

SOLARSTROM FÜR 6 CENT/KWH: ENTWICKLUNG EINES LOW-COST HELIOSTATEN MIT DÜNNFILMREFLEKTOR AM NASA JET PROPULSION LABORATORY

Armin BUCHROITHNER¹, Gani GANAPATHI², Art PALISOC³, Gyula GRESCHIK⁴

Kurzfassung: Heliostaten stellen einen wesentlichen Kostenfaktor bei der Errichtung und dem Betrieb solarthermischer Kraftwerke dar. Sie können bis zu 50% der gesamten Anlagekosten ausmachen. Das *U.S. Department of Energy* (DOE) verfolgt mit der Ausschreibung der *SunShot* Initiative das Ziel, die Energiekosten für Solarstrom auf 6 US-Cent pro kWh zu reduzieren. Da die Leistung von Solarturmkraftwerken (*Concentrated Solar Power* Anlagen) proportional zur installierten Spiegelfläche und der Genauigkeit der Sonnennachführung ist, spielt die Entwicklung kostengünstiger und leistungsstarker Heliostaten eine besondere Rolle. Die Kosten der Heliostatfläche müssen von den aktuell erreichbaren ~ \$ 200 - 250/m² auf ~ \$ 100/m² reduziert werden.

Am *NASA Jet Propulsion Laboratory* wurde im Rahmen eines vom DOE geförderten Projektes in Zusammenarbeit mit der *TU Graz* ein Heliostat entwickelt, welcher durch Einsatz von Schaumkern-Sandwichpaneelen und Dünnschichtreflektoren eine signifikante Gewichts- und Kostenreduktion ermöglicht. Die Spiegel wurden umfangreichen Reflektivitäts- und Lebensdauertests unterzogen, sowie mittels Reverse Shack-Hartman Methode photogrammetrisch charakterisiert. Verschiedene Kosten-Nutzen-Analysen ergaben eine kostenoptimale Heliostatgröße von etwa 100m², wobei hierbei auch Installations- und Verkabelungskosten beachtet wurden. Ein kabelloser, autarker Heliostat, welcher über PV-Module und Batterie mit Energie versorgt wird und über Wi-Fi kommuniziert, erwies sich als kostengünstigste Variante. Basierend auf dieser Größenabschätzung wurde eine mechanische Grundstruktur entworfen, welche nicht nur durch konsequenten Leichtbau, sondern auch durch Optimierung von Transport und Montage die Kosten des Heliostaten weiter reduziert. Abschließend wurde ein 3x2m Heliostat-Prototyp konstruiert, gebaut und getestet. Das CAD Modell wurde mit den Software Tools ANSYS und COMSOL unter Windlasten von bis zu 35 mph im Betrieb und 85 mph in Parkposition (Stow) simuliert, wobei ein optischer Gesamtwinkelfehler der mechanischen Grundstruktur von unter 1 mrad RMS ermittelt wurde.

Keywords: Heliostat, Concentrated Solar Power, Erneuerbare Energie, Solarkraftwerk

¹Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik/TU Graz, Inffeldgasse 21 b/II, A-8010 Graz, +43-316-873-7363, armin.buchroithner@tugraz.at, <http://www.ime.tugraz.at>

²Jet Propulsion Laboratory, 4800 Oak Grove Drive, 91109 Pasadena, USA, +1-818-354-7449, gani.b.ganapathi@jpl.nasa.gov, <http://www.jpl.nasa.gov>

³L'Garde, 15181 Woodlawn Ave, Tustin, CA 92780, USA, +1 714-259-0771, www.lgarde.com, art_palisoc@lgarde.com

⁴TentGuild Engineering Co., 4740 Table Mesa Drive, 80305 Boulder, USA, +1-866-666-7761, greschik@tequ.ec

1 Einleitung

1.1 Erneuerbare Energie in Europa

Im Jahr 2013 erreichten die 28 EU Staaten eine netto Elektrizitätsproduktion von unglaublichen 3262 TWh. Zwar stellt dieser Wert eine Reduktion von 1,1% gegenüber dem Jahr zuvor, repräsentiert aber dennoch den signifikant ansteigenden Energieverbrauch, nicht nur in Europa, sondern auf der ganzen Welt. In Abbildung 1 ist eindeutig zu erkennen, dass es seit den 1990er Jahren zu einem besonders starken Anstieg gekommen war. In den letzten 10 Jahren kam es zu einer leichten Stabilisierung im Verbrauchssektor, wobei der Anteil der Elektrizitätserzeugung durch Kraft-Wärme-Koppelung annähernd konstant blieb. [1]

In erster Linie sind es der Gebäude- und der Dienstleistungssektor, die für den erhöhten Stromverbrauch verantwortlich sind, während der Elektrizitätsbedarf im Transportsektor über die letzten Jahre ziemlich konstant blieb. Dieser Umstand mag etwas unwahrscheinlich anmuten, da der *Gesamtenergieverbrauch* im Transportsektor über die letzten Jahre konstant anstieg. Grund für den relativ geringen *Elektrizitätsverbrauch* im Transportsektor ist der nach wie vor geringe Anteil an Elektrofahrzeugen (EVs) und der immer geringer werdende Anteil des Schienenverkehrs am gesamten Transportvolumen. [2]

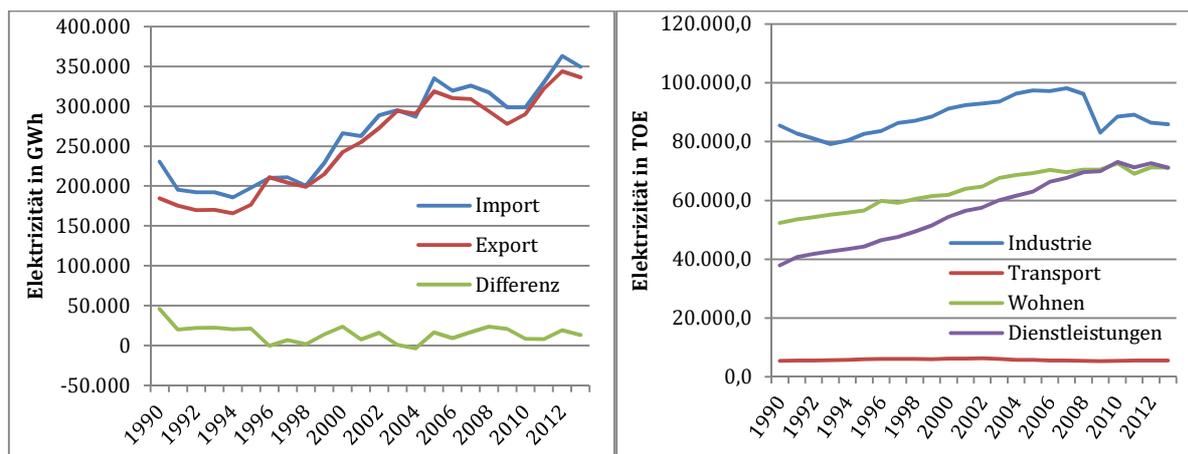


Abbildung 1: links - Entwicklung des EU Elektrizitätsmarktes; rechts - Verlauf des Elektrizitätsverbrauchs [3] verschiedener Sparten in Tonnen Öläquivalent (TOE)

Aber nicht nur das Streben nach einer zunehmenden Elektrifizierung des Transportsektors, sondern auch der besonders starke Verbrauchsanstieg in Gebäudesektor und Industrie (vergleiche Abbildung 1) zeigen auf eindringliche Art und Weise wie bedeutsam die Erzeugung von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen heutzutage ist.

Zum ersten Mal in der Geschichte der EU stellen erneuerbaren Energien mit einem Nettoenergieertrag von 890 TWh (27,2%) den größten Anteil dar – dicht gefolgt von Atomkraft (26,9%) und Kohlekraftwerken (26,7%). Zwar erscheint dieser EU-Mittelwert ein zufriedenstellendes Ergebnis zu sein, dieses wird jedoch durch die hohen Wasserkraftanteile Skandinaviens verfälscht. Abbildung 2 zeigt, dass die Anteile erneuerbarer Energie in Mitteleuropa – mit Ausnahme von Österreich – durchwegs im Bereich von 10% und darunter liegen. Außerdem setzten sich die 27,2% aus *allen* erneuerbaren Quellen wie Wind, Wasser und Solar zusammen. Das aktuelle Ergebnis reicht also noch lange nicht aus, um eine vollständige Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern und Kernenergie zu erlangen.

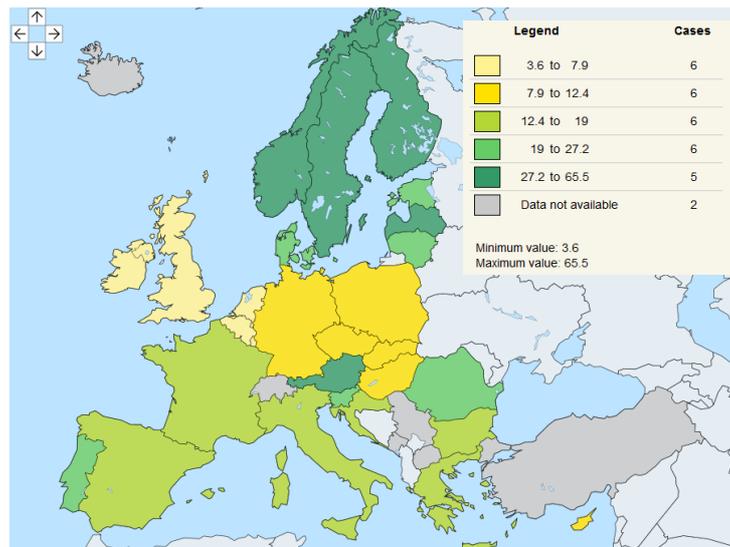


Abbildung 2: Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch in Europa [1]

Wie Abbildung 3 anschaulich darstellt, unterliegt der Sektor der erneuerbaren Energien seit einigen Jahren einem stetigen Wachstum, wobei Sonnenenergie den jüngsten und gleichzeitig am stärksten expandierenden Sektor darstellt.

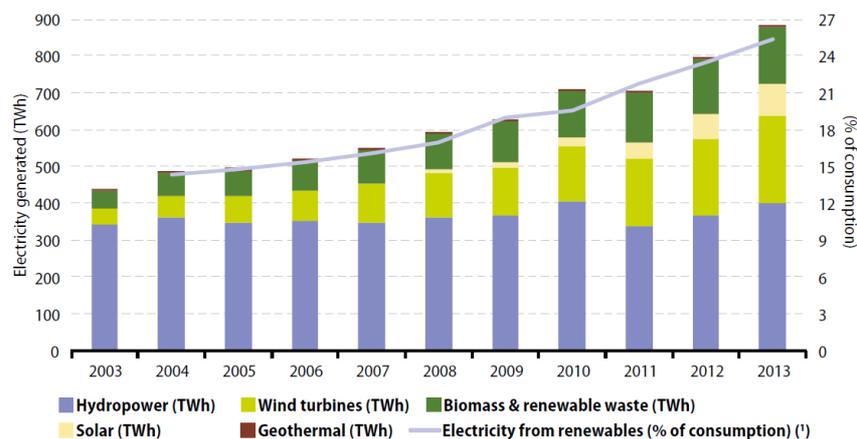


Abbildung 3: Entwicklung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im letzten Jahrzehnt [1]

Kleine, private Photovoltaik-Anlagen ermöglichen eine Steigerung des Autarkiegrades bei gleichzeitig relativ geringen Anschaffungskosten und einfacher Installation, beispielsweise am Dach eines Gebäudes. Aber dennoch stellen die geringen Wirkungsgrade heutiger Photovoltaikzellen (~15%) bei relativ hohen Kosten, und vor allem die schwierige Speicherbarkeit des Stroms ein potentielles Hemmnis für die flächendeckende Durchsetzung dieser Technologie dar.

1.2 Solarthermie oder “*Concentrated Solar Power*” (CSP)

Eine mögliche Alternative zu PV-Anlagen sind *solarthermische Kraftwerke*, welche neben höheren Wirkungsgraden auch eine Lastpunktverschiebung durch den Einsatz von thermischen Energiespeichern bieten. Bei diesem Prinzip wird Sonnenenergie mittels Spiegel auf einen Receiver fokussiert, der mit einem Hitzemedium durchströmt wird. Die Spiegel, welche dem Verlauf der Sonne folgen, können entweder als Parabolrinnen mit Rohr im Brennpunkt, oder als flache Spiegel (*Heliostaten*) mit einem Turm (*Receiver*) im Zentrum des

Feldes ausgeführt werden. Die erzeugte Wärme wird in einem Wärmetauscher an ein Arbeitsmedium – üblicherweise Wasser - übergeben, welches in einer Turbine abgearbeitet wird und in weiterer Folge Strom oder Wasserstoff erzeugt. Mittlerweile sind einige Anlagen im Leistungsbereich von 300 bis über 1000 MW im Südwesten der USA, Spanien und den arabischen Emiraten im Einsatz. Der Wärmespeicher, welcher meist flüssiges Nitratsalz als Arbeitsmedium verwendet, erlaubt eine zeitliche Verschiebung des Lastpunktes hin zu den Abend- oder Morgenstunden, in welchen der Strombedarf am höchsten ist.

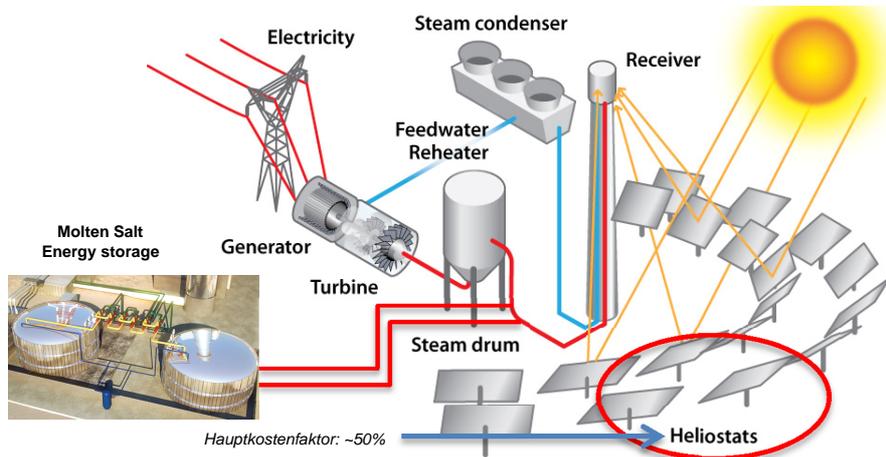


Abbildung 4: Aufbau eines Solarturmkraftwerkes (Power Tower) mit Wärmespeicher [4]

1.3 Kosten von CSP Anlagen und Heliostaten

Solarturmkraftwerke (*Power Towers*) werden vielerorts als die kostengünstigste Möglichkeit angesehen Elektrizität oder Wasserstoff im großen Stil zu erzeugen. Der Energiepreis wird jedoch stark von den Kosten der *Heliostaten* dominiert, welche meist rund 50% der gesamten Anlagekosten ausmachen. Grund hierfür ist die enorme erforderliche Spiegelfläche und die damit verbundene hohe Anzahl an Heliostaten.³ Über Berechnungsmethoden des *U.S. Department of Energy* für die Ermittlung der durchschnittlichen Stromgestehungskosten konnte ein Zusammenhang zwischen den Kosten pro Quadratmeter Spiegelfläche und Strompreis pro kWh hergestellt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Power Tower Stromgestehungskosten [5]

Spezifischer Heliostat Preis	Nitratsalz Power Tower	Wasserstoff (HyS Zyklus)
\$ 80/m ²	5,4 cent/kWh	\$ 2,6/kg
\$ 100/m²	5,9 cent/kWh	\$ 2,9/kg
\$ 150/m ²	7,3 cent/kWh	\$ 3,5/kg
\$ 200/m ²	8,7 cent/kWh	\$ 4,1/kg

Es ist daher offensichtlich, dass der Schlüssel zum Erreichen der unter Abschnitt 2.1 beschriebenen „6 cent/kWh-Grenze“ von Strom aus CSP-Anlagen in der Entwicklung kostengünstiger Heliostaten liegt. Der Preis muss von den aktuell erreichbaren 200~250 US Dollar auf rund 100 US Dollar / Quadratmeter Heliostatenfläche reduziert werden.

³ Das Solarturmkraftwerk *Ivanpah* in Kalifornien besitzt 173.500 Heliostaten.

2 Entwicklung des Low-Cost Heliostaten mit Dünnschichtreflektor

2.1 Die DOE Sunshot Initiative

Ziel der vom U.S. Department of Energy ins Leben gerufenen SunShot Initiative ist eine tiefgehende Potentialanalyse solarstrombezogener Technologien, um in den nächsten Jahrzehnten eine signifikante Erhöhung des Marktanteiles zu erlangen. Diese DOE Initiative verfolgt das Ziel die Kosten von Solarstrom zwischen 2010 und 2020 um 75% reduziert werden. Für den Kunden bedeutet das Preise unter 6,0 Cent/kWh. Der technologische Fokus liegt auf der Weiterentwicklung von Photovoltaik (PV) und CSP-Anlagen. Bis zum Jahr 2030 sollen jährlich bis zu 30 Mrd. US Dollar an Energiekosten gespart werden. Die Entwicklung des Low-Cost Heliostaten mit Dünnschichtreflektor am NASA Jet Propulsion Laboratory wurde durch Subventionen des DOE im Zuge von Sunshot gefördert.

2.2 Herausforderungen des Heliostat-Designs

Die Entwicklung eines Heliostaten ist ein interdisziplinäres, multidimensionales Problem, das vielen Einflüssen der Umgebung (des Supersystems) unterliegt. Neben den Kosten, die während des gesamten Entwicklungsprozesses stets im Auge behalten werden müssen, sind es physikalische Eigenschaften wie optische Genauigkeit und Eigenfrequenz des Heliostaten, sowie Umgebungseinflüsse, welche die Komplexität des Optimierungsproblems ausmachen. Abbildung 5 zeigt die wichtigsten Einflüsse auf die Gestaltung des Heliostaten.

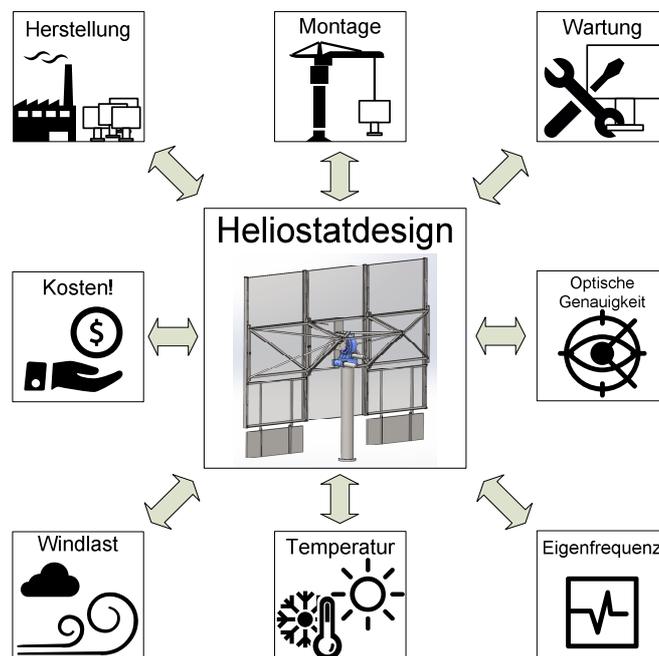


Abbildung 5: Wichtigste äußere Einflüsse und Aspekte des Heliostatdesigns

Das NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, Kalifornien wurde vom Department of Energy beauftragt, sich der Entwicklung eines neuartigen, low-cost Heliostatkonzeptes zu widmen. Grund hierfür ist die Erfahrung von JPL im Bereich mechatronischer Tracking-Systeme (z.B. Antennen des JPL Deep Space Network), sowie Expertise im Bereich Dünnschichttechnik und optische Systeme. Die Aufgabe wurde von einem interdisziplinären 7-köpfigen Team, beginnend mit der in Abbildung 6 dargestellten Kostenanalyse, bearbeitet.

2.3 Entwicklungsziele und Kostenanalyse

Auch wenn die vielfältigen, in Abbildung 5 dargestellten Umwelteinflüsse ein hochkomplexes System darstellen, so gestaltet sich das *quantifizierbare* Anforderungsprofil in Bezug auf Genauigkeit und Kosten als relativ simpel:

- Optische Genauigkeit:
 - 1,5 mrad RMS Winkelfehler bei Windstille
 - 4,0 mrad RMS Winkelfehler bei 27 mph Wind
- Maximale Windgeschwindigkeit: 85 mph
- Lebensdauer: 30 Jahre
- Kosten: ~ \$ 100/m²

Die Komplexität der Problematik steigt jedoch signifikant, sobald diese Anforderungen einzelnen Komponenten im *Subsystem* des Heliostaten zugeteilt werden. Dies gilt nicht nur für die Fehlertoleranz, (vergleiche Tabelle 2) sondern auch für die Kosten, welche über die direkte Erzeugung des Heliostaten bis hin zu dessen Installation und Kalibrierung berücksichtigt werden müssen.

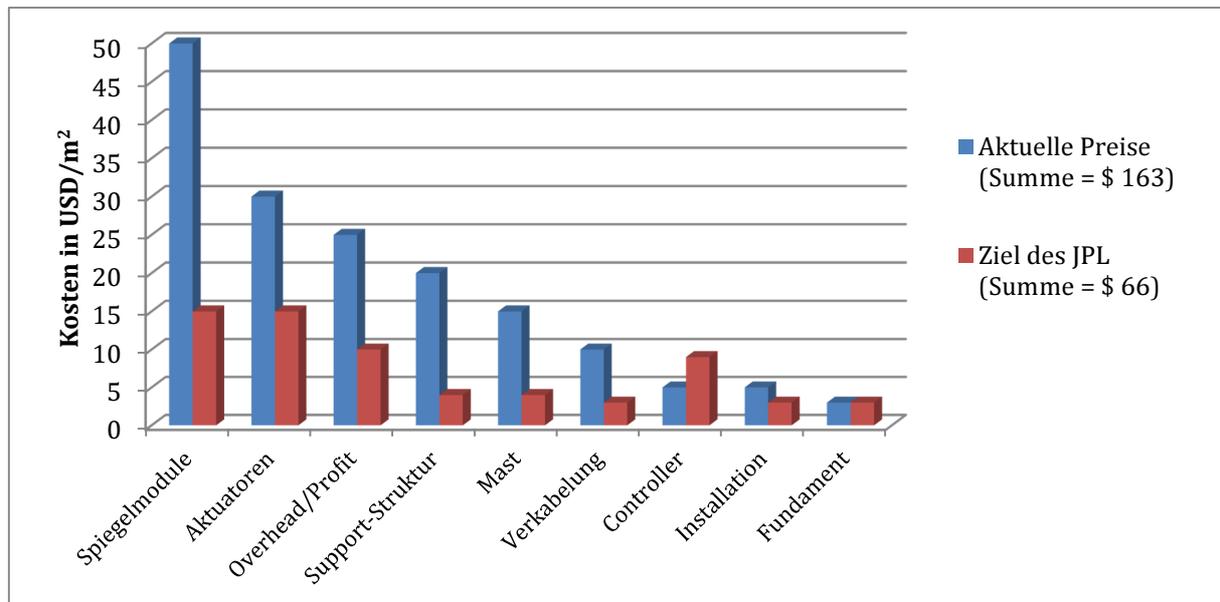


Abbildung 6: Ungefähre Ist-Kosten der wesentlichen Heliostat-Komponenten basierend auf [5], [6], sowie Kostenziele des JPL Heliostaten

Tabelle 2: Budget der optischen Winkelfehler bezogen auf die Komponenten des Heliostaten [7]

Fehler Typ	Zulässiger RMS Winkelfehler [mrad]	
	Heliostat Field Durchschnitt	Heliostat im "Worst Case" Wind+Richtung
• Mechanische Ausrichtungsfehler		
Durchbiegung des Masten	0.50	1.50
Tracking (Controller)	1.00	1.00
Verbleibende Offsets	1.00	1.00
Total (RMS)	1.50	2.06
• Beam Quality Errors		
Focusing/Canting	2.50	2.50
Spiegeldurchbiegung	1.62	4.86
Temperaturgradient	N/A	N/A
Total (RMS)	2.98	5.47
Total Optical Error (in quadrature)	3.34	5.84

Bei genauerer Betrachtung von Abbildung 6 stechen folgende Posten ins Auge:

1. **Spiegelmodule:** Diese stellen die Hauptkosten des Heliostaten dar und bieten folglich unumstritten das größte Potential für Kostenreduktion.
2. **Controller:** Die Kosten des neu zu entwickelnden Systems liegen über den aktuellen. Grund hierfür sind die Ergebnisse einer Systembetrachtung, welche zeigte, dass ein *Stand-alone Power System* (Versorgung des Heliostaten über Photovoltaik-Modul und *Wireless Communication* – siehe Abschnitt 2.6) die Gesamtkosten von Verkabelung/Installation und Controller verringert.

2.4 Entwicklung der Spiegel

Die üblicherweise eingesetzten *Floatglas-Spiegel* bieten zwar eine hohe optische Güte, haben aber einen hohen Preis und erfordern eine steife und aufwändige mechanische Support-Struktur, welche sich wieder in den Gesamtkosten des Heliostaten niederschlägt. Aus diesem Grund wurde eine Sandwichkonstruktion, welche aus einem Schaumkern und einem hochreflektiven Film besteht, gewählt. Ursprünglich wurde *Rigid Polyurethane Foam (PU)* vorgesehen, da dieser die Möglichkeit bietet, den *ReflecTech*[®] Film direkt während des Formprozesses an die Oberfläche zu binden. Aufgrund der hohen Kosten (\$ 40-50 /m²) wurde diese Lösung aber verworfen und *Expanded Polystyrene (EPS, ca. \$ 5-10/m²)* in der in Abbildung 7 gezeigten Konfiguration gewählt. Die Konstruktion wird durch zwei an den Polystyrene-Schaumkern angrenzende Edelstahlbleche versteift [8].

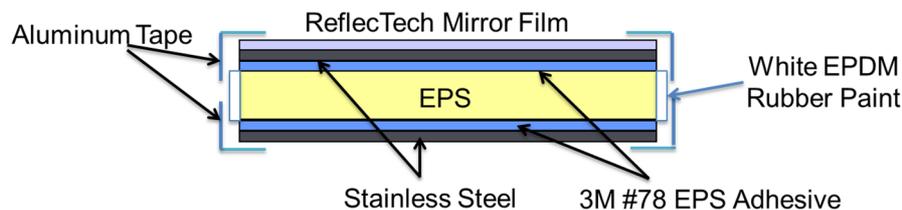


Abbildung 7: Aufbau der Spiegelmodule mit EPS Foam Core und ReflecTech Mirror Film

Um erste Erkenntnisse bezüglich Fertigungstechnik, optische Performance und zu erwartende Lebensdauer zu erlangen, wurden 15 *Sample Coupons* angefertigt und dem in Abbildung 8 dargestellten Testablauf unterzogen. Hauptaugenmerk wurde dabei auf den Nachweis des Erreichens von 30 Jahren ungestörtem Betrieb unter extremen Umweltbedingungen gelegt.

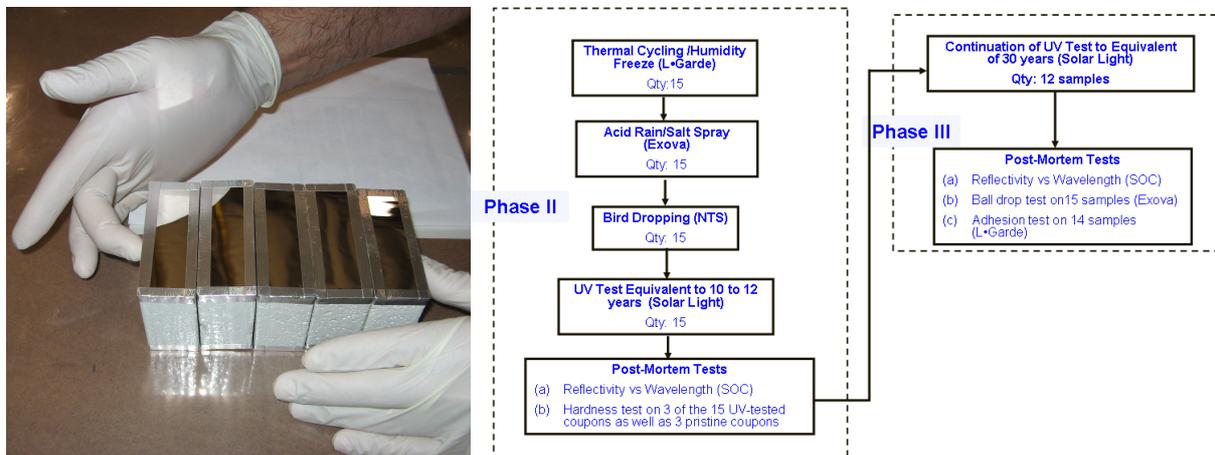


Abbildung 8: Testablauf für die Zuverlässigkeitsprüfung der 15 Spiegel-Test-Coupons (Foto: L'Garde Inc.)

Alle Tests wurden den *ASTM Standards* entsprechend durchgeführt. Besonders wichtig für die Verwendung des polymeren *ReflecTech® Mirror Films* anstelle von Floatglas war der Nachweis einer hohen, bzw. nahezu unverminderten Reflektivität nachdem die Samples einer äquivalenten Dosis von 30 Jahre UV-Strahlung ausgesetzt wurden. Das Ergebnis, welches kaum eine Veränderung nach 30 Jahren UV-Äquivalent zeigt, ist in Abbildung 9 dargestellt.

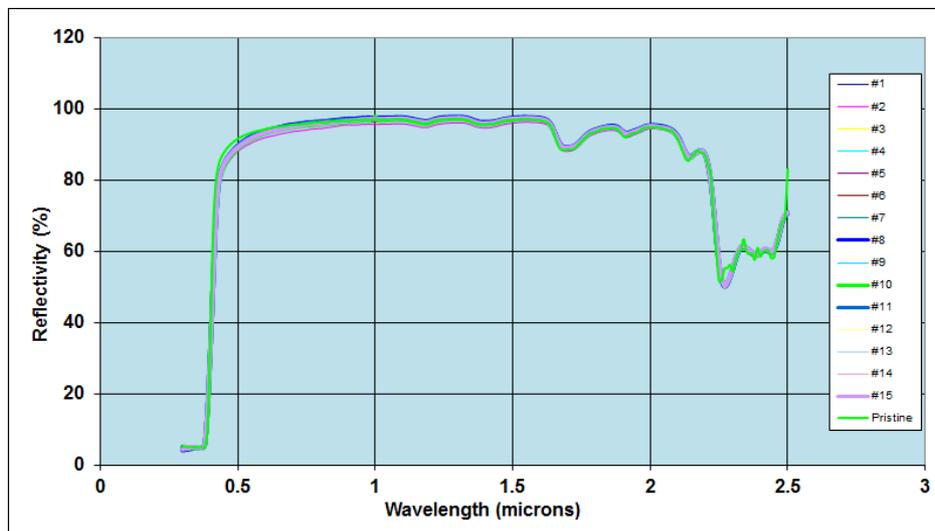


Abbildung 9: Vergleich der Reflexionsgrade nach 30 Jahren UV-Äquivalent (Fabrikneu = „Pristine“)

2.5 Mechanische Grundstruktur

Um eine möglichst kostenoptimierte, aber dennoch präzise und starre Grundstruktur für die Schaumkernspiegelpaneele zu entwerfen, wurden etliche bestehende Systeme (wie z.B. in [9]) analysiert und Kosten-Nutzen-Analysen unter Berücksichtigung zu erwartender Bedingungen bei einer Serienfertigung von 100 000 Stück/Jahr durchgeführt. Wesentlich bei der Suche nach dem niedrigsten Preis/m² Spiegelfläche ist die Gesamtgröße des Heliostaten, da die Kosten einiger Komponenten nichtlinear mit der Gesamtfläche ansteigen. Dies liegt unter anderem an der Nichtlinearität aerodynamischer Windlasten [10] und der damit verbundenen Dimensionierung der Aktuatoren.

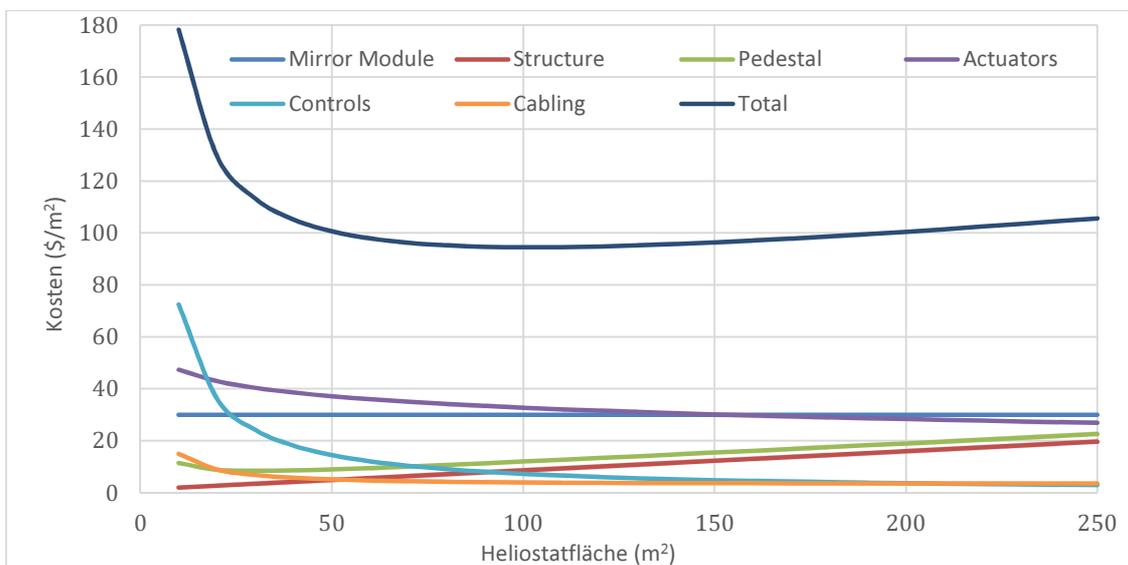


Abbildung 10: Verlauf der Kostenanteile verschiedener Heliostatkomponenten über die Gesamtfläche

Auch wenn der Verlauf der Summenkurve in Abbildung 10 nur ein relativ flaches Minimum aufweist, so kann daraus doch geschlossen werden, dass die Idealgröße um ca. 100 m² Gesamtfläche liegt. Um bei dieser Fläche den Windlasten zu widerstehen und ausreichende Steifigkeit für hohe optische Genauigkeit selbst bei Windgeschwindigkeiten von bis 35 mph zu gewährleisten, wurde nach einer Reihe von FEM-Simulationen aus einer Vielzahl von Designstudien ein *Fachwerkskonzept* gewählt. Das in Abbildung 11 dargestellte Konzept besteht aus einem horizontal angeordneten Fachwerksträger auf dem C-Schienen montiert sind, welche die Spiegelpaneele aufnehmen.

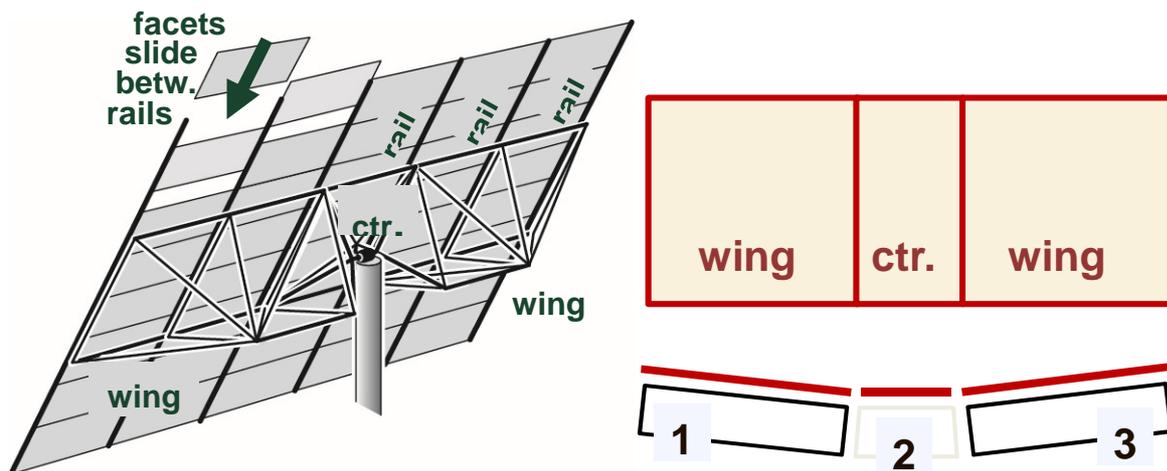


Abbildung 11: Prinzipskizze der mechanischen Grundstruktur des Heliostaten (Konzept: Gyula Greschik)

Der Fachwerksträger ist in 3 Segmente unterteilt, was den Transport der einzelnen Baugruppen erleichtert und auch ein Fokussieren des reflektierten Lichts mittels Winkelleinstellung (sogenanntem „Canting“) der Seitenteile („Wings“) ermöglicht. Das Zentralelement des Fachwerks stellt die Schnittstelle zum Aktuator und in weiterer Folge zum zentralen Mast bzw. Fundament dar.

Das Konzept wurde für eine Heliostatgröße von etwa 100m² unter Windlasten von bis zu 35 mph mit Hilfe der Finite-Elemente-Software *NASTRAN* vorausgelegt. Jedes „Wing-Element“ ist ca. 6,5m ausladend, wobei die C-Schienen 5m lang sind. Mit einem Gewicht von rund 80 kg pro Fachwerkelement und einem Stahlpreis von \$ 0,90/kg ergibt sich ein Materialpreis der mechanischen Grundstruktur von etwa \$ 2,20/m². Der maximale RMS Winkelfehler wurde in der Vorauslegung mit lediglich 1,22 mrad bestimmt (vergleiche Abbildung 13) und bestätigte die gute optische Performance des Konzeptes.

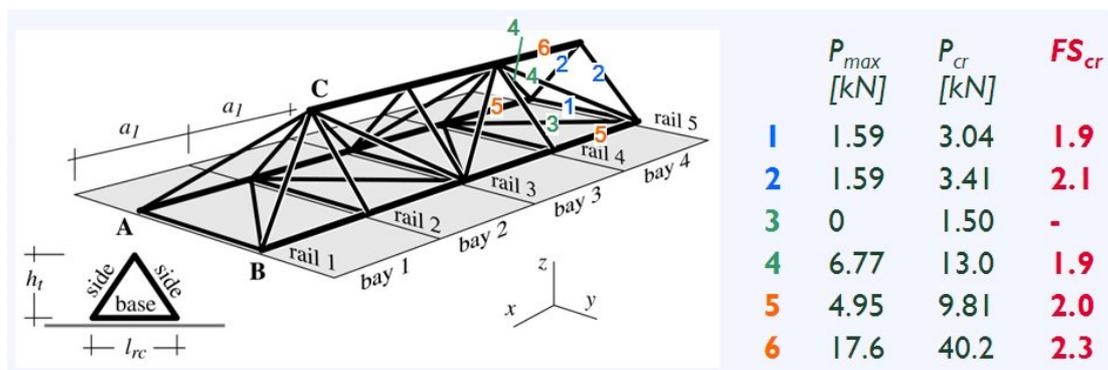


Abbildung 12: Maximale Belastungen der Fachwerksstäbe und Sicherheiten gegen Euler'sche Knickung (Konzept und Berechnung: Gyula Greschik)

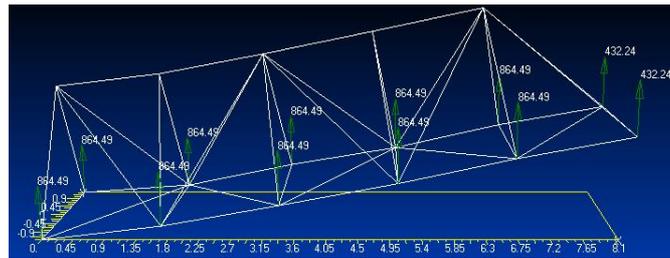


Abbildung 13: Maximale Durchbiegung eines Wing-Teils bei 35 mph Windgeschwindigkeit (NASTRAN)

2.6 Energieversorgung und Kommunikation: Das Stand-Alone Power System

In Abschnitt 2.3 wurde bereits erwähnt, dass die Kosten der Verkabelung für Kommunikation und Stromversorgung im Zuge der Baumaßnahmen (abhängig vom geologischen Untergrund) einen wesentlichen Beitrag zu den Gesamtkosten leisten. Folglich wurde das Konzept eines *autarken Heliostaten*, welcher seine eigene Stromversorgung mittels PV-Panel und Batterie besitzt und Befehle über eine Wifi-Schnittstelle empfängt, verfolgt, wie Abbildung 14 zeigt.

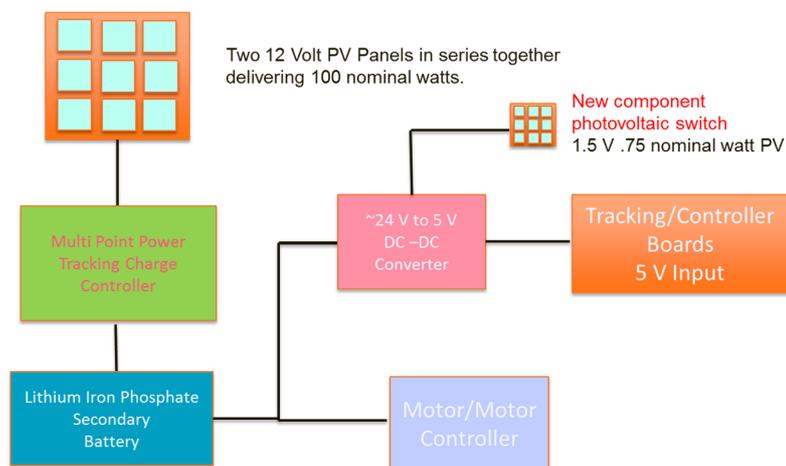


Abbildung 14: Schema des Stand-Alone Power und Control Systems

Um die Leerlaufverluste der Steuerung zu verringern und die Batterie während der Nachtstunden nicht zu belasten, wurde ein Photovoltaik-Schalter hinzugefügt, welcher das System ab einer gewissen Untergrenze der Sonneneinstrahlung in einen Ruhezustand (*Sleep Mode*) versetzt. Als Energiespeicher wurde eine Li-Fe-Batterie gewählt und auf Basis des Energieverbrauchs von Controller und Stellmotoren ausgelegt. Das drahtlose Controller-System besteht aus 3 hierarchischen Ebenen, welche in Tabelle 3 beschrieben sind.

Tabelle 3: Komponenten und Aufgaben des Steuersystems

Ebene	Controller Board (Prototyp)	Aufgabe
Main Controller	Arduino Uno R3	Aussenden der Befehle wie Tracking, Parkposition, Kalibrieren, etc.
Gateway Controller	Raspberry Pi 2 (Raspbian OS)	Berechnen mathematischer Funktionen im Python-code – Berechnen der Trajektorie der Sonnen sowie Azimut- und Elevationswinkel des Heliostaten.
Heliostat Controller	Arduino Mega 2530	Empfangen von Befehlen, Berechnen der Heliostat-Ist-Position auf Basis des Hallsignals, Stellen der Sollposition

3 Skalierter 6m²-Heliostat-Prototyp

Um die Performance und Praktikabilität des Heliostatkonzeptes zu verifizieren wurde ein verkleinerter Prototyp mit 3x2m Spiegelfläche konzipiert und gebaut. Die Dimensionen all jener Bauteile, welche Einfluss auf die Nachgiebigkeit und folglich optische Genauigkeit des Heliostaten unter Einfluss von Wind- und Gewichtskraft haben, wurden so skaliert, dass der Gesamtwinkelfehler genau jenem des 100m²-Serienproduktes entspricht.

3.1 Das Aktuatorkonzept

Das Bestimmen des kostengünstigsten Aktuatorkonzeptes ist eine komplexe Aufgabe, da einerseits die Windgeschwindigkeit und der Anstellwinkel in Kombination mit der Gesamtfläche das erforderliche Verstellmoment bestimmt und andererseits verschiedene Aktuatoren stark unterschiedliche Wirkungsgrade aufweisen, was sich wiederum auf die Dimensionierung und den Preis von PV- und Batteriesystem auswirkt. Auch sind die Systemgrenzen der unterschiedlichen Aktuatoren stark verschieden. Während ein 2-achsiger Schneckenschwenkantrieb ein in sich geschlossenes System ist, welches über einen Flansch mit der mechanischen Grundstruktur des Heliostaten verbunden wird, benötigen Linearaktuatoren separate Gleitlager und beeinflussen somit die Geometrie des umgebenden Systems. Obwohl elektrische Spindelinearantriebe die niedrigsten „\$ pro Newton Hubkraft“-Werte aufwiesen, wurde diese Lösung aufgrund der zusätzlichen Kosten für die erforderlichen Gleitlager und aus Gründen der Kompaktheit verworfen und ein zweiachsiger Schneckenschwenktrieb der Firma *Kinematics Manufacturing* gewählt. Der Antrieb des Prototypen (Modell *KDE 7E*) ist mit jenem des Serienheliostaten (Modell *KDE21C-125MHA*) technologisch identisch; er weist das gleiche Gehäuse-, Lager- und Dichtkonzept auf, wodurch Eigenschaften wie Wirkungsgrad, Spiel und Nachgiebigkeit gut skalierbar sind.

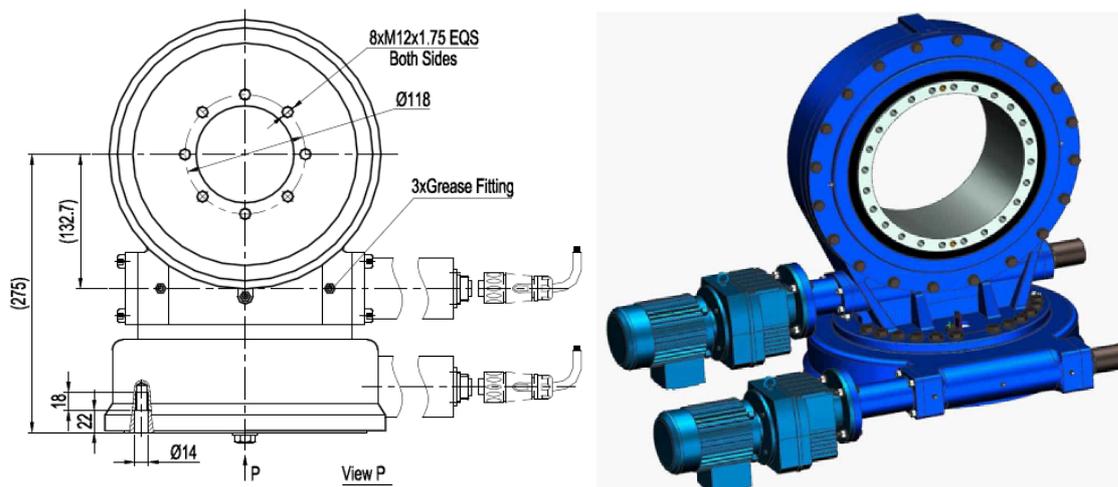


Abbildung 15: Links - Antrieb des Prototypen, Kinematics KDE-7E. Rechts - Typ KDE21C für 100m² [11]

Das Schneckengetriebe, welches eine Untersetzung von 73:1 aufweist, wird mit je einem 24V DC-Motor pro Achse angetrieben. Die Motoren besitzen jeweils ein Planetengetriebe zur Drehzahlreduktion mit einer Untersetzung von 575:1. Die Gesamtuntersetzung von 41975:1 resultiert in einer mechanischen Auflösung von 0.0086° oder 0,15 mrad pro Motorumdrehung, welche mit einem integrierten Hallsensor detektiert wird.

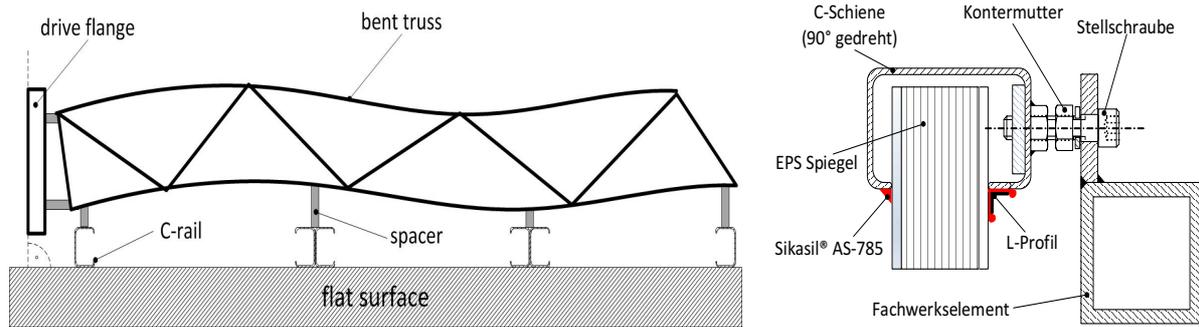


Abbildung 17: Ausgleichen des Schweißverzuges durch Spacer (links) bzw. Stellschrauben (rechts)

3.4 Verifikation des Prototypdesigns mittels FEM

Nachdem alle Funktionen, Komponenten und Dimensionen des Prototyps eindeutig definiert waren, wurde ein CAD-Modell in *SOLIDWORKS* angefertigt, welches in Abbildung 18 dargestellt ist.

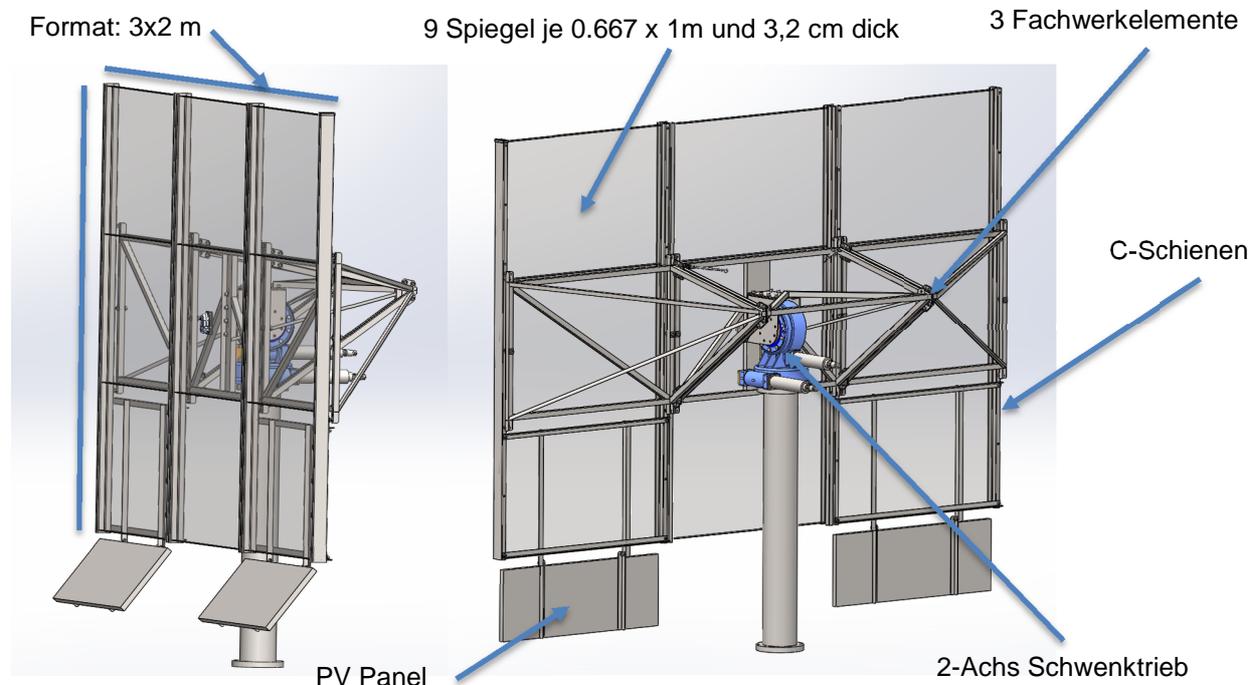


Abbildung 18: Fertiges CAD-Modell des 6m²-Prototypen

Die mechanische Leistungsfähigkeit der Prototypkonstruktion wurde mittels 3 verschiedener kommerzieller Finite Elemente Codes - *SOLIDWORKS*, *ANSYS* und *COMSOL Multiphysics* – verifiziert, wobei folgende Lastfälle untersucht wurden:

- 1) Verformung und Spannungen bei 35 mph Wind und bei 0°, 45°, 90°Anstellwinkel
- 2) Übertragungsfunktion und Eigenfrequenz
- 3) Einfluss der angebauten PV-Paneele auf die Durchbiegung
- 4) Materialspannungen in Parkposition (85 mph)

Die Ergebnisse der 3 Solver zeigten gute Konvergenz, wobei die maximale Deformation unter einer Windlast von 35 mph zwischen 0,6 und 1,05 mm lag. Die Deformationsergebnisse wurden mit Hilfe von *COMSOL* in einen RMS-Winkelfehler umgerechnet, welcher im

schlechtesten Fall 0,71 und im Durchschnitt 0,4 mrad betrug. Es sei jedoch angemerkt, dass hierbei nur die Deformation von Spiegel, C-Schiene und Fachwerk simuliert wurde und der Schwenktrieb als starre Einspannung angenommen wurde. Gründe für diese vereinfachte Annahme sind fehlende Getriebedaten und die Tatsache, dass die mechanischen Eigenschaften dieses Serienteils ohnehin nicht beeinflussbar waren. Die Ausführung des Masts variiert je nach Untergrund und erforderlichem Fundament, sein Winkelfehler wurde im Falle des Prototypen jedoch mit 0,1 mrad auf Basis seiner Biegelinie analytisch berechnet.

Abbildung 19 zeigt die Verteilung des Winkelfehlers bei 35 mph Wind. Das Maximum tritt an der unteren Kante der Spiegel auf, was durch den asymmetrischen Dreiecksquerschnitt des Fachwerksträgers erklärt wird.

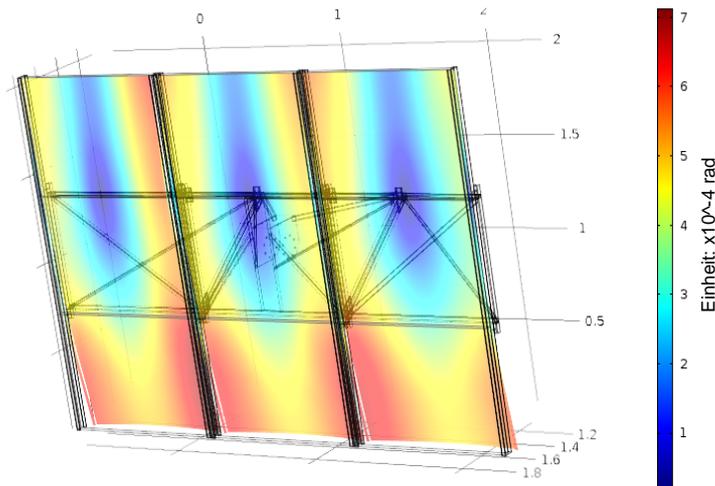


Abbildung 19: Ergebnisse der Simulation des RMS Winkelfehlers bei 35 mph Wind (COMSOL Multiphysics)

3.5 Fertigung und Assemblierung

Die Fertigungs- und Produktionsprozesse für einen Prototypen mit Stückzahl 1 divergieren beträchtlich von jenen, die für das Serienprodukt (100.000 Stück/Jahr) gewählt werden können. In der Großserie werden die C-Schienen zum Beispiel walzprofiliert, was aufgrund der hohen Werkzeugkosten für geringe Stückzahlen nicht wirtschaftlich ist. Für die Prototypschienen wurde ein Abkantprozess gewählt, welcher von der Firma *A&M Metal Forming* in Gardena, Kalifornien übernommen wurde. Auch die Schweißarbeiten für das Fachwerk wurden nicht automatisiert, sondern manuell von der Firma *Advanced Technology Company* in Pasadena durchgeführt.



Abbildung 20: Links - Fertig geschweißter und montierter Fachwerksträger bei der Prüfung der Ebenheitstoleranz. Rechts – Detailaufnahme einer der Verbindungsplatten zwischen Wing und Central Hub.

Um das Fachwerk einerseits vor Korrosion zu schützen und Verformungen durch einen hohen thermischen Gradienten vorzubeugen, wurde die gesamte Schweißkonstruktion mit *Dupont Sky White*, einer weißen Farbe mit hohem Reflexionsgrad, pulverbeschichtet.

Vor dem finalen Zusammenbau wurden die 9 Spiegelpaneele des Prototyps mit *Reverse Shack-Hartman* Technik photogrammetrisch vermessen. Die Ergebnisse des RMS-Winkelfehlers bewegten sich zwischen 0,58 und 0,69 mrad.

Abbildung 21 zeigt den 6m²-Heliostat Prototyp knapp vor der Fertigstellung (mit demontierter zentraler Spiegelbahn) in einer der Werkstätten des *JPL*. Man beachte die einstellbare Winkellage der Solarpaneele, welche im Gegensatz zu den Spiegelpanelen normal auf die einfallenden Sonnenstrahlen stehen sollen.



Abbildung 21: Heliostat Prototyp knapp vor der Fertigstellung am NASA Jet Propulsion Laboratory

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Entwicklungsprozess eines Low-Cost Heliostaten mit Dünnschichtreflektor am *NASA Jet Propulsion Laboratory* wurde erläutert und Kernkomponenten wie Spiegel, Schwenktrieb und mechanische Grundstruktur detailliert behandelt. Hauptaugenmerk lag dabei auf Kostenreduktion durch Entwicklung eines neuen Spiegelkonzeptes bestehend aus einem EPS-Schaumkern in Kombination mit dünnen Edelstahlblechen und einem hochreflektiven, versilberten Polymerfilm. Um die Installationskosten weiter zu senken wurde ein *Stand-Alone Konzept* entwickelt, welches ein autarkes Energiesystem und kabellose Kommunikation aufweist. Neben umfangreichen Zuverlässigkeitstests der Spiegel wurde auch ein skalierter Prototyp mit 3x2m Spiegelfläche gebaut.

Bis zum März 2016 wird der Prototyp umfangreichen mechanischen und optischen Tests unterzogen. Die Ergebnisse dienen unter anderem der Verifikation des FEM-Modells zur Berechnung der Durchbiegung, der Eigenfrequenzabschätzung, des PV/Batteriesystems und der Funktionalität des Controllers. Weitere Details zu den Testergebnissen sowie Detaillösungen werden im Laufe des Jahres 2016 in separaten Publikationen erscheinen.

5 Danksagung

Das in dieser Publikation beschriebene Forschungsprojekt wurde am *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology* unter Vertrag mit der *National Aeronautics and Space Administration* durchgeführt. Die Subventionierung erfolgte durch *DOE's SunShot CSP R&D Funding Opportunity DE-FOA-0000595* mit einem Eigenanteil der *L'Garde Inc.*

Die Verantwortlichkeiten der Autoren dieser Publikation lauten wie folgt:

- Armin Buchroithner: Konstruktion und Bau des 6m²-Prototyps
- Gani Ganapathi: Projektleitung und Kommerzialisierung
- Art Palisoc: Fertigung und Untersuchung der Spiegelpaneele
- Gyula Greschik: Konstruktion und Berechnung der mechanischen Strukturen

Besonderer Dank gilt auch den restlichen Mitarbeitern des Projektes:

- Andrew Kindler: PV- und Batteriesystem
- Sai Nataraj: Steuerungssystem
- Bill Nesmith: Heliostatumgebung, Systemanalyse und Antriebstechnik

Ebenfalls dankend erwähnt für ihre Unterstützung werden Jonathan Reh, Jordi Paredes Garcia, Creed Riley, Ben Furst und Robert Newcomb.

6 Literaturverzeichnis

- [1] EUROSTAT, „Key figures on Europe (2015 edition)“, European Commission, Luxembourg, 2015.
- [2] A. Buchroithner und M. Bader, „Hybridfahrzeuge, Energiespeicher und Betriebsstrategien in der modernen Mobilität“, EnInnov 2014, Graz, 2014.
- [3] EUROSTAT, „Electricity and Heat Statistics“, European Commission, Luxembourg, 2015.
- [4] U.S. Department of Energy - Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, „Concentrating Solar Power Tower System Basics“, [Online]. Available: <http://energy.gov/eere/energybasics/articles/concentrating-solar-power-tower-system-basics>. [Zugriff am 10.01.2016].
- [5] G. J. Kolb, S. A. Jones, M. W. Donnelly, D. Gorman, R. Thomas, R. Davenport and R. Lumia, „Heliostat Cost Reduction Study“, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, 2007.
- [6] G. Ganapathi, A. Palisoc, A. Buchroithner, Sai Nataraj, B. Nesmith, A. Kindler, G. Greschik, K. Gidanian, „Development and Prototype Testing of a Low-Cost Lightweight Thin Film Solar Concentrator“, Proceedings of the ASME 2016 Power and Energy Conference, Charlotte, North Carolina, 2016.
- [7] J. A. Gary, „Heliostat Optical Requirements“, 2015.
- [8] G. Ganapathi, A. Palisoc, B. Nesmith, G. Greschik, K. Gidanian und A. Kindler, „Low-Cost Lightweight Thin Film Solar Concentrator“, Proceedings of ASME 2014 8th International Conference on Energy Sustainability, Boston, MA, USA, 2014.
- [9] „SolarPACES - Catalog of Solar Heliostats“, Sandia National Laboratories, Solar Thermal Technology, Albuquerque, N.M 87185, USA, 2000.
- [10] Peterka, J.A., Tan, Z., Bienkiwicz, B., Cermak, J.E., „Wind Loads on Heliostats and Parabolic Dish Concentrators“, Solar Energy Research Institute, Fort Collins, Colorado, 1988.
- [11] Kinematics Manufacturing, „KDE7E-73MHA-24H004RC Slewing Drive Product Data Sheet“, KMI Group, 21410 N 15th Ln #104, Phoenix, AZ 85027, United States, 2015.