



**Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt**

Masterarbeit

Prüfungsnummer: MA EGM 07/16

Verifikation und konstruktive Verbesserung des Prototyp-Moduls für den
Modularen Hochleistungsstrahler Jülich

Verification and Constructive Improvement of the Prototype Module for
the Modular High-Flux Solar Simulator

17. 02. 2016 - 29. 06. 2016

Alexander Lenz

Matrikel-Nr.: 11075877

Referent: Prof. Dr. Ulf Blieske

Korreferent: Dr.-Ing. Kai Wieghardt (DLR)

Zusammenfassung

Diese Masterthesis ist Bestandteil des Masterstudienganges Erneuerbare Energien der Technischen Hochschule Köln und wurde am Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), Standort Jülich, im Zeitraum vom 17. Februar bis zum 29. Juni 2016 erarbeitet.

Das Institut für Solarforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt wird im Herbst des Jahres 2016 den im Bau befindlichen neuen modularen Hochleistungsstrahler **synlight** in Betrieb nehmen. Zu diesem Zeitpunkt wird die Forschungsanlage die größte „künstliche Sonne“ der Welt sein. Somit können in Zukunft, unabhängig von der Tageszeit und den aktuellen Wetterverhältnissen, Dauerbelastungsversuche mit einer dem Sonnenspektrum ähnlichen Solarstrahlung durchgeführt werden. Die Weiterentwicklung von solarthermischen Kraftwerken, solarchemischen Prozessen und von Raumfahrtmaterialien sind nur einige von vielen möglichen Anwendungsgebieten. [1]

Im fertiggestellten Zustand werden SPS-gestützt 149 7-kW-Xenon-Kurzbogenlampen individuell ansteuerbar sein. Die solare Strahlung kann somit in einer der drei Versuchskammern (Brennweite 8m) auf max. 300 kW fokussiert werden.

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Entwicklung von funktionswichtigen Konstruktionselementen mit der Software *AutoDesk Inventor* und die daraus entstehenden Konstruktionen werden durch praxisnahe Versuche am Prototypmodul verifiziert.

Des Weiteren werden die ersten Flussdichtemessungen am Prototyp beschrieben und die resultierenden Ergebnisse ausgewertet. Für diesen Zweck werden die notwendigen Grundlagen, Versuchsaufbauten und Optimierungsmaßnahmen zum Erreichen der Zielsetzungen beschrieben. [2]

Abstract

This thesis is a part of the Master degree in Renewable Energy at the Technische Hochschule Köln and is written in cooperation with the German Aerospace Center (DLR) in Jülich, from 17th February to 29th June 2016.

The DLR Institute of Solar Research is planning to finish the construction and installation of the new modular high-flux simulator **synlight** in 2016. At that time the research facility will be the biggest artificial sun of the world. In future, it will be possible to perform a long-term stress test with solar radiation similar to the solar spectrum independent of weather conditions and time of day. [1]

There are many possible areas of application, for example the further development of the solar-thermal plants, solar chemical processes and space materials.

In the end it will be possible to control 149 7-kW-Xenon short-arc lamps individually and with software support. The solar radiation can be focused in one of the three test chambers (focal length 8m) until max. 280kW.

This present paper deals with the first radiation tests and their evaluation. The development of constructive elements is described by the software *AutoDesk Inventor* and verified with practical tests on the prototype module. [2]

Lenz, Alexander

Jülich, den 29.06.2016

Matrikel- Nr.: 11075877

Thema der Abschlussarbeit

Verifikation und konstruktive Verbesserung des Prototyp-Moduls für den Modularen Hochleistungsstrahler Jülich

Verification and Constructive Improvement of the Prototype Module for the Modular High-Flux Solar Simulator

Keywords: Verification, Constructive Improvements, Prototype-Module, Modular High Power Solar Simulator, synlight, Radiation Tests, German Aerospace Center (DLR), Jülich

Erklärung zur Selbstständigkeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die genannten Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Sperrvermerk

Hiermit erkläre ich, dass ich die Abschlussarbeit aufgrund der Auflagen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt bis auf Widerruf **nicht** ausgeliehen werden darf.

Bestätigung der Abgabe

Herrn Alexander Lenz
wird hiermit bestätigt, dass er die Abschlussarbeit fristgerecht abgegeben hat.

(Ort, Datum, Unterschrift)

1 VORWORT

Bedingt durch das Masterstudium im Bereich der Erneuerbare Energien der Technischen Hochschule Köln, absolvierte ich im Sommersemester 2016 meine Masterthesis bei dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Standort Jülich. Durch meine ebenfalls beim DLR abgeschlossene Bachelorarbeit (Standort Köln), war es mir möglich, meine bereits vorhandenen Kenntnisse zu festigen und weitere spezifische Fähigkeiten des wissenschaftlichen Arbeitens zu erlernen sowie anzuwenden. Durch die Einzigartigkeit des Projektes **synlight** konnte ich neben diesen wissenschaftlichen Tätigkeiten auch die Aspekte der Projektplanung und -durchführung kennenlernen und für mich viele wichtige Erfahrungen sammeln. Die Zeit, die ich in diesem Projekt mitarbeiten durfte, hat mir den Stellenwert der Forschung als Vorreiter der Energiewende verdeutlicht und mich in meiner Entscheidung bestärkt, einen Teil dazu beitragen zu wollen.

Neben den vielen Anwendungsbereichen, die der modulare Hochleistungsstrahler nach der Fertigstellung bietet, bin ich davon überzeugt, dass es die Technologieentwicklung im Bereich der Effizienz von Solarthermischen Kraftwerke beschleunigen wird. Meine Hoffnung für eine „saubere“ und zukunftssträchtige Energieversorgung liegt in nationenübergreifende Energieparks. Jedoch scheitern diese bisher an politischen als auch technischen Problemen [3]. Durch Projekte wie **synlight** können zumindest die technischen Probleme angegangen und behoben werden. Diese Position wird auch von Bernhard Hoffschmidt, Direktor am Institut für Solarforschung, vertreten.

*„Die neue Forschungsanlage **synlight** wird die größte künstliche Sonne der Welt sein. Sie bietet den Herstellern von Komponenten sowie Entwicklern von Verfahren für solarthermische Kraftwerke, der solaren Chemie und der Raumfahrt ideale Testmöglichkeiten.“* [4]

In diesem Rahmen möchte ich allen danken, die mich auf meinem bisherigen beruflichen Werdegang begleitet und unterstützt haben. Im Besonderen Herr Prof. Dr. Ulf Blieske, welcher mich bereits bei meiner Bachelorarbeit unterstützte und prüfte. Ebenso meinem Betreuer beim DLR, Herr Dr.-Ing. Kai Wieghardt, und dem ganzen Institut für Solarforschung. Nicht zuletzt meiner Freundin Charlotte Zenses und meiner Familie.

Vielen Dank für die Unterstützung.

Jülich im Juni 2016

Inhaltsverzeichnis

1	VORWORT	IV
	Abbildungsverzeichnis	VII
	Tabellenverzeichnis	IX
	Formelverzeichnis.....	X
2	EINLEITUNG	- 1 -
2.1	Darstellung des Projektes und der Problemstellung	- 1 -
2.2	Zielsetzung der Abschlussarbeit.....	- 2 -
3	STAND DER TECHNIK	- 3 -
3.1	Grundlagen zu synlight und dem Projektaufbau	- 4 -
3.2	Technische Daten zum Modularen Hochleistungsstahler synlight.....	- 5 -
4	GRUNDLAGEN ZUM ANLAGENAUFBAU	- 6 -
4.1	Gebäude und Wartungsbühne	- 6 -
4.2	Aufbau des Strahlermoduls	- 7 -
4.3	Definition der Energiekette	- 9 -
4.4	Reflektoreigenschaften und Beschichtung	- 10 -
4.5	Experimentalbereich.....	- 12 -
5	METHODIK UND KONSTRUKTION	- 13 -
5.1	3D-Konstruktion der Wartungsbühne	- 13 -
5.2	Detailkonstruktion der Energiekettenanbindung	- 17 -
5.3	Methode zur Positionierung eines Xenon-Strahlermoduls.....	- 22 -
5.4	Optimierung der Reflektorform	- 32 -
5.5	Messung der Peak-Flussdichte des Reflektors	- 38 -

6	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	- 42 -
6.1	Auswertung der Wartungsbühnen-Konstruktion	- 42 -
6.2	Validierung der Energiekettenanbindung am Prototypmodul.....	- 45 -
6.3	Praktische Anwendung der Positionierungsmethode	- 47 -
6.4	Auswertung der Reflektoroptimierung	- 48 -
6.5	Auswertung der Peak-Flussdichtemessung	- 51 -
7	FAZIT	- 57 -
7.1	Zusammenfassung.....	- 57 -
7.1	Zukünftige Schritte.....	- 59 -
	LITERATURVERZEICHNIS	- 60 -
	ANHANG	- 62 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strahler-Anordnung mit Versuchskammern [9]	- 5 -
Abbildung 2: CAD-Aufbau des gesamten modularen Hochleistungsstrahlers [9] ...	- 7 -
Abbildung 3: Aufbau des einzelnen Strahlers	- 7 -
Abbildung 4: Ansicht der kompletten Energiekette	- 10 -
Abbildung 5: Theoretische Berechnung der Reflektorinnenkontur [2].....	- 10 -
Abbildung 6: Abmessungen des Reflektors	- 11 -
Abbildung 7: Versuchskammern [9].....	- 12 -
Abbildung 8: Bühnenmodell A	- 14 -
Abbildung 9: Bühnenmodell B	- 15 -
Abbildung 10: Innenabmessungen der Energiekette	- 18 -
Abbildung 11: Kollisionsprüfung der Energiekette im Bühnenmodell A	- 19 -
Abbildung 12: Fertiges CAD-Modell des oberen Strahlermoduls (HLS 000)	- 20 -
Abbildung 13: Fertiges CAD-Modell des unteren Strahlermoduls (HLS 000G)	- 21 -
Abbildung 14: Positionen der Bezugsebenen	- 23 -
Abbildung 15: Theoretische Sollmodulposition, tatsächliche Istmodulposition	- 24 -
Abbildung 16: Modulzuordnungen [13]	- 24 -
Abbildung 17: Positionierung des Tachymeters im mittleren Versuchsraum	- 29 -
Abbildung 18: Messprisma auf dem Führungswagen	- 30 -
Abbildung 19: Messprisma zur Vermessung der Bezugsebenen x und y	- 30 -
Abbildung 20: Messprisma zur Vermessung der Bezugsebene z.....	- 31 -
Abbildung 21: Aufbau des Tachymeters	- 31 -
Abbildung 22: Benutzeroberfläche des Excel-Tools	- 32 -
Abbildung 23: Reflektion des Xenon-Lichtes [15]	- 33 -
Abbildung 24: Versuchsaufbau Oberflächenvermessung.....	- 34 -
Abbildung 25: Messpunkte am Reflektor	- 35 -
Abbildung 26: Vergleich der Messwerte und CAD-Werte	- 35 -
Abbildung 27: Rillen in der Reflektoroberfläche	- 37 -
Abbildung 28: Versuchsaufbau der Reflektionsmessung	- 38 -
Abbildung 29: Flussdichtevertelung des gesamten mHLS [9].....	- 39 -
Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Prüfung der Reflektionseigenschaften	- 40 -

Abbildung 31: Justierung der Lampe	- 41 -
Abbildung 32: Abgeschlossener Wartungsbühnenaufbau	- 43 -
Abbildung 33: Detailaufnahme der Strahlermodulanbringung	- 44 -
Abbildung 34: Schematische Darstellung der Vorspannung [17].....	- 45 -
Abbildung 35: Komplette Energiekettenbaugruppe	- 46 -
Abbildung 36: Vordere (fixe) Energiekettenanbindung	- 46 -
Abbildung 37: Hintere (bewegliche) Energiekettenanbindung.....	- 46 -
Abbildung 38: Stellschrauben zur Positionierung	- 47 -
Abbildung 39: Messpositionen der Reflektionsmessung	- 48 -
Abbildung 40: Auftreffposition (Außen).....	- 49 -
Abbildung 41: Langgezogene Reflektion (Außen)	- 49 -
Abbildung 42: Auftreffposition (Mitte).....	- 49 -
Abbildung 43: Langgezogene Reflektion (Mitte).....	- 49 -
Abbildung 44: Auftreffposition (Hinten)	- 49 -
Abbildung 45: Punktförmige Reflektion (Hinten).....	- 49 -
Abbildung 46: Vergleich der alten und neuen Reflektoroberfläche.....	- 50 -
Abbildung 47: Flussdichte Verteilung des ersten Reflektors (beschichtet).....	- 51 -
Abbildung 48: Flussdichte Verteilung des oberflächenverbesserten Reflektors.....	- 52 -
Abbildung 49: Flussdichte bei variabler Brennweite	- 53 -
Abbildung 50: Flussdichte Verteilung des formverbesserten Reflektors	- 54 -
Abbildung 51: Plasmakern der Xenon-Kurzbogenlampe	- 55 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Beschreibung der Arbeitspakete [2]	- 4 -
Tabelle 3.2: synlight und die bekannten Sonnenlichtsimulatoren [7]	- 3 -
Tabelle 3.3: Strahlerparameter [8]	- 8 -
Tabelle 4.1: Vergleich der Bühnenmodelle	- 16 -
Tabelle 4.2: Arbeitsschritte der Energiekettenkonstruktion.....	- 17 -
Tabelle 4.3: Spezifikation der Energiekette	- 18 -
Tabelle 4.4: Anforderungen an den Reflektor [2]	- 33 -
Tabelle 4.5: Maßabweichungen der Messpositionen.....	- 36 -

Formelverzeichnis

(3.1) Ellipsengleichung	- 11 -
(4.1) Ermitteln des Richtungsvektors	- 25 -
(4.2) Ermitteln der theoretischen Geraden	- 25 -
(4.3) Ermitteln des tatsächlichen Richtungsvektors	- 26 -
(4.4) Ermitteln der tatsächlichen Geraden	- 26 -
(4.5) Erstellen eines Hilfsvektors	- 27 -
(4.6) Errechnen eines Normalenvektors	- 27 -
(4.7) Betrag des Normalenvektors	- 27 -
(4.8) Normalenform der Ebene	- 27 -

Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

°	Grad
°C	Grad Celsius
A	Ampere
AP	Arbeitspaket
CAD	Computer-Aided Design
CIRE	Cologne Institute for Renewable Energy
DC	Gleichstrom
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
F1	Brennpunkt im Reflektorzentrum
F2	Brennpunkt auf Versuchstarget
HNF	Hessesche Normalenform
kW	Kilowatt
lm	Lumen
m	Meter
mHLS	Modularer Hochleistungsstrahler
Ra	Arithmetischer Mittenrauwert
TH	Technische Hochschule
UV	Ultraviolett
V1,V2,V3	Versuch 1; 2; 3
V _{sp}	Vorspannung der Energiekette

2 EINLEITUNG

Das DLR ist eine führende und richtungsweisende Forschungseinrichtung der Bundesrepublik Deutschland. Die weltweit 7700 Mitarbeiter forschen und entwickeln, verteilt auf die 32 Institute, in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr.

Das Institut für Solarforschung verwendet seit einigen Jahren am Standort Jülich Deutschlands einzigen Solarturm als solarthermisches Versuchskraftwerk [5]. Neben diesem Projekt entwickelten und etablieren sich zusehends auch weitere Forschungseinrichtungen an dem ohnehin schon energietechnisch geprägten Standort. So beispielsweise der modulare Hochleistungsstrahler **synlight**, mit dem sich die vorliegende Arbeit beschäftigt.

2.1 Darstellung des Projektes und der Problemstellung

Die Ergebnisse von Bestrahlungsversuchen sind für die Solarforschung von großer Bedeutung. Jedoch entsprechen die Möglichkeiten zur Durchführung von Bestrahlungsversuchen weltweit derzeit nicht den Anforderungen aufwändigerer Versuche. Es gibt verschiedene Möglichkeiten die solare Strahlung der Sonne für Bestrahlungsversuche zu nutzen, z.B. in Form von Solartürmen oder Solaröfen. Jedoch generieren diese lediglich kurzzeitige und leistungsschwankende Ergebnisse. Zur Umgehung dieses Problems werden Dauerbelastungsuntersuchungen in der Regel mit Xenon-Hochleistungs-Strahlern durchgeführt. Der Vorteil dieser Technik besteht darin, dass das Lichtspektrum dem der Sonne sehr ähnelt und zudem eine konstante Bestrahlungsleistung über viele Stunden geliefert werden kann. Nur durch die Lampenleistung und der Strahlungsverluste sind die Möglichkeiten der Bestrahlungsversuche begrenzt. Der modulare Hochleistungsstrahler **synlight** erreicht eine hohe Modularität durch die feine Leistungsstufung. Ein weiterer Vorteil liegt in den drei vorhandenen Versuchskammern, in denen Experimente parallel bearbeitet werden können [2].

2.2 Zielsetzung der Abschlussarbeit

Das Ziel der Arbeit besteht in der Verifikation des Prototypmoduls des modularen Hochleistungsstrahlers (mHLS) durch zuvor entwickelte Untersuchungsmethoden. Das schließt Aufgaben aus den Bereichen Validierung und Optimierung der Stahleigenschaften und konstruktive Entwicklung von fehlenden Baugruppen mit ein. Im Laufe der Arbeit entstehende Verbesserungen und Neuerungen werden mittels der CAD-Software *Autodesk Inventor* in die Modulplanung eingepflegt und sowohl softwaregestützt als auch praktisch an dem Prototyp verifiziert. [6]

Aus der Zielsetzung ergeben sich konstruktive Aufgaben an der Wartungsbühne und dem Strahlermodul, sowie Optimierungsprozesse am Reflektor. Die Reflektoroptimierung wird mit einer Peak-Flussdichtemessung verifiziert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend in der Gesamtanlage umgesetzt und die notwendigen Arbeitsschritte näher erläutert.

Im Abschnitt 3 *Stand der Technik* werden grundlegende Informationen zum modularen Hochleistungsstrahler *synlight* und dessen weltweiten Alternativen gegeben.

Hingegen werden in Abschnitt 4 *Grundlagen zum Anlagenaufbau* alle für diese Arbeit relevanten Komponenten und Verständnisgrundlagen vorgestellt.

Die in Abschnitt 5 *Methodik und Konstruktion* vorgestellten fünf Hauptthemen gehen aus der Aufgabenstellung hervor. Die Themen *3D-Konstruktion der Wartungsbühne*, *Detaillkonstruktion der Energiekettenanbindung* und *Methode zur Xenon-Strahlerausrichtung* an der Wartungsbühne haben einen konstruktiven Charakter. Wogegen die Themen *Optimierung der Reflektorform* und *Messung der Peak-Flussdichte des Reflektors* auf der Verifizierung basieren.

In Abschnitt 6 *Diskussion der Ergebnisse* werden die gewonnenen Ergebnisse der fünf Hauptthemen ausgewertet. Die Ausarbeitung endet anschließend mit Zusammenfassung und Ausblick in Abschnitt 7.

3 STAND DER TECHNIK

Das Projekt **synlight** (DLR) soll in naher Zukunft aussagekräftige Ergebnisse für Forschungsaufträge im Bereich der solaren Kraftwerke, solaren Chemie und Raumfahrttechnik liefern. In Tabelle 3.1 wird verdeutlicht, dass die geplante Leistungsgröße die Lücke zwischen dem am DLR betriebenen Anlagen Hochflusssichte-Sonnenofen (bis zu 25kW) sowie dem Hochleistungsstrahler (bis zu 20kW) und dem experimentellen Solarturmanlagen (>> 100kW) füllt. Daher ist der Aufbau der künstlichen Sonne am Standort Jülich sowohl für die Solarforschung weltweit, als auch die praktische Umsetzung in der Industrie von großem Interesse. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung ist **synlight** der bisher leistungsstärkste Sonnenlichtsimulator [7].

Tabelle 3.1: **synlight und die bekannten Sonnenlichtsimulatoren mit einer Strahlungsleistung >10kW [7]**

Operator and facility	Year of construction	Solar power [kW]	Electric power [kW]	Focal length [m]	Peak flux [MW/m ²]
DLR, synlight, Jülich	2016	300 240 240	149 x 7	8.0	>11.0
ETH Zürich, Argon HFSS	2002	75	1 x 200	<1	4.3
PSI, Zürich	2005	50	10 x 15	3.0	11.0
Niigata University	2013	33	19 x 5		3.2
DLR, HLS, Cologne	2007	20	10 x 6	3.0	4.2
Aristotle Univ., Thessaloniki	2013	20	11 x 6	3.0	4.8
KTH Stockholm, Solar Lab	2014	20	12 x 7	1.5	6.7
Australian Nat. University	2015	15	18 x 2.5	1.9	9.5
EPFL Lausanne, LRESE	2015	15	18 x 2.5	1.9	9.5
University of Florida	2011	14	7 x 6	2.0	5.0
IMDEA, Madrid	2013	14	7 x 6	2.5	3.6
University of Minnesota	2010	11	7 x 6.5	2.3	8.5

So ist zu erwarten, dass sich die Receiver-Technologie für Solarkraftwerke nach Fertigstellung des modularen Hochleistungsstrahlers **synlight** entsprechend verbessern und weiterentwickeln wird. Somit ist mit dem Bau auch die Hoffnung auf Fortschritte im Bereich der Durchsetzungsfähigkeit von Solarkraftwerken auf dem internationalen Energiemarkt verbunden. [1]

3.1 Grundlagen zu **synlight** und dem Projektaufbau

Das Projekt ist im Jahr 2014 angelaufen und soll im Herbst 2016 für erste Versuchsdurchführungen zur Verfügung stehen. Um einen fehlerfreien und planmäßigen Projektablauf zu garantieren, wurde das komplette Projekt in acht verschiedene Arbeitspakete (AP) gegliedert, die in einem Projekt-Zeitplan stetig nachverfolgt und der aktuelle Stand der Arbeitspakete überprüft wird. Tabelle 3.2 zeigt die Gliederung in die verschiedenen Arbeitspakete, wovon die hervorgehobenen Aspekte die Grundlage für diese Arbeit bilden.

Tabelle 3.2: Beschreibung der Arbeitspakete [2]

<u>AP 1</u> Definition	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigt Forderungen aus Forschung und Entwicklung
<u>AP 2</u> Machbarkeitsstudie und Grobspezifikation	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfung der technischen Realisierung • Festlegen grober Betriebsparameter
<u>AP 3</u> Detailauslegung	<ul style="list-style-type: none"> • Bauplanung • Konstruktion • Komponentenentwicklung
<u>AP 4</u> Angebotseinholung und Auftragsvergaben	<ul style="list-style-type: none"> • Angebote für Komponenten und einzukaufende Dienstleistungen • Vergabe von Aufträgen
<u>AP 5</u> Aufbau und Vortests	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau der Anlage • Prototypenversuche • Komponentenprüfung

<p><u>AP 6</u> Inbetriebnahme und Qualifizierung</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Inbetriebnahme des Gesamtsystems • Qualifizierung <ul style="list-style-type: none"> ○ Funktion ○ Sicherheitstechnik ○ Messtechnik
<p><u>AP 7-8</u> Planung, Fertigung und Inbetriebnahme einer thermochemischen Wasserstofferzeugungseinheit</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung, Konstruktion, Aufbau • Verifikation der wissenschaftlichen Relevanz

3.2 Technische Daten zum Modularen Hochleistungsstahler **synlight**

Die komplette Konstruktion (Abbildung 1) umfasst 149 Xenon-Kurzbogenlampen mit ellipsoiden Reflektoren (Durchmesser ca. 1m), die in einer 15m hohen Montage- und Wartungsbühne verbaut sind. Jeder einzelne Strahler kann über eine Software angesteuert und variabel eingestellt werden. Die elektrische Anschlussleistung beträgt 2MVA.

Dadurch kann das Licht mit einer maximalen Bestrahlungsleistung von voraussichtlich bis zu 300kW in einem acht Meter entfernten Punkt fokussiert oder über eine größere Versuchsfläche verteilt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit das Licht aufzuteilen und parallel in bis zu drei nebeneinander angeordneten Testkammern zu nutzen. [8]

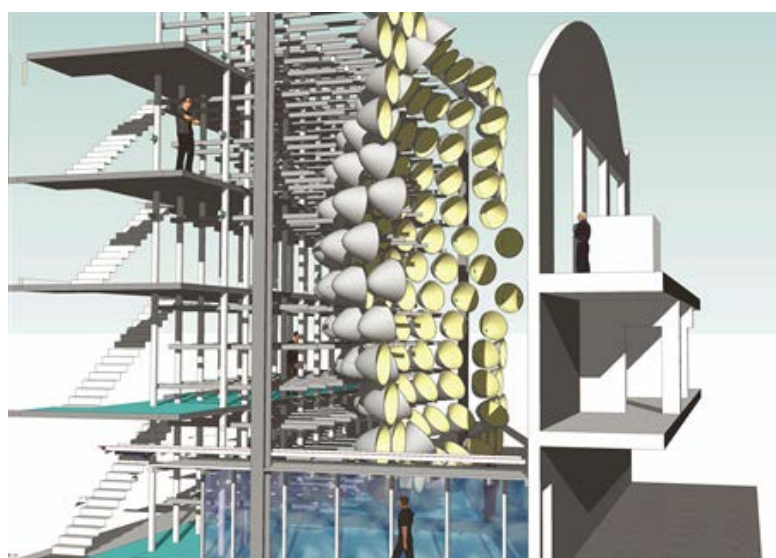


Abbildung 1: Strahler-Anordnung mit Versuchskammern [9]

4 GRUNDLAGEN ZUM ANLAGENAUFBAU

In diesem Abschnitt sollen die Grundkomponenten der Anlage beschrieben werden. Es wird davon ausgegangen, dass zum dargestellten Zeitpunkt das Gebäude und die Wartungsbühne mit allen Untergruppen fertiggestellt sind und die Montage der Strahlermodule begonnen hat. Des Weiteren wird nicht im vollen Ausmaße auf die sicherheitstechnischen Aspekte der Anlage eingegangen, da sie keinen wesentlichen Teil der Aufgabenstellung bilden.

4.1 Gebäude und Wartungsbühne

Die Baumaßnahmen des synlight-Gebäudes wurden im Mai 2016 abgeschlossen und der Aufbau der eigentlichen Anlage konnte beginnen. Das Gebäude teilt sich in einen Massiv- und Stahlbau auf.

Die Wartungsbühne (Abbildung 2) trägt die insgesamt 149 Strahlermodule und Gleichrichter, sowie auch 23 Schaltschränke, in denen die Hardware der Schrittmotorensteuerung für die dreiachsige Nachführung der Strahlermodule verbaut ist. Hinter der Wartungsbühne befindet sich die Belüftung der Anlage. Diese muss während des Betriebszustandes die Anlage (insbesondere die Reflektoren und Lampen) auf eine maximale Raumtemperatur von 60°C kühlen.

Bei der Planung der in der Strahlerhalle befindlichen Komponenten wurde besonders darauf geachtet, dass möglichst viele aus Metall bestehen (z.B. Energiekette). Alternativ wurden auch Bauteile aus halogenfreien, UV-beständigem Kunststoff gewählt (z.B. Gleichstromkabel). Die Notwendigkeit für diese Maßnahmen ergibt sich aus den vorgeschriebenen und teils DLR-intern festgelegten Brandschutzbestimmungen. Allgemein war die Vorgabe, die Brandlasten im der Strahlerhalle möglichst gering zu halten. Die einzelnen Ebenen werden im fertigen Zustand über Treppen erreichbar sein [8].

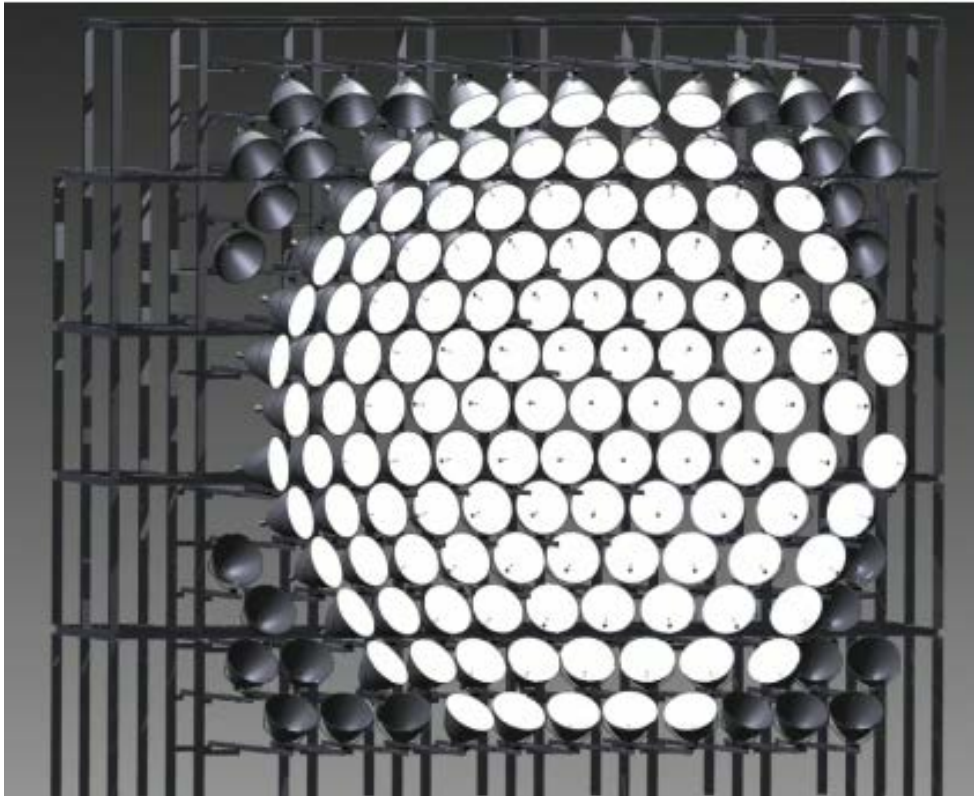


Abbildung 2: CAD-Aufbau des gesamten modularen Hochleistungsstrahlers [9]

4.2 Aufbau des Strahlermoduls

Der korrekte Aufbau jedes einzelnen Strahlers ist für die einwandfreie Funktion des späteren modularen Hochleistungsstrahlers von großer Bedeutung. Daher ist bei allen Bauteilen auf die Einhaltung der Fertigungstoleranzen und Bauteilspezifikationen zu achten.

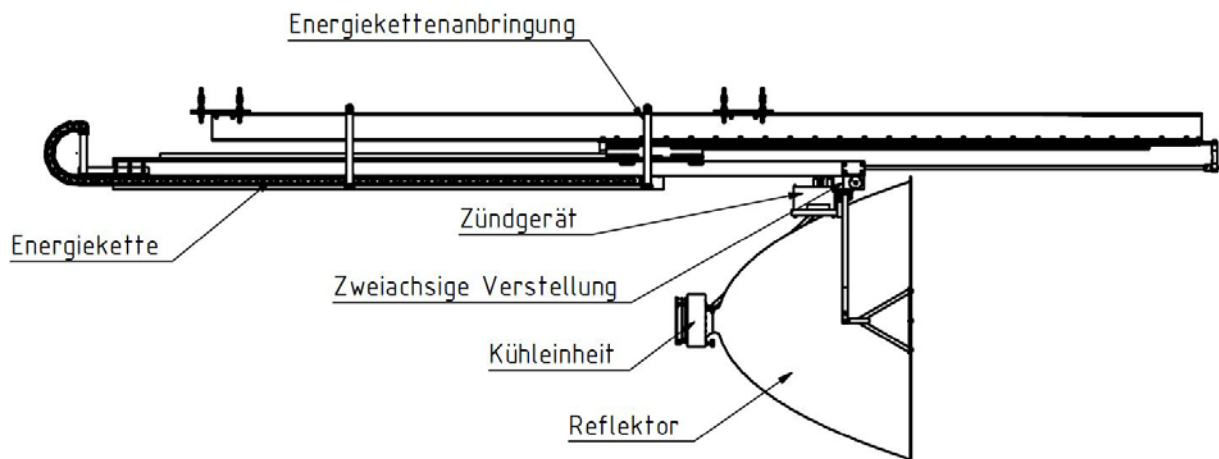


Abbildung 3: Aufbau des einzelnen Strahlers

Die elektrotechnische Funktion und Betriebsweise kommt im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit vorgestellten Aspekten keine wesentliche Bedeutung zu und wird daher vernachlässigt. Somit wird in der folgenden Beschreibung nur auf die konstruktiven und qualitativen Eigenschaften Bezug genommen. In Abbildung 3 werden alle Komponenten, die direkt an dem Modul verbaut sind, dargestellt. Für eine einwandfreie Leistungsübertragung müssen alle Strahler auf den gleichen Punkt (8m Brennweite) fokussierbar sein. Aufgrund gleicher Reflektoren müssen die Strahler kugelausschnittförmig angeordnet sein (Abbildung 2) und somit dreiachsig verstellbar [8]. Dies wird durch Schrittmotoren realisiert, die über eine Trapezgewindespindel oder eine Zahnstange eine Achsverstellung auslösen. Damit der Brennpunkt von allen Strahlern beleuchtet werden kann, ist es notwendig die in Abbildung 3 gezeigten Strahlermodule im unteren Teil der Wartungsbühne um 180° gedreht einzubauen. Die Xenon-Kurzbogenlampe wird mit einem konventionellen Dreiphasenwechselstromanschluss gespeist, der zuvor in einem Gleichrichter in Gleichstrom transformiert wurde. Durch die große Wärmestrahlung muss die Lampe und der Reflektor durch eine separate Kühleinheit mit einem Luftstrom versorgt werden. In Tabelle 4.1 sind die aktuellen Strahlerparameter aufgeführt.

Tabelle 4.1: Strahlerparameter [8]

Parameter	Beschreibung	
Lampentyp	Xenon-Kurzbogen-Gasentladungslampe	
Elektrische Leistung	7kW (6,5 – 10kW)	
Spannung	39 – 42V (– 50V)	
Stromstärke	150 – 170A (– 200A)	
Lichtmenge	300.000 – 350.000lm (– 450.000lm)	
Strahlungsleistung	2,5 – 3kW (– 4kW)	
Linearverstellung	Max. Verstellweg	3560mm
	Verstellgenauigkeit	< 0,05mm
Horizontale Verstellung	Verstellwinkel	≈ 50°
	Verstellgenauigkeit	0,0573°
Vertikale Rotationsbewegung	Verstellwinkel	360°
	Verstellgenauigkeit	0,0573°
Fokussiergenauigkeit	< 1mm	
Max. Umgebungstemperatur	45°C	

4.3 Definition der Energiekette

In den Abschnitten 5.1 bis 5.3 wird die Relevanz der im Rahmen dieser Abschlussarbeit entwickelten und konstruierten Bühnenmodelle unter anderem anhand der Entwicklung einer Energiekettenanbindung dargestellt. Da diese Anbindung im späteren Anlagenaufbau 149-fach ausgeführt wird, ist eine vorläufige Definition des Begriffes Energiekette notwendig.

Die Energiekette (auch Energieführungskette oder Schleppkette) ist ein Maschinenelement das dynamische (flexible) Kabel oder auch hydraulische und pneumatische Leitungen führt und vor äußeren Einflüssen schützt. Diese Art der Kabelnachführung garantiert die Einhaltung der kabelspezifischen Biegeradien im bewegten Zustand. Ein weiterer Vorteil liegt in der Zugentlastung der verlegten Kabel. Die funktionsgerechte Führung der Kabel wäre ohne eine Energiekette kaum umsetzbar. Des Weiteren wird zur besseren Führung der Kabel der rechteckige Querschnitt der Kette durch längs zur Bewegungsrichtung laufende Stege in verschiedene Segmente getrennt. [10]

Die in diesem Fall zweidimensional bewegliche Kette besteht aus einer Vielzahl von Einzelgliedern, die miteinander verbunden sind. Bedingt durch die hohe UV-Strahlung besteht diese aus verzinktem Stahl. Die geführten Kabel dienen zur Steuerung und Stromversorgung der Xenon-Strahlereinheit. In der zweidimensionalen Verbauungsform wird ein stationärer (fixer) und ein beweglicher Anschlusspunkt am zu bewegenden Maschinenelement (Xenon-Strahlermodul) benötigt. Die Anschlusspunkte bilden die jeweiligen Kettenenden und bestimmen neben den benötigten Energiekettenhalterungen die gesamte Einbausituation. Eine Grundbedingung für die folgend beschriebene Ausarbeitung ist eine möglichst platzsparende Konstruktion um Bauteilkollisionen zu verhindern.

In Abbildung 4 ist eine komplette Energiekette mit Trennstegen und Anschlusspunkten (Kettenenden) abgebildet.



Abbildung 4: Ansicht der kompletten Energiekette [11]

4.4 Reflektoreigenschaften und Beschichtung

Die Berechnung der Reflektorform ist eine wesentliche Grundlage für die unter *Methodik und Konstruktion* erläuterten Untersuchungen. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle der theoretische Hintergrund der Reflektorbeschaffenheit vorgestellt.

Abstand [F1, F2]: 8 m Abstand [s, F1]: 100 mm

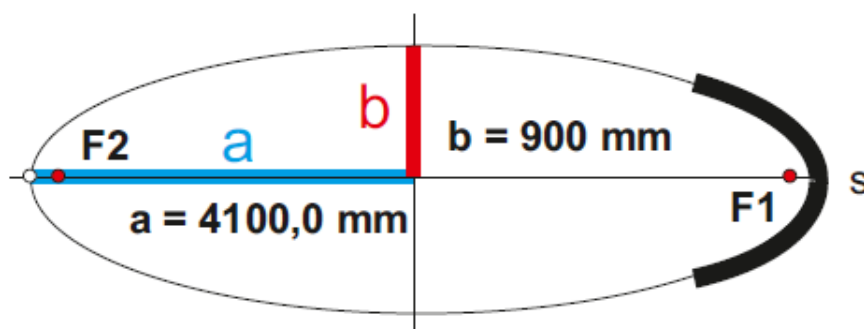


Abbildung 5: Theoretische Berechnung der Reflektorinnenkontur [2]

Die theoretisch ermittelte Kontur des Reflektors bildet sich aus dem Teilausschnitt einer Ellipse (Abbildung 5) und errechnet sich nach Ellipsengleichung [11] wie folgt:

$$y(x) = \sqrt{b^2 * \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)} \quad (4.1)$$

Das Maß a bildet hierbei 4100mm und entspricht somit der Hälfte der geforderten Brennweite von 8000mm (Abbildung 5, Abstand F1, F2) zuzüglich dem Abstand von 100mm. Dieser entspricht dem Abstand zwischen Brennpunkt und Außenkante der Ellipse. Die Gesamtgröße des Reflektors wird durch die Verschattung des Anodensockels bestimmt (Abbildung 6). Durch das Drehen dieser Kontur um die Rotationsachse bildet sich die ellipsoide Reflektorform.

Die Beschichtung der Reflektorinnenseite muss eine Reflektivität im Lichtspektrum von 400nm bis 1200nm, hohe Temperatur- und Alterungsbeständigkeit sowie eine ausreichende Oberflächengüte ($R_a < 1$) aufweisen [2].

Die Thematik Beschichtung wird in Tabelle 5.4 *Anforderungen an den Reflektor* noch genauer betrachtet.

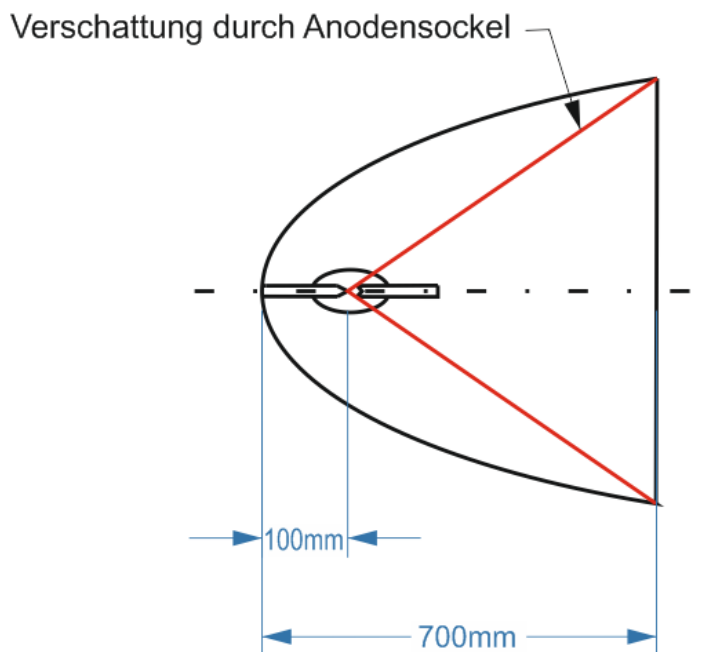


Abbildung 6: Abmessungen des Reflektors

4.5 Experimentalbereich

Der Experimentalbereich (Abbildung 7) gliedert sich in einen Versuchsraum mit *extra hoher UV-Strahlung* (V1, Raumfahrtexperimente) und zwei Versuchsräumen (V2, V3) für *solarchemische Anwendungen*. Mit neuen Lampen kann in V1 und V3 eine max. Strahlungsleistung von 240kW und in V2 von 300kW erreicht werden. Diese als Gauß-Verteilung angenommene Peak-Flussdichte kann in V2 mit 11MW/m² spezifiziert werden (Tabelle 3.2). Jeder Versuchsraum ist mit allen notwendigen Versorgungseinheiten (Stromanschlüsse: 400V/ 230V, Kühlanlagen, Luftabzug etc.) ausgestattet.

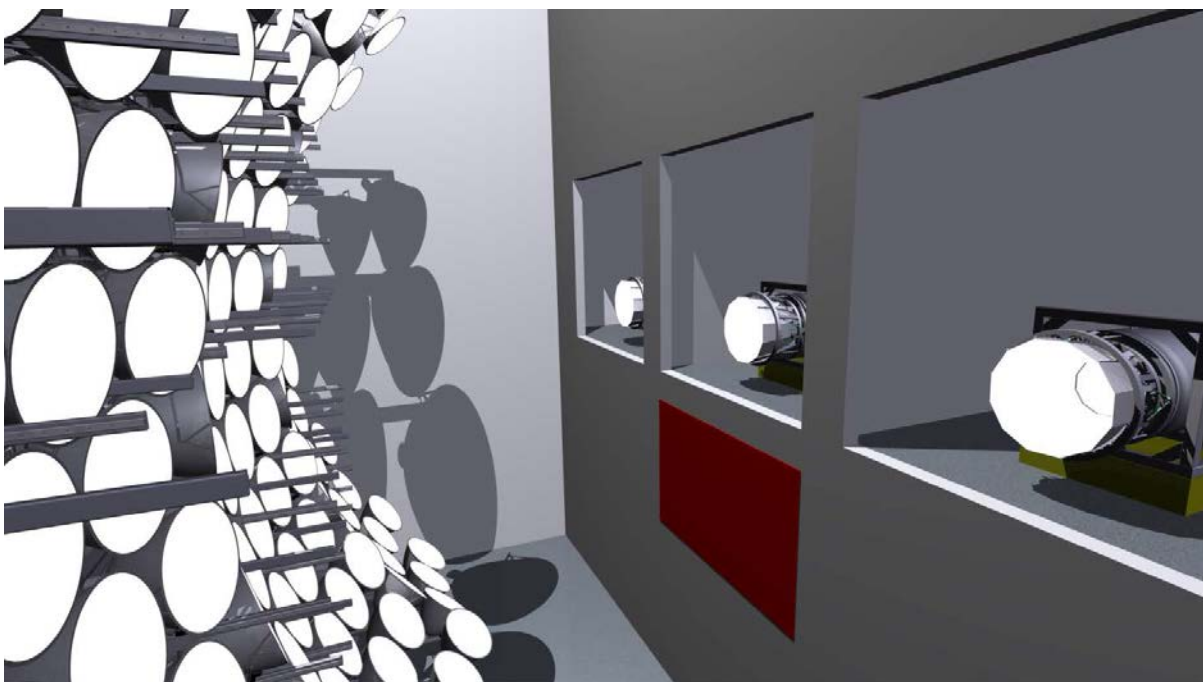


Abbildung 7: Versuchskammern [9]

5 METHODIK UND KONSTRUKTION

Im Folgenden werden die fünf parallel erarbeiteten Hauptthemen (Abs. 2.2) und die verwendeten Methoden vorgestellt. Dabei handelt es sich um drei konstruktive Themen (Abs. 5.1; 5.2; 5.3) und der Reflektoroptimierung (Abs. 5.4; 5.5). Die Entwicklung und Konstruktion der dargestellten Modelle und Baugruppen ist, neben den beschriebenen Bestrahlungsversuchen, einer der zwei Themengebiete, die im Rahmen dieser Abschlussarbeit ausgearbeitet wurden. Unter Punkt 6 erfolgt die Diskussion der Ergebnisse.

5.1 3D-Konstruktion der Wartungsbühne

Bei der Konstruktion der Wartungsbühne sind verschiedene Vorgaben zu beachten. Das *funktionsorientierte Konzept* [8] legt einen pragmatischen Bühnenaufbau nahe. Dabei sind die Bauteile, wie zum Beispiel die tragenden Stahlträger, vorerst nicht genau spezifiziert. Dieses Konzept bildet die Grundlage für die spätere Bühnenkonstruktion und muss ausreichend Platz für die Xenon-Strahler-Module und derer Unterbaugruppen garantieren.

Darüber hinaus muss auf Basis des *statischen Konzeptes* [12], welches die technische Umsetzbarkeit garantiert, den Anforderungen des *funktionsorientierten Konzeptes* entsprechen. Die Kompatibilität der beiden Konzepte ist beim Aufbau zu berücksichtigen. Die anschließende Konstruktion sowie die Kollisionsprüfung von Bauteilen/-gruppen und die Detailauslegung werden mit einer 3D-Simulation arrangiert. Die Tragfähigkeit der Konstruktion wird in jedem Entwicklungsstadium von einem Architekten (bzw. Statiker) überprüft.

Für die unterschiedlichen praktischen Anwendungsgebiete werden unterschiedliche Modellanforderungen gestellt. So muss bei der Bauteilkonstruktion die durch die Wartungsbühne vorgegebene Platzsituation kontinuierlich berücksichtigt werden. Hierfür ist ein Bühnenausschnitt, wie in Abbildung 8 grafisch dargestellt, ausreichend. Dieses 3D-Modell ist einer der sechs gleichbleibenden Bühnenteile, an denen die Strahlermodule montiert werden. Alle signifikanten Bauteile sind den Abmessungen entsprechend miteinbezogen und nicht vereinfacht dargestellt. Des Weiteren ist in Abbildung 8 *Bühnenmodell A* zu erkennen, dass die Strahlermodule im unteren Wartungsbühnenbereich um 180° gedreht montiert werden.

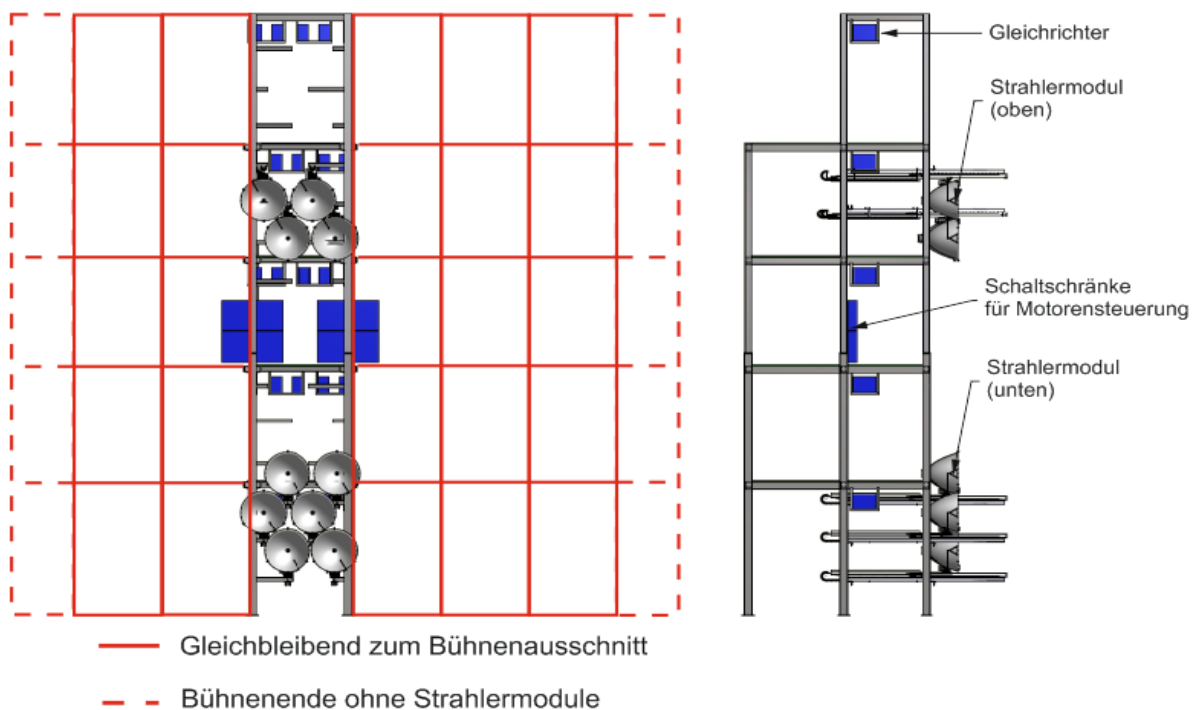


Abbildung 8: Bühnenmodell A

Im Unterschied zu der in Abbildung 8 dargestellten Konstruktion stellt das Bühnenmodell B (Abbildung 9) den kompletten Aufbau der Wartungsbühne dar. Entscheidend ist hier die Positionsgenauigkeit der Strahler und der Anschlusskomponenten. Um die Dateigröße und Performance (Berechnungszeit des Computers) möglichst klein zu halten wurden Bauteile, die für die Abmessungen der Baugruppen keine Bedeutung haben, vereinfacht oder unterdrückt dargestellt.

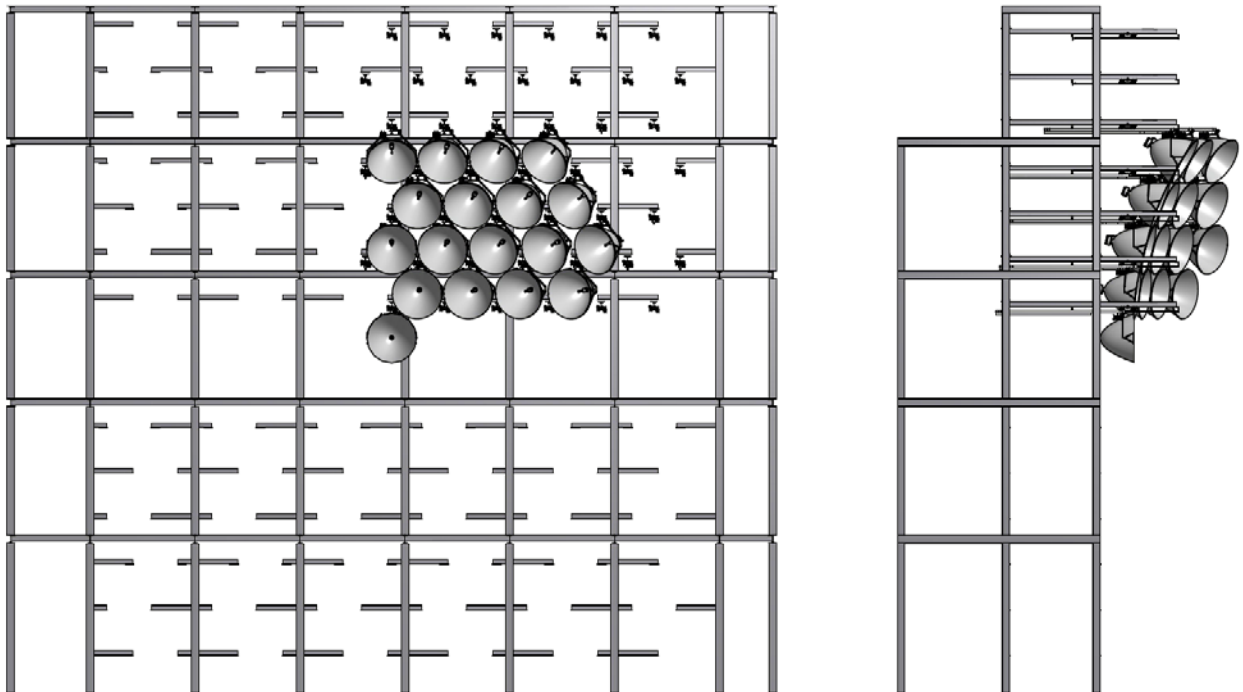


Abbildung 9: Bühnenmodell B

Die signifikanten Unterschiede und Anwendungen der erstellten Bühnenmodelle werden in Tabelle 5.1 veranschaulicht und die Hauptmerkmale sind farblich hinterlegt.

Tabelle 5.1: Vergleich der Bühnenmodelle

Genauigkeit <ul style="list-style-type: none"> • Strahlerpositionen • Anbringungsmaße • Verbindungselemente • Komplexität • Detailgenauigkeit • Strahlermodul 	Ungefähre Positionen	Exakt
	Exakt	Exakt
	Sehr genaue Darstellung	Vereinfachte Darstellung
	Hoch	Hoch
	Sehr hoch	Hoch
	Sehr hoch	Nur signifikante Bauteile
Vereinfachte Darstellung	Nein	Ja
Performance	Sehr hoch	Sehr hoch
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Kollisionsprüfung • Bühnenbelegung • Bauteilkonstruktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfverfahren • Strahlerpositionierung • Strahlerausrichtung • Referenzmodell
Aufgaben	<ul style="list-style-type: none"> • Konstruktion der Energiekettenanbindung • Anbringung von Schaltschränken, Gleichrichtern • Kabelauslegung 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Montagekonzepten • Vergleich Soll/ Ist

Mithilfe der hier entwickelten 3D-Modelle können viele konstruktive Probleme während der Montage der realen Wartungsbühne veranschaulicht und vor allem gelöst werden. Um den Nutzen der erstellten Bühnenmodelle darzustellen, wird in den folgenden Abschnitten die Weiterarbeit beschrieben.

In Abschnitt 5.2 wird die Detailkonstruktion der Energiekettenanbindung anhand des *Bühnenmodells A* aufgeführt.

Hingegen wird in Abschnitt 5.3 die Entwicklung einer Positionierungsmethode der Xenonstrahler an der Wartungsbühne vorgestellt. Zu diesem Zweck wird das *Bühnenmodell B* weiter verwendet.

5.2 Detailkonstruktion der Energiekettenanbindung

Nachdem unter Punkt 4.3 der Begriff Energiekette anwendungsspezifisch definiert wurde, soll in diesem Abschnitt die Entwicklung der Energiekettenanbindung mit dem *Bühnenmodell A* verdeutlicht werden. Die Energiekettenanbindung ist wesentlicher Bestandteil der Konstruktion, weil die Versorgungs- und Steuerungskabel hindurch geführt werden. In der Tabelle 5.2 sind alle Arbeitsschritte von der Grobspezifikation bis zur Funktionsprüfung aufgeführt.

Die notwendigen Arbeitsschritte und die konstruktive Methodik werden in diesem Abschnitt beschrieben.

Tabelle 5.2: Arbeitsschritte der Energiekettenkonstruktion

Arbeitsschritt		Beschreibung
1	Grobspezifikation	<ul style="list-style-type: none"> • Ideenfindung • Bestimmen der max. Abmessungen • Bestimmen möglicher Einbaupositionen
2	CAD-Modellierung	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen verschiedener vereinfachter Modelle • Anschließende Entscheidungsfindung
4	Detailkonstruktion	<ul style="list-style-type: none"> • Konstruktion der zwei verschiedenen Modelle <ul style="list-style-type: none"> ○ Strahlermodul oben/ unten • Konstruktion der Anbringungselemente
5	Funktionsprüfung (Abs. 5 Diskussion der Ergebnisse)	⇒ Test am Prototypen <ul style="list-style-type: none"> ○ Motorenleistung ○ Vorbiegung der Energiekette ○ Ausrichtung

Für die Grobspezifikation müssen zuerst die Innenabmessungen der Energiekette bestimmt werden, um eine Geeignete für die Anwendung auswählen zu können. Dafür müssen die benötigten Kabel (UV-beständig, halogenfreie Materialien, kleine dynamische Biegeradien) ausgewählt und die Kabelquerschnitte festgelegt werden (Abbildung 10). An die Energiekette werden Anforderungen in den Bereichen UV-

Beständigkeit, Biegesteifigkeit und Baugröße gestellt. Hierdurch und durch den vorgegebenen Verfahrweg eines Strahlers von max. 1800mm können die Energiekettenparameter, wie in Tabelle 5.3 dargestellt, bestimmt werden.

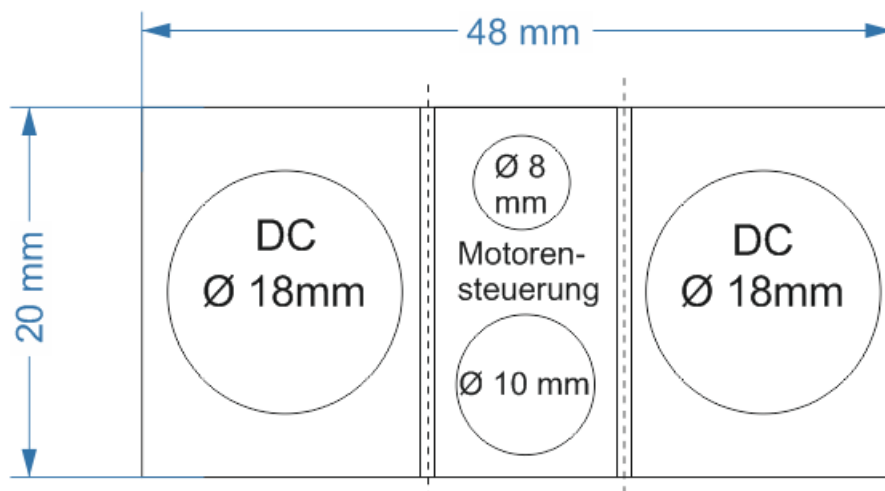


Abbildung 10: Innenabmessungen der Energiekette

Tabelle 5.3: Spezifikation der Energiekette

Außenmaße	2400 x 35 x 68mm
Biegeradius	R = 100mm
Material	Stahl, verzinkt
Hersteller Typenbezeichnung	EKD Gelenkrohr SLP 120 / 100 x 2400 / 60-N/E 2Pz/2.te Tlg. I.O.

Aufbauend auf den Energiekettenabmessungen und den Abmessungen des gesamten Strahlermoduls kann mit stark vereinfachten Baugruppen eine CAD-Modellierung (Kollisionsprüfung) im *Bühnenmodell A* (Abbildung 11) durchgeführt werden. Für die Festlegung des maximal benötigten Einbauvolumens wird das vereinfachte Strahlermodul im komplett eingefahren und im komplett ausgefahrenen Zustand in das Bühnenmodell eingepflegt. Die Energiekette (Abbildung 11, rot) wird an der angegebenen Position befestigt. Anschließend wird durch die 3D-Ansicht überprüft, ob die gewählte Einbausituation zu keiner Kollision mit anderen Bauteilen führt. Analog wird diese Vorgehensweise bei einer um 180° gedrehten Einbausituation genutzt. Die folgende Grafik soll dies veranschaulichen.

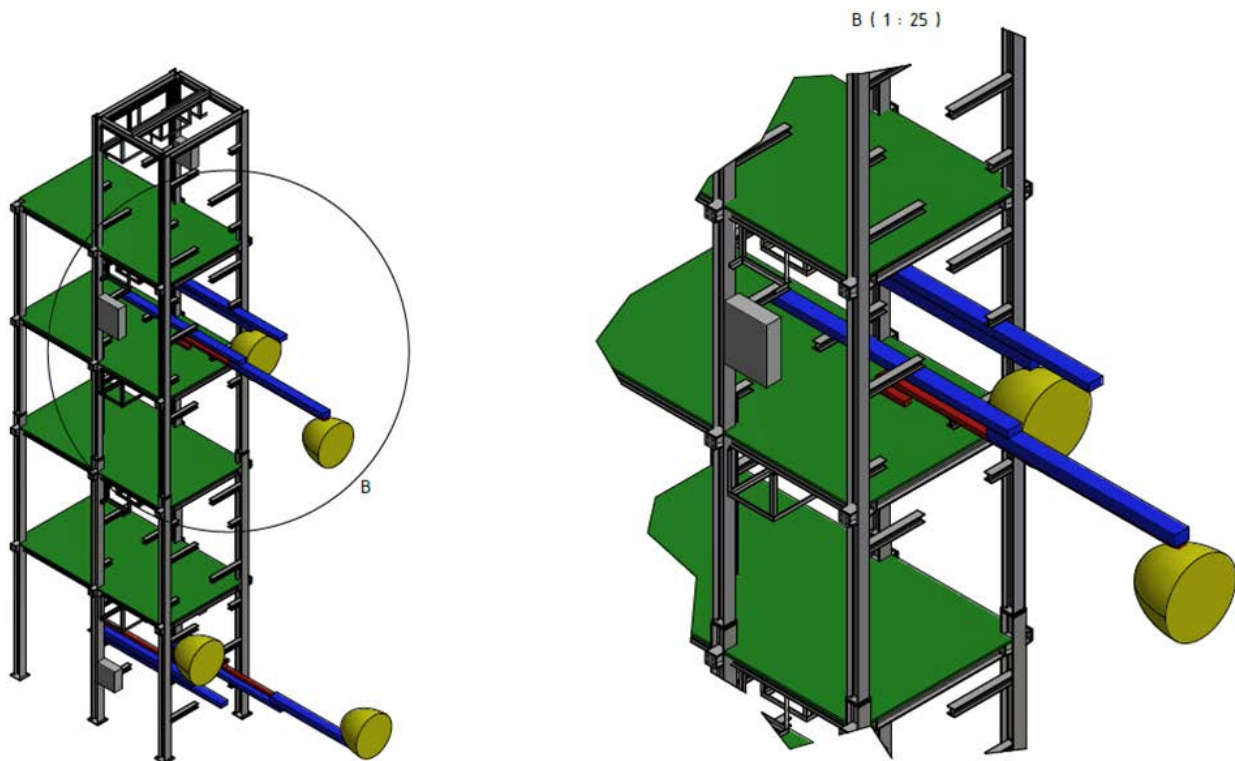


Abbildung 11: Kollisionsprüfung der Energiekette im Bühnenmodell A

Die Kollisionsprüfung erbringt als Ergebnis, dass zwei verschiedene Anbindungskonzepte für das obere und untere Strahlermodul benötigt werden. Des Weiteren sind die maximalen Einbaugrößen für die Detailkonstruktion festgelegt.

Tabelle 5.2 zeigt, dass die Detailkonstruktion nach der CAD-Modellierung den nächsten Arbeitsschritt darstellt und wird im Folgenden beschrieben.

Aus den Ergebnissen der zuvor dargestellten Kollisionsprüfung und dem fertiggestellten 3D-Modell des Strahlermoduls (HLS 000) [8] wird, wie in Abbildung 12 gezeigt, die Detailkonstruktion der Energiekette beschrieben. Besondere Beachtung verlangt auch bei dieser Baugruppe, die UV-Beständigkeit, das Gewicht und gleichbleibende Normteile.

Angepasst an die minimalen dynamischen und statischen Biegeraden der verwendeten Energie- und Steuerkabel (Herstellerangaben) ist die komplette Baugruppe möglichst klein konstruiert. Des Weiteren werden zur Senkung der Gesamtkosten möglichst gleichbleibende Halbzeugmaterialien verbaut.

Wie schon beschrieben, unterscheiden sich das obere und untere Strahlermodul (Abbildung 12; Abbildung 13) nur in der um 180° gedrehten Einbausituation. Dies und die schwerkraftbedingten Verformungen setzen die Entwicklung zwei verschiedener Energiekettenanbindungen voraus.

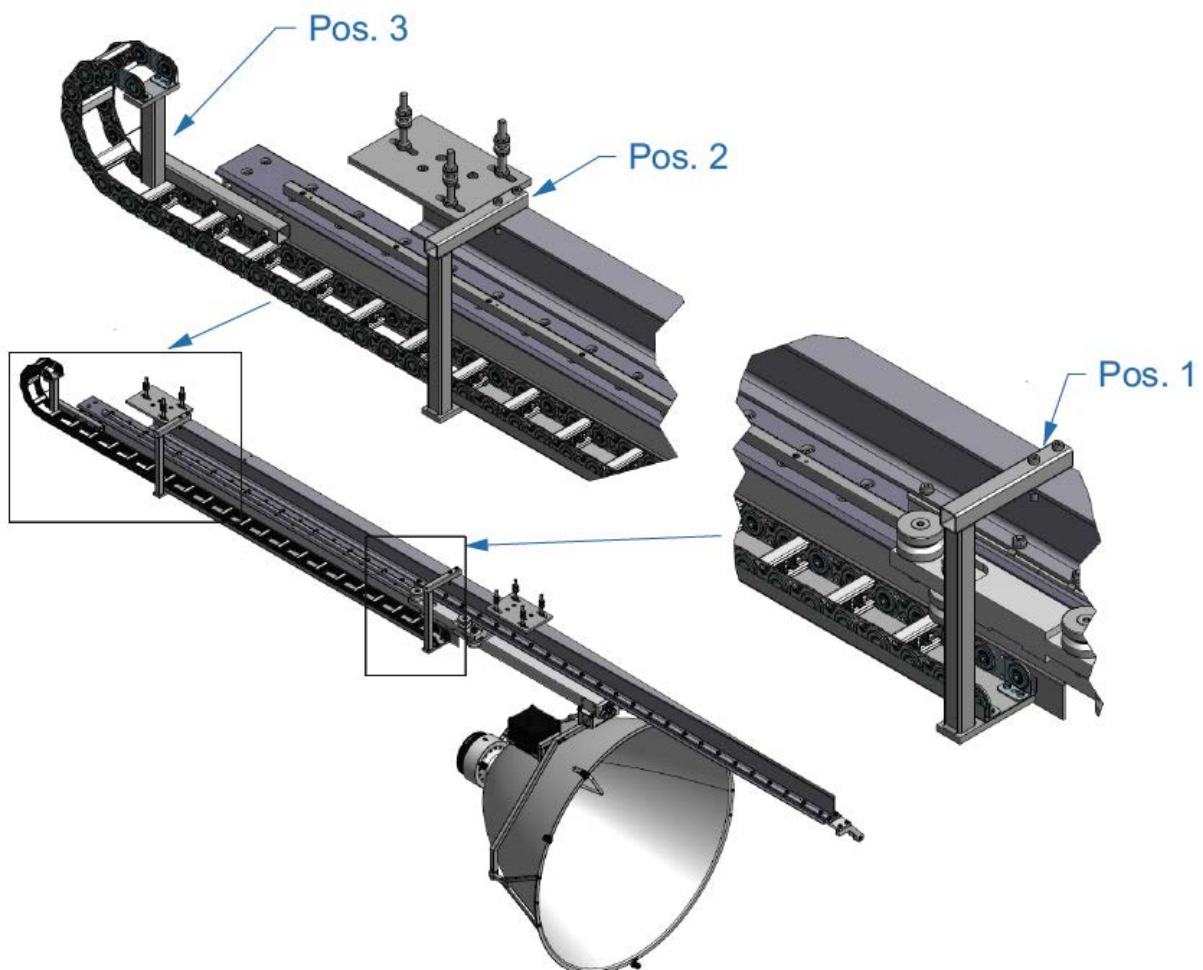


Abbildung 12: Fertiges CAD-Modell des oberen Strahlermoduls (HLS 000)

Beim oberen Strahlermodul (Abbildung 12) sind zwei Halterungen verbaut. Ein Halter dient als Energieketten-Anschlusspunkt (Abbildung 12, Pos. 1) und der andere als Stütze gegen Durchbiegung (Abbildung 12, Pos. 2). Die zuführenden Kabel werden durch ein geschweißtes Anschlusswinkel (Abbildung 12, Pos. 3) in den beweglichen Modulausleger (Aluminium Vierkantrrohr) zu den elektrischen Anschlüssen des Strahlers geführt. Die Schwierigkeit aller Anbindungsbauteile liegt im Kombinieren der vorgegebenen Biegeradien der Energiekette (welche die minimale Baugröße vorgeben) und der Kollision mit anderen Bauteilen.

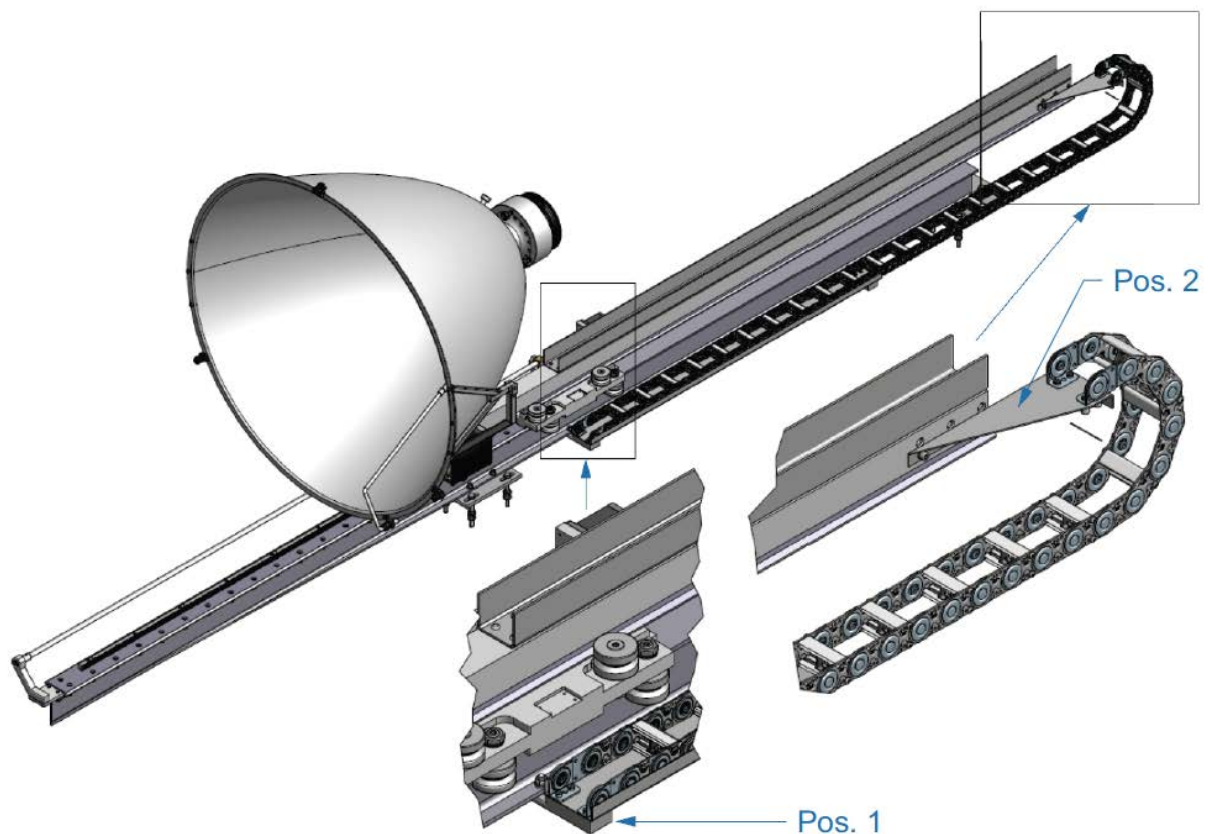


Abbildung 13: Fertiges CAD-Modell des unteren Strahlermoduls (HLS 000G)

Die Energiekettenanbindung des unteren Strahlermoduls, HLS 000G [8] (Abbildung 13), besteht aus ähnlichen Komponenten. Die Halterungen werden in diesem Fall durch zwei Flachstahlelemente (Abbildung 13, Pos. 1) realisiert. Die Anbindung an den beweglichen Modulausleger wird hingegen durch ein abgekantetes Stahlblech (Abbildung 13, Pos. 2) umgesetzt. Die Notwendigkeit einer Blechkonstruktion ergibt

sich aus dem geringen Platz zwischen den Bauteilen. Alle Positionen werden mit normgerechten Schraubverbindungen befestigt. Zur Befestigung von Position 2 (Abbildung 13) an den beweglichen Modulauslegern werden Blindnietmuttern verwendet.

5.3 Methode zur Positionierung eines Xenon-Strahlermoduls

Die zur Positionierung der Xenon-Strahler entwickelte Methode basiert auf dem in Abschnitt 5.1 vorgestellten *Bühnenmodell B* (siehe Abbildung 9).

Alle 149 Module des im Bau befindlichen modularen Hochleistungsstrahlers *synlight* werden zurzeit an der fertiggestellten Wartungsbühne verbaut und sollen in naher Zukunft exakt ausgerichtet werden. Diese Ausrichtung ist von hoher Bedeutung für die spätere Funktion des mHLS, da bei einer ungenauen Strahlermodul-Position die Gefahr der Strahler-Kollision besteht. Das bedeutet, dass in verschiedenen Ausfahrzuständen die Reflektoren miteinander kollidieren.

Grundlegend für die Positionierung der einzelnen Module ist die Entwicklung einer Messmethode die eine Ausrichtung der einzelnen Module mit Hilfe eines Tachymeters auf $\pm 0,5\text{mm}$ gewährleistet. Die Genauigkeit dieses Mess- und Prüfverfahrens ist wesentlich höher, jedoch ist eine genauere händische Ausrichtung in der Praxis kaum realisierbar und für die Funktion der Anlage nicht notwendig. Im Folgenden sollen zunächst die theoretischen Hintergründe und entsprechende Berechnung vorgestellt werden. Anschließend wird die praktische Anwendung und der genaue, praktische Prüfaufbau vorgestellt.

Für die Vermessung der theoretischen und tatsächlichen Modulpositionen müssen in einem ersten Schritt die Bezugsebenen bestimmt werden (Abbildung 14). Mit der CAD-Software *AutoDesk Inventor* werden anschließend die nötigen theoretischen $x/y/z$ -Werte der Module ermittelt, die zur beschriebenen Berechnung benötigt werden.

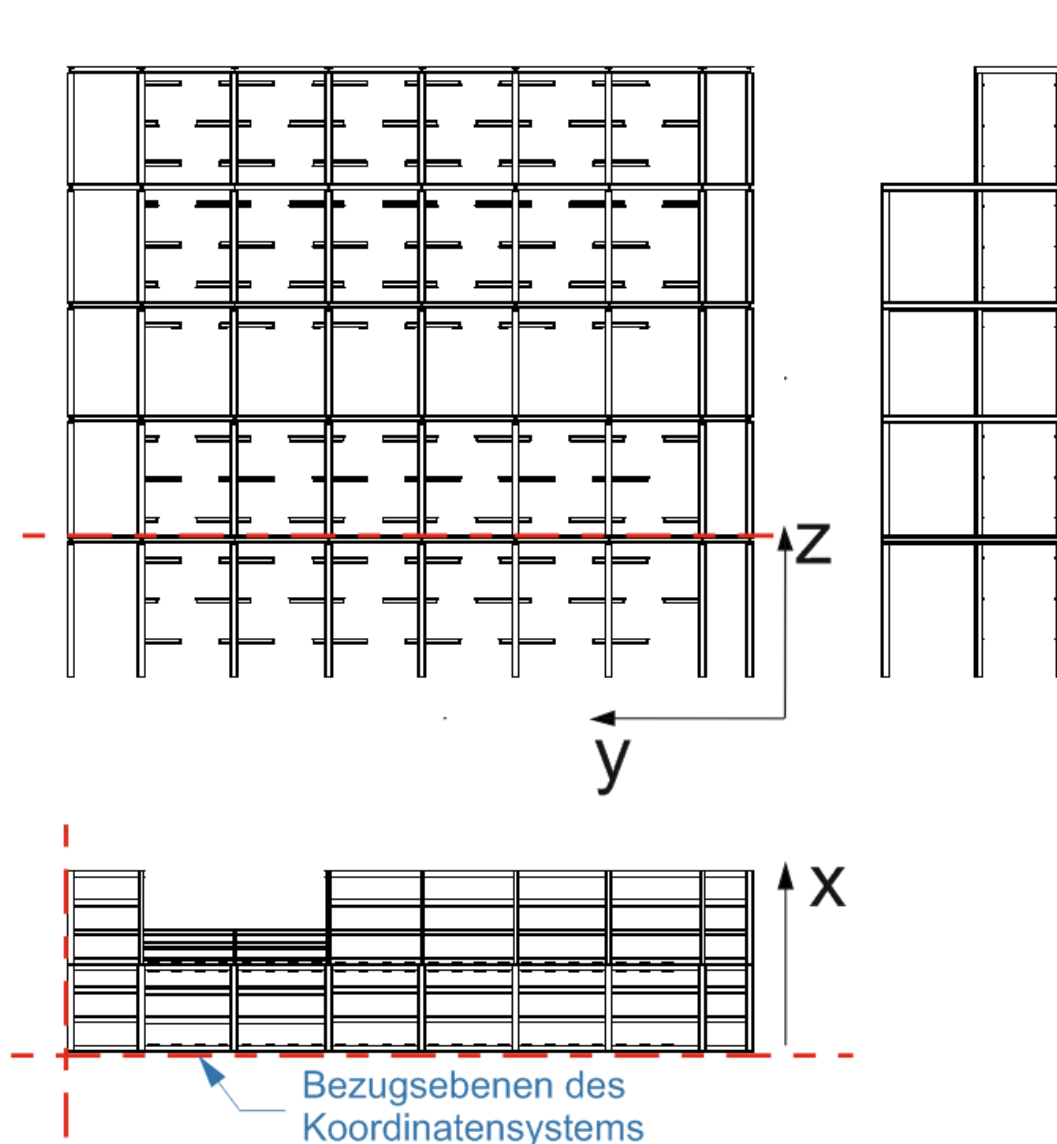


Abbildung 14: Positionen der Bezugsebenen

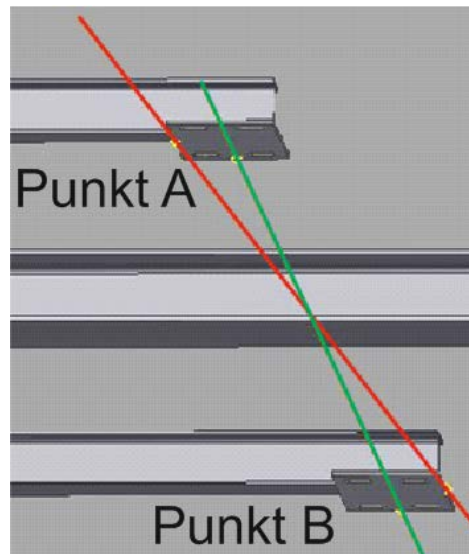


Abbildung 15: Theoretische Sollmodulposition (grün), tatsächliche Istmodulposition (rot)

In der vorliegenden Beispielrechnung werden die theoretischen Anbringungs-Maße des Strahlers A1 (Abbildung 15, grün) angenommen und mit den frei gewählten tatsächlichen Anbringungs-Maßen (Abbildung 15, rot) verrechnet. Dadurch erhält man die Abweichungen in x/y/z-Koordinaten. Diese Abweichungen müssen während der Modulmontage direkt ausgeglichen werden. Gegebenenfalls muss die nachkorrigierte Position nochmal vermessen und erneut korrigiert werden. In Abbildung 16 sind alle Strahlerbezeichnungen aufgeführt.

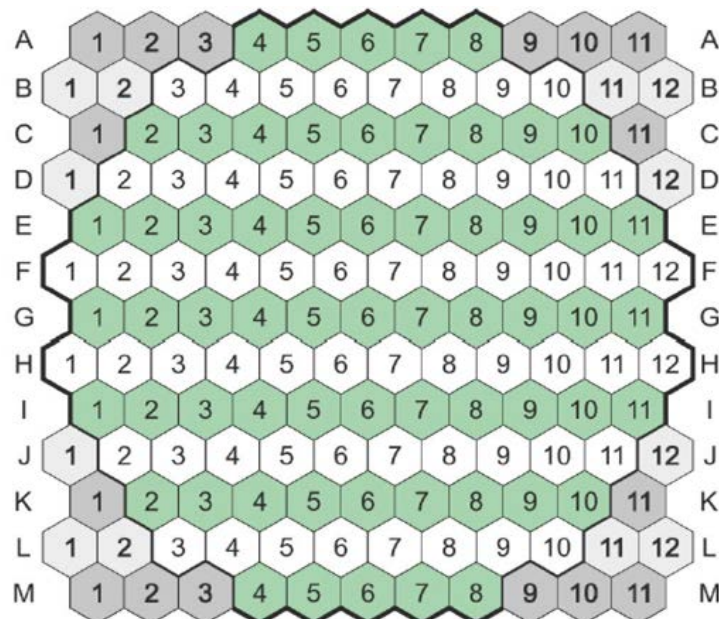


Abbildung 16: Modulzuordnungen [13]

In der folgenden Beispielrechnung wird die y-Abweichungen des Strahlers A1 an dem Punkt A von der Idealposition berechnet, welche die Sinnhaftigkeit der Methode bestätigt. Darüber hinaus dient diese Rechnung als Grundlage für das resultierende Excel-Tool. Die Basis für diese Berechnung liefert die Abstandsberechnung zweier windschiefer Geraden im Raum [11].

Theoretische Punkte des Moduls A1 (CAD)

$$A \hat{=} \vec{p} = (-80; 2580; 10629,198)$$

$$B \hat{=} \vec{q} = (-1980; 2580; 10629,198)$$

Ermitteln des theoretischen Richtungsvektor (\vec{u}_1)

$$\vec{u}_1 = \vec{p} - \vec{q} = \begin{pmatrix} -1980 \\ 2580 \\ 10629,198 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -80 \\ 2580 \\ 10629,198 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1900 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Ermitteln der theoretischen Geraden (g)

$$g: \vec{\chi} = \vec{p} + r_1 * \vec{u}_1 \quad (5.2)$$

$$g: \vec{\chi} = \begin{pmatrix} -80 \\ 2580 \\ 10629,198 \end{pmatrix} + r_1 \begin{pmatrix} -1900 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Tatsächliche Punkte des Moduls A1 (Annahme)

Da noch keine tatsächlichen Werte bekannt sind, wird wie in Abbildung 15 gezeigt, eine Strahlerposition (rot) für diese Beispielrechnung angenommen. Das hat den weiteren Vorteil, dass die erhaltenen Ergebnisse anschließend durch eine einfache Abstandsmessung (AutoDesk Inventor) überprüft werden können.

Es werden zwei Messpunkte angenommen, die die Position des Moduls nach der Montage und vor der Feinausrichtung widerspiegeln sollen. Es handelt sich um Extremabweichungen, die in der Realität nicht vorkommen werden. Die Berechnung mit den angenommenen Messpunkten dient zur Verifizierung der Methode.

$$\vec{k} = (-80; 2485; 10629,198)$$

$$\vec{l} = (-1980; 2675; 10637,198)$$

Ermitteln des tatsächlichen Richtungsvektors (\vec{u}_2)

$$\vec{u}_2 = \vec{l} - \vec{k} = \begin{pmatrix} -1980 \\ 2675 \\ 10637,198 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -80 \\ 2485 \\ 10629,198 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1900 \\ 190 \\ 8 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Ermittelte tatsächliche Gerade (h)

$$h: \vec{\chi} = \vec{k} + r_2 * \vec{u}_2 \quad (5.4)$$

$$h: \vec{\chi} = \begin{pmatrix} -80 \\ 2485 \\ 10629,198 \end{pmatrix} + r_1 \begin{pmatrix} -1900 \\ 190 \\ 8 \end{pmatrix}$$

Erstellen eines Hilfsvektors für die Normalenform der Ebene

$$E_{hilf} = \vec{k} + r_1 * \vec{u}_1 + r_2 * \vec{u}_2 \quad (5.5)$$

$$E_{hilf} = \begin{pmatrix} -80 \\ 2585 \\ 10629,198 \end{pmatrix} + r_1 \begin{pmatrix} -1900 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + r_2 \begin{pmatrix} -1900 \\ 190 \\ 8 \end{pmatrix}$$

Errechnen des Normalenvektors

$$\vec{n} = \vec{u}_1 \times \vec{u}_2 \quad (5.6)$$

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -1900 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -1900 \\ 190 \\ 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 15200 \\ -36100 \end{pmatrix}$$

$$|\vec{n}| = \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2} \quad (5.7)$$

$$|\vec{n}| = \sqrt{18179200^2 + (-361000)^2} = 361319,858 \text{ mm}$$

Normalenform der Ebene

$$E_{hilf} = \left[\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} - \vec{p} \right] * \vec{n} \quad (5.8)$$

$$E_{hilf} = \left[\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -80 \\ 2580 \\ 10629,198 \end{pmatrix} \right] * \begin{pmatrix} 0 \\ 15200 \\ -361000 \end{pmatrix}$$

$$E_{hilf} = 15200x_2 + (-361000)x_3 - 3876285000$$

Hessesche Normalenform (HNF)

$$HNF: \left| \frac{15200x_2 + (-361000)x_3 - 3876285000}{18182783,99} \right| = d$$

Einsetzen von \vec{k} in HNF zur Abstandsermittlung

$$HNF: \left| \frac{18179200 * 2485 + (-361000) * 10629,198 - 3876285000}{18182783,99} \right| = d$$

$$\underline{d = 94,822 \text{ mm}}$$

$$\underline{d \approx 95 \text{ mm}}$$

Wie in den dargestellten Berechnungen deutlich wird, handelt es sich um eine y-Abweichung von rund 95mm des Moduls an Punkt A (Abbildung 15). Diese Abweichung wird mit einer Abstandsmessung (*AutoDesk Inventor*) überprüft und bildet die Grundlage der folgenden Ausführung.

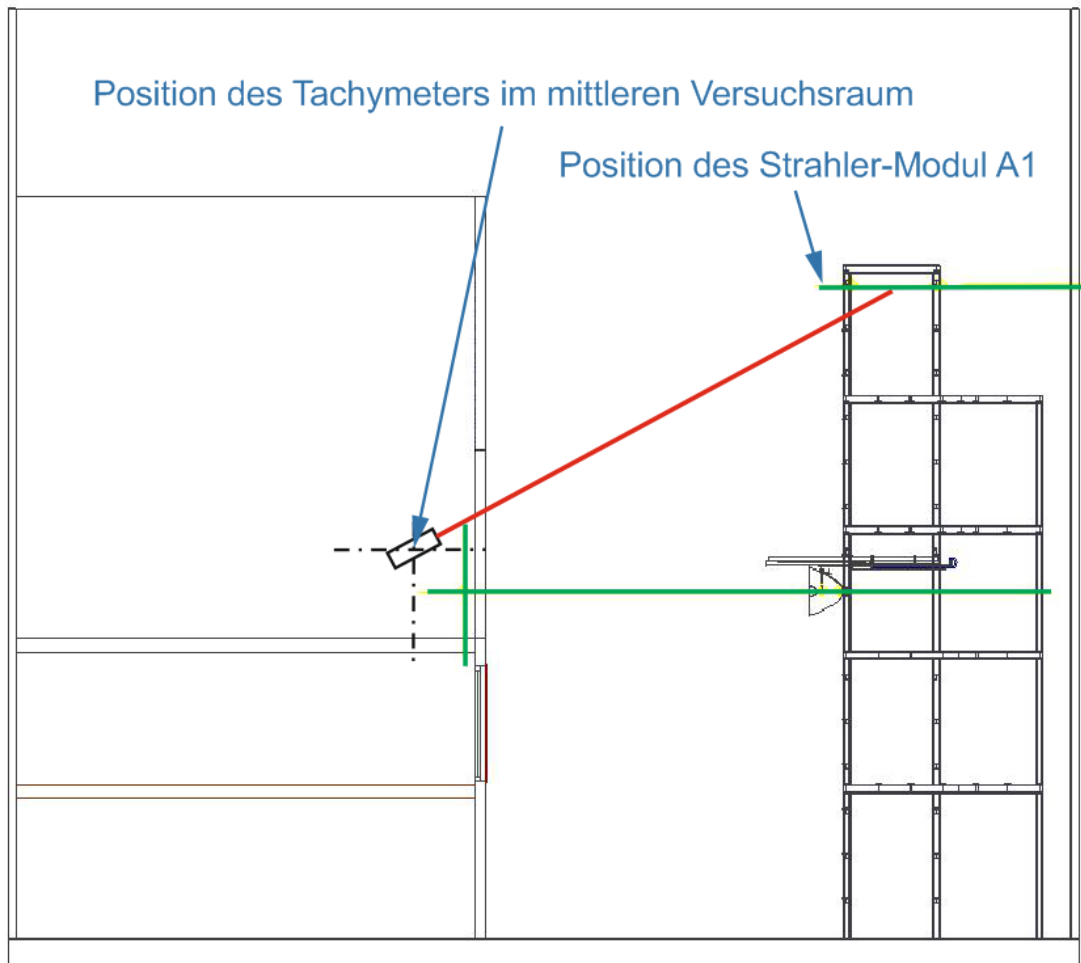


Abbildung 17: Positionierung des Tachymeters im mittleren Versuchsraum

Die Abbildung 17 zeigt die tatsächlichen Strahlerpositionen, die mit einem Tachymeter und den dazugehörigen Messprismen aufgenommen werden. Das Tachymeter (Abbildung 21) ist ein Messgerät, mit dem Entfernungen zum Zielpunkt (Messprisma) in allen drei Achsrichtungen automatisch erfasst werden können. Die Position des Tachymeters muss so gewählt werden, dass alle auszurichtenden Strahlerpositionen mit dem Positionierungslaser angezielt werden können. Da das Stativ für den Gebrauch auf flexiblen Untergründen gedacht ist, muss in diesem Anwendungsfall eine besondere Fixierung der Füße gegeben sein [14].

Die theoretisch bestimmten Bezugsebenen (CAD) müssen an der realen Wartungsbühne vermessen werden. Dazu ist es nötig die entsprechenden Messprismen mit

den dafür vorgesehen Magnetfüßen (Abbildung 19; Abbildung 20) an die Träger anzubringen, die genau auf den Bezugsebenen liegen.

Ein weiteres Messprisma muss auf dem Führungswagen der Axialverstellung angebracht werden (Abbildung 18). Mit diesem Prisma und dem Tachymeter werden an zwei Punkten die tatsächlichen Koordinaten des Moduls aufgenommen.

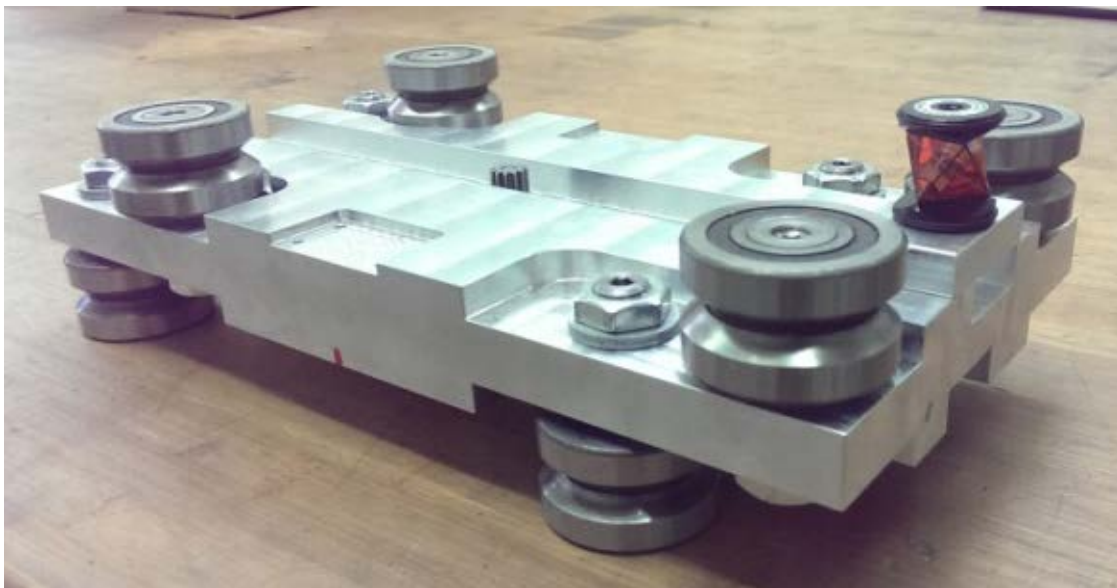


Abbildung 18: Messprisma auf dem Führungswagen



Abbildung 19: Messprisma zur Vermessung der Bezugsebenen x und y



Abbildung 20: Messprisma zur Vermessung der Bezugsebene z



Abbildung 21: Aufbau des Tachymeters

Die zuvor beschriebenen Abstandsberechnungen sollen eine Hilfestellung beim händischen Ausrichten der Xenon-Strahlermodule darstellen. Für alle Module wurden die theoretischen CAD-Daten in einem Excel-Tool¹ hinterlegt. Während des Ausrichtens können mit dem Tool die theoretischen und manuell einzutragenden tatsächlichen Werte (Abbildung 22, rot) verrechnet werden. Diese bilden durch die *Hessesche Normalenform* die Abweichungen in x/y/z-Richtung (Abbildung 22, blau). Die Punkte A und B bilden dabei die Mitte der Modul-Montageplatten. Nach diesen Werten (mm) können die Module den Anforderungen entsprechend ausgerichtet werden. In diesem Beispielfall (Abbildung 22) würde das bedeuten:

Punkt A (vordere Montageplatte des Strahlermoduls):

95mm nach rechts ($y = -95$)

Punkt B (hintere Montageplatte des Strahlermoduls):

95mm nach links ($y = 95$); 8mm nach unten ($z = -8$)

¹ Beigefügter Datenträger

		Tatsächlichen Maße						Hessesche Normalenform (HNF)					
Strahlerreihe	Strahler	Punkt A			Punkt B			Punkt A			Punkt B		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
A	A1	-80	2485	10629,198	-1980	2675	10637,198	0	-95	0	0	95	-8
A	A2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A	A11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 22: Benutzeroberfläche des Excel-Tools

5.4 Optimierung der Reflektorform

Um qualifizierte Aussagen über das Strahlungsverhalten der späteren Anlage treffen zu können, muss vor dem Aufbau das Verhalten des Reflektors geprüft und eventuelle Nachbearbeitungen (ggf. Verbesserungen) validiert werden.

Bezogen auf den Anlagenaufbau wurde die ellipsoide Form des Reflektors ausgerechnet (siehe Abs. 4.4) und geprüft.

Notwendige Anforderungen: Der erste Brennpunkt (Abbildung 23, F1) muss im Zentrum des Plasmakerns der Xenon-Lampe liegen und der zweite Brennpunkt (Abbildung 23, F2) in 8m Entfernung auf dem Versuchstarget. Im späteren Einbaustand (Abbildung 2) werden anwendungsbedingt variierend viele Strahler auf diesen zweiten Brennpunkt fokussiert, um durch Leistungsaddition die geforderte Flussdichte zu erreichen. Dafür müssen die in Tabelle 5.4 angegebenen Anforderungen in den beschriebenen Versuchen untersucht und der Reflektor bis zu der Erfüllung dieser optimiert werden.

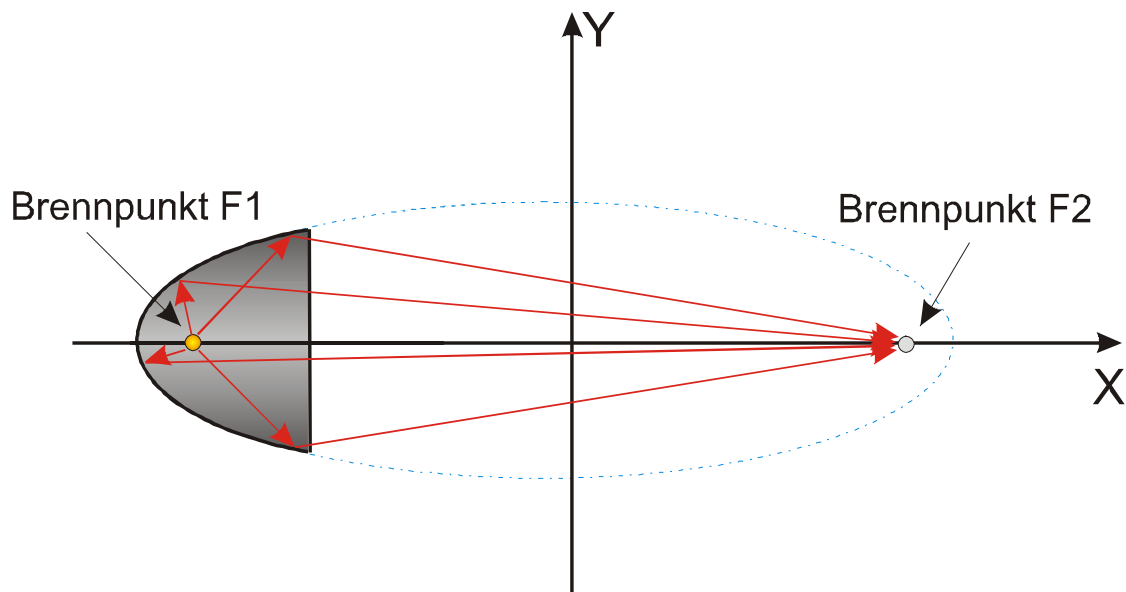


Abbildung 23: Reflexion des Xenon-Lichtes [15]

Die Anforderungen an den Reflektor lassen sich in a) *geometriegebundene Anforderungen an die Ellipse* und b) *oberflächengebundene Anforderungen an die Beschichtung* differenzieren [2]. Während die in Tabelle 5.4 markierten Anforderungen in den hier beschriebenen Untersuchungen nachgewiesen werden, sind die übrigen Anforderungen zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführungen (März - Mai 2016) als gegeben vorausgesetzt.

Tabelle 5.4: Anforderungen an den Reflektor [2]

Geometrische Anforderungen	Oberflächen Anforderungen
Nachweis der Fertigungsgenauigkeit des Reflektors	Hohe Reflektivität im Lichtspektrum von 400nm bis 1200nm
Homogene Reflektorinnenfläche	Mittlere Oberflächen-Rauigkeit von max. 50nm
Gesamtflussdichte (mHLS) von 11000 kW/m ²	Temperaturbeständigkeit mind. 100°C
Reflektorform muss einem idealen Ellipsoid-Ausschnitt entsprechen	Abriebfeste transparente Schutzbeschichtung
	Nachweis der Festigkeit der Beschichtung
	Punktgenau Reflektion der Beschichtung

In einer ersten Prüfung wird der Reflektor mit einem Tachymeter (Abbildung 24) vermessen, wodurch Aussagen über die Fertigungsgenauigkeit getroffen werden können. Es wird geprüft, ob die Form des Reflektors nach der Herstellung (Metalldrü-

cken) den theoretisch ermittelten und geforderten Qualitätsmerkmalen entspricht. Die beschriebene Methode dient der tendenziellen Annäherung und soll als Grundlage für weitere, zielgerichtete Untersuchungsvorgänge genutzt werden.

Folgende Mess- und Prüfmittel werden verwendet:

- Winkelmess-System Leica TS30 (Tachymeter)
- Messprisma (Leica GRZ 101) zum Bestimmen der Nullpunkte
- Prototyp-Reflektor
- Gliedermaßstab zum ermitteln des Reflektordurchmessers

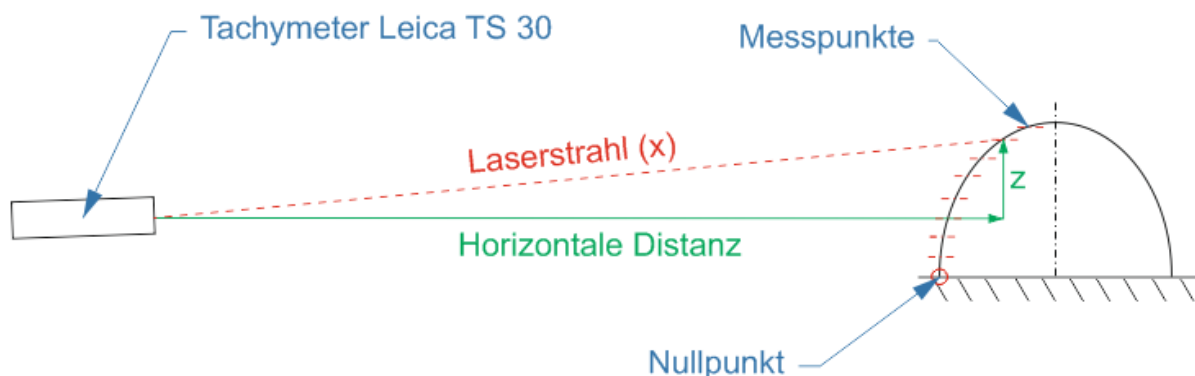


Abbildung 24: Versuchsaufbau Oberflächenvermessung

Die Ergebnisse der Messung mit dem Tachymeter werden mit dem bestehenden CAD-Reflektormodell überprüft. Für diesen Zweck wird das Winkelmess-System *Leica TS 30* für den Prüfungsfall eingestellt und der Nullpunkt des Koordinatensystems festgelegt (Abbildung 24). Dieser wird im Anschluss als Referenzwert für den Datenabgleich von Messwerten und CAD-Werten verwendet.

Auf der Außenseite des Reflektors werden 8 Messpunkte linear über die Reflektoroberfläche (Abbildung 25) markiert. Mit dieser Methode werden die x-, y-, z-Werte sowie die horizontale Distanz (Abbildung 24) ermittelt. Da an dieser Stelle lediglich die Kontur des Reflektors untersucht wird, wird von einer Betrachtung der x- und y-Werte abgesehen.



Abbildung 25: Messpunkte am Reflektor

Die ermittelten Werte der horizontalen Distanz und die Höhenverschiebung (z-Achse) werden auf den Diagrammachsen (Abbildung 26) gegeneinander aufgetragen. Um die Konturdifferenzen zu veranschaulichen sind die Messwerte der gemessenen Kontur mit dem Faktor 10 vergrößert. Dadurch wird erkennbar, dass die gemessene Reflektorform von der idealen Form (CAD) abweicht. Tabelle 5.5 veranschaulicht die Abweichungen für jede Messposition.

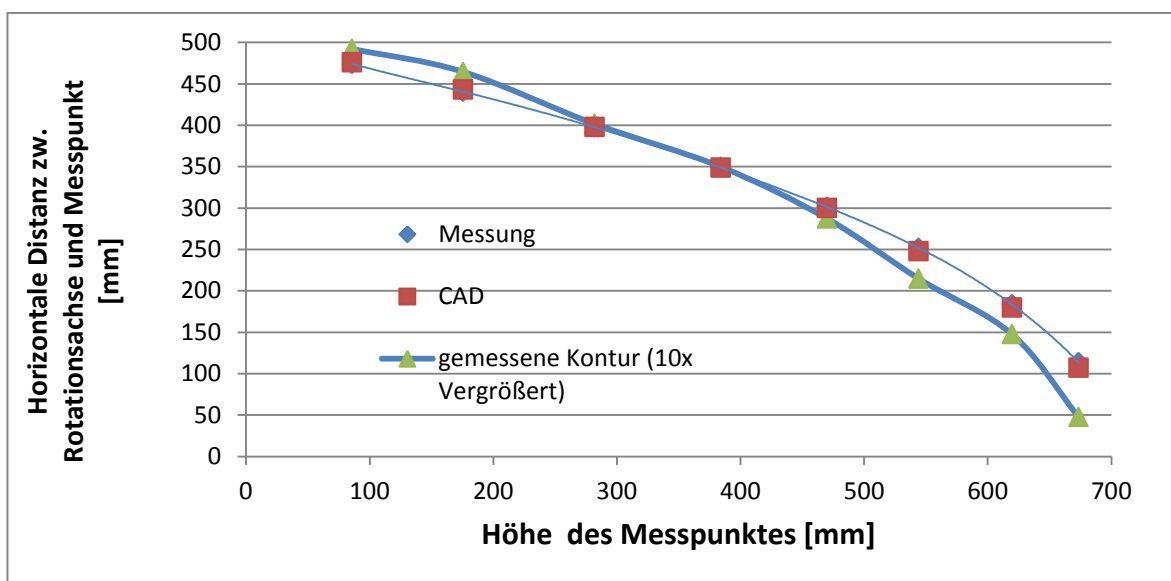


Abbildung 26: Vergleich der Messwerte und CAD-Werte

Tabelle 5.5: Maßabweichungen der Messpositionen

Messposition	Abweichung [mm]
1	1,8
2	2,4
3	0,4
4	0,1
5	1,4
6	3,7
7	3,6
8	6,6

Da die beschichtete Innenseite des Reflektors durch die Anbringung der Messpunkte nicht beschädigt werden darf, kann ausschließlich eine Vermessung der Außenseite durchgeführt werden. Die Wandstärke des Reflektors kann, bedingt durch das Drückverfahren, vom Sollwert abweichen. Daher ist an dieser Stelle eine Messungsgenauigkeit zu erwarten.

Des Weiteren ist der Reflektordurchmesser mit einem Gliedermaßstab ermittelt worden, wodurch weitere Messungsgenauigkeiten mit einbezogen werden müssen.

Aus diesen Gründen kann eine **Messungsgenauigkeit von +/- 3mm** nicht ausgeschlossen werden.

Zunächst fällt auf, dass die Messpositionen 6-8 (Tabelle 5.5, rot) erhöhte Abweichungen aufweisen, was auf eine weitere Ungenauigkeit hinsichtlich der Messungen deutet. Erklären lässt sich dies durch den Anbringungswinkel der Messpunkte auf dem Reflektor [16]: Durch große Winkelabweichungen von der Senkrechten (Abbildung 25, Pos. 6-8) wird der Laserstrahl zu stark gestreut, was zu ungenauen Messergebnissen führt. Daher liefern diese Messwerte nur hinreichend genaue Aussagen über die tatsächliche Oberflächenkontur.

Im direkten Vergleich der Messwerte und der CAD-Werte ist eine Maßabweichung (Tabelle 5.5) bis zu 6,6mm festzustellen. Durch die Vernachlässigung der Positionen 6-8 ist die maximal gemessene Abweichung 2,4mm. Die tendenzielle Abweichung bestätigt die falsche Reflektorform und die Notwendigkeit einer Formänderung.

Um geeignete Änderungsmaßnahmen in der Reflektorherstellung durchzuführen, muss zuvor noch eine qualitative Aussage über das Reflektionsverhalten des Prototypreflektors getroffen werden. Trotz des simplen Versuchsaufbaus (Abbildung 28) ist diese Durchführung von hoher Relevanz für die Fertigung der Reflektoren sowie deren Beschichtung. Bei der Sichtprüfung der Reflektorbeschichtung fällt zunächst auf, dass diese nicht die gewünschte Oberflächenhomogenität aufweist (Abbildung 27). In diesem Versuch soll die Annahme überprüft werden, dass die „Rillen“ eine Streuung des reflektierten Lichtes hervorrufen und auch die Leistung der gesamten Anlage signifikant mindern.



Abbildung 27: Rillen in der Reflektoroberfläche

Die in Abbildung 28 aufgeführten Reflektionsmessung werden folgende Mess- und Prüfmittel verwendet:

- Horizontal beweglicher Positionierungslaser
- Beschichteter Reflektor
- mm-Messskala im Reflektorzentrum (Rotationsachse)

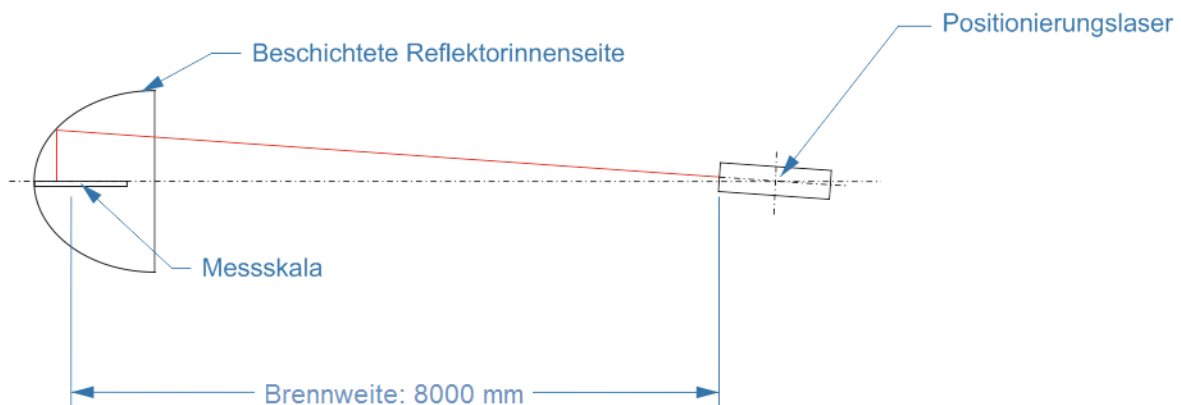


Abbildung 28: Versuchsaufbau der Reflektionsmessung

Der Positionierungslaser wird in einem Abstand von 8m (entspricht der Brennweite) mittig zum Reflektor positioniert. Ein in die Lampenfassung verschraubter Aluminiumstab mit einer mm-Skala soll die Abmessungen der Xenon-Kurzbogenlampe simulieren. Mit einer händischen horizontalen Verstellung des Lasers wird die Innenfläche des Reflektors abgefahren. Da die Auftreffposition des Lasers auf die Reflektionsschicht schwer zu erkennen ist, wird diese mittels eines weißen Blattes festgestellt. Im Idealfall bündeln sich die Laserstrahlen in dem zuvor berechneten ersten Brennpunkt des Reflektors (Abbildung 23, F1).

In Abschnitt 6.4 werden die Ergebnisse der Versuchsdurchführung ausgewertet.

5.5 Messung der Peak-Flussdichte des Reflektors

Zuvor ist die Methodik zur Untersuchung der Eigenschaften des ersten Prototypreflektors beschrieben. Für aussagekräftigere Ergebnisse muss das Bestrahlungsverhalten genauer untersucht werden. Einwandfreie Reflektionseigenschaften bilden die wichtigste Voraussetzung für den späteren Versuchsbetrieb. Deshalb besteht das Ziel darin, die theoretisch ermittelte Peak-Flussdichte eines Xenon-Strahlers von $\approx 75\text{kW/m}^2$ ($11000\text{ kW/m}^2/149$ Module) zu reproduzieren [9].

Abbildung 29 zeigt die theoretisch ermittelte Flussdichteverteilung des gesamten modularen Hochleistungsstrahlers.

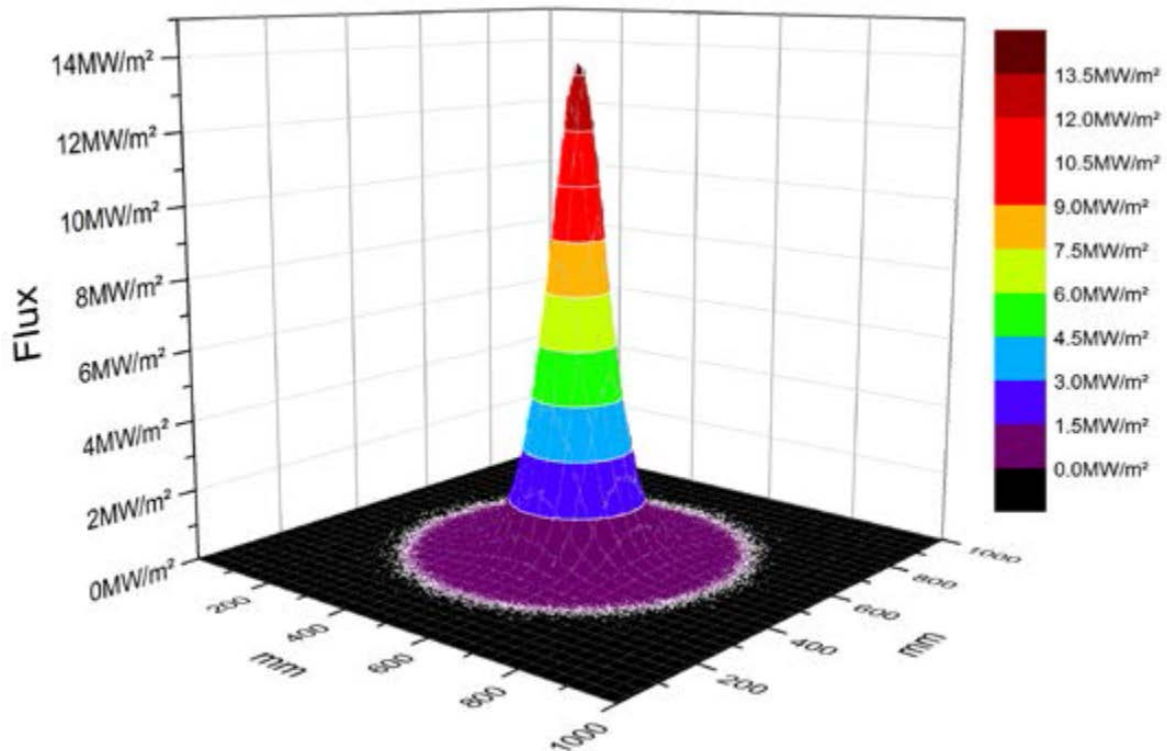


Abbildung 29: Theoretisch ermittelte Flussdichteverteilung des gesamten modularen Hochleistungsstrahlers [9]

An dieser Stelle wird ein reproduzierbarer Versuchsablauf zur Vermessung der Peak-Flussdichte vorgestellt. Es wird ein stetig und aufeinander aufbauender Optimierungsprozess beschrieben. Das Ziel der Untersuchung ist die Verifizierung der theoretischen Strahlungsleistung und Flussdichte. In Abbildung 30 sind die folgenden Mess- und Prüfmittel im Versuchsaufbau gezeigt:

- Prototyp **synlight** -Xenon-Strahlermodul
- Messrechner mit Messsoftware
- Versuchstarget mit Radiometer und Wasserkühlung
- Wärmebildkamera mit Graufiltern

⇒ Ergebnis:

Verifizierung der theoretischen Strahlungsleistung und Flussdichte

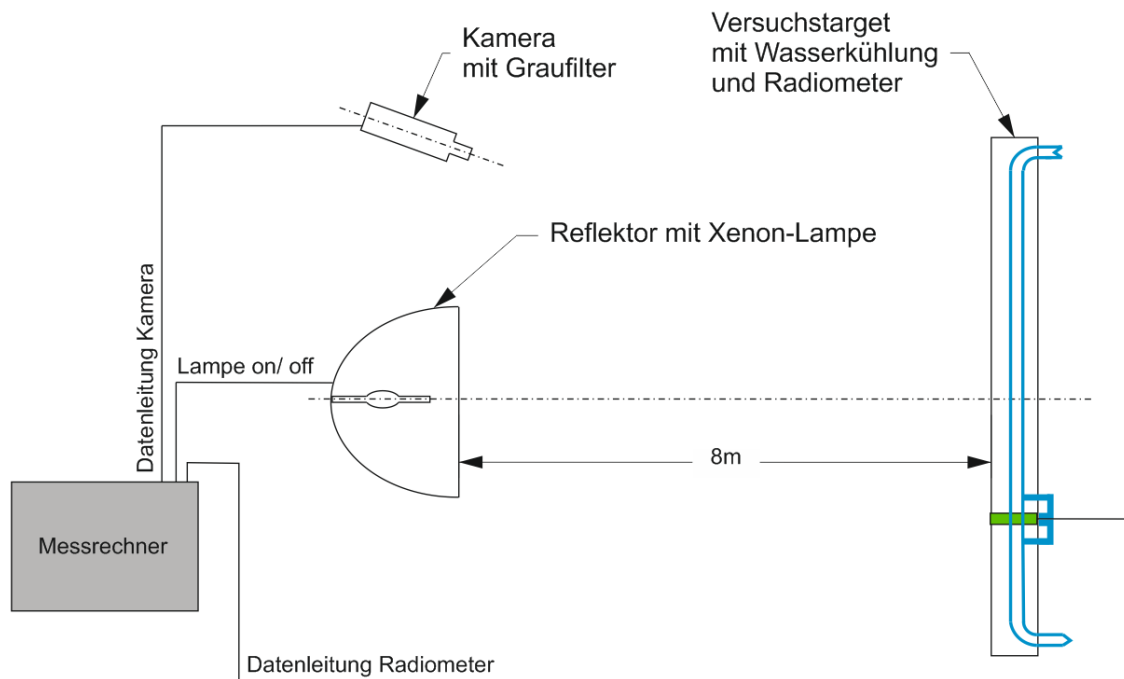


Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Prüfung der Reflektionseigenschaften

Der Ablauf des Versuches gliedert sich in die folgenden Arbeitsschritte:

1. Der zu prüfende Reflektor muss in die vorgesehene Haltestruktur montiert werden.
2. Die Xenon-Kurzbogen-Lampe wird unter Berücksichtigung der Sicherheitsvorschriften in den Kathodensockel eingesetzt und das Anodenkabel am Zündgerät verschraubt.
3. Die elektrischen Anschlüsse des Gleichrichters, Zündgerät und Schaltschrankes (Motorensteuerung) müssen verbunden werden.
4. Wenn die Wasserkühlung des Targets und des Radiometers gewährleistet ist, kann unter der Berücksichtigung des Schutzes vor hoher UV-Strahlung die Xenon-Lampe eingeschaltet werden.
5. Durch die Fokussierung wird der Lichtbogen der Lampe genau in den Brennpunkt des Reflektors gelegt um die maximale Leistung zu erhalten. Hierfür wird die Lampenposition über drei Stellschrauben (Abbildung 31) verändert bis die Wärmebildkamera ein Leistungspeak an der gewünschten Target-Position aufnimmt.

6. Das Radiometer nimmt die Strahlungsintensität im Fokuspunkt auf und muss softwarebedingt auf jede spezifische Messsituation erneut eingestellt werden. Ebenso muss der Messbereich auf dem Target festgelegt werden.
7. Nach dem keine Leistungssteigerung mehr durch die Einstellung des Moduls erfolgt, können die Messdaten aufgenommen werden. Die Software stellt die Ergebnisse in Diagrammen dar.

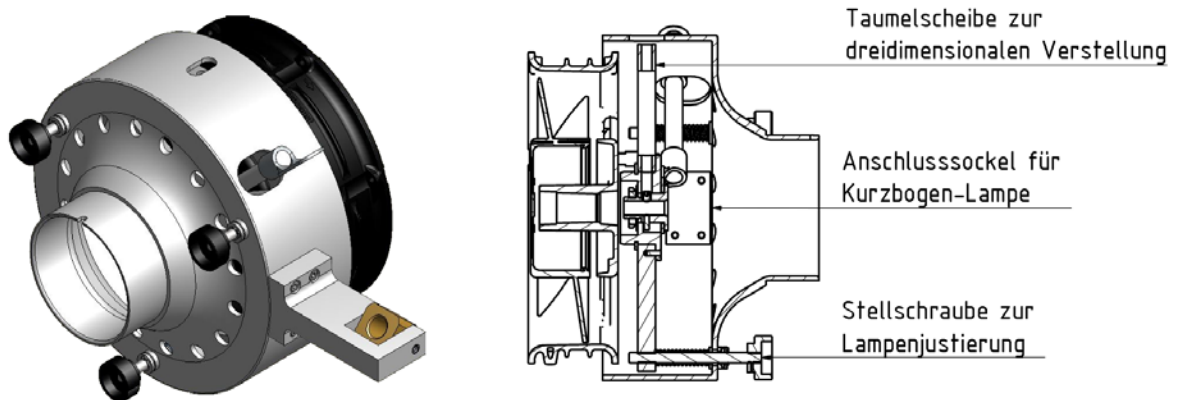


Abbildung 31: Justierung der Lampe

Bei der Bestrahlungsdurchführung mit dem ersten Reflektor sind Leistungsabweichungen zu erwarten, da in Abschnitt 5.3 eine Formabweichung und Oberflächenfehler (Rillen) beschrieben sind. Der Reflektor hat alle Fertigungsschritte (Metalldrücken und Beschichten) durchlaufen. Diese Bestrahlung soll die erkannten Fehler verifizieren. Die gewonnen Messwerte bilden die Ausgangsleistung für den Optimierungsprozess.

In der *Diskussion der Ergebnisse* (Abs. 6.5) wird die Versuchsdurchführung und Auswertung detailliert beschrieben.

6 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die in Abschnitt 5 *Methodik und Konstruktion* erzielten Ergebnisse vorgestellt, dokumentiert und ausgewertet, so dass eine Aussage über den Nutzen für den Projektverlauf getroffen werden kann.

6.1 Auswertung der Wartungsbünnen-Konstruktion

In Abschnitt 5.1 *3D-Konstruktion der Wartungsbühne* wird die Entwicklung des *Bünnenmodell A* (Abbildung 8) bzw. *Bünnenmodell B* (Abbildung 9) erläutert.

Das *Bünnenmodell A* ist aufgrund der Detailgenauigkeit besonders für Bauteilkonstruktionen und -verbesserungen geeignet. Durch das Modell können unter anderem die Abmessungen der Strahlverkabelungen bestimmt und Bauteile durch Kollisionprüfungen entwickelt werden.

In Abschnitt 5.2 wird die Konstruktion der Energiekettenanbindung durch eine Kollisionsprüfung am *Bünnenmodell A* beschrieben. Um die Funktion der Konstruktion festzustellen, wird in Abschnitt 6.2 *Validierungen der Energiekettenanbindungen am Prototypmodul* die Einbausituation dargestellt.

Das *Bünnenmodell B* bewährt sich besonders bei dem tatsächlichen Aufbau der Wartungsbühne in der Strahlerhalle und der damit verbundenen Lösung von konstruktiven Fragen. Diese entstehen durch das Zusammenarbeiten verschiedener Unternehmen am Projektaufbau und ist somit als Hilfestellung bei der Überprüfung und Freigabe von Einbaupositionen (z.B. von Schaltschränken) unumgänglich. Abschließend kann gesagt werden, dass der Wartungsbünnenaufbau mit den hier vorgestellten Bünnenmodellen fristgerecht realisiert werden konnte.

Die folgenden Abbildungen zeigen die erfolgreiche Umsetzung der Konstruktionen. Der Wartungsbünnenaufbau konnte im Juni 2016 abgeschlossen werden.

Abbildung 32 zeigt die Wartungsbühne nach den Montagearbeiten und vor der Anbringung der Xenon-Strahler. Die baulichen Ausmaße der Anlage werden durch den Größenunterschied zum PKW verdeutlicht.



Abbildung 32: Abgeschlossener Wartungsbühnenaufbau

In der Detailaufnahme (Abbildung 33) sind Stahlermodulanbringung und die Gleichtrichterhalterungen zu erkennen. Nach einer Vermessung der fertigen Wartungsbühne kann die vorgegebene Montagetoleranz von $\pm 5\text{mm}$ positiv bestätigt werden.



Abbildung 33: Detailaufnahme der Strahlermodulanbringung

6.2 Validierung der Energiekettenanbindung am Prototypmodul

In Abschnitt 5.2 werden die Konstruktionsschritte der Energiekettenanbindung aufgeführt. An dieser Stelle wird die Funktion der entworfenen Baugruppe am Prototypmodul verifiziert.

Im eingebauten Zustand weist die Energiekette zwar den berücksichtigten Biegeradius von 100 mm auf, dennoch kollidiert die Energiekette beim Verfahren des Moduls mit den angebrachten Anbindungselementen.

Durch eine zu große Vorspannung, V_{sp} (Abbildung 34), der Energiekette wird die maximale Baugröße der Energiekette überschritten. Die Vorspannung soll dem Gewicht der verbauten Kabel entgegenwirken und ein Durchhängen der Energiekette verhindern. Der Produktionsfirma *EKD-Gelenkrohr* ist es allerdings möglich, durch ein hydraulisches Andrückverfahren die Vorspannung für verschiedene Anwendungsfälle zu bestimmen [17].

In diesem Fall wurde die zu große Vorspannung von 13 mm/m auf 5 mm/m verringert. Diese Optimierungsmaßnahme sorgt dafür, dass sich die Vorspannung, der mit Kabeln belegten Energiekette, auf annähernd Null reduziert. Dadurch wird eine Bauteilkollision im Betriebszustand verhindert.

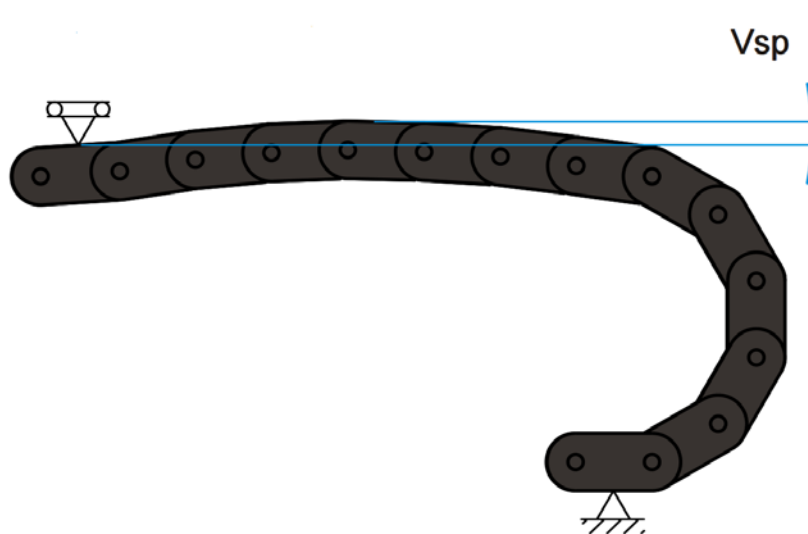


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Vorspannung [17]

In Abbildung 35 ist die Energiekette mit den dazugehörigen Anbindungselementen zu sehen. In Abbildung 36 und Abbildung 37 sind vordere, fixe bzw. die hintere, bewegliche Energiekettenanbindung in Detailaufnahmen gezeigt.



Abbildung 35: Komplette Energiekettenbaugruppe



Abbildung 36: Vordere (fixe) Energiekettenanbindung



Abbildung 37: Hintere (bewegliche) Energiekettenanbindung

6.3 Praktische Anwendung der Positionierungsmethode

Die in Abschnitt 5.3 entwickelte Methode dient als Hilfestellung bei der Montage der Strahlermodule an die Wartungsbühne. Die theoretischen Grundlagen und die Beschreibung der Methode sind wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Es ist zu erwarten, dass die Ausrichtung der Strahlermodule auch mit dieser Prüfmethode viel Zeit in Anspruch nehmen wird. Daher muss vor der Ausrichtung mit dem Tachymeter eine Vorausrichtung (Abstandslehren und Digitalwasserwaage) stattfinden. Anschließend muss die Position nach der beschriebenen Methode überprüft werden. Bei einer guten Vorausrichtung ist zu erwarten, dass keine Nachkorrekturen, nach der Positionsprüfung durchgeführt werden müssen. Die Abbildung 38 zeigt die am Modul verbauten Stellschrauben zur Positionseinstellung.



Abbildung 38: Stellschrauben zur Positionierung

Da die Positionierungsmethode (bedingt durch den Montagestand der Wartungsbühne) bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht erprobt werden konnte, werden an dieser Stelle Verfeinerungen der Methode aufgeführt die bei der praktischen Anwendung beachtet werden müssen:

- ⇒ Die Bedieneroberfläche des Tachymeters muss für den Vermessungsfall spezifisch eingestellt werden.
- ⇒ Das Koordinatensystem muss auf die Bezugsebenen der tatsächlichen Wartungsbühne positioniert werden, damit die Ergebnisse mit dem CAD-Modell kompatibel sind.
- ⇒ Der Abstand zwischen dem Messprisma zur Vermessung der Bezugsebenen und dem Magnethalter muss ermittelt werden. Anschließend muss dieser von dem Gesamtmaß abgezogen werden, um die genaue Position der Bezugsebenen zu erhalten.

6.4 Auswertung der Reflektoroptimierung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse und die Auswertung der unter Punkt 5.4 beschriebenen Reflektionsmessungen vorgestellt. Die Methode dient zur Überprüfung der Reflektorform.

Die untersuchten Messpunkte spiegeln nur drei von vielen Messpunkten (Abbildung 39) wieder. Entscheidend für die Darstellung der Ergebnisse sind nicht die absoluten Koordinaten, sondern die Form des reflektierten Laserpunktes und die Abweichung vom idealen Brennpunkt (F1).

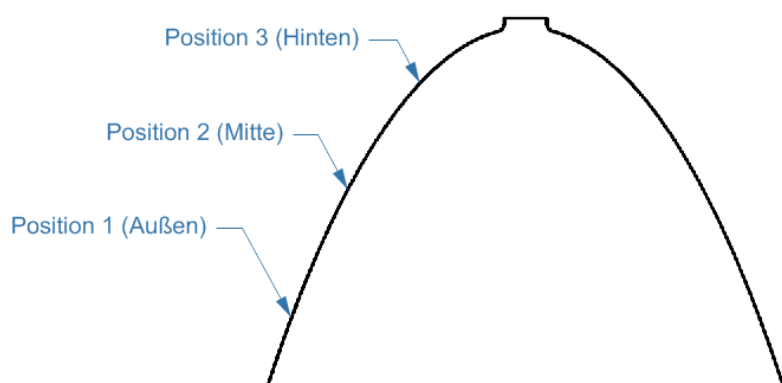
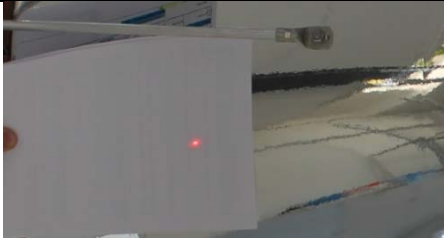







Abbildung 39: Messpositionen der Reflektionsmessung

Pos. 1	 Abbildung 40: Auftreffposition (Außen)	 Abbildung 41: Langgezogene Reflektion (Außen)	<u>Messwert:</u> 180-190mm
			<u>Abweichung F1:</u> +28...+38mm
Pos. 2	 Abbildung 42: Auftreffposition (Mitte)	 Abbildung 43: Langgezogene Reflektion (Mitte)	<u>Messwert:</u> 170-175mm
			<u>Abweichung F1:</u> +18...+23mm
Pos. 3	 Abbildung 44: Auftreffposition (Hinten)	 Abbildung 45: Punktförmige Reflektion (Hinten)	<u>Messwert:</u> 144mm
			<u>Abweichung F1:</u> -8mm

An den drei exemplarischen Positionen ist zu erkennen, dass die „Rillen“ eine Reflektion der Laserstrahlen in verschiedenen Winkeln verursacht (Abbildung 40-45). Dieses Verhalten ermöglicht keine zweckgemäße Reflektion vom ersten zum zweiten Brennpunkt. Im Idealfall müssten alle Reflektionen im gleichen Brennpunkt gebündelt sein. Stattdessen treten oftmals langgezogene Reflektionen (Abbildung 41; Abbildung 43) auf, wodurch Rückschlüsse auf eine mangelnde Oberfläche getroffen werden können. Es ist zu erwarten, dass statt einem zweiten Brennpunkt ein Brennbe- reich vorhanden ist. Dadurch wird es keinen Leistungspeak bei der vorgegebenen Brennweite von 8m geben.

Die in Abschnitt 5.4 *Optimierung der Reflektorform* vorgestellten Messungen weisen eine Formabweichung bis zu 2,4mm von der idealen Ellipsoid-Form nach. Diese Tendenz und die anschließend untersuchten ungenauen Reflexionseigenschaften des Prototypreflektors bestätigen die Notwendigkeit einer Änderung der Reflektor-

herstellung. Bei der Bestimmung der neuen Reflektorparameter ist keine Tachymetervermessung durchgeführt worden, da diese keine genauen Ergebnisse sondern nur Tendenzen liefert. Jedoch erbringt die CNC-Fertigung eine wesentlich höhere Genauigkeit und eine bessere Oberflächengüte als die konventionelle Fertigung.

Die Wirkung der Oberflächenverbesserung wird durch eine Sichtprüfung festgestellt. So ist in Abbildung 46 ein Vergleich der alten und der verbesserten Reflektoroberfläche zu sehen. Nach der Umsetzung der vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen (schleifen und polieren) der Reflektorinnenfläche sind nur noch geringe Oberflächenfehler (Rillen) vorhanden. Die Oberfläche ist annähernd homogen.



Abbildung 46: Vergleich der alten (links) und neuen (rechts) Reflektoroberfläche

⇒ Es kann festgestellt werden, dass die Reflektorform einerseits von Idealform abweicht. Andererseits wird die Leistung durch die „Rillen“ gemindert. Diese Erkenntnisse begründen die Notwendigkeit der Änderungen in der Reflektorherstellung und der Beschichtung durchzuführen.

Der folgende Abschnitt wertet die Ergebnisse der Reflektorverbesserungen mittels einer Peak-Flussdichtemessung aus.

6.5 Auswertung der Peak-Flussdichtemessung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der in Abschnitt 5.5 beschriebenen Peak-Flussdichtemessung dokumentiert und ausgewertet.

Abbildung 47 zeigt eine große Formabweichung von der theoretischen Gaußschen Flussdichteverteilung [13]. In der Lichtpunktaufnahme (Abbildung 47) der Versuchskamera ist zu erkennen, dass die geforderte Fokussierung des Lichtkegels auf einen Punkt nicht möglich ist. Der Größte der drei Leistungspeaks des Reflektors liegt zwar annähernd auf dem theoretischen Brennpunkt; die max. Flussdichte beträgt aber lediglich 44 kW/m^2 (Abbildung 47) statt der erwarteten über 100 kW/m^2 .

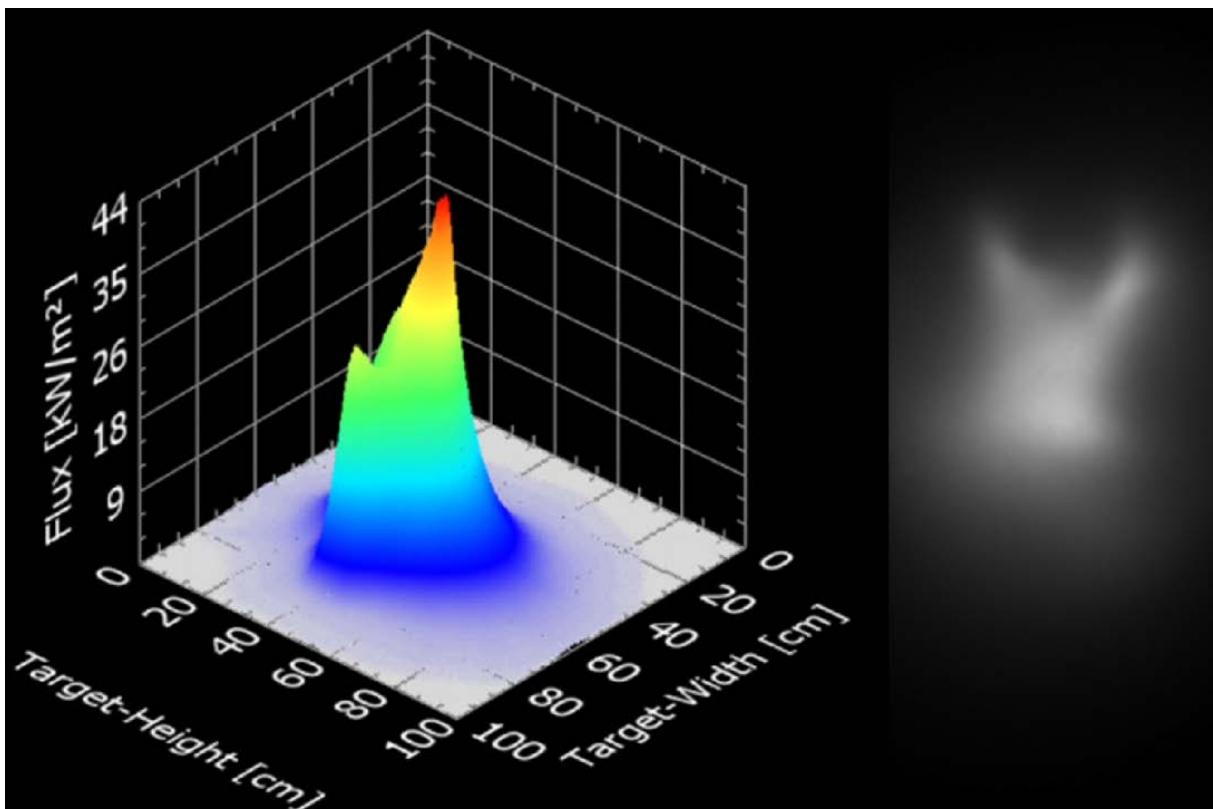


Abbildung 47: Flussdichteverteilung des ersten Reflektors (beschichtet) und tatsächlicher Lichtpunkt auf dem Versuchstarget

Durch eine Verbesserung der zuvor festgestellten Kontur- und Beschichtungsmängel soll die zu geringe Gesamtleistung auf den erforderlichen Wert gesteigert werden.

Da die beschriebenen „Rillen“ (Abschnitt 5.3) vor und nach der Aufbringung der Reflektionsbeschichtung vorhanden sind, wird vermutet, dass diese eine Folge des Metalldrückens sind. Durch Schleifen und Polieren der unbeschichteten Reflektorinnen-seite wird eine Oberflächengüte von $Ra \approx 0,1$ erreicht.

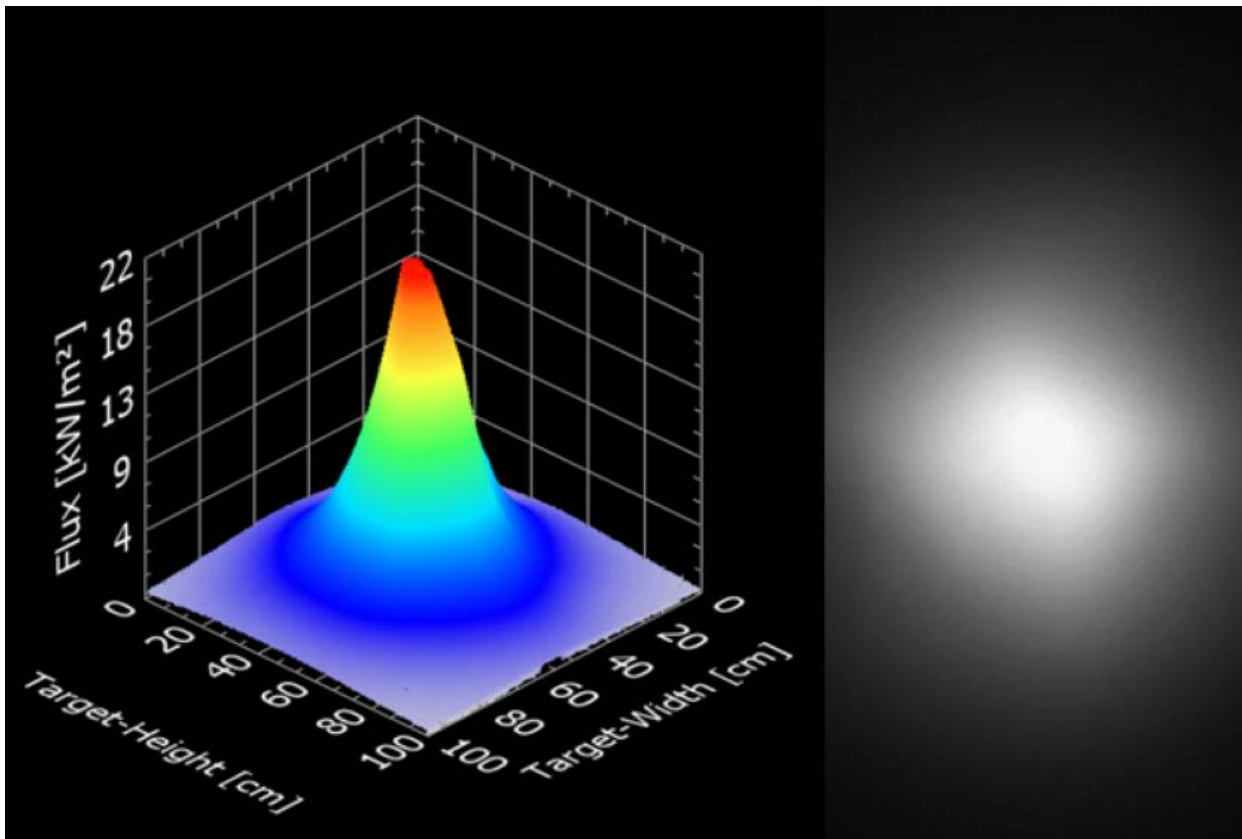


Abbildung 48: Flussdichteverteilung des oberflächenverbesserten Reflektors (unbeschichtet, poliert) und tatsächlicher Lichtpunkt auf dem Versuchstarget

Bei der Bestrahlung mit dem nachbearbeiteten, oberflächenverbesserten Reflektor wird nur die polierte Aluminiumfläche als Reflektionsfläche genutzt. Trotz der guten Reflektionseigenschaften von poliertem Aluminium [18] können die Ergebnisse keine verwertbare Aussage über die tatsächliche Flussdichte liefern. Festzustellen ist, dass die nachbearbeitete, homogene Reflektoroberfläche einen positiven Einfluss auf die Normalverteilung des Lichtkegels (Abbildung 48) hat. Diese Feststellung wird durch die Aufnahme des tatsächlichen Lichtpunktes (Abbildung 48) bestätigt.

Die Beschichtung und die erneute Bestrahlung mit dem Reflektor zeigt eine Steigerung der Flussdichte auf $\approx 60 \text{ kW/m}^2$ und liegt weiterhin weit unter dem geforderten Wert von $\approx 75 \text{ kW/m}^2$.

Um die Annahme des Brennbereiches (Abs. 5.3) zu prüfen, wurde der Abstand des Strahlers zum Target während der Messung vergrößert bzw. verkleinert. Abbildung 49 veranschaulicht, dass die Flussdichte ein Maximum ($\approx 60 \text{ kW/m}^2$; Abstand: 7,5m) erreicht, jedoch keine signifikante Änderung bei verschiedenen Distanzen vorhanden ist. Unmittelbar vor und nach dem 8m-Abstand (zweiter Brennpunkt) müssten die Flussdichten wesentlich kleiner sein. Dadurch wurde die Annahme des falschen Brennpunktes (bzw. Brennbereich) durch eine falsche Reflektorform bestätigt. Ferner lässt sich sagen, dass die Schwankungen der Flussdichte nicht sehr groß sind ($52 - 59,5 \text{ kW/m}^2$), sodass hier der Einfluss der Entfernung keine große Rolle spielt. Dies bestätigt nochmals die fehlerbehaftete Form des Reflektors.

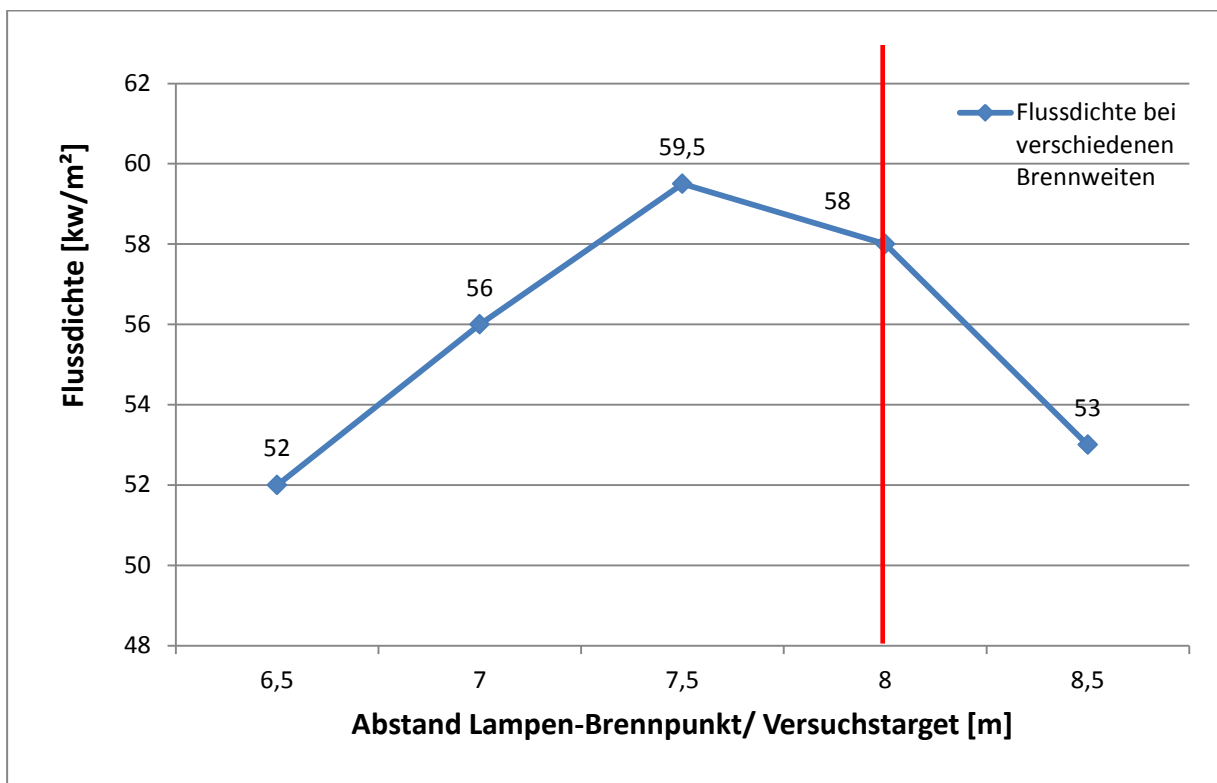


Abbildung 49: Flussdichte bei variabler Brennweite

Im weiteren Optimierungsprozess wurde das Metalldruckverfahren von einer konventionellen Fertigung auf eine CNC-Fertigung umgestellt. Durch das präzisere Fertigen sind die Formabweichungen von der idealen Kontur wesentlich geringer und die maximal erreichbare Flussdichte höher (Abbildung 50).

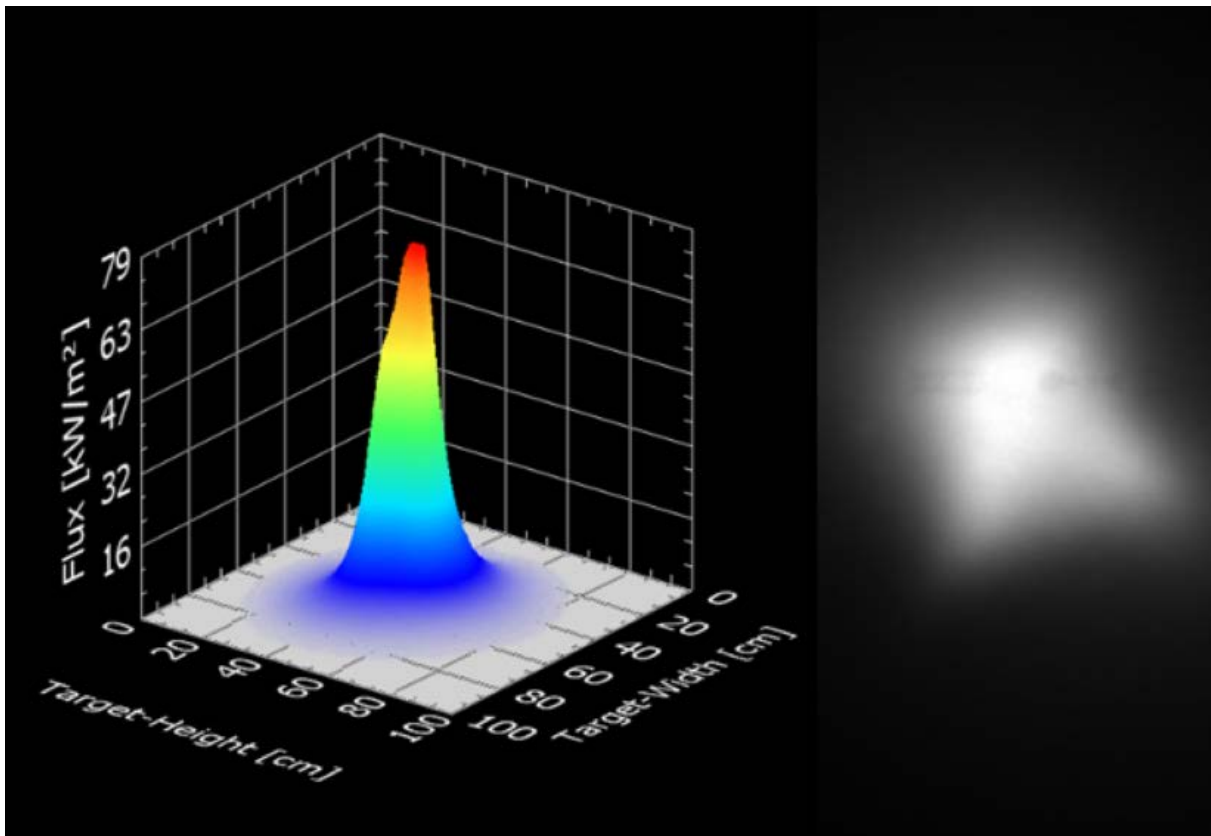


Abbildung 50: Flussdichteverteilung des formverbesserten, beschichteten Reflektors und tatsächlicher Lichtpunkt auf dem Versuchstarget

Die Feinjustierung der Anode und Katode zur Leistungssteigerung mittels eines Magneten blieb erfolglos. Für eine solche Untersuchung muss das Verhalten des Plasmakerns (Abbildung 51) mit einer Kamera beobachtet werden und eine Bohrung in den Reflektor eingebracht werden. Abbildung 50 zeigt, dass diese Bohrung eine geringe Abweichung von der optimalen Gaußschen Normalverteilung (Abbildung 29) bewirkt und spiegelt sich auch in dem nicht komplett zentrischen Lichtpunkt (Abbildung 50) wieder. Es ist zu erwarten, dass diese Peak-Flussdichte von 79 kW/m² ohne die Veränderung geringfügig größer ausfällt.



Abbildung 51: Plasmakern der Xenon-Kurzbogenlampe

Der vorgestellte Optimierungsnachweis zeigt den positiven Einfluss der Reflektoränderungen (Form, Oberfläche) auf die Peak-Flussdichte eines einzelnen Xenon-Strahlers. Der maximale Wert konnte im Laufe der Untersuchungen von 44 kW/m^2 auf $\approx 80 \text{ kW/m}^2$ gesteigert werden. Der in Abschnitt 5.3 festgestellte Brennbereich konnte verringert werden, sodass sich bei dem formverbesserten, beschichteten Reflektor ein fixer Brennpunkt feststellen lässt.

Die geforderte Einzelleistung von 75 kW/m^2 (Gesamtleistung: 11000 kW/m^2) kann somit reproduzierbar nachgewiesen werden. Durch dieses positive Ergebnis der Peak-Flussdichte von 79 kW/m^2 kann die Serienproduktion der benötigten 149 Reflektoren beginnen.

Des Weiteren darf der Einfluss der Lampenalterung auf die Peak-Flussdichte nicht vernachlässigt werden. Durch das versuchsbedingte häufige An- und Ausschalten der Kurzbogenlampe (Firma *Osram* [19]) ist der Verschleiß der Lampenmaterialien erheblich gestiegen und somit der Lampenwirkungsgrad stark gefallen. Durch das Austauschen der Xenon-Lampe gegen eine Neuwertige (Firma *Ushio* [20]) konnten bei annähernd gleicher elektrischer Leistung eine maximale Flussdichten bis zu 110

kW/m² festgestellt werden. Hinzu kommt, dass es sich um eine Digitallampe handelt, das heißt der Abstand zwischen Anode und Kathode ist deutlich kleiner und somit kommt der Lichtbogen einer punktförmigen Lichtquelle deutlich näher.

Abschließend kann gesagt werden, dass eine maximale Peak-Flussdichte von 11000 kW/m² unter der Annahme einer Leistungsaddition der 149 Strahler möglich ist [7].

Es muss weiterhin beachtet werden, dass die Lampen im optimalen Betriebszustand verwendet werden müssen. Das schließt das Einhalten der Betriebsbedingungen und maximale Betriebsstunden genauso ein wie die regelmäßige Wartung der Gesamtanlage.

Wie nachgewiesen werden konnte, hat die Reflektorqualität erheblichen Einfluss auf die Funktion der Anlage. Daher muss vor dem verbauen die Reflektionsschicht und die richtige Reflektorform der einzelnen Reflektoren überprüft werden.

7 FAZIT

Das Fazit besteht aus der abschließenden Zusammenfassung und einem Einblick in die zukünftigen Schritte des Projektes.

7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Abschlussarbeit stellt zuerst die Grundlagen der Sonnenlichtsimulation bzw. des Projektes vor und die daraus resultierende Zielsetzung. Im *Stand der Technik* wird in kurzer Form eine Übersicht über die Projektgliederung und die für das Verständnis dieser Ausarbeitung relevanten Themen dargestellt.

Der Hauptteil ergibt sich aus der Zielsetzung und teilt sich in die Abschnitte *Methodik und Konstruktion*, sowie die *Diskussion der Ergebnisse*. In diesen werden jeweils zuerst die konstruktiven Themen an der Wartungsbühne und anschließend die Verbesserungen am Reflektor behandelt. Die erhaltenen Ergebnisse bzw. getroffenen Entscheidungen in beiden Teilbereichen bauen aufeinander auf und sind auch so verschriftlicht.

In dem konstruktiven Teil wird die Vorgehensweise zur Problemlösung behandelt. Die Ergebnisse üben unmittelbaren Einfluss auf den Anlagenaufbau wie auch auf dessen spätere Funktion aus.

Im zweiten Aufgabenteil wird der Reflektoroptimierungsprozess bis zum Erreichen der gewünschten Flussdichte von 75 kW/m^2 beschrieben.

Die Ergebnisse aller Abschnitte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Konstruktion

- Die Energiekettenanbindung der Xenon-Strahlermodule wird auf der Grundlage der entwickelten Bühnenmodelle konstruiert und die Funktion am Prototypmodul überprüft.

- Um das Kollidieren der Strahlermodule in verschiedenen Positionen zu verhindern ist eine genaue Ausrichtung der Module von hoher Bedeutung. Für diesen Zweck wird eine Methode zur Positionierung vorgestellt und theoretisch belegt. Die praktische Funktion kann im Rahmen dieser Arbeit nicht voll erfasst werden. Die Methode basiert auch auf dem zuvor entwickelten Bühnenmodell.
- Der Aufbau der Wartungsbühne konnte durch die erstellten Konstruktionsmodelle frist- und funktionsgerecht abgeschlossen werden.

Verbesserungen an der Reflektorform

- Es werden die Anforderungen an den Reflektor und die notwendigen Untersuchungen zur Optimierung beschrieben und die Ergebnisse dargestellt. Das Resultat der Untersuchungen sind Änderungen im Herstellungsverfahren und die damit verbundene Form- und Oberflächenverbesserung.
- Zur Verifizierung der Leistungsparameter wird die Messung der Peak-Flussdichte vorgestellt und der Messprozess bis zum Erreichen des erforderlichen Ergebnisses von mindestens 75 kW/m^2 aufgeführt.

Durch die Überprüfung am Prototypmodul können die konstruktiven Elemente und die Peak-Flussdichte als gegeben angesehen werden. Bei der Methode zur Positionierung eines Strahlermoduls können bei der praktischen Anwendung noch geringfügige Änderungen auftreten.

7.1 Zukünftige Schritte

Die reproduzierbaren Bestrahlungsergebnisse belegten die technische Funktion des modularen Hochleistungsstrahlers **synlight** und lieferten somit eine Grundlage für spätere Funktionsbeschreibungen (z.B. Betriebshandbuch).

Die 3D-Modelle der Wartungsbühne werden während des Anlagenaufbaus für die Entwicklung von Montagekonzepten verwendet. Das Bühnenmodell B kann neben der entwickelten Positionierungsmethode für die Xenon-Scheinwerfer, die in naher Zukunft beginnen wird, auch für andere Vermessungsmethoden als Referenzwert herangezogen werden.

Die Verifizierung der Betriebsparameter des Prototypmoduls wurde mit dieser Ausarbeitung abgeschlossen. Jedoch besteht weiterhin die Notwendigkeit, nach dem vollendeten Anlagenaufbau, die Gesamtleistung festzustellen. Eventuelle Änderungen an dem Messverfahren können in diesem Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden.

Der Abschluss der Aufbauphase und die Inbetriebnahme der Anlage sind für Oktober 2016 geplant. Ab diesem Zeitpunkt steht der modulare Hochleistungsstrahler **synlight** der Solarforschung zur Verfügung. Da es bisher noch keine vergleichbaren Simulationmöglichkeiten gibt wird erwartet, dass sowohl DLR-interne, als auch externe Forschungsintuitionen großes Interesse an der Anlage zeigen werden [1].

Eine thermochemische Wasserstofferzeugungseinheit (Abs. 3, AP 7-8) soll als Referenzversuch dienen und die wissenschaftliche Relevanz verifizieren [2].

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR), „DLR stellt 2016 weltweit größte künstliche Sonne fertig,“ *IWR Online*, 21 Januar 2016.
- [2] K. Wieghardt, C. Raeder und K.-H. Funken, „Machbarkeitsstudie modularer Hochleistungsstrahler,“ DLR, Köln, 2014.
- [3] M. Schmidt, „Planung von Energieparks. Eine Untersuchung der möglichen Vorteile und Hemmnisse für die Ausweisung von Flächen zur Nutzung erneuerbarer Energien in kombinierten und dezentralen Anlagensystemen,“ Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg, 2007.
- [4] B. Hoffschmidt, Interviewee, *Pressemittteilung: DLR stellt 2016 weltweit größte künstliche Sonne fertig*. [Interview]. 21 Januar 2016.
- [5] P. Schwarzbözl, K. Hennecke, M. Ebert und G. Dibowski, „Das solarthermische Versuchskraftwerk Jülich - Entwicklung, Umsetzung und Perspektiven,“ DLR, Köln, 2006.
- [6] K. Wieghardt und D. Laaber, „Aufgabenstellung: Verifikation und konstruktive Verbesserung des Prototyp-Moduls für den Modularen Hochleistungsstrahler,“ DLR, Jülich, 2015.
- [7] K.-H. Funken, K. Wieghardt, G. Dibowski und B. Hoffschmidt, „Solar Simulator Juelich - The world´s largest artificial sun,“ in *SolarPACES*, Cape Town, South Africa, 2015.
- [8] K. Wieghardt, D. Laaber, V. Dohmen und P. Hilger, *Interne Absprachen - Projekt Synlight*, Jülich: DLR, 2016.
- [9] K. Wieghardt, K.-H. Funken, G. Dibowski, B. Hoffschmidt, D. Laaber , P. Hilger und K.-P. Eßer, „SynLight – The World’s Largest Artificial Sun,“ 9 Oktober 2015.
- [10] S. Hesse, in *Lexikon der elektrischen Antriebe*, Denkendorf, Festo Didactic GmbH & Co.KG, 2004, p. 46.
- [11] L. Papula, *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 3: Vektoranalysis und Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung.*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2001.

- [12] Ingenieur-Büro für Bauwesen; Dipl.-Ing. Manfred Schulz, „Wartungsbühne, Konstruktions- und Positionsplan,“ Jülich, 2016.
- [13] K.-P. Eßer und C. Raeder, Entwicklung einer Zielpunktstrategie und Flussdichteprognose für den modularen Hochleistungsstrahler des DLR in Jülich, Jülich, Köln: DLR, 2015.
- [14] Leica Geosystems AG, Leica TS30/TM30 - User Manual, Heerbrugg, Schweiz, 2013.
- [15] G. Dibowski, Betriebshandbuch Hochleistungsstrahler HLS, Köln: DLR, 2011.
- [16] G. Crolly, „Streuung,“ in *Laserstreuung - Grundlagen*, Idar-Oberstein, Fritsch GmbH, p. 2/7.
- [17] EKD-Gelenkrohr, „Energieführungsketten und Energiekettenführungssysteme in Stahl und Kunststoff,“ Erkrath, 2015.
- [18] F. Ostermann, „Konstruieren mit Aluminium,“ in *Anwendungstechnologie Aluminium*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2015, pp. 685-721.
- [19] Osram GmbH, „Product datasheet - XBO 7000 W/HS XL OFR,“ München , 2016.
- [20] Ushio Deutschland GmbH, „Specification Sheet - Xenon Short Arc Lamp DXL-65SC,“ Steinhöring, 2010.
- [21] D. Chopra, Development and Implementation of a Control Concept for mHLS and the Complete mHLS Plant, Jülich: DLR, 2016.

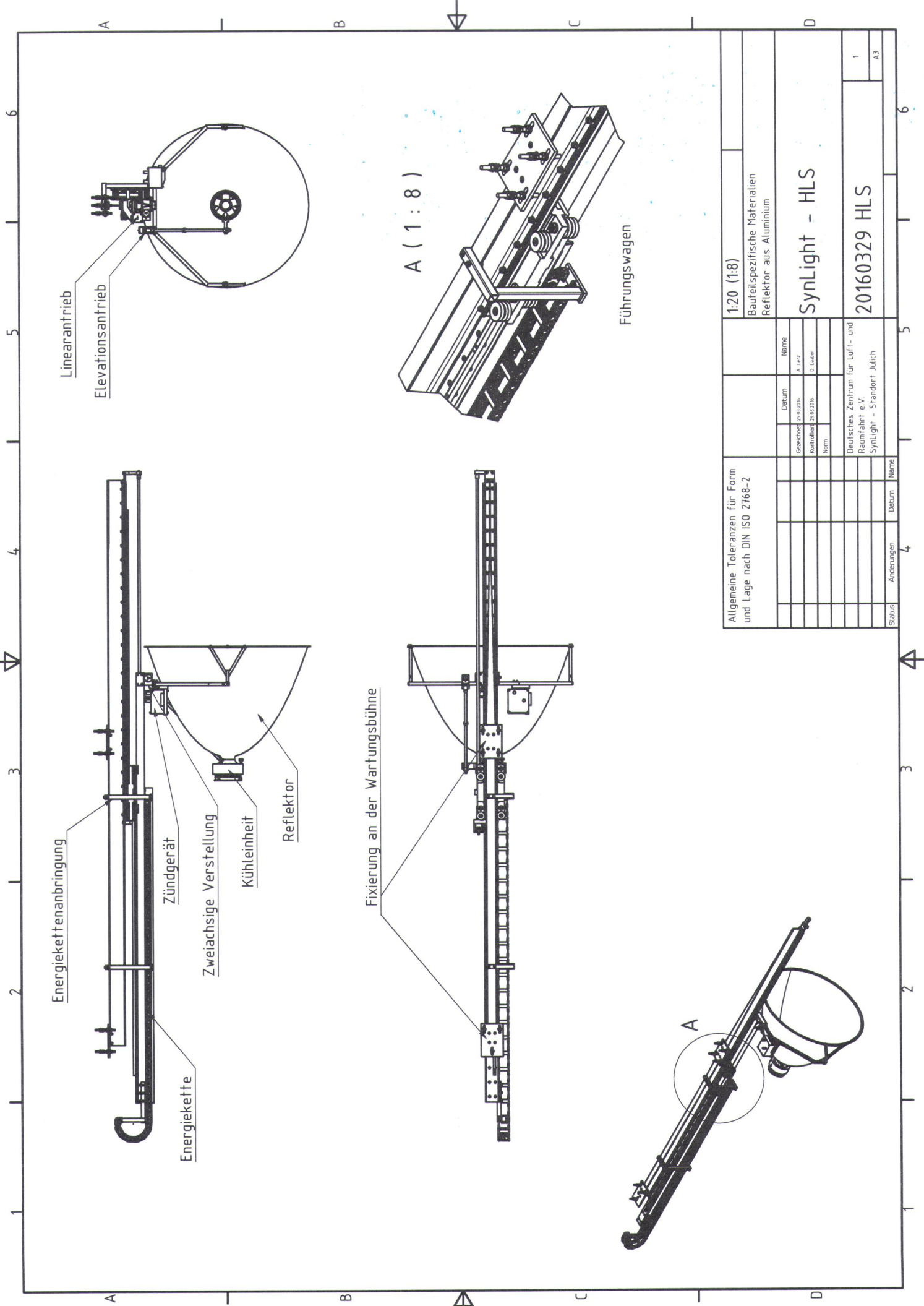
ANHANG

Nach dem Abschluss der konstruktiven Phase begann die Montage der einzelnen Baugruppen. In diesem Stadium des Projektes war es wichtig, die konstruierten Elemente praxisorientiert und montagefreundlich in verschiedenen technischen Zeichnungen darzustellen. Diese Aufgabe war ein Themengebiet neben den in der Zielsetzung genannten.

- Zeichnung 1 Gesamtbaugruppe Strahlermodul (HLS-000)
- Zeichnung 2 Montagehinweis Modulanbringung
- Zeichnung 3 Montagehinweis Führungswagen (HLS-002-031)
- Zeichnung 4 Montagehinweis Ausleger (HLS-002-030)
- Zeichnung 5 Montagehinweis Justiereinheit (HLS-001-004)
- Zeichnung 6 Montagehinweis Elevationsantrieb (HLS-001-002)
- Zeichnung 7 Montagehinweis Axialantrieb

Anhang auf dem beigefügten Datenträger:

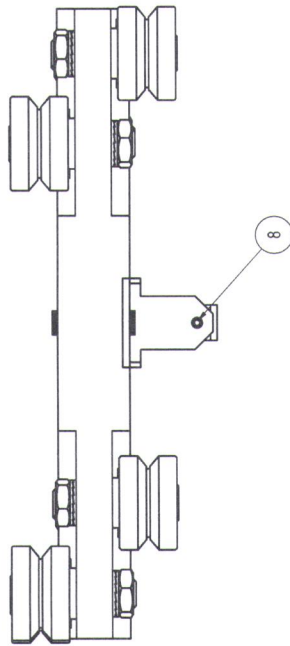
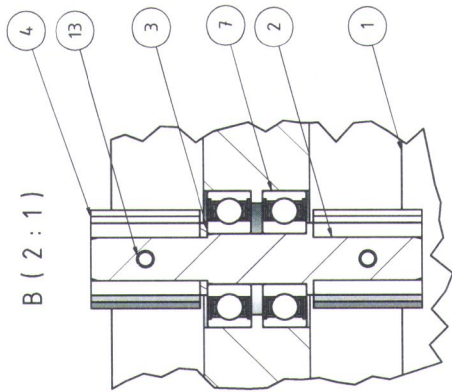
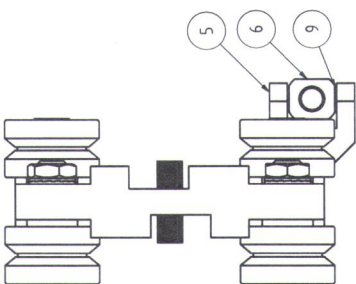
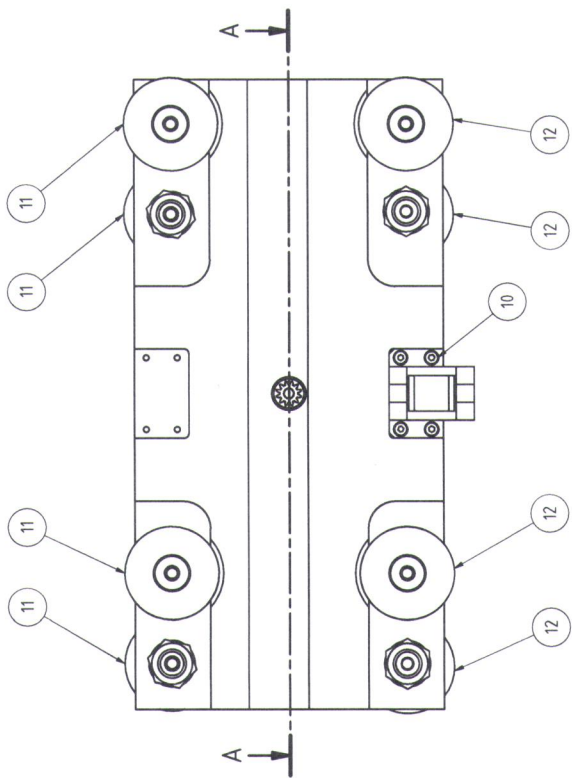
- 1.) Digitale Form der Masterarbeit (PDF)
- 2.) Excel-Tool zur Positionierung der Xenon-Strahlermodule



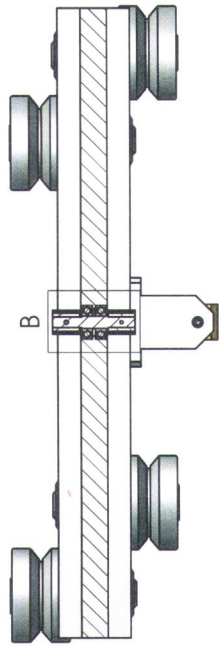
Allgemeine Toleranzen für Form und Lage nach DIN ISO 2768-2		1:20 (1:8)		Bauteilspezifische Materialien Reflektor aus Aluminium	
Status	Änderungen	Datum	Name	SynLight - HLS	
				20160329 HLS	
				1	
				A3	

Allgemeine Toleranzen für Form und Lage nach DIN ISO 2768-2		1:20 (1:8)		Bauteilspezifische Materialien Reflektor aus Aluminium	
				SynLight - HLS	
				20160329 HLS	
				1	
				A3	

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
SynLight - Standort Jülich



A-A (1:2)

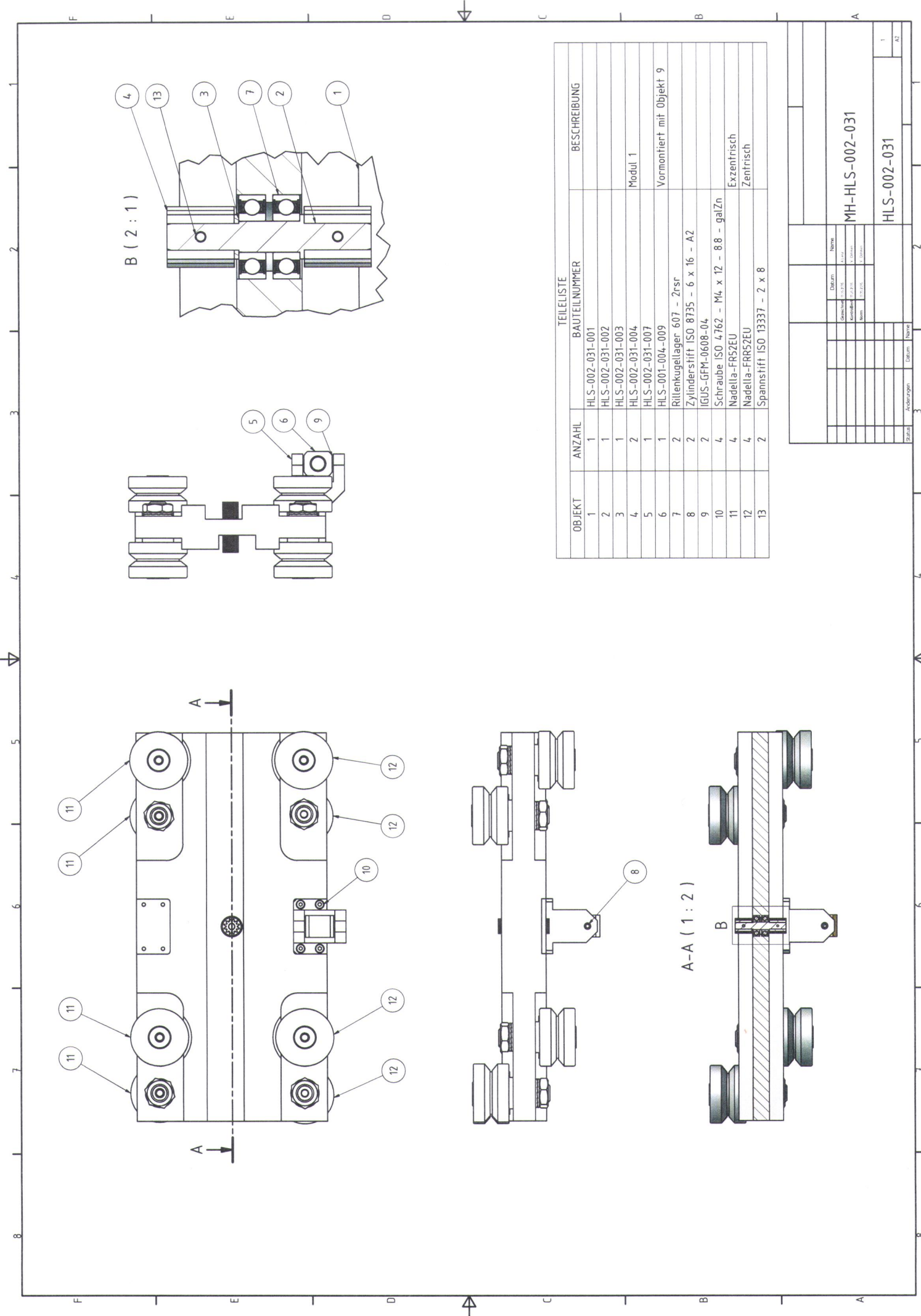


OBJEKT	ANZAHL	BAUTEILNUMMER	BESCHREIBUNG
1	1	HLS-002-031-001	
2	1	HLS-002-031-002	
3	1	HLS-002-031-003	
4	2	HLS-002-031-004	Modul 1
5	1	HLS-002-031-007	
6	1	HLS-001-004-009	Vormontiert mit Objekt 9
7	2	Rillenkugellager 607 - 2rsr	
8	2	Zylindersstift ISO 8735 - 6 x 16 - A2	
9	2	IGUS-GFM-0608-04	
10	4	Schraube ISO 4762 - M4 x 12 - 8.8 - galZn	Exzentrisch
11	4	Nadelila-FRS52EU	Zentrisch
12	4	Nadelila-FRS52EU	
13	2	Spannstift ISO 13337 - 2 x 8	

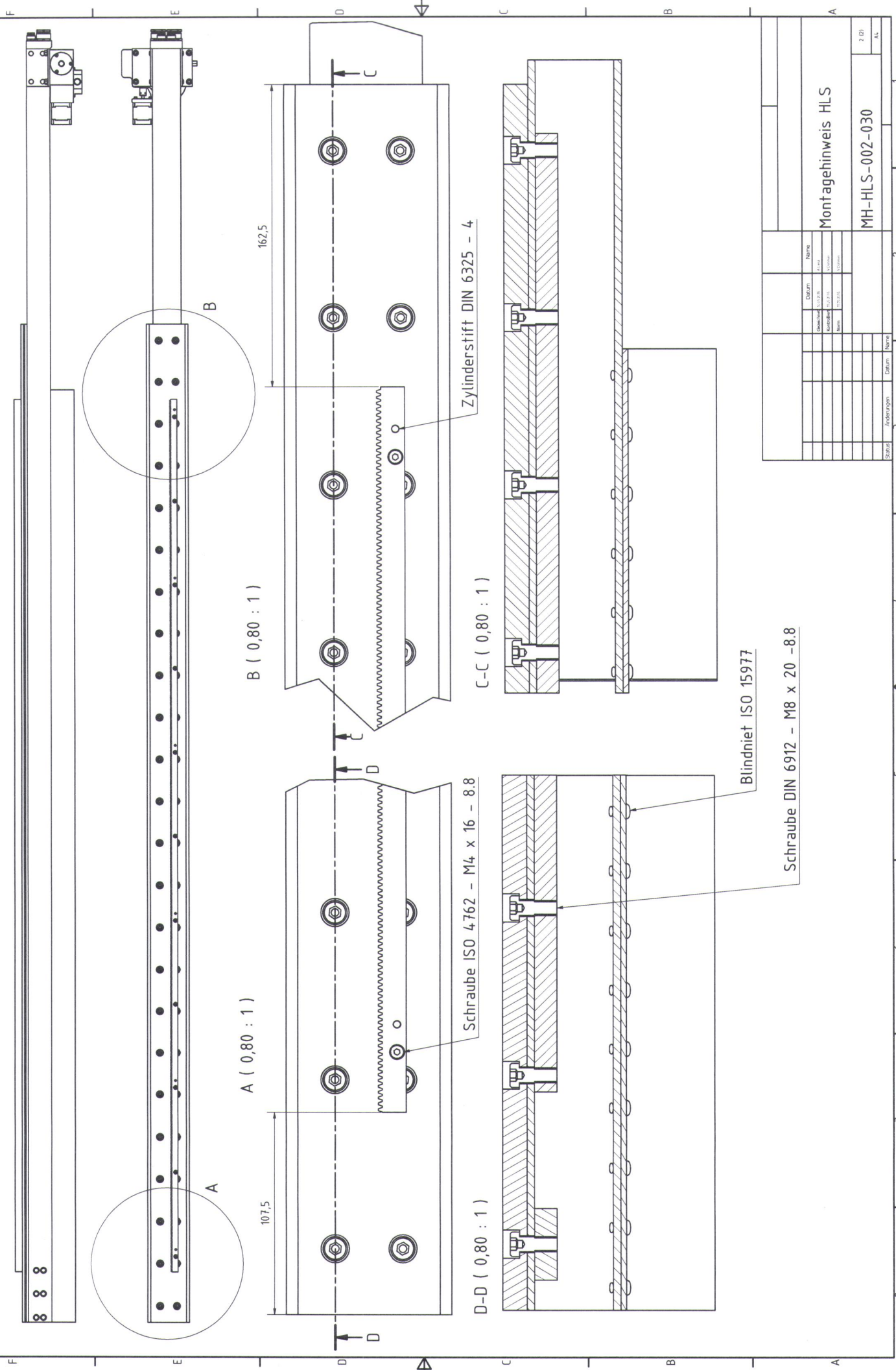
Stapel	Änderungen	Datum	Name

			Datum	Name
			Gezeichnet	
			Geprüft	
			Konstrukt.	
			Freigegeben	

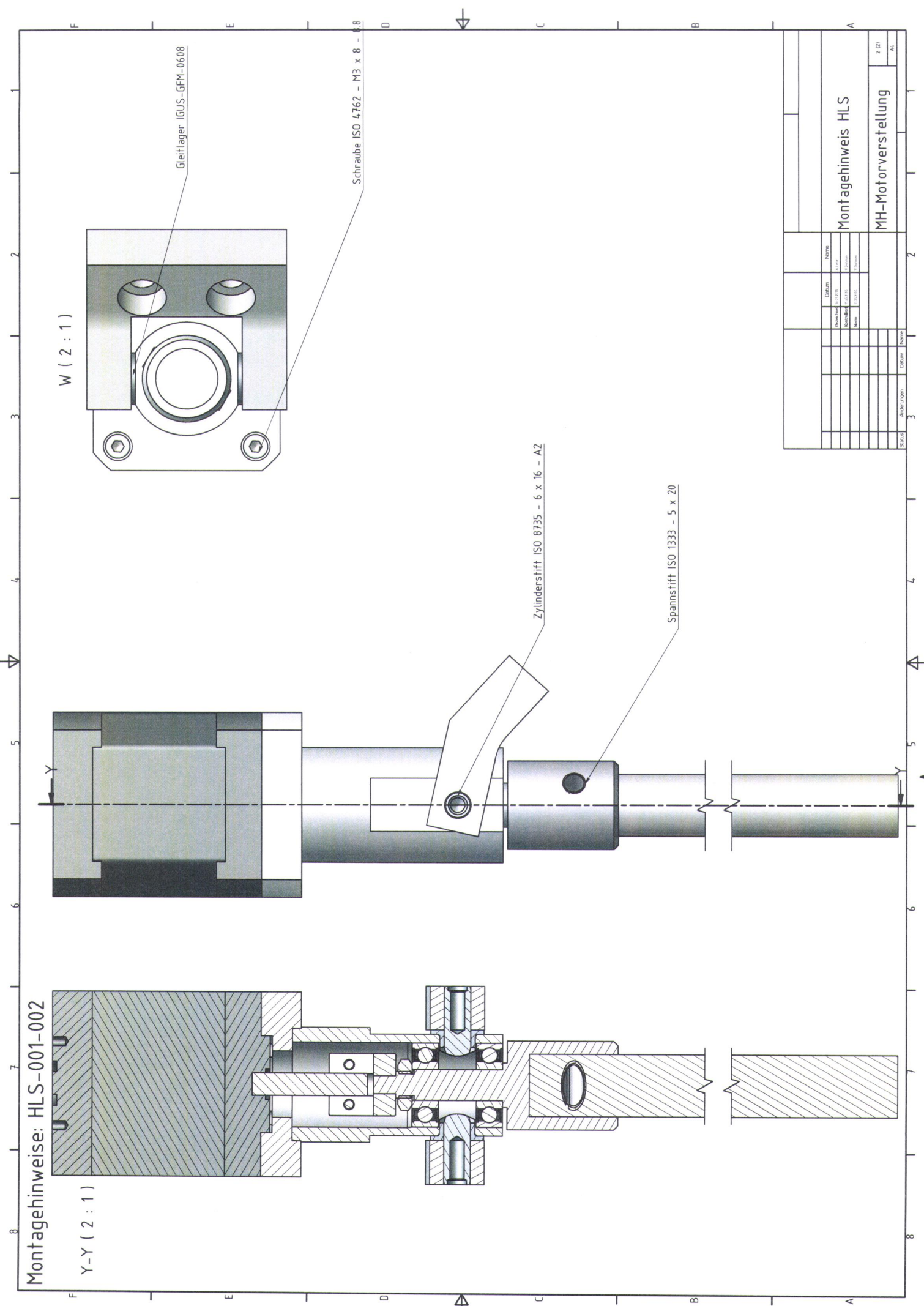
				MH-HLS-002-031
				HLS-002-031



Montagehinweise: HLS-002-030



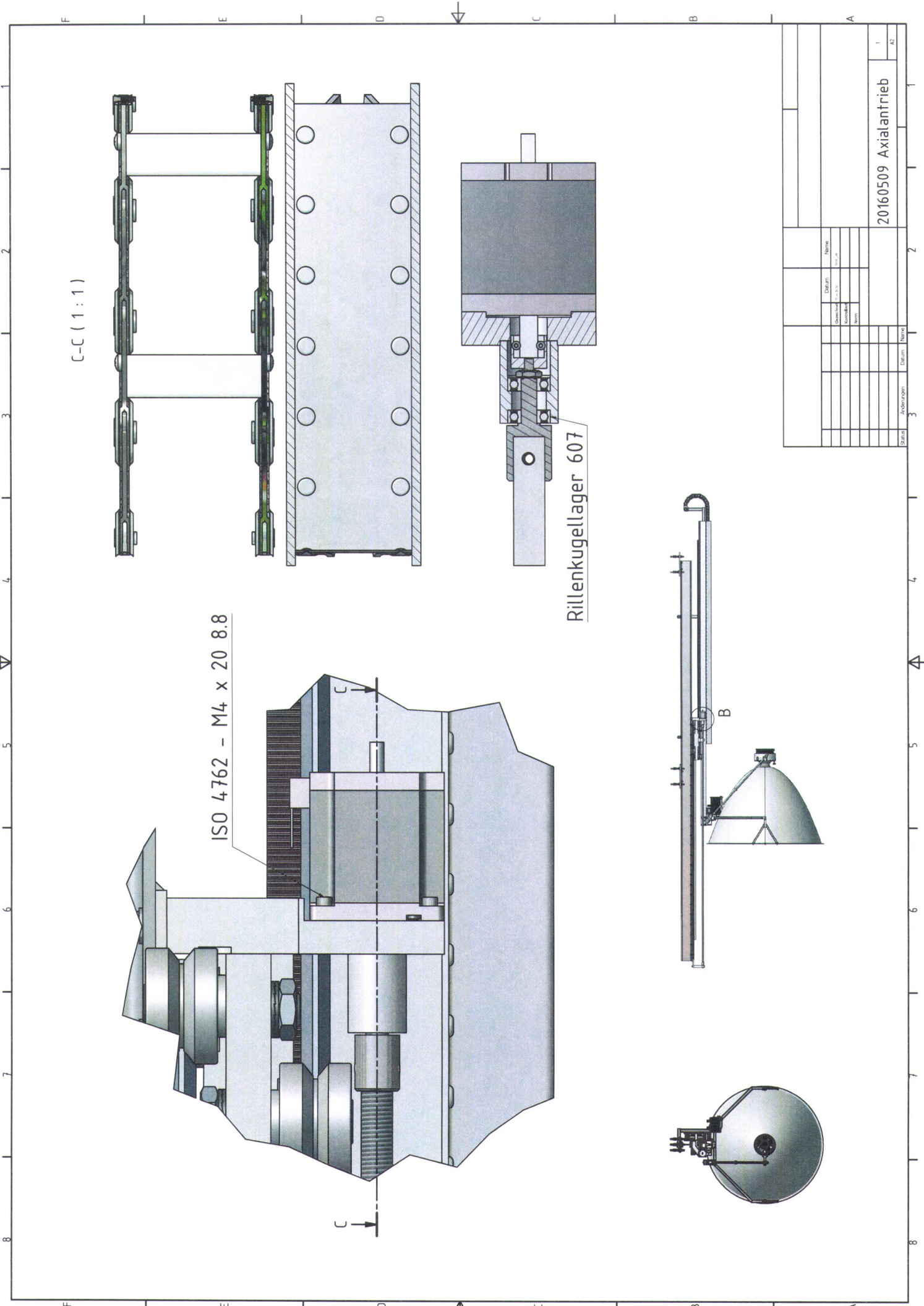
Name		Date	
Gezeichnet	11.12.12	Geprüft	11.12.12
Montiert	11.12.12	Abgenommen	11.12.12
Skizziert	11.12.12	Gezeichnet	11.12.12
Name		Date	
Montagehinweis HLS		2 (D)	
MH-HLS-002-030		AK	



Name		Datum	
Gezeichnet	U.S.K.	1.1.20	
Kontrolliert	F.P.K.		
Freigegeben	F.P.K.		

Blatt	Anzahl	Blatt	Name
2	2		

Montagehinweis HLS	
MH-Motorverstellung	
Z. 101	ALC



C-C (1:1)

ISO 4762 - M4 x 20 8.8

Rillenkugellager 607

Name		20160509 Axialantrieb	
Datum		1	
Gezeichnet		AZ	
Konstruiert			
Notiz			
Statut	Änderungen	Datum	Name