

**EKSH-Förderprogramm „HWT Energie und Klimaschutz“**

**Abschlussbericht  
zum Forschungsprojekt  
„Modularer Polygonturm für Windenergieanlagen“**

wissenschaftlicher Leiter: Prof. Dr.-Ing. Christian Keindorf  
wissenschaftlicher Mitarbeiter: M. Sc. Tim Bülow  
Berichtszeitraum: 2020-2022  
Dokument-Nr.: 580-EKSH-FB-03  
Datum: 12.04.2023

  
\_\_\_\_\_

## **Genderhinweis**

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird in dem vorliegenden Bericht die gewohnte männliche Sprachform bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen verwendet. Dies dient lediglich der sprachlichen Vereinfachung und soll bitte nicht als Benachteiligung des weiblichen Geschlechts zu verstehen sein.

Wenn beispielweise von einem „verantwortlichen Mitarbeiter“ berichtet wird, ist stets das weibliche und diverse Geschlecht einbezogen.

## Inhaltsverzeichnis

Genderhinweis.....	II
Inhaltsverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	X
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Allgemeine Herausforderungen im Turmbau.....</b>	<b>1</b>
2.1           Wirtschaftliche Herausforderung .....	2
2.2           Technische Herausforderung.....	2
2.3           Logistische Herausforderungen .....	4
<b>3 Marktrecherche über Turmbaukonzepte (AP1) .....</b>	<b>5</b>
3.1           Hybridtürme .....	5
3.2           Beton-Sandwichtürme.....	6
3.3           Gittermasten .....	6
3.4           Geteilte-Stahlrohrbauweise.....	7
<b>4 Innovativer Lösungsansatz für eine modulare Stahlbauweise.....</b>	<b>9</b>
<b>5 Konzeptvorstellung für den modularen Polygonturm als neuen Lösungsansatz .....</b>	<b>11</b>
<b>6 Potentialanalyse modularer Polygonturm als neuen Lösungsansatz .....</b>	<b>12</b>
<b>7 Standsicherheit von stählernen Polygontürmen im Vergleich zu Rohrtürmen (AP1/AP3) .....</b>	<b>14</b>
7.1           Grenzzustand der Tragfähigkeit (Spannungsanalyse) .....	14
7.2           Grenzzustand der Tragfähigkeit (Stabilitätsanalyse) .....	15
7.2.1         Stand der Forschung zur Stabilität von polygonalen Türmen.....	16
7.3           Kritische Beulspannung für Einzelfeldbeulen nach EN 1993-1-5.....	18
7.4           Grenzzustand der Ermüdung.....	19
7.5           Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	20
<b>8 Referenzanlage für die nächste Generation von Onshore-WEA .....</b>	<b>20</b>
<b>9 Aerodynamischer Einfluss des Turmquerschnitts auf die Windlasten .....</b>	<b>21</b>
<b>10 Anforderungsanalyse für das Turmdesign.....</b>	<b>21</b>
<b>11 Vorbemessung und Auslegung des modularen Polygonturms .....</b>	<b>21</b>
<b>12 Konzeptentwicklung modularer Polygonturm .....</b>	<b>23</b>
12.1         Montagekonzept der Doppelwandelemente zu einer gesamten Turmsektion .....	23

12.2	Fertigungskonzept Profilverbindung .....	24
12.3	Montageablauf auf der Baustelle.....	24
12.3.1	Vormontage vom Doppelwandelement „01-DWE-01“ am Boden .....	24
12.3.2	Stellen und Sichern vom Doppelwandelement „01-DWE-01“ .....	25
12.3.1	Vormontage vom Doppelwandelement „01-DWE-02“ am Boden .....	25
12.3.2	Stellen und Sichern vom zweiten Doppelwandelement „01-DWE-02“ .....	26
12.3.3	Montage weiterer Doppelwandelemente .....	26
12.3.4	Abschließende Montage über die Formstücke.....	26
12.3.5	Vormontage vom Doppelwandelement „02-DWE-01“ am Boden .....	27
12.3.6	Stellen und Sichern vom DWE „02-DWE-01“ .....	28
12.4	Tragfähigkeit für Schubspannungen infolge von Querkräften .....	29
12.5	Tragfähigkeit für Biegespannungen infolge von Biegemomenten .....	29
<b>13</b>	<b>Tragfähigkeit der Flanschverbindung .....</b>	<b>29</b>
13.1	Nachweis der vorgespannten Schraubenverbindung .....	29
13.2	Nachweis der Tragfähigkeit der Flanschverbindung .....	30
<b>14</b>	<b>Beanspruchbarkeit der Profilverbindung des modularen Polygonturms .....</b>	<b>32</b>
14.1	Belastung der Profilverbindung durch Schubspannungen infolge Querkraft .....	34
<b>15</b>	<b>Planungsphase für die Traglastversuche an modularen Prüfkörpern .....</b>	<b>38</b>
15.1	Anforderungsanalyse für das Prüfmodell .....	39
15.2	Maßstabsermittlung und Sektions-Auswahl für das Prüfmodell .....	40
15.2.1	Bestimmung der äquivalenten Biegeauslastung im Prüfmodell .....	41
15.3	Maßstab 1:10 für ausgewählte Turmsektionen 3 und 4.....	41
<b>16</b>	<b>Entwicklung und Fertigung der Prüfkörper .....</b>	<b>41</b>
16.1	Maßstabsbedingte Einschränkung Profilverbindung.....	43
16.2	Werkstoffprüfung (Doppelwandelemente) .....	43
<b>17</b>	<b>Numerische Simulationen der Belastungszustände .....</b>	<b>43</b>
17.1	Modellaufbau für Referenzprüfkörper.....	44
17.2	Vernetzung des Referenzprüfkörpers.....	45
17.3	Vergleich mit den Versuchswerten für den Referenzprüfkörper.....	46
17.4	Modellaufbau für den modularen Prüfkörper.....	48
17.5	Vernetzung des modularen Prüfkörpers .....	50
17.6	Statisch mechanische Randbedingungen beim modularen Prüfkörper .....	50
17.7	Vergleich mit Versuchswerten für modularen Prüfkörper .....	51
<b>18</b>	<b>Traglastversuche.....</b>	<b>53</b>

18.1	Referenzprüfkörper.....	53
18.2	Prüfkörper des modularen Polygonturms (Pharos I, gesteckt).....	53
18.3	Messmittel.....	54
18.4	Messkonzept / Versuchsaufbau .....	56
18.5	Plausibilitätsprüfung der Messensoren .....	59
18.6	Versuchsablauf .....	61
18.7	Aufbringen der Normalkraft .....	63
18.8	Messergebnisse.....	63
18.8.1	Messergebnisse - Referenzprüfkörper .....	63
18.8.2	Messergebnisse - Modularer Prüfkörper (Pharos I, gesteckt) .....	68
18.8.3	Messergebnisse - Modularer Prüfkörper (Pharos II, geschraubt) .....	77
18.8.4	Messabweichungen (modularer Prüfkörper, Pharos I) .....	80
18.9	Vergleich der Messergebnisse für Traglastversuche .....	80
<b>19</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit .....</b>	<b>84</b>
<b>20</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>86</b>
<b>21</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>1</b>

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1-1 Gegenüberstellung der umfangsorientierten und längsorientierten Fertigung</i> .....	1
<i>Abbildung 2-1 Stahlrohrtürme und Hybridtürme für Windenergieanlagen</i> .....	1
Abbildung 2-2 Skizze für die Windbeanspruchung auf Rotor und Turm (nach [2]).....	3
Abbildung 2-3: Idealer Turmdurchmesser gegenüber transportierbarer Turmdurchmesser [5] ....	5
Abbildung 3-1: Übergangsstück, Patent DE102013221681A1_0005 [7].....	7
Abbildung 3-2: Vestas: EP 1 606 514 B1 [3].....	7
Abbildung 3-3: GE: US 8 316 615 B2 [8] .....	7
Abbildung 3-4: Siemens: WO 2011147478 A [10] .....	7
Abbildung 4-1: Modularer Polygonturm mit längsorientierten Verbindungselementen.....	9
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung für die Traglastversuche im Festigkeitslabor.....	10
Abbildung 5-1: Funktionsprinzip: Modularer Polygonturm .....	11
Abbildung 7-1: Dreipunkt-Biegeversuch nach [13].....	17
Abbildung 7-2: bezogene Biegetragfähigkeit in Abhängigkeiten der Kantenanzahl [13] .....	18
Abbildung 11-1: Turmkopfauslenkung.....	22
Abbildung 12-1 Spundwandkonzept (links) und Montagekonzept FH Kiel (rechts).....	23
Abbildung 12-2: walzbare Anker-Geometrie als mögliche Profilverbindung.....	24
Abbildung 12-3: Stellen und Sichern des Doppelwandelement 01-DWE-01 .....	25
Abbildung 12-4: Vormontage /Stellen und Sichern vom Doppelwandelement 01-DWE-02.....	26
Abbildung 12-5: Montage der Formstücke.....	27
Abbildung 12-6: Vormontage für Doppelwandelement 02-DWE-01 .....	28
Abbildung 12-7: Stellen und Sichern 02-DWE-01.....	28
Abbildung 13-1: Versagensarten von Flanschverbindungen nach Petersen [19].....	30
Abbildung 14-1: Balkenbeispiel.....	33
Abbildung 14-2-a) Kragarm belastet mit Kraft F am freien Ende b) resultierende Schnittgrößen, c) resultierende Schubspannungsverteilung $\tau_{xz}$ und d) rechteckiges infinitesimales Element, welches am Schnittquerschnitt grenzt [14] .....	34
Abbildung 14-3-Laufvariable .....	35
Abbildung 14-4-Schubspannungsverlauf.....	37
<i>Abbildung 15-1: Aufbau für die Traglastversuche im Prüflabor</i> .....	38
Abbildung 15-2: Portalprüfmaschine im Labor für Schiffsfestigkeit der FH Kiel .....	39

Abbildung 16-1: Bauteilübersicht für ein Doppelwandelement und vereinfachte Profilverbindung.....	42
Abbildung 16-2: Maßstabsbedingter Spalt in der Profilverbindung .....	43
Abbildung 17-1: FE-Modell für die Geometrie des Referenzprüfkörpers.....	44
Abbildung 17-2: Vernetzung des Referenzprüfkörpers .....	45
Abbildung 17-3 Kraftreaktion in Abhängigkeit von der Verschiebung in Y-Richtung .....	46
Abbildung 17-4: Beulversagen beim Prüfkörper (oben) und Beulanalyse in FEM (unten).....	47
Abbildung 17-5: FE-Modell für Prüfkörper „Pharos I“.....	49
Abbildung 17-6: Vernetzung für den modularen Prüfkörper.....	50
Abbildung 17-7: Randbedingungen des modularen Prüfkörpers .....	51
Abbildung 17-8: Beul- und Längsschubversagen beim modularen Prüfkörper „Pharos I, gesteckt“ .....	52
<i>Abbildung 18-1: Referenzprüfkörper, montiert an der Einspannvorrichtung.....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 18-2: Modulare Polygonturmsektionen (Pharos I, gesteckt).....</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 18-3: Modulare Polygonturmsektionen (Pharos II, geschraubt) .....</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 18-4: Verwendete Messverstärker / Messkonverter.....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 18-5: Ausrichtung der DMS in den Messebenen des jeweiligen Prüfkörpers .....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 18-6: Darstellung der Zugstange und Position der Messhülse am Prüfkörper.....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 18-7: Prüfkörper und Positionierung der DMS + Wegaufnehmer, Ansicht links.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 18-8: Prüfkörper und Positionierung der DMS + Wegaufnehmer, Ansicht rechts .....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 18-9: Prüfkörper und Positionierung der DMS + Wegaufnehmer, Ansicht von oben .</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 18-10: Prüfkörper und Positionierung der DMS + Wegaufnehmer, Ansicht von unten .....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 18-11: Pharos I (gesteckt); erweiterte DMS Applikationen im Bereich der Messebene 3.....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 18-12: DMS-Test für Referenzprüfkörper .....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 18-13: Ablaufschema für den Traglastversuch beim modularen Prüfkörper.....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 18-14: Ablaufschema für den Traglastversuch beim Referenzprüfkörper .....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 18-15: Kraft-Weg Diagramm für Referenzprüfkörper, gemessen an der Krafteinleitung.....</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 18-16: Kraft / Weg über Zeit, Referenzprüfkörper (Laststufe 130 kN) .....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 18-17: Plattenbeulen im Druckspannungsbereich nach Aufbringen der Maximallast</i>	<i>64</i>

<i>Abbildung 18-18: Spannungs-Kraftverlauf beim Referenzprüfkörper (Laststufe 50 kN)</i> .....	65
<i>Abbildung 18-19: Spannungs-Kraftverlauf beim Referenzprüfkörper (Laststufe 100 kN)</i> .....	65
<i>Abbildung 18-20: Spannungs-Kraftverlauf beim Referenzprüfkörper (Laststufe 130 kN)</i> .....	66
<i>Abbildung 18-21: Druckspannungsverlauf über die Prüfzeit für die Messtelle DMS 3.1 am Referenzprüfkörper (Laststufe 130 kN)</i> .....	67
<i>Abbildung 18-22: Kraft-Weg Diagramm für modularen Prüfkörper „Pharos I, gesteckt“, gemessen an der Krafteinleitung</i> .....	68
<i>Abbildung 18-23: Spannungs-Kraftverlauf im modularen Prüfkörper (Laststufe 25 kN)</i> .....	69
<i>Abbildung 18-24: Spannungs-Kraftverlauf beim Prüfkörper „Pharos I“ (Laststufe 50 kN)</i> .....	70
<i>Abbildung 18-25: Spannungs-Kraftverlauf beim Prüfkörper „Pharos I“ (Laststufe 50 kN)</i> .....	70
<i>Abbildung 18-26: Links: Plattenbeulen im mittleren Bereich der Turmsektion 3, 930 mm vom Lasteinleitungskreuz (Druckspannungsbereich), Rechts: Spalt zwischen Lasteinleitungskreuz und Flansch, (unter Last: 50 kN)</i> .....	71
<i>Abbildung 18-27: Längsverschub der DWE zwischen Turmsektion 3 und 4 (unter Last 50 kN)</i> .....	71
<i>Abbildung 18-28: Längsverschiebung der Doppelwandelemente (Laststufe 50 kN)</i> .....	71
<i>Abbildung 18-29: Spannungs-Kraftverlauf beim Prüfkörper „Pharos I“ (Laststufe 65 kN)</i> .....	72
<i>Abbildung 18-30: Spalt zwischen Lasteinleitungskreuz und Flansch, sowie Plattenbeulen im Messtellenbereich DMS 6.4 (unter Last 65 kN)</i> .....	73
<i>Abbildung 18-31: Links: Spalt zw. Lasteinleitungskreuz und Flansch (Flanschverschraubungen M8 haben versagt), Rechts: Plattenbeulen im Messtellenbereich (unter Last 65kN)</i> .....	73
<i>Abbildung 18-32: Verschobene Flanschverbindung der Turmsektion 3 / 4, im Messtellenbereich DMS 4.2 / DMS 5.2 (unter Last: 65kN)</i> .....	73
<i>Abbildung 18-33: Längsverschiebung der Doppelwandelemente (Laststufe 65 kN)</i> .....	74
<i>Abbildung 18-34: Spannungs-Kraftverlauf beim Prüfkörper „Pharos I“ (Laststufe 70 kN)</i> .....	75
<i>Abbildung 18-35: Plattenbeulen im Messtellenbereich DMS 6.4 / DMS 6.2 (unter Last: 70 kN)</i> .....	75
<i>Abbildung 18-36: Beulen im Messtellenbereich DMS 3.2 / Materialrisse (Bild unter Last: 70 kN)</i> .....	76
<i>Abbildung 18-37: Längsverschiebung der Doppelwandelemente (Laststufe 70 kN)</i> .....	76
<i>Abbildung 18-38: Kraft-Weg Diagramm für modularen Prüfkörper „Pharos II, geschraubt“, gemessen an der Krafteinleitung</i> .....	77
<i>Abbildung 18-39: Plattenbeulen nach dem Aufbringen der maximalen Prüflast im Bereich größter Druckspannungen (DMS3.1), in direkter Nähe zur Einspannvorrichtung</i> ....	78
<i>Abbildung 18-40: Druckspannungsverlauf im Messtellenbereich DMS 3.1 und Prüfkraft im zeitlichen Prüfverlauf (Laststufe 100 kN)</i> .....	78



<i>Abbildung 18-41: Druckspannungsverlauf im Messstellenbereich DMS 3.1 und Prüfkraft im zeitlichen Prüfverlauf (Laststufe 125 kN).....</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 18-42: Druckspannungsverlauf im Messstellenbereich DMS 3.1 und Prüfkraft im zeitlichen Prüfverlauf (Laststufe 150 kN).....</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 18-43: Vergleich der Traglastkurven für die unterschiedlichen Turmkonstruktionen .</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 18-44: Vergleich der Verformungen für die unterschiedlichen Turmkonstruktionen ..</i>	<i>82</i>

## **Tabellenverzeichnis**

<b>Tabelle 1-1: Arbeitspakete vom Forschungsvorhaben .....</b>	<b>2</b>
<b>Tabelle 6-1: Vorteile gegenüber bisherigen Turmsystemen in Stahlbauweise.....</b>	<b>13</b>
<b>Tabelle 7-1 Gegenüberstellung der Querschnittswerte .....</b>	<b>15</b>
<b>Tabelle 7-2 Stabilitätsanalyse für verschiedene Turmquerschnitte.....</b>	<b>19</b>
<b>Tabelle 8-1: Überblick für Referenzanlagen im Vergleich zum Stand der Technik.....</b>	<b>20</b>
<b>Tabelle 10-1: Spezifikationen für eine Turmauslegung.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabelle 11-1: Turmdaten nach Vorbemessung .....</b>	<b>22</b>
<b>Tabelle 14-1: Schubspannungen bezogen auf Orientierung der Doppelwandelemente.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabelle 15-1: Anforderungen an den Versuchsaufbau .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabelle 15-2: Abmaße der Turmsektionen 3 und 4 im Maßstab 1:10 .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabelle 18-1: Messapplikationen.....</b>	<b>55</b>
<b>Tabelle 18-2: Messebenen.....</b>	<b>59</b>
<b>Tabelle 18-3: Vergleich der Traglastversuche .....</b>	<b>81</b>
<b>Tabelle 18-4: Vergleich der Gesamtverformungen bei einer Prüflast von 50 kN.....</b>	<b>82</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Achteck.....	8E
Annahme auf der sicheren Seite.....	A.a.d.s.S.
DLC .....	<i>Design load case</i>
LDST .....	<i>lager-diameter-steel-tower</i>
MW .....	<i>Megawatt</i>
Sechzehneck.....	16E
Zwölfeck .....	12E

## 1 Einleitung

Im Rahmen des EKSH-Förderprogramms „HWT Energie und Klimaschutz“ wurde ein Forschungsvorhaben für einen modularen Polygonturm als Tragstruktur für Windenergieanlagen durchgeführt. Die Forschungsarbeiten wurden durch die Firma Hoesch Schwerter Profile GmbH unterstützt.

Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens wurde ein modulares Baukastenprinzip für Türme von Windenergieanlagen entwickelt, um noch größere Bauwerkshöhen realisieren zu können. Dafür müssen größere Turmfußabmessungen möglich sein, die eine Endmontage am jeweiligen Standort erfordern. Als technische Lösung ist geplant, die einzelnen Turmsegmente entlang ihrer Längskanten über kraft- und formschlüssige Passprofile zu verbinden, sodass am Standort keine Schrauben- oder Schweißverbindungen erforderlich sind.

Im Vergleich zur umfangsorientierten Fertigung ( Abbildung 1-1 links) von klassischen Stahlrohtürmen, stellen sich bei der längsorientierten Fertigung ( Abbildung 1-1 rechts) signifikante Unterschiede bei der Geometrie, beim Fertigungsprozess sowie beim Montageablauf ein.

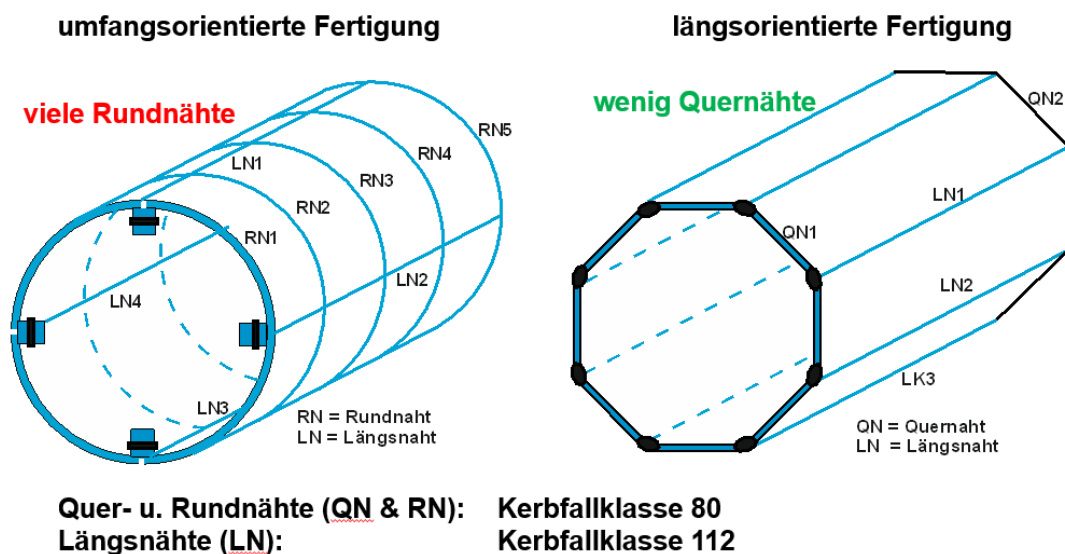


Abbildung 1-1 Gegenüberstellung der umfangsorientierten und längsorientierten Fertigung

Durch diese innovative Verbindungstechnik und die längsorientierte Fertigung von ebenen Wandelementen sollen auch Umformprozesse und Schweißprozesse während der Fertigungsphase eingespart werden, die bislang bei den rohrförmigen Stahltürmen erforderlich sind. Nicht zuletzt wird durch die höhere Kerbfallklasse der verbleibenden Längsnähte eine Steigerung bei der Ermüdungsfestigkeit und somit eine Verlängerung der Betriebsdauer erwartet.

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde der Grenzzustand der Tragfähigkeit analysiert und mit einer voll verschweißten Referenzgeometrie verglichen. Dazu wurden experimentelle und numerische Untersuchungen in den jeweiligen Arbeitspaketen (AP) durchgeführt.

In der nachfolgenden Tabelle ist der Zeitplan mit den einzelnen Arbeitspaketen dargestellt.

*Tabelle 1-1: Arbeitspakete vom Forschungsvorhaben*

<b>Arbeitspaket 1 – Markt- und Literaturrecherche sowie Konzept</b>	
AP 1-1	Markt- und Literaturrecherche
AP 1-2	Konzept für einen modularen Polygonturm erstellen
<b>Arbeitspaket 2 – Definitionen für konventionellen Stahlrohrturm und modularen Polygonturm</b>	
AP 2-1	Definition einer Referenz-WEA (Vorgabe von Lasten)
AP 2-2	Definition eines konventionellen Stahlrohrturms (Vergleichswerte für Geometrie, Traglasten und Massen)
AP 2-3	Formfindung für modularen Polygonturm (Querschnittseigenschaften)
<b>Arbeitspaket 3 – Analytische Ansätze zur Strukturanalyse</b>	
AP 3-1	Traglastanalysen mit Hilfe von analytischen Ansätzen
AP 3-2	Analyse der Beulstabilität von Polygonquerschnitten
<b>Arbeitspaket 4 – Numerische Simulationen für die Tragfähigkeiten</b>	
AP 4-1	Aufbau eines Finite-Element-Modells und numerische Strukturanalysen für Turmsektionen im Modellmaßstab (Auslegung der Versuchskörper)
AP 4-2	Numerische Strukturanalysen für reale Abmessungen und Lasten von Turmsektionen
<b>Arbeitspaket 5 – Verbindungs-, Fertigungs- und Montagetechnik</b>	
AP 5-1	Planung der Verbindungstechnik
AP 5-2	Fertigung der Turmsegmente im Modellmaßstab
AP 5-3	Montage der Segmente zu einer gesamten Turmsektion
<b>Arbeitspaket 6 – Experimentelle Untersuchungen</b>	
AP 6-1	Vorbereitung der Versuchsreihe
AP 6-2	Durchführung der Versuchsreihe
AP 6-3	Auswertung der Versuchsreihe
<b>Arbeitspaket 7 – Auswertung, Vergleich und Zusammenfassung</b>	
AP 7-1	Massenvergleich und Potenziale zur Optimierung aufzeigen
AP 7-2	Vor- und Nachteile von modularen Polygontürmen
AP 7-3	Abschlussbericht

Ein wesentliches Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die technische Machbarkeit eines modularen Polygonturms aufzuzeigen, wobei dessen Segmente über kraft- und formschlüssige Verbindungsmittel zusammengesetzt werden sollen. Die Tragfähigkeit soll mit einem konventionellen Turmsegment verglichen werden. Der Grenzzustand der Ermüdung wird allerdings nicht betrachtet.

In Ergänzung zu den experimentellen und numerischen Untersuchungen werden erste Konzepte für die Fertigungs- und Montageprozesse entwickelt, die unter Berücksichtigung der großen Dimensionen und gleichzeitig geringer Passtoleranzen für die jeweiligen Segmente neue Herausforderungen darstellen.

## 2 Allgemeine Herausforderungen im Turmbau

Bevor die Marktrecherche über modulare Turmkonzepte von Windenergieanlagen (WEA) durchgeführt wird, werden zunächst die Herausforderungen im Turmbau erläutert.

Bei der Bemessung von Stahlrohtürmen führen oftmals die Stabilitäts- und Ermüdungsprobleme infolge der hohen statischen und dynamischen Beanspruchungen zu großen Turmabmessungen. Das steht im Konflikt mit den Herstellungskosten, Transportmöglichkeiten, Fertigungstechniken sowie der Montagetechnik. Des Weiteren stellt die Verbindungstechnik für turmartige Bauwerke immer wieder eine neue Herausforderung dar, wenn größere Anlagen geplant werden.

Alternativ zu den Stahlrohtürmen gibt es die sogenannten Hybridtürme, wo der obere Abschnitt aus Stahlsektionen und der untere Abschnitt aus Betonsektionen besteht.

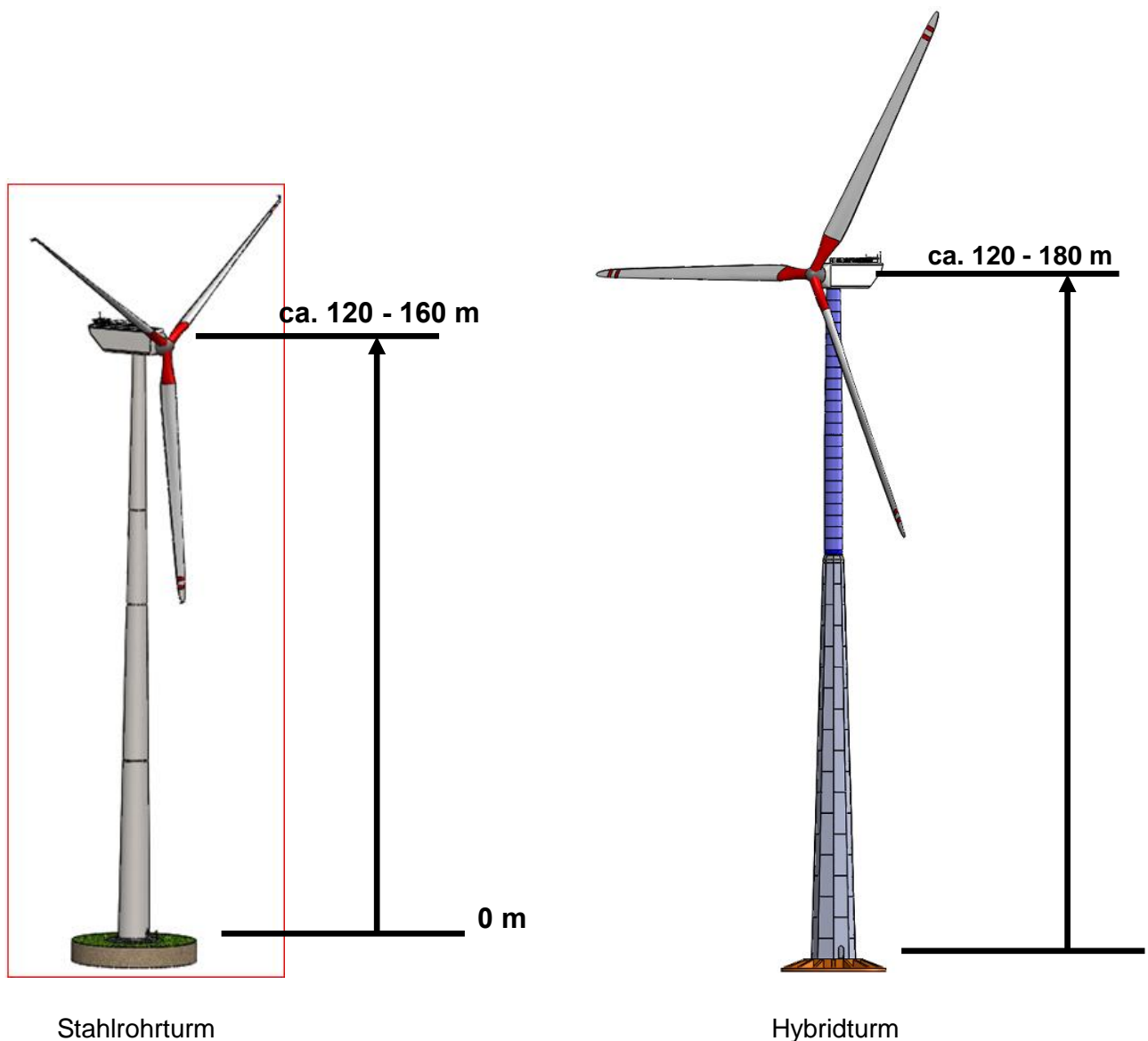


Abbildung 2-1 Stahlrohtürme und Hybridtürme für Windenergieanlagen

## **2.1 Wirtschaftliche Herausforderung**

Aufgrund der Größe und Masse müssen für die Turmkonstruktionen zwischen 15% und 25% der gesamten Investitionskosten einer WEA eingeplant werden. Außerdem verursacht der Turm einen Großteil der Transport- und Montagekosten [1]. Da die durchschnittliche Nabenhöhe im Verhältnis zur Anlagenleistung standortbedingt in Europa wächst, ist davon auszugehen, dass der Anteil für die Tragstruktur an den Gesamtkosten weiter steigt. Im Hinblick auf zukünftige Ausschreibungsverfahren für Windparks mit sinkenden Zuschlagsgeboten (cent/kWh) stehen die Hersteller von WEA vor der wirtschaftlichen Herausforderung die Gesamtkosten weiter zu reduzieren.

## **2.2 Technische Herausforderung**

Hinsichtlich der technischen Herausforderungen wird zunächst der Zusammenhang zwischen dem Turmdesign und den steigenden Belastungen infolge der Windturbinen erläutert.

Grundsätzlich steigen bei Türmen die Belastungen exponentiell mit der Höhe an. Der Grund dafür ist zum einen die Windgeschwindigkeit, die mit zunehmender Höhe über Geländeoberkante steigt. Entsprechend steigen die damit verbundenen Windlasten auf Rotor und Turm. Diese Windlasten sorgen gemeinsam mit dem Gewicht der WEA für eine Überlagerung von Normal- und Querkraft sowie Torsions- und Biegemomenten im Turmquerschnitt (Schnittgrößen).

Die größte Auslastung bezogen auf das Spannungsniveau wird durch die Biegemomente hervorgerufen. Die Zusammenhänge der Biegebelastung sollen im Folgenden, anhand der Abbildung 2-2 und mit Gl. (2-1) erläutert werden.

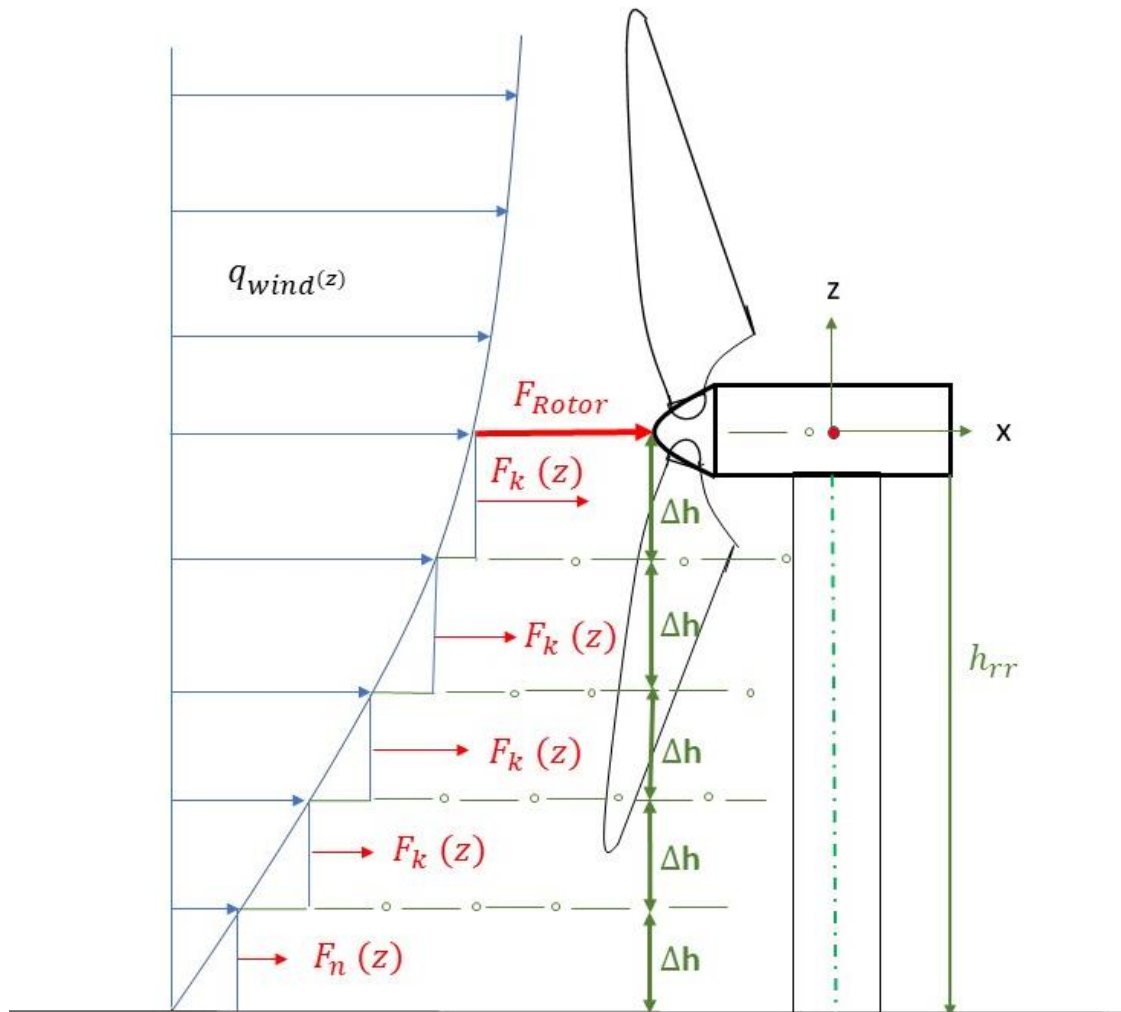


Abbildung 2-2 Skizze für die Windbeanspruchung auf Rotor und Turm (nach [2])

$$M_{y_{TB}} = \sum_{k=1}^n \left[ \left( h_{TT} - \frac{k * \Delta h}{2} \right) * \int_{h_{TT} - (k+1) * \Delta h}^{h_{TT} - k * \Delta h} q_{wind}(z) * D_T * dz \right] + F_{Rotor} * h_{TT}$$

Belastung am Turmfuß einer WEA

Gl. (2-1), [2]

$M_{y_{TB}}$  : Biegemoment am Turmfuß

$n$ : Anzahl der betrachteten Streckenlastabschnitte

$k$ : Zählweite der betrachteten Streckenlastabschnitte

$h_{TT}$ : Höhe Turm vom Boden bis zur Nabhöhe

$\Delta h = h_{TT}/n$ : Höhe des betrachteten Streckenlastabschnittes

$D_T$ : Durchmesser des Angeströmten Turmquerschnitts

$q_{wind}(z)$ : Staudruckfunktion durch Wind abhängig von der Höhe

$F_{Rotor}$ : Kraft resultierend aus Rotorschub (ebenfalls abhängig von  $q_{wind}(z)$ )



Die Gleichung Gl. (2-1) zeigt eine Formel zur Berechnung des Biegemoments am Turmfuß. Der linke Summand der Gl. (2-1) beschreibt das aus dem Staudruck auf den Turm entstehende Biegemoment. Der Verlauf des Staudrucks wird in „n“ Abschnitte unterteilt, um den jeweiligen Abschnitt zu einer resultierenden Windkraft und einem resultierenden Hebelarm zusammenzufassen, s. Abbildung 2-2. Die aus dem Staudruck resultierende Windkraft lässt sich mathematisch für jeden Abschnitt unter Annahme eines konstanten Turmdurchmessers als Einfach-Integral über der Höhe des Abschnittes beschreiben. Der rechte Summand beschreibt das aus dem Rotorschub resultierende Biegemoment, welches sich aus einer Schubkraft und einem Hebelarm über die gesamte Nabenhöhe zusammensetzt. Weitere Beanspruchungen auf die WEA sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in Abbildung 2-2 dargestellt.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgt die Bemessung der Turmquerschnitte für die extremen Lastfallkombinationen. Für die Dimensionierung kann entweder die Wanddicke oder der Durchmesser eines Turmquerschnitts angepasst werden. Ein höherfestere Stahlgüte wird aufgrund der nicht in gleichem Maße ansteigenden Ermüdungsfestigkeit nicht favorisiert.

Eine Vergrößerung des Durchmessers bei gleichbleibender Wanddicke wäre hinsichtlich der Massenbilanz zu bevorzugen. Dies beruht darauf, dass der Durchmesser mit der dritten Potenz in das Widerstandsmoment eingeht.

Der technisch ideale Querschnitt bestimmt sich jedoch nicht nur nach den Theorien der Festigkeitslehre, sondern auch unter Berücksichtigung von funktionsbedingten Kriterien, wie z.B. dem Blattfreigang (Abstand zwischen Rotorblatt und Turm unter Last) und weiteren Bedingungen, wie z.B. die Transportfähigkeit und der Montageaufwand.

### **2.3 Logistische Herausforderungen**

Um die Türme überhaupt transportieren (und montieren) zu können, werden diese der Länge nach geteilt. Diese sogenannten Sektionen werden auf die Baustelle transportiert und dort einzeln montiert.

Die häufigste Beschränkung bei Transporten über Land sind dabei Straßenbrücken, Unterführungen und Tunnel, deren Durchfahrtshöhen üblicherweise bei ca. 4,5 m liegen [3], [4] und [5]. Trotz der Verwendung spezieller Transportfahrzeuge, die es ermöglichen die Turmsektionen bis kurz über den Straßenbelag abzusenken (Abbildung 2-3), bleibt der Durchmesser ein wesentliches Transportlimit.

Dieses Limit wird bereits bei Anlagen ab 2 MW Nennleistung schnell erreicht. Durchmesser von über 4,3 m am Turmfuß sind keine Seltenheit [6]. Technisch und wirtschaftlich sinnvolle Querschnitte für aktuelle und zukünftige Nabenhöhen können somit in konventioneller Bauweise als vollumfängliche Stahlrohrsektion nicht mehr umgesetzt werden, was zwangsläufig zu alternativen Lösungsansätzen führt [5].

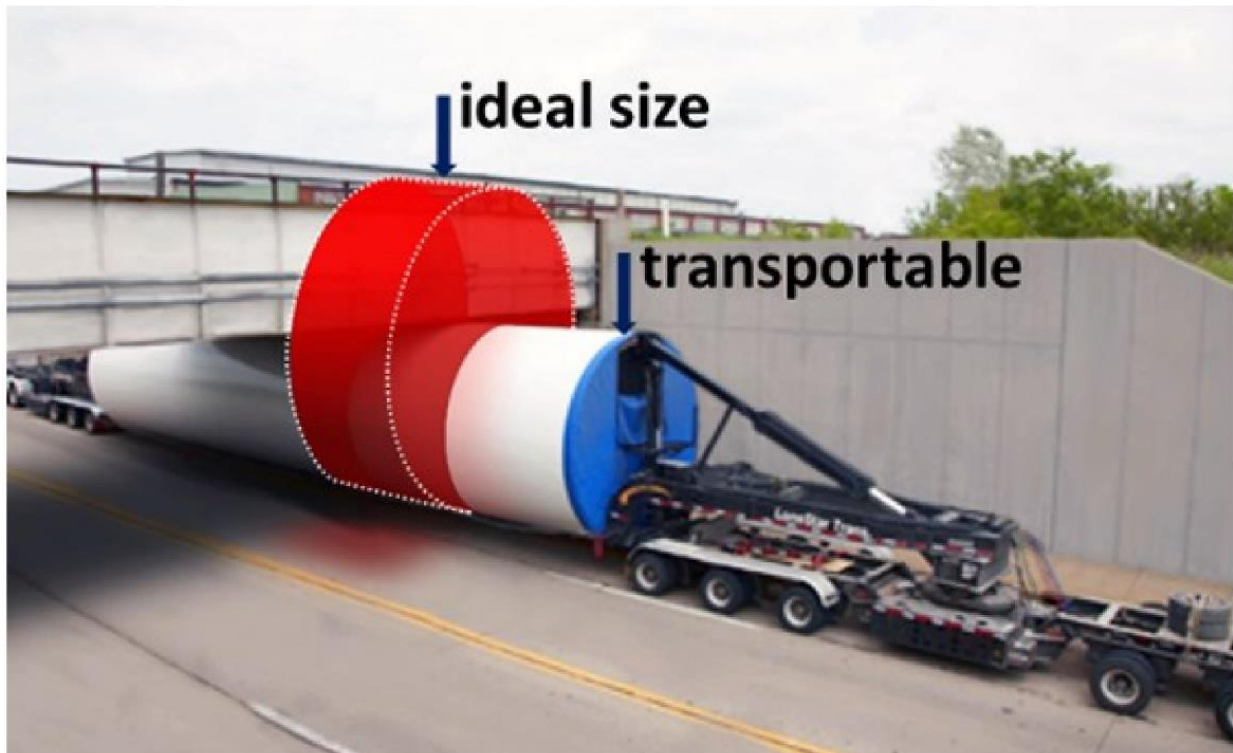


Abbildung 2-3: Idealer Turmdurchmesser gegenüber transportierbarer Turmdurchmesser [5]

### 3 Marktrecherche über Turmbaukonzepte (AP1)

Unter den konventionellen Bauweisen für Turmkonstruktionen für WEA haben sich die Stahlrohtürme gegenüber Gittertürmen, Betontürmen oder abgespannten Masten weitestgehend durchgesetzt, da diese verhältnismäßig einfach und wirtschaftlich herzustellen sind [6]. Allerdings sind die idealen Dimensionen einer Tragstruktur für zukünftige WEA nicht mehr allein durch voll-verschweißte Stahlrohrsektionen umsetzbar. Deswegen werden zunehmend kombinierte und modulare Bauweisen verwendet werden, von denen die wichtigsten Konzepte im Folgenden vorgestellt werden.

#### 3.1 Hybridtürme

Eine häufige Alternative stellen Hybridtürme dar, bei denen der untere Abschnitt aus Spannbeton gefertigt wird und der obere Abschnitt besteht weiterhin Stahlrohrsektionen, um deren Kostenvorteil gegenüber den Betonsektionen zu nutzen [1]. Die großen Durchmesser am Turmfuß werden dabei aus Betonfertigteilen (im Durchmesser halbierte oder gedrittelte Segmente) auf der Baustelle montiert. Obwohl die Fertigteile deutlich schwerer sind, ist der Transport erheblich günstiger als bei voll-verschweißten Stahlrohrsektionen.

Werden hingegen die Betonelemente vor Ort gegossen (Ortbeton), ist die Qualität des Betons abhängig von den Umgebungsbedingungen [1]. Dennoch gibt es aktuelle Montagekonzepte, bei denen die Segmente in einer mobilen Fabrik vor Ort hergestellt werden können.

Der Nachteil bei Hybridtürmen besteht darin, dass die sehr hohen Wanddicken der Betonteile, diesen Bereich sehr materialaufwändig und damit deutlich schwerer machen, als bei der klassischen Stahlbauweise [1], [6]. Ein wesentlicher Vorteil ist jedoch die modulare Bauweise mit Betonfertigteilen, die größere Turmfußdurchmesser und somit auch größere Nabenhöhen für WEA ermöglichen, vgl. Abbildung 2-1.

### **3.2 Beton-Sandwichtürme**

Das Patent DE 19832921 A1 [9] sieht eine Kombination, der beiden Baustoffe (Stahl und Beton) innerhalb einer Turmsektion vor. Dazu werden vorgefertigte, geteilte Metallschalen auf der Baustelle zu einem Außen- und Innenrohr montiert. Anschließend wird der Ringspalt zwischen den beiden Röhren mit Beton ausgegossen [3]. Somit entsteht ein Sandwichelement. Auch diese Bauweise erreicht seine Festigkeit hauptsächlich durch die Erhöhung der Wanddicke oder Durchmesser je Querschnittsebene. Der Vorteil gegenüber herkömmlicher Hybridtürme besteht hauptsächlich in der leichteren Transportierbarkeit der geteilten Metallschalen und der Verbundwirkung [3].

### **3.3 Gittermasten**

Der ehemalige Hersteller Senvion hatte eine Hybridbauweise entwickelt und mit dem Patent DE 10339438A1 schützen lassen [6]. Bei dieser Bauweise wird der untere Teil des Turms als Stahlgittermast und der obere Teil als Stahlrohrsektion ausgeführt

Die Besonderheit gegenüber den Gittermasten, die bis zur Nabenhöhe konzipiert sind, liegt in den verschieden ausgeführten und einzeln geschützten Verbindungsstücken, die den Übergang vom Gittermast zur Rohrsektion ermöglichen. Ein Beispiel für ein solches Verbindungsstück ist in der Abbildung 3-1 zu sehen.

Die Ausbildung des unteren Turmabschnitts in Form eines Gittermastes ermöglicht eine größere Spannweite am Turmfuß (Abstand zwischen den Eckstielen) und damit einen effizienten Materialeinsatz. Ein Gittermast gehört zur Leichtbauweise. Seine Einzelteile sind gut zu transportieren und in der Fertigung günstig [6]. Allerdings werden zahlreiche Schrauben zwischen den Eckstielen, Diagonalen und Streben benötigt, die teilweise auch in luftiger Höhe verbunden werden müssen. Die entscheidenden Nachteile sind somit der hohe Montage- und Wartungsaufwand, der aus den vielen dynamisch beanspruchten Schraubenverbindungen resultiert [6].

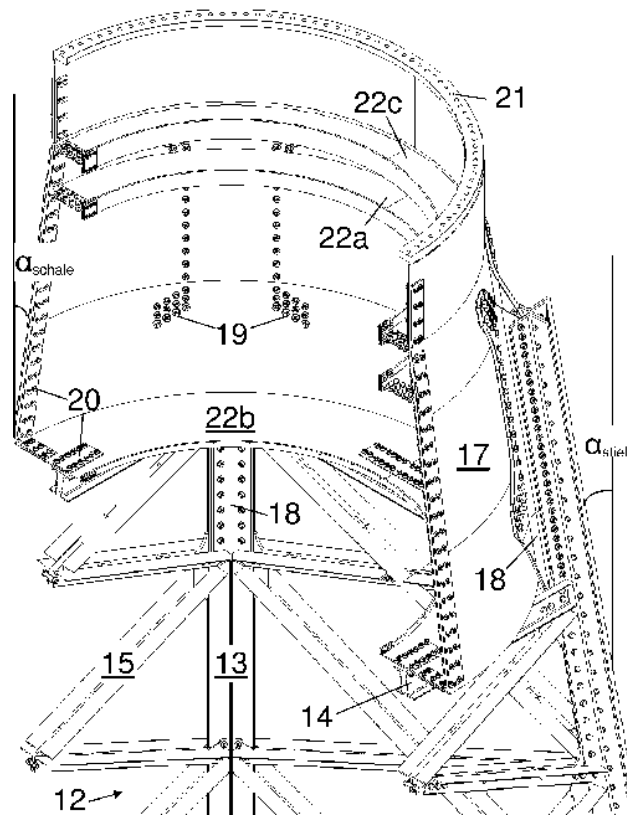


Abbildung 3-1: Übergangsstück, Patent DE102013221681A1\_0005 [7]

### 3.4 Geteilte-Stahlrohrbauweise

Mittlerweile werden auch Stahlrohrsektionen nicht mehr vollumfänglich transportiert, sondern als Teilschalen. Anschließend werden die Teilschalen auf der Baustelle zu einem Kreisringquerschnitt verschraubt. Dazu gibt es mehrere Patente.

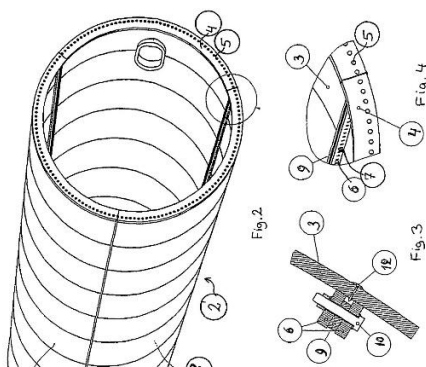


Abbildung 3-2: Vestas:  
EP 1 606 514 B1 [3]

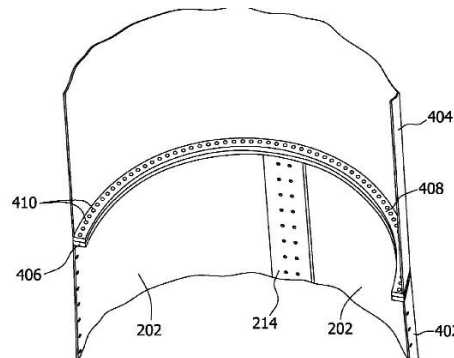


Abbildung 3-3: GE:  
US 8 316 615 B2 [8]

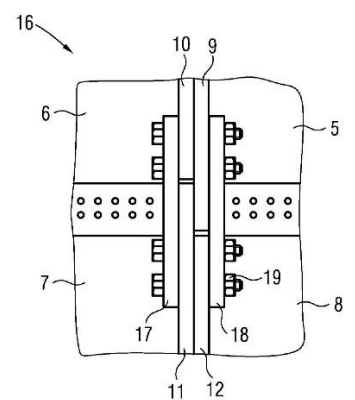


Abbildung 3-4: Siemens:  
WO 2011147478 A [10]

Die Patente der Firmen Vestas, GE und Siemens unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Ausführung der Verbindungselemente zwischen den Teilschalen. Bei der sogenannten „lager-diameter-steel-tower“-Bauweise (LDST{ XE "LDST" \t "lager-diameter-steel-tower" }-Bauweise) von Vestas (Abbildung 3-2) sind sowohl Längsflansche (6) als auch Querflansche (4) an die Segmentteile angeschweißt und dadurch verschraubt. Die Bauweise von GE (Abbildung 3-3) verwendet Verbindungselemente (214) an Stelle der Längsflansche. Mittels dieser werden die Teilsegmente (202) geschient und verschraubt. Bei der Bauweise von Siemens in Abbildung 3-4 werden überlappende Turmsegmente (6 und 7) in Umfangsrichtung direkt miteinander verschraubt und zusätzlich in Längsrichtung durch einen Flansch (9, 10, 11 und 12) mit Verbindungsplatten(17 und 18) miteinander verschraubt.

Als artverwand zum angestrebten Lösungskonzept dieses Forschungsvorhabens wird die Variante von der dänischen Firma „Andresen Towers A/S“ angesehen. Der Turmquerschnitt besteht aus einem regelmäßigen Vierzehneck, dass aus zwölf Bauteilen zusammengesetzt wird [10]. Die einzelnen Seitenelemente bestehen aus dreifach gekantetem Blech, wodurch die eigentlichen Ecken des Polygons, sowie die Flansche für die Verschraubung erzeugt werden.

Insgesamt betrachtet, sind alle Lösungsansätze einer modularen Bauweise bestrebt, den Materialaufwand in Grenzen zu halten und gleichzeitig günstige Transport- und Montagemöglichkeiten für die nächste Generation von Onshore-WEA zu schaffen.

#### 4 Innovativer Lösungsansatz für eine modulare Stahlbauweise

Als Alternative zu den bisherigen Konstruktionsvarianten wird eine neue Technologie vorgestellt, mit der ein modularer Polygonturm und dessen Endmontage am Einsatzort möglich ist, wofür auch neuartige Verbindungselemente eingesetzt werden sollen. In Abbildung 4-1 ist das modulare Baukastenprinzip für turmartige Konstruktionen als 3D-Modell dargestellt.

Das neue Baukastensystem besteht aus mehreren Wandelementen, die gekrümmt oder eben sein können (Schalen oder Platten). Die Wandelemente weisen an ihren Längskanten ein Profil auf, welches z.B. ein Rundstab sein kann. Mit Hilfe von Formstücken sollen die Längskanten verbunden werden, allerdings ohne Schrauben oder Klebemittel. Die Kraftübertragung findet vorwiegend über den Formschluss statt, wobei Kontaktpressungen und Reibung zwischen Rundstab und Formstück wirken. Hierfür ist eine hohe Passgenauigkeit erforderlich, um den Schlupf zwischen den Elementen zu minimieren.

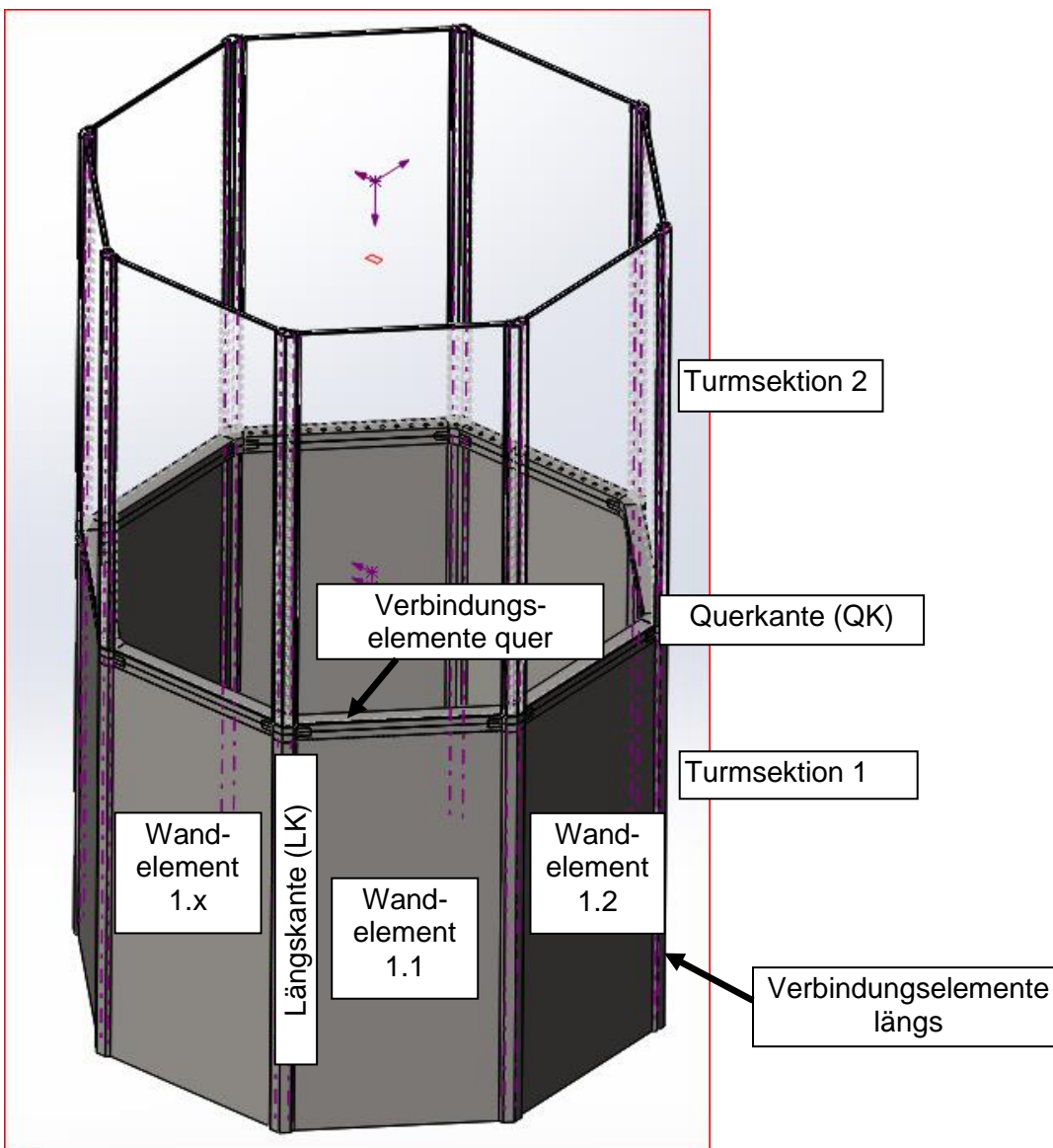


Abbildung 4-1: Modularer Polygonturm mit längsorientierten Verbindungselementen

Die Formstücke sind skalierbar und können an die jeweilige Geometrie (Eckdurchmesser, Winkel, Anzahl und Länge der Wandelemente) beliebig angepasst werden. Dadurch können zahlreiche Grundrisse des Baukastens ermöglicht werden. Bedingt durch die Verbindungselemente ist eine modulare und mobile Bauweise denkbar, die nachträglich ergänzt aber auch zerstörungsfrei demontiert werden kann.

Nach einer Konzeptphase (Arbeitspaket AP 2) wird das Trag- und Verformungsverhalten eines modularen Polygonturms analytisch in Arbeitspaket AP 3 untersucht. In Ergänzung zur Strukturanalyse werden im Arbeitspaket AP 4 mehrere Finite-Element-Modelle (FEM) erstellt, um das Tragverhalten im Modellmaßstab und in realer Größe simulieren zu können. Die Arbeitspakete AP 5 und AP 6 dienen zur Erforschung des Tragverhaltens mit Hilfe von großmaßstäblichen Belastungsversuchen [12] im Festigkeitslabor vom Institut für Schiffbau und maritime Technik der FH Kiel. Dafür sollen zwei Turmsectionen (Maßstab 1:10) in horizontaler Lage getestet werden, wobei die Biegebelastung am Turmkopf, mittels einer Prüfmaschine, aufgebracht wird, s. Abbildung 4-2.

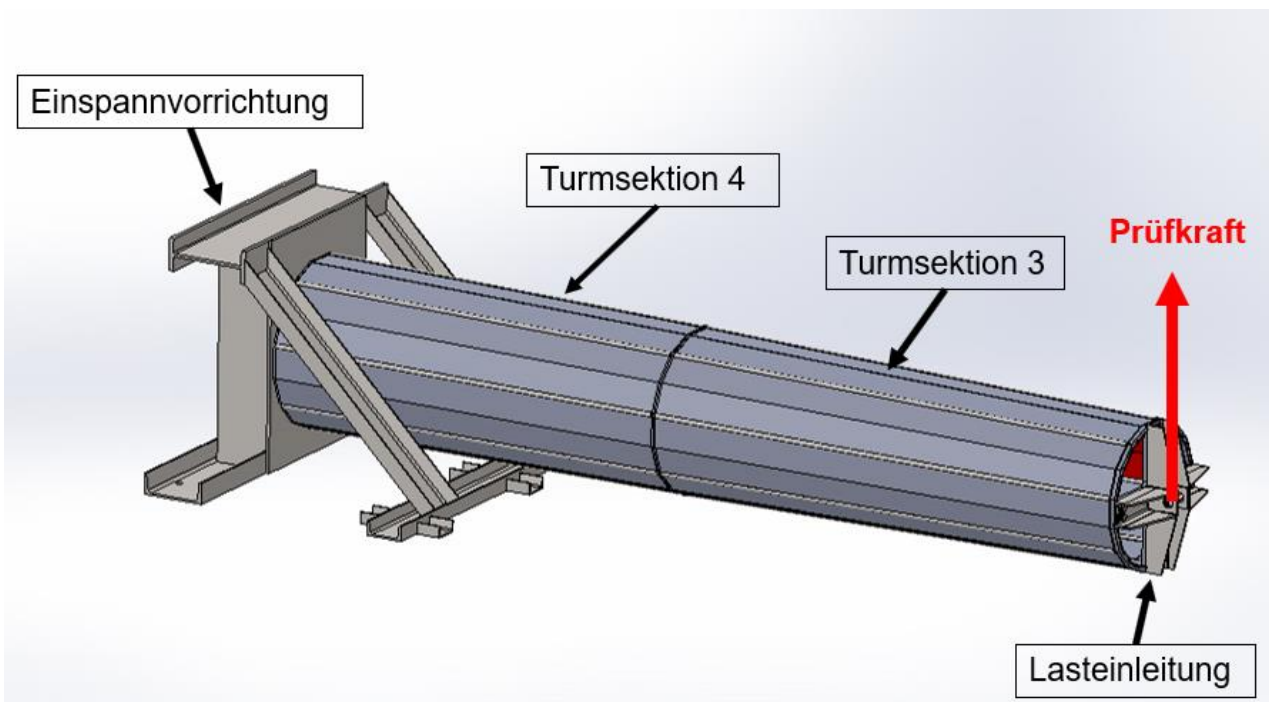


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung für die Traglastversuche im Festigkeitslabor

## 5 Konzeptvorstellung für den modularen Polygonturm als neuen Lösungsansatz

Die Idee zu dem zu untersuchenden Turmkonzept besteht darin, die Seitenwände nach dem Prinzip der Verschlosserung bei Spundwänden zu einem Polygonquerschnitt zusammenzusetzen. Innovativ an dieser Lösung ist, dass die Verbindung formschlüssig ist und an den Längskanten ohne zusätzliche Verschraubungen auskommen soll.

Das Funktionsprinzip des modularen Polygonturms ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Dazu werden zwei Profilstäbe (hier zunächst als Rundstab dargestellt) seitlich der Länge nach mit einem Wandelement auf Stoß verschweißt. Ein Formstück (auch Schlossprofil genannt) verbindet im montierten Zustand die Profilstäbe zweier Platten miteinander.

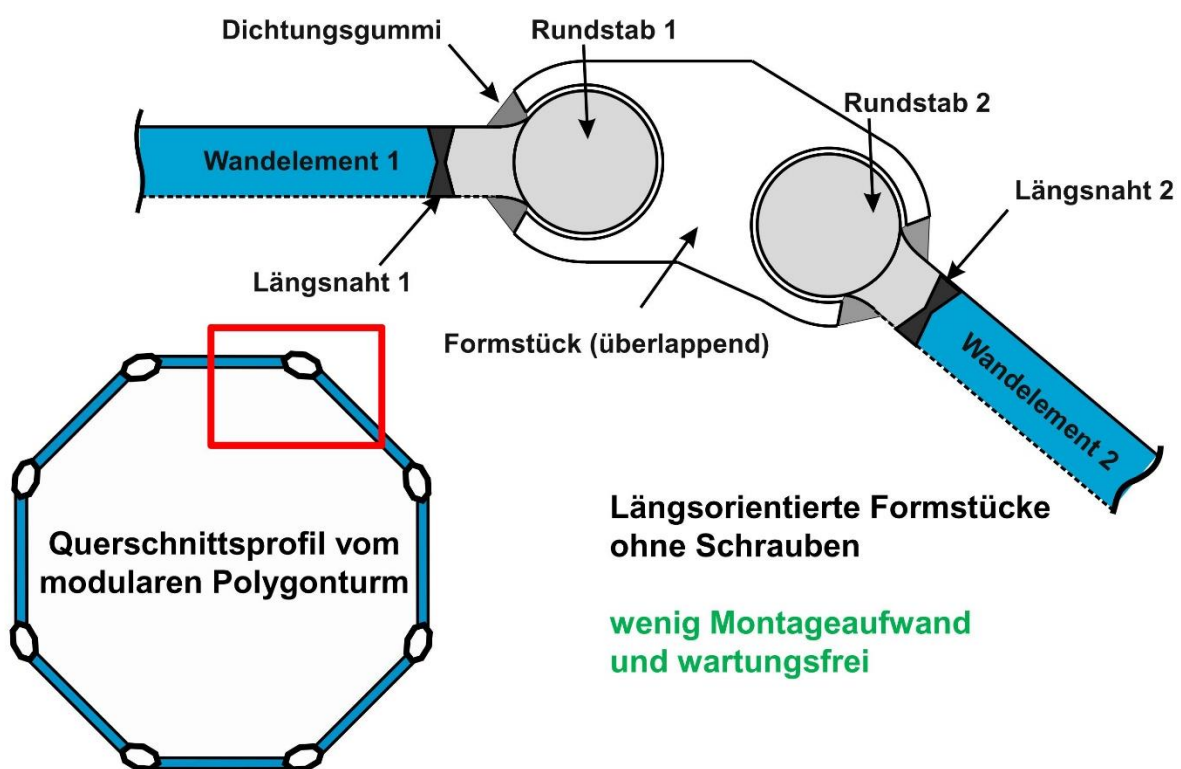


Abbildung 5-1: Funktionsprinzip: Modularer Polygonturm

Zum Beispiel kann mittels 8 Formstücken und 8 Wandelementen ein Polygonquerschnitt als 8-Eck montiert werden. Durch die Anpassung der Knickwinkel im Formstück können Polygonquerschnitte mit veränderlicher Eckenanzahl hergestellt werden. Die so entstehenden Turmsectionen werden anschließend übereinandergesetzt und mittels stirnseitiger Flanschverschraubungen miteinander verschraubt.



## **6 Potentialanalyse modularer Polygonturm als neuen Lösungsansatz**

Als Alternative zu den bisherigen Konstruktionsvarianten wird eine neue Technologie vorgestellt, mit der ein modularer Polygonturm und dessen Endmontage am Einsatzort möglich ist, wofür auch neuartige Verbindungselemente eingesetzt werden sollen. Das modulare Baukastensystem stellt eine Neuheit in Bezug auf ein Produkt, aber auch für ein Verfahren dar. Insofern beinhaltet die Idee mehrere Neuheitsgrade, die im Folgenden aufgelistet werden:

### **Bemessung (Design):**

- höhere Beulstabilität durch polygonartige Querschnittsform mit Beulsteifen (Formstücke)
- weniger Rundnähte je Turmsektion und somit weniger ermüdungskritische Kerbstellen

### **Herstellverfahren und Fertigungstechnik:**

- keine Umformtechnik bei ebenen Wandelementen
- keine Schweißnähte zwischen den Rohrschüssen notwendig, wenn längsorientierte Fertigung
- skalierbare Verbindungselemente in Serienproduktion möglich
- beliebige Grundrissformen für den Baukasten denkbar, weil Formstücke geometrisch angepasst werden können

### **Transport:**

- Transport sowohl über Land als auch über See
- keine Beschränkung auf 4.3 m bzw. 4.5 m für die Hauptabmessungen des Baukastens
- keine Überbreite beim LKW-Transport für die einzelnen Wandelemente

### **Montagetechnik:**

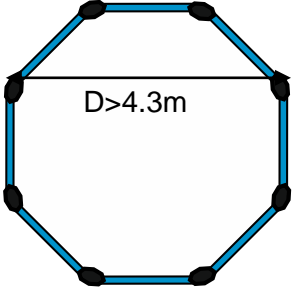
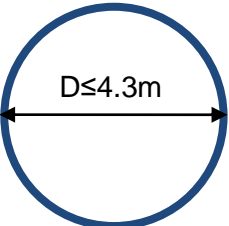
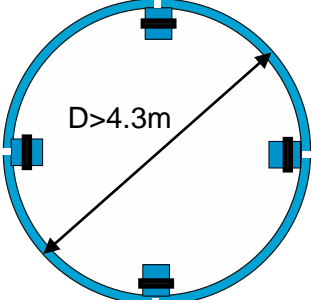
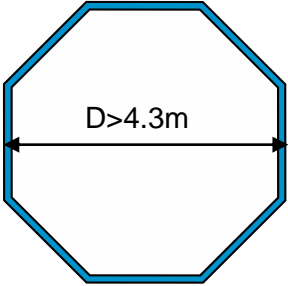
- horizontaler, geneigter oder senkrechter Vers Schub möglich
- eine einzige Spannvorrichtung wird für alle Verbindungen entlang der Längskanten benötigt
- robuster und einfacher Spannvorgang
- keine Anziehvorgänge für Schrauben an den Längskanten
- keine Schweißarbeiten und Korrosionsschutzmaßnahmen am Einsatzort erforderlich

### **Betrieb und Wartung:**

- direkte Kraftübertragung ohne Schlupf zwischen Formstück und Rundprofilen
- höhere Stabilität für die Wandelemente (Platten oder Schalen), da die Formstücke dazwischen als aussteifende Elemente fungieren
- keine Wartung der Verbindungen an den Längskanten erforderlich
- zerstörungsfreie Demontage möglich

Die Vorteile des modularen Baukastens mit Polygonquerschnitt gegenüber den üblichen Turmsystemen in Stahlbauweise sind in Tabelle 6-1 aufgelistet.

Tabelle 6-1: Vorteile gegenüber bisherigen Turmsystemen in Stahlbauweise

Turmsysteme (Stand der Technik)	Vorteile des modularen Baukastensystems gegenüber dem jeweiligen Turmsystem
	
<p>1. Stahlrohrturm mit <math>D \leq 4.3</math> m (umfangsorientierte Rohrschüsse mit Flanschen und Schrauben)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Umformarbeiten zu Rohrschüssen</li> <li>- weniger geschweißte Rundnähte</li> <li>- Transport ohne Überbreite möglich</li> <li>- Durchmesser <math>D &gt; 4.3</math> m möglich</li> <li>- Nabenhöhen größer als 140m möglich</li> <li>- Turbinenklassen mit mehr als 5 MW möglich</li> </ul>
<p>2. Stahlrohrturm mit <math>D &gt; 4.3</math> m (längsorientierte Teilschalen mit Flanschen und Schrauben)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Umformarbeiten zu Rohrschüssen</li> <li>- weniger geschweißte Rundnähte</li> <li>- höhere Ermüdungsfestigkeit innerhalb des Wandelements möglich, wenn diese keine Quernähte an den Blechdickensprüngen benötigen (flexibles Walzen anwenden)</li> <li>- keine Flansche an den Längskanten erforderlich</li> <li>- keine wartungssensitiven Schrauben an den Längskanten</li> <li>- Transport ohne Tieflader möglich, da Plattenstreifen auf üblichen LKW's geladen werden können</li> </ul>
<p>3. Polygonturm mit <math>D &gt; 4.3</math> m (längsorientierte Plattenstreifen mit Schrauben)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- höhere Beulstabilität als ein Polygonquerschnitt ohne Formstücke an den Längskanten (Beulsteifen)</li> <li>- keine wartungssensitiven Schrauben an den Längskanten</li> <li>- keine Lochschwächungen in den Plattenstreifen</li> <li>- höhere Ermüdungsfestigkeit, da keine Schrauben als Kerbstellen vorhanden sind</li> </ul>

Für die Gegenüberstellung dienen folgende Varianten:

1. Stahlrohtürme mit  $D \leq 4.3$  m, die jedoch für Nabenhöhen jenseits von 140 m und Turbinenklassen mit mehr als 5 Megawatt (MW) nicht realisierbar sind.
2. Stahlrohtürme mit  $D > 4.3$  m, die Nabenhöhen größer als 140 m ermöglichen, wie z.B. das Turmsystem LDST von Vestas oder von Eno Energy.
3. Polygontürme von Siemens (Andresen Tower) und Lagerway (Längskanten mit zahlreichen Schrauben verbunden).

Zusammenfassend ist für den innovativen Lösungsansatz festzuhalten, dass bei der Erforschung dieser neuen Technologie nicht nur allein das Kriterium der Tragfähigkeit herangezogen werden darf, sondern auch Fragestellungen zur Ermüdungsfestigkeit, Gebrauchstauglichkeit sowie Fertigungs- und Montagetechnik als Gesamtkonzept analysiert werden müssen.

## 7 Standsicherheit von stählernen Polygontürmen im Vergleich zu Rohrtürmen (AP1/AP3)

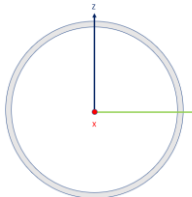
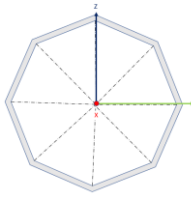
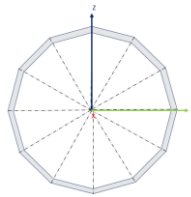
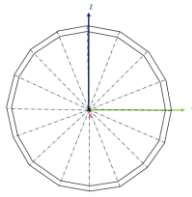
### 7.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit (Spannungsanalyse)

Um die Tragfähigkeit von polygonalen Querschnitten vergleichen zu können, wird zunächst eine Spannungsanalyse durchgeführt. Dazu werden exemplarisch die Querschnittseigenschaften von einem Achteck (8E), einem Zwölfeck (12E) und einem Sechzehneck (16E) gegenübergestellt. Für eine fiktive Biegebeanspruchung werden die Spannungszustände mit denen von einem kreisrunden Profil verglichen. Für die Vergleichbarkeit weisen alle Querschnitte den gleichen Flächeninhalt und damit den gleichen Materialeinsatz pro laufenden Meter Turmhöhe auf. Das Flächenträgheitsmoment des jeweiligen Polygonquerschnitts berechnet sich nach Gl. (7-1) wie folgt.

$I_y(e) = \frac{D_2^4 - D_1^4}{24} * \sin\left(\frac{2\pi}{e}\right) * \left(2 + \cos\left(\frac{2\pi}{e}\right)\right)$	Flächenträgheitsmoment für regelmäßige Polygonquerschnitte mit n-Ecken	Gl. (7-1)
<i>D<sub>2</sub>: äußerer Eckdurchmesser</i> <i>D<sub>1</sub>: Innerer Eckdurchmesser</i> <i>e: Anzahl der Ecken des Polygons</i>		

In Tabelle 7-1 sind die Normalspannungsreaktionen infolge der Biegebelastung gegenübergestellt.

Tabelle 7-1 Gegenüberstellung der Querschnittswerte

Querschnitt		Kreisring	Achteck	Zwölfeck	Sechszehneck
Skizze	Einheit				
Fläche	m <sup>2</sup>	0.250			
Durchmesser	m	4	4.1	4.04	4.02
Eckanzahl	-	"-"	8	12	16
Blechdicke	mm	20			
Seitenlänge	m	"-"	1.57	1.05	0.78
Biegemoment	kNm	40'000			
Widerstandsmoment	m <sup>3</sup>	0.247	0.228	0.238	0.242
Biegespannung	$\frac{N}{mm^2}$	161.56	175.02	167.75	165.21
Spannungserhöhung bezogen auf Kreisringquerschnitt	%	0	+ 8.0	+3.8	2.5

Anhand der Gegenüberstellung in Tabelle 7-1 ist ersichtlich, dass sich die Biegespannungen der Polygonquerschnitte mit zunehmender Eckanzahl asymptotisch an den Wert des Kreisringquerschnitts annähern. Bezogen auf den Kreisringquerschnitt beträgt die Spannungsüberhöhung beim Achteck 8.0% und beim Sechzehneck nur noch 2.5%.

Da mit steigender Eckanzahl auch die Kosten für Fertigung, Transport und Montageaufwand steigen, gilt es ein Optimum zu finden, bei dem sich dieser Aufwand mit der höheren Belastbarkeit und den Herstellkosten die Waage hält.

## 7.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (Stabilitätsanalyse)

Ein Kreisringquerschnitt kann unter Druckbeanspruchungen (Axialdruckspannungen und/oder Biegedruckspannungen infolge eines Biegemoments) durch Schalenbeulen versagen. Dieser Stabilitätsfall wird nach EN 1993-1-6 [24] untersucht.

Im Gegensatz dazu wird die Stabilität von plattenförmigen Bauteilen nach EN 1993-1-5 [23] überprüft. Insofern ist für den Polygonturm, der aus mehreren Platten besteht, zunächst eine Klassifizierung vorzunehmen. Bei Polygonen mit wenig Ecken ( $E < 12$ ) liefert die Idealisierung als mehrere, aneinander

gereichte Platten genaue Ergebnisse über das Tragverhalten eines Polygonquerschnitts. Der Nachweis wird in diesem Fall nach EN 1993-1-5 [23] für Plattenbeulen geführt.

Vereinfachend werden dafür keine konischen Sektionen angenommen, sondern ein konstanter Eckdurchmesser über die gesamte Länge. Außerdem wird die Spannungsverteilung als konstante Druckspannung über die gesamte Plattenbreite angenommen. Die Beulsteifigkeit eines Polygonquerschnitts steigt mit höherer Eckanzahl, da die Einzelbeulfelder der Platten kleiner werden und die stützenden Plattenränder bzw. Kanten engere Abstände besitzen.

Bei steigender Kantenanzahl ( $E > 18$ ) wird das Beulfeld durch die stumpferen Eckwinkel weniger auf die Seitenflächen (Platten) begrenzt. Daher nähert sich das Stabilitätsverhalten eines Polygonquerschnitts mit steigender Eckanzahl an das Stabilitätsverhalten eines Kreisringquerschnitts an. Dieser Übergangsbereich kann zu einer unterschiedlichen Einschätzung hinsichtlich der Stabilität führen, je nachdem welcher Ansatz nach Norm gewählt wird.

### **7.2.1 Stand der Forschung zur Stabilität von polygonalen Türmen**

Die bisherigen Forschungsarbeiten waren auf die Einordnung in den beiden Versagensfällen fokussiert [13]. Während sich einige Forschungsprojekte mit der Kategorisierung in die besagten Versagensfälle beschäftigt haben, untersuchte Reinke 2014 die Stabilität von polygonalen Querschnitten, um ein numerisches Berechnungsverfahren zu entwickeln, mit dem die Tragfähigkeit von Polygonmasten losgelöst von einer solchen Fallzuordnung bestimmt werden kann [13].

Dazu prüfte Reinke in seiner Dissertation 20 Proben in einem 3-Punkt Biegeversuch, s. Abbildung 7-1. Die Prüfkörper verteilen sich auf drei verschiedene polygonale Querschnitte (6E, 12E und 24E), sowie auf einige Kreisringquerschnitte als Referenz. Die Polygone wurden in verschiedenen Ausrichtungen geprüft, um sowohl das Tragverhalten für eine Biegung über Eck, als auch für eine Biegung über die Kante zu untersuchen [13].

Die geprüften Querschnitte weisen sowohl die gleiche Wanddicke, als auch das gleiche elastische Widerstandsmoment in ihrer jeweiligen Prüfrichtung auf. Daher sind die Eckdurchmesser verschiedener Proben zwangsläufig unterschiedlich [13].

Reinke prüfte über einen geschickten Versuchsaufbau stets zwei gleiche Proben zeitgleich, indem diese jeweils an einem Ende mit derselben Platte verschweißt werden und am anderen Ende (ebenfalls über angeschweißte Platten) auf Böcken frei aufliegen. Die Kraft wird von oben auf die mittlere Platte aufgebracht und erzeugt bei gleichen Proben zwei identische Biegebelastungen mit je einer fest eingespannten Lagerung an der mittleren Platte [13].



*Abbildung 7-1: Dreipunkt-Biegeversuch nach [13]*

Der Versuchsaufbau in diesem Forschungsvorhaben muss aus verschiedenen Gründen anders geplant werden:

1.) Laborkapazitäten:

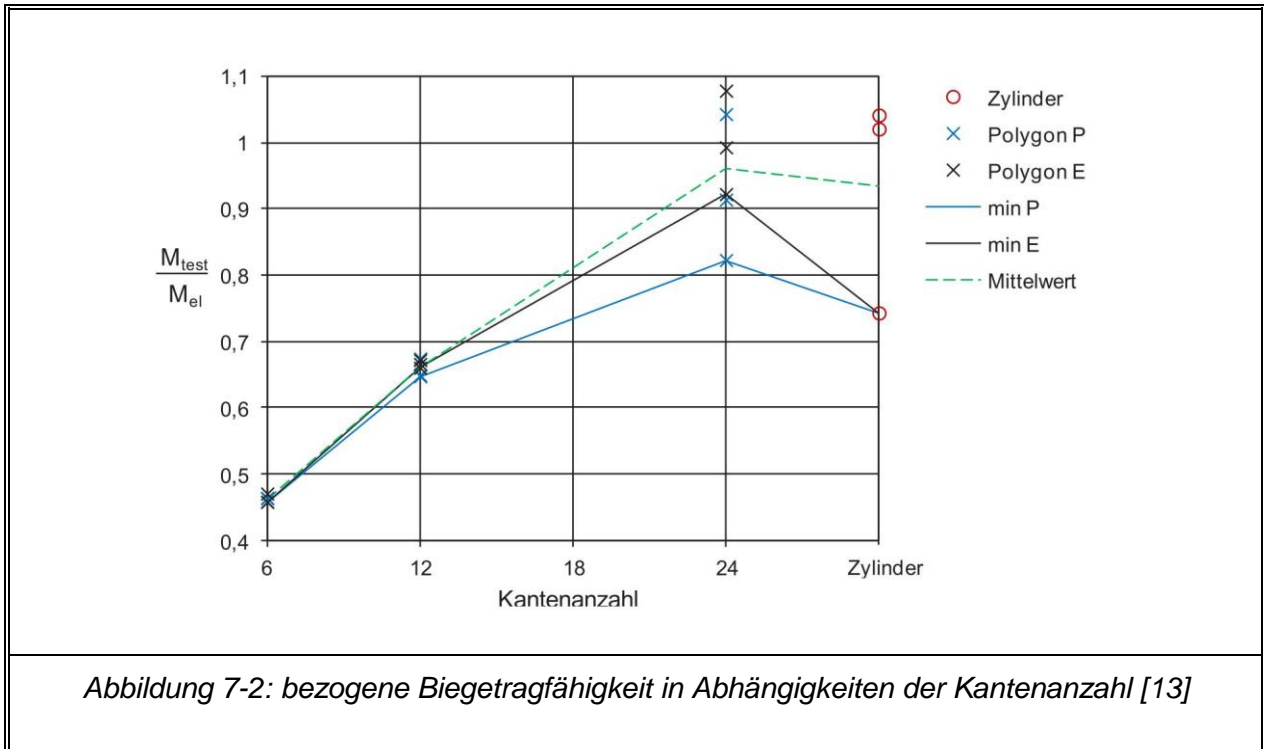
Da jede Probe im geplanten Versuch aus jeweils zwei längsseitig verschraubten Sektionen bestehen soll, ist die verfügbare Gesamtlänge für das Prüfen zweier Proben gleichzeitig nicht ausreichend. Außerdem benötigt dieser Aufbau die doppelte Prüfkraft. Dieses wäre ein Ausschlusskriterium für den Versuchsaufbau.

2.) Probenanzahl:

Aufgrund der Fertigungskosten sowie der benötigten Entwicklungsarbeit ist das Budget nur für drei Versuchskörper ausreichend. Da davon mindestens einer ein voll verschweißter polygonaler Querschnitt sein soll (Referenz) und die Flächenträgheitsmomente somit nicht identisch sind, würde sich die Belastung nicht gleichmäßig verteilen. Der Versuchsaufbau für dieses Forschungsprojekt erfordert deshalb eine Einspannvorrichtung an einem Ende der Turmsektionen.

Die Traglastversuche von Reinke haben ergeben, dass Polygone bei gleichem Masseneinsatz und gleichem Widerstandsmoment eine Steigerung der Biegetragfähigkeit mit steigender Eckanzahl aufweisen. Die Steigerung der Tragfähigkeit vom 6-Eck zum 24-Eck beträgt im Versuch mindestens

70% der durchschnittlichen Tragfähigkeit aus allen Versuchen dieser Kategorie. Einige Prüfkörper versagten im plastischen Bereich. Die großen Streuungen beim 24-Eck und bei den Kreisringquerschnitten korrelieren mit den vorab gemessenen Imperfektionen [13].



Die Versuchsergebnisse zeigen, dass ein Stabilitätsversagen in den meisten Fällen den Grenzzustand der Tragfähigkeit bei den Polygonquerschnitten darstellt.

### 7.3 Kritische Beulspannung für Einzelfeldbeulen nach EN 1993-1-5

Für das Beispiel aus Kap. 7.1 (Spannungsanalyse) wird in diesem Kapitel die kritische Beulspannung für das Einzelfeldbeulen verglichen. Dazu wurde der Kreisringquerschnitt auf Schalenbeulen nach EN 1993-1-6 [24] untersucht.

Die polygonalen Querschnitte wurden hingegen nach EN 1993-1-5 [23] auf Plattenbeulen untersucht, wobei folgende Annahmen getroffen wurden. Es wird ein konstanter Eckdurchmesser über die Sektionslänge angenommen. Außerdem wird die in der dargestellten Belastungsrichtung maximale Druckspannung als konstante Druckspannung über die gesamte Plattenbreite angesetzt. Die Daten in Tabelle 7-2 geben die Ausnutzung der Biegetragfähigkeit an. Wenn diese mit den experimentell ermittelten Ergebnissen von Abbildung 7-2 verglichen werden, liegen die kritischen Beulspannungen der 12- und 16-Ecke in einem plausiblen Bereich. Die Ergebnisse zeigen, dass Polygonquerschnitte mit einer hohen Eckanzahl ein Potenzial für eine höhere Biegetragfähigkeit haben, wenn das Versagen dem Plattenbeulen zugewiesen werden kann.

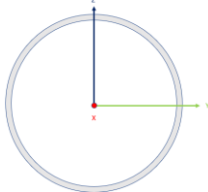
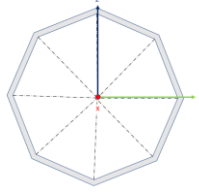
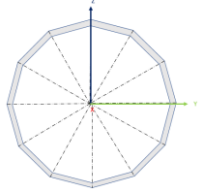
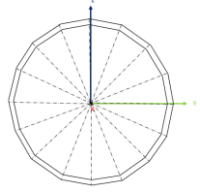
Querschnitt		Kreisprofil	Achteck	Zwölfeck	Sechszehneck
Skizze					
Querschnittsfläche A	[m <sup>2</sup> ]	0,250			
Durchmesser D	[m]	4,00	4,10	4,04	4,02
Eck-Anzahl n	[-]	"-"	8	12	16
Blechdicke t	[mm]	20			
Seitenlänge	[m]	"-"	1,57	1,05	0,78
Biegemoment M <sub>y</sub>	[kNm]	40'000			
Widerstandsmoment W <sub>y</sub>	[m <sup>3</sup> ]	0,247	0,228	0,238	0,242
Biegespannung σ <sub>x</sub>	$[\frac{N}{mm^2}]$	161,56	175,02	167,75	165,21
Streckgrenze	$[\frac{N}{mm^2}]$	355			
Plattenlänge	[m]	20			
Krit. Beulspannung	$[\frac{N}{mm^2}]$	233,75	182,02	252,10	311,14
Krit. Beulspannung/ Streckgrenze	[%]	65,50	51,30	71,01	87,65

Tabelle 7-2 Stabilitätsanalyse für verschiedene Turmquerschnitte

## 7.4 Grenzzustand der Ermüdung

Zusätzlich zum Grenzzustand der Tragfähigkeit ist bei dynamisch beanspruchten Bauteilen von Windenergieanlagen die Betriebsfestigkeit für die geplante Betriebsdauer von 20 Jahren sicherzustellen, wofür der Grenzzustand der Ermüdung bekannt sein muss.

Ein Ermüdungsversagen kann z.B. durch zyklische Zug- und Druckbelastungen der Rotorblätter (Wechselast) sowie durch turbulente Windbelastungen auf den Turm selbst hervorgerufen werden, wobei sehr große Lastwechselzahlen über die gesamte Betriebsdauer zu beachten sind.

Weder der Nachweis der Zeitfestigkeit (Ermüdung), noch die Untersuchung der Dauerfestigkeit sind Gegenstand dieser Forschungsarbeit. Daher werden folgende Aspekte nur der Vollständigkeit halber erläutert. Es wird darauf hingewiesen, dass nach den Traglastversuchen weitere Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit unumgänglich ist. Der Versuchsaufbau, der während dieses Forschungsvorhabens entwickelt wurde, kann zukünftig auch für dynamische Prüfungen genutzt werden.



## 7.5 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit von Türmen ist gegeben, wenn es keine dauerhaften Resonanzeffekte oder Vibrationen gibt. Im Idealfall liegen die relevanten Eigenfrequenzen des Turms außerhalb der im Betrieb auftretenden Anregungsfrequenzen.

Des Weiteren ist die Turmkopfauslenkung ein Kriterium für die Bemessung von WEA und muss bestimmte Grenzwerte einhalten. Dafür ist auch eine ausreichende Biegesteifigkeit der Turmsektionen erforderlich.

## 8 Referenzanlage für die nächste Generation von Onshore-WEA

Mit Hilfe der Marktrecherche im Arbeitspaket AP 1-1 wurde eine geeignete Referenzanlage für den modularen Polygonturm definiert, die sowohl den benötigten Vorsprung zum Stand der Technik wahrt, als auch alle benötigten Lasten bereitstellt.

Unter den fiktiven Referenzanlagen wird die Optimus 200 mit 10 MW Nennleistung für den Onshore-Einsatz ausgewählt, wobei die Nabenhöhe ebenfalls auf 200 m angehoben wird (s. Tabelle 8-1).

*Tabelle 8-1: Überblick für Referenzanlagen im Vergleich zum Stand der Technik*

Parameter	Einheit	Verfügbare Referenzanlagen			Stand der Technik			Ziel: Turm-Design
		NREL 5MW	DTU 10 MW	Optimus 200	Vestas V150-5.6	Nordex N-163-5.X	GE Cypress 6.0-164	Optimus 200 Onshore
On- / Off-shore	-	Off-	On-	Off-	On-	On-	On-	Onshore
Jahr	-	2009	2013	2018	2019	2020	k.A.	k.A.
Nennleistung	MW	5.0	10	10	5.6	5.X	6.0	10
IEC-Turbine Class	-	I B	I B	I A	S	S	S	A
Rotor-Durchmesser	m	126	178	200	150	163	164	200
Nabenhöhe	m	90	119	143	105-166	164	167	200
Rotor-schubkraft	kN	~781	4'605	4'944	k.A.	k.A.	k.A.	4'944

Folgende Kennwerte werden als Referenz für die Arbeiten in diesem Forschungsprojekt definiert:

Standort:	Onshore
WEA-Typ:	Optimus 200
Nennleistung:	10 MW
Rotordurchmesser:	200 m
Nabenhöhe:	200 m
Turmfuß:	größer als 4.3 m Eckdurchmesser

## 9 Aerodynamischer Einfluss des Turmquerschnitts auf die Windlasten

Für die Referenzanlage Optimus 200 steht ein Dokument als Load-Report zur Verfügung, der auch die maßgeblichen Belastungen für den Turmkopf beinhaltet. In Ergänzung dazu müssen die Windlasten infolge der direkten Anströmung auf den Turm selbst nach DIN EN 1991-1-4 [25] ermittelt werden.

In der DIN EN 1991-1-4 [25] sind verschiedene Formfaktoren definiert, die unter anderem die aerodynamischen Einflüsse des Turmquerschnitts berücksichtigen. Für einen bestimmten Eckdurchmesser nähern sich die Windlasten ab dem Typ 12E immer weiter dem Wert für einen Kreisringquerschnitt an.

## 10 Anforderungsanalyse für das Turmdesign

Für das zu entwickelnde Turm-Design wurde zunächst eine Anforderungsanalyse im Arbeitspaket AP 2-1 durchgeführt, wobei die Aspekte hinsichtlich Fertigung, Transport und Montage berücksichtigt werden. Die erstellte Spezifikation für das Turmdesign ist in der Tabelle 10-1 aufgeführt.

Tabelle 10-1: Spezifikationen für eine Turmauslegung

Anforderung	Wert
Turmkopflasten	DLC{ XE "DLC" \t "Design load case" }6.2
Gondelmasse	674 to
normativer Ansatz für Windlasten auf den Turm	DIN EN 1991-1-4 [25]
maximale Breite eines Wandmoduls (Fertigung und Transport)	3.00 m
fertigungsbedingte maximale Sektionslänge	28.00 m
maximaler Eckdurchmesser auf Höhe des Blattdurchgangs	8.23 m
maximaler Eckdurchmesser am Turmfuß (bei Plattenbreite von 3 m)	12.36 m
maximales Gewicht einer Montageeinheit	60 to
maximale Anzahl der Montagehübe je Sektion	8

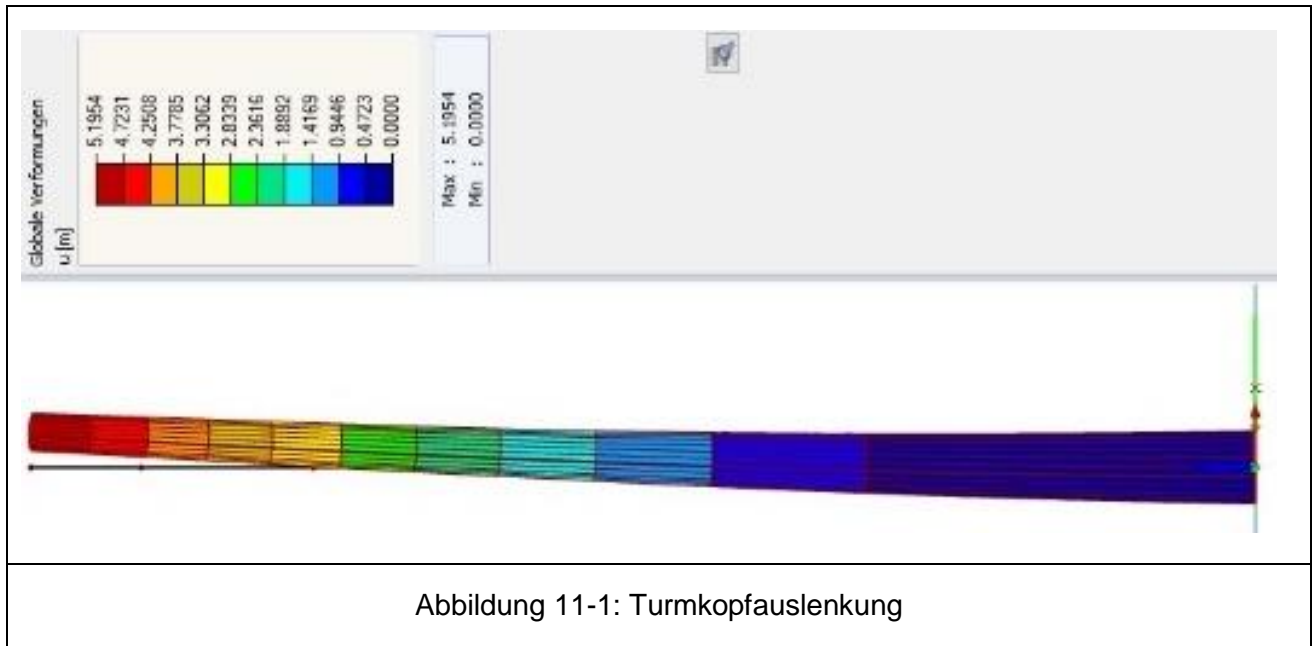
## 11 Vorbemessung und Auslegung des modularen Polygonturms

Da es durch die Windlasten auf den Turm eine Wechselwirkung zwischen der Querschnittsgeometrie und einem nicht zu vernachlässigen Teil der Gesamtbelastung gibt, kann eine spannungsoptimierte Geometrie nur iterativ ermittelt werden.

Dazu wurde eine Berechnungsprozedur im Arbeitspaket AP 3-1 programmiert, mit dem die Belastungen für beliebig wählbare Querschnitte in Abhängigkeit von der Höhe nach DIN EN 1991-1-4 [25] berechnet werden und anschließend ein Spannungsnachweis je Bauteil geführt werden kann. Damit können zukünftig bautechnische Nachweise in parametrisierter Form durchgeführt werden.

Tabelle 11-1: Turmdata nach Vorbemessung

	Sektion	Kopf-Durchmesser	Fuß-Durchmesser	Wanddicke	Sektionslänge
		[D_top]= m	[D_bot]=m	[t]=mm	[L_Sect]=m
196,00	1	6.00	6.07	13	18
178,00	2	6.30	7.00	23	28
150,00	3	7.00	7.75	29.5	24
126,00	4	7.75	8.05	34	20
106,00	5	8.05	8.75	38	19
87,00	6	8.75	9.44	41	19.5
67,50	7	9.44	10.15	42	19.5
48,00	8	10.15	10.77	43	17.0
31,00	9	10.77	11.35	43	16.0
15,00	10	11.35	11.90	43	15.0
00,00					



## 12 Konzeptentwicklung modularer Polygonturm

Nachdem die Referenzanlage definiert wurde, wurde das Konzept für die modulare Umsetzung erstellt. Dazu wurde zum einen die Konstruktion in zwei Teilfunktionen genauer definiert. Die Teilfunktionen werden in den Kapiteln 12.1 und 12.2 im Detail beschrieben.

### 12.1 Montagekonzept der Doppelwandelemente zu einer gesamten Turmsektion

Die übergeordnete Teilfunktion „Längsverbinding“ ermöglicht eine modulare Bauweise, wobei die einzelnen Wandelemente nach dem Transport auf der Baustelle an der Längskante zu einer geschlossenen Sektion zusammengesetzt werden.

Durch den konischen Zulauf der Turmsektion vom Turmfuß zum Turmkopf, sind die einzelnen Wandelemente grundsätzlich trapezförmige Bleche. Deshalb ist das Montagekonzept von Spundwänden, bei dem ein Wandelement an der einen Kante das Federprofil und auf der anderen Seite das Schlossprofil aufweist, nicht ohne weitere Anpassungen anwendbar.

Die Abbildung 12-1 zeigt auf der linken Seite, dass bei dem Spundwandkonzept die Montage des letzten Wandelements durch den konischen Verlauf über die Sektionslänge nicht möglich ist.

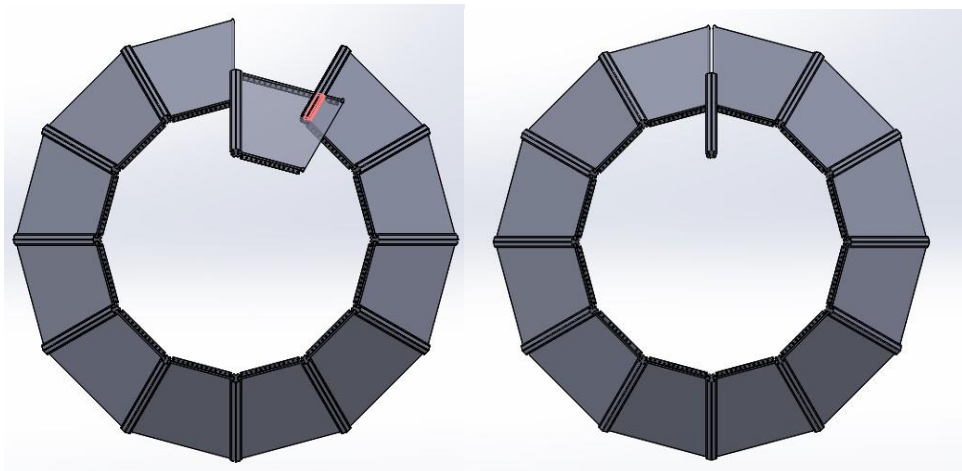


Abbildung 12-1 Spundwandkonzept (links) und Montagekonzept FH Kiel (rechts)

Deshalb muss die Profilverbinding aus drei einzelnen Bauteilen bestehen. Somit kann die letzte Platte in Position gebracht werden und wie in Abbildung 12-1 auf der rechten Seite gezeigt, durch die von oben eingefädelt Formstücke fixiert werden.

## 12.2 Fertigungskonzept Profilverbindung

Nach einigen insolvenzbedingten Umstellungen der Fertigungsmöglichkeiten bei der Firma Schwerter Profile GmbH wurde eine warmwalzbare Profilverbindung abgestimmt. Da durch den Walzprozess keine Geometrie mit zwei Hinterschnitten möglich ist, kann der Kantenwinkel nicht mehr über das Formstück vorgegeben werden. Deshalb müssen die Profilstäbe um  $11,25^\circ$  abgewinkelt werden. Ein zweiseitiges Umschließen der Profilstäbe durch das Formstück ist mit der fertigungstechnischen Limitierung ebenso nicht möglich. Daher wurde die in Abbildung 12-2 gezeigte Ankergeometrie als Basis für das Formstück ausgewählt.

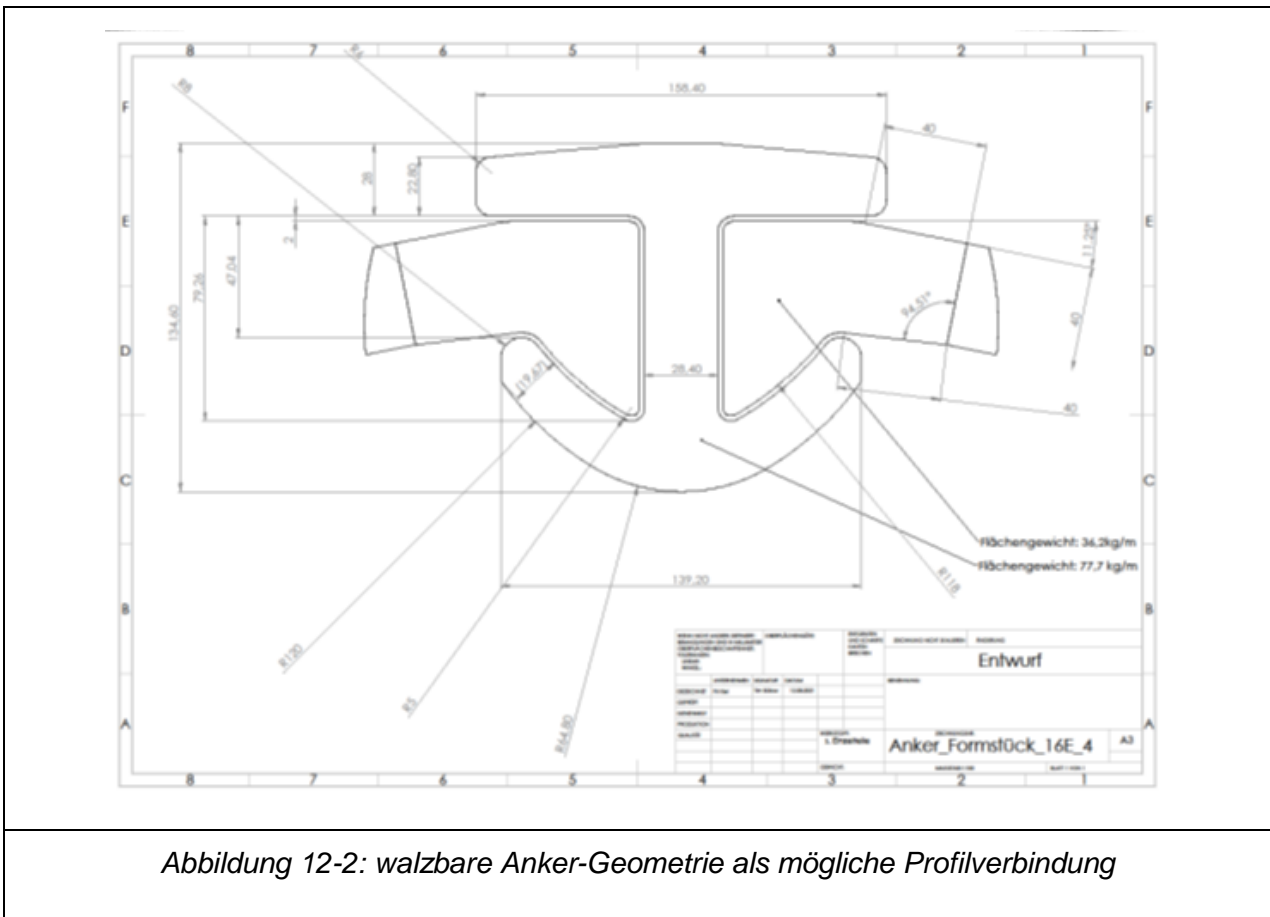


Abbildung 12-2: walzbare Anker-Geometrie als mögliche Profilverbindung

Die Dimensionierung der Schenkeldicken wurde von dem Doppelwulstprofil übernommen. Durch die eingeschränkten Möglichkeiten beim Walzprozess, aber auch durch die vorangeschrittene Projektlaufzeit, ist eine komplette Neuentwicklung nicht mehr möglich gewesen.

## 12.3 Montageablauf auf der Baustelle

### 12.3.1 Vormontage vom Doppelwandelement „01-DWE-01“ am Boden

Für den Montageprozess werden neben einem Arbeitspodest und einer Leiter außerdem an jedem Doppelwandelement (DWE) eine teleskopierbare Montagestütze benötigt, die zur temporären Lagesicherung dient.

### 12.3.2 Stellen und Sichern vom Doppelwandelement „01-DWE-01“

Das vormontierte DWE kann im zweiten Montageschritt gehoben und auf das vorbereitete Fundament gestellt werden. Die in Abbildung 12-3 rechts angedeuteten Stehbolzen müssen dazu in das passende Bohrbild am unteren Flansch eingefädelt werden. Als Führung dienen dabei die zuvor platzierten Eckverbinder, deren zusätzliche Funktionen in der weiteren Beschreibung des Montageablaufs verdeutlicht werden.

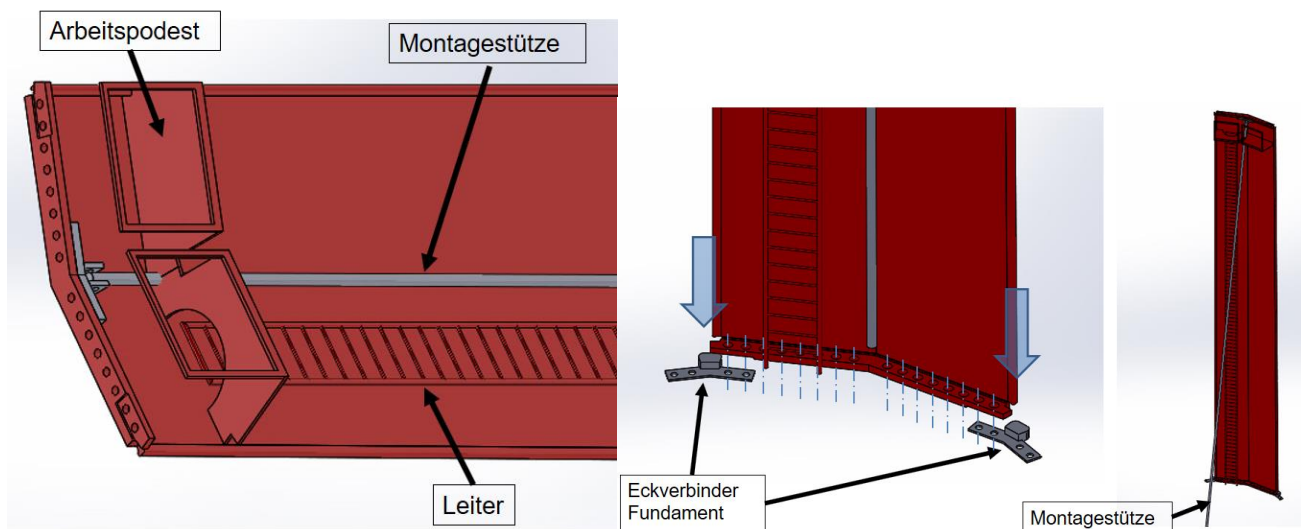


Abbildung 12-3: Stellen und Sichern des Doppelwandelements 01-DWE-01

Zum Sichern wird das DWE noch am Kranhaken hängend am unteren Flansch der vorigen Sektion und am Fundament verschraubt. Zusätzlich wird die vormontierte Montagestütze ausgeklappt und am freien Ende über das Fundament angeschlagen, so dass das DWE zusätzlich abgestützt wird. Anschließend kann das erste Arbeitspodest von Servicetechnikern genutzt werden.

### 12.3.1 Vormontage vom Doppelwandelement „01-DWE-02“ am Boden

In analoger Vorgehensweise wird das zweite DWE (s. Abbildung 12-4 links) am Boden vorbereitet. Dieser Montageschritt unterscheidet sich zum Ersten „01-DWE-02“ lediglich durch ein zusätzliches Montagewerkzeug, welches „Montageverbinder“ genannt wird.

Dieser Montageverbinder hat die Aufgabe, die nachträglichen DWE im oberen Bereich zu fixieren, bis die Formstücke eingeschoben worden und die Aufgabe des Kraftschlusses zwischen den DWE übernehmen. Dazu wird der Eckverbinder an der Ecke des oberen Flansches montiert, die dem bereits gestellten DWE zugewandt ist.

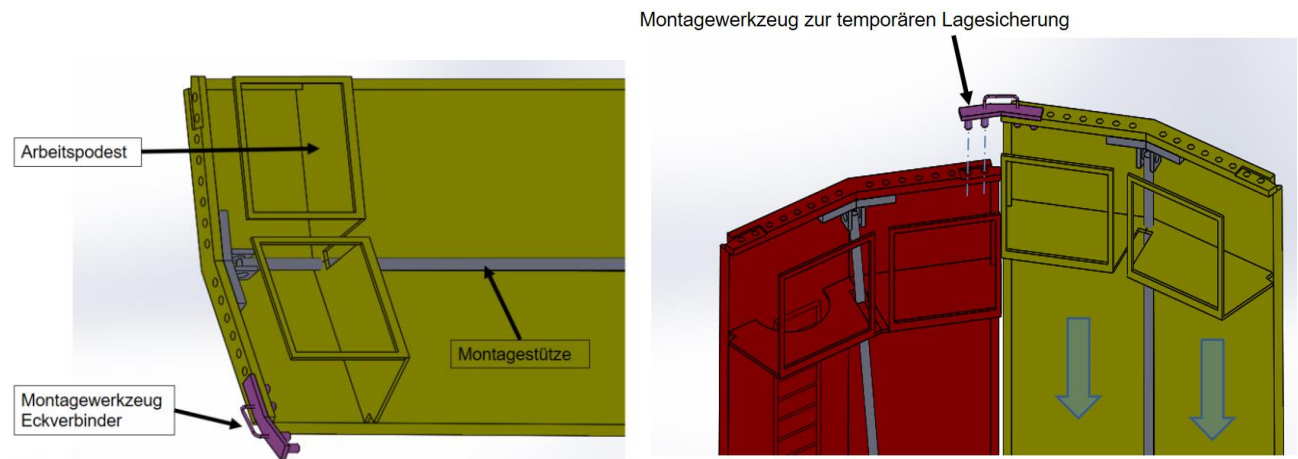


Abbildung 12-4: Vormontage / Stellen und Sichern vom Doppelwandelement 01-DWE-02

### 12.3.2 Stellen und Sichern vom zweiten Doppelwandelement „01-DWE-02“

Die Montage des zweiten DWE verläuft ähnlich wie beim ersten DWE. Allerdings werden Bolzen des Montagewerkzeugs zusätzlich in die Flanschbohrungen des bereits stehenden DWE eingefädelt. Das Einführen und Verschrauben des Montagewerkzeugs kann sicher durch zwei Monteure von dem Arbeitspodest des bereits gestellten DWE aus erfolgen. Weitere Monteure übernehmen zeitgleich wieder das Verschrauben am unteren Flansch und das Abstützen mit der Montagestütze.

### 12.3.3 Montage weiterer Doppelwandelemente

Der Montageablauf der Doppelwandelemente #03 bis #07 ist identisch zum zweiten DWE. Die Arbeitspodeste sind vollumfänglich begehbar, so dass ein kontinuierlicher Montageablauf stattfinden kann. Ab einer bestimmten Anzahl an DWE werden keine weiteren Montagestützen mehr benötigt, weil sich die DWE gegenseitig ausreichend stützen.

Die einzige Besonderheit bei DWE08 ist, dass die Montagewerkzeuge an beiden Seiten montiert werden müssen, d.h. sowohl am DWE01 als auch am DW07 sind die Verbinder gleichzeitig einzusetzen.

### 12.3.4 Abschließende Montage über die Formstücke

Nachdem die Montagewerkzeuge zu einander ausgerichtet wurden, können anschließend jeweils zwei Profilstäbe zweier unterschiedlicher DWE über ein Formstück verbunden werden. Dazu wird am Kran auf eine Vortriebseinheit, ähnlich wie beim Montieren von Spundwänden, gewechselt, welches die Formstücke zwischen die Wandelemente einfädelt.

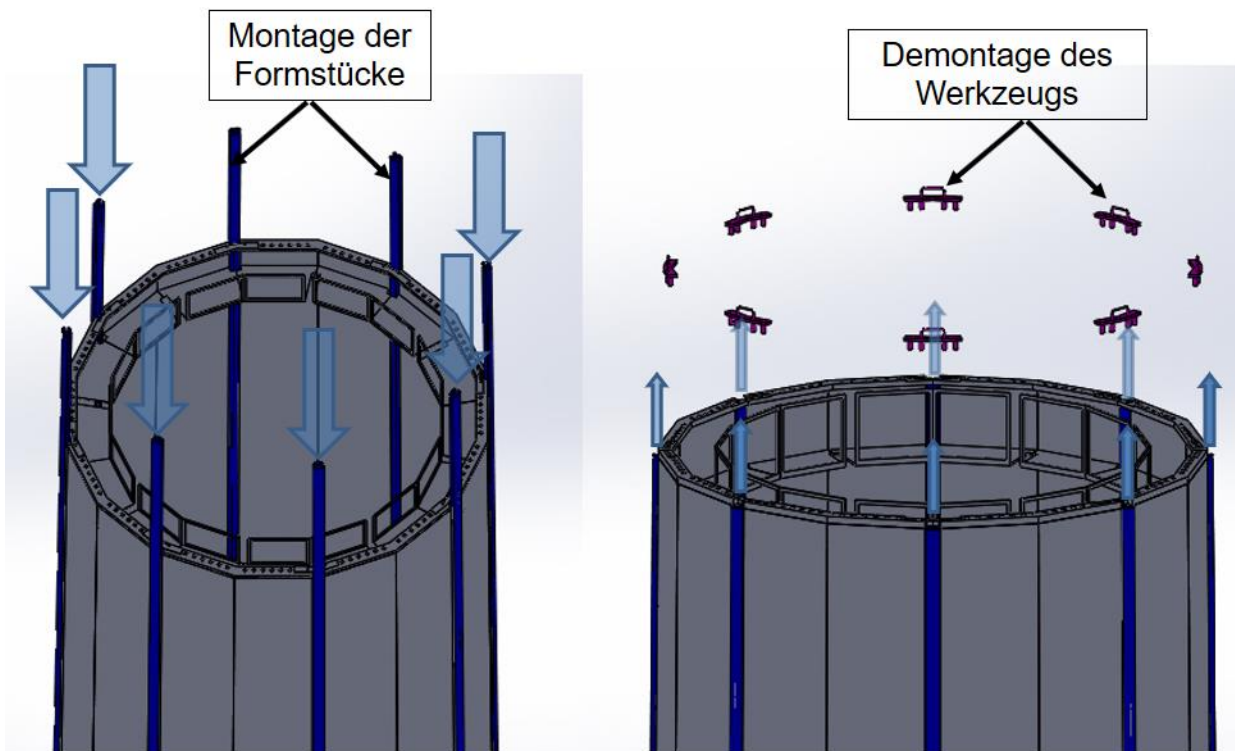


Abbildung 12-5: Montage der Formstücke

Nachdem alle Formstücke eingeschoben wurden, können die Montagewerkzeuge entfernt werden. Die erste Turmsektion ist somit fertiggestellt und weist einen geschlossenen Polygonquerschnitt auf, der für sich allein standsicher ist.

### 12.3.5 Vormontage vom Doppelwandelement „02-DWE-01“ am Boden

Die Vormontage der weiteren Sektionen ist ähnlich zur Vormontage der Bodensektion „01-DWE-01“, siehe Kapitel 12.3.1. Allerdings sind nun Eckverbinder an den unteren Ecken zu befestigen. Die Eckverbinder erfüllen zum einen den Zweck, die im oberen Ringflansch der Sektion 1 notwendigen Aussparungen für das Einfädeln der Formstücke nachträglich zu verschließen. Dadurch können die Eckverbinder außerdem den Längsschub zwischen den Profilverbindungen zusätzlich blockieren, was sich positiv auf die Gesamtsteifigkeit auswirkt.



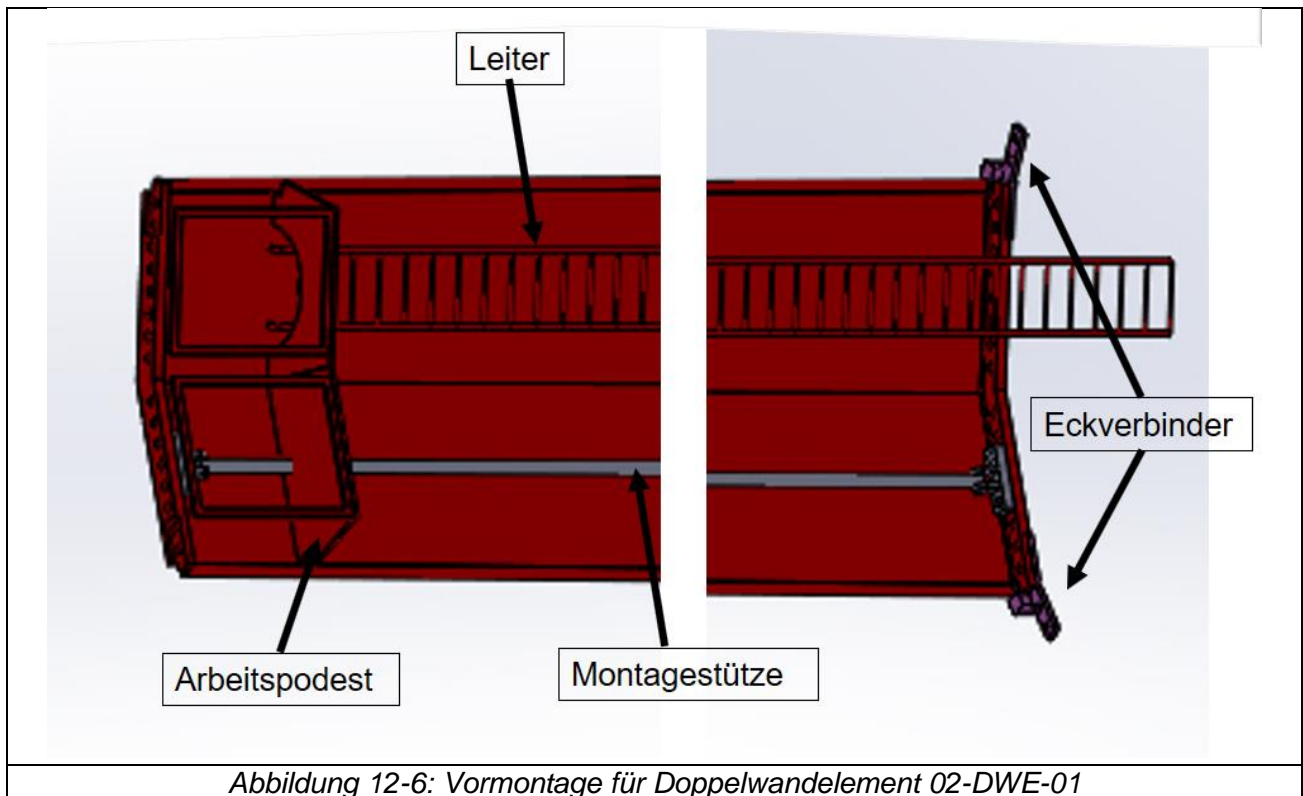


Abbildung 12-6: Vormontage für Doppelwandelement 02-DWE-01

### 12.3.6 Stellen und Sichern vom DWE „02-DWE-01“

Die vormontierten Eckverbinder können zusammen mit dem kompletten DWE angehoben werden und helfen außerdem, dass am Kran hängende DWE genau auf die untere Sektion zu zentrieren. Am Doppelwandelement sind bereits Montagestützen, Leiterraufgänge und Arbeitspodeste vormontiert.

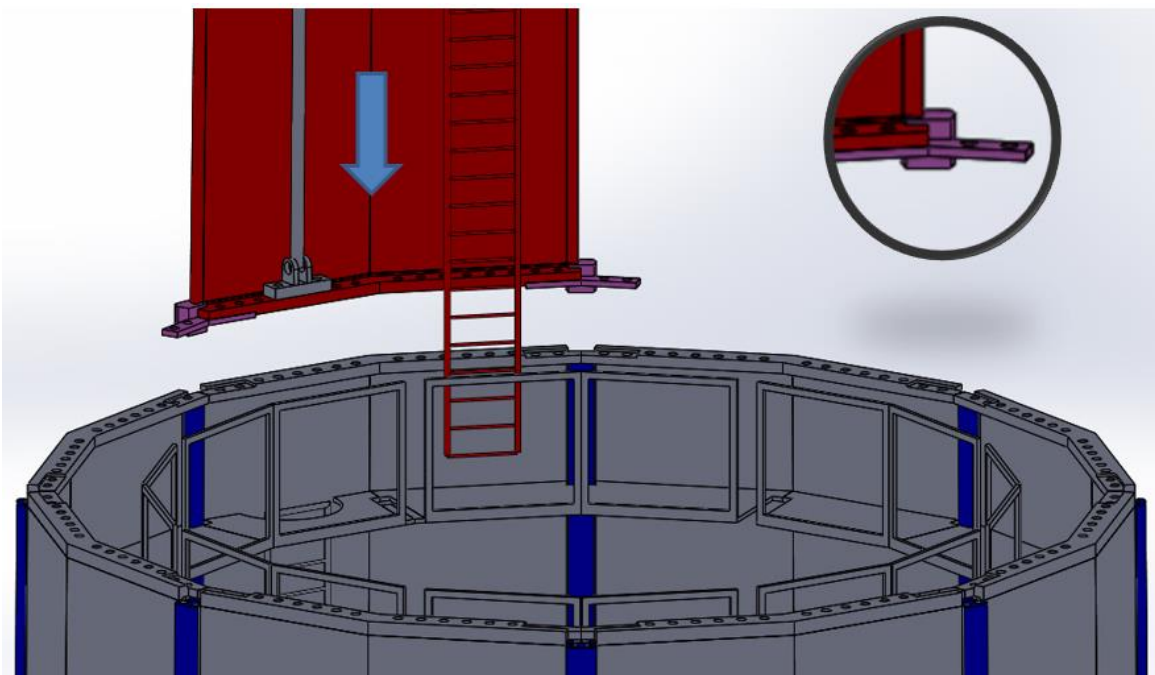


Abbildung 12-7: Stellen und Sichern 02-DWE-01

Das Sichern erfolgt über die Flanschverschraubung und die Montagestütze, die auf dem gegenüberliegenden Flansch abgestützt werden kann. Die weiteren Schritte der Vormontage, des Positionierens und Sichern der verbleibenden Wandelemente 02-DWE-02 bis 02-DWE-08 ist analog zu den Schritten für die erste Turmsektion, weshalb auf die Erläuterungen in den vorigen Kapiteln verwiesen wird.

## **12.4 Tragfähigkeit für Schubspannungen infolge von Querkräften**

Unter Last muss die Profilverbindung die auftretenden Schubspannungen aufnehmen, damit die Sektion als geschlossener Polygonquerschnitt hinsichtlich der Normalspannungsverteilung betrachtet werden darf.

## **12.5 Tragfähigkeit für Biegespannungen infolge von Biegemomenten**

Unter Last muss die Profilverbindung die auftretenden Biegespannungen eines geschlossenen Polygonturms ertragen.

## **13 Tragfähigkeit der Flanschverbindung**

### **13.1 Nachweis der vorgespannten Schraubenverbindung**

Es wurden zunächst die bautechnischen Nachweise für die Schraubenverbindungen der untersten Turmsektion mit der Einspannvorrichtung durchgeführt. In der Berechnung nach VDI2230 [26] muss die Belastung der Schraube über eine Zugbeanspruchung aus dem wirkenden Moment berechnet werden. Anschließend erfolgt die Vorauswahl für die Dimensionen der Schraube, unter Berücksichtigung der Belastungsarten [17], [18].

Aus Tabellen kann für bestimmte Montagebedingungen ein Anzugsdrehmoment bestimmt werden, bei dem die benötigte Mindestvorspannkraft erreicht wird. Diese Vorspannkraft ergibt zusammen mit der Zugkraft im Mantelblech die maximal auftretende Schraubkraft.

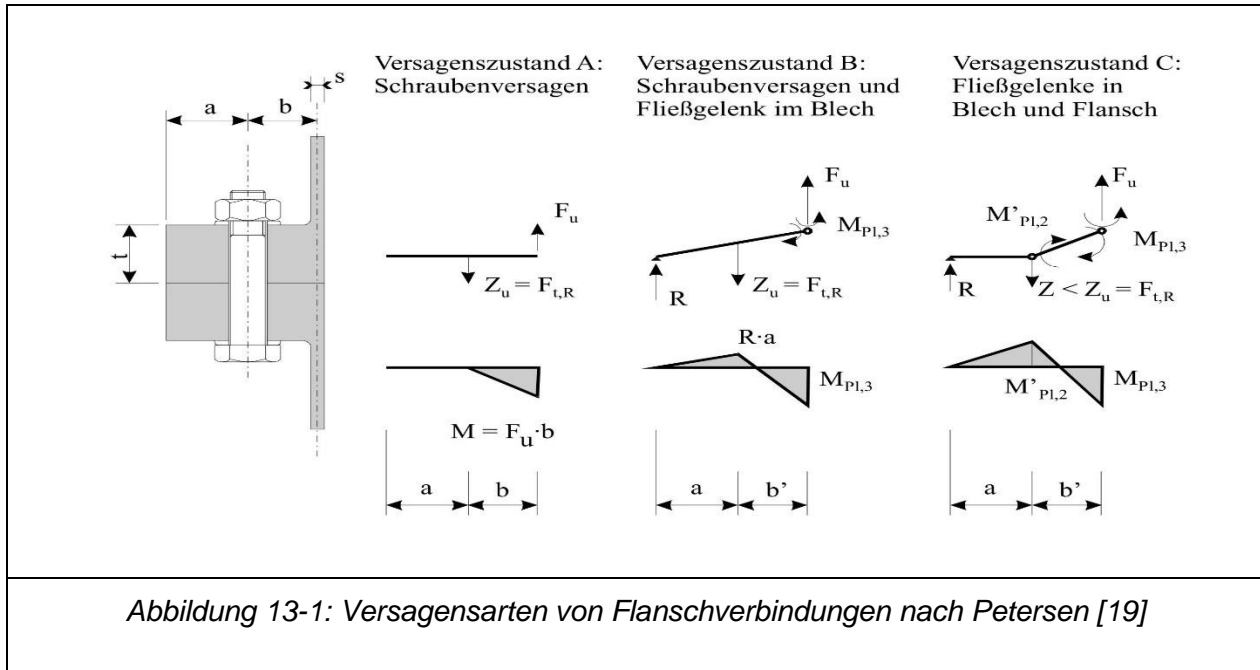
Sind alle Belastungen der SV bekannt, können anschließend Bemessungen für die Schraube, die Schraubenmutter und für die Auflageflächen durchgeführt werden.

Die Berechnungen haben ergeben, dass das Modell mit 36 Schrauben M12 x 1,75 der Güteklasse 10.9 unter Verwendung von 4 mm dicken HV-Scheiben nach EN14399-6 [27] mit einem Außendurchmesser von 24 mm zu befestigen sind.

Da die SV zwischen den Trennfugen und zur Lasteinleitung grundsätzlich mit der gleichen Schraubenanzahl umsetzbar ist, brauchen diese für die SV im Entwurfsstadium nicht weiter nachgewiesen werden. Der bei dieser SV etwas kleinere Lochkreis erhöht die Belastung durch das Biegemoment deutlich weniger, als dass das Moment durch den kürzeren Hebelarm sinkt.

### 13.2 Nachweis der Tragfähigkeit der Flanschverbindung

Neben der Berechnung der Schraubenverbindung muss zusätzlich überprüft werden, ob der Flansch die Belastungen während des Traglastversuches aufnehmen kann. Die Tragfähigkeit einer, wie im Abbildung 13-1 gezeigten Flanschverbindung, hängt von der Beanspruchbarkeit der Verschraubung (Versagensart A in Abbildung 13-1b), der Beanspruchbarkeit vom Anschluss zum Mantelblech (Versagensart B in Abbildung 13-1c) und der Beanspruchbarkeit des Flansches (Versagensart C in Abbildung 13-1 d) selbst ab.



Der Nachweis sieht allgemein den Vergleich der kleinsten Widerstandskraft (Grenztragfähigkeit)  $F_U$  mit der einwirkenden Zugkraft  $Z_u$  vor.

Im Versagenszustand A verformt sich der Flansch und das Mantelblech nicht wesentlich. Die Grenztragfähigkeit  $F_U$  lässt sich aus dem Kräftegleichgewicht über die Schraubenkraft bestimmen berechnen.

$F_u = F_{t,R}$	Grenztragfähigkeit nach Petersen Versagenszustand A	<i>Gl. (13-1)</i>
$F_u$ : Grenztragfähigkeit, $F_{t,R}$ : Grenztragfähigkeit der Schraube		

Im Versagenszustand B stellt sich zusätzlich zum Schraubenversagen eine plastische Verformung ein (unmittelbar am Übergang zwischen Flansch und Mantelblech). Gegen diese Verformung kann der betroffene Bereich bis zu einem Moment, dem sog. *plastischen Widerstand*  $M_{Pl,3}$  widerstehen. Vorausgesetzt, dass der plastische Widerstand bekannt ist, lässt sich die Grenztragfähigkeit mit dem Momentengleichgewicht bestimmen.

$F_u = \frac{F_{t,R} * a + M_{pl,3}}{a + b'}$	Grenztragfähigkeit nach Petersen Versagenszustand B	Gl. (13-2)
<p><math>F_u</math>: Grenztragfähigkeit  <math>F_{t,R}</math>: Grenztragfähigkeit der Schraube  <math>a</math>: Abstand zwischen Schraubenmittellachse und Flansch-Ende  <math>b'</math>: Abstand zwischen Schraubenachse und Fließgelenk  <math>M_{pl,3}</math>: plastisches Moment (Fließgelenk)</p>		

Da sich das Fließgelenk sowohl im Querschnitt des Mantelbleches, als auch im Querschnitt des Flansches einstellen kann, muss das plastische Moment  $M_{pl,3}$  für beide Varianten berechnet werden. Das Fließgelenk wird an der Stelle mit dem geringeren Widerstand auftreten.

$M_{pl,3} = \min \left\{ \begin{array}{l} M_{pl,N,BI} = \left[ 1 - \left( \frac{N}{N_{pl,BI}} \right)^2 \right] * M_{pl,BI} = \left[ 1 - \left( \frac{F_U}{c * s * f_{y,BI}} \right)^2 \right] * \frac{c * s^2}{4} * f_{y,BI} \\ M_{pl,V,Fl} = \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{V}{V_{pl,Fl}} \right)^2} \right] * M_{pl,Fl} = \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{F_U}{c * t * f_{y,Fl} / \sqrt{3}} \right)^2} \right] * \frac{c * t^2}{4} * f_{y,Fl} \end{array} \right.$	Gl. (13-3)
<p><math>M_{pl,3}</math>: maßgeblicher (geringerer) Momentenwiderstand am Zugblech  <math>M_{pl,N,BI}/M_{pl,V,Fl}</math>: tragender Anteil des Momentenwiderstandes im Blech bzw. im Flansch  <math>N/V</math>: wirkende Normalkraft im Flansch/ wirkende Schubkraft im Blech  <math>N_{pl,BI}/V_{pl,Fl}</math>: plastische Normalkraft des Flansches / plastische Schubkraft des Blechs  <math>M_{pl,BI}/M_{pl,Fl}</math>: möglicher Momentenwiderstand im Blech bzw. im Flansch  <math>F_U</math>: Grenztragfähigkeit der Flanschverbindung  <math>c</math>: Abstand zwischen den Schraubenachsen zweier Schrauben (in umlaufender Richtung)  <math>s</math>: Wandstärke vom Flansch  <math>t</math>: Dicke vom Flanschblech  <math>f_{y,BI}/f_{y,Fl}</math>: Streckgrenze von Blech/Flansch</p>	

Die in Gl. (13-3) dargestellte M/N- bzw. M/V- Interaktion ist in diesem Fall numerisch zu lösen. Der Versagenszustand B setzt jedoch ein Versagen der Schraubenverbindung voraus. Daher tritt dieser nur auf, wenn der plastische Widerstand im Flansch  $M_{pl,2}$  größer ist, als die Schraubenkraft mit dem Hebel  $a$  zur Randaufgabe ist. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, tritt Versagenszustand C ein.

Der Versagenszustand C setzt voraus, dass anstelle des Schraubenversagens sich ein weiteres Fließgelenk unmittelbar an der Schraube bildet. Der ursprüngliche Versagensfall C von Petersen geht von einem Fließgelenk unmittelbar in der Schraubenachse aus.

$F_u = \frac{F_{t,R} * a + M_{pl,3}}{a + b'}$	Grenztragfähigkeit nach Petersen Versagenszustand C	Gl. (13-4)
<p><math>F_u</math>: Grenztragfähigkeit  <math>F_{t,R}</math>: Grenztragfähigkeit der Schraube  <math>a</math>: Abstand zwischen Schraubenzentrum und Flansch-Ende  <math>b'</math>: Abstand zwischen Schraubenachse und Fließgelenk  <math>M_{pl,3}</math>: plastisches Moment</p>		

Wo genau sich das Fließgelenk bildet und welchen Einfluss die vorgespannte Schraube auf die Grenztragfähigkeit hat, ist Gegenstand der experimentellen und numerischen Forschung [20]. So gibt es verschiedene Überarbeitungen (Versagenszustände D und E) die den Einfluss der Verschraubung auf das Ausbilden des Fließgelenkes beinhalten [20].

Für den Nachweis der Flanschverbindungen des Modell-Körpers wurden die Versagenszustände D und E berücksichtigt. Die Berechnung hat ergeben, dass die Randbedingung für den Versagenszustand am Flansch der Lasteinleitung nicht erfüllt wird und sich somit nur die Versagenszustände A, (C), D und E einstellen können.

Die geringste Grenztragfähigkeit tritt im Versagenszustand D auf, bei dem von zwei Fließgelenken im Flansch ausgegangen wird. Ein Fließgelenk wird in diesem Berechnungsmodell direkt in der Schraubenachse und das andere direkt am Mantelblech angenommen. Der plastische Widerstand, der durch das Durchgangsloch der Schraube einseitig erheblich geschwächt wird, kann durch den Einfluss der Schraubendruckkraft leicht erhöht berücksichtigt werden [20].

Für die relevante Beanspruchung im Traglastversuch ergibt sich letztendlich eine Auslastung von 34 % für die Flanschverbindungen.

#### **14 Beanspruchbarkeit der Profilverbindung des modularen Polygonturms**

Da die Profilverbindung sowohl Einfluss auf die Tragfähigkeit als auch auf die Steifigkeit des Modells (gesamter Turm) hat, müssen diese Abhängigkeiten bei der Festlegung eines konkreten Prüfkörpers berücksichtigt werden.

Es wird eine reibungsbehaftete Verbindung zwischen den einzelnen Platten und Formstücken angenommen. Außerdem wird vermutet, dass die Profilverbinder eine Erhöhung der Steifigkeit bewirken, weil das Flächenträgheitsmoment gegen Biegung allein durch den Steineranteil erhöht wird. Da die Profilverbinder den axialen Verschiebungsfreiheitsgrad in Profillängsrichtung nicht (formschlüssig) sperren, kann es allerdings grundsätzlich zu Relativverschiebungen zwischen den einzelnen Bauteilen kommen. Voraussetzung für deren Auftreten ist das Überwinden der Haftreibung innerhalb der Profilverbinder, was Gegenstand der Forschungsarbeiten ist.

Tritt dies ein, verhält sich das System nicht mehr wie ein geschlossener Querschnitt, sondern vielmehr wie mehrere Einzelkörper. Dieser Effekt ist anschaulich in Abbildung 14-1 dargestellt, wo zwei einzelne Biegebalken übereinander liegen.



Abbildung 14-1: Balkenbeispiel

In Gl. (14-1) ist das Flächenträgheitsmoment eines Rechteckquerschnitt aufgeführt. Der linke Teil der Gleichung gilt, wenn die zwei Balken in der Auflagefläche fest mit einander verbunden sind. Es ergibt sich ein monolithischer Querschnitt mit dem Flächenträgheitsmoment  $I_{\text{ganz}}$ .

Sind die Balken im Kontaktbereich nicht mit einander verbunden und Längsschub wird zugelassen (Abbildung 14-1), wird das Flächenträgheitsmoment „ $I_{\text{geteilt}}$ “ als Summe der einzelnen Flächenträgheitsmomente angenommen.

Durch die dritte Potenz, die in die Höhe „H“ eingeht, ergibt sich für zwei Einzelquerschnitte nur ein Viertel des Flächenträgheitsmoments eines monolithischen Querschnitts. Jeder Balken weist für sich eine eigene Biegedruck- und Biegezug-Seite auf. Das verursacht eine doppelt so hohe Biegespannung in den jeweiligen Randfasern der Einzelbalken.

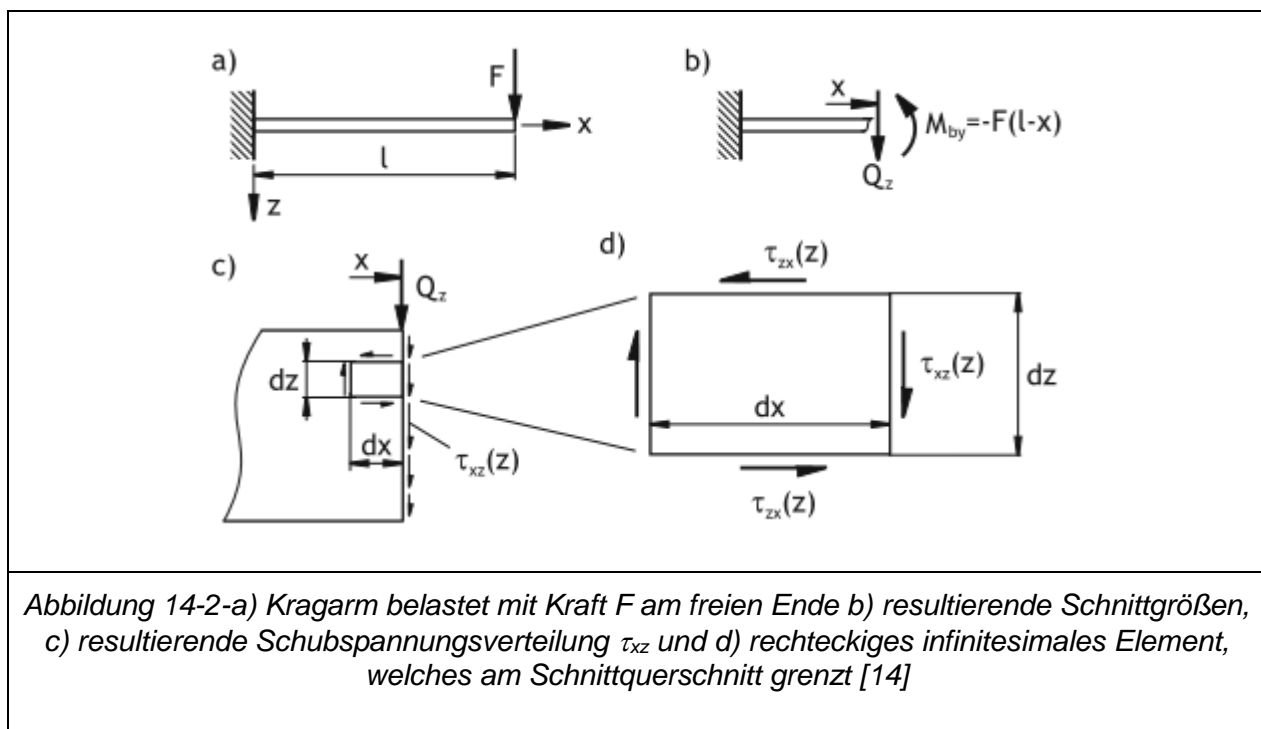
$I_{\text{ganz}} = b \times \frac{H^3}{12} \gg I_{\text{geteilt}} = 2 * b \times \frac{(0,5 * H)^3}{12}$	Unterschied Flächenträgheitsmoment eines geteilten und eines ganzen Rechteckquerschnitt	Gl. (14-1)
<p> <math>I_{\text{ganz}}</math>: Flächenträgheitsmoment eines durchgehenden Balken mit der Höhe H                      b: Breite des Trägers in diesem Beispiel konst.                      H: Höhe des Querschnitts in Belastungsrichtung  <math>I_{\text{geteilt}}</math>: Flächenträgheitsmoment zweier aufeinanderliegender Balken mit jeweils der Höhe 0,5 x H                 </p>		

Beim Auftreten von Relativverschiebungen ist mit einer lokalen Überbeanspruchung an den Doppelwandelementen zu rechnen, wo die Längsschubspannungen maximal sind.

Im folgenden Kapitel wird der Schubspannungsverlauf eines vollverschweißten Polygonturmes ermittelt, um eine Abschätzung für den auftretenden Längsschub zu erhalten. Die genaue Schubspannung, die sich über die modulare Profilverbindung tatsächlich übertragen lässt, ist dagegen selbst mit numerischen Simulationen (FEM) nur bedingt zu berechnen, da bei reibbehafteten Verbindungen sowohl baupraktische Reibwerte als auch fertigungs- und montagebedingte Toleranzen vorliegen, die als Imperfektionen im Modell zu berücksichtigen wären. Deshalb sollen Traglastversuche durchgeführt werden, weil bei Experimenten solche Nichtlinearitäten und Imperfektionen enthalten sind, womit eine Ermittlung von Traglasten realitätsnah erfolgen kann.

### 14.1 Belastung der Profilverbindung durch Schubspannungen infolge Querkraft

Durch die Profilverbindungen wird die geschlossene Querschnittsgeometrie unterbrochen, was insbesondere bei der Aufnahme der Längsschubspannungen eine Schwachstelle darstellen kann. In Abbildung 14-2 a) ist ein fest eingespannter Biegebalken zu sehen, der zunächst einmal als Voll-Körper betrachtet werden soll. In der Seitenansicht wird ein kleines Rechteck betrachtet. Die Querkräfte entlang den Schnittflächen lassen sich als Integrale der Schubspannungen  $\tau_{xz}(z)$  auffassen. Aufgrund des Momentgleichgewichts in der Ebene gilt Schubgleichheit für  $\tau_{xz}$  und  $\tau_{zx}$ .

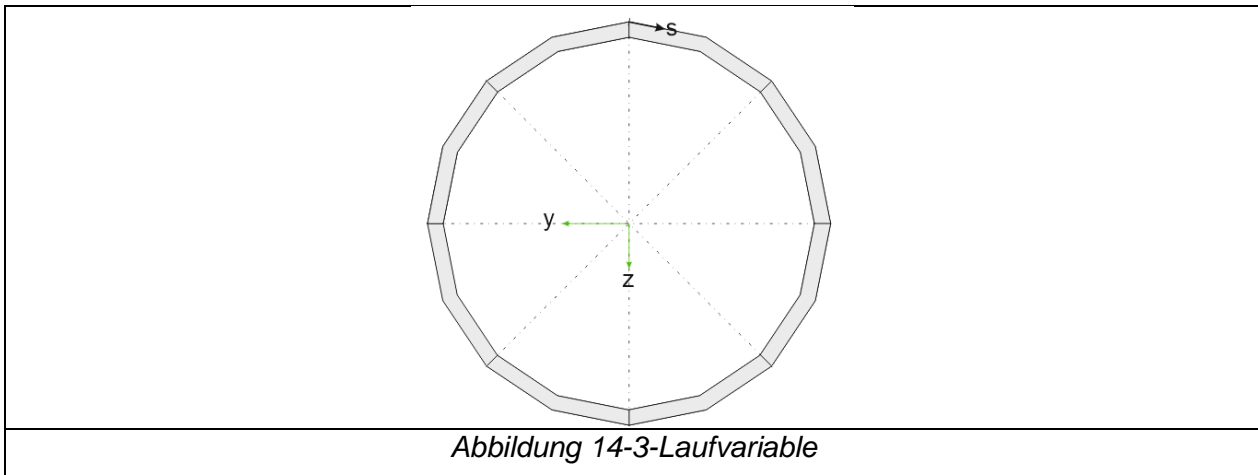


Bei einem geschlossenen zusammengesetzten Querschnitt müssen diese Längsschubspannungen bestimmt werden, um zu prüfen wie hoch der Längsschub ist, der von den Profilverbindungen übertragen werden muss.

$\tau(s) = \frac{q(s)}{t(s)}$	Schubspannung für dünnwandige Profile	Gl.(14-2) nach [16]
-------------------------------	---------------------------------------	---------------------

$\tau(s)$ : Schubspannung  
 $q(s)$ : Schubfluss  
 $t(s)$ : Wanddicke hier const.

Die Formel für den Schubfluss bei geschlossenen Profilen setzt sich grundsätzlich aus zwei Faktoren zusammen. Der variable Teil des Schubflusses ist bei einheitlicher Wanddicke abhängig von der umlaufenden Umfangsvariable „s“, die in Abbildung 14-3 dargestellt ist. Der Startpunkt der Umfangsvariable s kann beliebig im Querschnitt gelegt werden.



Der Startpunkt der Umfangsvariable liegt nicht wie bei einem offenen Profil an einem freien Ende. Daher kann der Schubfluss im Startpunkt auch nicht auf Null gesetzt werden, sondern der variable Teil muss um einen konstanten Startwert „q<sub>0</sub>“ ergänzt werden.

$q(s) = q'(s) + q_0$	Schubfluss bei geschlossenem Querschnitt	Gl. (14-3) nach [16]
$q'(s)$ : variabler Schubanteil $q_0$ : konstanter Schubanteil		

Um den variablen Anteil zu ermittelt kann dieser zunächst losgelöst betrachtet werden, um diesen dann mit dem konstanten Teil zu überlagern. In Gl. (14-5) ist die Formel des statischen Moments aufgeführt, welche sich aus der Querkraft  $Q_z$ , dem Flächenträgheitsmoment um die resultierenden Biegeachse sowie dem statischen Moment des Querschnitts in Integraler Form besteht.

$q'(s) = -\frac{Q_z}{I_y} * sm_y = -\frac{Q_z}{I_y} * \int z(s) dA$	Schubfluss bei geschlossenem Querschnitt	Gl. (14-4) nach [16]
$Q_z$ : Querkraft in Z-Richtung $I_y$ : Flächenträgheitsmoment um die Y-Achse $sm_y$ : statisches Moment $z(s)$ : Abstand zur schwere Achse $dA \rightarrow dt_{const} * ds$ totales Flächendifferential		



Da das Oberflächendifferential  $dA$  durch die Laufvariable  $s$  und der Wanddicke  $t$  (hier konstant) aufgespannt wird, wird die Abstandsfunktion zur Schwerachse  $z(s)$  nach  $s$  integriert, was zu einer quadratischen Funktion für das statische Moment führt.

$Sm_{y_i} = [t_i]_{t=0}^t * \left[ z_{i-1}(s = a) * s_i - \frac{\sin(\alpha_i)}{2} * s_i^2 \right]_{s=0}^s + \sum_1^{i-1} Sm_{y_i}$	statisches Moment Polygon	Gl. (14-5) nach [16]
$S_i$ : Statisches Moment $t$ : Wanddicke $t=konst$ $\alpha_i$ : Winkel zwischen Seitenhalbierenden und Vertikalen Schwerpunktachse (math. negativ) $s_i$ : Laufvariable $z_0$ : Startwert abstand der Laufvariable		

Dass es sich bei dem betrachteten Querschnitt um ein Polygon handelt, kann keine einzelne Funktion den Abstand zur Schwerachse beschreiben. Vielmehr muss der Querschnitt in  $n$  Abschnitte unterteilt werden.

Jeder Abschnitt beginnt mit einem Startwert  $z_0$  der sich aus der Funktion des vorherigen Abschnitts ergibt. Außerdem ändert sich mit jedem Abschnitt die Steigung  $\sin(\alpha_i)$  der linearen Funktion. Auch die Laufvariable  $s$  wird in  $n$  Abschnitte unterteilt, so dass sich für jede Seitenwand eine eigenständige Funktion für den Schwerpunktabstand ergibt. Demnach setzt sich der variable Schubflussanteil aus  $n$  Abschnitten zusammen.

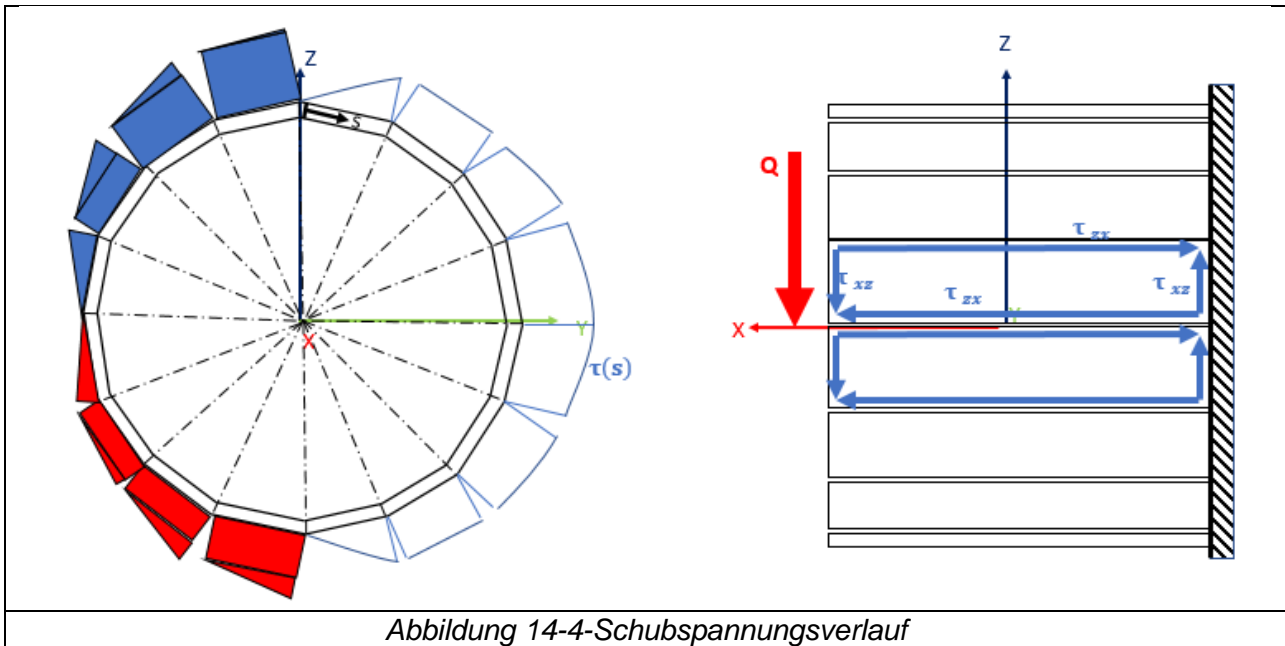
$q'(s) = \sum_i q'(s_i)$	Schubfluss bei geschlossenem Querschnitt	Gl.( 14-6) nach [16]
$q'(s)$ : variabler Schubanteil $q_0$ : konstanter Schubanteil		

Der konstante Schubflussanteil ist über die umlaufender Umfangvariable konstant, da er ausschließlich von einem aus der aufgebrachten Querkraft resultierenden Torsionsmoment  $T$ . Dieses Torsionsmoment tritt nur bei exzentrisch eingeleiteter Querkraft auf, was im Laborversuch nicht auftritt. Der Vollständigkeit halber wird die Berechnung in Gl. (14-7) aufgeführt.

$q_0 = T/2A_m$	Konstanter Schubfluss nach der ersten Bredtschen Formel	Gl. (14-7) nach [16]
$T = e * Q_z$ Torsionsmoment aus außermittiger Querkraft $A_m = \frac{n}{2} * \frac{D_{eck}^2}{2} * \sin(\frac{2\pi}{n})$ :die von der Profilmittellinie umschlossene Fläche		

Da er sich bei unserem Fall um einen vollsymmetrischen Körper handelt, bei dem die Querkraft zentrisch angreift, ist der Abstand zwischen dem Schubmittelpunkt und dem Flächenschwerpunkt und damit das Torsionsmoment gleich null.

In Abbildung 14-4 ist der Schubspannungsverlauf in den Doppelwandelementen dargestellt.



Auf der linken Seite eines Polygonquerschnitts werden die Biegezug- und Biegedruckspannungen aufgetragen. Die Spannungen werden nach der Tensor-Schreibweise mit  $\sigma_{xx}$  bezeichnet. Der erste Index beschreibt die Ebene in der die Spannungen wirken über die zugehörige Flächennormale und der zweite Index beschreibt die Spannungsrichtung in der Ebene. Auf der rechten Hälfte des Querschnitts sind die über die Gl.(14-2) bis Gl. (14-3) zu berechnende umlaufende Schubspannung  $\tau_{xz}$  aufgetragen. Die Maxima von Normal – und Schubspannungen treten um  $90^\circ$  versetzt auf. Auf der rechten Seite der Abbildung 14-4 sind zusätzlich zu den Schubspannungen  $\tau_{xz}$  auch die Längsschubspannungen  $\tau_{zx}$  dargestellt. Nach dem Prinzip der zugeordneten Längsschubspannungen Gl. (14-8) lassen sich demnach an jeder Stelle im Querschnitt die Längsschubspannungen berechnen und entsprechend an den künftigen Stellen der Profilverbindung ausgeben.

$\tau_{zx} = \tau_{xz}$	Gesetz der zugeordneten Schubspannungen	Gl. (14-8) nach [16]
-------------------------	---	----------------------

Die Berechnungen wurden für das sechzehneckige Turmdesign durchgeführt, wobei der kleinste Querschnitt also direkt am Turmkopf gewählt wurde, da hier die Schubspannungen bei dem konisch verlaufenden Turm am größten sind. Außerdem wurde die „Belastung über Eck“ angenommen, weil auch dieser Fall ebenfalls höhere Schubspannungen hervorruft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14-1 aufgeführt, wobei die oberste Ecke mit  $0^\circ$  beschrieben wird und weiter in  $22,5^\circ$ -Schritten bis zur seitlichen maximal belasteten  $90^\circ$ -Position erfolgt.

Tabelle 14-1: Schubspannungen bezogen auf Orientierung der Doppelwandelemente

Anforderung	$\tau_{zx}$ bzw $\tau_{xz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
0°	0
22,5°	16,05
45°	29,67
47,5°	38,76
90°	41,96

## 15 Planungsphase für die Traglastversuche an modularen Prüfkörpern

Für das Forschungsprojekt ist ein Versuchsaufbau geplant, bei dem zwei maßstäbliche Turmsectionen an ihren Stirnseiten miteinander verschraubt werden und so gelagert werden, dass der Prüfkörper horizontal fest eingespannt ist und einseitig auskragt. Am Kragarmende soll eine vertikale Prüfkraft wirken, die eine zur Praxis äquivalente Rotorschubkraft darstellen soll. Zusätzlich soll das Eigengewicht der Gondel durch eine axiale Vorspannkraft berücksichtigt werden. Beide Turmsectionen bestehen aus den beschriebenen Doppelwandelementen, die an den Längskanten über die zu erforschenden Profilverbindungen verbunden sind.

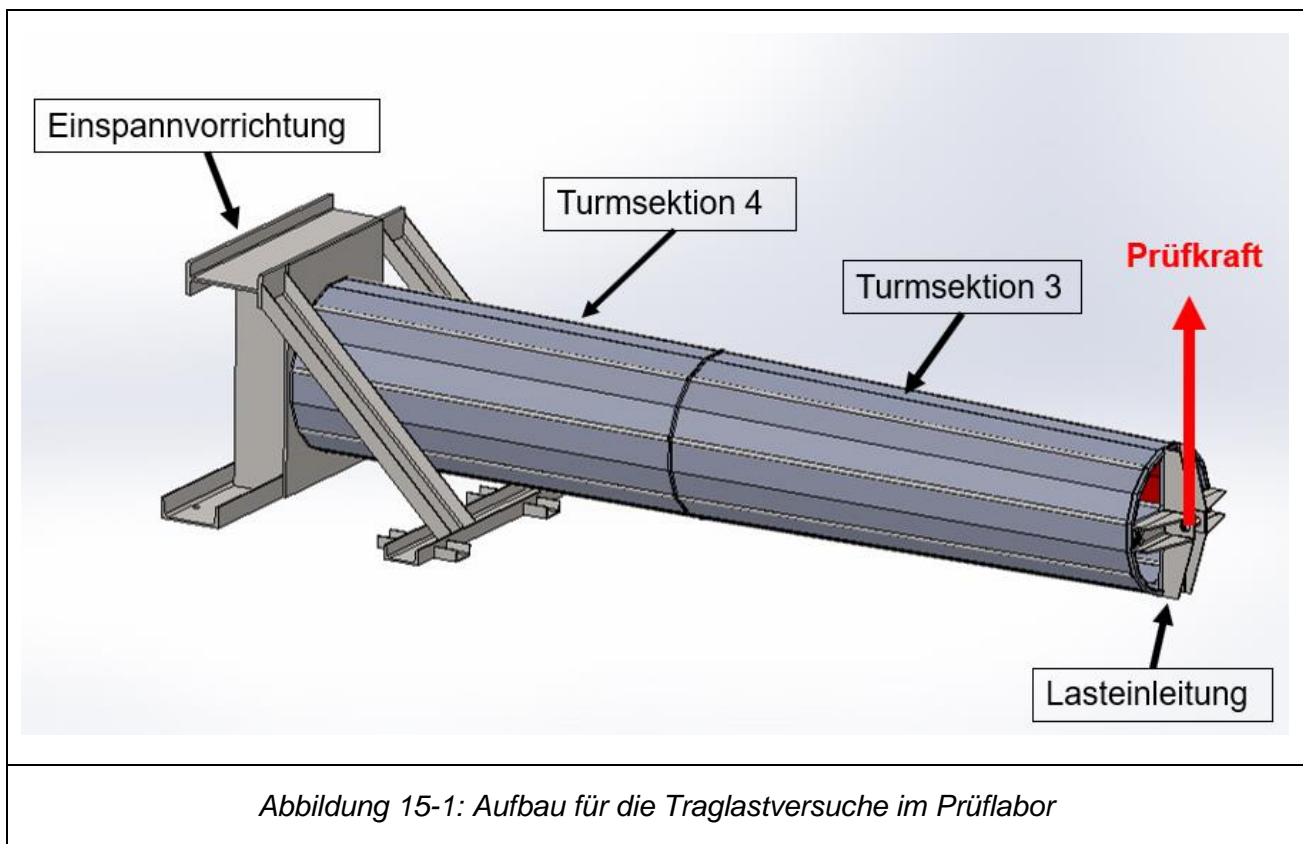


Abbildung 15-1: Aufbau für die Traglastversuche im Prüflabor

Der Versuchsaufbau und der Maßstab müssen so gewählt werden, dass der Prüfkörper mindestens bis zur elastischen Streckgrenze, im Idealfall bis in den plastischen Bereich, belastet wird. Die

Tragstrukturen von WEA werden elastisch bemessen aber bestmöglich bis zur Streckgrenze ausgelastet, weshalb dieser Grenzwert maßgebend für die Traglastversuche sein wird. Im Rahmen einer Anforderungsanalyse wurde sinnvolle Kombinationen aus Sektionen und Maßstäben definiert, die für die Prüftechnik umsetzbare Varianten darstellen.

Anschließend wird der Einfluss der Profilverbindungen auf die Steifigkeit der Prüfkörper betrachtet, um die Umsetzbarkeit zu prüfen und schlussendlich eine Entscheidung für zwei Modell-Sektionen und den Maßstab zu treffen.

### 15.1 Anforderungsanalyse für das Prüfmodell

Die Traglastversuche werden im Labor für Schiffsfestigkeit am Institut für Schiffbau und maritime Technik der Fachhochschule Kiel durchgeführt (s. Abbildung 15-2), wofür die Anforderungen bzw. technischen Randbedingungen in Tabelle 15-1 aufgeführt sind.



*Abbildung 15-2: Portalprüfmaschine im Labor für Schiffsfestigkeit der FH Kiel*

Die Querkraft wird durch die in Abbildung 15-2 gezeigte Prüfmaschine vom Typ „Hydropuls PZ 200/400“ aufgebracht. Weitere Anforderungen ergeben sich über die Bodenschienen, die zur Verankerung dienen sowie aus dem Transport und Montage im Labor.

Tabelle 15-1: Anforderungen an den Versuchsaufbau

Anforderung	Wert
Lichte Maße Laborzugang	2.47 m x 2.27 m
Maximales Montagegewicht	500 kg
Montagebedingter Mindestdurchmesser (innen)	600 mm
Abstand Verankerungspunkte im Boden (quer zum Turm)	6 x 800 mm
Abstand Verankerungspunkte im Boden (Längs zum Turm)	min
Anschlussgeometrie Verankerungspunkte im Boden	M33 Eischraubtiefe 30 mm
Maximale Normalkraft Verankerungspunkte im Boden	200 kN
Maximale Länge Versuchsfläche	6 m
Maximale Breite Versuchsfläche	4 m
Anschlussgeometrie Prüfmaschine	M36x2
Maschinenbedingter maximaler Verfahrweg	±400 mm
Maschinenbedingter maximale Prüfkraft	±200 kN
Max. lichte Höhe unter Prüfmaschine	1.2 m
Max. Höhe der Krafteinleitung über dem Boden	800 mm

## 15.2 Maßstabsermittlung und Sektions-Auswahl für das Prüfmodell

Bei der Ermittlung des Maßstabs muss zunächst sichergestellt werden, dass die technischen Randbedingungen erfüllt sind. Der Abgleich der geometrischen Randbedingungen ermöglicht eine Vorauswahl der Turmsektionen und der möglichen Maßstäbe.

Des Weiteren muss die maximale Prüfkraft berücksichtigt werden, um den Prüfkörper hinsichtlich seines Spannungszustandes vorab überprüfen zu können. Mit Hilfe dieser Vorauslegung wurde entschieden, dass der Prüfkörper aus einem Baustahl S 235 gefertigt wird und nicht aus einem S 355, der sonst als Stahlgüte für WEA-Türme üblich ist. Bis auf den Unterschied bei der Streckgrenze, verhalten sich beide Baustähle nach DIN EN 10025-2 [15] ähnlich. Der Prüfkörper wird als fest eingespannter Biegebalken mit Polygonquerschnitt angenommen, wofür eine Überprüfung der maximalen Prüfkraft nach Gl. (15-1) erfolgt.

$F_{Maschine} = \frac{Re_{S235} * I_y}{l_{ges} * y_{max}}$	Prüfkraft	Gl. (15-1)
<p><math>F_{Maschine}</math> { XE "[F_Maschine] = kN" &amp; "Prüfkraft der Maschine maximal 200kN" } &lt;&lt; ! 200kN: maximale Kraft der Prüfmaschine</p> <p><math>Re_{S235}</math> { XE "[Re_S235]=N/mm<sup>2</sup>" &amp; "Streckgrenze des Werkstoffs S235Jr" } = 235 N/mm<sup>2</sup> :angestrebte Spannung im Querschnitt</p> <p><math>[I_y] = m^4</math> { XE "[I_y]=m<sup>4</sup>" &amp; "Flächenträgheitsmoment des Querschnitts" } :Flächenträgheitsmoment des Querschnitts</p> <p><math>[l_{ges}] = m</math> { XE "[l_ges] = m" &amp; "Länge der beiden eingespannten Sektionen (Prüfkörper)" } : Einspannlänge der Sektionen</p>		

$$[y_{max}] = mm \{ XE \text{ "[y_max] = mm" } \cdot l \text{ "Maximale Durchbiegung in Y-Richtung (Prüfkörper)" } \cdot \sqrt{F1} \} \cdot \text{Abstand zur Randfaser der Querschnitts}$$

Um die aussteifende Wirkung der Verbindungsmittel an den Längskanten in Gl. (15-1) entsprechend zu berücksichtigen, muss die Geometrie realitätsnah erfasst werden.

### 15.2.1 Bestimmung der äquivalenten Biegeauslastung im Prüfmodell

Am unteren Ende der Turmsektion 4 (Abschnitt  $n = 32$ ) liegt ein resultierendes Biegemoment von 528 MNm an, was zu einer Biegenormalspannung im 1:1 Querschnitt von 337 N/mm<sup>2</sup> führen würde. Da der Turm im Vergleich zum Prüfmodell aus S 355 gefertigt wird, muss die äquivalente Bezugsspannung für das Prüfmodell um den Faktor 47/71 (=235/355) reduziert werden. Somit liegt die äquivalente Biege-Normalspannung bei 223 N/mm<sup>2</sup>.

### 15.3 Maßstab 1:10 für ausgewählte Turmsektionen 3 und 4

Für die Traglastversuche werden die Turmsektionen 3 und 4 ausgewählt, wofür die Prüfkörper entsprechend im Maßstab 1:10 skaliert werden.

Tabelle 15-2: Abmaße der Turmsektionen 3 und 4 im Maßstab 1:10

Sektionen 3 und 4 im Maßstab 1:10	Einheit	Kopf von Sektion 3	Fuß von Sektion 4
Durchmesser (jeweils die Enden)	mm	700	805
Länge (Gesamtlänge beider Sektionen)	mm	4'400	
Länge (Gesamtlänge beider Sektionen)	mm	2'400	2'000
Masse	kg	194.7	195.2
Seitenlänge vom Polygonquerschnitt	mm	136.6	157.0
Wanddicke	mm	3.0	3.4
Querschnittsfläche (ohne Formstücke)	mm <sup>2</sup>	6'418	8'506
Querschnittsfläche der Formstücke	mm <sup>2</sup>	486.5	486.5
Prüfkraft	kN	129.35	

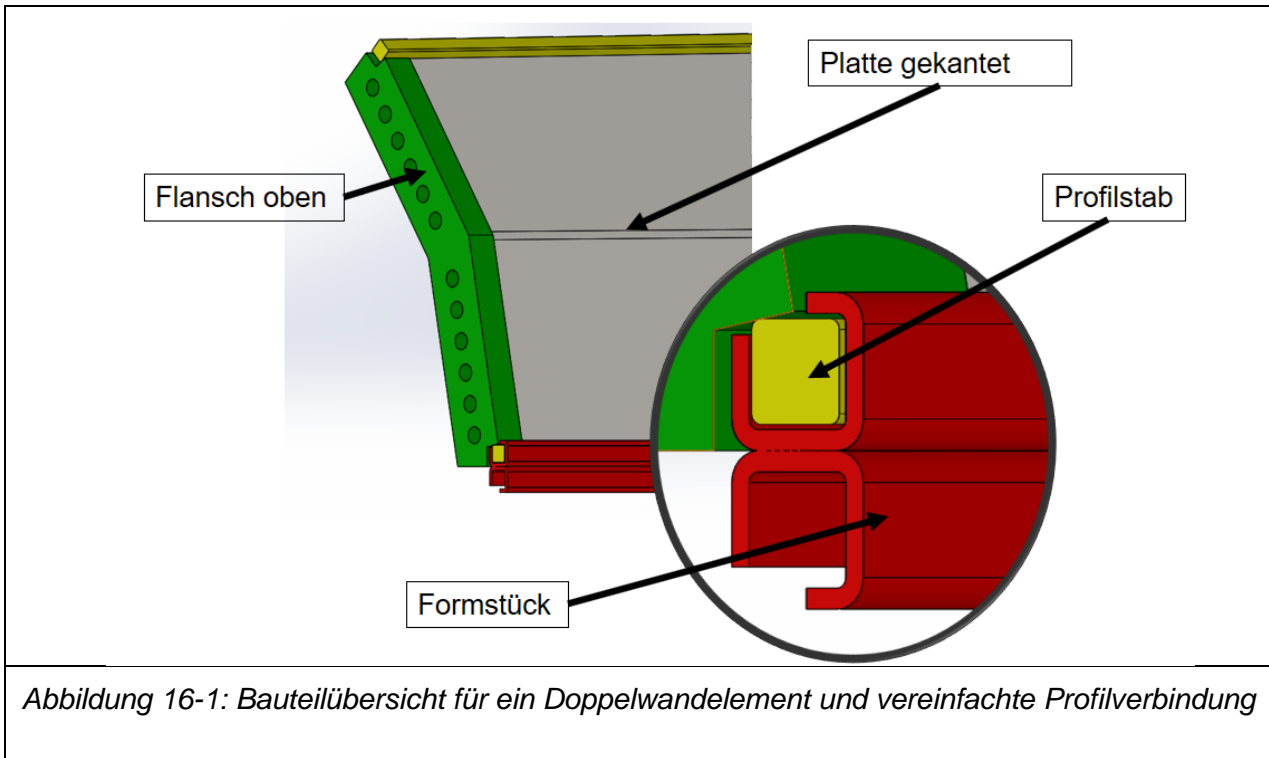
## 16 Entwicklung und Fertigung der Prüfkörper

Die Abstimmung mit dem Industriepartner „Schwerter Profil GmbH“ hat ergeben, dass die in Abbildung 12-2 dargestellte warmwalzbare Geometrie der Profilverbindung nicht im Maßstab 1:10 im Walzverfahren herstellbar ist.

Verschiedene Anfragen bezüglich spanender Fertigung der maßstäblichen Profilverbindung haben ergeben, dass allein die Profilverbindung das Budget des Industriepartners für die Prüfkörperfertigung um das Vierfache übersteigt. Die Anfrage bezüglich einer Fertigung im Strangpressverfahren ergab

keine technische Machbarkeit, weil die thermischen und mechanischen Belastungen auf die Matrize deutlich zu hoch sind. Durch die extremen Mehrkosten war es der Firma „Schwerter Profile“ daher leider nicht möglich die Fertigung der Prüfkörper zu übernehmen.

Um das Forschungsvorhaben dennoch mit geeigneten Prüfkörpern fortführen zu können, bedurfte es einer Überarbeitung der Profilverbindung. Die neue Schweißbaugruppe besteht aus einzelnen Standardprofilen, wodurch die Profilverbindung günstiger hergestellt werden konnte.

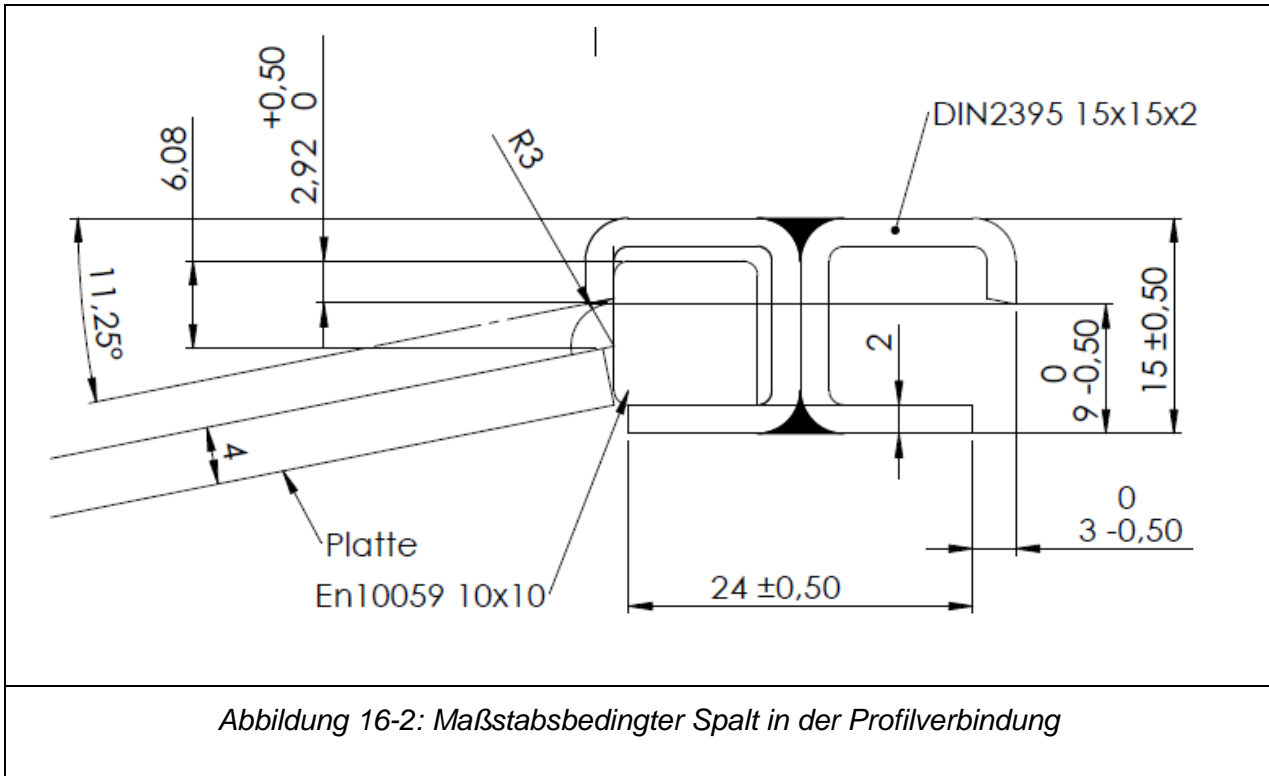


Die in Abbildung 16-1 dargestellte Profilverbindung setzt sich aus Standard-Halbzeugen zusammen. Als Profilstab wird ein warmgewalzter Vierkantstahl  $\square 10$  nach EN 10059 gewählt. Für die Formstücke werden zwei Vierkantrohre 15x15x2 (DIN 2395) in Längsrichtung zusammengeschweißt und geschlitzt. Die Flansche werden aus Kostengründen nicht gefräst, sondern mit einem Laser geschnitten und anschließend in der Zentralwerkstatt der FH Kiel gebohrt. Deshalb konnten die Aussparungen für die Eckverbinder nicht maßstäblich umgesetzt werden. Um ein vergleichbares Blockieren des Längsschub in der Flanschebene zu erzeugen, werden bei den unteren Flanschen die Aussparungen für die Formstücke entfernt, so dass jedes Formstück zwischen zwei Flanschenden blockiert wird.

Die Firma Schwerte Profile hat den vereinbarten Industrieanteil für die Fertigungsarbeiten übernommen. Hierin enthalten waren Materialkosten für die Prüfkörper und die Kosten für externe Dienstleistungen (Laserzuschnitte / Kantungen der Platten / Auftrennen + Verschweißen der Formstücke) enthalten. Der restliche Fertigungsaufwand der Prüfkörper inkl. der gesamten Schweißmontage wurde im vollen Umfang durch die FH Kiel übernommen.

## 16.1 Maßstabsbedingte Einschränkung Profilverbindung

Für die in Abbildung 12-3 gezeigte Profilverbindung ist von der Schwerter Profile GmbH ein Spaltmaß von 2 mm empfohlen worden, damit die für die Montage benötigte Vortriebskraft durch Fertigungstoleranzen im Querschnitt ( $\pm 1$  mm) und der Längswölbung (2 mm/m), die für Spundwände üblichen Kräfte nicht übersteigt.



Durch die begrenzte Verfügbarkeit an geeigneten Standardprofilen ergibt sich bei der maßstäblichen Profilverbindung ein Spaltmaß von 0,5 mm, s. Abbildung 16-2. Größere Spaltmaße in der Profilverbindung würden die Längsschubtragfähigkeit negativ beeinflussen.

## 16.2 Werkstoffprüfung (Doppelwandelemente)

Es wurden zwei Blechabschnitte aus den Doppelwandelementen ( $s = 3$  mm) herausgetrennt und einer Zugprüfung beim Institut für Werkstoffe und Oberflächen der FH-Kiel unterzogen. Der Zugversuch erfolgte gemäß ISO 527-4 mit Blechproben, die nach DIN EN ISO 6892-1 gefertigt wurden.

Die Streckgrenze für beide Einzelversuche beträgt im Mittel  $337 \text{ N/mm}^2$  und wurde aus den erzeugten Kraft-Weg-Messdiagrammen graphisch ermittelt, siehe Anhang 1.

## 17 Numerische Simulationen der Belastungszustände

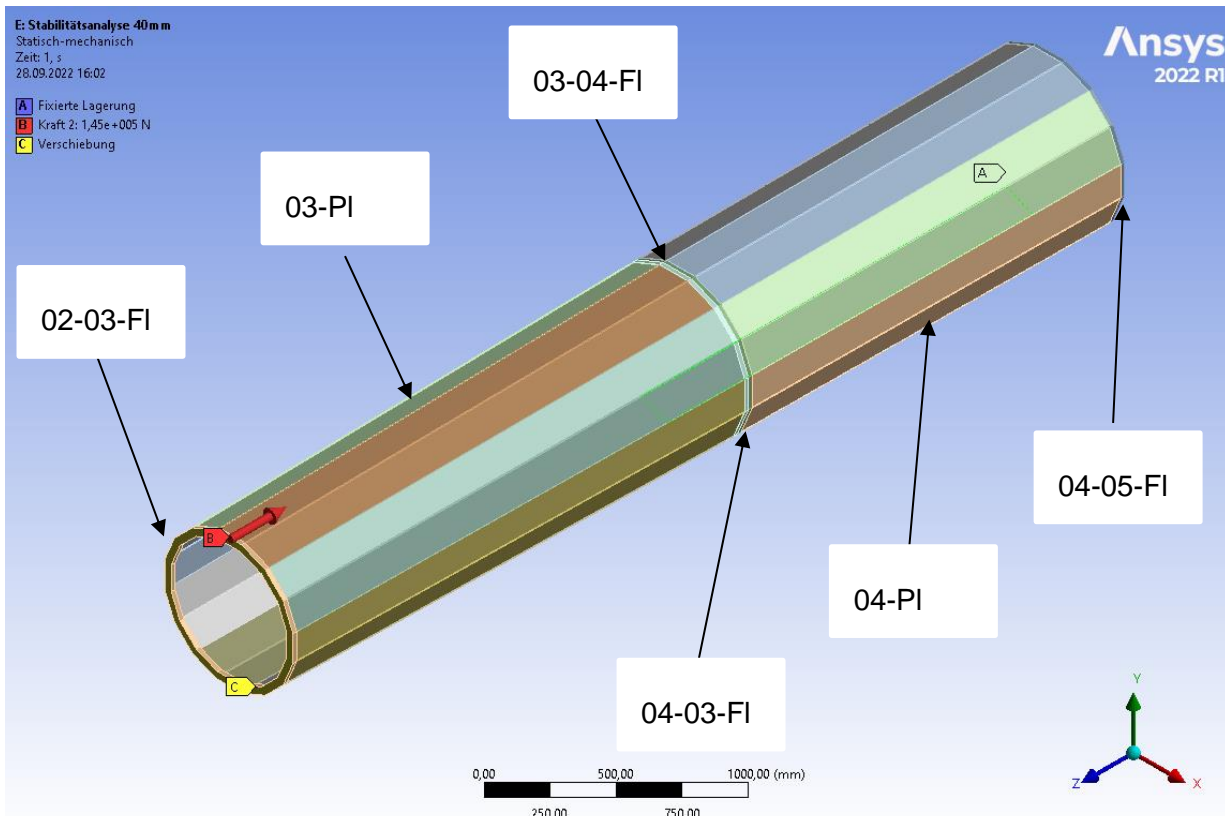
Für die Simulation der Prüfkörper konnte keine Vereinfachung durch Symmetriebedingungen vorgenommen werden, da der Körper zwar grundsätzlich Symmetrieebenen aufweist, jedoch als Gesamtsystem mit der Ausrichtung der Last zum Körper keine nutzbare Symmetrie vorlag.



Das übergeordnete Ziel, die Traglastversuche mit einer numerischen Simulation abzugleichen, konnte dennoch erreicht werden. Die Simulationen wurden mit „Ansys Workbench“ auf der Workstation „Fujitsu Celsius M7010n“ mit einem „Intel Xeon W-2265 Prozessor“ mit 12 Kernen und 64 GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

### 17.1 Modellaufbau für Referenzprüfkörper

Für den Referenzprüfkörper wurde ein Volumenmodell erstellt, welches aus insgesamt sechs Bauteilen besteht, s. Abbildung 17-1.



- |  |  |
|--|--|
| 02-03-FL: Flansch oberes Ende Sektion 3  | <b>A</b> : feste Einspannung                               |
| 03-PL: Blech DWE Sektion 3               | <b>B</b> : Normalvorspannkraft 145 kN (Gewichtssimulation) |
| 03-04-FL: Flansch unteres Ende Sektion 3 | <b>C</b> : aufgebrauchte Verschiebung in Y-Richtung        |
| 04-03-FL: Flansch oberes Ende Sektion 4  |  |
| 04-PL: Blech DWE Sektion 4               |  |
| 04-05-FL: Flansch unteres Ende Sektion 4 |  |

Abbildung 17-1: FE-Modell für die Geometrie des Referenzprüfkörpers

Die Kontakte zwischen den einzelnen Bauteilen wurden auf Verbund gesetzt. Diese Einstellung kann getroffen werden, weil beim Referenzprüfkörper die einzelnen DWE verschweißt und die Flanschverbindung vorgespannt und ausreichend dimensioniert sind, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Kontakte unbegrenzt hohe Kräfte in allen drei Raumrichtungen übertragen.

Die unterste Flansch-Ebene 04-05-FI wurde für die feste Einspannung „A“ gewählt. Es gilt beim Vergleich zu beachten, dass eine unendlich steife Einspannung im Laborversuch nicht umsetzbar ist, weil auch die Auflagerkonstruktionen (hier Einspannvorrichtung) eine gewisse elastische Nachgiebigkeit aufweisen.

Über die oberste Flansch-Ebene 02-03 wird die Normalkraft von 145 kN „B“ im ersten Lastschritt aufgebracht, über die das Eigengewicht der Gondel und der darüber liegenden Turmsektionen im Laborversuch berücksichtigt werden soll. Der Wert 145 kN entspricht der Normalkraft, bei der rein rechnerisch im Prüfkörper eine äquivalente Normalspannung anliegt, wie im Eigengewichtslastfall des 1:1 Turmdesigns. Im Vergleich zum Prüfkörper gilt es zu beachten, dass Lasteinleitung über radiale Streben am Kragarmende erfolgt und somit lokal eine ungleichmäßige Spannungsverteilung vorliegt, die sich erst in einem gewissen Abstand zur Lasteinleitungsstelle homogenisiert.

In einem zweiten Lastschritt wird ebenfalls am Kragarmende eine vertikale Prüfkraft in Form einer Verschiebungsrandbedingung „C“ aufgebracht. Dazu wird eine Verschiebung in Y-Richtung von 40 mm vorgegeben.

## 17.2 Vernetzung des Referenzprüfkörpers

Für die Vernetzung der Bauteile wurde die Sweep-Methode in der Standarteinstellung benutzt. Es wurde eine quadratische Elementansatzfunktion bei einer Elementgröße von 50 mm gewählt. Die in Abbildung 17-2 gezeigte strukturierte Vernetzung besteht aus ca. 11'500 finiten Elementen.

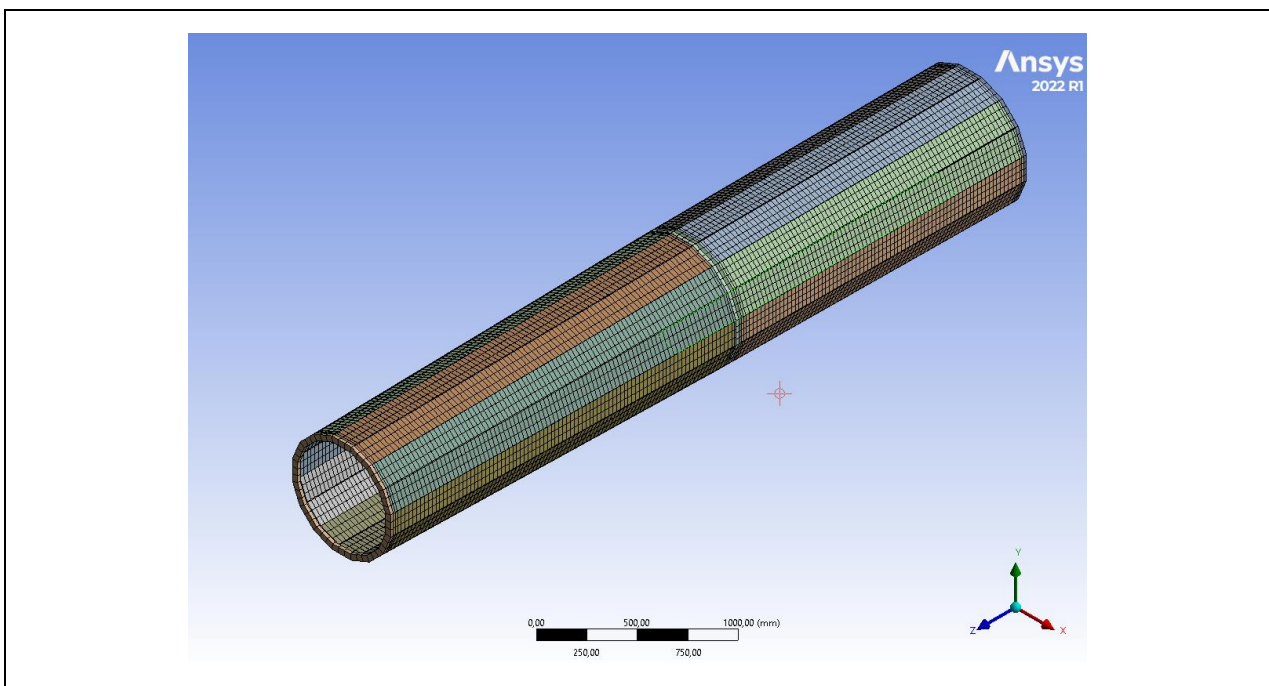
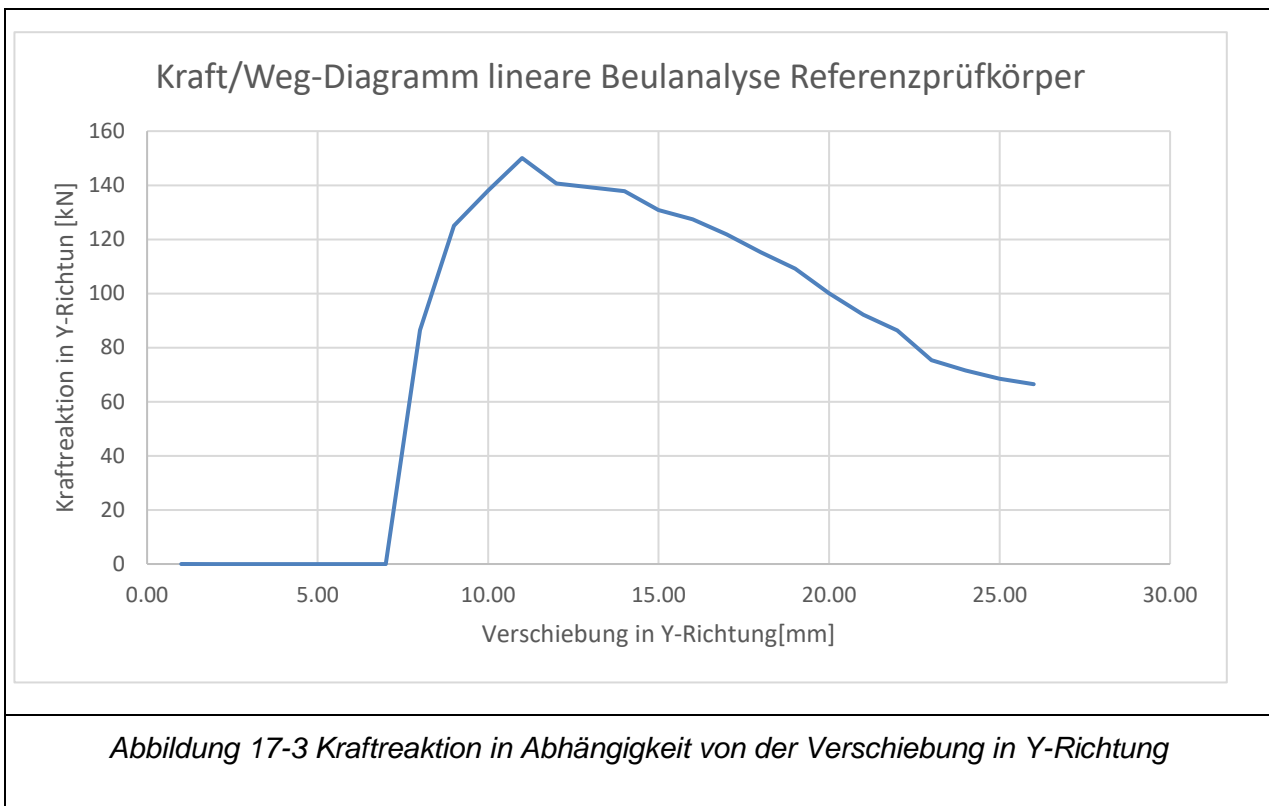


Abbildung 17-2: Vernetzung des Referenzprüfkörpers

### 17.3 Vergleich mit den Versuchswerten für den Referenzprüfkörper

Mit Beginn des zweiten Lastschritts (vertikale Prüfkraft) steigt die Kraftreaktion am oberen Ende der Sektion 3 zunächst linear an, flacht anschließend ab und fällt beim Erreichen von 125 kN und einer Auslenkung von 9 mm signifikant ab.



Erst ab einer Kraftreaktion von 150 kN beult der Prüfkörper. Bis zu dieser Verzweigungslast bleibt der Körper stabil. Es tritt kein Einzelfeldbeulen ein, sondern ein Beulen über mehrere Plattenstreifen (Doppelwandelemente) ein. In Abbildung 17-4 sind die Beulen des echten und simulierten Prüfkörpers gegenübergestellt. Die Beulen von der numerischen Simulation beginnen unmittelbar an der Einspannung und erstrecken sich über etwa 100 mm. Im Vergleich dazu beult der wahre Prüfkörper nach innen. Die Beule verläuft über die Kante des obersten DWE hinaus (Teilfeldbeulen). In den angrenzenden DWE tritt die Beule leicht versetzt auf, was zu einer Aufwerfung an den Beulrändern führt.

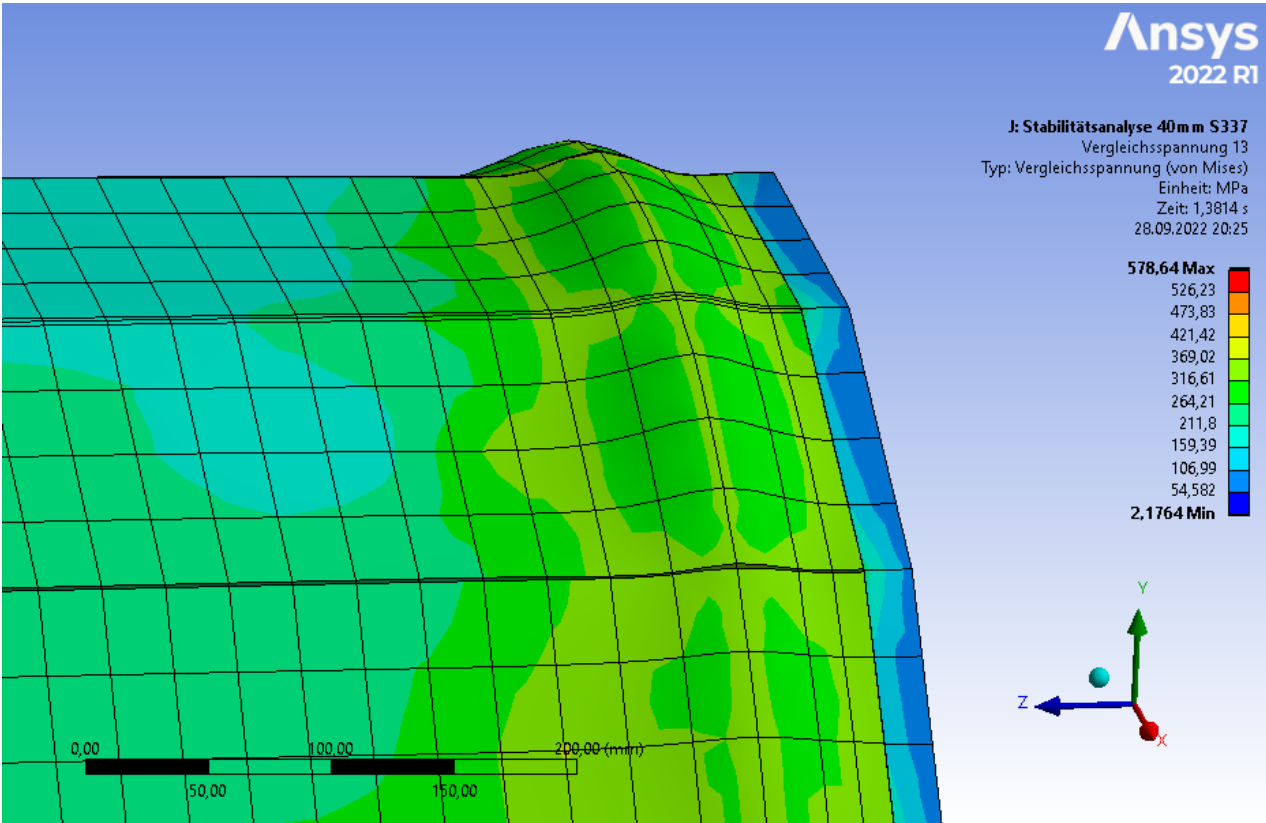
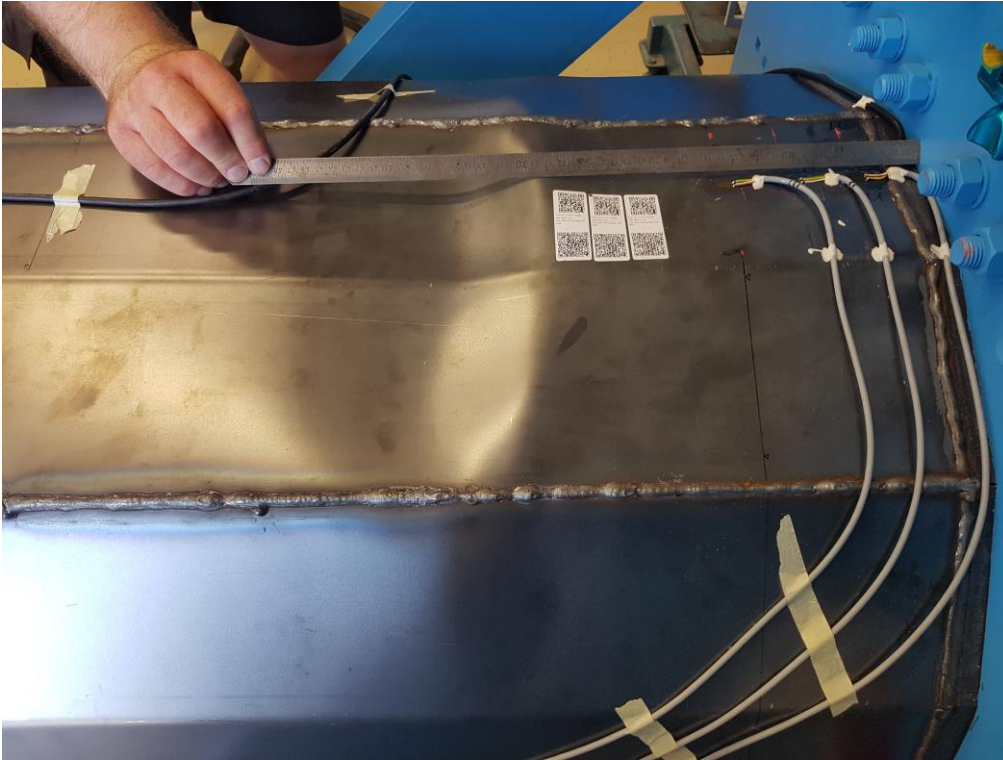


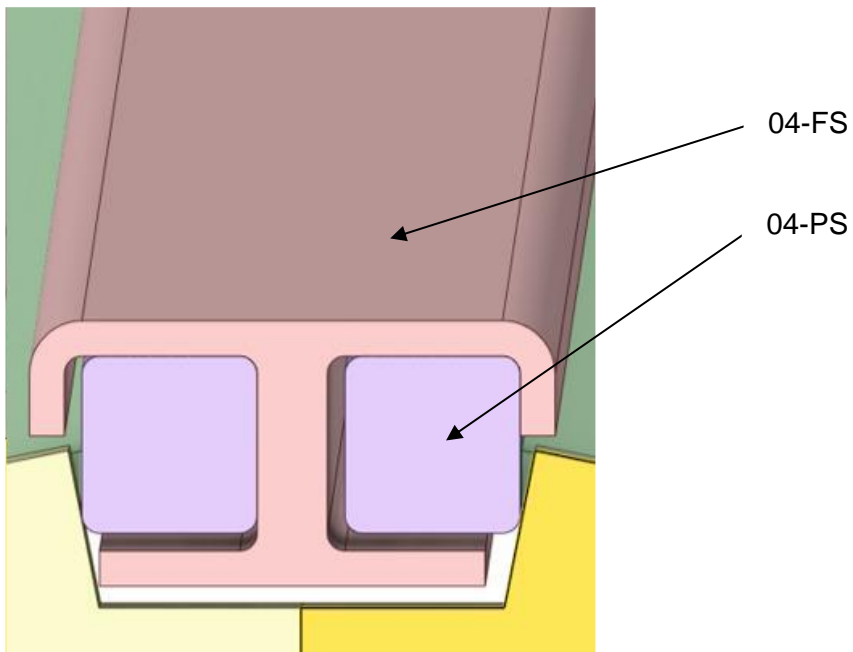
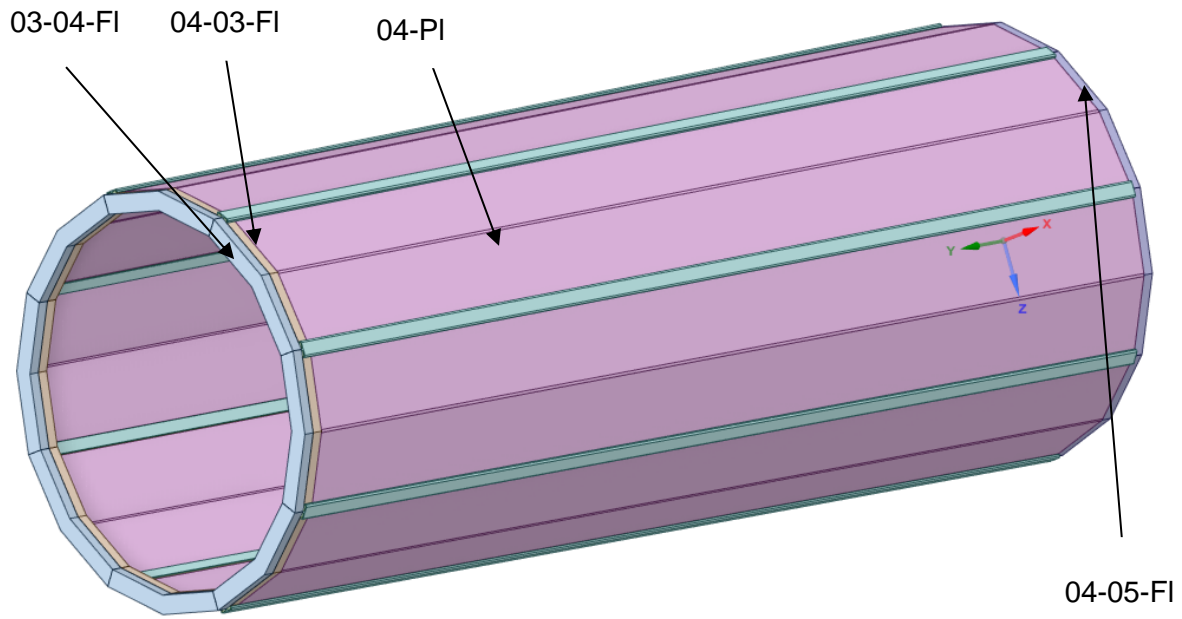
Abbildung 17-4: Beulversagen beim Prüfkörper (oben) und Beulanalyse in FEM (unten)

## 17.4 Modellaufbau für den modularen Prüfkörper

Die Simulation von einer Bauteilgruppe, wo einige Bauteile lediglich über Kontakt und Reibung verbunden sind, sind numerische Simulationen aufgrund der physikalischen Nichtlinearität sehr zeitaufwendig. Deshalb wurde die Submodelltechnik angewendet.

Dazu wurden zuerst in einem globalen Modell vereinfachte Kontaktverbindungen zwischen den Bauteilen (Funktionstyp „Verbund“) definiert. Die Verschiebungen an den Anschlussstellen zwischen Blech und Vierkantstahl wurden anschließend als Verschiebungsrandbedingung für ein Submodell genutzt, indem nur die Profilverbindung behandelt wird. So kann innerhalb des Submodells eine deutlich feinere Vernetzung durchgeführt werden und der Einfluss von Reibung und Kontakt innerhalb der Profilverbindung analysiert werden.

In Abbildung 17-5 sind die einzelnen Bauteile dargestellt, mit denen die Simulation des modularen Polygonturms durchgeführt wurde. Die Kontakte der Flansche wurden innerhalb der Flanschebene auf Verbund gesetzt und innerhalb eines jeden Flanschrings auf „reibungsfrei“, da derselbe Freiheitsgrad im Modell vorliegt. Die Profilstäbe wurden mit den Blechen über Verbundkontakt miteinander kombiniert, da diese Bauteile als fest verschweißt angenommen werden können. Im globalen Modell ist es in der Bearbeitungszeit gelungen, die Kontakte zwischen den Formstücken und den Profilstab, die im Bereich der größten Schubspannungen liegen, zu simulieren. Die restlichen Profilverbindungen mussten aus Konvergenzgründen vorerst auf Verbund gesetzt werden.



03-04-FL: Flansch unteres Ende Sektion 3  
 04-03-FL: Flansch oberes Ende Sektion 4  
 04-PL: Blech DWE Sektion 4  
 04-05-FL: Flansch unteres Ende Sektion 4

04-FS: Formstück Sektion 4  
 04-PS: Profilstab Sektion 4

Abbildung 17-5: FE-Modell für Prüfkörper „Pharos I“

## 17.5 Vernetzung des modularen Prüfkörpers

Für die Vernetzung der Platten wurde als Standardeinstellung die Elementgröße von 50 mm benutzt. Die Profilverbindungen wurden mit einer Sweep-Methode und einer Elementkantenlänge von 20 mm vernetzt. Für die Elementgröße für den Anfangsquerschnitt wurde 3 mm gewählt. Es wurde insgesamt eine quadratische Elementansatzfunktion gewählt.

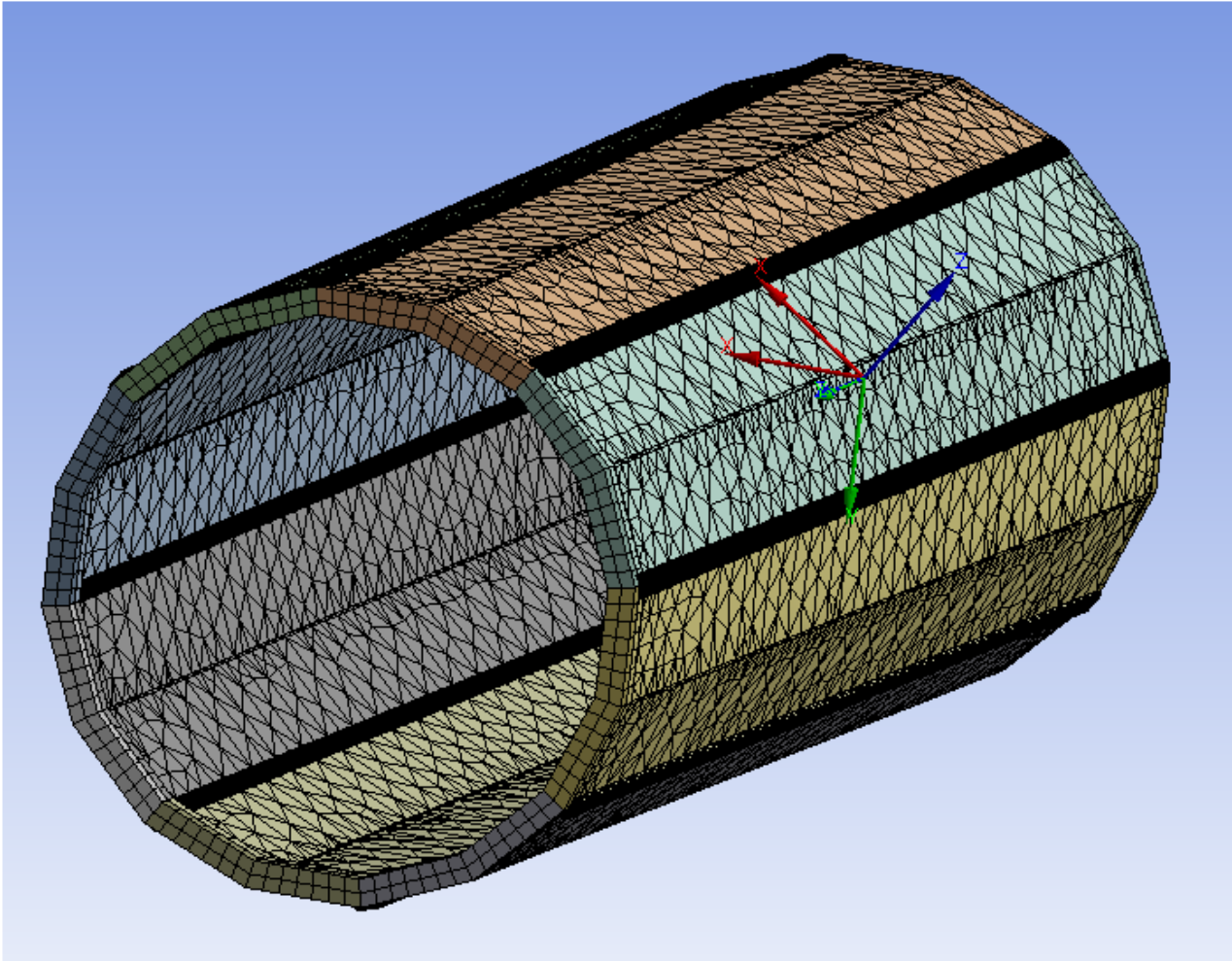


Abbildung 17-6: Vernetzung für den modularen Prüfkörper

## 17.6 Statisch mechanische Randbedingungen beim modularen Prüfkörper

Die in Abbildung 17-7 gezeigten Randbedingungen ändern sich vom Prinzip nicht signifikant von denen des Referenzprüfkörpers. Es wird ebenfalls mit einer festen Einspannung und einer Verschiebung an den gegenüberliegenden Flanschebenen gearbeitet. Der Hauptunterschied ist der Betrag der Verschiebung. Es wurde lediglich für eine Verschiebung bis 5 mm berechnet.

### F: Verschiebung SEK04 Reibungsfrei 4Kontakt ohne FR Sperrung

Statisch-mechanisch

Zeit: 1, s

02.09.2022 13:45

**A** Fixierte Lagerung

**B** Verschiebung

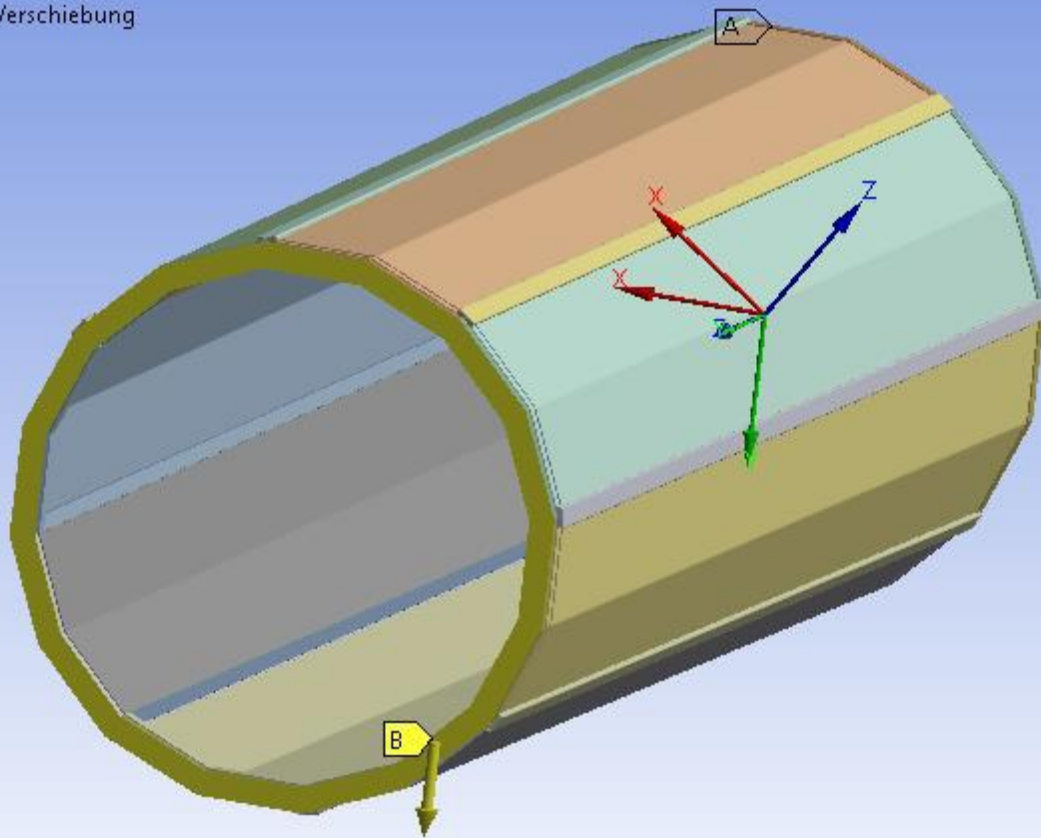


Abbildung 17-7: Randbedingungen des modularen Prüfkörpers

## 17.7 Vergleich mit Versuchswerten für modularen Prüfkörper

Die Gegenüberstellung des Spannungsplots beim Erreichen der 5 mm als Zwangsverschiebung mit den Versagensbildern, die bei 65 kN im Versuch aufgenommen wurden, zeigen auf, dass bereits bei geringer Laststufe eine Spannungskonzentration an den Enden der Formstücke hervorgerufen wird, was sich mit der Behinderung des Längsschubs an den Stirnenden der Turmsektionen begründen lässt, s. Abbildung 17-8.

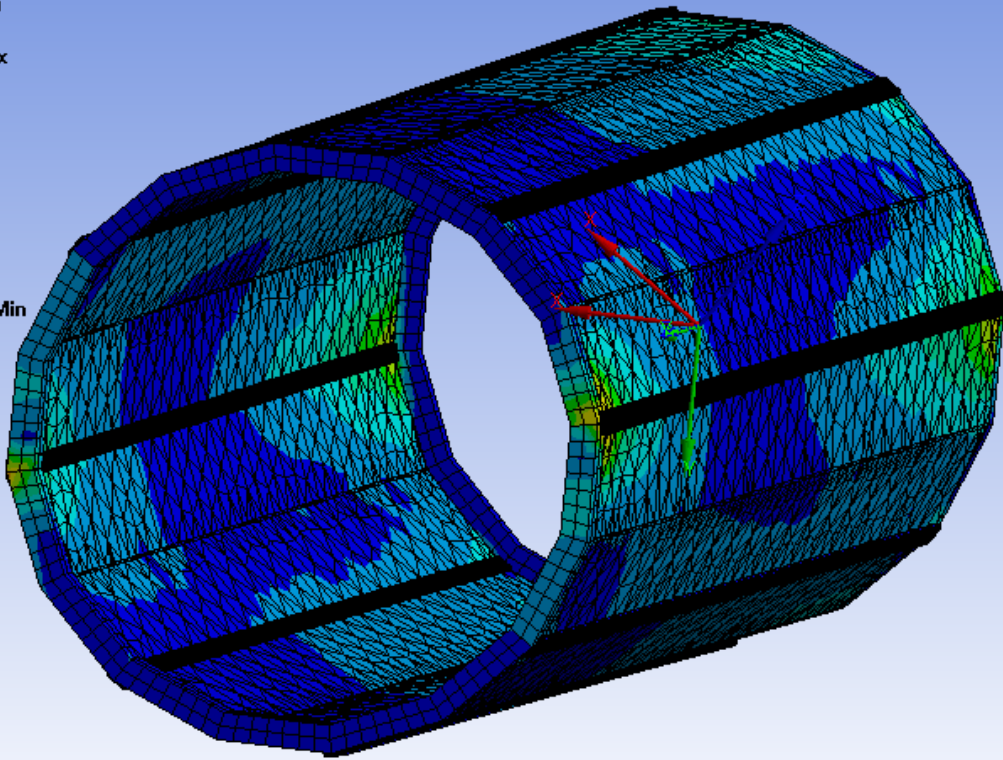
Anhand der Traglastversuche konnte festgestellt werden, dass die gewählte und fertigbare Profilverbindung den Längsschubs zwischen den Doppelwandelementen nicht ausreichend verhindern kann. Die Reibkräfte zwischen Formstück und Profilstäben reichen nicht aus um die Verschiebungen infolge der Längsschubkraft zu verhindern.



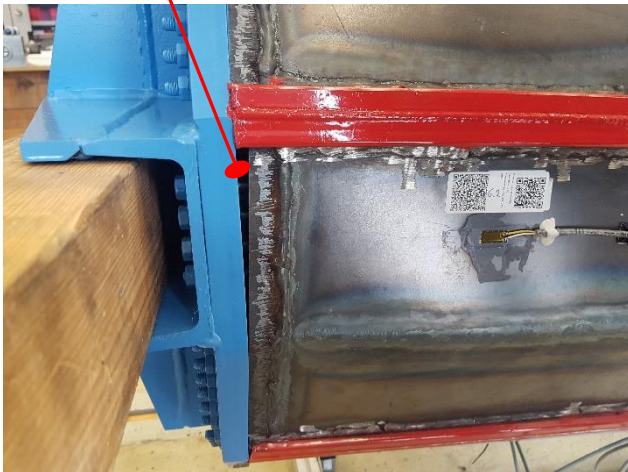
F: Verschiebung SEK04 Reibungsfrei 4Kontak  
Vergleichsspannung  
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)  
Einheit: MPa  
Zeit: 5 s  
06.09.2022 14:29

Längsschub zwischen den  
Doppelwandelementen

322,24 Max  
286,44  
250,64  
214,83  
179,03  
143,23  
107,43  
71,629  
35,827  
0,025941 Min



Längsschub zwischen den  
Doppelwandelementen



Plattenbeulen

Abbildung 17-8: Beul- und Längsschubversagen beim modularen Prüfkörper „Pharos I, gesteckt“

## 18 Traglastversuche

Die Prüfkörper sollen in einem statischen Biegebelastungsversuch bis zur Traglast getestet und verglichen werden. Das Ziel der Traglastversuche ist es, die Belastungsgrenzen zu ermitteln und die Unterschiede darzulegen, die sich durch die Profilverbindungen ergeben.

### 18.1 Referenzprüfkörper

Der Referenzprüfkörper besteht aus zwei Turmsektionen (Nr. 3 und Nr. 4), die sich jeweils aus acht einzelnen, längs gekanteten Doppelwandelementen zusammensetzen, s. Abbildung 18-1. Die jeweiligen Doppelwandelemente eines Turmsegmentes wurden stofflich durch eine Längsschweißung dauerhaft gefügt, d.h. an den Längskanten liegt ein Formschluss vor.

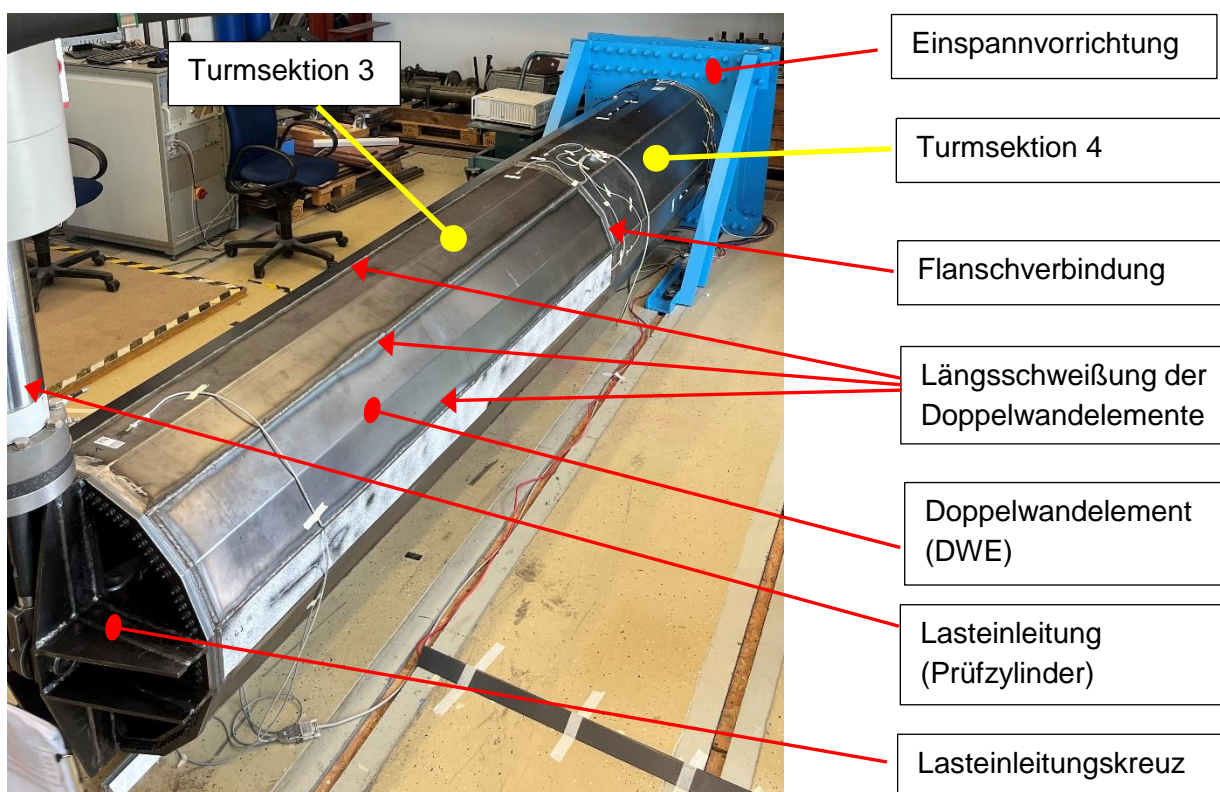


Abbildung 18-1: Referenzprüfkörper, montiert an der Einspannvorrichtung

### 18.2 Prüfkörper des modularen Polygonturms (Pharos I, gesteckt)

Im Gegensatz zum Referenzprüfkörper (Längsschweißung der Doppelwandelemente), sind die Doppelwandelemente des modularen Polygonturms durch Formstücke und Profilstäbe miteinander verbunden. Insgesamt wurden zwei modulare Polygonprüfkörper gefertigt.

Prüfkörper 1: Modulare Polygonturmsektionen (Pharos I, gesteckt) mit Doppelwandelementen, welche längsseitig durch Profilverbinder verbunden sind, siehe Abbildung 18-2.

Prüfkörper 2: Modulare Polygonturmsektionen (Pharos II, geschraubt) mit Doppelwandelementen, welche längsseitig a) durch Profilverbinder verbunden und b) durch zusätzliche M12-Verschraubungen fixiert sind, siehe Abbildung 18-3. Die Verschraubungen sorgen in Längsrichtung für eine form- und kraftschlüssige Verbindung der angrenzenden Doppelwandelemente und dem mittig liegenden Profilverbinder.

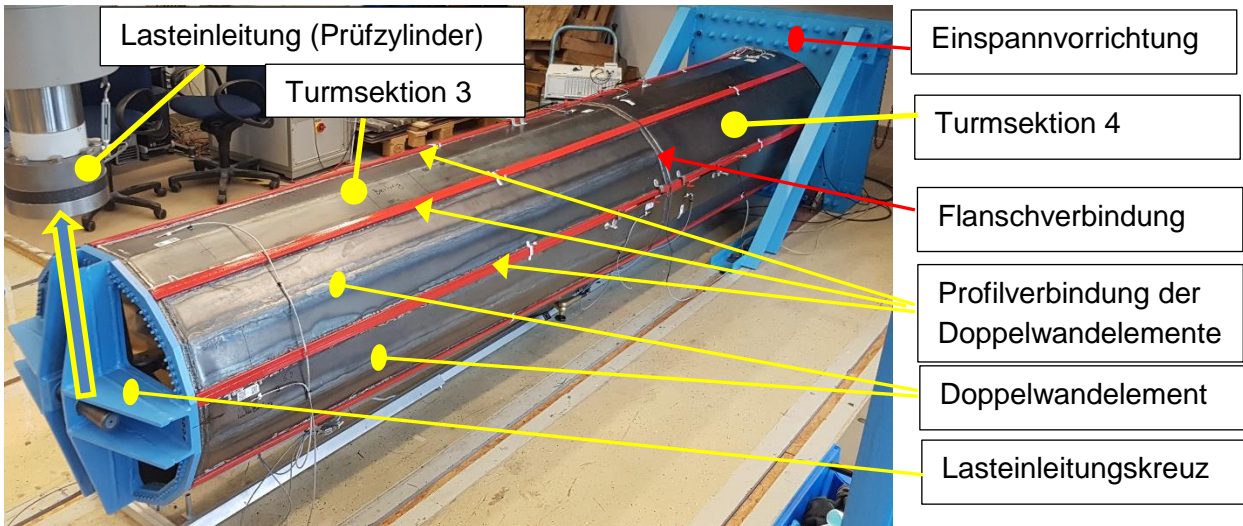


Abbildung 18-2: Modulare Polygonturmsektionen (Pharos I, gesteckt)

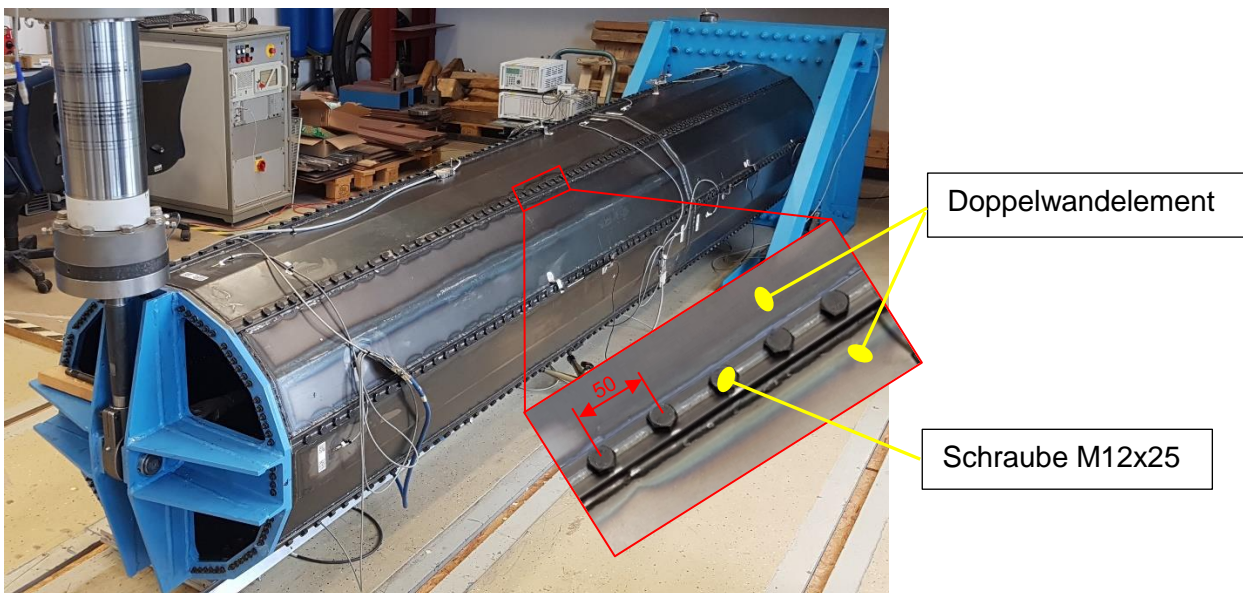


Abbildung 18-3: Modulare Polygonturmsektionen (Pharos II, geschraubt)

### 18.3 Messmittel

In der Tabelle 18-1 sind die verwendeten Messapplikationen gelistet. Der Anschluss der Messsensoren an den Messverstärkern (Kanalbelegung) ist im *Anhang 2* bis *Anhang 4* dokumentiert. Die Messkanalkonfiguration für die einzelnen Prüfkörper ist in den originalen Messdateien hinterlegt.

Tabelle 18-1: Messapplikationen

Bezeichnung / Sensortyp	Hersteller	Typ	Identifizierung
Universalprüfmaschine	WPM	Hydropuls PZ 200/400	
Wegsensor	Micro-Epsilon	ILD1420-50	22010357
	Micro-Epsilon	ILD1420-200	22010421
	Micro-Epsilon	ILD1420-200	22010422
	Micro-Epsilon	ILD1900-500	00321020045
	WayCon	LAH-G105	-
	Variohm / Eurosensor	ELPM-150POP	HTL-000410
	Variohm / Eurosensor	ELPM-150POP	HTL-000408
	Variohm / Eurosensor	ELPM-150POP	HTL-000409
	Variohm / Eurosensor	ELPM-150POP	HTL-000407
	HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik)	W20TK	2692
	HBM	W10TK	35924
	HBM	WA50	74410170
Dehnungsmessstreifen	HBM	DMS 10/350 LY41	-
Messverstärker, siehe Abbildung 18-4	HBM	MGC plus	BL05
	HBM	MGC plus	AB22A
Messkonverter, siehe Abbildung 18-4	HBM	MC2A	-
Messsoftware	HBM	Catman Easy	-

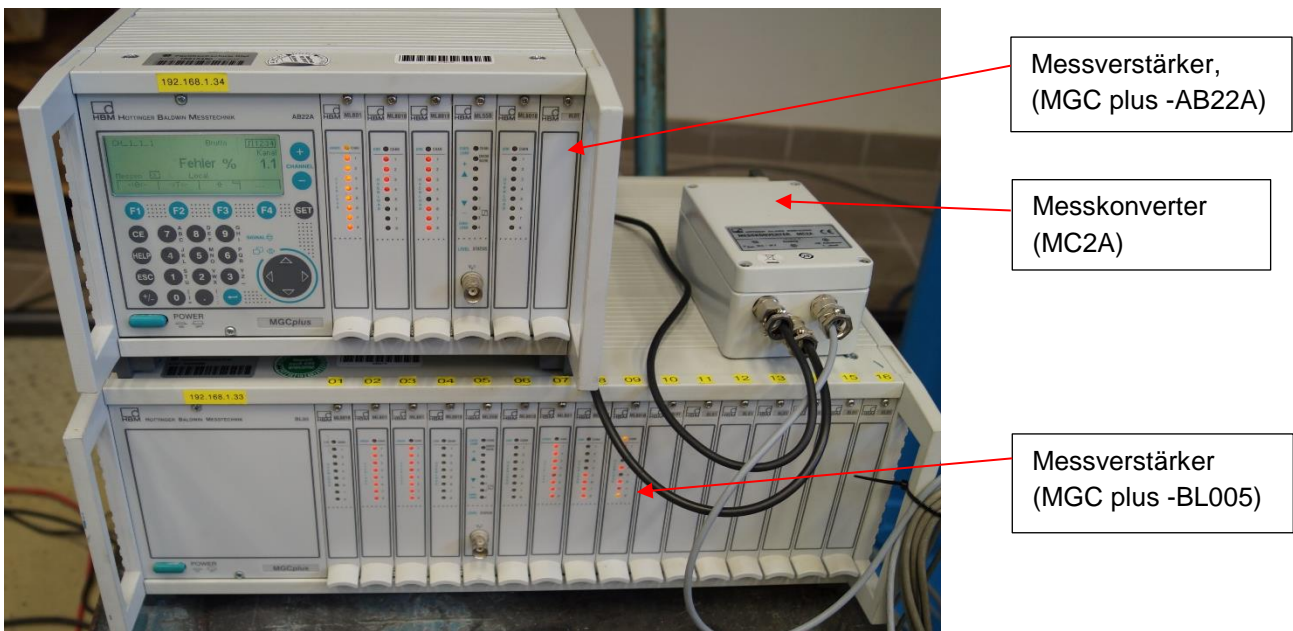


Abbildung 18-4: Verwendete Messverstärker / Messkonverter

## 18.4 Messkonzept / Versuchsaufbau

Das Messkonzept sieht vor, in Bereichen, wo hohe Dehnungen, Spannungen und Verschiebungen erwartet werden, entsprechende Messsensoren zu platzieren. Hierzu werden Dehnungsmessstreifen (DMS) und verschiedene Wegsensoren verwendet, die wie folgt positioniert werden:

- a) Die Messpositionen der DMS sind primär in vier radialen Messebenen unterteilt, siehe Messebenen in Abbildung 18-7 bis Abbildung 18-10. In jeder Messebene sind die DMS mit einer Ausrichtung von  $0^\circ / 90^\circ / 180^\circ / 270^\circ$  auf dem Prüfkörper appliziert, siehe Abbildung 18-5. Die Nummerierung der DMS-Messposition folgt folgendem Schema: Die erste Ziffer steht für die Messebene, die zweite Ziffer steht für die Ausrichtung ( $1 = 0^\circ / 2=90^\circ / 3=180^\circ / 4=270^\circ$ ). Die Bezeichnung DMS 3.4 bedeutet z.B. DMS in der Ebene 3, Ausrichtung  $270^\circ$ .

Referenzprüfkörper	Pharos I (gesteckt) & Pharos II (geschraubt)
--------------------	--

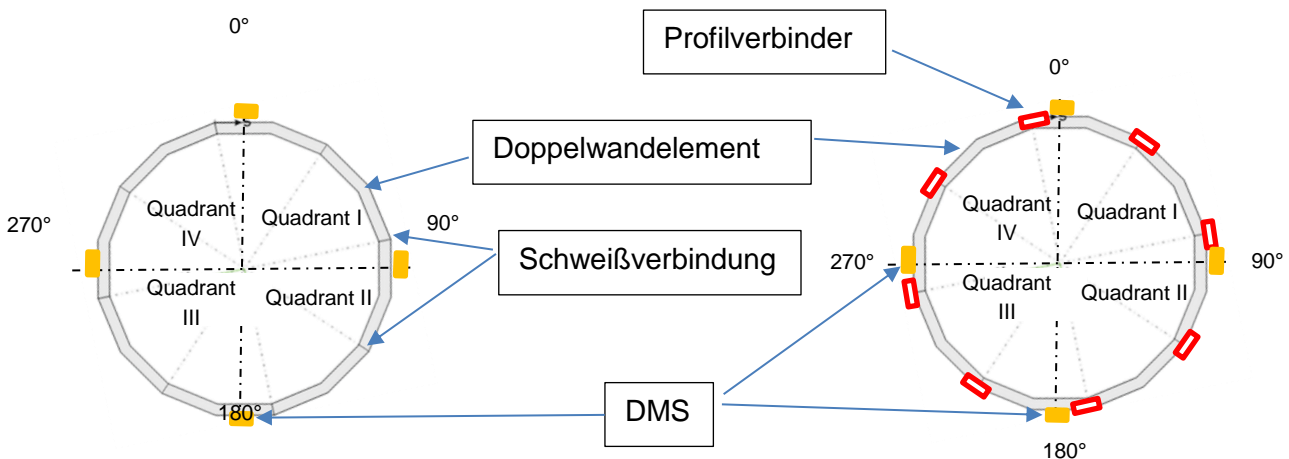


Abbildung 18-5: Ausrichtung der DMS in den Messebenen des jeweiligen Prüfkörpers

- b) Vier weitere DMS werden auf einer Messhülse appliziert, mit welcher die axiale Vorspannkraft der innenliegenden Zugstange gemessen wird, s. Abbildung 18-6.

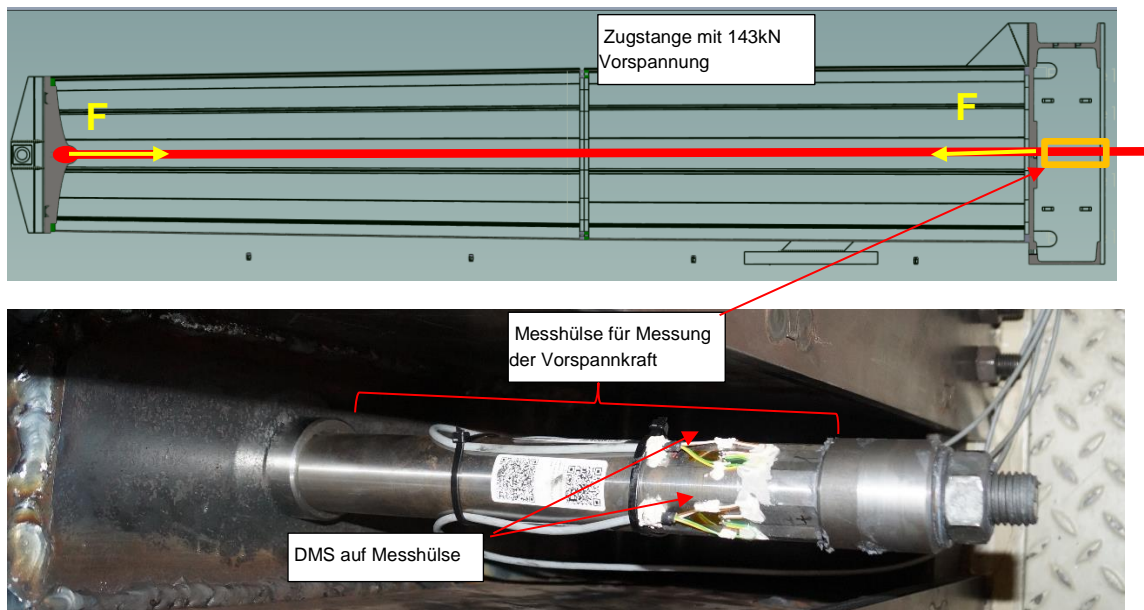


Abbildung 18-6: Darstellung der Zugstange und Position der Messhülse am Prüfkörper

- c) Vier Laserwegsensoren werden unterhalb des Prüfkörpers positioniert, um die radiale Auslenkung der Messebenen der Turmsectionen zu erfassen, s. Abbildung 18-8.
- d) Acht zusätzliche Wegaufnehmer (nur Pharos I) werden genutzt, um die relative Verschiebung der Doppelwandelemente zu messen, s. Abbildung 18-7 bis Abbildung 18-10.
- e) Ergänzende DMS für lokale Spannungsanalysen (Beulen) nach Bedarf

Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1 mm/sec bei allen Traglastversuchen.

Alle Messwerte werden in Abhängigkeit von der Prüfkraft und Messzeit aufgezeichnet.

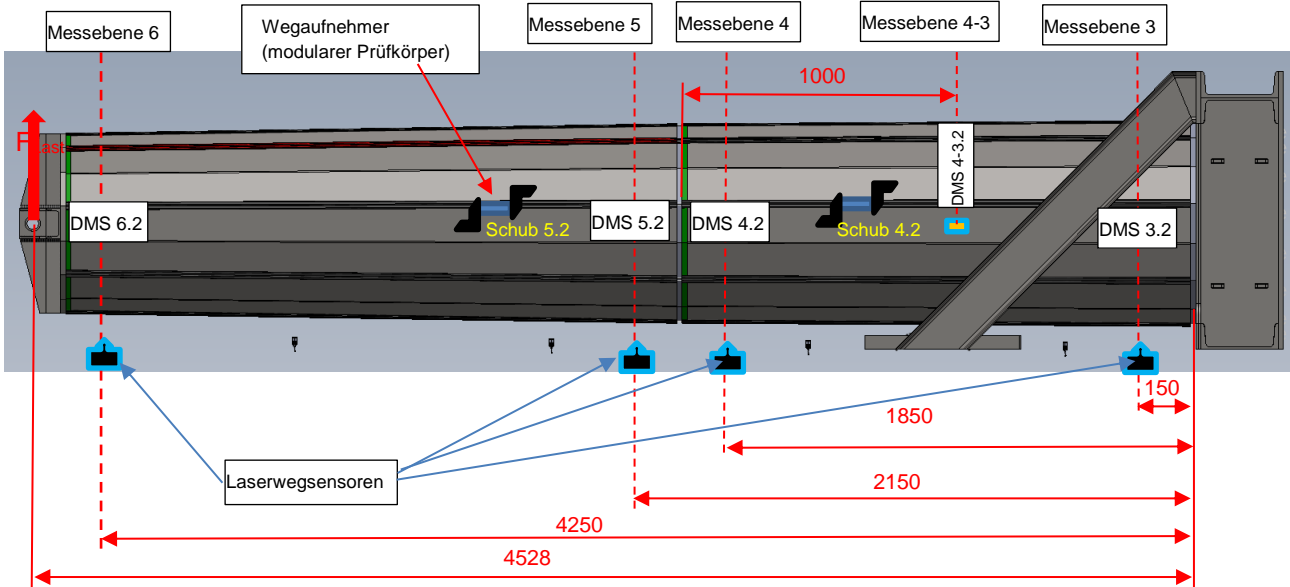


Abbildung 18-7: Prüfkörper und Positionierung der DMS + Wegaufnehmer, Ansicht links

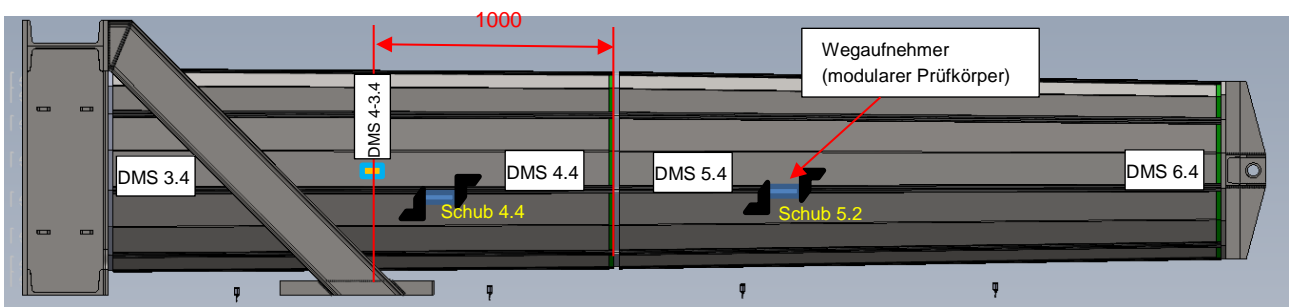


Abbildung 18-8: Prüfkörper und Positionierung der DMS + Wegaufnehmer, Ansicht rechts

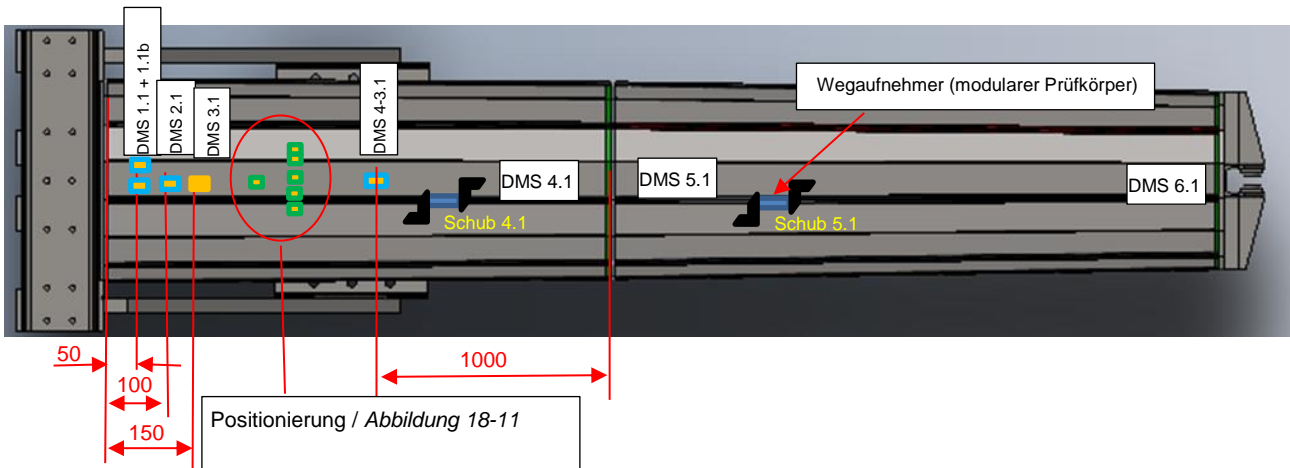


Abbildung 18-9: Prüfkörper und Positionierung der DMS + Wegaufnehmer, Ansicht von oben

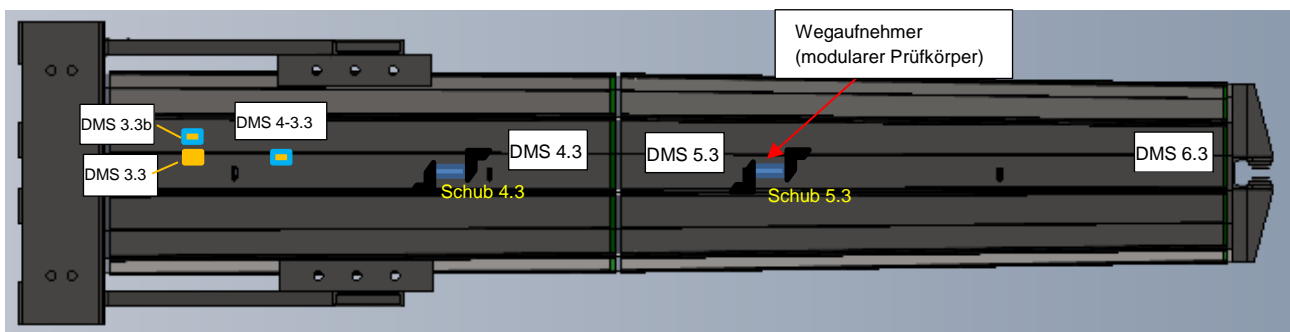


Abbildung 18-10: Prüfkörper und Positionierung der DMS + Wegaufnehmer, Ansicht von unten

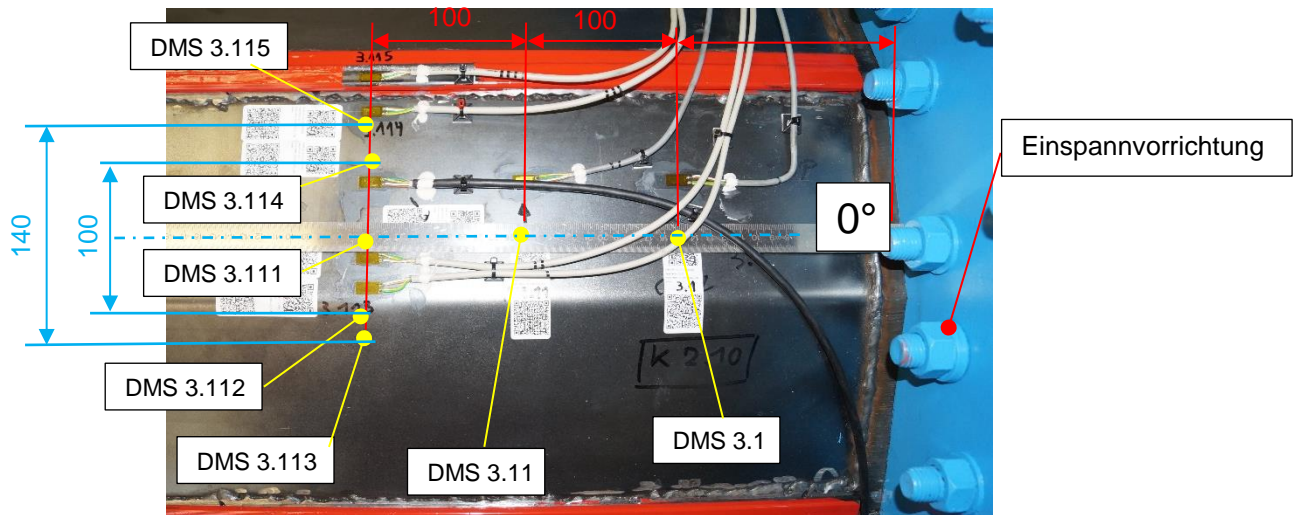


Abbildung 18-11: Pharos I (gesteckt); erweiterte DMS Applikationen im Bereich der Messebene 3

### 18.5 Plausibilitätsprüfung der Messensoren

Um zu überprüfen, dass alle DMS plausible Normalspannungen anzeigen, wurde über die Zugstange eine definierte Vorspannkraft aufgebracht, die eine Normalspannung erzeugt, die äquivalent zum Eigengewicht sein soll. Somit konnten die gemessenen Spannungswerte mit den errechneten Spannungswerten abgeglichen werden.

Tabelle 18-2: Messebenen

	Soll-Querschnittsfläche A [mm <sup>2</sup> ]	Normalspannung [N/mm <sup>2</sup> ]				
		Sigma_0	DMS/X.1	DMS/X.2	DMS/X.3	DMS/X.4
Messebene 3	9904	-14,7	-19	-19	-5,78	-20
Messebene 4	9608	-15,2	-13	-17	-13	-16
Messebene 5	7143	-20,4	-18	-22	-21	-20
Messebene 6	6541	-22,3	-58	-26	-54	-27

Aufgrund der Lasteinleitung über einen Achskreuz kam es an den Rändern der Turmsektionen zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung, die mit der Messebene 6 registriert wurde. Dort kam es zu größeren Abweichungen vom Sollwert.



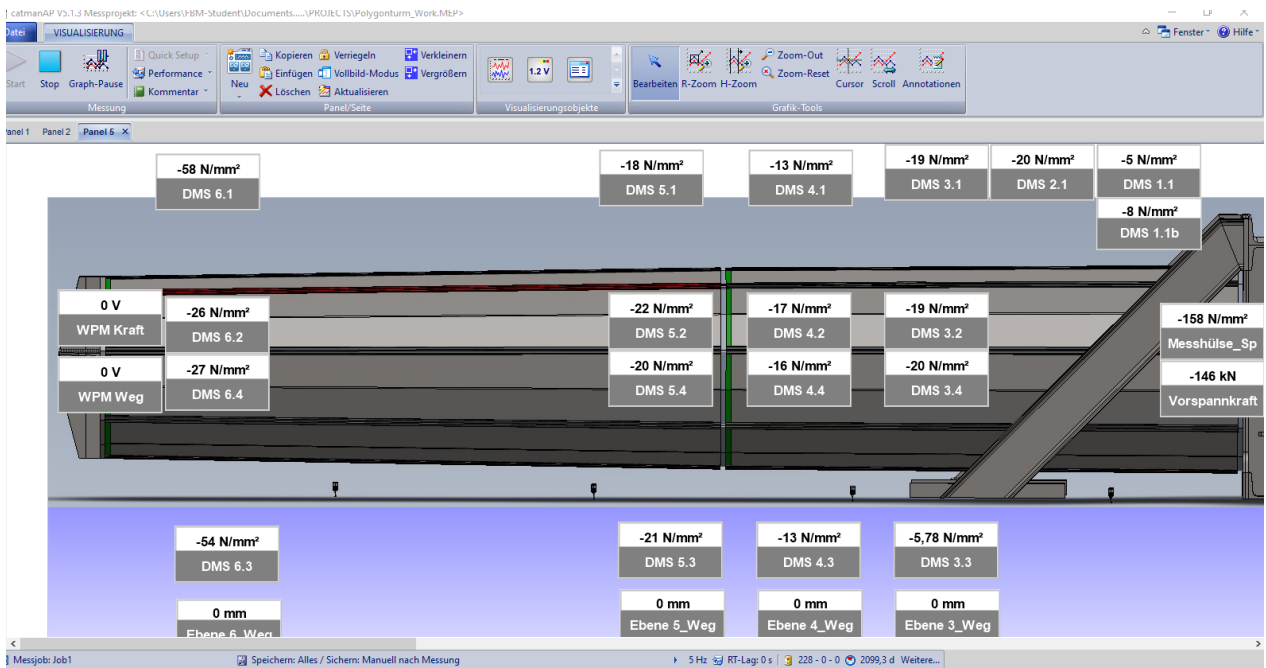


Abbildung 18-12: DMS-Test für Referenzprüfkörper

## 18.6 Versuchsablauf

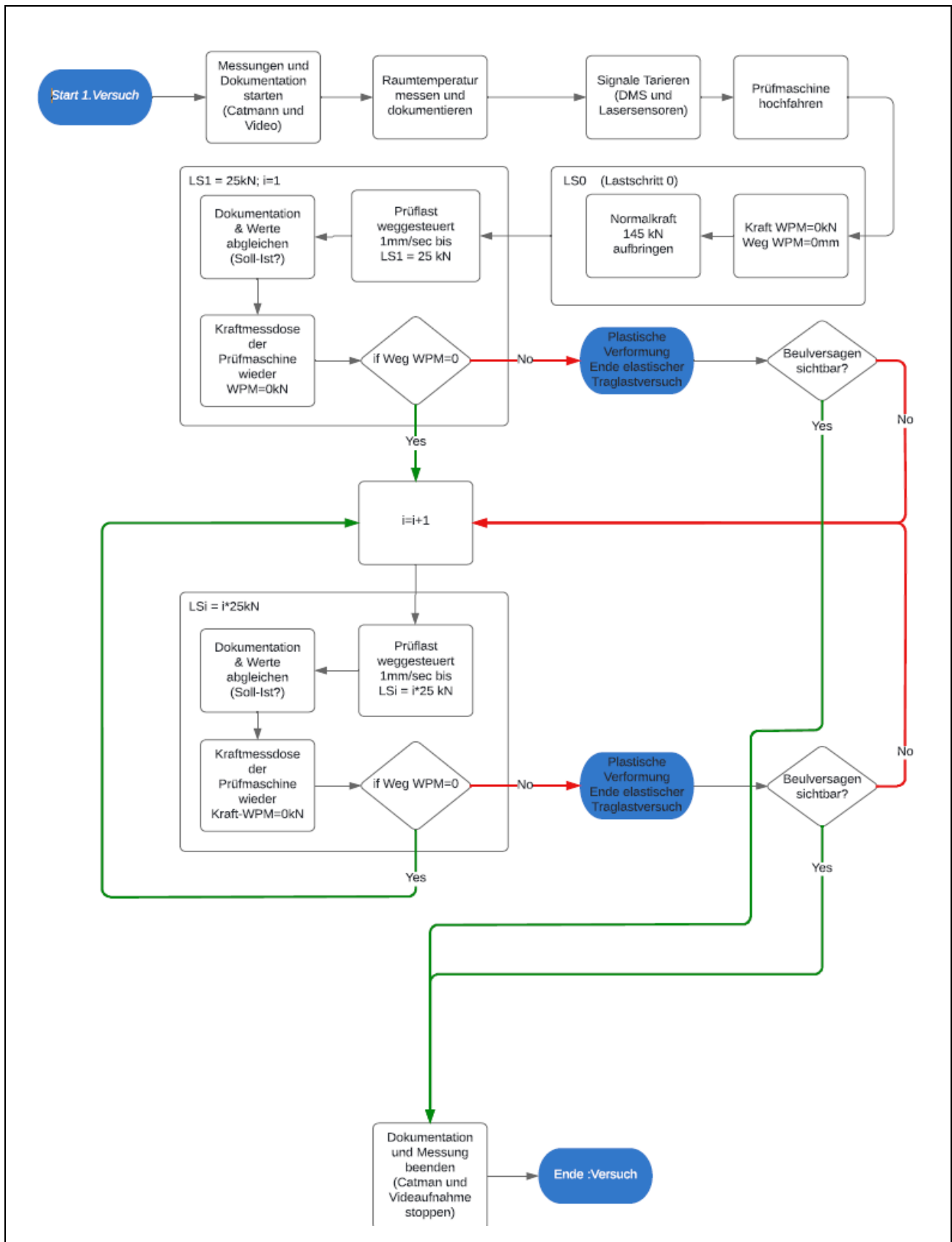


Abbildung 18-13: Ablaufschema für den Traglastversuch beim modularen Prüfkörper

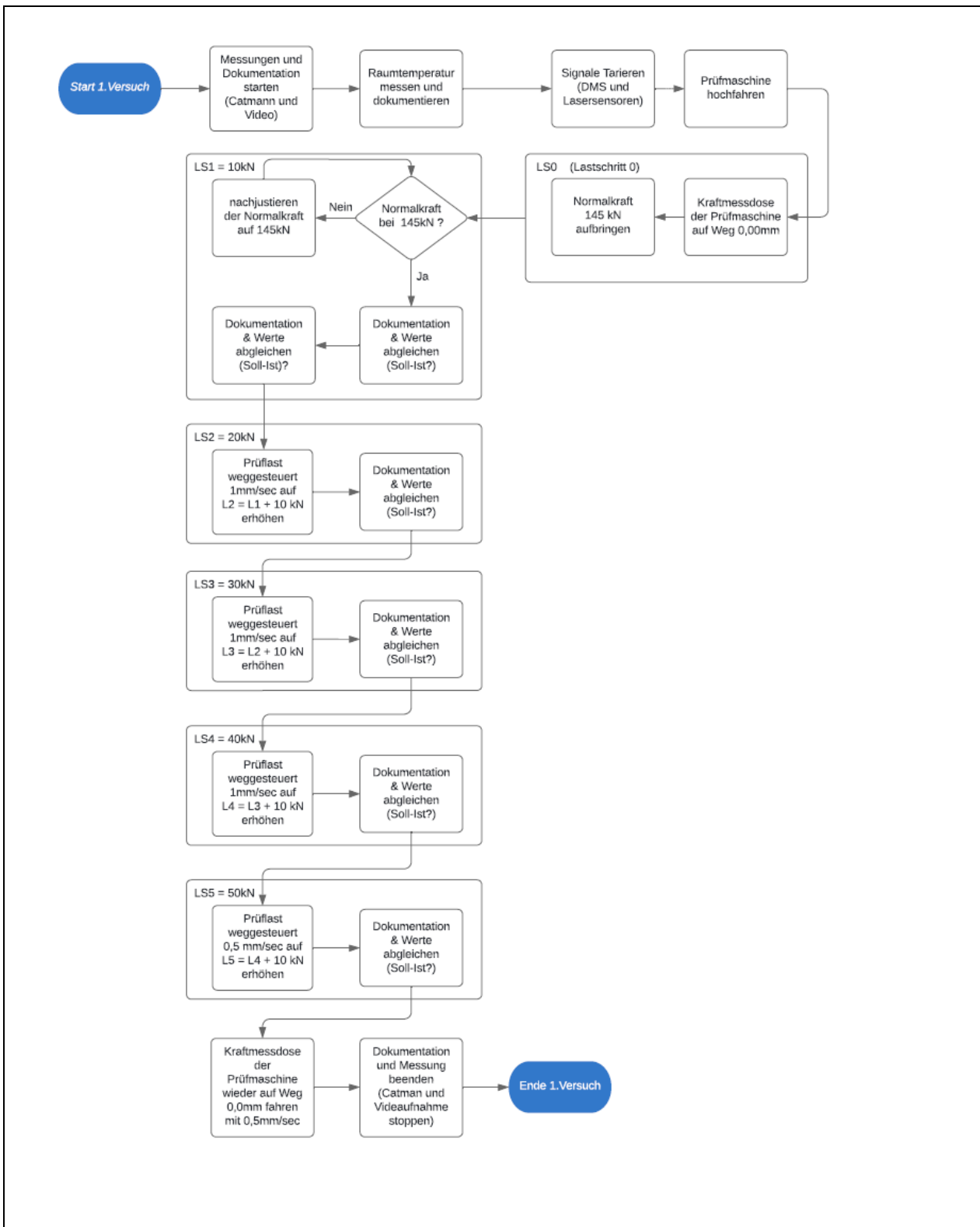


Abbildung 18-14: Ablaufschema für den Traglastversuch beim Referenzprüfkörper

## 18.7 Aufbringen der Normalkraft

Die Normalkraft (durch Turmmittelachse, zwischen Lasteinleitungskreuz und Einspannvorrichtung) wurde mittels einer Gewindestange aufgebracht. Um die Vorspannkraft messtechnisch einstellen und überprüfen zu können, wurde eine Messhülse integriert, auf der DMS appliziert waren (siehe auch Abbildung 18-6).

## 18.8 Messergebnisse

Sämtliche Rohdaten sind als Excel-Dateien auf einer externen Festplatte gespeichert und im Institut für Schiffbau und maritime Technik der FH-Kiel archiviert.

### 18.8.1 Messergebnisse - Referenzprüfkörper

Der Traglastversuch für den Referenzprüfkörper wurde mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 mm/s durchgeführt. Das in Abbildung 18-15 gezeigte Kraft-Weg-Diagramm setzt sich aus drei Einzelmessungen zusammen (Lastrampe 1 bis 3).

Die Prüfkraft steigt mit zunehmenden Prüfweg an und erreicht eine maximale Prüfkraft von 129,6 kN. Die kleinen Kraftabfälle im Diagramm sind dadurch entstanden, dass die Prüfkraft in Stufen aufgebracht wurde. Der Kraftabfall am Kurvenende resultiert aus einem Plattenbeulen im Druckspannungsbereich, ca. 350 mm entfernt von der Einspannvorrichtung, siehe Abbildung 18-17. Im zeitlichen Ablauf von Prüfkraft und Prüfweg lässt sich dieses durch den Kraftabfall bei zunehmendem Prüfweg erkennen, s. Abbildung 18-16.

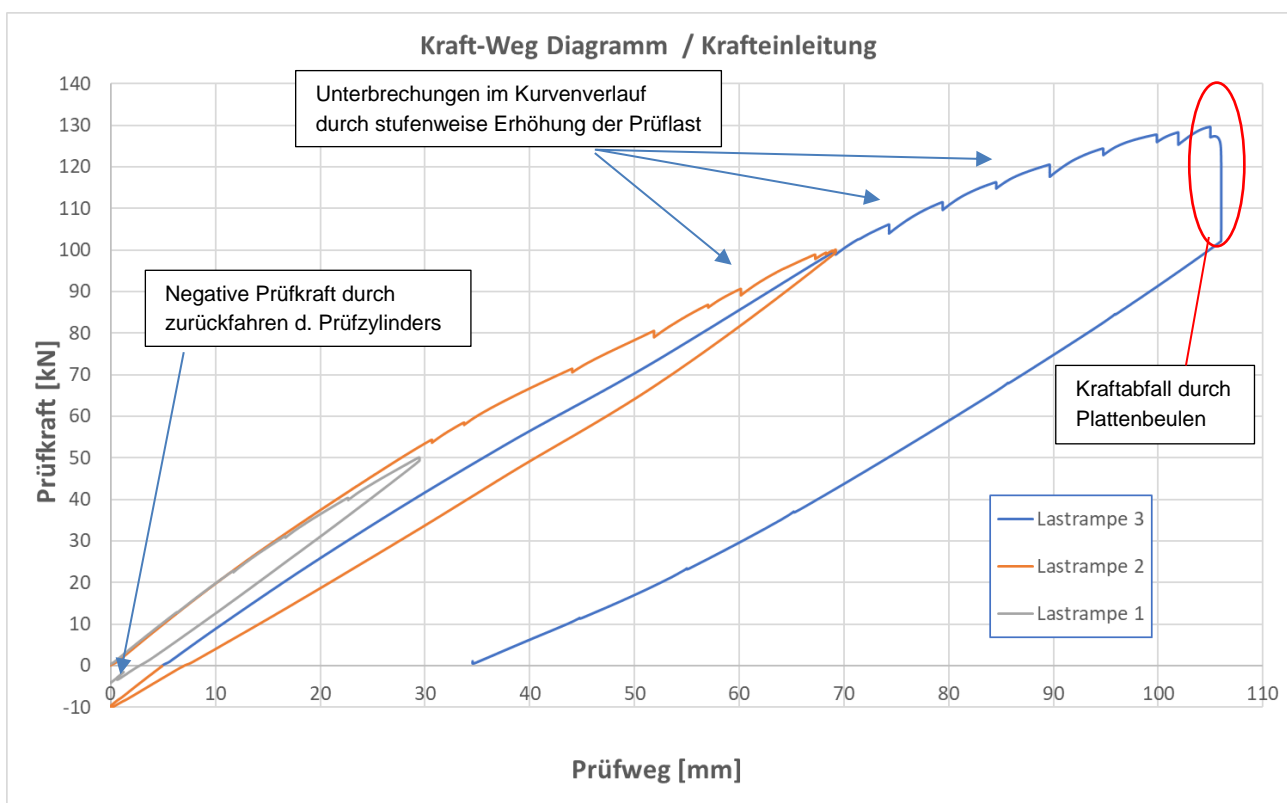


Abbildung 18-15: Kraft-Weg Diagramm für Referenzprüfkörper, gemessen an der Krafteinleitung

Weitere Details für jede Laststufe sind in den nachfolgenden Abschnitten mit weiteren Diagrammen und Abbildungen zu finden.

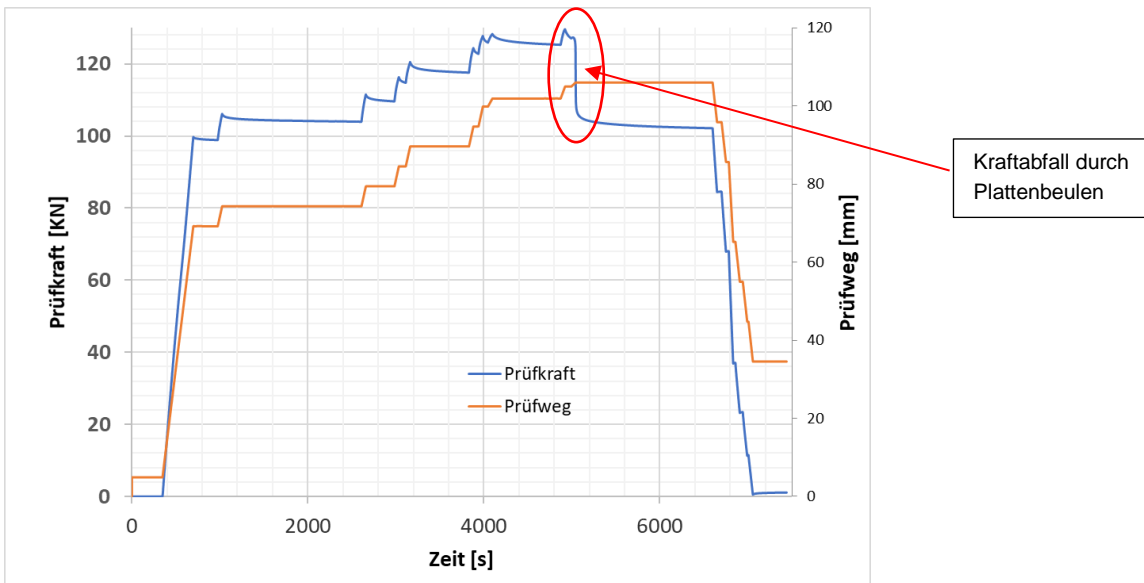


Abbildung 18-16: Kraft / Weg über Zeit, Referenzprüfkörper (Laststufe 130 kN)

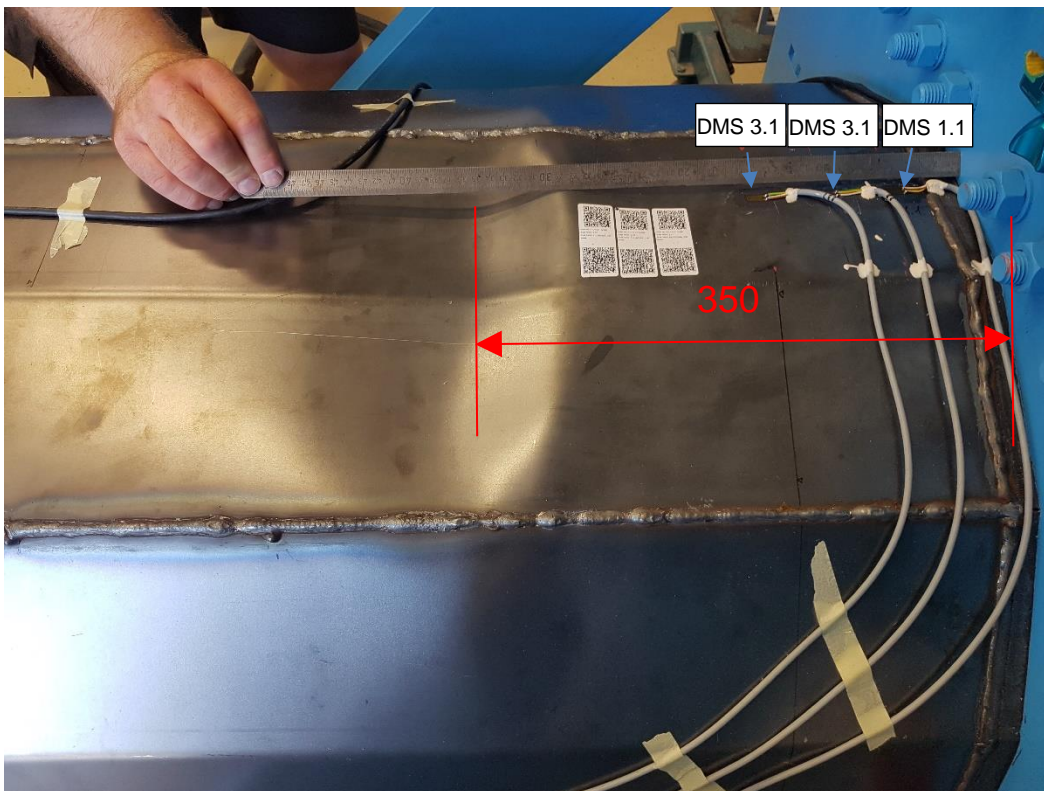


Abbildung 18-17: Plattenbeulen im Druckspannungsbereich nach Aufbringen der Maximallast

### 18.8.1.1 Laststufe 50kN / 100kN

Bei den Laststufen 50 kN und 100 kN ist an allen DMS Messstellen ein linearer Spannungsverlauf zu erkennen, was auf ein linear-elastisches Materialverhalten des Prüfkörpers hindeutet, s. Abbildung 18-18 und Abbildung 18-19.

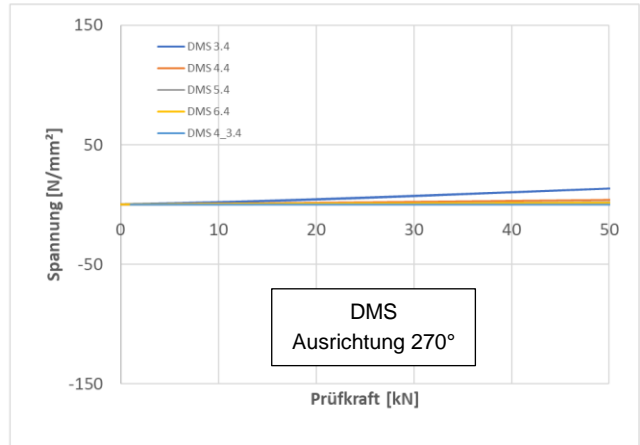
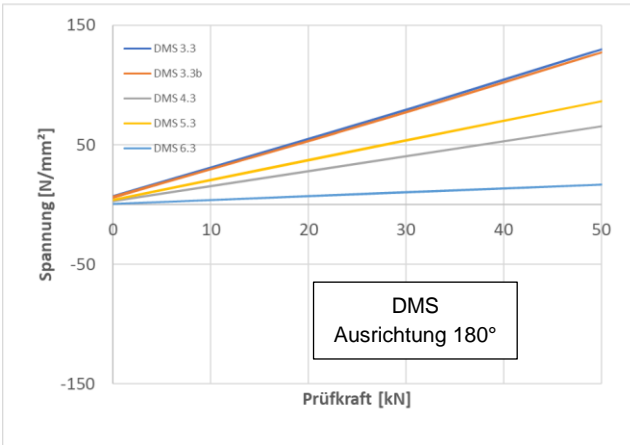
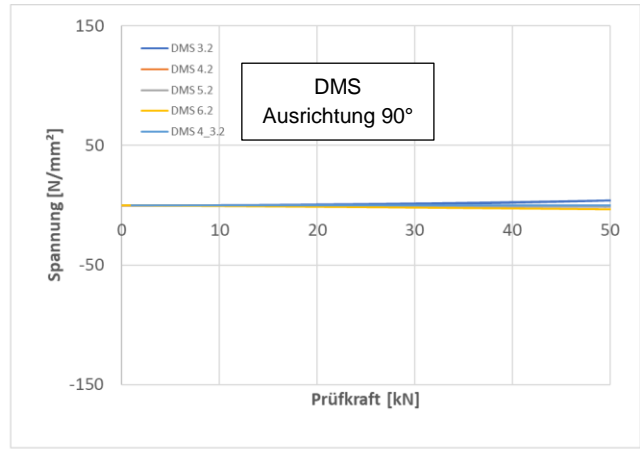
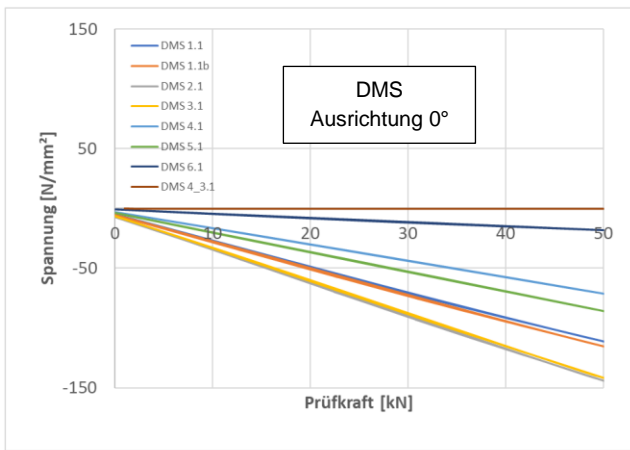


Abbildung 18-18: Spannungs-Kraftverlauf beim Referenzprüfkörper (Laststufe 50 kN)

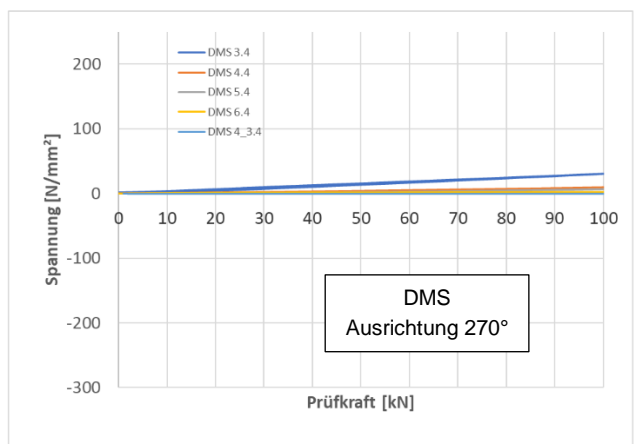
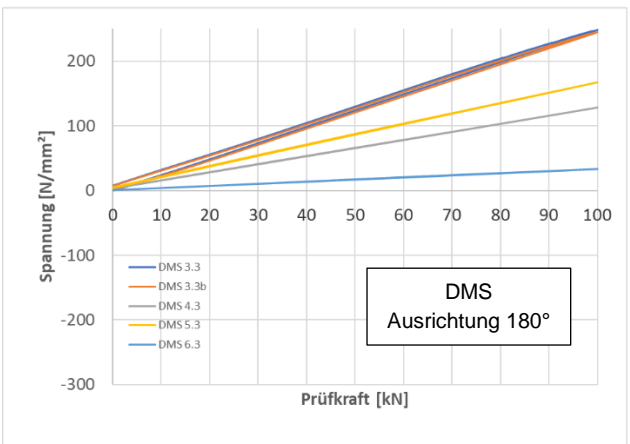
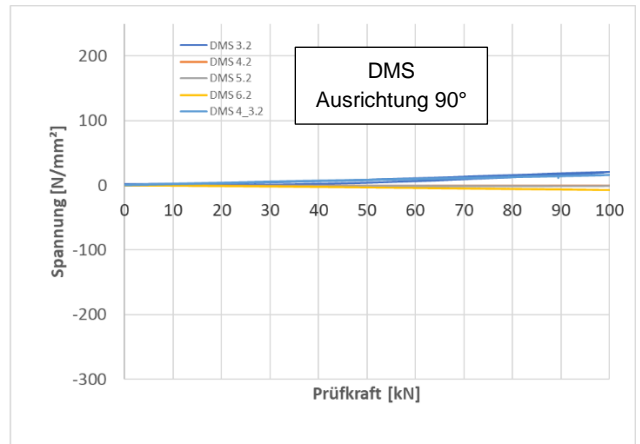
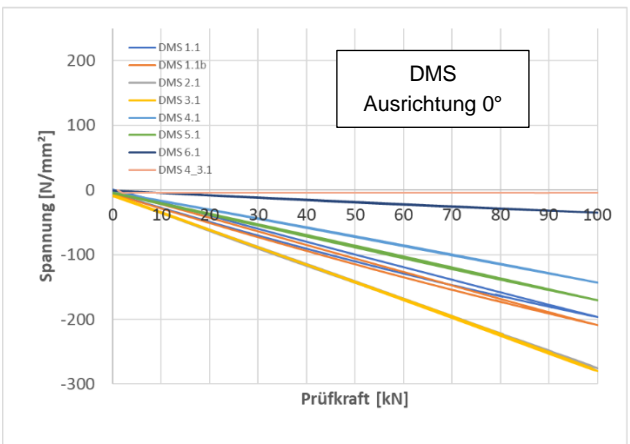


Abbildung 18-19: Spannungs-Kraftverlauf beim Referenzprüfkörper (Laststufe 100 kN)

### 18.8.1.2 Laststufe 130kN

Ab einer Prüflast von ca. 119 kN wird erstmalig die Streckgrenze von 337 N/mm<sup>2</sup> (Werkstoffkennwerte, siehe Kapitel 16.2) im Bereich der applizierten DMS 2.1 / DMS 3.1 überschritten, s. Abbildung 18-20 und Abbildung 18-21. Darin sind Spannung, Prüfkraft und Kolbenweg in Bezug zur Zeitachse dargestellt, um die Zusammenhänge am Beispiel des am höchsten belasteten Messbereich (Druckspannungen an Messstelle DMS 3.1) zu zeigen. Visuell konnte beim Erreichen der Maximallast ein Beulfeld im Druckspannungsbereich des DMS 3.1 festgestellt werden, s. Abbildung 18-17.

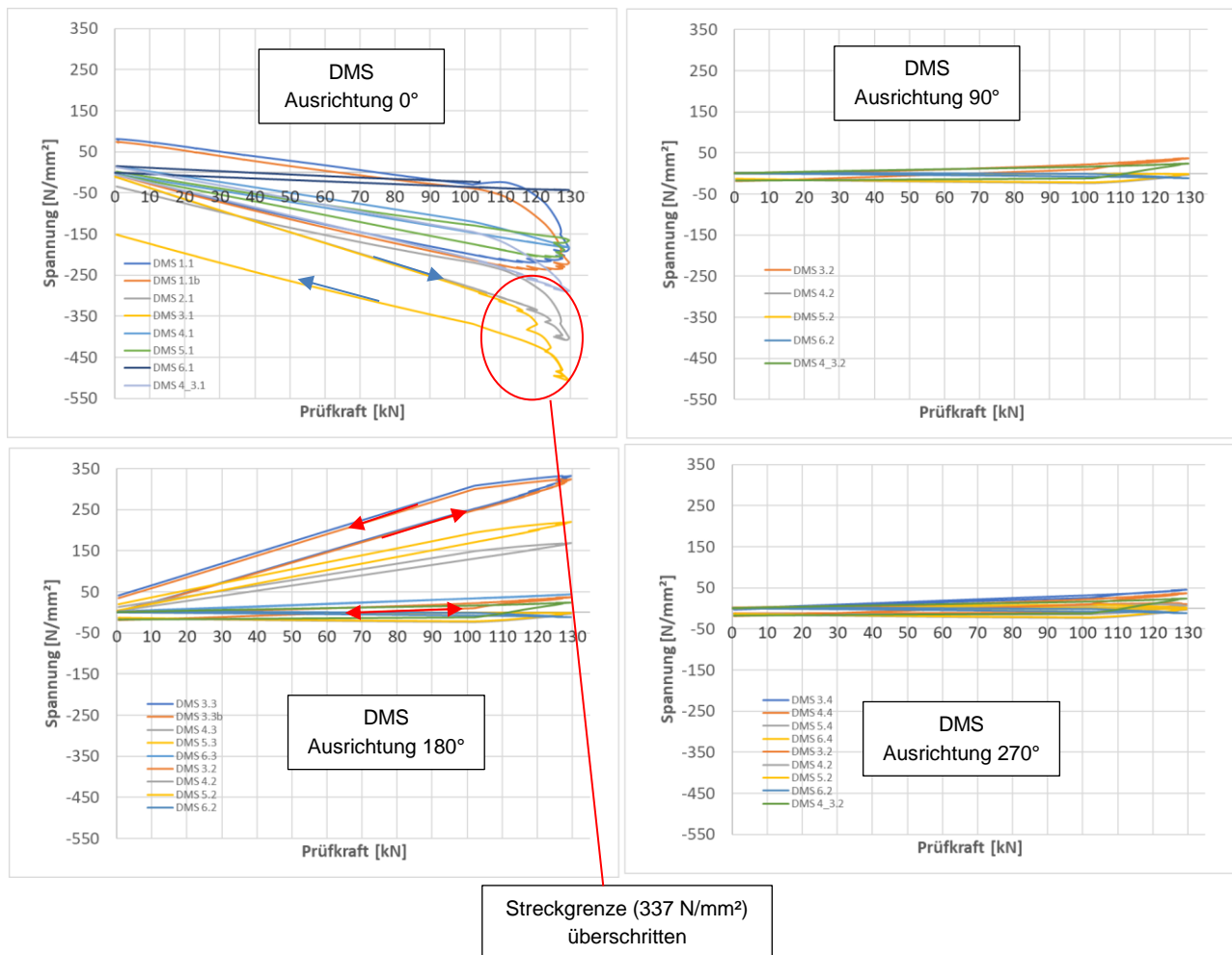
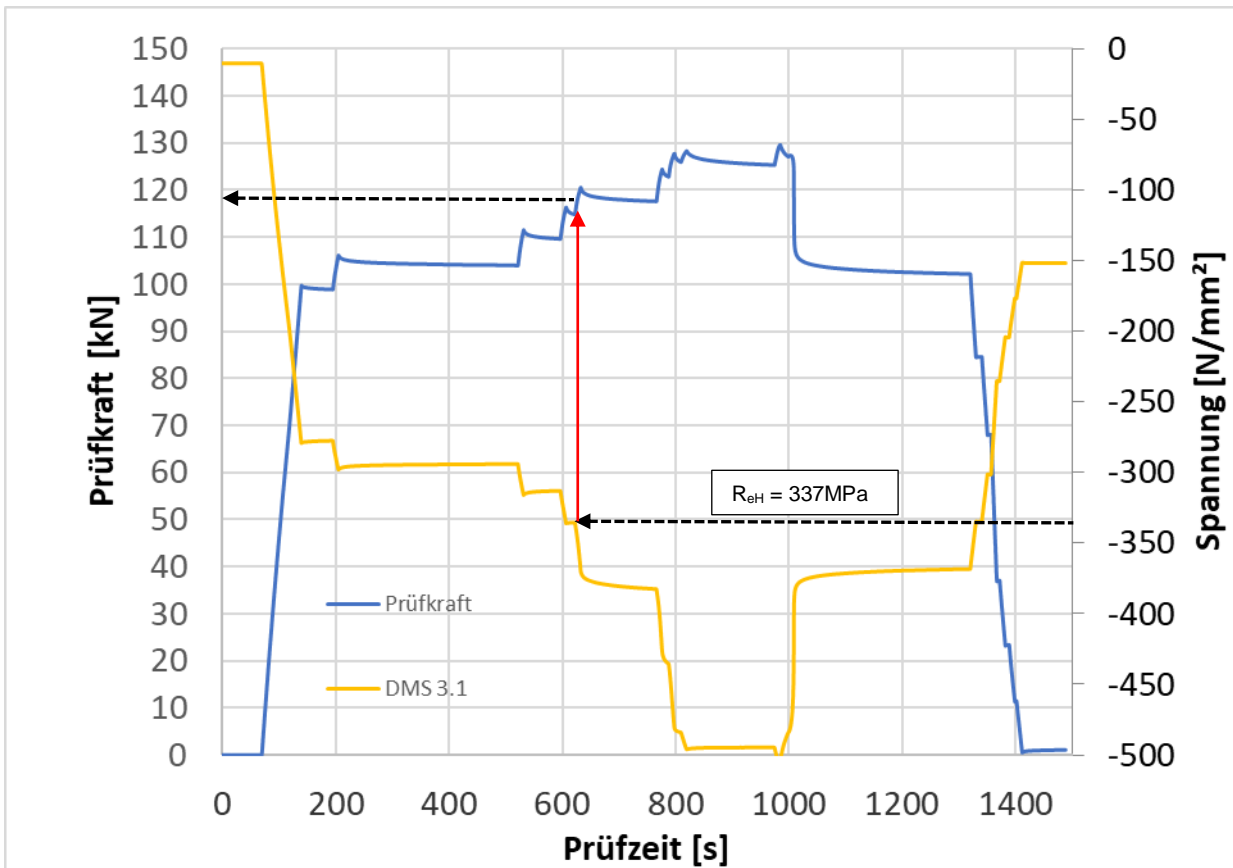


Abbildung 18-20: Spannungs-Kraftverlauf beim Referenzprüfkörper (Laststufe 130 kN)



- Initiale Druckspannung von 10 N/mm<sup>2</sup> bei Versuchsstart (F=0 kN)
- Bleibende Druckspannung von 151 N/mm<sup>2</sup> am Versuchsende (F=0 kN)
- Prüfkraft beim Erreichen der Streckgrenze ( $R_{eH}$ ) ~ 119 kN

Abbildung 18-21: Druckspannungsverlauf über die Prüfzeit für die Messtelle DMS 3.1 am Referenzprüfkörper (Laststufe 130 kN)



### 18.8.2 Messergebnisse - Modularer Prüfkörper (Pharos I, gesteckt)

Der Traglastversuch wurde mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 mm/s durchgeführt. Das in der Abbildung 18-22 gezeigte Kraft-Weg Diagramm setzt sich aus sechs Einzelmessungen zusammen (Lastrampe 1 bis 6). Die Prüfkraft steigt mit zunehmenden Prüfweg an und flacht nach dem Erreichen einer maximalen Prüfkraft von 69,8 kN soweit ab, dass der Versuch beendet werden musste.

Die sprunghaften Kraftabfälle im Kurvenverlauf resultieren durch das Abreißen einzelner M8 Verschraubungen am Lasteinleitungskreuz (siehe Abbildung 18-31 und Abbildung 18-35) und zum anderen aus einem Materialriss im Bereich der Flanschverbindung zum Lasteinleitungskreuz (Abbildung 18-35), sowie im Bereich der Einspannvorrichtung (Abbildung 18-36). Dieses ist in folgenden Abschnitten mit weiteren Diagrammen und Bildern für jede Laststufe näher dokumentiert.

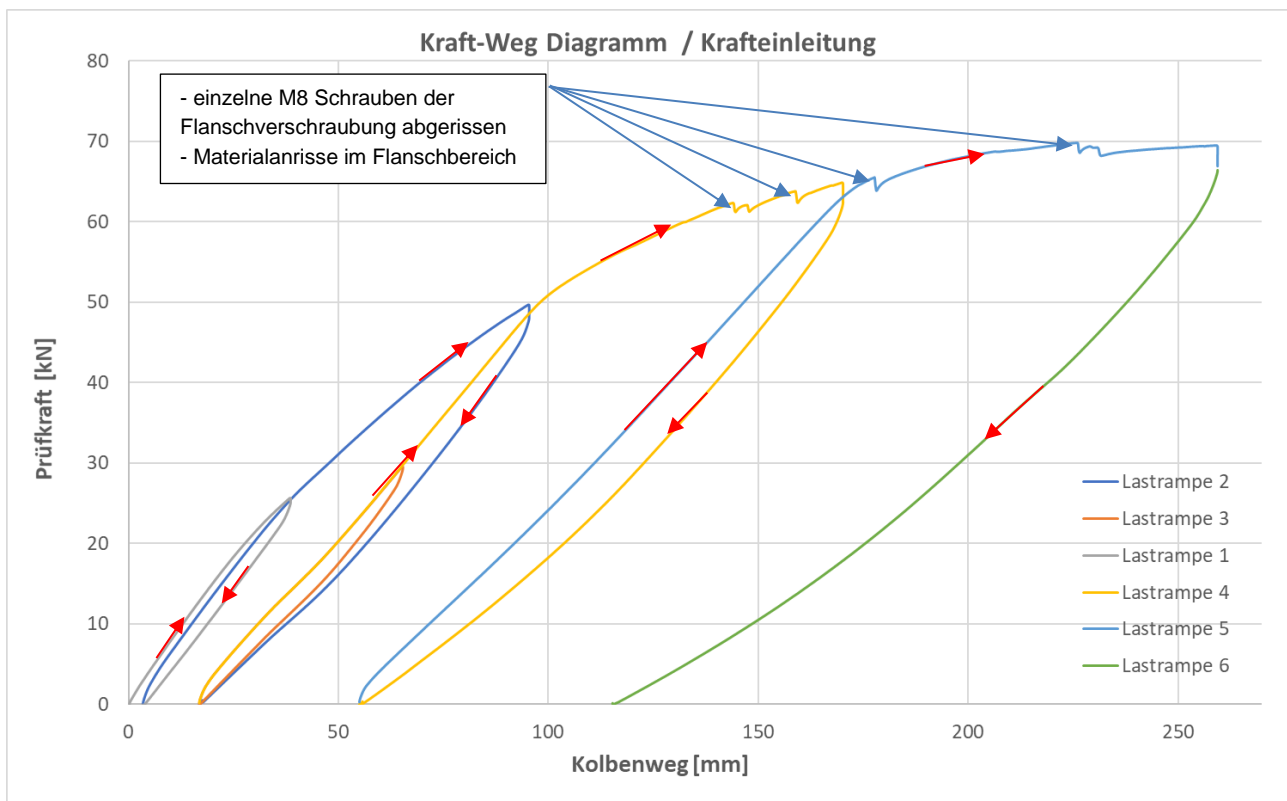


Abbildung 18-22: Kraft-Weg Diagramm für modularen Prüfkörper „Pharos I, gesteckt“, gemessen an der Krafteinleitung

### 18.8.2.1 Laststufe 25 kN

In der Laststufe 25 kN ist an allen DMS Messstellen ein linearer Spannungsverlauf zu erkennen, was auf ein linear-elastisches Verhalten des Prüfkörpers hindeutet, s. Abbildung 18-23.

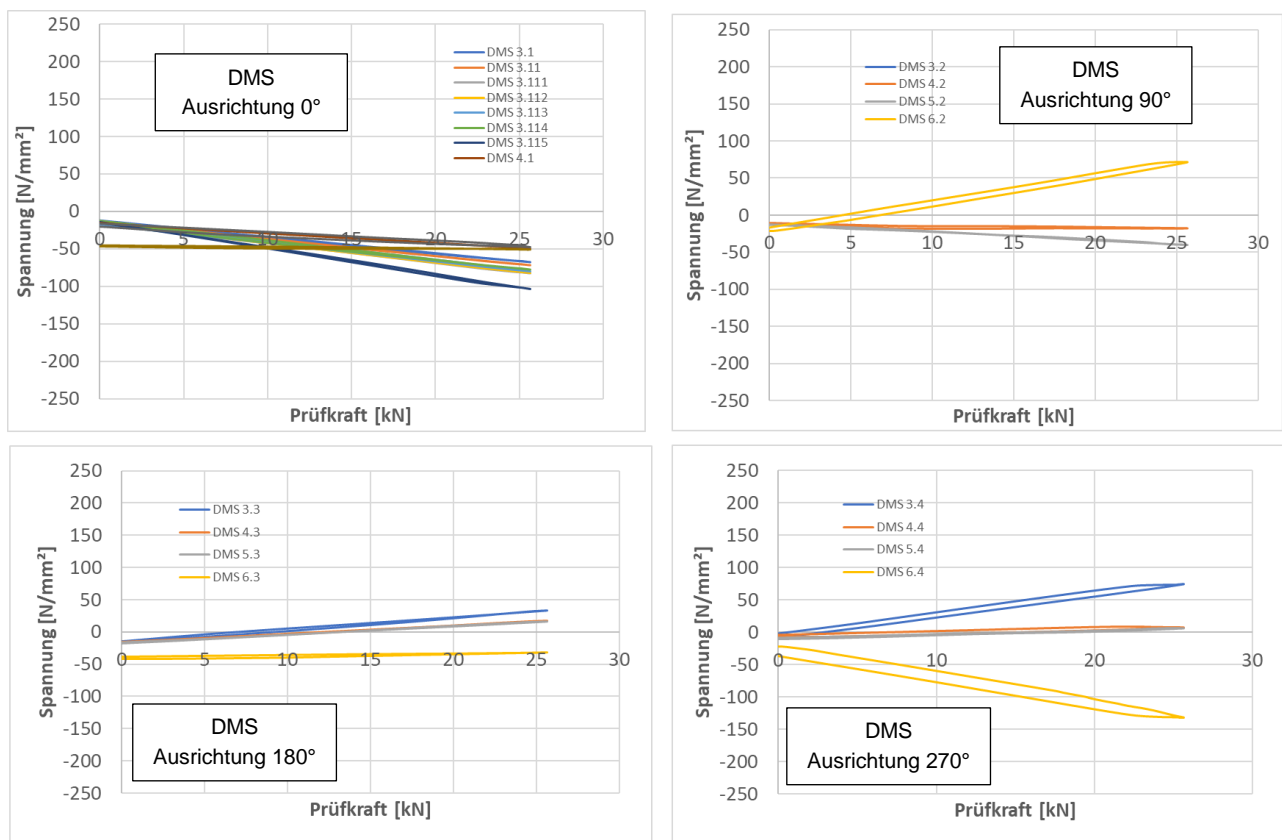


Abbildung 18-23: Spannungs-Kraftverlauf im modularen Prüfkörper (Laststufe 25 kN)

### 18.8.2.2 Laststufe 50 kN

In der Laststufe 50 kN (Abbildung 18-24 / Abbildung 18-25) zeigen fast alle DMS einen linearen Spannungsverlauf mit Ausnahme der Messtellen DMS 6.2 und DMS 6.4. An beiden Messtellen ist eine bleibende Dehnung nach Entlastung des Prüfkörpers zu erkennen.

An der Messtelle DMS 6.4 wurde eine maximale Druckspannung von  $-152 \text{ N/mm}^2$  gemessen bevor sich die Spannungsrichtung geändert hat und eine maximale Zugspannung von  $355 \text{ N/mm}^2$  erreicht wurde. Der linear-elastische Spannungsbereich der Messtelle DMS 6.4 wird bei einer Prüfkraft von ca. 30 kN verlassen, welches auf plastische Dehnungen bzw. bleibende Verformungen hinweist. An der Messtelle DMS 6.2 wurde eine maximale Zugspannung von  $186 \text{ N/mm}^2$  gemessen.

Unter Last konnte ein Plattenbeulen im Druckspannungsbereich der Turmsection 3 beobachtet werden (mittler Bereich, ca. 930 mm vom Lasteinleitungskreuz entfernt), s. Abbildung 18-26.

Des Weiteren wurde ein Spalt an der Flanschverbindung zum Lasteinleitungskreuz und eine Relativverschiebung der Doppelwandelemente festgestellt, s. Abbildung 18-26 und Abbildung 18-27.

Der maximal gemessene Längsverschub (-7,4 mm) wurde an der Messtelle „Schub 5.4“ gemessen, s. Abbildung 18-28.

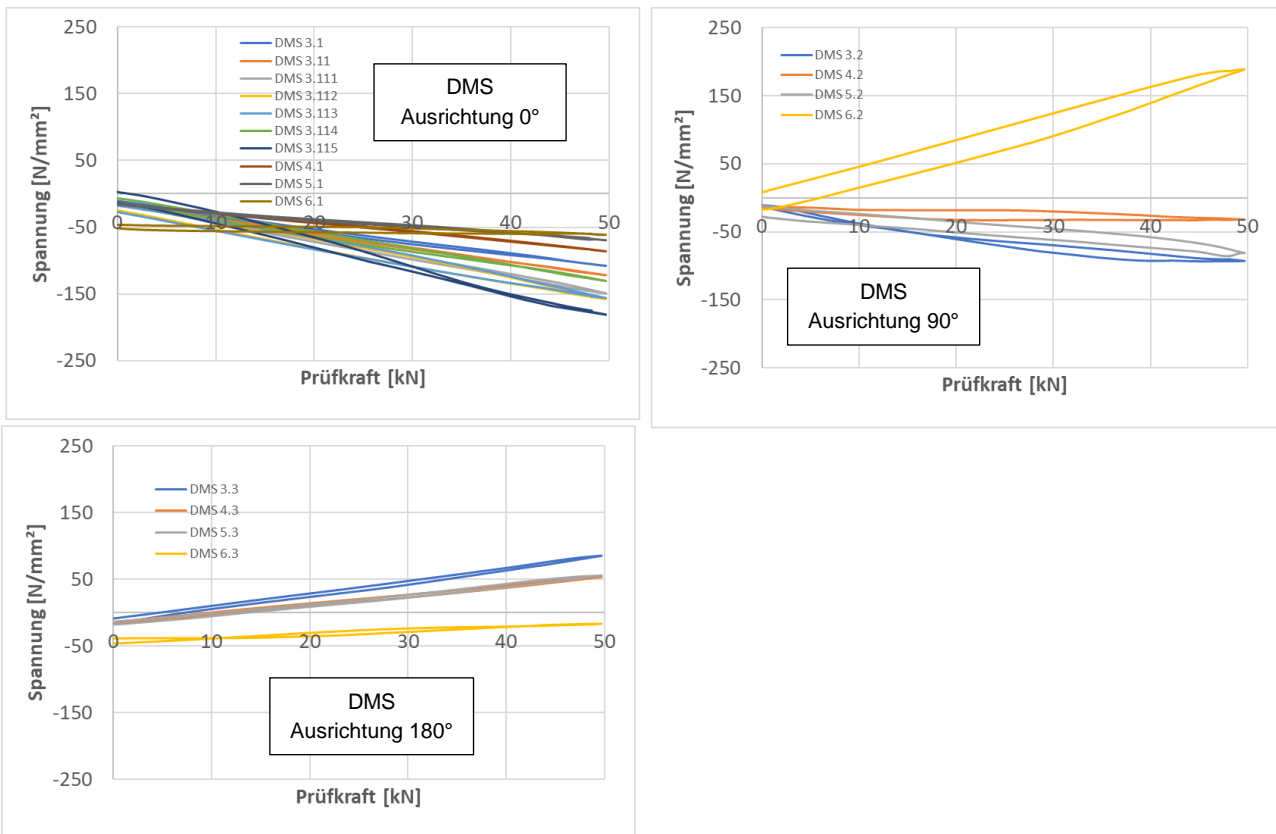


Abbildung 18-24: Spannungs-Kraftverlauf beim Prüfkörper „Pharos I“ (Laststufe 50 kN)

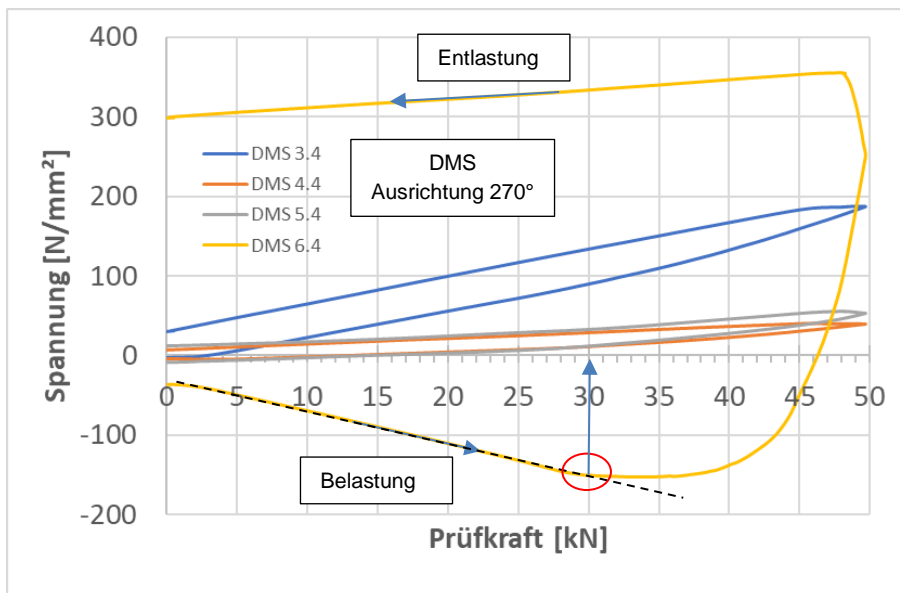


Abbildung 18-25: Spannungs-Kraftverlauf beim Prüfkörper „Pharos I“ (Laststufe 50 kN)

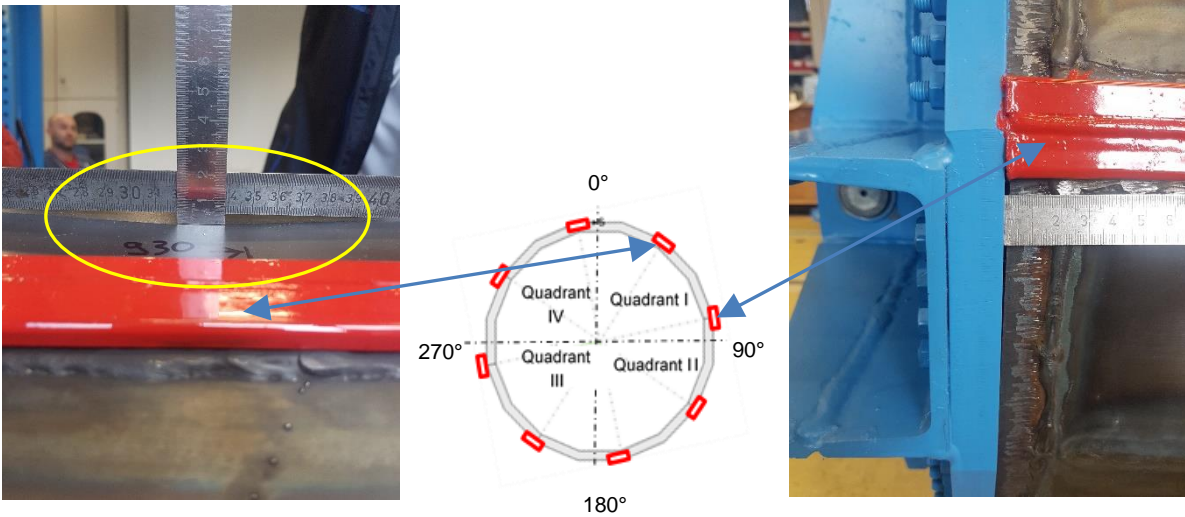


Abbildung 18-26: Links: Plattenbeulen im mittleren Bereich der Turmsection 3, 930 mm vom Lasteinleitungskreuz (Druckspannungsbereich), Rechts: Spalt zwischen Lasteinleitungskreuz und Flansch, (unter Last: 50 kN)

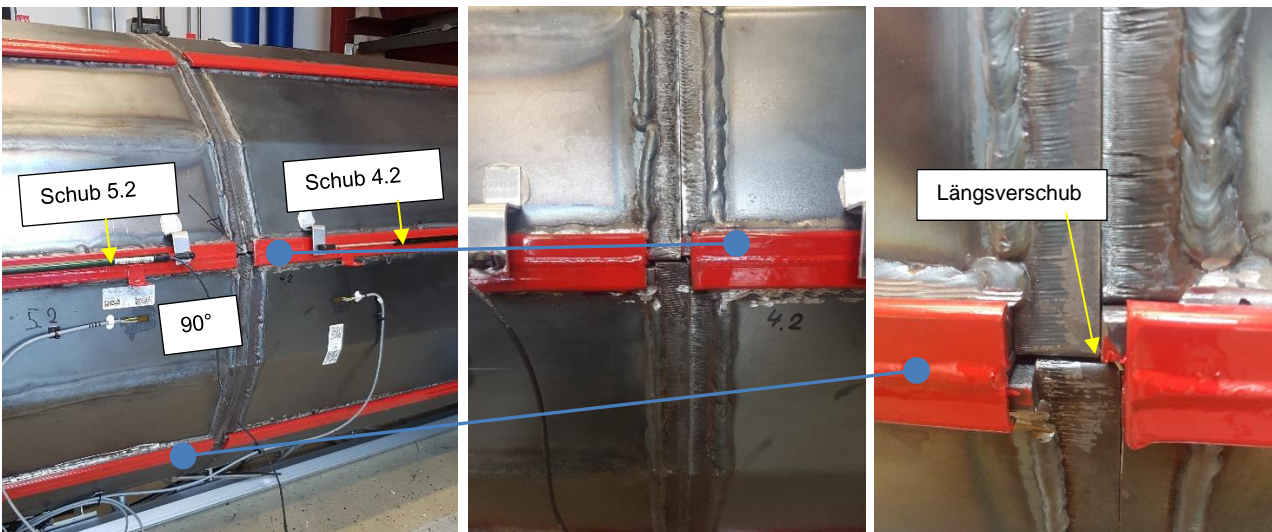


Abbildung 18-27: Längsverschiebung der DWE zwischen Turmsection 3 und 4 (unter Last 50 kN)

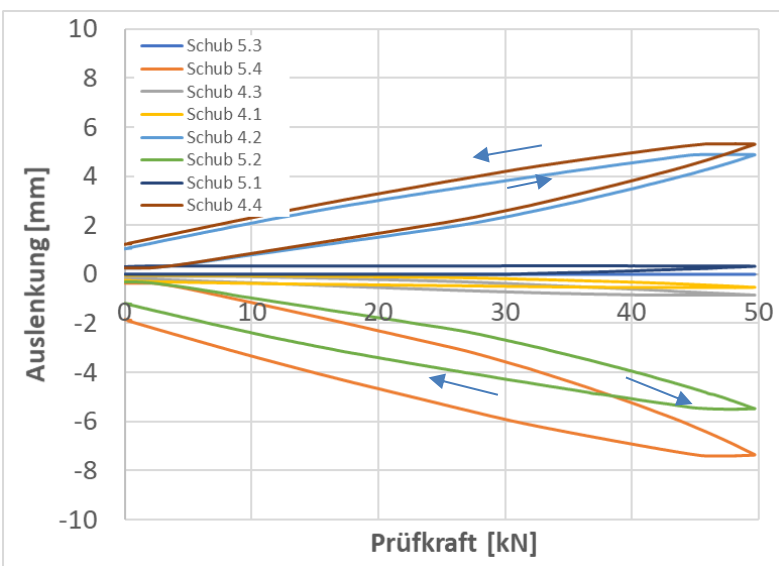


Abbildung 18-28: Längsverschiebung der Doppelwandelemente (Laststufe 50 kN)

### 18.8.2.3 Laststufe 65 kN

Für die Laststufe 65 kN ist der Spannungs-Kraftverlauf aller DMS Messstellen in der Abbildung 18-29 wiedergegeben. Die größten Spannungsveränderungen sind im seitlichen Bereich des Prüfkörpers (90° und 270° Ausrichtung, Messtellen DMS 6.2 und DMS 6.4) zu finden.

An diesen Messtellen ist eine bleibende Spannung nach Entlastung des Prüfkörpers zu festzustellen. An der Messtelle DMS 6.2 wurde eine maximale Zugspannung von 186 N/mm<sup>2</sup> gemessen. An der Messtelle DMS 6.4 ergab sich eine maximale Druckspannung von -152 N/mm<sup>2</sup> bevor sich die Spannungsrichtung geändert hat und eine Zugspannung von 355 N/mm<sup>2</sup> gemessen wurde. Unter Last konnte ein Plattenbeulen im Druckspannungsbereich der Turmsektion 3 beobachtet werden (mittler Bereich, ca. 930 mm vom Lasteinleitungskreuz entfernt), s. Abbildung 18-26.

Des Weiteren wurde folgendes beobachtet:

- Plattenbeulen im Messtellenbereich DMS 6.4 / DMS 6.2, s. Abbildung 18-30 u. Abbildung 18-31
- Spalt an der Flanschverbindung zum Lasteinleitungskreuz vergrößert, s. Abbildung 18-30 und Abbildung 18-31
- Relativverschiebung zwischen den Doppelwandelementen hat sich fortgesetzt, max. Längsverschub (-13,1 mm) wurde an der Messtelle „Schub 5.4“ gemessen, s. Abbildung 18-33.

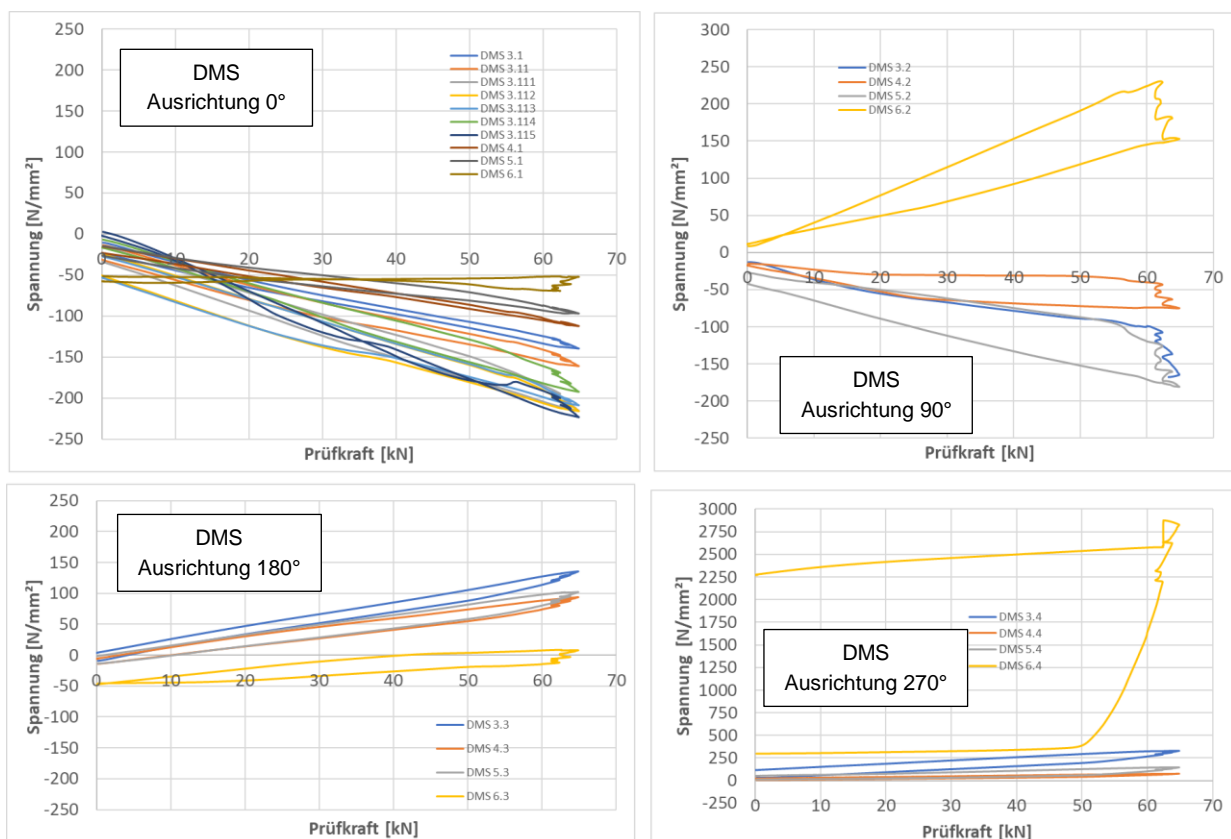


Abbildung 18-29: Spannungs-Kraftverlauf beim Prüfkörper „Pharos I“ (Laststufe 65 kN)

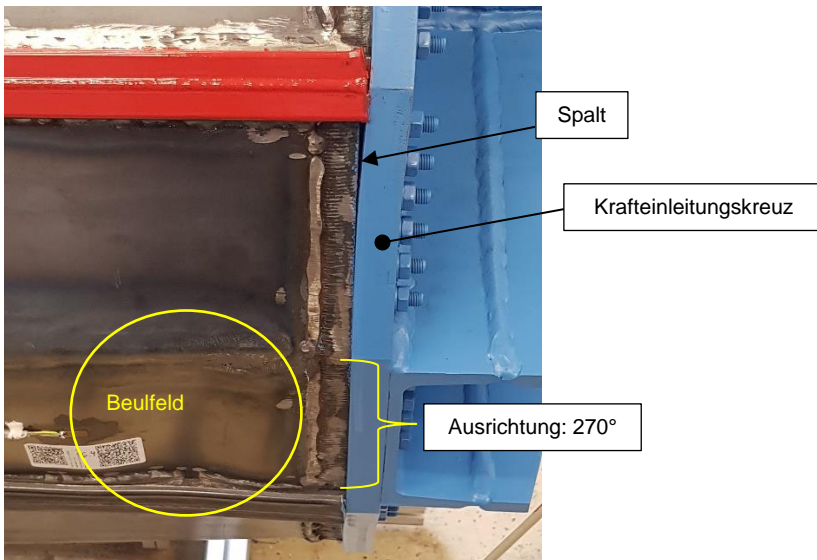
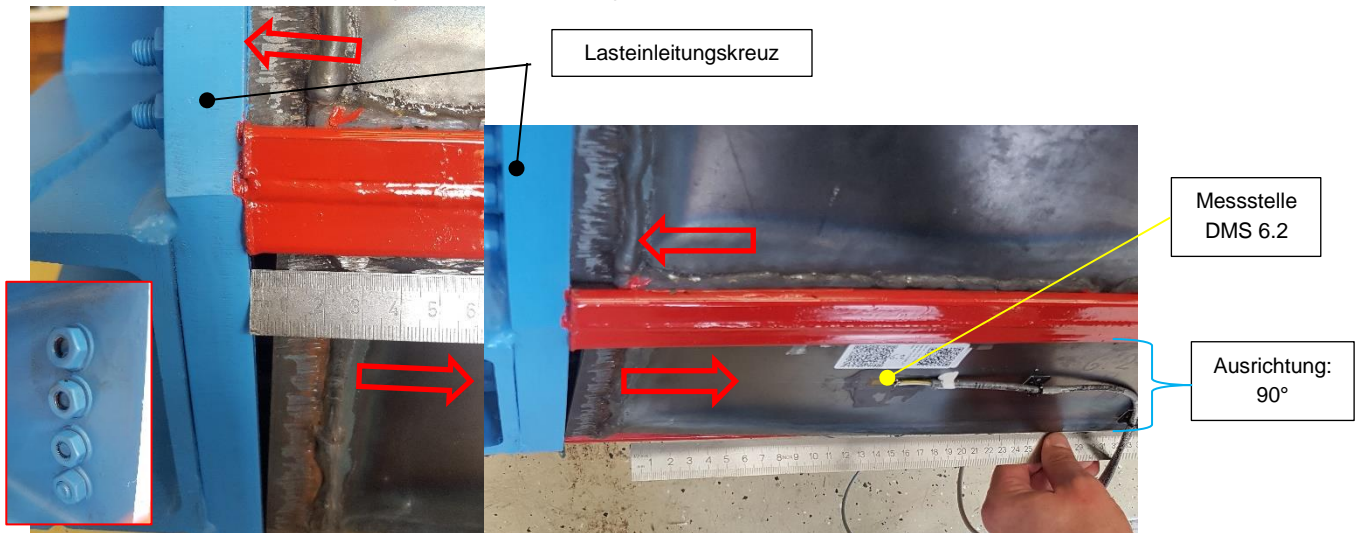


Abbildung 18-30: Spalt zwischen Lasteinleitungskreuz und Flansch, sowie Plattenbeulen im Messstellenbereich DMS 6.4 (unter Last 65 kN)



Symbolik für Richtung des Kraftflusses: ←

Abbildung 18-31: Links: Spalt zw. Lasteinleitungskreuz und Flansch (Flanschverschraubungen M8 haben versagt), Rechts: Plattenbeulen im Messstellenbereich (unter Last 65kN)

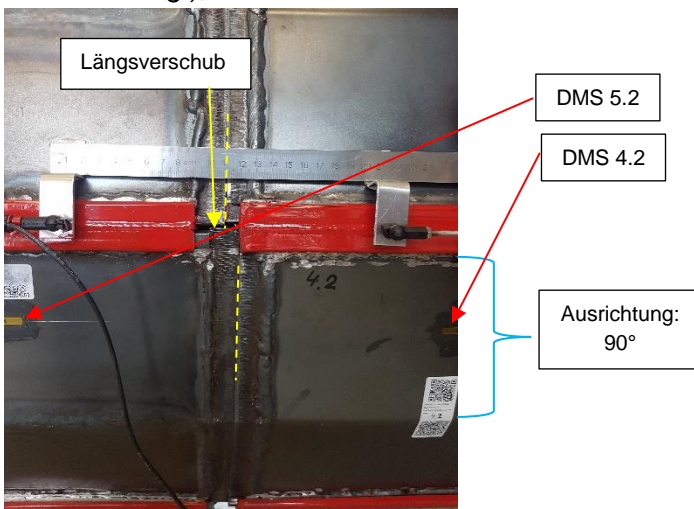


Abbildung 18-32: Verschobene Flanschverbindung der Turmsektion 3 / 4, im Messstellenbereich DMS 4.2 / DMS 5.2 (unter Last: 65kN)

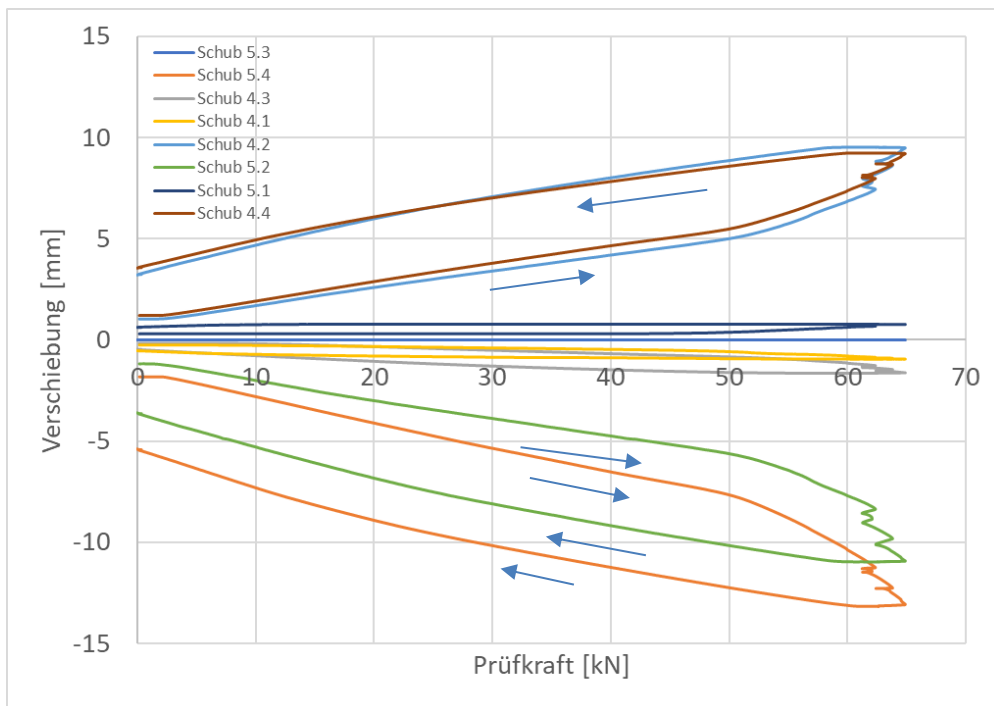


Abbildung 18-33: Längsverschiebung der Doppelwandelemente (Laststufe 65 kN)

#### 18.8.2.4 Laststufe 70 kN

Für die Laststufe 70 kN ist der Spannungs-Kraftverlauf aller DMS-Messstellen in der Abbildung 18-34 dargestellt. Die größten Spannungsveränderungen sind im seitlichen Bereich des Prüfkörpers (90° und 270° Ausrichtung, Messtellen DMS 3.2 und DMS 6.4) zu finden.

Des Weiteren wurde folgendes beobachtet:

- Plattenbeulen im Messtellenbereich DMS3.2 / DMS6.4 / DMS6.2, s. Abbildung 18-35 und Abbildung 18-36.
- Spalt an der Flanschverbindung zum Lasteinleitungskreuz vergrößert, s. Abbildung 18-35.
- Materialriss im Doppelwandelement (Messtellenbereich 6.4), siehe Abbildung 18-35.
- Relativverschiebung zwischen den Doppelwandelementen hat sich fortgesetzt, max. Längsverschub (-18,1 mm) wurde an der Messtelle „Schub 5.4“ gemessen, s. Abbildung 18-37.
- Kein „Rauspringen“ der Profilverbinder durch Längsverschub.

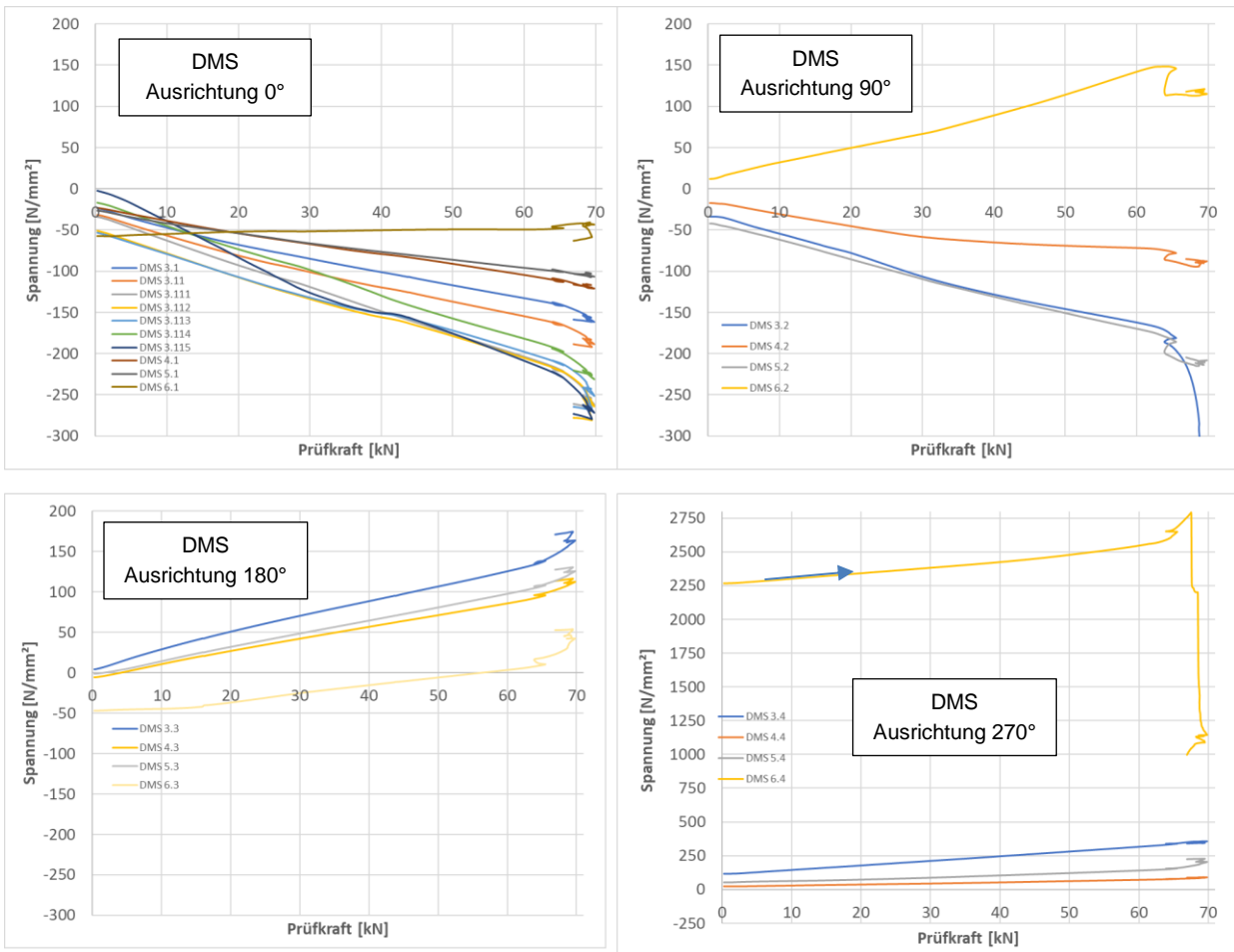
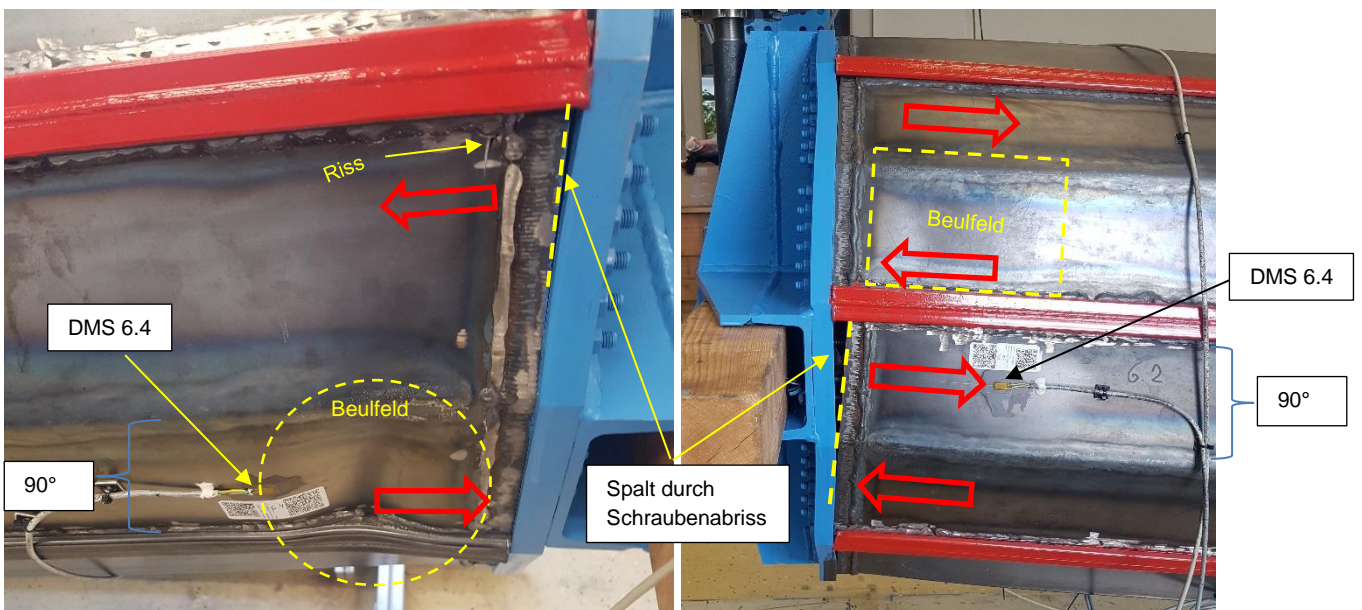


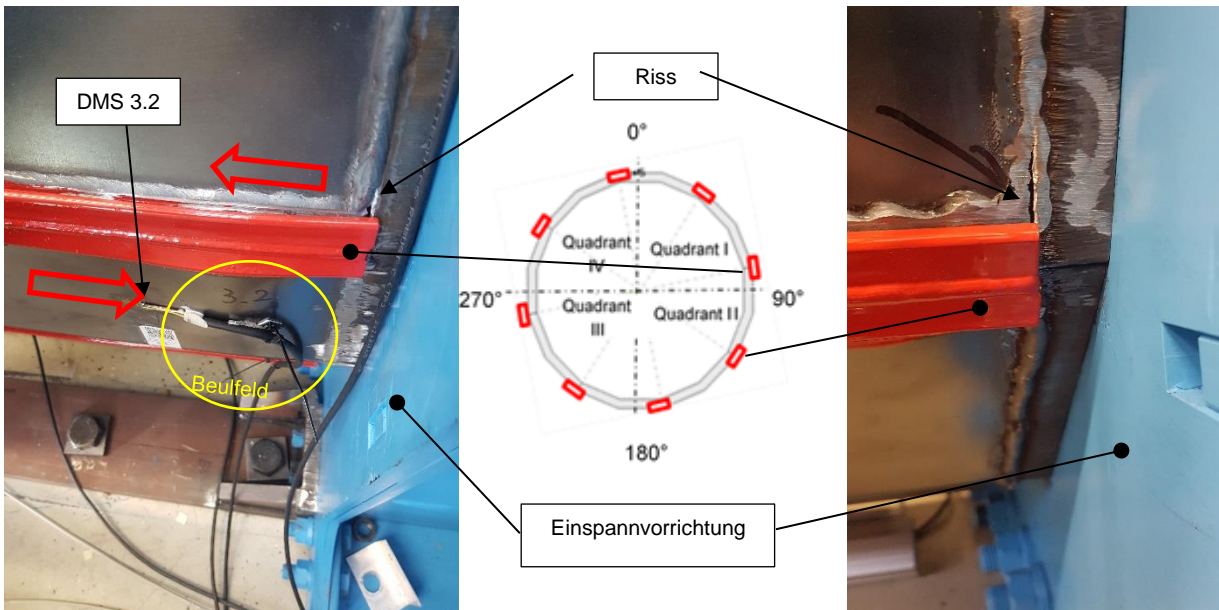
Abbildung 18-34: Spannungs-Kraftverlauf beim Prüfkörper „Pharos I“ (Laststufe 70 kN)



Symbolik für Kraftfluss im Doppelwandelement:

Abbildung 18-35: Plattenbeulen im Messtellenbereich DMS 6.4 / DMS 6.2 (unter Last: 70 kN)





Symbolik für Kraftfluss im Doppelwandelement: 

Abbildung 18-36: Beulen im Messtellenbereich DMS 3.2 / Materialrisse (Bild unter Last: 70 kN)

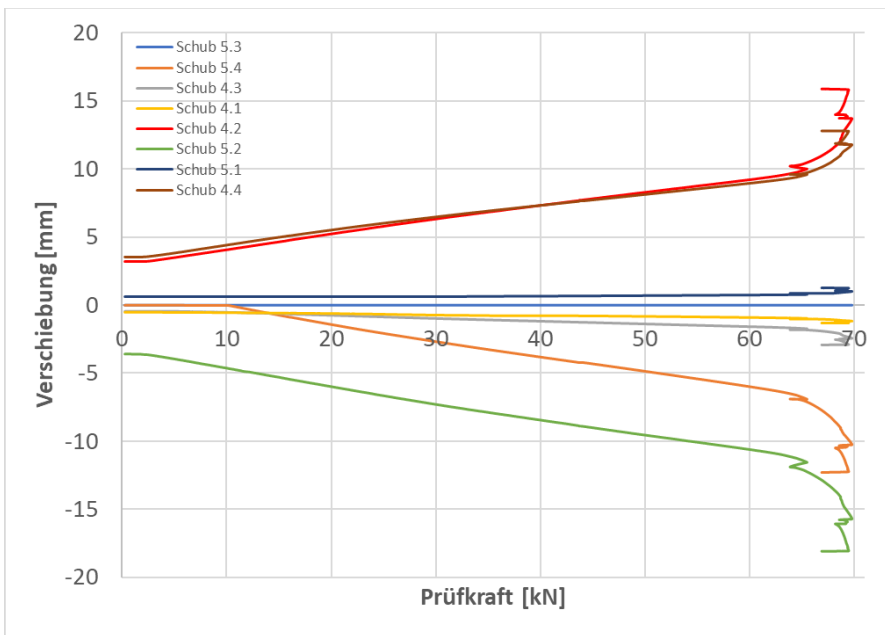


Abbildung 18-37: Längsverschiebung der Doppelwandelemente (Laststufe 70 kN)

### 18.8.3 Messergebnisse - Modularer Prüfkörper (Pharos II, geschraubt)

Der Traglastversuch wurde mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,1 mm/s durchgeführt. Das in der Abbildung 18-38 gezeigte Kraft-Weg-Diagramm setzt sich aus sieben Einzelmessungen zusammen (Lastrampe 2 bis 8). Die Prüfkraft steigt mit zunehmenden Prüfweg an und fällt nach dem Erreichen einer maximalen Prüfkraft von 140,0 kN gleichmäßig ab. Der Kraftabfall am Kurvenende resultiert aus dem Plattenbeulen im Bereich der höchsten Druckspannungen, siehe Abbildung 18-39, in direkter Nähe zur Einspannvorrichtung.

Der Druckspannungsverlauf im Bereich des Plattenbeulen konnte durch die Messtelle DMS 3.1 erfasst werden und ist in Abbildung 18-40 bis Abbildung 18-42 dargestellt. Die Materialstreckgrenze von 337 N/mm<sup>2</sup> (Werkstoffkennwerte siehe Kapitel 16.2) wird bei einer Prüflast von ca. 100 kN überschritten.

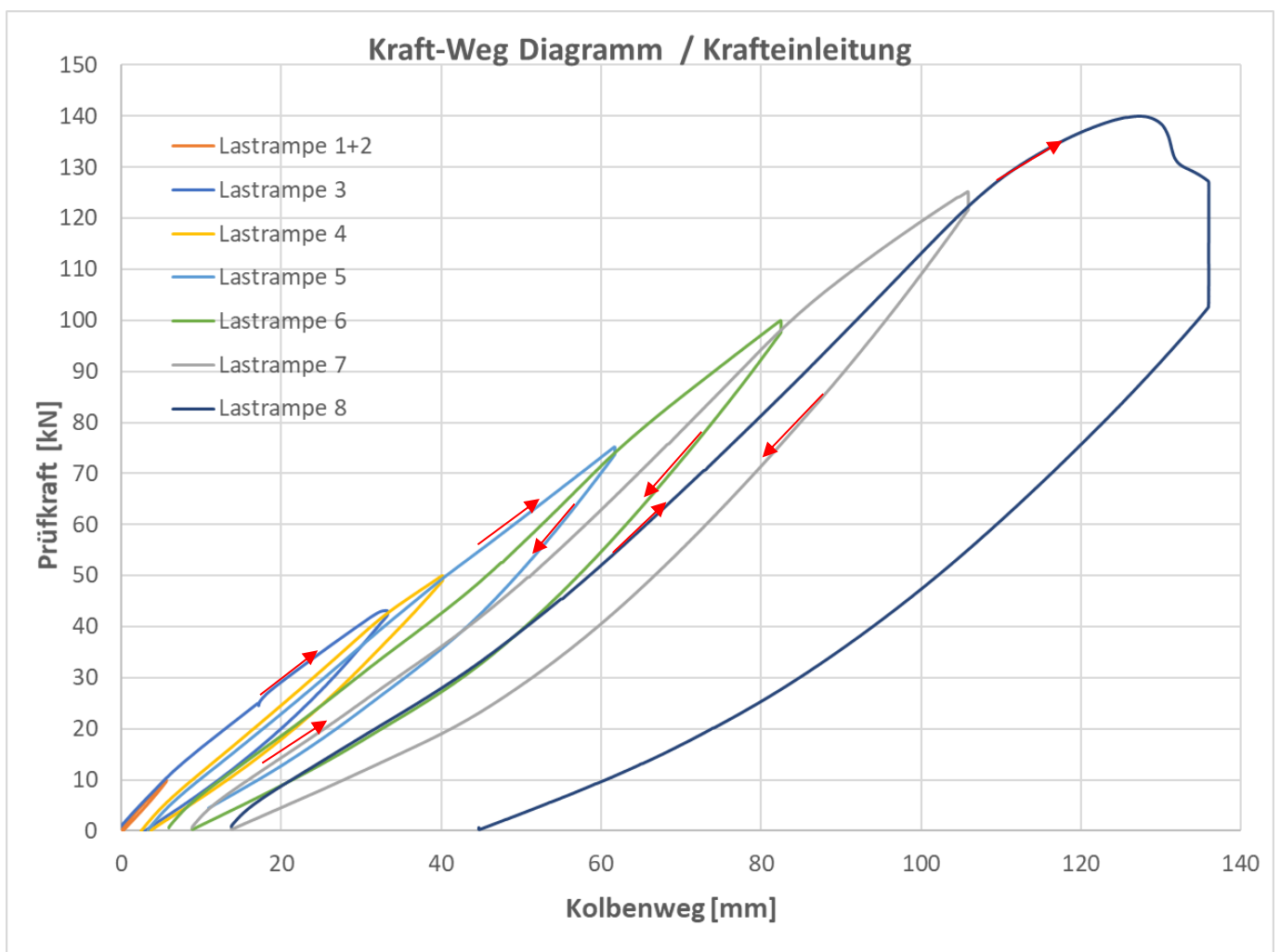


Abbildung 18-38: Kraft-Weg Diagramm für modularen Prüfkörper „Pharos II, geschraubt“, gemessen an der Krafteinleitung

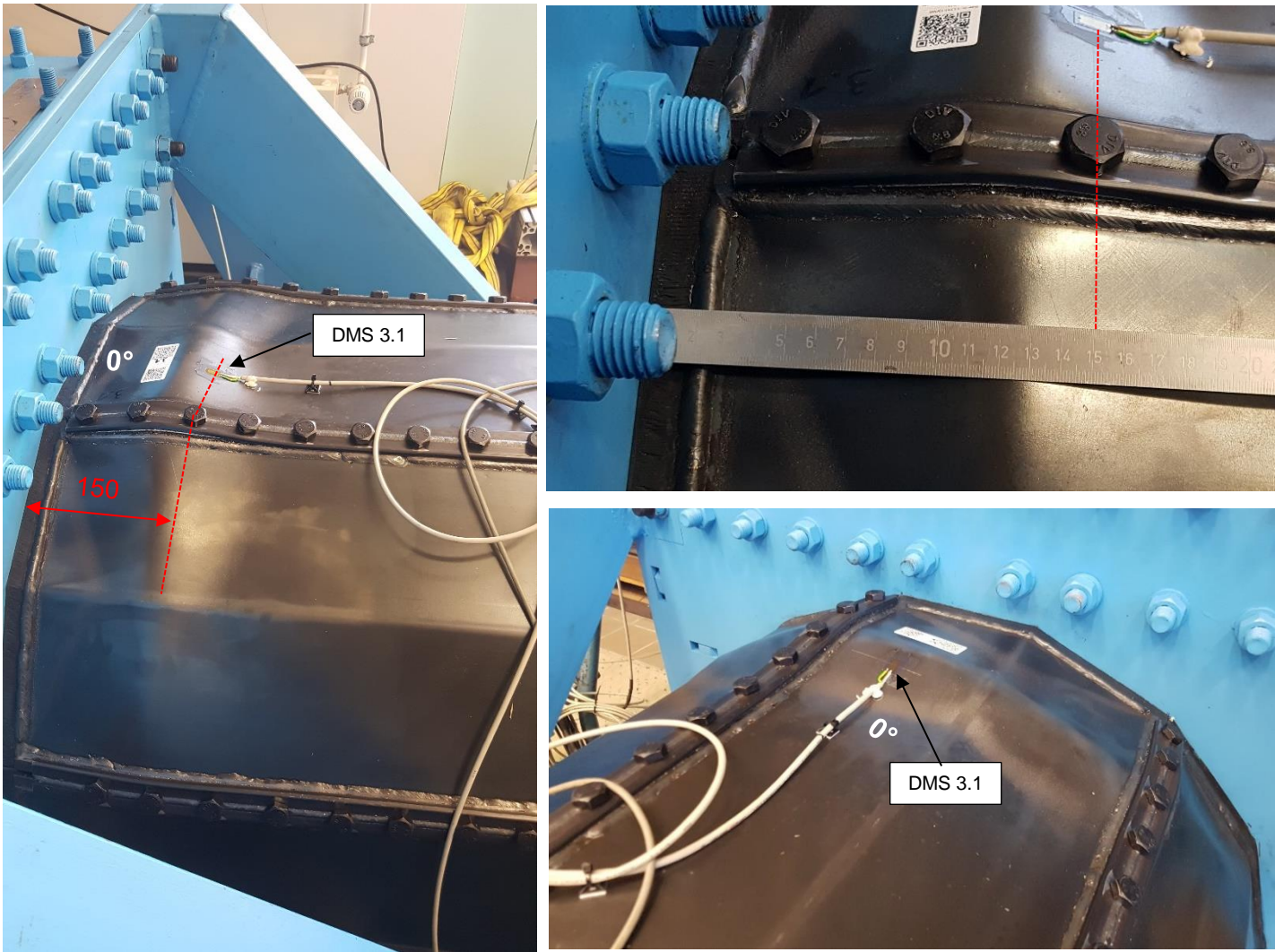


Abbildung 18-39: Plattenbeulen nach dem Aufbringen der maximalen Prüflast im Bereich größter Druckspannungen (DMS3.1), in direkter Nähe zur Einspannvorrichtung

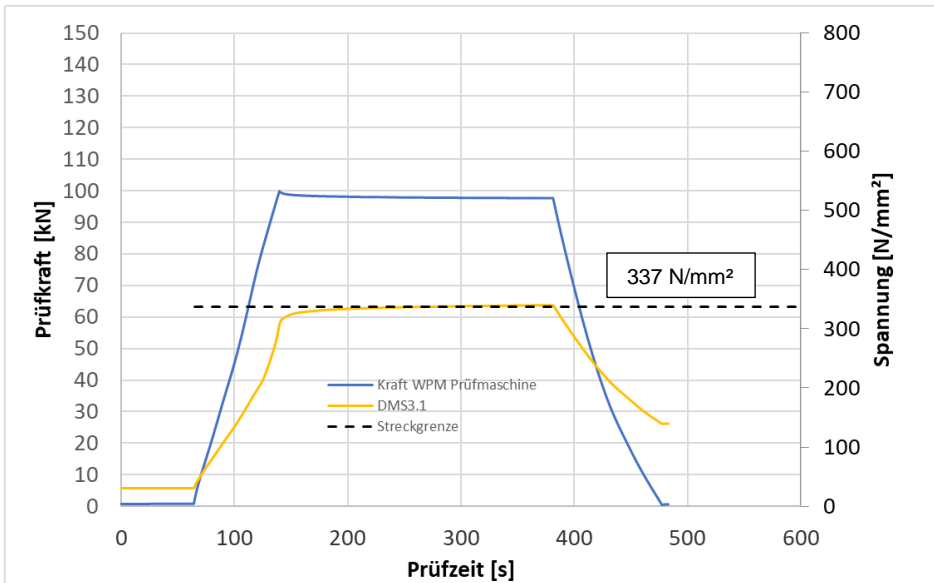


Abbildung 18-40: Druckspannungsverlauf im Messstellenbereich DMS 3.1 und Prüfkraft im zeitlichen Prüfverlauf (Laststufe 100 kN)

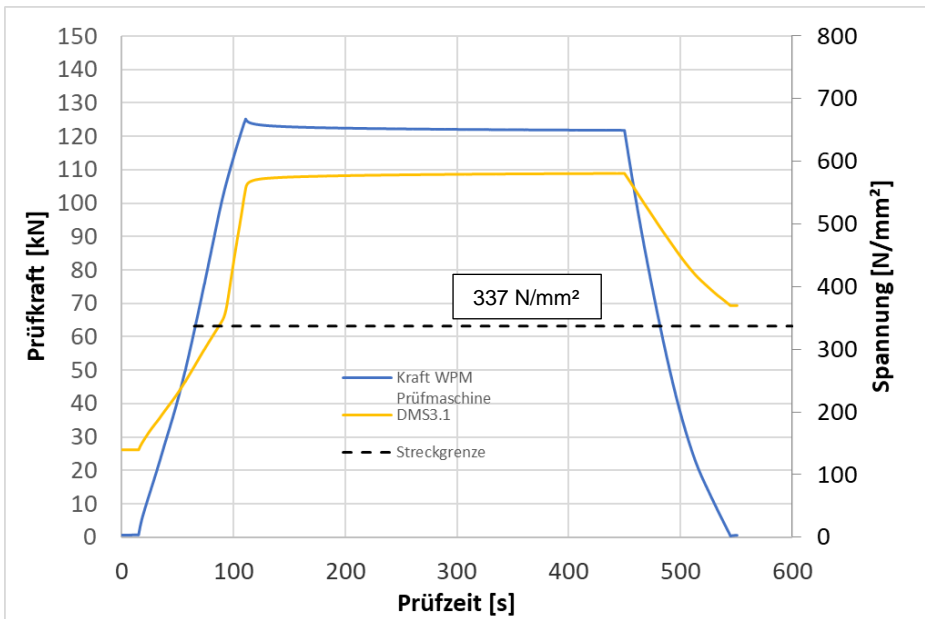


Abbildung 18-41: Druckspannungsverlauf im Messstellenbereich DMS 3.1 und Prüfkraft im zeitlichen Prüfverlauf (Laststufe 125 kN)

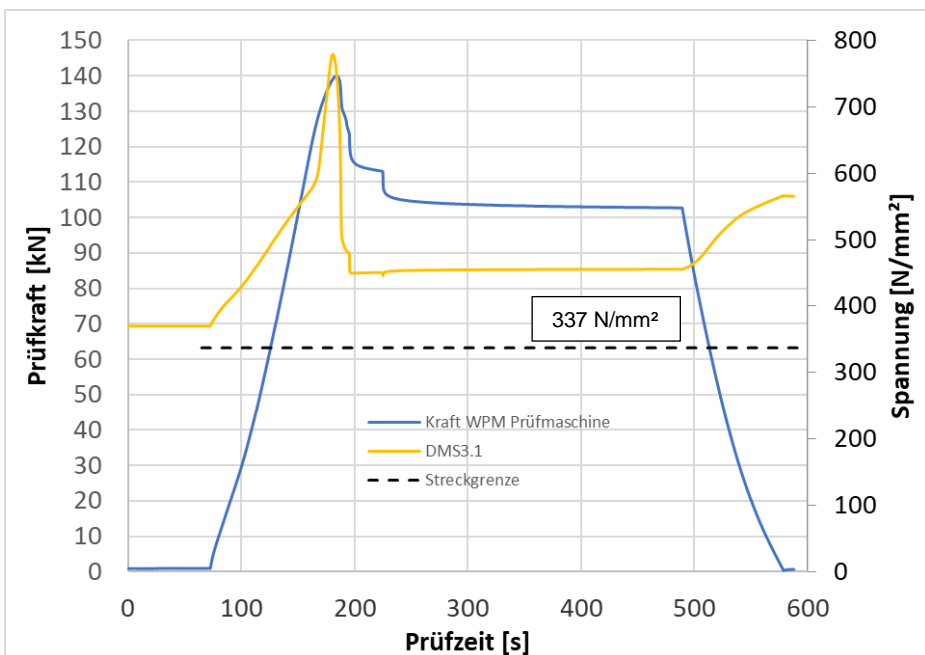


Abbildung 18-42: Druckspannungsverlauf im Messstellenbereich DMS 3.1 und Prüfkraft im zeitlichen Prüfverlauf (Laststufe 150 kN)

### 18.8.4 Messabweichungen (modularer Prüfkörper, Pharos I)

- Die Messanzeige „DMS 3.2“ ist in Laststufe 25 kN und 65 kN teilweise bzw. vollständig ausgefallen, wodurch der Kurvenverlauf nicht vollständig dargestellt ist.
- Der Wegaufnehmer „Schub 5.4“ hat einen zu kurzen Messbereich gehabt, wodurch die Wegmessungen mit diesem Sensor nicht vollumfänglich sind.

### 18.9 Vergleich der Messergebnisse für Traglastversuche

#### Grenzzustand der Tragfähigkeit:

Die Prüfkörper wurden zunächst mit einer Normalkraft beansprucht, um das Eigengewicht von der Gondel und den weiteren Turmsektionen im Modellmaßstab erfassen zu können. Anschließend wurde eine vertikale Prüfkraft eingeleitet, um sukzessive die Querkraft und das Biegemoment in den Polygonquerschnitten zu steigern. Die messtechnisch ermittelten Traglastkurven werden in Abbildung 18-43 gegenübergestellt.

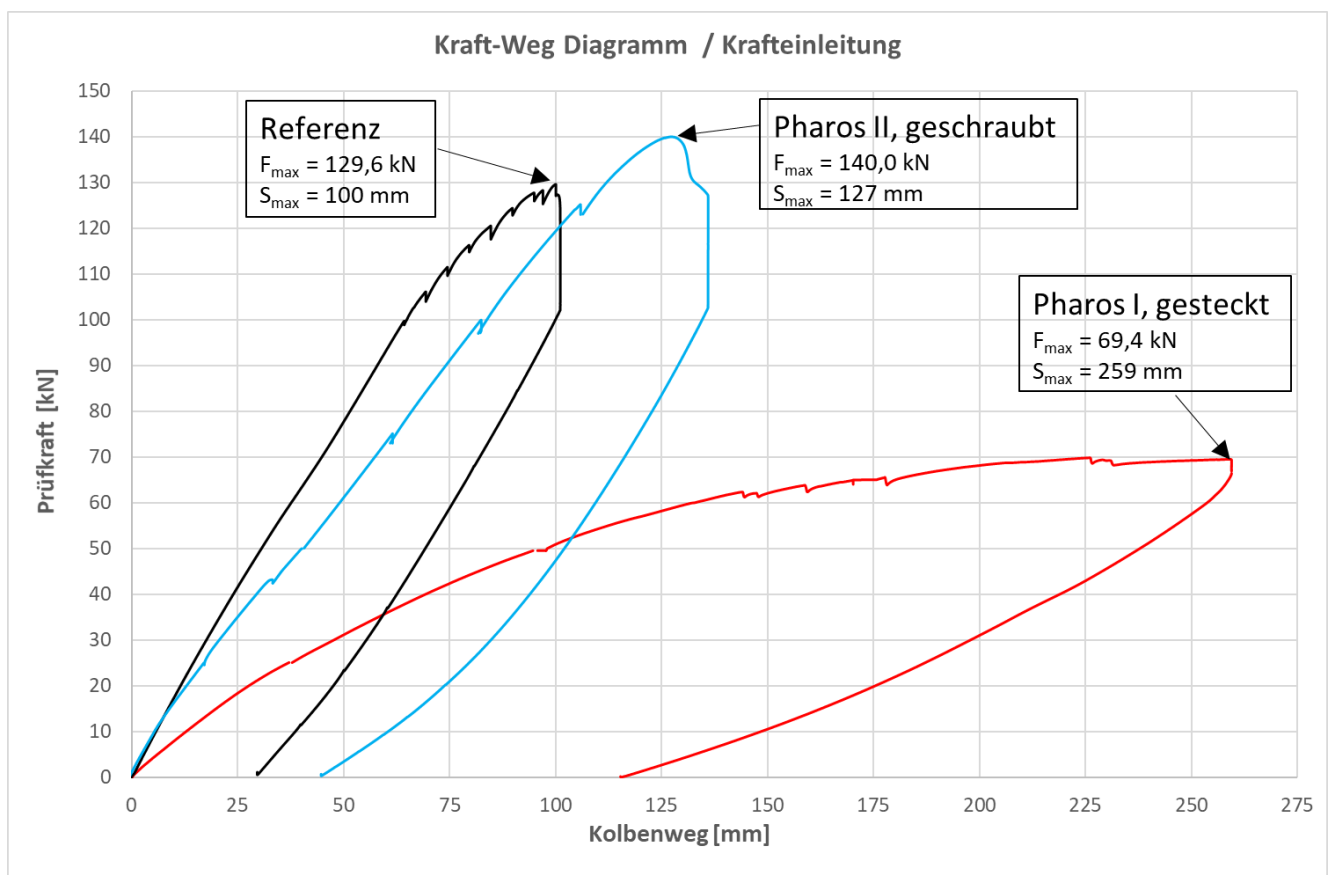


Abbildung 18-43: Vergleich der Traglastkurven für die unterschiedlichen Turmkonstruktionen

#### **Modulare Polygonturmsektionen (Prüfkörper „Pharos I, gesteckt“):**

Die Streckgrenze an der Messstelle „DMS6.4“ wurde bereits bei einer Prüflast von 30 kN überschritten. An dieser Messstelle wurde das spätere Plattenbeulen beobachtet. Danach konnte der Prüfkörper „Pharos I, gesteckt“ noch bis zu einer maximalen Prüfkraft von 69,4 kN belastet werden. Dieser Wert bestimmt den Grenzzustand der Tragfähigkeit. Am Prüfkörper selbst konnten irreversible Verformungen

durch Plattenbeulen und relative Längsverschiebungen zwischen den Doppelwandelementen festgestellt werden.

Die Doppelwandelemente haben sich gegeneinander verschoben, weil die Profilverbinder keinen ausreichenden Reibschluss (Kraftschluss) hatten und sind deshalb als Einzelquerschnitte ohne Verbund zu betrachten. Diese einzelnen Doppelwandelemente bilden keinen geschlossenen Polygonquerschnitt und müssen besonders im seitlichen Bereich wesentlich größere Längsschubspannungen aufnehmen als die vollverschweißten Platten vom Referenzprüfkörper, s. Erläuterungen zu den Längsschubspannungen in Kapitel 14. In Tabelle 18-3 sind die Ergebnisse der Traglastversuche gegenübergestellt.

*Tabelle 18-3: Vergleich der Traglastversuche*

Parameter	Prüfkörper		
	Referenz	Pharos I	Pharos II
Überschreiten der Streckgrenze ( $R_{eH} = 337 \text{ N/mm}^2$ ) an DMS Messtelle / Prüfkraft (Werkstoffkennwerte siehe Kapitel 16.2). <b>Hierbei ist zu beachten, dass der DMS nicht im Bereich der max. Beulung appliziert werden konnte, weil das Auftreten des Beulens nicht genau vorhergesagt werden kann!</b>	DMS3.1 /119 kN (Beulfeld)	DMS6.4 / 30 kN (Beulfeld)	DMS3.1 /100 kN (Beulfeld)
Max. Prüfkraft (Traglast)	129,6 kN	69,4 kN	140,0 kN
Traglast in %	100%	54%	108%
Auslenkung bei max. Prüfkraft (Traglast)	100 mm	259 mm	127 mm

#### **Referenzprüfkörper:**

Der Referenzprüfkörper zeigte die erste Überschreitung der Streckgrenze im Messfeld DMS 3.1 bei einer Prüfkraft von ca. 119 kN. Danach konnte die Last noch bis zu einer maximalen Traglast von 129,6 kN erhöht werden, bevor der Prüfkörper durch Plattenbeulen im Messbereichsfeld DMS 3.1 versagt hat. Diese Messposition befindet sich in dem Bereich, wo bei einem geschlossenen Querschnitt die höchsten Druckspannungen erwartet wurden.

Aus der Gegenüberstellung der einzelnen Traglastkurven (Abbildung 18-43) lässt sich feststellen, dass die Tragfähigkeit der modularen Polygonturmsektionen (Pharos I, gesteckt) nur 54% vom Referenzprüfkörper beträgt. Hingegen haben die modifizierten Polygonturmsektionen (Pharos II, geschraubt) mit 108% sogar eine höhere Tragfähigkeit als der geschweißte Referenzprüfkörper.

Gesamtverformung:

Die Gesamtverformung der unterschiedlichen Turmvarianten wird bei einer Prüflast von 50 kN in Abbildung 18-44 verglichen.

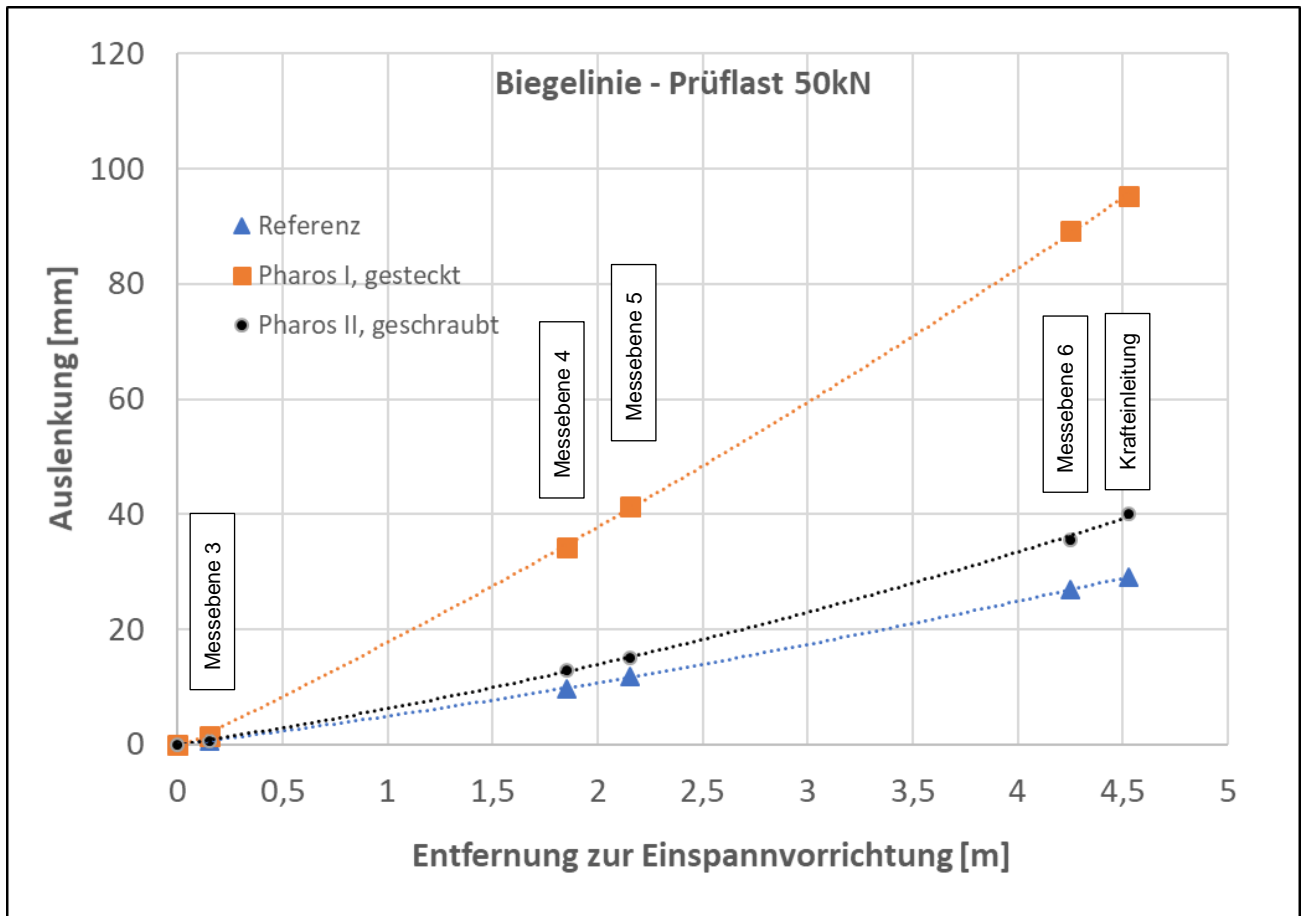


Abbildung 18-44: Vergleich der Verformungen für die unterschiedlichen Turmkonstruktionen

Tabelle 18-4: Vergleich der Gesamtverformungen bei einer Prüflast von 50 kN

	Messebene				
	3	4	5	6	Krafteinleitung
Entfernung zur Einspannvorrichtung [m]	0,15	1,85	2,15	4,25	4,53
Auslenkung Referenzprüfkörper [mm]	0,54	9,73	11,72	26,98	29,08
Auslenkung Pharos I, gesteckt [mm]	1,36	34,23	41,33	89,34	95,28
Auslenkung Pharos II, geschraubt [mm]	0,65	12,92	15,07	35,61	40,12
Differenz [mm]	0,81	24,50	29,61	62,36	66,20
Differenz % (Referenz zu Pharos I)	249	352	353	331	328

Je weiter der Messpunkt zur Einspannung entfernt liegt, desto größer ist die gemessene Auslenkung. Die maximale Auslenkung wurde an der Lasteinleitung gemessen, was auch dem erwarteten Verformungsverhalten eines eingespannten Kragarms mit Einzellast am Kragarmende entspricht. Die maximale Durchbiegung beträgt beim Referenzprüfkörper 29,08 mm und für den Prüfkörper „Pharos I,

gesteckt“ 95,28 mm. Die Durchbiegung beim Prüfkörper „Pharos II, geschraubt“ liegt mit 40,12 mm näher am Messwert für den Referenzprüfkörper und ist damit etwas biegeweicher einzustufen.

Für die anderen Messebenen (ausgenommen Messebene 3) ist die Differenz zwischen den Auslenkungen auf einem ähnlichen Niveau.

Die Ursache für die geringere Traglast und Biegesteifigkeit des modularen Prüfkörpers „Pharos I, gesteckt“ liegt darin begründet, dass die ausgewählten Profilverbinder zwischen den Doppelwandelementen keinen ausreichenden Reibschluss hatten, die eine vollständige Übertragung von Längsschubspannungen ermöglicht hätten. Deshalb ist jedes Doppelwandelement als Einzelquerschnitt ohne kraftschlüssigen Verbund zu den benachbarten Doppelwandelementen zu betrachten. Aufgrund der geringen Schubkraftübertragung über die gesamte Länge der Profilverbinder haben sich die Relativverschiebungen bis zu den Stirnenden der Turmsektionen aufsummiert und sind ursächlich für die beschriebenen Versagensmechanismen an diesen lokalen Positionen. Im Gegensatz dazu konnte beim modularen Prüfkörper „Pharos II, geschraubt“ eine Schubkraftübertragung stattfinden, weil entlang der Längskanten Schrauben in regelmäßigen Abständen angeordnet wurden, die einen ausreichenden Scherwiderstand gegen den Längsschub aufgebracht haben.



## 19 Zusammenfassung und Fazit

Das Forschungsvorhaben „modularer Polygonturm für Windenergieanlagen“ wurde im Rahmen des EKSH-Förderprogramms „HWT Energie und Klimaschutz“ vom 01.01.2020 bis zum 30.09.2022 in Kooperation mit der Firma Hoesch Schwerter Profile GmbH durchgeführt.

Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens wurde ein modulares Baukastenprinzip für Türme von Windenergieanlagen entwickelt, um noch größere Bauwerkshöhen realisieren zu können. Dafür ist eine Endmontage am jeweiligen Standort erforderlich, um größere Turmfußabmessungen ermöglichen zu können. Insofern wurden für die Turmsektionen Doppelwandelemente entworfen, die auf der Baustelle an ihren Längskanten mit Profilstäben und Formstücken anstelle von Schraub- und Schweißverbindungen verbunden werden sollen. Durch diese innovative Verbindungstechnik und die längsorientierte Fertigung von ebenen Wandelementen sollen auch Umformprozesse im Werk eingespart werden, die bislang bei den rohrförmigen Stahltürmen erforderlich sind.

Nach einer Marktrecherche (Arbeitspaket 1) wurde eine fiktive Onshore-Windenergieanlage mit 200 m Nabenhöhe und 10 MW Nennleistung als Referenzkonfiguration für die zukünftigen Anlagenklassen angenommen (Arbeitspaket 2). Im Vergleich zu den klassischen Stahlrohtürmen wurde dafür ein modularer Polygonturm konzipiert und für relevante Lastfälle vordimensioniert.

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde der Grenzzustand der Tragfähigkeit analysiert und mit einer vollverschweißten Referenzgeometrie verglichen. Erste analytische Ansätze für die Bemessung solcher Konstruktionen zeigten auf, welche Traglasten zu erwarten sind (Arbeitspaket 3). Mit Hilfe der Finiten-Element-Methode wurden anschließend numerische Simulationen durchgeführt (Arbeitspaket 4), um die Versagensmechanismen der modularen Polygonturm-sektionen, wie z.B. Plattenbeulen oder Längsverschub analysieren zu können.

Neben den fertigungstechnischen Aspekten wurde auch ein Montagekonzept für die wesentlichen Arbeitsschritte auf der Baustelle entwickelt (Arbeitspaket 5).

Die numerischen Simulationen vom Arbeitspaket 4 dienten auch zur Vorauslegung der Prüfkörper, die im Modellmaßstab getestet werden sollten. Für die Traglastversuche mussten zunächst die Bauteile für die Lasteinleitung und die Einspannvorrichtung im Festigkeitslabor konstruiert und gefertigt werden. Anschließend folgten die experimentellen Untersuchungen (Arbeitspaket 6) am Referenzprüfkörper (vollverschweißt), am modularen Prüfkörper „Pharos I“ (gesteckt) und am modularen Prüfkörper „Pharos II“ (geschraubt). Die Prüfkörper wurden zunächst mit einer Normalkraft beansprucht, um das Eigengewicht von der Gondel und den weiteren Turmsektionen im Modellmaßstab erfassen zu können. Anschließend wurde eine vertikale Prüfkraft eingeleitet, um sukzessive die Querkraft und das Biegemoment in den Polygonquerschnitten zu steigern. Der Referenzprüfkörper erreichte eine Traglast von 129,6 kN bevor Plattenbeulen eintrat. Im Gegensatz dazu erreichten die modularen Polygonturmsektionen (Pharos I, gesteckt) nur 54% der Traglast des Referenzprüfkörpers. Die Ursache

für die geringere Traglast und Biegesteifigkeit des modularen Prüfkörpers „Pharos I“ liegt darin begründet, dass die ausgewählten Profilverbinder zwischen den Doppelwandelementen keinen ausreichenden Kraftschluss hatten, die eine vollständige Übertragung von Längsschubspannungen ermöglicht hätten. Deshalb ist jedes Doppelwandelement als Einzelquerschnitt ohne kraftschlüssigen Verbund zu den benachbarten Doppelwandelementen zu betrachten. Aufgrund der geringen Schubkraftübertragung über die gesamte Länge der Profilverbinder haben sich die Relativverschiebungen bis zu den Stirnenden der Turmsektionen aufsummiert und sind ursächlich für die beschriebenen Versagensmechanismen an diesen lokalen Positionen. Im Gegensatz dazu konnte beim modularen Prüfkörper „Pharos II“ eine Schubkraftübertragung stattfinden, weil entlang der Längskanten Schrauben in regelmäßigen Abständen angeordnet wurden, die einen ausreichenden Scherwiderstand gegen den Längsschub aufgebracht haben. Diese modifizierten Polygonturmsektionen (Pharos II, geschraubt) haben mit einer Traglast von 140 kN sogar eine um 8% höhere Tragfähigkeit als der geschweißte Referenzprüfkörper erreicht. Ein Grund für die Traglaststeigerung sind die längsorientierten Formstücke und Profilstäbe, die als eine Art Längssteife fungierten und ein Plattenbeulen hinauszögerten.

Als Fazit aus den numerischen und experimentellen Untersuchungen an den modularen Polygonturmsektionen für Windenergieanlagen kann festgehalten werden, dass die Formstücke und Profilstäbe allein nicht ausreichend sind, um an den Längskanten der Platten einen Form- und Kraftschluss sicherzustellen. Gegen den Längsschub zwischen den Platten ist die Reibkraft allein nicht ausreichend und zusätzliche Scherwiderstände müssen vorgesehen werden. Als Alternative zu den zahlreichen Schrauben wäre eine im Werk vorbereitete Verzahnung an den Längskanten der Platten denkbar, die über ein Formstück in Position gehalten werden, sodass eine kontinuierliche Übertragung der Längsschubkräfte sichergestellt wird. Da solche Verbindungselemente gleichzeitig als Beulsteifen fungieren, sind bei diesen modifizierten Polygonturmsektionen sogar höhere Traglasten möglich als bei der konventionellen Bauweise als Stahlrohrturm.

## 20 Literatur

- [1] e.V., B. W.: Turm und MastBWE e.V, 2020. <https://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/konstruktiver-aufbau/turm-und-mast/>, abgerufen am: 18.03.2020
- [2] Verification of stress for tower sections of an offshore wind turbine. ÜB\_02-stresses-tower-sections Rev.00, Prof. Dr.-Ing. Keindorf, C.
- [3] EP1606514B1: Patent, Vestas
- [4] Schneider u. Albert: Bautabelle für Ingenieure. mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH 2016
- [5] keystonetowersystems.com: In-Field – Keystone Tower Systems, 2020. <http://keystonetowersystems.com/in-field-2/>, abgerufen am: 25.03.2020
- [6] DE10339438A1: Patent, Tower for a wind turbine
- [7] DE102013221681A1: Patent, Adapter for a hybrid tower of a wind turbine
- [8] US 8,316,615 B2: Patent, GeneralElectric
- [9] DE 19832921 A1: Patent, Turmkonstruktion, insbesondere für Windkraftanlagen
- [10] WO2011147478A: Patent, Siemens
- [11] Modularer Polygonturm für Windenergieanlagen. EKSH-Förderprogramm "HWT Energie und Klimaschutz", Prof. Dr. Christian Keindorf, 2019
- [12] Konstruktionsrichtlinie: 2012-05. (I-1-1) Schiffskörper
- [13] Reinke, T. C.: Tragverhalten von biegebeanspruchten Stahlmasten mit polygonalen Querschnitten, Fakultät für Bauingenieur-, Geo und Umweltwissenschaften Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- [14] Torben, B., Falco, I., Tiara, H. u. Alexander, L.: Load report. Pre-design Optimus200 Group: Loads and Dynamics, Hochschule Flensburg/Fachhochschule Kiel. Flensburg/Kiel 2018
- [15] DIN EN 10025-1:2005-02, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen\_- Teil\_1: Allgemeine technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN\_10025-1:2004
- [16] 2015-11. VDI 2230 Blatt 1
- [17] Illgner, K. H. u. Esser, J.: Schrauben Vademecum. Bramsche: Rasch 2001
- [18] Petersen, C.: Stahlbau. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2013
- [19] P. Schaumann, M. Seidel: Zur Bestimmung der Grenztragfähigkeit von Verbindungen mit planmäßig auf Zug beanspruchten Schrauben. Bauingenieur 2000 75, S. 637–645
- [20] Herbert Schmidt, M. N.: Zum elastostatischen Tragverhalten exzentrisch gezogener L-Stöße mit vorgespannten Schrauben. Stahlbau (1997) 3, S. 163–168
- [21] Prof. Dr. Christian Keindorf: Ring flange connection with pretensioned bolts (ULS). ÜB\_01\_ring\_flange\_ULS, S. 1–10
- [22] Tim Bülow: Master-Thesis, Untersuchung von Polygontürmen für Windenergieanlagen, FH-Kiel, 2020
- [23] DIN EN 1993-1-5:2017-07, Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile
- [24] DIN EN 1993-1-6: 2017-07, Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen
- [25] DIN EN 1993-1-4:2015-10, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln - Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen
- [26] VDI2230: VDI-Richtlinie, Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen

[27] EN14399-6, HV-Scheiben

## **21 Anhang**

Anhang 1: Zugprüfung an Blechproben, gemäß ISO 527-4 (2 Seiten)

Anhang 2: Messkanalbelegung für Referenzprüfkörper (1 Seite)

Anhang 3: Messkanalbelegung für modularen Prüfkörper (Pharos I, gesteckt) (2 Seiten)

Anhang 4: Messkanalbelegung für modularen Prüfkörper (Pharos II, geschraubt) (2 Seiten)

# Anhang 1

Zugprüfung an Blechproben gemäß ISO 527-4

## Zugprüfung ISO 527-4/3/2

Die Proben wurden vor der Prüfung länger als 16 Stunden beim Normklima nach ISO 527-1, Abschnitt 9.1 gelagert.

Probenbezeichnung: Zugprobe mit Spannkopf

Zeichnungsnummer:

Fehler der Messlänge beträgt 0,2% ; Fehler der Kraftwerte beträgt 0,5%

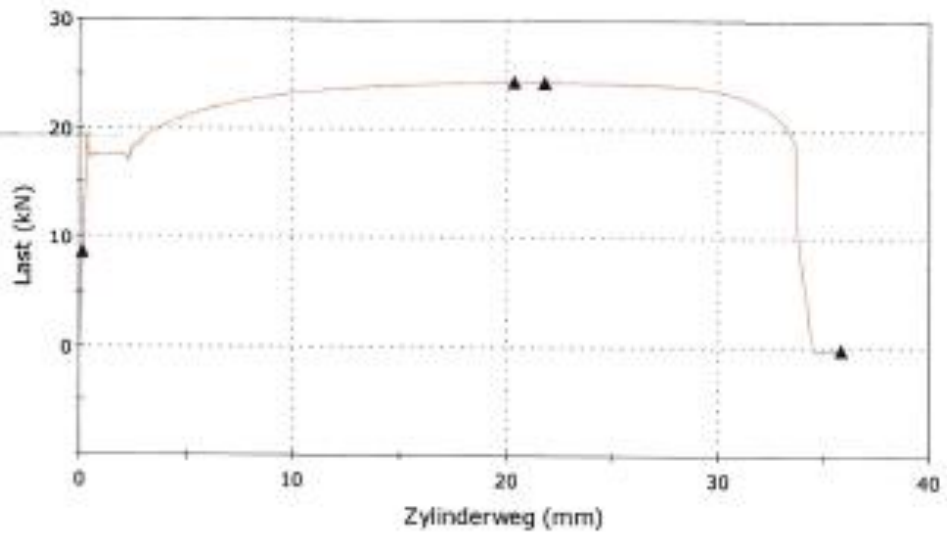
	Bediener	Lo (mm)	MW Breite (mm)	MW Dicke (mm)	A0 (mm <sup>2</sup> )	Rm (MPa)	Fmax (kN)
1	Dietze	1,00	20,00	3,03	60,60	401,027	24,340
2	Dietze	1,00	20,00	2,90	58,00	421,881	24,523
MW		1,00	20,00	2,96	59,30	411,454	24,432

	Bemerkung	Elastizitäts-Modul (MPa)	Rp 0,2 (MPa)
1	<Keine>	2028,39171	143,19613
2	<Keine>	2097,70138	149,08172
MW		2063,04654	146,13893

September 2022

Probe 1 bis 1

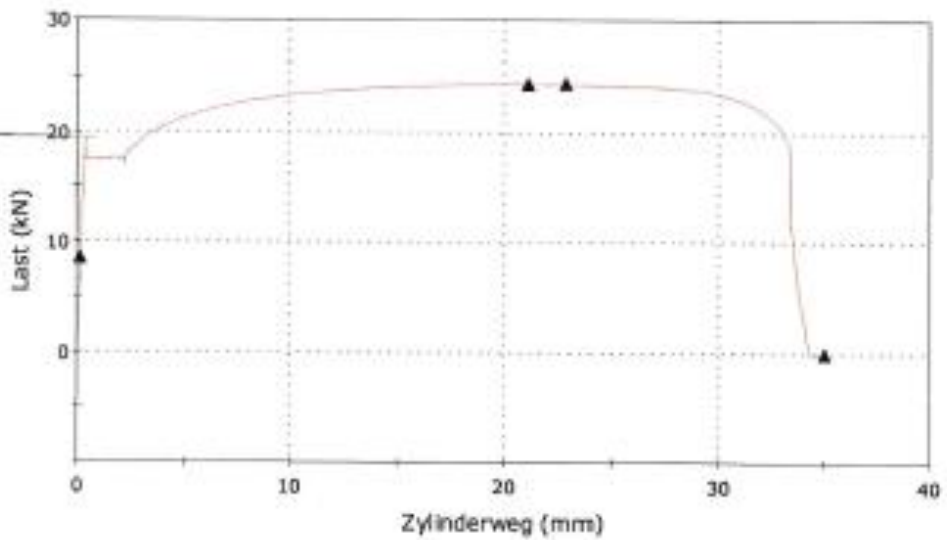
$$F_{max} = 19,51 \text{ kN}$$
$$A = 60,16 \text{ mm}^2$$
$$\sigma = 337 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



Probe Nr.  
1

Probe 2 bis 2

$$F_{max} = 19,55 \text{ kN}$$
$$A = 58 \text{ mm}^2$$
$$\sigma = 337 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

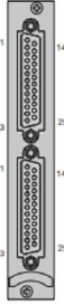



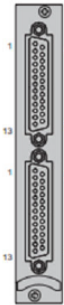
Probe Nr.  
2

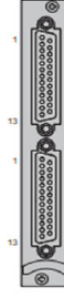
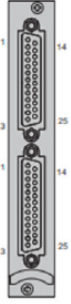


## Anhang 2

Messkanalbelegung am Messverstärker (MGC PLUS)\_für den Referenzprüfkörper

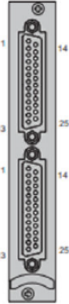

Einschub #04				Einschub #01				
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal	AP801S6		
Messebene 4, DMS 4.1	CH1_4_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K1	Weg, Messebene 3	CH1_1_1			
Messebene 5 DMS 5.1	CH1_4_2			Weg, Messebene 4	CH1_1_2			
Messebene 5 DMS 5.2	CH1_4_3			Weg, Messebene 5	CH1_1_3			
Messebene 4, DMS 4.2	CH1_4_4			Weg, Messebene 6	CH1_1_4			
Messebene 6, DMS 6.4	CH1_4_5							
Messebene 6, DMS 6.3	CH1_4_6							
Messebene 6, DMS 6.2	CH1_4_7							
Messebene 6, DMS 6.1	CH1_4_8							

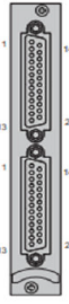
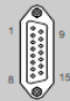
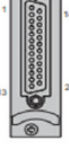
Einschub #08			
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker
Ebene 4_3, DMS 4_3.1	CH1_8_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K6 / Anschlussbox (Kanal 5/6/7/8)
Ebene 4_3, DMS 4_3.2	CH1_8_2		
	CH1_8_3		
Ebene 4_3, DMS 4_3.4	CH1_8_4		frei
	CH1_8_5		
	CH1_8_6		
	CH1_8_7		
	CH1_8_8		

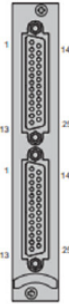
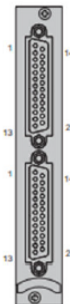
Einschub #09				Einschub #06			
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker
DMS 4.4	CH1_9_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K5	Messhülse, DMS #1	CH1_6_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K3
DMS 5.4	CH1_9_2			Messhülse, DMS #2	CH1_6_2		
DMS 5.3	CH1_9_3			Messhülse, DMS #3	CH1_6_3		
DMS 4.3	CH1_9_4			Messhülse, DMS #4	CH1_6_4		
DMS 1.1	CH1_9_5		K4	Ebene 3, DMS 3.3	CH1_6_5		Anschlussbox
DMS 2.1	CH1_9_6			Ebene 3, DMS 3.4	CH1_6_6		
DMS 3.1	CH1_9_7			Ebene 1, DMS 1.1b	CH1_6_7		
DMS 3.2	CH1_9_8			Ebene 3, DMS 3.3b	CH1_6_8		


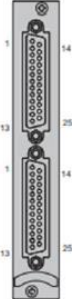
## Anhang 3

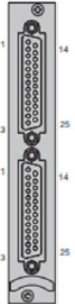
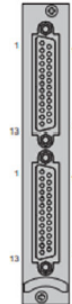
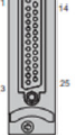
Messkanalbelegung am Messverstärker (MGC PLUS)\_für Pharos I, gesteckt

Einschub #04				Einschub #01			
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal	AP801 S6 (16V Speisespannung)	
Ebene 6, DMS 6.4	CH1_4_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K3	Weg, Ebene 3	CH1_1_1		
Ebene 6, DMS 6.3	CH1_4_2			Weg, Ebene 4	CH1_1_2		
Ebene 6, DMS 6.2	CH1_4_3			Weg, Ebene 5	CH1_1_3		
Ebene 6, DMS 6.1	CH1_4_4			Weg, Ebene 6	CH1_1_4		
Ebene 4, DMS 4.1	CH1_4_5		K2	WayCon LAH-G105, Laser 40-60mm	CH1_1_5		
Ebene 5, DMS 5.1	CH1_4_6			Schub 5.3 (Eurosensor 150 POP)	CH1_1_6		
Ebene 4, DMS 4.3	CH1_4_7			Schub (Eurosensor 150 POP)	CH1_1_7		
Ebene 4, DMS 4.4	CH1_4_8			Schub (Eurosensor 150 POP)	CH1_1_8		

Einschub #06				Einschub #05			
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal	AP01	Sub-D Stecker
Ebene 4, DMS 4.2	CH1_6_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K4		CH1_6_1		
Ebene 5, DMS 5.4	CH1_6_2				CH1_6_2		
Ebene 5, DMS 5.3	CH1_6_3				CH1_6_3		
Ebene 5, DMS 5.2	CH1_6_4				CH1_6_4		
Ebene 3, DMS 3.3	CH1_6_5		K5	Schub, (HBM W20TK ±20mm)	CH1_6_5		
Ebene 3, DMS 3.11	CH1_6_6						
Ebene 3, DMS 3.3	CH1_6_7						
Ebene 3, DMS 3.4	CH1_6_8						



Einschub #09				Einschub #08			
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker
Längs DMS	CH1_9_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	Anschlussbox, (Kanal 1-4)	Messhülse, DMS #1	CH1_8_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	
"defekt"	CH1_9_2			Messhülse, DMS #2	CH1_8_2		
"frei"	CH1_9_3			Messhülse, DMS #3	CH1_8_3		
Quer DMS	CH1_9_4			Messhülse, DMS #4	CH1_8_4		
	CH1_9_5		Anschlussbox, (Kanal 5-8)		CH1_8_5		
Ebene 3, DMS 3.2	CH1_9_6				CH1_8_6		
Ebene 3, DMS 3.111	CH1_9_7				CH1_8_7		
"defekt"	CH1_9_8				CH1_8_8		

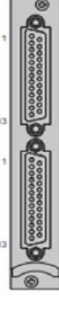

Einschub #05 (MGC #AB22A)			Einschub #04 (MGC #AB22A)				
Sensor	Messkanal	AP801 S6 (16V Speisespannung)	Sensor	Messkanal	AP815i 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken	Sub-D Stecker	
Schub 4.1	5_1			CH1_6_1			
Schub 4.2	5_2			CH1_6_2			
Schub 5.2	5_3			CH1_6_3			
Schub 5.1	5_4			CH1_6_4			
	5_5			Schub 3.3, (HBM WA 50)		CH1_6_5	
	5_6						
	5_7						
Schub 4.4	5_8						

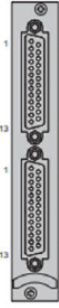
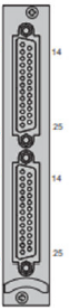
Einschub #03 (MGC #AB22A)				Einschub #02 (MGC #AB22A)			
Sensor	Messkanal	AP815i 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken	Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal	AP815i 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken	Sub-D Stecker
	CH1_3_1				CH1_2_1		
	CH1_3_2				CH1_2_2		
	CH1_3_3				CH1_2_3		
	CH1_3_4				CH1_2_4		
Weg-WPM	CH1_3_5			Ebene 3, DMS 3.113	CH1_2_5		
				Ebene 3, DMS 3.112	CH1_2_6		
				Ebene 3, DMS 3.114	CH1_2_7		
				Ebene 3, DMS 3.115	CH1_2_8		



## Anhang 4

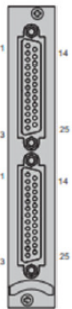
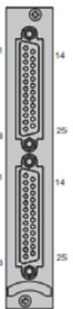
Messkanalbelegung am Messverstärker (MGC PLUS)\_für Pharos II, geschraubt

Einschub #04				Einschub #01			
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal	AP801 S6 (16V Speisespannung)	
Ebene 6, DMS 6.4	CH1_4_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K3	Weg-Laser, Ebene 3	CH1_1_1		
Ebene 6, DMS 6.3	CH1_4_2			Weg-Laser, Ebene 4	CH1_1_2		
Ebene 6, DMS 6.2	CH1_4_3			Weg-Laser, Ebene 5	CH1_1_3		
Ebene 6, DMS 6.1	CH1_4_4			Weg-Laser, Ebene 6	CH1_1_4		
Ebene 4, DMS 4.1	CH1_4_5		K2	WayCon LAH-G105, Laser 40-60mm	CH1_1_5		
Ebene 5, DMS 5.4	CH1_4_6			Schub 5.3 (Eurosensor 150 POP)	CH1_1_6		
Ebene 4, DMS 4.3	CH1_4_7			Schub (Eurosensor 150 POP)	CH1_1_7		
Ebene 4, DMS 4.4	CH1_4_8			Schub (Eurosensor 150 POP)	CH1_1_8		

Einschub #06				Einschub #05			
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal	AP01	Sub-D Stecker
Ebene 5, DMS 5.1	CH1_6_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K4		CH1_6_1		
Ebene 5, DMS 5.2	CH1_6_2				CH1_6_2		
Ebene 5, DMS 5.3	CH1_6_3				CH1_6_3		
Ebene 4, DMS 4.2	CH1_6_4				CH1_6_4		
Ebene 3, DMS 3.1	CH1_6_5		K5	Schub 4-3, (HBM W10TK ±10mm)	CH1_6_5		
Ebene 3, DMS 3.2	CH1_6_6						
Ebene 3, DMS 3.3	CH1_6_7						
Ebene 3, DMS 3.4	CH1_6_8						

Einschub #09				Einschub #08			
Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal		Sub-D Stecker
Messhülse, DMS #1	CH1_9_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	K1		CH1_8_1	<b>AP815i</b> 8 DMS-Viertel-, Halb- oder Vollbrücken 	Hardware nicht erkannt!
Messhülse, DMS #2	CH1_9_2				CH1_8_2		
Messhülse, DMS #3	CH1_9_3				CH1_8_3		
Messhülse, DMS #4	CH1_9_4				CH1_8_4		
	CH1_9_5				CH1_8_5		
	CH1_9_6				CH1_8_6		
	CH1_9_7				CH1_8_7		
	CH1_9_8				CH1_8_8		

Einschub #05 (MGC #AB22A)			Einschub #04 (MGC #AB22A)				
Sensor	Messkanal	AP801 S6 (16V Speisespannung)	Sensor	Messkanal	AP 01	Sub-D Stecker	
Schub 4-4	5_1			CH1_6_1			
Schub 4-2	5_2			CH1_6_2			
Schub	5_3			CH1_6_3			
Schub	5_4			CH1_6_4			
	5_5			Schub 5-1, (HBM WA 50)	CH1_6_5		
	5_6						
	5_7						
Schub 4.4	5_8						

Einschub #03 (MGC #AB22A)			Einschub #02 (MGC #AB22A)			
Sensor	Messkanal	Sub-D Stecker	Sensor	Messkanal	Sub-D Stecker	
	CH1_3_1			CH1_2_1		
	CH1_3_2			CH1_2_2		
	CH1_3_3			CH1_2_3		
	CH1_3_4			CH1_2_4		
Weg-WPM	CH1_3_5			CH1_2_5		
			CH1_2_6			
			CH1_2_7			
			CH1_2_8			