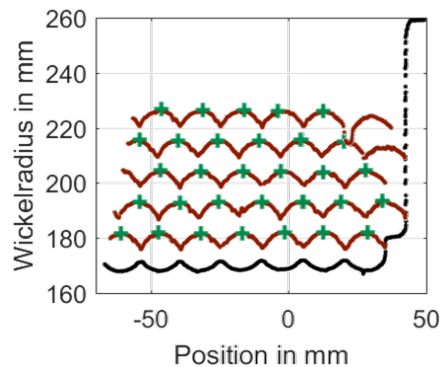


Abbildung 35: Aufbau des Wickelpaketes bei 25 kN Zugkraft

Die aufgetretenen Schäden wurden nach dem Auftrittsort beschrieben und analysiert. Insgesamt konnten vier Auftrittsorte mit charakteristischen Schäden identifiziert werden. Dies waren der Kreuzungsbereich und der Parallelbereich der Lebus-Rillung, der Aufstiegsbereich des Seils aus einer Lage in die nächst höhere Lage sowie die Wickelfehler im Seilpaket durch den geschädigten Kunststoffmantel. Die Schadensintensität war in den unteren Lagen am höchsten und nahm in den höheren Lagen ab. Diese Beobachtung kann durch den geringer werdenden Wickeldruck der höheren Lagen begründet werden.

Tabelle 10: Wickelradien für jede Lage

Lage	Wickelradius r	Δr
5	226,3	10,9
4	215,4	11,0
3	204,4	11,2
2	193,2	11,3
1	181,9	13,9
Rillung	168	

In den Kreuzungsbereichen der Seiltrommel war eine Abplattung des Kunststoffmantels nach wenigen Spuldurchgängen festzustellen. Bei den beiden untersuchten Kunststoffen führte die fortwährende Belastung zu unterschiedlichen Schäden am Seil. Bereits nach dem ersten Spulen waren Deformationen am Kunststoffmantel zu erkennen. In Abbildung 37 sind diese nach dem zweiten Spulvorgang auf der Seiltrommel mit einem D/d -Verhältnis von 18 für die Seilvariante 2 gezeigt. Die unterschiedlich starke Ausprägung der Verformung ist auf die unterschiedlichen Querdrücke zwischen der zweiten (oben) und der vierten Lage (unten) zurückzuführen.



Abbildung 36: Deformation der zweiten (oben) und der vierten Lage (unten) nach zweimaligem spulen auf der Seiltrommel $D/d = 18$

Bei beiden Kunststoffen konnte anfänglich eine Gratbildung beobachtet werden. Abbildung 36 (oben) zeigt diesen Grat an der Kunststoffummantelung der Seilvariante 2. Die beiden Kunststoffe verhielten sich unter stetiger Be- und Entlastung auf Grund des unterschiedlichen Materials verschieden. Auf die mechanischen Materialeigenschaften wird in AP 4 eingegangen.

Bei dem transparenten Kunststoff (Seilvariante 1) führte der wiederholte Querdruck zunächst zu einer Gratbildung. Die weitere Deformation war von der Prüflast abhängig. Bei der höheren Last bildeten sich große Grate bevor der Kunststoff aufriss (Abbildung 37). Mit steigender Anzahl der Prüfzyklen konnte eine Ablösung und Aufweitung des Kunststoffmantels festgestellt werden. Dabei wurde der Kunststoffmantel so dünn, dass er löchrig wurde (Abbildung 38). Bei der geringeren Prüflast von 10 kN konnte auch eine Gratbildung beobachtet werden. Jedoch kam es während des Versuches nicht zum Riss der Kunststoffummantelung.

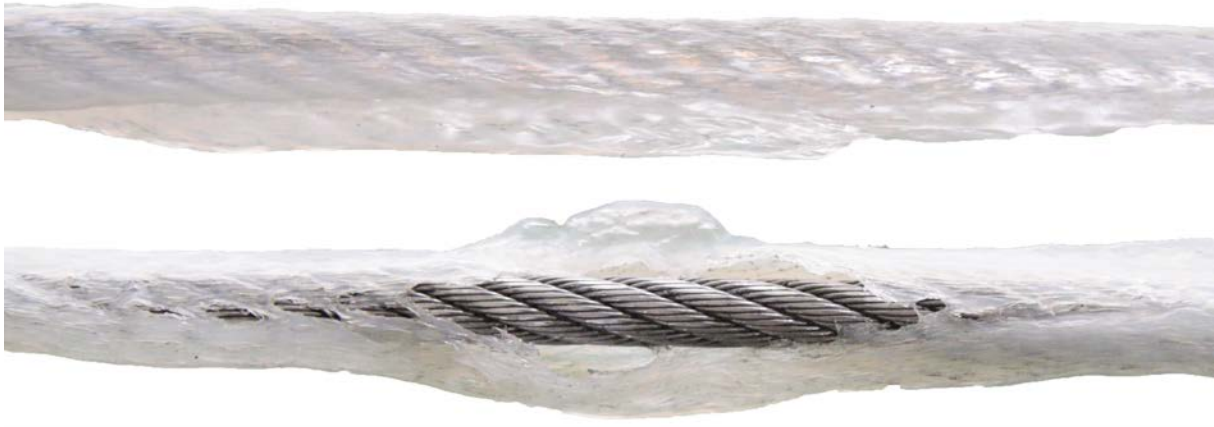


Abbildung 37: Schäden im Kreuzungsbereich bei einer Prüflast von 25 kN an Seilvariante 1



Abbildung 38: Kunststoffmantel nach 20-maligem spulen bei 25 kN und $D/d = 25$

Während der Versuche mit Seilvariante 2 (schwarzer Kunststoff) kam es ebenfalls zu einer Gratbildung. Die Höhe des Grates konnte stellenweise mehr als 14 mm betragen, sodass das Seil an diesen Stellen einen doppelten Durchmesser aufwies. Mit zunehmender Schädigung riss der Kunststoffmantel auf, zeigte jedoch keine starke Aufweitung wie der transparente Kunststoff. Die Ablösung vom Seil konnte auf Grund der Intransparenz nur schlecht beurteilt werden. Jedoch lag der Kunststoff bei offenem Mantel meist noch eng um das Seil (Abbildung 39). Unter beiden Prüflasten verschob sich der Kreuzungsbereich beim schwarzen Kunststoff mit jeder zusätzlichen Umschlingung um einige Grad (Abbildung 41). Dies deutete darauf hin, dass die Steigung der Rillung nicht zu dem Seil passte. Bei dem transparenten Kunststoff konnte dies nicht beobachtet werden (Abbildung 40).

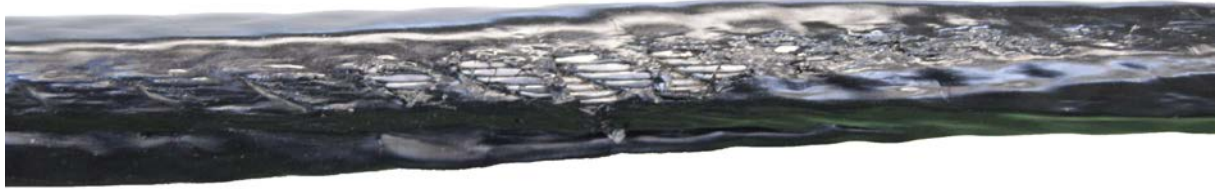


Abbildung 39: Schaden im Kreuzungsbereich bei einer Prüflast von 25 kN an Seilvariante 2

Das Drahtseil, das während des gesamten Wickelversuches auf der Seiltrommel lag, wies bei beiden untersuchten Kunststoffvarianten das gleiche Schadensbild auf. Der im Kontakt befindliche Kunststoff wurde in die Seilzwischenräume gedrückt, sodass das Stahlseil offen gelegt wurde (Abbildung 40). Der Kreuzungsbereich wurde zusätzlich in einem Modellversuch in AP 3 untersucht.



Abbildung 40: Offener Kunststoffmantel im Kreuzungsbereich bei Auflage auf der Seiltrommel

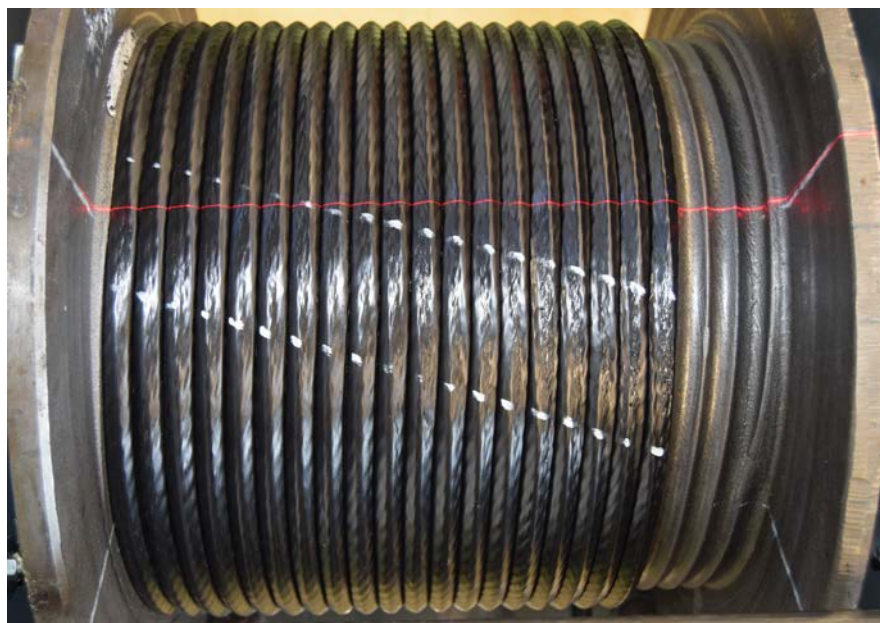


Abbildung 41: Verschiebung des Kreuzungsbereichs bei der Prüflast 25 kN

Der Parallelbereich wies die geringsten Schäden am Kunststoffmantel auf. Der schwarze Kunststoff nahm nach einiger Zeit einen sechseckigen Querschnitt an (Abbildung 42 links). Doch auch in den höheren Lagen hat die Seilummantelung teilweise eine sechseckige Form angenommen, welche sich unterschiedlich stark ausprägte (Abbildung 43). Die Deformation konnte sowohl bei der Prüfkraft von 25 kN als auch bei 10 kN beobachtet werden. Die Deformation von einem runden Querschnitt zu einem Sechseck ist von Faserseilen in der der Mehrlagenwicklung bekannt (Abbildung 42 rechts) und ist auf den geringen Querelastizitätsmodul des Faserseiles zurückzuführen. Röntgenuntersuchungen zeigten, dass bei Faserseil die Deformation überwiegend im Schutzmantel stattfindet [Ern 18].

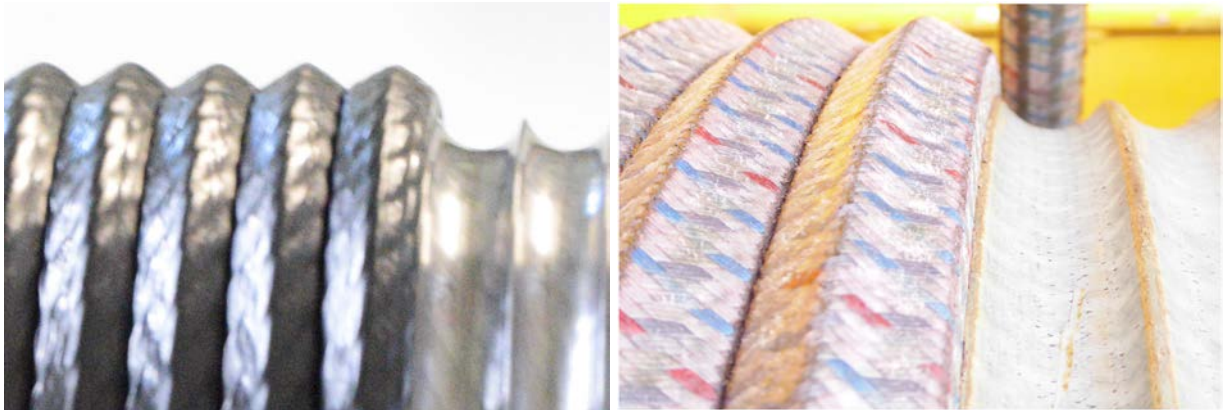


Abbildung 42: Deformiertes Prüf- und Faserseil im Parallelbereich der Mehrlagenwicklung [Ern 18]



Abbildung 43: Sechseckig deformierter Kunststoffmantel im Parallelbereich einer höheren Lage

Der transparente Kunststoff bildete in den Parallelbereichen Grate. Zusätzlich kam es zu einer Ablösung des Kunststoffs vom Seil und einer Aufweitung des Mantels. Mit zunehmender Versuchsdauer wurde der Kunststoffmantel so dünn, dass der Kunststoff löchrig wurde und das Stahlseil schließlich auf längeren Stücken offen gelegt wurde (Abbildung 38).

Im Aufstiegsbereich von einer Lage in die nächsthöhere Lage wurde das Seil besonders stark geschädigt. Das Seil hatte in diesem Bereich zwei kritische Kontakte, sodass es an drei Stellen, die jeweils eine Umwicklung auseinanderliegen, geschädigt wurde. Die erste geschädigte Stelle konnte an der letzten Umschlingung der unteren Lage in dem Kreuzungsbereich, in dem das Seil von einer vollen auf die halbe Seilbreite an die Bordscheibe heranlief detektiert werden (Abbildung 44 links). Die Schädigung entstand durch den Aufstieg des Seiles in die obere Lage bei der nachfolgenden Umdrehung. Der mittlere Schädigungsbereich befand sich im aufsteigenden Seilstück und war an beiden kritischen Kontakten beteiligt (Abbildung 44 Mitte). Eine weitere Schä-

digung der Ummantelung fand eine Umschlingung weiter statt, als das in der höheren Lage laufende Seil auf das aus der niedrigeren Lage aufsteigende Seil auflief und eine Seilbreite weiter geworfen wurde. In Abbildung 44 (rechts) ist der gerade geöffnete Kontakt und die Deformation an der Kontaktstelle sichtbar.

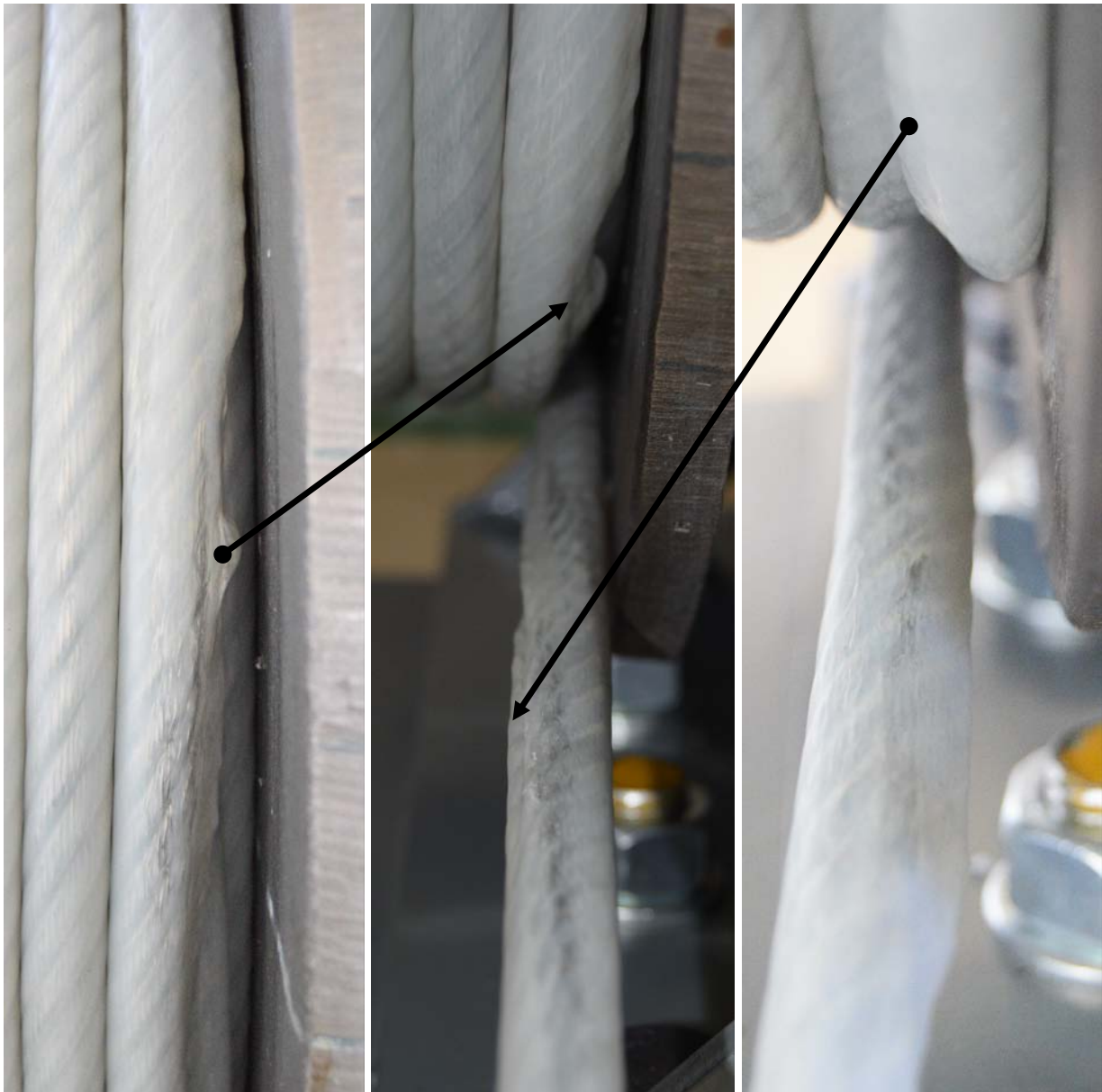


Abbildung 44: Aufstiegsbereich der 3. in die 4. Lage mit den drei Schädigungsstellen an der letzten vollen Umschlingung (links), am austiegenden Seil (Mitte) und nach der ersten vollen Umschlingung im Kontakt mit dem aufsteigenden Seil (rechts)

Auf Grund des fehlenden Kontaktes wurde im Aufstiegsbereich noch ein weiterer Schaden festgestellt. Das Seil, das eine halbe Rillenweite von der Bordscheibe entfernt war, wies eine Gratbildung auf. Dies ist in Abbildung 45 auf der Trommel und in Abbildung 46 am abgespulten Seil gezeigt. Der durch den Grat geschädigte Mantel hatte eine Länge von ca. 400 mm. Dies entsprach bei der verwendeten Trommel der exakten Länge des Parallelbereichs.



Abbildung 45: Geschädigtes Seil durch fehlenden Bordscheibenkontakt auf der Trommel



Abbildung 46: Grat am Seil im Detail (oben) und mit Maßstab (unten)

Mit zunehmender Schädigung des Seils kam es vermehrt zu Wickelfehlern. Verantwortlich dafür waren die gebildeten Grate am deformierten Kunststoffmantel. Das aufspulende Seil wurde dadurch zu früh in den nächsten Seilzwischenraum der unteren Lage überführt. Je nach Position des Grates wurde entweder die Nachbarwicklung zu früh umgeworfen oder in der überliegenden Lage eine Windung weiter. In beiden Fällen resultierte eine Lücke, in die das Seil der nächsthöheren Lage hereinfiel. Dabei entstand ein ähnlicher Kontakt wie im Aufstiegsbereich. Zwei Beispiele für Wickelfehler und die Schäden sind in Abbildung 47 und Abbildung 48 zu sehen.

Der Wickelfehler in Abbildung 47 entstand bei einer Last von 10 kN beim 35. Spulvorgang. Der Kunststoffmantel wies nur erste Deformationen auf. Der Grat der zu dem Wickelfehler führte, entstand im Aufstiegsbereich der anderen Seiltrommel. In Krananwendungen mit nur einer Seiltrommel ist das deformierte Seil aus dem Aufstiegsbereich auch immer nur im Aufstiegsbereich wieder zu finden. Da sich jedoch auch in den Kreuzungsbereichen Grate bilden, können Deformationen trotzdem jederzeit auftreten.

Der Schaden in Abbildung 48 entstand bei einer Prüfkraft von 25 kN. Der Kunststoffmantel war hier auf Grund der hohen Prüfkraft und der 10 Spulvorgänge (50 % bis Versuchsende) bereits vorgeschädigt. Auf Grund der Vorschädigung konnte hier der Grund für den Wickelfehler nicht zweifelsfrei identifiziert werden.



Abbildung 47: Auswirkungen (links) eines Wickelfehlers (Mitte) durch einen Grat in der unteren Lage (rechts).



Abbildung 48: Schädigung des Kunststoffmantels bei 25 kN Prüfkraft durch Wickelfehler

Da das Materialverhalten von Kunststoffen von dem der Metalle abweicht, werden vor der Analyse der Schäden das mechanische Verhalten von Kunststoffen, Versagenskriterien und Festigkeitsnachweise vorgestellt.

Kunststoffe weisen drei Verformungsarten unter Belastung auf. Die elastische Verformung ist reversibel und beruht auf Abstandsänderungen von Atomen und Valenzwinkelverschiebungen. Dieser Anteil ist bei Kunststoffen sehr gering. Die zeitabhängige, reversible viskoelastische Verformung ist durch die Relaxationszeiten der Makromoleküle des Polymeres gekennzeichnet. Der Werkstoff reagiert also zeitverzögert auf die äußeren Kräfte bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Mit zunehmender Belastung kommt es zu zeitabhängigen, irreversiblen, stark nicht linearen viskosen Verformungen [Erh 08].

Das viskoelastische Materialverhalten der Kunststoffe sagt aus, dass der Kunststoff sowohl die Eigenschaften einer viskosen Flüssigkeit als auch die eines elastischen Festkörpers hat. Daraus resultiert, dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dehnung gibt. Der viskose Anteil kann durch einen Dämpfer beschrieben werden, da in einer viskosen Flüssigkeit die Spannung von der Dämpfungskonstanten η und der Dehnungsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ abhängt.

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (1)$$

Der linear elastische Anteil kann durch eine Feder beschrieben werden. Der proportionale Zusammenhang zwischen der Spannung und der Verformung, das Hookesche Gesetz

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

ist analog zum linearen Federgesetz. Zur Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens ist nun die Kombination der Feder und des Dämpfers nötig. Das Maxwell-Modell ist die Reihenschaltung von Feder und Dämpfer (Abbildung 49 links) und beschreibt den Relaxationsvorgang, also eine Abnahme der Spannung bei konstanter Dehnung. Bei der Reihenschaltung ist eine bleibende Verformung durch den Dämpferanteil bei der Entlastung realisierbar. Die Parallelschaltung von Feder und Dämpfer ist das Kelvin-Voigt-Modell und beschreibt das Kriechverhalten, also die zunehmende Dehnung unter konstanter Last. Für eine hinreichend genaue Beschreibung von viskoelastischem Verhalten reichen die beiden einfachen, vorgestellten Modelle nicht aus. Für eine realistischere Beschreibung sind Kombinationen mehrere Federn und Dämpfer nötig [Gro 11].

Bei thermoplastischen Polymeren hängen die mechanischen Eigenschaften von vielen Einflussfaktoren, wie Temperatur, Zeit, Art und Höhe der Beanspruchungen sowie von Umwelteinflüsse (z. B. UV-Strahlung) ab [Erh 08]. Das Kriechen beginnt bei Polyethylen bereits bei Raumtemperatur und relativ geringen Lasten und nimmt bei steigender Temperatur sowie steigender Belastung zu. In Abbildung 50 ist der Zusammenhang zwischen der Spannung, Dehnung und Beanspruchungsdauer für Polyethylen mit einer hohen Dichte, wie es der Kunststoffvariante 2 entspricht, dargestellt. Es ist klar erkennbar, dass eine hohe Spannung in kurzer Zeit zu einer starken Dehnung des Kunststoffes führt. Insbesondere für unter Last auf Seiltrommeln aufgewickelte Seile, die längere Zeit stehen, kann dies zu Problemen führen. Eine 10 stündige Belastung (z. B. Nichtnutzung des Kranes über Nacht) mit einem Druck von 13 MPa führt zu einer Dehnung von 8 % [Dom 05].

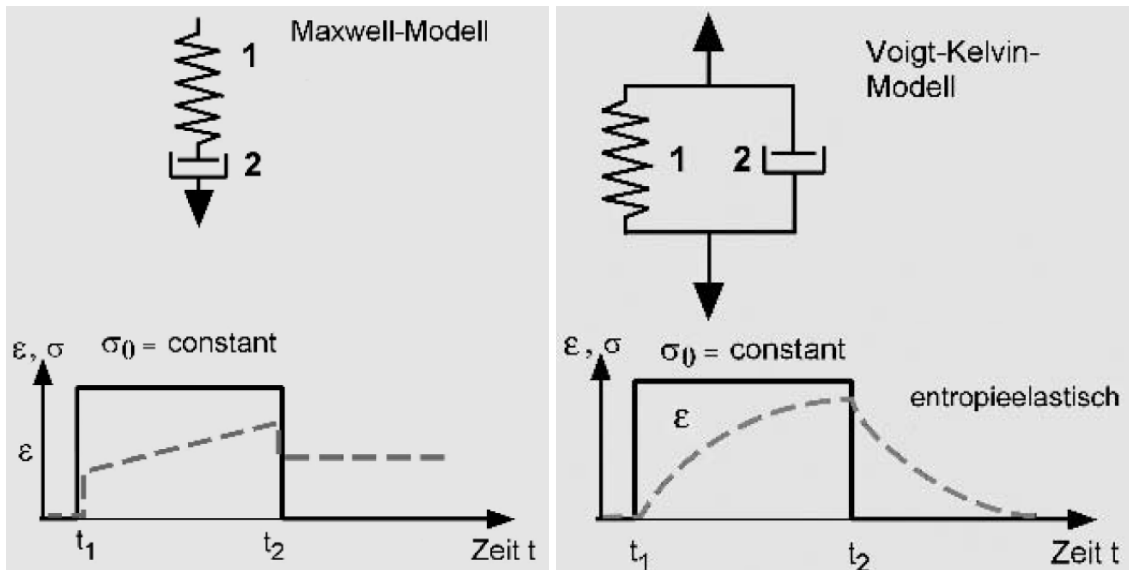


Abbildung 49: Maxwell-Modell (links) und Kelvin-Voigt-Modell (rechts) [Dom 05]

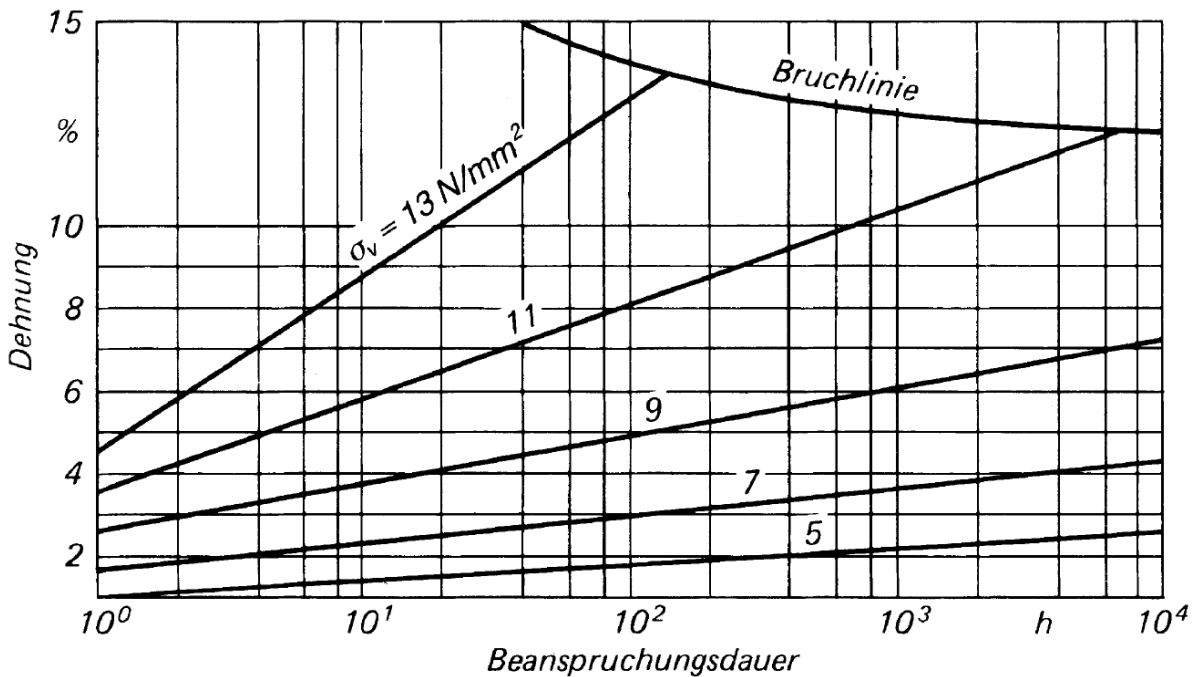


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen der Spannung, Dehnung und Beanspruchungsdauer auf PE-HD (Kunststoffvariante 2) bei 20 °C [Dom 05]

Das viele der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen zeit- und temperaturabhängig sind stellt Konstrukteure vor Herausforderungen. Insbesondere gilt dies für eine Auslegung im nichtlinearen Bereich, in denen Thermoplaste, wie die zur Ummantelung genutzten Kunststoffe, häufig beansprucht werden. Solange die Beanspruchung jedoch noch nahe dem linearen Bereich liegt, ist eine Auslegung mit den Gesetzen der Elastizitätstheorie vertretbar [Erh 08].

Der Festigkeitsnachweis wird dann analog zu dem für Metalle geführt, in dem aus einem Festigkeitskennwert K , einem Sicherheitsbeiwert S und dem Werkstoffabminderungsfaktor A eine zulässige Spannung $\sigma_{v,max}$ berechnet wird.

$$\sigma_{v,max} \leq \sigma_{zul} = \frac{K}{S \cdot A} \quad (3)$$

Der Festigkeitskennwert ist bei einer ausgeprägten Streckgrenze oder einem sprödem Trennbruch leicht zu bestimmen. Bei allen anderen Kunststoffen wird analog zur Dehngrenze $R_{p0,2}$ für Kunststoffe ebenfalls eine Ersatzstreckgrenze bei einer Dehnung von 0,5 % definiert. Die 0,5 % Dehngrenze als zulässige Spannung liegt für Kunststoffvariante 1 bei 5,5 MPa und bei Kunststoffvariante 2 bei 13,5 MPa. Bei einer statischen Langzeitbelastung ist die Zeitstandfestigkeit σ^* als Festigkeitskennwert zu wählen [Erh 08]

Während uniaxiale Beanspruchung direkt mit der zulässigen Spannung verglichen werden kann, ist für mehrachsige Spannungszustände nach einem geeigneten Versagenskriterium eine Vergleichsspannung zu berechnen. Die Vergleichsspannung kann dann im Festigkeitsnachweis mit der zulässigen Spannung verglichen werden. Nach [Erh 08] ist für reine Scherung das Schubspannungskriterium nach Tresca

$$\sigma_v = 2 \cdot \tau \quad (4)$$

ausreichend genau. Auch mit der Gestaltsänderungsenergie-Hypothese (GEH)

$$\sigma_{v,GEH} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (5)$$

erhält man hinreichend genaue Ergebnisse. Jedoch werden Polymerwerkstoffe im Zugbereich überschätzt und im Druckbereich unterschätzt. Für Werkstoffe bei denen die Druckfestigkeit höher ist als die Zugfestigkeit, sollte deshalb eher mit dem konischen oder parabolischen Bruchkriterium gearbeitet werden. Zur Anpassung der Formel an das reale Werkstoffverhalten werden die Kennwertverhältnisse der Druck- zur Zugfestigkeit, der Schub- zur Zugfestigkeit oder der Umfangsspannung eines mit Innendruck beaufschlagten Hohlkörpers zur Zugfestigkeit benötigt. Für ein Druck- zur Zugfestigkeitsverhältnis von 1 gehen beide Bruchkriterien in die GEH über. Das konische Bruchkriterium ist

$$\sigma_{v,I/II} = \frac{m-1}{2m} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \frac{m+1}{2\sqrt{2}m} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (6)$$

und das parabolische Bruchkriterium ist

$$\sigma_{v,I/II} = \frac{m-1}{2m} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \sqrt{\left(\frac{m-1}{2m}\right)^2 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{2m} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (7)$$

mit

$$m = \frac{\sigma_{dB}}{\sigma_{zB}} \quad (8)$$

In [Erh 08] ist zu erkennen, dass manche Kunststoffe besser durch das konische oder parabolische Bruchkriterium beschrieben werden als durch die GEH oder Schubspannungshypothese.

Da nicht genügend Informationen für Verwendung der Bruchkriterien vorlagen, wurde für die Auswertung der FE-Untersuchungen sowie des Modellversuchs die Schubspannungshypothese als Versagenskriterium angewandt. In zukünftigen Untersuchungen wäre ein Unterschied der Druck- und Zugfestigkeit des Kunststoffes zu untersuchen.

In den Kreuzungsbereichen wurde der Kunststoffmantel durch die Stapelanordnung besonders belastet, da die gesamte Last der darüberliegenden Lagen nur auf einem Linienkontakt übertragen wurde. Der Druck im Kontakt war damit sehr viel höher als in der Pyramidenanordnung im Parallelbereich, in dem die Last an zwei Linienkontakten übertragen wurde. Unter dem Druck begann der Kunststoff von der Oberseite des Seils in die Seilzwischenräume zu fließen. Der Kunststoffmantel wurde in dem Kontakt zum darüber- oder darunterliegenden Seil mit fortschreitender Versuchsdauer dünner. Eine extreme Verformung wie in Abbildung 51 für Faserseile gezeigt, ist bei dem kunststoffummantelten Seil auf Grund des formstabilen Stahlseils nicht möglich. Die beobachtete Verformung wurde jedoch in diese Richtung festgestellt.

Auffällig war insbesondere bei Abbildung 39 und Abbildung 40, dass der Kunststoffmantel an den Litzen geöffnet wurde und in den Litzenzwischenräumen noch Kunststoff vorhanden war. Dies deutete darauf hin, dass im Kreuzungsbereich eine reine Druckbelastung vorlag und keine Scherbelastungen beim Auf- oder Abspulen auftraten, da die dünnen Kunststoffstege dadurch zerstört worden wären.

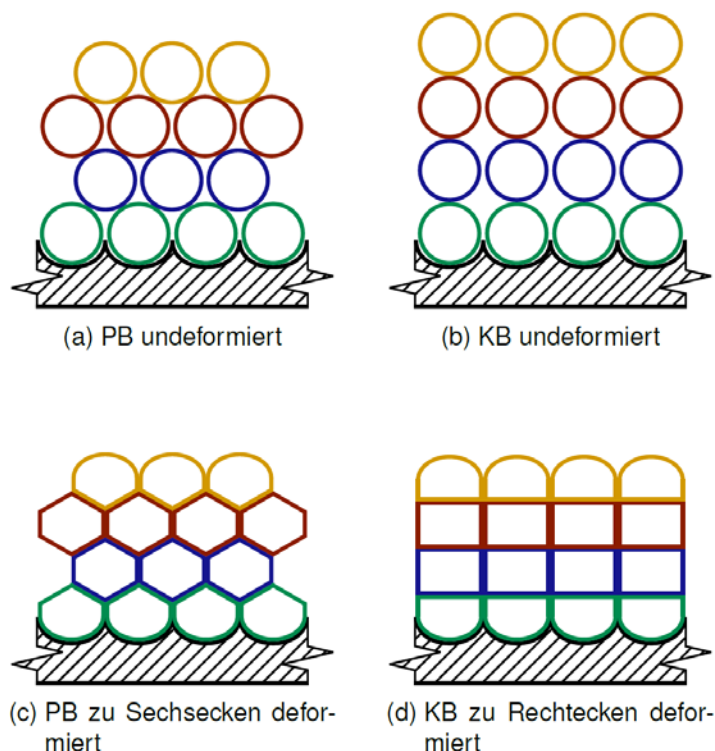


Abbildung 51: Unverformte und theoretisch maximal deformierte Seilquerschnitte im Parallel- (PB) und Kreuzungsgebiet (KB) [Sch 19]

Die im Parallelbereich beobachtete Deformation konnte auf das Fließen des Kunststoffes unter der Last der oberen Lagen zurückgeführt werden. Der Kunststoff floss auch hier aus den Kontaktregionen in die Seilzwischenräume. Bei der pyramidalen Seilanordnung resultierte dies in der

sechseckigen Deformation der Seile. In Abbildung 51 sind die undeformierten den maximal möglichen Verformungen des Seilquerschnitts in den unterschiedlichen Bereichen der Seiltrommel gegenübergestellt worden.

Die Verformung des Seilmantels vom runden Querschnitt zu einem sechseckigen Querschnitt wurde nur bei der schwarzen Ummantelung festgestellt und konnte auf die Materialeigenschaften zurückgeführt werden. Unter Einwirkung derselben Kraft war die Verformung des transparenten Kunststoffes sehr viel größer als bei dem schwarzen Kunststoff. Dies fand bereits in dem mehr als doppelt so großen Elastizitätsmodul Ausdruck. Die Ersatzstreckgrenze bei 0,5 % Dehnung des schwarzen Kunststoffes ist um den Faktor 2,5 erhöht. Der transparente Kunststoff wies unter Last auf Grund des größeren Verformungsvermögens einen größeren Kontaktbereich als der schwarze Kunststoff auf. Der Druck war deshalb bei dem schwarzen Kunststoff höher als bei dem transparenten Kunststoff. Die Fließgeschwindigkeit hängt damit maßgeblich zusammen (Abbildung 50).

Der Aufstiegsbereich war für das Seil besonders schädlich, da hier ein mehrachsiger Spannungszustand vorlag. In dem Kreuzungsbereich, in dem das Seil von einer vollen freien Rillenbreite e auf eine halbe Rillenbreite $e/2$ an die Bordscheibe heranlief, wurde das aufwickelnde Seil durch den sich verengenden Spalt in die nächste Lage gezwungen. In Abbildung 52 ist die Mitte des Kreuzungsbereiches mit den dort wirkenden Kräften und resultierenden Deformationen des Mantels dargestellt. In den Kontakten wurde der Kunststoff sowohl auf Druck als auch auf Scherung beansprucht. Der Druck reichte bereits aus, um den Mantel in kürzester Zeit zu schädigen, vgl. Kreuzungsbereich. Die zusätzliche Scherbelastung überlastete den Kunststoff noch stärker. Da die Kontaktfläche nicht bekannt war, konnten keine Vergleichsspannungen für die einzelnen Kontakte berechnet werden.

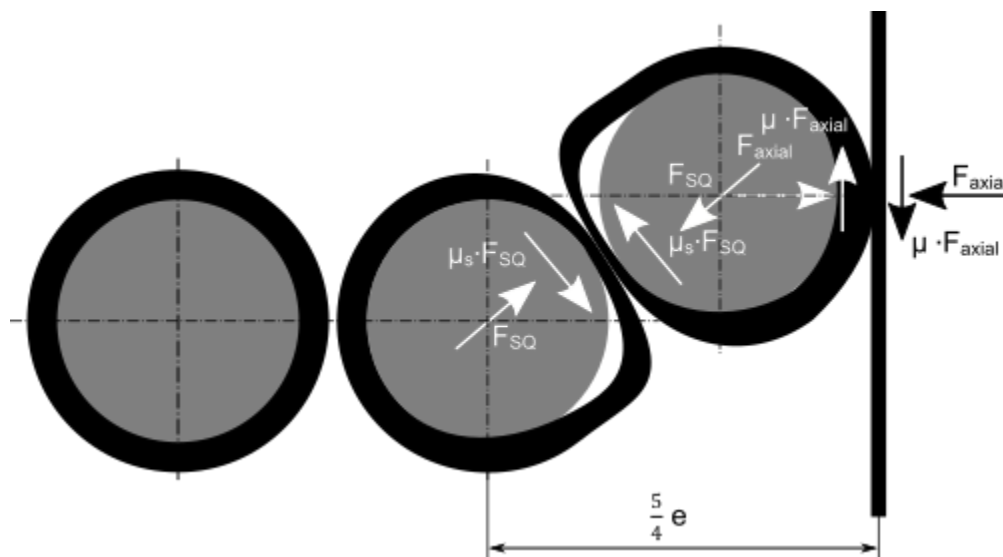


Abbildung 52: Kräfte im Aufstiegsbereich als Ursache für mehrachsigen Spannungszustand

Um die Mehrachsigkeit im Aufstiegsbereich zu vermeiden, ist die starke Scherbelastung zu verhindern. Durch eine Aufstiegshilfe, vgl. AP 6, die das Seil von unten stützt, könnte das aufsteigende Seil sich nicht mehr so stark in den enger werdenden Spalt einziehen und die Scherbelastung würde reduziert werden. Die Kontakte während des Aufstiegs könnten so überwiegend auf eine Druckbelastung reduziert werden.

Die Schädigung im Parallelbereich, an dem das Seil den Abstand einer halben Rillenbreite zur Bordscheibe hatte und einen Grat aufwies, entstand aus dem gleichen Grund wie im Aufstiegsbereich. Jedoch war der Keilwinkel hier größer, sodass die Scherkraft und die Schädigung gemindert wurden.

Die aus den Wickelfehlern resultierenden Lücken waren ein Ab- und ein kurz darauffolgender Aufstiegsbereich. Die in dem Abschnitt „Aufstiegsbereich“ beschriebene mehrachsige Beanspruchung trat hier zweimal kurz hintereinander auf. Damit die Wickelfehler zu Schäden am Seil führen, müssen diese jedoch entweder wiederholt auftreten oder die Seilzugkraft groß genug sein, damit der Kunststoffmantel geschädigt wird.

Es konnte nicht beobachtet werden, dass ein einmal aufgetretener Wickelfehler sich bei den nächsten Wickelvorgängen wiederholte. Bei der Prüflast von 10 kN führten Wickelfehler deshalb nicht zu einer zusätzlichen Schädigung des Trommelmantels, da die Belastung zu gering war (Abbildung 47 Mitte). Bei einer hohen Seilzugkraft oder einem bereits vorgeschädigten Mantel konnten die Scherspannungen zu einer Schädigung führen (Abbildung 48).

Der Verlauf der Spulversuche wurde in regelmäßigen Abständen dokumentiert. Mit den Laserprofilscannern konnte das Wickelbild aufgenommen werden. Zusätzlich wurden die fortschreitenden Schäden am Seil sowie die geschädigten Stellen im Kontakt mit der Seiltrommel durch Fotos dokumentiert. Die Versuche wurden bis zu einer starken Schädigung der Seile durchgeführt. In einem Protokoll wurden alle Beobachtungen festgehalten. Das Abbruchkriterium für die Versuche wurde als Risslänge in der Ummantelung von mindestens einem Meter Länge definiert. Zusätzlich wurde die Anzahl der Spulungen festgehalten nach denen der Kunststoffmantel Löcher aufwies, durch die Feuchtigkeit eindringen könnte. Des Weiteren wurde dokumentiert bis zu welcher Spulungszahl das Spulverhalten hinreichend gut war sowie wann der Versuch beendet wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Anzahl der Spulzyklen für die unterschiedlichen Seiltrommeln und Prüflasten

	D/d	Prüfkraft [kN]	Kunststoffmantel offen	Gutes Wickelbild	Versuch beendet
Kunststoff 1 (transparent)	24	10	50	130	340
		25	3	4	20
	18	10	-	-	-
		25	1	3	11
Kunststoff 2 (schwarz)	24	10	70	550	550 ¹
		25	2	13	25
	18	10	-	-	-
		25	1	11	20

Das Wickelbild nach 550 Spulvorgängen ist für Kunststoff 2 bei einem D/d-Verhältnis von 24 und einer Prüfkraft von 10 kN in Abbildung 53 dargestellt. Das Seil wies bereits Deformationen auf, die jedoch noch keine negativen Auswirkungen auf das Spulverhalten des Seiles hatten. Mittig unten ist ein Stück freiliegendes Drahtseil zu sehen, bei dem sich der Kunststoffmantel bereits komplett gelöst hatte. Dies war der Aufstiegsbereich von der zweiten in die dritte Lage der zweiten Seiltrommel.

¹ Der Versuch wurde bei 550 Spulzyklen beendet, um noch weitere Seile mit der zweiten Trommel testen zu können.



Abbildung 53: Wickelbild nach 550 Spulvorgängen von Kunststoff 2 bei einem D/d-Verhältnis von 24 und einer Prüflast von 10 kN

Aus den Spulversuchen konnten zwei Schlussfolgerungen gezogen werden. Sobald die Kunststoffe oberhalb der Zugfestigkeit belastet wurden, wie es bei 20 % der MBF der Fall zu sein schien, wurde der Kunststoffmantel in kürzester Zeit zerstört. Bei niedrigeren Lasten, die nicht zu einer direkten Zerstörung des Kunststoffmantels führten, hatte die höhere Zugfestigkeit des Kunststoffes 2 in der Anzahl der Spulvorgänge mit einem guten Wickelbild zu einer Vervierfachung geführt. Eine hohe Festigkeit des Kunststoffes ist deshalb in der Mehrlagenwicklung wichtig.

Übereinstimmung der Ergebnisse aus AP 2.4 mit dem Ziel

In dem Arbeitspaket 2.4 konnten erfolgreich die Spulversuche gemäß Tabelle 11 durchgeführt werden. Als Ergebnis liegen für die unterschiedlichen Bereiche des Seilpaketes die Schäden und Schadensmechanismen sowie für die unterschiedlichen Lasten und D/d-Verhältnisse die Versuchsdauern für die beiden unterschiedlichen Kunststoffe vor.

AP 3: Modellversuche querbelastetes Seil Forschungsstelle 1

Die Drahtbeanspruchung kann mit üblichen Verfahren nicht direkt gemessen werden. Im Rahmen des Arbeitspakets 3 sollte mittels Querdruckuntersuchungen versucht werden die Einflüsse der Kunststoffummantelung auf die Seilbeanspruchung nachzuweisen.

AP 3.1 Messung Dehnung, plastische Verformung

Die drei Seilvarianten wurden in einem definierten Prüfwerkzeug eingespannt. Dabei kamen zwei unterschiedliche Werkzeuge zum Einsatz, die die Rillengeometrie entsprechend des Außendurchmessers der Versuchsseile nachbildeten. Die Werkzeuge sind vertikal verfahrbare Stahlstempel. Durch eine servo-hydraulische Prüfmaschine an der Forschungsstelle 1 konnte eine definierte Querbelastung auf die Prüflinge aufgebracht werden. Zielsetzung war es, die plastische Verformung in der Kontaktzone zwischen Seil und Rillengeometrie sowie im inneren Schädigungsbereich zwischen Außenlitzenlage und Seilkern zu untersuchen.

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden spezielle Prüfwerkzeuge zur Durchführung der Querdruckuntersuchungen gefertigt. Entsprechend der Parameter der zu untersuchenden Seilvarianten verfügen die Prüfwerkzeuge über Rillen mit dem Radius $r = 7,5 \text{ mm}$ für die kunststoffummantelten Seilvarianten 1 und 2 sowie über Rillen mit dem Radius $r = 6,5 \text{ mm}$ für die konventionelle Seilvariante 3. Es erfolgte die Querdruckprüfung mit unterschiedlichen Laststufen für die drei Seilvarianten. Auf Grund mangelhafter Ergebnislage der Untersuchungen mit dem eigentlichen, kalibrierten Prüfseil wurden die Versuche mit einem zur Verfügung gestellten unkalibrierten Seilmuster wiederholt. Zur Durchführung der Versuche mit einem ummantelten Seil wurden Kunststoffsegmente um das neue Prüfseil gelegt. Infolge der Auswertung der Versuche wurden die Außenlitzen der Prüfseile entnommen, um plastische Verformungen in den äußeren und inneren Kontaktstellen zu untersuchen.

Erzielte Ergebnisse

Das in diesem Forschungsprojekt untersuchte Basisdrahtseil wurde vor der Ummantelung mit zwei unterschiedlichen Kunststoffen kalibriert, um den gewünschten Nenndurchmesser auch mit Kunststoffschicht zu gewährleisten. Diese Kalibrierung kann als geringfügige Verdichtung des Gesamtseilverbundes angesehen werden.



Abbildung 54: Kalibriertes Basisdrahtseil

Die nachträgliche Verdichtung des Gesamtseiles sorgte für abgeplattete Drahtkuppen der Einzeldrähte der Außenlitzen (Abbildung 54). Diese Abplattungen verhinderten die erhoffte Bildung von Kontaktellipsen zwischen den Außendrähten der Außenlitzen und dem Prüfwerkzeug mit der Rillengeometrie einer Seilscheibe. Zusätzlich zu dieser Veränderung kam es durch die Kalibrierung

des Basisdrahtseiles zu dem Kontakt benachbarter Außenlitzen. Die Sperrung der Drahtseilkonstruktion wurde überwunden und punktuelle Kontaktbereiche zwischen Einzeldrähten entstanden. Dieser Kontakt beeinflusste das Verhalten der Seilkonstruktion bei der Querdruckprüfung entscheidend. Rückschlüsse infolge der Querkraft im inneren Schädigungsbereich der Seilkonstruktion waren nicht möglich.



Abbildung 55: Querdruckversuche; a) Seilvariante 1; b) Seilvariante 2; c) Seilvariante 3

Im Rahmen der Vorbereitung des Forschungsprojektes wurde der Forschungsstelle 1 ein unkalibriertes Drahtseil zur Verfügung gestellt. Die geringe Seillänge war nicht ausreichend um Dauerbiegeversuche oder große Querdruckversuchsreihen damit durchzuführen. Auf Grund der unzureichenden Erkenntnisse der bisherigen Querdruckversuche am kalibrierten Prüfseil mit und ohne Kunststoffummantelung wurde eine Testreihe mit dem ursprünglichen Basisdrahtseil durchgeführt (Abbildung 55). Die Wahl der aufgebrachtten Querkraft hing von der gewünschten Querverformung ab, deren Verformung im Kontaktbereich begutachtet werden sollte. Die ursprünglich angedachten Querverformungen von 6 MPa bis 18 MPa erwiesen sich als ungeeignet. Auf Grund der statischen Belastung während der Querdruckprüfung wurden neue Querkräfte gewählt. Unter Aufbringung von 27 kN, 75 kN und 120 kN wurden die Versuche für die drei Seilvarianten durchgeführt. Da das unkalibrierte Seil nur als konventionelles Drahtseil zur Verfügung stand, wurde die Ummantelung des kalibrierten Seiles gelöst und um das Prüfseil gelegt.

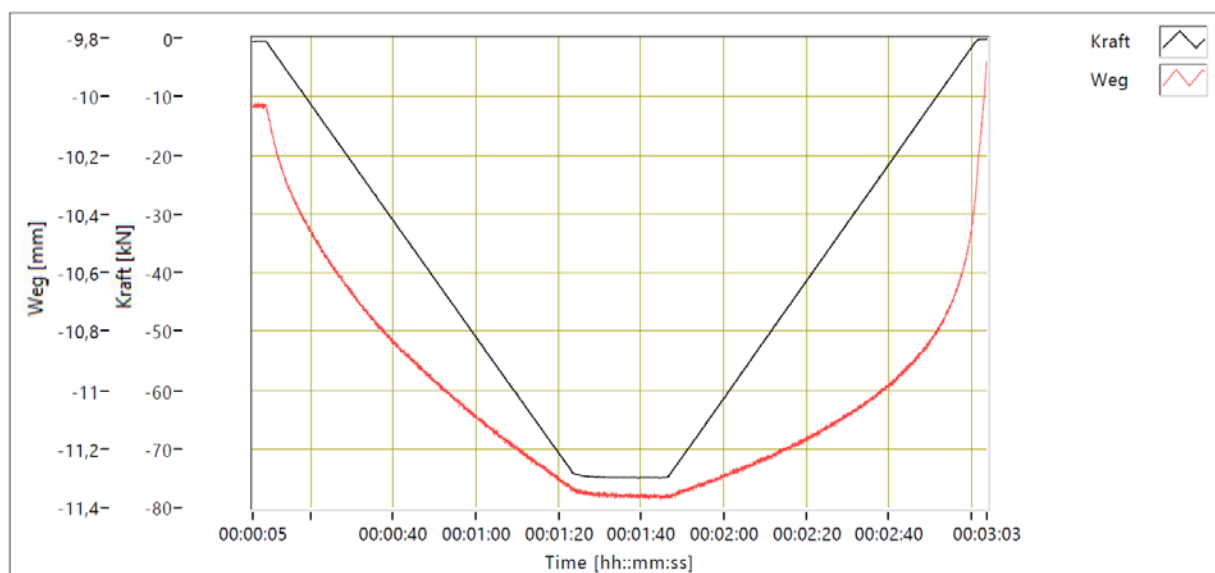


Abbildung 56: Messdaten Querdruckprüfung

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde die servo-hydraulische Prüfmaschine der Forschungsstelle 1 genutzt. Die Kraftaufbringung erfolgte konstant bis zum Erreichen des gewünschten Wertes. Nach einer kurzen Haltedauer wurde das Prüfseil wieder kontinuierlich entspannt. Abbildung 56 zeigt den Verlauf der Messdaten anhand des Prüfprotokolls.



Abbildung 57: Äußerer Zustand nach Querdruckprüfung; Seilvariante 2; $F = 75 \text{ kN}$

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung wurden die Prüfseile genauer untersucht. Der Fokus lag auf dem äußeren Kontaktbereich zwischen Außendrähten der Außenlitzen und der nachgebildeten Rillengeometrie des Prüfwerkzeuges sowie auf dem Kontaktbereich im Inneren des Drahtseiles zwischen Außendrähten der Außenlitzen und der unterliegenden Litzenlage. Der Zustand der Kunststoffummantelung war nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Abbildung 57 zeigt den Zustand des Drahtseiles nach dem Ablösen der Kunststoffummantelung. Die Querdruckprüfung wurde mit einer Kraft von $F = 75 \text{ kN}$ durchgeführt. Die leichten Verfärbungen an den Drahtkuppen der Außenlitzen sind keine Abplattungen, sondern lediglich polierte Stellen infolge der geringen Relativbewegung, die die Kunststoffummantelung während der Kraftaufbringung vollzogen hat.



Abbildung 58: Innerer Zustand nach Querdruckprüfung; Seilvariante 2; $F = 75 \text{ kN}$

Abbildung 58 zeigt den inneren Zustand des Drahtseiles nach dem Ablösen der Kunststoffummantelung. Unregelmäßige Abplattungen im Kontaktbereich der Einzeldrähte der Außenlitzen mit den Drähten der unterliegenden Litzenlage waren erkennbar. Zusätzlich waren auch Abplattungen erkennbar, die auf den Kontakt benachbarter Außenlitzen schließen lassen. Dieser Kontakt verfälschte die Ergebnisse der Kontaktabplattungen im Seilinneren.

Im Rahmen der Durchführung der Querdruckversuche zur Untersuchung der plastischen Verformung in den äußeren und inneren Kontaktbereichen der Außenlitzen des Drahtseiles musste festgestellt werden, dass die Überprüfung geringer Pressungen/Kräfte keine plastische Verformung in den Kontaktbereichen erzielte. Die Überprüfung höherer Pressungen/Kräfte schaffte die plastische Verformung in den Kontaktbereichen. Allerdings begünstigte die hohe Belastung des Prüfseiles auch unplanmäßige Berührungsszenarien, welche das Ergebnis verfälschten.

Während des praktischen Einsatzes von Litzenseilen kommt es beim Auf- und Abrollvorgang auf Seilscheiben zur Erhöhung der Pressung (Abbildung 59). Durch die dynamische Bewegung befinden sich die Einzeldrähte sowie die Litzen in Relativbewegung zueinander. Dieses Szenario ließ sich mit dem Querdruckversuch nicht nachbilden. Die statische Belastung scheint ungeeignet zur Ermittlung der tatsächlichen plastischen Verformung im äußeren und inneren Kontaktbereich während des Einsatzes als laufendes Seil.

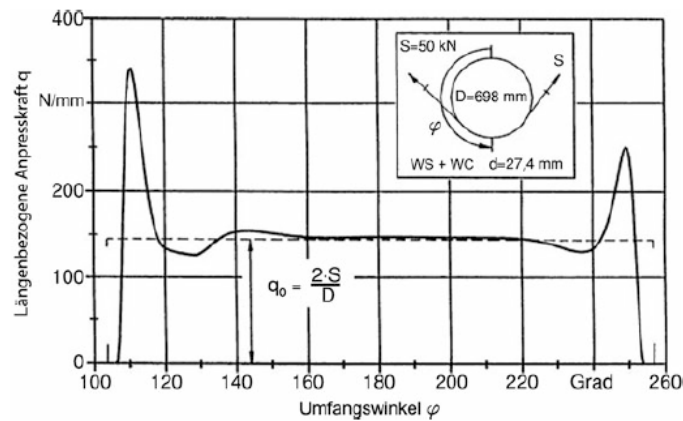


Abbildung 59: Verlauf der Pressung zwischen Seil und Seilscheibe [Fey 00]

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 3.1 mit dem Ziel

Die im Rahmen des Arbeitspakets durchgeführten Querdruckversuche der eigentlichen Seilvariationen erwiesen sich als ungeeignet auf Grund der nachträglichen Verdichtung des Basisdrahtseiles. Die nachfolgende Untersuchung mit einem unkalibrierten Versuchseil zeigte die Schwächen des statischen Versuches zur Bestimmung der plastischen Verformung im äußeren Kontaktbereich der Außendrähte der Außenlitzen mit der Rillengeometrie der Seilscheibe sowie im inneren Kontaktbereich der Außendrähte der Außenlitzen mit der unterliegenden Litzenlage auf.

AP 3: Modellversuch querbelastetes Seil Forschungsstelle 2

Aus dem Grundlagenversuchen in AP 2 waren die Schadensarten und Schadensorte sowie die Deformation des Kunststoffmantels und die Stapelbarkeit der Seile bekannt. In dem dritten Arbeitspaket wurde der Kunststoffmantel im Hinblick auf die Schädigung der Ummantelung und das Spulverhalten bei Mehrlagenwicklung untersucht.

AP 3.2 Messung Querelastizität, Schädigung Ummantelung

Im Arbeitspaket 3.2 wurden insgesamt drei Versuche durchgeführt. Die Querelastizität ist von einem einzelnen Seil sowie für mehrere Lagen in unterschiedlichen Anordnungen bestimmt worden. Als letzten Versuch ist der Kreuzungsbereich der Lebus-Rillung nachgestellt worden, um die Schäden des Kunststoffes bei unterschiedlichen Querkräften zu untersuchen.

Durchgeführte Arbeiten

Entnommen aus dt. Version OIPEEC 19 [Loh 19].

Die Kennwerte der Elastizität konnten im Prüfstand des Instituts für Maschinenwesen der TU Clausthal (IMW) bestimmt werden. Mit Hilfe von Hydraulikzylindern konnte dazu sowohl eine Längs- als auch eine Querkraft auf das Seil aufgebracht werden (Abbildung 60).

Die Längskraft F_S wurde dazu in Bereichen von 5 % bis 40 % der Mindestbruchkraft des Seils variiert (Formel (9)).

$$F_S = 0,05 \dots 0,4 \cdot MBF \quad (9)$$

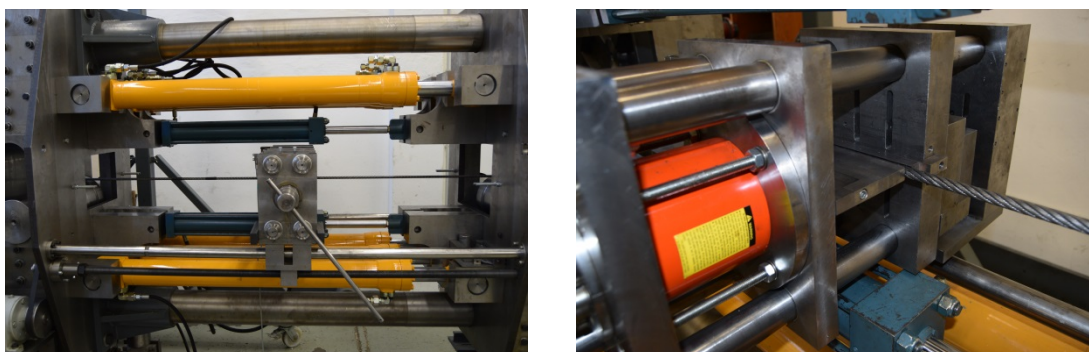


Abbildung 60: Seilzugprüfstand; Hauptzylinder (gelb) zur Aufbringung der Seilkraft (links) und zusätzlicher Zylinder (orange) zur Aufbringung der Querkraft (rechts)

Mit Hilfe des realen Querschnitts des Seils A_{real} (im vorliegenden Fall des metallischen Querschnitts) wurde daraus die Spannung in Längsrichtung σ_L berechnet (Formel (10)).

$$\sigma_L = \frac{F_S}{A_{\text{real}}} \quad (10)$$

Aus der festgelegten Messlänge l_i , der gemessenen Kraft am Seil F_S und der gemessenen Längenänderung Δl des Seils konnte nach Formel (11) die Längselastizität E_{SL} berechnet werden [ISO 12076].

$$E_{SL} = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} = \frac{\Delta F_S \cdot l_i}{A_{\text{real}} \cdot \Delta l} \quad (11)$$

Schematisch ist der Versuch in Abbildung 61 dargestellt.

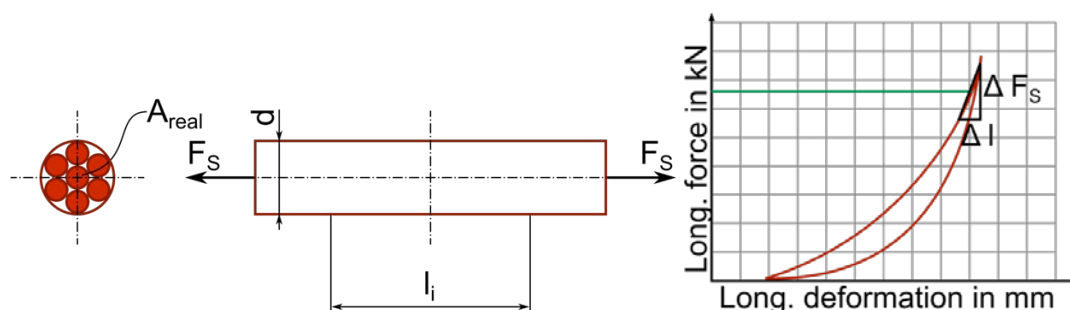


Abbildung 61: Längselastizitätsversuch

Die Querelastizität E_{SQ} wurde in einem vereinfachten Testaufbau untersucht. Die Vereinfachung lag dabei in der Untersuchung eines geraden Seils in einer einlagigen Anordnung. Die Abweichungen zum Wickelpaket die daraus resultierten, dass das Seil tatsächlich im Parallelbereich auf Lücke lag und im Kreuzungsbereich in verschiedenen anderen Konfigurationen wurde bei der Berechnung des Gesamtsystems berücksichtigt [Die 71], [Mup 01], [Loh 15]. Um die Querelastizität zu ermitteln, musste die relevante Querkraft F_Q festgelegt werden. Hierzu war das System Seil/Seiltrommel zu betrachten. Dazu konnte das Querspannungsverhältnis k_Q nach Formel (12) in bekannten Grenzen variiert werden. Das Verhältnis kann dabei vereinfacht als Kehrwert des Verhältnisses aus Trommel- zu Seildurchmesser (D/d -Verhältnis) interpretiert werden [Mup 01].

$$k_Q = \frac{\sigma_Q}{\sigma_L} = 0,04 \dots 0,06 \quad (12)$$

Unter Berücksichtigung der Geometrie des Seils (metallischer Querschnitt A_{real}) und der Geometrie des Prüfaufbaus (Messlänge l_{meas}) konnte die benötigte Querkraft ermittelt werden (Formel (13)).

$$F_Q = \sigma_Q \cdot \sqrt{A_{real}} \cdot l_{meas} \quad (13)$$

Die Berechnung der Querelastizität erfolgte nach Formel (14) aus der gemessenen Querkraft und der gemessenen Durchmesserreduzierung Δd unter Berücksichtigung der Messlänge.

$$E_{SQ} = \frac{\sigma_Q}{\varepsilon_Q} = \frac{\Delta F_Q}{l_{meas} \cdot \Delta d} \quad (14)$$

In Abbildung 62 ist die Durchführung des Querelastizitätsversuchs schematisch dargestellt.

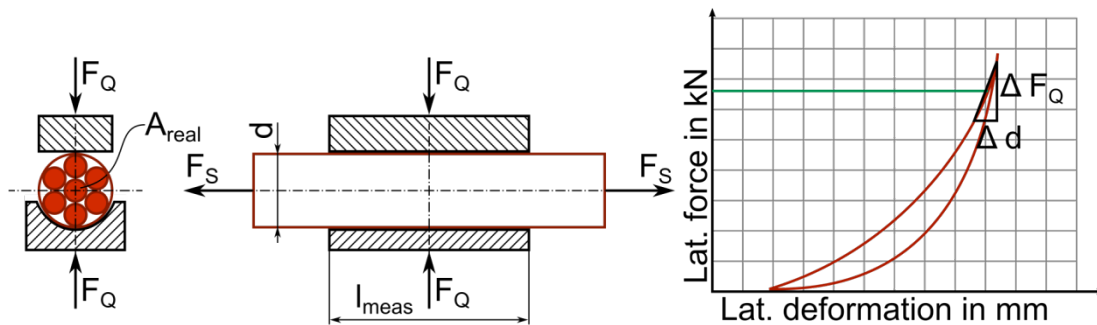


Abbildung 62: Prinzipieller Aufbau des Querelastizitätsversuchs

Dt. Version OIPEEC 19 Ende [Loh 19].

Zur Untersuchung der Mehrlagigkeit wurden verschiedene Anordnungen von Seilen untersucht. Im Parallelbereich liegt eine Umwicklung einer höheren Lage immer genau im Tal zweier darunterliegender Lagen. Es liegt im kompletten Parallelbereich eine pyramidenförmige Anordnung der Seile vor. Dadurch hat die aufliegende Umwicklung zwei linienförmige Kontakte zu den beiden unteren Umwicklungen (Abbildung 63).

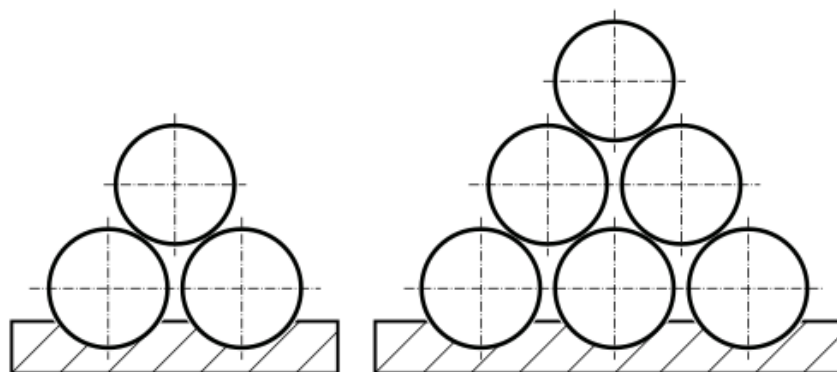


Abbildung 63: Pyramidenförmige Anordnung der Seile (Parallelbereich) für zwei Lagen (links) und für drei Lagen rechts [Man 18]

Anders verhält es sich im Kreuzungsbereich. Die obere Umwicklung läuft über eine darunterliegende Wicklung über und hat dadurch nur einen linienförmigen Kontakt. In der Mitte des Kreuzungsbereichs liegen die Umwicklungen genau übereinander, wodurch eine lineare Säule aus den Umwicklungen entsteht (Abbildung 64).

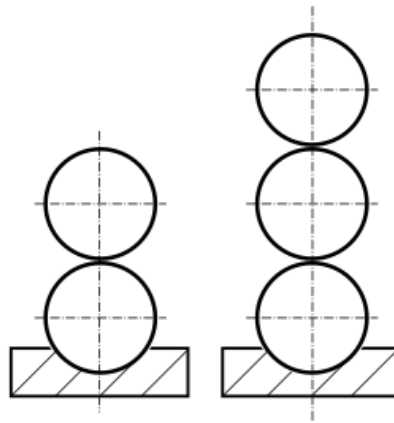


Abbildung 64: Säulenförmige Anordnung der Seile (Kreuzungsbereich) für zwei Lagen (links) und für drei Lagen rechts [Man 18]

Das Ziel des letzten Experiments war die Identifizierung der Querkraft, ab welcher der Mantel geschädigt werden würde. Der kritische Bereich im Kontakt Seil/Seil liegt im Kreuzungsbereich vor. Während sich die Umwicklung einer oberen Lage im Parallelbereich der Trommel auf zwei unteren Umwicklungen abstützt, liegt im Kreuzungsbereich lediglich ein Kontakt vor. Aus diesem Grund ist hier der Druck zwischen den Umwicklungen höher und damit ist hier eine frühere Schädigung des Mantels zu erwarten. Die Kontaktsituation ist in Abbildung 64 zu sehen.

Diese Belastung zweier Umwicklungen konnte mit einem Querprüfgerät nachgebildet werden. Dazu wurden zwei Seile mit einer definierten Querkraft in einem der Trommel entsprechendem Kreuzungswinkel zusammengedrückt. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 65 dargestellt.

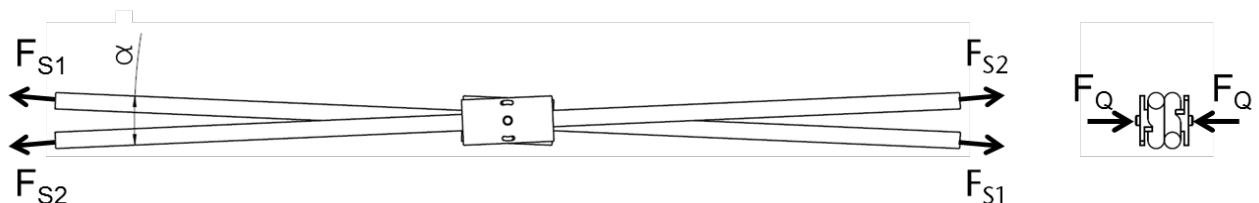


Abbildung 65: Prinzipieller Versuchsaufbau zur experimentellen Simulation der belasteten Seilkreuzung in der Mehrlagenwicklung

Zur möglichst realitätsnahen Nachbildung des Kontaktes konnten die Seile mit einer der Anwendung entsprechenden Seilzugkraft belastet werden. Anschließend wurde der Kontakt in Querrichtung mit der dem Wickeldurchmesser entsprechenden Querkraft beaufschlagt. Die Seilkreuzung konnte im Bereich von 3° bis 7° variiert werden.

Da der Einfluss der Seilzugkraft auf die durch den Mantel ertragbare Querkraft als gering eingeschätzt wurde, wurde das Experiment ohne die Aufbringung einer Seilzugkraft durchgeführt. Der reale Aufbau des Querdruckversuchs zur Ermittlung der Manteleigenschaften ist in Abbildung 66 zu sehen.

Da die tatsächliche Kontaktlänge zwischen den beiden Seilen im durchgeführten Experiment unbekannt war, wurde die Querkraft in einem großen Bereich variiert. Begonnen wurde mit einer Querkraft von 2,5 kN. Diese wurde an jeweils neuen Seilmustern schrittweise auf 80 kN erhöht. Dies entsprach einer deutlichen Überbelastung des Seils in Querrichtung.

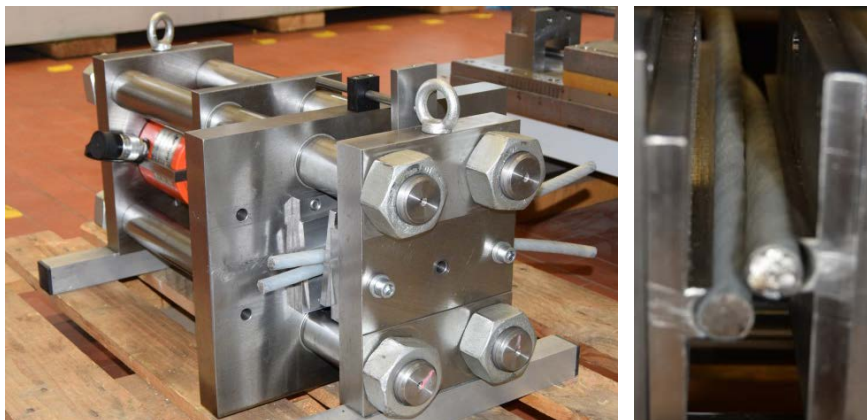


Abbildung 66: Mobiler Querprüfgerät mit Prüfbacken zur Untersuchung der Widerstandsfähigkeit des Mantels gegen Querdruck

Erzielte Ergebnisse

Für die Untersuchung des Querelastizitätsmoduls waren für jedes Seil fünf verschiedene Anordnungen geplant. Neben der Untersuchung eines einzelnen Seils sollten für den Parallelbereich eine pyramidenförmige Anordnung für zwei Lagen aus drei Seilen und für drei Lagen aus sechs Seilen untersucht werden (vgl. Abbildung 63). Für den Kreuzungsbereich sollten ebenso für zwei Lagen eine Anordnung aus zwei Seilen und für drei Lagen eine aus drei Seilen untersucht werden (vgl. Abbildung 64).

Bei der Durchführung der Experimente hatte sich herausgestellt, dass die Seilanordnungen für drei Lagen durch den Querdruck kollabierten. Die gewünschten Anordnungen konnten auch durch den Einsatz zusätzlicher Führungen bei den ummantelten Seilen nicht aufrechterhalten werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ergebnisse für die Seilvarianten in ein- und zweilagiger Anordnung vorgestellt. Dies musste mit den Reibungsverhältnissen innerhalb des Seilpaketes zusammenhängen. Das Ergebnis überraschte jedoch, da eine Recherche der Reibwerte für die Kunststoffe höhere Werte als bei einem Stahlseil erwarten ließ. In [Erh 08] sind für Kunststoff 2 für Gleit- und Haftreibung Reibwerte um $\mu = 0,2$ angegeben. Ein geringerer Reibwert innerhalb des Seilpaketes führt zu einer höheren Belastung der Bordscheiben. Auf die Trommelmantelbelastung hat der Reibwert keinen Einfluss.

Alle Seile in einlagiger und zweilagiger Anordnung wurden nach der Prüfmatrix in Tabelle 12 untersucht. Die Seilkraft wurde in vier verschiedenen Anteilen der Mindestbruchkraft variiert (5 %, 10 %, 20 % und 30 %). Die Querkraft wird nach Formel (13) ermittelt und entsprechend für die Querspannungsverhältnisse 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 und 0,1 auf das Seil aufgebracht. Damit wurden alle Seile für praxisrelevante Parameterkombinationen aus Seil- und Querkraft untersucht.

Tabelle 12: Querelastizitätsmodul Seilvariante 3, eine Lage

E_{SQ} in MPa	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	15,03	253,67	424,68	649,30	991,28
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	234,20	789,84	981,54	1119,94	1261,67
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	1391,34	1657,00	1542,20	1613,45	1769,83
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	1542,66	1858,98	1853,99	2016,58	1946,34

Der Querelastizitätsmodul von Seilvariante 3 lag in einem aus Erfahrung bekannten Wertebereich für Stahlseile. Die Querelastizitätsmoduln der unterschiedlichen Parameterkombinationen des nicht ummantelten Seils sind in Abbildung 67 dargestellt.

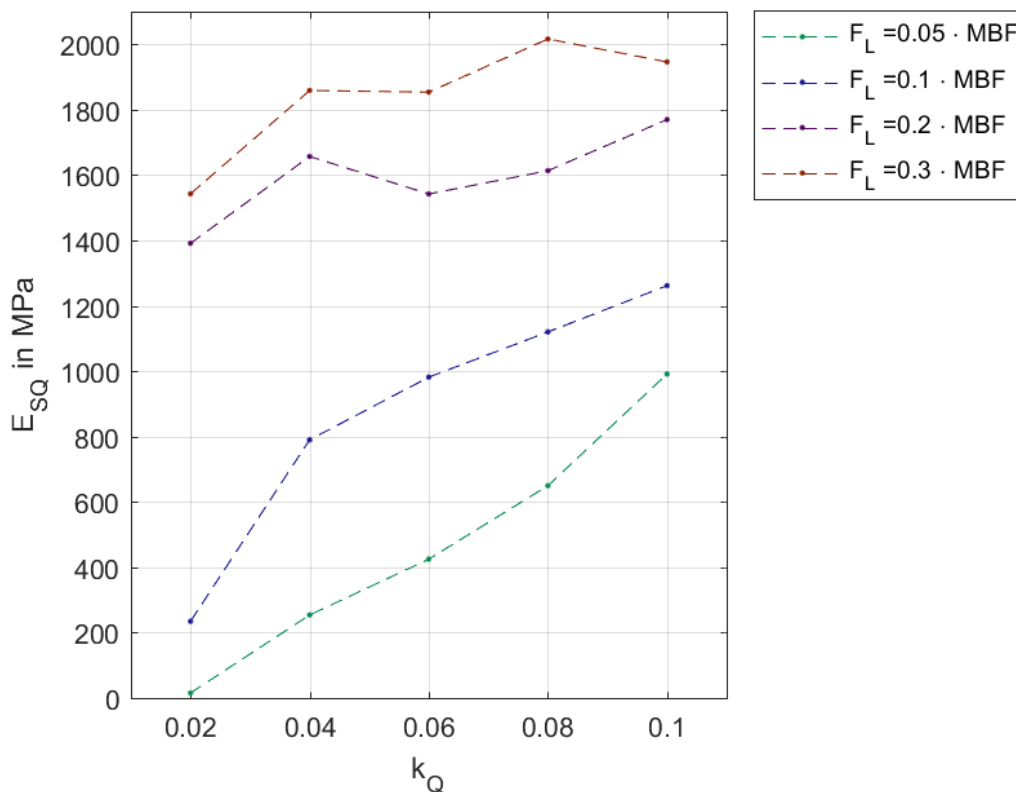


Abbildung 67: Querelastizitätsmodul Seilvariante 3, eine Lage

Die Ergebnisse zum Querelastizitätsmodul der ummantelten Seile wurden zuerst im Verhältnis zum nicht ummantelten Seil ausgewertet. Dazu wurde jeder Wert der nach der Prüfmatrix (Tabelle 12) ausgewertet wurde zwischen einem ummantelten und dem nicht ummantelten Seil ins Verhältnis gesetzt:

$$\frac{E_{SQ,Seilvar.i}}{E_{SQ,Seilvar.3}} \tag{15}$$

Die Ergebnisse für die Seilvarianten 1 und 2 sind in den Tabelle 13 und Tabelle 14 angegeben.

Tabelle 13: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 1 zu Seilvariante 3, eine Lage

$\frac{E_{SQ,Seilvar.1}}{E_{SQ,Seilvar.3}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	0,70	0,95	0,66	0,37	0,28
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,84	0,50	0,50	0,63	0,65
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,32	0,51	0,76	0,91	0,97
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,48	0,88	0,95	0,93	1,05

Tabelle 14: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 2 zu Seilvariante 3, eine Lage

$\frac{E_{SQ,Seilvar.1}}{E_{SQ,Seilvar.3}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	5,22	0,95	0,80	0,68	0,52
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,87	0,53	0,59	0,65	0,70
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,34	0,50	0,66	0,75	0,80
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,56	0,63	0,60	0,55	0,61

Zudem ist das Ergebnis in Abbildung 68 als Boxplot graphisch dargestellt.

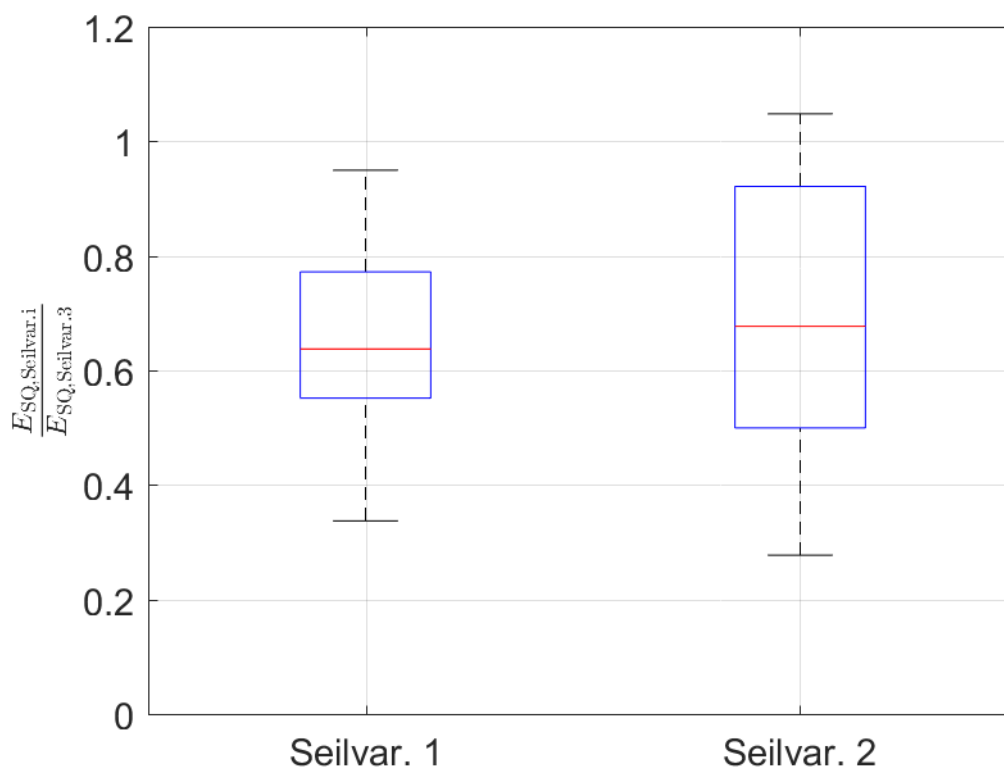


Abbildung 68: Boxplot des Vergleichs der Querelastizitätsmoduln der verschiedenen Seile

Es zeigte sich, dass die Mediane aus dem Vergleich der ummantelten Seile mit dem nicht ummantelten Seilen nah beieinanderliegen. Im Fall von Seilvariante 1 liegt der Median des Querelastizitätsverhältnisses bei 0,64 und im Fall von Seilvariante 2 bei 0,68. Die Streuung ist für die Seilvariante 1 kleiner als für die Seilvariante 2. Zudem liegt für Seilvariante 2 ein Ausreißer vor, der in der Abbildung nicht berücksichtigt wurde. Grundsätzlich zeigte sich, dass die Ummantelung eine Reduzierung des Querelastizitätsmoduls bewirkt. Dies ist auf Grund des niedrigeren Moduls des Kunststoffes im Vergleich zum Draht plausibel. Da sich die beiden Seilvarianten ähnlich verhalten, ließ sich an dieser Stelle kein Vorzug einer Variante feststellen.

Als weitere Auswertung wurde das Verhalten der drei Seile in den verschiedenen zweilagigen Anordnungen untersucht. Nach Mupende ist für das Verhältnis in den verschiedenen Anordnungen ein Verhältnis der Querelastizitätsmoduln entsprechend des Spannungsverhältnisses

$$k_{lp} = \frac{\sigma_{Q,pyr}}{\sigma_{Q,lin}} = \frac{1}{2 \cdot \sin(\gamma)} \quad (16)$$

der Anordnungen zu erwarten [Mup 01]. Der zu berücksichtigende Keilwinkel war aus dem Zusammenspiel von Trommel und Seil zu berechnen. Er ließ sich aus der Rillensteigung und dem Seildurchmesser ermitteln (Abbildung 69).

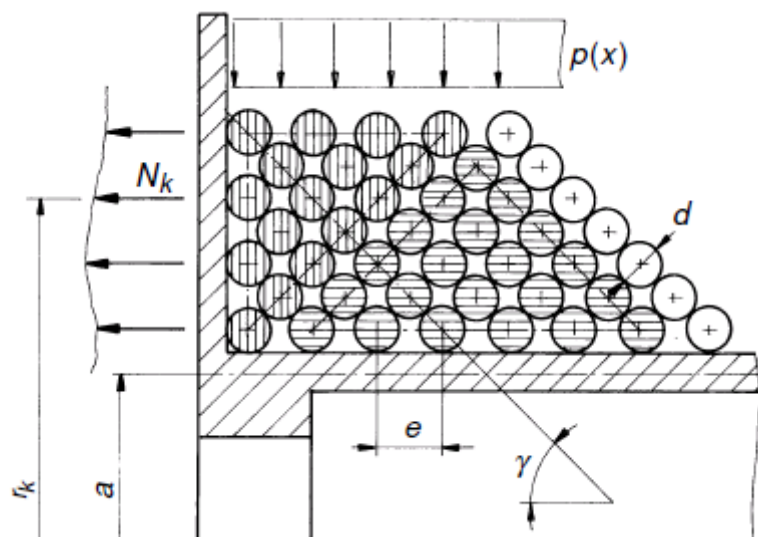


Abbildung 69: Keilwinkel Gamma [Mup 01]

Für die vorliegenden Trommeln und Seile ergab sich das Spannungsverhältnis $k_{tp} = 0,5875$. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 bis Tabelle 17 zu sehen.

Tabelle 15: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 1 Pyramide zu Stapel, zwei Lagen

$\frac{E_{SQ,pyr}}{E_{SQ,lin}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	0,85	1,30	0,96	1,04	1,00
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,78	1,07	0,91	0,94	0,81
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,89	0,85	0,83	0,80	0,71
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,84	0,71	0,70	0,50	0,55

Tabelle 16: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 2 Pyramide zu Stapel, zwei Lagen

$\frac{E_{SQ,pyr}}{E_{SQ,lin}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	1,85	1,06	1,02	0,97	1,06
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,99	0,91	1,09	1,04	1,03
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	1,13	1,03	0,92	0,77	0,83
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	1,07	0,78	0,92	0,96	0,60

Tabelle 17: Verhältnis Querelastizitätsmodul Seilvariante 3 Pyramide zu Stapel, zwei Lagen

$\frac{E_{SQ,pyr}}{E_{SQ,lin}}$	$k_Q = 0,02$	$k_Q = 0,04$	$k_Q = 0,06$	$k_Q = 0,08$	$k_Q = 0,1$
$F_L = 0,05 \cdot MBL$	0,44	0,65	0,53	0,51	0,55
$F_L = 0,1 \cdot MBL$	0,43	0,48	0,56	0,65	0,63
$F_L = 0,2 \cdot MBL$	0,39	0,55	0,78	0,84	0,80
$F_L = 0,3 \cdot MBL$	0,59	0,63	0,74	0,77	0,96

Weiterhin sind die Ergebnisse in Abbildung 70 zusammengefasst.

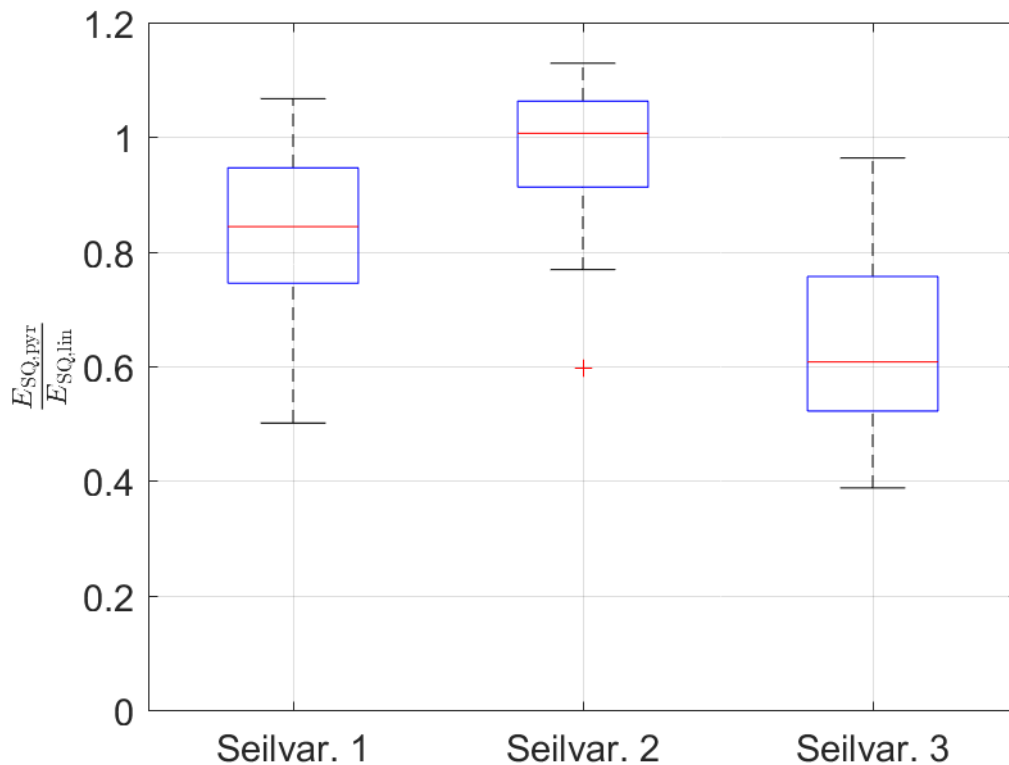


Abbildung 70: Boxplot des Vergleichs der Querelastizitätsmoduln der unterschiedlichen Anordnungen in zwei Lagen

Für die nicht ummantelte Seilvariante 3 zeigte sich, dass der Median von 0,61 gut mit dem Spannungsverhältnis übereinstimmt. Das Seil verhielt sich somit entsprechend der Erfahrungswerte [Mup 01].

Die ummantelten Seile wichen von diesem Verhalten deutlich ab. Es zeigte sich, dass die Querelastizitätsmoduln für die beiden zweilagigen Anordnungen im Fall von Seilvariante 1 ähnliche und im Fall von Seilvariante 2 sehr ähnliche Mediane aufwiesen.

Dies könnte auf die unterschiedlichen Steifigkeiten zwischen Stahlseil und Kunststoff zurückzuführen sein. Der weichere Kunststoff schien sich dämpfend auf die Steifigkeitsänderungen auszuwirken, ähnlich einem Druckspeicher in Hydraulikanlagen, in denen erheblich kompressiblere Gase für einen gleichmäßigeren Druck im System sorgen.

Für die Trommelberechnung ließ sich daraus ableiten, dass für die Elastizität des gesamten Wickelpakets andere Werte zu berücksichtigen sind. Im Gegensatz zum bisherigen Vorgehen muss ggf. eine geringere Reduzierung des Querelastizitätsmoduls im Bereich der höheren Lagen berücksichtigt werden. Dies kann zu einer im Vergleich zu aktuellen Berechnungen höheren Belastung im Kreuzungsbereich der Trommel führen.

Die Seile aus dem letzten Querdruckversuch, in dem die von den Kunststoffmänteln ertragbare Querkraft ermittelt wurde, sind in Abbildung 71 zu sehen.

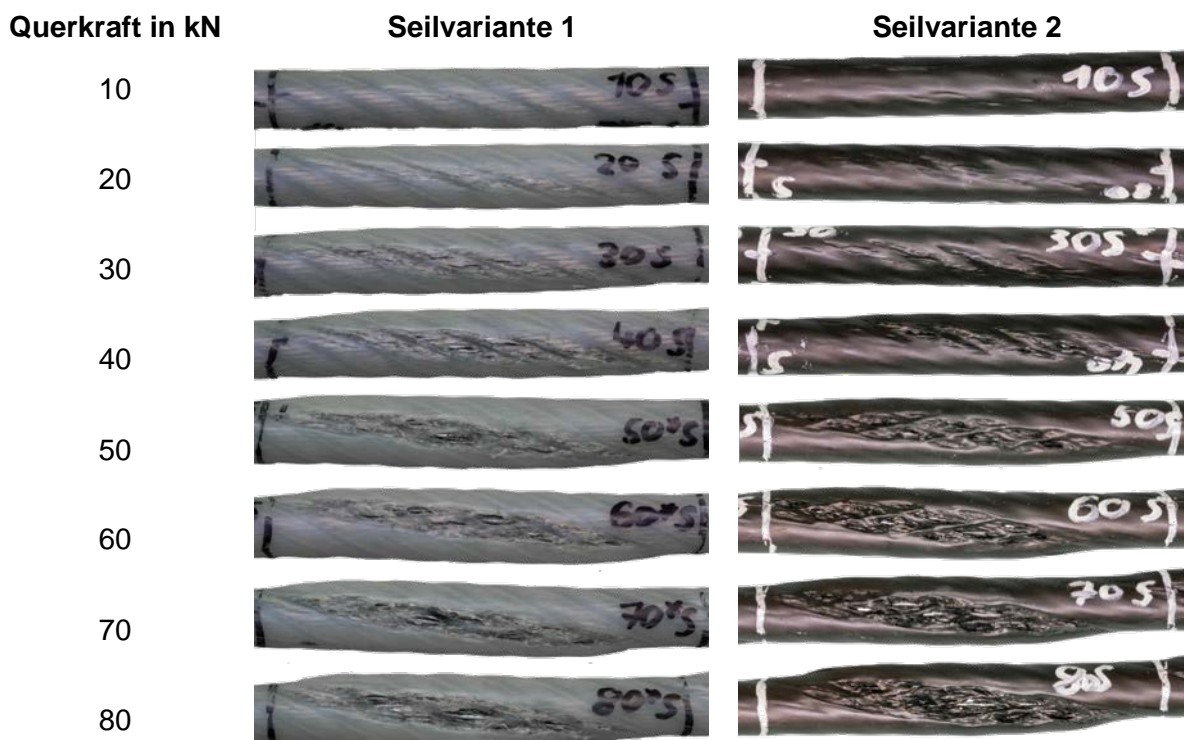


Abbildung 71: Beschädigungen in Folge des durch die Querkraft belasteten Seil/Seil-Kontakts

Bei Seilvariante 1 war ab einer Belastung von 20 kN in Querrichtung eine Beschädigung des Mantels erkennbar. Bei Seilvariante 2 waren bereits bei 10 kN Querkraft bleibende Deformationen am Mantel zu sehen. Bei beiden Ummantelungen zeigte sich ab 30 kN eine erhebliche Beschädigung des Mantels. Ab 40 kN Querkraft waren einzelne Drähte durch den Mantel zu sehen und bis 80 kN war der Mantel vollständig zerstört.

Um den relevanten Kraftbereich zu bestimmen wurde die Kontaktlänge nach den Versuchen ermittelt. Sobald bleibende Eindrücke nach dem Aufbringen der Querkraft erkennbar waren, konnte die Kontaktlänge gemessen werden. Unabhängig von der dabei aufgebrauchten Kraft ergab sich eine Kontaktlänge von 90 mm.

Durch die weiteren Faktoren Querspannungsverhältnis und Seilkraft wurde die Belastungssituation festgelegt. Es wurden zum einen ein Maximalwert bestimmt und zum anderen die sich für Trommel 1 und 2 ergebenden Werte. Allgemein berechnet sich die Querkraft nach

$$F_Q = k_Q \cdot F_L \cdot \frac{l_{max}}{\sqrt{A_{Met}}} \quad (17)$$

Für eine mögliche maximale Querbelastung wurde ein Querspannungsverhältnis von 0,0797 (ca. $D/d = 18$) und eine Seilkraft von $0,25 \cdot MBF$ angenommen

$$F_{Q,max} = 0,0797 \cdot 0,25 \cdot 112,5 \text{ kN} \cdot \frac{90 \text{ mm}}{\sqrt{71,7 \text{ mm}^2}} = 25,8 \text{ kN} \quad (18)$$

Für Trommel 1 ergab sich bei einer Seilkraft von 20 % der Mindestbruchkraft eine Querkraft von

$$F_{Q,D/d=24} = 0,05984 \cdot 0,2 \cdot 112,5 \text{ kN} \cdot \frac{90 \text{ mm}}{\sqrt{71,7 \text{ mm}^2}} = 14,3 \text{ kN} \quad (19)$$

Auf der Trommel 2 betrug die Querkraft entsprechend des kleineren Trommeldurchmessers bei gleicher Seilkraft

$$F_{Q,D/d=18} = 0,0797 \cdot 0,2 \cdot 112,5 \text{ kN} \cdot \frac{90 \text{ mm}}{\sqrt{71,7 \text{ mm}^2}} = 19,1 \text{ kN}. \quad (20)$$

Wie erwartet stellte damit die Belastung mit einer Querkraft bis 80 kN eine deutliche Überbelastung dar.

Die Beschädigungen der Ummantelung im relevanten Kraftbereich ist in Abbildung 72 zu sehen.

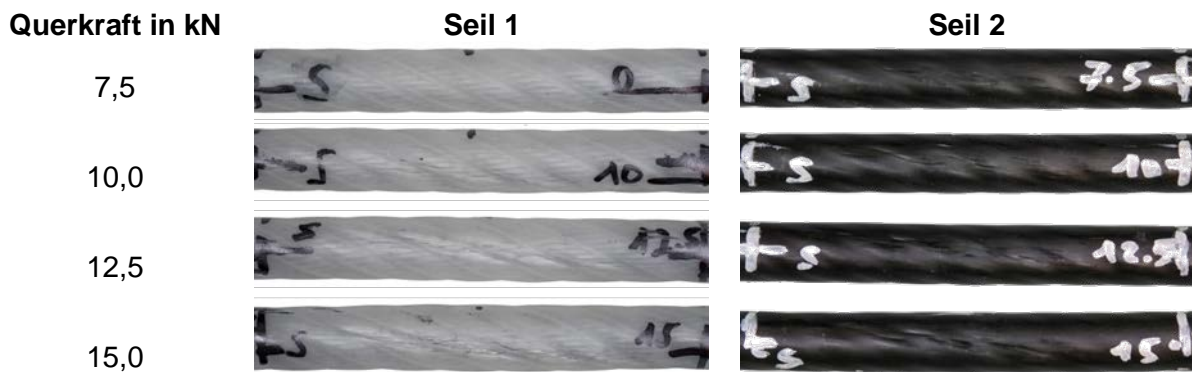


Abbildung 72: Beschädigungen in Folge des durch relevante Querkraft belasteten Seil/Seil-Kontakts

Für Seilvariante 1 war eine bleibende Beschädigung ab 12,5 kN erkennbar. Bei Seilvariante 2 waren Eindrücke des gegenüberliegenden Seils bereits ab 7,5 kN vorhanden.

Zur Abschätzung des maximalen Eindrucks wurden für eine Querkraft von 20 kN Laser-Scanning-Mikroskop-Aufnahmen gemacht (Abbildung 73 bis Abbildung 76).



Abbildung 73: Aufnahme Laser-Scanning-Mikroskop von Seilvariante 1

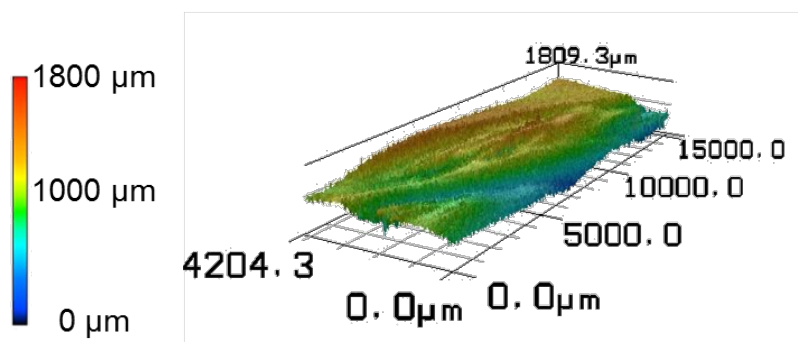


Abbildung 74: Höhenprofil der Aufnahme von Seilvariante 1

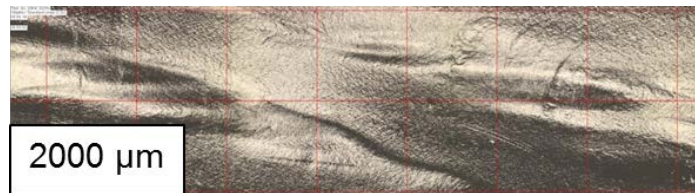


Abbildung 75: Aufnahme Laser-Scanning-Mikroskop von Seilvariante 2

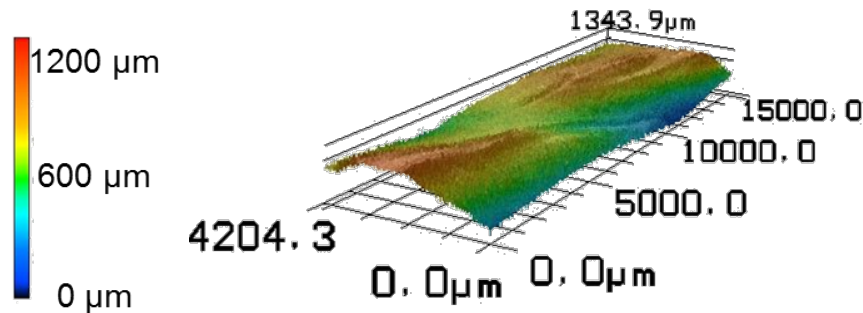


Abbildung 76: Höhenprofil der Aufnahme von Seilvariante 2

Im Vergleich der beiden Aufnahmen zeigte sich für Seilvariante 1 eine stärker geformte Oberfläche und ein tieferer Abdruck aus dem Seilkontakt. Für die Mehrlagenwicklung ist hier mit einer schlechteren Lebensdauer zu rechnen. Auf Grund der Deformation der Ummantelungen erscheint ein Einsatz genau dieser Ummantelungen in der Mehrlagenwicklung als problematisch. Eine ausreichende Haltbarkeit des Mantels ist als unwahrscheinlich einzuschätzen. Das Ausmaß der Deformation ließ jedoch die Vermutung zu, dass sich durch eine Optimierung des Mantels eine für die Mehrlagenwicklung geeignete Konstruktion finden lässt. Optimierungsmöglichkeiten liegen in der Wahl des Kunststoffes und auch in einer Variation des Aufbaus des Mantels.

Übereinstimmung der Ergebnisse aus AP 3.2 mit dem Ziel

In Arbeitspaket 3.2 wurden die Steifigkeiten für ein einzelnes Seil sowie für zweilagige Seilanordnungen bestimmt. Die dreilagige Seilanordnung konnte auf Grund der Reibverhältnisse im Seil/Seil-Kontakt nicht ausgewertet werden, da das Seilpaket nicht stabil genug war. Aus dem Querdruckversuch, der den Kreuzungsbereich der Seiltrommel nachstellt, konnten die vom Kunststoffmantel maximal ertragbaren Querkräfte bestimmt werden.

AP 4: FE-Modell Forschungsstelle 1

Im Rahmen des Arbeitspakets 4 wurde die numerische Modellbildung eines Rundlitzenseiles bearbeitet. Mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) wurden an der Forschungsstelle 1 zwei- und dreidimensionale Modelle der konventionellen und kunststoffummantelten Seilvariante generiert. Zielsetzung war es, mit den erstellten Modellen die Beanspruchung der Seildrähte unter Zug- und Biegebelastung zu untersuchen. Die Generierung eines Szenarios, welches vergleichbar mit den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen ist, wurde angestrebt. Zur Erstellung des FE-Modells wurde die Software ANSYS Mechanical APDL verwendet. Die Software kann über die grafische Benutzeroberfläche (GUI = Graphical User Interface) gesteuert werden. Alternativ ist zur Steuerung auch die Eingabe von Kommandos in die Befehlsleiste zulässig. ANSYS nutzt die

programmeigene Skriptsprache APDL (ANSYS Parametric Design Language). Den durchgeführten Handlungen im GUI sind ebenfalls APDL-Befehle hinterlegt, welche in einer separaten Datei mitgeloggt werden.

AP 4.2 Ermittlung Werkstoffkennwerte Draht

Allgemein wird die Vorgehensweise einer FEM-Analyse in drei Bereiche untergliedert - Preprocessor, Solver, Postprocessor. Im ersten Teilprozess wurde das Modell für die zu untersuchende, reale Konstruktion erstellt. Dabei konnten vernachlässigbare Details idealisiert werden. Bereits im Preprocessing war über die Dimension (2-D oder 3-D) der späteren Analyse zu entscheiden. Des Weiteren wurden die spezifischen FE-Elemente ausgewählt, die Konstruktionsstruktur des Modells diskretisiert sowie die Materialkennwerte zugewiesen.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Erstellung des numerischen Berechnungsmodells war die Kenntnis über einige spezifische Werkstoffkennwerte notwendig. Diese wurden bei dem Hersteller der Versuchsseile angefragt. Zusätzlich erfolgten eine Recherche der Fachliteratur sowie der Austausch und Festlegung der spezifischen Werte.

Erzielte Ergebnisse

Um die Beanspruchungen der Bauteile hinreichend genau berechnen zu können war die Festlegung der Materialkennwerte für die verwendeten Werkstoffe notwendig. Die charakteristischen Kenndaten sind in Tabelle 18 zusammengetragen.

Tabelle 18: Materialkenndaten

Kenndaten Stahl	
Elastizitätsmodul E_S in N/mm^2	200.000
Querkontraktionszahl ν_S	0,3
Schubmodul G in N/mm^2	81.000
Zugfestigkeit R_m in N/mm^2	2.224
Streckgrenze R_e in N/mm^2	1.400
Kenndaten Kunststoff	
Elastizitätsmodul E_K in N/mm^2	40.000
Querkontraktionszahl ν_K	0,49

Dem Drahtstahl wurden der Elastizitätsmodul, eine Querkontraktionszahl sowie ein Schubmodul zugewiesen. Damit wurde ein elastisches, isotropes Materialverhalten vollständig definiert. Das allgemein bekannte Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Stahles ist gekennzeichnet durch den Übergang des elastischen Materialverhaltens in den Bereich der plastischen Verformungen. Die charakteristischen Kenngrößen Zugfestigkeit und Streckgrenze wurden in das FE-Modell impliziert. Mittels Definition einer Datentabelle für Materialeigenschaften konnte ein elastisch-plastisches Materialverhalten in ANSYS erzeugt werden. Mittels der APDL-Eingabe einer „BISO“-Tabelle wurde ein bilineares, isotropes Materialverhalten erstellt. Bis zum Erreichen der Streckgrenze vollzog ANSYS somit eine rein elastische Analyse. Mit der Überschreitung der Fließgrenze wurde zudem die Plastizität berücksichtigt.

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 4.2 mit dem Ziel

Die Werkstoffkennwerte wurden gemeinsam mit den Industriepartnern festgelegt. Zusätzliche Konsultation der Fachliteratur bestärkte die Auswahl der Konstanten. Dieses Ergebnis erfüllte das gesetzte Ziel vollumfänglich.

AP 4.3 Analyse der Seilkonstruktion, Geometriemodell

Um die Verteilung der Druckspannung in einem konventionellen Drahtseil mit der Verteilung in einem kunststoffummantelten Drahtseil zu vergleichen, wurde ein zweidimensionales FE-Modell erzeugt, welches den Querschnitt des entsprechenden Seiles abbildet. Dieses Modell konnte mit relativ geringem Zeitaufwand simuliert werden. Zusätzlich erfolgte die Generierung eines dreidimensionalen Modells, dessen Simulation sehr große Anforderung an Rechenleistung und -zeit stellte.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Erstellung der Querschnittsabbildung des Litzenseiles waren die geometrischen Abmessungen der Drähte sowie ihre vorkommende Anzahl pro Drahtlage nötig. Des Weiteren stellte die Anzahl der Litzen pro Litzenlage einen zusätzlich zu definierenden Parameter. Zusätzlich wurden zur Geometrieerstellung die Wickelradien der Parallelschlaglitzen benötigt, um die Ausrichtung der einzelnen Drähte innerhalb der Litze wirklichkeitsgetreu darstellen zu können. Tabelle 19 zeigt die Übersicht der wichtigsten Seildaten zur Erstellung eines Geometriemodells in einer FEM-Umgebung.

Tabelle 19: Seildaten

Seilkenndaten			
Seilkonstruktion	6x26WS IWRC	Drahtdurchmesser Außenlitze	
Geometrie		Kerndraht d_{20} in mm	0,37
Seildurchmesser d in mm	12	1. Drahtlage d_{21} in mm	0,53
Seildurchmesser Kunststoff d_k mm	14	2. Drahtlage dick d_{221} in mm	0,63
Schlagart	sZ	2. Drahtlage dünn d_{222} in mm	0,5
Außenlitzenanzahl n_i	6	3. Drahtlage d_{23} in mm	0,9
Lagenanzahl Litze	3	Schlaglänge Außenlitze	
Drahtanzahl Außenlitze	$6 \cdot (1+5+(5+5)+10)$	Schlaglänge Litze l_L in mm	79
Einlage	IWRC (7x7)	Schlaglänge Draht l_D in mm	33,37

Die Finite-Elemente-Methode teilt ein Grundmodell in endlich viele Teilgebiete. Die Erstellung dieser Teilgebiete wird Vernetzung genannt. Im Rahmen dieses Berichtes wird auch der Begriff Diskretisierung genutzt. Die modellierten Drähte sowie die Kunststoffummantelung und auch die Seilscheibe wurden mit entsprechenden Elementen vernetzt. Das bisher erstellte Geometriemodell beinhaltete alle Objekte des Seiltriebes, die zur Untersuchung der Beanspruchung notwendig waren. Die einzelnen Drähte, die Kunststoffummantelung sowie die Seilscheibe standen allerdings noch nicht miteinander in Beziehung. Durch Kontakterstellung wurde die Interaktion der modellierten Bauteile möglich.

Erzielte Ergebnisse

Zunächst wird das zweidimensionale Geometriemodell beschrieben. Auf Grund der speziellen Ausrichtung der Drähte in Parallelschlaglitzen war die Ermittlungsart der Teilkreisradien wie bei

Spiralseilen nicht zulässig. Die Lagendrähte wurden mit gleicher Schlaglänge der darunterliegenden Lage in die Rillen zweier Drähte verseilt. Abbildung 77 zeigt die Wickelradien einer Warrington-Seale-Litze [Jen 92]. Diese konnten durch gegebene geometrische Zusammenhänge rechnerisch ermittelt werden. Auf die Darstellung der Gleichungen wird in diesem Bericht verzichtet. Sie sind in der entsprechenden Fachliteratur zu finden.

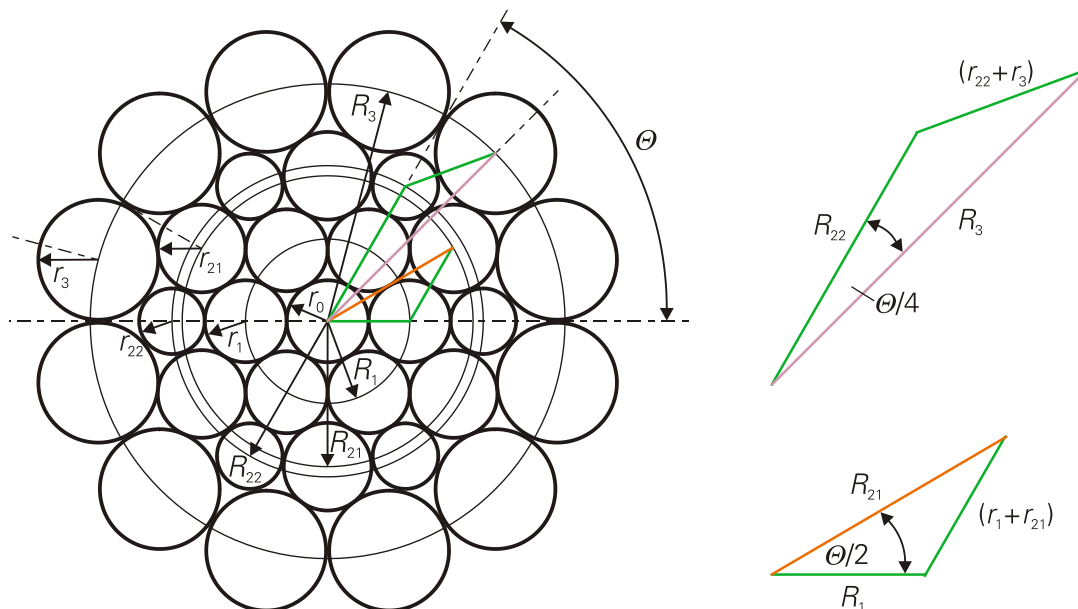


Abbildung 77: Wickelradien Warrington-Seale-Litze

Die Einzeldrähte wurden als Kreisquerschnitte definiert. Die Betrachtung des realen Seilquerschnitts weist jedoch meist eine elliptische Querschnittsfläche der einzelnen Drähte auf. Auf Grund der einfachen bzw. doppelten Verseilung stellte die Abbildung einer kreisförmigen Fläche eine starke Abstraktion der Wirklichkeit dar. Für die nachfolgende qualitative Untersuchung der Verteilung der Druckspannung in einem zweidimensionalen Modell ermöglichte die Vereinfachung einen erleichterten Geometrieaufbau. Die Diskretisierung der Drahtfläche erfolgte mit Elementen des Typs PLANE183. Den Elementtypen sind prinzipielle Verhaltensvorgaben zugeordnet. Diese Einstellungen (Keyoptionen) können durch den Anwender spezifiziert und geändert werden. Auf Grund einer definierten Unterteilung der Linien der Teilflächen der Querschnittsabbildung konnte ein strukturiertes Netz generiert werden (Abbildung 78a). In der späteren Ergebnisbetrachtung wurden speziell die Kontaktstellen der Drähte innerhalb einer Litze sowie die Berührungspunkte der Litzenlagen ausgewertet. Um eine wirklichkeitsgetreue Berechnung der Betrachtungszonen zu erhalten war eine lokale Netzverfeinerung unabdingbar. In den Einfachlitzen der Seileinlage verteilten sich die Kontaktzonen der Lagendrähte zum Kerndraht linienförmig entlang des Kerndrahtumfangs. In die Geometrieerstellung der Seildrähte wurde eine zweistufige Netzverfeinerung integriert. Abbildung 78b zeigt die zweistufige Netzverfeinerung eines Drahtes der Seileinlage. In Parallelschlaglitzen sind die Kontaktzonen der Drähte untereinander nicht regelmäßig über den Querschnitt verteilt. Eine Zuweisung der lokalen Netzverfeinerung auf die tatsächlichen Kontaktbereiche wäre mittels angepasster Elementauswahl möglich. Um die späteren Berührungsbereiche der Außenlitzen zur Kunststoffummantelung entsprechend vorzubereiten, wurden die Drähte der Warrington-Seale-Außenlitzen mit einer konstanten Netzverfeinerung entlang ihres Umfangs ausgestattet (Abbildung 78c).

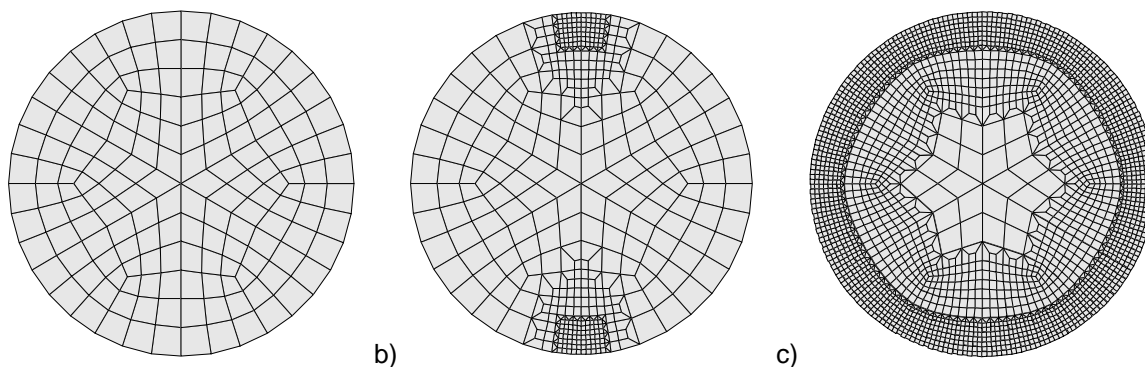


Abbildung 78: Diskretisierung des Drahtquerschnittes; a) Grundnetz; b) punktuelle Netzverfeinerung; c) vollständige Netzverfeinerung

Nach der Erstellung der kreisförmigen Drahtquerschnitte des Litzenseiles erfolgte die Generierung der Kunststoffummantelung. Die Grundstruktur der Ummantelung wurde durch einen Kreisring abgebildet, dessen innerer Durchmesser durch den Teilkreisdurchmesser der Außenlitzelage im Gesamtseil dargestellt werden konnte (Abbildung 79a). Auf Grund der zu erwartenden Regelmäßigkeit der Kunststoffummantelung wurde diese nur an einer Außenlitze erstellt. Nach Vollendung der Modellierung konnte die generierte Fläche gemustert werden (Abbildung 79b).

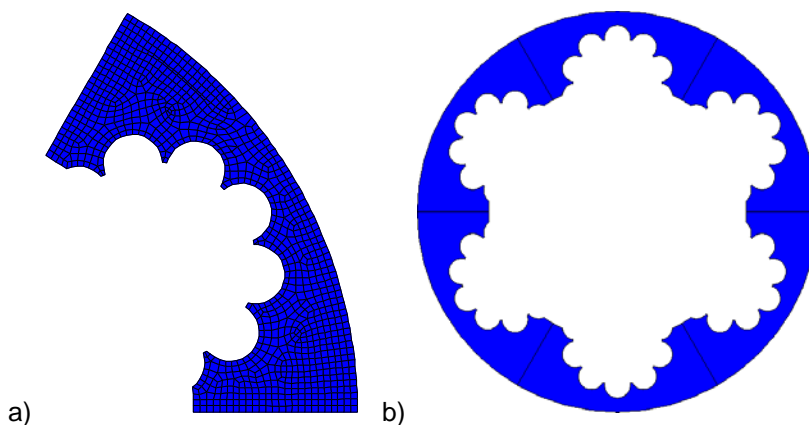


Abbildung 79: Kunststoffummantelung im FE-Modell; a) Teilfläche der Kunststoffummantelung; b) vollständige Ummantelung des Litzenseiles

Die Erstellung der Scheibengeometrie erfolgte für den Rillenradius in Abhängigkeit des Seildurchmessers. Je nach Untersuchungsmodell wurde also der Durchmesser des Drahtseiles bzw. der Kunststoffummantelung zur Festlegung des Scheibenparameters genutzt. Die Seilscheibengeometrie wurde durch die Generierung einer halben Kreisringfläche erzeugt.

Das bisher erstellte Geometriemodell beinhaltet alle Objekte des Seiltriebes, die zur Untersuchung der Beanspruchung notwendig sind. Die einzelnen Drähte, die Kunststoffummantelung sowie die Seilscheibe standen allerdings nicht miteinander in Beziehung. ANSYS bietet die Möglichkeit der Kontakterstellung, um eine Interaktion der modellierten Bauteile durchzuführen.

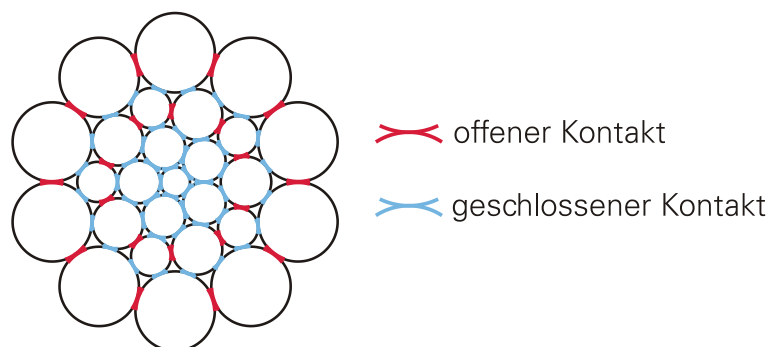


Abbildung 80: Bereiche der Kontaktdefinition der Drähte einer 26WS-Litze

Für die Erstellung der Kontakte zwischen den Drähten innerhalb einer Litze, zwischen den Litzenlagen sowie den Kontakten zwischen Seil und Kunststoffummantelung sowie Kunststoff und Seilscheibe wurden zweidimensionale Elemente eingesetzt. Eine Kontaktpaarung besteht aus Contact- und Target-Elementen, die miteinander interagieren. Die Kontaktelemente wurden auf eine bestehende Vernetzung aufgelegt. Die Vernetzung der Contact-Bereiche einer Kontaktpaarung wurden durch CONTA172-Elemente realisiert. Um die Kontaktpaarung vollständig zu definieren, wurden die Target-Bereiche mit dem Element TARGE169 vernetzt. Betrachtet man den modellierten Querschnitt einer Parallelschlaglitze, so ergeben sich zwei unterschiedliche Kontaktzonen. Die Lagendrähte übereinanderliegender Lagen befinden sich im geschlossenen Kontakt zueinander. Der Kontaktbereich zwischen den Drähten einer Lage gilt allgemein als offen. Auf Grund der Belastung des Drahtseiles können die Drähten einer Lage aber in Kontakt geraten. Diese Betrachtung erforderte die Definition von Kontaktpaarungen in jedem Bereich. Basierend auf den unterschiedlichen Grundvoraussetzungen wurden veränderte Einstellungen für die unterschiedlichen Kontakte festgelegt. Abbildung 80 zeigt die offenen und geschlossenen Kontakte der Warrington-Seale-Litze. Der Draht/Draht-Kontakt zwischen den Litzenlagen wurde als geschlossener Kontakt mit den entsprechenden Einstellungen definiert. In dem Untersuchungsmodell eines kunststoffummantelten Litzenseiles musste der Kontakt der Außendrähte der Außenlitzenlage mit der Hülle definiert werden. Diese Kontaktpaarung der zwei unterschiedlichen Materialien wurde als geschlossener Kontakt festgelegt. Diesem geschlossenen Kontakt wurde die Möglichkeit des Gleitens zugeschrieben. Auf die Erläuterung der verwendeten Keyoptionen soll in diesem Bericht verzichtet werden.

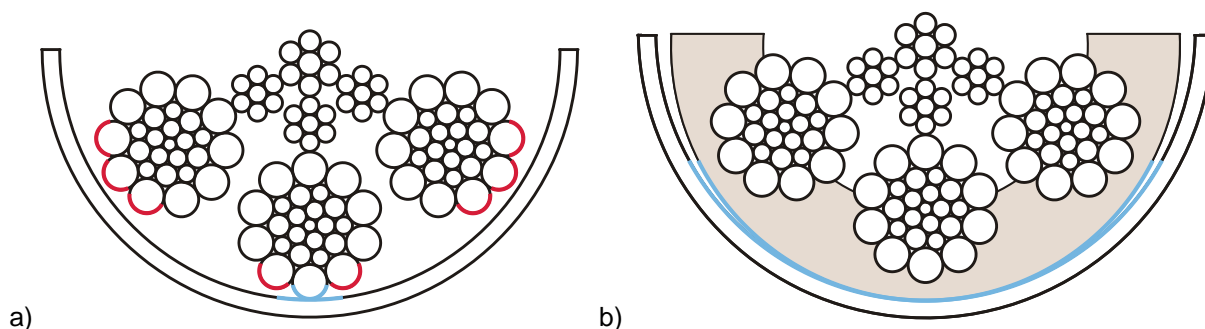


Abbildung 81: Bereiche der Kontaktdefinition zwischen Seil und Scheibe

Die Kontaktpaarung zwischen der Seilscheibenrinne sowie dem Gesamtseil musste je nach Untersuchungsmodell als Draht/Scheibe-Kontakt bzw. Kunststoff/Scheibe-Kontakt definiert werden. Abbildung 81 zeigt die beiden Szenarien.

Nachfolgend wird der Aufbau des dreidimensionalen Geometriemodells beschrieben. Das nicht gebogene Drahtseil verfügt über einen geraden Kerndraht in der Kernlitze. Die Lagendrähte der Kernlitze sind in einfacher schraubenförmiger Raumkurve um den Kerndraht geschlagen. Diese Schraubenkurve wird als einfache Verseilung bezeichnet. Die darauffolgende Litzenlage verfügt über einen Kerndraht in einfacher Verseilung. Die darum geschlagenen Drähte der Litzenlagen folgen einer doppelten Schraubenkurve. In der Literatur wird auch von Doppelhelix gesprochen. Dieser Begriff ist allerdings irreführend, sodass der Sachverhalt fortlaufend als zweifache Verseilung bezeichnet wird. Abbildung 82 zeigt die Verseilarten am Querschnitt eines Litzenseiles.

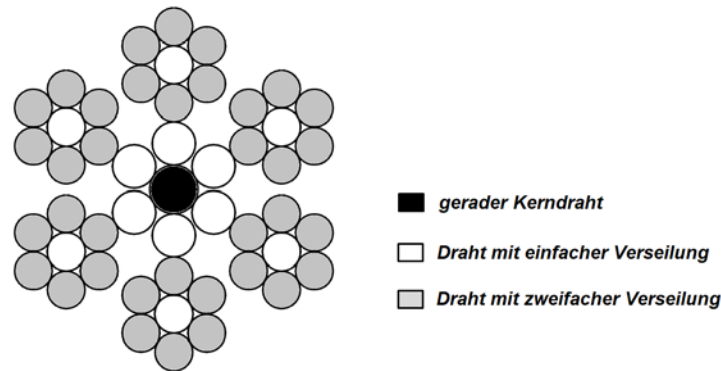


Abbildung 82: Querschnitt des Rundlitzenseils mit Verseilarten

Die mathematische Beschreibung der Raumkurven der einfachen und zweifachen Verseilung kann der Fachliteratur [Fey 00] entnommen werden. Während der Erstellung des dreidimensionalen Modells eines Litzenseiles wurden die Einzeldrähte in Segmente unterteilt, deren interne Bezugskoordinatensysteme entsprechend der nachfolgenden Diskretisierung angepasst wurden. Der Bezug wurde genutzt, um die Ausrichtung der Kontaktdefinition an die Struktur des Litzenseiles zu gewährleisten.

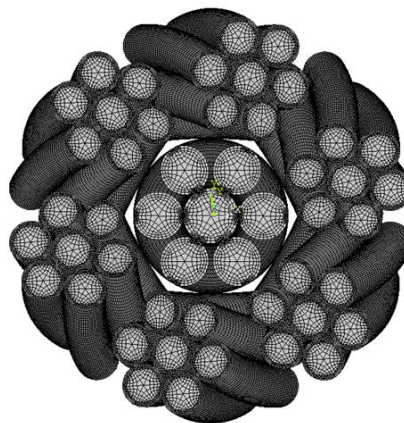


Abbildung 83: Vollständig diskretisiertes Drahtseilmodell mit strukturiertem Gitter

Ein Vorteil der Vernetzung eines strukturierten Gitters mit Hexaederelementen ist die geringere Anforderung an Speicher- und Rechenleistung verglichen mit einem unstrukturierten Gitter. Dennoch war der allgemeine Anspruch an die Rechenleistung bei der Simulation eines Litzenseiles enorm hoch. Abbildung 83 zeigt das diskretisierte Modell eines Litzenseiles. Die Einbeziehung der Parallelschlaglitzen der Außenlage übersteigt die zur Verfügung stehende Rechenleistung bei weitem.

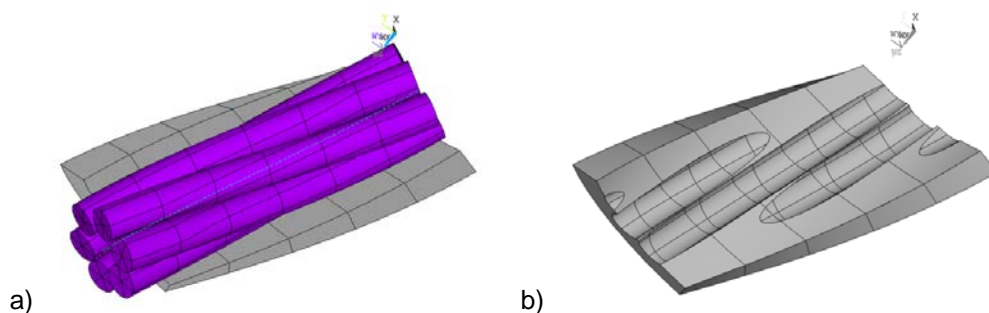


Abbildung 84: Modellierung der Ummantelung für Litzenseil; a) Ummantelung mit Drahtmodell; b) Ummantelung mit herausgeschnittenen Drahtvolumen

Die Form des Querschnitts der Ummantelung ändert sich entlang des Litzenseiles im dreidimensionalen Raum ständig. Die Vorgehensweise der Erstellung durch Austragen der Stirnfläche, wie beim zweidimensionalen Modell, funktionierte hierbei nicht mehr. Es wurde eine Boolesche Operation, die sich direkt auf das Volumen der Drahtmodelle stützt, verwendet. Dazu wurden Modelle erstellt, die das Drahtvolumen aus der schlauchförmigen Ummantelung ausschneiden. Im Anschluss wurden diese Drahtmodelle wieder gelöscht. Das erstellte Teilsegment der Kunststoffummantelung konnte zur vollständigen Umhüllung des Litzendrahtseiles gemustert werden (Abbildung 84).

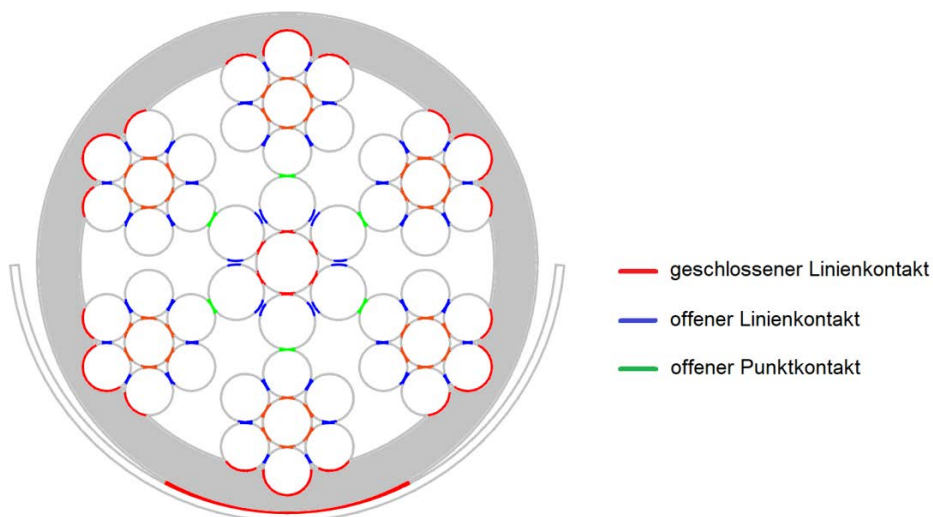


Abbildung 85: Bereiche der Kontaktdefinition im Rundlitzenseil

Hinsichtlich der Art des Kontaktes kann ein Surface-to-Surface-Kontakt punktförmig oder linienförmig auftreten. Das untersuchte Rundlitzenseil wies beide Formen auf. Abbildung 85 zeigt die definierten Kontaktbereiche im Seilmodell exemplarisch an der kunststoffummantelten Variante. Im Untersuchungsfall des konventionellen Drahtseiles wurde der Kontakt zwischen Außendraht und Seilscheibe als geschlossener Punktkontakt definiert.

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 4.3 mit dem Ziel

Im Rahmen des Arbeitspakets 4.3 konnten zwei- und dreidimensionale Geometriemodelle konventioneller und kunststoffummantelter Drahtseile generiert werden. Die komplexe Konstruktionsstruktur der Seilgeometrie und die zahlreichen Kontaktpaarungen zwischen Einzeldrähten, Litzenverbänden und dem Gesamtseil mit der Seilscheibe erwiesen sich bei der Modellierung als höchst anspruchsvoll. Die Kalibrierung des Seiles zur experimentellen Untersuchung konnte im FE-Modell nicht nachgebildet werden, da Drahtverformungen und Eigenspannungen unbekannt

sind. Die Zielsetzung des Aufbaus eines Geometriemodells zur Untersuchung der Drahtbeanspruchung konnte erfüllt werden.

AP 4.4 FE-Modell Beanspruchung

Das Litzenseil wird bei dem Lauf über eine Seilscheibe mehreren Belastungen ausgesetzt. Die Seilzugkraft erzeugt eine Schnürwirkung der Drähte innerhalb einer Litze sowie eine Schnürung der Litzenlagen um die Kernlitze. Des Weiteren belastet eine, aus der Biegung über die Scheibe resultierende, Streckenlast die Seildrähte.

Durchgeführte Arbeiten

In dem Untersuchungsmodell wurden die Schnürdrücke der Draht- und Litzenlagen sowie die Streckenlast als Randbedingungen auf die Einzeldrähte bzw. die Seilscheibe aufgegeben. Neben der Kraftereinleitung wurden zusätzlich Lagerungen definiert, um die Bewegungsrichtung der Drähte einzuschränken. Durch die Betrachtung eines zweidimensionalen Untersuchungsmodells mussten die Freiheitsgrade eindeutig definiert werden, da die Schnürung der Drähte entlang der Seillängsachse nicht simuliert werden konnte.

Erzielte Ergebnisse

Infolge der Belastung des Seiles mit einer Seilzugkraft erzeugen die Drähte durch ihre Wendelform ein Drehmoment. Damit dieses Moment nicht zum Aufdrehen der Seilstruktur führt, müssen die Seilenden durch drehfeste Endverbindungen geführt werden. Alternativ können die Drehmomente durch rechts und links geschlagene Draht- bzw. Litzenlagen ausgeglichen werden [Fey 00]. Die weitere Betrachtung unterliegt der Voraussetzung, dass das Aufdrehen der Litzen und Seile verhindert werden würde. Die schraubenförmig geschlagenen Lagendrähte einer Litze stützen sich unter Zugbelastung auf den Kerndraht oder die unterliegende Drahtlage. Dadurch wird ein Schnürdruck erzeugt, welcher als längenbezogene Radialkraft anzusehen ist. Abbildung 86 zeigt die Wirkungsrichtung des Schnürdrucks durch die Belastung des Seiles mit der Seilzugkraft. Dabei kommt es in einem Litzenseil zur Schnürung der Drähte um den Litzenkern sowie zur Schnürung der Litzenlagen um die Seileinlage. Dieser Effekt bedingt eine geringe Verlängerung des Seiles sowie die Reduktion des Drahtnennendurchmessers.

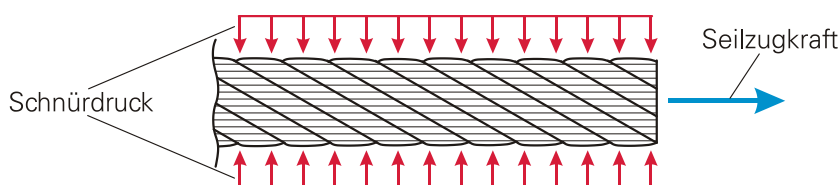


Abbildung 86: Wirkung des Schnürdrucks auf ein Seil

Die Generierung der Randbedingungen wurde in zwei Schritten durchgeführt. Im ANSYS Preprocessor erfolgte die Selektierung, Ausrichtung und Komponentenbildung für die Randbedingungen des Draht- bzw. Litzenschnürdrucks. Dabei erfolgte die Auswahl der entsprechenden Knoten über das für jeden Drahtquerschnitt erstellte Koordinatensystem. Die zur Kraftereinleitung des Drahtschnürdrucks ausgewählten Knoten wurden einer Ausrichtung ihres internen Koordinatensystems zum jeweiligen Litzenmittelpunkt unterzogen. Weiterhin wurden die Knoten zur Kraftereinleitung des Litzenschnürdrucks in Richtung des globalen Koordinatensystems im Seilmittelpunkt ausgerichtet. Diese Drehung der Knoten-Koordinatenrichtung geschah zur späteren eindeutigen Kraftereinleitung entlang einer fest definierten Koordinatenachse. Zusätzlich wurden Loslagerungen für alle Drahtquerschnitte vorbereitet. In sämtlichen Lagendrähten einer jeden Litzenlage

wurden einige selektierte Knoten zum Litzenmittelpunkt ausgerichtet. Dabei wurde darauf geachtet, dass diese Knoten nicht zur späteren Krafteinleitung genutzt wurden. Weiterhin wurden einige Knoten der Kerndrähte der Mittel- und Außenlage zum Seilmittelpunkt gedreht. Alle Selektierungen erhielten die Zuweisung eines eigenen Komponentennamens, welcher die spätere Wiederaufrufung vereinfachte. Im ANSYS Solver wurden die definierten Komponenten wieder aufgerufen. In diesem Teil der Modellgenerierung wurden die Kräfte auf die vorgesehenen Knoten aufgebracht. Des Weiteren wurden die Knoten-Komponenten der Lagendrähte als Loslagerung definiert. Somit war die Bewegung der Lagendrähte nur in Richtung des jeweiligen Litzenmittelpunktes möglich. Die Kerndrähte einer jeden Litzenlage wurden ebenfalls mit einer Loslagerung versehen. Diese gestattete ausschließlich die Bewegung in Richtung Seilmittelpunkt. Der Mittelpunkt des Kerndrahtes der Kernlitze wurde fest eingespannt. Abbildung 87 zeigt die Gesamtheit der Krafteinleitungs- und Lagerungsbedingungen der Drähte des Litzenseiles.

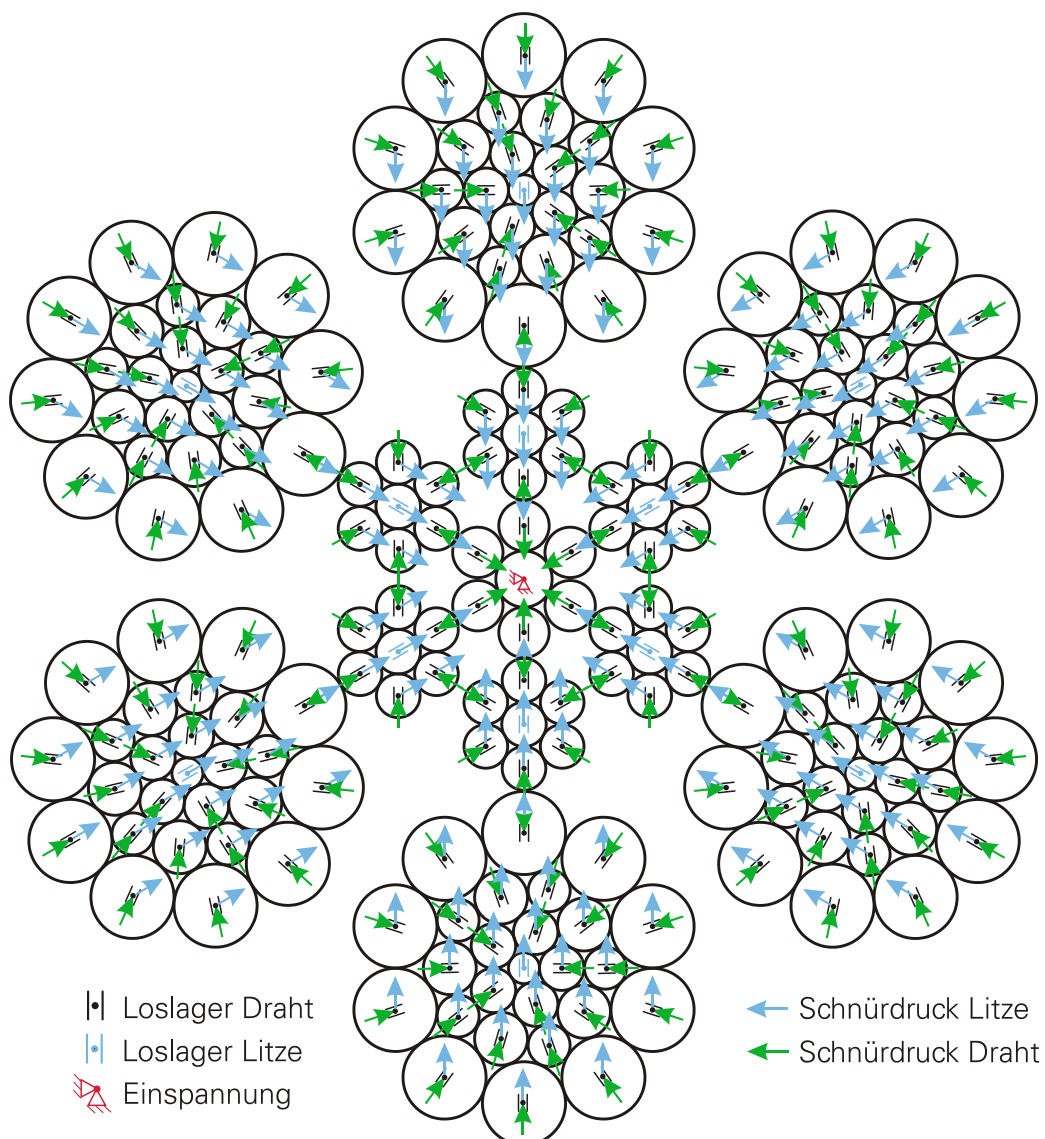


Abbildung 87: Randbedingungen der Seildrähte

Bei Auflage des Seiles in der Seilscheibenrinne und der Belastung durch die Seilzugkraft entsteht die Streckenkraft g , welche eine weitere Belastung der Seildrähte hervorruft. Die Streckenkraft g kann mittels Seilzugkraft S , der Schlaglänge der Litze l_L sowie der dem Durchmesser der Seilscheibe D ermittelt werden [Jeh 85]. Der Sachverhalt ist in Abbildung 88 dargestellt.

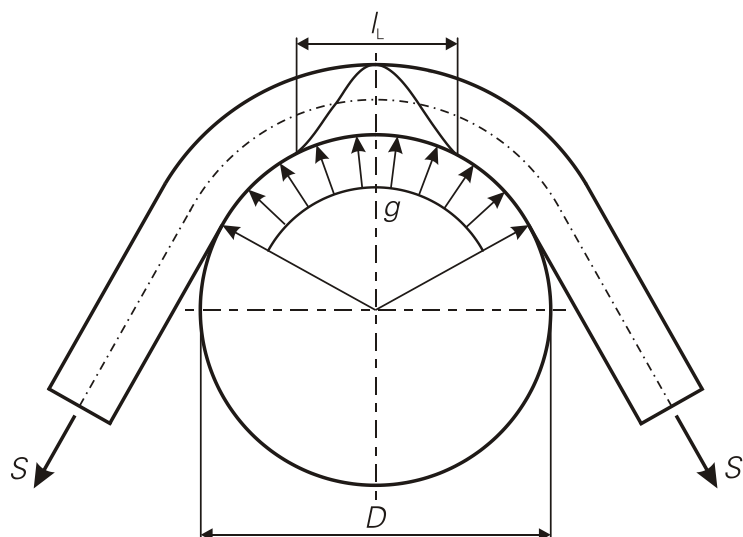


Abbildung 88: Beanspruchung des Seiles in der Rille [Jeh 85]

Die Streckenlast wurde durch das Drücken der Scheibe in Richtung des Seilmittelpunktes auf das Drahtseil aufgebracht. Dabei erfolgte die Krafteinleitung über einen externen Punkt der mittels einer starren Constraint Equation mit den Knoten der Scheibe verbunden wurde und die Kraft gleichmäßig verteilte (Abbildung 89). Der Krafteinleitungsknoten wurde mit einem MASS21-Element vernetzt, welches als Punktelement deklariert wurde.

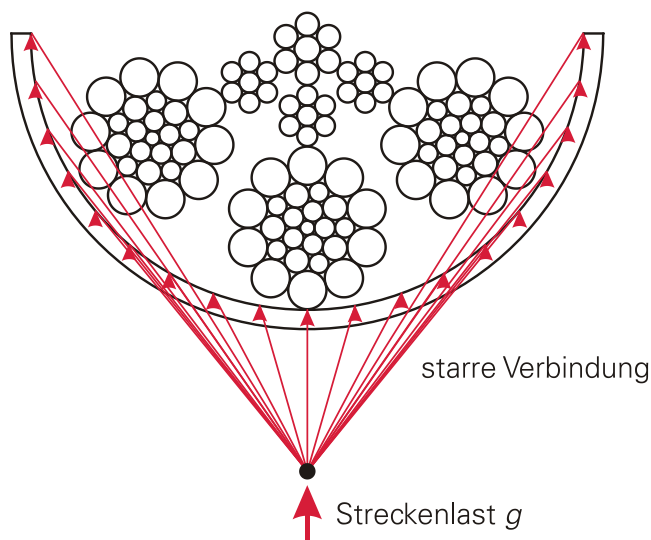


Abbildung 89: Krafteinleitung der Streckenlast in die Scheibe

Nachfolgend wird die Aufbringung und Definition der Randbedingungen im dreidimensionalen Geometriemodell beschrieben. Zur Fixierung des Seiles wurde ein Seilende mittels Knotenfixierung fest eingespannt. Alle Freiheitsgrade der Knoten an diesem Seilende wurden beschränkt, um die translatorischen und rotatorischen Bewegungen zu unterbinden. Auf der Zugseite am zweiten Seilende erfolgte die Zugkrafteinleitung über einen masselosen Pilot-Knoten, der in Verlängerung der Seillängsachse definiert wurde. Die Bewegungseigenschaften des Pilot-Knoten wurden mit allen Knoten der Kontaktflächen am Seilende verknüpft. Durch die Einschränkung der Freiheitsgrade der Rotationsbewegung war nur noch die translatorische Bewegung entlang der Seillängsachse möglich. Somit wurde eine ideale symmetrische Zuglastverteilung auf die Einzeldrähte erreicht. Die Aufbringung der zugkraftbedingten Randbedingungen ist in Abbildung 90 dargestellt.

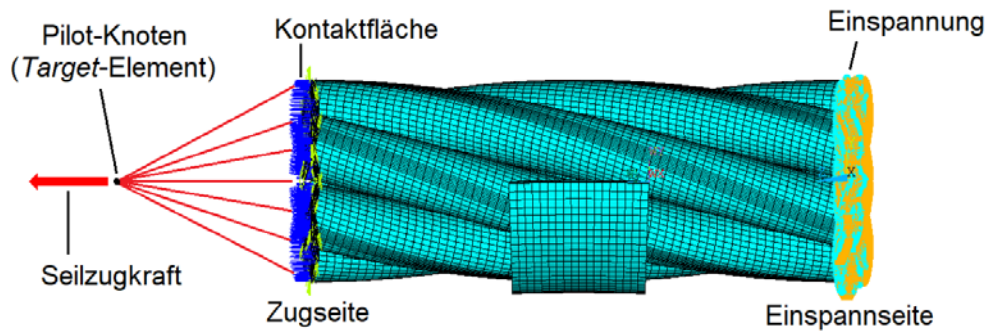


Abbildung 90: Einspannung und Zugkräfteinleitung

Die Einleitung der Querkraft wurde von der Seilscheibe in Richtung des Seilmittelpunktes ausgeübt. Dazu wurde die Verknüpfung eines externen Kräfteinleitungsknotens mit den Knoten der Seilscheibe implementiert. Die Streckenlast ließ sich entsprechend der Modellgröße der Seilscheibe gleichmäßig auf deren Oberfläche verteilen. Durch die Einschränkung von Freiheitsgraden war nur die in Richtung der Seilmittelachse gerichtete Translation zulässig (Abbildung 91).

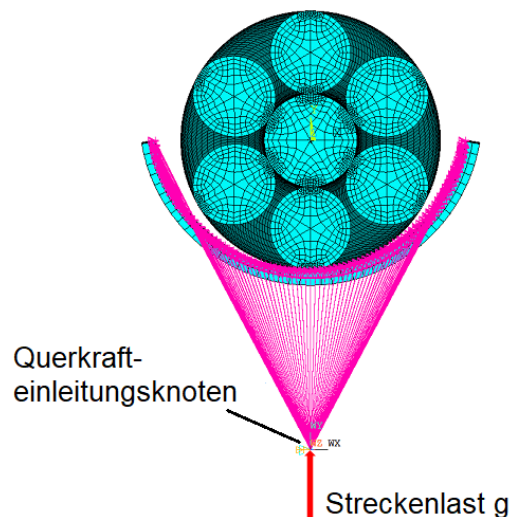


Abbildung 91: Querkrafteinleitung

Auf Grund der aufgebrachtten Randbedingungen an den Seilenden wurde das Seilmodell in diesen Bereichen eingeschränkt. Zur Entfaltung des seilspezifischen Verhaltens musste ein ausreichend langes Seilmodell simuliert werden, um den Einfluss der Randbereiche zu eliminieren.

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 4.4 mit dem Ziel

Im Rahmen des Arbeitspakets 4.4 konnten die Randbedingungen für zwei- und dreidimensionale Geometriemodelle konventioneller und kunststoffummantelter Drahtseile implementiert werden. Durch die erstellten Zusammenhänge konnte ein simulationsfähiges FE-Modell generiert werden. Die Zielsetzung des Arbeitspaketes konnte erfüllt werden.

AP 4: FE-Modell Forschungsstelle 2

Das Vorgehen zur Erstellung des FE-Modells gliederte sich in mehrere Schritte. Zuerst wurde ein 3-D Modell erstellt. Den einzelnen Geometrien wurden Materialgesetze mit materialspezifischen Werkstoffkennwerten zugeordnet. Die Geometrie wurde vernetzt und die Kontakt- und Randbedingungen der Simulation festgelegt. Das genaue Vorgehen wird im Folgenden beschrieben.

AP 4.1 Ermittlung Werkstoffkennwerte Ummantelung

Die beiden untersuchten Kunststoffe sind Polyethylene. Die Seilvariante 1 wies eine niedrige Dichte (PE-LD) auf, während die Seilvariante 2 eine hohe Dichte (PE-HD) aufwies. Abhängig von dem in der Simulation verwendeten Materialmodell waren unterschiedliche Werkstoffkennwerte nötig. Es wurde untersucht, ob ein lineares Materialmodell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens des Kunststoffs geeignet ist. Der Vorteil eines linearen Materialmodells ist, dass nur zwei Werkstoffkennwerte anzugeben sind, aus denen die vier notwendige Materialkennwerte Querkontraktionszahl, Elastizitäts-, Kompressions- und Schermodul berechnet werden.

Durchgeführte Arbeiten

Die Eigenschaften der Kunststoffe wurden am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PUK) der TU Clausthal in Zugversuchen nach DIN EN ISO 527-1 bestimmt. Weitere für die Simulation relevanten Materialkennwerte wurden in einer Literaturrecherche bestimmt.

Erzielte Ergebnisse

Die aus dem uniaxialen Zugversuch ermittelten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Die aufgenommenen Spannungs-Dehnungskurven sind in Abbildung 92 dargestellt.

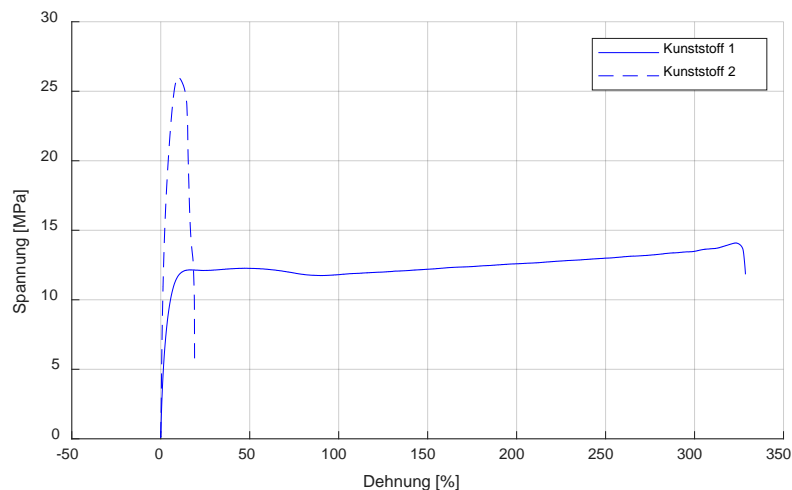


Abbildung 92: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungskurven der Kunststoffe 1 und 2

Tabelle 20: Werkstoffkennwerte der beiden untersuchten Kunststoffe

	Kunststoff 1	Kunststoff 2
E_t	417 MPa	967 MPa
σ_m	13,7 MPa	25,3 MPa
σ_b	12,7 MPa	8,29 MPa
ϵ_m	300 %	10 %
ϵ_{tb}	-	18 %

Da Kunststoffe nur einen sehr geringen linearen Verformungsbereich haben, ist in [DIN 527-1] der Elastizitätsmodul als ein Sekantenmodul zwischen den Dehnungen 0,05 % und 0,25 % definiert als

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (21)$$

Für das lineare Materialmodell lagen somit für beide Kunststoffe der E-Modul vor. Für das Erstellen des Materialmodells fehlte jedoch noch die Querkontraktionszahl, das Kompressions- oder Schubmodul. Für die FE-Simulation wurde die Software ANSYS Workbench® verwendet. In der Materialbibliothek ist unter „General Materials“ Polyethylen zu finden mit einer Querkontraktionszahl $\nu = 0,42$. Für die linearen Materialmodelle wurde die Querkontraktionszahl beibehalten und für jeden Kunststoff der experimentell ermittelte Elastizitätsmodul verwendet.

Für die durchgeführten Simulationen mit einem hyperelastischen Materialmodell waren die Ingenieurs-Spannungs-Dehnungskurven in die wahren Spannungs-Dehnungskurven umzurechnen. Dies kann nach [Geb 11] mit den Formeln (22) und (23) durchgeführt werden.

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{ing}) \quad (22)$$

$$\sigma = \sigma_{ing} \cdot (1 + \varepsilon_{ing}) \quad (23)$$

Damit ergeben sich die in den Abbildung 93 und Abbildung 94 gezeigten Verläufe.

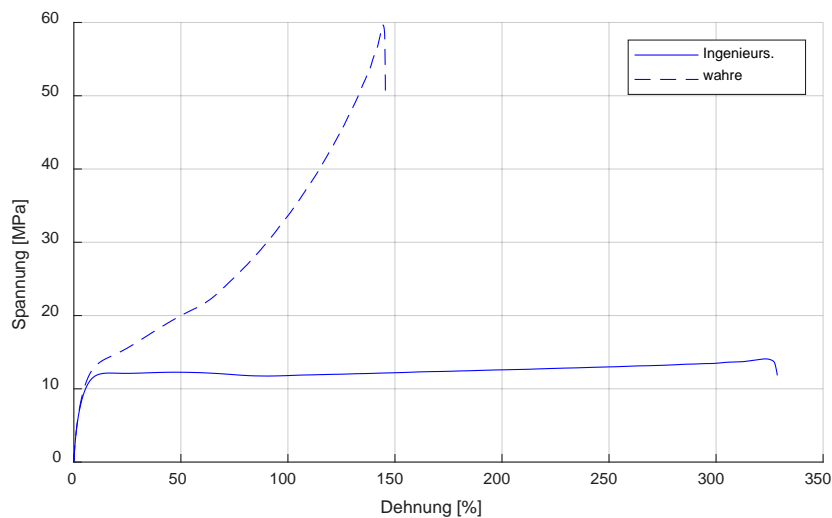


Abbildung 93: Spannungs- Dehnungs-Diagramm von Kunststoff 1

Für die Simulationen mit hyperelastischem Materialmodell wurden die Querkontraktionszahlen in einer Literaturrecherche genauer bestimmt. In [Ehr 02] ist eine Querkontraktionszahl für PE-LD (Kunststoff 1) von $\nu = 0,45$ und für PE-HD (Kunststoff 2) von $\nu = 0,38$ angegeben. Über die Temperatur aufgetragen findet man die Querkontraktionszahlen in [Obe 80]. Für weiche Polyethylene (PE-LD) ist die Querkontraktionszahl $\nu = 0,48$ und steigt auf bis zu $\nu = 0,5$ bei einer Temperatur von 80°C an. Für harte Polyethylene (PE-HD) beträgt die Querkontraktionszahl $\nu = 0,375$ bei 20°C und nimmt auf bis zu $\nu = 0,5$ bei einer Temperatur von 135°C zu. In [Erh 08] sind Richtwerte für die Querkontraktionszahlen von PE-LD und PE-HD mit $\nu = 0,5$ bei Raumtemperatur angegeben. Während sich die Quellen für PE-LD einigermaßen mit einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0,48 \dots 0,5$, stimmen für PE-HD nur die ersten beiden Quellen mit $\nu = 0,375 \dots 0,38$ überein. In [Bau 20] ist in einem Rechenbeispiel eine Querkontraktionszahl von $\nu = 0,38$ verwendet. Somit wird für Kunststoff 1 die Querkontraktionszahl auf $\nu = 0,48$ und für Kunststoff 2 auf $\nu = 0,38$ festgelegt.

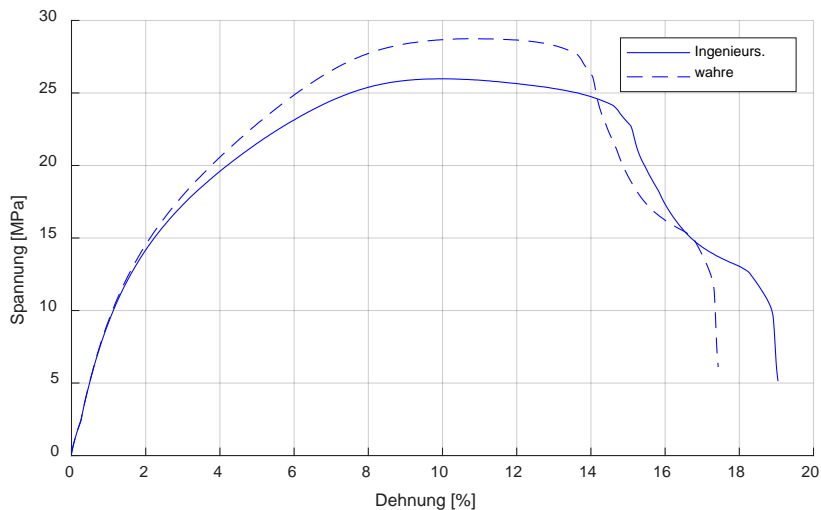


Abbildung 94: Spannungs- Dehnungs-Diagramm von Kunststoff 2

Für das AP 5.2 wurde als eine Variation der Kunststoffparameter die Verwendung von einem thermoplastischen Polyurethan (TPU) ausprobiert. Die Daten der Spannungs-Dehnungskurven sind [Cam 19] entnommen und mit den Gleichungen (22) und (23) in die wahren Spannungen und Dehnungen umgerechnet worden. In Abbildung 95 sind die Verläufe dargestellt. Die Querkontraktionszahl für Polyurethan wird von [Ehr 02] mit $\nu = 0,5$ angegeben und [Obe 80] spricht von nahezu $\nu = 0,5$, sodass dieser Wert fortführend benutzt wurde.

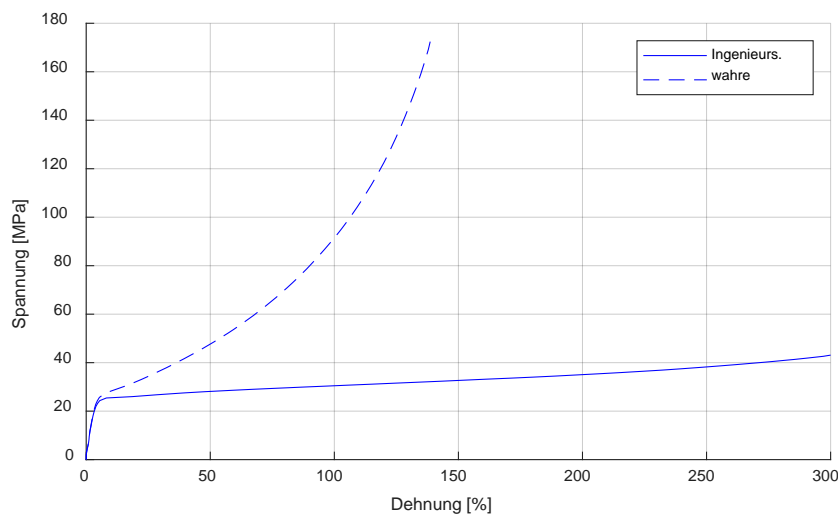


Abbildung 95: Spannungs-Dehnungsverlauf von dem verwendeten Polyurethan

Übereinstimmung der Ergebnisse aus AP 4.1 mit dem Ziel

Für die Simulationen konnten alle relevanten Daten beschafft werden, sodass das Ziel des Arbeitspaketes vollumfänglich erreicht wurde.

AP 4.3 Analyse der Seilkonstruktion, Geometriemodell

Durchgeführte Arbeiten

Die Modellierung des Seils und des Aufbaus zur Aufbringung der Querkraft wurde in Creo Parametric vorgenommen. Es wurde dazu ein parametrisches Modell erstellt, welches anschließend

auch aus dem FE-System ANSYS heraus eine Veränderung von wesentlichen Seilparametern erlaubt [Loh 19].

Erzielte Ergebnisse

Entnommen aus dt. Version OIPEEC 19 [Loh 19]

Der Verlauf der Drähte wird durch Kurven vorgegeben. Dabei ist zwischen dem geraden Kerndraht, einfachen und zweifachen Helices zu unterscheiden. Die Modellierung wurde mit Hilfe der Formeln (24) und (26) nach [Wei 15] ausgeführt.

Drähte die in einer einfachen Helix liegen sind die Außendrähte der Kernlitze und die Kerndrähte aller geschlagenen Litzen. Zur Berechnung wurde die Formel (24) angewandt.

$$\begin{bmatrix} X(\varphi_D) \\ Y(\varphi_D) \\ Z(\varphi_D) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_D \cdot \cos(\varphi_D) \\ R_D \cdot \sin(\varphi_D) \\ R_D \cdot (\varphi_D / \tan(\alpha)) \end{bmatrix} \quad (24)$$

Die geometrischen Angaben finden sich in Abbildung 96.

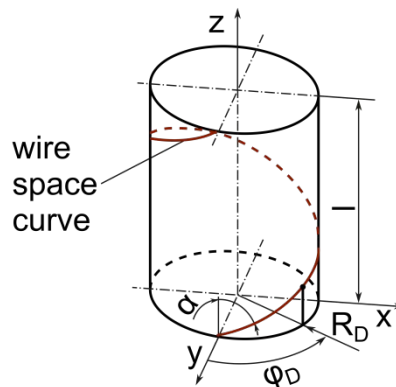


Abbildung 96: Definition einer einfachen Helix [Wei 15], [Sch 18]

Beispiele für in einfachen Helices geschlagene Drähte sind in Abbildung 97 dargestellt.

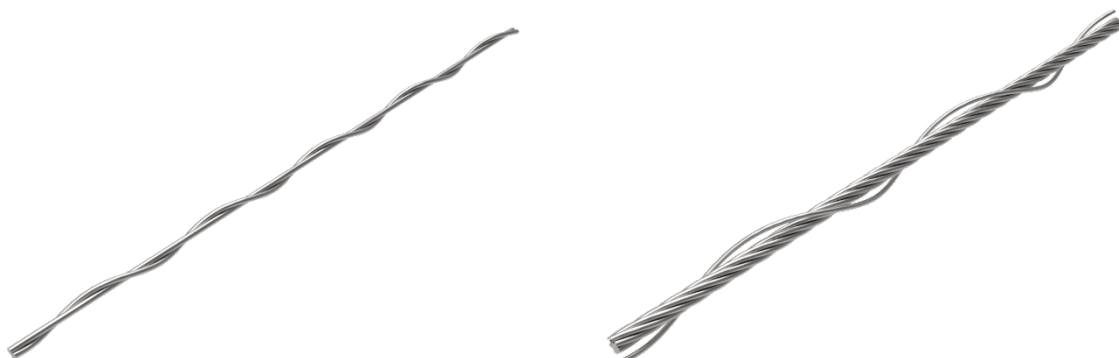


Abbildung 97: Kerndraht mit einem in einer einfachen Helix geschlagenen Draht (links) und Kernlitze mit weiterem Draht in einfacher Helix

Alle Drähte in geschlagenen Litzen, außer den jeweiligen Kerndrähten, sind in doppelten Helices geschlagen. Zu ihrer Berechnung werden die Formeln (25) und (26) genutzt.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} X(\varphi_L) \\ Y(\varphi_L) \\ Z(\varphi_L) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R_L \cdot \cos(\varphi_L) - R_D \cdot (\cos(\varphi_L) \cdot \cos(W \cdot \varphi_L) - \sin(\varphi_L) \cdot \sin(W \cdot \varphi_L) \cdot \cos(\beta)) \\ R_L \cdot \sin(\varphi_L) - R_D \cdot (\sin(\varphi_L) \cdot \cos(W \cdot \varphi_L) + \cos(\varphi_L) \cdot \sin(W \cdot \varphi_L) \cdot \cos(\beta)) \\ R_L \cdot \left(\frac{\varphi_L}{\tan(\beta)}\right) + R_D \cdot \sin(W \cdot \varphi_L) \cdot \sin(\beta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

$$W = \frac{\varphi_D}{\varphi_L} = \frac{R_L \cdot \tan(\alpha)}{R_D \cdot \sin(\beta)} - 1 \quad (26)$$

Die hierfür notwendigen geometrischen Informationen sind in Abbildung 98 dargestellt.

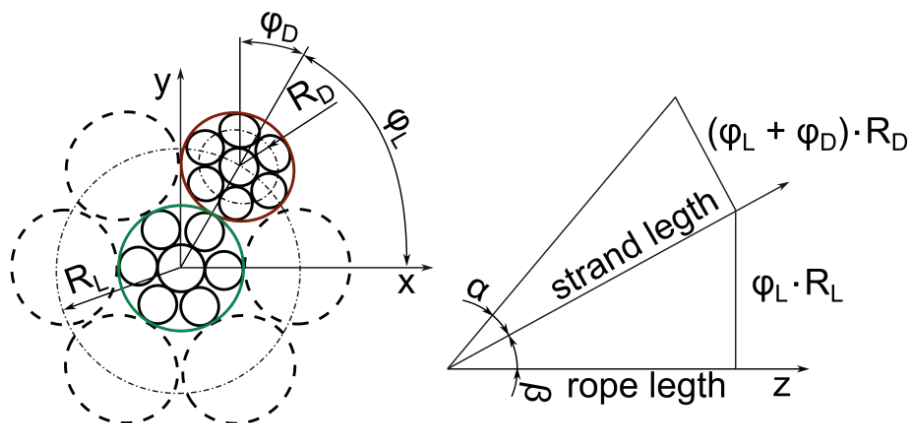


Abbildung 98: Definition doppelter Helices [Wei 15], [Sch 18]

Drähte in doppelten Helices sind in Abbildung 99 zu sehen.



Abbildung 99: Kernlitze mit weiterem Draht in einfacher Helix und zusätzlichem Draht in doppelter Helix (links) und kompletter Seilkern mit einer Außenlitze (rechts)

In Abbildung 100 ist schließlich das komplette 6x26 IWRC Seil abgebildet. Auf der rechten Seite der Abbildung ist das Seil um die für die Aufbringung der Querkraft notwendigen Backen ergänzt.



Abbildung 100: Vollständiges IWRC Seil (links) und Seil mit Prüfbacken für Querelastizitätsversuch (rechts)

Übereinstimmung der Ergebnisse aus AP 4.3 mit dem Ziel

Das Ziel des AP 4.3 war ein voll parametrisiertes Geometriemodell des untersuchten Seils. Dies ist, wie in Abbildung 100 zu sehen ist, gelungen. Dieses Modell kann an beliebige andere Seilgeometrien angepasst werden.

AP 4.5 FE-Modell Querelastizitätsbestimmung

Durchgeführte Arbeiten

Für die FE-Berechnungen wurde ein Modell von einem Sechstel der Schlaglänge des Seils eingesetzt. Dies ist durch die Vernetzung begründet. Ein längeres Modell hätte eine zu lange Rechenzeit zur Folge. Das vernetzte Modell ist in Abbildung 101 (rechts) zu sehen. Außerdem ist ein einzelner Draht mit der Netzauflösung von ungefähr 0,1 mm in Abbildung 102 dargestellt.

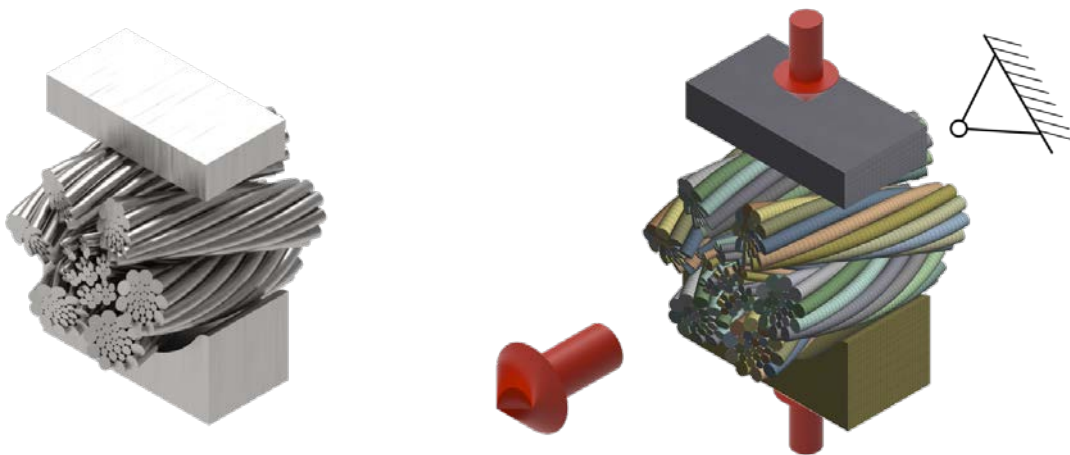


Abbildung 101: Kurzes CAD-Modell des Seils mit Querelastizitätsprüfbacken (links) und vernetztes FE-Modell mit Angabe der aufgebrauchten Randbedingungen (rechts)

Für die Berechnungen wurde vereinfacht ein linear elastisches Werkstoffverhalten angenommen. Für die Elemente wurde ein quadratischer Ansatz gewählt. Die Kontakte sowohl zwischen den einzelnen Drähten als auch zwischen Drähten und den Backen zur Aufbringung der Querkraft werden mit Hilfe des Augmented Lagrange Kontaktalgorithmus berechnet. Der Reibwert wurde auf $\mu = 0,12$ gesetzt [Geb 11], [Ehr 02]. Die Randbedingungen wurden, wie für den Versuch beschrieben (vgl. Abschnitt 2) und in Abbildung 101 rechts gezeigt, festgelegt. Im ersten Lastschritt wurde eine Längskraft auf das Seil aufgebracht. Dazu wurde das Seil an einer Seite mit Hilfe

eines Remote-Displacements festgehalten und auf der anderen Seite wurde die Kraft über eine Remote-Force aufgebracht [Wei 15]. Die Querkraft wurde durch Kräfte auf die Rillung und das Druckstück aufgebracht. Durch die Aufbringung von beiden Seiten wurde eine symmetrische Belastung erreicht.

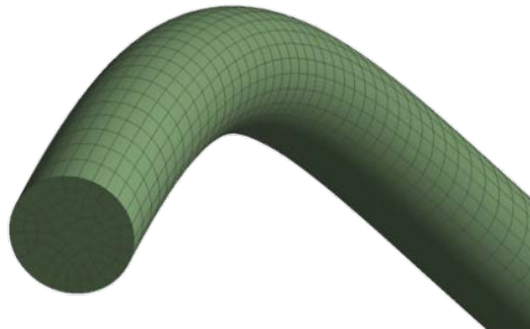


Abbildung 102: Einzelner vernetzter Draht; Kantenlänge eines Elements ca. 0,1 mm

Um die Querelastizität des kunststoffummantelten Seils simulieren zu können, wurde jedoch nicht das sehr komplexe Modell des gesamten Seils genutzt. Es wurde ein vereinfachtes Modell des Seils gewählt, mit dem das Verhalten des Kunststoffmantels validiert werden sollte. Simuliert wurde deshalb der Querdruckversuch für den Kreuzungsbereich der Seiltrommel und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Das Verhalten des Kunststoffs bei der Schädigung sollte möglichst gut beschrieben werden, um dieses dann im Anschluss optimieren zu können. Zur Beschreibung des Materialverhaltens wurde erst ein linear-elastisches Materialgesetz verwendet. Da dieses keine verwertbaren Ergebnisse lieferte, wurde anschließend ein hyperelastisches Materialmodell verwendet.

Um die Berechnungsdauer möglichst kurz zu halten und mit dem vorhandenen Arbeitsspeicher auszukommen, wurde das Modell geometrisch auf die Größe der Kernlitze verkleinert. Zusätzlich wurde die Geometrie des Seils vereinfacht, indem die Litzen des Seils als Zylinder modelliert wurden. Die Kontakte innerhalb des Seils sowie zwischen Seil und Mantel wurden als „bonded“ eingestellt. Die Belastung stellte sich aus einer definierten Verschiebung des oberen Seils ein. Die resultierende Kraft wurde über „Force Reaction“ ausgewertet. Das Modell ist in Abbildung 103 dargestellt.

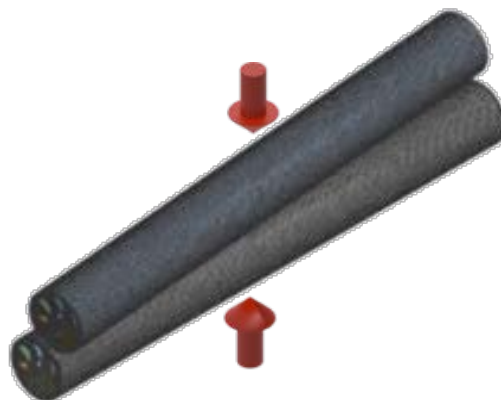


Abbildung 103: Vereinfachtes Modell des Modellversuchs „Querkraft auf Seilkreuzung“

Die ausgewertete Belastung wurde entsprechend der geometrischen Verkleinerung angepasst.

In dem FE-Modell mit einem hyperelastischen Materialmodell wurden die im AP 4.1 ermittelten Werkstoffdaten in ein „Mooney-Rivlin 9 Parameter“-Modell eingepflegt. Das Seil wurde im richtigen Maßstab mit einem kreisrunden Querschnitt stark in der Geometrie vereinfacht. Dem Stahlseil wurde als Festigkeit der Querelastizitätsmodul zugeordnet. Die Querverformung des Kreisrundenseils sollte somit der Verformung des richtigen Seils entsprechen. Die Kontaktprobleme konnten so vermieden werden und auch die Vernetzung gestaltete sich einfacher. Im Seil/Seil-Kontaktbereich wurde eine besonders feine Vernetzung verwendet. Im restlichen Modell ist die Vernetzung gröber, sodass insgesamt ähnlich viele Knoten wie in dem Modell mit linearem Materialmodell verwendet wurden. In den Bereichen mit einem hohen Spannungsgradienten sind jedoch mehr Elemente, sodass die Vernetzung für die Beanspruchung optimiert wurde. In den Simulationen wurde versucht die Last immer weiter zu steigern und den Modellversuch „Querdruk auf Seilkreuzung“ nachzustellen. Dafür mussten in der Simulation bei einer Querkraft von 10 kN erste bleibende plastischen Verformungen sichtbar werden. Die Kraft wurde also für alle drei simulierten Kunststoffe gesteigert bis ANSYS auf Grund von Konvergenzproblemen die Simulation nicht mehr lösen konnte [DIN 4309].

Erzielte Ergebnisse

In Abbildung 104 ist gezeigt, wie sich das Seil unter der Längskraft in Längsrichtung verformt. Dieses Ergebnis wurde zur Berechnung der Längselastizität E_{SL} benutzt. Allerdings wurde dazu nicht die Verschiebung an den beiden Enden ausgewertet. Vielmehr wurde die Verschiebung mit einem Abstand zum Rand verrechnet. Durch die Differenz der Verschiebungen konnte die Dehnung des Zwischenstücks des Seils ermittelt werden.

Zur Berechnung der Querelastizität E_{SQ} wird die Verschiebung der Rillung und des Stempels herangezogen. Die Summe der Verschiebungen ergibt die Durchmesserreduzierung des Seils.

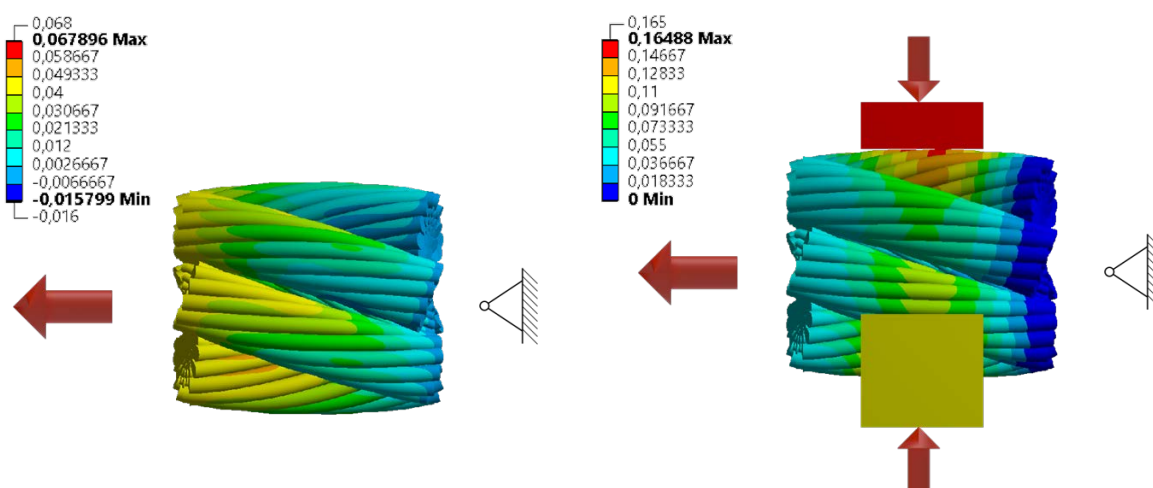


Abbildung 104: Längsdeformation in mm unter aufgebracht Längslast nach dem ersten Lastschritt (links) und die Gesamtdeformation in mm nach dem zweiten Lastschritt unter Längs- und Querkraft (rechts)

Zur Berechnung der Längselastizität E_{SL} sind nach Formel (14) die Kraftdifferenz und die Dehnung notwendig (Abbildung 104 links). Es war erkennbar, dass das Experiment bei gleicher Kraft eine geringere Dehnung im Vergleich zur Simulation aufwies.

Dieser Unterschied zeigte sich anschließend auch bei der Berechnung der Längselastizität. Diese konnte, wie in der Norm [ISO 12076] gefordert, zwischen 10 % und 30 % der Mindestbruchkraft des Seils berechnet werden. Für das Experiment ergab sich daraus ein Wert von $E_{SL, Exp} = 115 \text{ GPa}$. Für die Simulation ergab sich ein Wert von $E_{SL, Sim} = 73 \text{ GPa}$. Die Abweichung zwischen den beiden Werten beträgt 58 %.

Weiterhin konnte die Elastizität auch kontinuierlich ausgewertet werden. Dieses Ergebnis ist in Abbildung 105 (rechts) dargestellt. Wird für diese beiden Kurven die Abweichung zwischen Experiment und Simulation berechnet, ergibt sich eine maximale Abweichung von 65 % und eine mittlere Abweichung von 47 %.

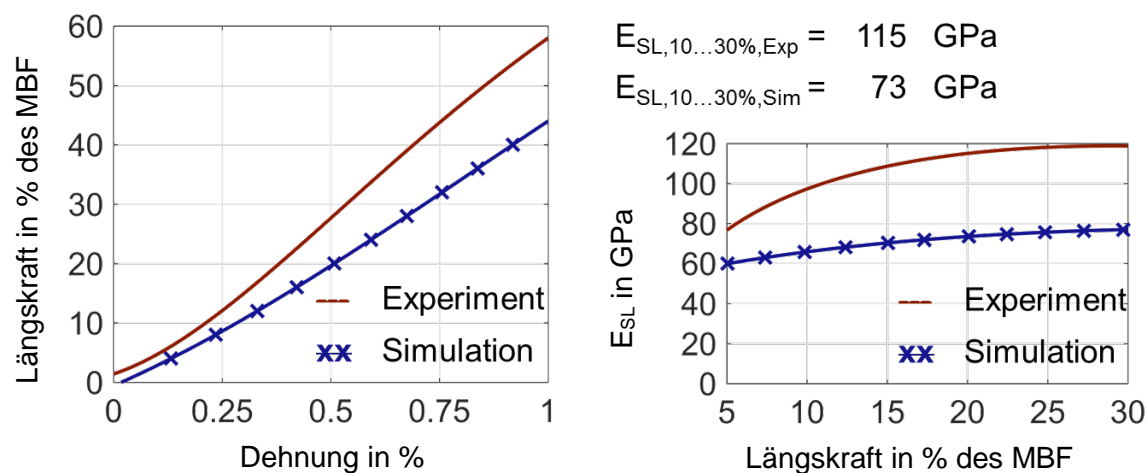


Abbildung 105: Vergleich von Experiment und Simulation der Längsdehnung (links) und der Längssteifigkeit (rechts)

Die Begründung für die hohe Abweichung bei der Längselastizität zwischen Experiment und Simulation ist in verschiedenen Bereichen zu suchen. Zuerst sei das von der Realität abweichende linear elastische Werkstoffverhalten der Simulation genannt. Weiterhin wurde ein verhältnismäßig kurzes Modell untersucht. Dadurch ergab sich nur ein geringer Abstand der ausgewerteten Bereiche zum Ende des Modells. Ein weiterer Punkt bezieht sich auf den gewählten Reibwert. Eine Veränderung des Reibwertes würde zu einer geänderten Längselastizität führen. Unter Einsatz eines angepassten Reibwertes zwischen den einzelnen Drähten könnte die Übereinstimmung voraussichtlich noch verbessert werden. Abschließend sei noch erwähnt, dass das Modell vornehmlich zur Bestimmung der Querelastizität aufgebaut wurde.

Der für die Auswertung der Querelastizität E_{SQ} notwendige Zusammenhang zwischen Querkraft und Durchmesserreduzierung (vgl. Formel (14)) ist in Abbildung 106 (links) zu sehen. Wegen der unterschiedlichen Messlängen l_{meas} in Experiment und Simulation wurde in der Abbildung der Querdruck angegeben, um die Werte direkt miteinander vergleichen zu können.

Bei der Auswertung des Experiments begann die Verschiebung nicht direkt bei einem Querdruck von 0 MPa. Dies ist jedoch der Auswertung geschuldet, die auf Grund des Messaufbaus erst ab einem bestimmten Querdruck begann. Es ist festzuhalten, dass die experimentellen und die Simulationsergebnisse zur Durchmesserreduzierung nicht in allen Bereichen übereinstimmten. Es lag eine Abhängigkeit vom Querdruck vor, die in der Simulation noch nicht abschließend Berücksichtigung findet.

Dieser steilere Anstieg der Kurve zeigte sich auch in den Werten für die Querelastizität. Jeder rote Punkt in Abbildung 106 (rechts) steht dabei für die Querelastizität für eine bestimmte Querkraft in einem Wiederholungszyklus der Querkraftaufbringung. Die Kurve der Querelastizität E_{SQ} wurde durch ein curve-fitting an alle gültigen Auswertepunkte generiert. Die Querelastizität für ein bestimmtes Querspannungsverhältnis konnte anschließend aus der Kurve abgelesen werden.

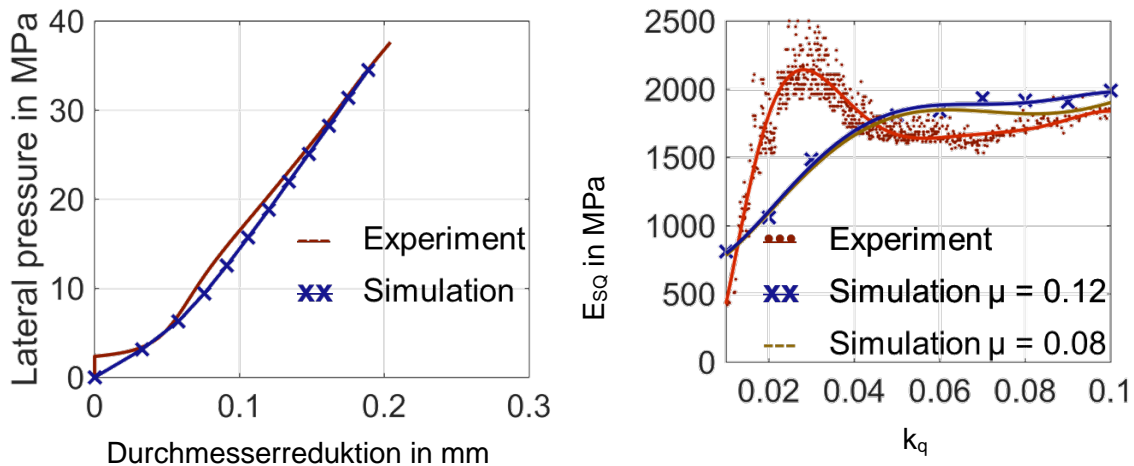


Abbildung 106: Vergleich von Experiment und Simulation der Querdeformation (links) und der Querelastizität E_{SQ} (rechts)

Der Vergleich von Experiment und Simulation konnte in verschiedene Bereiche geteilt werden. Für den ersten Bereich von $k_Q = 0.01 \dots 0.04$ (entspricht ungefähr $D/d = 150 \dots 37,5$) ergab sich eine Abweichung von 41,5 %. Diese war relativ hoch, jedoch war das der Bereich, welcher weniger im Fokus der Berechnungen lag. Der folgende Bereich von $k_Q = 0.04 \dots 0.1$ (entspricht ungefähr $D/d = 37,5 \dots 15$) wies eine Abweichung 9,5 % auf. Dies kann als eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation bezeichnet werden.

Durch die Wahl eines geringeren Reibwertes von $\mu = 0.08$ konnte die Abweichung auf 6,7 % reduziert werden.

Für die Abweichung zwischen Experiment und Simulation konnte, neben den bereits bei der Längselastizität genannten Gründen, wie das linear-elastische Werkstoffmodell und die gezeigte Auswirkung einer Veränderung des Reibwertes, ein weiterer Grund festgestellt werden. Bereits durch die Fertigung oder noch verstärkt durch eine anschließende Kalibrierung des Seils kam es zu plastischen Verformungen zwischen den Drähten. Diese Verformung konnten einen Formschluss zwischen den Drähten bewirken. Dieser Effekt bewirkte vermutlich auch die erhöhte Querelastizität des Seils die im unteren k_Q – Bereich im Experiment zu sehen ist.

Dt. Version OIPEEC 19 Ende. [Loh 19]

Zur Validierung des Materialmodells für den Kunststoffmantel wurde ein vereinfachtes Modell mit linearem Materialmodell berechnet. Ausgewertet wurde jeweils die maximale Scherspannung für alle drei simulierten Kunststoffe (Abbildung 107). Die auftretenden Scherspannungen wurden mit der Schubspannungshypothese nach Tresca in eine Vergleichsspannung umgerechnet und sind auf die jeweilige Zugfestigkeit normiert worden. Bei dem thermoplastischen Polyurethan lag die maximale Schubspannung 18,7 % über der Zugfestigkeit. Bei den beiden experimentell untersuchten Kunststoffen war die Abweichung noch weit größer. Bei Kunststoff 2 lag die berechnete maximale Schubspannung 187,7 % über der Zugfestigkeit und bei Kunststoff 1 waren es sogar

292,7 %. Mit diesen hohen Spannungen war keine Aussage über die Schädigung möglich. Bei der Belastung kam es zu einer plastischen Verformung (vgl. Abbildung 71), jedoch war das Seil noch vom Kunststoff bedeckt.

Tabelle 21: Maximale Schubspannungen und Festigkeiten bei linearem Materialmodell

	Kunststoff 1	Kunststoff 2	TPU
Max. Schubspannung [MPa]	26,901	36,349	29,675
Zugfestigkeit (nach Tresca) [MPa]	6,85	12,635	25
Überschreitung R_m [%]	292,7	187,7	18,7

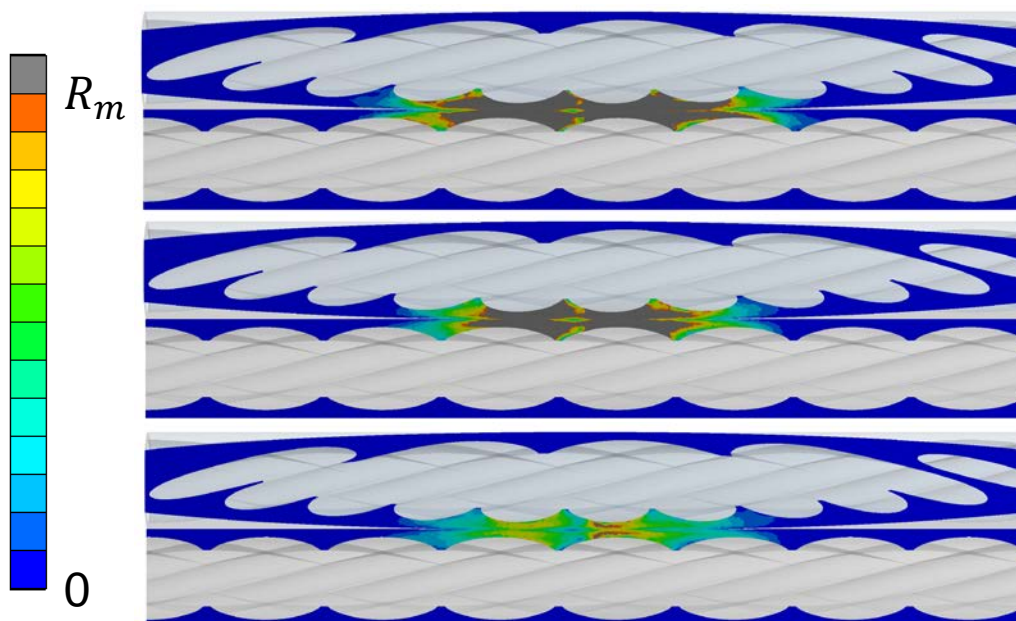


Abbildung 107: Maximale Scherspannung für Kunststoff 1 (oben), Kunststoff 2 (Mitte) und thermoplastisches Polyurethan (unten) normiert auf die Zugfestigkeit

Da das lineare Materialverhalten keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, wurde ein noch weiter vereinfachtes Modell des Seils mit einem hyperelastischen Materialmodell für den Kunststoff berechnet. Dabei wurde die Last für alle drei simulierten Kunststoffe gesteigert bis ANSYS auf Grund von Konvergenzproblemen die Simulation nicht mehr lösen konnte.

Eine Last von 800 N konnte auf alle Simulationsmodelle aufgebracht werden. Bei einer Steigerung darüber hinaus konnte für Kunststoff 2 keine Konvergenz mehr erreicht werden. Die Verformung einiger Elemente war zu groß geworden. Die Verwendung von „Nonlinear Adaptiv Region“, die eine Neuvernetzung besonders deformierter Bereiche während der Simulation bewirkte, konnte nicht zu einer höheren ertragbaren Querkraft beitragen. Im Querdruckversuch sind erste plastische Verformungen bei einer Last von 7,5 kN zu sehen. Hier lagen das Experiment und die Simulation eine Größenordnung auseinander. Eine mögliche Fehlerquelle war das hyperelastische Materialmodell, das große elastische Verformungen, wie beispielsweise von Gummi, gut beschreibt. Eine Plastifizierung des Materials war hier nicht vorgesehen. Das bereits im Unterkapitel AP 2.4 angesprochene viskoelastische Materialverhalten sollte daher in zukünftigen Untersuchungen unbedingt durch ein viskoelastisches Materialmodell beschrieben werden [Neu 20].

Für Kunststoff 1 konnte die Last bis auf 3 kN gesteigert werden, darüber traten dieselben Konvergenzprobleme auf. Im Versuch konnte eine Schädigung des Kunststoffmantels erst bei einer

Querkraft von 12,5 kN festgestellt werden. Auch hier war das Problem, dass der Kunststoff über ein viskoelastisches Materialverhalten verfügte und mit einem hyperelastischen Materialmodell simuliert wurde. Für den zu Vergleichszwecken simulierten thermoplastische Elastomer auf Polyurethan-Basis konnte die Last auf bis zu 6 kN gesteigert werden. Es verfügte über ein hyperelastisches Materialverhalten. Dies könnte erklären warum hiermit die höchste Querkraft erreicht werden konnte. Die in den Versuchen bestimmten Werte konnten jedoch in keiner der Simulationen generiert werden. Eine weitere mögliche Erklärung für das Abweichen von Simulation und Versuch sind die für den Kunststoff im Zugversuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven. In zukünftigen Untersuchungen sind die Kunststoffkennwerte für den Druckbereich zu bestimmen [Neu 20].

Die maximal auftretenden Schubspannungen und Dehnungen sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Auftretende Schubspannungen und Dehnungen bei der maximal aufgebrauchten Querkraft [Neu 20]

	Kunststoff 1	Kunststoff 2	TPU
Max. aufgebrauchte Querkraft [N]	3000	800	6000
Max. Schubspannung im Mantel [MPa]	17,48	10,36	32,5
Max. Dehnung im Mantel [%]	6,31	1,38	4,37

Übereinstimmung der Ergebnisse aus AP 4.5 mit dem Ziel

Die Querelastizität des konventionellen Drahtseils konnte numerisch gut bestimmt werden. Das Ziel des Arbeitspaketes wurde somit erreicht. Darüber hinaus konnte durch die Modellbildung klar herausgearbeitet werden, dass weder ein linearelastischen noch ein hyperelastisches Materialmodell geeignet ist, um die Spannungen im Kunststoffmantel ausreichend zu beschreiben.

AP 5: FE-Simulation Forschungsstelle 1

Es wurde ein FE-Modell eines geraden Seilabschnitts eines konventionellen und kunststoffummantelten Drahtseiles erstellt. Der Fokus lag auf der Nachbildung der Kontaktverhältnisse der einzelnen Drähte und der Ermittlung der Drahtbeanspruchung unter definierter Vorspannung. Zusätzlich sollte der Seilverbund einer Querbelastrung ausgesetzt sein.

AP 5.1 Beanspruchung Seildrähte

Die FE-Simulationen liefern Informationen über die Beanspruchung der Seildrähte sowie der Ummantelung auf Grund äußerer Belastungsaufbringung. Mittels FE-Simulation ist es möglich komplizierte Beanspruchungszustände einzelner Drähte nachzuvollziehen.

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des Arbeitspakets 5.1 sind Simulationen mit den erstellten zwei- und dreidimensionalen Geometriemodellen der Seilvarianten durchgeführt worden. Dabei wurden Randbedingungen auf das Seilmodell aufgebracht, die den realen Belastungen durch Zug infolge einer zu hebenden Masse sowie durch Biegung infolge der Umlenkung durch Seilscheiben entsprechen. In

der Auswertung wurden die Ort und die Größe der maximal auftretenden Druckspannung der konventionellen und kunststoffummantelten Seilmodelle untersucht.

Erzielte Ergebnisse

Während der Projektzeit wurden zahlreiche FE-Simulation des zweidimensionalen Seilmodells durchgeführt. Dabei wurde die Seilkonstruktion systematisch aufgebaut. Beginnend mit der Simulation eines Modells einer Einfachlitze, über eine Parallelschlaglitze und ein 6x7-Litzenseil bis hin zum vollständigen 6x26WS-Litzenseil wurden die Simulationen mit und ohne Kunststoff durchgeführt. Im Vorfeld dieser Simulationen wurde eine Parameterstudie zur Gestaltung einer optimalen Diskretisierung durchgeführt. Mittels dem Untersuchungsmodell zweier aufeinanderliegender Drähte, welche durch eine Druckkraft belastet wurden, konnte die Pressung zwischen den Körpern ermittelt werden. Der Vergleich mit den analytisch bestimmten Werten wurde als Bewertungsstandart zur Validierung der Feinheit der Vernetzung genutzt. Für alle zweidimensionalen Untersuchungsmodelle wurden vier Simulationen durchgeführt, um die Unterschiede zwischen einer konventionellen Fertigung und der zusätzlichen Aufbringung einer Kunststoffummantelung auszuwerten:

- konventionell, Belastung nur durch Schnürdruck (SD),
- konventionell, Belastung durch Schnürdruck und Scheibe (SD_S),
- kunststoffummantelt, Belastung nur durch Schnürdruck (SD_KS),
- kunststoffummantelt, Belastung durch Schnürdruck und Scheibe (SD_KS_S).

In der Auswertung des Untersuchungsmodells der Einfachlitze wurden die relevanten Schädigungszonen betrachtet:

- Lagendraht – Kerndraht (LD – KD),
- Lagendraht – Scheibe/Kunststoff (LD – S/KS).

In der Auswertung wurden die Änderungen der dritten Hauptspannung $\Delta\sigma_3$ durch die Belastung der Litze mit der Scheibe und der aufgebrachten Streckenlast ermittelt. Dabei wurde der Spannungswert der reinen Schnürdrucksimulation von dem Maximalbetrag der Belastungskombination aus Schnürdruck und Streckenlast abgezogen. Diese Betrachtung erfolgte jeweils für die konventionelle sowie die kunststoffummantelte Litze (Tabelle 23).

Tabelle 23: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells Einfachlitze

Modell	σ_3 in MPa		$\Delta\sigma_3$ in MPa	Reduktion in %	
	LD - KD	LD - S/K		LD - KD	LD - S/K
SD	1.585,7	-	-	-	-
SD_S	2.361,0	2.127,9	775,3	-	-
SD_KS	1.520,1	-	-	-	-
SD_S_KS	2.193,2	265,0	673,1	-13,2	-87,5

Die Gegenüberstellung der Spannungen in den jeweiligen Bereichen der Auswertung zeigte eine deutliche Reduzierung des Maximums zugunsten der kunststoffummantelten Litze (Abbildung 108). Speziell die Kontaktzone zwischen Seil und Seilscheibenrille zeichnete sich durch eine große Minderung des Maximalwertes aus. Neben der Reduktion der maximalen Werte in den

Kontaktzonen war erkennbar, dass der Außendraht über den gesamten Querschnitt weniger beansprucht wurde. Diese Tendenz erweiterte sich auch auf den Kerndraht der Litze. Die Druckspannung wurde durch den Kunststoff merklich breiträumiger verteilt.

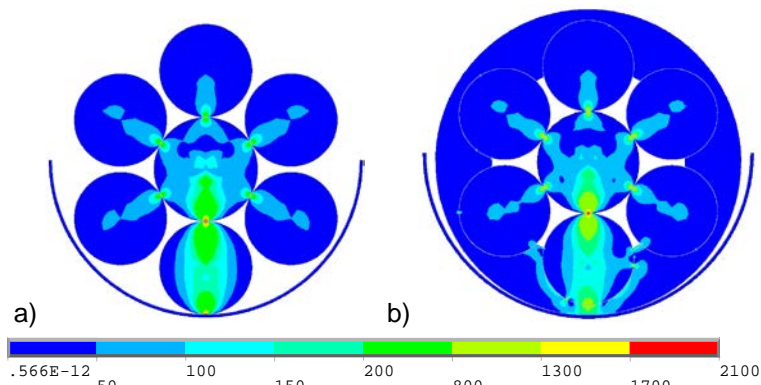


Abbildung 108: Druckspannungsvergleich Einfachlitze; a) konventionelle Einfachlitze; b) kunststoffummantelte Einfachlitze

Das Untersuchungsmodell der Parallelschlaglitze wurde hinsichtlich der späteren Verwendung einer Warrington-Seale-Außenlitze mit 26 Einzeldrähten im Gesamtmodell des 6x26WS Litzenseiles generiert. Als wichtigste Betrachtungszonen galten die Kontaktstellen der Außendrahtlage. Es wurden drei Bereiche näher untersucht:

- 3. Lage – 2. Lage dick (3L – 2L1),
- 3. Lage – 2. Lage dünn (3L – 2L2),
- 3. Lage – Scheibe/Kunststoff (LD – S/KS).

Tabelle 24 fasst die Auswertung des Untersuchungsmodells zusammen. Die deutlichste Reduzierung des Spannungsmaximums fand in der Kontaktzone zwischen Außendraht und der Seilscheibe bzw. der Kunststoffummantelung statt. Die Dimension der Minderung entsprach dem Ergebnis der Untersuchungen der Einfachlitze. Auch in den Berührungszonen des Außendrahtes zu der unterliegenden Drahtlage der Parallelschlaglitze erfolgte eine nahezu gleichmäßige Reduzierung der maximalen Beanspruchung.

Tabelle 24: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells Parallelschlaglitze

Modell	σ_3 in MPa			$\Delta\sigma_3$ in MPa		Reduktion in %		
	3L - 2L1	3L - 2L2	3L - S/KS	3L - 2L1	3L - 2L2	3L - 2L1	3L - 2L2	3L - S/KS
SD	629,8	1.217,2	-	-	-	-	-	-
SD_S	2.304,2	2.301,9	2.459,5	1.674,4	1.084,7	-	-	-
SD_KS	576,6	1.131,1	-	-	-	-	-	-
SD_S_KS	1.970,5	2.031,1	238,0	1.393,9	900,0	-16,8	-17,0	-90,3

Die Gegenüberstellung der Verteilung der Druckspannung in einer konventionellen Parallelschlaglitze der Machart Warrington-Seale mit der kunststoffummantelten Litze erfolgt in Abbildung 109. Durch die Kunststoffummantelung wurden die Spannungsspitzen in den untersuchten Kontaktbereichen deutlich verringert. Die Verteilung der Druckspannung erfolgte auf den Umfang des in Kontakt befindlichen Drahtes einer Litze ohne Kunststoffummantelung. Weiterhin wurden die Spannungen auch auf die benachbarten Außendrähte weitergegeben. Die Reduzierung des Maximalwertes hat eine positive Auswirkung auf die Beanspruchung der inneren Litzendrähte.

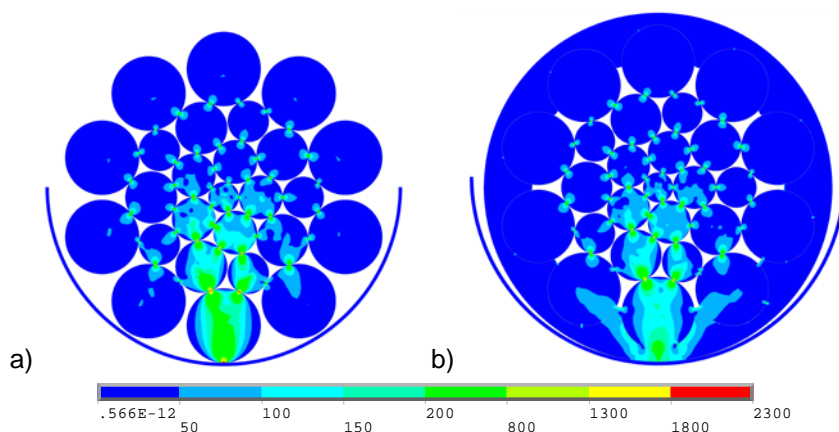


Abbildung 109: Druckspannungsvergleich Parallelschlaglitze 26WS; a) konventionelle Parallelschlaglitze; b) kunststoffummantelte Parallelschlaglitze

Das Untersuchungsmodell des 6x7-Litzenseiles bildet die Einlage des zu untersuchenden Gesamtmodells. Dabei wurden sechs Einfachlitzen um die Kerneinfachlitze geschlagen. In dieser Untersuchung wurden die Litzen bereits hinsichtlich ihrer Benennung im Gesamtmodell bezeichnet. In der Auswertung wurden die relevanten Schädigungszonen:

- Lagendraht Mittellage – Kerndraht Mittellage (LD – KD)
- Litze Mittellage – Litze Kernlage (ML – KL)
- Lagendraht Mittellage – Scheibe/Kunststoff (LD – S/KS)

betrachtet. Die Ergebnisse der Spannungsmaxima in den Betrachtungszonen aus Tabelle 25 wurden mit der üblichen feinen Vernetzung der Drähte sowie der Kunststoffummantelung ermittelt. Die Auswertung der Änderung der maximalen dritten Hauptspannung in den Kontaktbereichen erfolgte nach dem vorgestellten Prinzip. Die größte Reduzierung der Druckspannung trat erwartungsgemäß in der Kontaktzone des Drahtes mit der Scheibe/Kunststoffummantelung auf. Weiterhin ließen sich signifikante Minderungen in den weiteren Untersuchungszone feststellen. In diesem Untersuchungsmodell wurden erstmals beide Betrachtungszonen der Methode „Leipzig“ abgebildet. Die Reduzierung der Beanspruchungen lieferten erste Erkenntnisse über den positiven Einfluss der Kunststoffummantelung des Drahtseiles auf die zu erwartende Betriebs- und Lebensdauer.

Tabelle 25: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells 6x7-Litzenseiles

Modell	σ_3 in MPa			$\Delta\sigma_3$ in MPa		Reduktion in %		
	ML KD - LD	KL - ML	ML - S/KS	ML KD - LD	KL - ML	ML KD - LD	KL - ML	ML - S/KS
SD	1.677,3	1.199,7	-	-	-	-	-	-
SD_S	3.697,5	2.203,5	3.100,6	2.020,2	1.003,8	-	-	-
SD_KS	1.484,0	1.024,1	-	-	-	-	-	-
SD_S_KS	2.054,4	1.556,9	171,2	570,4	532,8	-71,8	-46,9	-94,5

Abbildung 110 visualisiert die Druckspannungsverteilung für die beiden Modellspezifikationen des 6x7 Litzenseiles. Es konnte eine deutliche Entlastung der in Kontakt zur Seilrille befindlichen Litze festgestellt werden. Weiterhin wurde die Spannung auf mehrere Außendrähte der Außenlitzennlage verteilt. Zusätzlich setzte sich die Minderung der Spannung im gesamten Seilquerschnitt fort.

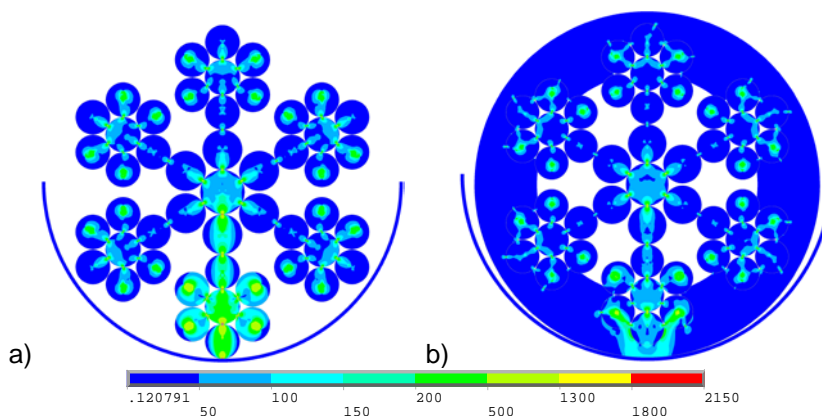


Abbildung 110: Druckspannungsvergleich 6x7-Litzenseil; a) konventionelles 6x7-Litzenseil; b) kunststoffummanteltes 6x7-Litzenseil

Abschließend wurde die Gesamtseilkonstruktion eines Litzenseiles mit sechs Außenlitzen in Warrington-Seale Machart sowie einer unabhängig verseilten Einlage aus sieben Einfachlitzen simuliert. Die betrachteten Schädigungszonen der Methode „Leipzig“ wurden dabei genauer untersucht. Insgesamt erfolgte die Betrachtung für die Bereiche:

- Litze Außenlage – Litze Mittellage (AL – ML),
- 3. Lage – 2. Lage dick (3L – 2L1),
- 3. Lage – 2. Lage dünn (3L – 2L2),
- 3. Lage – Scheibe/Kunststoff (LD – S/KS).

Damit wurden neben der inneren und äußeren Berührungszone nach Methode „Leipzig“ zusätzlich die Kontaktstellen der Außendrähte der Außenlitze zu der unterliegenden Litzenlage in der Parallelschlaglitze untersucht. Das Untersuchungsmodell des 6x26WS-Litzenseiles enthielt eine vielfache Drahtanzahl im Vergleich zu den bisherigen Simulationsmodellen. Der hohe Diskretisierungsgrad der Drahtquerschnitte sowie der Kunststoffabbildung konnte auf Grund der massiven Steigerung der Elementanzahl nicht genutzt werden. Die durchzuführenden Simulationen waren mit der zur Verfügung stehenden Rechentechnik nicht realisierbar. Die bekannten Modellspezifikationen wurden mit veränderten Netzparametern für den Drahtquerschnitt, die Seilscheibe und für die Kunststoffummantelung durchgeführt.

Tabelle 26: Auswertung der FE-Simulationen des Untersuchungsmodells 6x26WS-Litzenseiles

Modell	σ_3 in MPa			
	ML - AL	3L - 2L1	3L - 2L2	AL - S/KS
SD	112,5	1.071,3	1.156,3	-
SD_S	97,3	3.034,2	2.971,4	3.232,6
SD_KS	110,5	730,6	786,8	-
SD_S_KS	106,5	1.912,1	2.011,7	186,1

Modell	$\Delta\sigma_3$ in MPa		
	ML - AL	3L - 2L1	3L - 2L2
SD_S	15,2	1.962,9	1.815,1
SD_S_KS	4,0	1.181,5	1.224,9

Modell	Reduktion in %			
	ML - AL	3L - 2L1	3L - 2L2	AL - S/KS
SD_S_KS	-73,7	-39,8	-32,5	-94,2

Tabelle 26 liefert eine Übersicht der numerischen Lösungen für die Spannungen in den schadenrelevanten Betrachtungszonen. Es erfolgte die bekannte Auswertung der Spannungsänderung durch die Wirkung der Streckenlast sowie der prozentuale Vergleich. Die Reduktion der Spannung in der Kontaktstelle des Außendrahtes der Außenlitzen zur Seilscheibe bzw. zur Kunststoffummantelung entsprach dem Reduzierungsgrad an dieser Stelle in den bisherigen Untersuchungsmodellen. Damit lag die höchste Beanspruchung des Seilquerschnittes zwar weiterhin an den Außendrähten der Außenlitze, der Ort der Beanspruchung verschob sich jedoch von der Kontaktzone zur Seilscheibe in Richtung der unterliegenden Drahtlage der Parallelschlaglitze. Auch an diesen Betrachtungszonen ließ sich eine deutliche Reduzierung des Spannungsmaximums feststellen. Weiterhin ließ sich die Tendenz der Untersuchungsmodelle, wonach die Kunststoffummantelung bereits zur Reduzierung der Beanspruchung infolge der reinen Schnürdruckbelastung beiträgt, deutlich erkennen. Die numerisch ermittelten Werte für den Kontaktbereich der Außendrähte der Außenlitzen zu den Außendrähten der Seileinlage wurden durch die Nutzung der Kunststoffummantelung ebenfalls reduziert. Diese Werte erschienen jedoch sehr gering. In den Untersuchungen des Versuchsmodells des 6x7-Litzenseiles, mit höherem Diskretisierungsgrad, wurden deutlich größere Beträge ermittelt. Die auftretende Problematik ließ sich durch nähere Betrachtung der definierten Freiheitsgrade der Einzeldrähte der Parallelschlaglitze beurteilen (Abbildung 87). In jedem Draht der drei Drahtlagen der untersuchten Litzenstruktur wurde eine Loslagerung bezüglich des Litzenkerndrahtes definiert. Im Gesamtmodell lagen einzelne Drähte der Außenlitze so, dass ihre Loslagerung genau senkrecht zu der Loslagerung des Litzenkerndrahtes stand. Diese antagonistische Stellung verhinderte die Bewegung der Lagen drähte infolge der Belastung durch den Litzenschnürdruck. Auf Grund der Unterbindung der Bewegungsfreiheit der Parallelschlaglitze konnte die aus der FE-Simulation erhaltene Druckspannung zwischen der Außenlitzenlage und der Seileinlage nicht ausgewertet werden. Ein Erkenntnisgewinn für die Änderung der Druckbeanspruchung bei kunststoffummantelten Seilen gegenüber konventionellen Seilen für die innere Betrachtungszone der Methode „Leipzig“ war mit dem Gesamtmodell 6x26WS-Litzenseiles nicht zu erzielen.

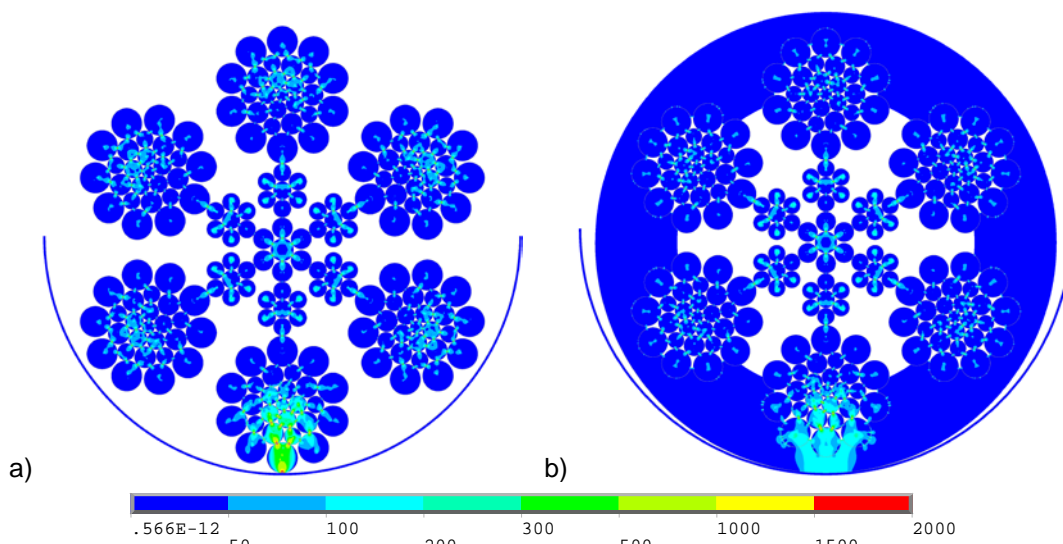


Abbildung 111: Druckspannungsvergleich 6x26WS-Litzenseil; a) konventionelles 6x26WS-Litzenseil; b) kunststoffummanteltes 6x26WS-Litzenseil

In Abbildung 111 wird die Verhinderung der Weiterleitung der Druckspannung ab dem Mittelpunkt der Parallelschlaglitze infolge der gegensätzlichen Loslagerdefinition deutlich. Die Änderungen

der Druckspannungsverteilung im äußeren Kontaktbereich zwischen Drahtseil und der Seilscheibenrille bzw. der Kunststoffummantelung konnten zur Auswertung nach Methode „Leipzig“ genutzt werden.

Im Folgenden wird die Auswertung der dreidimensionalen Simulationsmodelle beschrieben. Zur Minimierung der Einflüsse der Randbedingungen an den Seilenden erfolgte die Auswertung um die Modellmittelebene. Der Hauptschwerpunkt der Auswertung war die Spannungsverteilung bzw. die Spannungsmaxima in einem zug- und querbelasteten Litzenseil sowie die Auswirkung einer Kunststoffummantelung. Dazu wurden die numerischen Ergebnisse der Kriterien:

- axiale Beanspruchung (Drahtzugspannung σ_z),
- dritte Hauptspannung σ_3 (Auswertung für die Kontaktpressung),
- Vergleichsspannung σ_v (von-Mises-Spannung)

näher betrachtet. Die Auswertung erfolgte qualitativ und wurde mittels einer grafischem Darstellung ergänzt. Des Weiteren wurde in einem definierten Bereich der Spannungsverlauf entlang einer Pfadlinie implementiert, um exakte Spannungswerte zu erhalten und vergleichen zu können. Mit allen Untersuchungsmodellen wurden vier Simulationen durchgeführt:

- 1: konventionell, nur Zugbelastung,
- 2: konventionell, mit Zug- und Querbelastung,
- 3: kunststoffummantelt, nur Zugbelastung,
- 4: kunststoffummantelt, mit Zug- und Querbelastung.

Die Auswertung des dreidimensionalen Seilmodells erfolgte, wie schon bei der zweidimensionalen Betrachtung, durch strukturierten Aufbau der Seilkonstruktion. Im ersten Untersuchungsfall wurde die Einfachlitze (Kernlitze) simuliert. Abbildung 112 zeigt die Spannungsverteilung der dritten Hauptspannung infolge der Zugbelastung (ohne Querbelastung) des Seilmodells. Auf Grund der schraubenförmigen Verseilung der Lagendrähte drückten diese auf den Kerndraht. Das charakteristische Verhalten durch den Schnürdruck als längenbezogene Radialkraft wurde abgebildet.

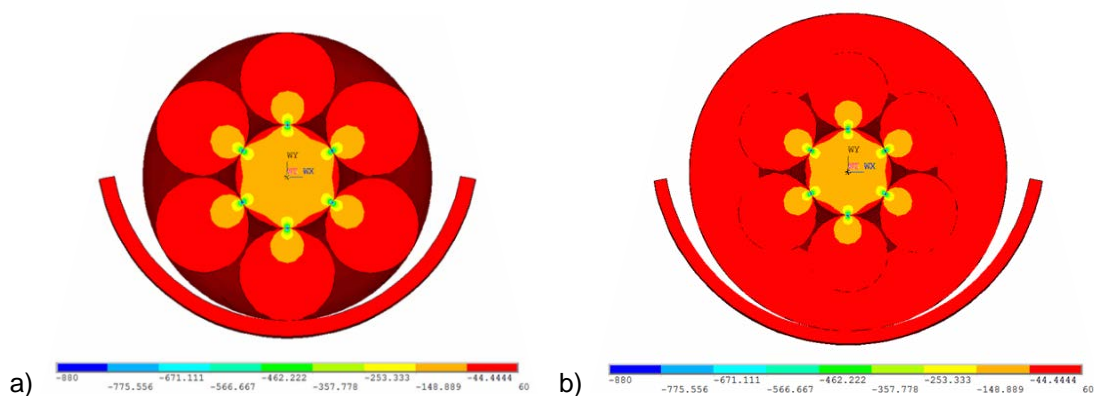


Abbildung 112: Spannungverteilung in der Einfachlitze infolge von Zugbelastung;
a) konventionelle Einfachlitze; b) kunststoffummantelte Einfachlitze

Abbildung 113 visualisiert den Spannungsverlauf entlang eines Pfades durch das Modell der Einfachlitze. Es wurde deutlich, dass die Wirkung der Kunststoffummantelung auf die Spannungsverteilung bei reiner Zugbelastung vernachlässigbar gering ist.

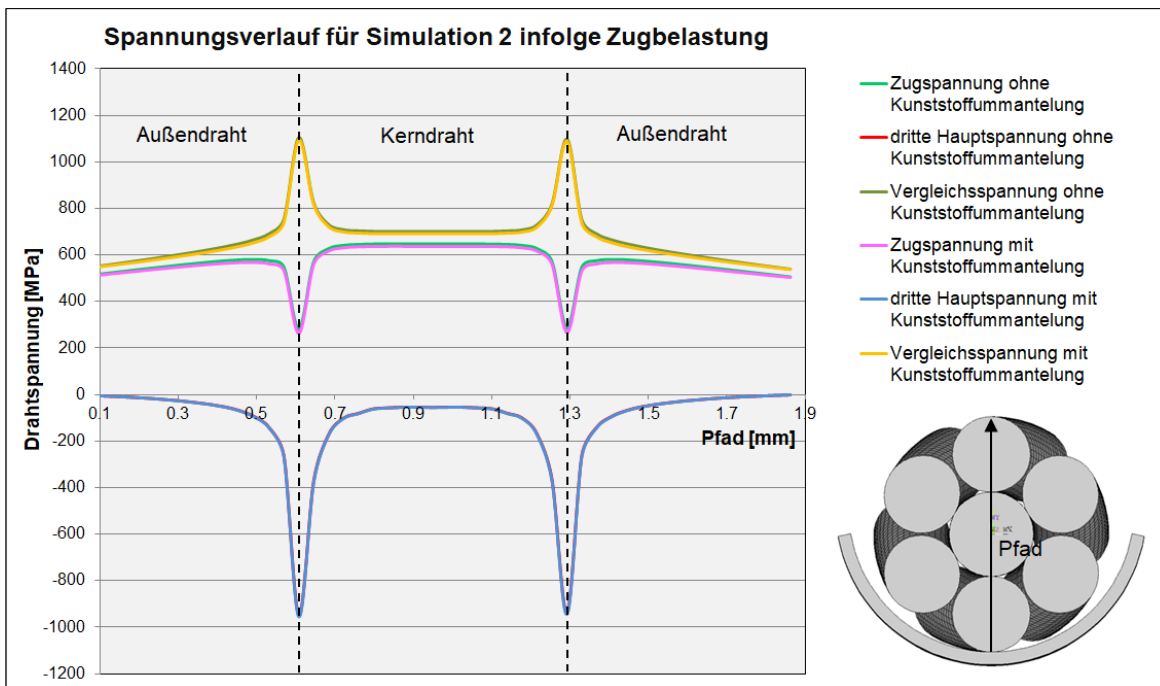


Abbildung 113: Spannungsverlauf durch das Modell der Einfachlitze bei Zugbelastung

Nachfolgend wurde dieses Modell durch eine zusätzliche Querbelastung ergänzt, welche mittels der modellierten Seilscheibe auf das Modell der Einfachlitze aufgebracht wurde. Abbildung 114 zeigt die Spannungsverteilung im Modell. Das Spannungsmaximum trat im konventionellen Modell, wie erwartet, im Kontaktbereich zwischen dem Außendraht und der Seilscheibe auf. Durch die Kunststoffummantelung wurde dieser Bereich deutlich weniger beansprucht. Es erfolgte eine breitere Verteilung der Beanspruchung auf den außenliegenden Bereich des Lagendrahtes. Das Maximum der Beanspruchung beim kunststoffummantelten Drahtseil verschob sich in den Kontaktbereich des Lagendrahtes mit dem Kerndraht. Die Größe der maximalen Beanspruchung wurde deutlich abgemindert.

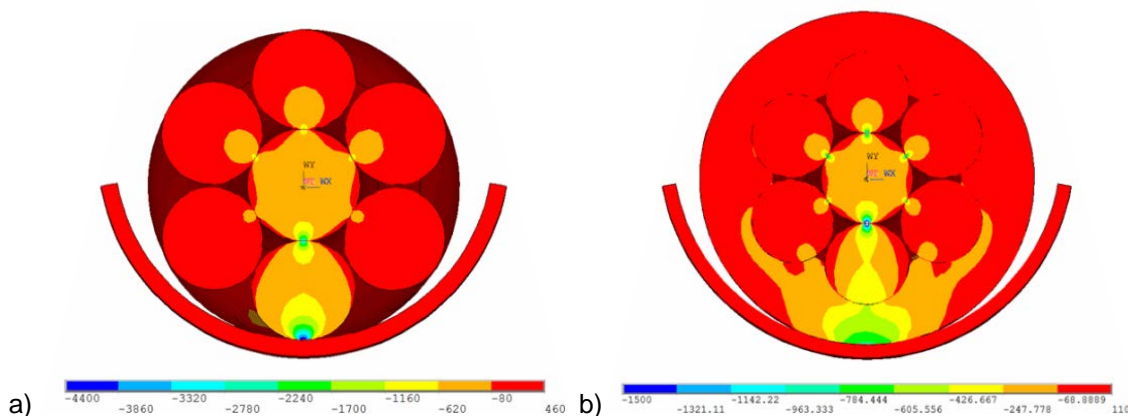


Abbildung 114: Spannungsverteilung in der Einfachlitze infolge von Zug- und Querbelastung; a) konventionelle Einfachlitze; b) kunststoffummantelte Einfachlitze

Abbildung 115 zeigt den Spannungsverlauf durch das Modell bei Zug- und Querbelastung. Die kunststoffummantelte Variante fiel durch die niedrigeren Spannungen über den gesamten Querschnitt des Seiles auf.

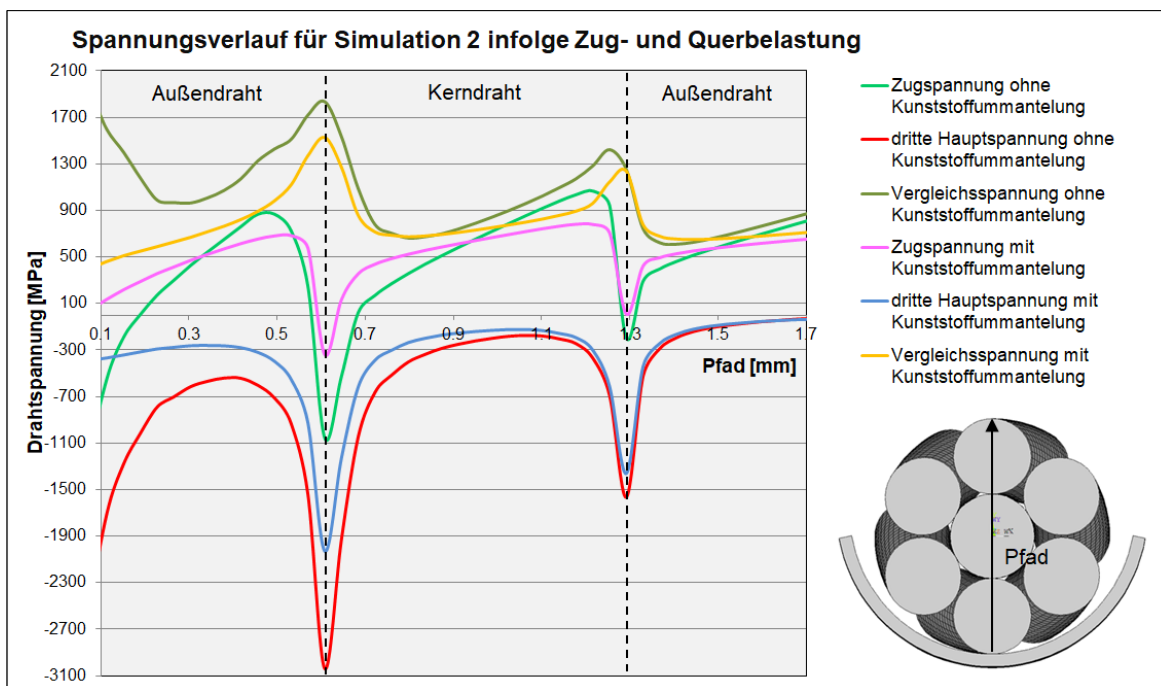


Abbildung 115: Spannungsverlauf durch das Modell der Einfachlitze bei Zug- und Querbelastung

Tabelle 27 fasst die Ergebnisse der FE-Simulation des dreidimensionalen Modells der Einfachlitze zusammen. Dabei wurden die Spannungen in den entsprechenden Kontaktbereichen miteinander verglichen und die prozentuale Reduzierung des maximalen Spannungswertes ermittelt.

Tabelle 27: Auswertung der FE-Simulationen der Einfachlitze

Modell	σ_3 in MPa		$\Delta\sigma_3$ in MPa	Reduktion in %	
	LD - KD	LD - S/K	LD - KD	LD - KD	LD - S/K
SD	947,2	-	-	-	-
SD_S	3.038,3	3.807,0	2.091,1	-	-
SD_KS	955,1	-	-	-	-
SD_S_KS	2.028,4	407,2	1.073,3	-48,7	-89,3

Nachfolgend werden die Ergebnisse der FE-Simulation eines 6x7-Litzenseiles vorgestellt. Die Untersuchungen waren ähnlich strukturiert wie in den vorherigen Betrachtungsfällen. Abbildung 116 zeigt die Verteilung der Spannung bei reiner Zugbelastung. Infolge des Schnürverhaltens zogen sich die Lagendrähte um den Kerndraht der jeweiligen Litzenlage. Weiterhin zog sich die äußere Litzenlage um die Kernlitze. Dieser Effekt wurde in der Darstellung nur bedingt abgebildet. Die definierten Randbedingungen zur Einspannung und Zugkraftaufbringung beeinflussten das Verhalten der Drähte. Das Seilmodell wurde nach den zur Verfügung stehenden Kapazitäten der Rechentechnik maximal lang gestaltet. Es scheint dennoch nicht ausreichend lang gewesen zu sein, um die Einflüsse vollständig zu eliminieren. Durch die spätere Aufbringung der Querkraft wurden diese Einflüsse reduziert.

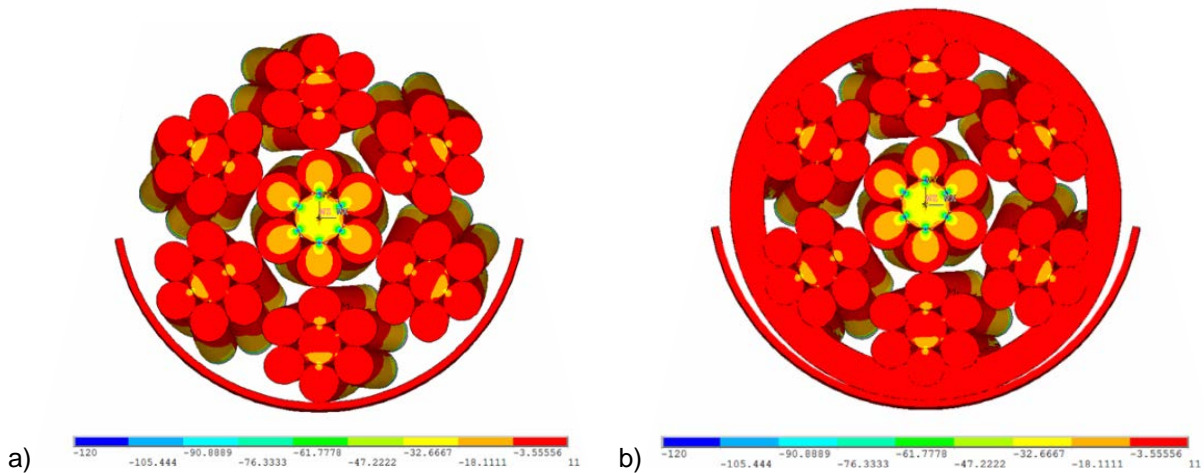


Abbildung 116: Spannungsverteilung im 6x7-Litzenseil infolge von Zugbelastung; a) konventionelle Einfachlitze; b) kunststoffummantelte Einfachlitze

Abbildung 117 zeigt den Verlauf der Spannung durch das Modell des 6x7-Litzenseiles mit und ohne Kunststoffummantelung. Wie bereits im Modell der Einfachlitze festgestellt wurde, hat die Kunststoffummantelung einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Spannungsverteilung.

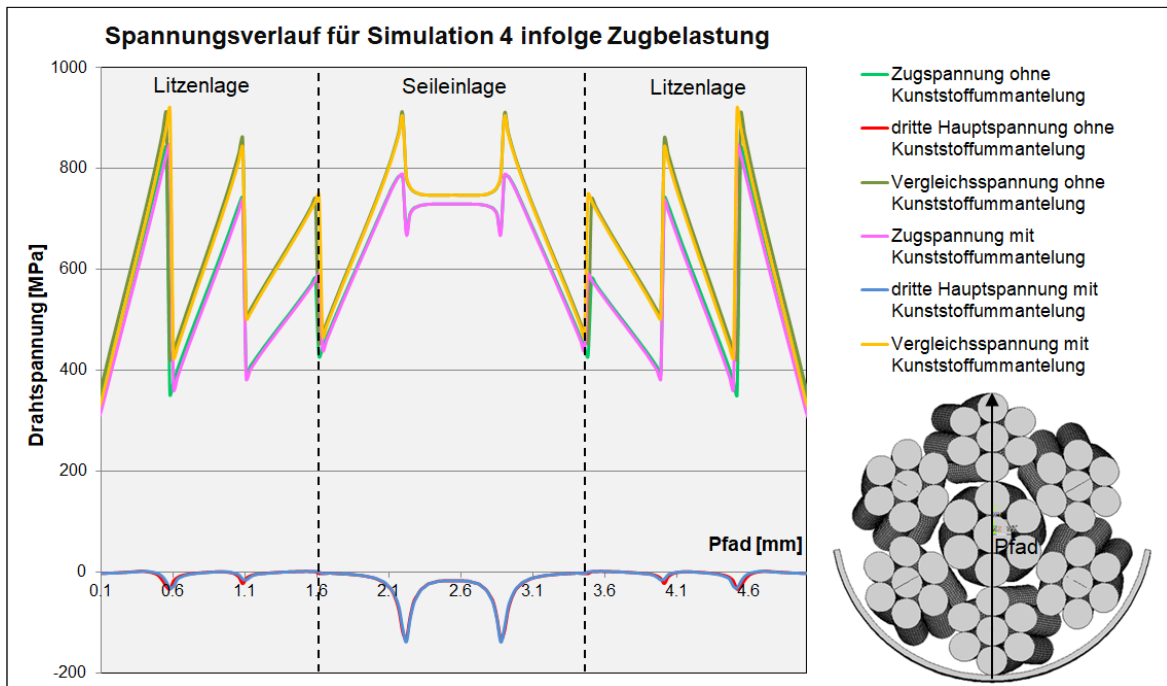


Abbildung 117: Spannungsverlauf durch das Modell des 6x7-Litzenseiles bei Zugbelastung

Nachfolgend wurde die FE-Simulation mit der Aufbringung einer Querkraft durch die Seilscheibe erweitert. Abbildung 118 zeigt die Spannungsverteilung im 6x7-Litzenseil mit und ohne Kunststoffummantelung. Das Maximum der Druckspannung des konventionellen Seilmodells lag im Kontaktbereich der Außendrähte der Außenlitze mit der Seilscheibe. Die Spannung verringerte sich in Richtung des Seilmittelpunktes. Durch die Kunststoffummantelung wurde die Spannung an der Außenseite des Außendrahtes der Außenlitze deutlich reduziert. Es erfolgte eine breitflächigere Verteilung der Belastung auf den Drahtumfang. Zusätzlich wurden auch die benachbarten Drähte geringfügig belastet. Das Maximum der Druckspannung verschob sich an dem Außendraht der Außenlitze in den Kontaktbereich mit dem Kerndraht der Litzenlage.

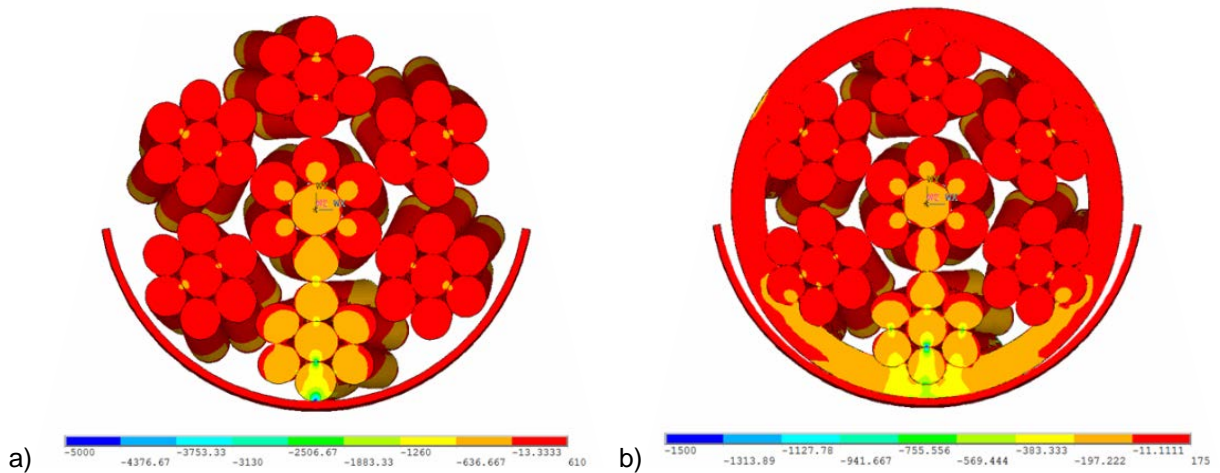


Abbildung 118: Spannungsverteilung im 6x7-Litzenseil infolge von Zug- und Querbelastung;
a) konventionelles 6x7-Litzenseil; b) kunststoffummantelte 6x7-Litzenseil

Abbildung 119 zeigt den Spannungsverlauf durch das Seilmodell mit und ohne Kunststoffummantelung entlang eines Pfades. Die Reduzierung der Spannung infolge der Kunststoffummantelung wurde in den schädigungsrelevanten Kontaktbereichen deutlich.

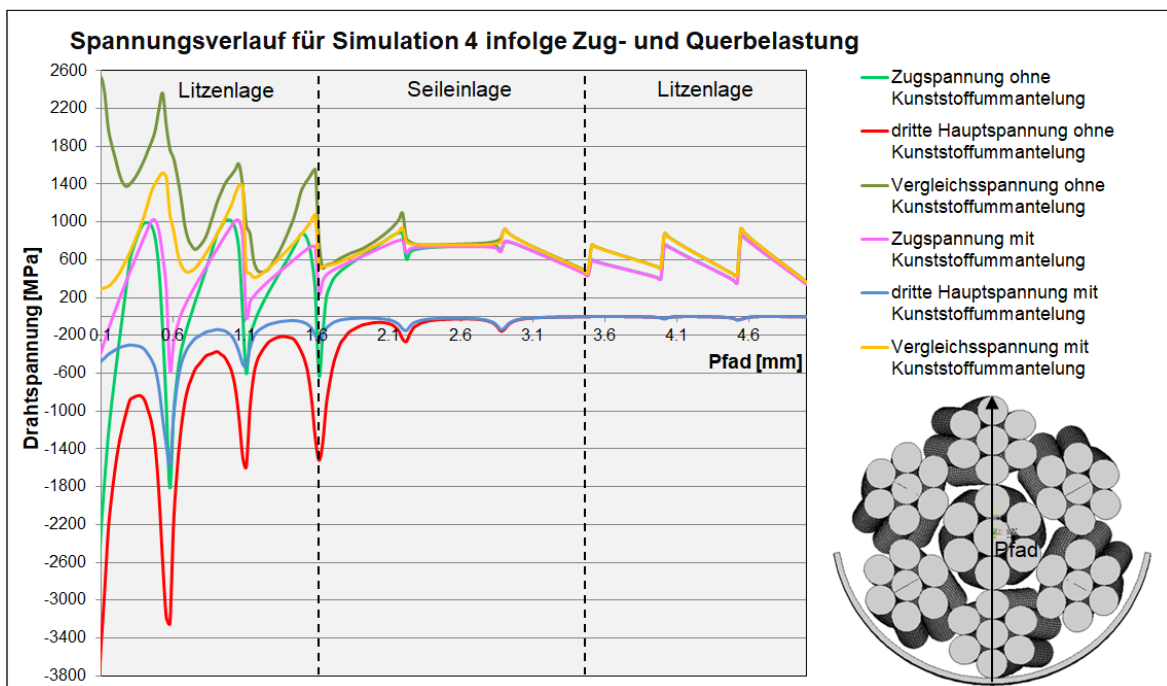


Abbildung 119: Spannungsverlauf durch das Modell des 6x7-Litzenseiles bei Zug- und Querbelastung

Tabelle 28: Auswertung der FE-Simulationen des 6x7-Litzenseiles

Modell	σ_3 in MPa			$\Delta\sigma_3$ in MPa		Reduktion in %		
	ML KD - LD	KL - ML	ML - S/KS	ML KD - LD	KL - ML	ML KD - LD	KL - ML	ML - S/KS
SD	33,8	3,3	-	-	-	-	-	-
SD_S	3.247,8	1.520,4	4.626,0	3.214,0	1.517,1	-	-	-
SD_KS	31,7	3,1	-	-	-	-	-	-
SD_S_KS	1.568,4	269,1	718,6	1.536,7	266,0	-52,2	-82,5	-84,5

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der FE-Simulation des dreidimensionalen Modells des 6x7-Litzenseiles ist in Tabelle 28 dargestellt. Dabei wurden die Spannungen in den entsprechenden Kontaktbereichen miteinander verglichen und die prozentuale Reduzierung des maximalen Spannungswertes ermittelt.

Ähnlich wie im dreidimensionalen Modell der Einfachlitze zeigte sich eine auffällige Reduktion Spannungsspitzen in allen relevanten Schädigungszonen infolge der Kunststoffummantelung.

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 5.1 mit dem Ziel

Im Rahmen des Arbeitspakets 5.1 konnten die erstellten zwei- und dreidimensionalen FE-Modelle mit und ohne Kunststoffummantelung simuliert werden. Durch die Belastung mittels Zug- und Querkraft konnte der Lauf des Seiles über eine Seilscheibe abgebildet werden. Auf Grund der enormen Anforderung an die Rechenleistung konnte das dreidimensionale Modell nur bis zum 6x7-Litzenseil untersucht werden. Die erreichten Ergebnisse wurden dennoch als positiv bewertet, da sie die theoretischen Annahmen validieren. Die Zielsetzung des Arbeitspaketes konnte erfüllt werden.

AP 5: FE-Simulation Forschungsstelle 2

In Arbeitspaket 5.2 wurden verschiedene Einflüsse einzelner Geometrie- und Werkstoffkennwerte der Ummantelung (z. B. Scherfestigkeit, Reibungskoeffizient, Elastizität, Shore-Härte, Steifigkeitsgradient, Beschichtungsdicke) durch systematische Variationsrechnung auf das Beanspruchungsszenario im Seil unter Längs- und Querlast untersucht. Es wurden diejenigen Parameterkombinationen bestimmt, die im Hinblick auf das in AP 2 und AP 3 klassifizierte Schädigungsverhalten und die für die Wickeleignung notwendige Quersteifigkeit vorteilhaft waren. Als Ergebnis liegt die werkstoffneutrale Eigenschaftsformulierung einer für die Mehrlagenwicklung optimierten Ummantelung vor.

AP 5.2 Parametervariation Seilummantelung

Da es in AP 4 nicht gelungen ist die Beanspruchung der Kunststoffummantelung realistisch nachzubilden, war eine entsprechende Parametervariation schwierig. Zusätzlich war es nicht möglich alle im Antrag genannten Eigenschaften umzusetzen. Die Shore-Härte und Scherfestigkeit wurden in keinem der verwendeten Materialgesetze berücksichtigt und eine Variation war somit nicht möglich.

Durchgeführte Arbeiten

Unter der Annahme, dass der Mantel nur im linearen Bereich belastet wurde, um ihn nicht dauerhaft zu schädigen und das Kriechen nicht unnötig stark zu beschleunigen, sind der Elastizitätsmodul des Kunststoffmantels und die Beschichtungsdicke variiert worden. So sollten erste Ansatzpunkte für eine Optimierung des Kunststoffmantels gefunden werden.

Erzielte Ergebnisse

Die beiden für die Ummantelung verwendeten Kunststoffe wiesen bereits unterschiedliche Elastizitätsmodule auf, zusätzlich wurde das ausgewählte thermoplastische Polyurethan verwendet. Obwohl die Simulation mit dem hyperelastischen Materialmodell durchgeführt wurde, befinden sich die Kunststoffe mit einer Last von 500 N im elastischen Belastungsbereich. Es wurden die

maximale Schubspannung, die höchste Dehnung und die maximalen Kontaktbreiten in Tabelle 29 zusammengefasst und in Abbildung 120 dargestellt.

Tabelle 29: Einfluss des E-Moduls auf die Beanspruchung [Neu 20]

	Kunststoff 1	TPU	Kunststoff 2
Elastizitätsmodul [MPa]	417	560	967
σ_{zul} [MPa]	13,7	43	25,3
Max. Schubspannung [MPa]	5,35	7,51	7,96
Max. Dehnung [%]	2,23	1,26	1,11
Max. Kontaktbreite [mm]	1,1	0,83	0,78
Auslastung [%]	78,1	34,93	62,92

Mit zunehmendem Elastizitätsmodul nahm die Dehnung des Kunststoffes ab. Dies äußerte sich ebenfalls in einem schmaleren Kontaktbereich. Da in allen drei Modellen die gleiche Querkraft verwendet wurde, ist die steigende Schubspannung nicht verwunderlich. Aus den Simulationen ließ sich deshalb ableiten, dass ein geringerer Elastizitätsmodul vorteilhaft ist, da die Kontaktfläche so größer und die resultierenden Spannungen kleiner wurden. Dabei war jedoch auch die Festigkeit des Kunststoffes zu berücksichtigen. Denn die von dem Kunststoff ertragbaren Spannungen mussten trotzdem möglichst hoch sein. Bei den drei in Tabelle 29 genannten Kunststoffen hat Kunststoff 1 den geringsten E-Modul, hielt aber auch am wenigsten aus. Wird die Auslastung berechnet, schneidet Kunststoff 1 somit am schlechtesten ab [Neu 20].

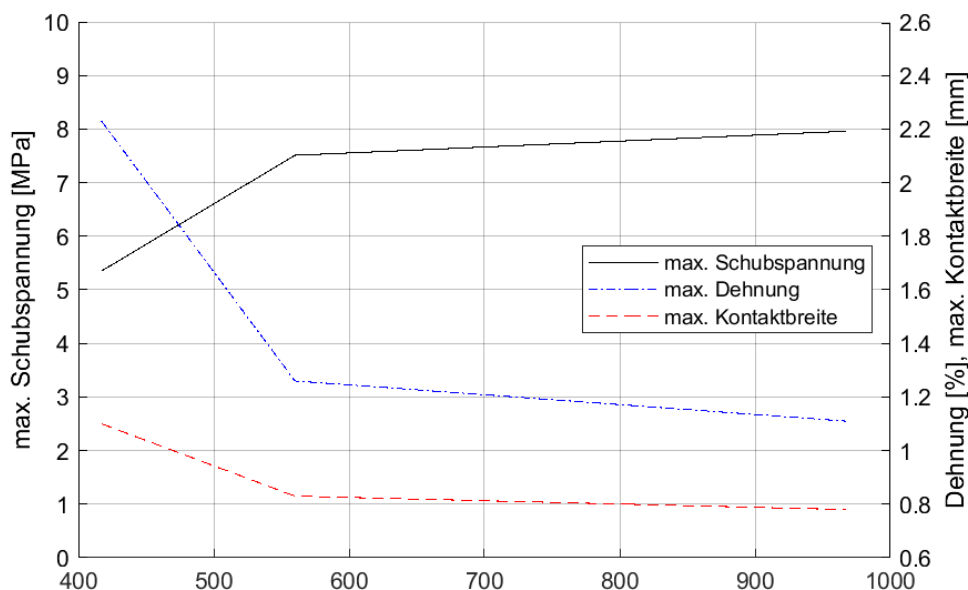


Abbildung 120: Maximale Schubspannungen, Dehnungen und Kontaktbreiten über den Elastizitätsmodul [Neu 20]

In [Neu 20] wurde der Einfluss der Manteldicke auf die Schubspannungsbeanspruchung des Mantels sowie die Dehnung des Mantels untersucht. Die numerischen Ergebnisse der Parameterstudie sind in Tabelle 30 zusammengefasst. Die Schubspannungen schwankten für eine Mantelstärke von $\pm 0,5$ mm um maximal 0,226 MPa oder 2,91 %. Diese Schwankungen waren so gering, dass sie auf die neue Vernetzung der Geometrie zurückgeführt werden konnten. Die Knoten des Netzes waren etwas anders verteilt und somit ergaben sich etwas andere Spannungen.

Tabelle 30: Variierte Manteldicke mit den resultierenden Spannungen und Dehnungen [Neu 20]

Manteldicke in mm	Schubspannung in MPa	Dehnung in %	Normierte Schubspannung in MPa / MPa	Normierte Dehnung in % / %
0,725	7,587	1,28	0,9779	0,9922
0,975	7,676	1,289	0,9894	0,9991
1,225	7,759	1,295	1	1
1,475	7,625	1,277	0,9828	0,9899
1,725	7,533	1,26	0,9709	0,9767
2,225	7,2	1,207	0,928	0,9357

Der Mantel hatte erst dann einen geringen Einfluss, wenn er sehr viel dicker wurde. Die Spannungsreduktion um ca. 7 % bedeutet jedoch einen um ca. 96 % höheren Kunststoffeinsatz.

Die letzte Parametervariation betraf den Seilquerschnitt. Vergleicht man die beiden für den Kunststoffmantel verwendeten Geometrien, konnte der Einfluss der Außenlitzenzahl auf die im Mantel auftretenden Spannungen beurteilt werden. Die beiden Geometriemodelle wurden mit derselben Kraft von 100 N belastet. Der runde Seilquerschnitt hatte den gleichmäßigeren Schubspannungsverlauf und mit 3,23 MPa ein erheblich geringeres Maximum als die 5,027 MPa bei der Seilgeometrie in der die sechs Litzen als Zylinder modelliert wurden. Die beiden Kontakte sind in Abbildung 121 dargestellt. Daraus konnte abgeleitet werden, dass je runder die Außenkontur des Seils ist, desto geringer ist die Spannung im Mantel.

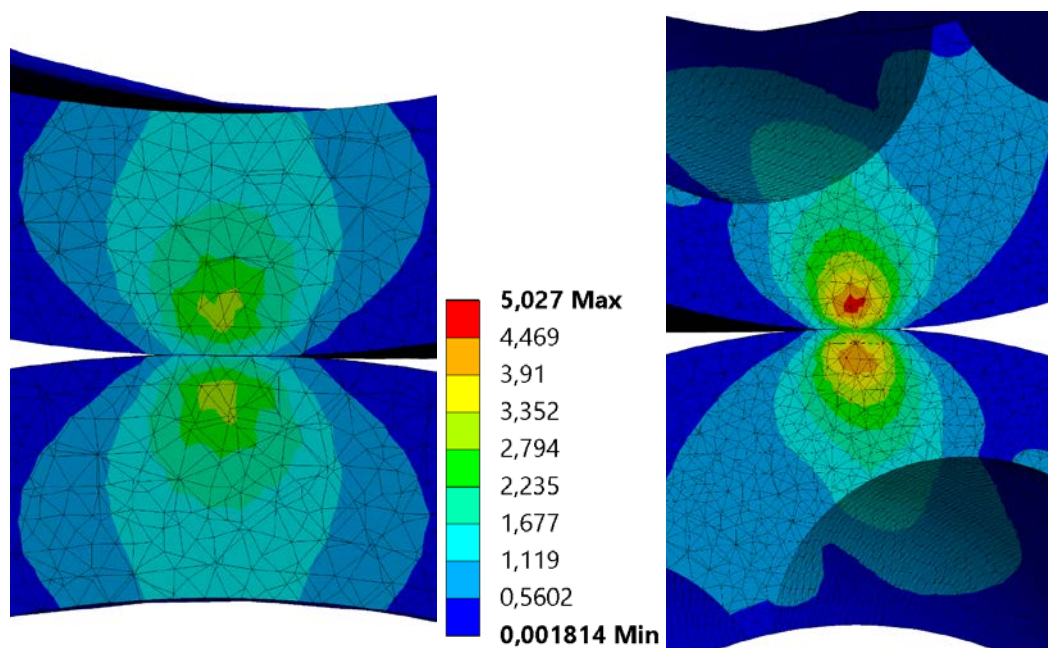


Abbildung 121: Vergleich zwischen der komplexen und der vereinfachten Seilgeometrie [Neu 20]

Übereinstimmung der Ergebnisse aus AP 5.2 mit dem Ziel

Für die Kunststoffmanteldicke, den Elastizitätsmodul und die Außenkontur des Seils wurden Variationsrechnungen durchgeführt, aus denen sich Erkenntnisse für die Optimierung des Kunststoffmantels ableiten lassen.

AP 6: Anwendungshinweise Forschungsstelle 1

Geltende Normen definieren spezifische Ablegekriterien für konventionelle Drahtseilkonstruktionen. Kunststoffummantelte Drahtseile finden in den aktuellen Regelwerken keine Berücksichtigung. Ziel des Forschungsprojektes war es, den Einfluss der Kunststoffummantelung auf die Lebensdauer des Gesamtseiles abzuschätzen.

AP 6.1 Lebensdauerabschätzung

Die Methode „Leipzig“ bietet die Möglichkeit, die zu erwartende Betriebs- bzw. Lebensdauer eines Drahtseiles abzuschätzen. Dabei wird die Betrachtung in der Ermittlung einer Biegewechselzahl für den inneren und äußeren Schädigungsbereich der Außendrähte einer Außenlitze unterteilt. Mittels der Erkenntnisse aus experimentellen und numerischen Untersuchungen sollte der Abschätzungsansatz der Methode „Leipzig“ um den Gegenstand der kunststoffummantelten Drahtseile erweitert werden. Drahtseile sind hinsichtlich ihrer Konstruktion außerordentlich vielfältig. Je nach Anwendungsfall werden Seilkonstruktionen eingesetzt, deren Eigenschaften den komplexen Anforderungen des jeweiligen Einsatzgebietes am besten entsprechen. Daher konnte der Abschätzungsansatz der Methode „Leipzig“ im Rahmen dieses Arbeitspaketes nur für die verwendete Konstruktionsform angepasst werden.

Durchgeführte Arbeiten

Die Lebensdauer der experimentell untersuchten Konstruktionsform wurde rechnerisch mittels der Methode „Leipzig“ abgeschätzt. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse der Beanspruchung der Einzeldrähte bei Zug- und Querbelastung in den numerischen Simulationen konnte die prozentuale Reduktion der Beanspruchung sowie die Verlagerung des Ortes der maximalen Spannungsinduzierung bestimmt werden. Mit diesen Ergebnissen konnte der Anteil der Druckspannung an der Schädigung des Drahtseiles während des Laufs über Seilscheiben im Berechnungsansatz angepasst werden.

Erzielte Ergebnisse

Im Arbeitspaket 5.1 wurde festgestellt, dass die Auswertung der Ergebnisse der zweidimensionalen FE-Simulation des 6x26WS-Litzenseiles für den äußeren Kontaktbereich der Außendrähte zu der Seilscheibe bzw. der Kunststoffummantelung zulässig ist. Daher wurde die innere Schädigungszone in der nachfolgenden Betrachtung nicht ausführlicher untersucht. Im FE-Modell des Gesamtseiles konnte eine sehr hohe Reduktion der Druckspannung an der Außenseite der Außendrähte der Parallelschlaglitztenlage festgestellt werden. Aufgrund der starken Minderung der maximalen Spannung in diesem Kontaktbereich verschob sich der Ort der maximalen Spannung bei Kunststoffummantelung von der in Kontakt zur Scheibe befindlichen Außenseite der Drähte in den Kontaktbereich des Außendrahtes zur unterliegenden Drahtlage der Parallelschlaglitze. Damit war die prozentuale Reduzierung der maximalen Beanspruchung des Außendrahtes der Außenlitzen nach Tabelle 31 bestimmbar.

Tabelle 31: Reduktion der maximalen Beanspruchung des Außendrahtes

Modell/Bedeutung	Größe	Wert	Ort der max. Spannung
SD_S	$\sigma_3 =$	3232,6 MPa	3L - S
SD_S_KS	$\sigma_3 =$	2011,7 MPa	3L - 2L2
Reduktion	$\Delta\sigma_3 =$	-37,8 %	

Auf Grund der kreisförmigen Abbildung der Drahtquerschnitte im FE-Modell sowie der Betrachtung des gesamten Drahtseilquerschnitts als Verbund paralleler Zylinder mit einer Einheitsdicke war die qualitative Änderung der Druckspannung durch die Ummantelung eines Drahtseiles mit einer Kunststoffhülle zulässig. Unter dieser Voraussetzung konnte die nach Methode „Leipzig“ ermittelte äußere Druckspannung des konventionellen Drahtseiles σ_{daK} um den prozentualen Anteil der Änderung der maximalen Spannung $\Delta\sigma_3$ gemindert werden. Somit war die Ermittlung der Druckspannung für den Außendraht eines kunststoffummantelten Drahtseiles σ_{daU} möglich. Mit diesem reduzierten Wert konnte die Abschätzung der ertragbaren Biegewechselzahl bis zum Erreichen der Ablegereife bzw. des Litzenbruchs nach Methode „Leipzig“ erfolgen.

Tabelle 32: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“

Bedeutung	Größe	S = 15,0 kN	S = 22,4 kN
Druckspannung (konventionell)	$\sigma_{daK} =$	176,3 MPa	215,5 MPa
Druckspannung (ummantelt)	$\sigma_{daU} =$	109,7 MPa	134,0 MPa
Ablegereife außen (konventionell)	$N_{aK}^{(Z) 10\%} =$	25.052	13.497
Ablegereife außen (ummantelt)	$N_{aU}^{(Z) 10\%} =$	34.377	18.814
Änderung Ablegereife außen	$\Delta N_a^{(Z) 10\%} =$	+37,2 %	+39,4 %
Litzenbruch außen (konventionell)	$N_{aK}^{3\%} =$	33.029	17.119
Litzenbruch außen (ummantelt)	$N_{aU}^{3\%} =$	46.228	24.365
Änderung Litzenbruch außen	$\Delta N_a^{3\%} =$	+40,0 %	+42,3 %

Tabelle 32 zeigt die geminderte Druckspannung der Außendrähte sowie die ermittelten Biegewechselzahlen für ein kunststoffummanteltes Drahtseil. Der Vergleich mit den Biegewechselzahlen eines konventionellen Seiles lieferte eine Erhöhung der Betriebs- bzw. Lebensdauer des Seiles infolge der Ummantelung um ca. 40%.

Im Rahmen der FE-Simulation des dreidimensionalen FE-Modells wurde die Seilkonstruktion bis zum 6x7-Litzenseil untersucht. Entsprechend dieser Konstruktion wurde nachfolgend der Einfluss der Kunststoffummantelung auf die Betriebs- und Lebensdauer nach dem Abschätzungsansatz der Methode „Leipzig“ betrachtet. Dabei wurde der Fokus auf die äußere Kontaktzone des Seiles mit der Seilscheibe sowie auf den inneren Kontaktbereich der Außenlitzenlage mit der Kernlitze gelegt.

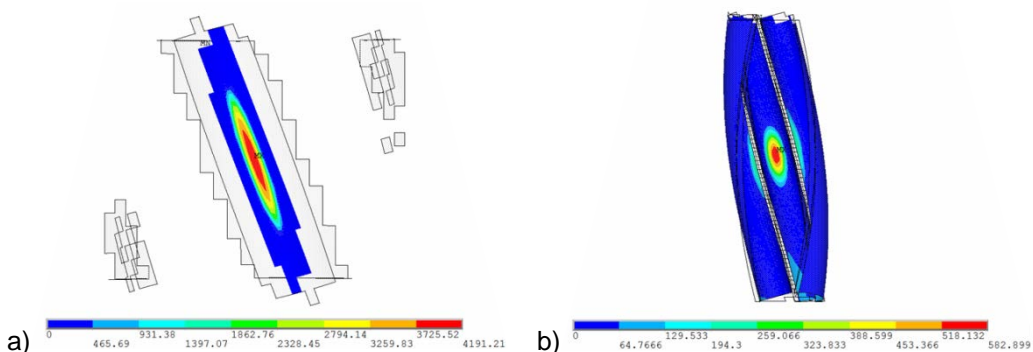


Abbildung 122: Kontaktellipse des Außendrahtes im Modell der Einfachlitze; a) konventionelles Modell; b) kunststoffummanteltes Modell

Abbildung 122 zeigt den äußeren Kontakt zwischen Lagendraht und Seilscheibe bzw. die Beanspruchung des Drahtes mit Kunststoffummantelung. Die starke Reduzierung der Druckspannung infolge der Ummantelung konnte deutlich festgestellt werden. Abbildung 123 zeigt den äußeren Kontaktbereich des 6x7-Litzenseiles. Auch in diesem Modell war die Reduzierung der Druckspannung deutlich erkennbar. Zusätzlich wurde die breite Verteilung der Belastung infolge der Kunststoffummantelung auf die nebenliegenden Lagendrähte visualisiert.

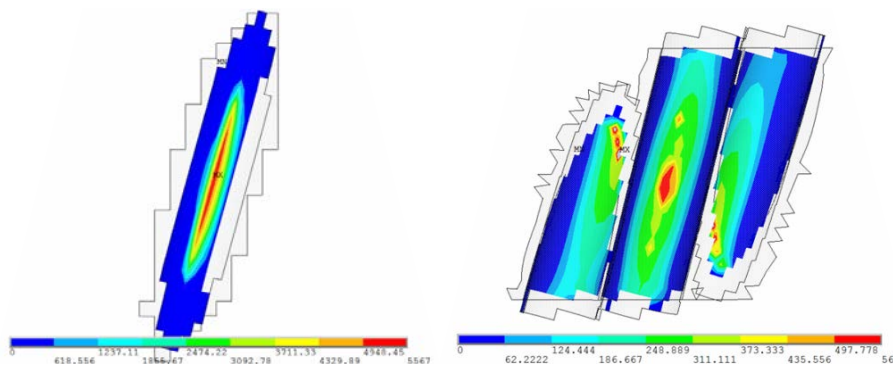


Abbildung 123: Äußerer Kontaktbereich im Modell des 6x7-Litzenseiles; a) konventionelles Modell; b) kunststoffummanteltes Modell

Die Druckspannungsreduzierung durch die Ummantelung des Drahtseiles im inneren Kontaktbereich zwischen den Litzenlagen wird in Abbildung 124 dargestellt.

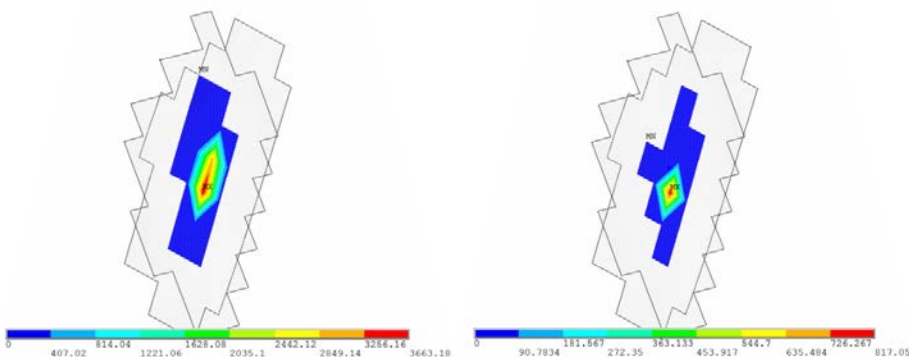


Abbildung 124: Innerer Kontaktbereich im Modell des 6x7-Litzenseiles; a) konventionelles Modell; b) kunststoffummanteltes Modell

Aufgrund der starken Minderung der maximalen Spannung im äußeren Kontaktbereich verschob sich der Ort der maximalen Spannung bei Kunststoffummantelung von der in Kontakt zur Scheibe befindlichen Außenseite des Außendrahtes (4626 MPa) in den Kontaktbereich des Außendrahtes zum unterliegenden Kerndraht (1568 MPa). Damit wurde die Reduzierung der maximalen Beanspruchung des Außendrahtes der Außenlitzen nach Tabelle 33 bestimmbar. Zusätzlich wurde auch die Reduzierung der maximalen Spannung im inneren Kontaktbereich zwischen den Litzenlagen dargestellt.

Tabelle 33: Reduktion der maximalen Spannung am Modell des 6x7-Litzenseiles

Modell/Bedeutung	Größe	Kontakt außen		Kontakt innen	
		Wert	Ort σ_{max}	Wert	Ort σ_{max}
konventionell	$\sigma_3 =$	4626,0 MPa	ML - S	1520,4 MPa	KL - ML
ummantelt	$\sigma_3 =$	1568,4 MPa	ML KD - LD	269,1 MPa	KL - ML
Reduktion	$\Delta\sigma_3 =$	-66,1 %		-82,3 %	

Mittels dieser Reduzierung konnte die nach Methode „Leipzig“ ermittelte äußere Druckspannung σ_{daK} sowie die innere Druckspannung σ_{diK} des konventionellen Drahtseiles um den prozentualen Anteil der Änderung der maximalen Spannung $\Delta\sigma_3$ gemindert werden. Somit wurde die Ermittlung der Druckspannung für den Außendraht σ_{daU} sowie die Druckspannung für den inneren Drahtkontakt σ_{diU} eines kunststoffummantelten Seiles möglich. Mit diesem reduzierten Wert konnte die Abschätzung der ertragbaren Biegewechselzahlen bis zum Erreichen der Ablegereife bzw. des Litzenbruchs nach Methode „Leipzig“ für beide Betrachtungszonen erfolgen. Die zur Abschätzung mit Methode „Leipzig“ notwendigen Parameter des 6x7-Litzenseiles wurden aus den Seildaten des 6x26WS-Litzenseile extrahiert und ggf. überschlagen. Zudem erfolgte die Anpassung der Seiltriebdetails auf die Parameter des 6x7-Litzenseiles.

Tabelle 34: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“ im äußeren Kontaktbereich

Bedeutung	Größe	Wert
Druckspannung außen (konventionell)	$\sigma_{daK} =$	140,2 MPa
Druckspannung außen (ummantelt)	$\sigma_{daU} =$	47,5 MPa
Ablegereife außen (konventionell)	$N_{aK}^{(Z) 10\%} =$	8.810
Ablegereife außen (ummantelt)	$N_{aU}^{(Z) 10\%} =$	12.378
Änderung Ablegereife außen	$\Delta N_a^{(Z) 10\%} =$	+40,5 %
Litzenbruch außen (konventionell)	$N_{aK}^{3\%} =$	10.881
Litzenbruch außen (ummantelt)	$N_{aU}^{3\%} =$	15.615
Änderung Litzenbruch außen	$\Delta N_a^{3\%} =$	+43,5 %

Tabelle 34 zeigt die geminderte Druckspannung des äußeren Kontaktbereichs sowie die abgeschätzten Biegewechselzahlen für ein kunststoffummanteltes 6x7-Litzenseil. Der Vergleich mit den Biegewechselzahlen eines konventionellen Seiles lieferte eine Erhöhung der Betriebsdauer um ca. 41 % sowie der Lebensdauer um ca. 44 % infolge der Ummantelung.

Tabelle 35: Auswirkung der Kunststoffummantelung auf die Abschätzung der Biegewechselzahl nach Methode „Leipzig“ im inneren Kontaktbereich

Bedeutung	Größe	Wert
Druckspannung innen (konventionell)	$\sigma_{diK} =$	233,7 MPa
Druckspannung innen (ummantelt)	$\sigma_{diU} =$	41,4 MPa
Ablegereife innen (konventionell)	$N_{iK}^{(Z) 10\%} =$	6.424
Ablegereife innen (ummantelt)	$N_{iU}^{(Z) 10\%} =$	12.671
Änderung Ablegereife innen	$\Delta N_i^{(Z) 10\%} =$	+97,2 %
Litzenbruch innen (konventionell)	$N_{iK}^{3\%} =$	7.779
Litzenbruch innen (ummantelt)	$N_{iU}^{3\%} =$	16.008
Änderung Litzenbruch innen	$\Delta N_i^{3\%} =$	+105,8 %

Tabelle 35 zeigt die geminderte Druckspannung und Biegewechselabschätzung des inneren Kontaktbereichs. Der Vergleich mit den Biegewechselzahlen eines konventionellen Seiles lieferte eine Erhöhung der Betriebsdauer um ca. 97 % sowie der Lebensdauer um ca. 105 % infolge der Ummantelung des Seiles mit einer Kunststoffschicht. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Biegewechselzahl der inneren Schädigungszone an die Abschätzung der äußeren Biegezone

angeglichen wurde. Die Methode „Leipzig“ stufte die innere Schädigung der vorliegenden Seilkonstruktion als dominierend ein. Die Ummantelung veränderte dieses spezifische Verhalten erheblich.

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 6.1 mit dem Ziel

Im Rahmen des Arbeitspakets 6.1 konnten die Auswertungen der FE-Simulationen in der Abschätzung der Betriebs- und Lebensdauer nach der Methode „Leipzig“ angewandt werden. Die prozentuale Reduzierung der maximalen Druckspannung aus den FE-Simulationen wurde in die Abschätzungsrechnung eingepflegt. Die Beanspruchung der Seildrähte infolge der Zug- und Biegebelastung des Seiles blieben auch bei kunststoffummantelten Drahtseilen auf dem Niveau des konventionellen Seiles. Die Erhöhung der Betriebs- und Lebensdauer für die untersuchten Seilkonstruktionen war mittels der Methode „Leipzig“ möglich. Der Vergleich zu den experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes war schwierig. Auf Grund der Kalibrierung der Seilkonstruktion wurden Eigenschaften des Prüfseiles verändert, welche mittels FEM nicht darstellbar waren. Die Tendenz und die Größenordnung des Einflusses der Kunststoffummantelung des Drahtseiles auf die Betriebs- und Lebensdauer konnte dennoch abgebildet werden. Die Ziele des Arbeitspaketes konnten erfüllt werden.

AP 6: Anwendungshinweise Forschungsstelle 2

In dem sechsten Arbeitspaket sollten aus den im Forschungsprojekt generierten Erkenntnissen konstruktive Hinweise für Seiltrommelkonstruktionen mit der Bewicklung eines kunststoffummantelten Stahlseils erarbeitet werden. In den Auslegungshinweisen sollten die Einflüsse der veränderten Reibungs- und Steifigkeitsverhältnisse auf die Belastung der Seiltrommel erläutert werden und so Schlussfolgerungen auf zusätzliche Führungselemente oder optimierte Rillungs- und Bordscheibengeometrien gezogen werden.

AP 6.2 Auslegung Seiltrieb

Durchgeführte Arbeiten

Die aus den in den Arbeitspaketen 2 und 3 bekannten Steifigkeitseigenschaften, Schäden und Schadensorte wurden analysiert, um ihren Einfluss auf die Seiltrommel und das kunststoffummantelte Drahtseil zu bestimmen. Insbesondere die Schäden wurden auf konstruktive Maßnahmen geprüft, mit denen die Schädigung verhindert oder zumindest gemindert werden kann.

Erzielte Ergebnisse

In der Schadensanalyse im Abschnitt AP 2.4 wurde bereits angemerkt, dass die Schäden in den Aufstiegsbereichen durch eine angepasste Bordscheibengeometrie abgemindert werden können. Dazu muss das Seil beim Aufstieg durch die Bordscheibe geführt werden, statt durch die vorherige Seilumschlingung. In dem Kreuzungsbereich, in dem das Seil von einer Lage in die nächst höhere Lage aufsteigt, ist eine Aufstiegshilfe vorzusehen. Das aufsteigende Seil wird nicht durch den sich verengenden Spalt zwischen der letzten vollen Seilumschlingung und der Bordscheibe in die höhere Lage gezwungen, sondern durch eine Aufstiegshilfe, die unter dem Seil verläuft, in die nächste Lage gehoben. Dazu bietet sich z. B. ein unter dem Seil verlaufender Auffüllkeil an, der dann in die nächste Seillage mit aufsteigt. In der neuen Lage ist das Seil ebenfalls eine halbe Rillenweite von der Bordscheibe entfernt, sodass weiterhin ein Auflaufkeil zur Abstützung notwendig ist.

In den Parallelbereichen, in denen das kunststoffummantelte Seil nicht an der Bordscheibe anliegt, ist die Bordscheibe so aufzufüllen, dass das Seil seitlich wieder gestützt wird. Für die darüber liegende Seillage ergäbe sich der Vorteil, dass die sich an der Bordscheibe abstützende Seilumschlingung sich nicht so sehr in den Spalt hereinziehen kann (Abbildung 125 links). Die in der Schadensanalyse thematisierte Scherbelastung des Kunststoffmantels wird dadurch geringer.

Diese Bordscheibenanpassungen sind bereits von Anwendungen für Faserseile bekannt (Abbildung 126) [Loh 15]. Vom Design besteht kein Unterschied zwischen den Auflaufkeilen für Faserseile und kunststoffummantelte Seile. Der Unterschied ist lediglich, dass die kunststoffummantelten Seile die seitliche Abstützung nicht benötigen, da sie aufgrund des Stahlseils formstabil genug sind.

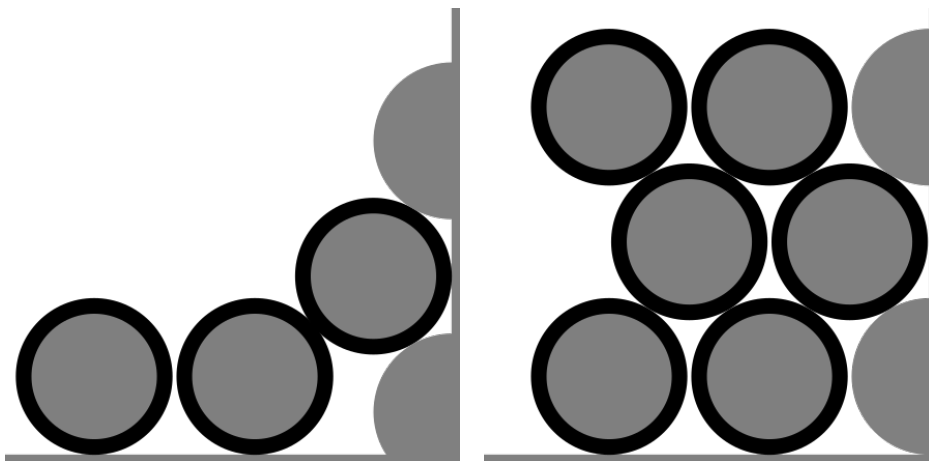


Abbildung 125: Kreuzungsbereich mit Auflaufkeil zur Unterstützung beim Aufsteigen (links) und Parallelbereich mit Auffüllkeilen zur Abstützung der oberen Lage (rechts)

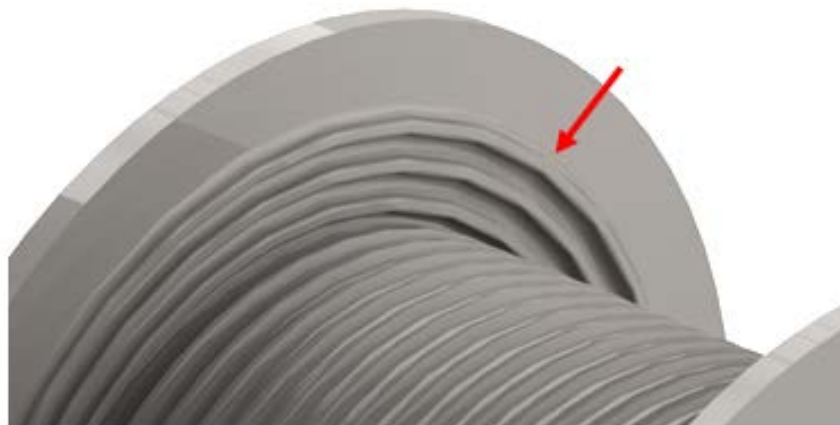


Abbildung 126: Auflaufkeile für die Unterstützung von Faserseilen [Loh 15]

Die tatsächliche Belastung der Seiltrommel und die daraus resultierende Beanspruchung durch kunststoffummantelte Drahtseile konnten im Rahmen des Vorhabens nicht ermittelt werden. Die im Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse lassen jedoch eine Abschätzung zu.

Die in AP 2 festgestellte geringe Querelastizität des kunststoffummantelten Seils von 32 % und 36 % gegenüber dem konventionellen Stahlseil hat einen Einfluss auf den Druck des Trommelmantels. Je weicher das Seil ist, desto größer sind die Entlastungseffekte bei der Bewicklung der

Seiltrommel. Durch den Druck der zusätzlichen Lagen steigt die Verformung der Seiltrommel sowie die Querdeformation der unteren Lagen. Die Zuglast, mit denen die unteren Seile aufgewickelt wurden, sinkt und der resultierende Druck auf die Seiltrommel nimmt im Vergleich mit einem Stahlseil weniger zu.

Die mehrlagige Untersuchung des Querelastizitätsmoduls lieferte überraschende Ergebnisse. Das Verhältnis der Quersteifigkeiten für die unterschiedlichen Seilanordnungen gibt [Ott 03] mit 70 % an. Bei den kunststoffummantelten Seilen ist dieser Wert für Kunststoff 1 etwas höher und für Kunststoff 2 etwa 1. Die nicht rotationssymmetrische Belastung der Seiltrommel, die in [Ott 03] beschrieben wird, ist auf die unterschiedlichen Wickelradien und die unterschiedlichen Quersteifigkeiten für die beiden Seilanordnungen zurückgeführt worden. Wenn die Steifigkeitsunterschiede geringer werden, bedeutet dies eine geringere Druckdifferenz für die beiden Rillungsbereiche der Seiltrommel. Insgesamt ist also von einem geringeren und gleichmäßigeren Trommelmanteldruck bei einem kunststoffummantelten Drahtseil auszugehen.

Die dreilagige Untersuchung der Quersteifigkeit konnte auf Grund einer instabilen Seilanordnung nicht untersucht werden. Dies deutet auf einen geringen Reibwert für den Seil/Seil-Kontakt innerhalb des Seilpaketes hin. Dies hätte den von Faserseilen bekannten Effekt der höheren Bordscheibenlasten zur Folge. Der Unterschied zwischen kunststoffummantelten Drahtseilen und Faserseilen ist jedoch, dass die Quersteifigkeit der kunststoffummantelten Seile relativ hoch ist und der positive Effekt der niedrigeren Kraftangriffspunkte an der Bordscheibe nicht eintritt.

Für die Seiltrommelbelastung werden also höhere Lasten für die Bordscheiben und eine niedrigere und gleichmäßigere Last für den Trommelmantel erwartet. Diese theoretisch hergeleitete Beanspruchung der Seiltrommel ist im Nachfolgevorhaben experimentell zu überprüfen und mit analytisch und numerisch bestimmten Beanspruchungen zu vergleichen.

In diesem Forschungsprojekt konnte gezeigt werden, dass kunststoffummantelte Seile unter bestimmten Bedingungen, zeitlich begrenzt in der Mehrlagenwicklung funktionieren. Das Spulverhalten der Seile ist mit intaktem Mantel sehr gut. Die Lasten sollten dabei jedoch recht niedrig sein, um den Kunststoffmantel möglichst wenig zu beschädigen. Nach [Erh 08] sollte die Ersatzdehngrenze von 0,5 % des Kunststoffes nicht überschritten werden. Aus den ersten Versuchen der Seiltrommel mit einem D/d-Verhältnis von 18 kann abgeleitet werden, dass die Lebensdauer des Kunststoffes mit steigendem D/d-Verhältnis besser wird.

Aus den Simulationen zur Optimierung des Kunststoffmantels ist zu sehen, dass ein möglichst runder Seilquerschnitt besser für die Lastverteilung ist, als ein Seil mit wenigen Außenlitzen. Um einen möglichst runden Seilquerschnitt zu erreichen wären viele dünne Außenlitzen nötig. Auch eine Verdichtung des Seils kann dazu beitragen, die Spannungsspitzen im Mantel zu minimieren.

Der für den Kunststoffmantel ausgewählte Kunststoff sollte nach der Literaturrecherche nicht aus einem Thermoplasten bestehen, da diese bereits bei Raumtemperatur fließen. Wenn die Kunststoffe belastet werden, beschleunigt sich der Fließvorgang sogar. Von einem Thermoplast ist also trotz der guten Verarbeitbarkeit abzusehen. Außerdem sollte sich der Kunststoff durch einen geringen Elastizitätsmodul und eine hohe Festigkeit auszeichnen.

Einschätzung der Ergebnisse aus AP 6.2 mit dem Ziel

Aus den experimentellen und numerischen Ergebnissen der vorherigen Arbeitspakete konnten Hinweise zu den Auswirkungen der Bewicklung einer Seiltrommel mit einem kunststoffummantelten Drahtseil abgeleitet werden. Eine Optimierung schein aus den Seilschäden nur für die Bordscheibe nötig. Die im Projektantrag formulierten Ziele sind damit erreicht.

AP 7: Abschlussbericht Forschungsstelle 1 & 2

Das Arbeitspaket 7 umfasste die gemeinsame Erarbeitung dieses Abschlussberichts. Das vorliegende Dokument fasst die durchgeführten Arbeiten und die erreichten Ziele zusammen.

Verwendung der Zuwendung

Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Arbeitspaket (AP)	Verwendung der Zuwendung	
	FST1: TUD	FST2: TUC
AP 1.1 Anforderungen an kunststoffummantelte Drahtseile	0,8 PM	0,8 PM
AP 1.2 Auswahl und Beschaffung	0,8 PM	0,8 PM
AP 2.1 Parameter Dauerbiegeversuche	1,4 PM	-
AP 2.2 Parameter Spulversuche Mehrlagenwicklung	-	0,95 PM
AP 2.3 Durchführung Dauerbiegeversuche	10,5 PM	-
AP 2.4 Durchführung Spulversuche bei Mehrlagenwicklung	-	5,55 PM
AP 3.1 Messung Dehnung, plastische Verformung	1,0 PM	-
AP 3.2 Messung Querelastizität, Schädigung Ummantelung	-	1,8 PM
AP 4.1 Ermittlung Werkstoffkennwerte Ummantelung	-	2,0 PM
AP 4.2 Ermittlung Werkstoffkennwerte Draht	1,0 PM	-
AP 4.3 Analyse der Seilkonstruktion und Geometriemodell	1,6 PM	1,2 PM
AP 4.4 FE-Modell Beanspruchung	4,0 PM	-
AP 4.5 FE-Modell Querelastizitätsbestimmung	-	3,0 PM
AP 5.1 Parametervariation Seilscheibe	3,7 PM	-
AP 5.2 Parametervariation Seil-Ummantelung	-	5,5 PM
AP 6.1 Lebensdauerabschätzung	2,2 PM	-
AP 6.2 Auslegung Seiltrieb	-	2,0 PM
AP 7 Abschlussbericht	1,8 PM	2,0 PM

Geräte

Die beantragte Zuwendung für die Beschaffung einer Workstation für FEM-Simulationen an der Forschungsstelle 1 wurde im Berichtszeitraum nicht abgerufen. Es erfolgte während der Projektlaufzeit eine Umwidmung der Mittel. Mittels der Zuwendung für die Gerätebeschaffung wurde die Beschaffung eines magnetinduktiven Prüfgerätes zur zerstörungsfreien Seilprüfung an der Forschungsstelle 1 realisiert.

Leistungen Dritter

Entfallen.

Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

FST 1: Professur für Technische Logistik der TUD

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die unterschiedlichen Versuche waren nicht nur in der Durchführung zeitaufwendig, sondern auch in der Vor- und Nachbereitung. Die Auswertungen von Detailuntersuchungen an Probestücken waren sehr zeitintensiv. Weiterhin wurden im Projektablauf mehrere FE-Modelle erstellt. Die zwei- und dreidimensionalen Abbildungen von Drahtseilen waren auf Grund der komplexen Seilgeometrie eine Herausforderung. Die Simulation der erstellten Modelle stellte auf Grund notwendiger Diskretisierungen sehr hohe Anforderungen an die Rechentechnik. Die Aufbringung von Randbedingungen zur Steuerung des charakteristischen Schnürverhaltens von Drahtseilen unter Zugbelastung war anspruchsvoll. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse und deren Genauigkeit erforderten zahlreiche Parameterstudien, um eine realistische Einschätzung abgeben zu können. Des Weiteren erfolgte die Verknüpfung von numerischen Simulationsergebnissen mit analytischen Berechnungsansätzen.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, um die Ziele der Arbeitspakete des Forschungsprojektes zu erreichen. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes entsprachen den Erwartungen des Projektantrags.

FST 2: Institut für Maschinenwesen der TUC

In dem Forschungsprojekt sind viele zeit- und arbeitsintensive Versuche und Simulationen erfolgreich durchgeführt worden. Größere Umbaumaßnahmen am Spulprüfstand aus eigenen Mitteln wurden notwendig, um die Prüfparameter mit kleineren Antrieben in den notwendigen Grenzen einhalten zu können. Dies brachte den Zeitplan durcheinander. Die Dokumentation mit Laserprofilscannern und Fotografien zur Beurteilung des Stapelverhaltens und der auftretenden Schäden war zeitaufwendig. Die Simulationen stellten auf Grund der Komplexität und Größe der Modelle eine Herausforderung dar. Auf Grund der hohen notwendigen Knotenanzahlen und nichtlinearen Materialgesetzen ist der Arbeitsspeicher an seine Leistungsgrenze gestoßen. Die Auslagerungsdateien führten zu langen Berechnungsdauern. Es sind insgesamt viele Erkenntnisse für die Verwendung kunststoffummantelter Drahtseile in der Mehrlagenwicklung gewonnen worden.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten entsprachen den im Arbeitsplan des Projektantrages genannten Punkten und waren damit notwendig und angemessen zur Projektbearbeitung.

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Laufende Drahtseile unterliegen auf Grund der Beanspruchung ihrer Drähte durch Zug-, Druck- und Biegebelastung der Ermüdung. Im Zusammenspiel mit Reibverschleiß und weiteren äußeren Einflüssen weisen sie eine begrenzte Lebensdauer auf und sind nicht als dauerhaft zu betrachten. In praktischen Anwendungen werden kunststoffummantelte Drahtseile bereits eingesetzt. Dabei zeichnen sie sich durch eine längere Lebensdauer als konventionelle Drahtseile aus. Diese haben, in Normen festgesetzte, Ablegekriterien gemäß ihres Schädigungsgrades bei denen das Seil in der Anwendung getauscht werden muss. Aktuelle Normen geben keine Anwendungs- und Handhabungshinweise für kunststoffummantelte Drahtseile. Die Definition von Ablegekriterien übernimmt aktuell der Seilhersteller. Auf Grund erfahrungsbasierter Kenntnisse über das Schädigungsverhalten des Seiles werden Wechselbedingungen bestimmt. Dabei werden eher konservative Ansätze zur Bewertung des Schädigungsgrades genutzt, um die Gefahr für Mensch und Maschine beim Seilversagen auszuschließen. Dennoch wird sicherlich auch Einsatzzeit eines funktionierenden und intakten Drahtseiles nicht ausgeschöpft.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten durch experimentelle Untersuchungen weitere Erfahrungswerte generiert werden. Zusätzlich wurden Erkenntnisse über die Verteilung der Seilschädigung im äußeren und inneren Bereich erarbeitet. Durch die Testung mehrerer D/d-Verhältnisse und Laststufen konnte das Verhalten des Drahtseiles sowie der Kunststoffummantelung unter variablen Parametern begutachtet werden. Mit Hilfe der FE-Simulationen von zwei- und dreidimensionalen FE-Modellen der Seilgeometrie konnte die Beanspruchung der Seildrähte infolge des Laufes über Seilscheiben dargestellt werden. Insbesondere die Begutachtung der Beanspruchung im Inneren des Seiles stellte einen wichtigen Erkenntnisgewinn zur Einschätzung des Schädigungsverhaltens kunststoffummantelter Drahtseile dar. Der innenliegende Zustand der Einzeldrähte oder der Litzen in Richtung Seilmittelpunkt kann optisch nicht überprüft werden. Messtechnische Untersuchungen mittels magnetinduktiver Prüfung geben keinen Aufschluss über den genauen Ort und die Größe der Drahtbeanspruchung. Die Ergebnisse der Simulationen bieten einen Ansatzpunkt zur Gestaltung der Bewertung der Seilschädigung kunststoffummantelter Drahtseile. Weiterhin können diese Ergebnisse von Seilherstellern genutzt werden, um die eigenen Ablegekriterien zu prüfen. Darüber hinaus können sie als Startpunkt für allgemeingültige Grenzzustände zum Erreichen der Ablegereife in der Normung genutzt werden. Rechnerische Methoden zur Abschätzung von Betriebs- und Lebensdauer laufender Drahtseile ließen eine sinnvolle Betrachtung kunststoffummantelter Drahtseile bisher nicht zu. Der Abschätzungsansatz der Methode „Leipzig“ basiert auf den einzelnen Zug-, Druck- und Biegespannungen der Seildrähte. Infolge der Kunststoffummantelung des Seiles verschob sich der Ort und die Größe der maximalen Druckspannungsbeanspruchung im Seilverbund. Durch die Erkenntnisse zur Druckspannungsverteilung in ummantelten Seilen aus den FE-Simulationen konnte die Reduzierung der Druckspannung rechnerisch in die Methode „Leipzig“ eingepflegt werden. Den Seilherstellern steht damit ein Werkzeug zur Verfügung, die zu erwartende Lebensdauer des ummantelten Seiles im Vergleich zur konventionellen Basis zu betrachten. Damit können eigene Erfahrungen der Seilhersteller zusätzlich geprüft und ggf. validiert werden. Dies erhöht die Sicherheit des Einsatzes kunststoffummantelter Drahtseile in der Praxis. Die experimentellen Untersuchungen im Forschungsvorhaben und deren theoretische Auswertung sind die Basis für standardisierte Ablegekriterien, welche die Einflüsse der Kunststoffummantelung auf die Seillebensdauer sowie Verschleißmechanismen berücksichtigen, um den Einsatz dieser Seile in Hebezeug- und Krananwendungen sicherer und wirtschaftlicher zu gestalten.

Zur Bestimmung der Last auf den Trommelmantel und die Bordscheiben einer Seiltrommel existieren für Faser- und Stahlseil unterschiedliche Konzepte. Die Seileigenschaften, die einen Einfluss auf die Belastung der Seiltrommel haben sind insbesondere die Quersteifigkeit und die Reibwerte in den Kontakten zwischen den Seilen im Seilpaket und zwischen dem Seil und der Bordscheibe. Mit dem Erkenntnisgewinn aus diesem Forschungsprojekt ist es nun möglich die Beanspruchung aus der Mehrlagenwicklung kunststoffummantelter Drahtseile zumindest konservativ abzuschätzen. Dem Konstrukteur eines Seiltriebes werden wichtige Hinweise an die Hand gegeben um einen Seiltrieb berechnen und Auslegen zu können. Darüber hinaus helfen die erarbeiteten Gestaltungshinweise für die Bordscheiben, die Schäden am Seil durch den Aufstieg aus einer Seillage in die nächst höhere Lage zu mindern. Für den Mantel sind erste Empfehlungen über den Kunststofftyp und die zu wählenden Materialeigenschaften des Kunststoffes für eine möglichst lange Betriebsdauer erarbeitet worden.

Aus wissenschaftlich-technischer Sicht sind die Ergebnisse interessant, da sie neue Forschungsfragen aufwerfen. Vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung ist ein Leichtbau der Seiltrommel anzustreben. Dazu ist eine exakte Auslegung der Seiltrommel nötig, die derzeit nur konservativ berechnet werden kann. Eine Ermittlung der genauen Lasten ist deshalb nötig. Ein wichtiger Erkenntnisgewinn liegt darin, dass die Schädigungsmechanismen und Schädigungsorte klar herausgearbeitet werden konnten. Es sind jedoch noch nicht für alle Schäden eine Lösung gefunden. Der hohe Druck in den Kreuzungsbereichen kann bis jetzt nicht abgemindert werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf ob durch neue Wickelsysteme oder eine Optimierung des Kunststoffmantels die Belastungen ertragbar wird.

Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde der intensive Kontakt mit Partnern des Projektbegleitenden Ausschusses gepflegt. In den Projektsitzungen wurde der Bearbeitungsstand präsentiert und künftige Schritte abgestimmt. Erste Ergebnisse wurden bereits auf Tagungen und in Veröffentlichungen vorgestellt. Die Gesamtheit der Ergebnisse wird zukünftig im Rahmen von Tagungen und wissenschaftlichen Publikationen der Fachöffentlichkeit präsentiert. Detaillierte Angaben zum durchgeführten und geplanten Ergebnistransfer sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

▪ Durchgeführte Transfermaßnahmen /Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Information der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	<ul style="list-style-type: none"> - Abstimmung Arbeitsstand + Vorgehensweise - regelmäßiger, ausführlicher Ergebnistransfer 	Sitzungen des PA	<p><u>Durchgeführt:</u> PA Sitzung am 07.11.2017 30.01.2018 26.06.2018 06.11.2018 07.05.2019 25.11.2019</p> <p><u>Geplant:</u> Abschlussstreffen (Auf Grund der Corona-Pandemie vertagt.)</p>
Gezielte Ansprache potentiell interessierter Unternehmen außerhalb des PA	<ul style="list-style-type: none"> - weitere Verbreitung der Technologie in der Wirtschaft, besonders der Intralogistik - Einbindung interessierter Unternehmen, FV und Verbände (VDI, DSV) - direkter Transfer in die Industrie 	<ul style="list-style-type: none"> a) Präsentation der Ergebnisse auf öffentlichen Tagungen: Internationale Kranfachtagung, Fachtagungen des VDI b) individuelle Ansprache 	<p><u>Durchgeführt:</u> 26. Kranfachtagung am 08.03.2018 14. Fachkolloquium der WGTL am 27.09.2018 2019 OIPEEC Conference am 14.04.2019</p> <p><u>Geplant:</u> a) 29. Kranfachtagung 2021 2021 OIPEEC Conference / 7th International Ropedays (beide Tagungen aktuell ausgesetzt auf Grund der Corona-Pandemie) b) nach Bedarf im gesamten Zeitraum</p>

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
<p>wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften / Dissertationen</p>	<p>a) Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Fachleute bzw. Unternehmen</p> <p>b) Vermitteln von Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wissenschaftliches Arbeiten</p>	<p>a) Veröffentlichungen in Fachzeitschriften</p> <p>b) Studien-, Diplomarbeiten und ggf. eine Dissertation</p>	<p><u>Durchgeführt:</u></p> <p>a) 26. Kranfachtagung (08.03.2018)</p> <p>14. Fachkolloquium der WGTL (27.09.2018)</p> <p>2019 OIPEEC Conference (14.04.2019)</p> <p>b) Diplomarbeit: „Analyse der Spannungsverteilung in einem kunststoffummantelten laufenden Litzenseil mittels FEM“</p> <p>Diplomarbeit: „Analyse der Randbedingungen zur Ermittlung der Druckspannungsverteilung in einem kunststoffummantelten laufenden Litzenseil mittels FEM“</p> <p>Projektarbeit: „Zuarbeit zur Entwicklung eines numerischen Simulationsmodells von Litzendrahtseilen unter Zugbelastung“</p> <p>Projektarbeit: „Untersuchung der Auswirkung von Kunststoffummantelungen auf die Querelastizität von Drahtseilen“</p> <p>Bachelorarbeit: „Aufbau und Validierung eines Rechenmodells für FE-Untersuchungen an kunststoffummantelten Seilen“</p> <p>Bachelorarbeit: „Analytische Bestimmung der Quersteifigkeit von kunststoffummantelten Seilen“</p> <p><u>Geplant:</u></p> <p>a) 2021 OIPEEC Conference / 7th International Ropedays</p>

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Einbeziehung von Multiplikatoren	Zusammenarbeit in der Forschungslandschaft, Know-how-Transfer, Stärkung des Forschungsstandortes Deutschland, speziell Sachsen	Forschungsprogramme - „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) - Verbundprojektförderung auf dem Gebiet der Zukunftstechnologien im Freistaat Sachsen	<u>Geplant:</u> - fortlaufende Information der TK innerhalb der DSV
Vorstellung der Ergebnisse / Vorträge und Präsentationen	- nationaler und internationaler Ergebnistransfer - Information der Mitglieder der FV sowie interessierter Fachleute	Vorträge im Rahmen - des Fachkolloquiums der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) inklusive eines Artikels im Tagungsband - der Internationalen Kranfachtagung inklusive eines Artikels im Tagungsband - Tagungen/Versammlungen der FV und Fstn	<u>Geplant:</u> 29. Kranfachtagung 2021 2021 OIPEEC Conference / 7th International Ropedays (beide Tagungen aktuell ausgesetzt auf Grund der Coronapandemie)
Vorstellung in anderen Fach- und Branchenverbänden	nationaler Ergebnistransfer	- Fachausschüsse des VDI im Fachbereich Produktion und Logistik	<u>Geplant:</u> eine Veranstaltung im 1. Halbjahr nach Abschluss (beide Tagungen aktuell ausgesetzt auf Grund der Coronapandemie)

Literaturverzeichnis

- [Bau 20] Bau-Überwachungsverein (BÜV e.V.): Tragende Kunststoffbauteile: Entwurf – Bemessung – Konstruktion. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2020.
- [Cam 19] <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Elastollan%C2%AE+1174+D/BASF+PU/59/ba84258f/SI?pos=6>
abgerufen am 02.05.2019 um 10:02 Uhr
- [Die 71] Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1971.
- [DIN 527-1] DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2019
- [DIN 4309] DIN ISO 4309:2013-06; Krane – Drahtseile – Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage; Berlin: Beuth Verlag; 2013
- [DIN 15061] DIN 15061-1: Deutsche Norm – Hebezeuge – Rillenprofile für Seilrollen; Beuth Verlag; Berlin; 1977
- [Dom 05] Dominghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2005.
- [Ehr 02] Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen Konstruieren, 2. Auflage, Hanser Verlag, München Wien, 2002.
- [Erh 08] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. München: Hanser, 2008.
- [Ern 18] ERNST, B.; MUPENDE, Y.: Hochfestes Faserseil als Hubseil in Kranen mit Mehrlagenwicklung. In: WEHKING, Karl-Heinz (Hrsg.): 6. Stuttgarter Seiltrage: Material, Anwendung & Prüfung, 2018. – ISBN 978-3-00-059115-0, S. 1–12
- [Fey 00] Feyrer, K.: *Drahtseile - Bemessung, Betrieb, Sicherheit*, Springer-Verlag; Berlin; 2. Auflage; 2000
- [Geb 11] Dipl.-Ing. Gebhardt C.: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench, Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [Gro 11] Gross, D.; Hauger, W.; Wriggers, P.: Technische Mechanik 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2011.
- [ISO 4309] DIN ISO 4309:2013-06; Krane – Drahtseile – Wartung und Instandhaltung, Inspektion und Ablage; Berlin: Beuth Verlag; 2013
- [ISO 12076] ISO 12076: Steel wire ropes — Determination of the actual modulus of elasticity; 15.08.2002.
- [Jeh 85] Jehmlich, G.: Anwendung und Überwachung von Drahtseilen; VEB Verlag Technik Berlin; Berlin; 1. Auflage; 1985
- [Jen 92] Jenner, T.: Geometrie von Drahtseilen; Dissertation; Universität Stuttgart; 1992

- [Loh 15] Lohrengel, A.; Stahr, K.; Schulze, M.; Wächter, M.: Innovative drum construction for multilayer winding with fibre ropes; Proceedings of the OIPEEC Conference 2015, Dr. I.M.L. Ridge, Stuttgart, ISBN: 978-0-9552500-5-7.
- [Loh 19] Lohrengel, A.; Schulze, M.; Wächter, M. (2019): Finite element analysis of wire rope stiffness. In: M.A.R. Dohm (Hg.): Exploring Opportunities - Synthetic/Steel. Proceedings of the OIPEEC Conference 2019. Conference 2019. Den Haag, 12. 15. März. OIPEEC, S. 207–220.
- [Man 18] Mann, L.; Dreblow, J.: Untersuchung der Auswirkung von Kunststoffummantelungen auf die Querelastizität von Drahtseilen, nicht veröffentlichte Projektarbeit TU Clausthal 2018
- [Mup 01] Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und plastischem Werkstoffverhalten; Dissertation, TU Clausthal, Curvillier Verlag Göttingen, 2001.
- [Neu 20] Neumann, M.: Aufbau und Validierung eines Rechenmodells für FE-Untersuchungen an Kunststoffummantelten Seilen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, TU Clausthal
- [Obe 80] Oberbach, K.: Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1980.
- [Ott 03] Otto, S.: Ein nicht-rotationssymmetrisches Belastungsmodell für die Ermittlung des Beanspruchungsverhaltens mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Diss. TU Clausthal 2003
- [Sch 18] Schulze, M., Lohrengel, A., Recknagel, T., Schmidt, T.: Lebensdauer und Wickelverhalten kunststoffummantelter Drahtseile, Tagungsband 26. Kranfachtagung 2018 Dresden
- [Sch 18_2] Schulze, M.; Lohrengel, A.; Wächter, M.: Faserseile auf mehrlagig bewickelten Seiltrommeln, 8. Fachkolloquium InnoZug, 6./7. September 2018, Technische Universität Chemnitz
- [Sch 19] Schulze, M. (2019): Kompatibilität von Faserseil und mehrlagig bewickelter Seiltrommel, Technische Universität Clausthal, Dissertation
- [Wei 15] Weis, J.C.: Parameterstudie der Kontaktspannungen in zugbelasteten Drahtseilen basierend auf der Finite-Elemente-Methode; Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 2015.