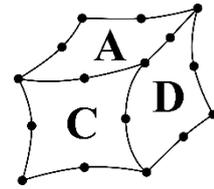




UNIVERSITÄT
BAYREUTH

Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Lehrstuhl für
Konstruktionslehre und CAD
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg



Konstruktion eines Parabolrinnenkollektors

Masterarbeit

angefertigt von

Andreas Kormann

Betreuung an der Universität Bayreuth

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Matthias Roppel M.Sc.

Betreuung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Martin Eickhoff

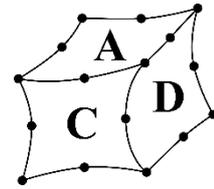
30. März 2020



**UNIVERSITÄT
BAYREUTH**

Fakultät für Ingenieurwissenschaften

**Lehrstuhl für
Konstruktionslehre und CAD
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg**



Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg

Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Universität Bayreuth

Universitätsstraße 30

95447 Bayreuth

Danksagung

Ich möchte mich bei dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. sowie dem Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD an der Universität Bayreuth für die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken. Insbesondere gilt mein Dank hierbei meinen Betreuern Martin Eickhoff und Matthias Roppel. Ebenso freue ich mich über das gegenseitige Interesse und die Unterstützung zwischen den Praktikanten am DLR bei den Projekten. Die freundliche, familiäre Arbeitsatmosphäre und die gute Gruppengemeinschaft haben mir erst die Realisierung der Arbeit ermöglicht. Nicht unerwähnt bleiben sollen meine Kommilitonen, welche mir oft mit Rat zur Seite standen. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, deren volle Unterstützung ich immer erfuhr, auch als ich tausende Kilometer entfernt war.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	X
Nomenklatur- / Abkürzungsverzeichnis	XI
1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen.....	4
2.1 Solarthermische Stromerzeugung	4
2.2 Parabolrinnenkraftwerke.....	7
2.3 Betrieb von Kraftwerken mit Flüssigsalz	9
3. Beschreibung des Ist-Zustandes	11
4. Rahmenbedingungen.....	21
4.1 Anforderungsliste und Systemanalyse	21
4.2 Beschreibung der kritischen Probleme.....	23
4.2.1 Lastfall 1: Eigengewicht des Kollektors – Durchbiegung.....	23
4.2.2 Lastfall 2: Eigengewicht des Kollektors – Lagerreibung.....	24
4.2.3 Lastfall 3: Windlast – Zusätzliche Belastung für alle Verbindungsstellen	25
5. Lösungsfindung.....	35
5.1 Vorauslegung.....	36
5.1.1 Stirnträger	36
5.1.2 Torsionsrohr.....	37
5.1.3 Lager.....	38
5.1.4 Spiegeltragarm	39
5.1.5 Spiegelmodul.....	41
5.1.6 Pylon.....	42
5.2 Berechnung des gesamten Kollektors.....	45
5.2.1 Netzgenerierung	45
5.2.2 Lastfall 1: Eigengewicht des Kollektors - Durchbiegung.....	47

5.2.3	Lastfall 2: Eigengewicht des Kollektors - Lagerreibung.....	51
5.2.4	Lastfall 3: Windlast	54
5.3	Festigkeitsnachweise.....	59
5.3.1	Stirträger	60
5.3.2	Aufnahme des Parabolspiegels	64
6.	Vorstellung und Bewertung des Gesamtsystems.....	67
7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	69
	Literaturverzeichnis	70
	Anhang.....	72
	Fertigungszeichnungen	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Teilvorgänge der solarthermischen Energiewandlung, dargestellt an einem Parabolrinnenkollektor in Schnittdarstellung [3, S. 283].....	5
Abbildung 2: Ideale strahlungsphysikalische Eigenschaften der Hauptkomponenten eines Solarkollektors. [3, S. 286]	6
Abbildung 3: Jahresgang der Globalstrahlung als Summe von Diffusstrahlungsanteil und Direktstrahlungsanteil für einen typischen süddeutschen Standort in der Bundesrepublik. Angegeben sind die über einen Monat gemittelten Tageswerte auf die Horizontale [4, S. 69].....	6
Abbildung 4: Prinzipskizze eines Parabolrinnenkraftwerks [2, S. 306]	8
Abbildung 5: Beheizung der Solarfeld-Verbindungsleitungen bei Nacht [6, S. 3].....	10
Abbildung 6: Komponenten eines Parabolrinnenkollektors	12
Abbildung 7: Doppel-V Fachwerk eines Parabolrinnenkollektors	12
Abbildung 8: Kollektor „Eurotrough“ mit Torsionsrohr und Hydraulik-Dreheinrichtung.....	13
Abbildung 9: Funktionsprinzip der hydraulischen Dreheinrichtung mit zwei Hydraulikzylindern zur Totpunktkompensation	14
Abbildung 10: Kollektor mit Dünnschichtspiegeln.....	15
Abbildung 11: Befestigung von Glasspiegeln am Kollektor	15
Abbildung 12: Absorber mit Stützstruktur	17
Abbildung 13: Konzeptdarstellung eines MS-Trough Moduls [10]	17
Abbildung 14: Ausdehnungskompensation des Absorberrohres am MS-Trough [10].....	18
Abbildung 15: Überblick über den Parabolrinnenkollektor in Falschfarbdarstellung.....	18
Abbildung 16: Detailansicht des Spiegeltragarms in einer Schnittansicht des Kollektors .	19
Abbildung 17: MS-Trough Demonstrator im Maßstab 1:4 [10].....	19
Abbildung 18: Umfang der Masterarbeit	20
Abbildung 19: Kraftverteilung auf das Vergleichs-Torsionsrohr durch Spiegel.....	23
Abbildung 20: Durchbiegung des Torsionsrohres am Vergleichskollektor.....	24
Abbildung 21: Untersuchtes Rohrmodell als Flächenmodell (links) und in Netzdarstellung (rechts).....	27
Abbildung 22: Einfluss der Anzahl von Prismenschichten auf das Simulationsergebnis ..	28
Abbildung 23: Vergleich von Turbulenz-Algorithmen in ANSYS	29
Abbildung 24: Netzstudie am quer angeströmten Rohr mit den Elementgrößen 100 mm, 200 mm und 300 mm im Raum.....	29
Abbildung 25: Anströmdarstellung des Kollektors	30
Abbildung 26: Netzanalyse am Windmodell des Kollektors	31
Abbildung 27: Netz des Strömungsmodells des Kollektors - Detailansicht.....	32
Abbildung 28: Windkräfte in Abhängigkeit des Anstellwinkels des Kollektors	32

Abbildung 29: Windkräfte in Abhängigkeit des Anstellwinkels des Kollektors - Detailansicht um 0°.....	33
Abbildung 30: Auf den Kollektor wirkendes Moment bei einer Windanströmung mit 25 m/s	33
Abbildung 31: Druckverteilung um den Kollektor bei Windbelastung in Windstellung.....	34
Abbildung 32: Strömungslinien um den Kollektor bei Windbelastung in Windstellung.....	34
Abbildung 33: Bereiche mit ermittelten Windkräften.....	34
Abbildung 34: Hauptspannungsverteilung bei der Vorauslegung des Stirnträgers	36
Abbildung 35: Verschiebung des Stirnträgers	37
Abbildung 36: Aufbau eines Dünnschichtspiegels.....	41
Abbildung 37: Randbedingungen auf den Pylon	42
Abbildung 38: Gesamtverformung des Pylon	43
Abbildung 39: Vergleichsspannungen am Pylon und an dessen oberen Ende	44
Abbildung 40: Vergleichsspannungen an der Bodenplatte des Pylon – Schnittansicht	44
Abbildung 41: Vergleichsspannungen an der Bodenplatte des Pylon	45
Abbildung 42: Netz für die Gesamtsimulation des Kollektormoduls.....	46
Abbildung 43: Vernetzung des Spiegels	46
Abbildung 44: Randbedingungen auf das gesamte Kollektormodul bei Eigenlast	47
Abbildung 45: Verformung des gesamten Kollektormoduls bei Eigenlast	47
Abbildung 46: Vertikale Verschiebung der Spiegel bei Eigenlast	48
Abbildung 47: Vergleichsspannung an den Aluminiumblechen des Dünnschichtspiegels bei Lastfall 1.....	49
Abbildung 48: Maximale Spannungen an den Haltern für die Spiegeltragarme (links) und an den Lagern (rechts).....	49
Abbildung 49: Spannungsverteilung der Spiegeltragarme bei Lastfall 1	49
Abbildung 50: Spannungsverteilung an den Stirnträgern bei Lastfall 1	50
Abbildung 51: Spannungsverteilung an den Torsionsrohren bei Lastfall 1	50
Abbildung 52: Singularität am rechten Torsionsrohr bei Lastfall 1.....	51
Abbildung 53: Randbedingungen auf ein Kollektormodul bei Lastfall 2.....	52
Abbildung 54: Gesamtverformung des Kollektormoduls bei Lastfall 2.....	52
Abbildung 55: Spannungen an den Kollektormodulen für Lastfall 3	53
Abbildung 56: Vergleichsspannungen am Spiegeltragarm für Lastfall 2	53
Abbildung 57: Vergleichsspannungen an den Stirnträgern für Lastfall 2.....	53
Abbildung 58: Vergleichsspannungen an den Torsionsrohren für Lastfall 2.....	54
Abbildung 59: Randbedingungen bei der Berechnung der Windlast	55
Abbildung 60: Gesamtverformung des MS-Trough bei Windlast.....	55
Abbildung 61: Vergleichsspannung des MS-Trough bei Windlast	56

Abbildung 62: Spannungen am Stirnträger 1 unter Windlast	56
Abbildung 63: Spannungen am Stirnträger 2 unter Windlast	57
Abbildung 64: Vergleichsspannungen der Torsionsrohre bei Lastfall 3	57
Abbildung 65: Vergleichsspannungen der Lager bei Lastfall 3	57
Abbildung 66: Vergleichsspannung am Torsionsrohrhalter bei Lastfall 3	58
Abbildung 67: Vergleichsspannung an den Spiegelträgermodulen inklusive Flachwinkeln - Detailansicht	58
Abbildung 68: Vergleichsspannungen an der Aluminiumschicht des Spiegels bei Lastfall 3	59
Abbildung 69: Zu prüfende Bereiche am Kollektor	60
Abbildung 70: Position der berechneten Schweißnaht (links) und deren Abmaße (rechts)	60
Abbildung 71: Aufnahme des Parabolspiegels durch einen Flachwinkel.....	64
Abbildung 72: Maximalspannungen an den Flachwinkeln	64
Abbildung 73: Renderdarstellung eines MS-Trough-Moduls.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste für den Parabolrinnenkollektor.....	22
Tabelle 2: Massen der Komponenten des Vergleichskollektors.....	24
Tabelle 3: Parameter der Windlastenberechnung am Rohr	27
Tabelle 4: Vernetzungseinstellungen bei der Ermittlung der Windkraft	31
Tabelle 5: Ermittelte Windkräfte inklusive Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors von $S_F = 3$	35
Tabelle 6: Abmaße des Stirnträgers und Eigenschaften der Simulation	37
Tabelle 7: Eigenschaften des Torsionsrohr	37
Tabelle 8: Windkräfte durch maximale Windbelastung in Windstellung inklusive Sicherheitsfaktor	38
Tabelle 9: Kräfte eines Kollektorsmoduls auf die Lager	39
Tabelle 10: Argumentationstabelle für den Spiegeltragarm	40
Tabelle 11: Materialkennwerte EN AW-6060 T66 [18]	41
Tabelle 12: Eigenschaften der Spiegelmaterialien	42
Tabelle 13: Eigenschaften des Pylon.....	43
Tabelle 14: Basisdaten der Vernetzung der Gesamtbaugruppe	45
Tabelle 15: Daten eines Kollektormoduls für den MS-Trough.....	68

Nomenklatur- / Abkürzungsverzeichnis

CFD	<i>continuous fluid dynamics</i>
CSP	<i>concentrated solar power</i>
cw-Wert	<i>Strömungswiderstandskoeffizient</i>
DISS	<i>Direktdampferzeugung</i>
FEM	<i>Finite-Elemente-Methode</i>
Fix-Fokus	<i>Konstante Fokussierung des Kollektors auf die Drehachse</i>
Fokallinie	<i>Linie im Fokus des Konzentrators</i>
Kollektor	<i>Struktur aus mehreren Kollektormodulen, welche ein Medium erhitzt</i>
Kollektorfeld	<i>Kraftwerksfeld mit mehreren Kollektoren</i>
Kollektormodul	<i>Einzelner Abschnitt eines Kollektors</i>
Konzentrator	<i>fokussiert solare Direktstrahlung</i>
optischer Wirkungsgrad	<i>Verhältnis von konzentrierter Strahlung zu Direktstrahlung</i>
PSA	<i>Plattaforma Solar de Almeria</i>
Raytracing	<i>Algorithmus zur Strahlenverfolgung</i>
Windstellung	<i>Kollektorneigung von 0°</i>

1. Einleitung

Im heutigen Alltag ist durchgängig verfügbare Energie nicht mehr wegzudenken. Für den Endverbraucher hat sie insbesondere als elektrische Energie oder in Form von Kraftstoff eine wichtige Bedeutung. Die primären Energiequellen waren in der Geschichte der Menschheit eine lange Zeit erneuerbare Energien. Erst seit der industriellen Revolution gewannen fossile Energieträger an Bedeutung. [1, V] Der Einsatz ist jedoch hinsichtlich Umwelt und Klima als problematisch einzustufen. Ein großer Kritikpunkt ist beispielsweise der hohe CO₂-Eintrag in die Atmosphäre. Ebenfalls sind diese Energieträger nicht regenerativ, das heißt, sie stehen nur in einer begrenzten Menge zur Verfügung. Um den Zielen der Energiewende gerecht zu werden, gilt es daher den Wechsel von fossilen zu erneuerbaren Energien zu meistern. Damit einher gehen allerdings neue Anforderungen an den Transport der erzeugten Energie. Es ist notwendig, das Stromnetz von einer zentralen Versorgung hin zu einem dezentralen Verteilnetz umzubauen. Eine zusätzliche Herausforderung ist die wetterabhängige Stromerzeugungskapazität von Solar- und Windkraftanlagen. Dies erfordert die Einbindung von Energiespeichern in das Stromnetz, um Lastspitzen und Versorgungsengpässe abpuffern zu können. Neben Pumpwasserkraftwerken werden hierfür unter anderem auch Batteriespeicher eingesetzt. Bei Leistungsüberschuss wird dem Netz Energie entnommen und eingespeichert. Bei einem Leistungsdefizit wird der Vorgang entsprechend umgekehrt. Der Gesamtwirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit solcher Speicherkonzepte ist bedingt durch Umwandlungsverluste beim Be- und Entladen des Speichers sowie den Anschaffungskosten oftmals unbefriedigend. Wünschenswert wäre eine Möglichkeit, Energie aus regenerativen Quellen effizient und kostengünstig zu speichern. Eine Option stellt die direkte Umwandlung von Sonnenstrahlung in Wärmeenergie dar, welche je nach Bedarf entweder direkt in Strom gewandelt oder in Form von Öl oder Flüssigsalz in Tanks gespeichert werden kann. Dadurch kann eine kontinuierliche Stromerzeugung erreicht werden. Schwankungen in der Sonneneinstrahlung und der Tag-/Nachtzyklus lassen sich ausgleichen. Um die Stromgestehungskosten, also die Kosten pro erzeugter Kilowattstunde (kWh), weiter zu senken, werden solarthermische Kraftwerke, insbesondere linienfokussierende Systeme (englisch concentrated solar power; CSP), stetig weiterentwickelt. CSP-Kraftwerke fokussieren die eintreffende Strahlung mit Hilfe von Spiegeln auf ein Absorberrohr, um dort eine thermische Flüssigkeit aufzuheizen. Das aufgeheizte Fluid kann im Anschluss entweder direkt zur Stromerzeugung oder zur Beladung eines Speichers genutzt werden. Die Prozesstemperatur der Stromerzeugung unterscheidet sich kaum von konventionellen Kraftwerken. So schreibt Kaltschmitt [1, S. 293] „Konzentrierende Kollektoren für solarthermische Kraftwerke arbeiten auf einem

vergleichbaren Temperaturniveau wie konventionelle, mit fossilen Energieträgern beheizte thermische Kraftwerke." Thermische Solarkraftwerke können als Parabolrinnen, Heliostaten oder Parabolspiegel ausgeführt werden. [2, S. 303] Der aktuelle Forschungsschwerpunkt des DLR, bezogen auf thermische Solarkraftwerke, sind Parabolrinnenkraftwerke. Die in diesem Kraftwerkstyp verwendeten Kollektoren bestehen im Wesentlichen aus einem Fluid durchströmten Absorberrohr und einem Parabolspiegel, der die Sonnenstrahlen auf das Absorberrohr bündelt. Das Kraftwerk selbst besteht wiederum aus mehreren solcher Kollektoren. Sie werden in Reihe geschaltet und mit flexiblen Leitungen verbunden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Konstruktion und Auslegung der Komponenten eines neuartigen Parabolrinnenkollektors, dessen Drehachse mit dem Zentrum des Absorberrohres zusammenfällt. Bei aktuellen Kollektoren stellen die flexiblen Zuleitungen zu den Kollektoren einen Schwachpunkt dar. Die zentrale Position des Absorberrohres ermöglicht eine drehwinkelunabhängige Montage dessen und macht die Verwendung von komplexen und störanfälligen Drehdichtungen in der Zuleitung obsolet (siehe Kapitel 3). Das hat sowohl positiven Einfluss auf die Wartungskosten als auch auf die Effizienz des Systems. Druck- und Wärmeverluste fallen geringer aus. Ein kostenintensiver Austausch der Dichtung entfällt.

Diese Arbeit gliedert sich wie folgt:

Grundlegendes

- In Kapitel 2 wird auf die Grundlagen der solarthermischen Energieerzeugung von Parabolrinnenkraftwerken eingegangen. Es werden die verschiedenen Typen von solarthermischen Kraftwerken vorgestellt und Parabolrinnenkraftwerke genauer behandelt. Auch wird auf die Verwendung einer Salzschnmelze als Energieträger eingegangen.
- Kapitel 3 beschreibt den aktuellen Stand der regenerativen Energieerzeugung mittels Parabolrinnenkraftwerken. Insbesondere wird deren Technik erläutert und das Konzept des Kollektors „MS-Trough“ für den Betrieb mit einer Salzschnmelze dargestellt.

Vorgehen und Analyse

- Kapitel 4 beschreibt das verwendete Verfahren zur Konstruktion eines neuartigen Parabolrinnenkollektors. Dieses lehnt sich an den Produktentstehungsprozess nach Pahl-Beitz an. Ebenfalls werden die Anforderungen an das System diskutiert und die kritischen Lasten analysiert. Hierfür werden drei verschiedene Lastfälle definiert.
- In Kapitel 5 wird die Konstruktion und die Berechnung der Komponenten des Kollektormoduls dokumentiert. Hierfür werden die Komponenten zunächst einzeln

konstruiert und vorausgelegt. Im Anschluss wird die Baugruppe simuliert und die Spannungen überprüft. In diesem Kapitel werden ebenfalls die spannungskritischen Pfade überprüft und berechnet.

Auswertung der Ergebnisse

- Kapitel 6 stellt die Konstruktion vor und bewertet diese anhand der getroffenen Anforderungen.
- Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen und stellt einen Ausblick auf die Weiterentwicklung des Kollektors in zukünftigen Projekten dar.

2. Grundlagen

Um ein besseres Verständnis für die Funktionsweise von CSP-Kraftwerken zu vermitteln, wird zunächst auf die Grundlagen der solarthermischen Stromerzeugung eingegangen.

2.1 Solarthermische Stromerzeugung

Die solarthermische Stromerzeugung mittels fokussierender Elemente erfolgt mittels vier unterschiedlichen Kollektortypen:

- Parabolrinnen-Kollektoranlagen
Hier werden Solarstrahlen mit gekrümmten Spiegeln auf ein Absorberrohr in der Fokallinie gebündelt. Eine genauere Beschreibung folgt in Kapitel 2.2 und 3.
- Fresnel-Kollektoranlagen
Über den Absorberrohren befinden sich sogenannte Fresnel-Streifen, die das Sonnenlicht konzentrieren. Das Absorberrohr muss nicht bewegt werden, was lange Kollektoren ermöglicht. Diese zeichnen sich positiv durch fehlende Rohrbögen oder flexible Verbindungsleitungen und damit geringere Strömungswiderstände aus. Die Kollektoren weisen etwas nachteilig aber Probleme durch Verschattung zwischen den Spiegelstreifen auf.
- Solarturmkraftwerke / Zentralreceiverkraftwerke
Als Fokuspunkt dient hierbei ein zentraler Receiver (Absorber) auf einem Solarturm. Um diesen Turm stehen verteilt Heliostaten, welche mehrachsrig nachführbar sind. Sie enthalten die Spiegel, mit denen das Sonnenlicht auf den Receiver konzentriert wird.
- Dish-Stirling-Anlagen
Paraboloidspiegel konzentrieren die Sonnenstrahlung auf einen Stirlingmotor in ihrem Brennpunkt. Die Spiegel erreichen Durchmesser zwischen 3 und 25 Meter. [2, S. 309] Die Anlagen werden der Sonne zweiachsrig nachgeführt.

Der Prozess der solarthermischen Energieumwandlung gliedert sich in verschiedene Teilvorgänge (Abbildung 1). [3, S. 283]

- Eintritt (a) der Strahlung in die Aperturfläche des Kollektors
- Fokussierung (b) der Strahlung mittels Spiegel oder Linsen
- Transmission (c) durch eine transparente Schutzschicht
- Absorption (d) kurzwelliger Strahlung und Wandlung in thermische Energie
- Temperaturabgabe durch Wärmestrahlungs- (e) und Wärmeübergangsverluste
- Abtransport (f) der thermischen Energie im Massenstrom eines Wärmeträgers

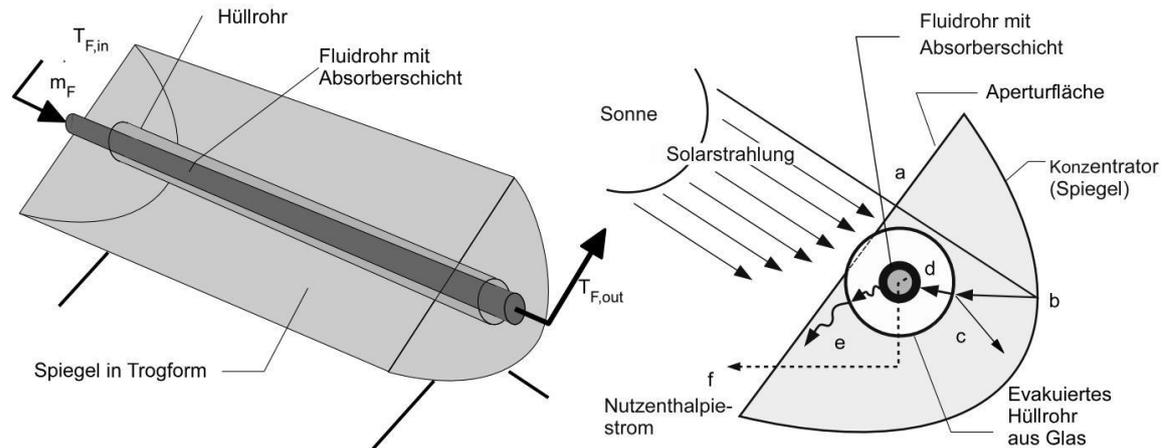


Abbildung 1: Teilvorgänge der solarthermischen Energiewandlung, dargestellt an einem Parabolrinnenkollektor in Schnittdarstellung [3, S. 283]

Für den Betrieb dieser Kraftwerke spielt der Sonnenstand eine wichtige Rolle. Daher ist die Nachführung, welche auch Sonnentracking genannt wird, ein wichtiger Bestandteil moderner Steuerungssoftware. Das Grundprinzip solarthermischer Kraftwerke ist die Umwandlung von kurzwelliger Solarstrahlung in thermische Energie. Beim Auftreffen auf den Absorber kann sie hierbei absorbiert, reflektiert oder transmittiert werden. Aufgrund der Energieerhaltung muss die Summe aus Absorptionsgrad α , Reflexionsgrad ρ und Transmissionsgrad τ gleich eins sein (Formel 2.1). [1, S. 212]

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad 2.1$$

Durch die Verwendung eines dichten Absorbermaterials lassen sich Transmissionsverluste vernachlässigen. Ein Beispiel für ein solches Material ist Stahl. Ein idealer Absorber muss kurzwellige Strahlung vollständig absorbieren und langwellige Strahlung komplett reflektieren. Erfüllt ein Absorber dies, so kann er Strahlung effektiv in Wärme umwandeln und aufnehmen, gibt sie jedoch kaum mehr in Form von Strahlung an die Umwelt ab. Für ein ideales Glashüllrohr gelten gegenteilige Anforderungen (Abbildung 2). Dieses soll die Sonnenstrahlung transmittieren, sodass diese zum Absorber dringt, die Wärmestrahlung jedoch reflektieren. Beim Konzentratorspiegel ist für alle Wellenlängen ein maximaler Reflexionsgrad erwünscht. Um die thermischen Energieverluste durch Wärmeleitung und Konvektion zu minimieren, wird der Bereich zwischen Absorberrohr und Glashüllrohr evakuiert (d in Abbildung 1). Die Nutzleistung \dot{Q}_{Nutz} bestimmt sich somit aus der Differenz zwischen dem tatsächlich zugeführten Wärmestrom \dot{Q}_{abs} und der Verlustleistung \dot{Q}_V (Formel 2.2).

$$\dot{Q}_{\text{Nutz}} = \dot{Q}_{\text{abs}} - \dot{Q}_V \quad 2.2$$

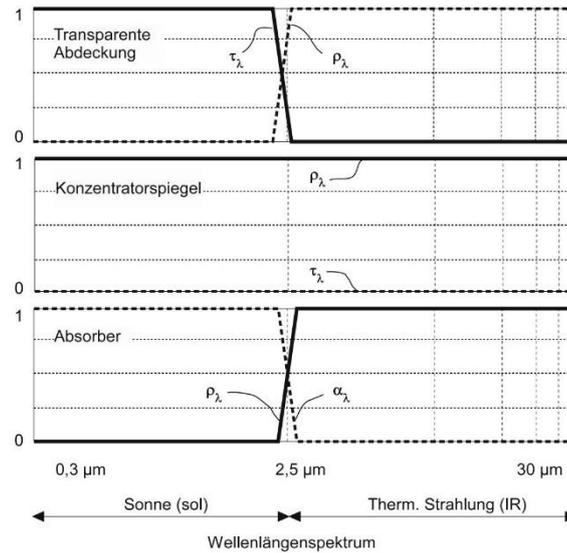


Abbildung 2: Ideale strahlungsphysikalische Eigenschaften der Hauptkomponenten eines Solarkollektors. [3, S. 286]

Kaltschmitt schreibt zur Effizienz der Kraftwerke: „Im Durchschnitt können bei den beiden heute marktbestimmenden Kraftwerkstypen (d. h. Parabolrinnen- und Solarturm-Kraftwerken) etwa 40 bis 60 % der einfallenden Direktstrahlung in thermische Energie umgewandelt werden, die dann im Kraftwerk zur Verstromung zur Verfügung steht. Weitere Verluste von etwa 25 bis 33 % der solaren Strahlungsenergie fallen bei dieser Umwandlung der thermischen in elektrische Energie an; dies liegt primär in den thermodynamischen Begrenzungen begründet, durch die solche Kreisprozesse charakterisiert sind.“ [1, S. 814]

Linienfokussierende Systeme wie Parabolrinnen- oder Fresnel-Kollektoranlagen werden entweder in Nord-Süd-Ausrichtung oder in Ost-West-Ausrichtung aufgestellt. Sie sind aus Kostengründen meist einachsig nachgeführt. [4, S. 88] Im Gegensatz zu nicht fokussierenden Systemen wie Photovoltaikanlagen oder Warmwasserkollektoren kann ein fokussierendes System keinen Nutzen aus diffuser Strahlung ziehen, sondern benötigt Direktstrahlung. Der Anteil an Direkt- und Diffusstrahlung ist in Abbildung 3 im Jahresgang dargestellt.

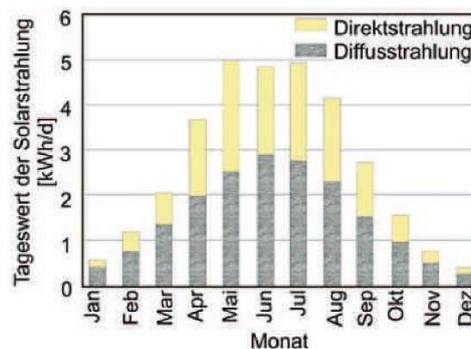


Abbildung 3: Jahresgang der Globalstrahlung als Summe von Diffusstrahlungsanteil und Direktstrahlungsanteil für einen typischen süddeutschen Standort in der Bundesrepublik. Angegeben sind die über einen Monat gemittelten Tageswerte auf die Horizontale [4, S. 69]

Die Aufstellung in Nord-Süd-Richtung ermöglicht eine bessere Nivellierung der Schwankungen der Sonneneinstrahlung eines Tages, während eine Ost-West-Ausrichtung eine bessere Nivellierung der Schwankungen im Jahresverlauf der Sonne ermöglicht. Eine Ost-West Ausrichtung erzielt in höheren geografischen Breiten bessere Ergebnisse. [4, S. 88] Da für eine vollständige Anpassung an den Sonnenstand eine zweiachsige Nachführung nötig wäre, entstehen sogenannte Kosinusverluste, welche vom Winkel der Sonne zur Fokallinie, also der Linie im Fokus des Konzentrators, abhängig sind.

Neben den Kollektoren sind auch Rohrleitungen, Wärmeübertrager, Pumpen und Speicherkomponenten von solarthermischen Kraftwerken notwendig. Die Speicher dienen dazu, nicht benötigte Nutzleistung \dot{Q}_{Nutz} aufzunehmen und bei Bedarf wieder abzugeben. Da das Energieangebot (Sonnenenergie) und die Nachfrage nie perfekt übereinstimmen, sind Speicher bei thermischen Anlagen zwingend erforderlich. [3, S. 366] So kann auch der Tag-/Nachtzyklus ausgeglichen werden. Die Speicher müssen diverse Anforderungen erfüllen. So schreibt Wesselak et al.: „Sie müssen kostengünstig sein, den hygienischen Vorgaben genügen, sowie dauer temperatur- und druckfest sein. Auch das Speichermedium muss kostengünstig, gesundheitsunschädlich und umweltverträglich sein, zudem eine hohe volumetrische Wärmekapazität bei geringer Viskosität besitzen und auch dauer temperaturbeständig sein.“ [3, S. 366]

2.2 Parabolrinnenkraftwerke

In diesem Kapitel werden Parabolrinnenkraftwerke vorgestellt. Dabei wird auf die physikalischen und technischen Grundlagen eingegangen.

Parabolrinnenkollektoren gehören wie auch Fresnel-Kollektoranlagen zur Gruppe der Linienfokussierenden Systeme. Parabolrinnenkollektoren enthalten gewölbte Spiegel, die Sonnenlicht auf ein Absorberrohr bündeln. Dieses verläuft in der Fokallinie der Spiegel. In den Absorberrohren wird die konzentrierte Solarstrahlung in Wärme umgewandelt und an ein zirkulierendes Wärmeübertragermedium abgegeben. [2, S. 305] Der erwärmte Energieträger wird im Anschluss dazu verwendet, einen Dampfturbinenkreislauf anzutreiben. Der gesamte Prozess ist in Abbildung 4 dargestellt.

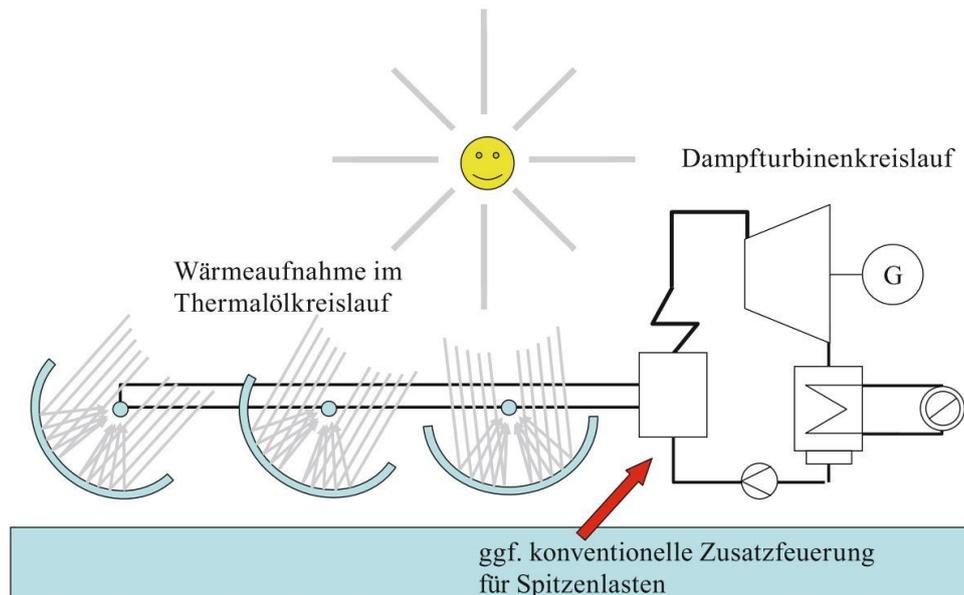


Abbildung 4: Prinzipskizze eines Parabolrinnenkraftwerks [2, S. 306]

Der Betrieb lässt sich grundsätzlich über zwei Methoden realisieren: die Direktdampferzeugung (DISS) und die konventionelle Nutzung von Wärmeübertragermedien. Bei letzterer ist der Dampfturbinenprozess vom Kollektorkreislauf getrennt. Das Wärmeübertragermedium nimmt Energie aus dem Kollektorfeld auf und gibt sie im Dampferzeuger des sekundären Dampfturbinenkreislauf wieder ab. Der dort erzeugte Wasserdampf treibt die Turbine zur Erzeugung des elektrischen Stroms an. Für Solarkraftwerke kommen dabei typischerweise Thermoöle oder Flüssigsalze zum Einsatz. Bei der Direktdampferzeugung hingegen entfällt der zusätzliche Kreislauf im Kollektorfeld. Die Absorberrohre im Kollektorfeld übernehmen hier die Rolle des Verdampfers. Das Wasser wird dort direkt verdampft und überhitzt. Vorteil dieses Verfahrens ist die Reduktion der Wärmeübertragungs- und Exergieverluste. [2, S. 305] Sie bergen jedoch Nachteile im laufenden Betrieb. Eine ständige Überwachung der Systeme ist notwendig, um eine partielle Kondensation, bedingt durch lokale Beschattung des Absorberrohres, zu verhindern. Andernfalls bestünde die Gefahr einer lokalen Überhitzung mangels unzureichender Wärmeabfuhr. [2, S. 305] Weiterhin ist die Einbindung eines Speichers bedingt durch die Eigenschaften von Wasserdampf nicht einfach möglich.

Beim konventionellen Betrieb hat die Wahl des Wärmeübertragermediums erheblichen Einfluss auf die Betriebsparameter der Anlage. Gängige Materialien sind beispielsweise das Hochtemperaturöl „Therminol VP-1“ oder das Flüssigsalz „Solar Salt“ (Mischung aus 60 % NaNO_3 und 40 % KNO_3). Je nach Wärmeübertragermedium unterscheidet sich die Minimal- und Maximaltemperatur. Bei der Mindesttemperatur ist die Anforderung an die Viskosität beziehungsweise die Schmelztemperatur maßgebend. Bei zu niedriger Viskosität ist der Strömungswiderstand im Rohr zu groß. „Therminol VP-1“ muss daher

mindestens 303 °C warm sein. Die Maximaltemperaturen sind sowohl durch die thermische Stabilität, bei Therminol VP-1 393 °C [5, S. 171], als auch durch die thermische Belastbarkeit der Komponenten der Anlage begrenzt. Bei „Solar Salt“ liegt die Schmelztemperatur bei 238 °C. Der nutzbare Temperaturbereich liegt zwischen 290 °C und 560 °C [6, S. 2]. Damit sind im Vergleich zu Thermoöl deutlich höhere Prozesstemperaturen realisierbar. Für Thermoöl ergibt sich damit eine Temperaturnutzung von 90 °C, für die Salzmischung „Solar Salt“ 270 °C. Die Temperaturnutzung bezieht sich dabei auf Temperaturdifferenz des Heiß- und des Kältspeichers der Anlage, dargestellt in Abbildung 5.

Wichtige Parameter von Parabolrinnenkraftwerken sind deren Aperturweite und Fokallänge. Die Aperturweite beschreibt den maximalen Abstand der Spiegel an deren Außenkanten zueinander. Die Fokallänge beschreibt den Abstand des Brennpunktes vom Spiegel. Beide Parameter nehmen direkten Einfluss auf die Form der Reflektoren.

2.3 Betrieb von Kraftwerken mit Flüssigsalz

In Kapitel 2.2 wurde in Aussicht gestellt, dass geschmolzenes Salz durch seinen großen Bereich hinsichtlich der Arbeitstemperatur ein vielversprechendes Wärmetransfermedium für linienfokussierende solarthermische Kraftwerke ist. Die Anwendung von geschmolzenen Salzen ist deshalb besonders interessant, da die höheren Betriebstemperaturen eine verbesserte Prozess- und Speichereffizienz ermöglichen. [5, S. 171] Bei dem Flüssigsalz „Solar Salt“ betragen die Speicherkosten 5,8 \$/kWh bei einem Temperaturgradienten von 200 °C. Bei dem Hochtemperaturöl „Therminol VP-1“ werden Speicherkosten von 57,5 \$/kWh bei einem Temperaturgradienten von 100 °C angegeben. [5, S. 174] Die Speicherkosten von Solar Salt sind somit deutlich geringer, weshalb sich ein Mehraufwand in den restlichen Bereichen lohnen kann. Ein wichtiger Parameter für thermische Speicher ist der Temperaturgradient. Er beschreibt die Differenz der Temperatur in den Speichern zwischen dem erhitzten und kalten Zustand eines Fluids.

Ein signifikanter Nachteil von Salzen ist die hohe Erstarrungstemperatur. Das führt dazu, dass sich das Salz verfestigt, wenn es am Abend nach der Anwendung im Absorberrohr verbleibt. Aus diesem Grund werden die Parabolrinnenkollektoren und Fresnel-kollektoren bei der Verwendung von Salzen entweder über Nacht beheizt, um Verfestigung zu vermeiden, oder für die Dauer der Nutzungsunterbrechung entleert. Für den Fall der Beheizung kann eine heiße Salzschmelze aus den Lagertanks verwendet werden, um die Temperatur im Absorberrohr konstant zu halten. [7]

Die neue Betriebsstrategie bei aktuellen CSP-Kraftwerken mit Flüssigsalz sieht eine Entleerung über Nacht vor. Die weiteren Komponenten werden auch nach der Entleerung am Abend auf Temperatur gehalten. Die Rohrwände der Verbindungsleitungen des

Solarfeldes sowie der Verteiler werden mittels eines thermischen Fluids aus den thermischen Speichertanks beheizt (Abbildung 5).

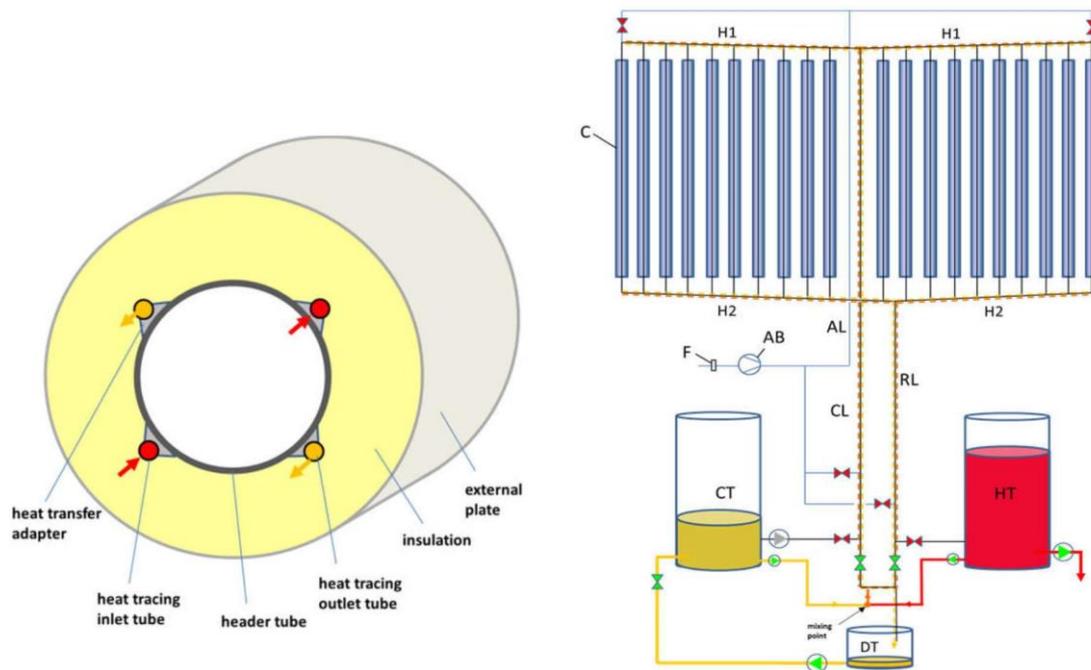


Abbildung 5: Beheizung der Solarfeld-Verbindungsleitungen bei Nacht [6, S. 3]

In der Abbildung 5 ist auf der linken Seite eine beheizte Verbindungsleitung dargestellt. Mittig ist das Sammelrohr (header tube) zu sehen, welches von je zwei Einlass- (heat tracing inlet) und Auslassrohren (heat tracing outlet) für die Wärmeschutzflüssigkeit umrandet wird. Zur Leitung der Heizflüssigkeit sind um das Leitungsrohr in einer umgebenden Isolationsschicht (insulation) weitere Rohre eingelassen. Eine Schicht zum Schutz vor externen Beschädigungen (external plate) umhüllt das gesamte Leitungssystem. In der Abbildung rechts ist der Heizkreislauf bei Nacht dargestellt. Die Verbindungsleitungen im Feld (RL und CL) und die Verteilleitungen zu den Kollektoren (H1 und H2) sind hierbei markiert und werden beheizt. Die Druckluftrohre (AL), wie auch die Speichertanks für die heiße Salzschmelze (HT) und die kalte Salzschmelze (CT) sind eingezeichnet. Vor der Wiederbefüllung der Kollektoren am Morgen wird die Wärme der Verbindungsleitungen genutzt, um die Zu- und Ablaufrohre der Kollektoren zu beheizen. Dies geschieht unter Zuhilfenahme von Druckluft. Anschließend werden die Absorberrohre mit den ersten Sonnenstrahlen vorgeheizt, bevor sie mit der Salzschmelze befüllt werden. [6, S. 2] Während des Aufheizvorgangs des leeren Absorberrohres kann es durch einseitigen Wärmeeintrag und einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit im Material zu kritischen Temperaturgradienten im Werkstoff kommen. Der Grund hierfür ist eine hohe Energieabsorption des Absorberrohres, wenn der Kollektor direkt fokussiert wird. Daher wird der Kollektor nur partiell fokussiert, das bedeutet, dass er mehrmals durch den Fokuspunkt gefahren wird, um ein gleichmäßiges und langsames Aufheizen zu ermöglichen. [6, S. 5]

Die Auswahl des passenden Trägermediums ist nicht nur von den Anforderungen aus dem Kollektorbetrieb, sondern auch von weiteren Randbedingungen abhängig. CSP-Anlagen können ihr volles Potenzial erst in Kombination mit einem Wärmespeicher entfalten (siehe Kapitel 2.1). Hierdurch kann tageszeitunabhängig die Wärmeenergie in elektrischen Strom umgewandelt werden, was einen Vorteil gegenüber anderen regenerativen Energiequellen wie Windkraft oder Photovoltaik darstellt. Um die Kapazität der hierfür benötigten Tanks zu verringern und die speicherbare Energiemenge zu maximieren, ist ein Speichermedium mit einer hohen spezifischen Wärmekapazität und einem breiten nutzbaren Temperaturbereich vorteilhaft. Die Speicherkosten können so signifikant gesenkt werden und etwaige Mehrkosten eines angepassten Kollektordesigns ausgeglichen werden. Aufgrund des breiten Temperaturfensters spricht dies für die Verwendung einer Salzschnmelze.

3. Beschreibung des Ist-Zustandes

In Solarkraftwerken werden aktuell mehrere Kollektoren in Reihe geschaltet, um einen Kreislauf zu bilden. Dies ist notwendig, um die erforderliche Endtemperatur des Energieübertragermediums zu erreichen. Bislang haben Kollektoren eine Länge von 150 m bis 240 m. Die zur Verbindung der Kollektoren verwendeten Drehdichtungen und flexiblen Verbindungsleitungen haben sich jedoch als Schwachstellen herausgestellt. Diese weisen einen hohen Verschleiß auf und müssen regelmäßig getauscht werden, wozu, je nach Trägermedium, eine komplette Entleerung des Fluid-Kreislaufes notwendig ist. Ein weiteres Problem ist, dass die in den Gelenken verwendeten Graphitdichtungen nicht (chemisch) resistent gegen die Salzschnmelze sind. [6] Die daraus resultierende hohe Störanfälligkeit verstärkt den bereits hohen Wartungsaufwand zusätzlich.

Bisherige Anlagen sind aufgrund der verwendeten Drehdichtungen und Kollektorverbindungsleistungen zu teuer und ungeeignet für den Einsatz mit einer Salzschnmelze als Energieträger, da im Störfall eine Entleerung sehr aufwendig ist. Auch die Ausrüstung aller Verbindungsleitungen zwischen den Kollektorabschnitten mit Widerstandsheizungen, um Salz-Pfropfenbildung zu vermeiden, ist ein weiterer zu berücksichtigender Punkt.

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Entwicklung der wichtigsten Komponenten eines Parabolrinnenkollektors vorgestellt. Abbildung 6 zeigt hierzu eine Übersicht über die Position einiger Komponenten anhand eines Kollektors.

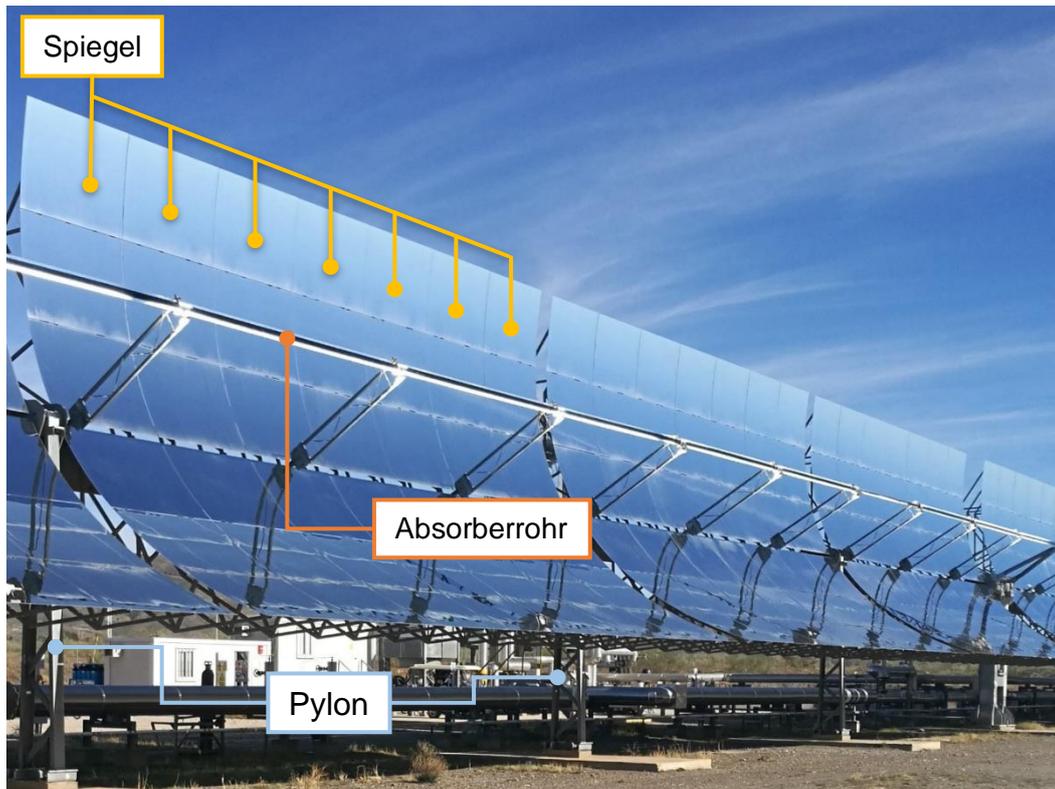


Abbildung 6: Komponenten eines Parabolrinnenkollektors

Torsionsbox

Stand der Technik sind Stahlrahmenkonstruktionen mit einem zentralen Torsionsrohr oder Doppel-V-Fachwerke. [8, S. 387] Diese Konstruktionsbauweise erzielt eine hohe Steifigkeit im Verhältnis zum Eigengewicht. Abbildung 7 zeigt die das Doppel-V-Fachwerk des Kollektors aus Abbildung 6.



Abbildung 7: Doppel-V Fachwerk eines Parabolrinnenkollektors

Der „Eurotrough“-Kollektor, welcher in dieser Arbeit als Vergleichskollektor dienen wird, besitzt je nach Ausführung ein Torsionsrohr oder eine Torsionsbox (Fachwerkstruktur). Sie müssen dazu in der Lage sein, auch Lagermomente und Windkräfte torsionssteif aufzunehmen. In Abbildung 8 ist der Anschluss eines Kollektors mit Glasspiegeln zu sehen. Er zeigt eine hydraulische Dreheinrichtung mit einseitig angebrachtem Kollektor. Durch die winkelfersetzt angeordneten Angriffspunkte der Hydraulikzylinder ist eine genaue Steuerung des Neigungswinkels ohne Totpunkt möglich. Das Funktionsprinzip eines solchen Antriebs ist in Abbildung 9 dargestellt. Im dortigen Zustand befindet sich der rot markierte Hydraulikzylinder in seinem Totpunkt. Er kann durch zusätzliche Krafteinwirkung kein Moment mehr auf die Konstruktion auswirken, da die Kraft keine radiale Komponente mehr besitzt. Der zweite versetzte Hydraulikzylinder hingegen kann ein Moment in diesem Zustand erzeugen. Damit ist eine Rotation des Systems ohne Totpunkt möglich. Im Kraftwerk werden die Dreheinrichtungen in der Mitte eines 150 m bis 240 m langen Kollektors angebracht. Dabei können eine oder mehrere dieser Systeme verwendet werden. Im Hintergrund von Abbildung 9 ist die Zuführleitung zum Absorberrohr erkennbar. Der Absorber ist mittels Flexrohr angeschlossen. Rechts ist ein Torsionsrohr abgebildet, welches aus gebogenen und verschraubten Blechen hergestellt wurde.

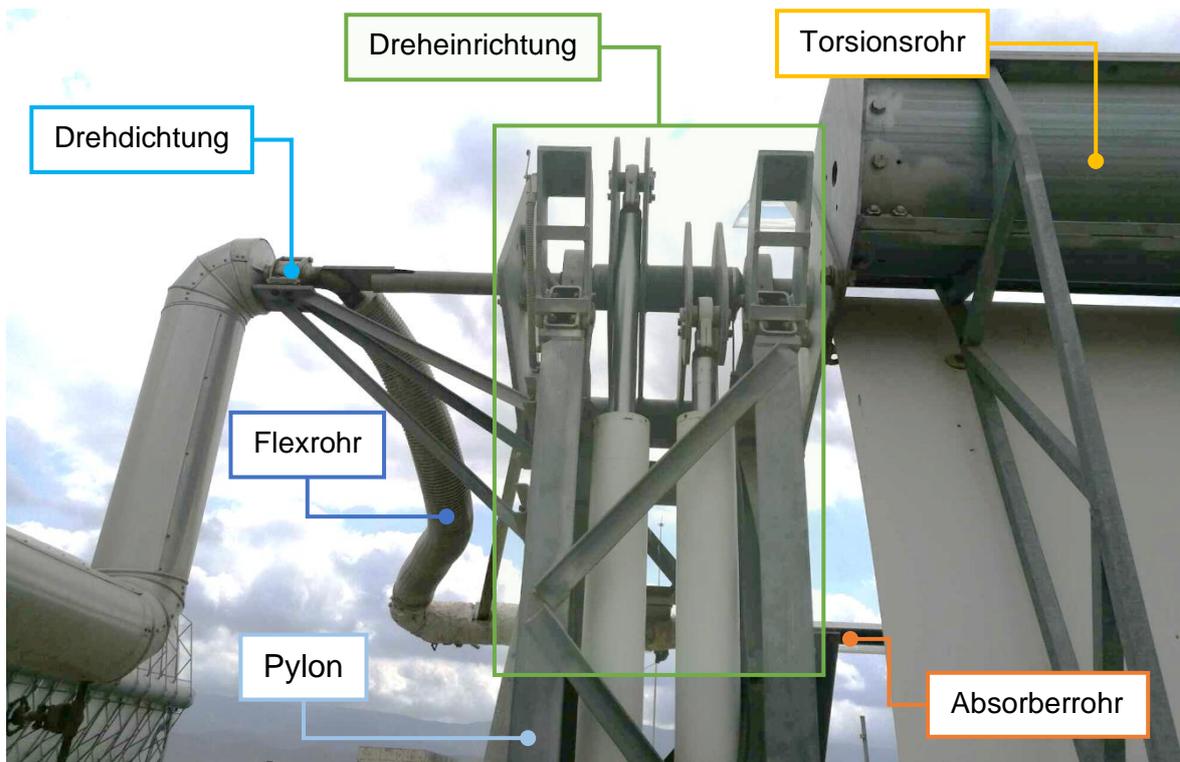


Abbildung 8: Kollektor „Eurotrough“ mit Torsionsrohr und Hydraulik-Dreheinrichtung

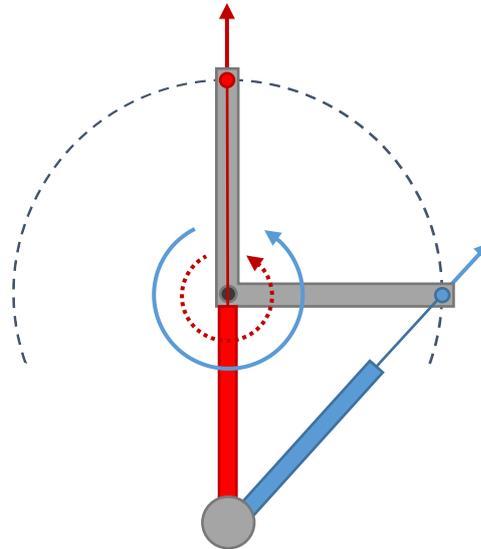


Abbildung 9: Funktionsprinzip der hydraulischen Dreheinrichtung mit zwei Hydraulikzylindern zur Totpunktkompensation

Eine Möglichkeit zur Verringerung der Torsion ist es, die Kollektorunwucht und Lagerreibung mittels Gegengewichten auszugleichen. Solche werden beim Entwurf dieses Kollektors nicht eingeplant, könnten jedoch nachgerüstet werden, sollte die Verformung infolge Torsion bei der Nachstellung zu groß ausfallen. Um den Worst-Case abzubilden, werden Gegengewichte bei der Berechnung der Lagerreibung nicht berücksichtigt.

Spiegel

Bei den Spiegeln gibt es eine Vielzahl verwendeter Ausführungen. Es werden hierfür beispielsweise Aluminiumplatten, Aluminiumplatten mit Glasabdeckung, Glasspiegel oder Dünnschichtspiegel verwendet. [9, S. 21] Dünnschichtspiegel sind Sandwichstrukturen, welche meist eine Deckschicht aus Glas, einen Schaumkern und eine stabile Rückseite aufweisen. Letztgenannte kann beispielsweise aus Aluminium oder faserverstärkten Kunststoffen hergestellt werden. Bei der Verwendung von Dünnglasspiegeln erhöht sich die Reflektivität des Spiegels und dadurch auch der optische Wirkungsgrad, der das Verhältnis von konzentrierter Strahlung zu Direktstrahlung beschreibt. Ein solcher Kollektor ist in Abbildung 10 dargestellt.

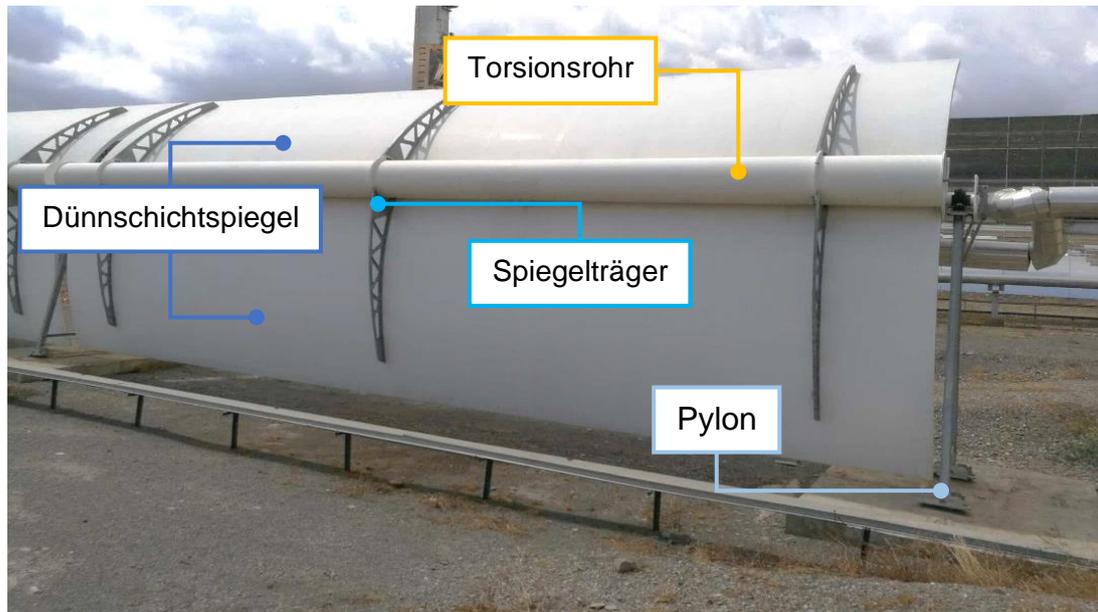


Abbildung 10: Kollektor mit Dünnschichtspiegeln

Die Montage von Glasspiegeln erfolgt mittels Flachwinkeln. Abbildung 11 zeigt diese Winkel. Sie enthalten Langlöcher, die eine genauere Positionierung der Spiegel ermöglichen.

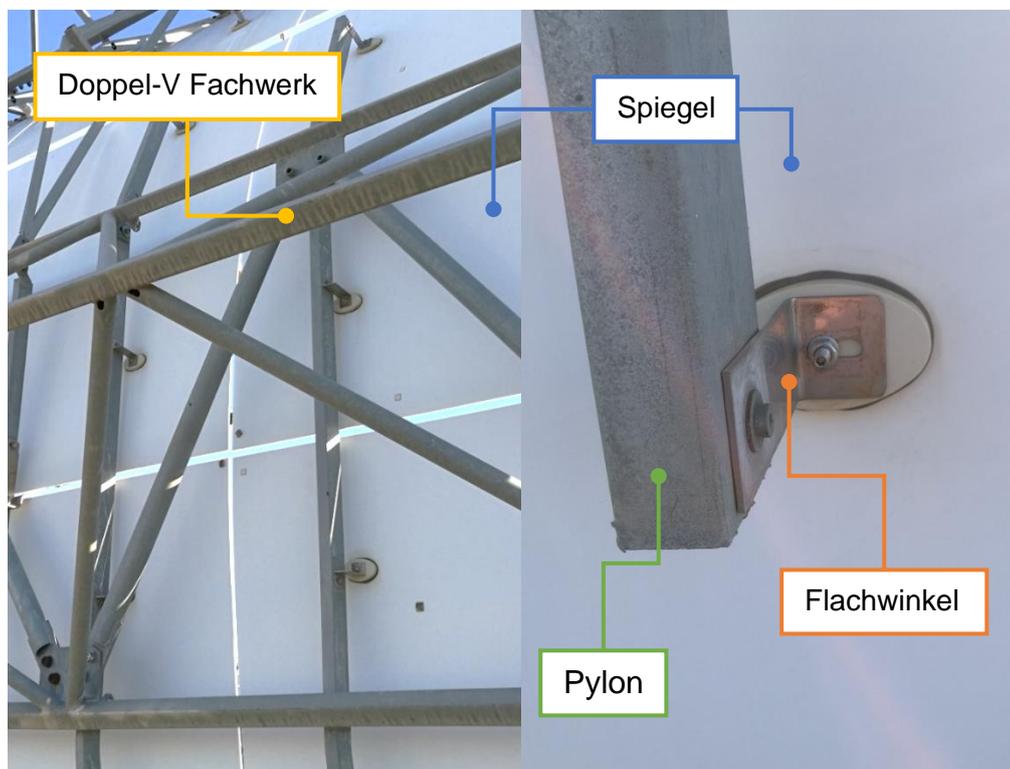


Abbildung 11: Befestigung von Glasspiegeln am Kollektor

Drehmechanismus

Zur Nachführung der Parabolrinnenkollektoren werden bislang entweder hydraulische Systeme oder Zahnräder verwendet. [8, S. 387] Bei hydraulischen Systemen kann ein Kollektor mittels zweier Hydraulikzylinder gedreht werden (Abbildung 8). Hierfür ist eine komplexe Steuerung notwendig, welche bei einer Fehlfunktion den Drehmechanismus beschädigen kann. Ein wichtiger Aspekt bei der Auswahl des Drehmechanismus ist dessen erforderliche Breite. Je breiter dieser ausfällt, desto länger muss die Spiegelfläche unterbrochen werden. Das Absorberrohr kann auf dieser Länge abkühlen, was je nach verwendetem Fluid zu Problemen wie der Rekondensation bei Direktampferzeugern führen kann.

Drehachse

Die Drehachse verläuft im Schwerpunkt des Kollektors. Aufgrund des großen Masseanteils des Torsionsrohrs am Kollektor ist der Abstand von Drehachse zu Torsionsrohr gering. Der Absorber ist bei aktuellen Kollektoren versetzt zur Drehachse in der Fokallinie des Spiegels montiert. Dies vereinfacht die Lagerung des Kollektors, führt jedoch zu enormen Herausforderungen bei der Verbindung der Absorber untereinander und mit den Zuleitungen. Hierfür werden Drehdichtungen oder flexible Verbindungsleitungen benötigt, welche beide diverse Nachteile mit sich bringen.

Absorber

Um das Absorberrohr verläuft ein strahlungsdurchlässiges Glashüllrohr. Im Spalt zwischen den Rohren herrscht ein Vakuum. Dies dient als Isolierung des Absorberrohres. Aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten und stark unterschiedlicher Betriebstemperaturen dehnen sich Absorberrohr und Glashüllrohr unterschiedlich stark aus. Um die unterschiedliche Längenausdehnung der beiden Röhren zu kompensieren, wird jedes Rohrsegment mit einem Kompensationszylinder abgeschlossen. Hierdurch wird die niedrigere Ausdehnung des Glasrohres ausgeglichen. Außerdem wird die Lagerung des Absorberrohres am Kompensationszylinder befestigt. Sie erfolgt über Stützen, die am Konzentrator befestigt sind. Sie werden beim Drehen des Konzentrators mitbewegt. Um die Ausdehnung der Absorberrohre auszugleichen, sind die Stützen in axialer Richtung schwenkbar angebracht. Die Lagerung des Absorbers ist zusammen mit diesen in Abbildung 12 zu sehen.

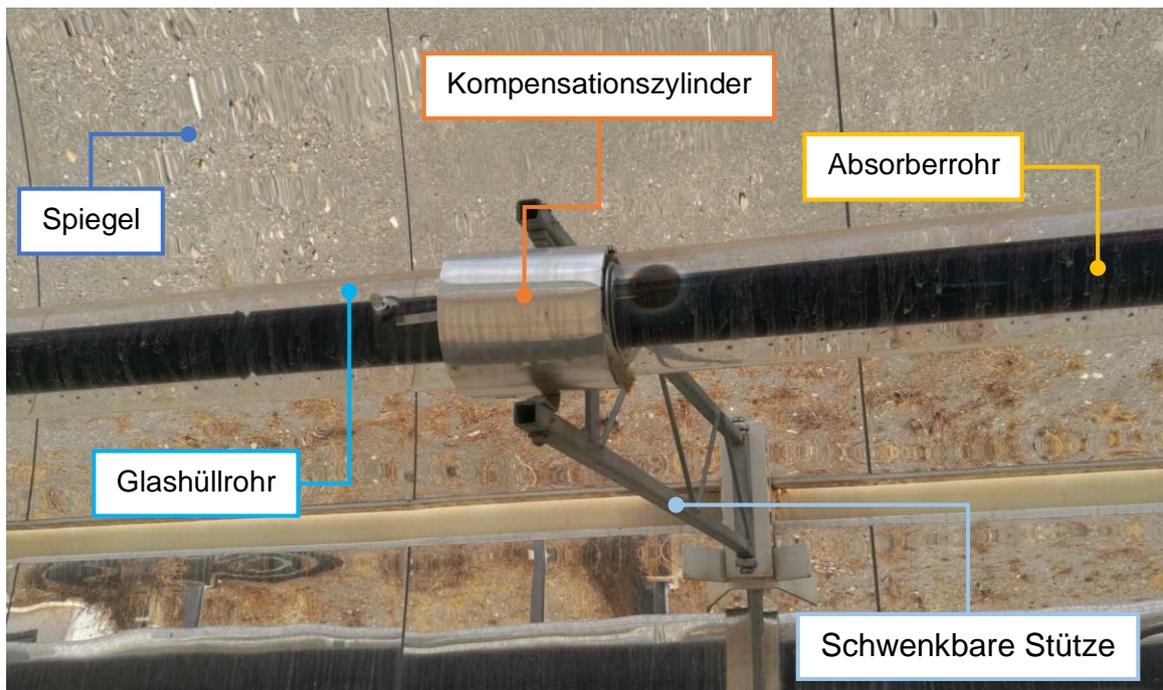


Abbildung 12: Absorber mit Stützstruktur

Einführung in den MS-Trough-Konzept-Parabolrinnenkollektor

Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten hat das DLR ein Konzept für einen Kollektor entwickelt, welcher für den Betrieb mit einer Salzschnmelze als Wärmeträger geeignet ist. Dieser wird wie der Eurotrough-Kollektor als Fix-Fokus Parabolrinnenkollektor ausgeführt. Der MS-Trough (Molten Salt Trough) soll nach Konzept aufgrund einer innovativen Lagerung eine Länge von bis zu 800 m erreichen. Abbildung 13 zeigt die Konzeptdarstellung dieses Kollektors. Es ist ein Ausschnitt mit einem Modul des Kollektors zu sehen. Dieses ist auf orangenen Pylonen gelagert. Mittig verläuft das Absorberrohr, welches an einer Gleitschiene (rot im Bild) befestigt ist.

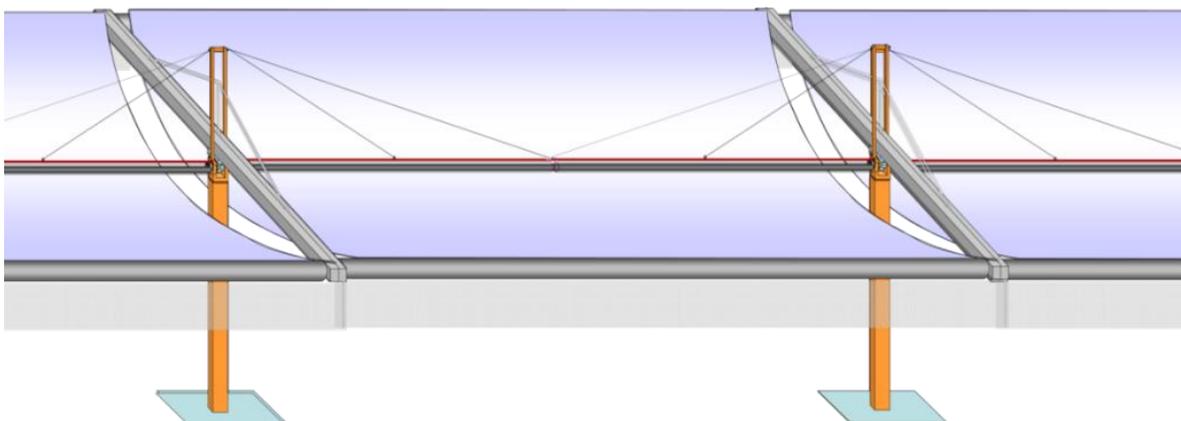


Abbildung 13: Konzeptdarstellung eines MS-Trough Moduls [10]

Aufgrund der Führung des Absorberrohres in der Drehachse können diese auf einem Gleitschienensystem unabhängig vom Kollektor gelagert werden. Ermöglicht wird das durch den Zusammenfall der Drehachse mit der Fokallinie. Wird der Kollektor nun der Sonne nachgeführt, so bleibt das Absorberrohr an seinem festen Platz und wird nicht

mehr mitgeführt. Dadurch werden Rotationsdichtungen und Kollektorverbindungsleitungen im Feld überflüssig. Das Absorberrohr hat so die Möglichkeit, sich in axialer Richtung losgelöst vom Kollektor in Folge von Temperaturänderungen auszudehnen. Das zugehörige Festlager wird in der Mitte eines 800 m langen Kollektors sitzen. Die Ausdehnungskompensation an den Seiten des Kollektors ist in Abbildung 14 dargestellt.

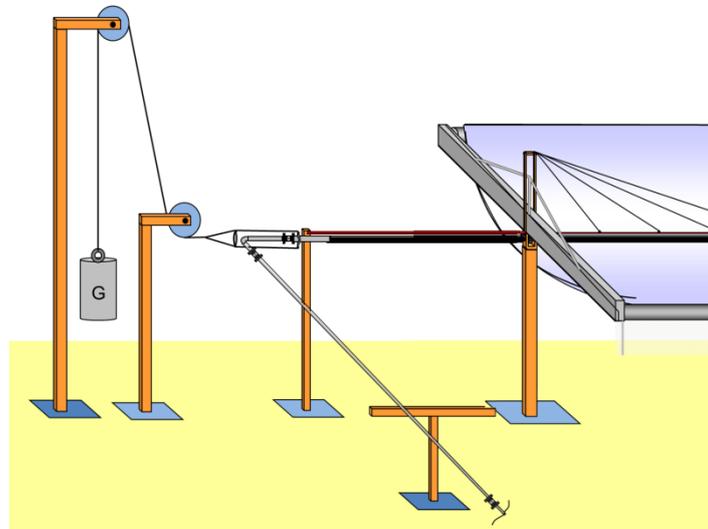


Abbildung 14: Ausdehnungskompensation des Absorberrohres am MS-Trough [10]

In Abbildung 15 und Abbildung 16 werden die Komponenten des MS-Trough dargestellt. Zur besseren Übersicht sind diese farblich markiert.

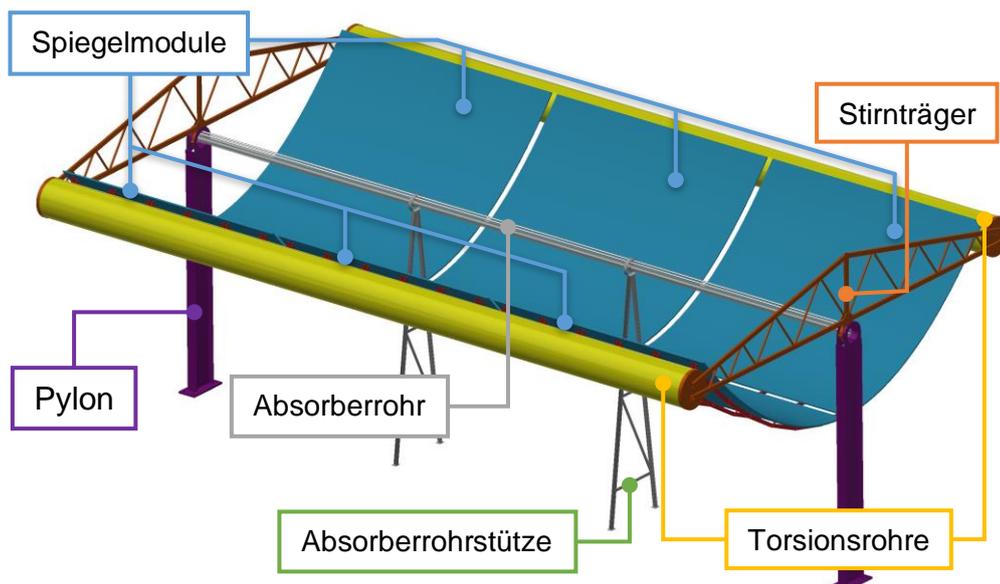


Abbildung 15: Überblick über den Parabolrinnenkollektor in Falschfarbdarstellung

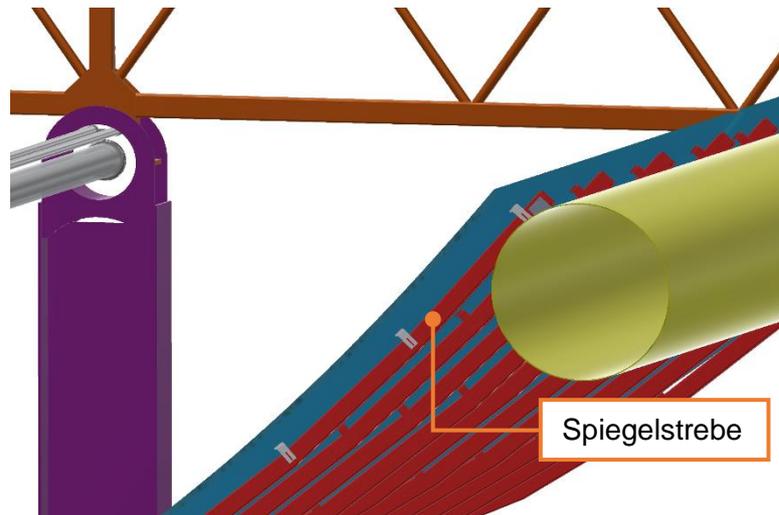


Abbildung 16: Detailansicht des Spiegeltragarms in einer Schnittansicht des Kollektors

Bei Parabolrinnenkollektoren sind die äußeren Spiegelflächen aufgrund ihrer großen Fokallänge besonders wichtig. Hier muss eine gute Formstabilität erreicht werden, um eine gute Konzentration zu erzielen. Der MS-Trough besitzt kein zentrales, sondern zwei dezentrale Torsionsrohre. Diese ermöglichen eine hohe Formstabilität an den äußeren Spiegelenden. Aufgrund ihres hohen Anteils an der Gesamtmasse und der Positionierung oberhalb der Drehachse tragen sie dazu bei, den Schwerpunkt in der Fokallinie zu halten und so eine starke Unwucht des Kollektors zu vermeiden. Auch der Stirnträger trägt aufgrund seines Schwerpunktes oberhalb der Drehachse zum Ausgleich der Unwucht bei. Im Rahmen eines vorherigen Projektes wurde am DLR ein Demonstrator des MS-Trough gebaut (Abbildung 17). Erste Tests verliefen positiv. Der Demonstrator besteht aus zwei Kollektormodulen, von denen nur eines (im Vordergrund zu sehen) mit einem Spiegel versehen wurde.



Abbildung 17: MS-Trough Demonstrator im Maßstab 1:4 [10]

Im Rahmen der Arbeit sind die Torsionsrohre neu auszulegen und in Form und Größe an die veränderten Positionen und Anforderungen anzupassen. Die Stirnträger, Pylonen und Spiegelstreben können nicht von bisherigen Konstruktionen übernommen werden.

Für den MS-Trough sind neue Spiegelmodule (Reflektoren) zu verwenden. Die Auslegung deren Sandwichstruktur ist jedoch kein Inhalt dieser Masterarbeit, sondern gilt als vorgegeben. Die Spiegel werden in die Festigkeitsanalysen mit einbezogen. Auch das Absorberrohr mit Befestigungspunkten und separaten Stützen ist kein Teil der vorliegenden Arbeit. Ebenfalls sind die Fundamente und Streben der Stützeinrichtung kein Teil der zu betrachtenden Konstruktion. Die zu entwickelnden Komponenten sind in Abbildung 18 farblich markiert.

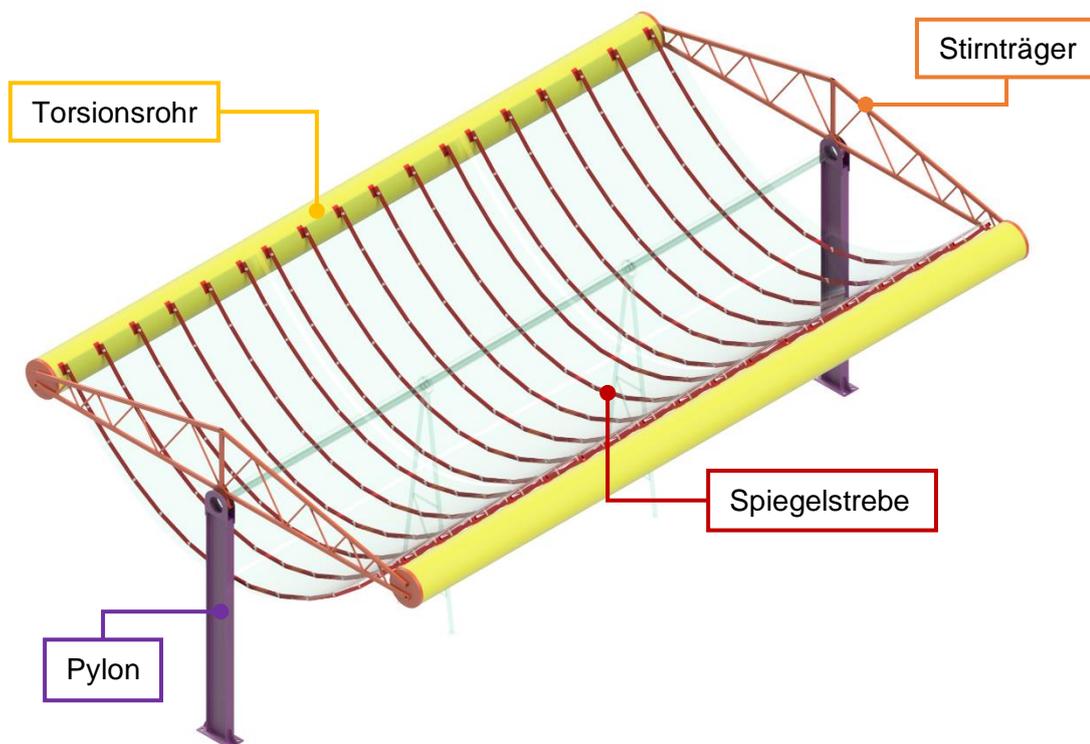


Abbildung 18: Umfang der Masterarbeit

4. Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die Baugruppen und Bauteile definiert. Dies dient dazu, eine optimale Lösung erarbeiten zu können. Der Produktentstehungsprozess lehnt sich an das Standardwerk von Pahl/Beitz an. [11] Der in Kapitel 3 beschriebene und zu konstruierende Parabolrinnenkollektor „MS-Trough“ basiert auf den Wirkprinzipien bestehender Systeme. Es handelt sich hierbei um eine Anpassungskonstruktion, da einige Bauteile im Vergleich zu marktüblichen Parabolrinnenkollektoren neue Aufgaben oder Abmessungen erhalten. Die Lösungsprinzipien der meisten Bauteile verändern sich jedoch nicht.

4.1 Anforderungsliste und Systemanalyse

Nach Pahl/Beitz steht an erster Stelle des Produktentstehungsprozesses die Klärung der Aufgabenstellung. [11] Die Aufgabenstellung ist vom DLR vorgegeben. [10] Die Systemgrenzen werden entsprechend Kapitel 3 festgelegt. Um den Konstruktionsprozess möglichst zielführend, nachvollziehbar und methodisch gestalten zu können, erfolgt im Anschluss das Erstellen einer Anforderungsliste. Über deren Funktion schreibt Decker et al.: „In dieser Liste werden die qualitativen und quantitativen Solleigenschaften des zu entwickelnden Produktes sowie die verbindlichen Forderungen und die Wünsche schriftlich formuliert mit Angaben, die für die Konstruktionsarbeit zutreffend sind.“ [12] Die Anforderungsliste kombiniert hierbei die Funktion des Lastenheftes und des Pflichtenheftes. Es werden also die Hauptmerkmale und angestrebten Eigenschaften des Produktes eingetragen. Da die Konstruktion eines Produktes schrittweise verläuft, wird die Anforderungsliste mit zunehmenden Entwicklungsfortschritt aktualisiert. Die Anforderungsliste findet sich in Tabelle 1 wieder.

In Kapitel 3 ist das Konzept des zu entwickelnden Fix-Fokus Parabolrinnenkollektors „MS-Trough“ vorgestellt worden. Als Forderungen sind insbesondere das Zusammenfallen von Drehachse und Absorberrohr, die Länge des Kollektors und die geometrischen Daten des Spiegels formuliert worden. Letztgenannte sind Aperturweite und Fokallänge. Diese beschreiben sowohl die Kurve, der der Spiegel folgt, als auch dessen Breite. Das Kompositmaterial der Dünnschichtspiegel besteht aus Aluminium, Styrodur und Borosilikatglas, ist aber, wie bereits beschrieben, nicht Gegenstand dieser Arbeit. Weitere Forderungen sind die Resistenz gegen Windlasten von bis zu 90 km/h. Hierfür darf sich der Kollektor in einer Sturmstellung, im Folgenden auch als Windstellung bezeichnet, befinden. In genannter Position beträgt die Neigung des Kollektors 0° . Die Spiegelmodule müssen so dimensioniert werden, dass sie nicht mit Absorberrohrstützen kollidieren, welche alle vier Meter errichtet werden (vergleiche Abbildung 15). Bei 12 m Länge eines Kollektormoduls sind somit zwei Lücken für diese Stützen vorzusehen. Die Breite der

Aussparungen soll 10 cm betragen. Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, ist eine hohe geometrische Genauigkeit der Spiegel erforderlich (siehe Kapitel 2.1). Verformen sich diese, so bewegt sich der Fokuspunkt aus der Drehachse und der Absorber wird verfehlt. Beeinflussende Faktoren sind hierbei die Torsionsrohre, Spiegelstreben und Stirnträger. Die erlaubte Durchbiegung des Stirnträgers ist ebenfalls vorgegeben. So darf die Absenkung der Torsionsrohre durch das Eigengewicht des Kollektormoduls und die Verformung der Stirnträger nicht mehr als 3 mm betragen. Vorgegeben sind zudem die Abmaße der Absorberrohre inklusive der Glashüllrohre.

Tabelle 1: Anforderungsliste für den Parabolrinnenkollektor

DLR		Anforderungsliste		2. Ausgabe vom 09.02.2020
Solar Research		für Parabolrinnenkollektor		Blatt: 1 Seite: 1
Änder.	F W	Pos.	Anforderungen	
13.09.2019	F	1	Zusammenfallen von Fokallinie und Drehachse	
13.09.2019	F	2	Kollektorlänge 12 m	
13.09.2019	F	3	Aperturweite des Spiegels 6,58m, Fokallänge 1,36m	
13.09.2019	W	4	Gute Transportfähigkeit der Module auf der Baustelle	
13.09.2019	W	5	Einfache Montage	
13.09.2019	W	6	Einfache Wartung / Wartungsfreiheit	
13.09.2019	F	7	Resistenz gegen Windlasten in Sturmstellung bis 90km/h Windgeschwindigkeit	
13.09.2019	W	8	Minimierter Verschattungsgrad durch Querstreben und Absorberrohrhalter	
13.09.2019	F	9	Unterbrechung des Kollektors alle 4 m für Absorberrohrstützen zum Boden.	
13.09.2019	W	10	Montage der Spiegel mittels Kleb- oder Nietverbindungen	
13.09.2019	W	11	Antrieb des Kollektors mittels Zahnkranzes mit Kollektordurchmesser	
13.09.2019	F	12	Verwendung von Dünnschichtspiegeln	
13.09.2019	F	13	Spiegelaufbau: Spiegel - Styrodur - Aluminium	
13.09.2019	W	14	Lagerung am Drehpunkt mittels Gleitlager	
13.09.2019	F	15	Verwendung zweier Torsionsrohre	
13.09.2019	W	16	Lage des Schwerpunktes in der Drehachse	
13.09.2019	W	17	Hohe geometrische Genauigkeit	
13.09.2019	W	18	Verwendung von Wartungsfreien Gleitlagern	
20.09.2019	F	19	Aufnahme eines Glashüllrohres mit 115mm Durchmesser	
17.01.2020	F	20	Maximale Durchbiegung bei der Aufnahme des Torsionsrohrs von 3mm	
21.01.2020	W	21	Produktion und Montage der Komponenten vor Ort	
21.01.2020	W	22	Maximale Durchbiegung des Kollektors vergleichbar mit EuroTrough	
			Ersetzt 1.	Ausgabe vom 13.09.19

4.2 Beschreibung der kritischen Probleme

Um die Komponenten auszulegen, ist es zunächst erforderlich, kritische Lastfälle zu definieren und diese zu spezifizieren. Anhand der Anforderungen ergeben sich drei besonders zu berücksichtigende Randbedingungen und deren Folgen:

1. Eigengewicht des Kollektors - Durchbiegung
2. Eigengewicht des Kollektors - Lagerreibung
3. Windlast - Zusätzliche Belastung für alle Verbindungsstellen

4.2.1 Lastfall 1: Eigengewicht des Kollektors – Durchbiegung

Ein wichtiger Aspekt ist die maximale Durchbiegung des Kollektors. Um möglichst exakte Fokussierung der Strahlen auf das Absorberrohr zu erreichen, darf diese nicht zu groß sein. Andernfalls kann es sein, dass ein Teil der reflektierten Strahlung das Absorberrohr nicht mehr trifft und die Effizienz des Kollektors sinkt. Um dies zu vermeiden, wird die maximale zulässige Durchbiegung des Kollektors festgelegt. Die Biegung geschieht hierbei an zwei verschiedenen Orten. So muss einerseits die Verschiebung durch Belastung des Stirträgers und andererseits die Biegung des Torsionsrohrs berücksichtigt werden. Die maximal erlaubte Durchbiegung durch den Stirträger beträgt hierbei wie beschrieben 3 mm. Diese gilt für den unbelasteten Zustand des Kollektors in waagerechter Stellung.

Als Anforderung an den MS-Trough bei der Durchbiegung des Torsionsrohrs gilt hierbei, dass dessen Durchbiegung ähnlich sein soll wie die eines Eurotrough-Kollektors. Da für diesen keine Werte für die maximale Durchbiegung vorliegen, werden sie zunächst bestimmt. Hierfür werden die Randbedingungen dieses Kollektors geklärt. Die Kraftverteilung durch die Spiegel, sowie deren Stützen auf das Torsionsrohr ist in Abbildung 19 dargestellt.

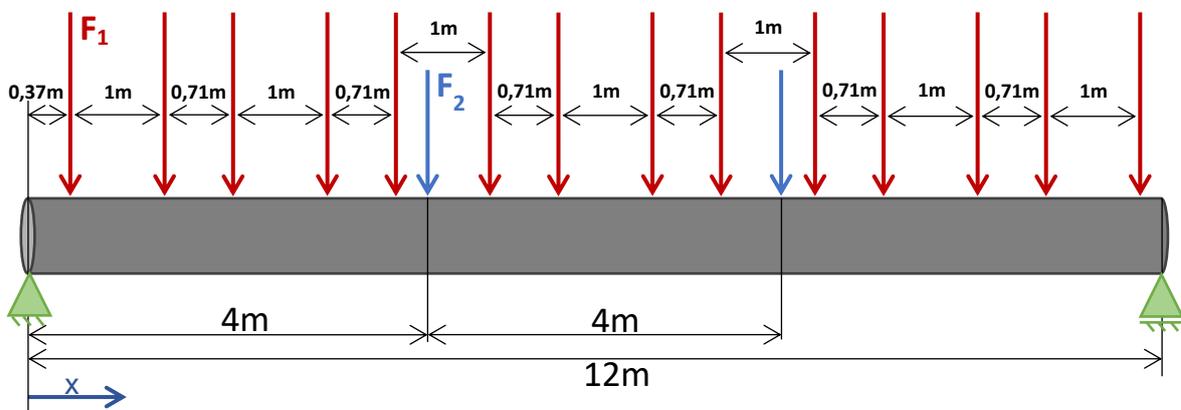


Abbildung 19: Kraftverteilung auf das Vergleichs-Torsionsrohr durch Spiegel

Jeder rote Pfeil entspricht einer Masse von 127 kg und somit einer Kraft F_1 von 1254 N. Zusätzlich zum Gewicht der Spiegel muss das Eigengewicht des Torsionsrohres und der Stützen für das Absorberrohr, sowie die Masse des Absorberrohres inklusive dessen

Inhalt berücksichtigt werden (siehe Tabelle 2). Das Torsionsrohr hat einen Außendurchmesser von 600 mm und eine Mantelstärke von 4 mm. Das Eigengewicht des Torsionsrohres wird als Linienkraft mit 577,3 N/m angenommen. Der Werkstoff ist S235. Die Massen durch Absorberrohr, Öl und Absorberrohrstützen wirken bei $x = 4$ m und $x = 8$ m mit jeweils $F_2 = 1225$ N.

Tabelle 2: Massen der Komponenten des Vergleichskollektors

Komponente	Masse
Torsionsrohr	58,85 kg/m
Absorberrohr (4m)	28 kg
Absorberrohrstütze	4 kg
Öl	23,23 kg/m

Der Kollektor ist auf beiden Seiten als torsionssteif eingespannt zu betrachten. Ein Ende wird als Festlager, das andere als Loslager ausgeführt. Zur Berechnung wird die Software z88Aurora verwendet. Abbildung 20 zeigt die simulierte Durchbiegung des Torsionsrohres mit den genannten aufgegebenen Lasten.

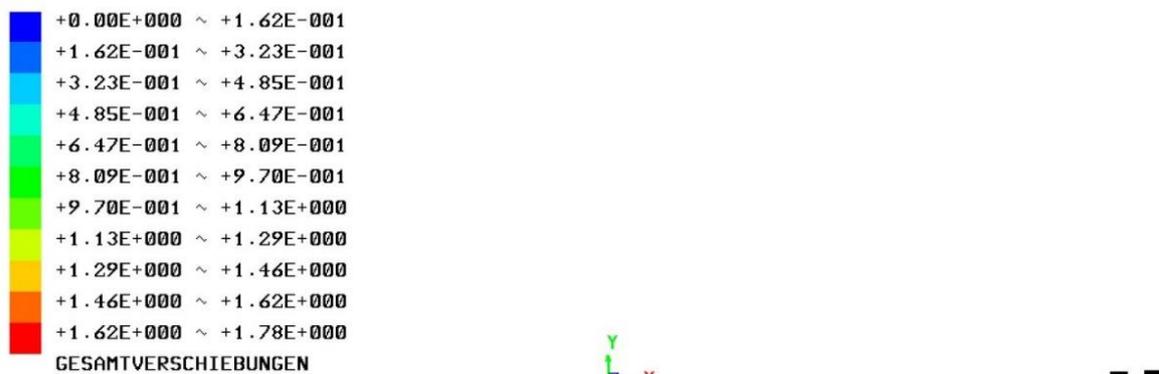


Abbildung 20: Durchbiegung des Torsionsrohres am Vergleichskollektor

Die maximale Durchbiegung des Vergleichskollektors am Torsionsrohr durch Eigenlast beträgt 1,78 mm. Dieser Wert gilt somit als Vergleichswert für die maximale Durchbiegung des Torsionsrohres relativ zu dessen Aufnahmepunkten am MS-Trough.

4.2.2 Lastfall 2: Eigengewicht des Kollektors – Lagerreibung

Um dem Verlauf der Sonne zu folgen, verfügen die Kollektoren über die Möglichkeit, den Spiegel zu drehen. Hierzu sind die Kollektoren an den Pylonen mittels eines Gleitlagers gelagert. Bedingt durch die niedrige Drehzahl ist die Geschwindigkeit an den Reibflächen sehr gering. Es herrscht somit Mischreibung bis Grenzreibung. Durch die Reibung am Lager wird auf den Kollektor bei dessen Drehung ein Widerstandsmoment ausgeübt, welchem der Kollektor standhalten muss. Die Höhe der Reibkraft ergibt sich hierbei aus

der Lagerkraft des Lagerzapfens multipliziert mit dem Reibbeiwert des Lagers. Aus der Reibkraft kann durch Multiplikation mit dem Radius der Reibfläche schließlich das Widerstandsmoment ermittelt werden (siehe Gleichung 4.14.1). Die Reibungszahl kann dem Datenblatt des Herstellers entnommen werden und beträgt $\mu = 0,03 \dots 0,25$. Für die Berechnung mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten wird vom größten Wert ausgegangen.

$$\begin{aligned} M_{Widerstand} &= F_{Reib} \cdot R_{Lager} = F_{Kollektor} \cdot \mu_{Lager} \cdot R_{Lager} \\ &= 30 \text{ kN} \cdot 0,25 \cdot \frac{273,1 \text{ mm}}{2} = 1,02 \text{ kNm} \end{aligned} \quad 4.1$$

Da im Betrieb eine gleichmäßige Ausrichtung des Kollektors gewünscht ist, ist dieser so auszulegen, dass die Verdrehung begrenzt wird. Daher ist eine hohe Torsionssteifigkeit notwendig. Die genaue Beschreibung des Lagers erfolgt in Kapitel 5.1.3.

4.2.3 Lastfall 3: Windlast – Zusätzliche Belastung für alle Verbindungsstellen

Die am aufwändigsten zu bestimmenden Lasten bei diesem Produktentwicklungsprozess sind die Windlasten. Für diese Belastungsart stehen keine passenden Literaturwerte zur Verfügung, weshalb sie mittels Finite-Elemente-Analysen ermittelt werden müssen. [13, S. 1901] Das hierfür verwendete Vorgehen wird in Kapitel 4.2.3.2 validiert.

4.2.3.1 Windlasten Theorie

Zur Berechnung der Windlasten wird von einer Windgeschwindigkeit von 90 km/h ausgegangen. Dies ist die Anforderung des DLR für den Standort „Plattaforma Solar de Almeria“ (PSA; Almeria, Spanien). Bei der Definition dieses Wertes wurde davon ausgegangen, dass das Kollektorfeld von Windzäunen umgeben wird. Diese reduzieren die Geschwindigkeit des auf die Kollektoren treffenden Windes. Bei der Entwicklung des EuroTrough-Kollektors wurden Windtunnelanalysen und Finite-Elemente-Methode-Analysen durchgeführt, sowie verschiedene Konzeptstudien erstellt. [8, S. 387] Aufgrund der hohen Unsicherheit bei der Bestimmung der Windlasten ist beim Eurotrough-Kollektor eine Messung der Belastung mittels Spannungs-, Beschleunigungs- und Winkelsensoren vorgesehen gewesen. [8, S. 391] Dies zeigt die Notwendigkeit, Windlasten mit einem hohen Sicherheitsfaktor zu beaufschlagen.

Die Ermittlung der Windlasten lehnt sich an die Europeanorm DIN EN 1991-1-4 an. Zur Berechnung der wirkenden Kräfte nach Norm ist neben der Windgeschwindigkeit auch die Querschnittsfläche des angeströmten Objektes und der Strömungswiderstandskoeffizient (cw-Wert) notwendig. Da der cw-Wert für Objekte dieser Form nicht aus Tabellenwerken ([13–15]) entnommen werden kann, muss er mittels einer Strömungssimulation (CFX-Simulation) in ANSYS bestimmt werden. Die Berechnung des cw-Wertes erfolgt nach Gleichung 4.2. Die Reynoldszahl wird nach Gleichung 4.3 bestimmt. Hierbei ist v die

Geschwindigkeit der Luft, b der Rohrdurchmesser und ν die kinematische Viskosität der Luft ($\nu = 15 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$). [15]

$$c_w = \frac{2 F_W}{\rho \cdot v^2 \cdot A} \quad 4.2$$

$$Re = \frac{v \cdot b}{\nu} \quad 4.3$$

Auf Basis der Geometrieinformationen, der Rauigkeit und der Reynoldszahl lässt sich der Grundkraftbeiwert c_f aus dem Eurocode1 [15] entnehmen. Aus diesem kann mittels Gleichung 4.4 die reale Windkraft berechnet werden.

$$F_W = q \cdot c_s c_d \cdot c_f \cdot A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_s c_d \cdot c_f \cdot A \quad 4.4$$

Der Strukturbeiwert $c_s c_d$ kann in diesem Fall vernachlässigt werden, da bei Körpern mit einer Höhe $h < 15 \text{ m}$ $c_s c_d = 1$ gilt. [15] Somit muss Gleichung 4.5 erfüllt werden.

$$c_w \stackrel{!}{=} c_f \quad 4.5$$

Das Vorgehen zur Berechnung der Windlasten kann somit als zielführend angesehen und auf den Parabolrinnenkollektor angewendet werden.

Der formähnlichste Körper, für den Tabellenwerte existieren, ist ein Zylinder. Deshalb wird die Simulation zunächst anhand eines Zylinderrohres durchgeführt und die ermittelten Werte mit Tabellenwerten verglichen, um die Plausibilität der Simulation zu gewährleisten. Da die genauen Abmessungen sowie die Position der Torsionsrohre von der Windlast beeinflusst werden und somit zu Beginn der Auslegung unbekannt sind, wird zur ersten Simulation ein auf Originalmaßstab skaliertes Modell des MS-Trough-Testaufbaus angenommen. Der Testaufbau wurde im Maßstab 1:3 gefertigt (vergleiche Kapitel 3). Zur Simulation wird der Kollektor stark vereinfacht. Die Verwendung von Werten aus der Simulation ermöglicht es, die Lastverteilung zu diskretisieren und somit eine genauere Belastung auf das Modell aufzugeben. Falls das endgültige Kollektordesign stark von dem der Simulation abweicht, muss dieses angepasst und die Berechnung wiederholt werden. Die Berechnung der Windlasten findet in ANSYS Fluent statt. Aufgrund der Geometrie des Kollektors kann dieser zweidimensional berechnet werden. Hierdurch sind bei gleicher Netzfeinheit Netze mit deutlich weniger Knoten realisierbar und die Rechenzeit kann im Vergleich zu einer dreidimensionalen Berechnung massiv verkürzt werden. Um die notwendige Netzfeinheit zu ermitteln, wird zunächst eine Netzstudie durchgeführt. Ziel ist außerdem, die erforderlichen Anforderungen an die Genauigkeit bei minimierten Berechnungszeiten zu erfüllen. Für die Netzstudie sind insbesondere die maximale Elementgröße im Netz sowie die Elementgröße um den angeströmten Körper als Stellgröße interessant. Für die Berechnungen werden Prismenschichten (Inflation-Layers) um die angeströmten Bauteile gelegt. Diese ermöglichen ein feines, strukturiertes Netz

um die zu betrachtende Geometrie. Auch werden verschiedene Turbulenzmodelle untersucht.

Mittels Fluidsimulation ist es möglich, die Lasten auf die einzelnen Komponenten des Kollektors getrennt zu ermitteln, verschiedene Anstellwinkel zu betrachten und Querkräfte zu ermitteln.

4.2.3.2 Windlasten Überprüfung

Zur Überprüfung der getroffenen Annahmen und Programmparameter wird zunächst eine Strömungssimulation anhand eines Körpers getroffen, dessen strömungsdynamisches Verhalten bekannt ist. Hierfür wird ein Zylinder gewählt, welcher frei im Raum steht.

Das untersuchte zylindrische Rohr kann als unendlich lang angenommen werden. Simuliert wird hierbei ein Abschnitt von einem Meter Länge mittels einer zweidimensionalen Simulation. Die freien Begrenzungslinien des Simulationsraums werden als Symmetrierandbedingungen vorgegeben. Die linke Wand fungiert als Lufteinlass. Als Luftauslass dient die rechte Wand. Die Parameter der Simulation sind in Tabelle 3 vermerkt.

Tabelle 3: Parameter der Windlastenberechnung am Rohr

Parameter	Wert
Durchmesser des Rohres	3000 mm
Länge des Simulationsraumes	25 m
Höhe des Simulationsraumes	16 m
Abstand des Zylinders von der Einlassöffnung	8 m
Windgeschwindigkeit	25 m/s

Abbildung 21 enthält eine Darstellung des zur Simulation berechneten Flächenmodells in Volldarstellung und mit dargestelltem Oberflächennetz.

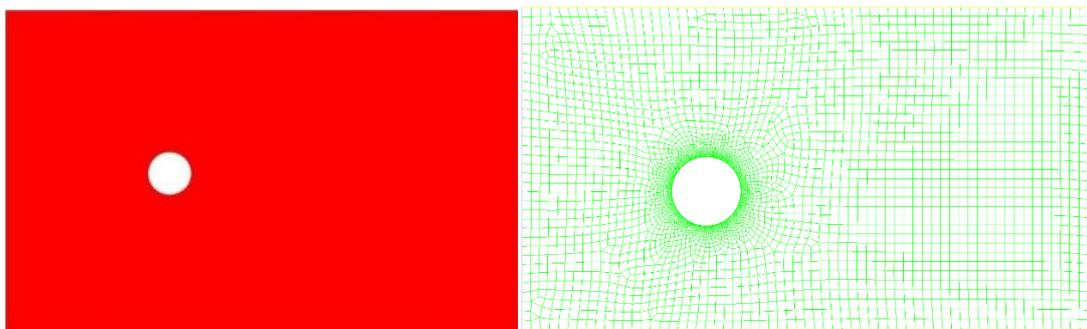


Abbildung 21: Untersuchtes Rohrmodell als Flächenmodell (links) und in Netzdarstellung (rechts)

Anhand dieses Körpers soll zunächst eine Netzstudie durchgeführt und anschließend die Ergebnisse mit Werten aus der Literatur verglichen werden. Da bei der Umströmung eines Zylinders Verwirbelungen auftreten (Kármánsche Wirbelstraße), schwankt das

Berechnungsergebnis über die Iterationen. Aus diesem Grund wird ein Mittelwert aus den letzten 300 Iterationen gebildet. Dies ist ausreichend, um konstante Werte zu erhalten. Um eine bessere Auflösung um das Objekt abzubilden, werden Prismenschichten (Inflation-Layers) verwendet, um das Netz lokal zu verfeinern. Diese ermöglichen neben einer feinen auch eine strukturierte Vernetzung um das Rohr. Der Einfluss von Prismenschichten wird in Abbildung 22 dargestellt.

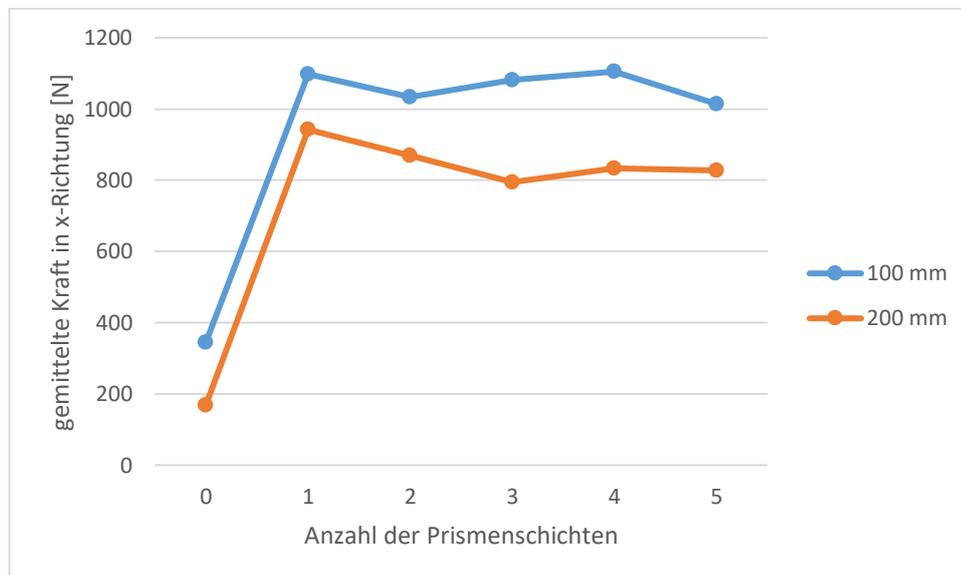


Abbildung 22: Einfluss der Anzahl von Prismenschichten auf das Simulationsergebnis

Hierfür wird einmal mit einer Netzfeinheit von 100 mm im Raum und 10 mm am Rohr, sowie einmal mit einer Netzfeinheit von 200 mm im Raum und 20 mm am Rohr vernetzt. Solange die Anzahl der Prismenschichten größer Null ist, hat die Anzahl der Schichten einen geringen Einfluss auf das Ergebnis. Ohne Prismenschichten fallen die ermittelten Kraftwerte deutlich geringer aus.

Zur Abbildung der Turbulenz und zum schnelleren Erreichen der Konvergenz sind verschiedene Turbulenz-Algorithmen wählbar. So können unter anderem der k-epsilon-, k-omega-, SST-, sowie der SA-Algorithmus verwendet werden. Die besten Ergebnisse bei dieser Simulation sind hierbei mittels SST-Algorithmus zu erzielen (Abbildung 23), weswegen dieser bei allen Simulationen verwendet wird. Der SST- und der SA-Algorithmus skalieren gut mit höherer Netzauflösung. Die Algorithmen k-epsilon und k-omega weisen hohe Abweichungen von den analytisch bestimmten Kraftwerten auf.

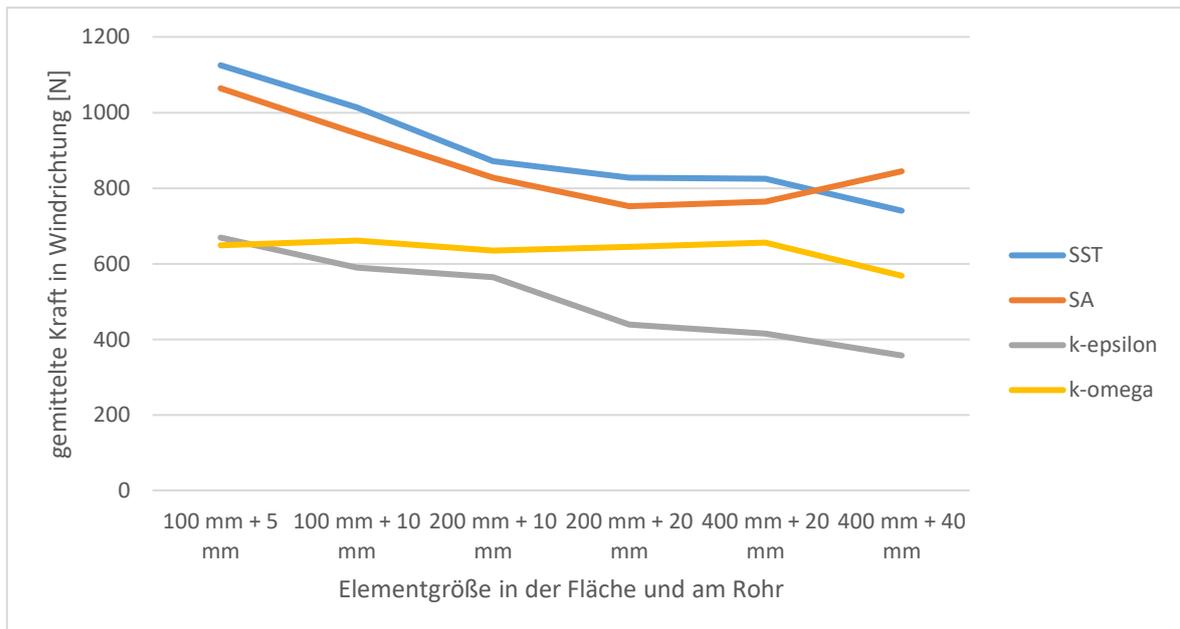


Abbildung 23: Vergleich von Turbulenz-Algorithmen in ANSYS

In Abbildung 24 werden die Ergebnisse der Netzstudie vorgestellt. Es wurden hierbei der SST-Algorithmus und 5 Prismenschichten verwendet.

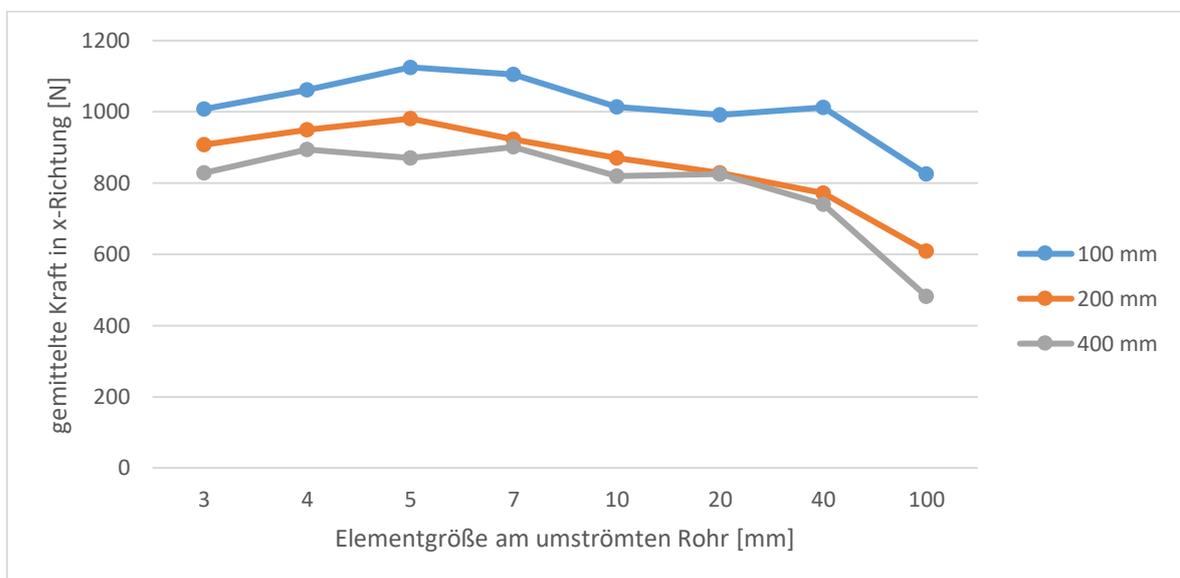


Abbildung 24: Netzstudie am quer angeströmten Rohr mit den Elementgrößen 100 mm, 200 mm und 300 mm im Raum

Es zeigt sich, dass eine feine Vernetzung des Raumes Einfluss auf die ermittelten Kräfte hat. Die Unterschiede bei den Ergebnissen zwischen den Netzeinstellungen sind annähernd konstant. Die Kraftwerte bei einer Elementgröße von 100 mm im Raum sind stets größer. Abseits dessen lassen sich bereits bei einer Elementgröße von 40 mm am umströmten Rohr gute Ergebnisse erzielen. Die Abweichungen der ermittelten Kräfte bleiben ab dieser Netzfeinheit im Vergleich zu feineren Netzen gering. Dies ist insbesondere bei der Vernetzung mit einer Elementgröße von 100 mm im Raum sichtbar. Analog Kapitel 4.2.3.1 wird aus der ermittelten Kraft der c_w -Wert gebildet.

$$Re = \frac{v \cdot b}{\nu} = \frac{25 \frac{m}{s} \cdot 3 m}{15 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 5 \cdot 10^6 \quad \text{Reynoldszahl}$$

$$c_w = \frac{2 F_W}{\rho \cdot v^2 \cdot A} = \frac{2 \cdot 1014 N}{1,024 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(25 \frac{m}{s}\right)^2 \cdot 3 m^2} = 1,067 \quad \text{cw-Wert}$$

Für kreisrunde Zylinder bei einer Rauigkeit von 0,2 und einer Reynoldszahl von 500.000 beträgt der Grundkraftbeiwert $c_f \approx 1,06$. [15] Damit gilt folgende notwendige Bedingung als erfüllt:

$$c_w \stackrel{!}{=} c_f \approx 1,06$$

Das Vorgehen zur Berechnung der Windlasten kann somit als zielführend angesehen und auf den Parabolrinnenkollektor angewendet werden.

4.2.3.3 Windlasten Anwendung

Eine Skizze des simulierten Kollektors ist in Abbildung 25 dargestellt. Der Wind strömt hierbei von links auf den Kollektor. Die Belastung des Kollektormoduls wird mit verschiedenen Neigungswinkeln gegenüber der Horizontalen berechnet. Die Ausrichtung und Amplitude der Kräfte beziehen sich hierbei immer auf das Koordinatensystem, das der Ausrichtung des Kollektors folgt. Es wird wie der MS-Trough im Winkel α gedreht. Für beide Torsionsrohre werden die Kräfte separat ausgegeben. Ebenfalls wird der Spiegel an der y-Achse geteilt und beide Hälften getrennt betrachtet. In der CFD-Analyse wird keine Formänderung des Kollektors betrachtet. In einem Abstand von vier Metern zum Drehpunkt des Kollektors wird eine Bodenplatte simuliert.

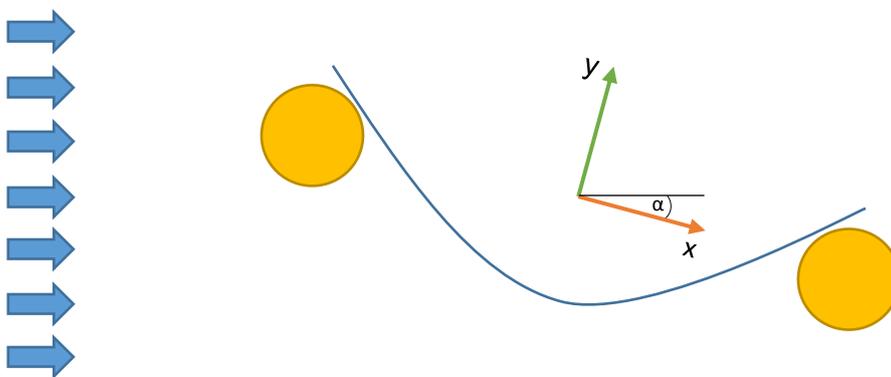


Abbildung 25: Anströmdarstellung des Kollektors

Die Vernetzung geschieht auf Basis der in Kapitel 4.2.3.2 gewonnenen Erkenntnisse. Bei der Vernetzung werden Prismenschichten und zur Berechnung der SST-Algorithmus verwendet. Aufgrund der veränderten Geometrie ist eine erneute Netzanalyse notwendig. Deren Ergebnisse sind in Abbildung 26 einsehbar. Es sind jeweils die Kräfte in x- und y-

Richtung (vergleiche Abbildung 25) mit unterschiedlichen gewählten Werten für die maximale Elementgröße aufgetragen.

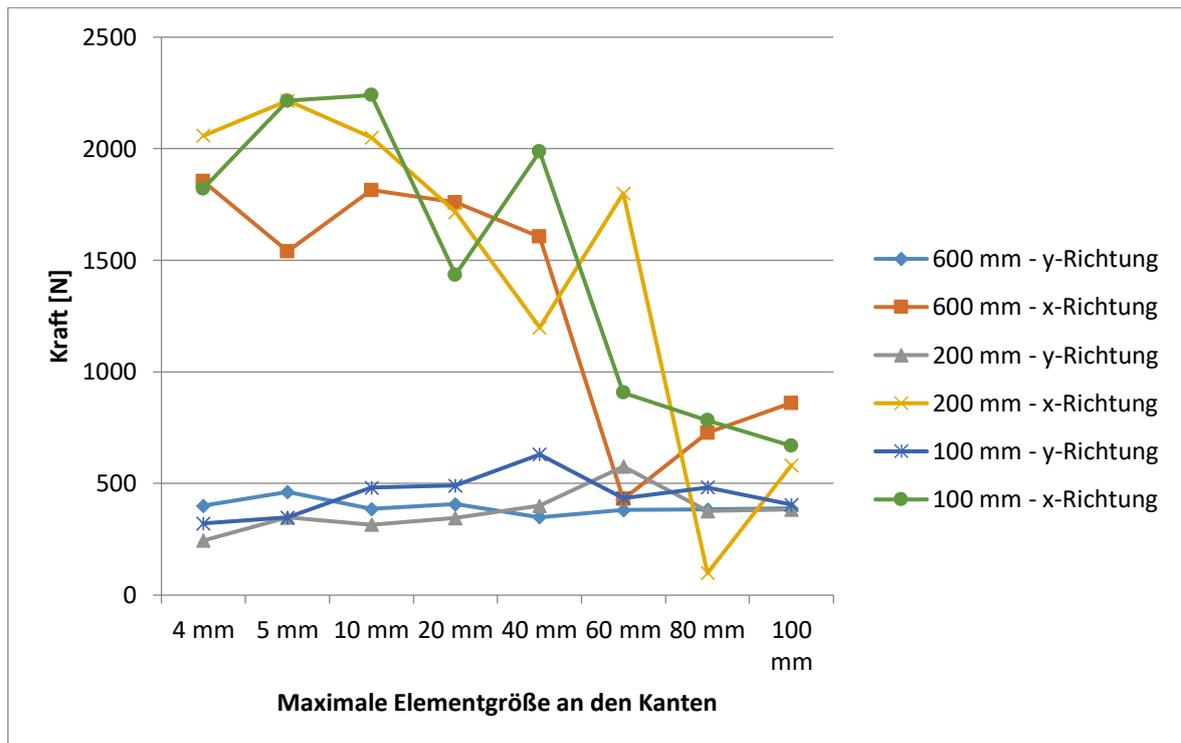


Abbildung 26: Netzanalyse am Windmodell des Kollektors

Es zeigt sich eine große Abhängigkeit der Ergebnisse von der maximalen Elementgröße an den Kanten. Dies bedeutet, dass eine feinere Vernetzung des Kollektorumrisses eine deutliche Verbesserung der Simulationsqualität bietet. Aufgrund von Limitierungen bei der Rechenleistung wird die Winkelstudie am Kollektormodell mit der geringsten Netzfeinheit durchgeführt, mit welcher ein hinreichend genaues Ergebnis erzielt wird. Die Berechnungseinstellungen können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Vernetzungseinstellungen bei der Ermittlung der Windkraft

Globale Elementgröße	200 mm
Elementgröße an den Kanten	5 mm
Anzahl der Prismenschichten	5

In Kombination mit der Verwendung von Prismenschichten konnte eine ausreichende Netzfeinheit erzielt werden. In Abbildung 27 ist das feine Netz abgebildet.



Abbildung 27: Netz des Strömungsmodells des Kollektors - Detailansicht

Die Ergebnisse bei einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s und einem Winkelbereich von 0 bis 360 ° werden in Abbildung 28 dargestellt.

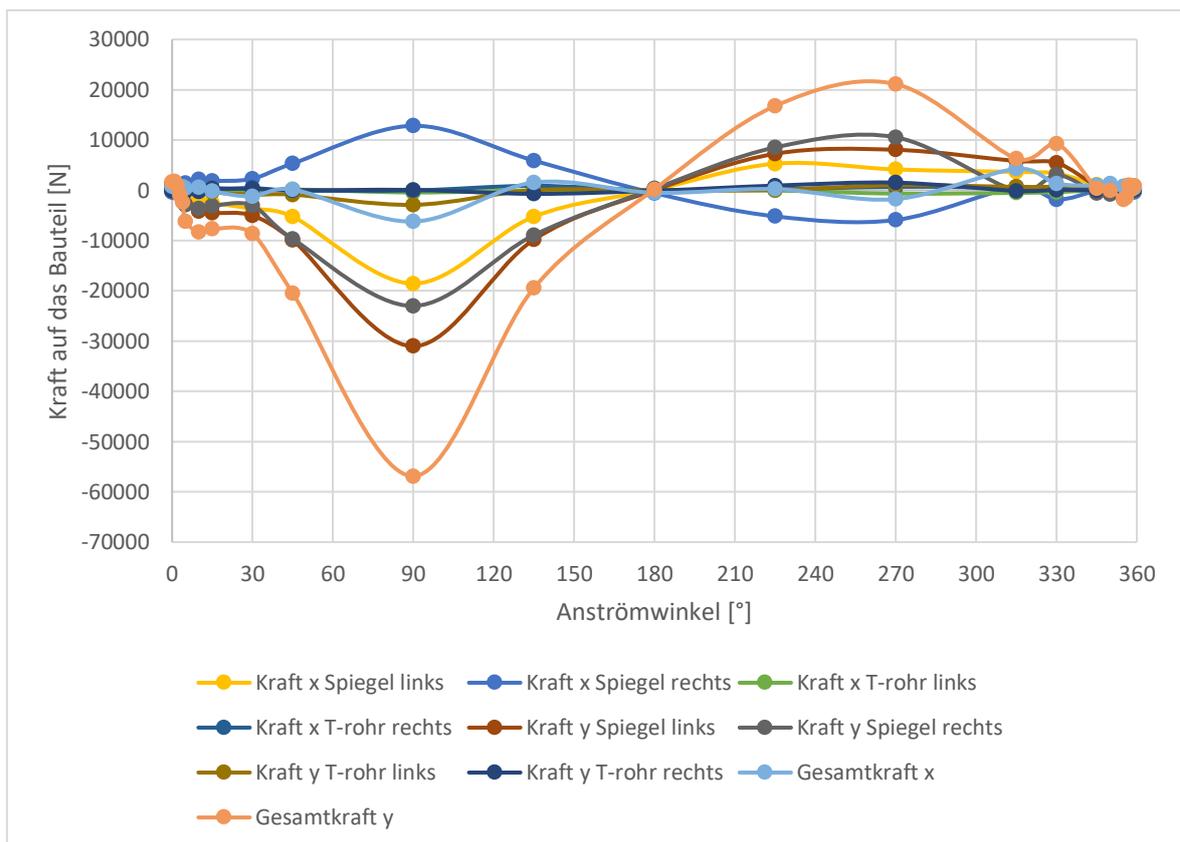


Abbildung 28: Windkräfte in Abhängigkeit des Anstellwinkels des Kollektors

Es sind jeweils in x- und y-Richtung die Gesamtkraft, und Teilkräfte für die beiden Torsionsrohre und die beiden Spiegelbereiche aufgetragen. Bei 90 ° und 270 ° wird die Stirnfläche des Kollektors maximal. Dies stellt sich auch in den Kräfteinwirkungen so dar. Sie unterscheiden sich durch eine Anströmung der konvexen beziehungsweise konkaven Kollektorseite. Der Verlauf der Kräfte über 360 ° ist interessant, da er sich bei geringeren Windgeschwindigkeiten, welche im Betrieb auftreten können, proportional verhält. Abbildung 29 zeigt den für die Windstellung relevanten Winkelbereich im Detail. Zwar wird der Kollektor bei hohen Windgeschwindigkeiten auf 0 ° gedreht, eine geringe Abweichung

des Winkels kann dennoch nicht ausgeschlossen werden. Daher wird die Kraft bei Winkelabweichungen von bis zu 5 ° ermittelt.

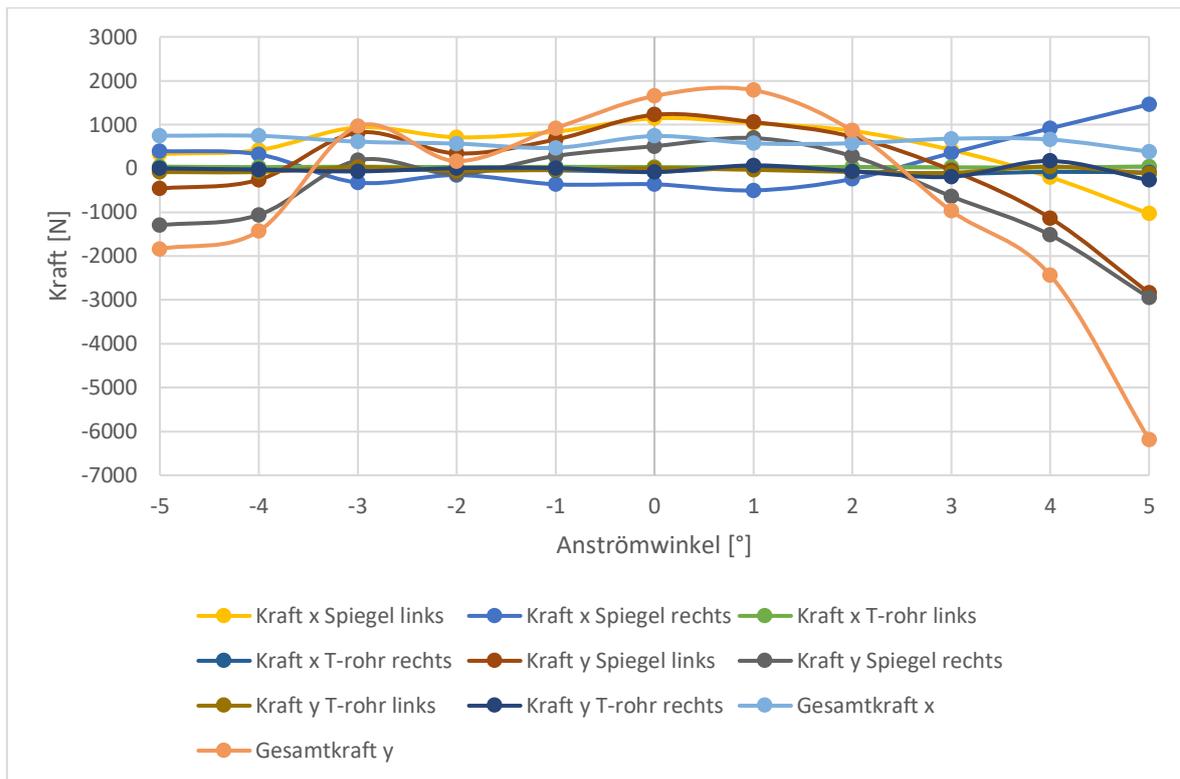


Abbildung 29: Windkräfte in Abhängigkeit des Anstellwinkels des Kollektors - Detailansicht um 0°

Anhand des Diagramms ist zu erkennen, dass der Kollektor in der Windstellung Winkel von -3° bis 2° problemlos einnehmen kann. In diesem Winkelbereich ähneln sich die Lasteinwirkungen. Außerhalb dieses Bereiches verändern sich die Lasten jedoch stark. Auffällig ist auch, dass der Kollektor nicht nur in Windrichtung belastet wird, sondern auch eine starke Lasteinwirkung normal zur Windrichtung erfährt. Diese ist größer als die Last in Windrichtung. Das auf den Kollektor wirkende Moment ist in Abbildung 30 über den Anstellwinkel des Kollektors aufgetragen.

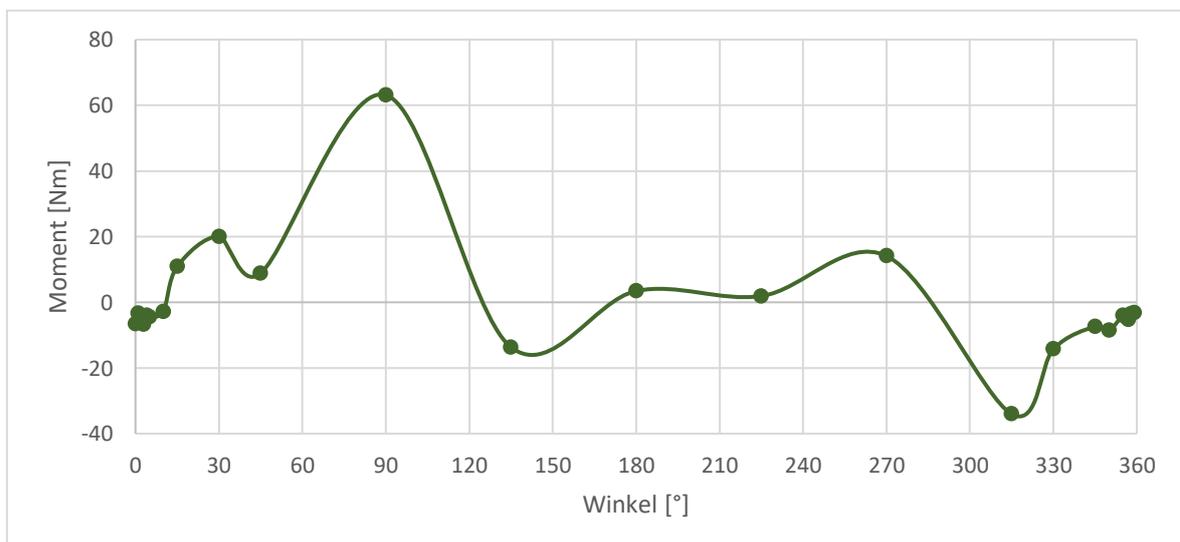


Abbildung 30: Auf den Kollektor wirkendes Moment bei einer Windanströmung mit 25 m/s

Im besonders relevanten Bereich um 0° fällt dieses mit unter 10 Nm sehr gering aus. In Abbildung 31 ist ein Unterdruck im Inneren des Reflektors erkennbar.

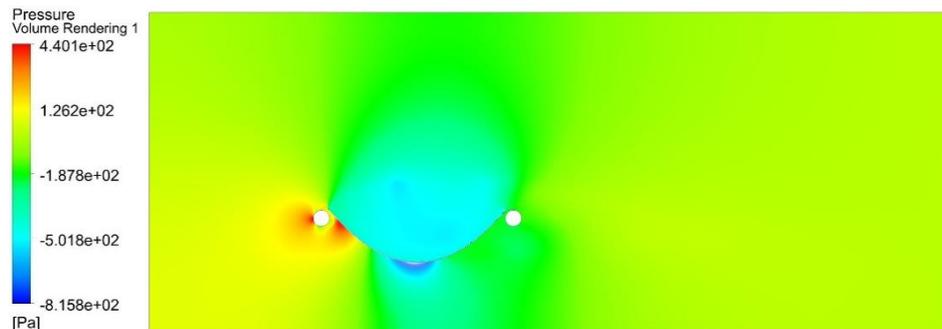


Abbildung 31: Druckverteilung um den Kollektor bei Windbelastung in Windstellung

Dieser Bereich wird nicht aktiv durchströmt (vergleiche Abbildung 32). Die auf die Spiegel wirkende Kraft staucht den Kollektor daher zur Drehachse hin. Diese Erkenntnis stimmt mit den Kraftwerten aus Abbildung 29 überein. Aufgrund dieses Effektes ist die Summe der Kräfte in Windrichtung relativ gering.

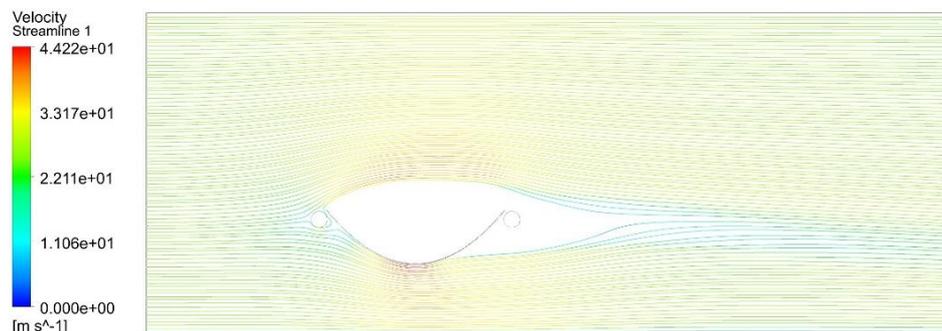


Abbildung 32: Strömungslinien um den Kollektor bei Windbelastung in Windstellung

Zur Darstellung der Windkräfte wird der Kollektor in vier Bereiche unterteilt. Die Aufteilung und Nomenklatur ist Abbildung 33 entnehmbar.

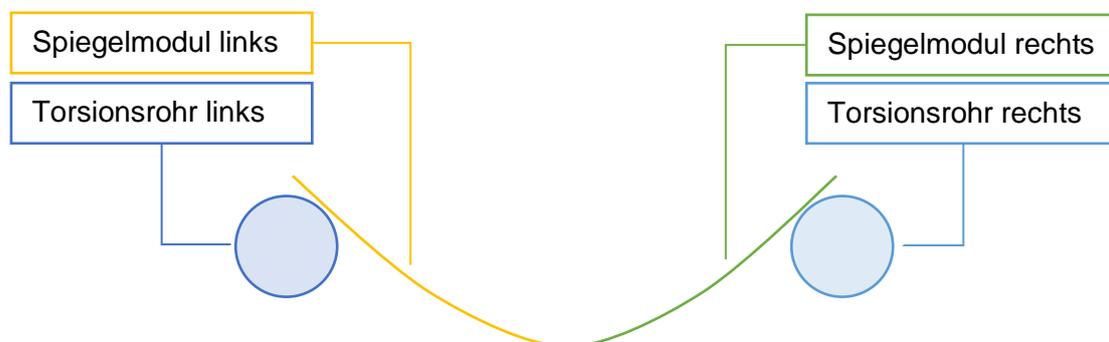


Abbildung 33: Bereiche mit ermittelten Windkräften

Die Kräfte aus der Simulation (siehe Tabelle 5) werden mit einem Last-Sicherheitsfaktor von 3 beaufschlagt, um den Einfluss von Unsicherheiten zu verringern. Die Sicherheitsfaktoren müssen umso größer ausfallen, je weniger Aufwand in deren experimentelle Entwicklung gesteckt wird. [16, S. 25] Im Rahmen der Arbeit sind jedoch keine Versuche im Windkanal umsetzbar.

Tabelle 5: Ermittelte Windkräfte inklusive Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors von $S_F = 3$

Körper	x-Richtung [N]	y-Richtung [N]
Spiegelmodul links	29425	22953
Spiegelmodul rechts	-14542	14028
Torsionsrohr links	2270	-1860
Torsionsrohr rechts	-794	154
Absolut	16358	35276

Die Kräfte gelten für ein gesamtes Kollektormodul mit 12 m Länge. Die absolut auftreffende Kraft ist für die Berechnung der Lagerkraft und des Pylons von Bedeutung.

5. Lösungsfindung

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 3 genannten Komponenten entworfen und konstruiert. Im Anschluss wird an den kritischen Stellen ein Festigkeitsnachweis erbracht. Eine genaue Simulation der Komponenten ist aufgrund der Beeinflussung durch die weiteren Komponenten nur durch eine Simulation des Gesamtsystems möglich. Um die Entwicklungszeit zu verkürzen, ist es jedoch notwendig, vorab eine Grundausslegung der Komponenten durchzuführen. Hierfür werden Finite-Elemente-Berechnungen mit stark vereinfachten Randbedingungen durchgeführt. Die hierdurch entstehenden Abweichungen können im Anschluss bei der Simulation des Gesamtsystems erkannt und berichtigt werden. Nach der Berechnung des Gesamtsystems können die Bauteile an die eventuell abweichenden Lasten angeglichen werden. Alle Simulationen werden mit unterschiedlichen Netzfeinheiten durchgeführt. Die Position der Komponenten wird in Abbildung 47 veranschaulicht.

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Komponenten für den Parabolrinnenkollektor MS-Trough. Die Bauteile Stirnträger, Torsionsrohre, Spiegeltragarme und die Pylonen werden in einer Finite-Elemente-Analyse bewertet. Kein Inhalt der Arbeit sind die Absorber, deren Stützen und die Betonfundamente für den Kollektor. Die Materialzusammensetzung des Dünnschichtspiegels wird übernommen. Für die Simulation der Windlast wird ein Hilfskörper verwendet. (siehe Kapitel 5.2.4.1) Die Komponenten werden einer Finite-Elemente-Analyse mit ANSYS Workbench 18.2 und 19.2 unterzogen. Alle Simulationen werden mit unterschiedlichen Netzfeinheiten durchgeführt. Die CAD-Modelle werden mit Autodesk Inventor 2018 und 2020 erstellt.

5.1 Vorauslegung

Verschiedene bisherige Tragwerkskonstruktionen von Parabolrinnen mit Spannweiten von über 6 Metern besitzen aufwändige Stahlkonstruktionen. [9, S. 46] Durch den Verzicht auf Torsionsboxen und die Verwendung von Torsionsrohren sinkt der Aufwand bei der Montage der Module enorm.

5.1.1 Stirnträger

Die Aufgabe des Stirnträgers ist es, eine Verbindung von den Torsionsrohren zum Lager herzustellen. Die Kopplung der Kollektormodule zu einem Kollektor soll ebenfalls an ihm erfolgen. Der Stirnträger ist möglichst steif zu konstruieren. So soll die Durchbiegung des Kollektors sehr gering ausfallen, um eine gute Fokussierbarkeit zu gewährleisten.

Um sowohl die Anforderungen nach einer hohen Steifigkeit als auch nach einer geringen Verschattung zu erfüllen, soll der Stirnträger aus Baustahl konstruiert werden. Dies ist auch der Grund für die Wahl einer Fachwerkkonstruktion. Bei dem Entwurf der Profilbauteile wird eine manuelle Formoptimierung durchgeführt. Hierbei wird iterativ vorgegangen und nach jedem Vorgang die Position, Dicke und Anzahl der Normprofile angepasst. Durch automatisierbare Optimierungsschleifen lässt sich dieses Vorgehen vereinfachen. Auch lassen sich durch eine Topologieoptimierung neue Formen erschließen. Die Hauptspannungsverteilung ist in Abbildung 34 sichtbar.

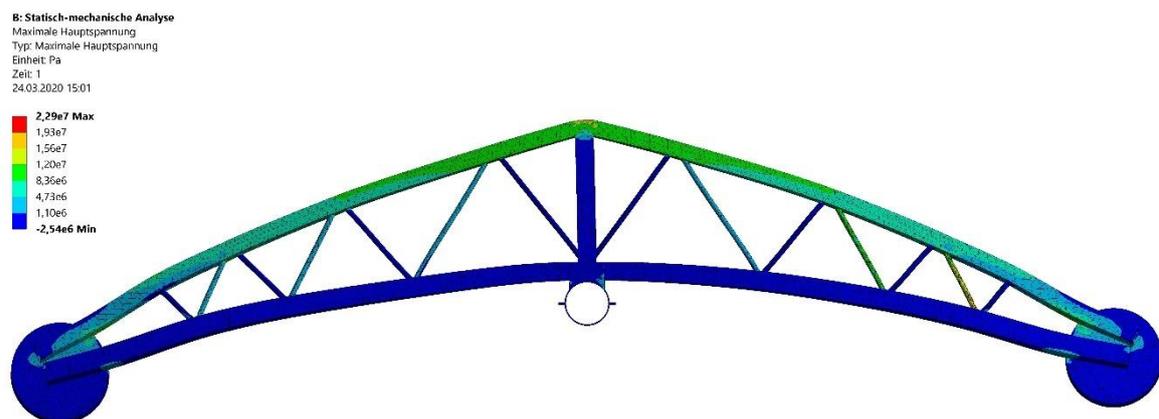


Abbildung 34: Hauptspannungsverteilung bei der Vorauslegung des Stirnträgers

Auffällig ist hierbei die vergleichsweise hohe Auslastung der oberen Träger. Sie liegen in diesem Fall auf dem spannungskritischen Pfad. Die Verschiebung der Knoten bei Belastung kann Abbildung 35 entnommen werden.

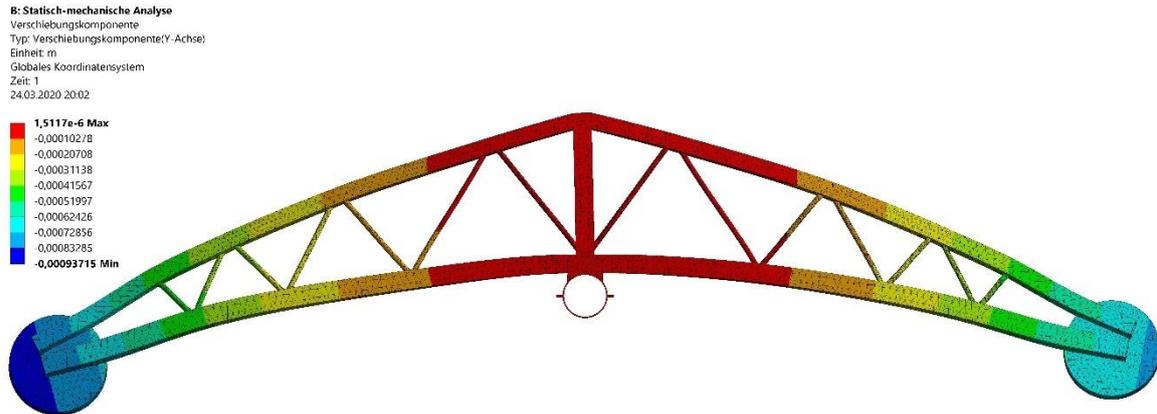


Abbildung 35: Verschiebung des Stirnträgers

Die maximale Verschiebung tritt bei den Aufnahmen für das Torsionsrohr auf und beträgt 0,9 mm. Die Daten der Simulation sind in Tabelle 6 einsehbar.

Tabelle 6: Abmaße des Stirnträgers und Eigenschaften der Simulation

Abstand zwischen den Mittelpunkten der Torsionsrohraufnahmen	7160 mm
Maximale Höhe über der Drehachse	1250 mm
Dimension der Rechteckholrohre	80 mm x 40 mm x 4.0 mm
Dimension der Rundrohre	33,7 mm x 2.0 mm
Elementansatzfunktion	quadratisch
Elementgröße	20
Knotenanzahl	139469
Elementanzahl	69159

5.1.2 Torsionsrohr

Das Torsionsrohr für den MS-Trough basiert auf dem Torsionsrohr des Eurotrough-Kollektors. Die Eigenschaften des Rohres sind Tabelle 7 entnehmbar.

Tabelle 7: Eigenschaften des Torsionsrohr

Länge	12 m
Durchmesser (außen)	600 mm
Dicke	4 mm

Die Torsionsrohre tragen maßhaltig zur Torsionssteifigkeit eines Kollektors bei. Sie sind jedoch auch die schwersten bewegten Bauteile am Kollektor. Da die Dimension der Torsionsrohre zunächst vom Eurotrough-Kollektor übernommen wird, wird zunächst auf eine nähere Darstellung der Durchbiegung und der Spannungen im Rohr verzichtet.

5.1.3 Lager

Die Lagerung eines Kollektormoduls wird durch zwei Gleitlager an den dessen Enden realisiert. Beide werden als Loslager konzipiert, um die Verschiebung durch Ausdehnung des Kollektors kompensieren zu können. Die Verschiebung in Axialrichtung wird in der Mitte eines Kollektors, der aus mehreren Modulen besteht, gesperrt. Dort befindet sich ebenfalls die Antriebseinheit für die Drehfunktion des Kollektors, welche auch diese Funktion übernimmt.

Da sich das Absorberrohr im Drehpunkt des Kollektors befindet, hat das Lager dieses zu umschließen. Der Durchmesser wird daher konstruktionsbedingt sehr groß gewählt. Die Innenseite besteht direkt aus dem Pylonträger, wohingegen das Außenlager mit dem Stirnträger verbunden wird und teilbar ausgeführt werden muss. Im Zwischenraum wird das Lagermaterial eingebracht.

Die Wahl des Lagermaterials hat Einfluss auf die unter Abschnitt 4.2.2 behandelte Lagerreibung. Um diese zu minimieren, gilt es ebenso, die Reibfläche kleinstmöglich auszuführen. Verbaut werden PTFE Composite-Gleitlager von SKF. [17, S. 17] Sie sind konzipiert für Trockenlauf und für Lagerungen, die hohen Belastungen und/oder Gleitgeschwindigkeiten ausgesetzt sind. [17, S. 17] Der Vorteil von PTFE-Lagern ist die breite Temperaturtoleranz, sowie ein sehr geringer Reibwert von $\mu = 0,03 \dots 0,25$. Dadurch ist sehr wenig bis keine Schmierung notwendig. Besonders für niedrige Gleitgeschwindigkeiten eignen sich Kunststoff-Gleitlager besser als Metall-Gleitlager, welche im Mischreibungsgebiet mit Verschleiß arbeiten würden. [12, S. 505] Aufgrund des großen Lagerdurchmessers werden Bandstreifen verwendet, welche an die erforderliche Größe angepasst und in Position gebogen werden.

Die Maximalbelastung der Lager ist gleichzeitig der Zustand der Maximalbelastung des gesamten Kollektormoduls. Da das Kollektormodul beidseitig gelagert wird, wirkt somit auf jedes Lager die halbe Kraft, die auf das Modul wirkt. Die Gesamtlast durch Windbelastung auf das Kollektormodul ist bereits in Kapitel 4.2.3 bestimmt worden und wird in Tabelle 8 dargestellt. In den Werten ist bereits der Sicherheitsfaktor für die Windlast von $S_W = 3$ eingerechnet. Die absolute Kraft kann mittels Satz des Pythagoras errechnet werden.

$$F_{Wind,abs} = \sqrt{F_{Wind,x}^2 + F_{Wind,y}^2} \quad 5.1$$

Tabelle 8: Windkräfte durch maximale Windbelastung in Windstellung inklusive Sicherheitsfaktor

Lastrichtung	Kraft auf das Kollektormodul [N]
Windrichtung	16360
Senkrecht zu Windrichtung	35275
Absolute Windlast	38884

Zur Windbelastung kommt die Gewichtskraft des Kollektormoduls hinzu, welche nach Formel 5.2 14715 N beträgt.

$$G_{Kollektor} = M_{Kollektor} \cdot g \cdot \frac{1}{i} \approx 3000 \text{ kg} \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{2} = 14715 \text{ N} \quad 5.2$$

Die absolute Lagerkraft wird unter Berücksichtigung der Sicherheitsfaktoren nach Gleichung 5.3 berechnet. Der Sicherheitsfaktor für die Gewichtskraft kann als $S_G = 1,1$ angenommen werden. Die Ergebnisse werden in Tabelle 9 dargestellt.

$$F_{Lager} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(G_{Kollektor} \cdot S_G + F_{Wind, senkrecht} \cdot S_W)^2 + (F_{Wind, horizontal} \cdot S_W)^2} \quad 5.3$$

Tabelle 9: Kräfte eines Kollektorsmoduls auf die Lager

Lastrichtung	Kraft auf den Kollektor [N]
Windrichtung	16359
Senkrecht zu Windrichtung	19089
Absolute Lagerlast	21658

Für die Berechnung der spezifischen Lagerbelastung wird von einer Kraft von 15000 N pro Lager ausgegangen. Der Lagerdurchmesser beträgt 277,1 mm und die Breite 60 mm. Die spezifische Lagerbelastung wird nach Gleichung 5.4 ermittelt.

$$p_{Lager} = \frac{F_{Lager}}{D \cdot b} = \frac{21658 \text{ N}}{277,1 \text{ mm} \cdot 60 \text{ mm}} = 1,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad 5.4$$

Aufgrund des konstruktiv bedingten großen Lagerdurchmessers ist die spezifische Lagerbelastung für das Gleitlager unproblematisch. Realisierbar wären hierbei Werte von bis zu 80 N/mm² bei dynamischer und 250 N/mm² bei statischer Belastung. [17, S. 17]

5.1.4 Spiegeltragarm

Zur biegesteifen Verbindung von Spiegelmodulen und Torsionsrohren sollen Spiegeltragarme entwickelt werden. Hierbei werden mehrere dieser Arme pro Spiegelmodul verwendet. Die Anzahl wird hierfür vorläufig auf 6 Arme pro Modul festgelegt. Somit hat jeder Spiegeltragarm vereinfacht eine Länge des Spiegelmoduls von ca. 65 cm abzudecken. Die Verbindungspunkte zu den Torsionsrohren wie auch Spiegelmodulen werden torsionsfest ausgeführt.

Als Konstruktionselemente für den Aufbau der Stützstruktur des Kollektors stehen mehrere Profile für die Metallstreben zur Auswahl. Es gilt an dieser Stelle, zwischen den in Frage kommenden Varianten die Vielversprechendste auszuwählen. Dies geschieht unter Berücksichtigung einer Argumentationsbilanz (siehe Tabelle 10). In dieser werden die Eigenschaften jedes Lösungsansatzes in Vor- und Nachteile aufgegliedert und gegeneinander abgewogen, sodass eine erste Einschätzung oder hier eine Entscheidung für die folgende Konzeptionierung möglich ist. [11] Ein morphologischer Kasten ist an

dieser Stelle aufgrund der geringen Anzahl und Varianten der möglichen Lösungen nicht sinnvoll.

Tabelle 10: Argumentationstabelle für den Spiegeltragarm

Trägerprofil	Vorteile	Nachteile
L-Profil genietet 	<ul style="list-style-type: none"> - Einfacher Aufbau - Leicht zu fertigen - Vor Ort anpassbar - Kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ niedriges Flächenträgheitsmoment - Stark richtungsabhängiges Biege­wider­stands­moment
Rechteckhohlprofil gebogen 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohes Biege­wider­stands­moment - Keine Materialschwächung durch Schweißprozess 	<ul style="list-style-type: none"> - Freiform-Biegemaschinen notwendig - Schwierig zu transportieren
Rechteckprofil geschweißt 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohes Biege­wider­stands­moment - Prototypenbau vor Ort möglich - Vor Ort anpassbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Gefahr des Verzugs beim Schweißen - Materialschwächung durch Schweißprozess

Aufgrund der dominanten Kriterien der praktikablen Produktion und der Torsionssteifigkeit, die proportional zu einem großen Biege­wider­stands­moment ist, kommt als beste Variante ein Rechteckhohlrohr in Betracht. Der einfachste Querschnitt für einen solchen Tragarm ist ein im Freiform-Biegeverfahren umgeformtes Rechteckhohlprofil, welches dem Biegeradius des Spiegelmoduls genau folgt. Da hierfür jedoch spezielle Biegemaschinen notwendig sind, ist nach Möglichkeit ein anderes Verfahren zu bevorzugen, welches die Herstellung der Träger in ortsansässigen Metallfachbetrieben oder vor Ort ermöglicht. Hierdurch ist vor allem in der Prototypenphase eine einfache Fertigung auf dem Kraftwerksgelände realisierbar. Sollte der Wechsel zu einer

Serienfertigung in Betracht gezogen werden, so ist die Auswahl zu evaluieren und eventuell auf ein anderes Trägerprofil zu wechseln.

Durch Montage vor Ort auf dafür vorgesehenen Trassen werden die Schraubenlöcher am Produktionsort gebohrt. Dies ermöglicht eine weitere Vereinfachung der Fertigung und höhere Toleranzen. Für den Spiegeltragarm wird wie für die Flachwinkel, welche diesen mit dem Spiegel verbinden, als Material die Aluminiumlegierung EN AW-6060 T66 gewählt. Die Auflistung der zugehörigen Kennwerte erfolgt in Tabelle 11.

Tabelle 11: Materialkennwerte EN AW-6060 T66 [18]

Eigenschaft	Wert
E-Modul	$70.000 \frac{N}{mm^2}$
Dichte	$2700 \frac{kg}{m^3}$
Zugfestigkeit R_M	$215 \frac{N}{mm^2}$
Streckgrenze $R_{p0,2}$	$160 \frac{N}{mm^2}$
Querkontraktionszahl	0,33
Bruchdehnung	8 %

5.1.5 Spiegelmodul

Das Kernstück eines Parabolrinnenkollektors ist dessen Reflektor. Dieser bündelt die Direktstrahlung der Sonne und konzentriert sie auf den Absorber. Jede noch so differenzierte Blechbauweise kann hinsichtlich einer Eigengewichtsoptimierung durch das Verbundprinzip übertroffen werden. Der einfachste Aufbau besteht dabei in einer Kombination von leichten und festen Werkstoffen zu einem Verbundmaterial. [19, S. 235] Beim MS-Trough wird auf einen Dünnschichtspiegel als Reflektor zurückgegriffen. Dieser besteht aus einer Sandwichstruktur mit einer Deckschicht aus Borosilikatglas, einer Mittelschicht aus XPS-Schaum und einer Bodenplatte aus Aluminium (siehe Abbildung 36).

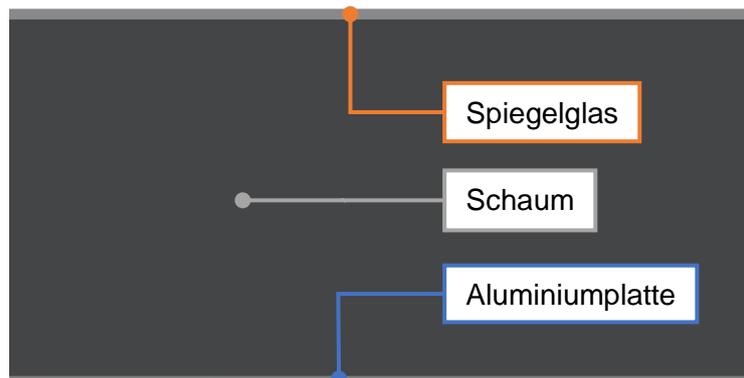


Abbildung 36: Aufbau eines Dünnschichtspiegels

Die Schichtdicken und Eigenschaften der Materialien sind in Tabelle 12 aufgelistet. Die Materialdaten stammen aus Datenblättern der Hersteller.

Tabelle 12: Eigenschaften der Spiegelmaterialien

Bezeichnung	Dicke [mm]	Material	E-Modul [N/mm ²]	Poisson- zahl	Dichte [kg/m ³]
Deckplatte	1	Schott Borofloat 33 [20]	64.000	0,2	2230
Mittelschicht	20	BASF Styrodur 3000CS [21]	20	0	30
Bodenplatte	0,6	Aluminium	70.000	0,34	2700

Die Platten sind untereinander verklebt. Ihr Kontakt wird auch in der Simulation als verklebt abgebildet.

5.1.6 Pylon

Der Pylon muss diverse Anforderungen erfüllen. So ist er in Länge und Breite möglichst kompakt zu bauen. Dies ist notwendig, um die Kollektorfläche nur auf einer geringen Länge zu unterbrechen. Die Breite ist ebenfalls begrenzt, da der maximale Anstellwinkel des Kollektors von ihr abhängt. Zur Weitergabe der Lasten an das Fundament müssen die Pylonen auf die Belastungen aus den Lastfällen ausgelegt werden. Für die Pylonen stellt Lastfall 3, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, die Maximalbelastung dar. Um eine möglichst kompakte und stabile Bauform zu erzielen, fiel die Entscheidung auf einen Doppel-T-Träger.

Die Randbedingungen für die Finite-Elemente-Analyse des Pylonen sind in Abbildung 37 abgebildet.

A: Pfosten
Statisch-mechanisch
Zeit: 1 s
25-03-2020 09:20

A Bolzenlast: 19318 N
B Verschiebung

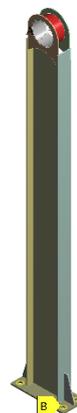


Abbildung 37: Randbedingungen auf den Pylonen

Die Bolzenlast ergibt sich aus der Windlast kombiniert mit der Gewichtskraft. Als Festlager dienen acht kreisförmige Bereiche am Fuß des Pylonen. Die Montage erfolgt dort mittels vier Betonanker oder Gewindestangen. Die resultierende Gesamtverformung ist in Abbildung 38 zu sehen.

Die Simulations-, Material- und Geometriedaten sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Eigenschaften des Pylonen

Höhe vom Lagermittelpunkt zum Boden	4000 mm
Lochabstand des Flansches	540 x 170 mm
Größe der Flanschschauben	M42
Art des I-Profiles	DIN I 400
Dicke der Platten	8 mm
Dicke des Flansches	20 mm
Material	S235JR
E-Modul	210.000 N/mm ²
Querkontraktionszahl	0,3
Knotenanzahl der Analyse	503418
Elementanzahl der Analyse	163242
Netzfeinheit	100 mm
Netzfeinheit Bodenplatte und Flansch	3 mm
Netzfeinheit Versteifung	5 mm
Elementansatz	quadratisch

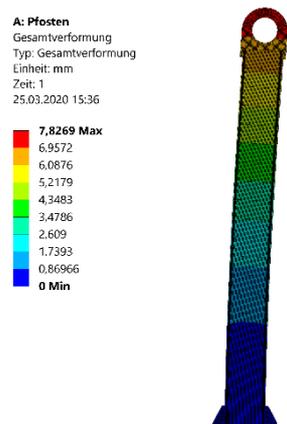


Abbildung 38: Gesamtverformung des Pylonen

Die größte Verformung beträgt 7,8 mm. Die dabei auftretenden Spannungen zeigt Abbildung 39. Es zeigen sich Singularitäten an den Kanten der Festeinspannungen (Abbildung 41).

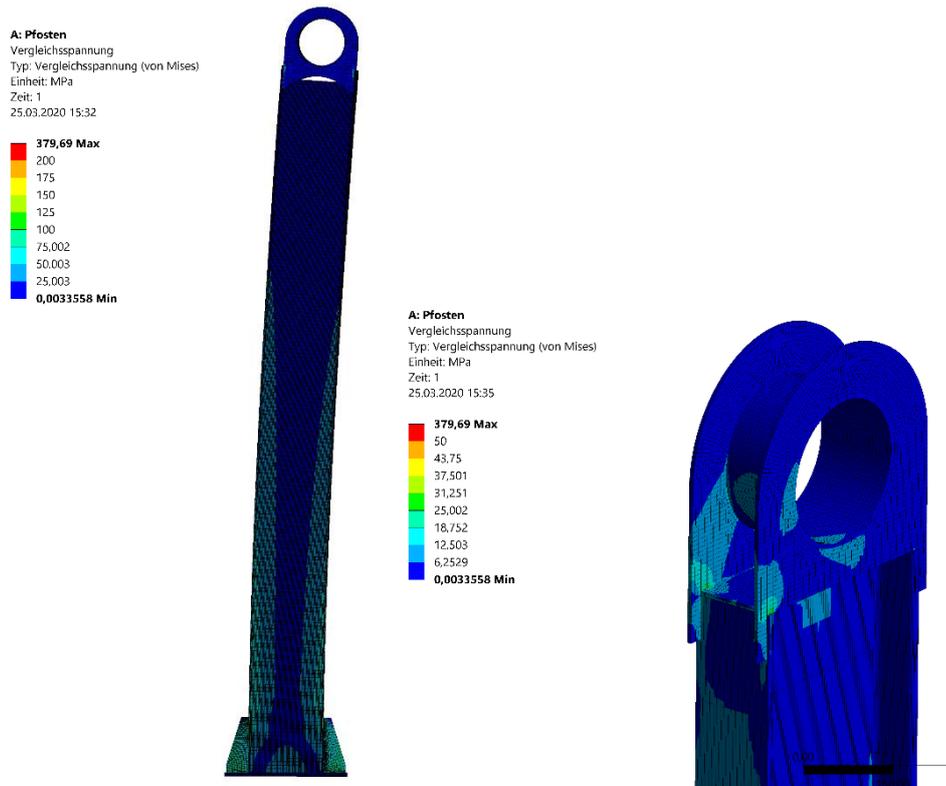


Abbildung 39: Vergleichsspannungen am Pylonen und an dessen oberen Ende

Abbildung 40 zeigt die Spannungsverteilung über den Querschnitt anhand eines Schnittbildes. Abseits der Singularitäten ist die maximale Spannung etwa bei 125 N/mm².

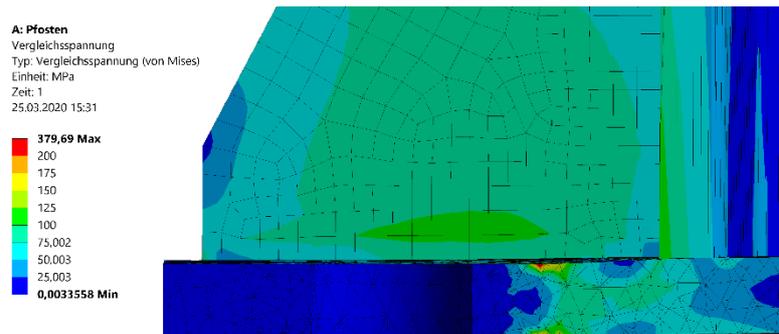


Abbildung 40: Vergleichsspannungen an der Bodenplatte des Pylonen – Schnittansicht

Abbildung 41 zeigt die Singularitäten an den Kanten der Randbedingungen, sowie an einem Bauteilübergang.

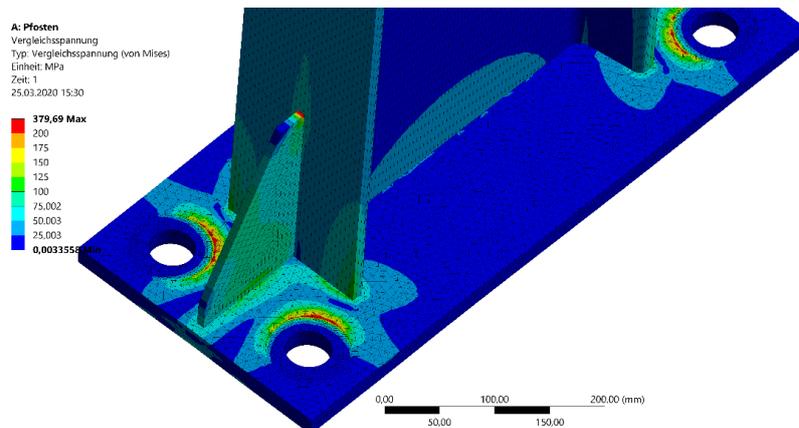


Abbildung 41: Vergleichsspannungen an der Bodenplatte des Pylonen

5.2 Berechnung des gesamten Kollektors

Die einzelnen Komponenten sind in Kapitel 0 bestmöglich ausgelegt worden. Da die Randbedingungen auf die Bauteile jedoch voneinander abhängig sind, kann die finale Berechnung der Komponenten nur im Gesamtsystem erfolgen. Dort können Abhängigkeiten der Bauteile untereinander berücksichtigt werden. Die Belastungsarten unterscheiden sich je nach Lastfall.

- Lastfall 1: Durch Eigengewicht induzierte Kraft in vertikaler Richtung
- Lastfall 2: Torsionsbelastung auf den Kollektor
- Lastfall 3: Durch Windkraft induzierte hohe Kraft in waagerechter und kleine Kraft in vertikaler Richtung.

5.2.1 Netzgenerierung

Ein wichtiger Bestandteil der Finite-Elemente-Analyse ist die Vernetzung der Bauteile. Generell ist es zielführend ein strukturiertes und möglichst feines Netz zu erstellen. Dies geschieht jedoch unter Berücksichtigung der notwendigen Netzfeinheit und zur Verfügung stehenden Rechenleistung. Die Basisdaten der Vernetzung werden in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14: Basisdaten der Vernetzung der Gesamtbaugruppe

Knoten	6975033
Elemente	3460774
Maximale Elementgröße	40mm
Elementansatzfunktion	quadratisch
Elementgröße an den Spiegeltragarmen	8 mm
Elementgröße an den Stirnträgern	12 mm
Elementgröße an den Torsionsrohren	30 mm
Elementgröße der Spiegelflächen	40 mm

Für verschiedene Flächen, Kanten und Bauteile wurde die maximale Elementgröße niedriger festgelegt (siehe Tabelle 14). Die mehrschichtigen Spiegelmodule sind großflächige Bauteile mit einer sehr geringen Dicke. Um diese ohne Verzerrung der Elemente abbilden zu können, bedarf es mit Volumenelementen einer sehr feinen Vernetzung. Aus diesem Grund wurden diese Bauteile mit Schalenelementen vernetzt. Abbildung 42 zeigt die vernetzte Baugruppe.

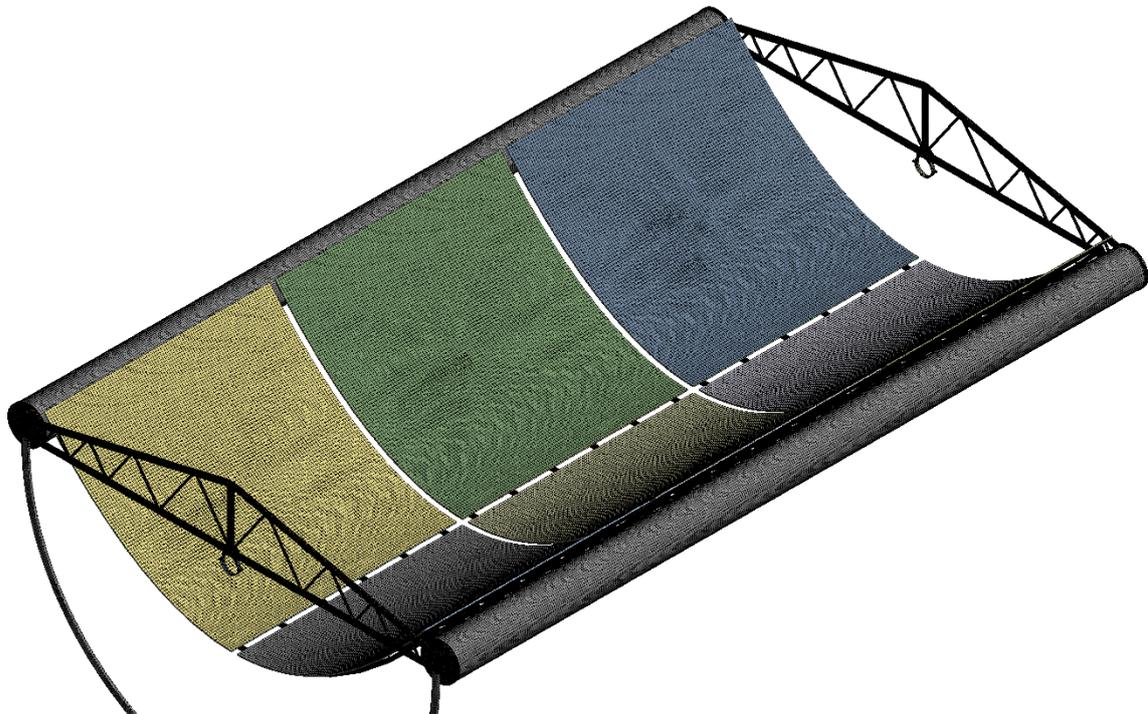


Abbildung 42: Netz für die Gesamtsimulation des Kollektormoduls

Abbildung 43 zeigt die Vernetzung der Spiegel mittels Flächenelementen. Hierzu werden Schalenelemente verwendet, welche von ANSYS automatisch aufgedickt dargestellt werden.

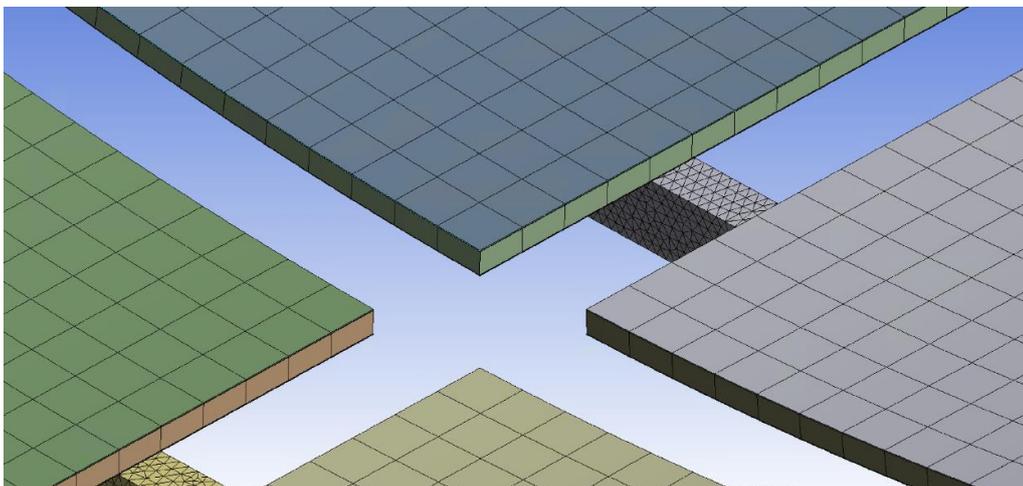


Abbildung 43: Vernetzung des Spiegels

5.2.2 Lastfall 1: Eigengewicht des Kollektors - Durchbiegung

Lastfall 1 beschreibt die Durchbiegung des Kollektormoduls bei Eigenbelastung (vergleiche Kapitel 4.2.1). Insgesamt sind zwei Fälle von Verschiebungen des Kollektors getrennt zu bewerten. Die Winkelstellung von 0 ° ist hierbei besonders wichtig, da sie wegen ähnlicher Winkel als Referenz für die Durchbiegung in Last dient.

1. Die Durchbiegung über die Länge des Kollektors
2. Die Durchbiegung am Stirnträger, welche den gesamten Kollektor versetzt.

5.2.2.1 Klärung der Randbedingungen

In Abbildung 44 sind die aufgegebenen Randbedingungen eingezeichnet. Das Modul ist an beiden Seiten auf der Lagerfläche reibungsfrei gelagert. Zusätzlich sind die Verschiebung und Rotation beim Festlager gesperrt. Auf das gesamte Kollektormodul wirkt die Erdanziehungskraft. Die Materialien der Komponenten haben die jeweilige Materialdichte hinterlegt.

E: Durchbiegung
 Durchbiegung
 Zeit: 0,22481 s
 25.03.2020 01:40

A Reibungsfreie Lagerung
B Reibungsfreie Lagerung 2
C Verschiebung
D Verschiebung 2
E Erdanziehungskraft: 9,8066 m/s²

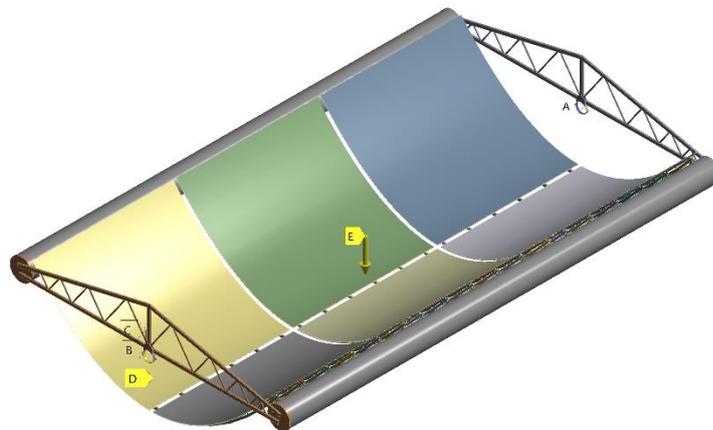


Abbildung 44: Randbedingungen auf das gesamte Kollektormodul bei Eigenlast

5.2.2.2 Auswertung der Berechnungsergebnisse

Die maximale Verformung des Kollektormoduls unter Eigenlast bei einem Winkel von 0 ° ist in Abbildung 45 dargestellt.

E: Durchbiegung
 Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Einheit: m
 Zeit: 1
 25.03.2020 01:43

0,0056218 Max
 0,0049972
 0,0043725
 0,0037479
 0,0031232
 0,0024986
 0,0018739
 0,0012493
 0,00062465
0 Min

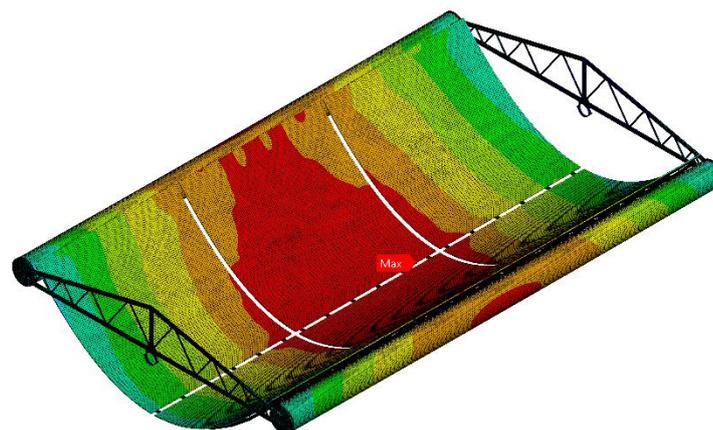


Abbildung 45: Verformung des gesamten Kollektormoduls bei Eigenlast

Die maximale Durchbiegung am Kollektor entsteht im Mittelpunkt der freitragenden Struktur. Die Torsionsrohre sind an den Aufnahmen um 2,2 mm verschoben. Die Steifigkeit der Stützrohre ist somit ausreichend. Die maximale Verschiebung der Torsionsrohre beträgt 5,6mm und die maximale Verschiebung an der Montagefläche der Spiegeltragarme 4,43 mm. Die durch die Durchbiegung bedingte Höhendifferenz zwischen der am geringsten und der am stärksten verschobenen Aufnahme eines Spiegeltragarms beträgt 2,2 mm. Der Vergleichskollektor „Eurotrough“ erzielt hier 1,8 mm. Die Verschiebung ist im Rahmen der Anforderung ähnliche Werte zum Eurotrough zu entwerfen als ausreichend einzustufen. In Abbildung 46 ist die vertikale Verschiebungskomponente nur für den Spiegel dargestellt.

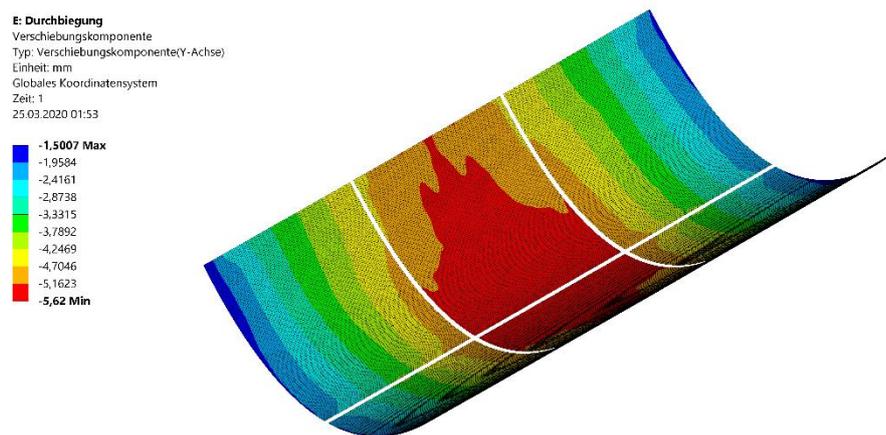


Abbildung 46: Vertikale Verschiebung der Spiegel bei Eigenlast

Der dort zu sehende Verlauf der Verschiebungskomponenten zeigt, dass sich die vier außen montierten Spiegel besonders in Axialrichtung neigen, während die mittleren Dünnschichtspiegel auch eine Verschiebung quer zum Kollektors aufweisen. Beide Effekte können durch eine angepasste Ausrichtung der Spiegel bei der Montage vermindert werden. Um eine qualitative Aussage über die Veränderung des Wirkungsgrades des Spiegels durch Verformung zu erstellen, sind weiterführende Raytracing-Analysen notwendig (Ausblick folgt in Kapitel 7). Die an der Aluminiumplatte des Spiegels auftretenden Spannungen sind in Abbildung 47 zu sehen.

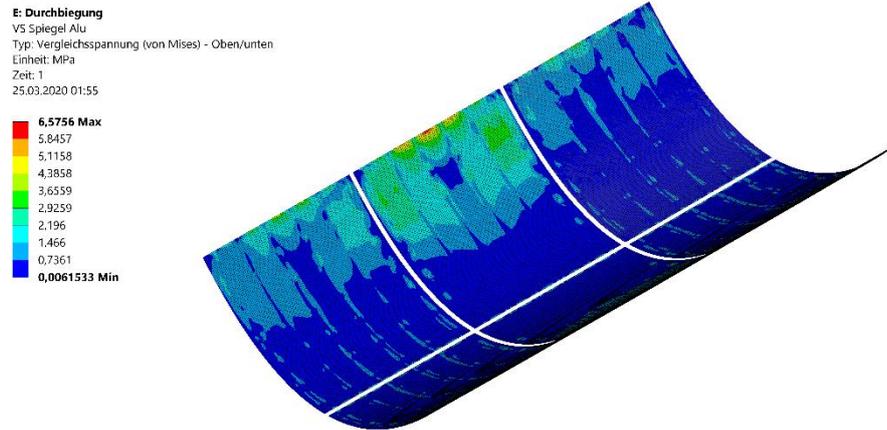


Abbildung 47: Vergleichsspannung an den Aluminiumblechen des Dünnschichtspiegels bei Lastfall 1

Sowohl die Spannungen an den Aluminiumblechen, als auch an den Haltern für die Spiegeltragarme, sowie an den Lagern (vergleiche jeweils Abbildung 48) sind bei diesem Lastfall unkritisch.

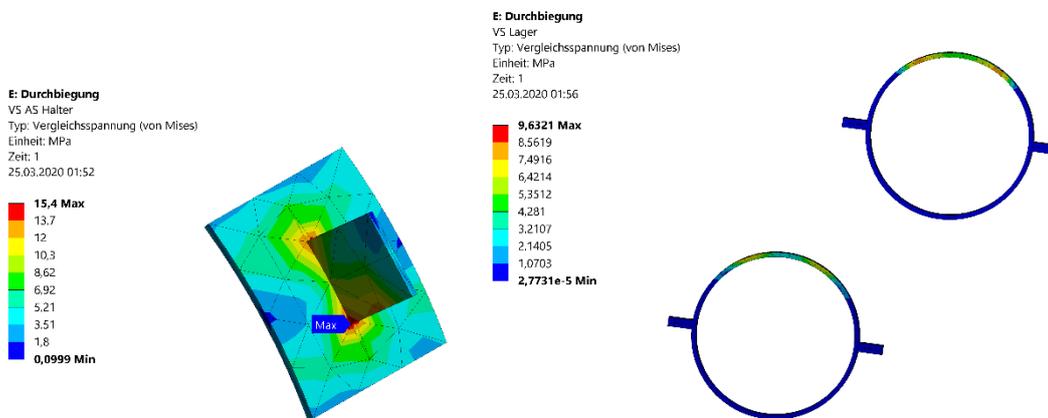


Abbildung 48: Maximale Spannungen an den Haltern für die Spiegeltragarme (links) und an den Lagern (rechts)

Die Spannungsverteilungen der Spiegelstreben und Stirnträger zeigen Abbildung 49 und Abbildung 50. Die maximalen Spannungen fallen mit $26,71 \text{ N/mm}^2$ respektive $46,12 \text{ N/mm}^2$ sehr gering aus. Die Spannungen in den Stirnträgern weichen über den gesamten Kollektor um weniger als 5 % ab.

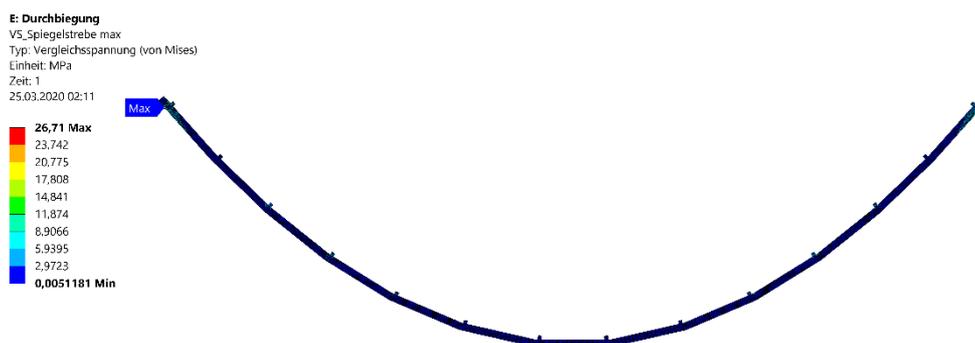


Abbildung 49: Spannungsverteilung der Spiegeltragarme bei Lastfall 1

Zur besseren Einordnung wird hier die Spannung über den gesamten Spiegeltragarm dargestellt. Die größten Spannungen treten an den Seiten auf.

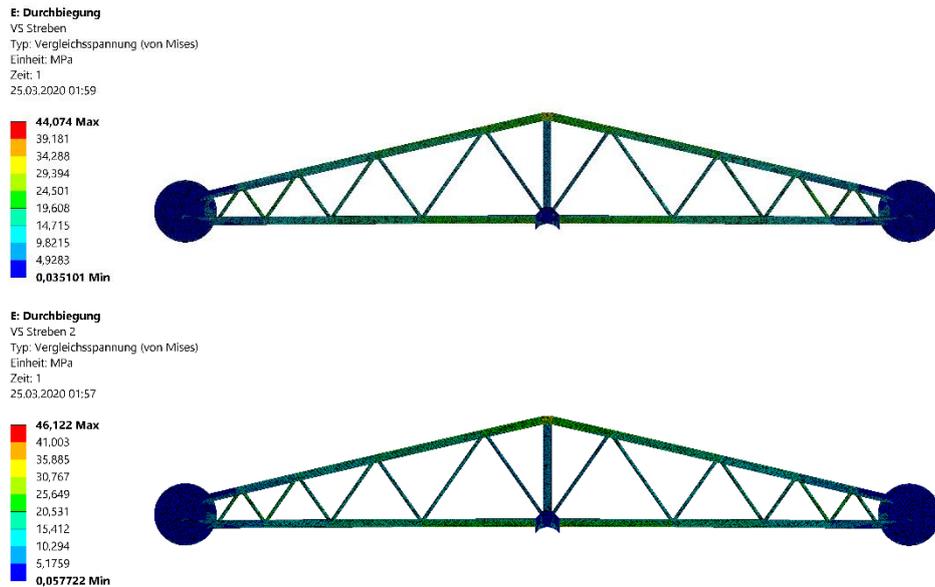


Abbildung 50: Spannungsverteilung an den Stirnträgern bei Lastfall 1

Die Spannungen an den Torsionsrohren werden in Abbildung 51 visualisiert. Die große maximale Spannungsdifferenz zwischen dem linken und rechten Torsionsrohr lässt sich mit einer Singularität erklären. Sie tritt an der Einspannung des Torsionsrohres im Stirnträger auf und lässt sich dadurch erklären. Die restlichen Spannungen schwanken in einem geringen Bereich. Dies entspricht der Erwartungshaltung an diese Analyse.

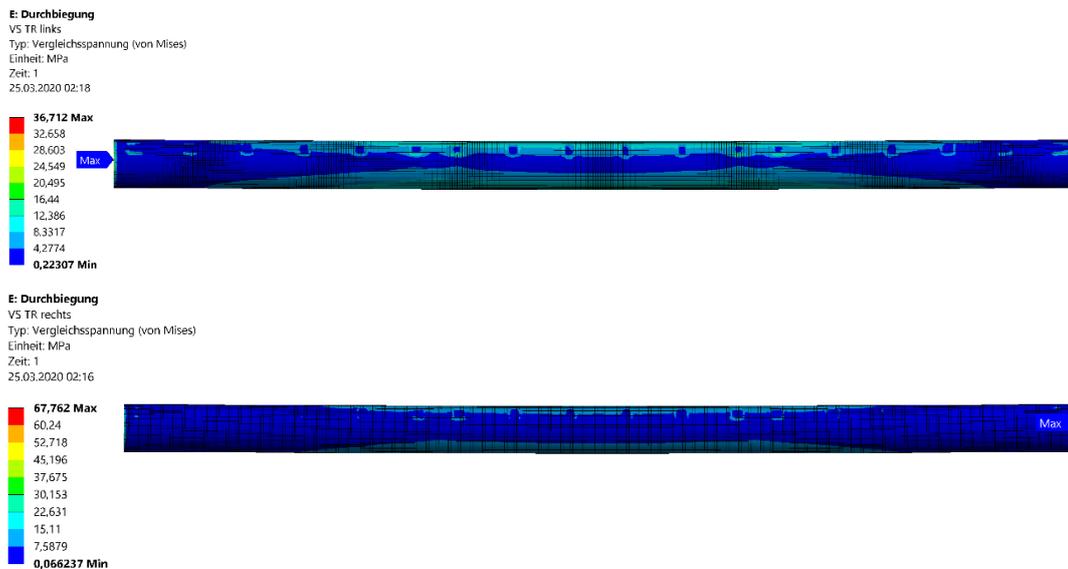


Abbildung 51: Spannungsverteilung an den Torsionsrohren bei Lastfall 1

Abbildung 52 zeigt die Spannungserhöhung am rechten Torsionsrohr im Detail. Dort ist eine deutliche Spannungserhöhung am Lastangriffspunkt durch die Verbindungsrandbedingung zu erkennen. Ein einzelner Knoten zeigt eine besonders hohe

Spannung. Aufgrund der Position und des Spannungsgradienten lässt sich hierbei auf eine Singularität schließen.

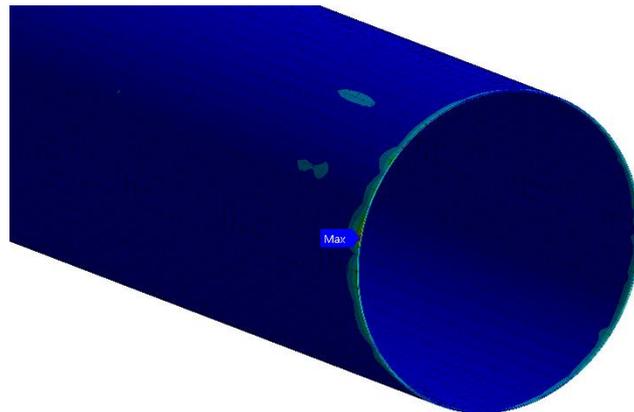


Abbildung 52: Singularität am rechten Torsionsrohr bei Lastfall 1

Bedingt durch die niedrigen Spannungen bei Lastfall 1 ist hier bei keinem Bauteil ein Festigkeitsnachweis vonnöten.

5.2.3 Lastfall 2: Eigengewicht des Kollektors - Lagerreibung

Lange Kollektoren haben das Problem, dass bei ihrer Drehung ein hohes Torsionsmoment und infolgedessen eine hohe Torsion im Kollektor entstehen kann. Es ist eine Torsion des Kollektormoduls zu erwarten, welche möglichst gering ausfallen soll.

5.2.3.1 Klärung der Randbedingungen

In Lastfall 2 werden auf das mittige Kollektormodul die Kräfte durch sein eigenes Gewicht, sowie die Widerstandskräfte der angeschlossenen Komponenten aufgegeben. Für die Berechnung wird von sieben weiteren Kollektormodulen ausgegangen. Daraus ergibt sich die Gesamtlänge des Kollektors von 180 m.

$$\begin{aligned}
 M_{\text{Schwerkraft}} &= G \cdot S \cdot x_{\text{Schwerpunkt}} \\
 &= m_{\text{Kollektorabschnitt}} \cdot S \cdot g \cdot x_{\text{SP}} \\
 &= 3732,83 \text{ kg} \cdot 1,1 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\
 &\quad \cdot (-25,46 \text{ mm}) = -1025,56 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Durch die Schwerkraft und den außermittigen Schwerpunkt des Kollektormoduls bedingtes Drehmoment

$$\begin{aligned}
 M_{\text{Widerstand}} &= F_{\text{Reib}} \cdot R_{\text{Lager}} = F_{\text{Kollektor}} \cdot \mu_{\text{Lager}} \cdot R_{\text{Lager}} \\
 &= 29,49 \text{ kN} \cdot 0,25 \cdot \frac{273,1 \text{ mm}}{2} \\
 &= 1021,46 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Widerstandsmoment durch Lagerreibung

$$\begin{aligned}
 F_{\text{Last}} &= K \cdot \frac{M_{\text{Widerstand}} + M_{\text{Schwerkraft}}}{b} \\
 &= 7 \cdot \frac{1025,56 \text{ Nm} + 1021,46 \text{ Nm}}{3600 \text{ mm}} \\
 &= 3980 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Aufbringung an den Verbindungspunkten mit den weiteren Kollektormodulen

Diese Kraft wird auf die zwei Verbindungspunkte zu den weiteren Kollektoren an beiden Torsionsrohren verteilt. Hinzu kommt das Widerstandsmoment des ersten Kollektors nach dem Lager, aufgetragen als Moment zur Hälfte am rechten Lager. Die Randbedingungen werden in Abbildung 53 dargestellt.

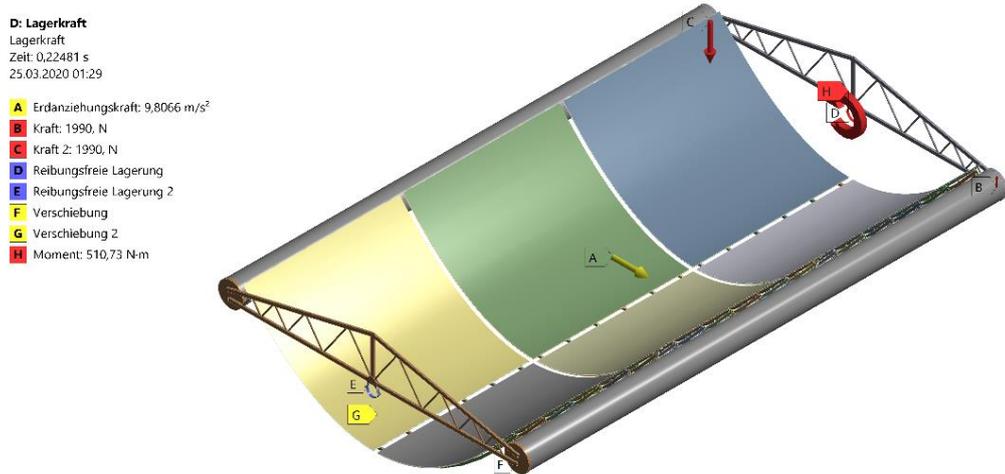


Abbildung 53: Randbedingungen auf ein Kollektormodul bei Lastfall 2

5.2.3.2 Auswertung der Berechnungsergebnisse

Abbildung 54 zeigt die Gesamtverschiebung am Kollektor. Hierbei ist besonders die maximale Verschiebung von Interesse.

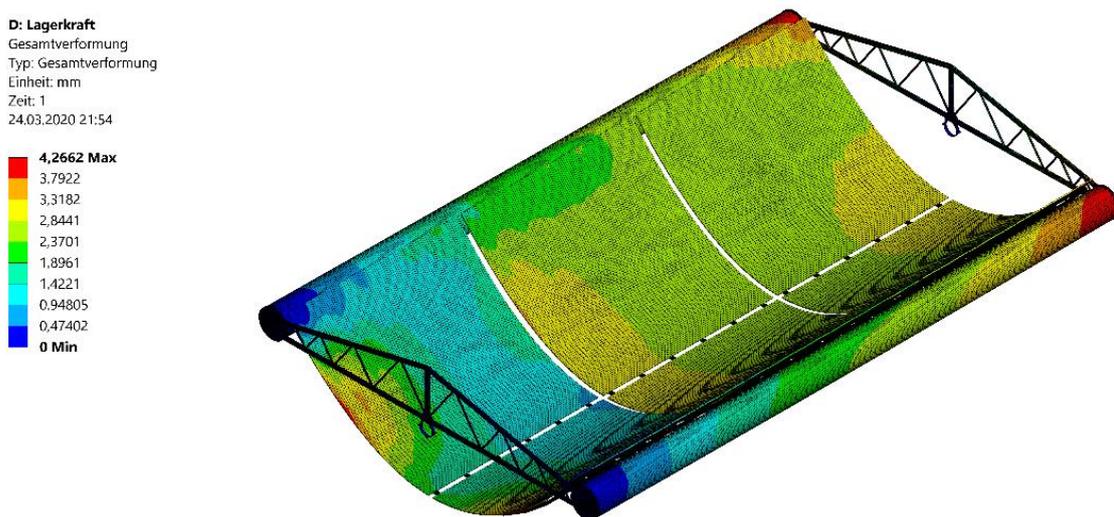


Abbildung 54: Gesamtverformung des Kollektormoduls bei Lastfall 2

Die Verschiebung am Mittelpunkt der Aufhängung der Torsionsrohre beträgt 4,26 mm. Mit einer Entfernung von 3600 mm von der Drehachse ergibt sich bei 8 Modulen eine maximale Winkeländerung von 0,54 °. Die Torsion fällt somit sehr gering aus. Die ermittelten Bauteilspannungen für das Kollektormodul sind im Vergleich zu Lastfall 3 relativ gering, weshalb hier kein Festigkeitsnachweis erforderlich ist. Dieser wird bei den höheren Spannungen in Lastfall 3 durchgeführt. Die Spannungen für den Kollektor in Lastfall 2 werden in Abbildung 55 gezeigt.

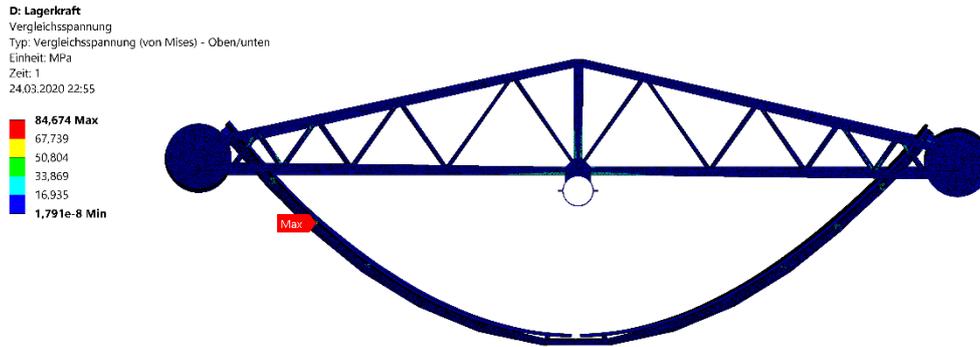


Abbildung 55: Spannungen an den Kollektormodulen für Lastfall 3

Für diesen Lastfall treten die größten Spannungen im Winkeleisen auf, vergleiche Abbildung 56. Bei diesem wird in Abschnitt 5.3.2 ein Nachweis für eine höhere Vergleichsspannung erbracht.

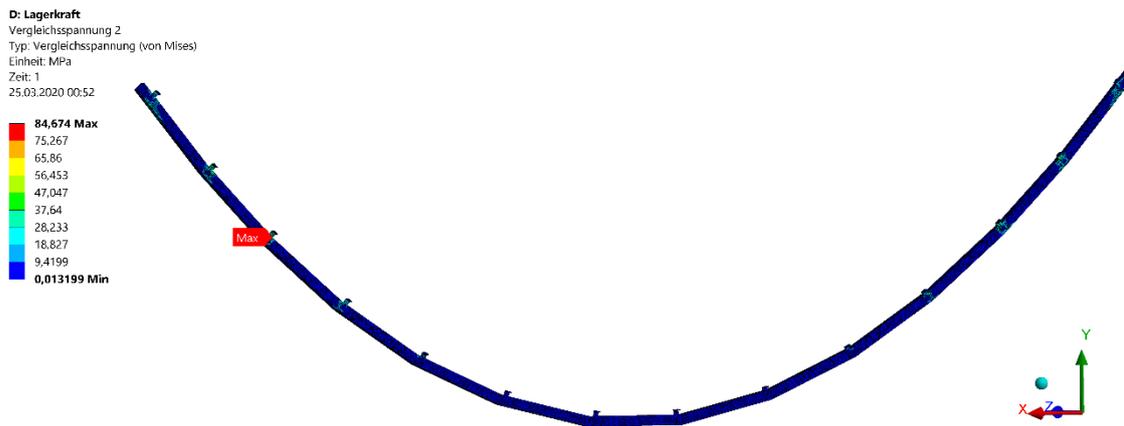


Abbildung 56: Vergleichsspannungen am Spiegeltragarm für Lastfall 2

In den Stirnträgern sind 50,49 N/mm² die maximal erreichte Vergleichsspannung (siehe Abbildung 57).

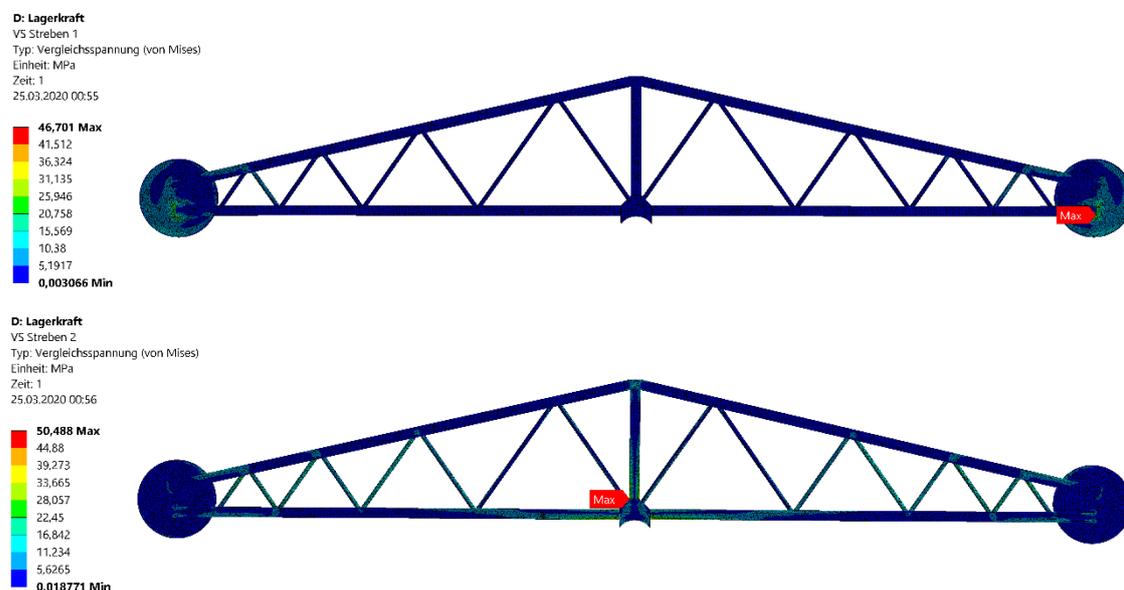


Abbildung 57: Vergleichsspannungen an den Stirnträgern für Lastfall 2

Der eingespannte Träger erfährt diese Spannungen an den Aufnahmen für die Torsionsrohre, während sie beim freien Träger insbesondere mittig auftreten. Die Auswirkungen auf die Torsionsrohre sind in Abbildung 58 abgebildet.

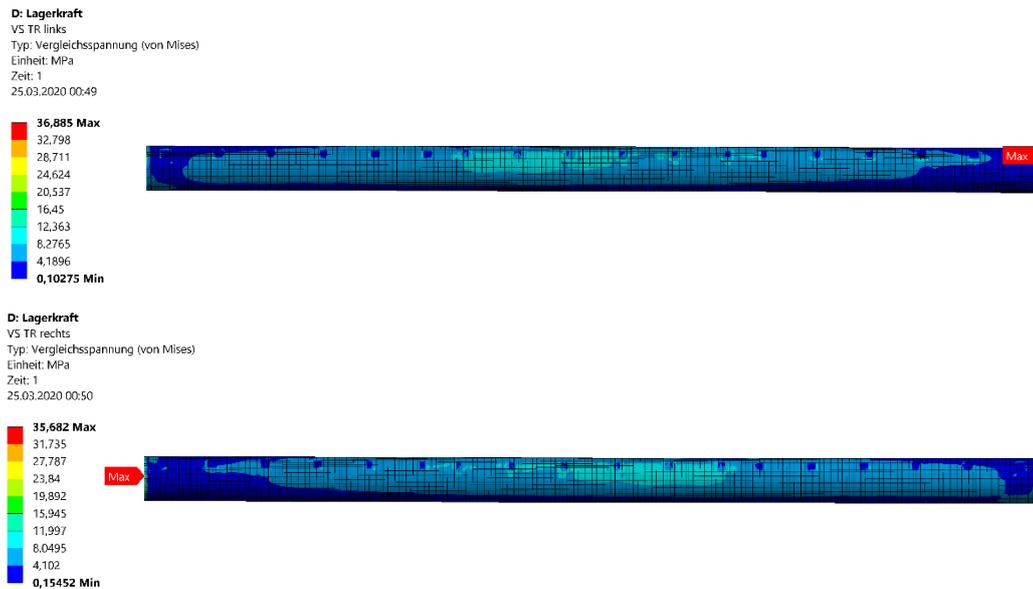


Abbildung 58: Vergleichsspannungen an den Torsionsrohren für Lastfall 2

Die Spannungen treten dort insbesondere auf halber Länge des Rohres auf. Abschließend lässt sich zu Lastfall 2 sagen, dass die Spannungen und der resultierende Winkel durch Torsion des Kollektors sehr gering ausfallen. Dies bedeutet, dass eine Kollektorlänge von mehr als 180 m mit einem Drehantrieb möglich wird.

5.2.4 Lastfall 3: Windlast

Die größten Anforderungen an die Komponenten stellt die Windlast. Lastfall 3 beschäftigt sich mit der Simulation des Kollektormoduls unter den Randbedingungen der Windlast.

5.2.4.1 Klärung der Randbedingungen

Um die Windlast abbilden zu können, muss der Kollektor gegen Rotation gesichert werden. Hierzu wird ein Ersatzkörper definiert, der einen ähnlichen Kräfteingriffspunkt aufweist wie die Streben der Dreheinrichtung, welche jedoch keinen Teil der Arbeit darstellen.

$$E \cdot A = \frac{F}{\varepsilon} = \frac{F}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{1000 \text{ N}}{\frac{24,662}{3750}} = 152000 \text{ kN} \quad \text{Steifigkeit}$$

$$c = \frac{F}{\Delta L} = \frac{1000 \text{ N}}{24,662 \text{ mm}} = 40,55 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad \text{Federkonstante}$$

Die Kräfte und deren Wirkung sind in Abbildung 59 sichtbar. Die Windkräfte werden über die Aluminiumflächen der Spiegel, sowie die Flächen der Torsionsrohre aufgegeben.

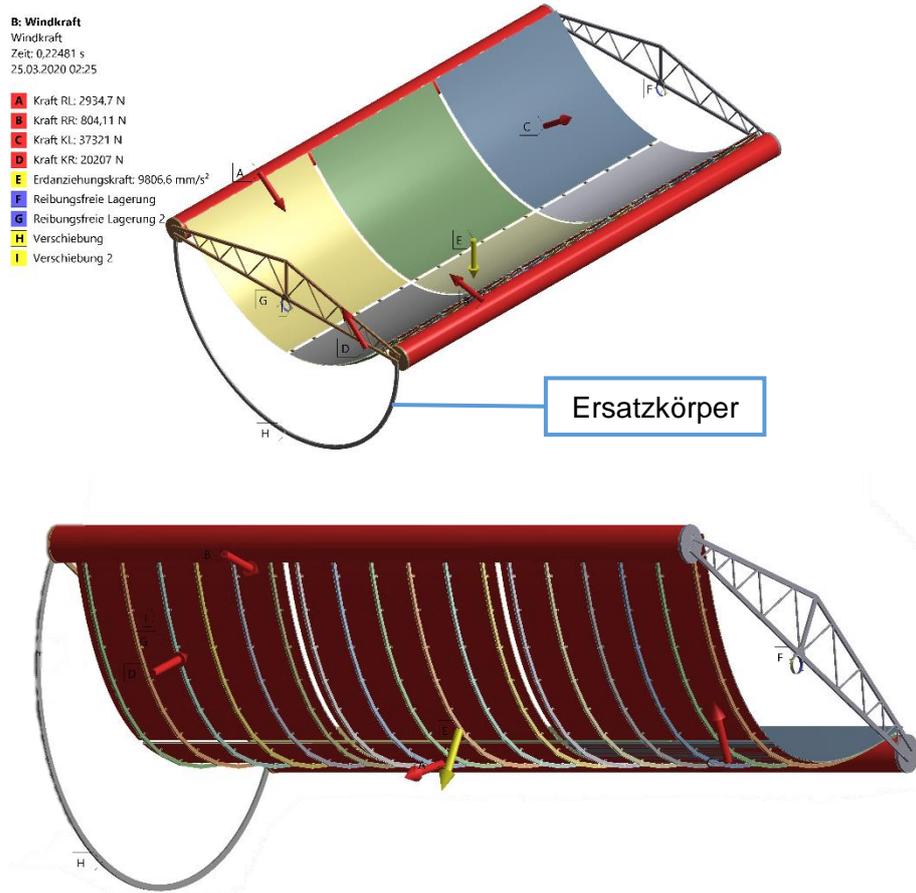


Abbildung 59: Randbedingungen bei der Berechnung der Windlast

5.2.4.2 Auswertung der Berechnungsergebnisse

In diesem Unterkapitel werden die Simulationen des MS-Trough unter Einwirkung der Windlast berechnet und die Spannungen in den Bauteilen ausgewertet. Auf deren Basis wird im Anschluss ein Festigkeitsnachweis geführt. Auch wird die Gesamtverformung des Kollektormoduls simuliert und in Abbildung 60 ausgewertet.

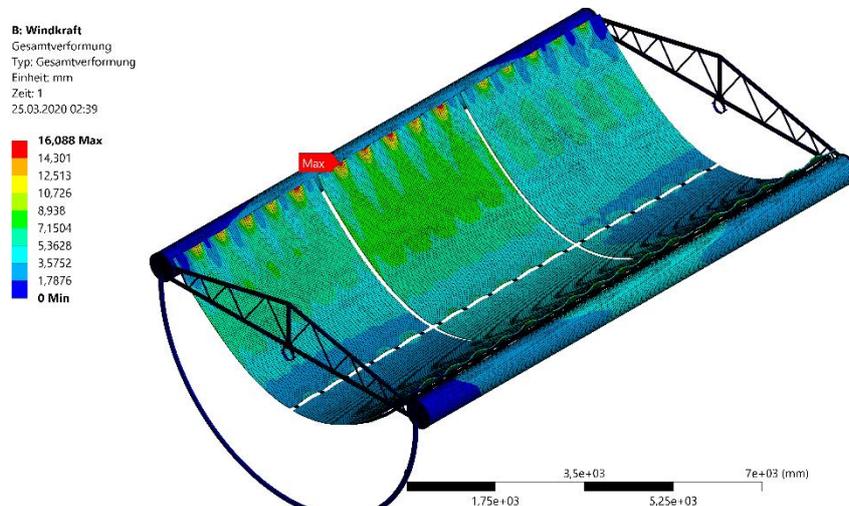


Abbildung 60: Gesamtverformung des MS-Trough bei Windlast

Die Punkte mit den maximalen Verformungen befinden sich an den freien Außenkanten der Spiegelmodule. Die größte Verformung beträgt 16 mm. Die auftretenden Spannungen sind in Abbildung 61 dargestellt.

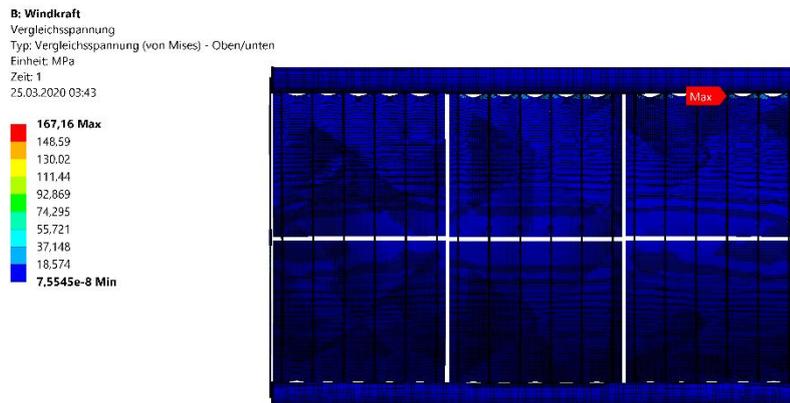


Abbildung 61: Vergleichsspannung des MS-Trough bei Windlast

Analog zu den Bereichen mit der stärksten Verformung ist eine Erhöhung der Spannungen an den Außenkanten der Spiegel sichtbar. Die größten Spannungen in Höhe von 111,41 N/mm² treten an den Flachwinkeln auf, welche die Spiegelmodule mit den Spiegeltragarmen verbinden.

Stirnträger

Die Stirnträger werden aufgrund ihrer Lage und damit der unterschiedlichen Lastangriffspunkte unterschiedlich belastet. Es wird ein Festigkeitsnachweis für die höchste auftretende Spannung durchgeführt. Bei der ersten Querstrebe liegt die maximale Spannung nahe am Lager (Abbildung 62) und beträgt 45,8 N/mm².

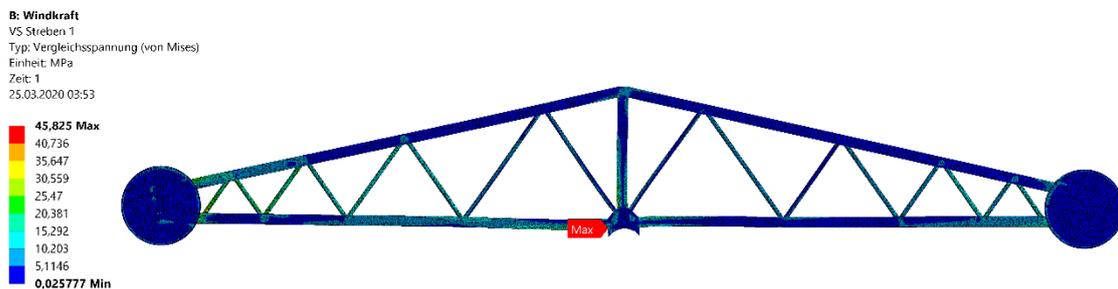


Abbildung 62: Spannungen am Stirnträger 1 unter Windlast

Die Maximalspannung am zweiten Stirnträger ist mit 65,41 N/mm² deutlich höher als die am ersten (vergleiche Abbildung 63).

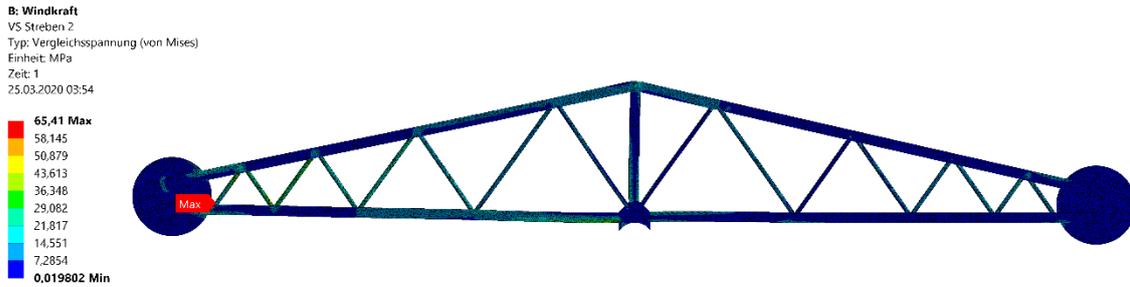


Abbildung 63: Spannungen am Stirträger 2 unter Windlast

Torsionsrohr

Bei den Torsionsrohren liegen die Beträge der maximalen Spannungen zwar erneut sehr nah beisammen, sie unterscheiden sich jedoch örtlich voneinander. (siehe Abbildung 64)

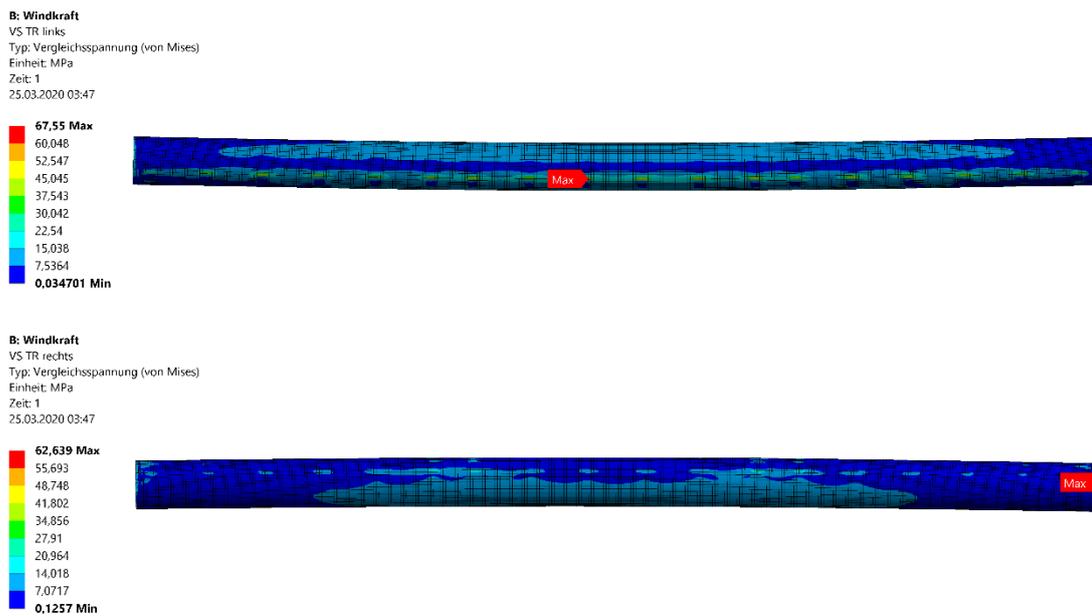


Abbildung 64: Vergleichsspannungen der Torsionsrohre bei Lastfall 3

Lager

Die maximale Spannung in den Lagerschalen beträgt 16 N/mm^2 (siehe Abbildung 65). Sie sind als unkritisch zu bewerten, weshalb ein Festigkeitsnachweis nicht notwendig ist.

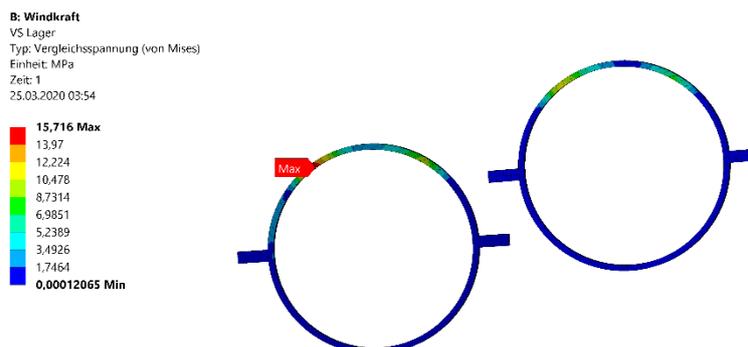


Abbildung 65: Vergleichsspannungen der Lager bei Lastfall 3

Torsionsrohrhalter

Der Torsionsrohrhalter befindet sich auf dem spannungskritischen Pfad, ist jedoch nicht als am kritischsten einzuordnen. So ist die Spannung im Flachwinkel, der zum Spiegeltragarm gehört, deutlich höher.

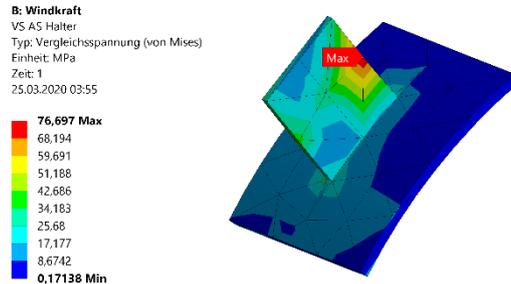


Abbildung 66: Vergleichsspannung am Torsionsrohrhalter bei Lastfall 3

Spiegeltragarm

Der Spiegeltragarm liegt ebenfalls auf dem spannungskritischen Pfad. Da dort die größten Spannungen auftreten, ist er zu berechnen. Die Abbildung 67 zeigt die spannungskritischen Stellen an diesem Bauteil.

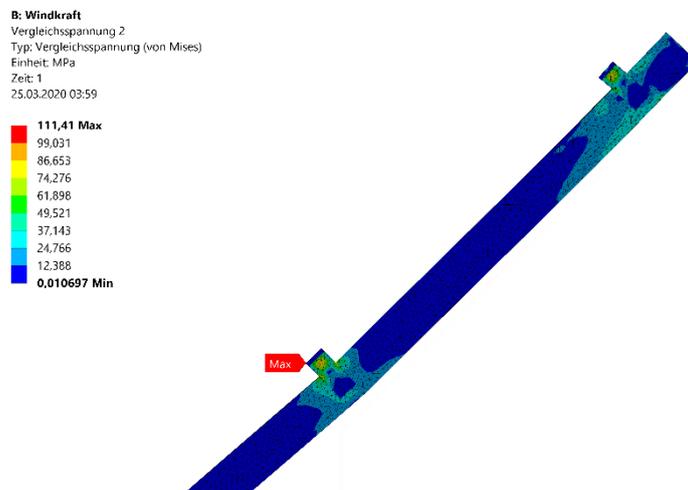


Abbildung 67: Vergleichsspannung an den Spiegelträgermodulen inklusive Flachwinkeln - Detailansicht

Spiegelmodul

Zur Überprüfung der Spannungen im Spiegel wird die Aluminiumplatte, welche dessen Rückseite bildet, herangezogen und die anderen Schichten vernachlässigt (siehe Abbildung 68).

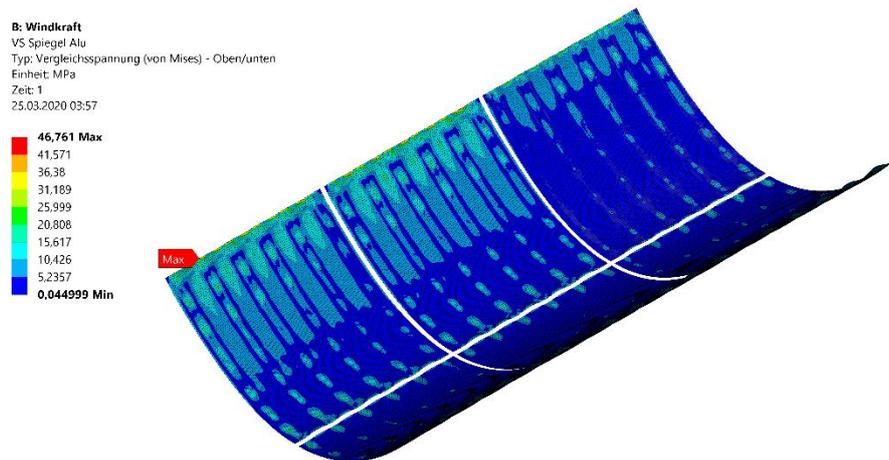


Abbildung 68: Vergleichsspannungen an der Aluminiumschicht des Spiegels bei Lastfall 3

Die Spannungen in der Aluminiumplatte sind mit maximal 46,76 N/mm² unkritisch. Daher ist eine Festigkeitsanalyse für den Entwurf nicht notwendig.

5.3 Festigkeitsnachweise

„In Festigkeitsnachweisen werden üblicherweise zwei Größen miteinander verglichen: vorhandene Beanspruchung und zulässige Beanspruchung bzw. vorhandene Belastung und zulässige Belastung“ schreibt Wächter et. al. [16, S. 20] Als Grundlage der Festigkeitsnachweise in dieser Arbeit dient die FKM-Richtlinie [16]. Diese stellt ein allgemeines Verfahren zur Berechnung der Festigkeit von Bauteilen im Maschinenbau dar. Eine Auslegung erfordert grundsätzlich einen Nachweis der Festigkeit aller Komponenten. Exemplarisch folgt hier der Festigkeitsnachweis für je eine Schweißnaht, den Grundwerkstoff, eine Klebeverbindung und eine Schraubverbindung.

In Abbildung 69 sind die Stellen am Kollektor markiert, für die ein Festigkeitsnachweis für den Entwurf erforderlich ist. Um die Anzahl der notwendigen Festigkeitsnachweise zu reduzieren, wird der spannungskritische Pfad beachtet. Ebenfalls werden diese nur für die größten auftretenden Lasten durchgeführt. Alle Verweise auf Tabellen beziehen sich auf Decker. [12]

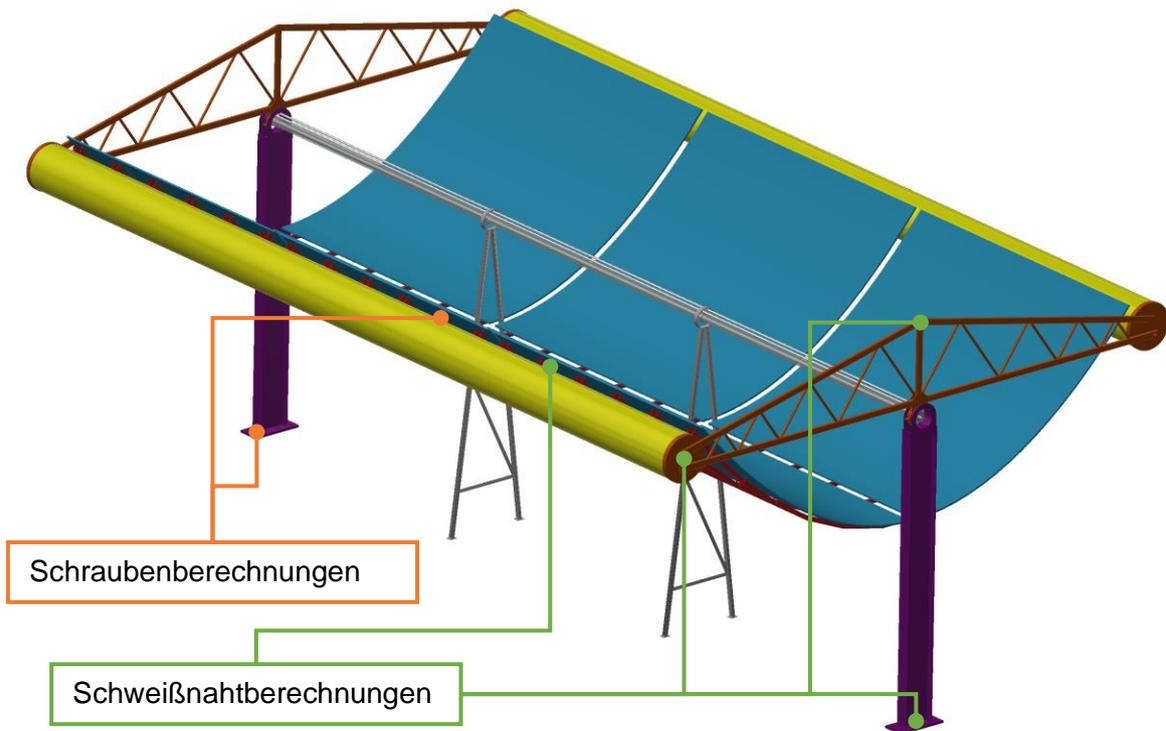


Abbildung 69: Zu prüfende Bereiche am Kollektor

5.3.1 Stirnträger

Beim Stirnträger ist ein Festigkeitsnachweis für die Schweißnaht in Abbildung 70 durchzuführen. Hier treten keine nennenswerten Torsionskräfte auf, die Schweißnaht wird auf Zug und Scherung beansprucht. Die Berechnung der Schweißnaht erfolgt nach Decker. [12] Die Abmaße der Schweißnaht können ebenfalls Abbildung 70 entnommen werden.

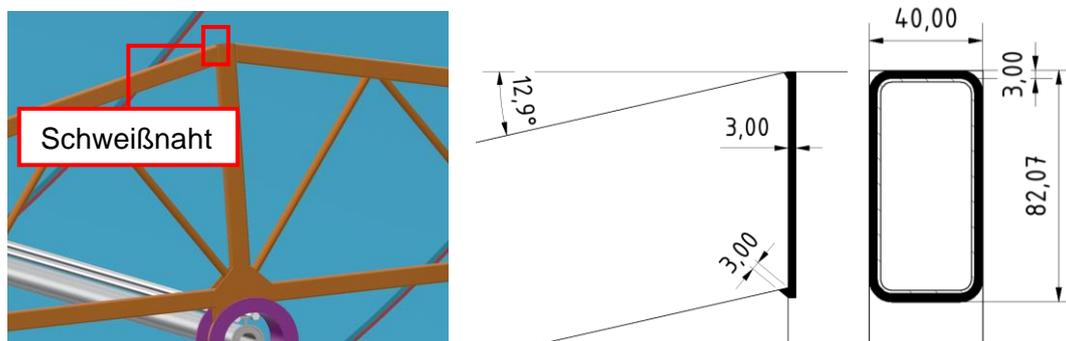


Abbildung 70: Position der berechneten Schweißnaht (links) und deren Abmaße (rechts)

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Normalspannungen gleichmäßig über die Schweißnahtflächen verteilen. Die Kraft auf die Schweißnaht wird mittels des Gestellanalyse-Tools in Autodesk Inventor bestimmt. Dieses ermöglicht die Definition von Randbedingungen analog zu FEM-Programmen ohne die Notwendigkeit einer detaillierten Vernetzung. Die Spannung in Richtung des Rohres beträgt 47059 N. Mittels Kosinus- und Sinussätzen lassen sich daraus die Zugkräfte, sowie die Querkräfte auf die Schweißnaht

berechnen. Das ebenfalls auftretende Moment ist sehr gering und kann vernachlässigt werden.

1. Arbeitsschritt

$$F_{zug} = F_{ges} \cdot \cos (12,9^\circ) = 47059 \text{ N} \cdot \cos (12,9^\circ) \quad \text{Zugkraft}$$

$$= 45871,3 \text{ N}$$

$$F_{quer} = F_{ges} \cdot \sin (12,9^\circ) = 47059 \text{ N} \cdot \sin (12,9^\circ) \quad \text{Querkraft}$$

$$= 10505,9 \text{ N}$$

$$t_{min} = t_{max} = 4 \text{ mm} \quad \text{Wandstärke der Bauteile}$$

$$2 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_{min} = 2,8 \text{ mm} \quad \text{Kehlnahtdicke nach Decker [12]}$$

$$a \geq \sqrt{t_{max}} - 0,5 = 1,5 \text{ mm} \quad \text{Eine Nahtdicke von 3mm ist bei}$$

$$\rightarrow a = 3 \text{ mm} \quad \text{Handschiweißung die ausführbare Mindestdicke [22]}$$

$$A_w = \sum(a \cdot l) \approx 720 \text{ mm}^2 \quad \text{Wirksame Kehlnahtfläche}$$

$$\tau_w = \frac{F}{A_w} = \frac{10506 \text{ N}}{720 \text{ mm}^2} = 14,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Schubspannung}$$

$$\sigma_w = \frac{F}{A_w} = \frac{45871 \text{ N}}{720 \text{ mm}^2} = 63,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Normalspannung}$$

$$\sigma_{wv} = \sqrt{\sigma_w^2 + \tau_w^2} = \sqrt{\left(63,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)^2 + \left(14,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)^2} \quad \text{Vergleichsspannung nach}$$

$$= 65,35 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Eurocode 3 [23]}$$

2. Arbeitsschritt

$$R_m = K_{d,m} \cdot K_A \cdot R_{m,N} = 0,9 \cdot 340 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 306 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Werkstoffkennwerte}$$

$$R_p = K_{d,p} \cdot K_A \cdot R_{p,N} = 0,9 \cdot 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 211,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Tab. 1.2 [12]}$$

$$d_{eff} = 8 \text{ mm} \leq d_{eff,N,m} = 40 \text{ mm} \quad \text{Technologischer}$$

$$\rightarrow K_{d,m} = K_{d,p} = 1 \quad \text{Größeneinflussfaktor}$$

$$R_{m,N} (3 \text{ mm} \leq d \leq 100 \text{ mm}) = 340 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Anisotropiefaktor } K_A$$

$$\rightarrow K_A = 0,90 \quad \text{Tab. 3.10 [12]}$$

Arbeitsschritt 3

$$n_{pl} = \min \left(\sqrt{E \cdot \frac{\varepsilon_{etr}}{R_p \cdot p_w}}; K_p \right) = \min(7,05; 1,27)$$

$$= 1,27$$

Konstruktionskennwerte
Tab. 3.29 [12]

$$\varepsilon_{etr} = 0,05$$

Arbeitsschritt 4

$$\sigma_{SK,W} = R_p \cdot n_{pl} \cdot \alpha_w = 255,17 \text{ N/mm}^2$$

Statische Bauteilfestigkeit

Arbeitsschritt 5

$$j_{ges} = j_s \left[j_z \cdot \max \left(\frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right) + \Delta j \right] = j_s \cdot j_z \cdot \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}$$

$$= 1 \left[1 \cdot \frac{2}{1} \cdot 0,69 \right] = 1,38$$

Geforderte Sicherheit

Tab. 3.12 [12]

Die restlichen Anteile entfallen, da $\frac{R_p}{R_m} = 0,69$ und keine hohen Temperaturen vorliegen

Arbeitsschritt 6

$$a_{SK} = \frac{\sigma_{VW}}{\sigma_{SK,W} / j_{ges}} = 0,33$$

Auslastungsgrad

Die Spannungen in der Schweißnaht sind somit geringer als die zulässigen Spannungen. Die Schweißnaht hält.

Berechnung der statischen Festigkeit des Stirnträgers

Auch wird die Bauteilfestigkeit bei der maximal auftretenden Spannung überprüft (siehe Abbildung 63). Es wird ein statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen für nicht geschweißte Bauteile gemäß FKM-Richtlinie durchgeführt. Die Werkstoffkennwerte und Faktoren werden Decker [12] entnommen.

1. Arbeitsschritt

$$\sigma_{vorh} = 65,41 \frac{N}{mm^2}$$

Vergleichsspannung

$$\sigma_1 = 5,03 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma_2 = -11,47 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma_3 = -67,05 \frac{N}{mm^2}$$

Hauptspannungen

$$h = \frac{\sigma_H}{\sigma_v} = -\frac{24,5}{65,41} = -0,37$$

Mehrachsigkeit

2. Arbeitsschritt

$$R_m = K_{d,m} \cdot K_A \cdot R_{m,N} = 0,9 \cdot 340 \frac{N}{mm^2} = 306 \frac{N}{mm^2}$$

Werkstoffkennwerte

$$R_p = K_{d,p} \cdot K_A \cdot R_{p,N} = 0,9 \cdot 235 \frac{N}{mm^2} = 211,5 \frac{N}{mm^2}$$

Tab. 1.2 [12]

$$d_{eff} = 8 \text{ mm} \leq d_{eff,N,m} = 40 \text{ mm}$$

Technologischer

$$\rightarrow K_{d,m} = K_{d,p} = 1$$

Größeneinflussfaktor

$$R_{m,N} (3 \text{ mm} \leq d \leq 100 \text{ mm}) = 340 \text{ N/mm}^2$$

Anisotropiefaktor K_A

$$\rightarrow K_A = 0,90$$

Tab. 3.10 [12]

Arbeitsschritt 3

$$n_{pl} = \text{MIN} \left(\sqrt{E \cdot \frac{\varepsilon_{etr}}{R_p \cdot p_w}}; K_p \right) = \text{MIN}(7,05; 1,27) = 1,27$$

Konstruktionskennwerte

$$\varepsilon_{etr} = 0,05$$

Arbeitsschritt 4

$$\sigma_{SK} = R_p \cdot n_{pl} = 268,6 \text{ N/mm}^2$$

Statische Bauteilfestigkeit

Arbeitsschritt 5

$$j_{ges} = j_s \left[j_z \cdot \text{MAX} \left(\frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right) + \Delta j \right] = j_s \cdot j_z \cdot \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m} = 1 \left[1 \cdot \frac{2}{1} \cdot 0,69 \right] = 1,38$$

Geforderte Sicherheit

Tab. 3.12 [12]

Die restlichen Anteile entfallen, da $\frac{R_p}{R_m} = 0,69$ und keine hohen

Temperaturen vorliegen

Arbeitsschritt 6

$$a_{SK} = \frac{\sigma_v}{\sigma_{SK}/j_{ges}} = 0,34$$

Auslastungsgrad

5.3.2 Aufnahme des Parabolspiegels

Die Aufnahme des Parabolspiegels enthält zwei Verbindungen auf dem kritischen Lastpfad, deren Haltbarkeit nachgewiesen werden muss. Abbildung 71 zeigt den Flachwinkel, der den Reflektor mit dem Spiegeltragarm verbindet. Er wird mittels einer Schraubverbindung mit dem Spiegeltragarm und mittels einer Klebeverbindung mit dem Spiegel verbunden.

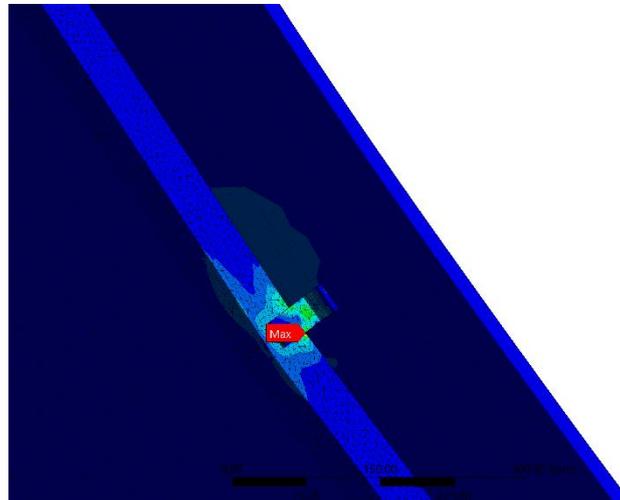


Abbildung 71: Aufnahme des Parabolspiegels durch einen Flachwinkel

Abbildung 72 zeigt die für die Berechnung notwendige maximale Vergleichsspannung in den Flachwinkeln. Die Spannungsverteilung über den Querschnitt des Flachwinkels ist relativ konstant.

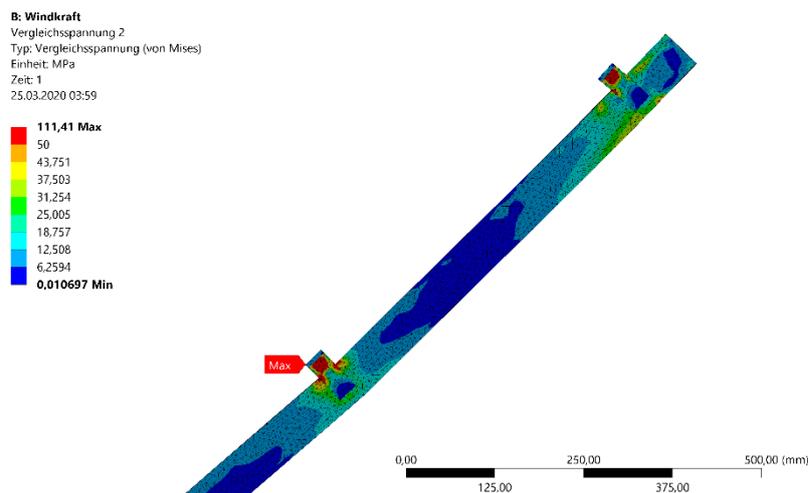


Abbildung 72: Maximalspannungen an den Flachwinkeln

Berechnung der statischen Festigkeit des Flachwinkels

Der Flachwinkel wird aus der Legierung EN AW-6060 T66 gefertigt. Die Werkstoffkennwerte sind Tabelle 11 zu entnehmen. Der Nachweis der statischen Festigkeit geschieht am Ort der Maximalspannung.

1. Arbeitsschritt

$$\sigma_{vorh} = 111,4 \frac{N}{mm^2}$$

Vergleichsspannung

$$\sigma_1 = 120 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma_2 = 12,3 \frac{N}{mm^2} \quad \sigma_3 = 7,94 \frac{N}{mm^2}$$

Hauptspannungen

$$h = \frac{\sigma_H}{\sigma_v} = -\frac{46,76}{111,4} = 0,42$$

Mehrachsigkeit

2. Arbeitsschritt

$$R_m = K_{d,m} \cdot K_A \cdot R_{m,N} = 0,95 \cdot 215 \frac{N}{mm^2} = 204,25 \frac{N}{mm^2}$$

Werkstoffkennwerte
Tab. 1.2 [12]

$$R_p = K_{d,p} \cdot K_A \cdot R_{p,N} = 0,95 \cdot 160 \frac{N}{mm^2} = 152 \frac{N}{mm^2}$$

$$K_{d,m} = K_{d,p} = 1$$

Technologischer
Größeneinflussfaktor
Anisotropiefaktor K_A
Tab. 3.10 [12]

$$R_{m,N} = 215 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow K_A = 0,95$$

Arbeitsschritt 3

$$n_{pl} = \text{MIN} \left(\sqrt{\frac{E \cdot \varepsilon_{etr}}{R_p}}; K_p \right) = \text{MIN}(4,8; 1,5) = 1,5$$

Konstruktionskennwerte

$$\varepsilon_{etr} = 0,05$$

K_p für rechteckige Querschnitte

Arbeitsschritt 4

$$\sigma_{SK} = R_p \cdot n_{pl} = 228$$

Bauteilfestigkeit

Arbeitsschritt 5

$$j_{ges} = j_s \left[j_z \cdot \text{MAX} \left(\frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right) + \Delta j \right] = j_s \cdot j_z \cdot \frac{j_m}{K_{T,m}} \cdot \frac{R_p}{R_m} = 1 \left[1 \cdot \frac{2}{1} \cdot 0,69 \right] = 1,41$$

Geforderte Sicherheit

Tab. 3.12 [12]

Die restlichen Anteile entfallen, da $\frac{R_p}{R_m} = 0,71$ und keine hohen Temperaturen vorliegen

Arbeitsschritt 6

$$a_{SK} = \frac{\sigma_v}{\sigma_{SK}/j_{ges}} = 0,69$$

Auslastungsgrad

Berechnung der Klebverbindung

Die Klebverbindung zwischen Flachwinkeln und Spiegelmodulen wird mittels des Klebefilms Cyanmid FM 1000 [12] hergestellt. Es wird ein Vergleich der Haltbarkeit durchgeführt. Hierzu wird die Abscherkraft der Klebeschicht mit der Zugbruchkraft des Bauteils verglichen.

$$F_{kB} = A_k \cdot \tau_{kB} \approx S \cdot R_m = F_B$$

$$F_{kB} = 900 \text{ mm}^2 \cdot 48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 43,2 \text{ kN}$$

Überprüfen der Zugfestigkeit und Vergleich mit dem Bauteil

$$F_B = S \cdot R_m = 180 \text{ mm}^2 \cdot 215 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 38,7 \text{ kN}$$

Beide Kräfte unterscheiden sich um ca. 10%, somit kann davon ausgegangen werden, dass die Klebverbindung dieselbe Haltbarkeit wie der Grundwerkstoff aufweist.

Berechnung der Schraubverbindung

Es wird die Schraubverbindung von Spiegeltragarm zum Winkeleisen nach Decker berechnet [12]. Es werden Durchsteckschrauben nach DIN EN 24014 der Festigkeitsklasse 5.8 verwendet.

1. Erforderliche Vorspannkraft bestimmen

$$S_H = \frac{\mu \cdot F_V \cdot m}{F_Q}$$

Haftsicherheit

Reibwert aus [24]

$$F_{V,M} = \frac{S_H \cdot F_Q}{\mu \cdot m} = \frac{1,3 \cdot 296 \text{ N}}{0,21 \cdot 1} = 1830 \text{ N}$$

Erforderliche Vorspannkraft

2. Wahl der Schraubengröße und der Festigkeitsklasse

$$F_{K,erf} = F_{V,M} + F_Z = 2830 \text{ N}$$

Der Vorspannkraftverlust wird auf 1000 N abgeschätzt

$$A_{S,erf} \geq \frac{\alpha_A \cdot F_{K,erf}}{0,6 \cdot R_p} = \frac{4 \cdot 2830 \text{ N}}{0,6 \cdot 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 47 \text{ mm}^2$$

Erforderlicher

Spannungsquerschnitt für das Anziehen von Hand

Tab. 10.6 [12]

→ Schraubengröße M10 erforderlich

Es gelten $F_A = 9625 \text{ N}$ und $M_A = 38,75 \text{ Nm}$

Als Schraubenanziehmoment kann $M_A \approx 30 \text{ Nm}$ vorgeschrieben werden, sodass $F_M = 9,6 \text{ kN} \cdot \frac{30}{38,75} = 7,45 \text{ kN}$ gilt. Eine Kontrolle auf Setzen erübrigt sich.

$\mu_G = \mu_K = 0,2$

3. Kontrolle

$$\begin{aligned}
 A_p &= \frac{(D_K^2 - D_{IK}^2)\pi}{4} - 2 \cdot D_K \frac{D_K - D_{IK}}{2} \\
 &= \frac{(14,6^2 - 12^2)\text{mm} \pi}{4} - 2 \cdot 19 \text{mm}^2 \\
 &= 16,36 \text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Pressfläche Tab. 10.4 [12]
(Langloch)

$$p_B = \frac{F_{V,max}}{A_p} = \frac{F_M - F_Z}{A_p} = \frac{6,45 \text{ kN}}{16,36 \text{ mm}^2} = 394 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Flächenpressung

Diese übersteigt die zulässige Flächenpressung von $p_{B,zul} \approx 250 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$, weshalb eine Scheibe untergelegt werden muss.

6. Vorstellung und Bewertung des Gesamtsystems

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Modul des Parabolrinnenkollektor MS-Trough (siehe Abbildung 73) entworfen und konstruiert worden. Der kritische Spannungspfad ist mit einer statischen Festigkeitsanalyse berechnet worden.



Abbildung 73: Renderdarstellung eines MS-Trough-Moduls

Die technischen Daten eines Kollektormoduls können Tabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 15: Daten eines Kollektormoduls für den MS-Trough

Modullänge	12080 mm
Gesamtbreite	7776 mm
Masse inkl. 2 Pylonen	3436 kg
Abstand der Mittelpunkte der Absorberrohre	7160 mm
Spiegelfläche	91,77 m ²
Aperturweite	6580 mm
Fokallänge	1360 mm

Der Produktentwicklungszyklus hat sich an Pahl/Beitz orientiert. Alle Forderungen nach der Anforderungsliste werden erfüllt. Die Drehachse des Kollektors fällt mit dessen Fokallinie und somit der Position des Absorberrohres zusammen. Der Schwerpunkt des Kollektors liegt leicht versetzt neben der Drehachse. Hier besteht weiteres Optimierungspotential durch geschickte Gewichtsverlagerung oder das Hinzufügen von Ausgleichsgewichten. Mögliche Positionen für Gegengewichte befinden sich in oder auf den Torsionsrohren. An dieser Stelle verschatten sie die Spiegel nicht. Den Anforderungen nach einer leichten Fertigung und Montage wird dadurch entsprochen, dass mit Ausnahme der Torsionsrohre alle Bauteile vor Ort fertigbar sind. Dies ist möglich durch die breite Verwendung von Schweißkonstruktionen. Die Aufnahmen der Spiegel sind mit einem relativ großen Verstellbereich ausgeführt. Somit können auch eventuelle Ungenauigkeiten durch Einflussfaktoren wie Schweißverzug einfach ausgeglichen werden.

Das System ist auf Windgeschwindigkeiten bis 90 km/h ausgelegt und hält diesen gemäß durchgeführter Simulationen stand. Entsprechende Sicherheiten sind hierbei einberechnet (siehe Kapitel 4.2.3.3). Die Komponenten oberhalb der Spiegel sind dabei möglichst schlank konstruiert, um die Verschattung zu minimieren.

Die Lagerung des Kollektormoduls auf dem Pylon ist mittels Gleitlager realisiert, welches hierfür zweiteilig aufgebaut ist. Bedingt durch eine Durchführung für das Absorberrohr inklusive dessen Gleitschiene zur Ausdehnungskompensation besitzt es einen sehr großen Durchmesser.

Die Werte für die erlaubte Verformung im Ruhezustand des Kollektors sind ebenfalls eingehalten. Als Referenz wurde hierzu der Eurotrough-Kollektor angenommen. Um eine Aussage über das reale optische Verhalten des MS-Trough treffen zu können, sind jedoch Raytracing-Simulationen (vergleiche Kapitel 7) oder Messungen an einem realen Aufbau notwendig.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz neuer Thermofluiden in Parabolrinnenkraftwerken erfordert es, die Kollektoren an deren Anforderungen anzupassen. Die Zielsetzung der Masterarbeit ist es, einen Parabolrinnenkollektor mit der Bezeichnung MS-Trough zu entwerfen, der durch ein ortsfestes Absorberrohr speziell an die Anforderungen von Flüssigsalz als Übertragungsmedium angepasst ist.

Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, sind zunächst Grundlagen zur solarthermischen Stromerzeugung und speziell zu Parabolrinnenkollektoren erarbeitet worden. Außerdem sind bestehende Kollektoren analysiert und Anforderungen an den neuen Kollektor in einer Anforderungsliste vermerkt worden.

Um den Forderungen einer begrenzten Biegung und Torsion sowie der Widerstandsfähigkeit gegen eine Mindestwindgeschwindigkeit gerecht zu werden, sind drei korrespondierende Lastfälle gebildet worden.

Anhand dieser konnten die einzelnen Komponenten entworfen und im Anschluss einer Analyse mittels Finite-Elemente-Methoden unterzogen werden.

Im Anschluss an diese Masterarbeit soll die Entwicklung des MS-Trough weiterverfolgt und auf vorhandenen Ergebnissen aufgebaut werden. Für das weitere Vorgehen sind zusätzliche Optimierungen sowie eine Untersuchung der Witterungseinflüsse auf den Kollektor denkbar. Sobald eine Serienfertigung des Kollektors relevant wird und somit eine größere Bauteilanzahl nachgefragt wird, können andere Herstellungsprozesse rentabler werden und die Module hierfür angepasst werden. Bei einer Serienfertigung sind alle Komponenten aus Baustahl zu verzinken. Bei Feststehen des gesamten Produktions- und Montageablauf ist eine Überprüfung der Komponenten auf auftretende Kräfte bei Fertigung, Transport und Montage notwendig. Auch sind vor einer Produktion weitere Festigkeitsanalysen notwendig, da für den Entwurf nur der spannungskritische Pfad berücksichtigt wurde.

Um das System genauer an die geforderten Anforderungen anpassen zu können, sind praktische Tests zur Windbelastung notwendig. Ebenso sind Raytracing-Analysen empfehlenswert, um Aussagen zum Wirkungsgrad unter mäßigen Windgeschwindigkeiten treffen zu können. Mittels dieser Analysen kann der Verlauf von Sonnenstrahlung dargestellt und eine Einschätzung bezüglich der Fokussierung der Spiegel getroffen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Kaltschmitt, W. Streicher und A. Wiese, Hg., *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*, 5. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [2] H. Watter, *Regenerative Energiesysteme: Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme*, 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [3] V. Wesselak, T. Schabbach, T. Link und J. Fischer, *Handbuch Regenerative Energietechnik*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [4] R. Stieglitz und V. Heinzl, *Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [5] D. Kearney *et al.*, „Assessment of a Molten Salt Heat Transfer Fluid in a Parabolic Trough Solar Field“, *Journal of Solar Energy Engineering*, Jg. 125, Nr. 2, S. 170–176, 2003, doi: 10.1115/1.1565087.
- [6] M. Eickhoff, M. Meyer-Grünefeldt und L. Keller, „New operating strategies for molten salt in line focusing solar fields - Daily drainage and solar receiver preheating“ in *SolarPACES*, Cape Town, South Africa, 2016, doi: 10.1063/1.4949154.
- [7] D. Kearney *et al.*, „Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field“, *Energy*, Jg. 29, 5-6, S. 861–870, 2004, doi: 10.1016/S0360-5442(03)00191-9.
- [8] E. Lüpfert *et al.*, „EuroTrough Design Issues and Prototype Testing at PSA“ in *Solar engineering 2001: Proceedings of the International Solar Energy Conference ; presented at the 2001 International Solar Energy Conference, a part of Forum 2001 - Solar energy: the power to choose, April 21 - 25, 2001, Washington, D.C, 2001*, S. 387–391, doi: 10.1115/SED2001-149.
- [9] Dipl.-Ing. Mathias Schlosser, „Forschungsbericht Parabolrinnenkollektorentwicklung: Entwicklung eines kostengünstigen Parabolrinnenkollektors und Zusammenschaltung mit Anlagen der dezentralen Strom- und Kälteerzeugung“, Technische Universität Baunschweig, Apr. 2014.
- [10] Martin Eickhoff, „Beschreibung des MS-Trough“, Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt e.V., 2019.
- [11] J. Feldhusen und K.-H. Grote, Hg., *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [12] K.-H. Decker *et al.*, *Decker Maschinenelemente: Funktion, Gestaltung und Berechnung*, 20. Aufl. München: Hanser, 2018.

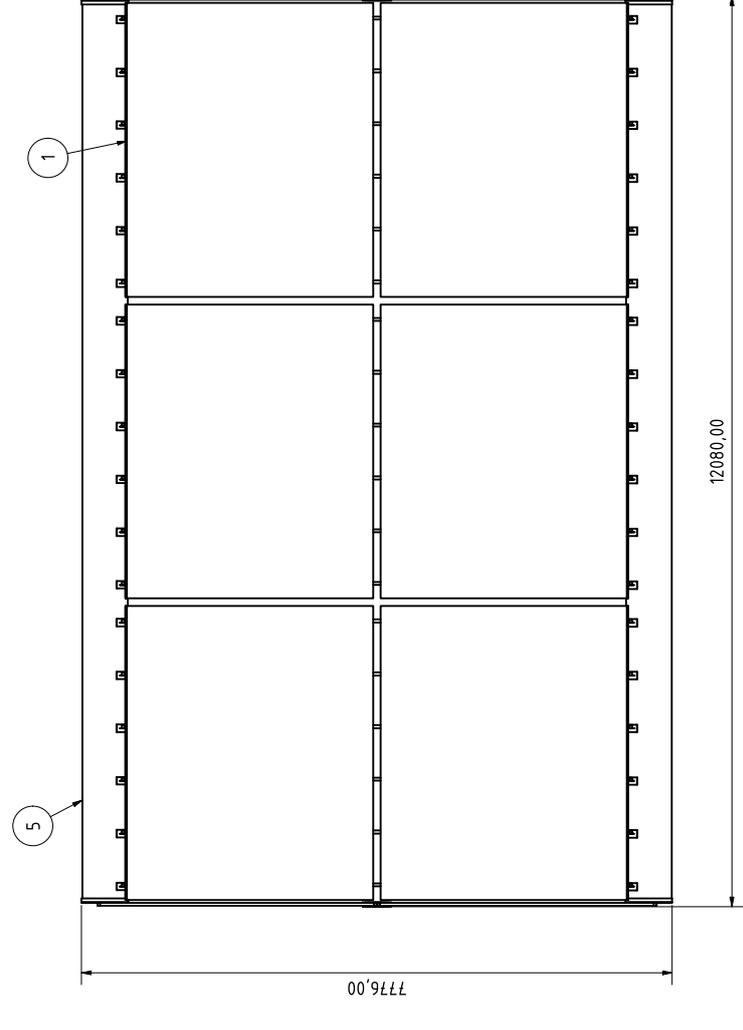
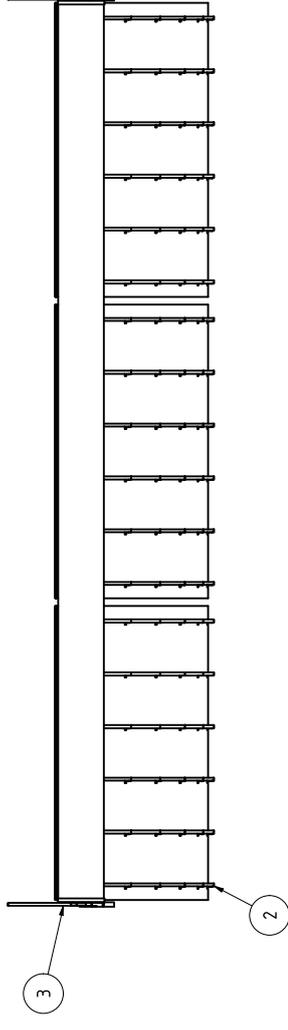
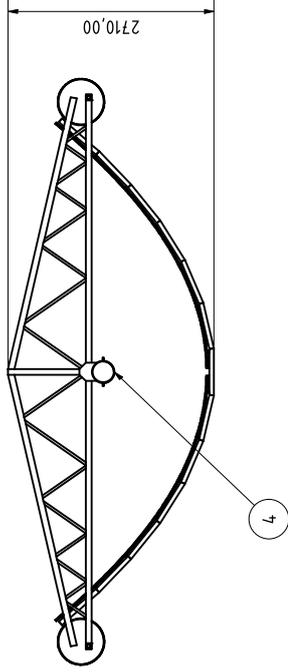
- [13] N. Naeeni und M. Yaghoubi, „Analysis of wind flow around a parabolic collector (1) fluid flow“, *Renewable Energy*, Jg. 32, Nr. 11, S. 1898–1916, 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.10.004.
- [14] J. Spurk und N. Aksel, *Strömungslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [15] *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*, DIN EN 1991-1-4, 2010.
- [16] M. Wächter, C. Müller und A. Esderts, *Angewandter Festigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [17] SKF, *SKF Gleitlager*. Zugriff am: 19. Februar 2020.
- [18] *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile - Teil 2: Mechanische Eigenschaften; Deutsche Fassung*, DIN EN 755-2, 2016.
- [19] B. Klein und T. Gänsicke, *Leichtbau-Konstruktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [20] Schott, Hg., „BOROFLAT Borosilikatglas“, 21. Aug. 2015.
- [21] BASF, Hg., „Technische Daten Styrodur“, 21. Feb. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.styrodur.de/portal/streamer?fid=1223538>. Zugriff am: 24. März 2020.
- [22] H. Wittel, D. Jannasch, J. Voßiek und C. Spura, *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*, 23. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [23] D. Ungermann, R. Puthli, T. Ummenhofer, K. Weynand und E. Preckwinkel, *Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Band 2 : Anschlüsse : DIN EN 1993-1-8 mit Nationalem Anhang : Kommentar und Beispiele*, 1. Aufl. Berlin, Wien, Zürich, Berlin: Beuth; Ernst & Sohn, 2015.
- [24] *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen*, VDI 2230, 2015.

Anhang

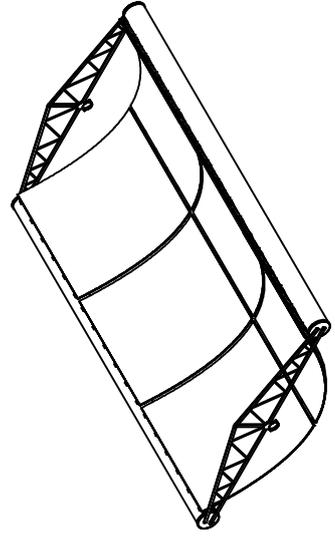
Fertigungszeichnungen

Es sind die folgenden Fertigungszeichnungen angehängt:

- A MS-Trough Modul
- A1 Dünnschichtspiegel Modul
- A2 Spiegeltragarm Modul
- A3 Stirnträger
- B Pylon



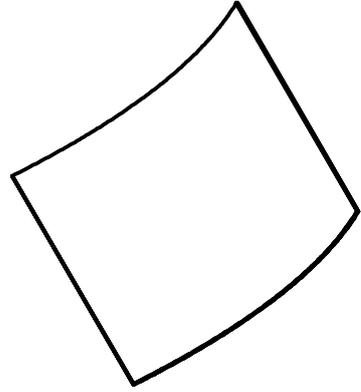
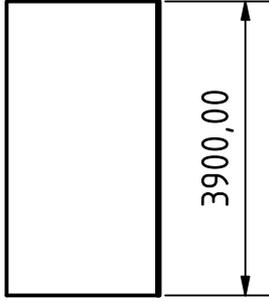
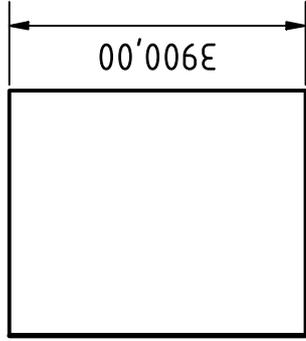
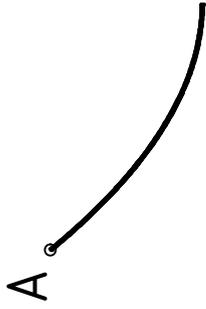
Maßstab: 1:100



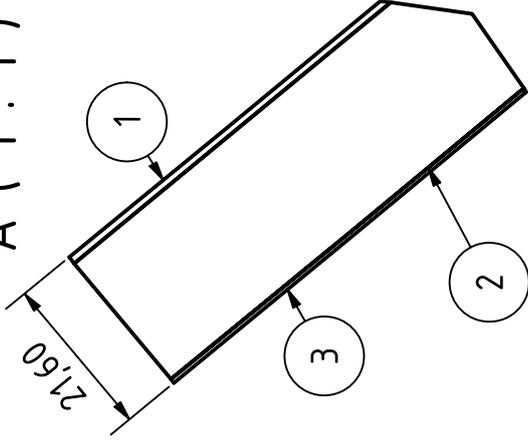
BAUTEILLELISTE

Pos.	Menge / Stck	Bezeichnung	Sachnummer	Werkstoff
1	6	Dünnschichtspiegel Modul	MST_01-02_V1	
2	18	Spiegeltragarm Modul	MST_01-03_V1	
3	2	Stirnträger	MST_01-04_V1	S235JR
4	2	Hauptlagerschale (unten)	MST_01-04_03_V1	S235JR
5	2	Torsionsrohr	MST_01-01_01_V1	S235JR
Oberfläche:		Allgemeinreferenz:		Verstärker:
Verantwortl. Abt.:		Technische Referenz:		Maßstab: 1 : 50
Erstellt durch:		Genehmigt von:		
Andreas Kormann				
Universität Bayreuth		Dokumententitel:		Documentenstatus:
Lehrstuhl für		Zusammenbauzeichnung		
Konstruktionstechnik		MS-Trough Modul		
und CAD		MST_01_V1		

Blatt:	18.11.2019
Version:	1
Blatt:	A



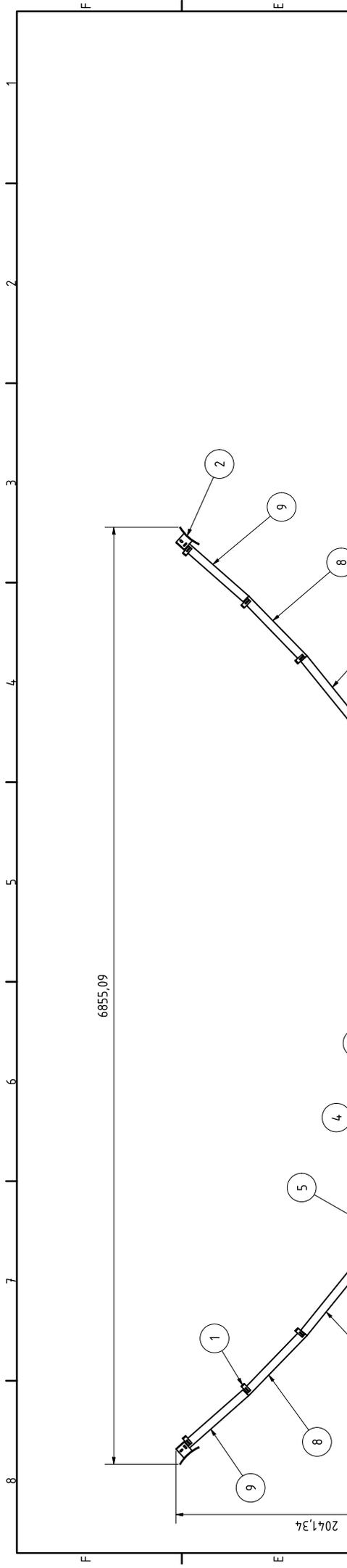
A (1:1)



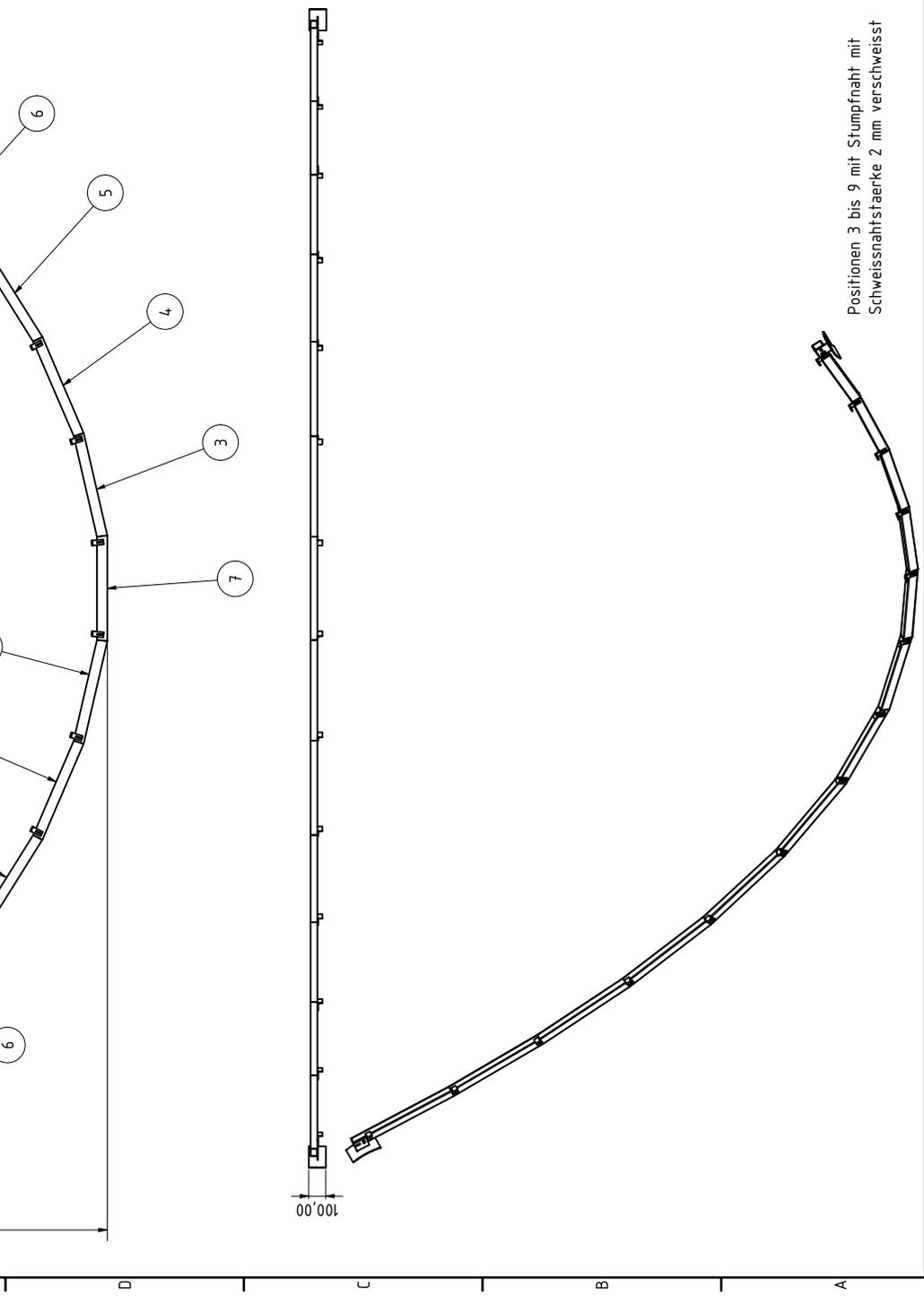
BAUTEILLISTE

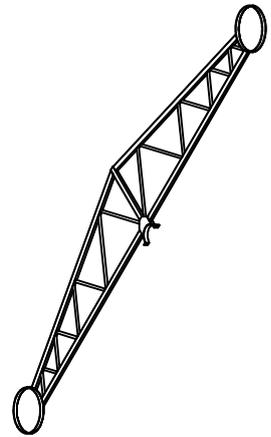
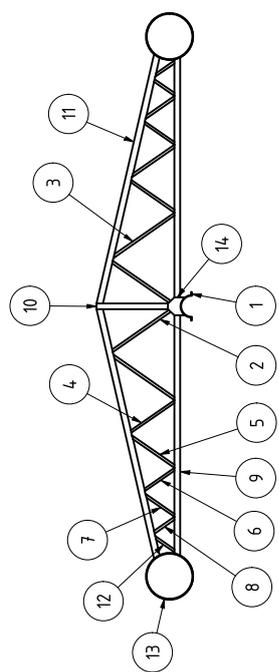
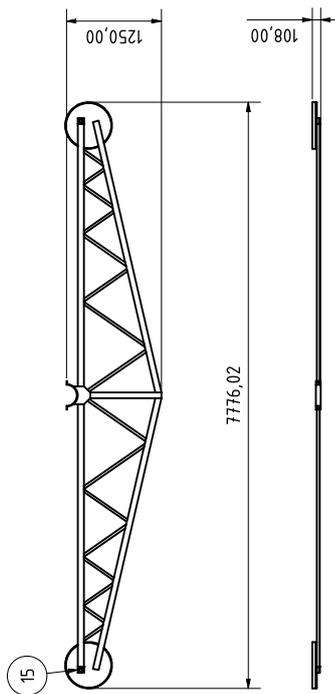
Pos.	Menge / Stck.	Bezeichnung	Sachnummer	Werkstoff
1	1	Spiegel - Borosilikatglas	MST_01-02_01_V1	Schott Borofloat 33
2	1	Spiegel - Styrodur	MST_01-02_02_V1	BASF Styrodur 3000CS
3	1	Spiegel - Aluminiumplatte	MST_01-02_03_V1	AlMg3

Oberfläche:	Allgemeintoleranz: nach DIN ISO 2768 - mK	Werkstoff:	Maßstab: 1 : 100
Verantwortl. Abt.:	Technische Referenz:	Erstellt durch:	Genehmigt von:
Universität Bayreuth Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD		Andreas Kormann	
		Dokumentenart: Zusammenbauzeichnung	Dokumentenstatus:
		Titel, Zusätzlicher Titel: Dünnschichtspiegel Modul	
		Änderungsdatum: 18.11.2019	Spr.: de
		Blatt: A1	



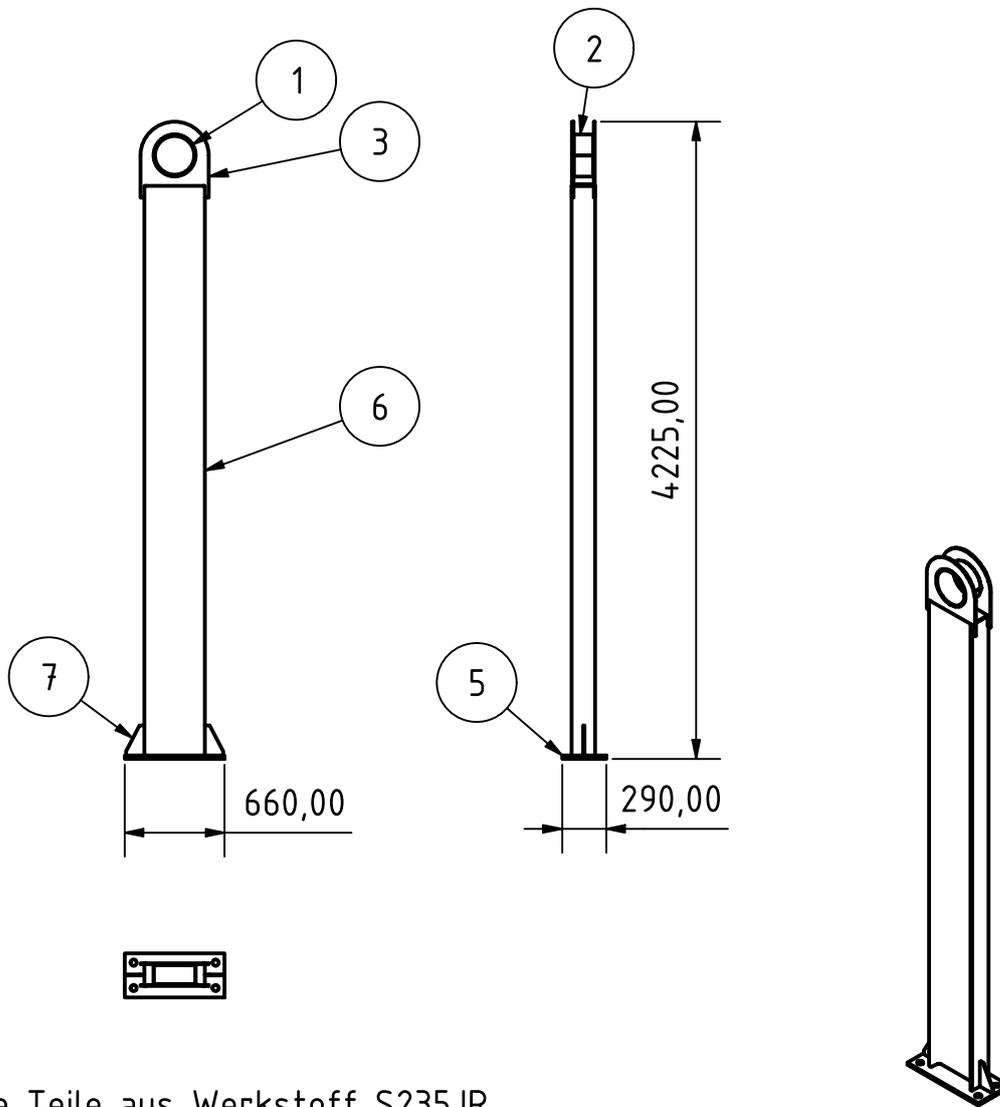
BAUTEILLISTE				
Pos.	Menge / Stck.	Bezeichnung	Sachnummer	Werkstoff
1	14	Montagewinkel (Spiegel)	MST_01-03_02_V1	EN AW-6060 T66
2	2	Aufnahme (Spiegeltragarm)	MST_01-03_03_V1	EN AW-6060 T66
3	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 60x40x2,5 - 622,263	EN AW-6060 T66
4	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 60x40x2,5 - 618,26	EN AW-6060 T66
5	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 60x40x2,5 - 615,003	EN AW-6060 T66
6	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 60x40x2,5 - 611,685	EN AW-6060 T66
7	1	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 60x40x2,5 - 624,868	EN AW-6060 T66
8	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 60x40x2,5 - 609,284	EN AW-6060 T66
9	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 60x40x2,5 - 654,172	EN AW-6060 T66
Oberfläche:		Allgemeinreferenz:	Werkstoff:	Maßstab: 1 : 20
Verantwortl. Abt.:		Technische Referenz:	Erstellt durch:	Genehmigt von:
Universität Bayreuth		Andreas Kormann	Andreas Kormann	
Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD		Dokumentart:		Dokumententyp:
		Zusammenbauzeichnung		
		Titel, zusätzlicher Titel:		
		Spiegeltragarm Modul		
		MST_01-03_V1		
		Spez. Blatt:		18.11.2019
		de		1A2





Alle Teile aus Werkstoff S235JR
mittels Kehlnaht mit
Schweißnahtstärke 3 mm
verschweisst

BAUTEILLISTE				
Pos.	Menge / Stck.	Bezeichnung	Sachnummer	Werkstoff
1	1	Hauptlagerschale (oben)	MST_01-04_01_V1	S235JR
2	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 33.7x2.0 - 988,558	S235JR
3	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 33.7x2.0 - 1000,803	S235JR
4	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 33.7x2.0 - 711,027	S235JR
5	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 33.7x2.0 - 701,664	S235JR
6	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 33.7x2.0 - 494,528	S235JR
7	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 33.7x2.0 - 485,164	S235JR
8	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 33.7x2.0 - 337,838	S235JR
9	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 80x40x4 - 3600	S235JR
10	1	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 80x40x4 - 1020	S235JR
11	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 80x40x4 - 3697,837	S235JR
12	2	Baustähle - Kaltgeformte, geschweißte Baustahl-Hohlprofile	ISO 10799-2 - 33.7x2.0 - 328,474	S235JR
13	2	Torsionsrohraufnahme	MST_01-04-02_V1	S235JR
14	2	Lagerstütze	MST_01-04_04_V1	S235JR
15	2	Bolzenaufnahme	MST_01-04_05_V1	S235JR
Oberfläche:		Algemeinreinigung	Werkstoff:	Maßstab: 1 : 50
Verantwortl. Abt.:		Technische Referenz	Erstellt durch:	Genehmigt von:
Universität Bayreuth		Andreas Kormann	Andreas Kormann	
Lehrstuhl für		Dokumententitel:		
Konstruktionslehre		Zusammenbauzeichnung		
und CAD		Titel, zusätzlicher Titel:		
		Schriftträger:		
		MST_01-04_V1		
		Kundenstempel:		
		18.11.2019		
		Blatt:		
		de A3		



Alle Teile aus Werkstoff S235JR
mittels Kehlnaht und
Schweissnahtstaerke 5 mm
verschweisst

BAUTEILLISTE

Pos.	MENGE / Stck.	Bezeichnung	Sachnummer	Werkstoff
1	1	Pylon Lagerrohr	MST_02_01_V1	S235JR
2	2	Gleitlager	MST_02_02_V1	
3	2	Pylon-Seitblech	MST_02_03_V1	S235JR
4	1	Träger-Deckblech	MST_02-04_V1	S235JR
5	1	Pylon-Bodenplatte	MST_02_05_V1	S235JR
6	1	Warmgewalzte I-Träger	DIN 1025 - I 400-3780	S235JR
7	2	Pylon-Streben	MST_02_07_V1	S235JR

Oberfläche:	Allgemeintoleranz: nach DIN ISO 2768 - mK	Werkstoff:	Maßstab: 1 : 50
-------------	--	------------	--------------------

Verantwortl. Abt.	Technische Referenz:	Erstellt durch: Andreas Kormann	Genehmigt von:
-------------------	----------------------	---	----------------

Universität Bayreuth
Lehrstuhl für
Konstruktionlehre
und CAD

Dokumentenart: Zusammenbauzeichnung	Dokumentenstatus:
Titel, Zusätzlicher Titel: Pylon	
MST_02_V1	Änderungsdatum: 19.11.2019
Spr.: de	Blatt: B