Technology
Arts Sciences
TH Köln

Technische Hochschule Köln

Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme

DLR

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Solarforschung

Bachelorarbeit

Modellprädiktive Regelung eines keramischen Receivers für Solartürme

Markus Tobias Geschonneck
Matr.Nr.: 11131469

Köln, den xxx

Ich versichere, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer oder der Verfasserin/des Verfassers selbst entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Markus Tobias Geschonneck

Köln, den xxx

Unterschrift: ____________________

Erstprüfer:	Dr. Chong Dae Kim
Zweitprüfer:	M. Sc. David Zanger
Angemeldet am	<Datum der Ausgabe des Themas>
Eingereicht am:	<Datum der Abgabe>

Danksagung

Wenn man diesen Textabschnitt nicht haben will, kann man ihn wie alle anderen Abschnitte einfach in der main.tex auskommentieren. Kommentare fügt man dabei über das % Symbol ein.

Abstract

Dies soll eine Vorlage für den Einstieg in LaTeX darstellen. Notwendig für die Nutzung dieser ist VSCode mit den entsprechenden Einstellungen in der settings.json, Strawberry Pearl sowie MikTex.

Generell ist das Hauptdokument die Main.tex. Die ist die einzige Datei, die letztlich ausgeführt wird. Alle anderen Dateien sollten in diese Datei eingebunden werden.

In der Documentclass in der Main.tex sowie in der Packages.tex entscheidet sich das Layout des Berichts. In der Misc.tex werden Informationen für die Titelseite hinzugefügt. Es ist sehr empfehlenswert für jedes Kapitel eine neue *.tex Datei im Ordner „ch“ hinzuzufügen. Das Ergebnis der Kompilierung zeigt immer die Main.pdf.

Schreibt man einfach nur In VSCode in eine neue Zeile wird in der entstehenden PDF einfach in derselben Zeile weiter geschrieben. Dennoch ist es sehr nützlich in neue Zeilen zu schreiben, sodass nachträglich zu korrigierende Sätze nicht in ewig langen Passagen untergehen.
Vor diesem Satz wurde nicht nur eine neue Zeile in VSCode eingefügt, sondern auch ein Doppel-Backslash „\\“ ans Ende der letzten Zeile gestellt. Dadurch entsteht eine neue Zeile ohne Abstand zum vorigen Abschnitt.

Lässt man eine Zeile in VSCode leer, entsteht ein wie oben gezeigter Abstand zwischen den verschiedenen Sätzen.

Lässt man eine Leerzeile und fügt sogar noch ein Doppel-Backslash „\\“ ans Ende des vorangestellten Abschnittes, so entsteht dieser Textabstand.

Gerade zu Beginn eines Kapitels oder Abschnittes hilft manchmal der „\noindent“-Befehl um das Einrücken zu Beginn einer Passage zu verhindern.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Formelverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
TH	Technische Hochschule

Lateinische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
l	Länge	m
$\mathrm{y}_{\mathrm{ref}}$	Referenzmesswert	W/m^2
U_{th}	Thermoelektrische Spannung	V

Griechische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Azimuth Winkel	$^\circ$
σ	Standardabweichung	W/m^2

1 Einleitung

Paar einleitende Worte. Hier auch schreiben, dass die Abbildungen in englischer Sprache sind und die Texte in Deutsch.

1.1 Motivation

Motivation, siehe Davids Masterarbeit, siehe Gall Diss.

Hier muss hin warum Solartürme überhaupt betrachtet werden sollten und wichtig sind.

1.2 Zielsetzung

Zielsetzung, siehe Zielsetzung an Kim und auf Bachelorarbeit Einreichung. Außerdem siehe David Ziele was die Simulationen angeht:

- Wie viel besser ist der MPC, wenn er von den Wolken weiß?
- Wo sind zu jedem Szenario die Grenzen? Also wie viel % darf die MPC Vorhersage vor der eigentlichen Simulation abweichen?

Außerdem hat David schon hier seine Quelle drin, wie man einen Controller auslegt. Wohin mit diesem Inhalt?

1.3 Struktur der Arbeit

Hier die Struktur hin.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel schafft alle relevanten Grundlagen bezüglich verwendeter Methodiken und Komponenten am Solarturm. Darüber hinaus wird die für diese Arbeit benötigte Theorie der modellprädiktiven Regelung erläutert. Zusätzlich werden verschiedene Ansätze der Zielpunktregelung und Nowcasting-Systeme dargestellt. Zum Abschluss des Kapitels wird die in dieser Arbeit genutzte Software vorgestellt.

2.1 Solartürme

Ein Solarturmkraftwerk wandelt Sonnenstrahlung durch einen Energieumwandlungsprozess in Strom um oder nutzt sie zur Unterstützung thermochemischer Prozesse. Es besteht aus einer Vielzahl von Spiegeln, sog. *Heliostaten*, die die Sonnenstrahlung auf einen *Receiver* fokussieren, der auf einem Turm montiert ist. Die nachfolgende Abbildung 2.1 zeigt zwei solcher Türme, inklusive des Heliostatenfeldes am Forschungsstandort Jülich. Der linke Turm wird zur Stromerzeugung genutzt, der rechte dient experimentellen Zwecken mit Hochtemperaturanwendung [1].

Abbildung 2.1: Solarthermisches Demonstrations- und Versuchskraftwerk Jülich [1]

Die solare Strahlung wird durch gezielte Ausrichtung der Heliostaten auf die Spitze des Solarturms, an der sich der Receiver befindet, konzentriert. Dieser absorbiert die Strahlung, und gibt sie an ein Wärmeträgermedium ab, welches dann dem sich anschließenden Prozess zur Verfügung steht. Alternativ kann das erhitzte Medium auch zur späteren Verwendung in einem Energiespeicher zwischengespeichert werden [2, S.11]. Die schematische Darstellung eines Solarturmkraftwerkes zeigt Abbildung 2.2, der in dieser Arbeit fokussierte Teil ist hervorgehoben.

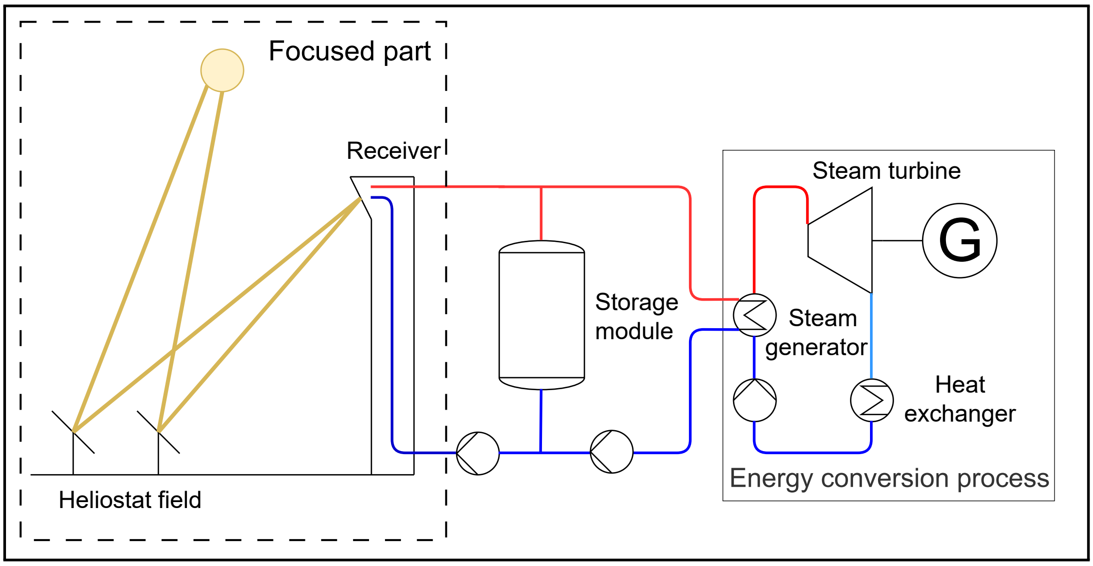

Abbildung 2.2: Vereinfachte schematische Darstellung eines Solarturmkraftwerkes [3, S.5]

Der Wärmespeicher und der Energieumwandlungsprozess werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Im Gegensatz dazu sind die Heliostaten sowie der Receiver und der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf diese Komponenten für das weitere Verständnis der Arbeit relevant und werden näher erläutert.

2.1.1 Heliostaten

Die Heliostaten sind bidirektional bewegliche Spiegel, die die Sonneneinstrahlung auf den Receiver bündeln. Jeder Heliostat besteht aus einer reflektierenden Fläche, einer tragenden Struktur und einem Nachführmechanismus. Letzterer ist erforderlich, um den Brennfleck auch bei wechselnden Sonnenständen statisch zu halten. Dafür verstellt eine integrierte Steuereinheit auf Basis des Sonnenstandes die reflektierende Fläche entsprechend. Die beiden Freiheitsgrade der Heliostaten sind die Drehung in der Elevations- und der Azimut-Ebene, wie sie in Abbildung 2.3 dargestellt sind. [2, S.13]

Größe, Form und Art der spiegelnden Fläche unterscheiden sich bei verschiedenen Heliostat-Typen. Die Spiegelfläche ist zwar bei allen Heliostaten in der Regel rechteckig, besteht bei größeren Heliostaten jedoch aus mehreren kleinen Spiegeln, sog. *Facetten*. Um eine geforderte Brennweite erreichen zu können, sind diese Facetten in einer Ebene oder zueinander gekippt angeordnet. Eine Krümmung der Fläche nach innen erzielt eine höhere Konzentration der Strahlung. [3, S.5]

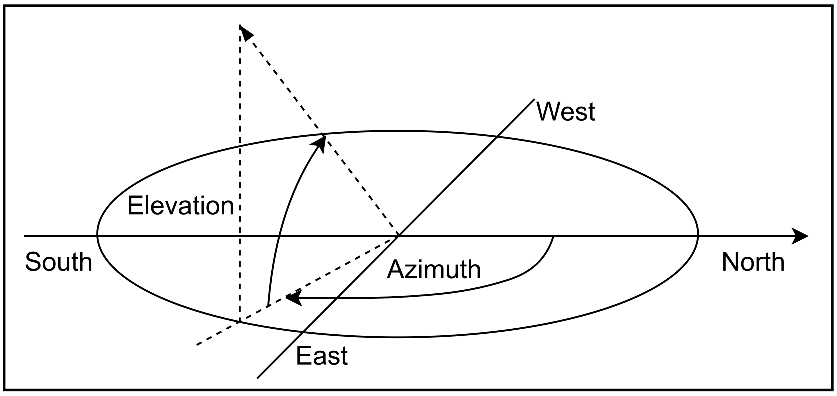

Abbildung 2.3: Darstellung der Elevations- und Azimut-Ebene [3, S.6]

Der tragende Körper bei Heliostaten jeder Größe normalerweise aus wirtschaftlichen Gründen aus einer T-Struktur [4, S.97]. Im Gegensatz zu den bei großen Heliostaten zur Nachführung eingesetzten Schneckengetriebeeinheiten, kommen bei Kleinheliostaten Schubstangenmotoren zum Einsatz. Die Heliostaten am Betrachtungsstandort Jülich bestehen aus vier ebenen, rechteckigen Facetten auf einem T-Träger und sind mit einer Reflexionsfläche von 8,3 m^2 vergleichsweise klein [5, S.4][2, S.13]. Auf der *PS10* (Planta Solar 10) bei Sevilla stehen beispielsweise Heliostaten mit 120 m^2 Reflexionsfläche aufgeteilt auf 28 Facetten [6, S.5]. Die nachfolgende Abbildung 2.4 soll die grundsätzliche Ähnlichkeit im Aufbau der Heliostaten auch bei unterschiedlicher Größe zeigen.

Abbildung 2.4: Ausra Heliostat am Forschungsstandort Jülich mit 8,3 m^2 (links) und Sanlúcar-120-Heliostat auf der PS10 bei Sevilla mit 120 m^2 Reflexionsfläche (rechts) [2, S.13]

Die Gesamtheit der Heliostaten, die um den Receiver eines Solarturms angeordnet sind, wird als Heliostatenfeld bezeichnet. Dieses besteht normalerweise aus identischen Heliostaten, welche in Reihen oder konzentrischen Kreisen angeordnet sind. Denkbare Anordnungen sind Rundum-, Nord- und Südfelder (siehe Abbildung 2.5); die effizienteste Anordnung ist besonders von der geografischen Lage abhängig. Effektiv sind Solarturmkraftwerke vor allem bei steilen Einfallswinkeln der Sonne auf die Spiegel (vgl. Kapitel 2.1.3). Damit ergibt sich zwangsläufig, dass in Polnähe einseitige Felder eine höhere Feldausbeute erreichen während in Äquatornähe Rundum-Felder effektiver sind. Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, handelt es sich in Jülich um ein einseitiges, nach Norden ausgerichtetes Feld, bestehend aus 2153 Heliostaten.

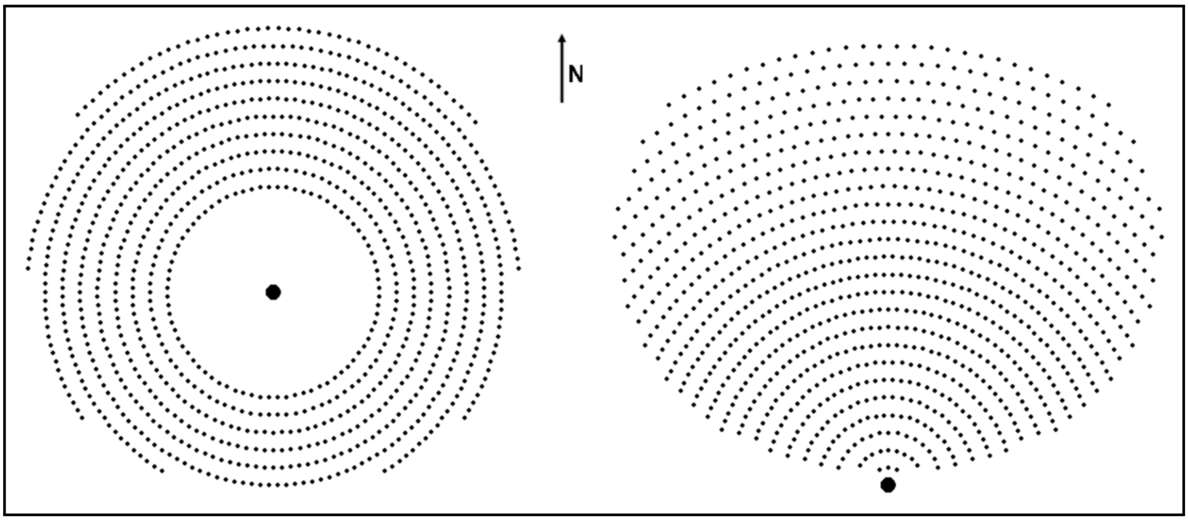

Abbildung 2.5: Verschiedene Heliostatfeld-Layouts auf der Nordhalbkugel: Rundum-Feld (links) und Nordfeld (rechts) [2, S.14]

2.1.2 Receiver

Die Aufgabe des Receivers ist die Absorption der reflektierten Sonneneinstrahlung. Durch Konvektion wird die absorbierte Energie an ein Wärmeträgermedium weitergegeben, das zur weiteren Verwertung oder Speicherung zur Verfügung steht. Receiver von Solarturmkraftwerken unterscheiden sich in ihrem Aufbau, Wärmeträgermedium, Material und den damit einhergehenden physikalischen Grenzen.

Grundsätzlich muss zwischen zylindrischen und rechteckigen Receivern unterschieden werden. Erstere kommen bei Rundum-Feldern zum Einsatz, letztere bei Nord- oder Südfeldern. Je nach Standort und Anwendungsfall kommen sog. *Cavity*-Receiver zum Einsatz, welche nach innen gebogen sind um vor Wärmeverlust durch zu schnelle Windgeschwindigkeiten an der Receiver Vorderseite zu schützen. [7]

Das Material des Receivers ist abhängig vom genutzten Wärmeträgermedium. Typische Medien sind Luft, geschmolzene Salze oder Wasser. Für Wasser oder Salzschmelzen werden meist Receiver aus Metallrohren unterschiedlicher Hochtemperatur-Legierungen verwendet. Für Receiver mit Luft als Wärmeüberträgermedium, wie beispielsweise in Jülich, wird zumeist eine poröse Keramik genutzt. [8][9]

Wenn Eigenschaften wie die maximal zulässigen thermischen Spannungen des Receivers überschritten werden, kann dieser beschädigt werden [10]. Bei einem Receiver mit Salzschmelze als Medium hängt diese beispielsweise mit der lokalen Salztemperatur und -geschwindigkeit sowie der Windgeschwindigkeit zusammen [11]. Dabei wird die lokale Salztemperatur direkt durch die solare Einstrahlung auf dem Receiver beeinflusst.

Eine Möglichkeit, die Einhaltung der maximalen thermischen Spannungen zu gewährleisten, ist also unter anderem die Einführung einer maximalen Flussdichte am Receiver, die auf der Grundlage seiner spezifischen Eigenschaften berechnet werden kann. Dabei ist der zulässige Wert auch stark vom verwendeten Wärmeträgermedium abhängig. Für Rohrreceiver, die mit flüssigem Natrium gekühlt werden, sind beispielsweise maximale Strahlungsflussdichten von $2{,}5\,\mathrm{MW\,m^{-2}}$ erlaubt, während bei luftgekühlten Rohrreceivern nur $200\,\mathrm{kW\,m^{-2}}$ [2, S.17] erreicht werden dürfen.

Die Flussdichte ϕ ist dabei als Strahlungsfluss F pro Fläche A zu verstehen, wobei F das Verhältnis aus absorbierter Strahlungsenergie Q pro Zeiteinheit t darstellt (siehe Formel 2.1 und 2.2).

$$F = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} \tag{2.1}$$

$$\phi = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}A} \tag{2.2}$$

Zur Bestimmung der Leistung, die dem System auf diese Weise zugeführt wird, kann die Flussdichte verwendet werden. Sie ergibt sich aus der Integration der Flussdichte ϕ über der Fläche des Receivers.

$$P = \int_A \phi \, \mathrm{d}A \tag{2.3}$$

Je nach Anwendungsfall kann auch ein Limit für die minimal erlaubte Flussdichte auf dem Receiver existieren, um beispielsweise das Problem von Verfestigung von Salzschmelzen zu vermeiden. Da das in dieser Arbeit untersuchte Turmkraftwerk in Jülich jedoch mit einem ebenen, rechteckigen Receiver aus Keramik und mit Luft als Medium ausgestattet ist, wird dies hier nicht weiter betrachtet.

2.1.3 Optische Verluste

Um den effizientesten Betrieb solarer Turmkraftwerke zu erreichen, ist die Minimierung optischer Verluste wesentlich. Diese optischen Verluste sind einerseits geografischer Natur, aber auch durch die Wirkweise der Heliostaten bedingt und werden nachfolgend erläutert. Auf meteorologische Einflüsse wird in Kapitel 2.2 näher eingegangen.

Kosinus-Verluste

Die *Kosinus-Verluste* sind ein geografischer Einflussfaktor. Die Sonnenstrahlen (*solar radiation*) treffen auf die Spiegeloberfläche (*mirror*) unter einem bestimmten Winkel, der von Sonnenstand und Ausrichtung des Spiegels abhängt. Dieser Winkel bestimmt die effektive Reflexionsfläche (*effective refelction surface*), welche senkrecht zur Einfallsrichtung der Strahlung projiziert wird. Wie in Abbildung 2.6 zu erkennen ist, entspricht das Verhältnis zwischen der effektiven Fläche und der Gesamtfläche jedes Heliostaten dem Kosinus des Winkels zwischen der Einfallsrichtung und der Hauptnormalen der Spiegelfläche (*main normal*). Bei zunehmendem Winkel β, also ungünstigeren Lichteinfallswinkeln, nimmt die effektive Fläche ab und die Effizienz der Heliostaten wird geringer. Diese wird mit dem Kosinus-Wirkungsgrad $\cos\beta$ ausgedrückt, der also in direktem Zusammenhang mit der reflektierten Sonnenleistung steht. Der Einfluss der Kosinus-Verluste zeigt sich beispielsweise an Untersuchungen am Solar One Tower in Süd-Kalifornien, dort schwankt der Kosinus-Wirkungsgrad in dieser Gegend jährlich zwischen 0,65 und 0,9, je nach Sonnenstand und damit verbundener Heliostatenposition. [12]

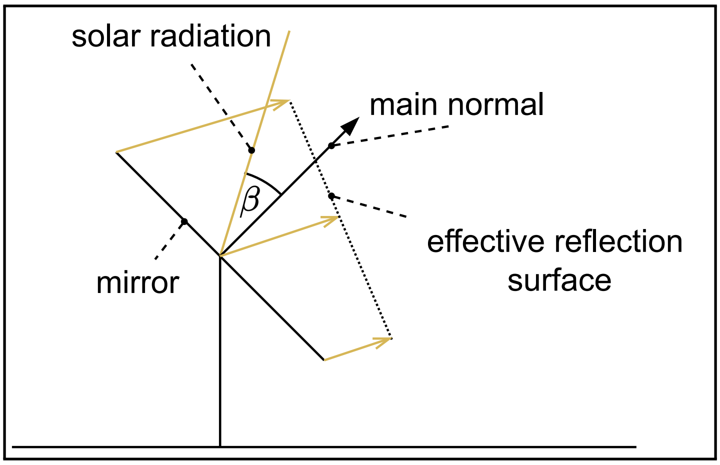

Abbildung 2.6: Seitenansicht eines Heliostaten zur Verdeutlichung des Winkels β im Kontext der Kosinus-Verluste [3, S.7]

Reflexionsverluste

Wenn das Sonnenlicht auf die Spiegel trifft, wird ein Teil absorbiert, was die Menge des reflektierten Lichts verringert. Diese Verringerung des Reflexionsvermögens wird durch Umweltfaktoren wie Regen und Staub weiter verstärkt. Reflektieren saubere Spiegeloberflächen normalerweise zwischen 87 % bis 94 % des auf sie treffenden Sonnenlichts, sinkt dieser Wert durch umweltbedingte Verschmutzung bis auf 80 %. [2, S.14]

Blockierung und Abschattung

Je nach Sonnenstand, Heliostatanordnung und Objekten mit Schattenwurf, wie dem Turm, werden Heliostaten verschattet oder „blockiert“. Im Falle einer *Abschattung* ist der direkte Weg zwischen Sonne und Heliostat (teilweise) versperrt, sodass die Sonnenstrahlung nicht ungehindert auf die Spiegelfläche treffen kann. Bei der *Blockierung* ist der Weg zwischen Heliostat und Receiver betroffen; die reflektierte Strahlung eines Heliostaten wird durch einen anderen Heliostaten (teilweise) blockiert. Abbildung 2.7 visualisiert dies. Das Problem der Abschattung betrifft alle Heliostaten und tritt besonders bei niedrigen Sonnenständen auf. Im Gegensatz dazu sind von der Blockierung, unabhängig vom Sonnenstand, zumeist die hinteren Heliostatenreihen betroffen. Durch ein geeignetes Felddesign kann diesen Verlusten entgegengewirkt werden. [13, S.686]

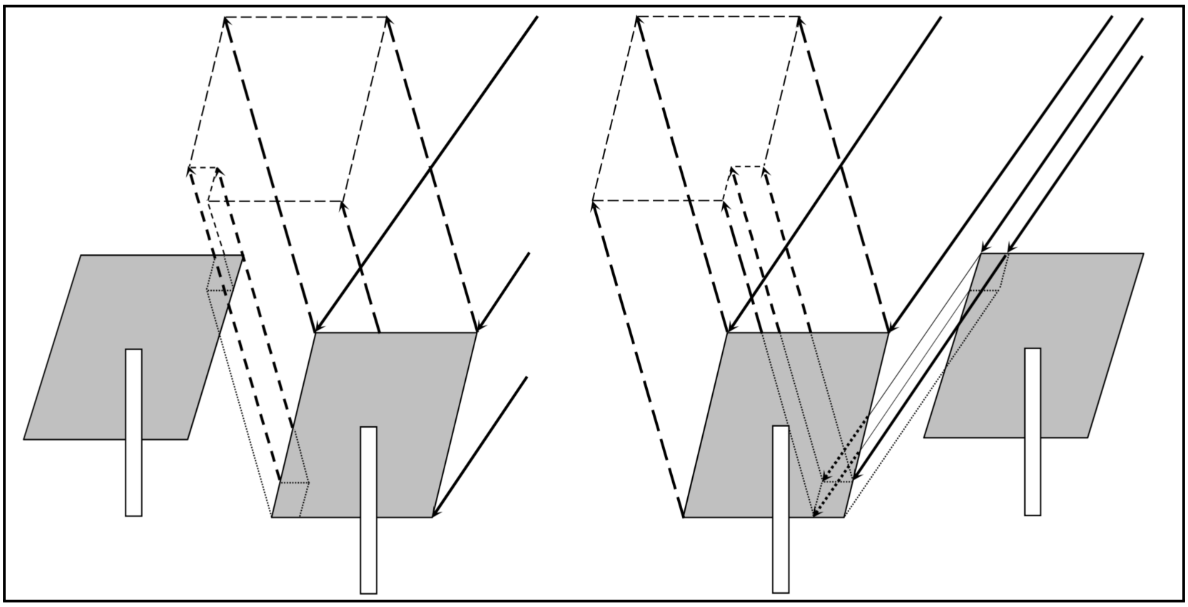

Abbildung 2.7: Blockierung (links) und Abschattung (rechts) von Heliostaten [2, S.15]

Spiegelfehler

Ein weiterer optischer Verlustfaktor sind die *Spiegelfehler*. Als solche werden Abweichungen eines Spiegels von seiner idealen Form genannt, welche den Spiegel wellig erscheinen lassen. Hervorgerufen wird dieser Fehler beispielsweise durch innere Spannungen in der Heliostatenstruktur als Folge von Wind oder Temperaturschwankungen oder aber durch Ungenauigkeiten in der Herstellung. Die Größe des Fehlers wird als Winkel zwischen dem tatsächlichen Normalvektor des Spiegels und dem idealen Normalvektor gemessen und liegt in der Regel zwischen 1,5 mrad und 2,5 mrad. [2, S.16]

Streuung

Als *Streuung* bezeichnet man den Teil der reflektierten Sonnenstrahlung, der den Receiver verfehlt und nicht in nutzbare Energie umgewandelt werden kann. Dies geschieht beispielsweise durch die oben genannten Spiegelfehler oder wenn der Abstand zwischen Heliostat und Receiver so groß ist, dass das Abbild der Reflexion auf dem Receiver größer ist als der Receiver selbst. [2, S.15-16]

Nachführfehler

Der Nachführfehler beschreibt die fehlerhafte Ausrichtung der Heliostaten. Er kann durch Schmutz oder Verschleiß an den Nachführachsen, oder Ungenauigkeiten bei der Motorausrichtung und Sonnenstandsmessung hervorgerufen werden [14, S.7]. Auch dieser Fehler wird als Winkel gemessen und liegt normalerweise bei 0,5 mrad bis 2 mrad [2, S.17].

Atmosphärische Abschwächung

Die reflektierte Strahlung wird auf dem Weg zwischen Heliostat und Receiver durch Absorption und Streuung an Luftmolekülen abgeschwächt. Die Intensität der Abschwächung ist von der Höhe des Heliostatenfeldes über dem Meeresspiegel und der lokalen Luftfeuchtigkeit, besonders aber von der Distanz zwischen Heliostat und Receiver, abhängig. Bei einem Abstand von 1000 m kann dir Abschwächung bis zu 1,2 % betragen [15, S.121][2, S.17].

2.2 Nowcasting-Systeme zur Wettervorhersage

Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Analyse des Wolkeneinflusses, welcher als meteorologischer optischen Verlust auf das Gesamtsystem des Solarturms einwirkt. Um eine zuverlässige Regelung hinsichtlich der im Kapitel 2.1.2 beschriebenen physikalischen Grenzen des Receivermaterials zu gewährleisten, ist eine möglichst genaue Wolkenvorhersage unerlässlich. In der Praxis wird dies durch die sogenannten *Nowcasting Systeme* erreicht, die im Gegensatz zu den klassischen Modellen der Wettervorhersage durch zeitlich und räumlich hochauflösende Beobachtungen genauere lokale Vorhersagen liefern [16].

Für deutschlandweit flächendeckende Vorhersagen nutzt der deutsche Wetterdienst u. a. Sensorik zur Überwachung von Luftdruck, -temperatur und -feuchte sowie Radarsysteme und Satellitenbilder [16][17]. Durch Abruf und Verarbeitung dieser Daten im 5-Minutentakt können regionale Wetterprognosen für die kommenden Stunden generiert werden.

Für den Anwendungsfall des Solarturms ist eine solche Prognose jedoch nicht ausreichend. Je präziser die jeweils lokale Vorhersage für das Heliostatenfeld ist, desto effektiver ist die Regelung. Da die Auflösung der deutschlandweiten Vorhersage lediglich rund 1 km × 1 km beträgt [16][18], während sich das Heliostatenfeld in Jülch auf eine Fläche von rund 330 m × 310 m beschränkt, sind lediglich sehr grobe Vorhersagen zu erwarten. Darüber hinaus ist auch die zeitliche Auflösung von 5 Minuten [18] unterhalb der Möglichkeiten anderer Nowcasting Systeme [19][20, S.272].

Ein Instrument für zeitlich und räumlich hochauflösende Vorhersagen sind die sogenannten „All-sky imagers“ (*ASI*) in Kombination mit Pyrheliometern. Bei ASIs handelt es sich um nach oben gerichtete Kameras, welche 180° × 180° halbkugelförmige Bilder mit dem Zweck der Wolkenüberwachung erzeugen. Pyrheliometer sind Messgeräte zur Ermittlung der direkten Sonneneinstrahlung (der *direct normal irradiation*, kurz: *DNI*). Der Prozess zur Erstellung von Nowcasting Vorhersagen auf Basis dieser Bilder und Messdaten wird beispielsweise von Samu *et al.* in [21] beschrieben.

Das DLR verwendet in Spanien und Jülich bereits ein Nowcasting System auf Basis der ASIs. Es erstellt in subminütlicher Auflösung Einstrahlungskarten des betrachteten Solarfeldes mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 20 m×20 m. Tabelle 2.1 fasst alle Schritte zur Erstellung dieser Karten zusammen. [21, S.4,S.13][19].

Tabelle 2.1: Vorgehen zur Erstellung der Einstrahlungskarten im Nowcasting mittels ASIs (nach[21, S.4])

Schritt	Beschreibung
1	Wolkensegmentierung
2	Bestimmung der 3D Koordinaten der Wolken
3	Extraktion der Wolkenbewegung
4	Vorhersage der zukünftigen Wolkenpositionen
5	Ermittlung der Lichtdurchlässigkeit der Wolken
6	Errechnen des Schattenwurfs
7	Erstellung der Einstrahlungskarten

Im Rahmen der Segmentierung (Schritt 1) wird durch Bilderkennung (z. B. mittels neuronaler Netzwerke) festgestellt, welche der aufgenommenen Pixel zu Wolken gehören. Für die Bestimmung der Wolkenpositionen (2) werden mindestens zwei ASIs benötigt, welche den Himmel zeitgleich aus unterschiedlichen Winkeln aufnehmen. Zu diesem Zweck werden sie rund 500 m bis 1000 m entfernt voneinander positioniert. Der Effekt der Stereoskopie ermöglicht auf dieser Basis die Bestimmung der Position und Ausdehnung im dreidimensionalen Raum [21, S.5]. Durch Analyse aufeinander folgender Bilder der Kameras kann die jeweilige Wolkenbewegung erfasst werden (3), die Aufschluss über die zukünftigen Positionen dieser Wolken (4) gibt. Die nachfolgende Abbildung 2.8 visualisiert exemplarisch, den jeweiligen Informationsgehalt der unbearbeiteten Kamerabilder (Links), der Bilder nach Segmentierung (Mitte) und nach Extraktion der Bewegungsvektoren (Rechts).

Die Ermittlung der Lichtdurchlässigkeit der Wolken (5) geschieht mithilfe der Messwerte von Pyrheliometern. Sofern die betrachtete Wolke im direkten Weg zwischen Sonne und Pyrhe-

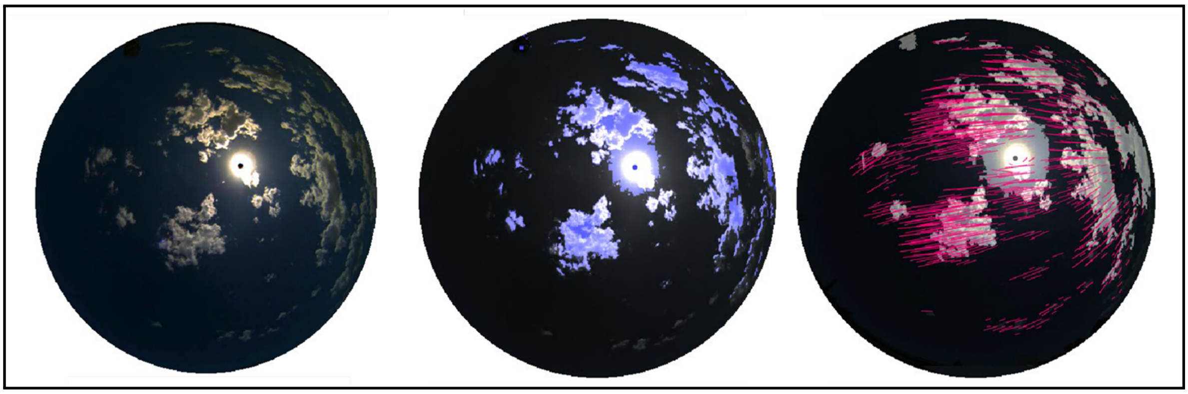

Abbildung 2.8: Beispiel eines unbearbeiteten ASI-Bildes (Links), eines segmentierten Bildes (Mitte) und eines Bildes inklusive visualisierter Bewegungsvektoren (Rechts) (nach [22, S.8])

liometer liegt, kann aus den Messwerten direkt die Lichtdurchlässigkeit der Wolke bestimmt werden. Andernfalls ergibt sich die Durchlässigkeit aus einer Wahrscheinlichkeitsanalyse mit historischen Wolkenhöhen- und Transmissionsmessungen sowie aktuellen Transmissionsmessungen anderer Wolken und deren Wolkenhöhen [23].

Durch Erfassung der Sonnenposition aus den Bildern der ASIs sowie der Wolkenpositionen und -bewegungsvektoren kann die resultierende lokale Verschattung geometrisch bestimmt werden (6). In Kombination mit der Lichtdurchlässigkeit ergeben sich zu dem aktuellen Zeitpunkt sowie prädiktiv in der benötigten zeitlichen Auflösung und über einen Horizont von 15 min bis 60 min die Einstrahlungskarten (7). Beispielhaft ist dies als Ergebnis des Nowcastings in Abbildung 2.9 zu sehen. Das insgesamt überwachte Feld erstreckt sich über $8\,\text{km} \times 8\,\text{km}$, jedes einzelne Pixel stellt den Einstrahlungswert für eine Fläche von $20\,\text{m} \times 20\,\text{m}$ dar. [21, S.14]

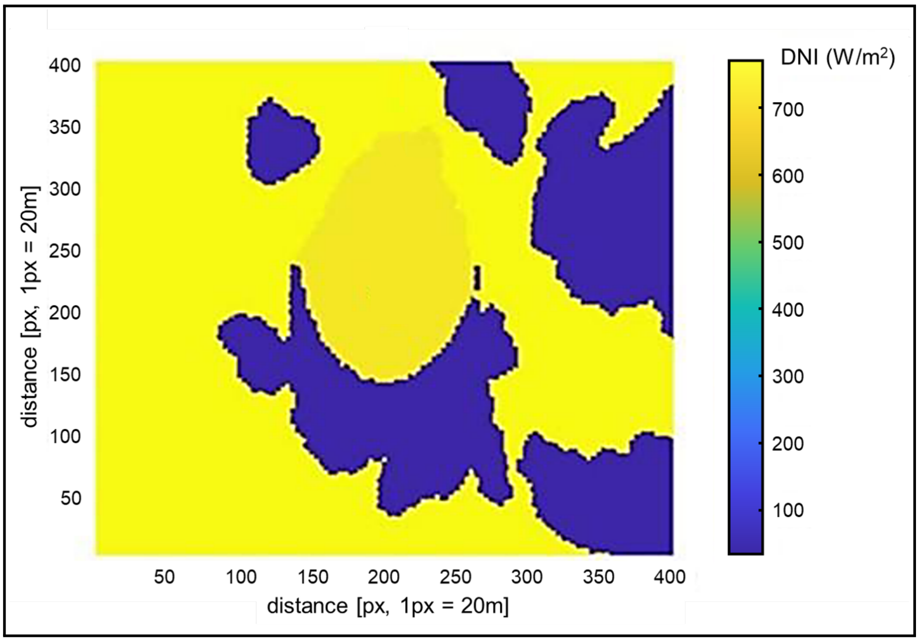

Abbildung 2.9: Beispielhafte Darstellung der Einstrahlungskarte als Ergebnis des Nowcastings (nach [21, S.14])

2.3 Modellprädiktive Regelung

Das Ziel eines Reglers ist im Allgemeinen, einen sich zeitlich verändernden Prozess von außen so zu beeinflussen, dass dieser Prozess in einer vorgegebenen Weise abläuft. Dazu besitzt das zu regelnde System mindestens eine beeinflussbare Größe und eine zurückgeführte Messgröße, die mit einer Führungsgröße verglichen wird. Weiterhin soll die Wirkung von Störungen so gut wie möglich unterdrückt werden [24, S.1ff]. Eine verbreitete Art der Regelung ist die hier vorgestellte modellprädiktive Regelung (kurz *MPR* bzw. *MPC*).

2.3.1 Grundlagen

Ein wesentliches Merkmal der MPC ist die Möglichkeit künftige Modellparameter in die Regelung einzubeziehen. Weiterhin besteht mit MPC die Möglichkeit, komplexe nicht-lineare *MIMO*-Systeme (**M**ulti **I**nput **M**ulti **O**utput) effektiv zu regeln. Der wohl bedeutendste Grund dafür, dass MPC in der Praxis mit dem PID-Regler den Stand der Technik ausmacht [25, S.viii], ist jedoch die zusätzliche Möglichkeit, Ein- und Ausgangsgrößen Systems mittels sog. *Constraints* zu limitieren; nachteilig ist jedoch der damit direkt verbundene hohe Rechenaufwand. [25, S.1-2]

Der MPC hat diese speziellen Features aufgrund des Zusammenspiels seiner beiden Hauptkomponenten: einer Optimierungseinheit und einem mathematischen Modell des zu regelnden Systems. Abbildung 2.10 zeigt den Aufbau eines Regelkreises mit dem MPC. Ein Beispiel für eine zu regelnde Anlage, die („Plant“), stellt ein Solarturmkraftwerk dar.

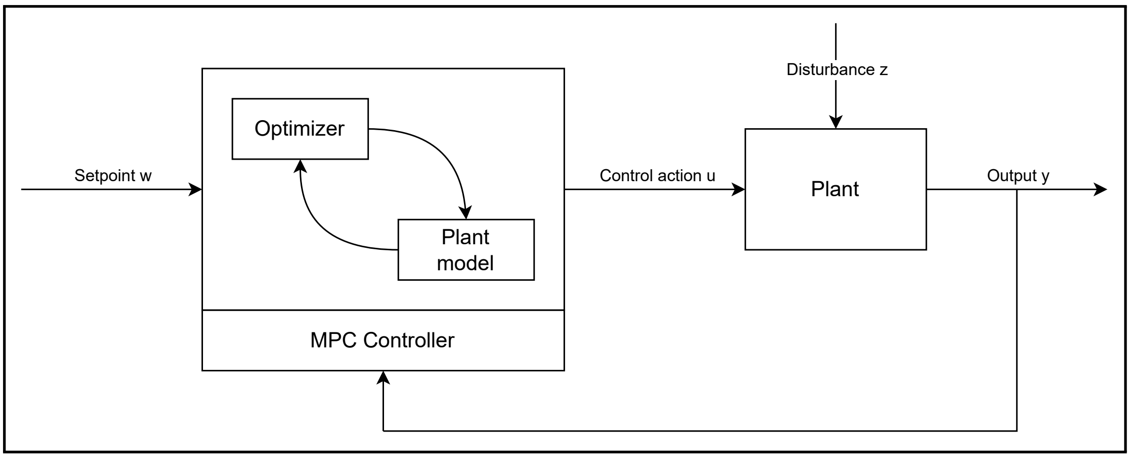

Abbildung 2.10: Geschlossener Regelkreis mit einem MPC gemäß[26, S.2]

Zum besseren Verständnis des Funktionsprinzips eines modellprädiktiven Reglers dient die nachfolgende Abbildung 2.11. Es ist erkennbar, dass der Regler zum Zeitpunkt k über die Dauer des gesamten *Prädiktionshorizontes* N_2 mittels des hinterlegten Modells die *Ausgangsgröße* $\boldsymbol{y}$ simuliert. Die Berechnung geschieht dabei in durch die *Sample Time* T_s vorgegebenen Zeitschritten. Dafür kalkuliert die Optimierungseinheit für den *Regelungshorizont* von

Zeitpunkt $k + N_1$ bis $k + N_u$ die optimalen *Stellgrößen* $\boldsymbol{u}$, sodass sich $\boldsymbol{y}$ der *Referenztrajektorie* $\boldsymbol{r}$ so gut wie möglich annähert. Der Abstand zwischen der Referenztrajektorie und der Ausgangsgröße wird mit dem *Fehler* $\boldsymbol{e}$ bezeichnet, der im Zuge der Regelung minimiert wird. Nach jedem Zeitschritt T_s wird lediglich die erste kalkulierte Stellgröße an das System weitergegeben, bevor sich die Horizonte um einen Zeitschritt verschieben. Auf Basis der Rückführung von Messgrößen des Systems ergibt sich das Optimierungsproblem des nächsten Zeitschritts. [26, S.3]

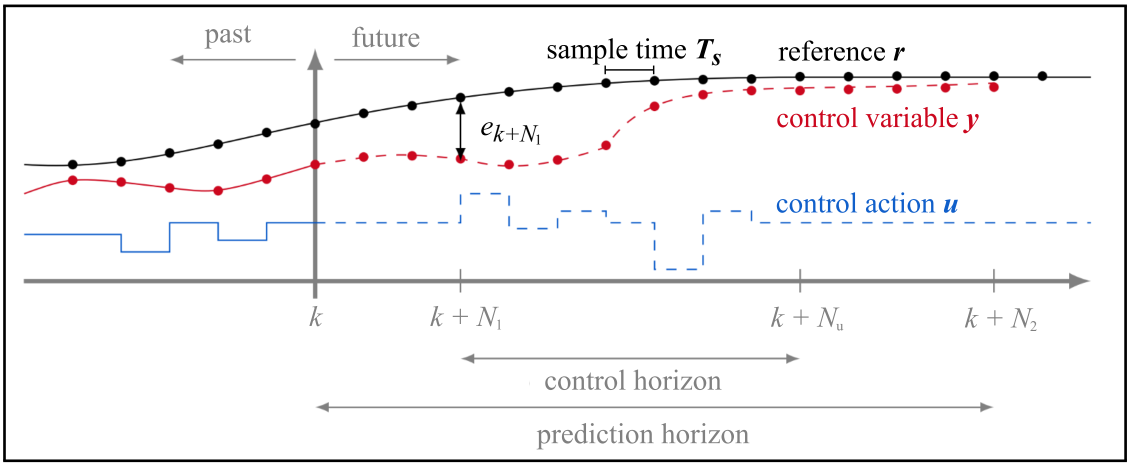

Abbildung 2.11: Funktionsprinzip eines MPC nach [26, S.3] gemäß [27]

2.3.2 Modellierung des Systems

Ein grundlegender Baustein zur erfolgreichen Regelung mit einem modellprädiktiven Regler ist die Abbildung des zu regelnden Systems durch mathematische Formeln – die Modellbildung. Je präziser das zu regelnde Realmodell in der Modellbildung beschrieben wird, desto genauer werden auch die Ergebnisse der Regelung. Dabei kann das System sowohl in diskreter als auch kontinuierlicher Form beschrieben werden; für die Optimierung werden kontinuierliche Systeme aus Differenzialgleichungen und algebraischen Gleichungen jedoch in der Regel diskretisiert (vgl. Kapitel 2.3.3), sodass das System letztlich wie in den Gleichungen 2.4 - 2.6 zu beschreiben ist. Dabei steht $\boldsymbol{x}$ für die dynamischen Modellzustände, $\boldsymbol{u}$ für die Stellgrößen, $\boldsymbol{z}$ für algebraische Größen und $\boldsymbol{p}$ bzw. $\boldsymbol{p}_{tv}$ für (zeitabhängige, **t**ime **v**arying) Modellparameter. [26, S.3][28]

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = f(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k, \boldsymbol{z}_k, \boldsymbol{p}_{tv,k}, \boldsymbol{p}) \tag{2.4}$$

$$\boldsymbol{0} = g(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k, \boldsymbol{z}_k, \boldsymbol{p}_{tv,k}, \boldsymbol{p}) \tag{2.5}$$

$$\boldsymbol{y}_k = h(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k, \boldsymbol{z}_k, \boldsymbol{p}_{tv,k}, \boldsymbol{p}) \tag{2.6}$$

2.3.3 Diskretisierung

Im Vergleich zu diskreten Modellen ist der rechnerische Aufwand zur Lösung kontinuierlicher Modelle höher. Zur Lösung praktischer Probleme sind daher heutzutage Schieß- und Kollokationsverfahren, die das System diskretisieren und so in ein *Nichtlineares Programm* (NLP) umformulieren, erfolgversprechender [5, S.63]. Nachfolgend wird die Methode der orthogonalen Kollokation vorgestellt, da diese die inhärente Sensitivität eines Schießverfahrens vermeidet und weniger präzise Startwerte für eine erfolgreiche Lösung erfordert [29, S.981]. Für komplexe, nichtlineare Kraftwerksmodelle ist diese Methode zu bevorzugen [30, S.247]. Bei der Kollokation werden die Zustands- und auch die Eingangstrajektorien diskretisiert und über ein Polynom angenähert. Die Optimierungsvariablen des NLPs bilden zum einen die Kollokationspunkte der Zustandstrajektorien, an denen die Systemdynamik erfüllt sein muss und zum anderen die Stützstellen der Eingangstrajektorien zu Beginn und Ende der finiten Elemente [5, S.63-64][31, S.2].

Abbildung 2.12 verdeutlicht das Prinzip der orthogonalen Kollokation. Die Zeit innerhalb der in Absatz 2.3.1 erläuterten Sample Time wird in $i = 1, ..., \mathrm{NE}$ finite Elemente der Dauer Δt eingeteilt. Weiterhin werden für jedes Element $j = 0, ..., K$ Kollokationspunkte eingeführt zu den diskreten Zeitpunkten $\tau \in [0, 1]$. Die Ansatzfunktion der Approximationspolyome innerhalb der finiten Elemente ist K-ten Grades:

$$\boldsymbol{x}_i^K(t) = \boldsymbol{\alpha}_0 + \boldsymbol{\alpha}_1 t + ... + \boldsymbol{\alpha}_K t^K \tag{2.7}$$

Die erforderliche Steigung der Polynome an den Kollokationspunkten ist durch die Zustandstrajektorien als Optimierungsvariable vorgegeben. In Abbildung 2.12 ist zu erkennen, dass auch die Kontinuität der einzelnen Polynome elementübergreifend erfüllt wird, wenn

$$\boldsymbol{X}_i^K(t_{i+1}) = \boldsymbol{x}_{i+1,0} \tag{2.8}$$

gilt. Diese Kontinuität gilt jedoch nur für die Zustände und nicht deren zeitliche Ableitungen [31, S.2].

Die Verteilung der Kollokationspunkte innerhalb der finiten Elemente geschieht in der Regel nach vier Methoden [32, S.48]:

- Äquidistant,
- Legendre-Gauss,
- Legendre-Gauss-Radau,
- Legendre-Gauss-Lobatto

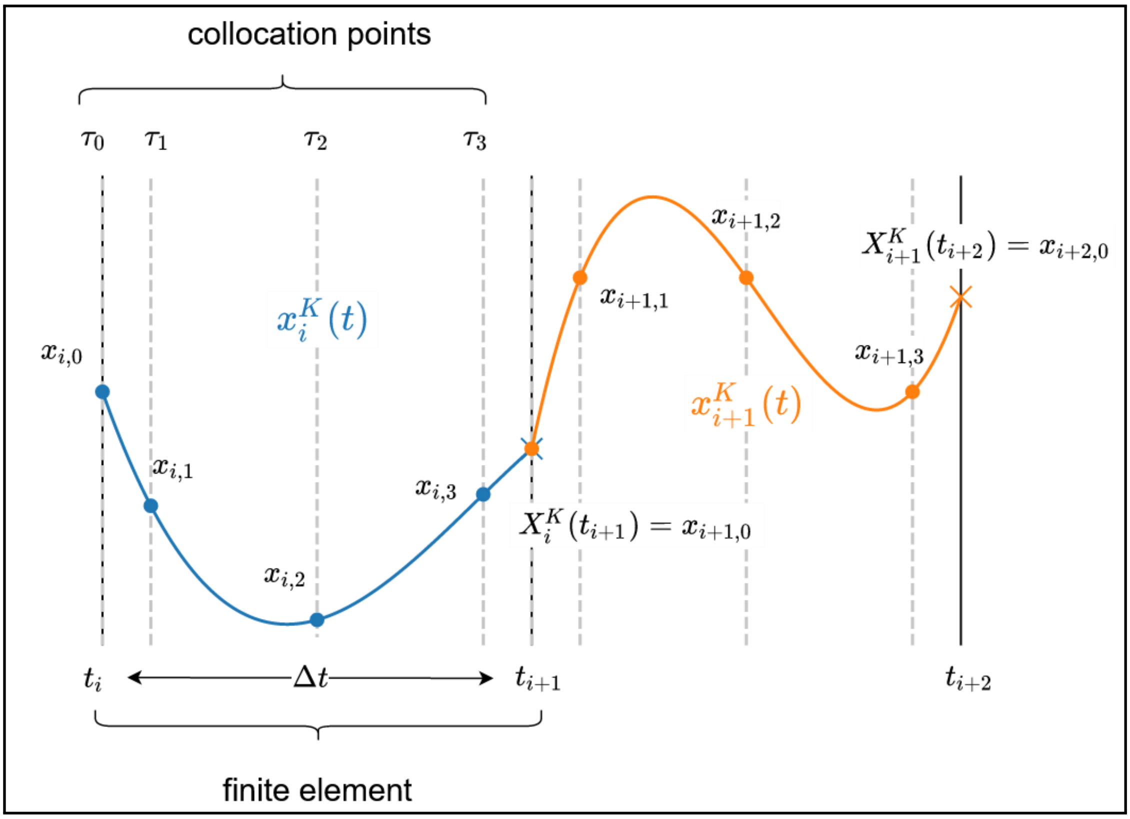

Abbildung 2.12: Beispielhafte orthogonale Kollokation auf finiten Elementen [28]

Äquidistante Verteilungen werden in der Praxis nicht genutzt, je nach Systemdynamik muss zwischen den weiteren Methoden gewählt werden [32]. Die nachfolgende Abbildung 2.13 zeigt die unterschiedlichen Verteilungen für $K = 10$ Kollokationspunkte.

Die Approximationspolynome berechnen sich aus

$$\boldsymbol{x}_i^K(t) = \sum_{j=0}^{K} L_j(\tau)\boldsymbol{x}_{i,j}, \tag{2.9}$$

wobei $L_j(\tau)$ das Lagrange-Polynom darstellt, welches nach Gleichung 2.10 beschrieben wird:

$$\begin{gathered} L_j(\tau) = \prod_{\substack{k=0 \\ k\neq j}}^{K} \frac{(\tau - \tau_k)}{(\tau_j - \tau_k)}, \quad \tau = \frac{t - t_i}{\Delta t_i}, \quad \Delta t_i = t_{i+1} - t_i \\ \forall\ i \in \{1, \ldots, \mathrm{NE}\} \text{ and } j \in \{0, \ldots, K\} \end{gathered} \tag{2.10}$$

Die zeitliche Ableitung des Polynoms wird wie folgt bestimmt

$$\begin{gathered} \left.\frac{d\boldsymbol{x}_i^K}{dt}\right|_{t_{i,k}} = \sum_{j=0}^{K} \frac{\boldsymbol{x}_{i,j}}{\Delta t_i} \underbrace{\left.\frac{dL_j}{d\tau}\right|_{\tau_k}}_{a_{j,k}}, \\ \forall\ i \in \{1, \ldots, \mathrm{NE}\} \text{ and } k \in \{0, \ldots, \mathrm{K}\} \end{gathered} \tag{2.11}$$

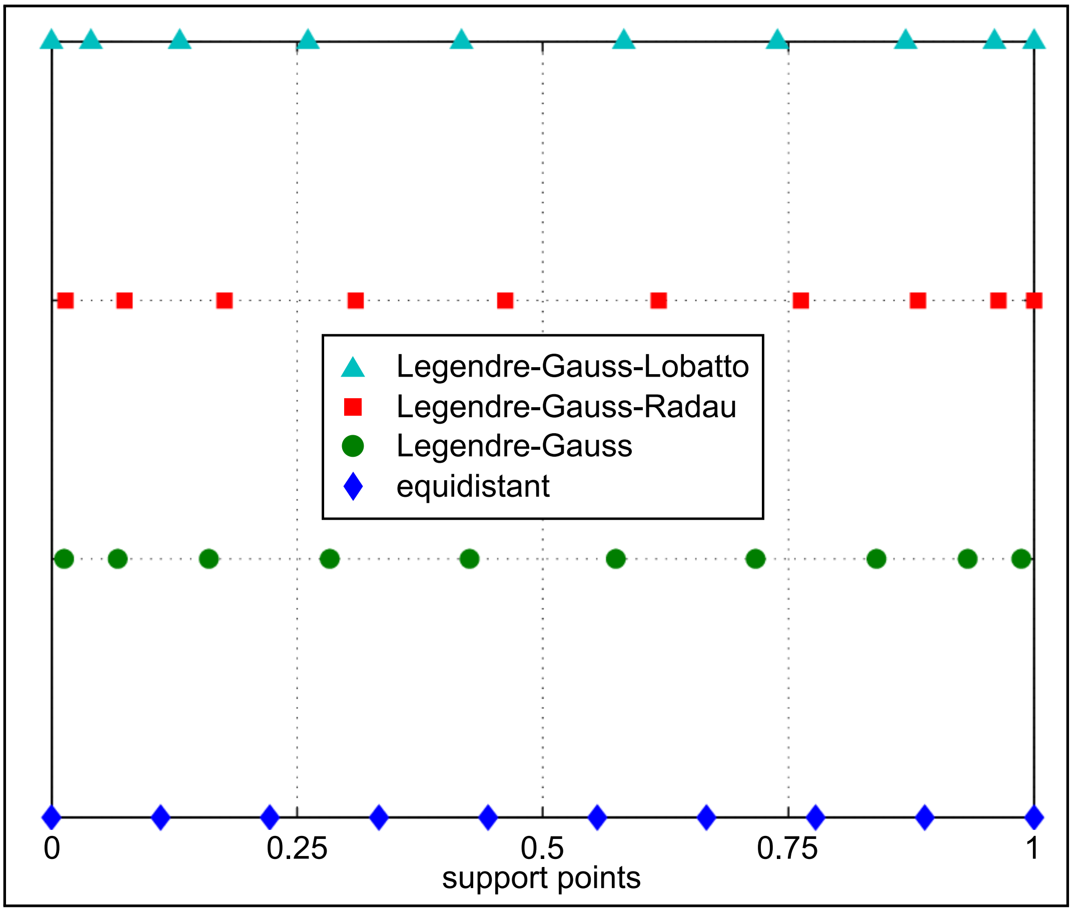

Abbildung 2.13: $K = 10$ Kollokationspunkte in Verteilungen nach Legendre-Gauss, Legendre-Gauss-Radau, Legendre-Gauss-Lobatto oder äquidistant im Intervall $[0, 1]$ (gemäß [32, S.48])

wobei der Term $a_{j,k}$ konstant ist und vorberechnet werden kann. Die Erfüllung der Systemdynamiken durch das Polynom an den Kollokationspunkten kann anhand von Gleichheitsbedingungen formuliert werden. Dabei steht $\dot{\boldsymbol{x}}$ für die durch Differentialgleichungen beschriebene Systemdynamik [5, S.70].

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i(\tau) = \sum_{j=0}^{K} \frac{\boldsymbol{x}_{i,j}}{\Delta t_i} a_{j,k} \qquad (2.12)$$

$$\forall\ i \in \{1, \ldots, \mathrm{NE}\} \text{ and } k \in \{0, \ldots, \mathrm{K}\}$$

An den Stützstellen der Elemente werden die Gleichheitsbedingungen für die Übergänge der Elemente definiert. Der Startwert eines Polynoms ist festgelegt durch das Polynom des vorigen Elementes zum Zeitpunkt $\tau = 1$, bei dem der Stetigkeitskoeffizient d_j vorberechnet werden kann.

$$\boldsymbol{x}_i^K(t_{i+1}) = \sum_{j=0}^{K} \underbrace{L_j(\tau = 1)}_{d_j} \boldsymbol{x}_{i,j} \qquad (2.13)$$

$$\forall\ i \in \{1, \ldots, \mathrm{NE}\}$$

Die Gleichungen 2.12 und 2.13 werden in das Optimierungsproblem der modellprädiktiven Regelung als Gleichheitsbedingungen eingebunden.

2.3.4 Kostenfunktion

Liegt dem Regler ein mathematisch hinreichend beschriebenes Modell vor, kann eine sogenannte Kostenfunktion aufgestellt werden, welche die Abweichung zwischen dem vorliegenden und dem gewünschten Systemzustand beschreibt. Während des Optimierungsprozesses wird die in Abbildung 2.10 dargestellte Optimierungseinheit diese Funktion minimieren und somit den Fehler $\boldsymbol{e}$ reduzieren. In der Kostenfunktion sollte der Vergleich der zu regelnden Ausgangsvariablen mit der Referenztrajektorie über den Regelungshorizont abgebildet sein. Dies geschieht zumeist in quadratischer Form, aufgrund der Differenzierbarkeit und der globalen Konvergenz dieser Gleichungen [33, S.24][26, S.3]. Weiterhin ist es in der Regel zielführend, die errechnete Veränderung der Eingangsvariablen $\Delta\boldsymbol{u}$ zwischen zwei Zeitschritten in die Kostenfunktion mit aufzunehmen, um einem unruhigen Regelverhalten vorzubeugen [33, S.24]. Ein mathematisches Beispiel einer solchen Kostenfunktion $\boldsymbol{J}$ ist in Formel 2.14 zu sehen; dabei stehen $\boldsymbol{W_w}$ und $\boldsymbol{W_u}$ für Gewichtungsmatrizen und $\boldsymbol{y}(k+i|k)$ für die zum Zeitpunkt k bezüglich des Zeitpunktes $k+i$ vorhergesagte Ausgangsvariable. [26, S.3]

$$\boldsymbol{J} = \sum_{i=N_1}^{N_2} \|\boldsymbol{r}(k+i \mid k) - \boldsymbol{y}(k+i \mid k)\|_{\boldsymbol{W_w}} + \sum_{j=1}^{N_u-1} \|\Delta\boldsymbol{u}(k+j \mid k)\|_{\boldsymbol{W_u}} \tag{2.14}$$

2.3.5 Constraints

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, sind auch die Constraints, also Beschränkungen auf Ein- und Ausgangsgrößen des Systems, ein wesentliches Merkmal modellprädiktiver Regelung. Während der Optimierung der Kostenfunktion wird bei Einbindung von Constraints sichergestellt, dass beispielsweise mechanische oder physikalische Limitierungen des Systems nicht überschritten werden. Dabei ist zwischen den sogenannten *hard constraints* und *soft constraints* zu unterscheiden. Nicht zu überschreitende, harte Limitierungen treten zumeist bei den Eingangsgrößen auf; beispielhaft kann das maximale Drehmoment eines Motors genannt werden. Im Gegensatz dazu sind harte Beschränkungen auf Ausgangsgrößen oft nur gewünscht als wirklich erforderlich und können das Optimierungsproblem unlösbar machen. Dies geschieht, wenn die limitierten Eingangsgrößen das System nicht auf eine Weise beeinflussen können, dass die Ausgangsgrößen ihren vorgegebenen Rahmen beibehalten. Ein zusätzlicher Freiheitsgrad wird durch die Einführung von soft constraints und sogenannten *Slack Variablen* $\boldsymbol{\xi}$ geschaffen. [26, S.4]

Mathematisch lässt sich die in Gleichung 2.14 dann um die constraints und die Gleichheitsbedingungen aus Gleichung 2.12 und 2.13 auf das gesamte Optimierungsproblem erweitern. Dazu wird nach [26, S.4] eine weitere Gewichtungsmatrix $\boldsymbol{W_\xi}$ in der Kostenfunktion eingefügt, um Dauer und Höhe der constraint-Überschreitung zu beeinflussen [34]. Die Indizes *lb* und *ub* kennzeichnen die **l**ower bzw. **u**pper **b**ound, also die untere und obere Variablengrenze. Die für die Diskretisierung eingeführten Indizes werden mit *col* erweitert.

$$
\begin{aligned}
\min_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},\boldsymbol{\xi},t} \quad & \sum_{i=N_1}^{N_2} \|\boldsymbol{r}(k+i \mid k) - \boldsymbol{y}(k+i \mid k)\|_{\boldsymbol{W_w}} + \sum_{j=1}^{N_u-1} \|\Delta \boldsymbol{u}(k+j \mid k)\|_{\boldsymbol{W_u}} + \sum_{i=N_1}^{N_2} \|\boldsymbol{\xi}(k+i \mid k)\|_{\boldsymbol{W_\xi}} \\
\text{subject to:} \quad & \dot{\boldsymbol{x}}_{i_{\mathrm{col}}}(\tau) - \sum_{j_{\mathrm{col}}=0}^{K} \frac{\boldsymbol{x}_{i_{\mathrm{col}},j_{\mathrm{col}}}}{\Delta t_{i_{\mathrm{col}}}} a_{j_{\mathrm{col}},k_{\mathrm{col}}} = \mathbf{0} \\
& \boldsymbol{x}_{i_{\mathrm{col}}}^{K}(t_{i_{\mathrm{col}}+1}) - \sum_{j_{\mathrm{col}}=0}^{K} d_{j_{\mathrm{col}}} \boldsymbol{x}_{i_{\mathrm{col}},j_{\mathrm{col}}} = \mathbf{0} \\
& \boldsymbol{u}_{lb} \leq (\boldsymbol{u}(k+j \mid k)) \leq \boldsymbol{u}_{ub}, \\
& \boldsymbol{y}_{lb} - (\boldsymbol{\xi}(k+i \mid k)) \leq (\boldsymbol{y}(k+j \mid k)) \leq \boldsymbol{y}_{ub} + (\boldsymbol{\xi}(k+i \mid k)), \\
& \forall\, \tau \in [0,1]\,,\, i_{\mathrm{col}} \in \{1,\ldots,\mathrm{NE}\} \text{ and } k_{\mathrm{col}} \in \{0,\ldots,\mathrm{K}\} \\
& \forall\, \boldsymbol{\xi} \geq \mathbf{0},\, i \in \{N_1,\ldots,N_2-i\} \text{ and } j \in \{0,\ldots,N_u\}
\end{aligned}
\tag{2.15}
$$

Eine gut konstruierte Kostenfunktion ermöglicht es, das Ziel des Modells oder Systems präzise zu definieren, unerwünschte Effekte oder Fehler zu minimieren und die gewollten Ergebnisse zu erzielen. Dazu sind die Zielvariablen, die Gewichtungen und die constraints sinnvoll zu wählen.

2.4 Modellbildung des offen volumetrischen Receivers

In [5, S.90ff] wird die Modellierung der Absorbercups im Receiver am Solarturm Jülich vorgestellt und in [35] erweitert. Die jeweiligen Ergebnisse werden an dieser Stelle verknüpft. Die Modellierung hat das Ziel eine einfache mathematische Beschreibung des Receivers zu erreichen, um für Optimierungszwecke geeignet zu sein. Ausgehend vom aufgeprägten Massenstrom, der Temperatur der Rückführluft und Umgebung sowie der solaren Einstrahlung soll das Verhalten des Receivers, insbesondere die Luftaustrittstemperatur und die Oberflächentemperatur, hinreichend genau abbildet werden [5, S.90].

2.4.1 Grundlagen und Annahmen

Die modellierte Receiver Front besteht aus einzelnen *Absorbercups*. Es wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Cups nicht miteinander interagieren, das heißt thermisch voneinander isoliert sind [5, S.91]. Die Cups selbst bestehen aus drei Komponenten, wie in Abbildung 2.14 zu sehen ist.

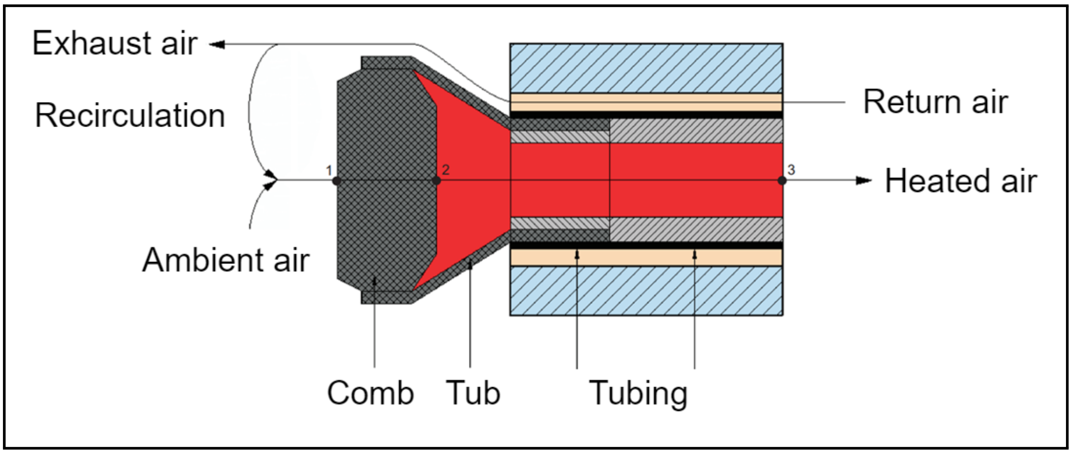

Abbildung 2.14: Schematische Darstellung eines Absorbercups (nach [5, S.90])

Die dargestellten Komponenten sind:

- **Absorberwabe** (*Comb*): Sie besteht aus einer porösen Keramik und dient der Absorption der konzentrierten Solarstrahlung. Diese wird in der Keramik in thermische Energie gewandelt und als innere Energie gespeichert. Aufgrund der porösen Struktur kann Umgebungsluft als Wärmeübertragungsmedium durch die Wabe strömen, die Energie aufnehmen und diese dem nachgeschalteten Prozess (vgl. Abschnitt 2.1) zur Verfügung stellen.
- **Absorberkelch** (*Tub*): Er besteht aus demselben Material wie die Absorberwabe, ist jedoch massiv. Der Kelch ist wie ein quadratischer Pyramidenstumpf mit rundem Auslass geformt und sammelt die warme Luft nach Durchströmen der Wabe.
- **Rohrstück** (*Tubing*): Dieses dient dem Transport der Luft zur weiteren Nutzung. Der vordere Teil des Rohrs besteht neben der Isolierung aus dem Endstück des Kelches. Am Ende des Rohrstücks befindet sich eine Blende, die je nach Position des Cups im Receiver einen unterschiedlichen Durchmesser besitzt.

Zur Erhöhung des Wirkungsgrades des Receivers wird die abgekühlte Luft (rund 80 °C bis 120 °C) [35] aus dem Prozess zu den Absorbercups zurückgeführt. Dort wird sie in Luftschlitzen zwischen den einzelnen Cups vor den Receiver geleitet, wo sie sich teilweise mit der Umgebungsluft mischt und erneut für die Wärmeübertragung zur Verfügung steht. Dieser Prozess ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

Die Cups werden in vier Sektoren unterteilt, welchen jeweils ein sogenannter primärer *Header* nachgeschaltet ist. In diesen Headern wird die aus dem Rohrstück jedes einzelnen Cups austretende, erwärmte Luft gemischt und ein bezüglich der Temperatur homogenisierter Luftmassenstrom entsteht. Über ein Ventil am Luftaustrittspunkt der Header kann theoretisch der Luftstrom durch die einzelnen Sektoren reguliert werden. In der Praxis ist dieses Ventil jederzeit geöffnet [35]. An die vier primären Header schließt sich ein sekundärer Header an, welcher den identischen homogenisierenden Effekt mit der Luft aus allen vier Sektoren, also dem gesamten Luftmassenstrom des Receivers, erzielt. Die schematische Darstellung zeigt Abbildung 2.15.

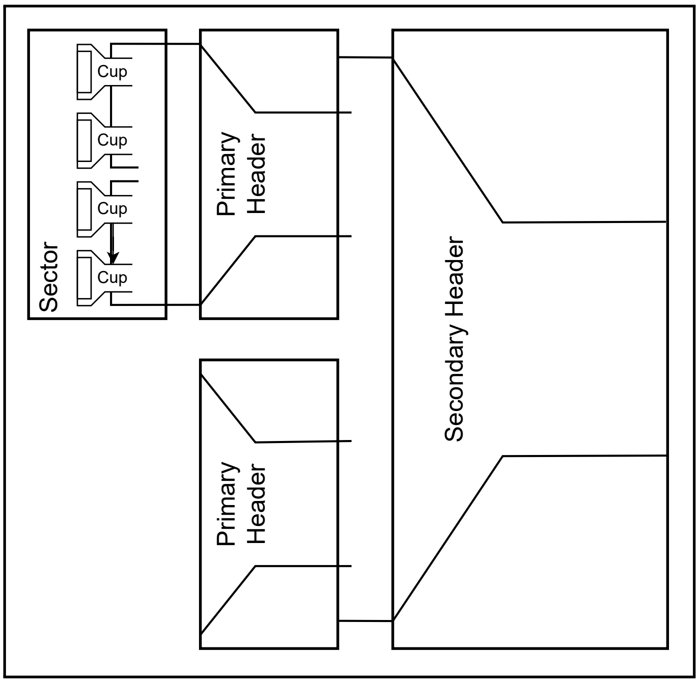

Abbildung 2.15: Schematische Darstellung der Header (nach [5, S.90])

Um das Modell des Receivers einfach zu halten, werden die folgenden Annahmen getroffen [5, S.92]:

- Die einzelnen Absorbercups sind thermisch voneinander isoliert.
- Das System wird als isobar angenommen, sodass die Enthalpie der Luft ausschließlich von der Temperatur abhängt.
- Die Lufttemperaturen innerhalb von Bilanzräumen sind homogen und ändern sich diskret an Bilanzgrenzen.
- Die Temperaturen der Rückführluft und der Luft hinter der Absorberwabe sind homogen. Dadurch wird die Berechnung der Wärmeübertragung vereinfacht, ohne die Genauigkeit der Berechnung zu stark zu beeinflussen, da die lokalen Temperaturänderungen relativ gering sind.
- Die Absorberwabe ist die einzige Komponente, die Wärme speichert.

2.4.2 Modellierung eines Absorbercups

Zur Berechnung der Entahlpieströme und Temperaturen kann der Absorbercup vereinfacht in die Aufheizzone, (gemäß o.g. Annahme: die Wabe), und die Transportzone (Kelch und

Rohrstück), aufgeteilt werden. Die real auftretenden Temperaturunterschiede zwischen Kelch und Rohrstrück sind vernachlässigbar gering, sodass eine Einzelbetrachtung dieser beiden Komponenten nicht erforderlich ist [5, S.93]. Abbildung 2.16 zeigt die beiden Zonen und alle Größen zur nachfolgenden Berechnung.

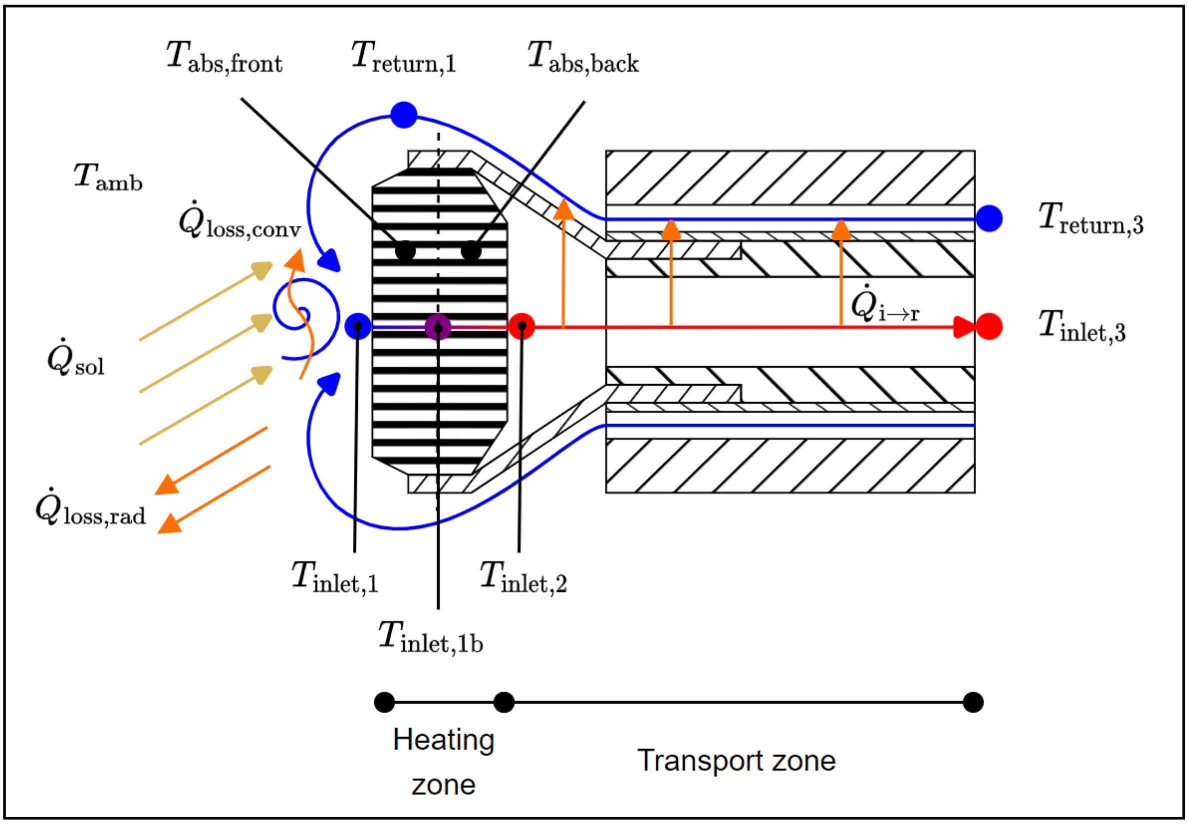

Abbildung 2.16: Berechnungsgrößen des Absorbercups (nach [35])

Aufheizzone

Gemäß Abbildung 2.16 ergibt sich die Energiebilanz an der Vorderseite der Absorberwabe zu

$$\dot{U}_{\text{abs,front}} = \dot{Q}_{\text{sol,front}} - \dot{Q}_{\text{loss,conv}} - \dot{Q}_{\text{loss,rad}} - \dot{Q}_{\text{comb,front}} - \dot{Q}_{\text{cond}}, \tag{2.16}$$

wobei $\dot{U}_{\text{abs,front}}$ die Änderung der inneren Energie der Wabenfront und $\dot{Q}_{\text{sol,front}}$ die von ihr aufgenommene solare Einstrahlung beschreibt. Die Terme $\dot{Q}_{\text{loss,conv}}$ und $\dot{Q}_{\text{loss,rad}}$ beschreiben die thermischen Verluste in Folge von Wind und Wärmestrahlung. Der gewünschte Wärmeübergang von der Wabe in die durchströmende Luft wird mit $\dot{Q}_{\text{comb,front}}$ ausgedrückt. $\dot{Q}_{\text{cond}}$ steht für die Wärmeleitung des vorderen Teils der Wabe in den hinteren Teil.
Die Änderung der inneren Energie kann weiterhin ausgedrückt werden als

$$\dot{U}_{\text{abs,front}} = m_{\text{abs,front}} \cdot c_{\text{abs}} \cdot \frac{dT_{\text{abs,front}}}{dt}, \tag{2.17}$$

mit der Masse des vorderen Absorberwabenteils $m_{\mathrm{abs,front}}$ und der Wärmekapazität c_{abs}, sowie der Änderung der Fronttemperatur über die Zeit.

Aufgrund der Struktur der Absorberwaben wird nicht die gesamte Einstrahlungsleistung an der Vorderseite der Wabe aufgenommen. Dies wird mit dem Faktor ξ_{rad} berücksichtigt, welcher diese Leistung in zwei Teile trennt.

$$\begin{aligned} P_{\mathrm{sol,front}} &= \xi_{\mathrm{rad}} P_{\mathrm{sol}} \\ P_{\mathrm{sol,back}} &= (1-\xi_{\mathrm{rad}}) P_{\mathrm{sol}} \end{aligned} \tag{2.18}$$

Mit der an der Wabenvorderseite aufgenommenen Leistung und dem Absorptionskoeffizienten α_{sol} sowie der Absorberoberfläche A_{abs} und der Flussdichte F ergibt sich

$$\dot{Q}_{\mathrm{sol,front}} = \alpha_{\mathrm{sol}} P_{\mathrm{sol,front}} = \alpha_{\mathrm{sol}} \xi_{\mathrm{rad}} A_{\mathrm{abs}} F. \tag{2.19}$$

Zu einem Zeitpunkt, wenn kein Wind den Receiver beeinträchtigt, sind die thermischen Verluste durch Konvektion $\dot{Q}_{\mathrm{loss,conv}}$ nicht vorhanden. Da außerdem die explizite Betrachtung dieser Verluste sehr komplex ist und ein eigenes Forschungsfeld darstellt, werden diese Verluste nicht weiter betrachtet [35]. Damit gilt:

$$\dot{Q}_{\mathrm{loss,conv}} = 0. \tag{2.20}$$

Die Verluste durch Wärmestrahlung können mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben werden. Dabei ist ϵ der Emissionskoeffizient, welcher zur Vereinfachung gleich dem Absorptionskoeffizienten α_{sol} gesetzt wird, σ die Boltzmann-Konstante und T_{amb} die Umgebungstemperatur. Somit ergibt sich:

$$\dot{Q}_{\mathrm{loss,rad}} = \epsilon\sigma A_{\mathrm{abs}} (T_{\mathrm{abs,front}}^4 - T_{\mathrm{amb}}^4) \tag{2.21}$$

Die Konvektion an der Vorderseite der Absorberwabe auf die durchströmende Luft kann durch die Enthalpieströme beschrieben werden. Weiterhin ist auch die Berechnung mit dem Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{\mathrm{comb,front}}$ und der Kontaktfläche zwischen Luft und Absorberwabe $A_{\mathrm{comb,front}}$ möglich:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\mathrm{comb,front}} &= \dot{H}_{\mathrm{inlet,1b}} - \dot{H}_{\mathrm{inlet,1}} \\ &= \dot{m}_{\mathrm{abs}} \cdot (h_{\mathrm{inlet,1b}} - h_{\mathrm{inlet,1}}) \\ &= \alpha_{\mathrm{comb,front}} A_{\mathrm{comb,front}} (T_{\mathrm{abs,front}} - T_{\mathrm{m,front}}) \end{aligned} \tag{2.22}$$

Für diese Berechnung wird die Durchschnittstemperatur $T_{\text{m,front}}$ zwischen dem Lufteintritt $T_{\text{inlet,1}}$ und der Mitte der Wabe $T_{\text{inlet,}1b}$ mit dem einstellbaren Gewichtungsfaktor w_{T} genutzt, welche sich gemäß Gleichung 2.23 ergibt.

$$T_{\text{m,front}} = (1 - w_{\text{T,front}})T_{\text{inlet,1}} + w_{\text{T,front}}T_{\text{inlet,1b}} \tag{2.23}$$

Die Wärmeleitung von der Absorbervorderseite zur -rückseite ergibt sich unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit λ_{comb}, A_{solid} als Oberfläche der Absorberfront abzüglich der Fläche für die Luftschlitze und l_{comb} als Tiefe des Absorbers:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \lambda_{\text{comb}} \cdot \frac{A_{\text{solid}} \cdot (T_{\text{abs,front}} - T_{\text{abs,back}})}{\frac{l_{\text{comb}}}{2}} \tag{2.24}$$

Durch die Halbierung der Absorbertiefe wird gewährleistet, dass die Betrachtung die Wärmeleitung zwischen der Mitte der Absorberfront und der Mitte der Rückseite betrachtet wird.

Für die hintere Seite der Absorberwabe kann eine der Gleichung 2.16 ähnliche Energiebilanz aufgestellt werden. Allerdings wird an dieser Stelle kein Verlust durch Wärmestrahlung beachtet, da die Oberfläche der Wabenrückseite größtenteils dem Kelch und nicht der Umgebung zugewandt ist und daher der Anteil an Strahlungsverlusten an die Umgebung vernachlässigbar ist:

$$\dot{U}_{\text{abs,back}} = \dot{Q}_{\text{sol,back}} - \dot{Q}_{\text{comb,back}} + \dot{Q}_{\text{cond}} \tag{2.25}$$

$\dot{Q}_{\text{comb,back}}$ kann dabei wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{comb,back}} &= \dot{H}_{\text{inlet,2}} - \dot{H}_{\text{inlet,1b}} \\ &= \dot{m}_{\text{abs}} \cdot (h_{\text{inlet,2}} - h_{\text{inlet,1b}}) \\ &= \alpha_{\text{comb,back}} A_{\text{comb,back}} (T_{\text{abs,back}} - T_{\text{m,back}}) \end{aligned} \tag{2.26}$$

Die durchschnittliche Temperatur an der Rückseite der Absorberwabe errechnet sich nach Gleichung 2.27.

$$T_{\text{m,back}} = (1 - w_{\text{T,back}})T_{\text{inlet,1b}} + w_{\text{T,back}}T_{\text{inlet,2}} \tag{2.27}$$

Durch Erweiterung von Gleichung 2.16 um die Gleichungen 2.17 bis 2.24 erhält man folgende

Differentialgleichung für die vordere Seite der Absorberwabe:

$$\begin{aligned} m_{\text{abs,front}} c_{\text{abs}} \frac{dT_{\text{abs,front}}}{dt} &= \epsilon \xi_{\text{rad}} A_{\text{abs}} F - \epsilon \sigma A_{\text{abs}} (T^4_{\text{abs,front}} - T^4_{\text{amb}}) \\ &- \alpha_{\text{comb,front}} A_{\text{comb,front}} (T_{\text{abs,front}} - T_{\text{m,front}}) \\ &- \lambda_{\text{comb}} \cdot \frac{A_{\text{solid}} \cdot (T_{\text{abs,front}} - T_{\text{abs,back}})}{l_{\text{comb/2}}} \end{aligned} \tag{2.28}$$

Für den hinteren Teil der Wabe ergibt sich aus den Gleichungen 2.25 bis 2.27 eine weitere Differentialgleichung:

$$\begin{aligned} m_{\text{abs,back}} c_{\text{abs}} \frac{dT_{\text{abs,back}}}{dt} &= \epsilon (1 - \xi_{\text{rad}}) A_{\text{abs}} F \\ &- \alpha_{\text{comb,back}} A_{\text{comb,back}} (T_{\text{abs,back}} - T_{\text{m,back}}) \\ &+ \lambda_{\text{comb}} \cdot \frac{A_{\text{solid}} \cdot (T_{\text{abs,front}} - T_{\text{abs,back}})}{l_{\text{comb/2}}} \end{aligned} \tag{2.29}$$

Die Temperaturen $T_{\text{abs,front}}$ und $T_{\text{abs,back}}$ stellen dabei die Systemzustände dar; die Flussdichte F eine Eingangsgröße. Weiterhin unbekannt sind die Temperaturen $T_{\text{inlet,1}}$, $T_{\text{inlet,}1b}$ und $T_{\text{inlet,2}}$.

$T_{\text{inlet,1}}$ ergibt sich aus der Energiebilanz vor der Absorberwabe (siehe Abbildung 2.16), bei der arr für die Rückführrate der Luft (*air return ratio*) steht. Dies ist der Anteil, der in den Absorber strömenden Luft, der zuvor aus dem Prozess zurückgeführt wurde.

$$\dot{H}_{\text{inlet,1}} = arr \cdot \dot{H}_{\text{return,1}} + (1 - arr) \cdot \dot{H}_{\text{amb}} \tag{2.30}$$

Diese Gleichung kann zu

$$h_{\text{inlet,1}} = arr \cdot h_{\text{return,1}} + (1 - arr) \cdot h_{\text{amb}} \tag{2.31}$$

umgeschrieben werden.

Um auf Basis der spezifischen Enthalpie die Temperatur zu bestimmen wird ein Approximationspolynom dritten Grades der Form $T = f(h)$ verwendet. Dies ist zulässig, da das Approximationspolynom im relevanten Bereich streng monoton steigend ist und so eine geschlossene Lösung erlaubt. Dies verringert den Rechenaufwand gegenüber anderen Berechnungen, die die temperaturabhängige Wärmekapazität für diese Umrechnung nutzen [5, S.96]. Aus Gleichung 2.31 ergibt sich mit $h_{\text{return,1}}$ eine neue Unbekannte, die aus der Energiebilanz der Transportzone errechnet wird.

Transportzone

Nach Abbildung 2.16 ergibt sich die Energiebilanz der Transportzone zu

$$\dot{H}_{\text{return},1} = \dot{H}_{\text{return},3} + \dot{Q}_{\text{loss,i}\to\text{r}}, \tag{2.32}$$

was gleichbedeutend mit

$$\dot{m}_{\text{abs}} h_{\text{return},1} = \dot{m}_{\text{abs}} h_{\text{return},3} + \dot{Q}_{\text{loss,i}\to\text{r}} \tag{2.33}$$

ist, wobei $\dot{Q}_{\text{loss,i}\to\text{r}}$ den Verlustwärmestrom darstellt, der sich nach Abbildung 2.16 aus drei in orange gekennzeichneten Teilen zusammensetzt und von der Rückführluft aufgenommen wird. Mathematisch lässt sich dies nach Gleichung 2.34 beschreiben.

$$\dot{Q}_{\text{loss,i}\to\text{r}} = \dot{Q}_{\text{loss,tub}} + \dot{Q}_{\text{loss,tube},1} + \dot{Q}_{\text{loss,tube},2} \tag{2.34}$$

Der Wärmeverlust durch die Rohrstücke kann mittels herkömmlicher Formeln der Wärmeübertragung in mehrschichtigen Rohre beschrieben werden. Durch die Umrechnung des Kelches in ein äquivalentes Rohr können die identischen Formeln auch hier angewandt werden. Daher gilt

$$\dot{Q}_{\text{loss,i}\to\text{r}} = \alpha_{\text{i}\to\text{r}} \cdot A_{\text{i}\to\text{r}} \cdot (T_{\text{inlet},2} - T_{\text{return},3}), \tag{2.35}$$

wobei $\alpha_{\text{i}\to\text{r}}$ der Wärmeübergangskoeffizient und $A_{\text{i}\to\text{r}}$ die entsprechende Kontaktfläche ist. Die Geometrie des Absorbers zeigt die Abbildung 2.17.

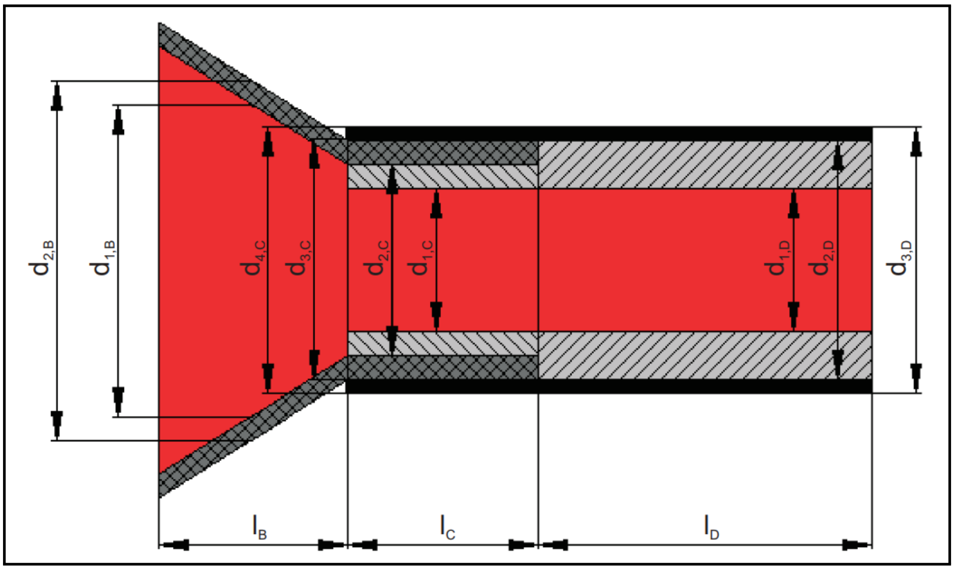

Abbildung 2.17: Geometrie des Absorbers [5, S.97]

Aus der Geometrie und den Wärmeleitfähigkeiten λ der Keramik, der Dämmung und des Rohres sowie den lokalen Wärmeübergangskoeffizienten ergibt sich

$$\begin{aligned}\alpha_{\mathrm{i}\to\mathrm{r}} = &\frac{\pi \cdot l_{\mathrm{B}}}{\frac{1}{\alpha_{\mathrm{inlet},2}\cdot d_{1,\mathrm{B}}} + \frac{1}{2}\cdot B + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{return},3}\cdot d_{2,\ \mathrm{B}}}} \\ &+ \frac{\pi \cdot l_{\mathrm{C}}}{\frac{1}{\alpha_{\mathrm{inlet},2}\cdot d_{1,\mathrm{C}}} + \frac{1}{2}\cdot C + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{return},3}\cdot d_{4,\mathrm{C}}}} \\ &+ \frac{\pi \cdot l_{\mathrm{D}}}{\frac{1}{\alpha_{\mathrm{inlet},2}\cdot d_{1,\mathrm{D}}} + \frac{1}{2}\cdot D + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{return},3}\cdot d_{3,\mathrm{D}}}},\end{aligned} \tag{2.36}$$

mit

$$\begin{aligned}B &= \frac{1}{\lambda_{\mathrm{cer}}}\cdot\ln\frac{d_{2,\mathrm{B}}}{d_{1,\mathrm{B}}} \\ C &= \frac{1}{\lambda_{\mathrm{ins}}}\cdot\ln\frac{d_{2,\mathrm{C}}}{d_{1,\mathrm{C}}} + \frac{1}{\lambda_{\mathrm{cer}}}\cdot\ln\frac{d_{3,\mathrm{C}}}{d_{2,\mathrm{C}}} + \frac{1}{\lambda_{\mathrm{pipe}}}\cdot\ln\frac{d_{4,\mathrm{C}}}{d_{3,\mathrm{C}}} \\ D &= \frac{1}{\lambda_{\mathrm{ins}}}\cdot\ln\frac{d_{2,\mathrm{D}}}{d_{1,\mathrm{D}}} + \frac{1}{\lambda_{\mathrm{pipe}}}\cdot\ln\frac{d_{3,\mathrm{D}}}{d_{2,\mathrm{D}}}.\end{aligned} \tag{2.37}$$

Für die spezifische Enthalpie $h_{\mathrm{inlet},1}$ folgt nach Gleichung 2.31, 2.33 und 2.35:

$$h_{\mathrm{inlet},1} = arr\cdot\left(h_{\mathrm{return},3} + \frac{\alpha_{\mathrm{i}\to\mathrm{r}}\cdot A_{\mathrm{i}\to\mathrm{r}}\cdot(T_{\mathrm{inlet},2} - T_{\mathrm{return},3})}{\dot{m}_{\mathrm{abs}}}\right) + (1-arr)\cdot h_{\mathrm{amb}} \tag{2.38}$$

Die Temperatur der Rückführluft $T_{\mathrm{return},3}$ ist eine Messgröße im Kraftwerk und daher bekannt [5, S.96].

$T_{\mathrm{inlet},1b}$ und $T_{\mathrm{inlet},2}$ können unter Berücksichtigung des Approximationspolynoms $T = f(h)$ durch die entsprechenden Bilanzräume in der Wabe errechnet werden, wobei sich $\dot{Q}_{\mathrm{comb,front}}$ nach Gleichung 2.22 und $\dot{Q}_{\mathrm{comb,back}}$ nach Gleichung 2.26 ergibt.

$$0 = \dot{m}_{\mathrm{abs}}(h_{\mathrm{inlet},1} - h_{\mathrm{inlet},1b}) + \dot{Q}_{\mathrm{comb,front}} \tag{2.39}$$

$$0 = \dot{m}_{\mathrm{abs}}(h_{\mathrm{inlet},1b} - h_{\mathrm{inlet},2}) + \dot{Q}_{\mathrm{comb,back}} \tag{2.40}$$

Demnach beschreiben die Gleichungen 2.28, 2.29 sowie 2.39 und 2.40 ein mathematisches Modell mit zwei Differentialgleichungen und zwei algebraischen Gleichungen, bei dem $T_{\mathrm{abs,front}}$ und $T_{\mathrm{abs,back}}$ die Zustände darstellen und $T_{\mathrm{inlet},1b}$ sowie $T_{\mathrm{inlet},2}$ die algebraischen Variablen.

Die Luftaustrittstemperatur $T_{\mathrm{inlet},3}$ eines Cups ergibt sich gemäß

$$h_{\mathrm{inlet},3} = h_{\mathrm{inlet},2} - \frac{\dot{Q}_{\mathrm{loss,i}\to\mathrm{r}}}{\dot{m}_{\mathrm{abs}}}; \tag{2.41}$$

auch hier gilt die Funktion $T(h)$. Somit ergibt sich ein vollständig definiertes Modell eines Absorbercups.

Header

Im primären Header mischen sich die Luft- und Enthalpieströme der einzelnen Cups jedes Sektors. Der Enthalpiestrom dieses Gemisches wird in Gleichung 2.42 beschrieben.

$$\dot{H}_{\text{inlet,3,mixed}} = \sum_i \dot{m}_{\text{abs},i} \cdot h_{\text{inlet,3},i} \tag{2.42}$$

Berücksichtigt man die Verluste durch Wärmeübertragung im Header, ergibt sich der Enthalpiestrom am Austritt des primären Headers zu

$$\dot{H}_{\text{sector}} = \dot{H}_{\text{inlet,3,mixed}} + \dot{Q}_{\text{loss,header,1}}. \tag{2.43}$$

Dieser Verlustwärmestrom $\dot{Q}_{\text{loss,header,1}}$ wird durch Umrechnung der konischen in äquivalente zylindrische Elemente errechnet und ist von der Leitfähigkeit λ der Isolierung und des Rohres sowie den lokalen Wärmeübergangsparametern α abhängig (siehe Gleichung 2.44). Die entsprechende Geometrie zeigt Abbildung 2.18.

$$\dot{Q}_{\text{loss,header,1}} = \frac{\pi \cdot l_{\text{h}} \cdot (T_{\text{inlet,3,mixed}} - T_{\text{amb}})}{\frac{1}{\alpha_{\text{h}} \cdot d_{1,\text{h}}} + \frac{1}{2} \cdot P + \frac{1}{\alpha_{\text{amb}} \cdot d_{3,\text{h}}}}, \tag{2.44}$$

mit

$$P = \frac{1}{\lambda_{\text{ins}}} \cdot \ln \frac{d_{2,\text{h}}}{d_{1,\text{h}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{pipe}}} \cdot \ln \frac{d_{3,\text{h}}}{d_{2,\text{h}}}. \tag{2.45}$$

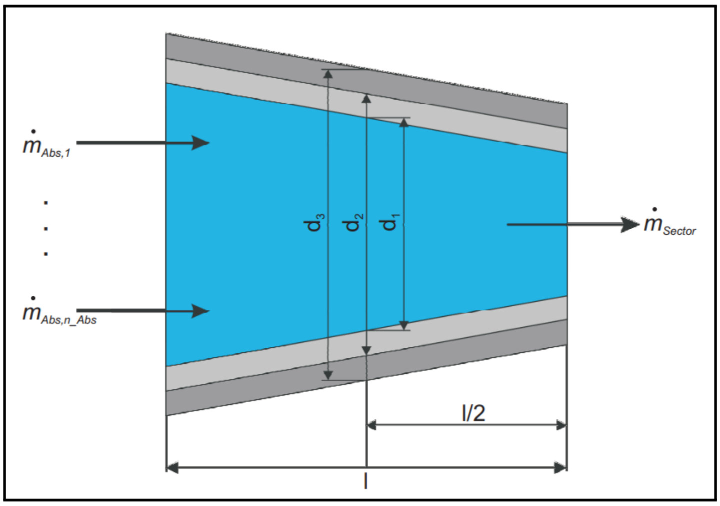

Abbildung 2.18: Geometrie des primären Headers [5, S.97]

Schließlich ergibt sich der Enthalpiestrom am Receiveraustritt durch äquivalente Inbezugnahme des zweiten Headers. Der Austrittsenthalpiestrom $\dot{H}_{\text{out}}$ ergibt sich zu

$$\dot{H}_{\text{out}} = \dot{H}_{\text{sector,mixed}} + \dot{Q}_{\text{loss,header,2}}, \tag{2.46}$$

was identisch mit

$$h_{\text{out}} = h_{\text{sector,mixed}} + \frac{\dot{Q}_{\text{loss,header,2}}}{\dot{m}_{\text{rec}}} \tag{2.47}$$

ist. Dabei ist $\dot{m}_{\text{rec}}$ der Luftmassenstrom durch den gesamten Receiver, also der Summe der Luftmassenströme durch alle einzelnen Cups. Der Wärmeverlust im sekundären Header wird analog zu Gleichung 2.44 mit $\dot{Q}_{\text{loss,header,2}}$ berücksichtigt und die Austrittstemperatur T_{out} ergibt sich erneut aus der Funktion $T(h)$. Der Massenstrom des Gesamtreceivers ist messbar und dient dem System als Eingangsgröße. [5, S.92]

Massenbilanzen

Die Massenströme der Luft am Receivereintritt und -austritt werden als identisch angenommen, da keine Druckunterschiede in der Modellierung betrachtet werden. Die Massenströme jedes einzelnen Absorbercups $\dot{m}_{\text{abs},i}$ können über den Gesamtmassenstrom $\dot{m}_{\text{rec}}$ errechnet werden. Da die Ventile an jedem Sektor als vollständig geöffnet betrachtet werden, sind die Absorbercupmassenströme lediglich von ihrem individuellen Blendendurchmesser im Rohrstück (vgl. 2.4.1) abhängig. Das Massenstromgesetz für eine Blende zeigt Gleichung 2.48:

$$\dot{V} = \alpha_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \tag{2.48}$$

Dies ist für Luft als Medium gleichbedeutend mit

$$\dot{m} = \alpha_0 \frac{\pi d_{\text{plate}}^2}{4} \sqrt{2\rho_{\text{air}}\Delta p}, \tag{2.49}$$

wobei α_0 ein Durchflusskoeffizient ist, d_{plate} der Blendendurchmesser, ρ_{air} die Dichte der Luft und Δp die Druckdifferenz vor und hinter der Blende. Für die in dem System vorliegenden hohen Reynoldszahlen kann der Durchflusskoeffizient als konstant angesehen werden [35]. Weiterhin ist für konstante Massenströme auch die Druckdifferenz konstant und die Dichte der Luft aufgrund der Vernachlässigung von Druckänderungen im System ebenfalls. Der Massenstrom ist daher direkt proportional zum Quadrat des Blendendurchmessers:

$$\dot{m} \propto d_{\text{plate}}^2 \tag{2.50}$$

Dementsprechend ergibt sich der Massenstrom eines einzelnen Cups durch die Eingangsgröße $\dot{m}_{\text{rec}}$ und alle Blendendurchmesser im Receiver gemäß

$$\dot{m}_{\text{abs},i} = \dot{m}_{\text{rec}} \cdot \frac{d^2_{\text{plate},i}}{\sum_j^{n_{\text{cups}}} d^2_{\text{plate},j}} \tag{2.51}$$

2.5 Zielpunktregelung

Neben der in Abschnitt 2.1.2 erwähnten Notwendigkeit der Zielpunktregelung zur Vermeidung zu hoher Temperaturen auf der Receiver Front, ist ein weiteres wesentliches Ziel, die Maximierung des wirtschaftlichen Ertrags des Kraftwerkes. Nachfolgend wird das daraus resultierende Optimierungsproblem erläutert sowie einige Zielpunktregelungen aus der Literatur vorgestellt. Im Anschluss wird eine Zielpunktstrategie mit Ventil-Analogie nach García *et al.* [36] detaillierter beschrieben.

2.5.1 Optimierungsproblem der Zielpunktregelung

Eine optimale Ausrichtung der Heliostaten wird erreicht, wenn die Temperatur an jedem Cup des Receivers gleich der maximal zulässigen Temperatur ist, da der Receiver dann die meiste Leistung aufnimmt. Aufgrund der Tatsache, dass ein Heliostat allerdings einen Brennfleck erzeugt, der mehrere Cups unterschiedlich beeinflusst, kann die Temperatur eines einzelnen Cups nicht durch einen Heliostaten angepasst werden, ohne die Temperatur der anderen Cups zu verändern. Aus diesem Grund kann es unmöglich sein, die optimale Lösung zu finden, bei der an jedem Cup des Receivers die maximale Temperatur vorliegt. Um die aufgenommene Leistung P_{receiver} zu maximieren, sollte also nicht die Temperatur jedes einzelnen Cups betrachtet werden, sondern die Leistung des Gesamtsystems unter Einhaltung der Grenztemperatur der Cups. Das zugehörige Optimierungsproblem ergibt sich dann gemäß Gleichung 2.52, wobei $T_{\text{front,i}}$ die jeweilige Fronttemperatur des Cups i und (x_h, y_h) die Zielpunktkoordinaten eines jeden Heliostaten h darstellen. Anstelle der maximalen Temperatur wird in der Literatur alternativ auch die maximale Flussdichte genutzt. [3, S.15]

$$\begin{aligned} & \max && P_{\text{receiver}} = f(T, x, y) && \\ \text{subject to:} \quad & && T_{\text{front,i}} \leq T_{\text{front,max}}, && \forall\, i \in \{1, ..., n_{\text{cups}}\} \\ & && (x_h, y_h) \in \mathbb{R}^2, && \forall\, h \in \{1, ..., n_{\text{heliostats}}\} \end{aligned} \tag{2.52}$$

Die kontinuierliche Gleichung 2.52 erlaubt dem Heliostaten alle möglichen Zielpunkte in der Ebene $\mathbb{R}^2$. Wie bereits in Kapitel 2.3.3 erwähnt, geht die Diskretisierung eines Modells jedoch mit geringerem Rechenaufwand einher [2, S.85]. Durch Definition einer Teilmenge möglicher diskreter Zielpunktkoordinaten A wird eine mathematische Beschreibung des Problems wie in Gleichung 2.53 erreicht:

$$\begin{aligned} & \max \quad P_{\text{receiver}} = f(T, x, y) \\ \text{subject to:} \quad & T_{\text{front,i}} \leq T_{\text{front,max}}, \qquad \forall\, i \in \{1, ..., n_{\text{cups}}\} \\ & (x_h, y_h) \in A, \qquad \forall\, h \in \{1, ..., n_{\text{heliostats}}\} \end{aligned} \tag{2.53}$$

Um eine möglichst hohe Leistung zu absorbieren, werden die Heliostaten bevorzugt auf die Mitte gerichtet, sodass alle Brennflecke vollständig auf dem Receiver abgebildet werden und die Streuungsverluste (vgl. Abschnitt 2.1.3) so gering wie mögich sind. Werden jedoch alle Heliostaten auf die Mitte ausgerichtet, wird die zulässige Fronttemperatur des Receivers überschritten. Aus diesem Grund werden einige Heliostaten bei klarem Himmel defokussiert. Obwohl alle Heliostaten, unabhängig von ihrer Entfernung zum Receiver, eine ähnliche Leistung reflektieren, ist der Einfluss receivernaher Heliostaten auf einzelne Cups aufgrund des kleineren Brennfleckes größer. Daher werden diese Heliostaten vorzugsweise zur Defokussierung verwendet, um die physikalischen Limitierungen des Receivers auch bei starker solarer Einstrahlung einzuhalten.

Es ist zu beachten, dass eine optimale Lösung des in Gleichung 2.53 formulierten Problems nicht notwendigerweise die optimale Lösung in Bezug auf das reale System ist, da Modellfehler auftreten und das reale System Störungen unterworfen ist. Sie verändern die Flussdichteverteilungen der Heliostaten und können daher die abgefangene Leistung einzelner Cups verringern oder auch erhöhen. Durch den Nachführfehler (Kapitel 2.1.3) beispielsweise könnte die erlaubte Temperatur des Receivers überschritten werden, wenn die Verschiebung hin zu einem bereits kritisch heißen Cup geschieht. [3, S.16]

Wolken widerum reduzieren die reflektierte Strahlung während ihres Durchzuges, was die Möglichkeit bietet, die Zielpunkte stäker zu fokussieren. Zieht die Wolke weiter, während die Heliostaten immer noch überwiegend in Richtung Receiver-Zentrum fokussieren, kann dies zu einer Überschreitung der maximalen Temperatur oder Temperaturgradienten führen. Diesen Umstand zeigt die Abbildung 2.19 qualitativ. Hier wird ein konstanter Luftmassenstrom im Inneren des Receivers vorausgesetzt, sodass die Temperatur auf der Vorderseite des Receivers (T_{abs}) und die Luftaustrittstemperatur im Receiver T_{outlet} lediglich von der solaren Einstrahlung P_{solar} abhängig ist.

Es ist erkennbar, dass die solare Einstrahlung durch eine Wolke ab dem Zeitpunkt t_1 abnimmt und sich ein Gleichgewichtszustand mit geringerer Leistung einstellt. Zum Zeitpunkt t_2 werden auch die Heliostaten mit geringer Entfernung zum Receiver stärker fokussiert und die aufgenommene Leistung sowie die Receiver- und Lufttemperatur steigen an. Aufgrund der geringeren Einstrahlung durch die Wolke kann P_{solar} nicht das identische Niveau wie vor Beginn des Wolkeneinflusses erreichen, durch die Fokussierung wird jedoch ein Teil des Verlustes ausgeglichen. Aus diesem Grund besteht allerdings die Gefahr, dass zu dem Zeitpunkt

t_3, an dem die Wolke keinen Einfluss mehr hat, die notwendige Defokussierung der Heliostaten nicht abgeschlossen ist. In der Folge ist mit einer Überschreitung der Grenztemperaturen und der Temperaturgradienten zu rechnen.

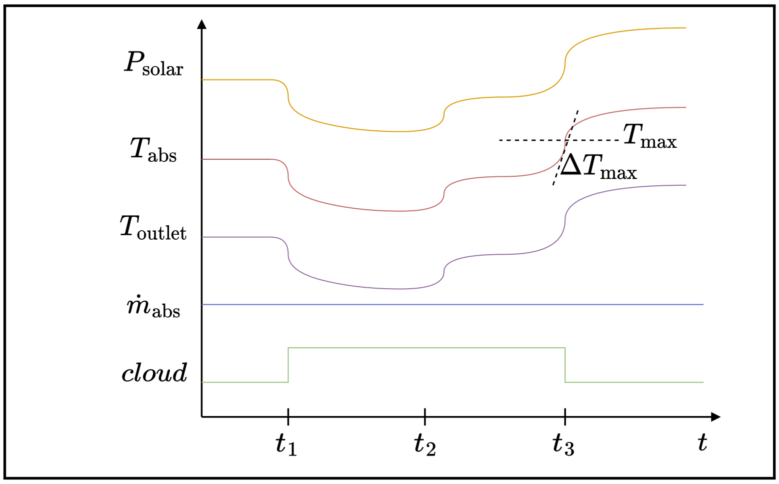

Abbildung 2.19: Darstellung der potenziellen Gefahr einer durchziehenden Wolke

2.5.2 Existierende Algorithmen

Eine Übersicht über verschiedene Algorithmen zur Zielpunktregelung wurde von Oberkirsch in [37] aufgestellt. An dieser Stelle werden beispielhaft einige dieser Regelungen kurz vorgestellt, bevor in Absatz 2.5.3 eine Zielpunktregelung nach García detaillierter erklärt wird.

Maldonado *et al.* [38][39] entwickelte beispielsweise einen iterativen Algorithmus namens *Local Search*. Dieser beginnt bei einer initialen Lösung zur Zielpunktverteilung und untersucht für jede Iteration, ob eine Verschiebung zu diskreten benachbarten Zielpunkten im Hinblick auf die Gesamtleistung des Receivers einen Vorteil bringt. Der jeweilige Heliostat ändert seine Ausrichtung dann so, dass die Leistung maximal gesteigert wird, sofern eine Steigerung möglich ist. Auf diese Weise wird nach und nach über jeden benachbarten Zielpunkt und über alle Heliostaten iteriert.

In einer Arbeit von Cruz *et al.* [40] wird ein Algorithmus zur Zielpunktsteuerung vorgeschlagen, der eine gewünschte Flussdichteverteilung auf dem Receiver erreichen soll. Das Problem wird durch eine zweistufige Optimierung gelöst; die erste Stufe bestimmt mittels eines metaheuristischen Algorithmus die zu optimierenden Heliostaten und die zweite Stufe legt mit einem gradientenbasierten Suchverfahren die Zielpunkte dieser Heliostaten fest. Erfolgreiche Tests dieses Verfahrens werden in der Veröffentlichung jedoch nur mit 50 aktiven Heliostaten beschrieben.

Vant-Hull *et al.* [41][42] hat unter anderem das *Dynamic Aimpoint Processing System* (*DAPS*) entwickelt; eine Regelung die im Wesentlichen das Überschreiten maximaler Flussdichten verhindern soll. Dazu wird der Teil des Receivers mit der höchsten überschrittenen Flussdichte gemessen oder simulativ bestimmt und anschließend identifiziert, welcher Heliostat den größten Einfluss auf diesen Cup hat; dieser Heliostat wird anschließend defokussiert. In einem iterativen Prozess wird dieses Verfahren wiederholt, bis die Flussdichte an keinem Cup mehr überschritten wird.

García *et al.* [43] stellte einen Algorithmus vor, der das Problem nicht als MIMO System definiert, also mit allen Heliostaten als Eingangsgrößen und allen Zielpunkten als separat zu berechnende Ausgangsgrößen, sondern als System aus 6 *SISO* (**S**ingle **I**nput **S**ingle **O**utput) Subsystemen. Dazu werden die Heliostaten je nach Entfernung zum Receiver in drei Gruppen eingeteilt. Für jede Gruppe werden dann zwei Faktoren eingeführt: Ein Faktor, der das *shifting*, also die Verschiebung der Zielpunktmitte jeder Gruppe vom Zentrum her beschreibt und einer, der die *dispersion*, also die Streuung der Heliostaten von dieser Gruppenmitte aus angibt. Auf diese Weise werden sechs Subsysteme gebildet, die von separaten *PID*-Reglern geregelt werden.

2.5.3 Zielpunktstrategie mit Ventil-Analogie nach García

Detailliert wird ein Algorithmus zur Zielpunktverteilung vorgestellt, welcher ebenfalls von García *et al.* [36] veröffentlicht wurde und mit Gruppierung von Heliostaten und *dispersion* (vgl. Kapitel 2.5.2) der Heliostaten arbeitet. Er wird in Kombination mit einer modellprädiktiven Regelung eines zylindrischen Receivers vorgestellt, der eine maximal erlaubte Flussdichte als physikalische Limitierung vorgibt. Der Algorithmus an sich kann jedoch auch in Kombination mit dem Modell eines rechteckigen Receivers und der Temperatur als Limitierung verwendet werden. Für diese Arbeit ist die vorgestellte Regelung nicht relevant, an dieser Stelle wird demnach lediglich die Zielpunktstrategie vorgestellt. Von besonderer Relevanz ist dabei einerseits die Gruppierung der Heliostaten und andererseits das Verhalten der einzelnen Heliostaten innerhalb der Gruppen in Abhängigkeit der von García eingeführten Stellgrößen.

Gruppierung der Heliostaten

Da in [36] ein Rundum-Heliostatenfeld (vgl. Abschnitt 2.1.1) untersucht wird, erfolgt zunächst eine Einteilung der Heliostaten in 18 Gruppen, die auf jeweils eins der 18 rechteckigen Teilstücke des insgesamt zylindrisch aufgebauten Receivers gerichtet werden. Anschließend wird jede dieser Gruppen noch dreifach unterteilt. Einerseits entstehen zwei Gruppen mit einem Radius von $< 400\,\mathrm{m}$ Entfernung zum Receiver, welche im gleichen Teil des Feldes stehen und eine ähnliche Leistung zum Receiver reflektieren können. Die dritte Gruppe umfasst alle weiteren Heliostaten mit größerem Abstand zum Receiver. [36, S.8-10]
Abbildung 2.20 zeigt diese Einteilung in 18×3 Gruppen von Heliostaten; die Gruppen sind farblich in Rot, Grün und Blau dargestellt.

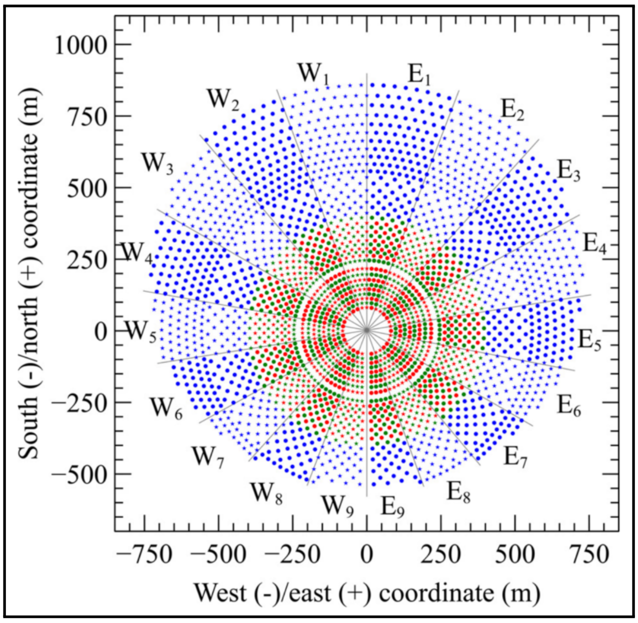

Abbildung 2.20: Einteilung des Heliostatenfeldes des Gemasolar-Kraftwerkes in Sevilla in 54 Gruppen [36, S.10]

Verhalten der Heliostaten innerhalb einer Gruppe

Das von García vorgestellte Verfahren besitzt zwei Parameter pro Gruppe, um das Verhalten der einzelnen Heliostaten innerhalb jeder Gruppe zu beeinflussen. Einerseits den *dispersion factor* κ, der Auskunft über die Streuung der Heliostaten innerhalb der Gruppe gibt und andererseits den Parameter y_{Cent}, der die vertikale Position des „Schwerpunktes“ aller Zielpunkte auf dem Receiver beeinflussen kann [36, S.5]. Die Ventil-Analogie bezieht sich auf den Faktor κ, ein kleiner Wert führt zu einer hohen Flussdichtekonzentration (geöffnetes Ventil) und ein großer Wert zu einer geringeren Konzentration der Flussdichte (geschlossenes Ventil). Der zweite Parameter ist bei zylindrischen Receivern notwendig, kann aber nachfolgend vernachlässigt werden und wird zu $y_{\text{Cent}} = 0$ gesetzt. Da sowohl nachfolgend als auch in der Arbeit von García $x_{\text{Cent}} = 0$ gilt, wird sichergestellt, dass der Schwerpunkt aller Gruppen im Zentrum des Receivers bei $(0, 0)$ liegt. Abbildung 2.21 zeigt den Einfluss der beiden Stellgrößen exemplarisch, wobei erkennbar ist, dass der Faktor $\kappa_1 > \kappa_2$ sein muss, da die Entfernung der Zielpunkte untereinander größer ist.

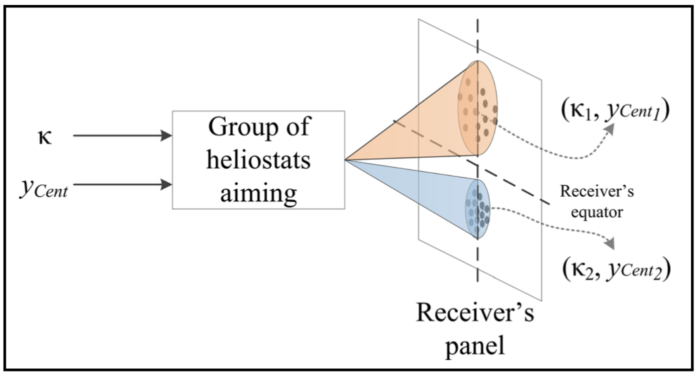

Abbildung 2.21: Veranschaulichung der Stellgrößen des gewählten Algorithmus [36, S.7]

Die Zielpunkte der Gruppe erfüllen zwei Kriterien, wenn sich durch die Stellgrößen κ und y_{Cent} ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat:

1. Jeder einzelne Punkt wird so nah wie möglich am festgelegten Schwerpunkt der Gruppe sein und dabei einen individuellen Minimalabstand zum nächsten Zielpunkt r, welcher von κ abhängt, nicht unterschreiten.
2. Ihr Gruppenschwerpunkt wird mit dem durch $(x_{\text{Cent}}, y_{\text{Cent}})$ vorgegebenen Punkt, hier also $(0, 0)$, übereinstimmen.

Kriterium 1:
Ein statischer Parameter a wird verwendet, um die Heliostaten einer Gruppe zu organisieren. Dieser Parameter weist jedem Heliostaten individuell einen Wert α zu, welcher sich aus der Anzahl der Heliostaten n und a ergibt (siehe Gleichung 2.54 und 2.55).

$$\alpha \in [-a, -a + \Delta\alpha, -a + 2\Delta\alpha, ..., a] \tag{2.54}$$

$$\text{Mit:} \qquad \Delta\alpha = \frac{2a}{n-1}, \quad \forall \ \{n \in \mathbb{N}, n > 1\} \tag{2.55}$$

Daraus kann für jeden Heliostaten der Radius r berechnet werden, der den Mindestabstand zu benachbarten Zielpunkten vorgibt und damit das zentrale Element der Zielpunktstrategie ist. Er ergibt sich gemäß 2.56, wobei κ wie beschrieben die Stellgröße des Reglers zur Zielpunktstreuung darstellt und β ein Skalierungsfaktor ist.

$$r = \frac{\kappa}{1 + \left|\frac{\alpha}{\kappa}\right|^{2\kappa}} \cdot \beta \tag{2.56}$$

Abbildung 2.22 zeigt die sich ergebenden Radien je nach individuellem α-Wert exemplarisch für $\kappa = 2$ bzw. $\kappa = 5$. Es ist erkennbar, dass die Wahl hoher Werte für a kleine Abstände zwischen den Zielpunkten zur Folge haben wird.

Auf den durch κ festgelegten Mindestabständen aufbauend, ergeben sich, sofern noch kein Gleichgewichtszustand erreicht ist, Bewegungen der Heliostaten und Zielpunkte. Die Distanz, die zwischen zwei Zielpunkten zurückgelegt werden muss, ist mit ΔD benannt und setzt sich aus Δx und Δy zusammen. Diese bezeichnen Strecken in beiden Dimensionen, die auf dem Receiver zwischen zwei Zielpunkten zurückgelegt werden müssen. In Abbildung 2.23 ist für eine Gruppe aus fünf Heliostaten dargestellt, welche Zeilpunktabstände dabei alle relevant sind. Exemplarisch ist die notwendige Evaluation der Radien r_1 und r_2 sowie der zugehörigen Distanz d_{1-2} dargestellt.

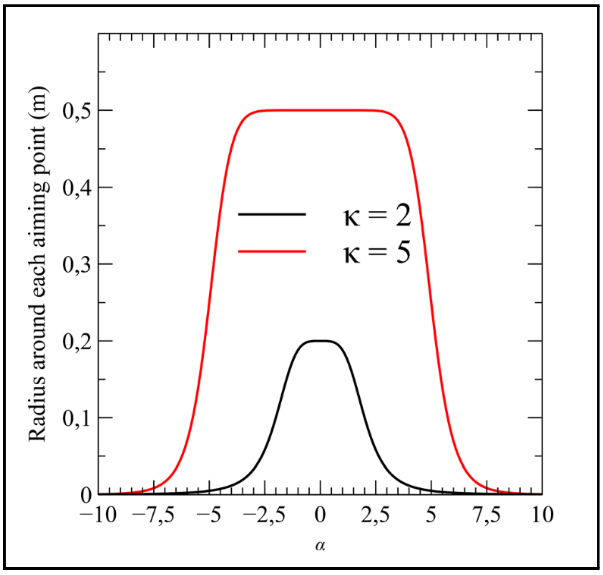

Abbildung 2.22: Minimalabstände der Zielpunkte je α-Wert [36, S.9]

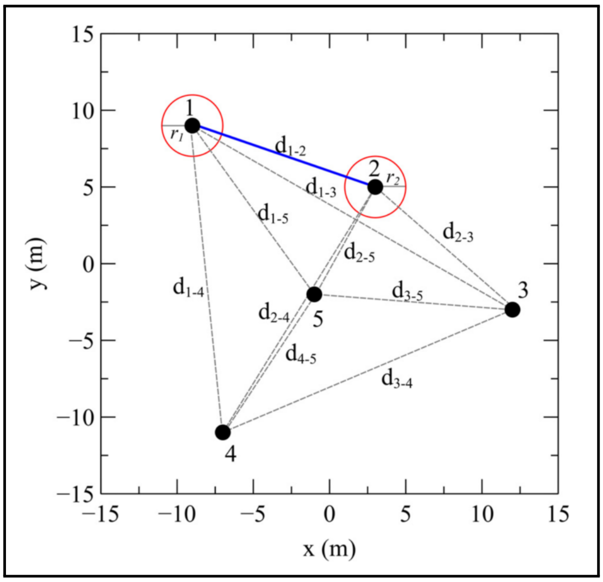

Abbildung 2.23: Visualisierung der relevanten Distanzen zwischen Zielpunkten für eine Gruppe aus fünf Heliostaten nach García [36, S.7]

Um sicherzustellen, dass der Abstand eines jeden Zielpunktes zu allen anderen Zielpunkten der Gruppe eingehalten wird, wiederholen sich diese Berechnungsvorschriften für jedes mögliche Pärchen aus Heliostaten [36, S.9]. Anschließend wird der Durchschnitt der berechneten Distanzen eines Zielpunktes relativ zu den anderen Heliostaten ($\overline{\Delta x_{\mathrm{TP_n}}}$) und ($\overline{\Delta y_{\mathrm{TP_n}}}$) errechnet [36, S.10].

Kriterium 2:
Wie erläutert, kommt es nun also zu erforderlichen Bewegungen der Zielpunkte auf dem Receiver. Diese Bewegungen müssen nun so reguliert werden, dass der Schwerpunkt der Heliostatengruppe weiterhin mit dem vorgegebenen Gruppenmittelpunkt übereinstimmt. Dazu wird $\Delta D_{\text{Centroid}}$ bestimmt, ein Wert, der angibt, wie weit sich das Gruppenschwerpunkt $(x_{\text{ActualCentroid}}, y_{\text{ActualCentroid}})$ vom geforderten Punkt $(x_{\text{Cent}}, y_{\text{Cent}})$ unterscheidet. Er berechnet sich nach Gleichung 2.57, wobei k_2 eine Konstante zur Berücksichtigung der zulässigen Stellgeschwindigkeiten der Heliostaten darstellt. [36, S.10]

$$\Delta D_{\text{Centroid}} = k_2 \cdot \sqrt{(x_{\text{Cent}} - x_{\text{ActualCentroid}})^2 + (y_{\text{Cent}} - y_{\text{ActualCentroid}})^2} \tag{2.57}$$

Darauf aufbauend ergeben sich mathematisch erneut die erforderlichen Verschiebungen der Gruppe ΔX_{Group} und ΔY_{Group} [36, S.10]. Zuletzt können die tatsächlichen Koordinaten eines jeden Zielpunktes im nächsten Zeitschritt durch Verschiebung der vorigen Koordinaten um $\overline{\Delta x, y_{\text{TP}_\text{n}}}$ und $\overline{\Delta X, Y_{\text{Group}}}$ nach Gleichung 2.58 bestimmt werden. Die vollständige Darstellung des hier vorgestellten Algorithmus nach García *et al.* [36] zeigt Abbildung 2.24.

$$\begin{aligned} x_{\text{TP}_\text{n}} &= x_{\text{TP}_\text{n}}^{\text{Previous}} + \overline{\Delta x_{\text{TP}_\text{n}}} + \overline{\Delta X_{\text{Group}}} \\ y_{\text{TP}_\text{n}} &= y_{\text{TP}_\text{n}}^{\text{Previous}} + \overline{\Delta y_{\text{TP}_\text{n}}} + \overline{\Delta Y_{\text{Group}}} \end{aligned} \tag{2.58}$$

Eine beispielhafte Zielpunktverteilung für einen zunehmenden Faktor κ und einem Gruppenzentrum in der Mitte des Receivers ist in Abbildung 2.25 erkennbar. Es wird deutlich, dass das Gruppenzentrum nach wie vor in der Mitte liegt und die Abstände zwischen den Zielpunkten dennoch sichtbar zunehmen. Aufgrund des individuellen Parameters α sind die erforderlichen Mindestabstände jedoch nicht für alle Zielpunkte gleich groß.

Zusammenfassung

Letztlich handelt es sich bei dem vorgestellten Algorithmus von García um eine Strategie, um viele Heliostaten mit einer geringen Anzahl an Stellgrößen auf individuellen Bahnen zu bewegen. Dafür werden pro Gruppe lediglich zwei Stellgrößen eingeführt, von der für rechteckige Receiver nur eine, der *dispersion factor* κ, weiter betrachtet wird. Dieser streut die Zielpunkte so, dass die Konzentration der Flussdichte wie durch ein Ventil geregelt wird. Ein wesentlicher Vorteil des gewählten Algorithmus ist die enorme Reduzierung der Stellgrößen; statt die vorhandenen 2153 Heliostaten am Standort Jülich einzeln positionieren zu müssen, geschieht dies durch lediglich drei Stellgrößen. Außerdem stehen als Endergebnis der Berechnung die einzelnen Zielpunkte der Heliostaten zur Verfügung. Dies sorgt für eine gute Kompatibilität in der Modellbildung des gesamten Systems, wie es in Kapitel 3 erläutert wird.

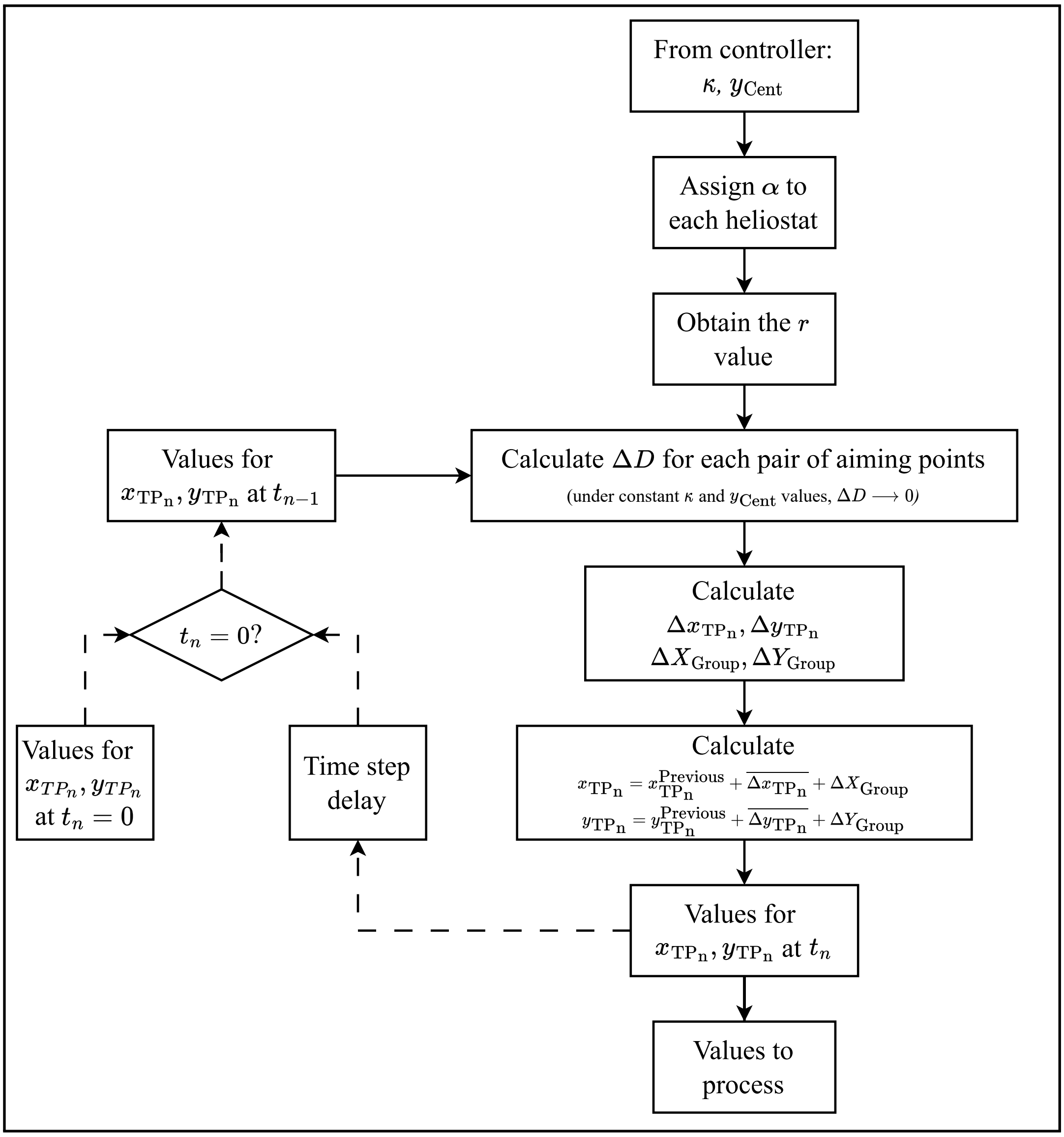

Abbildung 2.24: Übersicht der vollständigen Zielpunktstrategie nach García [36, S.10]

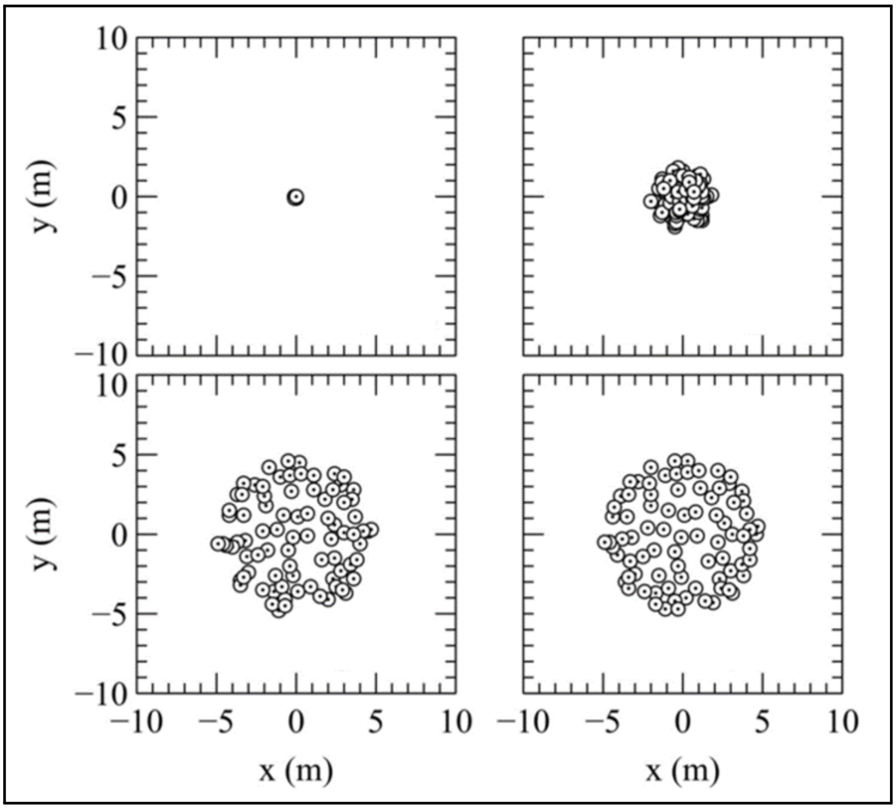

Abbildung 2.25: Beispielhafte Zielpunktverteilungen für einen zunehmenden κ Wert (nach [36, S.11])

2.6 Relevante Software

Die Modellbildung und die Simulationen in den nachfolgenden Kapiteln werden mithilfe der Programmiersprache *Python* umgesetzt. Dabei handelt es sich Stand März 2023 um die populärste Programmiersprache weltweit [44]. Nicht zuletzt aufgrund der Echtzeitfähigkeit und einfachen Syntax [45, S.9] hat sie sich besonders im Bereich des *machine learning* als Stand der Technik etabliert. Darüber hinaus zeichnet sich Python durch ihre große Anzahl an professionellen Frameworks und Bibliotheken aus, welche es Entwicklern ermöglichen, auch komplexe Probleme mit geringem Aufwand zu lösen [45, S.3]. Zwei Beispiele für solche Frameworks, die auch in dieser Arbeit Verwendung finden, sind „CasADi“ und „do-mpc“.

CasADi ist eine Open-Source Bibliothek für MATLAB/Octave, C++ und Python. Sie dient der gradientenbasierten numerischen Optimierung mit einem besonderen Fokus auf der Regelungstechnik. Durch CasADi soll besonders die symbolische Formulierung von gewöhnlichen Differentialgleichungen (ODEs) und differential-algebraischen Gleichungen (DAEs) erleichtert und damit die Formulierung und Lösung nicht-linearer Programme und Regelungsprobleme ermöglicht werden. [46]

Do-mpc ist ebenfalls eine Open-Source Bibliothek. Sie basiert auf CasADi und ermöglicht die einfache Integration modellprädiktiver Regelungen und Zustandsvorhersagen mittels *moving horizon estimation* (MHE). Ihre Module vereinen Simulations-, Vorhersage- und Regelungskomponenten aus diesem Bereich [47].

3 Modellbildung

Die Modellbildung hat das Ziel das Zusammenspiel des Heliostatenfeldes und des Receivers am Solarturm in Jülich zu beschreiben. Zu diesem Zweck wird das in Kapitel 2.4 vorgestellte Modell eines Absorbercups um die Lüftungsdynamik im Receiver auf ein thermisches Teilmodell erweitert. Darüber hinaus wird ein optisches Teilmodell zur Beschreibung der solaren Einstrahlung, der Heliostaten und deren Brennflecken auf dem Receiver eingeführt. Abschließend wird die Modellbildung durch die Kopplung der beiden Teilsysteme vervollständigt.

3.1 Thermisches Teilmodell

Zur Regelung des Massenstroms im Receiver müssen die Gebläse und Ventile im Luftkreislauf angesteuert werden. Gemäß [5, S.10ff] existieren zwei Gebläse/Ventil-Kombinationen, durch die der Luftdurchsatz im Receiver, am Wärmespeicher und am Dampfkraftprozess aufgeteilt wird. Jede der Gebläse/Ventil-Kombinationen wird mittels eines Einstellwertes angesteuert. In einer integrierten zweistufigen Regelung werden abhängig von diesem Einstellwert Ventilstellung und Gebläsedrehzahl angepasst, um einen gewünschten Luftmassenstrom zu erreichen. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich die Gebläse/Ventil-Kombination geregelt, die den Massenstrom im Receiver einstellt, da die weitere Verwendung dieser Luft zur Stromerzeugung oder Speicherung nicht betrachtet wird.

3.1.1 Analyse der Lüftungsdynamik

Durch die Vereinigung von Ventil und Gebläse entsteht bei einem Sprung des Einstellwertes eine gedämpft schwingende Anpassung des Luftstroms mit Verzögerung zweiter Ordnung. Dieses Verhalten zeigt die in Abbildung 3.1 dargestellte Messung am Solarturm vom 07.08.2022. Auf der rechten Achse ist der dimensionslose Einstellwert der Gebläse/Ventil-Kombination erkennbar, während links der zugehörige Massenstrom aufgetragen ist. Es ist zu erwähnen, dass die Änderung des Luftmassenstroms um 12:20 Uhr Störungen unterlag.

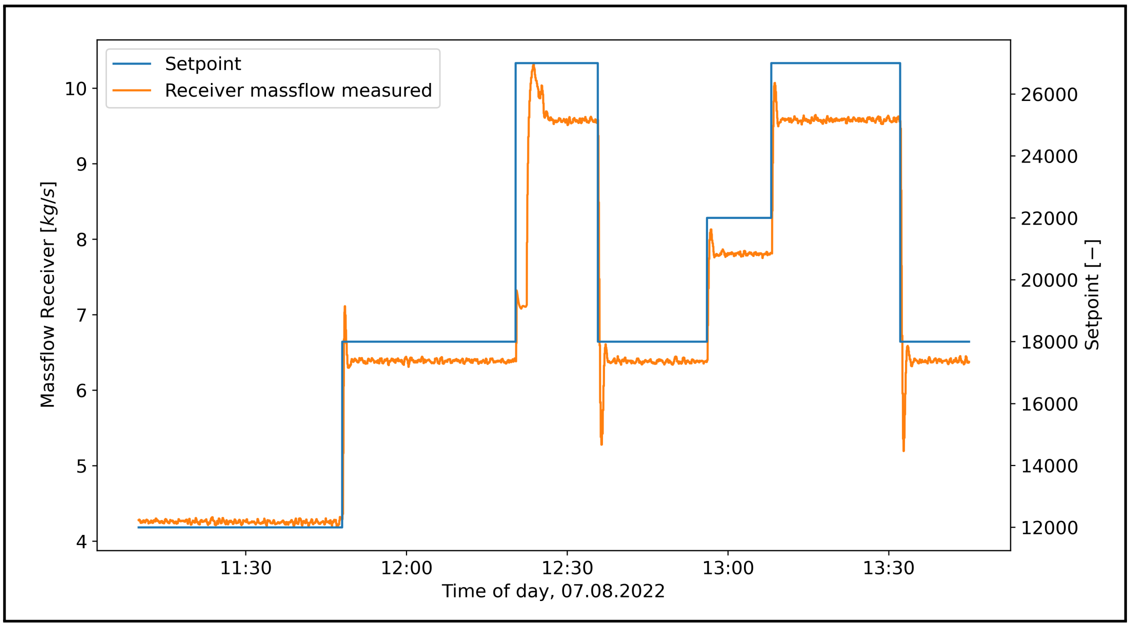

Abbildung 3.1: Luftstrommessung für unterschiedliche Einstellwerte am Solarturm Jülich (07.08.2022)

Um die Veränderung des Luftmassenstroms bei Einstellwertänderungen simulativ annähern zu können, wird dieser durch ein PT2-Verhalten modelliert. Ein solches Verhalten zeigt Abbildung 3.2. Die zugehörige Differentialgleichung beschreibt die Änderung der Ausgangsgröße y und deren Ableitungen bei Änderung der Eingangsgröße u. Gleichung 3.1 zeigt die allgemeine Differentialgleichung eines PT2-Gliedes in Abhängigkeit von der Zeit t [24, S.200][48, S.60].

$$K_p u(t) = T^2 \ddot{y}(t) + 2DT\dot{y}(t) + y(t) \tag{3.1}$$

Zur Beschreibung des PT2-Verhaltens der Lüftungsdynamik werden die drei unbekannten Größen aus Gleichung 3.1 ermittelt. Dies sind die Zeitkonstante T zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Veränderung, die Dämpfungskonstante D, die das Einschwingverhalten beschreibt, und der Proportionalitätsfaktor K_p. Anhand der nachfolgenden Abbildung 3.2 werden die Messgrößen einer Einheitssprungantwort $h(t)$ identifiziert, die zur Bestimmung dieser Größen benötigt werden.

Der Proportionalitätsfaktor K_p gleicht für eine Einheitssprungantwort dem Wert der von $h(t \to \infty)$ [48, S.60]. Grund dafür ist, dass der Einheitssprung eine Veränderung der Eingangsgröße von 0 auf 1 impliziert und die Ausgangsgröße vor der Anregung ebenfalls 0 beträgt. Allgemein lässt sich K_p nach Gleichung 3.2 ermitteln.

$$K_p = \frac{h(t \to \infty) - h(t = 0)}{\Delta u} \tag{3.2}$$

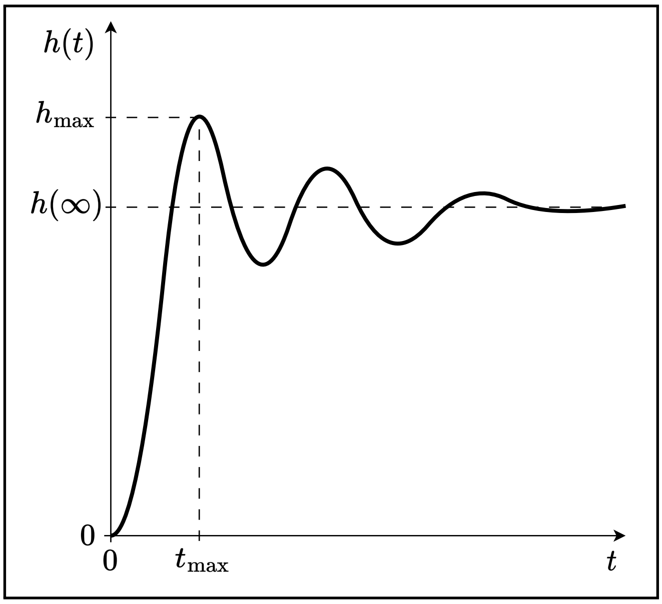

Abbildung 3.2: Exemplarische Einheitssprungantwort eines PT2-Gliedes (nach [48, S.60])

Für schwingfähige Systeme ergibt sich der Dämpfungsfaktor D aus der relativen Überschwingweite os der Sprungantwort. Es gilt:

$$D = \frac{\ln\left(\frac{1}{os}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln\left[\frac{1}{os}\right]\right)^2}}, \tag{3.3}$$

mit

$$os = \frac{h_{\max} - h(t \to \infty)}{h(t \to \infty)}. \tag{3.4}$$

Die Zeitkonstante eines PT2-Gliedes ergibt sich durch Inbezugnahme des Zeitpunktes $t_{\max}$, zu dem das maximale Überschwingen $h_{\max}$ auftritt (vgl. Abbildung 3.2). Sie berechnet sich wie folgt:

$$T = \frac{t_{\max} \cdot \sqrt{1 - D^2}}{\pi} \tag{3.5}$$

3.1.2 Mathematische Beschreibung der Lüftungsdynamik

Unter Betrachtung der störungsfreien Einstellwertänderungen aus Abbildung 3.1 werden die konkreten Parameter der Lüftungsdynamik bestimmt. Dazu werden die drei Parameter K_p, D und T für jeden Eingangssprung separat errechnet und anschließend gemittelt. Es ergibt sich

$K_p = 3{,}55 \cdot 10^{-4}$, $D = 0{,}35$ und $T = 11{,}60$. Die Plausibilität dieser Berechnungen zeigt nachfolgend Abbildung 3.3, in der erkennbar ist, dass das simulierte Verhalten des Massenstroms mit den Messwerten übereinstimmt. Die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (der *RMSE*) liegt über den Simulationszeitraum unter Ausschluss der invaliden Daten zwischen 12:20 Uhr und 12:40 Uhr bei $0{,}043\,\mathrm{kg\,s^{-1}}$.

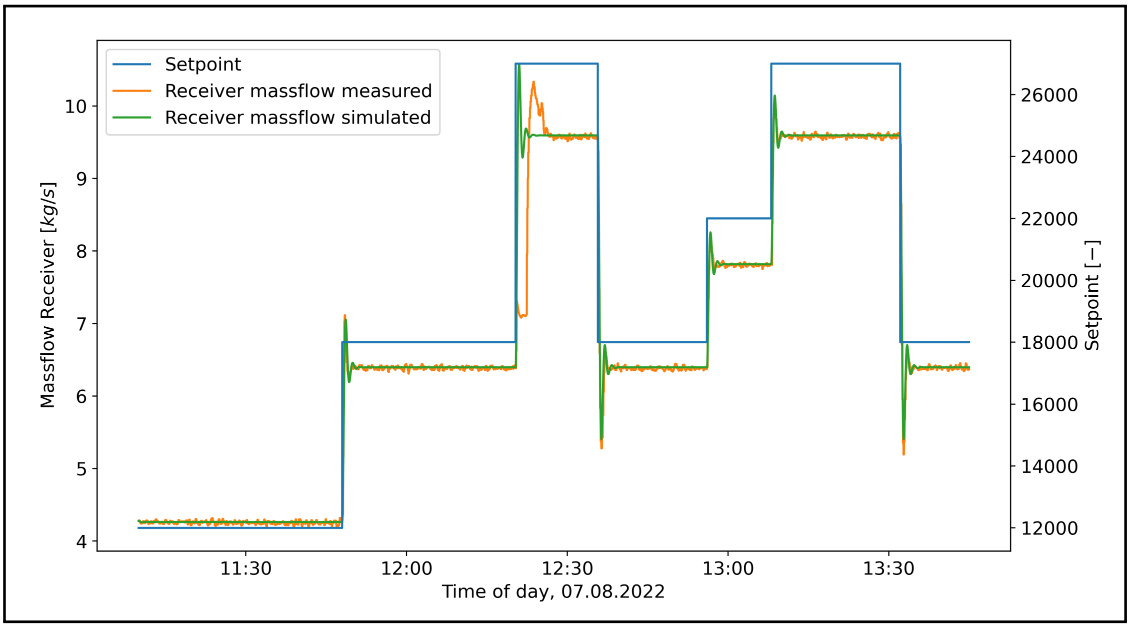

Abbildung 3.3: Vergleich der simulierten Massenströme mit den Messwerten vom 07.08.2022

Konkret ergibt sich Gleichung 3.1 mit der Ausgangsgröße y als Luftmassenstrom $\dot{m}_{\mathrm{rec}}$ zu der in Gleichung 3.6 dargestellten Differentialgleichung zweiter Ordnung. Dabei steht $u_{\mathrm{setpoint}}(t)$ für den zeitlich veränderlichen Einstellwert.

$$K_p u_{\mathrm{setpoint}}(t) = T^2 \frac{d^2 \dot{m}_{\mathrm{rec}}}{dt^2} + 2DT \frac{d\dot{m}_{\mathrm{rec}}}{dt} + \dot{m}_{\mathrm{rec}} \tag{3.6}$$

Aufgrund des geringeren Berechnungsaufwandes bei der numerischen Lösung von Differentialgleichungen erster Ordnung im Vergleich zu solchen mit höherer Ordnung [49, S.138-139][50, S.241ff], wird Gleichung 3.6 in zwei Differentialgleichungen erster Ordnung umgeschrieben. Dazu werden zwei Zustände eingeführt; einer für den Massenstrom $\dot{m}_{\mathrm{rec}}$ und einer für dessen zeitliche Änderung $\ddot{m}_{\mathrm{rec}}$. Die erste Differentialgleichung ergibt sich zu:

$$\frac{d\dot{m}_{\mathrm{rec}}}{dt} = \ddot{m}_{\mathrm{rec}} \tag{3.7}$$

Aus Gleichung 3.6 folgt außerdem:

$$T^2 \frac{d\ddot{m}_{\mathrm{rec}}}{dt} = K_p u_{\mathrm{setpoint}}(t) - 2DT\ddot{m}_{\mathrm{rec}} - \dot{m}_{\mathrm{rec}} \tag{3.8}$$

Das vollständige thermische Teilmodell ergibt sich durch die Modellierung der Absorbercups nach Kapitel 2.4 wobei die ursprüngliche Betrachtung des Massenstroms als Eingangsgröße (vgl. Absatz 2.4.2) verändert wird. Durch Einführung des Massenstroms und dessen Ableitung als Systemzustände ist der dimensionslose Einstellfaktor u_{setpoint} neben der Flussdichte F (vgl. Gleichung 2.29) die einzige Eingangsgröße des thermischen Modells.

3.2 Optisches Teilmodell

Das optische Teilmodell hat das Ziel, die Flussdichteverteilung auf dem Receiver in Jülich anhand der solaren Einstrahlung und unter Berücksichtigung des Wolkendurchzugs abzubilden. Nachfolgend werden zwei leicht unterschiedliche optische Modelle vorgestellt: Ein Modell dient Simulationszwecken und verwendet präzise berechnete Einstrahlungskarten, während das andere Modell für Optimierungszwecke entwickelt wird und den Berechnungsaufwand durch Approximationen dieser Karten reduziert.

Zunächst wird einer der in Kapitel 2.5.2 und 2.5.3 vorgestellten Zielpunktalgorithmen ausgewählt. Anschließend wird dieser Algorithmus den konkreten Anforderungen zur Nutzung in dieser Arbeit angepasst. Darauf aufbauend wird vorgestellt, wie sich durch Kombination der Zielpunkte auf dem Receiver mit der solaren Einstrahlung auf dem Heliostatenfeld die Flussdichteverteilung auf dem Receiver ergibt. Abschließend werden die Unterschiede zwischen den beiden optischen Teilmodellen hervorgehoben.

3.2.1 Auswahl der Zielpunktstrategie

Aufgrund des Sachkontextes ergeben sich folgende Anforderungen an den zu wählenden Zielpunktstrategie:

- Die Lösung des Optimierungsproblems zur Leistungsoptimierung nach Kapitel 2.5.1 muss möglich sein.
- Die Möglichkeit zur Inbezugnahme von Wolken muss gegeben sein.
- Der Berechnungs- und Zeitaufwand soll so gering wie möglich sein.

Der in Kapitel 2.5.2 vorgestellte DAPS-Algorithmus [41][42] ist lediglich zur Beschränkung der maximalen Flussdichte auf dem Receiver geeignet. Daher wird immer der Heliostat mit dem größten Einfluss auf den heißesten Cup manipuliert, welcher nicht zwangsläufig der ideale Heliostat in Bezug auf den Leistungserhalt auf dem Receiver darstellt. Bei Defokussierung ist dieser Algorithmus nicht zur erneuten Optimierung der absorbierten Leistung gedacht. Weiterhin ist dieser nicht für die Kombination mit Wolkendaten vorgesehen [37, S.35].

Der Local-Search [38][39] sowie der von Cruz *et al.* [40] vorgestellte Algorithmus basieren nicht auf der Gruppierung von Heliostaten, sodass diese einzeln zu regeln sind. Daher ist für diese Algorithmen ein hoher Rechenaufwand zu erwarten. Jedoch ist die Gruppierung der Heliostaten mit Einteilung des Systems in SISO-Subsysteme, wie von García in [43] beschrieben, für stark gekoppelte Sub-Systeme mit großen Abhängigkeiten nicht sinnvoll [3, S.33].

Gewählt wird der Algorithmus mit Ventil-Analogie von García [36], welcher in Kapitel 2.5.3 vorgestellt wurde. Aufgrund der starken Reduzierung der Stellgrößen ist mit einem vergleichsweise geringen Aufwand in der Optimierung zu rechnen. Der Algorithmus bietet mit den Zielpunkten als Ausgangsgröße eine gute Kompatibilität mit der darauf aufbauenden Modellierung.

3.2.2 Modifikation der gewählten Zielpunktstrategie

Aufgrund der Betrachtung des Jülicher Nord-Heliostatenfeldes mit einem rechteckigen Receiver entfällt die von García vorgestellte Gruppierung der Heliostaten bezüglich der nächstgelegenen Receiver-Teilfläche. Somit geschieht lediglich eine Einteilung der Heliostaten bezüglich des Abstandes zum Receiver in drei Gruppen. García teilt die Heliostaten dabei so ein, dass zwei Gruppen mit einem Radius von $< 400\,\mathrm{m}$ Abstand zum Receiver entstehen, die im gleichen Teil des Feldes stehen. Eine weitere Gruppe umfasst die restlichen Heliostaten. Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund der geringeren Größe des Feldes die folgende Einteilung vorgenommen:

- Gruppe 1: Alle Heliostaten mit einem Abstand von $< 120\,\mathrm{m}$ zum Receiver.
- Gruppe 2: Alle Heliostaten mit einem Abstand von $120\,\mathrm{m}$ bis $240\,\mathrm{m}$.
- Gruppe 3: Alle Heliostaten mit einem Abstand von $\geq 240\,\mathrm{m}$.

Wie in Kapitel 2.2 erläutert wurde, beträgt die Auflösung der vom DLR verwendeten Nowcasting-Systeme $20\,\mathrm{m} \times 20\,\mathrm{m}$. Dies hat zur Folge, dass die separate Betrachtung von Heliostaten innerhalb dieses Bereiches nicht notwendig ist. Aus diesem Grund werden alle Heliostaten in einem Bereich von $20\,\mathrm{m} \times 20\,\mathrm{m}$ zu einem repräsentativen Heliostaten zusammengefasst, der die identische Leistung reflektiert, wie alle Heliostaten des Bereiches zusammen. Insgesamt ergibt sich die Gruppeneinteilung der Jülicher Heliostaten für die Modellbildung gemäß Abbildung 3.4.

Aufgrund des rechteckigen Receiverdesigns in Jülich entfällt die Notwendigkeit der von García vorgestellten Stellgröße y_{Cent}, sodass lediglich ein *dispersion factor* κ als Stellgröße jeder der drei Gruppen betrachtet wird. Gemäß Kapitel 2.5.3 berechnet sich in Abhängigkeit dieses Faktors ein individueller Zielpunkt jedes Heliostaten auf dem Receiver.

In [36] wird neben dem finalen Zielpunkt der Heliostaten auch die maximal erlaubte Geschwindigkeit der Nachführung beachtet, sodass jede Zielpunktposition neben dem Streuungsfaktor

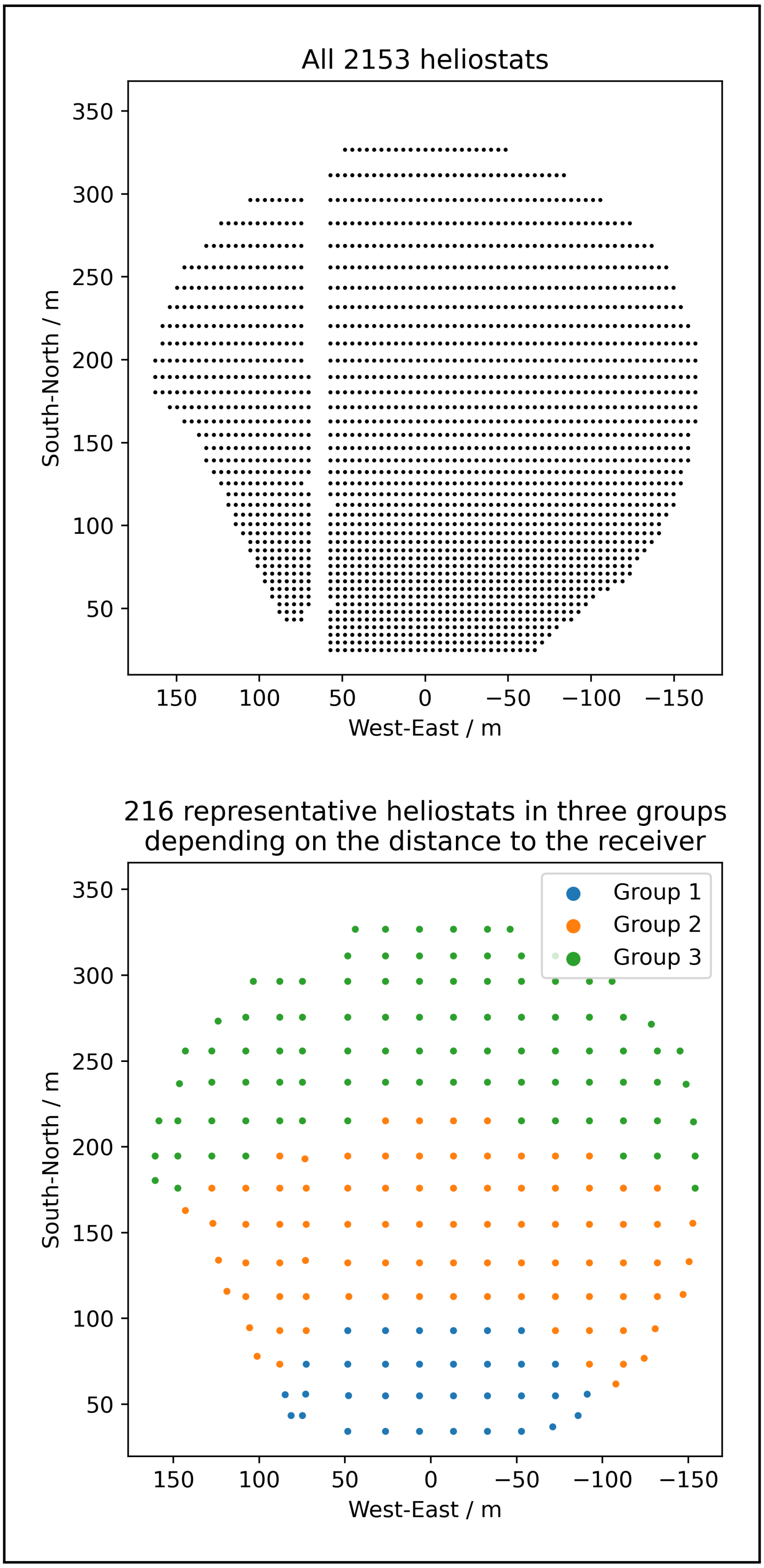

Abbildung 3.4: Gruppierung der Heliostaten am Standort Jülich. Links ist das vollständige Heliostatenfeld zu sehen, rechts die repräsentativen Heliostaten eines 20 m × 20 m Bereiches inklusive Einteilung in drei Gruppen nach Receiverabstand.

auch von der jeweils vorigen Positionierung des Heliostaten abhängig ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Dynamik vernachlässigt. Es wird angenommen, dass die Heliostaten sich innerhalb der *Sample Time* (vgl. Kapitel 2.3.1) zu einem statischen Zustand unabhängig von der vorigen Position des Zielpunktes bewegen können. Diese Annahme basiert darauf, dass die Heliostaten am Standort Jülich mit 8,3 m^2 [2, S.13] Reflexionsfläche wesentlich kleiner als die von García verwendeten Heliostaten mit einer Reflexionsfläche von 115,72 m^2 [51, S.386] am Gemasolar Solarkraftwerk in Sevilla sind und demnach eine schnellere Bewegung möglich ist.

Durch diese quasistatische Betrachtung des optischen Modells ergibt sich die Möglichkeit, die Heliostatenpositionen in Abhängigkeit des Streuungsfaktors linear zu approximieren. Dies vermeidet die komplexe Berechnungsvorschrift nach García (vgl. Abbildung 2.24) während der Optimierung. Weiterhin entsteht auf diese Weise eine differenzierbare Funktion zur Beschreibung der Zielpunktpositionen. Die Güte dieser Approximation zeigt Abbildung 3.5. Für die exemplarischen Faktoren $\kappa_1 = 25$, $\kappa_2 = 42$ und $\kappa_3 = 12$ sind links die Zielpunkte der 216 repräsentativen Heliostaten nach García zu sehen, während mittig die approximierten Zielpunkte dargestellt sind. Auf der rechten Seite ist für jeden Zielpunkt der Unterschied zwischen diesen Berechnungen zu erkennen. Die durchschnittliche Abweichung liegt bei 16 cm.

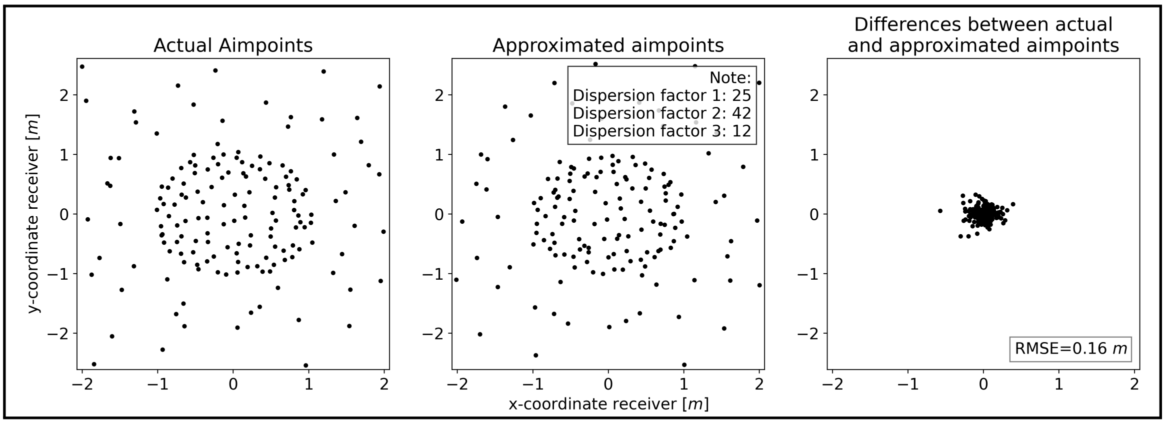

Abbildung 3.5: Darstellung der Zielpunktverteilung auf dem Receiver für exemplarische Streuungsfaktoren nach García (Links) und gemäß der Approximation (Mitte), sowie Visualisierung der Unterschiede dieser beiden Berechnungen (Rechts).

3.2.3 Verknüpfung der Zielpunkte mit der solaren Einstrahlung

Um auf der Grundlage der Zielpunkte die Flussdichteverteilung auf dem Receiver errechnen zu können, wird von jedem repräsentativen Heliostaten ein Brennfleck ermittelt, den dieser auf dem Receiver erzeugt. Zur Berechnung dieses Brennfleckes werden vorberechnete Strahlungskarten aus dem in [2, S.53ff] vorgestellten Programm *STRAL* (**S**olar **T**ower **Ra**ytracing **L**aboratory) verwendet. Dabei handelt es sich um ein Strahlverfolgungsprogramm, welches Sonnenstrahlen auf dem Weg von der Sonne zum Receiver simuliert.

Das Programm nutzt zur Simulation das reale Heliostatenfeld am Standort Jülich. Auf Basis des Sonnenstandes, der Zielpunktverteilung und der direkt damit einhergehenden Heliostatenpositionen wird pro Heliostat der Verlauf von 2000 eintreffenden Sonnenstrahlen berechnet. Optische Verluste (vgl. Kapitel 2.1.3), die sich durch geometrische Beziehungen ergeben werden durch die Strahlungsverfolgung bei der Berechnung des Brennfleckes berücksichtigt. Dazu zählt der Kosinus-Verlust, die Blockierung/Abschattung und die Streuung. Zusätzlich können in der Berechnung auch optische Verluste in Folge von Heliostateneigenschaften berücksichtigt werden. Die Reflexionsverluste werden mit 8 % angenommen, der Spiegelfehler mit 2 mrad und der Nachführfehler mit 1 mrad. Auch die atmosphärische Abschwächung wird in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Receiver und Solarturm berücksichtigt.

Für eine normierte solare Einstrahlungsleistung von $1\,\mathrm{W\,m^{-2}}$ wird mittels STRAL für jeden der 2153 Heliostaten die Flussdichteverteilung Receiver ermittelt. Dafür wird als Zielpunkt zunächst die Mitte des Receivers angenommen während die Sonnenposition vom 21.06.2022 um 13 Uhr übernommen wird (17,72° in der Azimuth und 61,65° in der Elevationsebene). Durch Überlagerung aller Flussdichteverteilungen von Heliostaten aus einem $20\,\mathrm{m} \times 20\,\mathrm{m}$ Bereich, entstehen die Brennflecke der repräsentativen Heliostaten dieses Bereiches. Wie in Kapitel 2.2 erläutert, ist das Ziel des Nowcastings die Prädiktion der direkten Einstrahlung in dieser Auflösung (vgl. Abbildung 2.9). Der entsprechende DNI-Wert jedes Bereiches wird anschließend mit der normierten Flussdichteverteilung der repräsentativen Heliostaten multipliziert. Für einen wolkenfreien Himmel wird eine direkte Einstrahlung von $850\,\mathrm{W\,m^{-2}}$ angenommen (XXX). Abbildung 3.6 zeigt exemplarisch die Flussdichteverteilung des repräsentativen Heliostaten mit dem geringsten Receiverabstand für wolkenlose Bedingungen.

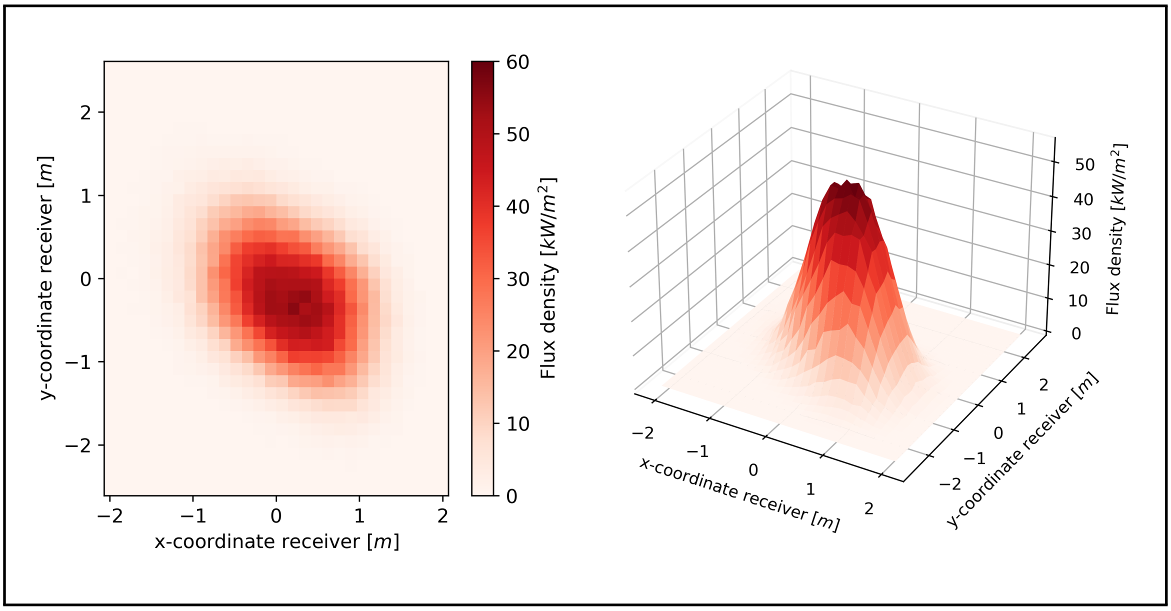

Abbildung 3.6: Exemplarische Flussdichteverteilung des repräsentativen Heliostaten mit dem geringsten Abstand zum Receiver in 2D (Links) und 3D (Rechts)

Es ist erkennbar, dass für jeden der 1080 Cups ein diskreter Wert der Flussdichte vorliegt. Durch Überlagerung der Flussdichteverteilungen aller repräsentativer Heliostaten wird die gesamte Flussdichte auf dem Receiver bestimmt. Wie in Kapitel 3.2 erwähnt, dient das bis hier vorgestellte optische Modell der Simulation, da es auf den exakten Strahlungskarten basiert.

Im Gegensatz dazu werden die Einstrahlungskarten für das optische Teilmodell zur Optimierung durch 2D-Gauss-Verteilungen approximiert. Dies verringert den Rechenaufwand auf Kosten der Genauigkeit. Die Abbildung 3.7 zeigt die approximierte Flussdichteverteilung für den receivernächsten repräsentativen Heliostaten.

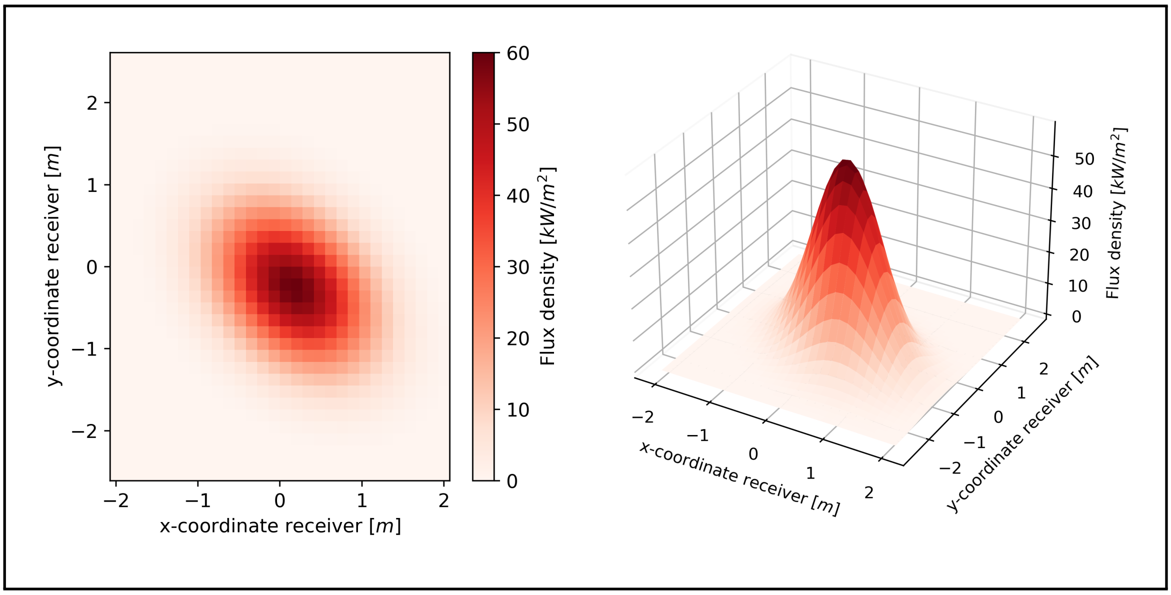

Abbildung 3.7: Exemplarische approximierte Flussdichteverteilung des repräsentativen Heliostaten mit dem geringsten Abstand zum Receiver in 2D (Links) und 3D (Rechts)

3.3 Kopplung der Teilmodelle

Der Solarturm in Jülich besteht aus 36×30 Absorbercups. Jeder dieser 1080 Cups wird wie in Kapitel 2.4.2 erläutert durch zwei Differentialgleichungen und zwei algebraische Gleichungen beschrieben. Aufgrund des daraus resultierenden hohen Rechenaufwandes zur Lösung eines Optimierungsproblems dieser Größe wird das Modell auf 6×5 Cups reduziert.

Zur Modifikation des thermischen Modells werden dazu je 36 Blendendurchmesser der Absorbercups gemittelt, um den Massenstrom durch einen repräsentativen Cup des jeweiligen Receiverbereiches zu erhalten. Insgesamt ergibt sich so ein System aus 30 repräsentativen Cups. Dieses kann unter Inbezugnahme der Lüftungsdynamik durch $60 + 2$ Differentialgleichungen und 60 algebraischen Gleichungen beschrieben werden.

Die gemeinsame Größe des optischen und des thermischen Teilmodells ist die Flussdichte der Absorbercups. Durch die Reduzierung des thermischen Modells auf 30 Cups muss auch optische Modell entsprechend angepasst werden. Abbildung 3.8 zeigt die erforderliche Diskretisierung des optischen Modells zur Simulation exemplarisch, für den Fall, dass alle Zielpunkte auf den Mittelpunkt des Receivers eingestellt sind.

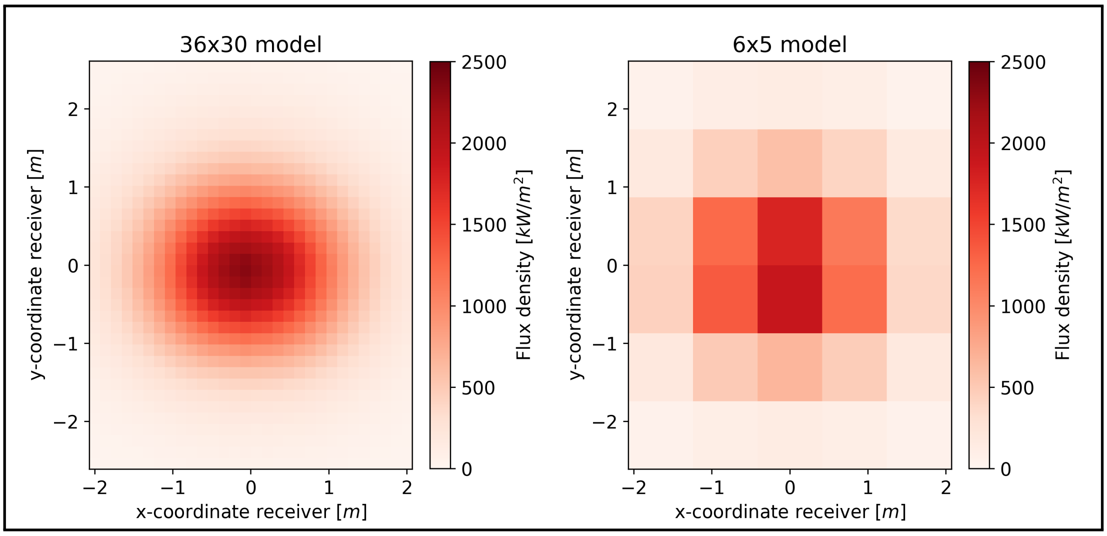

Abbildung 3.8: Überlagerung der Flussdichteverteilungen aller repräsentativer Heliostaten des simulativen optischen Modells am Receivermittelpunkt für das Modell mit 1080 Cups (Links) und das vereinfachte Modell mit 30 Cups (Rechts)

Aus dem Optimierungsproblem bezüglich der Leistungsoptimierung des Receivers (Gleichung 2.53) folgt, dass jeder der betrachten Cups möglichst nah an der maximal zulässigen Temperatur betrieben wird. Dementsprechend sind im Realbetrieb nicht alle Heliostaten in die Mitte ausgerichtet, sodass eine homogenere Flussdichteverteilung auf dem Receiver entsteht und der Einfluss dieser Diskretisierung weniger extrem ist, als aufgrund von Abbildung 3.8 anzunehmen ist. Für die drei Faktoren $\kappa_1 = 25$, $\kappa_2 = 42$ und $\kappa_3 = 12$ ergibt sich für das simulative optische Modell beispielhaft die in Abbildung 3.9 erkennbare Flussdichteverteilung.

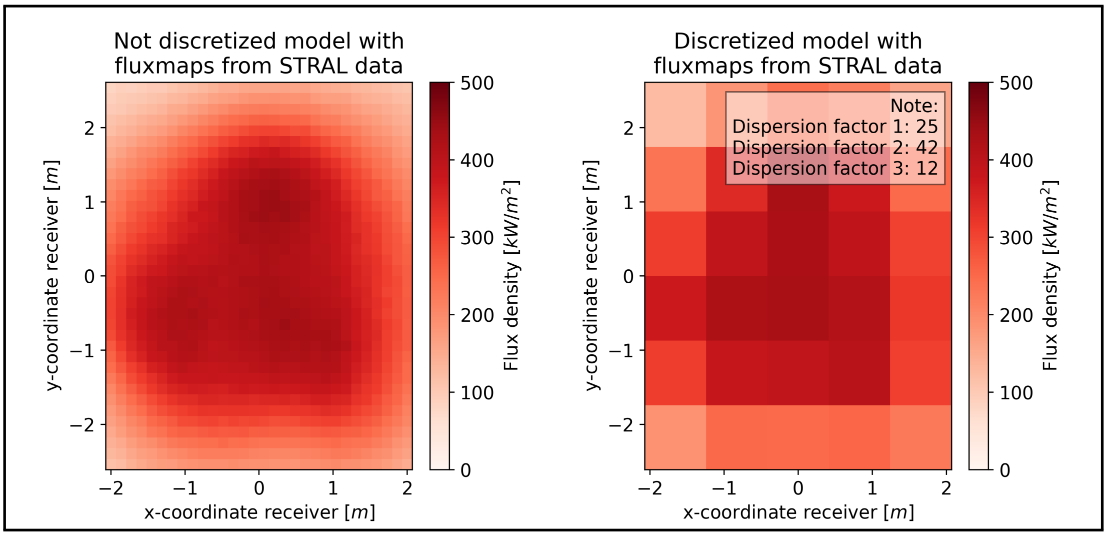

Abbildung 3.9: Homogenere Flussdichteverteilung im vollständigen Modell (Links) und im vereinfachten Modell (Rechts)

Der Betrag des Unterschieds zwischen dem optischen Modell zur Simulation auf Basis der Flussdichtekarten nach STRAL und dem optischen Modell zur Optimierung ist nachfolgend in Abbildung 3.10 zu sehen. Es ist erkennbar, dass die Approximation nur geringfügige Flussdichteunterschiede von durchschnittlich 14,4 $\mathrm{kW\,m^{-2}}$ verursacht.

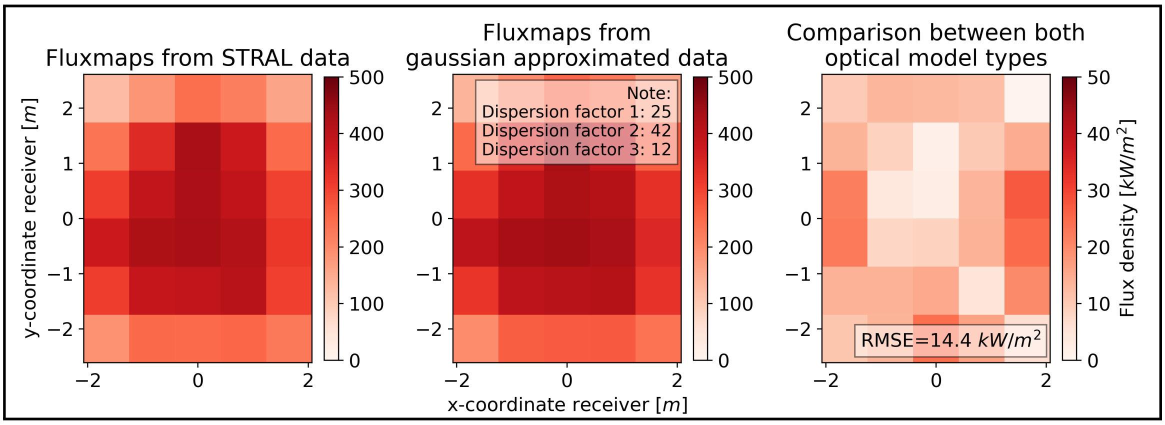

Abbildung 3.10: Visualisierung der Unterschiede der optischen Teilmodelle für eine beispielhafte Zielpunktverteilung

Beide optischen Teilmodelle resultieren in der Flussdichteverteilung für 30 Absorbercups. Somit wird jedem der Cups im thermischen Modell eine individuelle Flussdichte vorgegeben.

Insgesamt entstehen in der Modellbildung zwei unterschiedliche Modelle. Eines, welches Simulatitonszwecken dient und auf mit STRAL berechneten normierten Einstrahlungskarten basiert. Das zweite Modell nutzt approximierte normierte Einstrahlungskarten, um den Rechenaufwand in Optimierungsproblemen zu verringern. Durch diese Einstrahlungskarten wird in beiden optischen Modellen die Flussdichteverteilung auf dem Receiver für 6×5 Cups anhand von drei Streuungsfaktoren κ und dem lokalen DNI-Wert beschrieben.

Die Eingangsgrößen des thermischen Modells sind einerseits die Flussdichte auf jedem der 30 Absorbercups und andererseits der Einstellwert u_{setpoint} für die Gebläse/Ventil-Kombination. Durch 62 Differentialgleichungen und 60 algebraische Gleichungen ergibt sich der Enthalpiestrom der Luft am Receiveraustritt $\dot{H}_{\text{out}}$ und die Fronttemperatur des Receivers $T_{\text{abs,front}}$ sowie alle weiteren Berechnungsgrößen. Die wesentlichen Schritte der Modellbildung sowie die Kopplung der Teilmodelle sind nachfolgend in Abbildung 3.11 zu erkennen.

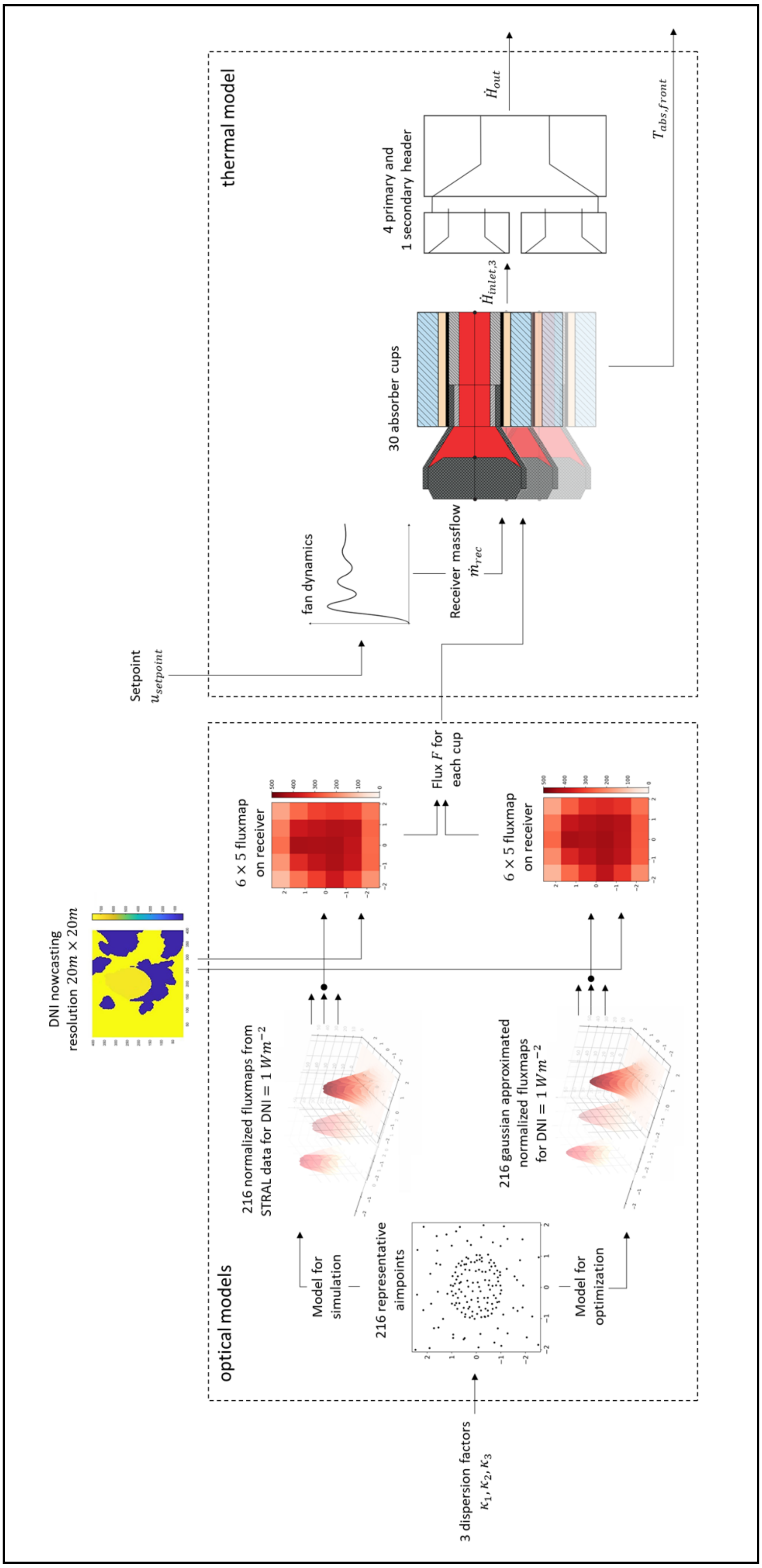

Abbildung 3.11: Visualisierung der wesentlichen Schritte der Modellbildung

4 Reglerentwurf

Hier kommt alles über das Buch von Davids Einleitung rein, zumindest mal die Unterpunkte von 2-4 ganz explizit.

Im Anwendungsfall dieser Arbeit ist dabei von besonderer Bedeutung, dass auch zukünftige Modellparameter in die Regelung prädiktiv einbezogen werden können. Aus diesem Grund sind klassische Regler wie der PID-Regler, die lediglich auf Basis der Abweichung von aktuellen Soll- und Istwerten Stellgrößen für das System vorgeben [24, S.408], nicht ausreichend und es wird ein modellprädiktiver Regler (kurz *MPC*) gewählt.

Hier soll die Auswahl der Regelungsmethode und der Kollokationsmethode mit Radau kommen.

4.1 Regelgrößen

Das sind die dann wohl die States aber siehe Davids Literatur aus seiner Einleitung. Warum sind diese Größen die Regelgrößen?

4.2 Stell- und Messgrößen

Auch hier siehe Davids Buch. Warum entscheiden wir uns für die entsprechenden Größen als Mess- und Stellgrößen?

4.3 Auslegung des Modellprädiktiven Reglers

Hier wird dann letztlich genau alles über den Regler und die Objective sowie die Constraints und alles was an Einstellungen getroffen wurde und warum dargestellt inkl. Schrittweite und Prädiktionshorizont. Für Schrittweite auch Negativbeispiel anfügen mit tstep = 15! Für Prädiktionshorizont Systemdynamik und eigentliche Auslegung darstellen und dann Berechnungszeiten miteinander vergleichen und sagen, warum 6 gewählt wurde.

Sagen welche collocation method benutzt wurde und warum.

5 Analyse der Modellprädiktiven Regelung

Hier sollen alle Ergebnisse hin. Es soll aus der Zielsetzung klar werden, dass das das Kapitel ist, auf das es ankommt und dass hier alle meine Ergebnisse stehen. Die Ergebnisse müssen dann am Ende aber natürlich auch das aussagen, was ich aussagen möchte und vernünftig analysiert und ausgewertet werden.

Erstmal etwas Feldanalyse wie staedy state Antwort und die Vergleiche zwischen rechts, links, oben und unten. Refernzszenario ganz wichtig.

Spätestens hier sollte auch aus Davids Intro Presi die Folie 5 rein.

Also hier soll das Systemverhalten beschrieben werden, dann soll gezeigt werden wie es ist, wenn der Regler von allem weiß, dann wenn er von nichts weiß, dann erst geht es um die fehlerhaften Informationen. Dabei wird dann speed, shading und Richtung untersucht.

Die vorliegenden Einschränkungen bezüglich thermischen Maximalbelastungen des Receivers werden dem Betriebshandbuch entnommen. Dort wird die maximale lokale Temperatur der Absorberfläche, welche direkt von der Flussdichte ϕ abhängig ist, mit 1275,15 K angegeben [52]. Dieser Wert dient in den Simulationen als Indikator für eine erfolgreiche Regelung, welche die Einhaltung dieses Limits als Grundvoraussetzung beinhaltet.

Vergleich vorlegen in der Regelung mit Szenario, wenn keine Regelung vorliegt! (cloud standby) Außerdem auch die Enthalpien darstellen, wie sie als Ergebnis in dem process result data Skript herauskommen. Dabei ist sowohl der Enthalpiestrom als auch die gesamte ins System aufgenommene Energie als integrale Größe interessant. Diese kommen aus dem process_result_data Skript und der Funktion calculate_enthalpy_flow_from_simulation_data. Für mich soll es aber um die Exergie gehen also David fragen was genau er sehen will.

Die gesamte Modellbildung, wie sie in Kapitel 3 beschrieben ist, wird in do-mpc realisiert und ausgewertet. Für die Simulation der Ergebnisse wird in dieser Arbeit ein 4-Kern Intel Core i7-1185G7 Prozessor mit einem Basistakt von 3,0 GHz verwendet. Als Arbeitsspeicher stehen 16 GB RAM mit 4267 MHz zur Verfügung. Das Betriebssystem ist Windows 10 Enterprise (Version 21H2).

5.1 Repräsentative Wolkenfälle

Was ist das und warum ist das wichtig? Für welche habe ich mich entschieden, um was genau zu analysieren?

Es muss immer klar sein, ob der MPC gerade von den Ergebnissen weiß oder nicht weiß. Ggf. nochmal aufzeigen, warum die Einstellungen so sind wie sie sind und wann eine Regelung als gescheitert gilt? Es muss am Ende rausgestellt werden, was die Grenzen der MPC sind und wie viel besser es war, im Vergleich zu einer unwissenden Regelung.

Daten von Nouri Bijan.

5.2 Einfluss der Wolkengeschwindigkeit

Spätestens hier soll erläutert werden, welche Wolkengeschwindigkeiten in der Realität auftreten und wie sie mit in unser System reinspielen. Was macht die höhere Wolkengeschwindigkeit? Warum ist die hohe Geschwindigkeit gefährlich? Weil der MPC gegebenenfalls gar nicht weiß, dass gerade das ganze Feld wieder sonnig ist aufgrund seiner Sample Time!

5.3 Einfluss der Lichtdurchlässigkeit

Hier soll rauskommen, dass die Lichtdurchlässigkeit, wenn der MPC davon weiß natürlich dazu beiträgt wie gut die Temperatur gehalten werden kann, aber auch dass in Kombination mit schnellen Wolken dieser Wert sehr wichtig ist, damit die Grenzen eingehalten werden. Wie falsch darf die Vorhersage prozentual je nach Wolkengeschwindigkeit sein, damit es keine Probleme gibt?

5.4 Einfluss der Verschattungsdauer

Nachträglich eingefügt, ggf sinnvoll?

5.5 Einfluss der Wolkengröße

Hier soll rein welchen Einfluss die Wolkengröße hat. Wie präzise kann der MPC dennoch die Temperatur halten?

5.6 Einfluss der Wolkenrichtung

Hier muss rauskommen, warum sich das System anders verhält, wenn die Wolken in andere Richtungen ziehen (Weil die vorderen Heliostate natürlich deutlich mehr Einfluss auf das Ergebnis haben).

Hier vllt eine Wolke einführen die ganz genau so groß wie das Feld ist. Wenn die Wolke schräg verläuft, wird das Feld weniger stark verschattet. Ergebnis soll eine Art umgekehrte Gaus Funktion sein wenn der RMSE über der vorhergesagten Richtung (-45 bis 45 Grad, die eigentlich 00 gerade nach oben ist) aufgetragen wird.

Generell muss erläutert werden, auf welcher Maschine die Analysen laufen. Begründen, warum für die Szenarien die Bewegung von unten nach oben genommen wird: Dadurch wird bei plötzlicher Belichtung des Feldes der Receiver der maximalen Belastung ausgesetzt, da die Heliostaten unten die meiste Leistung übertragen.

Analyse muss sich in den Details mit dem decken, was David in dem Paper mit meinem Namen darauf sagt. Besonders auch, dass der Simulator mit anderen Flussdichtekarten rechnet als der Controller.

6 Zusammenfassung und Fazit

Hier soll nochmal ganz klar die Zielsetzung beantwortet werden und es darf keine Frage offen bleiben. Sehr wichtig, gerade für Kim.

7 Weitere Forschung / Further Works

Mindestens hier muss auf weitere Forschung zu diesem Thema eingegangen werden:

- Robuste Regelung
- Weitere Testszenarien
- Verbesserter Solver oder direkt anderes Ansatz (immer nur eine Iteration, wie heißt der Fachbegriff?)

Literaturverzeichnis

[1] D. Z. für Luft-und Raumfahrt (DLR), *Die Jülicher Solartürme: Testanlage für kommerzielle solarthermische Kraftwerke und für die Entwicklung solarer Brennstoffe.*

[2] B. Belhomme, *Bewertung und Optimierung von Zielpunktstrategien für solare Turmkraftwerke.* dissertation ed., 2011.

[3] D. Zanger, *Development of control strategies for heliostat aiming in solar power tower plants.* masterarbeit ed., 2020.

[4] S. A. J. et al., *Heliostat Cost Reduction Study.* Sandia National Laboratorie, 2007. DOI: 10.2172/912923.

[5] J. Gall, *Betriebsfuhrung und -optimierung eines solarthermischen Turmkraftwerks.* dissertation ed., 2012.

[6] M. A. S. et al., *PS10, construction of a 11MW solar thermal tower plant in seville, spain.* 2006.

[7] R. M. Flesch, *Windeinfluss auf Cavity-Receiver für solare Turmkraftwerke.* dissertation ed., 2016.

[8] D. B. et al., *Innovation in concentrated solar power.* 2011. DOI: 10.1016/j.solmat.2011.05.020.

[9] C. K. Ho, *Advances in central receivers for concentrating solar applications.* Sandia National Laboratories, 2017. DOI: 10.1016/j.solener.2017.03.048.

[10] A. S.-G. et al., *Allowable solar flux densities for molten-salt receivers: Input to the aiming strategy.* 2020. DOI: 10.1016/j.rineng.2019.100074.

[11] L. L. Vant-Hull, *The Role of Allowable Flux Density in the Design and Operation of Molten-Salt Solar Central Receivers.* 2002. DOI: 10.1115/1.1464124.

[12] R. J. Holl, *Definition of two small central receiver systems.* 1978.

[13] X. W. et al., *A new code for the design and analysis of the heliostat field layout for power tower system.* 2010. DOI: 10.1016/j.solener.2010.01.020.

[14] P. R. et al., *Optimization of robust aiming strategies in solar tower power plants.* 2018. DOI: 10.1063/1.5117557.

[15] F. B. et al., *The helios model for the optical behavior of reflecting solar concentrators.* 1979. DOI: 10.2172/6273705.

[16] D. Wetterdienst, *Nowcasting-Verfahren.*

[17] D. Wetterdienst, *Bodenmessnetz.*

[18] D. Wetterdienst, *Zellerkennung und -Prognose (CellMOS).*

[19] D. Z. für Luft-und Raumfahrt, *Nowcasting - Kurzfristvorhersagen der ortsaufgelösten Solarstrahlung.*

[20] Q.-R. et al., *Cloud-tracking methodology for intra-hour DNI forecasting.* 2014.

[21] R. S. et al., *Solar Irradiance Nowcasting System Trial and Evaluation for Islanded Microgrid Control Purposes.* 2022. DOI: 10.3390/en15176100.

[22] S. S. et al., *Very short-term solar forecasting using inexpensive fisheye camera sky-imagery.* 2014.

[23] B. N. et al., *Determination of cloud transmittance for all sky imager based solar nowcasting.* 2019. DOI: 10.1016/j.solener.2019.02.004.

[24] J. Lunze, *Regelungstechnik 1.* Berlin: Springer Vieweg, 11. Auflage ed., 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-52678-1.

[25] B. K. et al., *Model Predictive Control.* Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-24853-0.

[26] M. S. et al., *Review on model predictive control: an engineering perspective.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021. DOI: 10.1007/s00170-021-07682-3.

[27] J. R. et al., *Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes.* 1978. DOI: 10.1016/0005-1098(78)90001-8.

[28] S. L. et al., *Orthogonal collocation on finite elements.* 2021.

[29] P. J. Enright, *Optimal Finite-Thrust Spacecraft Trajectories Using Collocation and Nonlinear Programming.* University of Illinois at Urbana-Champaign, 1991. DOI: 10.2514/3.20739.

[30] J. Bausa, *Dynamic Optimization of Startup and Load-Increasing Processes in Power Plants—Part I: Method.* Technical University of Berlin, 2001. DOI: 10.1115/1.1286728.

[31] M. C. et al., *A MATLAB package for orthogonal collocations on finite elements in dynamic optimisation.* 2005.

[32] G. T. Huntington, *Advancement and Analysis of a Gauss Pseudospectral Transcription for Optimal Control Problems.* dissertation ed., 2007.

[33] M. D. et al., *Design, implementation and simulation of an MPC algorithm for switched nonlinear systems under combinatorial constraints.* 2019. DOI: 10.1016/j.jprocont.2019.05.016.

[34] J. B. Rawlings, *Tutorial overview of model predictive control.* Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000. DOI: 10.1109/37.845037 .

[35] K. I. et al., *A Real-Time Capable Simulation of Open Volumetric Receiver Surface Temperatures with Spatially High Resolution.* 2023.

[36] J. G. et al., *Multivariable Closed Control Loop Methodology for Heliostat Aiming Manipulation in Solar Central Receiver Systems.* 2018. DOI: 10.1115/1.4039255.

[37] L. Oberkirsch, *Aim Point Management System for Solar Power Towers.* dissertation ed., 2022.

[38] D. M. et al., *Hybridization of Aim Point Optimization Methods for Solar Tower Power Plants.* 2018. DOI: 10.11128/arep.55.a55230.

[39] D. M. et al., *Evaluation of aim point optimization methods.* 2018. DOI: 10.1063/1.5067061.

[40] N. C. et al., *On Achieving a Desired Flux Distribution on the Receiver of a Solar Power Tower Plant.* 2016.

[41] L. L. V.-H. et al., *Real-Time Computational and Control of Solar Flux Density on a Central Receiver (Solar Two) (Preheat).* 1996.

[42] L. L. V.-H. et al., *Real-Time Computational and Control of Solar Flux Density on a Central Receiver (Solar Two) (Protection Against Excess Flux Density).* 1996.

[43] J. G. et al., *Heat Flux Distribution Over a Solar Central Receiver Using an Aiming Strategy Based on a Conventional Closed Control Loop.* 2017. DOI: 10.1115/ES2017-3615.

[44] S. GmbH, *Die beliebtesten Programmiersprachen weltweit laut PYPL-Index im März 2023.* 2023.

[45] P. S. F. (PSF), *python a programming language changes the world.* 2014.

[46] J. A. et al., *CasADi Documentation.* 2023.

[47] S. L. et al., *Model predictive control python toolbox.* 2020.

[48] P. D. E. M.¨uller, *Skriptum zur Vorlesung Regelungstechnik.* Hochschule München, 2020.

[49] F. G. et al., *Digitale Regelkreise.* Graz: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 1. Auflage ed., 1991.

[50] K. B. Howell, *Ordinary Differential Equations An Introduction to the Fundamentals.* Boca Raton: Springer Vieweg, 1. Auflage ed., 2015. DOI: 10.1201/9780429466090.

[51] J. W. et al., *Multi-objective optimization of solar-aided coal-fired power generation system under off-design work conditions*. 2018. DOI: 10.1002/ese3.280.

[52] K. M. GmbH, *Betriebstechnische Dokumentation Solarreceiver*. betriebshandbuch - extern ed., 2009.

A Anhang

Hier kommen die grossen Bilder, Diagramme und Grafiken rein, welche im Text den Lesefluss stören würden. Dabei ist trotzdem auf den korrekten Verweis zu achten:

z.B.: „siehe Anhang Bild A.1“

Die Leserichtung der Grafiken muss entweder von links nach rechts oder, bei ganzseitig-gedrehten Grafiken, von unten nach oben sein (vgl. Bild A.1 und Bild A.2):

Abbildung A.1: Beispielbild normale Ausrichtung

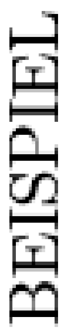

Abbildung A.2: Beispielbild normale Ausrichtung