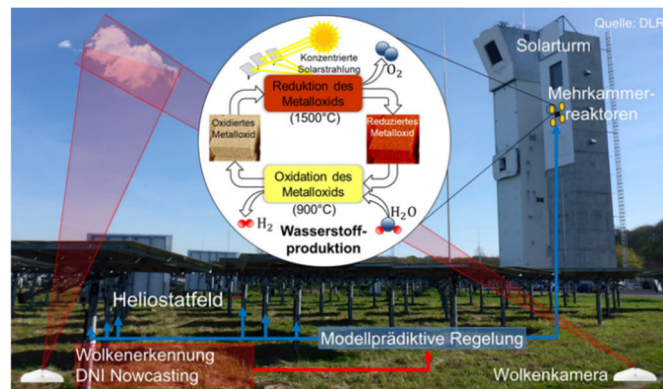


SolarFuelNow

Effiziente Regelung solarer Kraftstoffproduktion mit DNI Nowcasts



Abschlussbericht

Sachbericht als Anlage zum Verwendungsnachweis

Durchführungszeitraum: 01.09.20 – 31.12.23
Bewilligungszeitraum: 01.09.20 – 31.12.23

Förderkennzeichen

03EE5042A
03EE5042B
03EE5042C
03EE5042D

Projektpartner

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
RWTH Aachen - Institut für Regelungstechnik (RWTH)
CSP Services GmbH, Köln (CSPS)
Stausberg & Vosding GmbH (S&V)

Autoren:

DLR: Johannes Grobbel, David Zanger, Bijan Nouri
RWTH: Rudolf Popp, Nikolai Weber
S&V: Gregor Piesche
CSPS: Birk Kraas

Datum: 30.6.2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (früher Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) unter dem Förderkennzeichen 03EE5042 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Öffentliche Version des Abschlussberichts für die Veröffentlichung durch die TIB Hannover.

Inhaltsverzeichnis

A.	Kurzfassung	4
B.	Einführung.....	5
B.1.	Aufgabenstellung	5
B.2.	Ziele	5
B.3.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
B.4.	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
B.5.	Meetings und Zusammenarbeit	8
B.6.	Stand der Technik und Vorarbeiten	8
C.	Ergebnisse und Zielerreichung	11
C.1.	Arbeitspaket 1: Anlagenmodellierung (DLR).....	11
C.1.1.	Abschätzung relevanter Dynamiken (AP1.1)	11
C.1.2.	Dynamisches Modell von Heliostatfeld und Reaktorkammern (AP 1.2)	14
C.1.3.	Simulation charakteristischer Situationen (AP 1.3)	35
C.1.4.	Zusammenfassung und Fazit zu Arbeitspaket 1	39
C.2.	Arbeitspaket 2: Entwicklung eines Regelungskonzeptes (RWTH, DLR, S&V)	42
C.2.1.	Entwurf und Implementierung einer Basis-Mehrgrößenregelung (AP 2.1)	44
C.2.2.	Ableitung vereinfachter, echtzeitfähiger Modelle (AP 2.2)	52
C.2.3.	Entwurf und Validierung eines Beobachters zur Schätzung der Modellzustände (AP 2.3)	58
C.2.4.	Erweiterung und Optimierung der MPR (AP 2.4)	59
C.3.	Arbeitspaket 3: Anpassung der Wolkenkammeravorhersage (CSPS, DLR)	64
C.3.1.	Erhöhung der Zeitauflösung (AP3.1)	64
C.3.2.	Erstellung probabilistischer Vorhersagen (AP 3.2)	65
C.3.3.	Erhöhung der Genauigkeit (AP 3.3).....	71
C.4.	Arbeitspaket 4: Konstruktion, Bau und Installation von Reaktorattrappen (DLR)	76
C.4.1.	Konstruktion (AP4.1)	77
C.4.2.	Bau (AP 4.2)	83
C.4.3.	Installation (AP4.3).....	84
C.5.	Arbeitspaket 5: Integration in Steuerungshard- und software (S&V, DLR, RWTH, CSPS).....	87
C.5.1.	Spezifikation von Hardware für das erarbeitete Regelungskonzept (AP 5.1) ...	88
C.5.2.	Schnittstelle zwischen HeliOS und Reaktorkammern (AP 5.2)	89
C.5.3.	Anpassung des WobaS-Systems in Jülich an die Änderungen aus AP3 (AP 5.3)	92
C.5.4.	Erweiterung der Steuerungssoftware um die modellprädiktive Regelung (AP 5.4)	92
C.5.5.	Ausstattung des Reaktors und der Attrappen mit Reglern und Sensorik (AP 5.5)	93

C.6. Arbeitspaket 6: Demonstration an Testanlage und Bewertung des Verbesserungspotentials (DLR, S&V, RWTH, CSPS)	97
C.6.1. Betrieb des modifizierten Wolkenkamarasystems (AP 6.1).....	97
C.6.2. Simulation der Anlage mit dem neuen Regelungskonzept für verschiedene Szenarien des Wolkendurchzugs (AP 6.2)	101
C.6.3. Vergleich der H ₂ -Produktion mit und ohne Einbeziehung des Nowcastings (AP 6.3)	109
C.6.4. Betrieb des Reaktorsystems und Demonstration der Regelung (AP 6.4).....	110
C.6.5. Bewertung der Ergebnisse (AP 6.5)	121
D. Veröffentlichungen	122
D.1. Konferenzen und Workshops	122
D.2. Veröffentlichungen in Journals	122
E. Literaturverzeichnis	123
F. Abbildungsverzeichnis	125
G. Tabellenverzeichnis	129

A. Kurzfassung

Gegenstand des Projektes war die Regelung von solar-thermochemischen Brennstoffherstellungsanlagen mit einem Solarreceiver bestehend aus mehreren Batchreaktoren. Stand der Technik zu Projektbeginn war die weitestgehend manuelle Steuerung in bisherigen Prototypenanlagen.

Zentrales Ziel war die Entwicklung und experimentelle Erprobung einer modellprädiktiven Heliostatfeld- und Prozessregelung für mehrere Reaktoren unter Einbindung eines Wolkendetektionssystems zur Vorhersage der solaren Einstrahlung, um eine entsprechende Anlage effizient und sicher zu betreiben.

Dazu wurde ein Anlagenmodell aus Heliostatfeld und Reaktoren erstellt und daraus geeignete reduzierte Modelle für die Entwicklung einer Modellprädiktiven Regelung (MPR) abgeleitet. Das Nowcastingsystem zur Vorhersage der solaren Einstrahlung wurde für die Einbindung in die MPR weiterentwickelt, das heißt dessen zeitliche Auflösung wurde erhöht und es wurden probabilistische Vorhersagen hinzugefügt. Final wurden alle Systeme am Solarturm Jülich integriert und die MPR an vier neu konstruierten und am Solarturm installierten Reaktorattrappen mit hinterlegten virtuellen Reaktoren erfolgreich demonstriert. Die Plausibilität der simulierten Messwerte dieser Reaktorattrappen wurde durch den Vergleich mit Messdaten eines realen Reaktors gezeigt.

Es wurde gezeigt, dass mit der entwickelten MPR Aufheizraten und Temperaturgrenzen der betrachteten solarthermochemischen Reaktoren weitestgehend eingehalten werden können, insbesondere auch an Stellen, die messtechnisch kaum zu erfassen sind (z.B. Absorberfront), was einen deutlichen Mehrwert gegenüber dem Stand der Technik darstellt. Eine weitere Neuheit ist die automatisierte Regelung mehrerer Reaktoren. Das Verhalten der Mehrgrößen-MPR wird entscheidend durch eine Heuristik zum Umschalten der Reaktionsphasen bestimmt, deren Verwendung aufgrund der Komplexität der Problemstellung nötig war. Die Nutzung der Informationen des verbesserten Nowcastingsystems in der MPR führt zudem zu einem höheren Ertrag an Wasserstoff. Hier wird allerdings noch deutlich mehr Potential gesehen, da aus Zeitgründen lediglich ein Quantil der probabilistischen Daten verwendet wurde. Die erstellte Simulationsumgebung mit den entwickelten und verknüpften Systemen inklusive ihrer Kommunikationsschnittstellen repräsentiert die reale Anlage, sodass sich damit in Zukunft verbesserte Regelungsstrategien und Betriebsweisen im Voraus untersuchen lassen.

B. Einführung

Mit solarchemischen Hochtemperaturprozessen können u.a. Brennstoffe nachhaltig erzeugt werden, z.B. Kerosin für den Flugverkehr oder Wasserstoff. In einem möglichen Verfahren wird ein Redoxmaterial zunächst mit konzentrierter Solarenergie reduziert. Dann wird es wieder von Wasserdampf, Kohlendioxid oder einer Mischung dieser Gase oxidiert, wobei jeweils Wasserstoff, Kohlenmonoxid oder Synthesegas entsteht. Das Synthesegas dient als Grundstoff von Kerosin und anderen flüssigen Kraftstoffen. Die chemischen Prozesse haben bestimmte Anforderungen an konzentrierende Solarsysteme: Die vom Heliostatfeld zur Verfügung gestellte Leistung muss entsprechend der gewünschten Reaktionsführung geregelt werden. Eine hochskalierte Anlage wird aus mehreren Reaktoren bestehen, in denen jeweils Teilprozesse ablaufen. Ein Unterschreiten der hohen Zieltemperaturen in den jeweiligen Reaktoren kann aufgrund der Nichtlinearität der chemischen Reaktionen zu erheblichen Wirkungsgradeinbußen führen und den Prozess damit unwirtschaftlich machen.

B.1. Aufgabenstellung

Aufgabe im Verbundvorhaben SolarFuelNow war es, eine neuartige modellprädiktive Mehrgrößenregelung (MPR) für einen Solarreceiver mit mehreren Batch-Reaktoren für die solare Wasserstofferzeugung zu entwickeln und diese Regelung in das Heliostatfeldleitsystem in Jülich zu integrieren. Die Heliostatzielpunktzuordnung zu den jeweiligen Reaktoren und die Massenströme sollten optimiert werden, um eine sichere und hohe Brennstoffproduktion zu erreichen. Die Regelung sollte Vorhersagen der Direktstrahlung auf das Heliostatfeld berücksichtigen, die anhand eines Wolkenkamarasystems erstellt werden sollten. Dieses bereits in den BMWi-Projekten Wobas und Wobas A entwickelte und im BMWi Projekt Helibo am Solarturm Jülich installierte System, musste im Projekt SolarFuelNow für die MPR solarchemischer Prozesse im Hinblick auf zeitliche Auflösung, Genauigkeit und Spezifikation der Unsicherheit verbessert werden. Abschließend sollte das gesamte System an einem Solarreceiver bestehend aus einem realen Reaktor und mehreren günstigen Reaktorattrappen in Jülich erprobt und die Erhöhung der Wasserstoffproduktion durch die Einbeziehung der MPR und des Wolkenkamarasystems quantifiziert werden.

B.2. Ziele

Das Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und experimentelle Erprobung einer modellprädiktiven Heliostatfeld- und Prozessregelung für Solarreceiver mit mehreren solarchemischen Reaktoren zur Brennstoffherstellung, die durch Einbindung eines Wolkendetektionssystems den effizienten und sicheren Betrieb bei Wolkendurchzügen ermöglicht, wie es auf der Titelseite dieses Berichts illustriert ist.

Zur Erreichung der Projektziele wurden im Einzelnen die folgenden wissenschaftlich/technischen Arbeitsziele verfolgt, die sich auch als Ziele der einzelnen 6 Arbeitspakete verstehen lassen:

- Entwicklung dynamischer Modelle für den solarchemischen Teil bestehend aus Heliostatfeld und Receiver mit mehreren Reaktoren
- Darauf aufbauende Entwicklung einer Modellprädiktiven Mehrgrößen-Regelung
- Detailoptimierung des Nowcastingsystems durch Erhöhung der zeitlichen Auflösung und Ausgabe einer probabilistischen Vorhersage
- Bau eines Mehrreaktor-Testreceivers bestehenden aus einem bereits existierenden betriebsfähigen Receiverreaktor und einer Reihe von Ersatz-Reaktoren (Attrappen) zur

experimentellen Simulation des Multi-Reaktor-Betriebs und Installation auf dem Multi-Fokusturm in Jülich

- Integration des Nowcasting-Systems in das Leittechnik- und Regelungssystem und Implementierung am Solarturm Jülich
- Validierung der neu entwickelten Systeme anhand von Experimenten in Jülich

B.3. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens war eine Förderzusage des BMWK für das Projekt. Voraussetzung für die Demonstration der Regelung an einem realen Solarreaktor und nicht nur den Reaktorattrappen in AP6 war, dass ein betriebsbereiter Reaktor vom ursprünglich Ende 2022 endenden und zeitweise parallel zu SolarFuelNow laufenden Projekt ASTOR-ST übernommen werden konnte. Durch die Covid19-Pandemie und weitere Verzögerungen im Projekt ASTOR-ST war dies aber nicht der Fall und der reale Reaktor stand auch nach einer Projektverlängerung bis zum 31.12.2023 nicht zur Verfügung, sodass die Regelung nur auf den Reaktorattrappen demonstriert wurde.

B.4. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in 6 Arbeitspakete gegliedert, die mit ihren Schnittstellen zu den anderen Arbeitspaketen in Abbildung 1 dargestellt sind. In Klammern und in grün sind die an den jeweiligen Arbeitspaketen beteiligten Projektpartner aufgeführt, wobei der erste und fett gedruckte Partner die Leitung des Arbeitspakets innehatte. Das Projekt wurde vom DLR Institut für Future Fuels koordiniert.

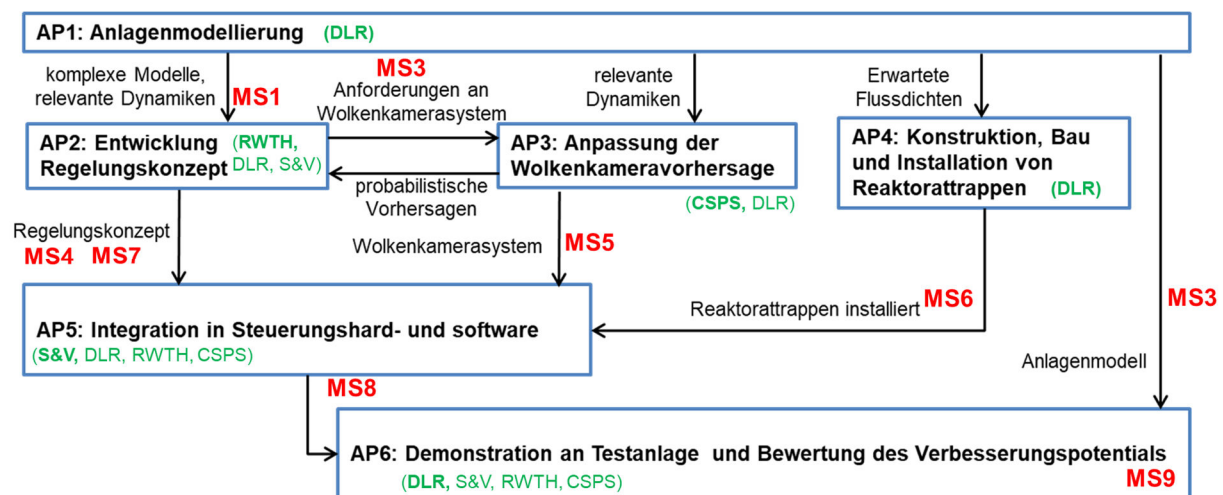


Abbildung 1: Arbeitspakete und deren Schnittstellen

Im ausschließlich vom DLR bearbeiteten Arbeitspaket „Anlagenmodellierung“ (AP1) sollte ein Simulationsmodell für Solarreceiver mit mehreren Reaktoren erstellt werden, das den Wolkendurchzug berücksichtigt. Dieses wurde in AP1.2 erstellt und es wurden in AP1.1 relevante Dynamiken abgeschätzt, die sowohl für die Modellerstellung als auch für den Entwurf des Regelungskonzeptes in AP2 genutzt wurden. Das vom DLR erstellte, detaillierte Modell eines Reaktors wurde in AP2 von der RWTH benutzt und mit dem Modell wurden charakteristische Situationen bei Wolkendurchzug in AP1.3 simuliert.

In dem von der RWTH geleiteten AP2 wurde ein Konzept einer modellprädiktiven Regelung für einen Solarreceiver mit mehreren thermochemischen Batch-Reaktoren entwickelt. In Zusammenarbeit mit dem DLR und S&V wurde in AP2.1 zunächst ein Grundgerüst der Regelung entworfen, das als Arbeitsgrundlage für die Weiterentwicklung des Wolkenkamarasystems in AP3 diente (MS3). Aus dem vom DLR in AP1 entwickelten komplexen Modell (Detailmodell) der Anlage wurde dann von der RWTH ein vereinfachtes Modell in AP2.2 erstellt. In AP2.3 wurde federführend von der RWTH ein Beobachter entworfen. Mit den vereinfachten Modellen und dem Beobachter wurde AP2.1 dann wieder aufgenommen und eine MPR erstellt (MS4). Diese wurde dann in AP2.4 noch erweitert und optimiert.

In AP3 wurde das kamerabasierte Vorhersagesystem entsprechend der sich aus dem Regelungskonzept ergebenden Anforderungen angepasst. Die Anpassungen betrafen die Zeitauflösung der Vorhersage, die Lieferung probabilistischer Vorhersagen und die Erhöhung der Genauigkeit. Das DLR übernahm dabei konzeptionelle Aufgaben, die Implementierung von zusätzlichen Programmfunktionalitäten sowie die Anpassung komplexer bestehender Programmabläufe, während CSPS die Rechenzeitoptimierung und die Implementierung am Solarturm in Jülich verantwortete. Des Weiteren wurde die Funktionalität und der Genauigkeitsvorteil anhand von historischen Kameradaten validiert.

In Arbeitspaket 4 errichtete das DLR eine Testanlage zur Erprobung der modellprädiktiven Regelung auf der Forschungsebene des Solarturms Jülich. Geplant war, einen solarchemischen Reaktor aus dem Projekt ASTOR-ST weiter zu nutzen und diesen im Projekt SolarFuelNow um 4 künstliche Reaktoren (Reaktorattrappen) zu ergänzen, um die Regelung kostengünstig demonstrieren zu können. Arbeitspaket 4 umfasste daher in den Unterarbeitspaketen die Konstruktion, den Bau und die Installation der Reaktorattrappen auf der Forschungsebene des Solarturmkraftwerkes des DLR in Jülich.

In Arbeitspaket 5 wurde das erarbeitete Regelungskonzept am Solarturm in Jülich implementiert und die Demonstrationstests in AP6 vorbereitet. Dazu wurden Schnittstellen zwischen den Subsystemen erstellt und die Systeme miteinander verknüpft.

In AP6 wurde das Gesamtsystem demonstriert und die erreichten Verbesserungen quantifiziert.

Die ursprünglich geplante Bearbeitungszeit betrug 3 Jahre, vom 1.9.2020 bis zum 31.8.2023, wie Abbildung 2 zu entnehmen ist.

Das Projekt wurde 2023 kostenneutral um 4 Monate bis zum 31.12.2023 verlängert, da es bei der Entwicklung der MPR sowie bei deren Einbindung und Demonstration auf dem Solarturm zu Verzögerungen gekommen war. Ein weiterer gewichtiger Grund für die Verlängerung des Projektes SolarFuelNow war die u.a. durch die Covid19-Pandemie bedingte starke Verzögerung des Projektes ASTOR-ST, in dem der reale Reaktor auf der Forschungsebene des Solarturms hätte aufgebaut und getestet werden sollen.

Mit der Verlängerung bestand zwischenzeitlich die Aussicht, den realen Reaktor aus ASTOR-ST noch für die Demonstrationstests zur Verfügung gestellt zu bekommen, was aber letztendlich aufgrund weiterer Verzögerungen im dann auch verlängerten Projekt ASTOR-ST nicht mehr der Fall war, sodass die MPR in AP6 nur auf den Reaktorattrappen getestet wurde.

Im Rahmen anderer Projekte konnte das DLR-Projektteam von ASTOR-ST im Juni 2024 kurz vor Fertigstellung dieses Berichts einen thermischen Test des realen Reaktors durchführen; ein Vergleich der dort gesammelten Messdaten mit dem in SolarFuelNow entwickelten Reaktormodell wird der Vollständigkeit halber in Kapitel 6 dieses Berichts aufgeführt.

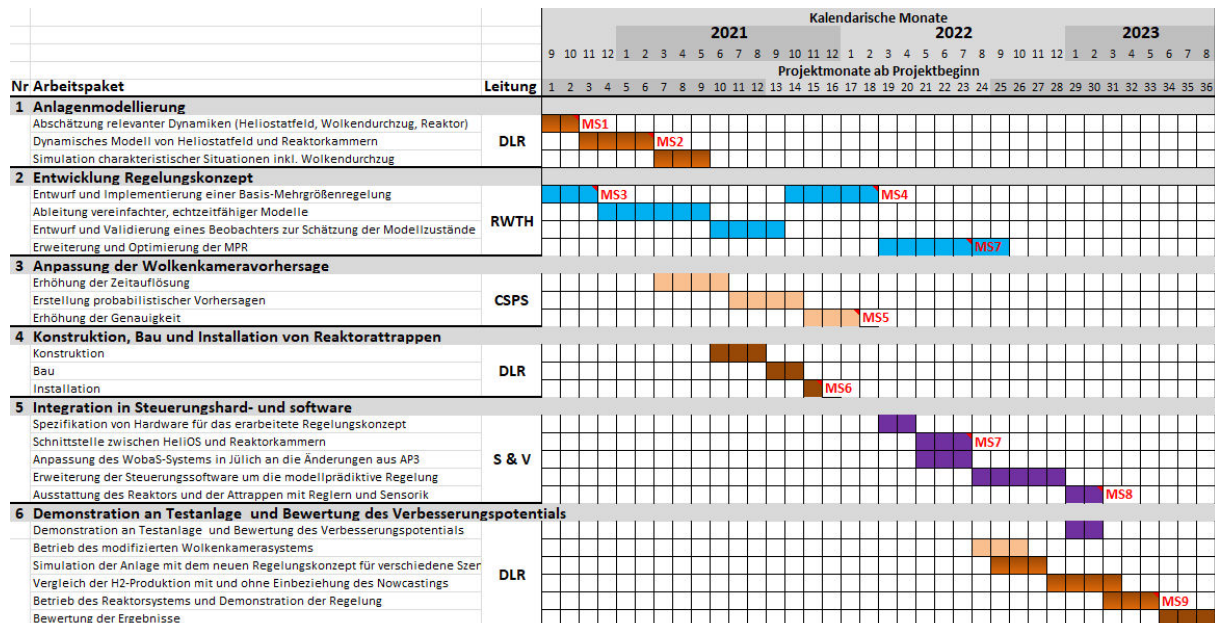


Abbildung 2: Zeitplan zu Beginn des Vorhabens

B.5. Meetings und Zusammenarbeit

Das Kickoff-Meeting des Projektes fand am 5.10.2020 statt. Darin wurde vereinbart, zweimal jährlich im Januar und Juli offizielle Projektmeetings mit Beteiligung des Projektträgers abzuhalten und zusätzlich dazu eine monatliche Telefonkonferenz zum aktuellen Status durchzuführen (max. 1,5 Stunden). Dies wurde auch so bis zum Projektende im Dezember 2023 umgesetzt, sodass über 40 Meetings gemeinsam mit allen Projektpartnern abgehalten wurden. Die offiziellen Projektmeetings sollten wenn möglich in Präsenz abgehalten werden, allerdings fiel der Projektstart unmittelbar in die Covid19-Pandemie, sodass dies erst ab dem Projektmeeting am 22.7.2022 geschah. DLR-Mitarbeiter aus Almería und in Ausnahmefällen andere Projektteilnehmer wurden per Videokonferenz eingebunden.

Zusätzlich dazu gab es bi- oder trilaterale Meetings in den Arbeitspaketen, z.B. einen zweiwöchentlichen Regeltermin zwischen RWTH und DLR zur Entwicklung der MPR in AP2 oder mehrere Meetings zwischen S&V, DLR und RWTH bei S&V in Aachen im Rahmen von AP2 und AP5, später dann auch zur Inbetriebnahme und den Tests am Solarturm in Jülich in AP5 und AP6. CSPS und DLR waren zudem in enger Abstimmung in AP3 und beim Betrieb des Wolkenkamerasystems in AP5 und AP6.

Das Abschlussmeeting fand am 13.12.2023 im Synlight des DLR in Jülich statt.

Auf dem Kickoff-Meeting wurde auch die vom DLR eingerichtete Teamsite vorgestellt, auf die im Laufe des Projektes Präsentationsfolien, Protokolle und technische Unterlagen geladen wurden und die die gleichzeitige Arbeit an Dokumenten ermöglichte. Außerdem wurde eine GitLab-Gruppe eingerichtet, auf die den Projektpartnern nach Unterzeichnung des Kooperationsvertrages im Januar 2021 Zugriff gegeben wurde. Darin wurden Git-Repositories für die Reaktormodelle, für die MPR und weitere unterstützende Tools eingerichtet, sodass Codeänderungen immer transparent für alle Projektpartner waren, gleichzeitig am Code gearbeitet werden konnte und eine Versionskontrolle bestand.

B.6. Stand der Technik und Vorarbeiten

Mittels thermochemischer Kreisprozesse können Kraft- und Brennstoffe regenerativ aus Solarenergie hergestellt werden. Dies wurde in mehreren nationalen und internationalen

Projekten untersucht. Hervorzuheben ist insbesondere die HYDROSOL-Projektreihe, die im Jahr 2002 begann und bis jetzt die höchste technische Reife erreicht hat (Abbildung 3).

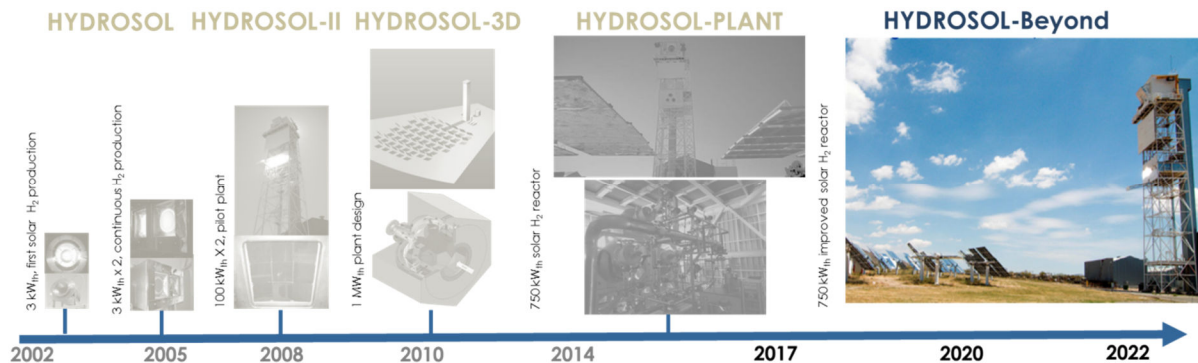


Abbildung 3: Bisheriger Entwicklungsprozess der HYDROSOL-Technologie

Das Grundkonzept ist in Abbildung 4 gezeigt: In einem zweistufigen Batchprozess wird zunächst ein Metalloxid (aktuell Ceroxid) bei hohen Temperaturen $>1400^{\circ}\text{C}$ reduziert und Sauerstoff wird freigesetzt. Um den Sauerstoff zu entfernen, wird Stickstoff als Spülgas benutzt, das das waben- oder schaumförmige Metalloxid von der Bestrahlungsseite her kommend durchströmt.

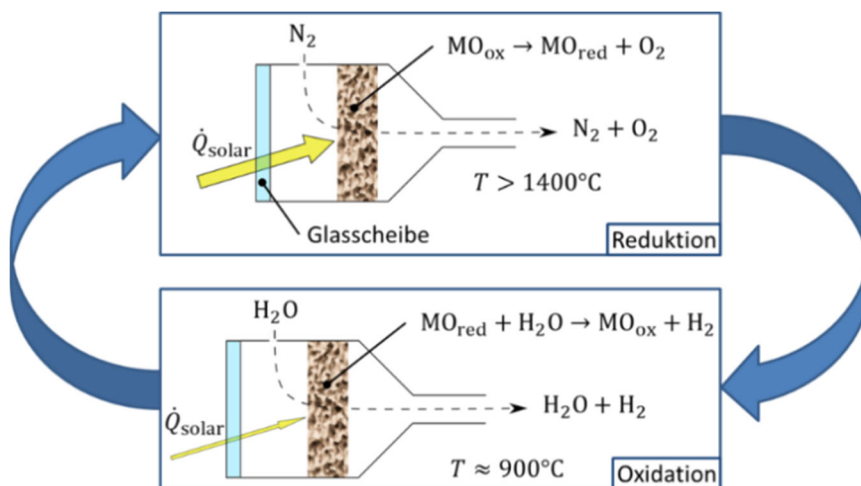


Abbildung 4: Grundkonzept der HYDROSOL-Projektreihe

Im zweiten Schritt wird das Metalloxid wieder mit Wasserdampf oxidiert, wobei Wasserstoff frei wird. Dies geschieht bei niedrigeren Temperaturen um 900°C . Die in den Prozessschritten benötigte Energie wird durch konzentrierte Solarstrahlung bereitgestellt.

In der Hydrosol-Projektreihe wurde die Technologie von der ersten Demonstration in einer Laborumgebung im Sonnenofen in Köln auf eine 750 kW_{th}-Anlage auf der Plataforma Solar de Almeria (PSA) in Spanien skaliert. Das in Abbildung 4 gezeigte Verfahren kann auch mit CO_2 statt H_2O oder mit einer $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Mischung durchgeführt werden. So kann direkt Synthesegas hergestellt werden, das über eine Fischer-Tropsch-Synthese zu verschiedenen Kraftstoffen, z.B. Kerosin, weiterverarbeitet werden kann. Diese gesamte Produktionskette wurde im europäischen Projekt Sun-to-Liquid das erste Mal außerhalb des Labors auf einem Solarturm demonstriert und es wurde Kerosin hergestellt [Zoll2022].

Um die Atmosphäre in den Solarreaktoren kontrollieren zu können, wird eine Scheibe verwendet. Diese begrenzt die Größe des Reaktors auf einen Durchmesser von etwa 1 Meter, bzw. bei einer Flussdichte von ca. $2 \text{ MW}/\text{m}^2$ auf eine thermische Leistung von ca. 1.5 MW. Für

eine weitere Hochskalierung in den 10-100MW-Bereich muss der Receiver daher modular aus mehreren Reaktorkammern aufgebaut werden. Dies hat auch den Vorteil, dass Reduktion und Oxidation parallel in verschiedenen Kammern ablaufen können und so der gesamte Prozess quasi-kontinuierlich betrieben werden kann. Da Oxidation und Reduktion verschiedene solare Leistungen erfordern, muss das Heliostatfeld entsprechend gesteuert oder besser geregelt werden, denn die Gasströme können nur in sehr engen Grenzen für eine Feinregelung verwendet werden.

Der Stand der Technik zu Beginn des Projektes basierte dabei im Wesentlichen auf einer Dissertation [Säck2002] von 2012, in der ein Regelungskonzept für die Hydrosol2-Anlage mit zwei Kammern entwickelt wurde.

Dabei wurde hauptsächlich das Heliostatenfeld verwendet, um die Temperatur in den Reaktorkammern mit einem PI-Regler zu regeln. Bei einer Temperaturabweichung wurden Zielpunkte einzelner Heliostaten auf den Reaktor hinzugefügt oder defokussiert. Roca et al. erweiterten diese Methode noch um eine Vorsteuerung [Roca2016]. Des Weiteren wurde die Regelung der Reaktoren bisher nur einzeln betrachtet.

Eine Erhöhung der Reaktorkammerzahl lässt das Optimierungsproblem naturgemäß komplexer werden. Nützlich bei der Optimierung können modellgestützte Methoden zur Optimierung der Verteilung der Heliostatzielpunkte auf der Oberfläche thermischer Receiver (kurz: Zielpunktoptimierung, ZPO) sein, an denen das DLR seit mehr als 10 Jahren arbeitet. Eine auf einem heuristischen Optimierungsalgorithmus basierende Methode [Belh2014] ist in der Ray-Tracing-Software STRAL des DLR implementiert und wurde erfolgreich am Solarturm Jülich validiert [Schw2016]. Diese Methode wurde bis Projektbeginn und auch danach erweitert und ausgebaut zu einem Zielpunkt-Managementsystem mit Einbeziehung von DNI-Vorhersagen und Messdaten aus dem Receiver. Das IRT der RWTH war an dieser Entwicklung beteiligt und entwickelte eine Modellprädiktive Regelung für einen Salzreceiver. Allerdings bezogen sich alle diese Entwicklungen auf rein thermische Receiver für Kraftwerksprozesse und es wurde nur in einer Ein-Größen-Regelung über den Massenstrom geregelt.

Die Übertragung dieser Methoden auf Receiver-Reaktoren für solarchemische Prozesse in dem hier beschriebenen Projekt SolarFuelNow sollte unter Einbindung von Strahlungsvorhersagen in eine modellprädiktive Regelung erfolgen. Die Strahlungsvorhersage liefert ein vom DLR und von der CSPS GmbH entwickeltes Wolkenkamarasystem, das zu Projektbeginn zur Vorhersage der Solarstrahlung für die nächsten ca. 15 Minuten in Almeria genutzt wurde und im Rahmen des Projekts Helibo auch in Jülich installiert worden ist. Kameras nehmen Fotos des gesamten Himmels auf, auf denen die sichtbaren Wolken detektiert werden. Durch Verwendung mehrerer Kameras oder zusätzlicher Wolkenhöhenmessung können die 3D-Koordinaten der Wolken ermittelt werden. Damit kann eine Einstrahlungskarte auf dem Boden berechnet werden. Durch die Verfolgung von Wolken in Bildserien ist auch eine Vorhersage der Einstrahlung möglich. Zu Projektbeginn wurden Vorhersagen in 30 sekundlicher Zeitauflösung für die nächsten 15 Minuten erstellt und es konnten Unsicherheitskarten herausgegeben werden. Allerdings musste für die Anwendung für solare Reaktoren die Zeitauflösung erhöht und probabilistische Vorhersagen ausgegeben werden.

C. Ergebnisse und Zielerreichung

Nachfolgend werden die Ergebnisse und die Zielerreichung in den einzelnen Arbeitspaketen beschrieben.

C.1. Arbeitspaket 1: Anlagenmodellierung (DLR)

In diesem Arbeitspaket sollten zunächst für die anderen Arbeitspakete wichtige Dynamiken abgeschätzt werden (AP1.1), dann ein Simulationsmodell für eine Anlage mit einem Receiver mit mehreren Reaktoren erstellt werden, das den Wolkendurchzug berücksichtigt (AP1.2) und schließlich mit dem Anlagenmodell charakteristische Situationen bei Wolkendurchzug simuliert werden (AP1.3).

C.1.1. Abschätzung relevanter Dynamiken (AP1.1)

Die Dynamiken der beteiligten Systeme wurden zu Beginn des Projektes grob abgeschätzt. Es wurde jeweils der damals aktuelle Stand der Systeme betrachtet.

C.1.1.1. Wolkengeschwindigkeiten und Dynamik des Wolkenkamarasystems

Eine erste grobe Abschätzung zu möglichen maximalen Geschwindigkeiten des Leistungsabfalls des Heliostatfeldes wurde anhand dessen Größe (Abbildung 5) und mittels der Annahme einer maximalen Wolkengeschwindigkeit von etwa 20 m/s getroffen: die Gesamtleistung kann im Extremfall in weniger als 10-20 Sekunden von voller Leistung auf null abfallen bzw. bei Wolkenabzug auch wieder ansteigen. In erster Näherung könnte man für diese Situation von einem linearen Abfall bzw. Anstieg ausgehen.

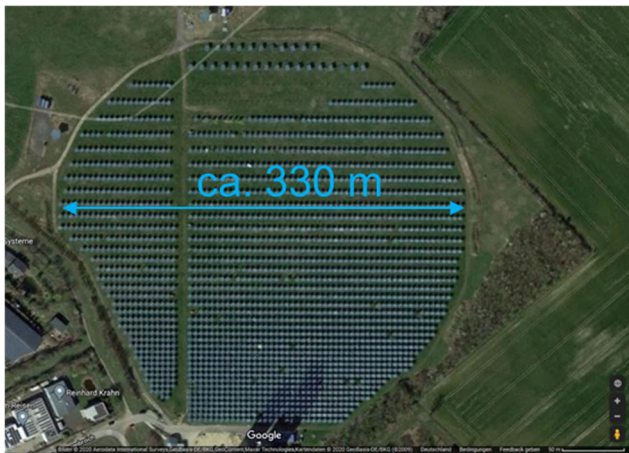


Abbildung 5: Heliostatfeld in Jülich

Das Wobas-Wolkenkamarasystem lieferte zu Beginn des Projektes eine minütliche Vorhersage über einen Zeitraum bis zu 20 Minuten in die Zukunft. Bilder wurden alle 30 Sekunden gemacht und die Laufzeit des Auswertalgorithmus betrug etwa 10 s. Abbildung 6 zeigt den Fehler in der Vorhersage des damaligen Wolkenkamarasystems für verschiedene Vorlaufzeiten und für Daten der Plataforma Solar de Almeria, die von CIEMAT betrieben wird. Das Wolkenkamarasystem teilt die Wolken in Klassen ein, für die sich unterschiedlich hohe Vorhersagegenauigkeiten ergeben. Mehr Informationen finden sich in [Nouri2020].

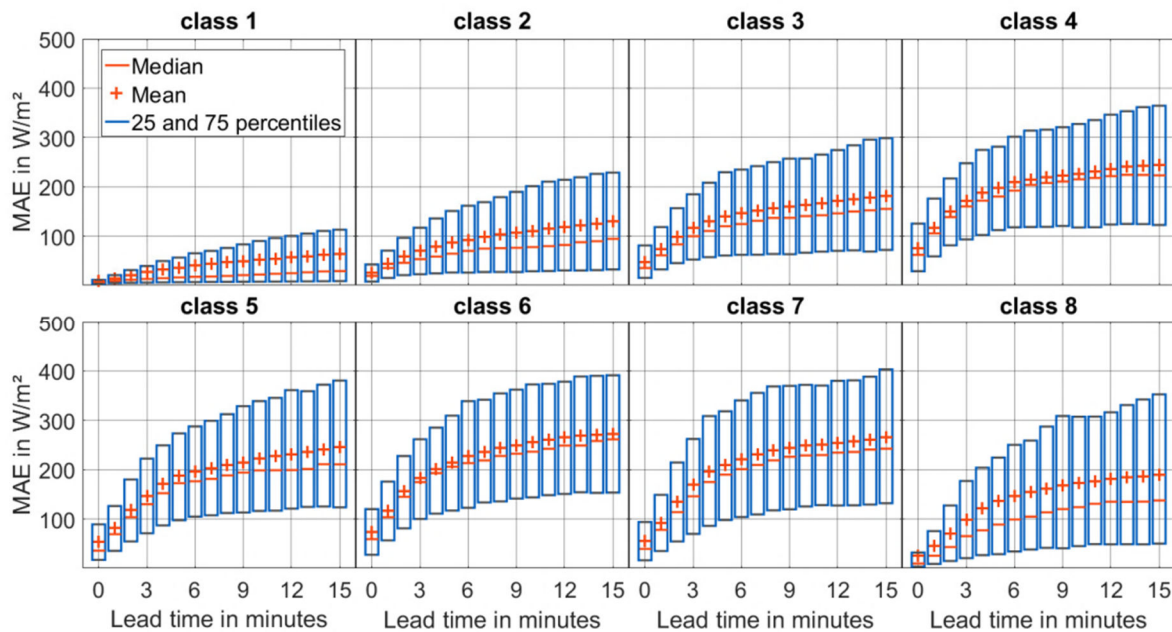


Abbildung 6: Durchschnittlicher absoluter Fehler (MAE) für verschiedene DNI-Variabilitätsklassen als Funktion der Vorlaufzeit, gezeigt für einen Datensatz über drei Jahre auf der PSA. Die über alle Zeitpunkte gemittelte Flussdichte beträgt 661 W/m^2 . Abbildung aus [Nouri2020]

C.1.1.2. Dynamik des Receiver-Reaktors

In Abbildung 7 sind die mit dem in Abschnitt C.1.2 beschriebenen Reaktormodell simulierten Temperaturen der Absorberfront, der Absorberrückseite und der Reaktorscheibe sowie der erzeugte Wasserstoffstrom in einem Zyklus mit Aperturflussdichte von 0 während der Oxidation und $1,5 \text{ MW/m}^2$ während der Reduktion gezeigt.

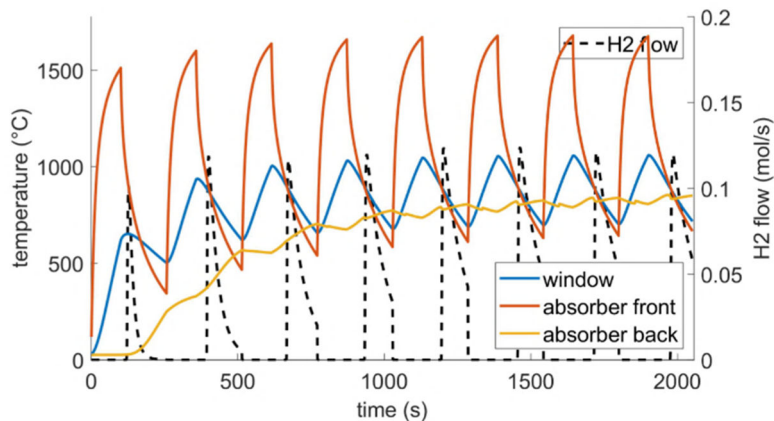


Abbildung 7: Temperaturen der Absorberfront, Absorberrückseite und der Reaktorscheibe sowie erzeugter Wasserstoffstrom in einem Zyklus mit Flussdichte von 0 während der Oxidation und $1,5 \text{ MW}$ während der Reduktion, aus Simulationsmodell zur Abschätzung der Reaktordynamik in AP1.1

Die Temperatur der Absorberoberfläche ändert sich am stärksten und wird sehr stark durch die Einstrahlung beeinflusst, während die Temperatur der Absorberrückseite nur sehr langsam auf eine veränderte Einstrahlung reagiert.

Der Einfluss der Massenströme auf die Maximaltemperatur des Absorbers ist in Abbildung 8 gezeigt.

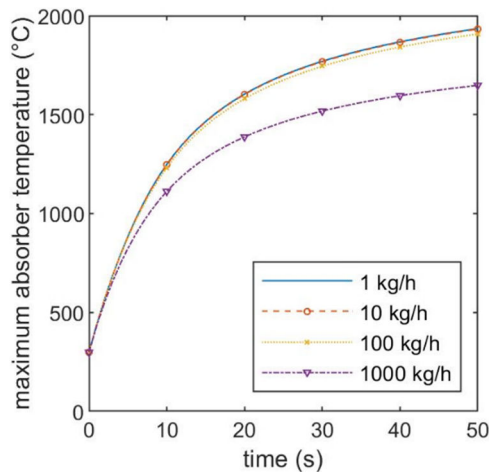


Abbildung 8: Verlauf der maximalen Absorbertemperatur für verschiedene Stickstoffmassenströme. Ein typischer Betriebsmassenstrom für diese Reaktorgröße liegt bei 75 kg/h.

Nur mit sehr hohen Massenströmen, die ein Vielfaches über den in bisherigen Experimenten eingestellten Massenströmen liegen, lässt sich die Temperatur signifikant absenken.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde im Folgenden davon ausgegangen, dass die Haupteinflussnahme in der Regelung über die Flussdichte geschehen muss und die Massenströme nur für eine Feinregelung genutzt werden könnten (siehe Arbeitspaket 2).

C.1.1.3. Dynamik des Heliostatfeldes und des Heliostatfeldleitsystems

Eine grobe Abschätzung durch das Betriebspersonal des Heliostatfeldes ergab eine ungefähr mögliche Geschwindigkeit des Brennflecks auf dem Target von 2 m/s, was einer Heliostatverfahrgeschwindigkeit von ca. 3 mrad/s entspricht. Diese Werte hängen zwar auch von der Position der Heliostate und anderen Parametern ab, sind aber ausreichend für eine Abschätzung. Das Heliostatfeldleitsystem aktualisiert den Sonnenvektor jede Sekunde und hat eine Taktrate von 333ms. In Anbetracht dieser Zahlen und der thermischen Trägheit der Reaktoren ist davon auszugehen, dass die Ansprechzeit und die Geschwindigkeit des Heliostatfeldes nicht dominierend ist und als ausreichend angesehen werden kann.

Tabelle 1: Abgeschätzte Dynamiken der Anlage (AP1.1)

Größe	Abgeschätzter Wert zu Beginn des Projektes
Geschw. Brennfleck auf Target	max. 2 m/s
Aktualisierung Sonnenvektor	sekündlich
Schnellster Leistungsabfall / -anstieg	Von maximaler auf gar keine Leistung und umgekehrt in etwa 10-20 s
Vorhersagehorizont Wobas	etwa 15-20 min., mit abnehmender Genauigkeit
Laufzeit der Wobas-Bildauswertung	Etwa 10 s
Häufigkeit der Wobas-Bildauswertung	Alle 30 s
Gradient der Absorberfronttemperatur am Materiallimit von 2000 K	≈7 K/s bei einer extremen Flussdichte von 2.25 MW/m ² in der Apertur (aus Simulationsmodell aus AP1.2)
Maximal zulässige Heizrate Fenster	max. 25 K/min (Angabe Heraeus)

Die relevanten Dynamiken der Anlage wurden in Tabelle 1 zusammengefasst und durch das DLR an die Partner am 22.10.2020 kommuniziert. Damit wurde Meilenstein MS1 wie geplant abgeschlossen.

C.1.2. Dynamisches Modell von Heliostatfeld und Reaktorkammern (AP 1.2)

Das dynamische Modell der solarchemischen Reaktoren und das Modell des Heliostatfeldes hatte im Projekt eine besondere Bedeutung, da es an mehreren Stellen benötigt wurde: zur Abschätzung der Dynamiken in AP1.1, zur Erstellung und Validierung des reduzierten Modells in der modellprädiktiven Regelung (AP2) und zur Ermittlung des Zustandes der Reaktorattrappen aus deren Messdaten in AP4 und AP5. In AP1 wurden zwei Reaktormodelle vom DLR entwickelt. Zum einen wurde ein existierendes MATLAB-Modell aus dem Projekt H2Loop weiterentwickelt, das am 13.11.2020 mit entsprechender Dokumentation der RWTH vom DLR zur Verfügung gestellt wurde. Es wird im Folgenden „detailliertes MATLAB-Modell“ genannt und wurde im späteren Verlauf des Projektes mit Messdaten aus dem ASTOR-Projekt validiert.

Zum anderen wurde ein neues, stark vereinfachtes Modell in Python erstellt. Dieses wird im Folgenden „simples Python-Modell“ genannt, da zugunsten von Verständlichkeit und Rechenzeit starke Vereinfachungen getroffen wurden. Es ermöglichte zu Beginn des Projektes für die anderen Projektpartner einen einfacheren Einstieg in die Thematik der solaren Reaktoren. Es half der RWTH bei der Konzepterstellung der MPR, wurde später aber durch das detaillierte MATLAB-Modell ersetzt.

Die Modellierung des Heliostatfeldes ist insbesondere wichtig, um die voraussichtliche Einstrahlungsleistung auf den Reaktoren unter Berücksichtigung der aktuellen Wolkensituation und des Sonnenstands zu berechnen. In der Literatur werden die Einstrahlungsleistungen entweder über analytische Modelle oder Raytracing-Modelle berechnet. Aufgrund ihrer höheren Modellierungsgenauigkeit fiel die Entscheidung zugunsten der Raytracing-Modelle aus. Konkret wurden das Heliostatfeld, die Sekundärkonzentratoren und die absorbierende Fläche des Reaktors im In-House Raytracer STRAL modelliert. Die Modellierung wird genauer in Abschnitt C.1.2.4 beschrieben.

C.1.2.1. Detailliertes MATLAB-Reaktormodell

Im NRW-Projekt H2Loop wurde bereits ein Modell für den Solarreaktor erstellt, das auf der SolarPACES 2020 präsentiert wurde [Grobbe2020]. Dieses Modell wurde in AP1.2 weiterentwickelt, für die Verwendung in SolarFuelNow angepasst und mit weiteren Messdaten aus dem ASTOR-Projekt validiert, die im Sonnensimulator Synlight des DLR aufgenommen wurden.

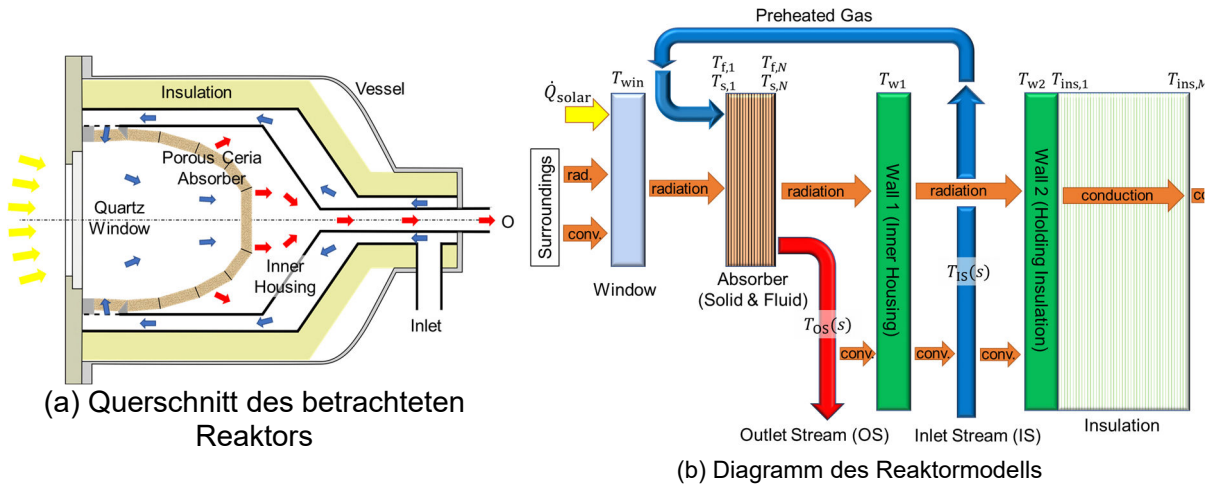


Abbildung 9: Querschnitt des betrachteten Reaktors und Diagramm des Reaktormodells, aus [Grobbe2020]

In dem in Abbildung 9 (b) gezeigten Modell sind die Hauptkomponenten des Reaktors aus Abbildung 9 (a) abgebildet: die Quarzglasscheibe, der poröse Ceroxid-Absorber, die ihn umgebende Wand1 des Innenkessels, die äußere Wand2 des Innenkessels sowie die an dieser Wand anliegende Isolation.

Es sollen zunächst die Energiebilanzen für die genannten Komponenten vorgestellt und dann näher auf die jeweiligen Terme eingegangen werden. Die Werte für die Parameter finden sich in Tabelle 2.

C.1.2.1.1. Energiebilanzen für die einzelnen Komponenten des solaren Reaktors

Die vom Heliostatfeld konzentrierte Solarstrahlung gelangt durch ein flaches Quarzglasfenster in den Reaktor. Es wird davon ausgegangen, dass die Temperatur des Fensters uniform und seine Wärmebilanz durch Gleichung (1) gegeben ist.

$$m_{\text{win}} c_{v,\text{win}} \frac{dT_{\text{win}}}{dt} = A_{\text{win}} h_{\text{win}} (T_{\text{amb}} - T_{\text{win}}) + \dot{Q}_{\text{rad,win,th}} + \dot{Q}_{\text{rad,win,opt}} \quad (1)$$

Berücksichtigt werden Konvektion zur Umgebungsluft und Strahlung im solaren (Index "opt") und im thermischen (Index "th") Spektrum. Der poröse Absorber ist in einer kuppelförmigen Anordnung hinter dem Fenster angeordnet, wodurch ein Hohlraum entsteht. Der poröse Absorber enthält eine Gas- und Festkörperphase und wird mit einem eindimensionalen Ansatz modelliert, wobei davon ausgegangen wird, dass die Strahlung auf den Absorber gleichmäßig ist und sich die Temperatur und andere Variablen nur entlang der Tiefe des Absorbers ändern. Die feste Phase im Absorber wird durch die eindimensionale partielle Differentialgleichung (PDE) in Gleichung (2) beschrieben:

$$\frac{\partial((1-\varepsilon)\rho_s c_{p,s} T_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{s,\text{total}} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + h_{\text{sf}} A_0 (T_f - T_s) + q_{\text{solar}} + q_{\text{chem}} \quad (2)$$

mit der Porosität ε , der Festkörperdichte ρ_s , Wärmekapazität des Festkörpers $c_{p,s}$, Gesamtwärmeleitfähigkeit des Festkörpers $k_{s,\text{total}}$, Fluidtemperatur T_f , Festkörpertemperatur T_s und dem Quellterm für die volumetrische Absorption der Solarstrahlung q_{solar} und einem weiteren Quellterm für die chemische Reaktion q_{chem} , der später definiert wird. Es wurden temperaturabhängige Stoffwerte des Ceroxids benutzt. Die fluide Phase wird als inkompressibel und mit konstanten Stoffwerten angenommen. Dies ist eine starke Annahme, erlaubt jedoch eine schnellere Simulation, da sich damit die Fluidgeschwindigkeit nicht entlang des Absorbers ändert und aus dem Massenstrom $\dot{m}$ zu $u_{\text{bulk}} = \dot{m} / (A_{\text{abs}} \rho_f)$ berechnet werden

kann. Zur Geschwindigkeitsberechnung muss eine Temperatur für die Bestimmung der Dichte angenommen werden; hier wurden die Stoffwerte von Stickstoff bei 500 K angenommen.

Die Transportgleichung für die Enthalpie des Fluids lautet damit

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_f c_{p,f} T_f)}{\partial t} + \frac{\partial(u_{\text{bulk}} \rho_f c_{p,f} T_f)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{f,\text{eff}} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + h_{\text{sf}} A_0 (T_s - T_f) \quad (3)$$

Dabei ist ρ_f die Dichte, $c_{p,f}$ die spezifische Wärmekapazität und $k_{f,\text{eff}}$ die effektive Wärmeleitfähigkeit des Fluids im Absorber. Beide partielle Differentialgleichungen (2) und (3) sind über den volumenspezifischen Wärmeübergangskoeffizient zwischen Gas und Feststoff h_{sf} , multipliziert mit der spezifischen Kontaktfläche A_0 miteinander gekoppelt.

Zu beachten ist, dass sich die vereinfachende Annahme der Inkompressibilität auf der linken Seite der Gleichung nur auf den instationären Term auswirkt, da im konvektiven Term nur der konstante, flächenspezifische Massenstrom $u_{\text{bulk}} \rho_f = \dot{m}/A_{\text{abs}}$ auftritt. Auf der rechten Seite der Gleichung hat die Annahme nur indirekt über die Nusseltzahl Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizient h_{sf} . Da der Einfluss des Fluids auf die Absorbertemperatur wie bereits in Abbildung 8 gezeigt gering ist, ist die Annahme konstanter Stoffwerte und Dichte des Fluids zur Reduzierung der Simulationszeit gerechtfertigt.

Das Gas verlässt den Absorber mit einer hohen Temperatur und heizt die Innenwand des Innenkessels (Wand1) durch Konvektion auf. Diese Wand wird auch über Strahlung von der Rückseite des Absorbers erwärmt. Die Außenseite von Wand1 wärmt den eintretenden Gasstrom auf und gibt Wärme über Strahlung an die Außenwand des Innenkessels (Wand2) ab, die wiederum die Isolation hält. In beiden Wänden wird eine gleichförmige Temperaturverteilung angenommen, sodass sich die Energiebilanzen in den Gleichungen (4) und (5) ergeben.

$$\text{(Wand 1)} \quad m_{w1} c_{v,w1} \frac{dT_{w1}}{dt} = \dot{Q}_{\text{rad},w1\text{inside}} + \dot{Q}_{\text{rad},w1\text{outside}} + \dot{Q}_{\text{IS} \rightarrow w1} + \dot{Q}_{\text{OS} \rightarrow w1} \quad (4)$$

$$\text{(Wand 2)} \quad m_{w2} c_{v,w2} \frac{dT_{w2}}{dt} = \dot{Q}_{\text{rad},w2} + \dot{Q}_{\text{IS} \rightarrow w2} + \dot{Q}_{\text{ins} \rightarrow w2} \quad (5)$$

Der Wärmestrom durch die Isolation mit deren Wärmeleitfähigkeit k_{ins} und Wärmekapazität $c_{v,\text{ins}}$ wird durch eine eindimensionale, instationäre Wärmeleitungsgleichung in zylindrischen Koordinaten mit Radius r in Gleichung (6) beschrieben.

$$\frac{\partial(\rho_{\text{ins}} c_{v,\text{ins}} T_{\text{ins}})}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{\text{ins}} r \frac{\partial T_{\text{ins}}}{\partial r} \right) \quad (6)$$

Die Innenfläche der Isolation wurde als Randbedingung die Temperatur von Wand2 gegeben, an der Außenseite der Isolation wurde eine konvektive Randbedingung zur Umgebung implementiert.

C.1.2.1.2. Vorwärmung der Gase im Innenkessel entlang der Wände

Das in den Reaktor eintretende Gas wird in dem durch Wand 1 und Wand 2 gebildeten Kanal vorgewärmt. Um dies zu modellieren, werden die zwei Wände als zwei konzentrische Zylinder mit Durchmessern D_{w1} und D_{w2} angenommen, beide mit der gleichen Länge L und mit gleichförmigen Temperaturen, die über die Gleichungen (4) und (5) berechnet werden. Die Gasphase wurde entlang der Länge des Kanals diskretisiert und die Energiebilanz des Gases in einem Volumenelement ist:

$$\dot{m} c_{p,f} dT_{\text{IS}} = -h_{\text{ch}} \pi ds [(T_{\text{IS}}(s) - T_{w1}) D_{w1} + (T_{\text{IS}}(s) - T_{w2}) D_{w2}] \quad (7)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient h_{ch} wurde als konstant angenommen. Die Gastemperatur des Eingangs-Gasstroms (IS) entlang des Strömungspfad s wurde durch Integration ermittelt:

$$T_{IS}(s) = K_1 + (T_{IS,in} - K_1) \exp(-K_2 s) \quad (8)$$

mit $K_1 = \frac{T_{w1}D_{w1} + T_{w2}D_{w2}}{D_{w1} + D_{w2}}$ und $K_2 = \frac{h_{ch}\pi(D_{w1} + D_{w2})}{\dot{m}c_{p,f}}$.

Die Wärmeströme des Eingangs-Gasstromes zu Wand 1 und zu Wand 2 finden sich in Gleichung (9) und (10).

$$\dot{Q}_{IS \rightarrow w1} = h_{ch}\pi D_{w1} \left[K_1 L + \frac{T_{IS,in} - K_1}{K_2} (1 - \exp(-K_2 L)) - T_{w1} L \right] \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{IS \rightarrow w2} = h_{ch}\pi D_{w2} \left[K_1 L + \frac{T_{IS,in} - K_1}{K_2} (1 - \exp(-K_2 L)) - T_{w2} L \right] \quad (10)$$

Das Temperaturprofil des den Absorber verlassenden und zum Austritt des Reaktors strömenden Gases wird ebenso hergeleitet und ist in Gleichung (11) gegeben; der entsprechende Wärmestrom vom austretenden Gas an Wand 1 in Gleichung (12).

$$T_{OS}(s) = T_{w1} + (T_{OS,in} - T_{w1}) \exp\left(-\frac{h_{ch}\pi D_{w1}}{\dot{m}c_{p,fl}} s\right) \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{fl,dirty \rightarrow w1} = \dot{m}c_{p,f} [T_{OS,in} - T_{OS}(s = L)] \quad (12)$$

Tabelle 2: Parameter für detailliertes MATLAB-Modell des solaren Reaktors

Parameter	Symbol	Wert
Quarzglasscheibe: Spektrale Reflektivität und Transmissivität	$\varrho_{\text{win}}, \tau_{\text{win}}$	Herstellerdaten (Haereus)
Ceroxid: spektrale Reflektivität	-	Abhängig vom Reduktionsgrad, interpoliert aus [5]
Porosität des Absorbers	ε	0.7
Extinktionskoeffizient	β	420.5 m^{-1} [6,7]
Stefan-Boltzmann-Konstante	σ	$5.6704\text{e-}8 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$
Masse der Scheibe	m_{win}	7.57 kg
Masse von Wand 1	m_{w1}	37.08 kg
Masse von Wand 2	m_{w2}	44.50 kg
Wärmekapazität der Stahlwände	$c_{v,\text{w1}}, c_{v,\text{w2}}$	$500 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Fläche der Quarzglasscheibe	A_{win}	0.3442 m^2
Wärmekapazität der Scheibe	$c_{v,\text{win}}$	$1052 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Stirnfläche des Absorbers	A_{abs}	1.36 m^2
Dicke des Absorbers	-	0.06 m
Effektive Wärmeleitfähigkeit des Gases im Absorber	$k_{\text{f,eff}}$	$0.0422 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Effektive Wärmeleitfähigkeit des Festkörperanteils des Absorbers	$k_{\text{s,eff}}$	$0.5615 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Länge des von Wand 1 und Wand 2 gebildeten Kanals	L	1 m
Wärmeübergangskoeffizient von Wand zu Gas	h_{ch}	$10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
Durchmesser der zylindrischen Wand 1	D_{w1}	0.5 m
Durchmesser der zylindrischen Wand 2	D_{w2}	0.6 m
Reduktionsenthalpie von Ceroxid	ΔH_{red}	$460 \text{ kJ (mol O)}^{-1}$
Molare Masse des Ceroxids im Absorber	n_{Ce}	1026.2 mol
Dichte des Ceroxids	ρ_{s}	7215 kg m^{-3}
Dichte des Gases im Absorber	ρ_{f}	0.562 kg m^{-3}
Wärmekapazität des Festkörpers im Absorber (Ceroxid)	$c_{p,\text{s}}$	Ref. [5]: $-0.000127069 \cdot T_{\text{s}}^2 + 0.2697656 \cdot T_{\text{s}} + 299.8696$ für $T_{\text{s}} \leq 1100 \text{ K}$ and $444.27 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ for $T_{\text{s}} > 1100 \text{ K}$
Wärmekapazität des Gases im Absorber	$c_{p,\text{f}}$	$1076.3 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient zwischen Feststoff und Gas im Absorber, multipliziert mit Kontaktfläche	$h_{\text{sf}}A_0$	Funktion der Nusseltzahl, wie in [4]. Größenordnung $10^5 \text{ W m}^{-3}\text{K}^{-1}$
Dicke der Isolation	-	0.2 m
Dichte der Isolation	ρ_{ins}	400 kg m^{-3}
Wärmekapazität der Isolation	$c_{v,\text{ins}}$	$1000 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit der Isolation	k_{ins}	$2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Initialtemperaturen aller Reaktorkomponenten	-	298.15 K
Temperatur der Gase am Eintritt	T_{IS}	300 K
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient von der Isolation oder vom Fenster an die Umgebung	$h_{\text{ins}}, h_{\text{win}}$	$5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

C.1.2.1.3. Strahlungsaustausch

Zwischen Quarzglasscheibe und Vorderseite des Absorbers

Der Strahlungsaustausch wird über ein spektrales Sichtfaktormodell berechnet. Dabei wird die Strahlung in optische, von der Sonne emittierte Strahlung (Index „opt“) und thermische, innerhalb des Reaktors emittierte Strahlung (index „th“) unterteilt. Im vorderen Bereich des Reaktors zwischen Scheibe und Absorbervorderseite wird optische und thermische Strahlung ausgetauscht. Die Strahlungsbilanz der Quarzglasscheibe und der Absorbervorderseite ist in Abbildung 10 (a) und (b) dargestellt.

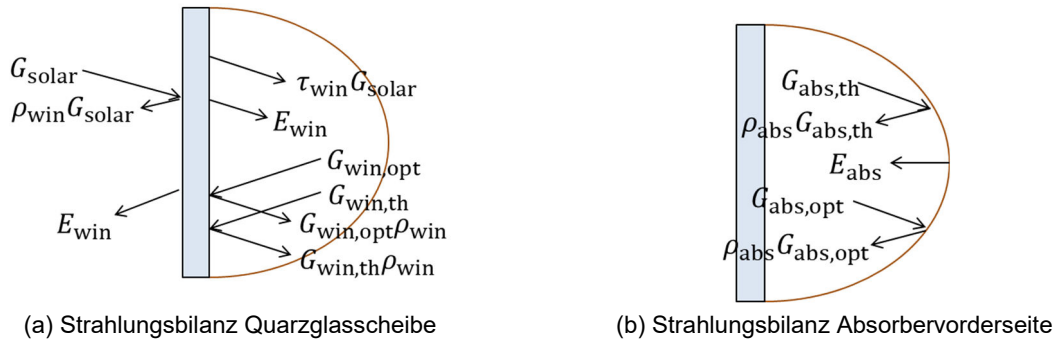


Abbildung 10: Strahlungsaustausch im vorderen Bereich des Reaktors (im Raum zwischen Quarzglasscheibe und Absorber).

Die Bilanzgleichungen des thermischen Teils der Strahlung sind:

$$A_{\text{abs}} G_{\text{abs,th}} = J_{\text{win,th}} A_{\text{win}} \phi_{\text{win} \rightarrow \text{abs}} + J_{\text{abs,th}} A_{\text{abs}} \phi_{\text{abs} \rightarrow \text{abs}} \quad (13)$$

$$A_{\text{win}} G_{\text{win,th}} = J_{\text{abs,th}} A_{\text{abs}} \phi_{\text{abs} \rightarrow \text{win}} \Rightarrow G_{\text{win,th}} = J_{\text{abs,th}} \quad (14)$$

$$J_{\text{abs,th}} = E_{\text{abs}} + \rho_{\text{abs}} G_{\text{abs,th}} \quad (15)$$

$$J_{\text{win,th}} = E_{\text{win}} + \rho_{\text{win}} G_{\text{win,th}} \quad (16)$$

Im optischen Bereich lauten sie:

$$A_{\text{abs}} G_{\text{abs,opt}} = J_{\text{win,opt}} A_{\text{win}} \phi_{\text{win} \rightarrow \text{abs}} + J_{\text{abs,opt}} A_{\text{abs}} \phi_{\text{abs} \rightarrow \text{abs}} \quad (17)$$

$$A_{\text{win}} G_{\text{win,opt}} = J_{\text{abs,opt}} A_{\text{abs}} \phi_{\text{abs} \rightarrow \text{win}} \Rightarrow G_{\text{win,opt}} = J_{\text{abs,opt}} \quad (18)$$

$$J_{\text{win,opt}} = \rho_{\text{win}} G_{\text{win,opt}} + \tau_{\text{win}} G_{\text{solar}} \quad (19)$$

$$J_{\text{abs,opt}} = \rho_{\text{abs}} G_{\text{abs,opt}} \quad (20)$$

Die Sichtfaktoren sind:

$$\phi_{\text{win} \rightarrow \text{abs}} = 1, \quad \phi_{\text{abs} \rightarrow \text{win}} = \frac{A_{\text{win}}}{A_{\text{abs}}}, \quad \phi_{\text{abs} \rightarrow \text{abs}} = 1 - \phi_{\text{abs} \rightarrow \text{win}}$$

Diese Gleichungen wurden wie in der Literatur beschrieben nach der Radiosity J , Einstrahlung G und Emissive Power E gelöst [Incropera], jeweils mit den optischen Eigenschaften für eine bestimmte Wellenlänge.

Um die gesamten Quellterme in den Energiegleichungen durch Strahlung zu erhalten, wurden die spektralen Anteile danach über der Wellenlänge numerisch mit der Trapezregel integriert. Für die Quarzglasscheibe gibt Gleichung (21) entsprechend den Quellterm durch von den Reaktorkomponenten emittierte Strahlung an und Gleichung (22) den Term für die von der Sonne emittierte Strahlung.

$$\dot{Q}_{\text{rad,win,th}} = A_{\text{win}} \int_0^\infty (G_{\text{win,th}} - J_{\text{win,th}} - \tau_{\text{win}} G_{\text{win,th}} - E_{\text{win}}) d\lambda \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{\text{rad,win,opt}} = A_{\text{win}} \int_0^\infty (G_{\text{win,opt}} - J_{\text{win,opt}} - \tau_{\text{win}} G_{\text{win,opt}} + G_{\text{solar}}(1 - \varrho_{\text{win}})) d\lambda \quad (22)$$

Innerhalb des Absorbers

Innerhalb des Absorbers wird die Solarstrahlung volumetrisch entlang der Tiefe des Absorbers absorbiert (Koordinate x). Dies wird durch das Beer-Lambert-Gesetz beschrieben. Der Quellterm q_{solar} für das Volumenelement i mit den Seiten an Position x_w und x_e ist

$$q_{\text{solar},i} = I_0 (\exp(-\beta x_w) - \exp(-\beta x_e)) \quad (23)$$

Die Intensität I_0 an der Vorderseite des Absorbers wird mit dem spektralen Sichtfaktormodell berechnet und ist gegeben durch Gleichung (24).

$$I_0 = \int_0^\infty (G_{\text{abs,opt}} - J_{\text{abs,opt}}) d\lambda \quad (24)$$

Die Emission und Absorption thermischer Strahlung innerhalb des porösen Absorbers wird mit der Rosseland-Approximation modelliert. Ein entsprechender Term wird zur effektiven Wärmeleitfähigkeit des Absorbers bei Raumtemperatur hinzuaddiert, sodass die gesamte Wärmeleitfähigkeit des Absorbers durch Gleichung 25 gegeben ist:

$$k_{\text{s,total}} = k_{\text{s,eff}} + \frac{16}{3} \frac{\sigma}{\beta} T^3 \quad (25)$$

Da die diffuse Strahlung innerhalb des Absorbers schon durch die Rosseland-Approximation berücksichtigt ist, wird für den Strahlungsaustausch mit den anderen Reaktorkomponenten die Oberflächentemperatur des Absorbers benutzt und der Strahlungsfluss wird als Teil der Randbedingung der entsprechenden Flächen der Volumenelemente gesetzt.

Gleichung (26) beschreibt den dadurch entstehenden Quellterm im ersten Volumenelement an der Vorder- und Rückseite des Absorbers, jeweils mit den Werten für G und J für die Vorder- und Rückseite.

$$q_{\text{abs,rad,th}} = \int_0^\infty (G_{\text{abs,th}} - J_{\text{abs,th}}) d\lambda \quad (26)$$

Zwischen Absorberrückseite und Wand 1 des Innenkessels

Die Quellterme durch Strahlung zwischen der Rückseite des Absorbers und der Innenseite von Wand 1 ($\dot{Q}_{\text{rad,w1inside}}$) ergeben sich auf gleiche Art und Weise, vgl. Abbildung 11.

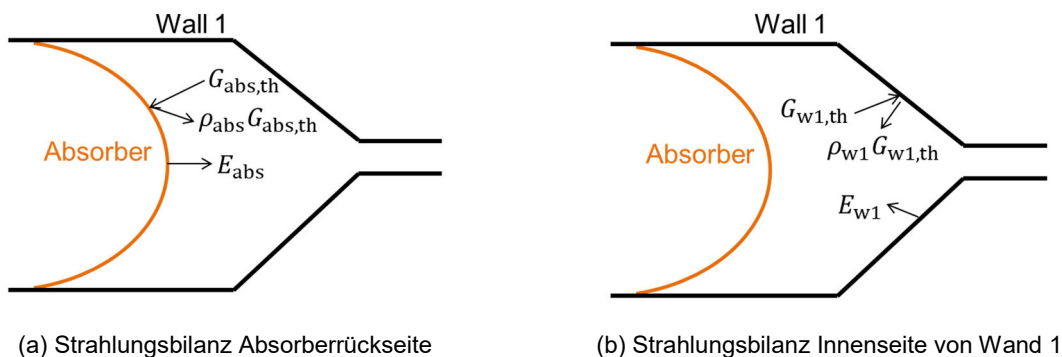


Abbildung 11: Strahlungsaustausch zwischen Absorberrückseite und der Innenseite von Wand 1

Damit ergibt sich für das letzte Volumenelement im Absorber ein entsprechender Quellterm gemäß Gleichung (26) und für die Innenseite der Wand1 der Quellterm in Gleichung (27).

$$\dot{Q}_{\text{rad,w1inside}} = \int_0^\infty A_{w1} (G_{w1,innen} - J_{w1,innen}) d\lambda \quad (27)$$

Zwischen Wand 1 und Wand 2 des Innenkessels

Auf gleiche Weise ergibt sich für den Strahlungsaustausch zwischen den beiden Wänden des Innenkessels:

$$\dot{Q}_{\text{rad,w1outside}} = \int_0^\infty A_{w1} (G_{w1,\text{outside}} - J_{w1,\text{outside}}) d\lambda \quad (28)$$

$$\dot{Q}_{\text{rad,w2}} = \int_0^\infty A_{w2} (G_{w2} - J_{w2}) d\lambda \quad (29)$$

C.1.2.1.4. Chemische Reaktion

Die chemische Reaktion des Ceroxids im Absorber mit der Gasphase wird mit einem Modell gemäß Abbildung 12 beschrieben.

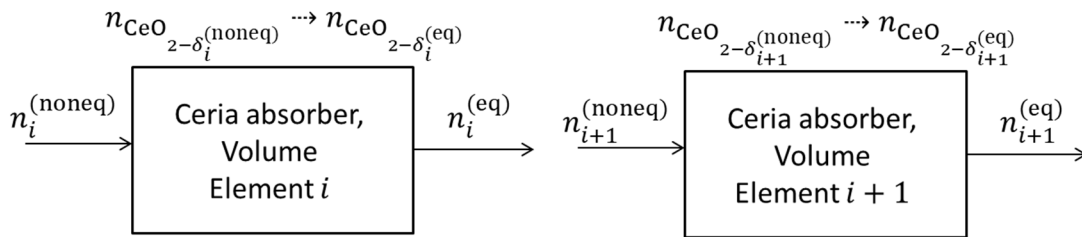


Abbildung 12: Veranschaulichung des chemischen Modells zur Reaktion des Ceroxids mit der Gasphase im Absorber

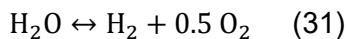
Jedes Volumenelement des Absorbers wird wie ein Batch-Reaktor modelliert, in dem ein Gasgemisch mit dem Ceroxid ins chemische Gleichgewicht gebracht wird. Die Menge der Gasgemischung wird berechnet über den Stoffmengenstrom multipliziert mit dem Zeitschritt:

$$n_{k,i}^{(noneq)} = \dot{n}_{k,i}^{\text{in}} \cdot \Delta t \quad (30)$$

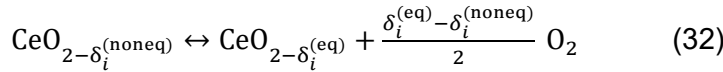
Im Modell bewegt sich diese Gasmenge durch den Absorber und verändert dabei auf ihrem Weg ihre Zusammensetzung und den Reduktionsgrad des Ceroxids.

Anfangs ist eine Gasgemischung mit den Komponenten $n_{k,i}^{(noneq)}$ und eine Ceroxidmenge mit Reduktionsgrad $\delta_i^{(noneq)}$ im Volumenelement i . Im chemischen Gleichgewicht zwischen Gasgemischung und Ceroxid ergibt sich die Zusammensetzung $n_{k,i}^{(eq)}$ der Gasphase und ein Reduktionsgrad des Ceroxids von $\delta_i^{(eq)}$. Die Zusammensetzung der Gasphase $n_{k,i}^{(eq)}$ bildet die nicht ins Gleichgewicht gebrachte, initiale Zusammensetzung der Gasphase $n_{k,i+1}^{(noneq)}$ für das nächste Volumenelement $i + 1$, während der initiale Reduktionsgrad $\delta_{i+1}^{(noneq)}$ aus dem letzten Zeitschritt bekannt ist. In jedem Zeitschritt wird so hintereinander die Zusammensetzung der Gasphase am Austritt jedes Volumenelementes berechnet. Die Zusammensetzung im ersten Volumenelement wird durch den gewählten Eingangsgasstrom bestimmt, die Gleichgewichtszusammensetzung im letzten Volumenelement bestimmt die Zusammensetzung des Gases am Absorber- und damit auch am Reaktorausstritt.

In der Gasphase werden die Komponenten H_2 , H_2O , N_2 und O_2 und die Wasserspaltungsreaktion in Gleichung (31) berücksichtigt, Stickstoff wird als inert angenommen.



Das Ceroxid reagiert mit der Gasphase gemäß Gleichung (32).



Mit der Reaktionslaufzahl ξ_{WS} ergeben sich die Stoffmengen im Gleichgewicht

$$n_{\text{H}_2\text{O}}^{(\text{eq})} = n_{\text{H}_2\text{O}}^{(\text{noneq})} - \xi_{\text{WS}} \quad (33)$$

$$n_{\text{H}_2}^{(\text{eq})} = n_{\text{H}_2}^{(\text{noneq})} + \xi_{\text{WS}} \quad (34)$$

$$n_{\text{O}_2}^{(\text{eq})} = n_{\text{O}_2}^{(\text{noneq})} + 0.5 \xi_{\text{WS}} - 0.5 \left(\delta^{(\text{noneq})} - \delta(T, p_{\text{O}_2}) \right) n_{\text{Ce}} \quad (35)$$

$$n_{\text{ges}}^{(\text{eq})} = n_{\text{H}_2\text{O}}^{(\text{eq})} + n_{\text{H}_2}^{(\text{eq})} + n_{\text{O}_2}^{(\text{eq})} + n_{\text{N}_2}^{(\text{eq})} \quad (36)$$

Über die Gleichgewichtskonstante der Wasserspaltungsreaktion (31)

$$K_{\text{WS}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_{\text{WS}}}{RT}\right) \quad (37)$$

ergibt sich

$$K_{\text{WS}} = \sqrt{\frac{p^{\text{eq}}}{p^0}} \cdot \frac{n_{\text{H}_2}^{\text{eq}} \sqrt{\frac{n_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{eq}} n_{\text{ges}}^{\text{eq}}}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{eq}} \sqrt{\frac{n_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{n_{\text{H}_2}^{\text{eq}} n_{\text{ges}}^{\text{eq}}}}} = \sqrt{\frac{p^{\text{eq}}}{p^0}} \cdot \frac{n_{\text{H}_2}^{\text{eq}} \sqrt{\frac{n_{\text{ges}}^{\text{eq}} p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{p^{\text{eq}}}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{eq}} \sqrt{\frac{n_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{n_{\text{H}_2}^{\text{eq}} n_{\text{ges}}^{\text{eq}}}}} = \sqrt{\frac{p^{\text{eq}}}{p^0}} \cdot \frac{n_{\text{H}_2}^{\text{eq}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{eq}}} \sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{p^{\text{eq}}}} = \frac{n_{\text{H}_2}^{\text{eq}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{eq}}} \sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{p^0}} \quad (38)$$

Nach Einsetzen der Stoffmengen ergibt sich

$$\begin{aligned} K_{\text{WS}} &= \frac{n_{\text{H}_2}^{\text{noneq}} + \xi_{\text{WS}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{noneq}} - \xi_{\text{WS}}} \sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{p^0}} \Leftrightarrow (n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{noneq}} - \xi_{\text{WS}}) K_{\text{WS}} = (n_{\text{H}_2}^{\text{noneq}} + \xi_{\text{WS}}) \sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{p^0}} \\ \Leftrightarrow \xi_{\text{WS}} \left(\sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{p^0}} + K_{\text{WS}} \right) &= n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{noneq}} K_{\text{WS}} - n_{\text{H}_2}^{\text{noneq}} \sqrt{\frac{p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}{p^0}} \\ \Leftrightarrow \xi_{\text{WS}} &= \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{noneq}} K_{\text{WS}} \sqrt{p^0} - n_{\text{H}_2}^{\text{noneq}} \sqrt{p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}}}{\sqrt{p_{\text{O}_2}^{\text{eq}}} + K_{\text{WS}} \sqrt{p^0}} \quad (39) \end{aligned}$$

die Reaktionslaufzahl der Wasserspaltungsreaktion ξ_{WS} als Funktion des Sauerstoffpartialdrucks. Dieser ergibt sich aber auch zu

$$p_{\text{O}_2}^{(\text{eq})} = \frac{n_{\text{O}_2}^{(\text{eq})}}{n_{\text{ges}}^{(\text{eq})}} p^{(\text{eq})} \Leftrightarrow p_{\text{O}_2}^{(\text{eq})} n_{\text{ges}}^{(\text{eq})} = n_{\text{O}_2}^{(\text{eq})} p^{(\text{eq})} \quad (40)$$

Weiterhin ist $n_{\text{ges}}^{(\text{eq})}$ und $n_{\text{O}_2}^{(\text{eq})}$ nach Einsetzen von ξ_{WS} wiederum bei isobaren und isothermen Bedingungen nur eine Funktion von $p_{\text{O}_2}^{(\text{eq})}$, da auch δ nur eine Funktion von $p_{\text{O}_2}^{(\text{eq})}$ ist [Bulfin]:

$$\delta(T, p_{\text{O}_2}) = 0.35 \frac{8700 \cdot p_{\text{O}_2}^{-0.217} \exp\left(-\frac{195.6 \text{ kJ mol}^{-1}}{RT}\right)}{1 + 8700 \cdot p_{\text{O}_2}^{-0.217} \exp\left(-\frac{195.6 \text{ kJ mol}^{-1}}{RT}\right)}, \quad (41)$$

Damit muss zur Lösung des chemischen Gleichgewichts das Nullstellenproblem

$$F(p_{\text{O}_2}) := p_{\text{O}_2}^{(\text{eq})} n_{\text{ges}}^{(\text{eq})} - n_{\text{O}_2}^{(\text{eq})} p^{(\text{eq})} = 0 \quad (42)$$

gelöst werden.

Durch die chemische Reaktion entsteht ein Quellterm in der Energiebilanz des Absorbers in Gleichung (2), der für das Volumenelement i durch Gleichung (43) gegeben ist.

$$q_{\text{chem},i} = -\frac{n_{\text{Ce},i}}{V_{\text{abs},i}} \Delta H_{\text{red}} \dot{\delta}_i \quad (43)$$

Dabei ist $n_{\text{Ce},i}$ die Stoffmenge des Ceroxid im Volumenelement $V_{\text{abs},i}$ und ΔH_{red} die Reduktionsenthalpie. Die Änderungsrate des Reduktionsgrades wird berechnet nach $\dot{\delta}_i = (\delta_{\text{eq},i} - \delta_{1,i})/\Delta t$.

C.1.2.1.5. Numerische Lösung

Die partiellen Differentialgleichungen (2),(3) und (6) werden mit der Finiten Volumen Methode wie in [Patankar] beschrieben diskretisiert. Für den Absorber wird ein äquidistantes Mesh mit 20 Volumenelementen gewählt, während für die Isolation eine wachsende Elementgröße mit 10 Volumenelementen gewählt wird. Alle Ableitungen nach der Zeit werden mit der impliziten Euler-Methode diskretisiert.

Die gekoppelten Gleichungen werden iterativ in jedem Zeitschritt gelöst, bis die relativen Residuen in den Reaktortemperaturen unterhalb von 10^{-4} liegen. Es wird ein Zeitschritt von 2 s verwendet. Im Projekt wurde das Modell so umgeschrieben, dass es die Einflussgrößen $\dot{Q}_{\text{solar}}$ sowie die eintretenden Gasströme zu jedem neuen Zeitschritt neu gesetzt werden können und nur die Variablen aus dem letzten Zeitschritt im Speicher gehalten werden.

Im Modell wird ca. 90% der Rechenzeit für Berechnung des chemischen Gleichgewichts aufgewendet. Das Suchen der Nullstelle der Funktion $F(p_{\text{O}_2})$ in Gleichung (42), die in Abbildung 13 dargestellt ist, ist schwierig. Die Ableitung ist so hoch, dass Fehler durch die Maschinengenauigkeit extrem verstärkt werden und gradientenbasierte Algorithmen (z.B. Newton-Verfahren) die Nullstelle nicht stabil finden konnten.

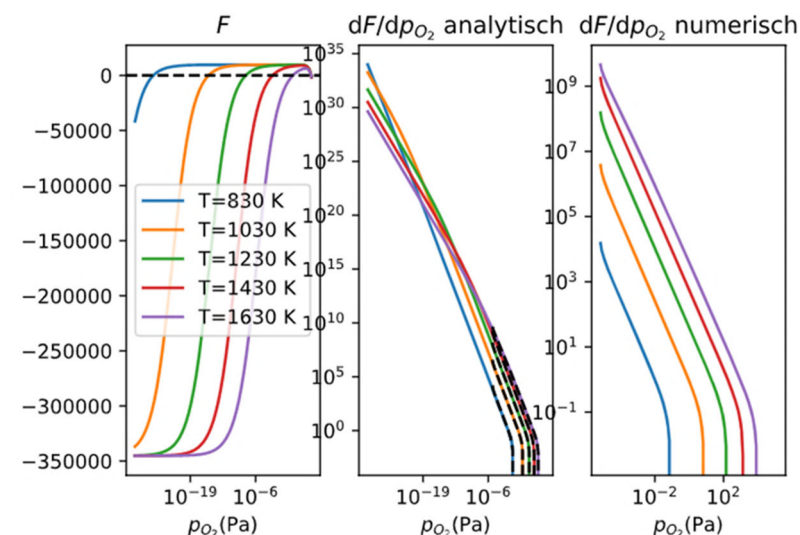


Abbildung 13: Gleichgewichtsfunktion der chemischen Reaktionen und deren analytische und über Newton-Verfahren numerisch berechneten Ableitung nach dem Partialdruck

Da die Funktion aber im physikalisch möglichen Wertebereich ($0 < p_{\text{O}_2} \leq p_{\text{ges}}$) monoton steigend ist, eignen sich die Bisektionsmethode und die Brentq-Methode sehr gut und garantieren das Finden der Nullstelle. Die Brentq-Methode ist die schnellste und braucht auch deutlich weniger Funktionsauswertungen als die gradientenbasierten Algorithmen, wenn diese überhaupt die Nullstelle finden. Daher wurde im Modell die Bisektions- bzw. später die Brentq-Methode verwendet.

C.1.2.2. Validierung des Reaktormodells durch Messdaten aus ASTOR

Aus dem ASTOR-Projekt standen im 2. Halbjahr 2021 Messdaten zur Validierung des Reaktormodells zur Verfügung, die im Rahmen von Versuchen im Sonnensimulator Synlight des DLR in Jülich aufgenommen wurden. Die Daten zweier Teststage wurden zur Validierung ausgewählt. Zum Vergleich wurden die Temperatur des Absorberschaums und die Gasströme herangezogen.

Im Experiment werden Temperaturen in einzelnen Schaumsegmenten gemessen, nicht aber die Temperaturverteilung über die Dicke des Schaumes. In Abbildung 14 sind die einzelnen Segmente des Absorbers dargestellt, in Abbildung 15 die Temperaturmesspunkte innerhalb von Segment IV, die in ähnlichen Positionen auch in den anderen Segmenten zu finden sind. Abbildung 16 zeigt die gemessenen Temperaturen.

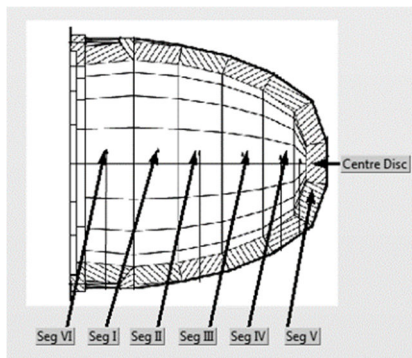


Abbildung 14: Absorbersegmente des Reaktors

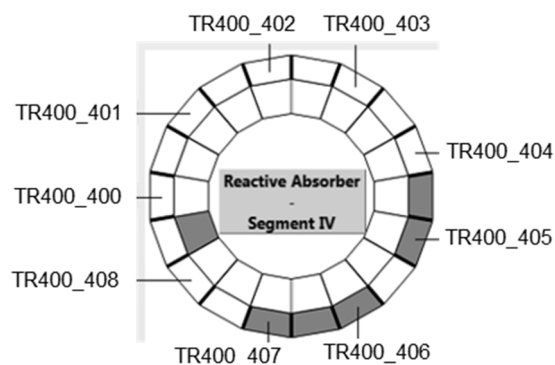


Abbildung 15: Temperaturmesspunkte in Absorbersegment IV

Im detaillierten Reaktormodell wird nur über die Absorberdicke diskretisiert. Es wird davon ausgegangen, dass in den einzelnen Schäumen des Absorbers die gleichen Einstrahlbedingungen und die gleichen Massenströme vorherrschen. Die gemessenen Temperaturen können also nicht direkt mit dem Modell verglichen werden. Stattdessen wurden die in den verschiedenen Schäumen gemessenen Temperaturen gemittelt und zu einer einzigen Absorbertemperatur zusammengefasst. Die Mittelung wurde zunächst in den einzelnen Segmenten durchgeführt, anschließend wurden die mittleren Segmenttemperaturen der Segmente 1-5 zu einer einzigen Absorbertemperatur gemittelt. Dabei wurden offensichtlich defekte Thermolemente nicht berücksichtigt, daher wurde auch Segment 6 in der Mittelung nicht berücksichtigt. Abbildung 17 zeigt die gemittelten Temperaturen innerhalb der Segmente.

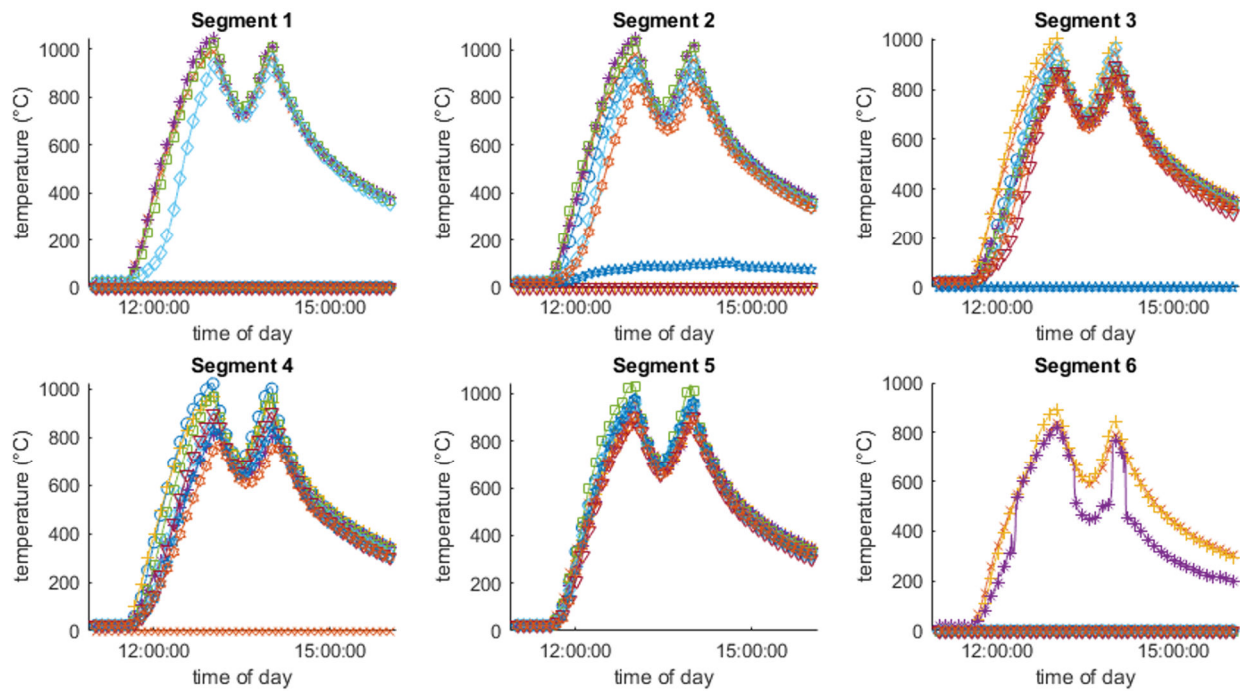


Abbildung 16: Gemessene Temperaturen im Absorberschaum am 6.7.21 (sog. „ASTOR-Test 4“)

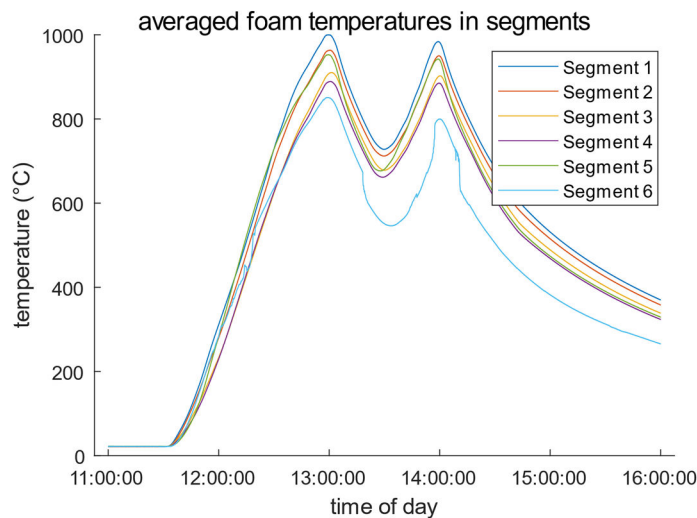


Abbildung 17: Durch Mittelung erhaltene Segmenttemperaturen (ASTOR-Test 4, 6.7.21)

Die Einstellungen wurden im Modell wie im Experiment gewählt, d.h. einen Anteil von Ceroxid an der Absorbermasse von 29,75% sowie die entsprechenden Gasströme am Eingang des Reaktors und die Flussdichte in der Apertur über der Zeit. Die Thermoelemente, die die Temperatur messen, sind auf der Rückseite der Schäume angebracht und etwa 5-10 mm in den Schaum gesteckt. Eine genauere Positionsangabe ist nicht verfügbar, sodass für die Validierung die Modelltemperatur in einer Tiefe von 7,5 mm von der Rückseite des Schaumes ausgewertet wurde.

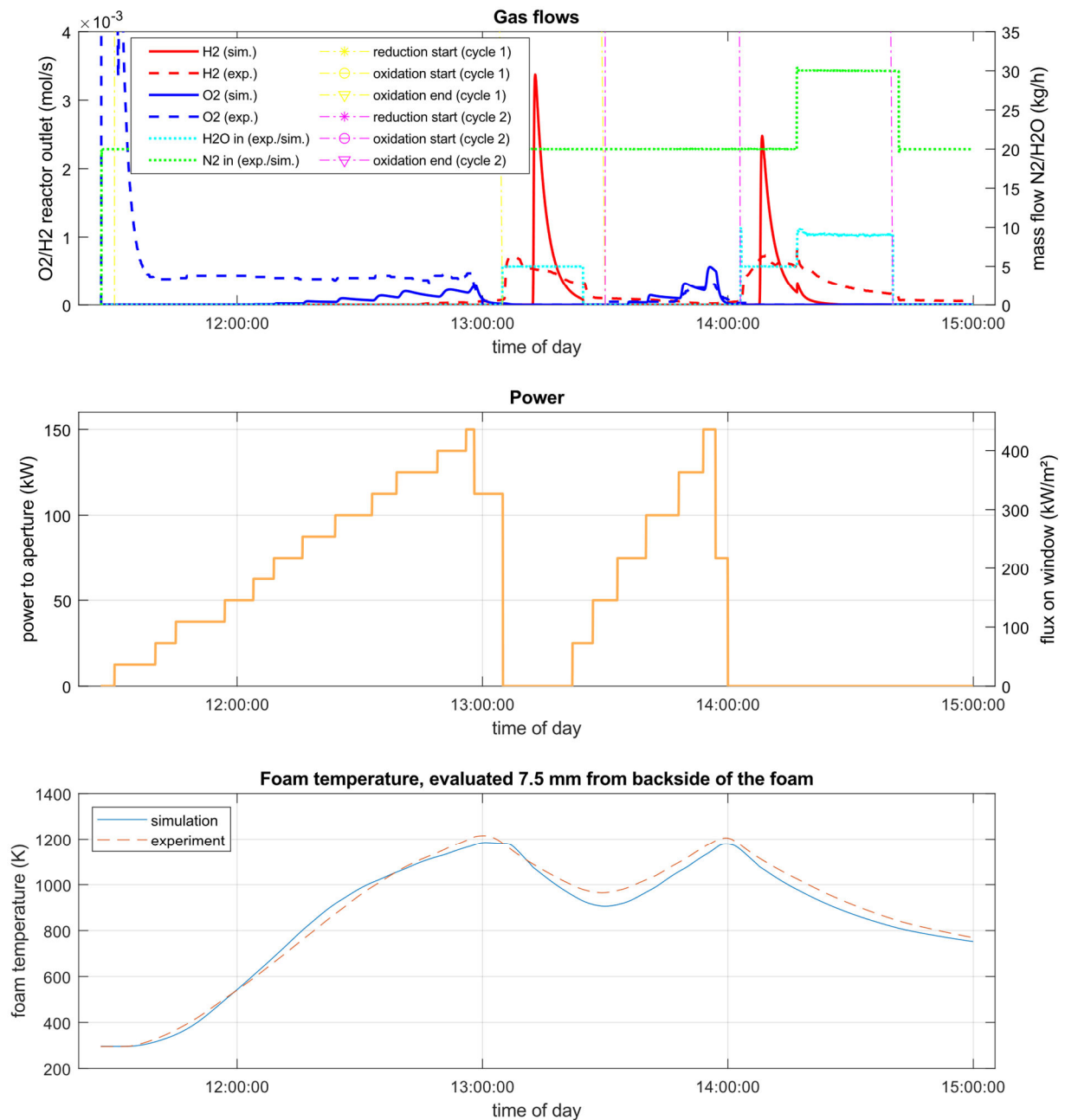


Abbildung 18: Vergleich der Absorbtemperatur sowie der Gasströme aus Experiment und Modell für den Test am 6.7.21 (ASTOR-Test 4)

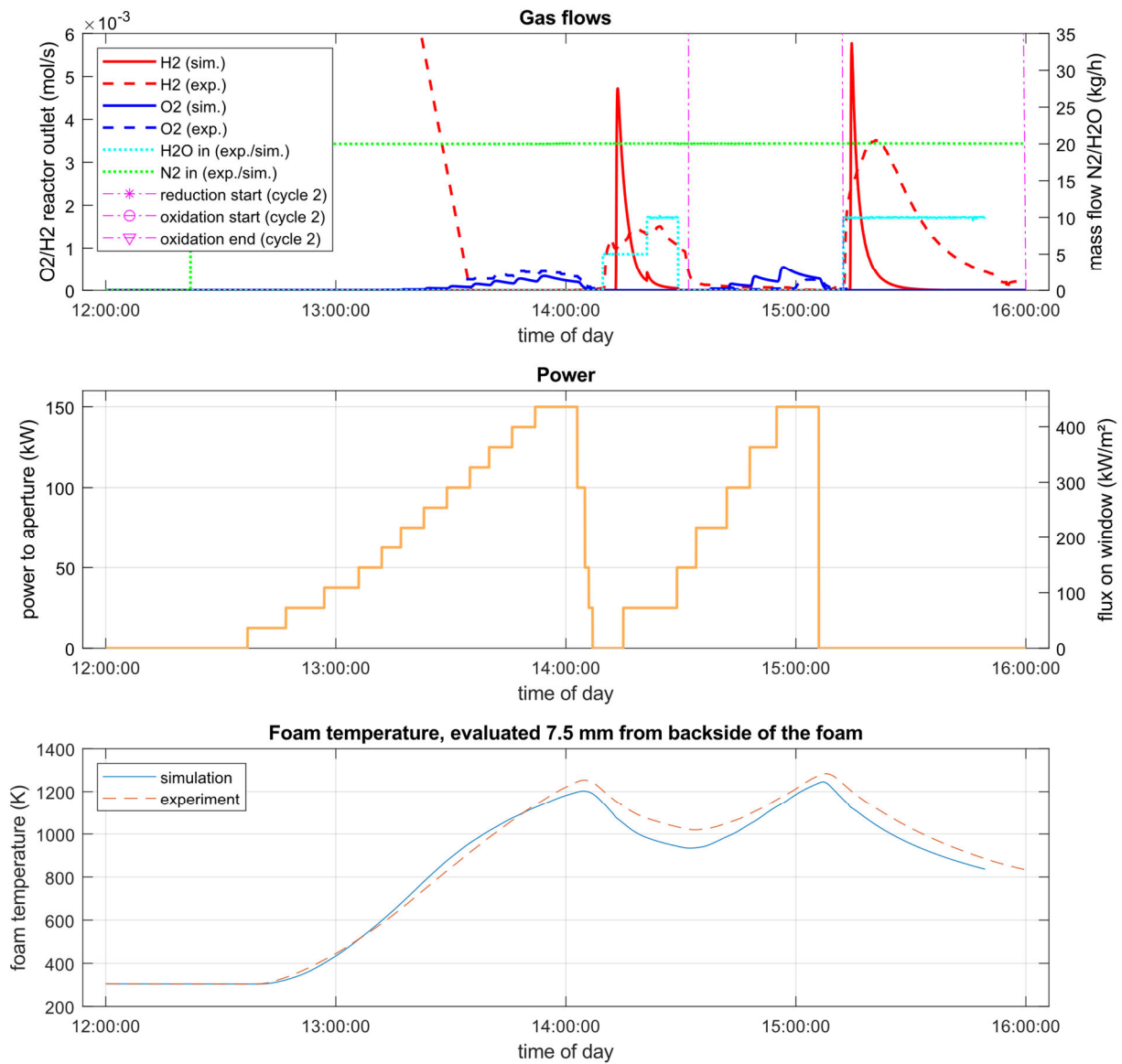


Abbildung 19: Vergleich der Absorbtemperatur sowie der Gasströme aus Experiment und Modell für den Test am 21.7.21 (ASTOR-Test 6). Die Simulation endet hier früher als das Experiment, da im Experiment ab einem gewissen Zeitpunkt kein Eingangsmassenstrom für den Wasserdampf gemessen wurde und so für die Simulation keine Eingangsdaten mehr zur Verfügung standen.

Der Vergleich für die zwei Datensätze in Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigt eine **sehr gute Übereinstimmung der Absorbtemperaturen** aus Modell und Experiment, besonders in Anbetracht der erfolgten Mittelungen und der Unsicherheit der Positionierung der Thermoelemente. Die maximalen, minimalen und durchschnittlichen Abweichungen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Abweichungen in der Absorbtemperatur zwischen Modell und Experiment

	$\max(T_{\text{sim}} - T_{\text{exp}})$	$\min(T_{\text{sim}} - T_{\text{exp}})$	$\frac{ T_{\text{sim}} - T_{\text{exp}} }{T_{\text{exp}}}$
Test 4 (6.7.21)	46 K	-61 K	2,8 %
Test 6 (21.7.21)	47 K	-92 K	4,1 %

Die Gasströme hingegen zeigen sowohl qualitativ als auch quantitativ größere Abweichungen voneinander. Das Wasserstoffsignal ist im Experiment deutlich verschmierter als in der Simulation. Es ist ebenfalls deutlich verschmierter als in Laborexperimenten mit dem gleichen Ceroxidschaum, die im Rahmen des Hydrosol-Projektes durchgeführt wurden (vgl. Abbildung 20). Es ist unklar, wo diese Unterschiede ihren Ursprung haben.

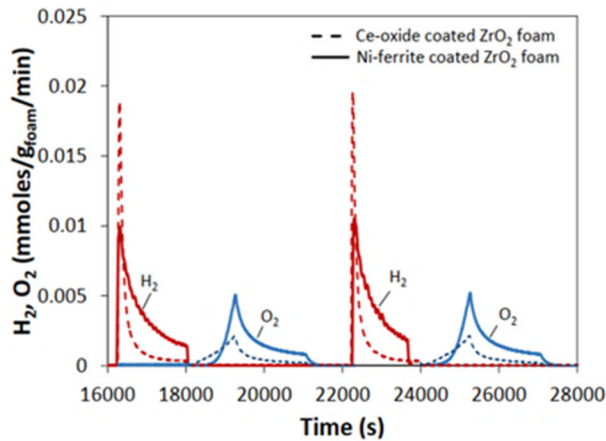


Abbildung 20: Messungen aus dem Projekt Hydrosol-Plant. Die Schäume wurden in einem Rohröfen bei 1400°C reduziert und bei 1100°C mit Wasserdampf (60% H₂O, 40% N₂) oxidiert.

Die Gasmessungen aus dem ASTOR-Projekt sind in sich selbst nicht konsistent, wie Tabelle 4 zeigt. Es wäre zu erwarten, dass das Verhältnis der erzeugten Wasserstoff- zur Sauerstoffmenge in der Nähe von 2 liegt, laut den Messdaten ist es allerdings meist weit entfernt davon.

Tabelle 4: Sauerstoff- und Wasserstoffmengen in Reduktion bzw. Oxidation, sowohl gemessen als auch simuliert

		Experiment	Simulation	rel. Abweichung (Sim.-Exp.)/Exp.	$\left(\frac{n_{\text{H}_2,\text{ox}}}{n_{\text{O}_2,\text{red}}}\right)_{\text{exp}}$
Test 4, 1. Zyklus	O ₂ während Reduktion	3.245 mol	0.355 mol	-89%	0,19
	H ₂ während Oxidation	0.620 mol	0.668 mol	+8%	
Test 4, 2. Zyklus	O ₂ während Reduktion	0.206 mol	0.265 mol	+29%	4,46
	H ₂ während Oxidation	0.917 mol	0.533 mol	-42%	
Test 6, 1. Zyklus	O ₂ während Reduktion	0.671 mol	0.440 mol	-34%	2,13
	H ₂ während Oxidation	1.434 mol	0.827 mol	-42%	
Test 6, 2. Zyklus	O ₂ während Reduktion	0.146 mol	0.429 mol	+193%	29,5
	H ₂ während Oxidation	4.313 mol	0.868 mol	-80%	

Auch der nahezu konstante Sauerstoffstrom während des ersten Aufheizens in Test 4 (Abbildung 18) ist nicht genau zu erklären. Ursprünglich im Reaktor befindlicher Sauerstoff überlagert sich hier möglicherweise mit Sauerstoff, der durch die Reduktionsreaktion entsteht. Die Abweichungen zwischen Modell und Simulation können daher durchaus nicht nur aus Modell- sondern auch aus Messfehlern resultieren.

C.1.2.3. Weitere Arbeiten zur Modellierung des Reaktors

C.1.2.3.1. *Simple Python-Modell*

Im ersten Halbjahr 2021 wurde ein weiteres Modell erstellt, um der RWTH einen einfacheren Einstieg in die Modellreduktion als durch das historisch gewachsene und komplexe MATLAB-Modell zu ermöglichen. Das Modell wird im Folgenden „simples Reaktormodell“ genannt, da starke Vereinfachungen getroffen werden und einige physikalische Effekte nicht enthalten sind. Das Modell diente zur ersten Konzeptionierung der MPR.

Die größte Annahme ist, dass der Absorber aus Ceroxid als eine einzige thermische Masse angesehen wird (Wärmeleitung wird nicht berücksichtigt). Eine Scheibe wird ebenfalls vernachlässigt, es werden außerdem effektive optische Eigenschaften angenommen und es wird nicht spektral gerechnet. Ein Schema des Modells ist in Abbildung 21 gezeigt.

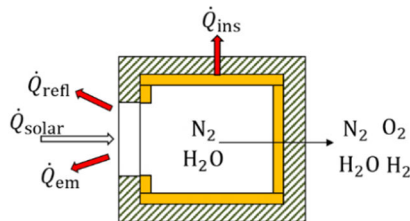


Abbildung 21: Schema des simplen Reaktormodells

Es werden Reflektions-, Emissions- und Isolationsverluste berücksichtigt. Die Energiebilanz des Ceroxidabsorbers ist:

$$m_{\text{abs}} c_{v, \text{abs}} \frac{dT_{\text{abs}}}{dt} = \alpha_{\text{eff}} \dot{Q}_{\text{solar}} - \sigma \varepsilon_{\text{eff}} A_{\text{ap}} T_{\text{abs}}^4 + \dot{Q}_{\text{chem}} - U_{\text{ins}} A_{\text{abs}} (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}}) + \dot{m}_{\text{fl}} c_{p, \text{fl}} (T_{\text{fl, in}} - T_{\text{abs}}) + \alpha_{\text{eff}} \sigma A_{\text{ap}} T_{\text{amb}}^4 \quad (44)$$

Das chemische Modell unterscheidet sich nicht vom MATLAB-Modell, außer dass an einigen Stellen Cython eingesetzt wurde, mit dem sich rechenintensive Teile des Python-Codes als C-Code kompilieren lassen. Dadurch konnte die Geschwindigkeit noch einmal um den Faktor 8 gesteigert werden.

Tabelle 5: Vergleich des simplen Reaktormodells in Python mit dem detaillierten Reaktormodell in MATLAB

	Simple Modell	Detailliertes Modell	Detailliertes Modell (weniger Elemente)
Absorber Modelltyp	Eine thermische Masse	2-Phasen Finite Volumen	2-Phasen Finite Volumen
Simulationsdauer	0.3 s	54 s	14.6 s
Pro Sek. simulierter Zeit	0.15 ms	26.3 ms	7.1 ms
Absorberdiskretisierung	1 Element	20 Elemente	3 Elemente
Spektrale Strahlungsberechnung	nein	ja	ja
Wärmerückgewinnung im Einlasskanal	nein	ja	ja
Programmiersprache	Python	MATLAB	MATLAB
Volumetrische Absorption	nein	ja	ja
Fenster enthalten	nein	ja	ja
Temperaturabhängige Stoffwerte	nein	Für viele Parameter	Für viele Parameter
Erzeugter Wasserstoff	8.2 mol	32.9 mol	36.9 mol

Das simple Reaktormodell ist ca. 180-fach schneller als das detaillierte Reaktormodell mit 20 Diskretisierungselementen im Absorber, vgl. Tabelle 5.

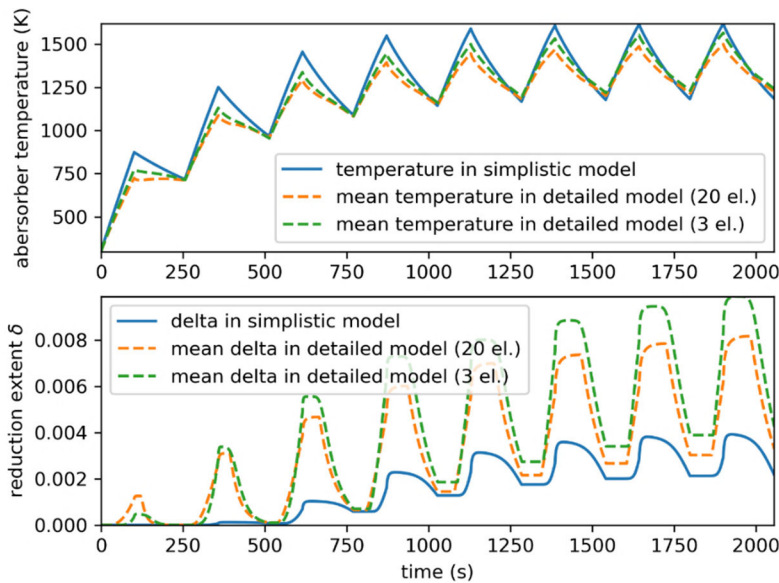


Abbildung 22: Vergleich des simplen Reaktormodells in Python mit dem detaillierten Reaktormodell in MATLAB

Abbildung 22 zeigt den Vergleich zwischen simplem und detailliertem Reaktormodell. Qualitativ ähnelt sich das Verhalten beider Modelle, allerdings gibt es in den Temperaturen Abweichungen von bis zu 250 K für den betrachteten Zyklus. Dementsprechend sind die Abweichungen im Reduktionsgrad sehr deutlich. Dies liegt vor allem an der fehlenden Diskretisierung des Absorbers. Für eine erste Konzepterstellung der MPR und für den Aufbau eines Grundverständnisses in AP1.3 wurde das Modell daher verwendet, allerdings wurde für alle weiteren Arbeiten auf das detailliertere Modell zurückgegriffen.

C.1.2.3.2. Python-Schnittstelle für detailliertes Modell und Wrapper für OpenAI

Es wurde ein Reaktormodell-Wrapper für das OpenAI Gym-Modul in Python geschrieben, mit dem der Reaktor in Python geladen werden kann. Aus physikalischen Betrachtungen wurden Zustandsgrößen identifiziert: die Temperaturen der Komponenten und des Fluids sowie der Reduktionsgrad des Redoxmaterials. Diese Zustandsgrößen werden an Python zurückgegeben. So wurde eine einfache Schnittstelle zum Reaktormodell geschaffen, die es erlaubt, den Reaktor mehrfach einzubinden und messbare Zustandsgrößen abzufragen. Mit der Schnittstelle lassen sich auch KI-Modelle trainieren, seitens des DLR wurde mit einem Reinforcement-Learning-Ansatz zur Optimierung des Betriebs experimentiert, aber nicht weiter verfolgt.

C.1.2.4. Optimierungsstrategie für Heliostaten-Kammer-Zuordnung

In den vorherigen Abschnitten wurde die thermische Modellierung des Reaktors beschrieben. Eine wichtige Größe, die dabei als bekannt vorausgesetzt wurde, ist die Einstrahlungsleistung auf den Reaktoren. Diese Leistung kann zwar in Experimenten gemessen werden, muss aber für die Regelung vorhergesagt werden können. Dies ist nötig, da die MPR die Leistung pro Reaktor als Stellgröße definiert. Das bedeutet, die MPR berechnet voraus, wie viel Leistung pro Reaktor benötigt wird, um die Reduktion oder Oxidation möglichst effizient zu gestalten. Diese Leistung wird dann von einer untergeordneten Steuerung eingestellt, indem die Zielpunkte der Heliostaten verschoben werden. Für die Steuerung muss berechnet werden können, welche Heliostaten wie viel Leistung auf den Reaktor lenken, um die gewünschte Leistung zu erreichen. Diese Steuerung wird im Folgendem als Zielpunktsteuerung bezeichnet.

Die Zielpunktsteuerung regelt die Leistungsverteilung pro Reaktor, indem sie die Ausrichtung der Heliostaten anpasst, um die gewünschte Leistung auf jedem Reaktor zu erzielen. Ein wesentliches Problem bei der Entwicklung dieser Steuerung ist die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Reaktoren. Diese Wechselwirkungen entstehen, weil der Brennfleck eines Heliostaten benachbarte Reaktoren mitbestrahlen kann, was eine unabhängige Regelung erschwert. Zur Einschätzung dieser Kopplungen wurde zunächst eine Simulation durchgeführt.

Basis für die Simulationen ist ein Modell des Heliostatfeldes und Sekundärkonzentratoren sowie der Reaktoren. Das Modell wurde innerhalb des In-House Raytracers STRAL erstellt. Das Modell des Heliostatfeldes besteht dabei aus den aktuell am Solarturm Jülich verfügbaren 1388 Heliostaten (der Rest wird aktuell umgebaut) mit jeweils einer Spiegeloberfläche von ca. 8 m². Die Modellierung der Heliostaten in STRAL ist in Abbildung 23 dargestellt. Als Spiegelfehler wurden in der Modellierung 2,8 mrad angenommen. Dieser Fehler repräsentiert sowohl Spiegel- als auch Nachführungsfehler. Der Wert wurde im Rahmen des Projektes H2Loop ermittelt und hat sich als gute Abschätzung erwiesen. Eine genauere Bestimmung der Fehler könnte mit Hilfe von Deflektometriedaten erfolgen, die jedoch nicht verfügbar waren. In dem Modell werden zudem weitere optische Fehler wie Kosinusverluste, Blocking und Shading, die Luftdämpfung (Absorption der Strahlung auf dem Weg vom Heliostaten zum Receiver), Sun Shapes und Reflektivitätsverluste berücksichtigt. Die Reflektivitäten der Spiegel wurden dabei auf 79% angenommen. Dies ist ein mittlerer aus vergangenen Messungen.

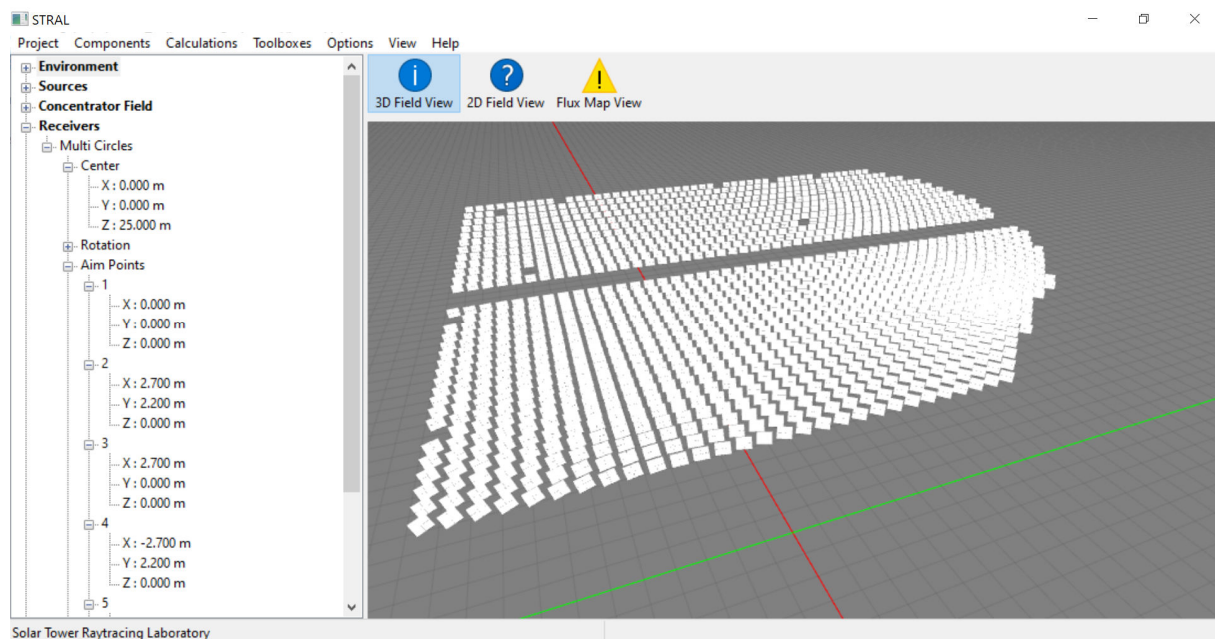


Abbildung 23: Darstellung des Heliostatfeldes in STRAL

Aus dem ASTOR-Projekt ist bekannt, dass ca. 250 kW pro Reaktor mit einem Sekundärkonzentrator von etwa 1,1 m Durchmesser ausreichen. Die Reaktorattrappen sind in einem Rechteck angeordnet, mit Abständen von etwa 5,4 m in der Breite und 2,2 m in der Höhe, vgl. Abbildung 56. Der reale Reaktor befindet sich mittig zwischen den Reaktorattrappen, die Höhe des Reaktors war zum Zeitpunkt der Simulation noch nicht bekannt. Da für die Simulation jedoch die untere linke Reaktorattrappe bestrahlt werden sollte, wurde der Reaktor so positioniert, dass dieser möglichst nah an der Attrappe (jedoch weiterhin mittig) liegt.

Für die Simulation wurde der 21.06.2021 um 12:00 Uhr als Beispielzeitpunkt gewählt. Um die 250 kW Leistung zu erreichen, wurden zufällig Heliostaten ausgewählt, insgesamt 583. Die resultierende Flussdichteverteilung ist in Abbildung 24 dargestellt.

Die Untersuchungen zeigen, dass neben dem bestrahlten Reaktor auch benachbarte Reaktor(attrappen) einer zusätzlichen Einstrahlung ausgesetzt sind. Insbesondere wird die obere linke Reaktorattrappe mit einer Leistung von circa 23 kW bestrahlt, was ungefähr 10% der Gesamtleistung entspricht, die auf die primär fokussierte Attrappe gerichtet ist. Diese partielle Einstrahlung auf umliegende Reaktoren sollte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf den Betrieb des Reaktors haben, selbst während Betriebsphasen wie der Oxidation, bei denen eine minimale Einstrahlung erforderlich ist. Dies bedeutet, dass keine nennenswerte Korrelation zwischen den Reaktoreinheiten in der Auslegung der Steuerung berücksichtigt werden muss. Daher kann diese geringe zusätzliche Einstrahlung in der Strategie der Zielpunktsteuerung vernachlässigt werden und somit wurde keine Korrelation bei der Steuerungsauslegung angenommen.

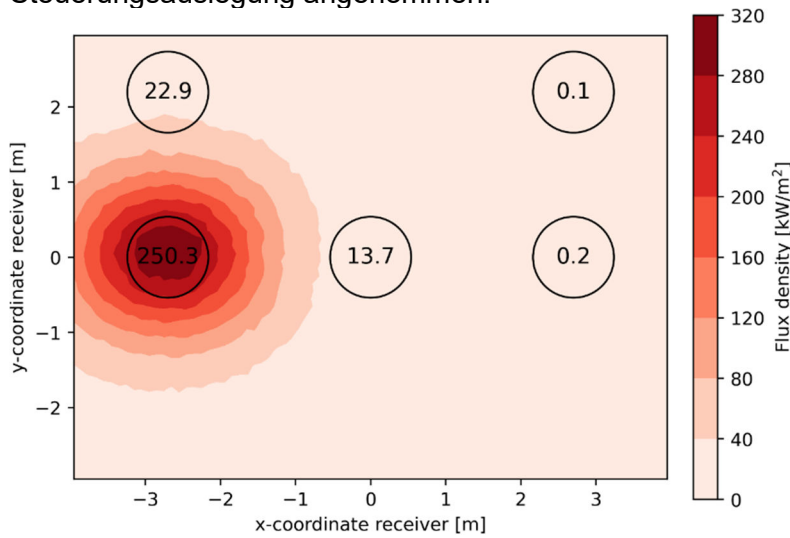


Abbildung 24: Flussdichteverteilung bei Bestrahlung eines Reaktors. Solarturm Jülich. Spiegelfehler 2,8 mrad, 543 zufällig ausgewählte Heliostaten. Die Zahl im Kreis gibt die Leistung in kW für die Fläche an.

Basierend auf den Ergebnissen der Simulationen wurde die Zielpunktsteuerung implementiert. Der zugrunde liegende Algorithmus dieser Steuerung ist in einem Sequenzdiagramm in Abbildung 25 dargestellt. Der Algorithmus nutzt die Raytracing-Software STRAL, um die Leistung jedes Heliostaten für einen Reaktor, einschließlich des Sekundärkonzentrators, auf Basis des aktuellen Sonnenstands und der vorhandenen Wolkendichte zu berechnen. Dabei wird der Reaktor mit einem Durchmesser von 0,65 m und der Sekundärkonzentrator mit einem Durchmesser von 1,08 m modelliert. Da die Leistung durch verschiedene Variablen wie Spiegel- und Nachführfehler beeinflusst wird, die sich nicht präzise quantifizieren lassen, liefert die Software STRAL lediglich eine approximative Berechnung der tatsächlichen Leistung. In diesem Kontext wurde ein angenommener Spiegelfehler von 2,8 mrad berücksichtigt, wie bereits in den Vorsimulationen verwendet.

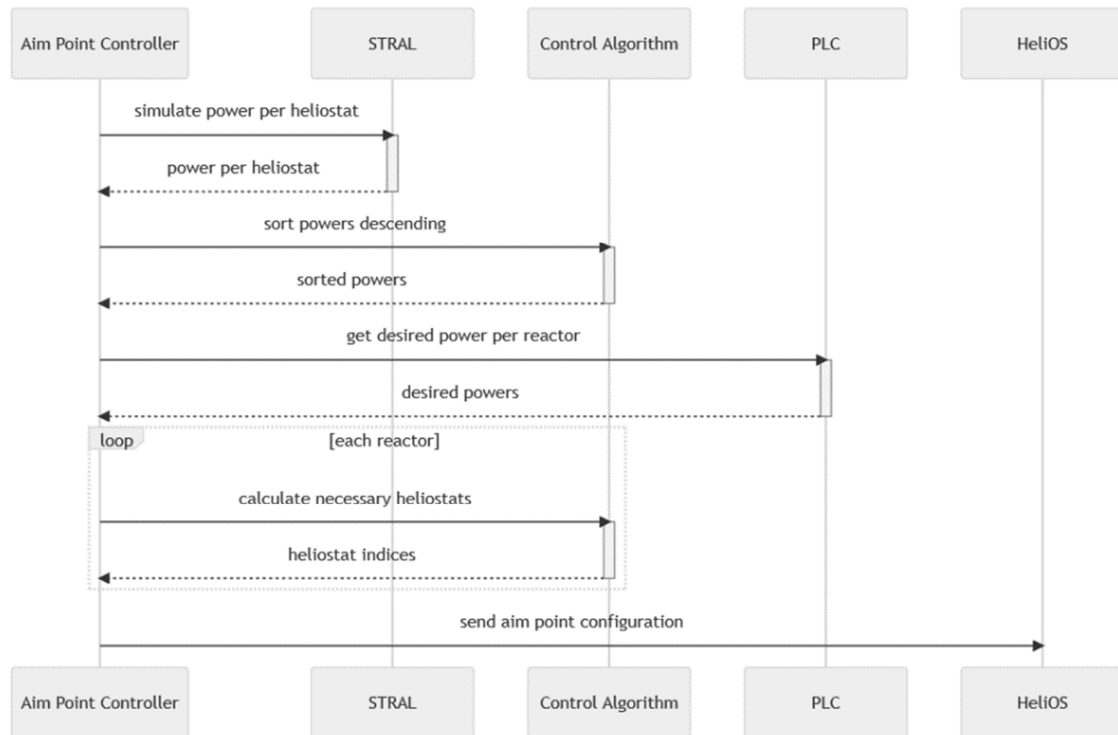


Abbildung 25: Sequenzdiagramm Zielpunktsteuerung

Nach der Berechnung werden die Leistungen der Heliostaten in absteigender Reihenfolge sortiert. Gemäß den von der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) abgefragten Leistungsanforderungen werden zunächst dem Reaktor mit der höchsten geforderten Leistung die leistungsfähigsten Heliostaten zugewiesen, bis die erforderliche Leistung erreicht ist. Dieser Prozess wird anschließend für die Reaktoren mit der zweit- und dritthöchsten geforderten Leistung wiederholt. Wenn nicht genügend Heliostaten vorhanden sind, um alle Reaktoren mit ausreichender Leistung zu bestrahlen, werden die Reaktoren mit der höchsten gewünschten Leistung zuerst bestrahlt. Die Heliostaten mit der höchsten Leistung werden zuerst ausgewählt, da sie in der Regel dem Receiver am nächsten sind und somit den kleinsten Brennfleck haben. Dies hat den wünschenswerten Effekt, dass die umliegenden Reaktoren weniger mitbestrahlt werden und sich damit die Anzahl benötigter Heliostate verringert.

Um die Berechnungszeiten der Leistung pro Heliostat zu optimieren, erfolgt keine Neuberechnung der Flussdichteverteilungen für jeden Sonnenstand. Stattdessen werden vorberechnete Flussdichteverteilungen für jede spezifische Heliostat-Reaktor-Konfiguration verwendet. Diese Verteilungen können entweder für einen bestimmten Tag im Voraus berechnet oder periodisch während des Betriebs aktualisiert werden. Im ersten Fall werden die Flussdichteverteilungen für ausgewählte Sonnenstände berechnet, wobei die Sonnenstände so ausgewählt werden, dass sie maximal 2° Unterschied in Azimut oder Elevation aufweisen. Diese vorberechneten Verteilungen werden dann während des Betriebs für den jeweils nächstliegenden Sonnenstand geladen. In Abbildung 26 sind beispielhaft die 114 Sonnenstände dargestellt, die für den Zeitraum von 9 bis 18 Uhr am 21.06.2023 vorberechnet werden müssten.

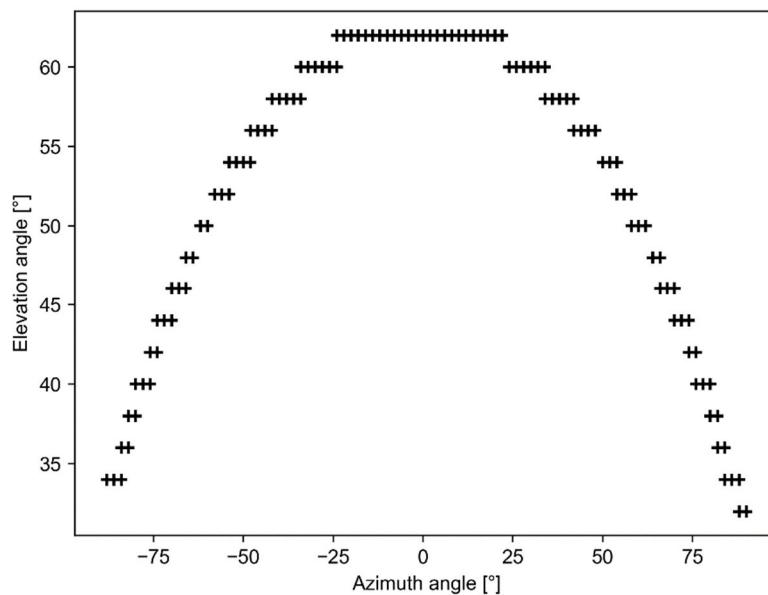


Abbildung 26: Vorberechnete Sonnenwinkel für den 21.06.2023

Die zweite Methode, periodische Neuberechnungen während des Betriebs, sollte aufgrund des hohen Rechenaufwands und der Dauer von bis zu 10 Sekunden pro Berechnung nur bei langen Abtastintervallen eingesetzt werden. Derzeit wird diese Methode angewandt, wobei die Flussdichteverteilungen alle 10 Minuten aktualisiert werden.

Die Wolkenkarten, die von dem in AP3 weiterentwickelten Nowcasting-System zur Vorhersage der Direktnormalstrahlung (DNI) bereitgestellt werden, weisen eine räumliche Auflösung von 20 m x 20 m auf. Diese Karten werden in die Software STRAL geladen, wobei entweder eine spezifische Datei oder ein Verzeichnis angegeben werden kann, in dem die Karten gespeichert sind. Bei Angabe eines Verzeichnisses wird automatisch die jeweils neueste Karte geladen. Die Aktualisierung der Karten erfolgt in 15-Sekunden-Intervallen, entsprechend der Aktualisierungsrate des Nowcasting-Systems (siehe AP3). Aus den Karten wird die DNI extrahiert und auf das Heliostatenfeld projiziert, um für jeden Heliostaten individuelle DNI-Werte zu bestimmen.

Für isolierte Tests im Vorfeld kann die DNI pro Heliostat auch unabhängig vom Nowcasting-System bestimmt werden, indem stattdessen Messungen eines Pyrheliometers auf dem Solarturm genutzt werden.

Die Zielpunktsteuerung ist als eine in C++ entwickelte Toolbox für die Software STRAL 3 implementiert worden.

C.1.2.5. Einbindung von Verschattungen

Der Turm mit dem Hauptreceiver sowie der Multifokusturm werden in C++ modelliert und als .dll in das Programm STRAL eingebunden, um den Einfluss ihrer Verschattung auf die Heliostaten zu berechnen. Der Hauptreceiver wird als Quader modelliert, ergänzt um einen geneigten Receiver, der durch Rechtecke und Dreiecke beschrieben wird. Die Höhe des Turms beträgt 60,16 m, die Breite 9,84 m und die Tiefe 15,11 m. Der Multifokusturm wird ebenfalls als Quader modelliert, mit einer Höhe von 55,51 m sowie einer Breite und Tiefe von je 8,7 m.

C.1.3. Simulation charakteristischer Situationen (AP 1.3)

Ziel des Arbeitspaketes ist es, die charakteristischen Situationen für das Solarturmkraftwerk in Jülich mit fünf Wasserstoffreaktoren zu simulieren. Dieses Arbeitspaket wurde in einer frühen Phase des Projektes bearbeitet und verwendet somit noch Annahmen, die später nicht mehr notwendig waren bzw. zum Teil falsch sind, jedoch keinen Einfluss auf die Interpretation der Ergebnisse haben.

In der Anfangsphase des Projektes genügte es, den Betrieb an einem durchschnittlichen, wolkenfreien Tag zu analysieren, um wesentliche Erkenntnisse zu gewinnen. Auch eine Zeitspanne von einer Stunde erwies sich als ausreichend. Um später jedoch eine möglichst umfassende Betrachtung der Situationen zu ermöglichen, wurde die Möglichkeit der Simulation von Wolken implementiert und auf eine schnelle Rechenzeit für etwaige Jahressimulationen Wert gelegt.

Auf Basis der vorangegangenen Beschreibung müssen folgende Komponenten in der Simulationsumgebung vorhanden sein:

- Ein Reaktormodell
- Ein Modell zur Simulation der Flussdichteverteilung auf dem Reaktor
- Ein Modell das Wolkenkarten generiert

Für die Simulation wurde bereits vorhandene Software im DLR wiederverwendet. Dazu gehören:

- Das simple 1-D Reaktormodell (Python), siehe Abschnitt C.1.2.3.1
- Das Strahlungsverfolgungsprogramm STRAL 3 zur Simulation der Flussdichteverteilung, das über eine Schnittstelle zum Einladen von Wolkendaten verfügt (C++).
- Ein in dem Projekt Dynasalt 2 entwickeltes Programm zur Generierung von Wolkenkarten (MATLAB).

Die unterschiedlichen Programme wurden in einer Simulationsumgebung in Python miteinander gekoppelt, wie in Abbildung 27 veranschaulicht.

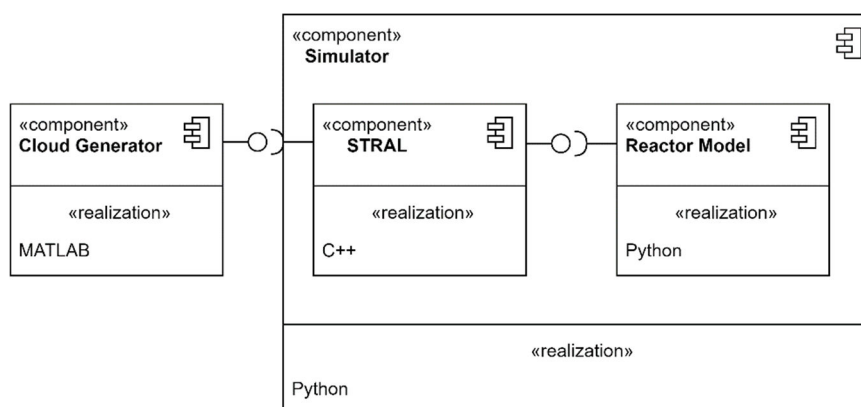


Abbildung 27: Komponentenmodell der Simulationsumgebung.

Als Wolkendaten stehen reale Wolkenkarten zur Verfügung, die am Standort Almería oder in Jülich aufgenommen wurden. Die Wolkendaten sind als .mat-Dateien vorhanden. Jede .mat-Datei enthält eine Matrix, die die DNI Werte für einen bestimmten Ort angibt. Die Abtastzeit liegt zwischen 15-30 Sekunden.

Die Abtastzeit von 15-30 Sekunden beschränkt die Simulation, falls geringere Abtastzeiten gewünscht sind. Um geringere Abtastzeiten zu ermöglichen, können entweder die realen

Wolkendaten interpoliert oder mit dem Programm aus Dynasalt 2 neue Wolkendaten generiert werden. Dafür wurde das Programm in Dynasalt so angepasst, dass es Wolkendaten im gleichen Format wie die bereits vorhandenen Daten generieren kann. Nachteil bei den generierten Wolkendaten ist, dass sie nur zwischen komplett verschattet und unverschattet unterscheiden. Eine Teildurchlässigkeit der Wolken wird nicht berücksichtigt.

Nachdem die Wolkendaten generiert wurden, können sie für die Simulation verwendet werden. Beim Start der Simulation wird an die WOBAS Schnittstelle in STRAL der Befehl gegeben, die Wolkenkarten einzuladen. Der Ursprung des Koordinatensystems wird mit dem Ursprung des Receivers gleichgesetzt. Anschließend wird jedem Heliostaten ein DNI-Wert der Wolkenkarte zugeordnet.

Nach der Zuordnung der DNI-Werte kann die Flussdichteverteilung berechnet werden. Dafür wurde die Python Schnittstelle in STRAL erweitert. In STRAL wird ein rechteckiger Receiver simuliert auf dem die Flussdichte auf Basis einer eingeladenen Zielpunktconfiguration simuliert wird. Die Zielpunktconfiguration wird von der Simulationsumgebung gesetzt. Die simulierte Flussdichteverteilung wird über eine TCP/IP Schnittstelle an die Simulationsumgebung in Python gesendet. Dort wird die Flussdichte auf Basis der Reaktorgröße und Position ausgewertet und eine gemittelte Flussdichte für jeden Reaktor berechnet. Mit der gemittelten Flussdichte für jeden Reaktor kann anschließend das Multireaktormodell simuliert werden.

Die Simulation ist mit dieser Konfiguration sehr langsam (ca. 40 min für 3600 Simulationsschritte), da die Berechnung der Flussdichteverteilung sehr rechenintensiv ist. Um die Berechnung zu beschleunigen, werden deshalb die Flussdichteverteilungen vorberechnet. Bei der Vorberechnung werden für jede Kombination von Zielpunkt und Heliostat (oder Gruppe von Heliostaten) eine Flussdichteverteilung auf dem Receiver berechnet. Die Verschattung und Blockierung von Strahlen wird hierbei jedoch etwas verfälscht, da die Neigung der Heliostaten von der Zielpunktverteilung abhängig ist, die zum Zeitpunkt der Berechnung noch nicht feststeht. Sind die Flussdichteverteilungen vorberechnet, können die einzelnen Verteilungen während der Simulation überlagert werden. Dies beschleunigt die Rechenzeit ungefähr um den Faktor 50.

Die vorberechneten Flussdichteverteilungen gelten nur für einen spezifischen Zeitpunkt bzw. Sonnenstand. Um die Bewegung der Sonne zu berücksichtigen, müssen für unterschiedliche Zeitpunkte neue Flussdichteverteilungen vorberechnet werden. Dafür wurde ein bereits implementiertes Tool in STRAL wiederverwendet und erweitert. Dieses berechnet die Flussdichteverteilungen für einen Tag vor. Dabei wird eine neue Verteilung berechnet, sobald sich der Azimut- oder Elevationswinkel der Sonne um mehr als 1° ändert (etwa alle 5 min). Untersuchungen haben ergeben, dass bei dieser Winkeländerung keine signifikante Veränderung in der Flussdichteverteilung auftritt. Wie in Abbildung 28 zu erkennen, bleibt die Wurzel des quadratischen Fehlers bei unter 1% für Messpunkte, die mindestens 80 % der maximalen Einstrahlung aufweisen.

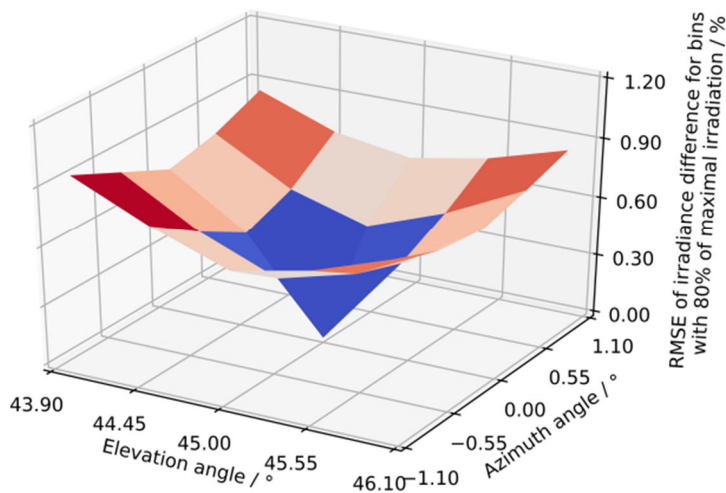


Abbildung 28: Änderung der Flussdichte mit dem Sonnenstand.

Weiterhin wurde die Simulationsdauer verringert, indem das Python-Modell des Reaktors mit der Implementierung von einzelnen Funktionen in Cython (C in Python Code) beschleunigt wurde.

Mit den genannten Optimierungen lässt sich eine Stunde am Kraftwerk in Jülich (500 Gruppen von Heliostaten) in 46 s simulieren (Intel Core i7-10850H CPU @ 2.70 GHz). Das heißt ein Tag mit 12 Stunden kann in ca. 9 min simuliert werden. Für das Simulationsmodell gelten dabei folgende Annahmen und Beschränkungen:

- Die Reaktordynamik wird durch das simple Reaktormodell ausreichend beschrieben (was nur eingeschränkt zutrifft, s. Abschnitt C.1.2.3.1).
- Die Reaktoren sind nicht geneigt, sondern befinden sich auf einer Ebene¹.
- Die Flussdichte ändert sich nicht signifikant bei einer Änderung des Sonnenstands in Azimuth- und Elevationsrichtung um 1°.
- Die Bestrahlung innerhalb des Reaktors wird nicht nachverfolgt.
- Die Flussdichteverteilung auf dem Reaktor ist homogen.

Mit Hilfe der Simulationsumgebung können erste Einschätzungen über den Betrieb der Reaktoren in Jülich getroffen werden. Auf Grund der noch fehlenden Deflektometriedaten wurden die Werte für Spiegelfehler etc. auf Basis von Erfahrungswerten geschätzt. Folgende Parameter wurden festgelegt:

- Turmhöhe: 25 m (Höhe der Forschungsebene)
- Heliostaten: 2153
- Spiegelfläche: 8 m²
- Trackingfehler: 1,5 mrad
- Spiegelfehler: 1 mrad
- Reflektivität: 0,92
- Exakte Cantinglänge
- Fläche Facetten (Fokallänge gegen unendlich)
- Sun shape: CSR 5

¹ Dies galt auch später für den realen Reaktor im Projekt ASTOR-ST, ist aber nicht optimal. Bestenfalls sollte der Reaktor zum Feld geneigt sein

Mit diesen Parametern ergibt sich eine maximale Flussdichte von 2 MW/m^2 auf dem Receiver. Die Parameter für die Heliostaten und deren betriebsbereite Anzahl sind dabei optimistisch abgeschätzt, sodass diese Flussdichte als eine obere Grenze anzusehen ist.

In der Anfangsphase des Projektes ergab eine Analyse der Konstruktionsdaten der Forschungsebene eine erste Abschätzung zur Platzierung des Reaktors und der Reaktorattrappen. Auf dieser Basis konnte eine erste Abschätzung der Leistungsverteilung auf den Reaktoren gegeben werden. Werden alle Heliostaten auf den zentralen/realen Reaktor fokussiert, ergibt sich die Flussdichteverteilung in Abbildung 29.

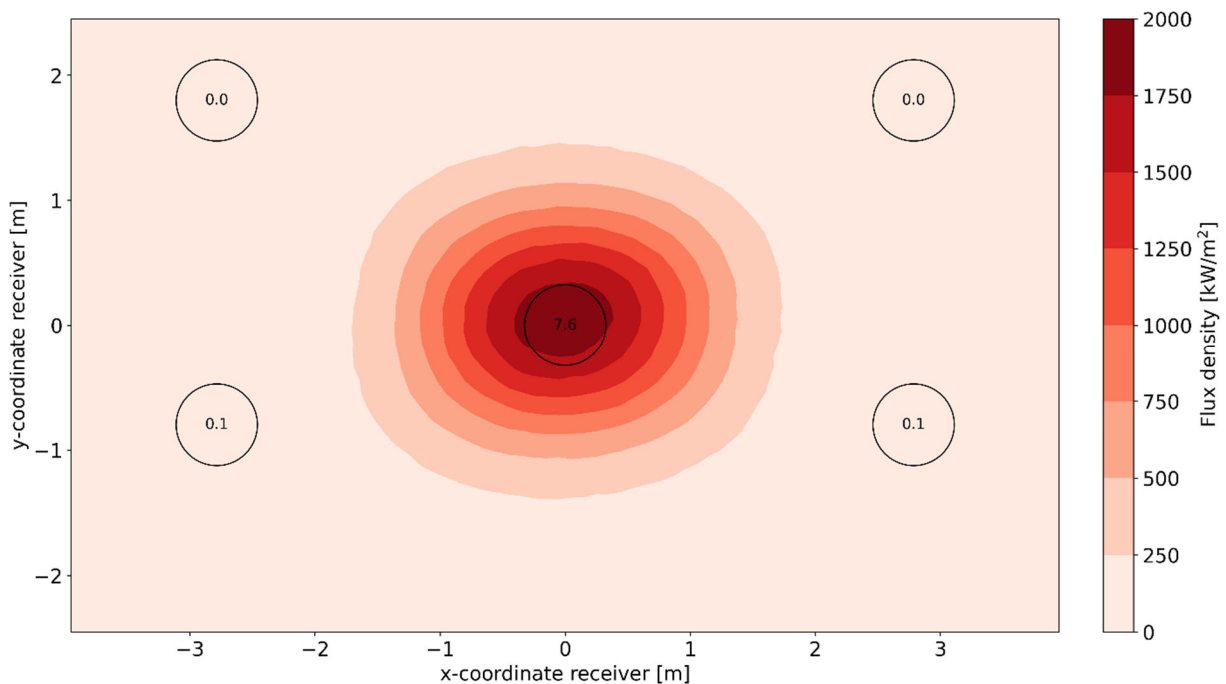


Abbildung 29: Optimistische Flussdichteverteilung am Solarturm in Jülich. (Die Zahlen geben den Interceptfaktor in % für den jeweiligen Reaktor an.)

7.7% der Strahlung treffen auf den zentralen Reaktor. Die umliegenden Reaktorattrappen werden kaum beeinflusst. Es treten somit kaum Kopplungen zwischen den einzelnen Reaktoren auf. Um dies zu verdeutlichen, wurden für eine Stunde am Kraftwerk die Temperatur und der Reduktionsgrad für die Reaktoren bei der gegebenen Flussdichteverteilung mit dem einfachen Python-Modell der Reaktoren simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 30 dargestellt. Die umliegenden Reaktoren werden nicht reduziert und der Temperaturanstieg ist verhältnismäßig gering.

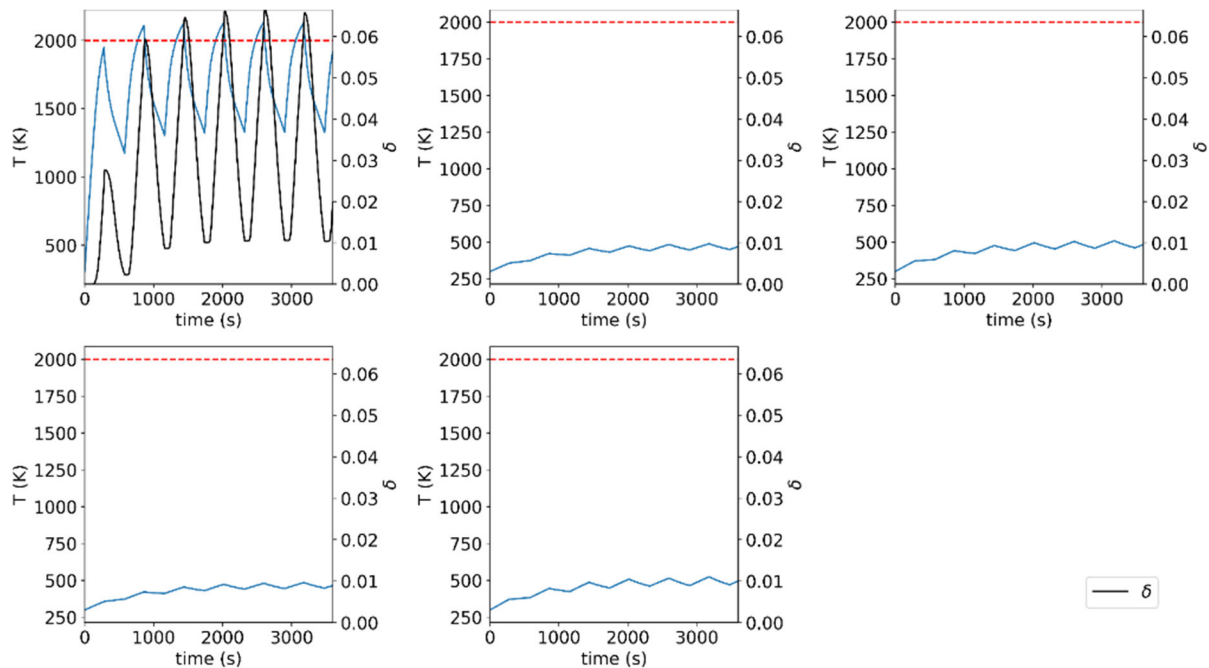


Abbildung 30: Temperatur (blau) und Reduktionsgrad (schwarz) der Reaktoren über eine Stunde. Zentraler Reaktor oben links.

Kopplungsfreie Reaktoren bedeuten eine starke Vereinfachung für den Regelungsalgorithmus, sind jedoch eine Vereinfachung, die womöglich auf eine kommerzielle Anlage nicht zutreffen würde, da dort versucht werden würde, die Reaktoren möglichst nah zueinander zu platzieren, um Spillage möglichst zu vermeiden. Neueste kommerzielle Entwicklungen von Heliostatfeldern speziell für solarchemische Anlagen deuten jedoch darauf hin, dass auch dann die Spillage durch sehr hohe Konzentrationsfaktoren gering gehalten werden kann, sodass in der neu entwickelten DAWN-Anlage der Firma Synhelion sogar auf einen Sekundärkonzentrator verzichtet wurde [Synh2024].

Weiterhin ist erkennbar, dass mit dieser Konfiguration nicht gleichzeitig mehrere Reaktoren bei hoher Leistung betrieben werden können. Ohne Sekundärkonzentrator werden ca. 1300 Heliostaten (ca. 60% des Heliostatfeldes) benötigt, um einen Reaktor mit einer Flussdichte von $1,5 \text{ MW/m}^2$ zu betreiben. Ein Sekundärkonzentrator ist somit nötig, um mehrere Reaktoren zu betreiben. Es ist dabei festzuhalten, dass das Heliostatfeld und die Reaktorzahl sowie -anordnung nicht repräsentativ für eine kommerzielle Anlage sind. Für eine kommerzielle Anlage sollten die Heliostaten besser fokussieren und zielen. Zudem sollten Reaktorcluster mit Sekundärkonzentratoren verwendet werden. Dies wurde zum Beispiel in dem Projekt H2Loop simuliert. Hier ergibt sich ein Interceptfaktor von ca. 78%.

Dieses Arbeitspaket hat in der Anfangsphase die wichtige Erkenntnis geliefert, dass die Reaktoren am Solarturm Jülich nicht ohne Sekundärkonzentrator sinnvoll betrieben werden können. Zusätzlich wurde hier auch die niedrige Korrelation zwischen der Bestrahlung eines Reaktors und der Mitbestrahlung anderer Reaktoren herausgestellt. Dieses Thema wurde jedoch auch noch einmal genauer in Abschnitt C.1.2.4 im Zusammenhang mit der Auslegung der Zielpunktsteuerung behandelt.

C.1.4. Zusammenfassung und Fazit zu Arbeitspaket 1

In Arbeitspaket 1.1 wurden zu Beginn Dynamiken des Heliostatfeldes, des Wolkendurchzugs und des Reaktors vom DLR abgeschätzt und in einem bilateralen Meeting am 22.10.20 mit der RWTH besprochen; entsprechende Folien wurden auch den anderen Partnern zur

Verfügung gestellt. Damit wurde MS1 erreicht und AP1.1 abgeschlossen, eine Zusammenfassung der Dynamiken findet sich in Tabelle 1.

In Arbeitspaket 1.2 wurde ein existierendes MATLAB-Modell des Reaktors aus dem Projekt H2Loop so angepasst, dass die Einstrahlung sowie die eintretenden Gasströme zu jedem Zeitschritt neu gesetzt werden können und nur die Variablen aus dem letzten Zeitschritt im Speicher gehalten werden. So kann es inkrementell ausgeführt werden, was für die Regelung benötigt wird. Außerdem wurde die Lösung der chemischen Reaktion verbessert, die einen Großteil der Rechenzeit ausmacht. Bei der Suche nach dem chemischen Gleichgewicht musste ein Nullstellenproblem gelöst werden, das bisher mit einem gradientenbasierten Ansatz gelöst wurde. Mit den nun flexibleren Eingangsgrößen erwies dieser Ansatz sich als nicht robust genug und es dauerte entweder sehr lange, bis eine Lösung gefunden wurde oder es konnte in manchen Fällen gar keine Lösung gefunden werden, was nicht akzeptabel ist. Mit nicht-gradientbasierten Ansätzen wie der Bisektions- oder Brentq-Methode konnte das Nullstellenproblem jedoch zuverlässig und dazu noch deutlich schneller gelöst werden. Dieses im Projekt gewonnene Erkenntnis erwies sich innerhalb des DLR auch für weitere Reaktormodelle als sehr hilfreich. Das detaillierte Modell wurde nach Unterzeichnung des Kooperationsvertrages am 20.1.2021 vom DLR als GitLab-Repository mit den Partnern geteilt.

Das Modell wurde mit Messdaten aus dem ASTOR-Projekt validiert, dabei hatte es sehr gute Übereinstimmung in den Temperaturen (mittlere Abweichung 3-4%), allerdings größere Abweichungen in den Gasströmen von -89% bis +193%, auch qualitativ ergab sich ein anderes Bild als im Experiment, in dem die Verläufe deutlich verschmierter waren. Da die experimentellen Ergebnisse aus dem ASTOR-Projekt bei den Gasströmen aber selbst nicht konsistent waren und Laborergebnisse aus dem HYDROSOL-Projekt qualitativ mit dem hier erstellten Modell übereinstimmen, wird davon ausgegangen, dass die Abweichungen in den Gasströmen zu einem großen Teil durch experimentelle Unsicherheiten und Fehler und nicht unbedingt vom Modell hervorgerufen wurden. Die Ergebnisse der Validierung und die entsprechenden experimentellen Daten wurden am 17.1.2022 vom DLR auf GitLab mit den Partnern geteilt, eine Auswertung mit einem weiteren experimentellen Durchlauf am 19.5.2022.

Zu Beginn des Projektes wurde außerdem ein vereinfachtes Reaktormodell in Python erstellt, das einen einfachen Einstieg für die Projektpartner ermöglichte und zur ersten Konzeptionierung benutzt wurde. Es ist 1-2 Größenordnungen schneller als das detaillierte Modell, allerdings vor allem durch die fehlende Diskretisierung des Absorbers deutlich ungenauer. Es wurde ebenfalls eine Python-Schnittstelle für das detaillierte Modell geschaffen.

Die thermische Modellierung des Reaktors erfordert eine Vorhersage der Einstrahlungsleistung. Diese Vorhersage ist entscheidend für die Regelung, da die Leistung pro Reaktor als Stellgröße definiert ist. Die Zielpunktsteuerung passt die Ausrichtung der Heliostaten an, um die gewünschte Leistung auf den Reaktoren zu erzielen, wobei Wechselwirkungen zwischen den Reaktoren berücksichtigt werden müssen. Die Simulationen zeigten, dass benachbarte Reaktoren geringfügig mitbestrahlt werden, was jedoch vernachlässigbar ist. Das Heliostatfeld wurde im Raytracer STRAL modelliert. Der Steuerungsalgorithmus verwendet vorberechnete Flussdichteverteilungen und aktuelle Wetterdaten, um die optimale Leistungseinstellung zu gewährleisten. Die Zielpunktsteuerung, implementiert in C++, sorgt so für eine effiziente Leistungsregulierung der Reaktoren.

In Arbeitspaket AP 1.3 wurden charakteristische Situationen für das Solarturmkraftwerk in Jülich mit fünf Wasserstoffreaktoren simuliert. Dafür wurde zunächst der Betrieb an einem durchschnittlichen, wolkenfreien Tag analysiert. Später wurden Simulationen unter Einbeziehung von Wolken implementiert, um umfassendere Szenarien zu berücksichtigen (siehe C.6.2). Die Simulation nutzt ein einfaches 1-D Reaktormodell, das

Strahlungsverfolgungsprogramm STRAL 3 und ein Programm zur Generierung von Wolkenkarten. Die verschiedenen Programme sind in einer Python-basierten Simulationsumgebung gekoppelt. Ergebnisse zeigten, dass ohne Sekundärkonzentrator eine effiziente Bestrahlung der Reaktoren am Solarturm Jülich nicht möglich ist. Zudem werden bei der Bestrahlung eines Reaktors umliegende Reaktoren nicht signifikant mitbestrahlt.

C.2. Arbeitspaket 2: Entwicklung eines Regelungskonzeptes (RWTH, DLR, S&V)

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, eine modellbasierte Mehrgrößenregelung für den thermochemischen Prozess in einem aus 5 Reaktoren bestehenden Solarreceiver zur Wasserstoffproduktion zu entwickeln, um es in einem Testbetrieb in AP6 zu demonstrieren. Die Regelung hat die Aufgabe, die verfügbare Solarenergie auf dem Feld optimal zu nutzen und auf den Reaktoren zu verteilen, um eine quasikontinuierliche Wasserstoffproduktion sicherzustellen und diese zu maximieren. Gleichzeitig soll ein sicherer Betrieb durch das Einhalten der Prozessgrenzen garantiert werden, um die Anlage vor Materialschäden zu schützen. Dazu gehört eine Begrenzung

- der Temperatur auf 1400 °C
- und der Aufheizrate auf 80 °C/min

in den jeweiligen Reaktoren. Als Regelungskonzept soll eine Modellprädiktive Regelung (MPR) entwickelt werden, die durch ihren proaktiv eingreifenden Charakter die Grenzen explizit berücksichtigen und Strahlungsvorhersagen nutzen kann. Wie Abbildung 31 zeigt, werden die Strahlungsvorhersagen gemeinsam von Wolkenkamarasystem WoBaS und der Raytracing-Software STRAL geliefert.

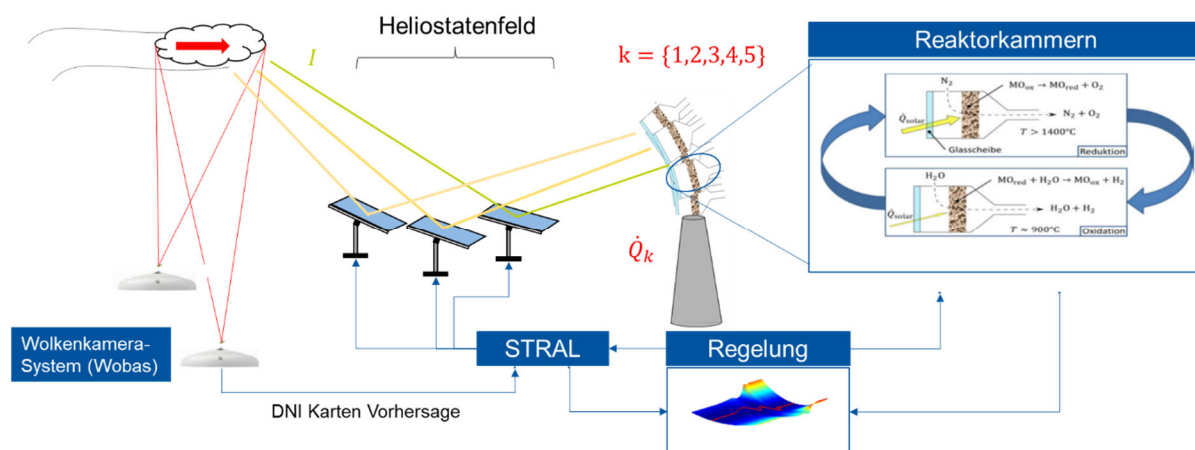


Abbildung 31 Übersicht der Systeme auf der Solarturmanlage

Mit den von WoBaS geschätzten Karten der Direktnormalstrahlung (DNI) auf dem Feld, rechnet STRAL diese in nutzbare Leistung auf den Reaktoren um. Neben der aktuellen Messung erhält die Regelung auch eine Vorhersage für die nächsten 20 Minuten.

Der zweistufige Zyklus zur Wasserstoffherzeugung wurde in AP1 bereits im Detail beschrieben. Mit Abbildung 32 soll hier der Bestrahlungsablauf nochmal in Erinnerung gerufen werden, da dieser für die Regelungsaufgabe entscheidend ist:

- In der **Reduktionsphase** soll der Reaktor bestrahlt und auf eine maximale Temperatur von 1400 °C aufgeheizt werden, um Sauerstoffleerstellen zu erzeugen.
- In der **Oxidationsphase** kühlt der Reaktor ab, sodass eine Bestrahlung zu vermeiden ist. Unterhalb einer Temperatur von ca. 900 °C werden die Wassermoleküle des eingelassenen Wasserdampfes gespalten und die Sauerstoffleerstellen gefüllt.

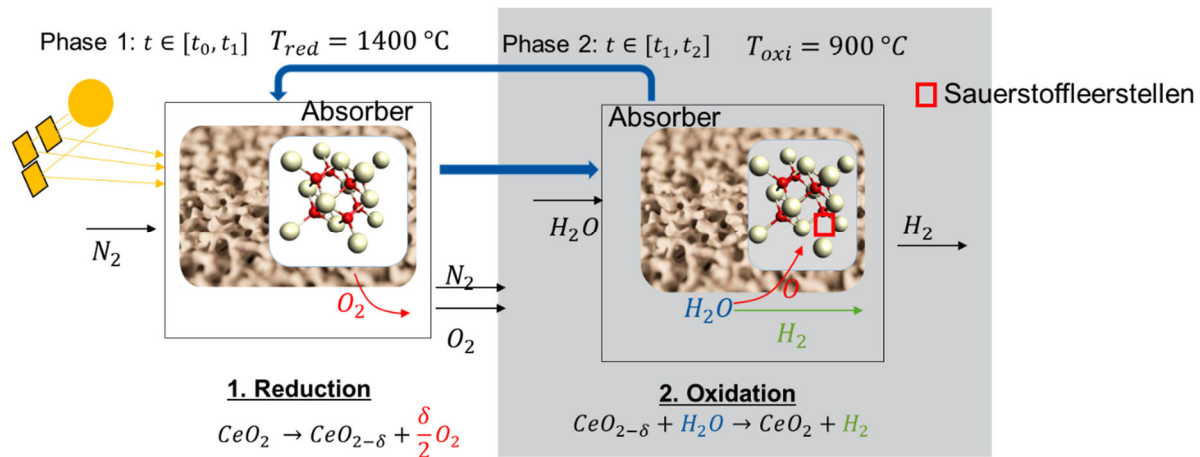


Abbildung 32 Wasserstoffproduktion im zyklischen Prozess

Der Prozess wird hauptsächlich über die Wärme geführt. Dem Modell stehen als Eingänge die Stoffströme der beiden Einlassgase und die Sollstrahlung zur Verfügung, wie Abbildung 33 darstellt.

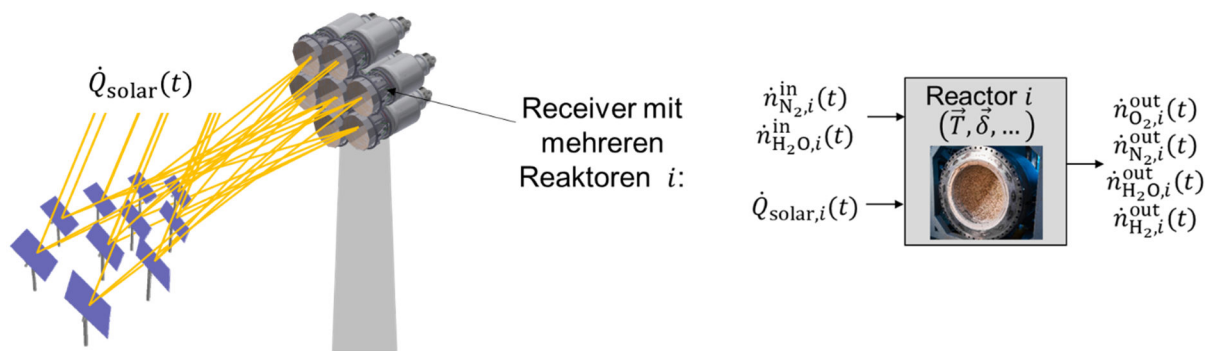


Abbildung 33 Ein- und Ausgänge der Reaktoren. Temperaturen $\vec{T}$ können nur teilweise gemessen werden, Reduktionsgrad $\vec{\delta}$ gar nicht.

Die Stoffströme der Einlassgase können neben der Steuerung der chemischen Reaktion auch die Temperatur in geringem Maße beeinflussen, da sie den Wärmetransport durch den Absorber in Flussrichtung verstärken. Wie Abbildung 8 verdeutlicht, ist dieser Effekt jedoch zu vernachlässigen. Um die Reaktionen zu beschleunigen, werden die Gasströme auf ihre maximalen Werte im Rahmen ihrer Betriebsbereiche aus dem Projekt ASTOR-ST eingestellt, d.h. während der Reduktion 50 kg/h Stickstoff und während der Oxidation 20 kg/h Stickstoff als Trägergas für 10 kg/h Wasserdampf. Dabei sollte beachtet werden, dass höhere Gasströme, vor allem während der Reduktion, einen noch höheren Umsatz versprechen, wie im Projekt H2Loop modelliert wurde. Da aber nicht vorgesehen ist, die ASTOR-ST-Anlage außerhalb ihres bisherigen Betriebsbereiches zu betreiben und dieser Reaktor auch zur Nutzung in SolarFuelNow vorgesehen war, wurde sich auf diese maximalen Gasströme beschränkt.

Die Sollstrahlung ist auf die verfügbare Leistung der konzentrierten Solarstrahlung, die STRAL berechnet und bereitstellt, begrenzt. Des Weiteren gilt die Einschränkung, dass die Summe der Eingangsstrahlung über alle Reaktoren die verfügbare Leistung nicht übersteigen darf.

Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse aus AP2 vorgestellt. In C.2.1 wird zunächst auf die Grundstruktur und den Signalfussplan der Regelung im Gesamtsystem eingegangen. Die Basis der MPR ist ein vereinfachtes Reaktormodell, dessen Entwurf in C.2.2 vorgestellt wird. Da nicht alle Größen (auch Zustände genannt) des Reaktors messbar sind, ist ein Beobachter

erforderlich, der diese Zustände schätzt. Als Zustände werden die Systemgrößen des Rektors bezeichnet, die zur Beschreibung der statischen und dynamischen Prozesse benötigt werden. In Abschnitt C.2.3 wird der Zustandsbeobachter vorgestellt und anhand eines real aufgenommenen Strahlungsszenarios validiert. Schließlich wird in Abschnitt C.2.4 die finale MPR in einer Simulation getestet.

C.2.1. Entwurf und Implementierung einer Basis-Mehrgrößenregelung (AP 2.1)

Abbildung 34 stellt die Regelungsstruktur der MPR und ihre Einbettung ins Gesamtsystem dar.

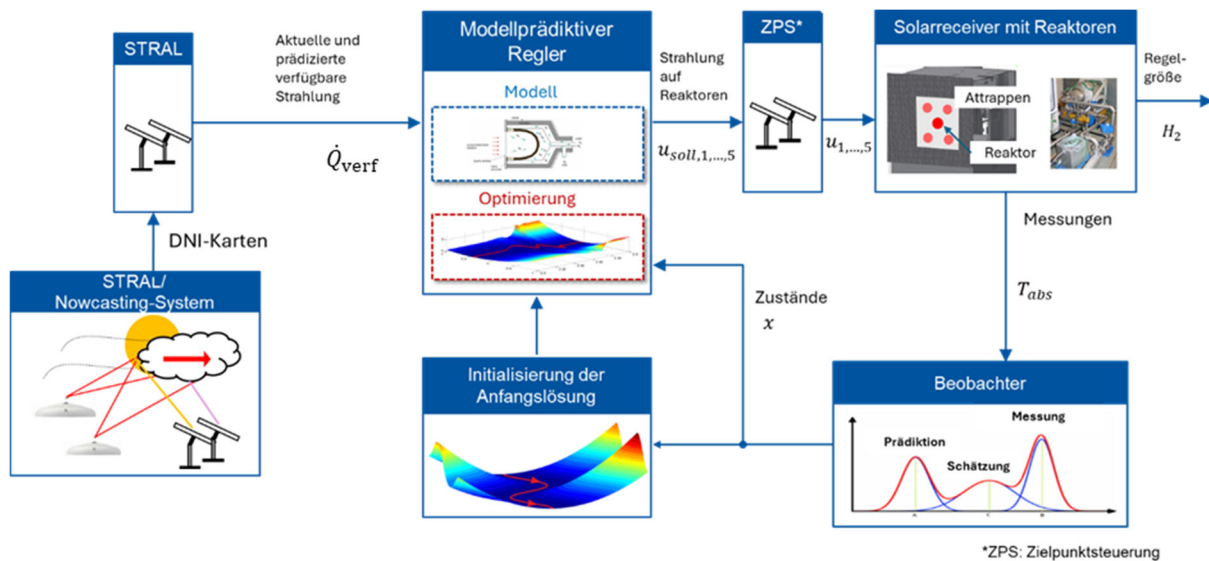


Abbildung 34 Übersicht der Regelungsstruktur und Signalfussplan.

Mit der von STRAL geschätzten, verfügbaren Strahlungsleistung $\dot{Q}_{\text{verf}}$ und dem aktuellen Zustandsvektor berechnet die MPR durch eine mathematische Optimierung eine Verteilung der Strahlung auf den Reaktoren, die einen maximalen Wasserstofftrag erzielt. Da der Lösungsraum lokale Minima aufweist, liefert der Initialisierungsblock eine Anfangslösung, um das globale Optimum schneller zu finden. Die zweite Funktion, die STRAL erfüllt, ist die Umsetzung der geforderten Strahlungsverteilung auf die Reaktoren. Da die einfallende Leistung auf den Reaktoren im realen Betrieb nicht gemessen werden kann, wird das Heliostatenfeld nur gesteuert und nicht geregelt. Entsprechend kommt es zu einer Abweichung der tatsächlichen Leistung ($u_1, \dots, u_5$) von der geforderten Leistung ($u_{\text{soll},1}, \dots, u_{\text{soll},5}$) auf dem Receiver.

Auf dem Solarturm werden die virtuellen Reaktoren durch Attrappen dargestellt, siehe AP4. Um ihr Verhalten zu simulieren, wird die tatsächliche Strahlung auf den Attrappen benötigt. Lediglich zu diesem Zweck werden Radiometersensoren im Zentrum der Attrappen platziert. Für die Regelung stehen diese Messwerte aber nicht zur Verfügung.

Parallel zur Regelstrecke simuliert der Beobachter das dynamische Verhalten des Multireaktorsystems mit einzelnen Modellen nach, um alle relevanten Zustände abzubilden. Mithilfe des Beobachters lassen sich vor allem auch sicherheitskritische Größen, wie nichtmessbare Temperaturen des Absorbers oder Aufheizraten schätzen, um diese entsprechend den Anforderungen durch die MPR aktiv zu begrenzen. Insbesondere die Temperaturen im vorderen Bereich des Absorbers und der Reduktionsgrad lassen sich messtechnisch kaum erfassen.

Als Eingangsgrößen erhält der Beobachter die Soll-Strahlungsleistung. Da diese jedoch erwartungsgemäß fehlerhaft ist, ebenso wie die Modelle im Beobachter kein perfektes Abbild darstellen, kommt es zu einem divergierenden Verhalten von der Realität. Die verfügbaren Temperaturmessungen in den Reaktoren werden mit dem Modellverhalten verglichen, um diese Fehler zu korrigieren. Daraus resultiert die Schätzung des Zustandsvektors zum aktuellen Zeitpunkt.

C.2.1.1. Modellprädiktive Regelung

Abbildung 35 stellt das grundsätzliche Prinzip der Modellprädiktiven Regelung (MPR) dar. Die MPR regelt die Regelstrecke im Sinne einer definierten Kostenfunktion J , mit deren Hilfe ein Wunschverhalten des Receivers in einem betrachteten Zeitfenster, dem Prädiktionshorizont der Länge N_2 , beschrieben werden kann.

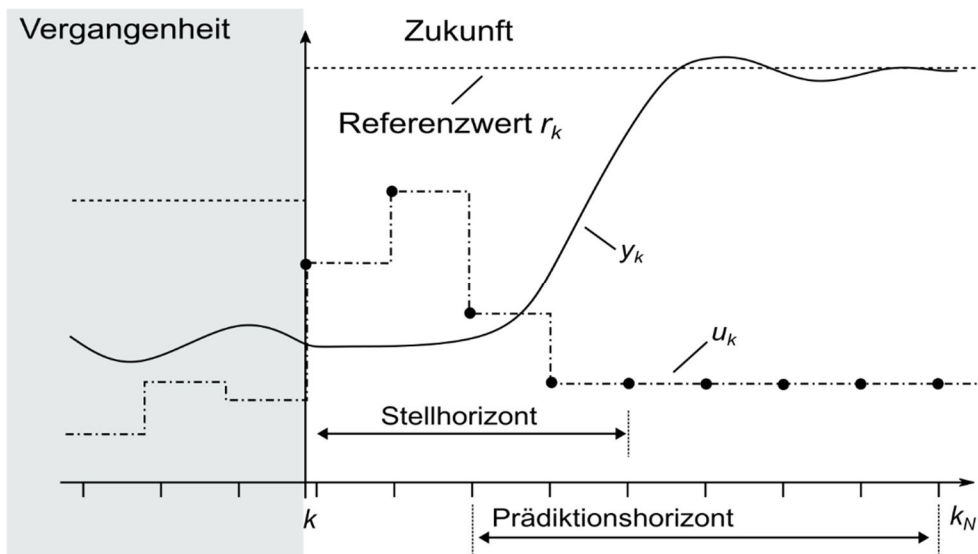


Abbildung 35 Prinzip der MPR

Das zukünftige Verhalten wird durch ein Modell prädiziert und mit dem Wunschverhalten verglichen. Eine Abweichung hat eine Erhöhung der Kosten zur Folge, sodass es das Ziel der MPR ist, eine Stellgrößenfolge $\{u_1 \dots u_{N_u}\}$ über den Stellhorizont durch eine mathematische Optimierung zu finden, die die Kostenfunktion minimiert. Anstelle von Kosten, kann in einem positiven Sinne auch von der Güte eines Regelverhaltens gesprochen werden. Zur Formulierung eines Optimierungsproblems, wird das Wunschverhalten durch eine Referenz r_k der Ausgangsgröße beschrieben. Typischerweise wird auch die Änderung der Stellenergie bestraft, da diese technisch begrenzt ist.

Bei der Minimierung des Kostenfunktion müssen des Weiteren die Nebenbedingungen berücksichtigt werden. Dazu zählt das Modellverhalten, das in Form eines algebraischen Zustandsgleichungssystems mit den Funktionen $f(x_k, u_k, z_k)$ und $g(x_k, u_k, z_k)$ beschrieben wird, sodass sich nicht beliebige Ausgangsgrößen y_k ergeben können. z_k ist dabei die algebraische Variable, die die Zustände der chemischen Reaktion beschreibt. Ebenso werden die beschriebenen Betriebsgrenzen hier formuliert. Damit ergibt sich die Beschreibung des Optimierungsproblems im Basisentwurf zu

$$\min_{u_1 \dots u_{N_u}} J = \sum_{k=1}^{N_2} \|r_k - y_k\|_Q^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \|u_k - u_{k-1}\|_R^2 \quad (45)$$

Unter den Nebenbedingungen

$$\dot{x}_{k+1} = f(x_k, u_k, z_k) \quad (46)$$

$$g(x_k, u_k, z_k) = 0 \quad (47)$$

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (48)$$

$$T_{Abs} \leq 1400 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (49)$$

$$\sum_{i=1}^5 u_i \leq \dot{Q}_{\text{verf}} \quad (50)$$

Gleichung (50) beschreibt die Nebenbedingung, dass die Summe aller Strahlungsanteile auf die Reaktoren die verfügbare Strahlung nicht überschreiten darf.

Im nächsten Schritt wird untersucht, welche Ausgangsgröße gewählt und welcher Referenzwert vorgegeben soll. Es ergeben sich zunächst folgende Problemstellungen:

- In dem zweistufigen Prozess erfolgt die Wasserstoffherzeugung in der Oxidationsphase. Welche Ausgangsgröße soll in der Reduktionsphase betrachtet werden?
- Wie viele Reaktoren müssen in der Prädiktion berücksichtigt werden? Dabei ist zu bewerten, dass die Erhöhung der Reaktoranzahl das Optimierungsproblem komplexer macht.
- Wie weit muss das Systemverhalten prädictiert werden?

Diese Fragestellungen müssen im gemeinsamen Zusammenspiel aus Modellkomplexität, Formulierung der Kostenfunktion und Lösbarkeit des Optimierungsproblems gelöst werden. Die resultierende MPR muss eine akzeptable Regelgüte liefern und echtzeitfähig betrieben werden können.

C.2.1.2. Parameterstudie mit einem Reaktor

Um die erste Fragestellung zu klären, wird zunächst eine Parameterstudie mit dem komplexen Modell des DLR durchgeführt. Dazu wird ein Reaktor betrachtet und mit dem Basisentwurf der MPR geregelt. An dieser Stelle sei auf das in AP 2.2 entwickelte Modell vorgegriffen, um es in der MPR zu nutzen. Untersucht wird, ob es eine Prozessgröße in der Reduktionsphase gibt, die mit dem Wasserstofftrag in der Oxidationsphase korreliert. Da der Wasserstofftrag vom zuvor erzeugten Grad der Sauerstoffleerstellen bzw. des Reduktionsgrades δ abhängt, liegt die Hypothese nahe, dass δ in einem linearen Zusammenhang zum erzeugten Wasserstoff steht.

Zur Untersuchung dieser Hypothese wird als Ausgangsgröße die Absorbertemperatur an der Frontseite gewählt, die auf eine Referenztemperatur von 1400 °C geregelt wird. Der Absorber wird aufgeheizt und für eine variable Zeitdauer auf der maximalen Temperatur gehalten (siehe Abbildung 36). Die Zeitdauer ist abhängig von dem über der Dicke der Absorberschicht gemittelten Reduktionsgrad $\bar{\delta}^*$, der erreicht werden muss, bevor die Reduktion beendet wird. In der anschließenden Oxidationsphase wird Wasserdampf eingelassen und der Reaktor nicht bestrahlt. Während der Reaktor im vorderen Teil abkühlt, wird er im hinteren Teil aufgrund der Wärmeleitung noch eine kurze Zeit erwärmt und kühlt mit einer Verzögerung ab. Es wird angenommen, dass bei hohen Temperaturen der Wasserdampf noch reduzierend wirkt, da das Wasser nicht direkt gespalten wird und somit die Rolle eines Spülgases einnimmt. Daher wächst der gemittelte Reduktionsgrad nach dem Umschalten auf Wasserdampf zunächst leicht. Wenn dann die Oxidationstemperatur erreicht ist, bleibt der gemittelte Reduktionsgrad zunächst konstant, da im vorderen Teil des Absorbers entstehender Wasserstoff als

Reduktionsmittel im hinteren Teil wirkt und daher dort den Reduktionsgrad erhöht. Erst wenn der Wasserstoff nicht mehr rekombiniert und am Austritt des Absorbers ankommt, sinkt der gemittelte Reduktionsgrad. Ab diesem Zeitpunkt steigt die produzierte Wasserstoffmenge in der Oxidationsphase an, bis die Sauerstoffleerstellen im gesamten Absorber wieder nahezu gefüllt sind. Sobald der austretende Stoffstrom an Wasserstoff einen Grenzwert unterschreitet, wird die Regelung wieder aktiviert und die Reduktion gestartet. Jeder Versuch wird für jeweils 4 Stunden simulativ gefahren.

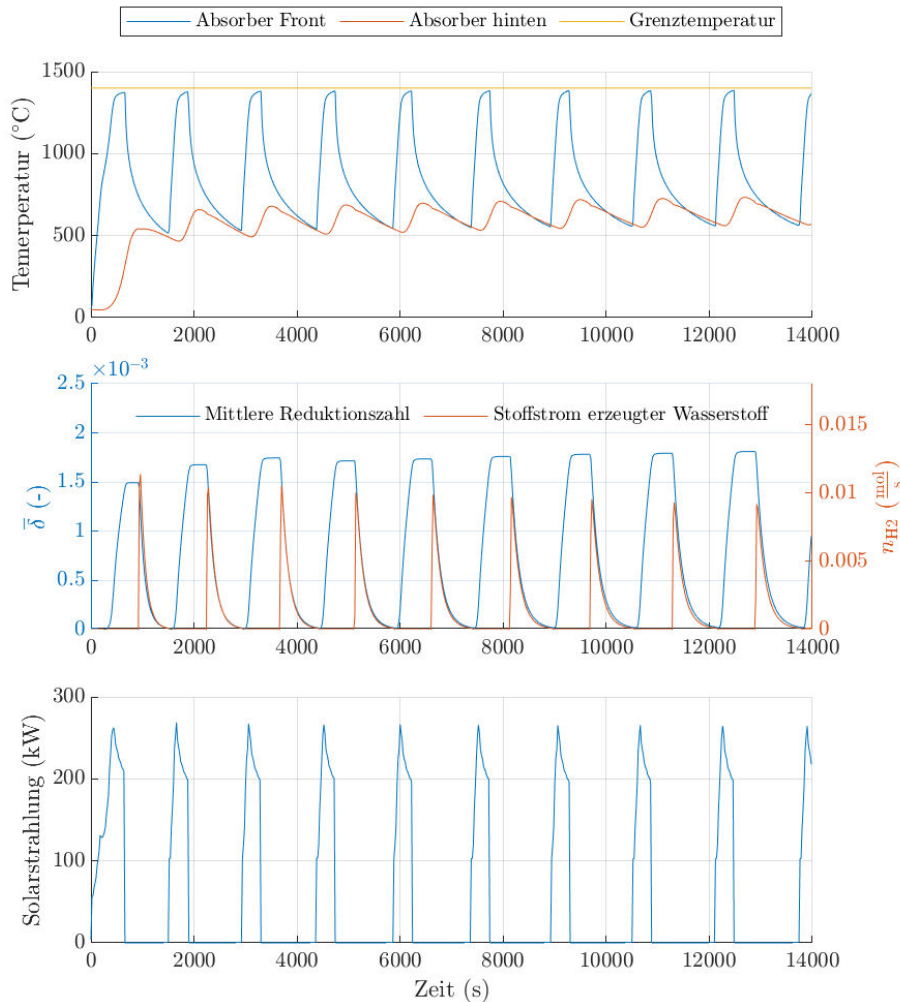


Abbildung 36 Versuchsreihe: Einstellung einer maximalen Reduktionsgrades $\bar{\delta}_{\max}$ als Zielgröße

Zur Bewertung der Parameterstudie werden folgende Zielgrößen definiert:

- Der maximale Reduktionsgrad $\bar{\delta}_{\max,i}$, der im Zyklus i mit der Dauer $t_{\text{zykl},i}$ erreicht wird,
- sowie die erzeugte Wasserstoffmenge je Zyklus

$$n_{\text{H}_2,i} = \int_0^{t_{\text{zykl},i}} \dot{n}_{\text{H}_2} dt \quad (51)$$

Darauf aufbauend wird ein Maß für die **Effizienz** der Wasserstoffherzeugung

$$\eta_{\text{H}_2,i} = \frac{n_{\text{H}_2,i}}{\int_0^{t_{\text{zykl},i}} \dot{Q}_{\text{Reaktor}} dt} \quad (52)$$

und des Aufbaus des Reduktionsgrad mit

$$\eta_{\delta,i} = \frac{\bar{\delta}_{max,i}}{\int_0^{t_{zykl,i}} \dot{Q}_{Reaktor} dt} \quad (53)$$

eingeführt, wobei $I_{Reaktor}$ die eingehende Strahlung auf dem jeweiligen Reaktor bezeichnet. Die Effizienz beschreibt somit, wieviel Wasserstoff je Energiemenge im Reaktionszyklus erzeugt bzw. welcher Reduktionsgrad je Energiemenge erreicht wurde.

Ein zweites Kriterium bewertet die **Ertragsleistung**, indem die Zielgrößen durch die Zyklusdauer geteilt werden.

$$P_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{\int_0^{t_{zykl,i}} dt} \quad (54)$$

$$P_{\delta} = \frac{\bar{\delta}_{max}}{\int_0^{t_{zykl,i}} dt} \quad (55)$$

Damit wird unabhängig von der eingebrachten Strahlung bewertet, wie schnell die Zielgrößen aufgebaut werden können.

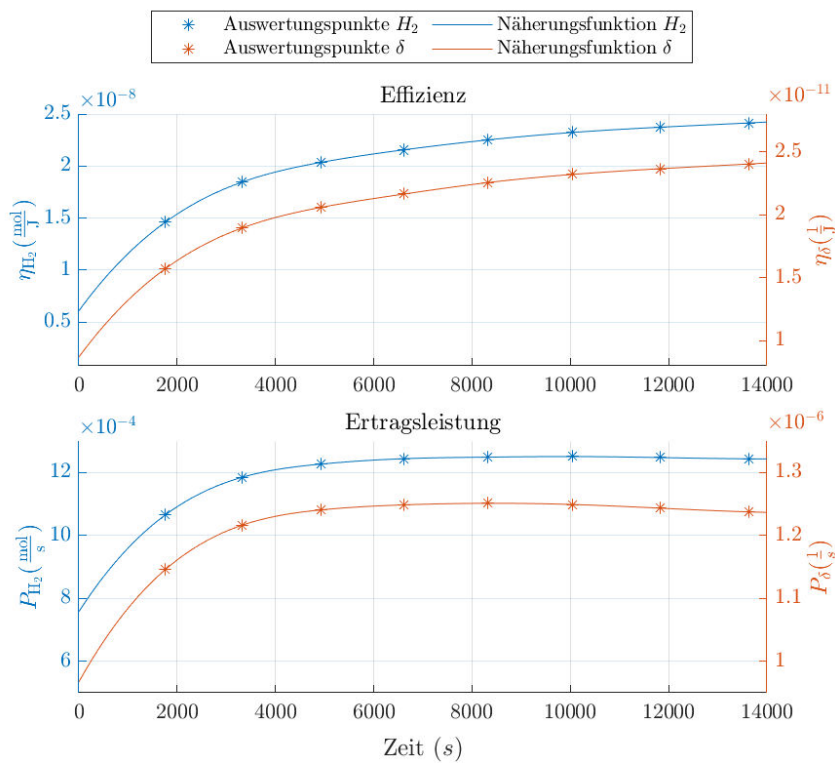


Abbildung 37 Verlauf der Effizienzen und Leistungserträge für eine Zielreduktionszahl von $\bar{\delta}_{max} = 0.0021$

Abbildung 37 zeigt exemplarisch den Verlauf der Effizienzen und Ertragsleistungen über der Zeit für einen Zielwert von $\bar{\delta}^* = 0.0021$.

Zum Ende einer Oxidationsphase werden die Bewertungsgrößen des Reaktorzyklus ausgewertet. Da der Reaktor zu Anfang kalt ist und in der Aufheizphase mehr Wärme benötigt, ist die Effizienz des ersten Zyklus geringer und nähert sich mit jedem weiteren Zyklus einer Sättigung an. Zu beachten ist, dass die Zyklen abhängig von Zielreduktionszahl $\bar{\delta}^*$ unterschiedlich lange andauern. Um die Versuche miteinander vergleichen zu können, wird eine Spline-Funktion als Näherungskurve durch die Auswertungspunkte gelegt. Eine Spline-Funktion wird stückweise durch Polynome dritter-Ordnung so parametrisiert, dass sie durch die Stützpunkte verläuft und stetig differenzierbar ist. Mithilfe der Näherungskurven werden Bewertungskriterien eines Versuches jeweils zum Simulationszeitpunkt $t^* = 10800 \text{ s}$ ausgewertet, um eine einheitliche Bewertungszeitdauer zu erhalten. In einem weiteren Graphen wird über dem maximalen Reduktionsgrad $\bar{\delta}_{\max}$ aufgetragen, siehe Abbildung 38.

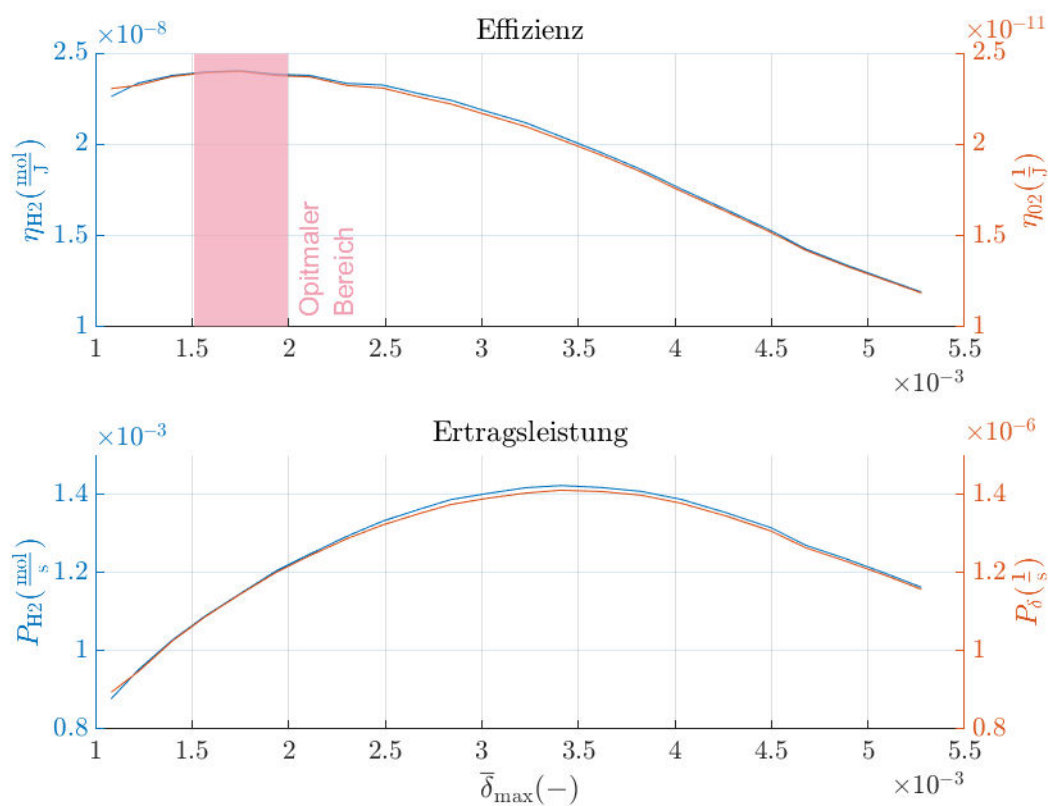


Abbildung 38 Effizienz und Ertragsleistung in Abhängigkeit eines eingestellten Zielreduktionsgrades $\bar{\delta}^*$

Zunächst ist zu erkennen, dass sich im Dauerbetrieb ein Hochpunkt herausstellt, bei dem die Effizienz der Wasserstoffproduktion am höchsten ist. Dies ist plausibel, da am Verlauf des Reduktionsgrades in Abbildung 36 zu erkennen ist, dass die Zunahme des Reduktionsgrades aufgrund der Temperaturbegrenzung abflacht. Da weiterhin viel Sonnenleistung benötigt wird, um die Temperatur aufrecht zu erhalten, sinkt das Verhältnis zwischen dem aufgebauten Reduktionsgrad und der eingebrachten Leistung.

Zunächst ist zu erkennen, dass beide Bewertungskriterien für die Wasserstoffproduktion und den Aufbau des Reduktionsgrades einen ähnlichen Verlauf haben. Beide Größen entwickeln bei annähernd identischen maximalen Reduktionsgraden ihre Hochpunkte sowohl für die Effizienz als auch für die Ertragsleistung. Somit lässt sich festhalten, dass der Reduktionsgrad als Ersatzgröße für die Maximierung des Wasserstoffes in der Reduktionsphase genutzt werden kann.

Der Umstand, dass Hochpunkte auftreten, ist plausibel, da die Zunahme des Reduktionsgrades aufgrund der Temperaturbegrenzung abflacht. Jedoch lässt sich feststellen, dass die Hochpunkte für die Ertragsleistung an unterschiedlichen Stellen liegen. Wenn ein Überfluss an Sonnenenergie vorhanden ist, scheint eine längere Bestrahlung sinnvoller zu sein. Wird die Bestrahlungsleistung jedoch begrenzt oder aufgebraucht, weil sie sich beispielsweise auf mehrere Reaktoren aufteilt, wäre ein effizienter Betrieb sinnvoller.

Als nächstes ist zu untersuchen, wie viele Reaktoren betrachtet werden müssen und wie weit in die Zukunft das Modellverhalten prädiziert werden muss. Dazu wird die Optimierung für eine Startkonfiguration der Reaktortemperaturen durchgeführt und die Anzahl der berücksichtigten Reaktoren sukzessive erhöht. In Abbildung 39 sind die von der MPR berechneten, optimalen Verläufe für ein, zwei und drei Reaktoren illustriert.

Dargestellt sind jeweils die Temperatur an der Absorberfront, die gemittelte Reduktionszahl und die bestrahlte Leistung auf den Reaktoren. Die Kurve in orange stellt die Summe der Größen der berücksichtigten Reaktoren dar.

Bei der Verwendung eines Reaktors wird dieser mit der kompletten verfügbaren Leistung bestrahlt. Um die Grenztemperatur nicht zu überschreiten, wird die Leistung nach einer gewissen Zeit reduziert. Sobald die Absorberfront ihre Grenztemperatur erreicht, steigt der Reduktionsgrad langsamer und scheint sich einem Sättigungswert zu nähern.

Bei zwei Reaktoren erhält der erste Reaktor annähernd die gleiche Leistung wie im Einzelversuch. Die restliche verfügbare Leistung, die mit der Zeit größer wird, erhält der zweite Reaktor, bis zum Zeitpunkt, wenn auch dieser seine Grenztemperaturen erreicht. Anschließend wird die Leistung reduziert, sodass die verfügbare Leistung nicht vollständig aufgebraucht wird.

Bei 3 Reaktoren wird Sonnenstrahlung bereits zu Anfang etwas zwischen zwei Reaktoren aufgeteilt, wobei ein Reaktor bevorzugt wird. Aufgrund der Begrenzung der Aufheizrate bleibt auch für den dritten Reaktor noch Strahlungsleistung übrig. Sobald der erste Reaktor seine Grenztemperatur und eine von der MPR errechnete Zielreduktionszahl erreicht hat, wird auch der dritte Reaktor bestrahlt, sodass die verfügbare Leistung komplett aufgebraucht wird.

Aus dieser Teststudie lassen sich zwei Erkenntnisse ziehen:

- Es ist zu erkennen, dass bei einem aufgewärmten Receiver nach ca. 1500 s drei Reaktoren die Grenztemperatur erreichen und ausreichend lang halten, um die Reduktionsphase, aus Sicht der Optimierungslösung der MPR, abzuschließen. Daraus kann geschlossen werden, dass ein Prädiktionshorizont von ca. 1500 s benötigt wird, um die Systemdynamiken aller 3 Reaktoren zu erfassen.
- Da die verfügbare Leistung mit drei Reaktoren im betrachteten Prädiktionshorizont vollständig genutzt wird, ist es unnötig, weitere Reaktoren in der MPR zu berücksichtigen, da diese Reaktoren nicht bestrahlt werden können. Eine weitere Hinzunahme von Reaktoren würde lediglich den Rechenaufwand und die Berechnungsdauer erhöhen, ohne den Informationsgewinn zu steigern.

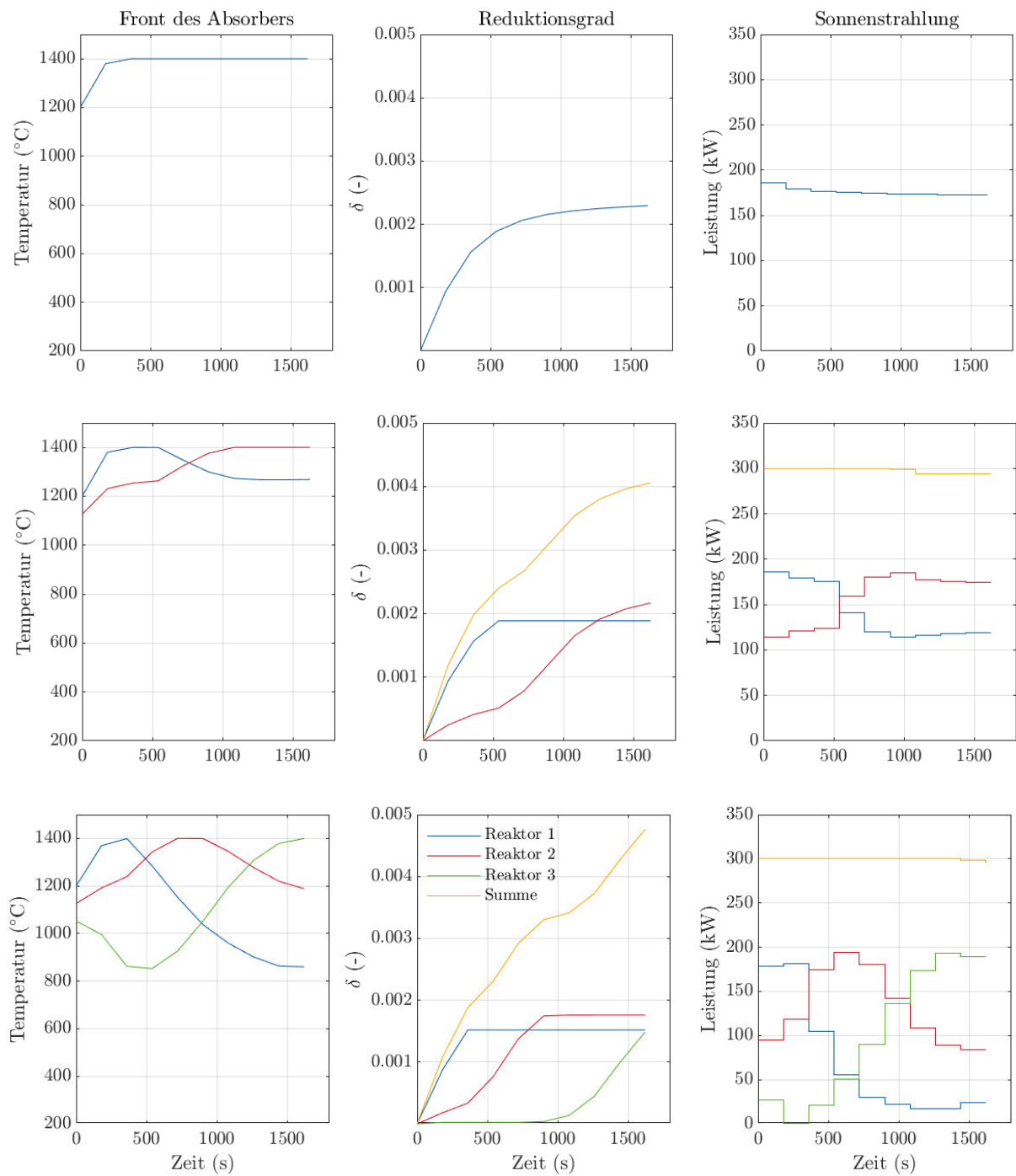


Abbildung 39 Optimale Leistungsverteilung bei Erhöhung der Anzahl der Reaktoren. Grafiken oben gelten für einen Reaktor, in der Mitte für 2 Reaktoren und unten für 3 Reaktoren.

C.2.2. Ableitung vereinfachter, echtzeitfähiger Modelle (AP 2.2)

Für den Einsatz in der MPR und im Beobachter muss das vom DLR in AP1 entwickelte detaillierte Reaktormodell (s. Abschnitt C.1.2.1) angepasst werden. Dazu gehört die Überführung in den Zustandsraum und das Vornehmen von Vereinfachungen, um Echtzeitfähigkeit herzustellen.

C.2.2.1. Zustandsraumdarstellung

Zunächst soll das detaillierte Modell in allgemeiner Zustandsraumdarstellung zusammengefasst werden. Aus den dynamischen Energiebilanzgleichungen (1)-(6) für die Reaktorkomponenten und den algebraischen Gleichungen, u.a. für die Berechnung der Temperaturen des ein- und austretenden Gases (Gleichungen 7-12), der Strahlung (Gleichungen 13-29) und des chemischen Gleichgewichts (Gleichungen 33-42) folgt die nichtlineare Differential-Algebraische Gleichung (DAE) in allgemeiner Zustandsraumdarstellung in zeitdiskreter Form:

$$\mathbf{x}(k+1) = F(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{z}(k)) \quad (56)$$

$$0 = g(\mathbf{x}(k+1), \mathbf{u}(k), \mathbf{z}(k)) \quad (57)$$

Dabei besteht der Zustandsvektor $\mathbf{x}$ aus den folgenden Größen:

$$\mathbf{x} = [T_{\text{win}} \ T_f \ T_s \ T_{W_1} \ T_{W_2} \ T_{\text{Iso}} \ \delta]^T \quad (58)$$

C.2.2.2. Modellvereinfachungen

Zur Vereinfachung der Gleichungen wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

Berechnung des Strahlungsaustausches durch Look-Up-Tabellen

Zwischen der Absorberfront und der Quarzglasscheibe, zwischen der Absorberrückseite und der Innenwand des Innenkessels und zwischen den beiden Wänden des Innenkessels wird der Strahlungsaustausch im detaillierten Modell des DLR durch Integration der spektralen Anteile über Wellenlänge berechnet, wie in Abschnitt C.1.2.1.3 beschrieben. Diese Integration wird in jedem Zeitschritt durchgeführt, was Rechenzeit kostet. Aus diesem Strahlungsaustausch resultieren die Quellterme $\dot{Q}_{\text{rad,win,th}}$ und $\dot{Q}_{\text{rad,win,opt}}$ für die Quarzglasscheibe, die thermische Strahlung $q_{\text{abs,rad,th}}$ jeweils für die Vor- und Rückseite des Absorbers, die Intensität der absorbierten optischen Strahlung I_0 an der Vorderseite des Absorbers sowie die Quellterme durch Strahlung für die Wände des Innenkessels. Um die Komplexität zu reduzieren, werden diese Quellterme durch Look-Up-Tabellen in Abhängigkeit der Temperaturen der beteiligten Komponenten sowie der Eingangssolarstrahlung abgelegt. Dabei wurde die im detaillierten Modell vorhandene Abhängigkeit der optischen Eigenschaften des Absorbers vom Reduktionsgrad δ vernachlässigt. Stattdessen wurde zur Berechnung der optischen Eigenschaften an der Absorberfront ein konstanter Wert von $\delta = 0.001$ und an der Absorberrückseite ein Wert von $\delta = 0$ verwendet.

Berechnung der Oberflächenflächentemperaturen und Korrektur des Diskretisierungsfehlers

Für die Strahlungsberechnung werden die Oberflächenflächentemperaturen an der Vorder- und Rückseite des Absorbers benötigt. Diese werden im detaillierten Modell aus der absorbierten Strahlung $q_{\text{abs,rad,th}}$ berechnet, da diese dem Temperaturgradienten entspricht

$$\frac{k_{s,\text{total}}(T_{s,\text{Front}} - T_{s,1})}{\Delta x/2} = q_{\text{abs,rad,th}} \quad (59)$$

Da eine explizite Gleichung aufgebaut werden soll und $q_{\text{abs,rad,th}}$ nicht bekannt ist, wird an dieser Stelle ein anderer Ansatz verwendet. Die aktuelle Wärmestrahlung wird aus dem Temperaturgradienten zwischen dem ersten und zweiten Knotenpunkt ausgewertet.

$$q_{\text{abs,rad,th}} = \frac{k_{\text{s,total}}(T_{\text{s},1} - T_{\text{s},2})}{\Delta x} \quad (60)$$

Dadurch berechnet sich die Temperatur an der Front- und Rückseite des Absorbers zu

$$T_{\text{s,Front}} = p_V (3 T_{\text{s},1} - T_{\text{s},2}), \quad (61)$$

$$T_{\text{s,Rückseite}} = p_H (3 T_{\text{s},n} - T_{\text{s},n-1}), \quad (62)$$

mit den Korrekturparametern p_V und p_H und n , der Anzahl an Volumenelementen. Die Korrekturparameter wurden hinzugefügt, um Abweichungen bei dem Wechsel der Ansätze zu auszugleichen. Ein weiterer Grund für Abweichungen resultiert aus der Reduzierung des Diskretisierungsgrades. Um das Modell zu vereinfachen, wird die Anzahl an diskreten Volumenelementen auf 5 gesenkt. Der Einfluss des Diskretisierungsgrades auf das Modellverhalten wurde in Abschnitt C.1.2.3.1 untersucht (siehe Abbildung 22). Es hat sich gezeigt, dass der Diskretisierungsfehler ebenfalls sehr gut durch diese Korrekturparameter kompensiert werden kann.

Eliminierung der fluiden Phase

Wie in AP 2.1 gezeigt, muss die MPR das Reaktorverhalten mit dem reduzierten Modell in die Zukunft präzisieren. Dazu müssen die Differentialgleichungen zeitlich diskretisiert werden. Je größer diese Zeitschrittweiten gewählt werden können, desto weniger Zeitschritte müssen berücksichtigt werden, um den geforderten Prädiktionshorizont zu erreichen. Bei der vorliegenden Systembeschreibung handelt es sich um ein steifes System, da die Zeitkonstanten der fluiden Phase und festen Phase sehr unterschiedlich sind. Während die Dynamik der fluiden Phase sehr schnell ist, reagieren die Temperaturen des Absorbers aufgrund der hohen thermischen Wärmekapazität deutlich langsamer. Dadurch lassen sich Abtastzeiten von maximal 2 Sekunden wählen, mit denen sich das zeitdiskrete System noch stabil simulieren lässt. Aus diesem Grund wird die fluide Phase vernachlässigt. Das Gas sorgt in der Realität dafür, dass die Wärme stärker von vorne nach hinten durchgeleitet wird. Um diesen Effekt auszugleichen, wird ein Korrekturterm zusätzlich zur Absorber-Gleichung verwendet

$$K(p) = p_f * (T_{\text{s},i} - T_{\text{s},j}) \quad i < j, \quad (63)$$

wobei p_f ein Parameter ist, der so zu wählen ist, dass der Modellierungsfehler möglichst minimiert wird.

Umstellung des Löses zu Lösung der DAE

Wie zuvor erwähnt, muss zur Lösung der algebraischen Gleichung ein Nullstellenproblem gelöst werden. Im komplexen Modell wird dafür die Bisektionsmethode mit if-else-Abfragen verwendet. Diese Abfragen dürfen im Beobachter- und im MPR-Modell nicht auftauchen, um die stetige Differenzierbarkeit der Modelle nicht zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird das Lösungsverfahren umgestellt.

Beim Beobachter wird ein Interior-Point (IP)-Löser verwendet, der die DAE mit einem impliziten Integrationsverfahren löst. Die kontinuierliche Formulierung der Differentialgleichung $\dot{x} = f(x, z, u, p, T)$ wird ebenfalls zu einem diskreten Nullstellenproblem umgewandelt, bei der eine Kostenfunktion $J = 0$ unter den Nebenbedingungen

$$0 = F(x_k + k_1 \Delta t, z_k, u_k, p_k, \Delta t) - k_1 \quad (64)$$

$$0 = g(x_k + k_1 \Delta t, z_k, p_k) \quad (65)$$

gelöst werden muss. Es gilt $k_1 = \dot{x}_{k+1}$. Das Gleichungssystem wird durch die Suche nach den optimalen Entscheidungsvariablen z_k und k_1 gelöst, sodass sich der Zustandsvektor zum nächsten Zeitschritt zu

$$x_{k+1} = x_k + k_1 \Delta t \quad (66)$$

ergibt. Diese Lösungsmethode funktioniert sehr robust, und ist für eine echtzeitfähige Anwendung im Beobachter ausreichend.

Nutzung eines konstanten Partialdruckes

Da die MPR durch die weite Prädiktion von ca. 1500 s und Berücksichtigung mehrerer Reaktoren ein größeres Optimierungsproblem zu lösen hat, wird hier eine weitere Vereinfachung angewendet. Anstatt eine Lösung für die algebraische Gleichung der chemischen Reaktion zu finden, wird ein konstanter Gleichgewichts-Sauerstoffpartialdruck eingesetzt. Der Gleichgewichts-Sauerstoffpartialdruck im Absorber bei den gegebenen Einlassgasströmen und typischem Betrieb des Reaktors ist stark von der Temperatur abhängig. Während der Gleichgewichts-Sauerstoffpartialdruck bei Temperaturen unterhalb von 1200 °C in der Reduktionsphase in Bereichen unter 1 Pa liegt, steigt er mit höheren Temperaturen exponentiell an und erreicht, beschränkt durch die Temperatur- und Aufheizratenbegrenzung, einen gemittelten Wert in der Größenordnung um 1000 Pa. Da dieser Wert ausschlaggebend für die Sauerstofferzeugung ist und den relevanten Betriebspunkt bei dem Phasenwechsel von Reduktion in Oxidation darstellt, wird die algebraische Variable zum konstanten Wert $z = 800$ Pa gesetzt.

Begrenzung der Änderung des Reduktionsgrades

Die Simulationen haben gezeigt, dass der Reduktionsgrad nach Abschaltung der Bestrahlung für eine bestimmte Zeit konstant bleibt, bis die Temperaturen im gesamten Reaktor eine gewisse Temperatur unterschreiten. Da ein konstanter Partialdruck verwendet wird, besteht das Problem, dass bei einem Abfall der Temperatur der Reduktionsgrad im MPR-Modell ebenfalls direkt abfällt, sodass dieses Hysterese-Verhalten nicht durch die vereinfachten Gleichungen abgedeckt wird. Da die MPR aber hauptsächlich in der Reduktionsphase das bestrahlte Verhalten betrachtet, wird die Hysterese durch folgende Vereinfachung nachgebildet: Negative Änderungen der Reduktionszahlen werden verhindert, sodass die Reduktionszahl nur wachsen kann.

Zusammenfassung der Methoden und Anwendung in den Modellen

Tabelle 6 zeigt, welche Vereinfachungen in den beiden Modellen des Beobachters und der MPR verwendet werden.

Tabelle 6: Modellvereinfachungen im Beobachter und MPR

Modellvereinfachung	Modell im Beobachter	Modell in der MPR
Eliminierung der fluiden Phase und Einführung des Korrekturparameters p_f	X $p_f = 0.0001$	X $p_f = 0$
Look-Up-Table zur Berechnung der Strahlungsaustausches zwischen Absorber und Fensterglas	X	X
Berechnung der Oberflächentemperaturen des Absorbers mit den Korrekturparametern p_v und p_H	X $p_v = 0,2$ $p_H = 0,65$	X $p_v = 0,1$ $p_H = 1$
Anzahl an diskreten Volumenelementen	5	5
Lösung der DAE mit implizitem Integrationsverfahren und IP-Löser	X	
Eliminierung der algebraischen Gleichung durch konstantes z. Lösung der Differentialgleichung durch implizites Integrationsverfahren durch Newton-Verfahren		X
Begrenzung der Reduktionszahl auf nur wachsendes Verhalten		X

Das Zustandsraumvektor und die Eingangsgröße des reduzierten Systems sind dann

$$\mathbf{x} = [T_F \ T_S \ T_{W_1} \ T_{W_a} \ T_{Iso} \ \delta]^T \quad (67)$$

$$u = \dot{Q}_{\text{Solar}} \quad (68)$$

C.2.2.3. Validierung der reduzierten Modelle

Zur Validierung des reduzierten Modells wurden dieselben Messdaten aus dem ASTOR-Projekt herangezogen, die auch für die Validierung des komplexen Modells in Abschnitt C.1.2.2. verwendet wurden. Abbildung 40 zeigt den Verlauf der gemessenen mittleren Temperatur, sowie die Temperaturverläufe des komplexeren Modells des DLR und des reduzierten Modells, das im Beobachter verwendet werden soll für einen Zyklus. Eine Korrektur des Modells über die Temperaturmessung findet hier noch nicht statt.

Das komplexe Modell des DLR wird hier mit 15 Elementen gerechnet, während im reduzierten Modell 5 Elemente genutzt werden. In der oberen Grafik werden die Temperaturen im ersten (vorderen) und mittleren Element dargestellt, sowie in der ungefähren Tiefe, in der die Temperatursensoren im Experiment im Absorber platziert sind, also 7,5 mm von Rückseite gemessen (vergleiche Abschnitt C.1.2.2).

Tabelle 7 Vergleich der Temperaturen zwischen dem komplexen DLR-Modell und dem reduzierten Modell im Beobachter

Ort im Absorber	Maximaler, absoluter Temperaturfehler	Gemittelter Temperaturfehler
Front	25,7 K	8,9 K
Mitte	21,8 K	9,0 K
Messort	13,4 K	4,5 K

In der unteren Grafik sind die Reduktionszahlen beider Modelle im vorderen, mittleren und hinteren Volumenelement dargestellt, sowie die gemittelte Reduktionszahl, da diese

besonders relevant für die Regelung sind. Während die lokalen Fehler hier etwas größer ausfallen, ist der gemittelte Fehler im akzeptablen Bereich.

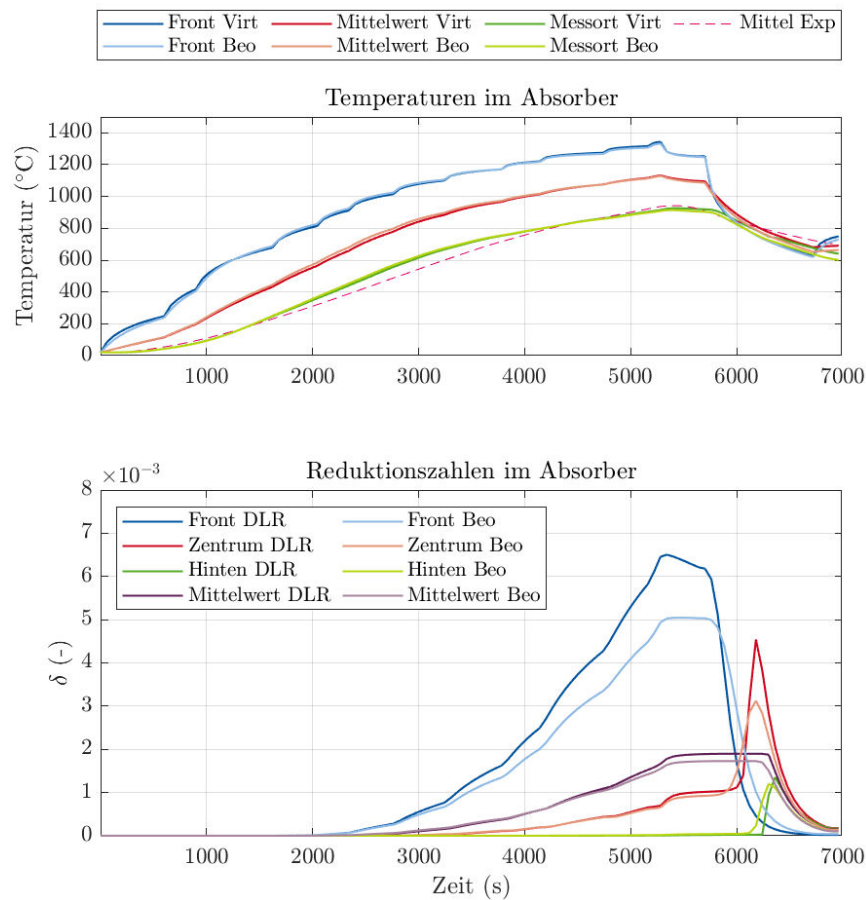


Abbildung 40 Vergleich DLR-Modell und Beobachtermodell

Abbildung 41 vergleicht dieselben Größenverläufe für das Modell der MPR. Die maximalen und gemittelten Temperaturfehler werden in Tabelle 8 dargestellt, wobei hier nur die Reduktionsphase bewertet wird.

Tabelle 8 Vergleich der Temperaturen zwischen dem komplexen DLR-Modell und dem reduzierten Modell in der MPR

Ort im Absorber	Maximaler, absoluter Temperaturfehler	Gemittelter Temperaturfehler
Front	25,4 K	11,0 K
Mitte	11,2 K	4,6 K
Messort	18,0 K	5,3 K

Da in dem MPR-Modell nur positive Änderungen des Reduktionsgrades zugelassen sind, fallen diese in der Oxidationsphase nicht ab. In der Grafik ist zu sehen, dass der gemittelte Reduktionsgrad für eine Weile auch im detaillierten Modell nahezu konstant bleibt und die Verläufe, wie erwartet, gut übereinstimmen.

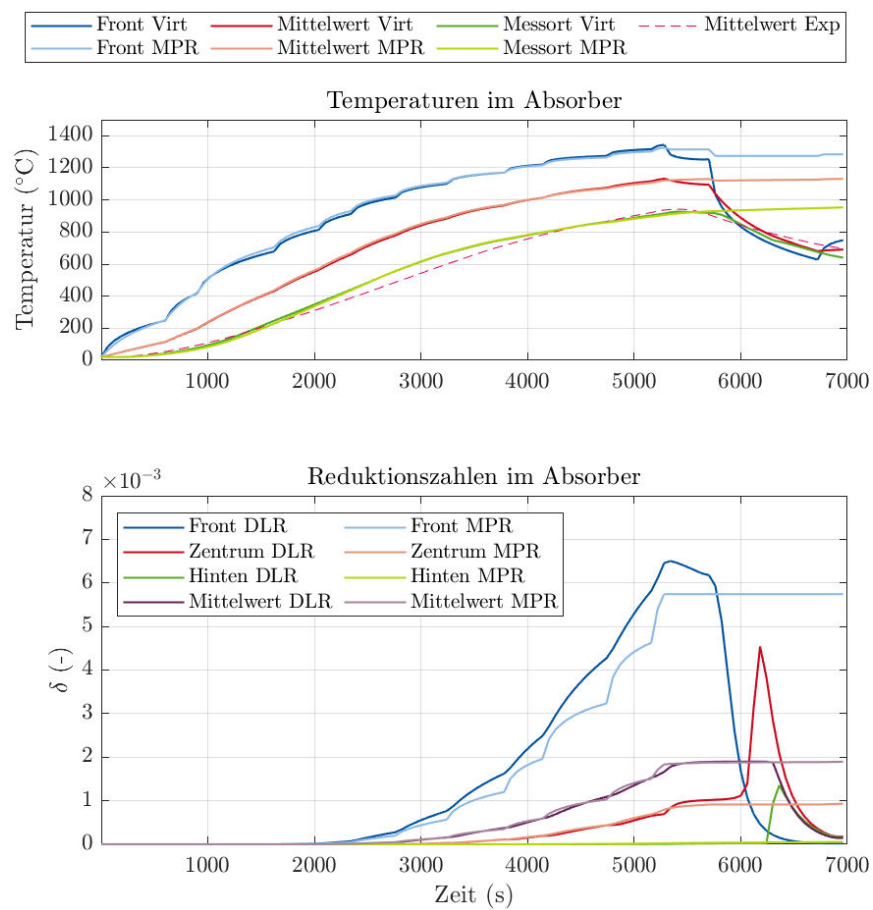


Abbildung 41 Vergleich DLR-Modell und MPR-Modell

C.2.3. Entwurf und Validierung eines Beobachters zur Schätzung der Modellzustände (AP 2.3)

Um mögliche Verletzungen der Temperaturgrenzwerte im Absorber zu erkennen und eine genaue Regelung sicherzustellen, benötigt die MPR möglichst exakte Systemzustände, die vom Beobachter berechnet werden. Der Beobachter besteht aus dem vereinfachten Beobachter-Modell (siehe Abschnitt C.2.2.2), das in Echtzeit ausgeführt wird und mittels Messgrößen mit der Regelstrecke verglichen wird. Die Abweichungen werden genutzt, um die aktuellen Systemzustände des Modells zu korrigieren und diese der MPR als Startwerte für die Prädiktion des Reaktorverhaltens zu liefern. Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der Strecke kommt ein Extended Kalman-Filter (EKF) als Beobachter zum Einsatz. Abbildung 42 zeigt die geschätzten Temperaturverläufe des Absorbers and der Frontseite und an der Messstelle der Thermoelemente, sowie die gemittelten Werte.

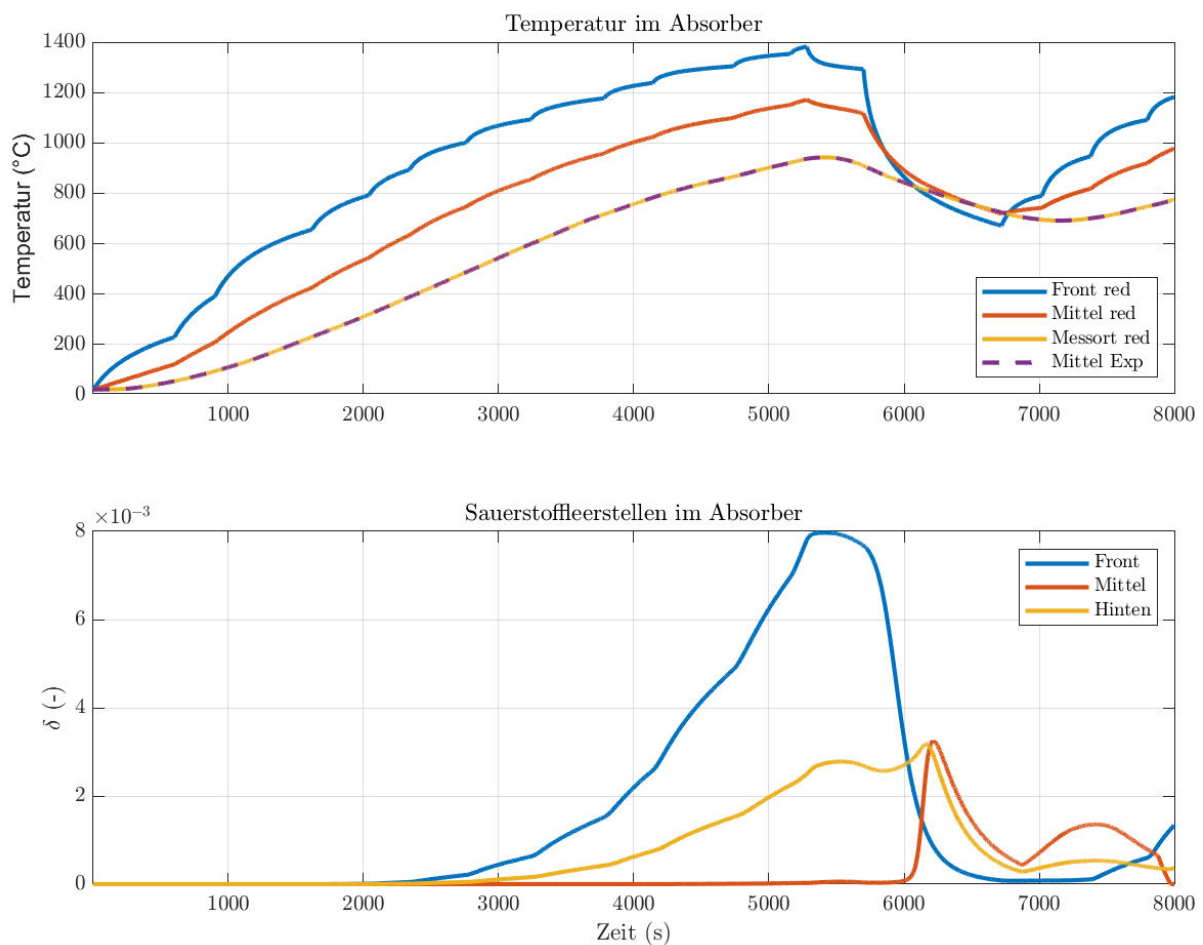


Abbildung 42 Temperaturverläufe unter Verwendung eines Extended Kalman Filters im Vergleich zu den Versuchswerten

Durch die Korrekturen stimmen die Verläufe von Simulation und Versuch an der Messstelle überein. Im Vergleich zu Abbildung 40 ist zu erkennen, dass auch die Fronttemperaturen in Richtung der Abweichung von den Messwerten korrigiert werden. Das bedeutet, dass zu Zeiten, an denen die simulierte Temperatur am Messort unterhalb der gemessenen Temperatur liegt, die Fronttemperatur nach oben und bei einer simulierten Temperatur am Messort oberhalb der gemessenen Temperatur die Fronttemperatur nach unten korrigiert wird.

Aufgrund von Modellfehlern und Messungenauigkeiten kann es trotz der Korrekturen zu größeren Abweichungen kommen. So kann die tatsächliche Strahlung auf den Reaktoren

beispielsweise nicht gemessen werden. Da die Leistung auf den Reaktoren nicht geregelt, sondern ohne Messrückführung gesteuert wird, sind größere Abweichungen hier sehr wahrscheinlich. Deshalb wird eine zusätzliche Störgröße angenommen, die vom EKF geschätzt wird und die die Modellabweichungen auch in der Prädiktion kompensiert.

$$u = \dot{Q}_{\text{ist}} * d \quad (69)$$

Die Störgröße d korrigiert die angenommene Eingangsleistung multiplikativ mit einem Faktor, der mit dem Wert 1 initialisiert wird. Dabei wird das Zustandsmodell um d wie folgt erweitert.

$$\tilde{x}_{k+1} = \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ d_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_k, u_k, z_k) \\ d_k \end{bmatrix} \quad (70)$$

Im Weiteren sei $\tilde{x}_k$ der neue Zustandsvektor des Systems und zur Vereinfachung ohne $\sim$ geschrieben. Das EKF lässt sich durch eine geeignete Parameterwahl nun so einstellen, dass bei Abweichungen die Zustände mit unterschiedlichem Vertrauensniveau angepasst werden.

C.2.4. Erweiterung und Optimierung der MPR (AP 2.4)

Basierend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen und der Parameterstudie in Abschnitt C.2.1.2 wird nun die finale Kostenfunktion der MPR abgeleitet. Diese wird um die Aufheizratenbegrenzung und weiche Betriebsgrenzen erweitert:

$$\begin{aligned} \min_{\substack{u_0 \dots u_9 \\ s_0 \dots s_9}} J = & \sum_{k=1}^{10} \left[\|r_k - \sum_{n=1}^3 \bar{\delta}_{k,n}\|_Q^2 + \|s_k\|_{Q_s}^2 + \|s_k\|_{Q_{sl}}^2 \right] \\ & + \sum_{k=0}^9 \left[\|\dot{Q}_{\text{verf}} - \sum_{n=1}^3 u_{k,n}\|_R^2 + \|\Delta u_k\|_{R_2}^2 \right] \end{aligned} \quad (71)$$

unter den Nebenbedingungen

$$x_{k+1} = F(x_k, u_k, z_k) \quad (72)$$

$$0 \leq \sum_{i=1}^5 u_{k,i} \leq \dot{Q}_{\text{verf}} \quad (73)$$

$$-s_{k,1} \leq T_{\text{front},k} \leq 1400^\circ\text{C} + s_{k,2} \quad (74)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} < \frac{80^\circ\text{C}}{\text{min}} + s_{k,3} \quad (75)$$

$$s_{k,i} \geq 0 \quad (76)$$

Diese Wahl ist folgendermaßen begründet:

- Da die gemittelte Reduktionszahl in der Reduktionsphase als Ersatz für den Wasserstofftragat betrachtet werden kann, wird diese über alle betrachteten Reaktoren summiert als Regelgröße gewählt. Wie in der Voruntersuchung gezeigt wurde, ist es ausreichend drei Reaktoren zu betrachten.
- Als Referenz wird ein konstanter Wert gesetzt, der leicht oberhalb des Wertes eines als optimal angenommenen Betriebes liegt. Dieser ergibt sich aus der Summe über drei Reaktoren mit dem effizientesten Betriebspunkt bei $\delta = 0.0017$ (siehe Abbildung 38) zu $r_k = 3 * 0.0017 = 0.0051$.
- Mit s_k , der sogenannten Slack-Variable, wird eine weiche Betriebsgrenze umgesetzt. Die Slack-Variable wird als Optimierungsvariable eingeführt, die immer dann unter steigenden Kosten positiv wird, wenn eine Betriebsgrenze überschritten wird.
- Es wurde eine Abtastzeit von 180 Sekunden und ein Prädiktionshorizont von 10 Schritten gewählt, um eine Zeit von 1800 Sekunden zu erzielen.

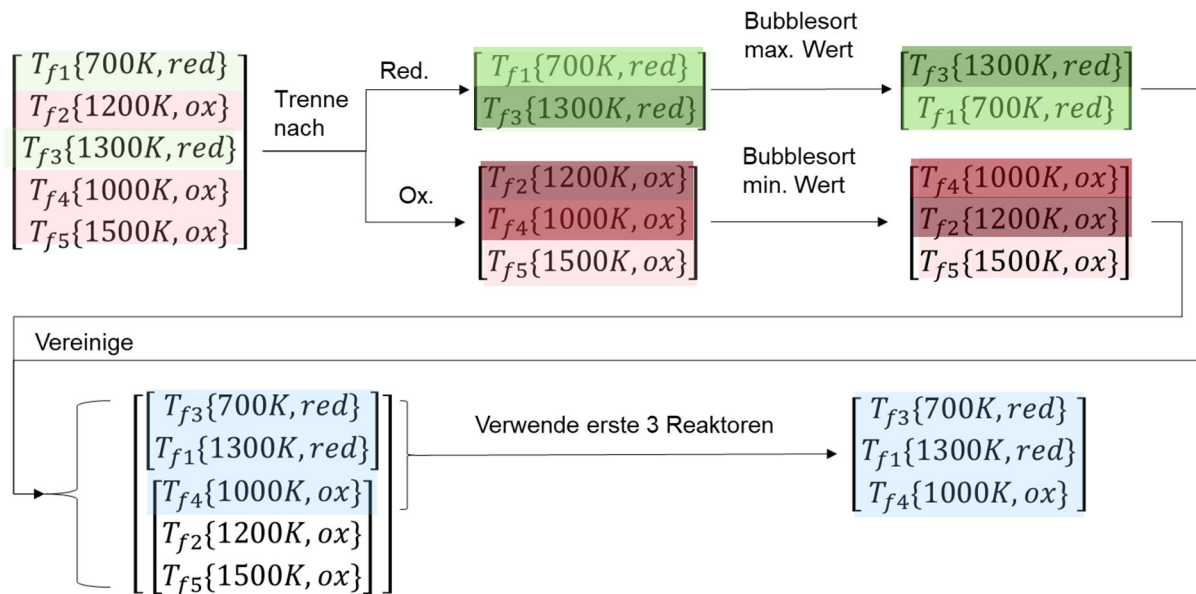


Abbildung 44 Heuristik zur Sortierung und Auswahl von drei Reaktoren

Im ersten Schritt werden die Reaktoren in die Gruppen Reduktion und Oxidation aufgeteilt. Die Reaktoren in der Reduktionsphase werden nach der höchsten Temperatur sortiert, da Reaktoren mit einer höheren Temperatur mit weniger Energieaufwand zum optimalen Punkt des Phasenwechsels gebracht werden können.

In der Oxidationsgruppe wird nach absteigender Reihenfolge sortiert, da die Wasserstoffproduktion bei geringeren Temperaturen unterhalb von ca. 900 °C einsetzt. Je schneller ein Reaktor ausreichend abgekühlt ist, darf er wieder reduziert werden. Anschließend werden beide Listen, angeführt von den Reduktionsgruppe, wieder zusammengeführt, wobei die ersten drei Reaktoren der MPR zugeleitet werden. Werden Reaktoren in der Oxidationsphase von der MPR berücksichtigt, so wird ihr Reduktionsgrad mit einer Null multipliziert, sodass sie keinen Einfluss auf die Kostenfunktion nehmen und nicht bestrahlt werden, bis sie in die Reduktionphase wechseln.

C.2.4.1. Integrationstest der MPR ins Gesamtsystem und Erprobung mit einem virtuellen Heliostatenfeld

In einem ersten Schritt wurde eine Simulation aufgebaut, in der fünf virtuelle Reaktoren und die Regelung jeweils getrennt in zwei MATLAB-Instanzen auf einem PC, und STRAL auf einem weiteren PC laufen (siehe Abbildung 45). STRAL übernimmt dabei sowohl die Simulation des virtuellen Heliostatenfeldes als auch die Steuerung der Strahlungsleistung. Die Daten werden per OPC UA Protokoll ausgetauscht und in einer SPS zwischengespeichert.

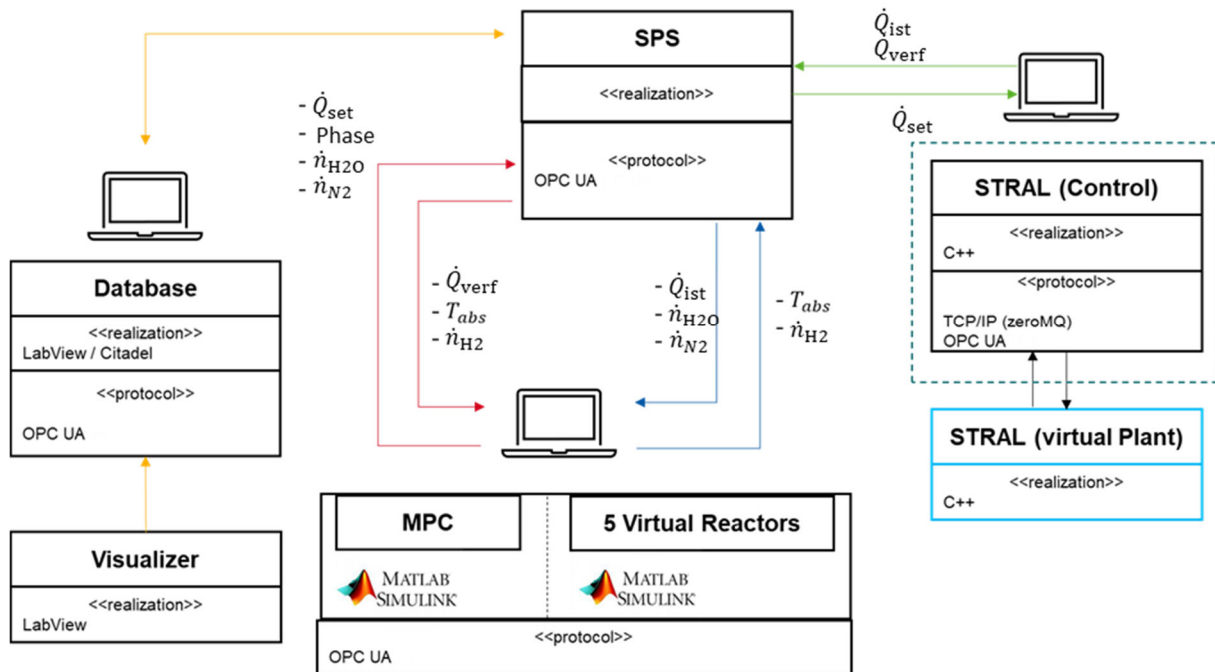


Abbildung 45 Kommunikationsstruktur zwischen den Rechnern

Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen die Simulationsergebnisse zur besseren Übersicht in zwei Zeitabschnitten für jeweils eine Stunde. Die Größen der fünf Reaktoren sind in unterschiedlichen Farben dargestellt (blau, rot, violett, grün, gelb). Zusätzlich illustrieren die Verläufe in türkis die Grenztemperatur von 1400 °C bzw. eine summierte Größe beim Stoffstrom des Wasserstoffes und bei der Solarstrahlung. In gestrichelter Linie sind bei der Sonnenstrahlung die Sollwerte, in durchgezogener Linie die tatsächlichen Werte abgebildet. Angemerkt sei auch, dass in diesem Versuch die Aufheizratenbegrenzung noch nicht aktiviert wurde. Als verfügbare Leistung wurde ein Wert von 260 kW angenommen.

Im Versuch ist zu sehen, wie die Reaktoren seriell bestrahlt werden und bis zur Grenztemperatur aufgeheizt werden. Um diese nicht zu überschreiten, bleibt ein Teil der verfügbaren Leistung übrig, die auf einen weiteren Reaktor von der MPR übertragen wird. An dem Verlauf der summierten Solarstrahlung ist zu sehen, dass die tatsächliche Strahlung höher ausfällt als die geforderte. Diese addiert sich hauptsächlich durch Spillage auf den unbeabsichtigt bestrahlten Reaktoren zusammen. Auch der rot markierte Reaktor erhält Spillage, während er nahe der Grenztemperatur betrieben wird, wodurch er diese leicht überschreitet. Ansonsten wird die Grenztemperatur sicher eingehalten, obwohl die Fronttemperatur nicht messbar ist.

Bei dem gemittelten Reduktionsgrad ist sehr gut zu sehen, dass die MPR die Reaktoren im Bereich des Effizienzoptimums betreibt (roter Streifen). Damit bestätigt die MPR die Parameterstudie aus Abschnitt C.2.1.2 und weist ein plausibles Verhalten nach. Die Überhöhung des rot markierten Reaktors ist wieder auf die unbeabsichtigte Temperaturüberhöhung aufgrund der Spillage zurückzuführen. Nach dem Anfahrvorgang sind die Reaktorkomponenten vorgeheizt, sodass sich ab der zweiten Hälfte des Versuches ein annähernd konstanter Wasserstoff Strom herausbildet.

Unter annähernd idealen, simulativen Bedingungen kann die MPR einen geregelten, optimalen Betrieb umsetzen und die Betriebsgrenzen einhalten.

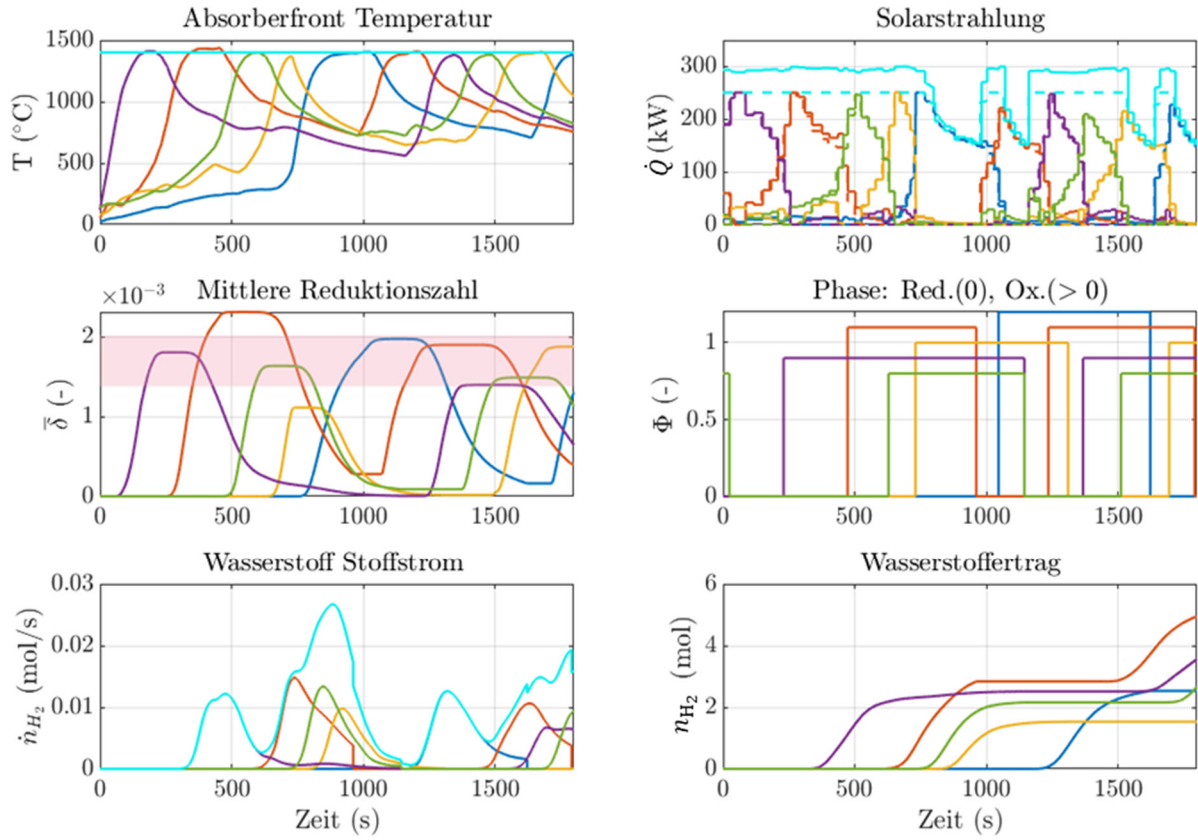


Abbildung 46 Integrationstest mit virtuellen Heliostatenfeld in STRAL: 0-1800 s

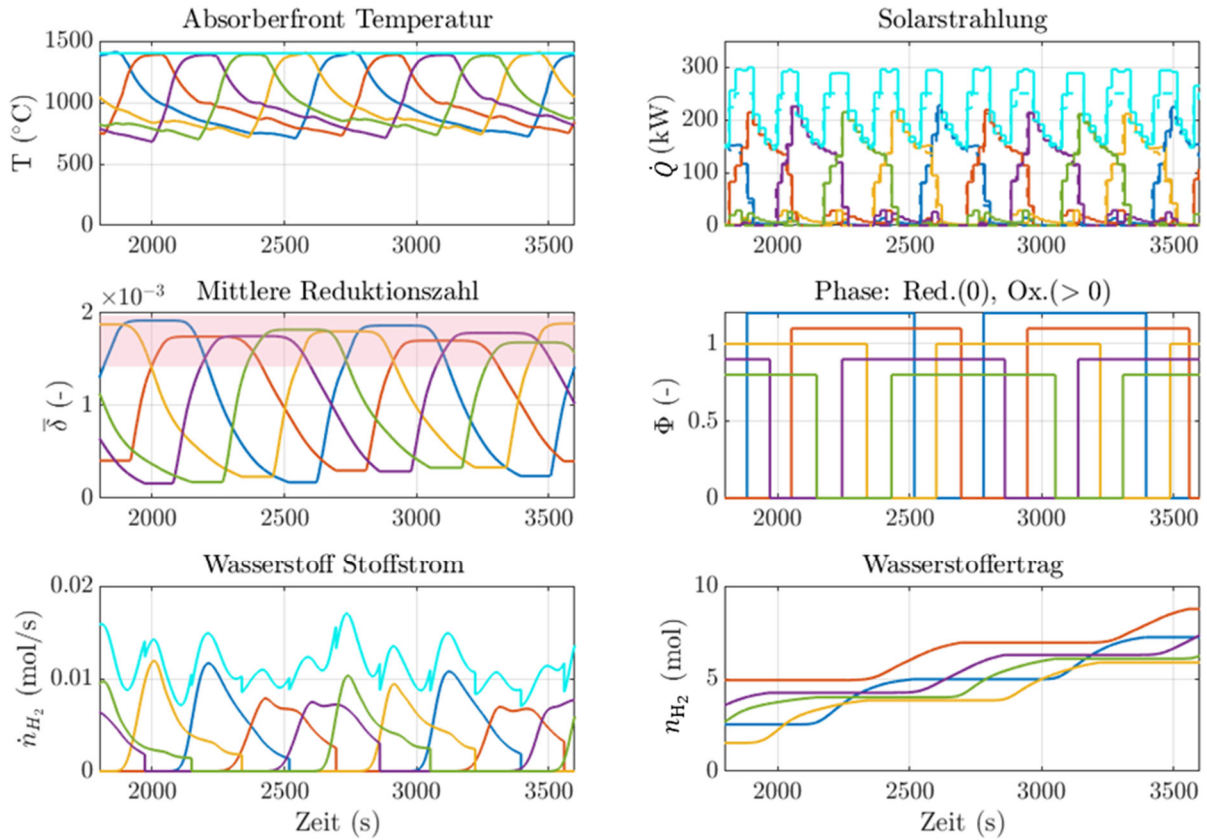


Abbildung 47 Integrationstest mit virtuellen Heliostatenfeld in STRAL: 1800-3600 s

C.3. Arbeitspaket 3: Anpassung der Wolkenkameravorhersage (CSPS, DLR)

C.3.1. Erhöhung der Zeitauflösung (AP3.1)

Ziel dieses APs war die Flexibilisierung des Prozesstakts (Updates der Vorhersagen) von bisher 30 Sekunden. Erwartet wurde, dass eine Aktualisierung etwa alle 10 Sekunden benötigt wird, um den Anforderungen resultierend aus AP1 und AP2 zu entsprechen. Dazu mussten Anpassungen in der Software und in der Kameraansteuerung gemacht werden, die bisher auf den fixen Prozesstakt festgelegt waren. Um eine häufigere Berechnung der Vorhersagen zu erreichen, musste weiterhin die Rechenzeit so stark wie möglich reduziert werden.

Der Code wurde auf rechenintensive Abschnitte analysiert, um diese Teile dann gezielt zu optimieren. Wo möglich wurde die Berechnung auf die GPU (Graphics Processing Unit) ausgelagert. Heutige Systeme können mit sehr leistungsfähigen GPUs ausgestattet werden, daher konnte hier ein großer Zeitvorteil erreicht werden.

Zur Validierung und Berechnung der Rechenzeiten wurden Bild- und meteorologische Daten aus dem Validierungszeitraum aus Jülich verwendet, da diese Daten ein breites Spektrum an möglichen Wetterbedingungen abdecken (freier Himmel, leichte Bewölkung, starke Bewölkung, komplett bedeckt). Diese Daten sind vom 02/03/04/05/07/09/16/21/23. September 2019, s. Abbildung 48. Die bisherige Rechenzeit (ohne Bildaufnahme) lag bei einem 4-Kamera-System im Mittel bei 12s. Sie konnte in der Validierung mit historischen Daten um 50% auf 6s reduziert werden. Im Echtzeitbetrieb sind also Rechenzeiten von ca. 10s zu erwarten. Auch die verwendete Hardware hat einen großen Einfluss auf die Rechenzeit. Die obigen Angaben sind konkret auf den in Jülich verwendeten "WobaS-Computer" bezogen.

Die Rechenzeit wurde im realen Echtzeitbetrieb noch leicht höher erwartet (ca. 2s zusätzlich), da hier noch die Bilddaten zusätzlich aufgenommen werden müssen.

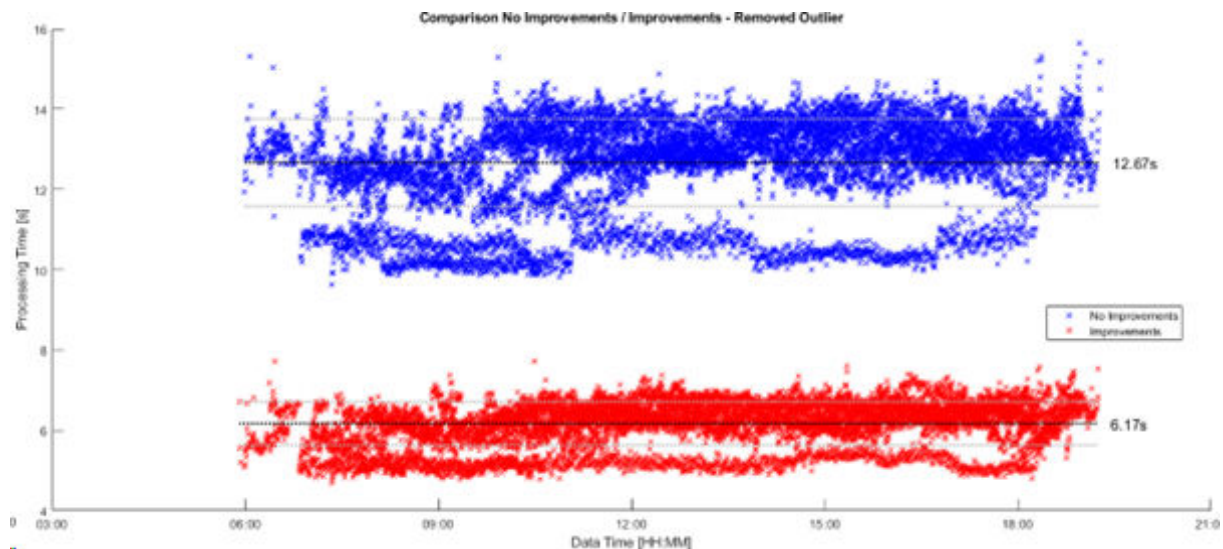


Abbildung 48 Rechenzeit in Sekunden für die Tage 02/03/04/05/07/09/16/21/23. September 2019; blau = ohne Optimierungen; rot = mit Optimierungen; Ausreißer wurden entfernt

Im Echtzeitbetrieb waren die erwarteten Rechenzeiten überwiegend beobachtbar. Das folgende Beispiel vom 17.10.2023 (siehe Abbildung 49) ist bereits eine Beobachtung aus dem Echtzeitbetrieb mit der probabilistischen Vorhersage (s. AP 3.2), welche noch deutlich rechenintensiver ist als die Ausgabe der deterministischen Vorhersage mit dem Stand der Software vor Projektbeginn.

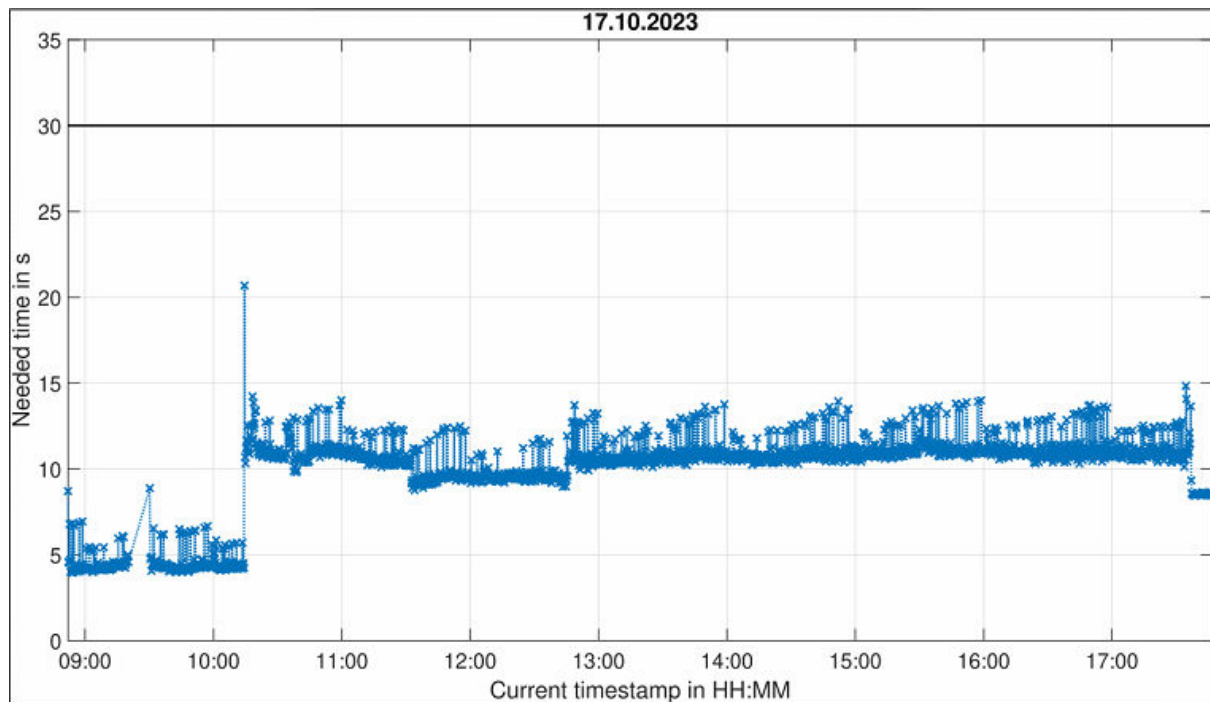


Abbildung 49 Rechenzeit in Sekunden für einen beispielhaft ausgewählten Tag

Bei der Revision der Software war aufgrund der Abhängigkeit von der verwendeten Computerhardware ein Augenmerk auch darauf zu legen, sowohl die Update-Rate als auch die Auslagerung von Rechenschritten auf die GPU nicht irreversibel und "hard-coded" durchzuführen, da es in der kommerziellen Anwendung vorkommen könnte (und nach Erfahrung von CSPS auch kommt), dass Anwender die Software auf virtuellen Computern (Virtual Machine, VM) oder Servern ohne dezidierte/leistungsfähige Grafikkarte betreiben wollen. Ein Motiv für eine solche kundenseitige Einschränkung kann zum Beispiel sein, dass IT-Sicherheitsrichtlinien die Integration eines vom Lieferanten bereitgestellten Computers untersagen, oder die Einbindung in die Sicherheitsarchitektur zu aufwändig wird. In einem solchen Fall müsste die Auslagerung mit einfachen Anpassungen wieder rückgängig gemacht oder deaktiviert werden und die Update-Rate gemäß der Leistungsfähigkeit des verwendeten Rechners angepasst werden können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ziele von AP 3.1 durch Reduktion der Rechenzeit und Flexibilisierung der Update-Rate erreicht wurden.

C.3.2. Erstellung probabilistischer Vorhersagen (AP 3.2)

Probabilistische Vorhersagen sollen im Sinne von „quantile forecasts“ erstellt werden. Bei „quantile forecasts“ werden historische Vorhersagen zunächst nach den vorherrschenden Bedingungen (z.B. Sonnenstand, Bedeckungsgrad, Wolkenklassen, Bewegungsvektoren, Variabilität, ...) klassifiziert. Anschließend werden für die verschiedenen Klassen Verteilungsfunktionen mit den historischen Vorhersagefehlern generiert. Den aktuellen Vorhersagen werden aus den entsprechenden Verteilungsfunktionen Unsicherheiten mit unterschiedlichen Überdeckungswahrscheinlichkeiten zugeordnet, die die „Quantilsvorhersagen“ darstellen. Diese zusätzliche Information gibt dem Anwender die Möglichkeit, die Zuverlässigkeit der Vorhersage unter den gegebenen Bedingungen zu beurteilen und die Verwendung der Vorhersage entsprechend anzupassen.

Die in AP3.2 durchgeführten Arbeiten wurden im Rahmen einer Veröffentlichung im Journal Solar Energy publiziert (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.060>).

C.3.2.1. Genutzte Datensätze

Für die Bestimmung und Validierung der Quantile verwendet das DLR einen PSA-Datensatz über 25 Monate (01.08.2019 bis 31.08.2021). Die Abdeckung und Auflösungen des verwendeten Datensatzes sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Lage der einzelnen PSA-Messstellen ist in Abbildung 50 dargestellt.

Tabelle 9 Abdeckung und Auflösung des genutzten Datensatzes

	Messgröße	Abdeckung	Station ID	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Vorlaufzeiten
ASI basierte Vorhersagen	DNI & GHI	8x8 km	2 & 10 (Kamera) 2 (Messtation)	20 m	30 s	21 Vorlaufzeiten von LT0 min bis LT20 min
Referenzstationen bestückt mit Pyrheliometern	DNI & GHI	9 Station verteilt auf einer Fläche von 1 km ²	1 – 9 (Messtation)	Punkt-messungen	1 min	-



Abbildung 50 Positionen der Referenzstationen und ASIs (Quelle: Google Earth Google 2021, abgerufen am 25. Mai 2021).

Aufgrund der starken Verzerrungseffekte von Fisheye-Objektiven in Horizontnähe werden Sonnenhöhen $<10^\circ$ nicht berücksichtigt. 93 Tage des Datensatzes sind für die Validierung der probabilistischen Vorhersagen reserviert. Die restlichen 657 Tage werden für die Bestimmung der Quantile verwendet. Beide Datensätze weisen eine vergleichbare Verteilung der DNI Variabilität auf (siehe Abbildung 51). Die Klassifikation der DNI Variabilität erfolgt nach Schroedter-Homscheidt et al. [Schr2018] mit 8 verschiedenen Klassen (siehe Tabelle 10).

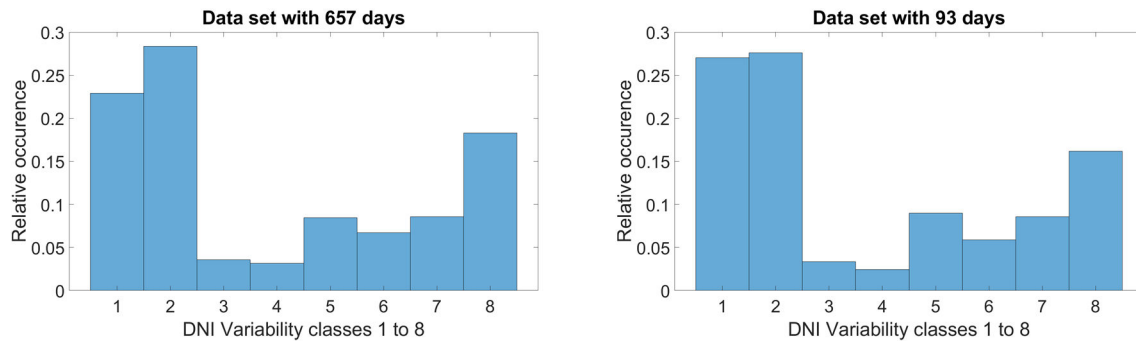


Abbildung 51 (Links) Verteilung DNI Variabilität beim Datensatz zur Ermittlung der Quantile. (Rechts) Verteilung DNI Variabilität Datensatz reserviert zur Validierung der Quantile

Tabelle 10 Kurzbeschreibung der Klassen der DNI Variabilität

Klasse	Kurzbeschreibung Klasse
1	Klarer Himmel mit geringer zeitlicher DNI-Variabilität und sehr hohem Clear Sky Index
2	Fast klarer Himmel mit geringer zeitlicher DNI-Variabilität und hohem Clear Sky Index
3	Fast klarer Himmel mit mittlerer zeitlicher DNI-Variabilität und hohem/mittlerem Clear Sky Index
4	Teilweise bewölkt mit hoher zeitlicher DNI-Variabilität und mittlerem Clear Sky Index
5	Teilweise bewölkt mit mittlerer zeitlicher DNI-Variabilität und mittlerem Clear Sky Index
6	Teilweise bewölkt mit hoher zeitlicher DNI-Variabilität und mittlerem/geringem Clear Sky Index
7	Fast vollständig bewölkt mit mittlerer zeitlicher DNI-Variabilität und niedrigem Clear Sky Index
8	Vollständig bewölkt mit geringer zeitlicher DNI-Variabilität und sehr niedrigem Clear Sky Index

Alle DNI-Signale werden über den clear sky DNI auf den clear sky index k^* normiert.

$$k^* = DNI/DNI_{\text{clear}} \quad (77)$$

Damit werden die Einflüsse der atmosphärischen Trübung und des Sonnenstandes bei der Bestimmung der Quantile berücksichtigt.

C.3.2.2. Implementierung eines Quantil-Nowcast-Systems

Der Grundgedanke des vorgestellten Ansatzes ist, dass der wichtigste Prädiktor für die zu erwartenden Unsicherheiten die Variabilität der solaren Einstrahlung ist. Es ist intuitiv offensichtlich, dass es einfacher ist, genaue Vorhersagen bei wolkenlosem oder bedecktem Himmel mit geringen Schwankungen zu machen, als bei sehr variablen Bedingungen mit durchbrochener Wolkendecke. Daher wird hier ein Quantil-Ansatz verwendet, der auf der vorherrschenden DNI-Variabilität basiert. Dazu wird die im vorhergehenden Abschnitt vorgestellte Klassifikation verwendet. Für die Klassifizierung werden 15-Minuten-Intervalle analysiert. Für Vorhersagen basiert dieser Zeitabschnitt auf Bodenmessungen und Vorhersagen in Abhängigkeit von der Vorlaufzeit (siehe Abbildung 52).

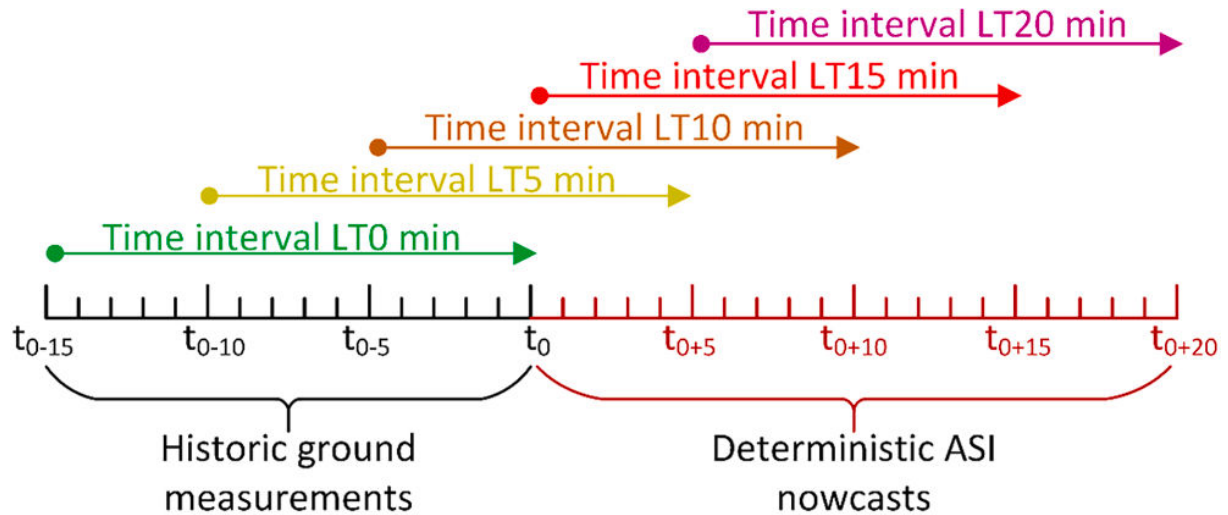


Abbildung 52 15-Minuten-Zeitintervall-Zusammensetzung aus historischen Bodenmessungen und deterministischen Vorhersagen, die für die DNI-Variabilitätsklassifikation für beispielhafte Vorlaufzeiten verwendet werden.

Für die Analyse der Quantile wird zunächst die Differenz zwischen dem vorhergesagten Clear Sky Index k_{pre}^* und den entsprechenden Referenzwerten k_{ref}^* über alle Zeitstempel t_i der neun Referenzstationen St und 21 Vorlaufzeiten LT berechnet.

$$\Delta k_{LT,St}^*(t_i) = k_{pre,LT,St}^*(t_i) - k_{ref,St}^*(t_i + LT) \quad (78)$$

Aus den Δk^* -Werten werden die Quantile mit den Wahrscheinlichkeitsniveaus τ von 0,01; 0,02; 0,03; ...; 0,99 bestimmt. Eine weitere Diskretisierung erfolgt auf der Grundlage der acht Variabilitätsklassen. Insgesamt gibt es 168 verschiedene Diskretisierungssätze für jedes Quantil, wenn die 21 verschiedenen Vorlaufzeiten berücksichtigt werden (siehe Abbildung 53).

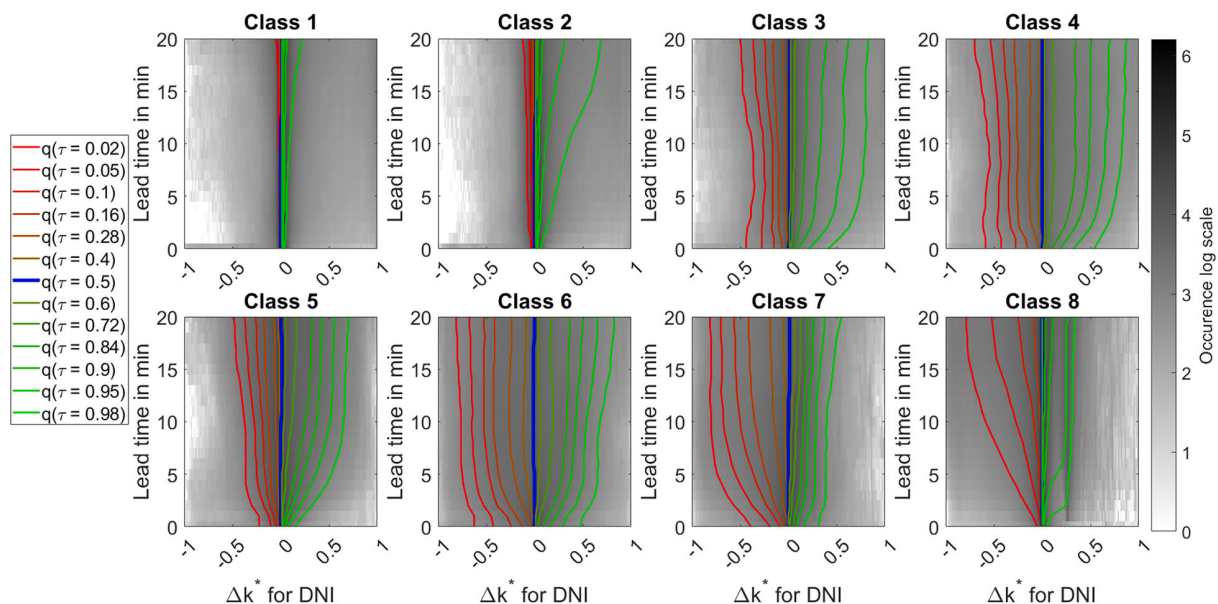


Abbildung 53 Streudiagramm, diskretisiert über die Vorlaufzeit und acht Variabilitätsklassen. Einige Quantile sind als Linien hervorgehoben.

Wie erwartet, ist in allen Fällen ein kontinuierlicher Anstieg der Unsicherheiten mit zunehmender Vorlaufzeit zu beobachten. Die geringsten Unsicherheiten werden für die Klassen 1, 2 und 8 mit geringer Variabilität beobachtet, während die höchsten Unsicherheiten für die Klassen 4 und 6 mit hoher Variabilität beobachtet werden. Ein Bias zur Überschätzung der Bestrahlungsstärke ist für die Klassen 1 und insbesondere 2 erkennbar. Diese Klassen

beschreiben Bedingungen mit hohem Clear Sky Index und vereinzelt Cirruswolken. Frühere Studien haben gezeigt, dass die Wolkensegmentierung für solche Cirruswolken die höchsten Unsicherheiten aufweist [Fabel2022]. Ein Bias in die entgegengesetzte Richtung ist besonders deutlich für die Klassen 7 und 8, die Bedingungen mit niedrigem oder sehr niedrigem Clear Sky Index und starker Bewölkung beschreiben. Dies deutet darauf hin, dass unter diesen fast vollständig bewölkten Bedingungen einzelne Wolkenlücken teilweise übersehen werden.

Der probabilistische Nowcast wird dann auf der Grundlage des aktuellen deterministischen ASI-Nowcast mit Hilfe einer Lookup-Tabelle abgeleitet, die den Ergebnissen in Abbildung 53 entspricht. Die entsprechenden Δk^* -Werte für die gewünschten Wahrscheinlichkeitsniveaus τ werden der Lookup-Tabelle entnommen. Anschließend wird Δk^* von den deterministischen Nowcasts k_{LT}^* subtrahiert, um die gewünschten Clear Sky Index Quantile $k_{LT,\tau}^*$ zu erhalten.

$$k_{LT,\tau}^*(t_i) = k_{LT}^*(t_i) - \Delta k_{LT,1-\tau}^* \quad (79)$$

Vorhersageintervalle PI mit einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von $1 - \alpha$ werden aus Quantilpaaren abgeleitet durch $PI_{(1-\alpha)} = [q_{\tau=\alpha/2}, q_{\tau=1-\alpha/2}]$ mit α als statistischer Signifikanz. Schließlich werden die Clear Sky Indizes in DNI durch Multiplikation mit der entsprechenden Clear Sky DNI umgewandelt. Abbildung 54 zeigt sechs Beispiele für Probabilistische Vorhersagen.

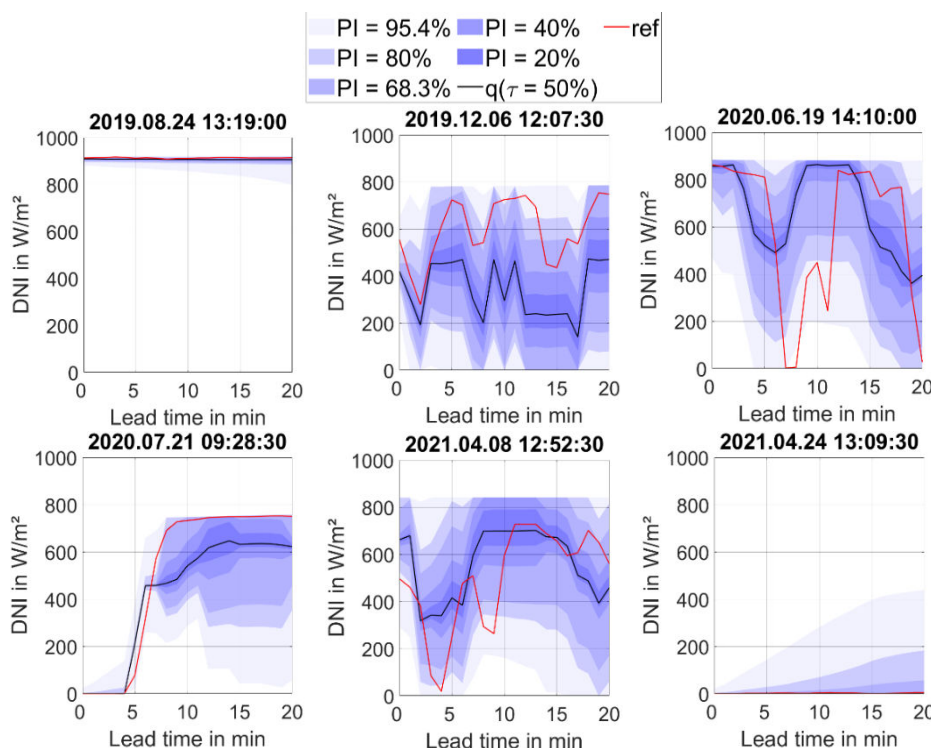


Abbildung 54 Sechs Beispiele einer probabilistischen Vorhersage mit den Überdeckungswahrscheinlichkeiten PI 95.4% 80%, 68.3%, 40% und 20% sowie der $q(\tau=50\%)$ Vorhersage und der tatsächlich beobachteten Referenz

C.3.2.3. Validierung der Quantilvorhersagen

Die Qualität probabilistischer Vorhersagen kann durch die Attribute Zuverlässigkeit, Auflösung und Schärfe charakterisiert werden. Die Zuverlässigkeit bewertet die statistische Konsistenz einer Vorhersage. Die Auflösung bewertet die Fähigkeit der Vorhersage, zwischen verschiedenen vorherrschenden Bedingungen zu unterscheiden. Die Schärfe beschreibt die Konzentration der Vorhersageverteilung, die sich ausschließlich aus den Vorhersagen selbst

ergibt. Eine probabilistische Vorhersage kann scharf, aber nutzlos sein, wenn sie unzuverlässig ist.

Typische Fehlermetriken für probabilistische Vorhersagen sind der „Intervall Score“ (IS), der „Quantil Score“ (QS) und der „Continuous Ranked Probability Score“ ($CRPS$) [Lauret2019].

$$IS_{PI} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{i,PI} - L_{i,PI}) + \frac{2}{\alpha} (L_{i,PI} - y_i) 1_{y_i < L_{i,PI}} + \frac{2}{\alpha} (y_i - U_{i,PI}) 1_{y_i > U_{i,PI}} \quad (80)$$

$$QS_{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \psi_{\tau}(y_t - \hat{y}_{t,\tau}) \quad \text{mit } \psi_{\tau}(u) \begin{cases} \tau u & \text{if } u \geq 0 \\ (\tau - 1)u & \text{if } u < 0 \end{cases} \quad (81)$$

$$CRPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_0^1 (F_{\hat{y}_i}(x) - F_{y_i}(x))^2 dx \quad (82)$$

Dabei ist L die untere Schranke, U die obere Schranke, PI das Vorhersageintervall, $F_{\hat{y}_i}$ beschreibt die kumulative Verteilungsfunktion (CDF) der Vorhersage, F_{y_i} beschreibt die CDF der entsprechenden Beobachtung als eine auf die Beobachtung y_i verschobene Heaviside-Stufenfunktion, α ist das statistische Signifikanzniveau und τ ist das Wahrscheinlichkeitsniveau.

IS konzentriert sich auf die Genauigkeit der Vorhersageintervalle. Enge und genaue Intervalle werden belohnt. Intervalle, die den tatsächlichen Wert verfehlen, werden hingegen bestraft. IS zielt vor allem auf Schärfe und Zuverlässigkeit ab. QS bewertet spezifische Quantilsprognosen, die Aufschluss darüber geben, wie gut die Prognose verschiedene Punkte in der Verteilung erfasst und zielt vor allem auf Zuverlässigkeit und Auflösung ab. $CRPS$ bewertet die Gesamtgenauigkeit der Vorhersageverteilung, indem die gesamte probabilistische Vorhersage in ein einziges Maß aggregiert wird.

Sowohl für deterministische als auch für probabilistische Vorhersagen wird empfohlen, Skill-Scores zu verwenden, die das untersuchte Modell mit einem Referenzmodell vergleichen. Der Skill-Score ss ist definiert als:

$$ss = 1 - \frac{s_{\text{model}}}{s_{\text{benchmark}}} \quad (83)$$

wobei s eine geeignete Metrik repräsentiert, im Falle probabilistischer Vorhersagen wird hierfür der $CRPS$ verwendet. Skill-Scores sind wichtig für die Bewertung und den Vergleich der Leistung von Vorhersagemodellen, da sie ein standardisiertes Maß für die Leistung einer Vorhersage im Vergleich zu einer Benchmark darstellen. Für probabilistische Vorhersagen wird üblicherweise eine klimatologische Verteilung als Benchmark verwendet. Hier wird dazu auf das etablierte Modell von La Salle et al. [LaSalle2021] zurückgegriffen.

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Validierung für den Validierungsdatensatz von 93 Tagen und die 9 Referenzstationen sowohl für das physikalische ASI- als auch für das Benchmark-Modell aufgelistet. Es werden die über die Vorlaufzeit gemittelten Ergebnisse mit den entsprechenden Standardabweichungen angegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass das verwendete Benchmark-Modell nicht auf hohe Leistungsfähigkeit ausgelegt ist. Um als Benchmark für Skill-Scores geeignet zu sein, sollten Benchmark-Modelle einfach zu implementieren sein, ausschließlich auf historischen Daten basieren, nahezu identische Scores aufweisen und statistisch konsistent sein.

Die Benchmark-Modelle zeigen nur vernachlässigbare Standardabweichungen über alle Metriken. Dies war zu erwarten, da die Benchmark-Modelle völlig unabhängig von der Vorlaufzeit sind. Im Gegensatz dazu zeigen die ASI-basierten Modelle eine höhere Standardabweichung, was auf einen signifikanten Einfluss der Vorlaufzeit auf die Vorhersageleistung hinweist.

Naturgemäß nimmt die Schärfe der Vorhersagen mit steigendem PI ab. Da der IS hauptsächlich von der Schärfe beeinflusst wird, ist ein starker Anstieg mit steigendem PI zu erkennen. Die klimatologischen Modelle sind so ausgelegt, dass sie eine möglichst hohe Zuverlässigkeit aufweisen, wobei die Schärfe der Vorhersagen keine Rolle spielt. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen des IS wider. Für QS zeigt das ASI-Modell signifikant niedrigere Werte im Vergleich zum Benchmark-Modell. Außerdem zeigt sich ein nahezu symmetrisches Muster um $\tau = 50\%$ mit niedrigeren Werten für die höchsten und niedrigsten Quantile, was auf gut definierte Quantile hinweist. Im Gegensatz dazu zeigt das Benchmark-Modell ein asymmetrisches Muster mit höheren Werten für niedrigere τ . Aufgrund der mangelnden Schärfe und des gegebenen Datensatzes, der zu ca. 59 % aus klarem Himmel besteht, werden insbesondere Quantile mit niedriger τ bestraft. Für $CRPS$, dass über die gesamte Verteilung aggregiert wird, zeigen die ASI-basierten Modelle einen deutlichen Vorteil gegenüber dem Benchmark-Modell. Dies spiegelt sich auch im Skill-Score wieder.

Tabelle 11 Validierungsergebnisse für das probabilistische ASI Modell sowie das klimatologische Benchmark Modell CSD-Clim. Die Vorhersagen werden für die 9 Referenzstationen bewertet. Für jede Metrik wird der Mittelwert Score und seine Standardabweichung über die LTs angegeben.

Metrik	ASI-Modell	CSD-Clim
IS in W/m^2 for $PI = 30\%$	144.6±43.0	545.8±0.5
IS in W/m^2 for $PI = 68.3$	242.7±90.5	792.2±1.3
IS in W/m^2 for $PI = 95.4\%$	511.1±130.1	817±1.2
QS in W/m^2 for $\tau = 20\%$	22.5±6.9	107.7±0.3
QS in W/m^2 for $\tau = 50\%$	26.0±7.7	99.3±0.1
QS in W/m^2 for $\tau = 80\%$	19.8±5.4	43.3±0.0
$CRPS$ in W/m^2	40.4±12.1	145.0±0.2
SS in %	72.13±8.35	-

Die in AP3.2 durchgeführten Arbeiten wurden im Rahmen einer Journal Publikation veröffentlicht: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.060>

C.3.3. Erhöhung der Genauigkeit (AP 3.3)

In AP 3.3 soll die Genauigkeit des Nowcasting verbessert werden. Ausgangspunkt der Arbeiten ist ein physikalisches Modell. Das physikalische Modell basiert auf einer Kette von Prozessschritten (Wolkendetektion, Wolkengeolokalisierung, Wolkennachführung, ...) und entspricht dem Entwicklungsstand vor Projektbeginn. Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene datengetriebene Deep-Learning-Ansätze entwickelt und mit dem physikalischen Modell kombiniert. Teile der Ergebnisse des Arbeitspakets wurden auf verschiedenen Konferenzen und Workshops vorgestellt:

- IEA PVPS Task 16 - All Sky Imagers Benchmarking <https://elib.dlr.de/192515/>
- EUPVSec Konferenz 2023 <https://elib.dlr.de/198714/>
- SolarPaces Konferenz 2023 <https://elib.dlr.de/201939/>
- IEA PVPS Task 16 workshop on Minutescale Forecasting <https://elib.dlr.de/204099/>

Des Weiteren flossen die Ergebnisse in eine Publikation im Journal Solar RRL (<https://doi.org/10.1002/solr.202300808>).

C.3.3.1. Genutzte Datensätze

Im Rahmen des Arbeitspakets werden 4 verschiedene Datensätze verwendet. Zunächst wird ein Datensatz verwendet, um ein Deep-Learning (DL) Modell zu trainieren. Ein weiterer Datensatz wird für die Validierung deterministischer Vorhersagen verwendet. Darüber hinaus werden die in AP3.2 verwendeten Datensätze auch in AP3.3 verwendet. Wie in AP3.2 wird ein Datensatz für die Quantilanalyse und der zweite für die Validierung probabilistischer Vorhersagen verwendet. Eine Auflistung der vier Datensätze findet sich in Tabelle 12. Die Lage der einzelnen PSA-Messstellen ist in Abbildung 50 dargestellt.

Tabelle 12 Verwendete Datensätze und ihre Anwendung in diesem Arbeitspaket. Station ID wie in Abbildung 50.

Anwendung	Station ID	Zeitraum
DL Training	1 (Kamera) 1 (Messtationen)	>3000000 Datenpunkte innerhalb 2015-2021
deterministische Validierung	2 & 10 (Kamera) 1-9 (Messtationen)	28 Tage innerhalb 2019
Quantile Analyse	2 & 10 (Kamera) 1-9 (Messtationen)	657 Tage innerhalb 2019-2021
probabilistische Validierung	2 & 10 (Kamera) 1-9 (Messtationen)	93 Tage innerhalb 2019-2021

C.3.3.2. Entwicklung und Implementierung von Deep-Learning-Ansätzen

Im Rahmen des Projekts wird ein Deep-Learning (DL) Vorhersagemodell entwickelt. Das Modell wird End2end trainiert, d.h. es werden keine physikalischen Prozesse wie Wolkendynamik oder Transmission explizit modelliert, sondern das Modell lernt die Korrelation von Eingangs- und Ausgangsdaten. Neben den Himmelsbildern werden dem Modell zusätzliche Zeitreihendaten, wie z.B. frühere Strahlungsmessungen, zugeführt. Die Ausgabe des Modells ist ein skalarer GHI- und DNI-Wert für jede Vorlaufzeit von 1 bis 20 Minuten. Um die räumlich-zeitlichen Abhängigkeiten der Bestrahlungsstärke und der Wolkendynamik zu berücksichtigen, integriert das Modell eine Transformator-basierte Architektur. Genauer gesagt besteht es aus zwei Zweigen, die jeweils eine separate Transformatorarchitektur zur Extraktion von Merkmalen aus Bildern und Zeitreihendaten enthalten.

Im ersten Zweig werden Merkmale aus Zeitreihen mit dem Modell aus Zerveas et al. [Zerveas2021] gelernt. Als Eingabedaten werden 30-minütige Sequenzen von GHI-, DNI- und DHI-Messungen sowie berechnete Werte von Sonnenhöhe- und -azimut verwendet, um zeitliche Muster zu lernen. Die Länge der resultierenden Repräsentationsvektoren ist ein auf 512 gesetzter Hyperparameter.

Für die Extraktion der Bildmerkmale wird die timeSformer-Architektur verwendet [Bertasius2021]. Durch die Anwendung eines kombinierten räumlich-zeitlichen Aufmerksamkeitsmechanismus soll das von der ASI beobachtete Wolkenverhalten gelernt werden. Hierbei wird ein kürzeres Zeitfenster von 5 Minuten betrachtet. Während die räumliche Aufmerksamkeit durch die zugrundeliegende Vision-Transformer-Architektur erreicht wird [Doso2020], wird die zeitliche Aufmerksamkeit auf den gleichen Bildausschnitt der gesamten Bildsequenz angewendet und folgt damit der Methode der "geteilten räumlich-zeitlichen Aufmerksamkeit" aus [Bertasius2021]. Wie bei der Zeitreihendarstellung ist die Länge des Repräsentationsvektors auf 512 festgelegt.

Zur endgültigen Vorhersage werden die beiden Repräsentationsvektoren verkettet und in ein „multi-layer-perceptron“ (MLP) eingespeist. Auf diese Weise werden Vorhersagen für Vorlaufzeiten von 1 bis 20 Minuten für jeden Zeitschritt berechnet. Eine schematische Darstellung des gesamten Ansatzes ist in Abbildung 55 dargestellt. Da beide Modellzweige End2end trainiert werden, werden sie ohne weiteres Pretraining parallel optimiert.

Neben diesem DL-Modell wird auch ein hybrides Modell verwendet. Das hybride Modell kombiniert das bestehende physikalische Modell mit dem neuen DL-Modell. Für die Kombination wird das in [Nouri2022] beschriebene Verfahren verwendet.

Sowohl für das DL-Modell als auch für das hybride Modell wird die in AP3.2 beschriebene Quantilanalyse angewendet. Damit können auch für diese Modelle probabilistische Vorhersagen bereitgestellt werden.

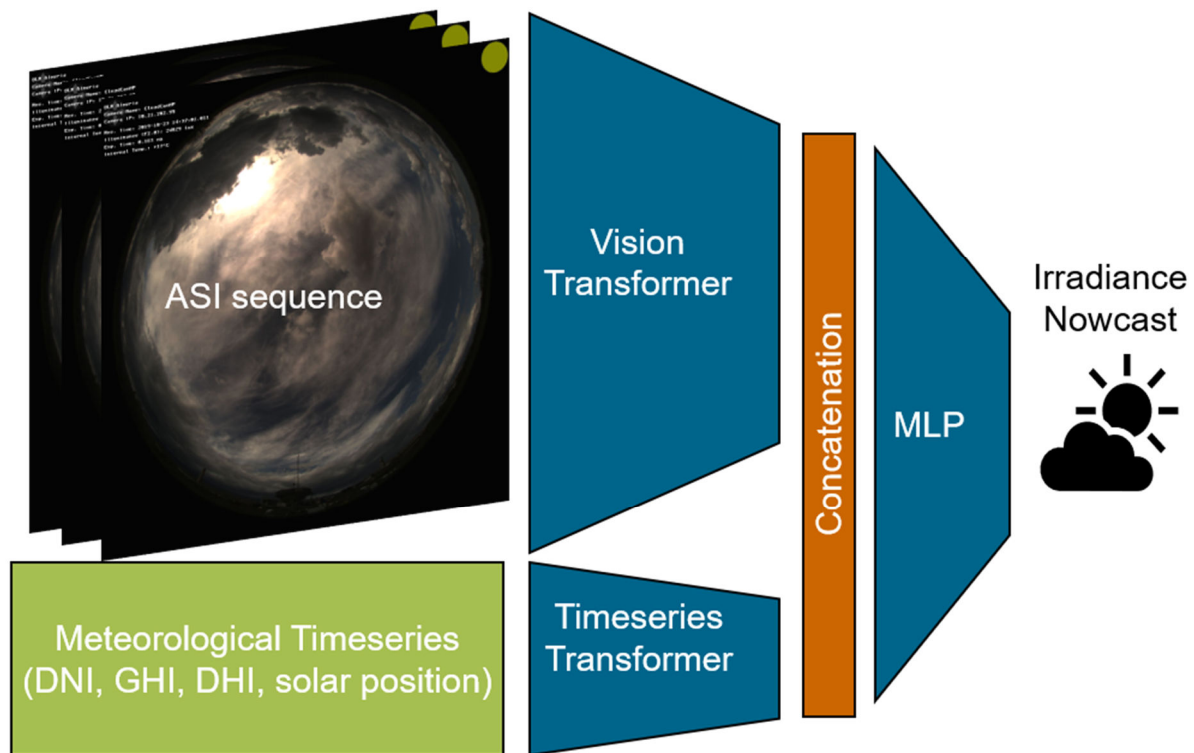


Abbildung 55 Schematische Darstellung der Erzeugung von Nowcasts mit dem DL End2end-Modell

C.3.3.3. Validierung von Deep-Learning-Ansätzen

Typische Fehlermetriken für deterministische Vorhersagen sind der *Bias*, der „mean absolute error“ (*MAE*) und der „root mean square error“ (*RMSE*):

$$Bias = 1/n \sum_{i=1}^n \hat{y}_i - y_i \quad (84)$$

$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (85)$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (86)$$

wobei $\hat{y}$ die vorhergesagte Bestrahlungsstärke und y die gemessene Bestrahlungsstärke ist. *Bias* gibt die systematische Abweichung an, *MAE* gibt die mittlere Fehlergröße an und *RMSE* weist darauf hin, dass große Fehler vorliegen. Wie bei probabilistischen Vorhersagen wird auch bei deterministischen Vorhersagen die Verwendung eines Skill-Scores empfohlen. Für

deterministische Vorhersagen werden Persistenz Modelle als Referenz beim Skill-Score verwendet [Kumler2019].

Die deterministischen Validierungsergebnisse für das physikalische ASI-Modell und das neue DL-Modell sind in Tabelle 13 dargestellt. Darüber hinaus sind auch die Ergebnisse eines Hybridmodells dargestellt, dass aus dem physikalischen ASI-Modell und dem DL-Modell besteht. Das neue DL-Modell zeigt eine deutliche Reduktion aller Fehlermetriken gegenüber dem ASI-Modell. Der durchschnittliche Skill-Score steigt um 14%-Punkte. Das hybride Modell zeigt eine weitere Verbesserung in Bezug auf *MAE*, *RMSE* und den Skill-Score. Allerdings ist der Bias des hybriden Modells etwas höher als der Bias des DL-Modells.

Tabelle 13 Validierungsergebnisse der deterministischen Vorhersagen für die verschiedenen Modelle. Die Vorhersagen werden für die 9 Referenzstationen bewertet. Für jede Metrik wird der Mittelwert-Score und seine Standardabweichung über die LTs angegeben.

Metrik	ASI-Modell	DL-Modell	Hybrid
<i>Bias</i> in W/m ²	9.5±5.0	3.5±2.7	8.7±1.4
<i>MAE</i> in W/m ²	63.4±17.7	58.7±15.7	54.7±15.5
<i>RMSE</i> in W/m ²	133.3±32.2	111.2±25.5	109.5±25.8
<i>SS</i> in %	8.3±2.6	22.7±7.4	24.1±6.0

Die Ergebnisse der probabilistischen Validierung auf Basis der bereits in Abschnitt C.3.2 vorgestellten Metriken sind in Tabelle 14 dargestellt. Analog zu den deterministischen Vorhersagen zeigt das neue DL-Modell auch bei den probabilistischen Vorhersagen eine signifikante Leistungsverbesserung gegenüber dem physikalischen ASI-Modell. Darüber hinaus zeigt sich auch bei den probabilistischen Vorhersagen ein leichter Vorteil durch die Hybridisierung der beiden Modelle. Insgesamt konnte der durchschnittliche Skill-Score nochmals um 8%-Punkte gesteigert werden.

Tabelle 14 Validierungsergebnisse der probabilistischen Vorhersagen für die verschiedenen Modelle. Die Vorhersagen werden für die 9 Referenzstationen bewertet. Für jede Metrik wird der Mittelwert Score und seine Standardabweichung über die LTs angegeben.

Metrik	ASI-Modell	DL-Modell	Hybrid
<i>IS</i> in W/m ² for <i>PI</i> = 30%	144.6±43.0	121.1±31.0	115.2±29.5
<i>IS</i> in W/m ² for <i>PI</i> = 68.3	242.7±90.5	199.9±49.7	189.9±47.2
<i>IS</i> in W/m ² for <i>PI</i> = 95.4%	511.1±130.1	456.6±96.0	433.4±91.1
<i>QS</i> in W/m ² for τ = 20%	22.5±6.9	19.1±4.8	18.2±4.6
<i>QS</i> in W/m ² for τ = 50%	26.0±7.7	22.1±5.7	21.1±5.5
<i>QS</i> in W/m ² for τ = 80%	19.8±5.4	16.2±4.1	15.5±3.9
<i>CRPS</i> in W/m ²	40.4±12.1	33.9±9.0	32.4±8.6
<i>SS</i> in %	72.13±8.35	77.00±6.1	80.21±6.4

Die Projektziele einer Erhöhung der Genauigkeit wurden somit sowohl für die deterministischen als auch für die probabilistischen Vorhersagen erreicht. Es wurde jedoch auch beobachtet, dass die klassischen Optimierungsverfahren, die auf *RMSE* und *CRPS* basieren, zwar zu einer Erhöhung der Genauigkeit der vorhergesagten Energiemenge führen, aber leider auch einen Glättungseffekt mit sich bringen. Dies führt dazu, dass die Amplituden für relevante Rampen teilweise unterschätzt werden. Dieser Glättungseffekt ist besonders bei leistungsstarken DL-Modellen sichtbar [Paletta2021, Fabel2024]. Für einige Anwendungsfälle ist die reine Optimierung auf Energiemengen durchaus vorteilhaft. Dies gilt insbesondere für den Energiehandel oder die Regelung großer Verteilnetze, bei denen räumliche Aggregationseffekte den negativen Einfluss lokaler Rampen stark reduzieren. Solche lokalen Rampen können jedoch bei der Regelung einzelner Solaranlagen oder in Verteilnetzen mit einzelnen zentralen Großkraftwerken durchaus problematisch sein. Es besteht daher weiterer

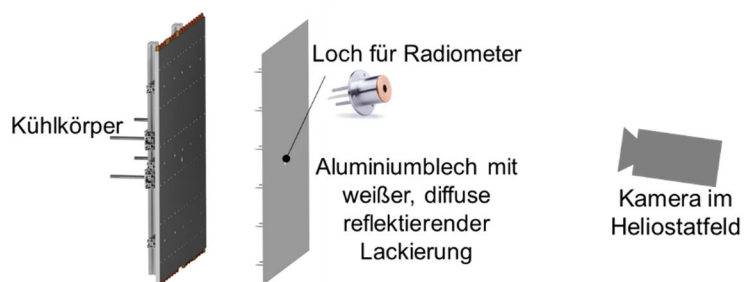
Forschungsbedarf zur Optimierung hochauflösender Vorhersagesysteme bezüglich Rampen. Generative Ansätze (z.B. Video-Prediction) erscheinen hier vielversprechend.

C.4. Arbeitspaket 4: Konstruktion, Bau und Installation von Reaktorattrappen (DLR)

In diesem Arbeitspaket sollten vier Reaktorattrappen konstruiert, gebaut und installiert werden, die die gleiche Art von Signalen wie der reale Reaktor aus dem Projekt ASTOR-ST liefern. Diese Signale sind Temperaturen und Massenströme, eine Flussdichte kann nicht während der Bestrahlung auf dem realen Reaktor gemessen werden. Wie in Abbildung 56 b) gezeigt, sind die Reaktorattrappen diffus reflektierende beschichtete Kühlkörper, die in ihrem Zentrum ein Radiometer haben, mit dem die Flussdichte in einem Punkt gemessen werden kann. Mit einer Kamera wird die Verteilung der Flussdichte auf den Attrappen gemessen und dann mit dem Radiometerwert kalibriert; dies wird über eine angepasste Version des Flussdichtemesssystems FMAS realisiert. Aus der Flussdichteverteilung wird dann über das detaillierte Reaktormodell aus AP1 ermittelt, welcher Zustand in einem realen Reaktor herrschen würde, wenn er am Ort der Attrappe platziert wäre. Aus dem Modell werden Signale für Temperaturen und Massenströme an den gleichen Messpunkten wie im realen Reaktor generiert und auch auf die gleiche Weise an den OPC-Server gesendet (s. AP5). Von dort kann u.a. die Modellprädiktive Regelung auf die Daten zugreifen und sie verwenden. Im Idealfall ist eine Reaktorattrappe für die Regelung nicht vom realen Reaktor zu unterscheiden. So konnte die Regelung kostengünstig ohne den Bau mehrerer Reaktoren getestet werden.

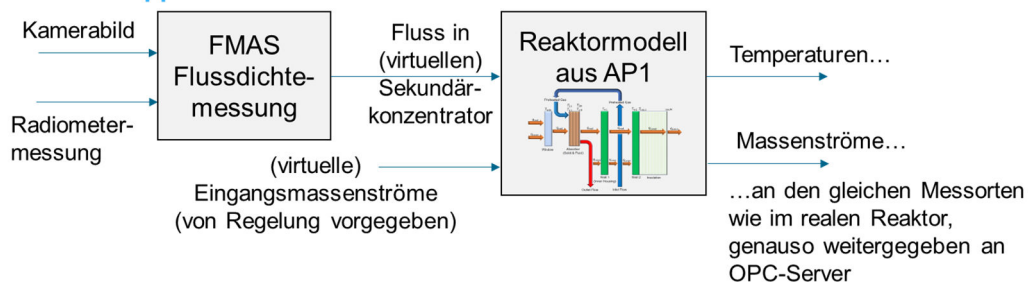


a) Anordnung auf der Forschungsebene des Solarturms



b) Aufbau einer Reaktorattrappe

reale Messungen auf Reaktorattrappe



c) Umwandlung der realen Messdaten auf den Reaktorattrappen in Messwerte in virtuellen Reaktoren

Abbildung 56: Anordnung, Aufbau und Datenverarbeitung der Reaktorattrappen auf dem Solarturm Jülich

C.4.1. Konstruktion (AP4.1)

Bei der im Mai 2021 begonnenen Auslegung und Konstruktion der Reaktorattrappen wurde iterativ von einer groben Auslegung zu einer immer detaillierteren Konstruktion vorgegangen, da viele Randbedingungen beachtet werden mussten und diese sich meist erst im Laufe des Projektes konkretisierten. Dazu gehörten:

- Beschichtung/Lackierung der bestrahlten Oberfläche
- Kühlung der Attrappen
- Abführung der Wärme über Kühlsystem
- Anschluss des Kühlsystems an Kühlkreislauf des Solarturms
- Auswahl des Kühlmittels
- Montagemöglichkeiten am Strahlenschutz auf der Forschungsebene
- Prüfung der (Montage-)Sicherheit / Statik
- Maximal zulässige Flusssichte auf Strahlungsschutz neben den Attrappen

Der Übersichtlichkeit halber sollen hier primär die finalen Ergebnisse dargestellt werden.

C.4.1.1. Anordnung und Montagemöglichkeit der Attrappen am STJ

Zusammen mit dem Betriebspersonal des Solarturmes Jülich (STJ) und Mitarbeitern aus dem Projekt ASTOR-ST wurde zunächst die Anordnung der Reaktorattrappen um den Reaktor aus dem Projekt ASTOR-ST festgelegt, wie es in Abbildung 57 zu sehen ist. Um die Attrappen zu befestigen, wurden einige der in Abbildung 58 gezeigten Strahlenschutzelemente entnommen und mit einer Tragestruktur für die Attrappen ersetzt.

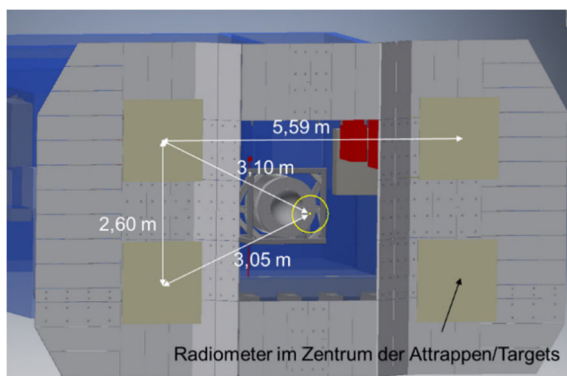


Abbildung 57: im Mai 2021 geplante Anordnung der Reaktorattrappen um den Reaktor aus dem Projekt ASTOR-ST



Abbildung 58: Elemente des Strahlenschutzes der Forschungsebene des STJ, die zur Anbringung der Reaktorattrappen teilweise entnommen wurden

C.4.1.2. Reaktorattrappen

Die konstruierten Reaktorattrappen sind in Abbildung 59 dargestellt. Eine Reaktorattrappe besteht aus mehreren Aluminiumkühlkörpern, die mit einer Tragestruktur und Befestigungsbolzen (Gewindestangen) an den Befestigungsstreben der Forschungsebene angebracht wurden (s. AP4.3).

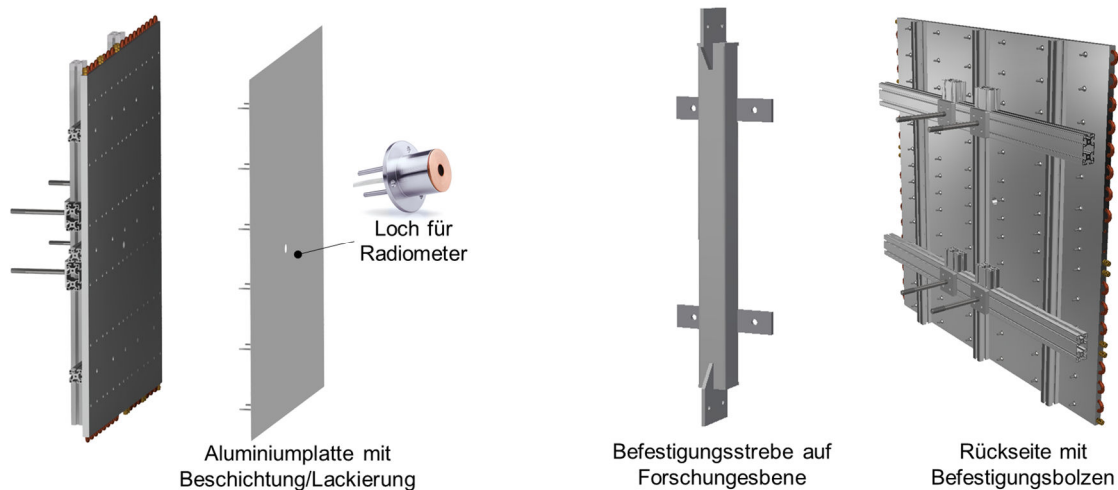


Abbildung 59: Reaktorattrappe

Im Zentrum der Attrappe befindet sich die Öffnung für ein Radiometer, das für die Flussdichtemessung benötigt wird. Auf die Vorderseite wird eine dünne Aluminiumplatte über bolzensgeschweißte Verbindungsschrauben befestigt, wie es in Abbildung 60 gezeigt ist.

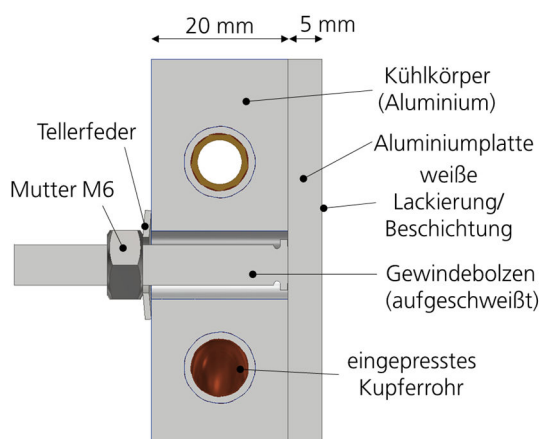


Abbildung 60: Verbindung der beschichteten Aluminiumplatte mit den Kühlkörpern

Die Platte ist an der Vorderseite diffus weiß lackiert. Die Konstruktion bietet den Vorteil, dass die Vorderseite bei Verschmutzung kostengünstig ausgetauscht werden kann.

C.4.1.3. Kühlung von Reaktorattrappen und Sekundärkonzentrator

Von den Reaktorattrappen wird nicht die gesamte Strahlung reflektiert. Die absorbierte Wärme muss über ein Kühlsystem abgeführt werden, das im Projekt ausgelegt, beschafft und installiert wurde. Im Laufe des Projektes stellte sich außerdem heraus, dass das Kühlsystem des realen Reaktors aus dem Projekt ASTOR-ST nicht ausreicht, um auch dessen Sekundärkonzentrator ausreichend zu kühlen. Daher wurde entschieden, diesen auch über das Kühlsystem aus dem Projekt SolarFuelNow zu versorgen.

Das finale Kühlsystem in Abbildung 61 umfasst 5 parallele Stränge, 4 für die Reaktorattrappen und einen für den Sekundärkonzentrator des realen Reaktors. In den Kühlsträngen der Reaktorattrappen kann die Austrittstemperatur über das Stellen eines Ventils, z.B. V701 geregelt werden. Der Wassermassenstrom wird jeweils gemessen. Zusammen mit den Temperaturmessungen am Ein- und Ausgang kann so die absorbierte Energiemenge berechnet werden. Diese Information kann zusätzlich oder alternativ zur Messung der

Flussdichte über FMAS (siehe AP5) verwendet werden. Um die Flussdichte zu bestimmen, ist in jeder Attrappe ein Radiometer verbaut, außerdem weitere Thermoelemente zur Sicherheit. Im Strang des Sekundärkonzentrators wird nicht die Austrittstemperatur geregelt, sondern der Absolutdruck am Eintritt des Sekundärkonzentrators, der bei 3 bar liegen sollte. Übersteigt der Druck 4 bar, kann der Sekundärkonzentrator beschädigt werden. Zur ausreichenden Durchströmung der Reaktorattrappen muss ein höherer Druck vorliegen, den eine Förderpumpe erzeugt.

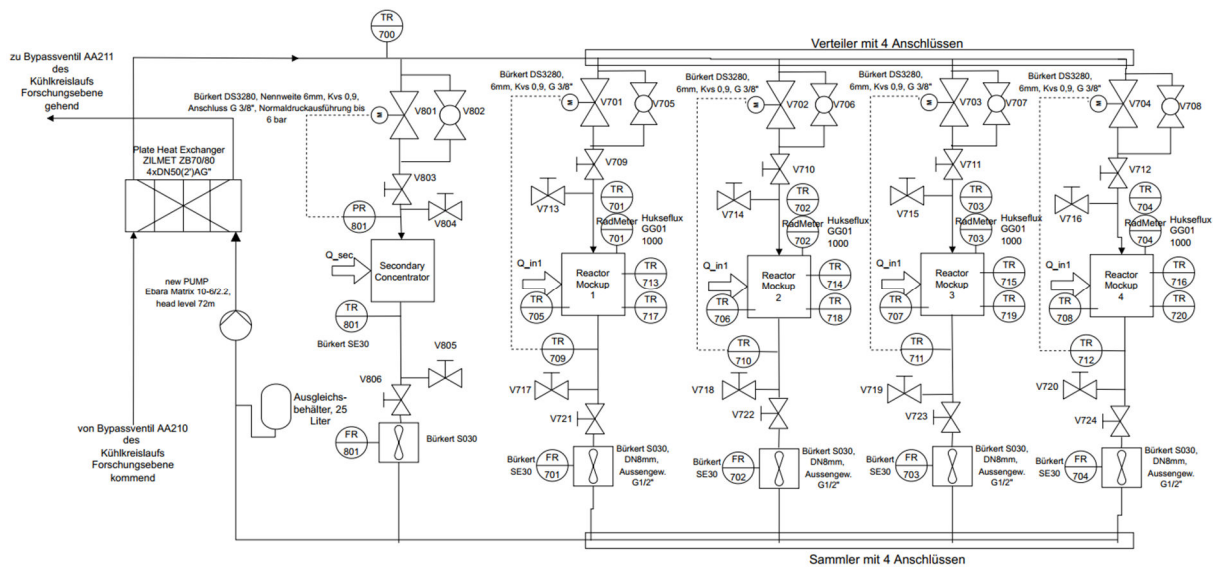


Abbildung 61: R&I-Diagramm der Reaktorattrappen

Die abzuführende Wärme der Stränge wird über einen Wärmeübertrager an den sogenannten Zwischenkühlkreis der Forschungsebene des Solarturms abgegeben, der Teil eines Luftreceiver-Teststandes ist und einen Wärmestrom von bis zu 2MW an die Kraftwerkskühlung des Solarturmkraftwerks abführen kann. Dieser kann nicht direkt angeschlossen werden, da dort ein zu hoher Druck herrscht. Ein entsprechend nötiger Wärmeübertrager wurde ausgelegt und beschafft (ZILMET ZB70/80).

Zur thermischen und hydraulischen Auslegung wurden verschiedenste Berechnungen durchgeführt, u.a. in Excel, Python und Modelica. Das Modell für das Kühlsystem in Modelica/OpenModelica ist sehr anschaulich und soll daher hier exemplarisch vorgestellt werden. Es wurde zur Auslegung und zur Simulation verschiedener Betriebszustände benutzt. Das Gesamtmodell ist in Abbildung 62 dargestellt.

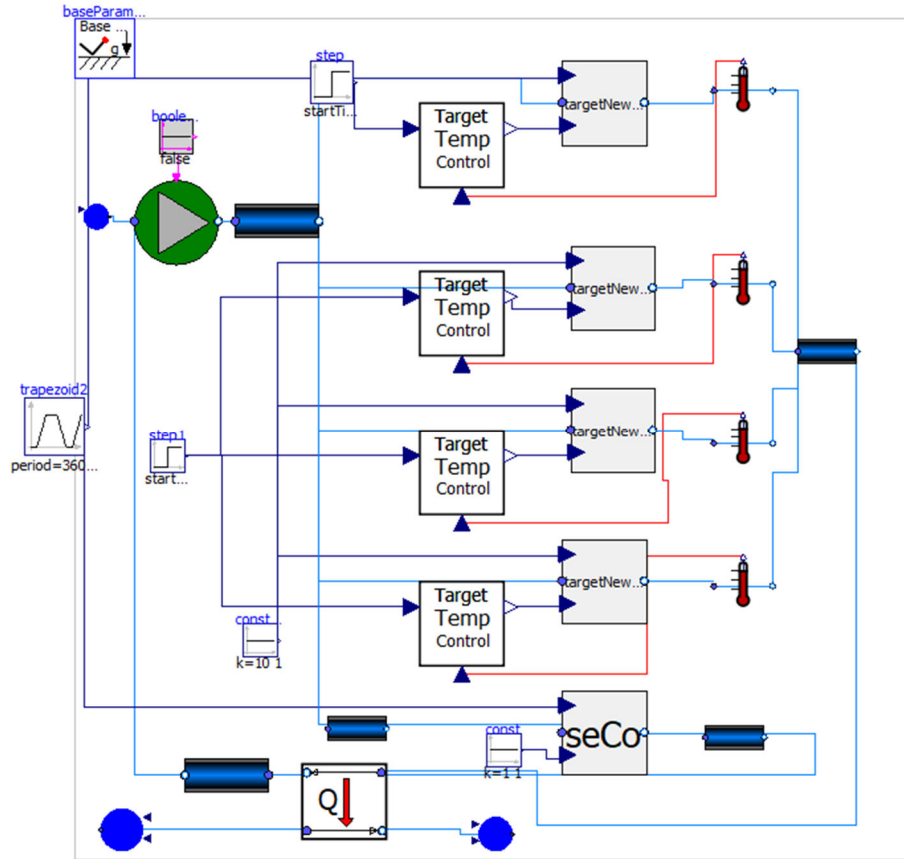


Abbildung 62: Modell des Kühlsystems in OpenModelica

Es repräsentiert das R&I-Schaubild in Abbildung 61 in einer Version vor dessen Finalisierung. Die Durchströmungen in Rohren werden als vollständig turbulent angenommen. Der Druckverlust Δp und der Massenstrom $\dot{m}$ wird nach Prandtl – Colebrook berechnet.

$$\lambda = \frac{|\Delta p| 2 D^3 \rho}{l \mu^2} \quad (87)$$

$$\text{Re} = -2\sqrt{\lambda} \log_{10} \left(\frac{2.51}{\sqrt{\lambda}} + 0.27 \frac{e}{D} \right) \quad (88)$$

$$\dot{m} = \frac{\pi}{4} D \cdot \mu \cdot \text{Re} \cdot \text{sgn}(\Delta p) \quad (89)$$

Dabei ist e die Rauheit des Rohres, D der Durchmesser, ρ die Dichte des Fluids, μ die dynamische Viskosität und l die Rohrlänge. Für Anschlüsse, etc. werden hydraulische Widerstände folgendermaßen berechnet:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho}{2} u^2 \quad (90)$$

Die Pumpe folgt der Pumpenkennlinie $H(\dot{V})$ des Pumpenherstellers

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot H(\dot{V}) \quad (91)$$

Jedes Target besteht aus mehreren, parallel angeströmten Kühlprofilen und wurde gemäß Abbildung 63 modelliert. Der vorgegebene, absorbierte Wärmestrom wird von den Rohren und der thermischen Masse des Aluminiumkörpers absorbiert:

$$\frac{d}{dt}(m c_p T) = H_{\text{in}} - H_{\text{out}} + \dot{Q}_{\text{abs}} \quad (92)$$

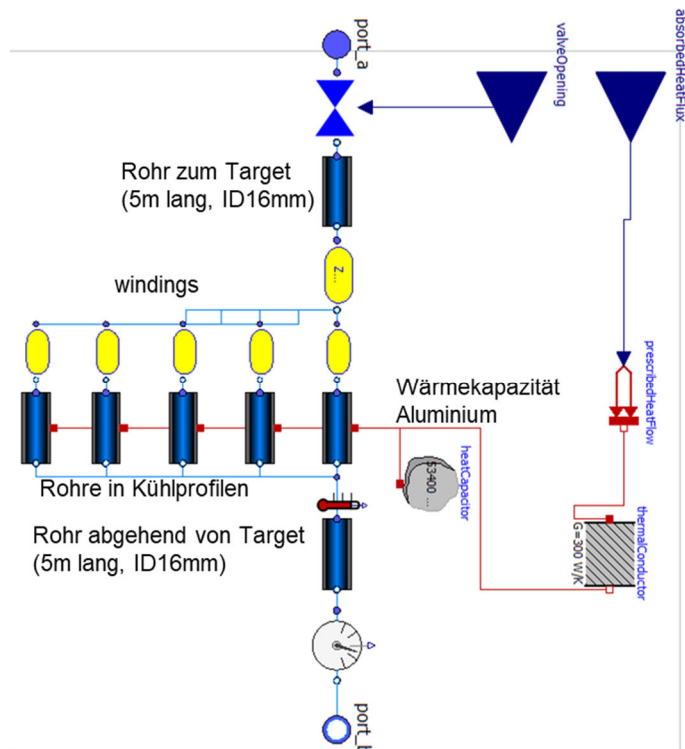


Abbildung 63: Modell eines Targets in OpenModelica zur Auslegung der Kühlung

Der Massenstrom des Kühlmittels wird durch das Ventil eingestellt.

$$\dot{m} = \rho \cdot \frac{K_{vs}}{3600} \cdot \text{opening} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{100000}} \quad (93)$$

Zum Zeitpunkt der Auslegung war geplant, über einen Temperaturregler das Ventil des Targets zu stellen und so die Austrittstemperatur über einen PID-Regler zu regeln. Der Sekundärkonzentrator ist ähnlich wie ein Target modelliert. Der Wärmeübertrager auf der Forschungsebene ist als Plattenwärmetauscher nach der ε -NTU-Methode modelliert.

Aus dem Modell ergaben sich zum Zeitpunkt der Auslegung die folgenden Erkenntnisse:

- Die Kühlprofile in den Reaktorattrappen sollten parallel durchströmt werden, sonst wäre der Druckverlust zu hoch und der Kühlmittelstrom könnte zu niedrig sein
- Der Druck vor dem Sekundärkonzentrator sollte von Ventil 801 geregelt werden, da die Pumpe für die Reaktorattrappen einen höheren Druck liefern muss als der Sekundärkonzentrator aushält
- Der Zwischenkühlkreis auf der Forschungsebene kann die absorbierte Wärme sicher abführen (auf 2 MW ausgelegt, während nur maximal 150 kW abgeführt werden muss)
- Ventile sollten K_{vs} -Wert von etwa 0.8 haben, um gut regeln zu können
- Eine Pumpe mit Förderhöhe von mindestens 60 m ist nötig
- Reaktorattrappen werden mit konstruiertem Kühlsystem ausreichend gekühlt

Die Auslegung des Kühlsystems musste im Laufe des Projektes aufgrund neuer Erkenntnisse mehrfach angepasst werden. Zum einen wurde in den Strahlenschutz auslaufendes Glykol in einem parallel laufenden Projekt als potentiell brandbeschleunigend identifiziert und dessen Verwendung seitens der Großanlagenleitung daher untersagt, sodass auf demineralisiertes Wasser gewechselt wurde. Der Sekundärkonzentrator ist zwar für den Betrieb mit dem Wasser-Glykol-Gemisch Typhocor ausgelegt, aber von den Kühleigenschaften ist demineralisiertes Wasser besser, da es eine höhere Wärmekapazität als das Typhocor hat. Der Nachteil besteht darin, dass das Kühlsystem bei Erwartung von Frost entleert werden

muss, um Schäden zu vermeiden sowie in verringertem Korrosionsschutz, der aber bei einer Prototypanlage weniger relevant als der Brandschutz ist.

Der Grund für eine weitere Anpassung des Kühlsystems war die unerwartet niedrige Reflektivität der Reaktorattrappen und damit die erhöhte Wärmemenge, die vom Kühlsystem abgeführt werden musste. Da ein zuvor nicht benutzter Lack verwendet wurde, ergab sich dieses Erkenntnis erst nach der in AP4.2 beschriebenen Messung der Reflektivität.

Das Kühlsystem wurde entsprechend auf die in Abbildung 61 gezeigte Variante angepasst. Um die nun nötige, erhöhte Kühlleistung erreichen zu können, muss mehr Kühlmittel durch die Reaktorattrappen fließen. Zum einen wurde dafür eine größere Pumpe ausgewählt, zum anderen wurden die Regelventile V801 und V701-V704 um parallele Kugelventile V705-V708 ergänzt. Dies war nötig, da die zu diesem Zeitpunkt schon beschafften und auf den alten Kühlmittelstrom ausgelegten Regelventile sonst einen zu großen Druckverlust verursachen würden, um hohe Kühlmittelströme zu erreichen.

Die Anpassungen wurden von aktualisierten Rechnungen begleitet, aus denen hervorgeht, dass eine ausreichende Kühlleistung selbst bei gleichzeitiger Bestrahlung aller Reaktorattrappen gegeben ist.

C.4.2. Bau (AP 4.2)

In AP4.2 wurden die Bauteile für die Reaktorattrappen und das Kühlsystem beschafft, gefertigt und für die Installation am Solarturm vormontiert. Abbildung 64 zeigt a) den Fertigungsschritt des Bolzenschweißens, b) die Rückseite einer fertig montierten Reaktorattrappe mit Haltegriffen, Thermoelementen und Einschrauböffnung für das Radiometer, c) die lackierte Reflektoroberfläche mit HiTemp1000 sowie d) die 4 fertig gestellten Reaktorattrappen.



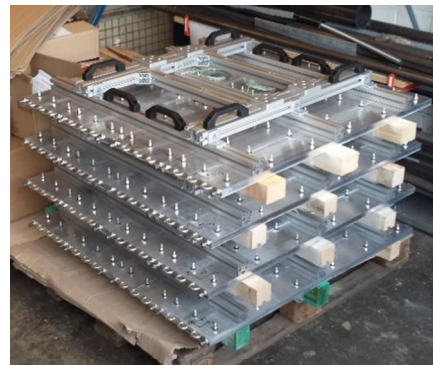
a) Fertigungsschritt des Bolzenschweißens auf der Rückseite des Reflektorblechs



b) Rückseite einer fertig montierten Reaktorattrappe mit Haltegriffen, Thermoelementen und Öffnung für Radiometer



c) Mit weißer HiTemp1000-Farbe lackierte Reflektoroberfläche



d) Gesamtheit der 4 Reaktorattrappen, vorbereitet für den Transport zum Solarturm

Abbildung 64: Bilder der montierten Reaktorattrappen

Das Kühlsystem wurde soweit wie möglich vormontiert und die Dichtigkeit überprüft, ebenso die Dichtigkeit der Reaktorattrappen. Die Ventile und Durchflusssensoren wurden auf einem verfahrbaren Wagen aus Aluminiumprofilen angebracht, ebenso Pumpe und Ausgleichsbehälter auf einem weiteren Wagen, wie in Abbildung 67 zu sehen. Dies war nötig, um Raum für den Einbau des realen Reaktors im Projekt ASTOR-ST bei Bedarf zur Verfügung stellen zu können.

Optische Eigenschaften der Reaktorattrappen

Die Oberfläche der Reaktorattrappen sollte das Sonnenlicht möglichst diffus und mit hohem Reflektionsgrad reflektieren. In der Dissertation von Ulmer [Ulmer2003] wurden verschiedene Verfahren der Lackierung/Beschichtung untersucht und der Schluss gezogen, dass eine PVD-Beschichtung mit Aluminiumoxid die besten optischen Ergebnisse liefert, die deutlich günstigere Lackierung mit dem Produkt „Amercoat 741“ aber nahezu genauso gute optische Eigenschaften hat. Es wurde daher entschieden, die günstigere Variante (Lackierung) zu verwenden, auch weil eventuelle Ausbesserungen bei Verdeckung oder Beschädigung der weißen Fläche vom DLR selbst ohne größere Verzögerungen durchgeführt werden könnten. So konnten Gelder eingespart und Preissteigerungen anderer Materialien ausgeglichen werden. Die Beschaffung von „Amercoat 741“ war dann allerdings schwierig, das Produkt war nicht mehr auf dem Markt verfügbar. Nach intensiver Suche wurde aufgrund seiner

Zusammensetzung und seiner Temperaturbeständigkeit seitens des Herstellers das Ersatzprodukt „HiTemp1000 White“ empfohlen, das daraufhin beschafft und von einer Lackiererei professionell aufgetragen wurde. Neben den 4 Aluminiumblechen für die Reaktorattrappen wurde eine kleine Probestfläche lackiert, die im Quartz-Labor des DLR in Köln optisch vermessen wurde. Dazu wurde wie bei [Ulmer2003] das Spektrophotometer Perkin Elmer UV-VIS-NIR Lambda 1050 im Wellenlängenbereich von 250 bis 2500 nm verwendet, der Reflektionsgrad ist in Abbildung 65 gezeigt.

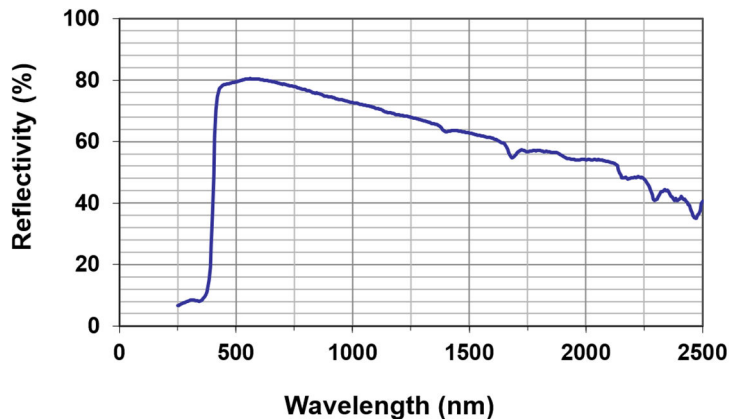


Abbildung 65: Spektraler, hemisphärischer Reflektionsgrad der aufgespritzten „HiTemp1000 White“-Lackierung, gemessen mit dem Perkin Elmer UV-VIS-NIR Lambda 1050 Spektrophotometer im Quartz-Labor des DLR

Eine Faltung mit dem Sonnenspektrum auf dem Erdboden ergab eine Gesamtreflektivität von 71,7%, die deutlich unter der in der Vorauslegung angenommenen 90% lag, sodass daraufhin die Auslegung des Kühlsystems wie bereits beschrieben angepasst wurde.

Ergänzend wurde die winkelabhängige Reflektivität der Oberfläche gemessen. Dazu wurde ein jahrelang nicht verwendetes Ghoniometer am DLR-Standort Köln-Porz wieder betriebsbereit gemacht. Eine qualitative Messung zeigte eine ausreichend diffuse Reflektion.

C.4.3. Installation (AP4.3)

Zur Installation der Attrappen wurde ein detaillierter Montageplan mit Einzelschritten für die Forschungsebene des STJ erarbeitet, der u.a.

- das Anbringen von Kettenzügen und eigens gefertigten Sicherungs- und Montageelementen
- das Kippen von Mehrfachstreben des Strahlenschutzes
- die Sicherung offener Stellen
- die Demontage von Einzelstreben
- das Kippen von Gesamtstreben über Kettenzüge
- die Anbringung der Reaktorattrappen
- die Rückmontage des Strahlenschutzes
- und die Abschlussarbeiten unter Zuhilfenahme der Verfahrabühne außen am Solarturm

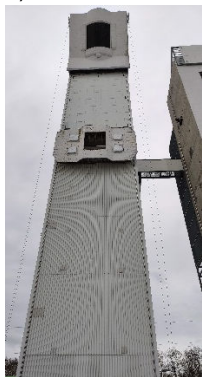
beinhaltete. Dieser Plan wurde weitestgehend ohne Probleme umgesetzt, sodass in KW13 und KW14 die Reaktorattrappen am Turm installiert werden konnten, wie Abbildung 66 zeigt.



a) Installation der Reaktorattrappen



b) Nach Installation aller Attrappen



c) Außenansicht Solarturm



d) Detail-Außenansicht Forschungsebene

Abbildung 66: Installation der Reaktorattrappen Ende März/Anfang April 2023

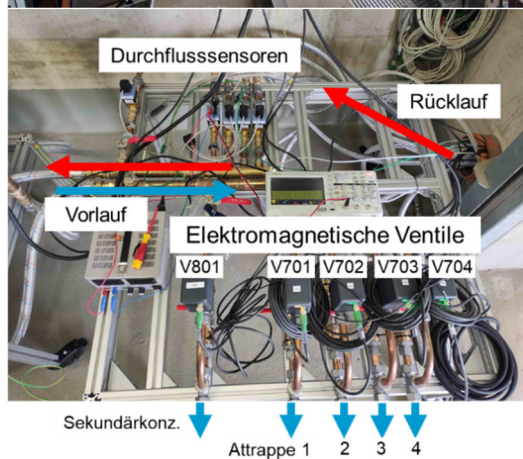
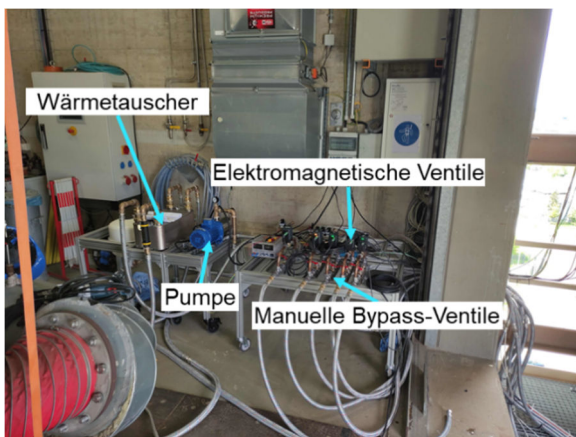
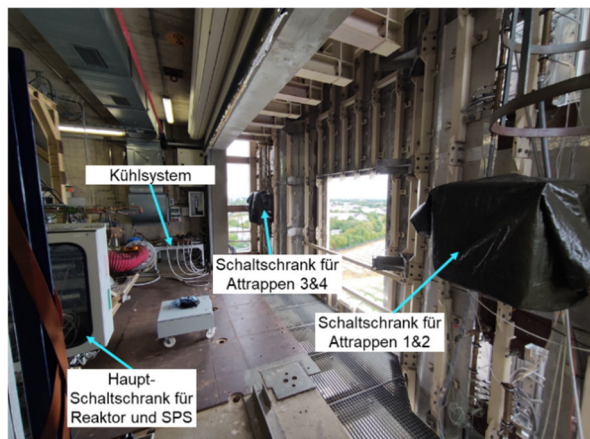


Abbildung 67: Installiertes Kühlsystem

Das vormontierte Kühlsystem wurde im April 2023 auf der Forschungsebene des Solarturms installiert, wie es in Abbildung 67 zu sehen ist. Damit wurde der Meilenstein MS6 erreicht.

Anfang Mai 2023 wurden Sensoren, Aktuatoren und die Pumpe angeschlossen und die Inbetriebnahme zusammen mit der Stausberg & Vosding GmbH erfolgreich durchgeführt (siehe AP5).

Der Kühlkreis für den Sekundärkonzentrator des Reaktors aus dem Projekt ASTOR-ST war zu diesem Zeitpunkt ebenfalls betriebsbereit. Durch die starken Verzögerungen im Projekt ASTOR-ST wurde der Sekundärkonzentrator für den realen Reaktor allerdings erst Anfang 2024 nach Ende des Projektes SolarFuelNow auf die Forschungsebene gebracht und angeschlossen. In den in AP6 beschriebenen Tests mit dem realen Reaktor nach Ende des Projektes im Frühjahr 2024 konnte der Einlassdruck des Kühlwassers in den Sekundärkonzentrator wie gewünscht eingestellt werden.

C.5. Arbeitspaket 5: Integration in Steuerungshard- und software (S&V, DLR, RWTH, CSPS)

Für eine effektive Regelung eines Multireaktorsystems in einem Solarturm ist es notwendig, dass diverse Subsysteme interagieren und kommunizieren. Wesentliche Komponenten umfassen das Nowcasting-System, eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) für die Reaktorsteuerung inklusive der Attrappen, die modellprädiktive Regelung (MPR), ein Zielpunktsteuerungssystem für die Heliostaten, Flusssichtmessgeräte und ein Leitsystem für das Heliostatfeld. Zudem sind für die spätere Auswertung eine Datenbank und für den laufenden Betrieb eine Visualisierungsoberfläche notwendig. Alle genannten Komponenten sind in Abbildung 68 dargestellt.

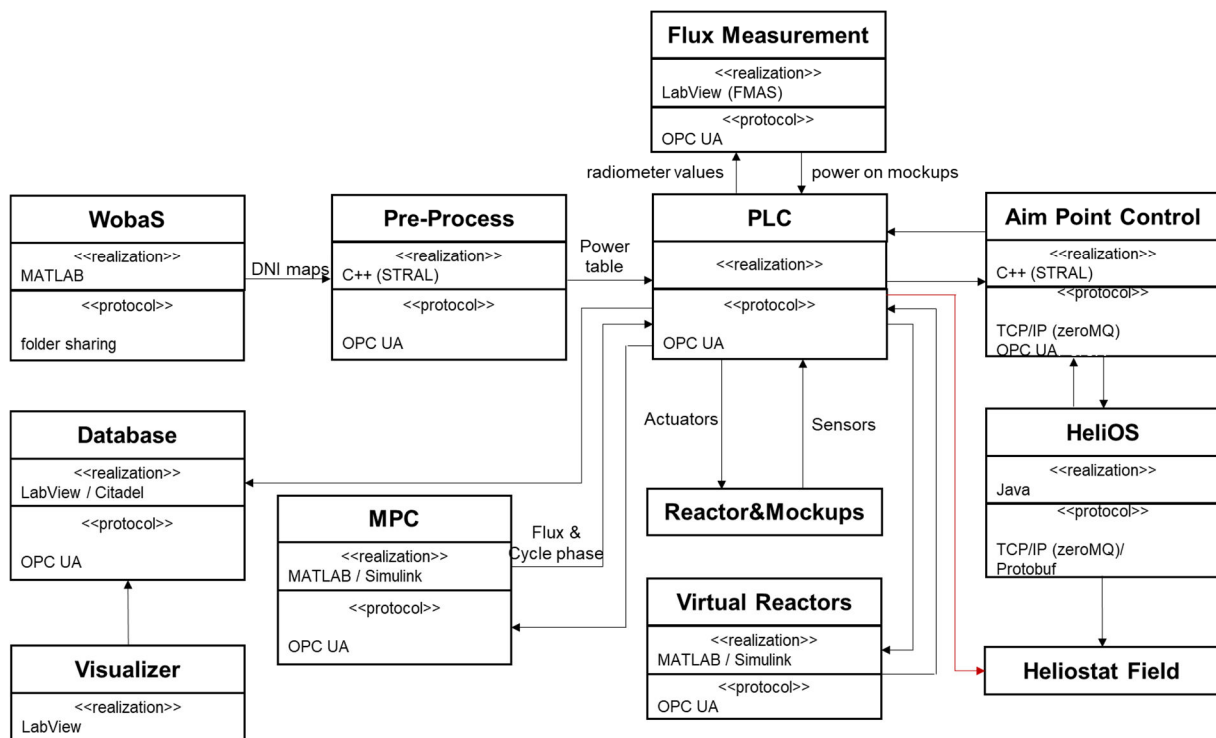


Abbildung 68: Schnittstellendiagramm der Steuerungshard- und software am Solarturm Jülich

Die Datenströme aus dem Schnittstellendiagramm in Abbildung 68 lassen sich wie folgt beschreiben: Das Nowcasting-System, welches durch Kameras die aktuelle Wolkenlage erfasst und Prognosen erstellt, ist der Ausgangspunkt für die Systemoperationen. Es speichert die Daten in Karten, die die direkte Normalstrahlung (DNI) über das Heliostatfeld angeben. Diese Karten werden an das Strahlungsverfolgungsprogramm STRAL gesendet, welches über eine Toolbox die Wolkenkarten einliest. STRAL berechnet die verfügbare Leistung für aktuelle und zukünftige Zeitpunkte und übermittelt diese über die SPS an die MPR. Neben der Leistungsübermittlung sendet die SPS auch Messwerte des Reaktors und der vier Reaktorattrappen an die MPR (vgl. AP4). Das Flusssichtmesssystem FMAS erhält über die SPS die Messwerte der Radiometer in den Reaktorattrappen und errechnet daraus zusammen mit Kamerabildern eine Leistung auf den Reaktorattrappen, die wiederum über die SPS an die virtuellen Reaktoren übermittelt wird. Diese errechnen dann Zustände an Messstellen wie im realen Reaktor und übermitteln diese an die SPS.

Auf Basis dieser Daten bestimmt die MPR die Soll-einstrahlleistungen pro Reaktor sowie den Betriebszustand (Reduktion oder Oxidation) der Reaktoren für den nächsten Zyklus. Diese Informationen werden an die SPS weitergegeben, die entsprechend die Reaktoren steuert und die Massenströme von Stickstoff oder Wasserdampf je nach Bedarf umschaltet. Die Soll-einstrahlleistungen werden an STRAL gesendet, dass nun als Zielpunktregelung fungiert

und bestimmt, welche Heliostaten auf welchen Reaktor ausgerichtet werden sollen. Die ermittelte Zielpunktverteilung wird an das Heliostatleitsystem HeliOS weitergeleitet, das die Heliostaten ansteuert.

Es ist erkennbar, dass Daten teilweise über die SPS umgeleitet werden. Dies geschieht, um die SPS als zentralen Kommunikationsknoten zu nutzen, der alle Messdaten archiviert und sicherheitsrelevante Ereignisse verwaltet. In kritischen Situationen ermöglicht die SPS auch eine direkte Kommunikation mit der Sicherheits-SPS des Heliostatfeldes, um Befehle, wie das Defokussieren des Feldes, unmittelbar umzusetzen. Somit wird die Kommunikation über STRAL umgangen. Dies ist in der Abbildung 68 durch einen roten Pfeil kenntlich gemacht.

Diese Schnittstellen müssen nun auf der Hardware-Ebene umgesetzt werden, was im folgenden Kapitel erläutert wird. Die softwareseitige Implementierung der Schnittstellen wird im darauffolgenden Kapitel gesondert behandelt. Die bestehende Schnittstelle zwischen WobaS und STRAL ist aufgrund der Anpassungen des WobaS Systems (AP3) nicht mehr verwendbar. Diese Änderungen werden in einem eigenen Kapitel erläutert. Daraufhin wird beschrieben, wie die modellprädiktive Regelung in die Steuerungshardware integriert wird. Abschließend werden die Ausstattung des Reaktors und der Attrappen mit Reglern und Sensorik skizziert.

C.5.1. Spezifikation von Hardware für das erarbeitete Regelungskonzept (AP 5.1)

Die verwendeten Hardware-Komponenten und ihre Vernetzung sind in Abbildung 69 dargestellt. Der PC für das Zielpunktmanagement (ZPM) (rechts oben im Bild) verbindet die meisten Netzwerke, darunter das Heliostatfeld-, das WOBAS-, das PLS SV- und das Remotenetzwerk. Auf diesem PC wird die MPR sowie STRAL für die Zielpunktsteuerung und die Verarbeitung der Wolkenkarten ausgeführt. Aufgrund der Anbindung an das Remotenetzwerk ist der PC sowohl vom Leitstand als auch von der Forschungsebene des STJ aus zugänglich. Um die MPR auf dem Rechner ausführen zu können, wurde MATLAB/Simulink mit der Industrial Communication Toolbox installiert. Die Aufnahme der Wolkendaten erfolgt auf dem WobaS-PC (rechts vom ZPM-PC im Bild). Auch die Flusssichtesoftware (links vom ZPM-PC im Bild) und das Heliostatfeldleitsystem HeliOS (rechts vom WobaS-PC im Bild) laufen auf einem eigenen PC.

Bei der speicherprogrammierbaren Steuerung handelt es sich um eine Software-SPS die auf einem Industrie-PC (IPC427) (links unten im Bild) läuft. Die SPS steuert die Reaktoren und Reaktorattrappen und sammelt alle Messdaten (Druck, Temperatur, Massenströme, Ventilstellungen usw.) ein. Zum Anschluss der analogen und digitalen Ein- und Ausgänge dienen dezentrale Peripherie-Einheiten. Diese sind zum einen ET200SP Systeme (unter der SPS im Bild) der Firma Siemens und UR20 Systeme (rechts unten im Bild) der Firma Weidmüller.

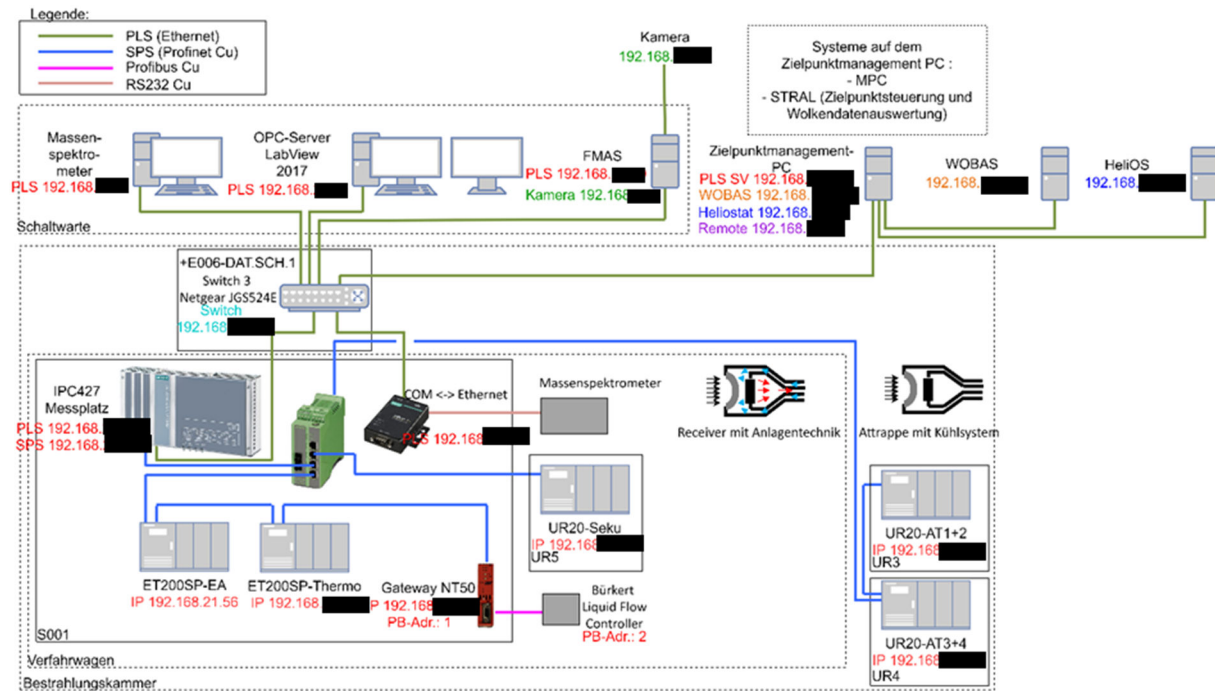


Abbildung 69: Vernetzung der Hardware Komponenten

Die Archivierung und Visualisierung der Mess- und Stellgrößen erfolgen über das Prozessleitsystem LabView 2017 auf einem eigenen PC (circa mittig oben im Bild). Diese Systeme sind über eine OPC UA Schnittstelle direkt mit der SPS verbunden, wodurch alle von der SPS übermittelten Daten in der relationalen Datenbank Citadel gespeichert werden. Alle Messwerte, Meldungen und Störungen können als CSV-Datei exportiert werden. Für diese Funktionen kann auf die bereits existierenden Lösungen des Projekts Astor-ST zurückgegriffen werden. Daten wie Wolkendaten und Zielpunktverteilungen, die nicht über die SPS laufen, werden separat archiviert.

C.5.2. Schnittstelle zwischen HeliOS und Reaktorkammern (AP 5.2)

Im Rahmen des Projekts wurde eine umfassende Schnittstellenarchitektur zwischen der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und den Systemen STRAL, MPR sowie dem Reaktor und den Reaktorsimulationen entwickelt und implementiert. Eine weitere wichtige Schnittstelle war die zwischen STRAL und HeliOS. Die Schnittstellenarchitektur ermöglicht den nahtlosen Datenaustausch und die effektive Steuerung der verschiedenen Komponenten. Die folgende Dokumentation beschreibt die spezifischen Datenformate und Kommunikationsprotokolle, die für die Interaktion zwischen der SPS und den genannten Systemen festgelegt wurden. Es wurde darauf Wert gelegt, die Anforderungen des Projekts optimal zu erfüllen und zukünftige Erweiterungen im Kontext von Industrie 4.0 zu ermöglichen.

Schnittstelle SPS zu STRAL, MPR und Reaktorsimulatoren

Für den Datenaustausch zwischen der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und den Systemen STRAL, MPR sowie den Reaktorsimulatoren wurden im ersten Schritt die spezifischen Daten und deren Formate definiert, die über die SPS kommuniziert werden sollen. Diese Daten sind in Tabelle 15 aufgeführt. Die Tabelle gibt eine Übersicht über die Sensoren und Aktoren im Reaktorsystem. Sie enthält Informationen zu den Typen (Sensor oder Aktor), den Bezeichnungen und Beschreibungen der Geräte, den Namen, Datentypen,

Längen und Einheiten der gemessenen oder gesteuerten Größen. Sensoren erfassen unter anderem Temperatur, Stoffströme und Strahlungsdichte, während Aktoren Sollwerte für Strahlungsleistung und Stoffströme steuern.

Tabelle 15: Datenliste SPS

Typ	Bezeichnung	Beschreibung	Name	Datentyp	Laenge	Einheit
Sensor	TR401	Reaktor Austrittstemo. Gas	T_out_gas {1,...,5}	float32	5	
Sensor	TR400_100-700_{_ ,V1,..V4}	Absorbertemperatur	T_abs {1,...,55; 1, ... ,5 } 6 Segemente * 9 Temperaturwerte + 1 T.Wert= 55 T.Werte	float32	55	°C
Sensor	TR400	Reaktor Eintrittstemp. Gas	T_in_gas {1,...,5}	float32	5	°C
Sensor	QR604	Ist Wasserstoff Stoffstrom	n_dot H2 {1,...,5}	float32	5	mol/s
Sensor	QR503	Ist Sauerstoff Stoffstrom	n_dot O2 {1,...,5}	float32	5	mol/s
Sensor	JR400	Ist Leistung auf virt. Reaktoren	Q_dot_virtual_reactors {1,...,5}	float32	5	W
Sensor	FRC301	Ist Stoffstrom	n_dot N2 {1,...,5}	float32	5	kg/h
Sensor	FRC101	Ist Stoffstrom	n_dot H2O {1,...,5}	float32	5	kg/h
Sensor	JRYL400	untere Grenze Prädizierte verfügbare Leistung	Q_dot_total_predict_lower {1, ... ,16}	float32	16	W
Sensor	JRYH400	obere Grenze Prädizierte verfügbare Leistung	Q_dot_total_predict_upper {1, ... ,16}	float32	16	W
Sensor	JRY400	Aktuelle und Prädizierte verfügbare Leistung	Q_dot_total_predict_det{1, ... ,16}	float32	16	W
Aktor	XO400	Info: Oxidations- oder Reduktionsphase	cycle_phase {1,...,5} Zur Steuerung weiterer Ventile	word	5	-
Aktor	HR400_SOLL	Soll Strahlung	q_dot_set {1,...,5}	float32	5	W
Aktor	FRC301_SOLL	Soll Stoffstrom	n_dot_N2_set {1,...,5}	float32	5	kg/h
Aktor	FRC101_SOLL	Soll Stoffstrom	n_dot_H2O_set {1,...,5}	float32	5	kg/h
Sensor	Radiometer	Ist Radiometer	flux_density_radiometer {1,...,4}	float32	4	kW/m ²
Sensor	JR_STRAL	von STRAL eingestellte	Q_dot_STRAL {1,...,5}	float32	5	W

Die Kommunikation mit der SPS erfolgt über eine OPC UA-Verbindung, wobei die SPS (im Schaltschrank S001) als OPC UA-Server fungiert. Auf dem OPC UA-Server sind alle in Tabelle 15 aufgeführten Daten unter den in der Spalte „Bezeichnung“ angegebenen Namen verfügbar. Sowohl die MPR als auch STRAL agieren als OPC UA-Clients. Insbesondere wurde die Client-Schnittstelle für STRAL neu eingerichtet, während die MPR durch eine in MATLAB/Simulink verfügbare Industrial Communication Toolbox unterstützt wird. Für die Implementierung der OPC UA-Schnittstelle in STRAL wurde die Open-Source C-Bibliothek „open62541“ genutzt, und um Abhängigkeiten zu minimieren wurde dies in einer zusätzlichen Toolbox implementiert. Beide Clients laufen auf dem Zielpunktmanagement-PC. Innerhalb der Programmiersoftware TIA-Portal sieht die Schnittstelle wie folgt aus:

OPC UA-Server-Schnittstelle		
Browse Name	Knotentyp	Zugriffsstufe
▼ SFN	Schnittstelle	---
▼ OPCUA_SFN_DB	Object	---
▶ FRC101_SOLL	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ FRC301_SOLL	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ XO400	ARRAY[0..4] of INT	RD/WR
▶ HR400_SOLL	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ TR400_100-700	ARRAY[0..54] of REAL	RD/WR
▶ TR400_100-700_V1	ARRAY[0..54] of REAL	RD/WR
▶ TR400_100-700_V2	ARRAY[0..54] of REAL	RD/WR
▶ TR400_100-700_V3	ARRAY[0..54] of REAL	RD/WR
▶ TR400_100-700_V4	ARRAY[0..54] of REAL	RD/WR
▶ TR400	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ TR401	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ QR503	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ QR604	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ FRC101	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ FRC301	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ JRY400	ARRAY[0..15] of REAL	RD/WR
▶ JRYL400	ARRAY[0..15] of REAL	RD/WR
▶ JRYH400	ARRAY[0..15] of REAL	RD/WR
▶ JR400	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR
▶ Radiometer	ARRAY[0..3] of REAL	RD/WR
▶ JR_STRAL	ARRAY[0..4] of REAL	RD/WR

Abbildung 70: OPC UA-Server-Schnittstelle zum Datenaustausch zwischen STRAL, MPC und SPS

Die Kommunikation über die OPC-UA Schnittstelle wurde durch S&V auf der SPS implementiert und in Kooperation mit dem DLR und der RWTH Aachen getestet und in Betrieb genommen. Die Wahl fiel auf OPC UA, da es sich um einen Industriestandard handelt, der sich leicht auf der SPS implementieren lässt und das Potenzial hat, sich als Standardprotokoll für Industrie 4.0 zu etablieren. Dies bereitet auch STRAL auf zukünftige Anwendungen im Bereich Industrie 4.0 vor.

Schnittstelle zwischen STRAL und HeliOS

Die bereits bestehende Schnittstelle zwischen STRAL und HeliOS musste für das Projekt SolarFuelNow angepasst werden. Sie basiert auf einer TCP/IP-Verbindung und implementiert spezifische Serialisierungs- und Deserialisierungsverfahren. Innerhalb dieser Konfiguration fungiert STRAL als Server und HeliOS als Client. Die Schnittstelle unterstützt verschiedene Funktionen, von denen besonders zwei für das Projekt von Bedeutung sind:

1. ``setActiveHeliostats``: Diese Funktion teilt STRAL die aktiven Heliostaten mit. Die aktiven Heliostaten sind für den Betrieb verfügbar, während andere möglicherweise in Reparatur sind oder für alternative Versuche verwendet werden.
2. ``getAimPointDistributionMatrix``: Diese Funktion ermöglicht es, die Zielpunkte für die einzelnen Heliostaten festzulegen in Form von Indizes.

Die zweite Funktion musste für das Projekt SolarFuelNow angepasst werden, da sie nur für den offen-volumetrischen Receiver am Solarturm Jülich ausgelegt war. Dafür wurde ein Receiver-Modell in HeliOS eingefügt, das spezifische, vordefinierte Zielpunkte für die Forschungsebene (die Ebene auf der die Reaktoren platziert sind) definiert. Dies erlaubt es, die Forschungsebene gezielt zu bestrahlen, wie in Abbildung 71 exemplarisch dargestellt wird. Die Herausforderung war es, präzise Zielpunkte zu bestimmen, da es an exakten Referenzpunkten auf der Forschungsebene mangelt. Die vorhandenen Vermessungsdaten und das CAD-Modell der Reaktorattrappen erlauben lediglich eine annähernde Schätzung der

Zielpunkte. Eine exakte Einstellung der Zielpunkte erfolgte nachträglich durch Trial und Error nach dem Aufbau der Reaktorattrappen.



Abbildung 71: Test der STRAL-HeliOS-Schnittstelle am Solarturm in Jülich.

C.5.3. Anpassung des WobaS-Systems in Jülich an die Änderungen aus AP3 (AP 5.3)

Die Schnittstelle zwischen STRAL und WobaS wurde modifiziert, da die bestehende TCP/IP-Schnittstelle die Übertragung probabilistischer Daten von STRAL nicht ermöglichte. Aufgrund der Einführung probabilistischer Daten hat sich das Datenformat geändert: Anstelle einzelner Dateien für jede Leadtime, die die DNI-Karte beinhaltet, befinden sich nun alle Leadtimes inklusive der Quantile in einer einzigen Datei. Der Code in STRAL wurde entsprechend angepasst, um das Einlesen und Auswerten des neuen Dateiformats effizient zu gestalten. Die bestehende TCP/IP-Schnittstelle wurde jedoch nicht erweitert; stattdessen erfolgt der Zugriff auf die Wolkenvorhersagedaten im .mat-Format nun durch eine Ordnerfreigabe auf dem WobaS-PC, was eine einfachere Lösung darstellt.

Während des Betriebs wurden folgende Probleme identifiziert: Instabilitäten können auftreten, wenn die Kamera ausfällt oder der verwendete Docker-Container abstürzt, was einen manuellen Neustart der Software erforderlich macht. Eine Integration eines automatischen Neustarts sowie eines über einen Desktop-Shortcut getriggerten Neustarts konnte die Effizienz der Behebung dieser Probleme im laufenden Betrieb erheblich verbessern.

C.5.4. Erweiterung der Steuerungssoftware um die modellprädiktive Regelung (AP 5.4)

Die MPR wurde in MATLAB implementiert. Um den Code auf die SPS zu übertragen, hätte er in C kompiliert werden müssen. Wie bereits beschrieben, wird die MPR jedoch nicht direkt auf der SPS ausgeführt, da die SPS einerseits nicht leistungsfähig genug ist und andererseits viele wichtige Visualisierungen, die in MATLAB bereits vorhanden sind, neu implementiert werden müssten.

Um mit der SPS zu kommunizieren, verfügt die MPR über einen OPC-Client, der mit dem OPC-Server der SPS verbunden ist. Als Hardware für die MPR wurde ein Desktop-PC (Zielpunktmanagement-PC) gewählt, der bereits zuvor am Solarturm in Jülich im Einsatz war. Der Rechner verfügt über 24 Kerne à 3 GHz und 128 GB RAM. Diese Rechenkapazität ist

ausreichend für den gleichzeitigen Betrieb von STRAL, der MPR-Software und der Reaktorsimulation.

C.5.5. Ausstattung des Reaktors und der Attrappen mit Reglern und Sensorik (AP 5.5)

Der Um-/ und Einbau sowie die Inbetriebnahme wurde in Zusammenarbeit mit dem DLR von S&V durchgeführt. Beim Bestandsschaltschrank (S001) aus dem Projekt ASTOR-ST wurden TC-Stecker (thermocouple) von Typ-K (grün) durch Typ-N (rosa) ersetzt, um höhere Temperaturen innerhalb des Reaktors messen zu können (siehe Abbildung 72).



Abbildung 72: Kuppel des realen Reaktors mit Typ N Thermoelementen

Für die Sensorik als auch für die Regelung der Kühlung der Attrappen und des Sekundärkonzentrators wurden drei weitere Schaltschränke UR3-5 installiert. UR3&4 (Abbildung 74) regeln das Kühlsystem für die Attrappen, bilden also die Sensoren und Aktoren in Abbildung 61 ab. Dabei nimmt gemäß Abbildung 73 UR3 die Sensorwerte von Reaktorattrappen 1&2, UR4 die von Reaktorattrappen 3&4 auf. Durch die räumliche Nähe zum auf der linken Seite der Forschungsebene platzierten Kühlsystem übernimmt UR4 die Messung der Kühlmassenströme und die Stellung der Ventile.

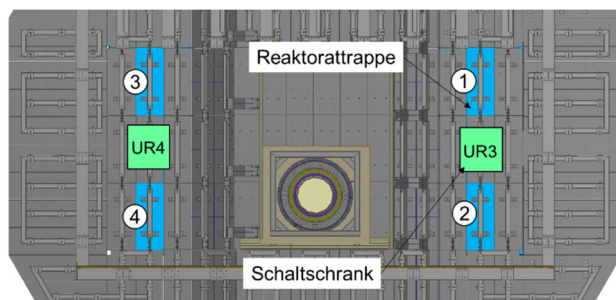


Abbildung 73: Anbringung der Schaltschränke und Attrappen auf der Forschungsebene, von innen gesehen



Abbildung 74: Schaltschrank UR3 Attrappe1+2 links und UR4 Attrappe3+4 rechts mit Weidmüller EA-Baugruppen
UR5 regelt das Kühlsystem für den Sekundärkonzentrator, wie in Abbildung 75 zu sehen.



Abbildung 75: Schaltschrank UR5 Seko mit Weidmüller EA-Baugruppen
Im Prozessleitsystem Labview wurde hierfür von S&V folgendes Bild gezeichnet.

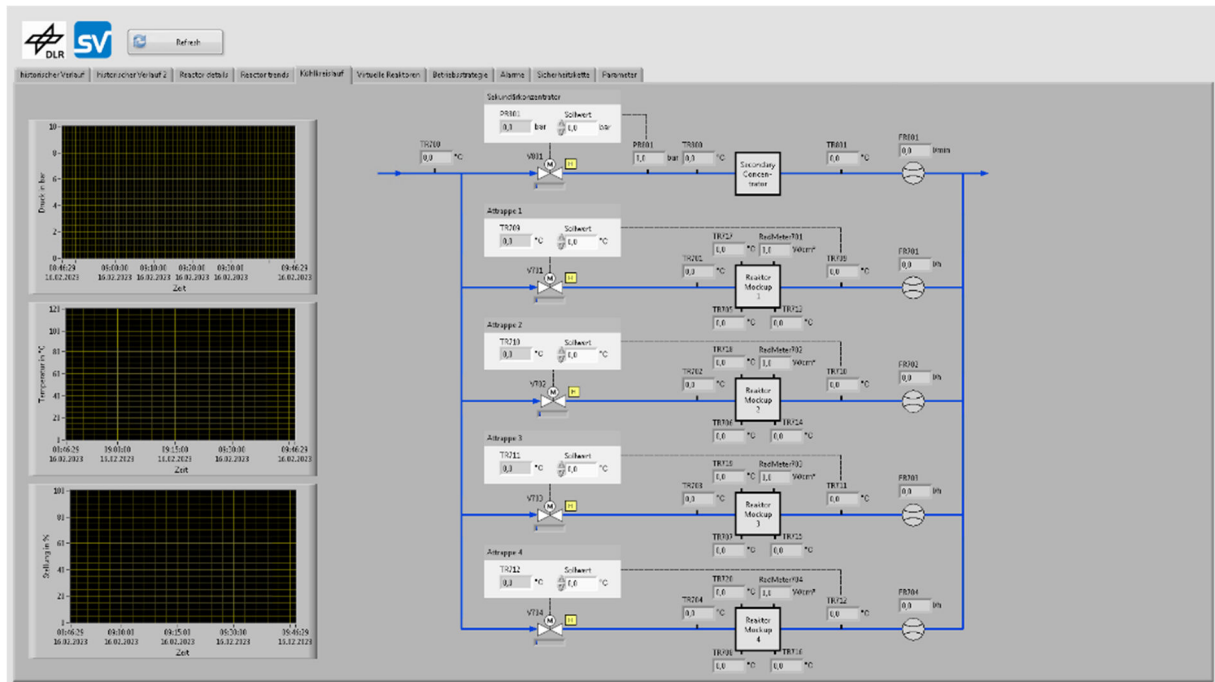


Abbildung 76: Kühlsystem im Prozessleitsystem Labview 2017

Für die Radiometer in den Attrappen wird eine maximale Flussdichte von 330 kW/m^2 erwartet. Um auch den Betrieb ohne Sekundärkonzentrator mit möglichen Flussdichten jenseits von 500 kW/m^2 messen zu können, wurde GG01 1000 Radiometer der Firma Hukseflux ausgewählt. In Kombination mit dem Messdatenerfassungsmodul Wago 750-498, das eine absolute Messgenauigkeit von 0.018 mV hat, ergibt sich bei der erwarteten Flussdichte von 330 kW/m^2 durch die Messdatenerfassung ein relativer Messfehler in der Flussdichte von 0.68% . Dieser Fehler wird als akzeptabel angesehen. Die Radiometer werden auch über das in AP4 beschriebene Kühlsystem gekühlt.

C.5.5.1. Flussdichtemessung auf den Reaktorattrappen

Zur Flussdichtemessung auf den Reaktorattrappen wurde das bisher in den Sonnensimulatoren des DLR in Köln und Jülich betriebene Flussdichtemesssystem FMAS [Thelen2016] vom DLR für den Einsatz im Projekt SolarFuelNow angepasst. Das Grundprinzip ist in Abbildung 77 dargestellt. Eine Kamera nimmt Grauwert-Bilder einer bestrahlten, diffus reflektierenden Fläche (Target) auf, die mit einem Radiometerwert zu einer Flussdichte kalibriert werden. Über die Angabe der Eckpunkte des Targets wird das Bild entzerrt und geometrische Abmessungen definiert. Über eine Integration wird dann die Leistung in einer Fläche, z.B. einem Kreis, berechnet. Das System wird aktuell für manuelle Einzelmessungen in den Sonnensimulatoren eingesetzt. Das in LabView programmierte System gibt Rohdaten und eine ausgewertete Zusammenfassung der Messung aus und speichert diese ab. Zur Kalibrierung der Grauwerte wird ein Radiometer in der Regel kurzzeitig in den Fokus gefahren.

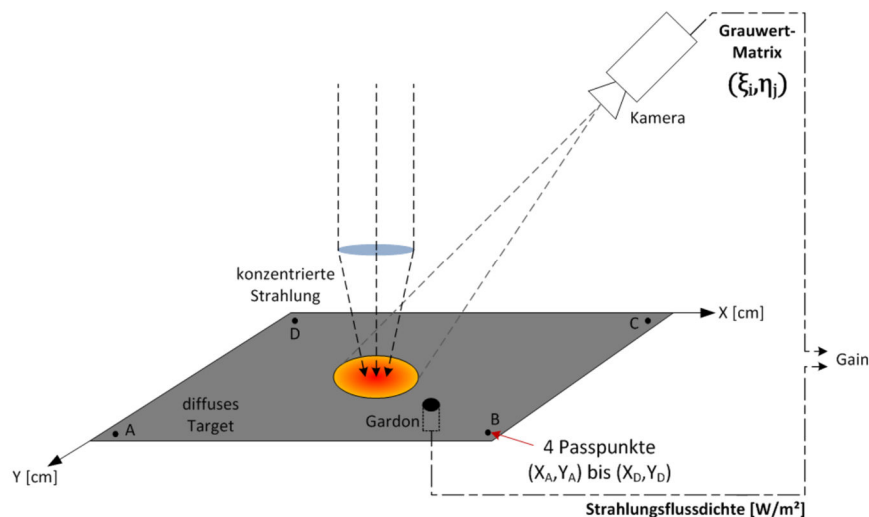


Abbildung 77: Messprinzip FMAS in Ursprungsversion [Thelen2016]

Für das Projekt SolarFuelNow wurde die Software folgendermaßen vom DLR modifiziert:

- es wurde eine Kommunikationsschnittstelle zum OPC-Server implementiert
- das System wurde auf einem separaten Rechner installiert (vgl. Abbildung 69). Da der OPC-Server in einem anderen Subnetz als die Kamera im Heliostatfeld liegt, wurde eine zusätzliche Netzwerkkarte eingebaut
- die Messung wird automatisch alle 2 Sekunden ausgeführt, vorher musste sie manuell getriggert werden
- eine Kamera misst die Flussdichte gleichzeitig auf allen 4 Reaktorattrappen, vorher konnte die Flussdichte nur auf einem Target gemessen werden
- da ein Speichern und Darstellen der Flussdichtemessung zu viel Rechenzeit benötigte, um die Taktrate von 2 Sekunden einzuhalten, wurde darauf verzichtet und stattdessen nur die über der Eintrittsfläche des Sekundärkonzentrators integrierte Leistung ausgegeben.
- die LabView-Oberfläche wurde so angepasst, dass im Betrieb die Werte der Radiometer und die integrierte Leistung auf den Reaktorattrappen angezeigt wird
- es wurde angenommen, dass der Flussdichtewert unmittelbar neben dem Radiometer nahe an dem Wert des Radiometers liegt. Daher erfolgte die Kalibrierung der Grauwerte über die in Abbildung 78 eingezeichnete Fläche mit aktuellen Radiometerwerten.

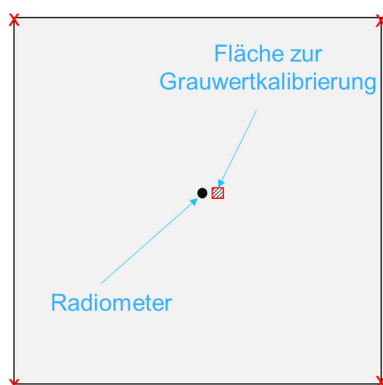


Abbildung 78: Skizze einer Reaktorattrappe mit Eckpunkten zur Entzerrung, Position des Radiometers und gewählter Fläche zur Grauwertkalibrierung

C.6. Arbeitspaket 6: Demonstration an Testanlage und Bewertung des Verbesserungspotentials (DLR, S&V, RWTH, CSPS)

In diesem Arbeitspaket sollte die in AP2 entwickelte und in AP5 in die Systeme am Solarturm integrierte Modellprädiktive Mehrgrößenregelung eines Receivers mit mehreren solaren Reaktoren und das modifizierte Wolkenkamarasystem aus AP3 am Solarturm Jülich zunächst simulativ und später in Realität mit Hilfe der in AP4 erstellten und installierten Reaktorattrappen demonstriert werden.

C.6.1. Betrieb des modifizierten Wolkenkamarasystems (AP 6.1)

Über den gesamten Projektzeitraum war CSPS mit der Aufgabe betraut, das Wolkenkamarasystem zu betreiben, wobei die Reinigung der Kameras und Strahlungssensoren sowie der Betrieb der Solarstrahlungsmessung im Verantwortungsbereich des DLR am Standort Jülich lag.

Das Wolkenkamarasystem besteht aus zwei Mobotix Q25 hemisphärischen Kameras, die horizontal nach oben schauend montiert sind. Eine der Kameras befindet sich auf dem Solarturm in Jülich, die andere auf dem Dach des Synlight Gebäudes in Jülich. Weiterhin ist ein Pyrheliometer zur DNI-Messung und ein Barometer zur Luftdruckmessung auf dem Dach des Solarturms montiert, deren Daten dem WobaS-Computer in Echtzeit zur Verfügung stehen.

Als einer der ersten Schritte noch vor Anpassung der WobaS-Software in AP 3.1-3.3 wurde die Frequenz der Kamerabilder erhöht, um später ausreichend Daten für die Berechnung von Zeiträumen mit höherer Zeitauflösung zu haben und nicht allein auf die ab der Anpassung aufgenommenen Daten angewiesen zu sein. Am 05. September 2022 wurde der Aufnahmetakt auf 5 Sekunden gesetzt, am 23.11.2023 dann auf 15 Sekunden reduziert, da die Erhöhung der Zeitauflösung letztlich auf 15 Sekunden festgelegt wurde.

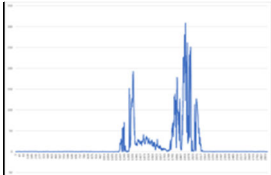
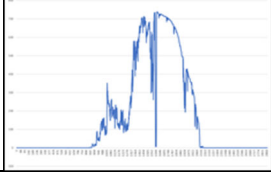
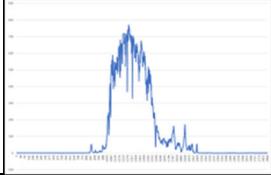
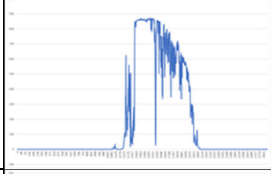
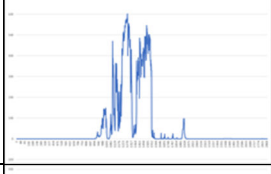
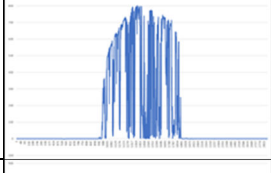
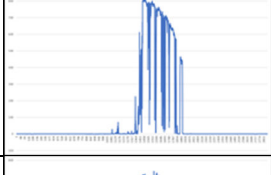
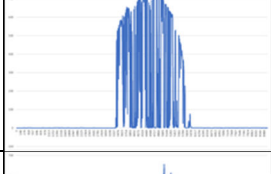
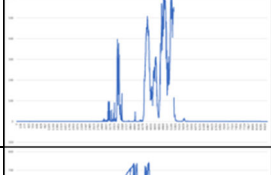
Trotz einiger Lücken ohne vorhandene Wolkenkamera-Bilder ist insgesamt eine gute Abdeckung des Projektzeitraums mit Wolkenkamerabildern gegeben. Lücken entstanden beispielsweise durch Stromausfälle, automatische Updates des Betriebssystems Windows, andere Arbeiten am WobaS-PC sowie einer längeren Datenlücke im Juni/Juli 2023 durch mangelnden Speicherplatz. Durch die Projektverlängerung und dadurch, dass die Aufnahme der Bilder in höherer Frequenz bereits vor den Arbeiten im AP3 begann, sind insgesamt deutlich mehr Bilder vorhanden als im ursprünglichen Projektzeitplan vorgesehen (3 Monate).

Die Meteodaten (DNI, Druck) sind ebenfalls für längere Zeiträume vorhanden. Das Pyrheliometer auf dem Solarturm war vom 19.12.2022 bis 24.01.2023 zur Kalibration eingesandt, dieser Zeitraum ist durch Übernahme der Daten einer weiteren Wetterstation am Nordrand des Heliostatenfeldes überbrückbar.

Insgesamt sind längere Zeiträume mit vorhandenen Wolkenkamerabildern sowie verfügbaren und qualitativ ausreichenden DNI-Daten vorhanden. Insbesondere sind die Zeiträume, in denen die Demonstrationstests der MPR am Solarturm durchgeführt wurden, abgedeckt. Dies wurde auch dadurch sichergestellt, dass sich CSPS und DLR an diesen Tagen koordinierten und die korrekte Funktion des Systems durch morgendlichen Neustart und Überwachung im Tagesverlauf sicherstellten.

Tabelle 16 zeigt eine Liste aller Tage, an denen Tests mit den Reaktorattrappen am Solarturm vorgenommen wurden; es ist ein Graph der Direktnormalstrahlung und einer kurzen Charakterisierung der Einstrahlung gezeigt.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Einstrahlungssituation an den Demonstrationstagen der MPR

09.10.23	Sehr niedrige DNI, fast durchgehend bewölkt	
10.10.23	Morgens bewölkt, dann aufklarend, nachmittags zeitweise wolkenfrei	
11.10.23	DNI-Daten / Wolkenbilder nur unvollständig vorhanden	
16.10.23	Morgens und nachmittags bewölkt, um Mittag herum relativ hohe DNI	
17.10.23	Morgens bewölkt, dann einzelne Wolkenlücken und anschliessend kurz Clearsky, danach durchziehende opake Wolken bei hoher DNI	
18.10.23	Viele Wolken, niedrige DNI	
31.10.23	Viele Wolken, aber hohe DNI in den Wolkenlücken. Hohe Variabilität	
02.11.23	Erst bewölkt, ab mittags viele Wolken, aber hohe DNI in den Wolkenlücken. Hohe Variabilität	
15.11.23	Viele Wolken, aber hohe DNI in den Wolkenlücken. Hohe Variabilität	
22.11.23	Viel Variabilität, meist niedrige DNI	
07.12.23	Viel Variabilität, kurzer Clearsky-Abschnitt folgender Totaleinbruch ggf. Sensorverschattung	

Da die Tests im Herbst oder sogar Spätherbst durchgeführt wurden, war der Sonnenstand auf der geographischen Breite von Jülich schon relativ niedrig und die Sonne daher relativ nah am Bildrand. Außerdem bzw. daraus folgend waren dies auch überwiegend Tage, an denen ein kommerzielles Solarfeld zur H₂-Erzeugung nur phasenweise oder gar nicht in Betrieb wäre.

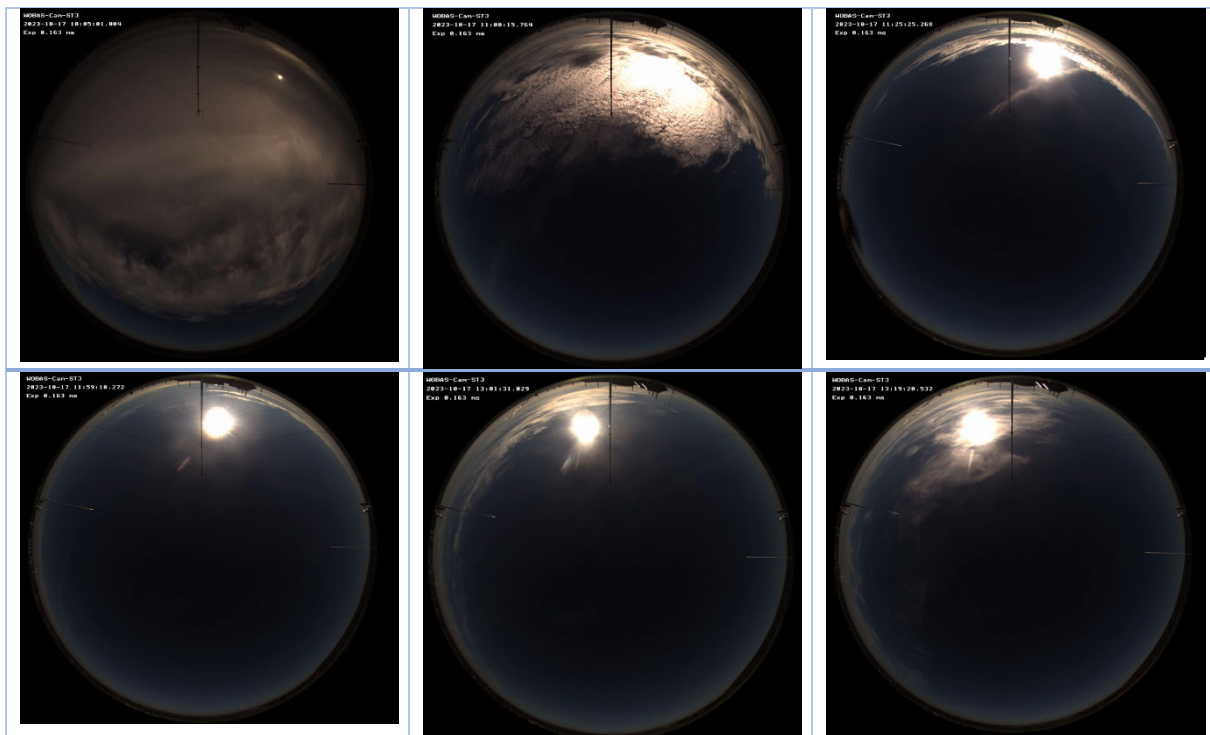


Abbildung 79: Bilder der Wolkenkamera für den 17.10.23

Ein Beispiel mit mindestens zeitweise hoher DNI und komplexen oder exemplarischen Wolkensituationen ist in Abbildung 79 gezeigt, wo das Aufklaren des Himmels am 17.10.23 zu sehen ist, gefolgt von einem Zeitabschnitt mit wolkenlosen Bedingungen im Bereich um die Sonne, sowie die danach wieder eintretende Teilbewölkung.

Gleichzeitig illustriert diese Bilderserie sehr anschaulich den angesprochenen Sachverhalt des niedrigen Sonnenstandes und ein weiteres Problem, das im Wesentlichen auch allen bisherigen und zukünftigen Wolkenkamerasystem-Installationen gemein ist: In Kraftwerken oder allgemein in bebauten Umgebungen finden sich fast immer Objekte am Horizont wie hier der Mast in Südrichtung. Diese müssen per Ausschlussmaske aus der Bildsegmentierung ausgeschlossen werden, es kann sich aber ein praktisches Problem ergeben falls solche Hindernisse nennenswerte Bereiche des Himmels abdecken.

Daher wäre zukünftig von der Installation von 2-Kamera-Systemen abzuraten, um die Wahrscheinlichkeit von überlappenden Abschattungsbereichen zu reduzieren, und um außerdem eine höhere Genauigkeit und auch Redundanz gegen Kameraausfall zu erreichen. Die zusätzlichen Kosten einer weiteren Kamera sind im Verhältnis zu den Kosten des Gesamtsystems überschaubar.

In diesem Arbeitspaket wurde von CSPS auch ein exemplarischer Tag für die Simulation der Anlage in AP6.2 und AP6.3 ausgewählt, der die folgenden Kriterien erfüllt:

- Valide Strahlungsmessdaten vorhanden
- Vorhersagen des Wolkenkamerasystems möglichst lückenlos vorhanden
- Nicht-triviale Betriebsbedingungen

Die Wolkenkamera-Bilder für alle in Frage kommenden Tage wurden gesichtet und auf Verwendbarkeit überprüft. Es wurde der 19.5.2023 ausgewählt, da dieser Tag sowohl

Passagen mit konstanter DNI als auch mit kompletter Verschattung aufweist, wie an der über dem Feld gemittelten DNI (P50-Quantil) in Abbildung 80 zu erkennen ist.

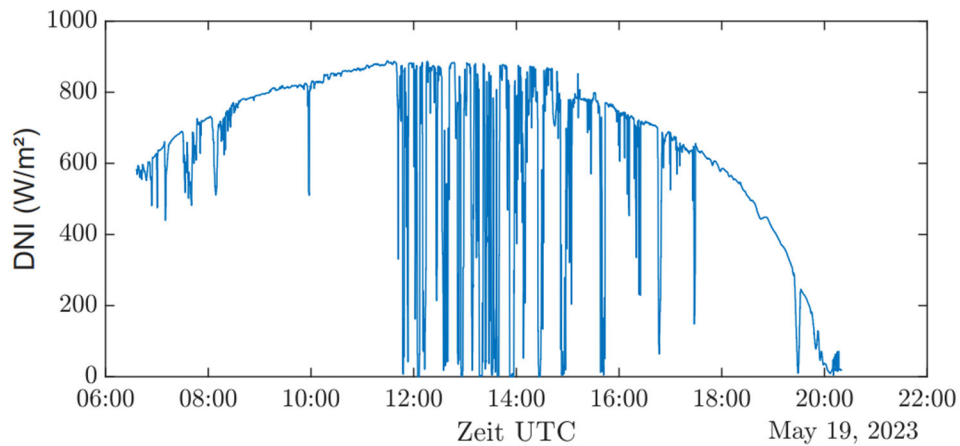


Abbildung 80: Über das Heliostatfeld mit 1388 Heliostaten gemittelte DNI am 19.5.2023

In dem Bereich mit stark variabler DNI werden vereinzelt Teilbedeckungen des Feldes wie in Abbildung 81 dargestellt eingefangen, die meiste Zeit ist die DNI jedoch auch in diesem Bereich homogen über dem Feld verteilt, da das Feld in Jülich relativ klein ist und leicht von einer Wolke komplett bedeckt werden kann.

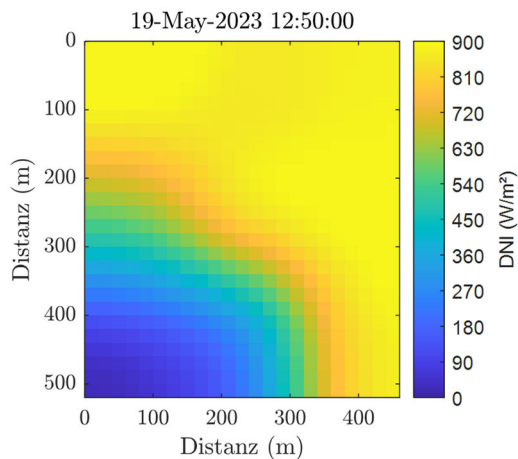


Abbildung 81: Teilbedeckung des Feldes mit Wolken am 19.5.2023

C.6.2. Simulation der Anlage mit dem neuen Regelungskonzept für verschiedene Szenarien des Wolkendurchzugs (AP 6.2)

In diesem Arbeitspaket wurde eine umfassende Simulationsumgebung entwickelt, um die Anlage mit dem neuen Regelungskonzept mit den in AP6.1 ausgewählten WobaS-Daten simulierten zu können.

Die Komponenten der Simulationsumgebung sind in Abbildung 82 dargestellt. Modifikationen gegenüber den realen Tests sind in blau hervorgehoben. Im Unterschied zu den Experimenten werden statt Live-Wolkendaten historische Wolkendaten aus AP6.1 verwendet, die als .mat-Dateien vorliegen. Anstelle des realen Reaktors wird ein zusätzlicher virtueller Reaktor simuliert. Zudem wird nicht eine reale SPS, sondern ein OPC UA Server Mock Up in Python verwendet, um den Datenfluss zu simulieren.

Das Raytracing-Tool STRAL berechnet die Leistung der Reaktoren basierend auf dem Datum und der der Uhrzeit, d.h. basierend auf dem Sonnenstand, den Zielpunkten und der Wolkensituation. Dabei ersetzt STRAL die Systeme HeliOS, das Kraftwerk und die Flusssichtmessung. Der koordinierende Simulator wurde in C++ als STRAL-Toolbox implementiert.

Das Zusammenspiel dieser Komponenten ist in Abbildung 83 illustriert. Der erste Schritt des Simulators besteht darin, WobaS anzuweisen, die nächste Wolkenkarte zu laden und die maximal verfügbare Leistung für die Reaktoren zu berechnen. Diese Leistung wird über OPC UA an die SPS (OPC UA Server Mock Up) übermittelt und von der MPC abgefragt. Nachdem die MPC die optimalen Stellgrößen berechnet hat, sendet sie diese zurück an die SPS. Die Stellgrößen umfassen dabei die Leistung pro Reaktor und den Zustand des Reaktors (Reduktion oder Oxidation).

Die gewünschte Leistung wird vom Simulator abgefragt und an die Zielpunktsteuerung weitergeleitet, die daraufhin die Zielpunkte der Heliostaten berechnet. Mit diesen Zielpunkten führt STRAL eine Simulation durch, um auf Basis des Datums und der Uhrzeit sowie der Wolkensituation die aktuelle Leistung an den Reaktoren zu ermitteln. Diese Leistung wird dann an die SPS zurückgesendet.

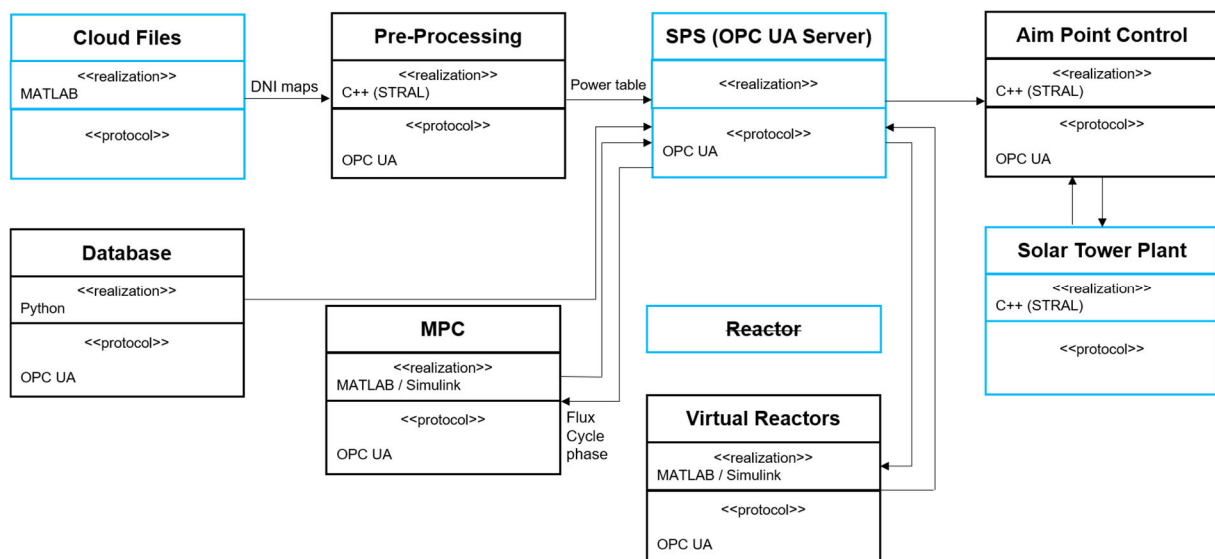


Abbildung 82: Schnittstellendiagramm Simulationsumgebung

Im letzten Schritt nimmt die Simulation der virtuellen Reaktoren die aktuellen Leistungs- und Zustandsdaten auf und berechnet daraus den aktuellen Reaktorzustand. Der gesamte Prozess wiederholt sich dann kontinuierlich bis zum Ende der Simulation.

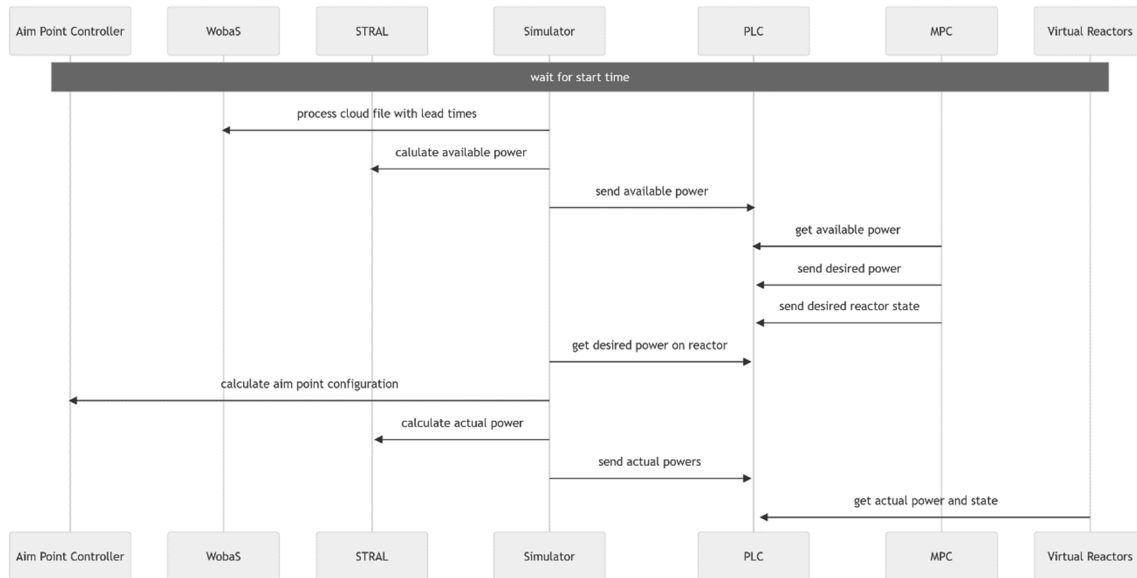


Abbildung 83: Sequenzdiagramm Simulation

Es wurden verschiedene Tage mit den aufgezeichneten WobaS-Vorhersagen nachsimuliert. Da absehbar war, dass durch Umbauarbeiten am Heliostatfeld nur etwa 1400 der 2153 Heliostate für die späteren Demonstrationstests zur Verfügung stehen würden, wurden die Simulationen wie in AP1.3 mit dem in Abbildung 84 gezeigten Heliostatfeld durchgeführt. Der linke Bereich des Feldes fehlt, da für diesen Umbauarbeiten geplant waren.

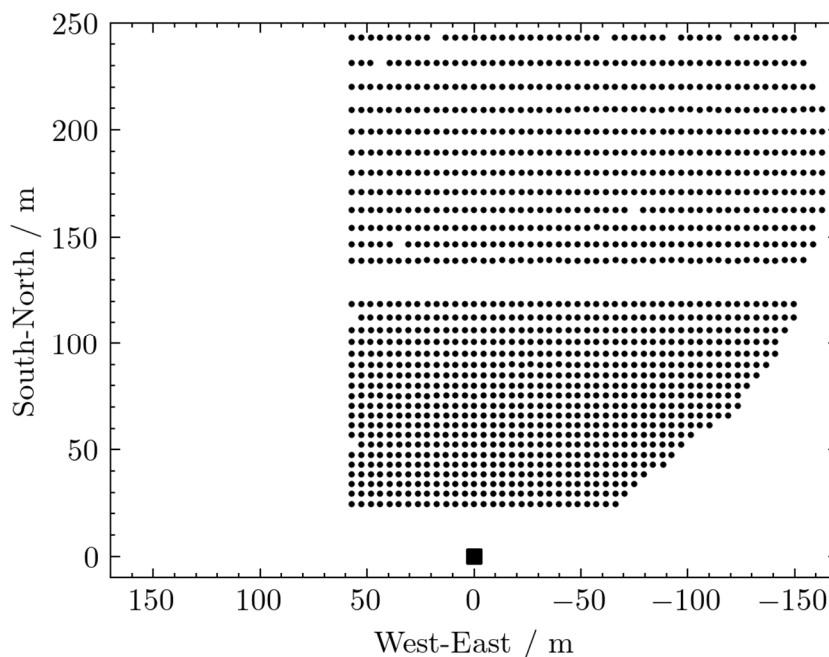


Abbildung 84: Zur Simulation verwendete 1388 Heliostate. Im linken Bereich des Feldes wurden Umbauarbeiten durchgeführt, sodass dort keine Heliostate verwendet werden konnten.

Zur Darstellung der Ergebnisse wurde wie in AP6.1 beschrieben der 19.5.2023 ausgewählt, da dieser Tag sowohl Passagen mit konstanter DNI als auch mit kompletter Verschattung aufweist.

Zunächst wurde die MPR ohne Nowcast betrieben, d.h. es wurde nur die von WobaS erfasste aktuelle Leistung auf das Heliostatfeld an die MPR weitergeleitet und angenommen, dass diese für den Prädiktionshorizont konstant bleibt. Damit ergeben sich die in Abbildung

85 gezeigten Verläufe der Absorberfronttemperaturen, der Leistungen, die Abweichungen der Ist- von der Sollleistung, der gemittelte Reduktionsgrad und die Stoffmengenströme des Wasserstoffs. Hier sollen einzelne Bereiche des Tages genauer betrachtet werden: das Anfahren, Betrieb bei konstanter DNI am Vormittag um 10 Uhr UTC, hohe Variation um 14 Uhr UTC und schließlich der Betrieb bei abfallender DNI um 18 Uhr UTC.

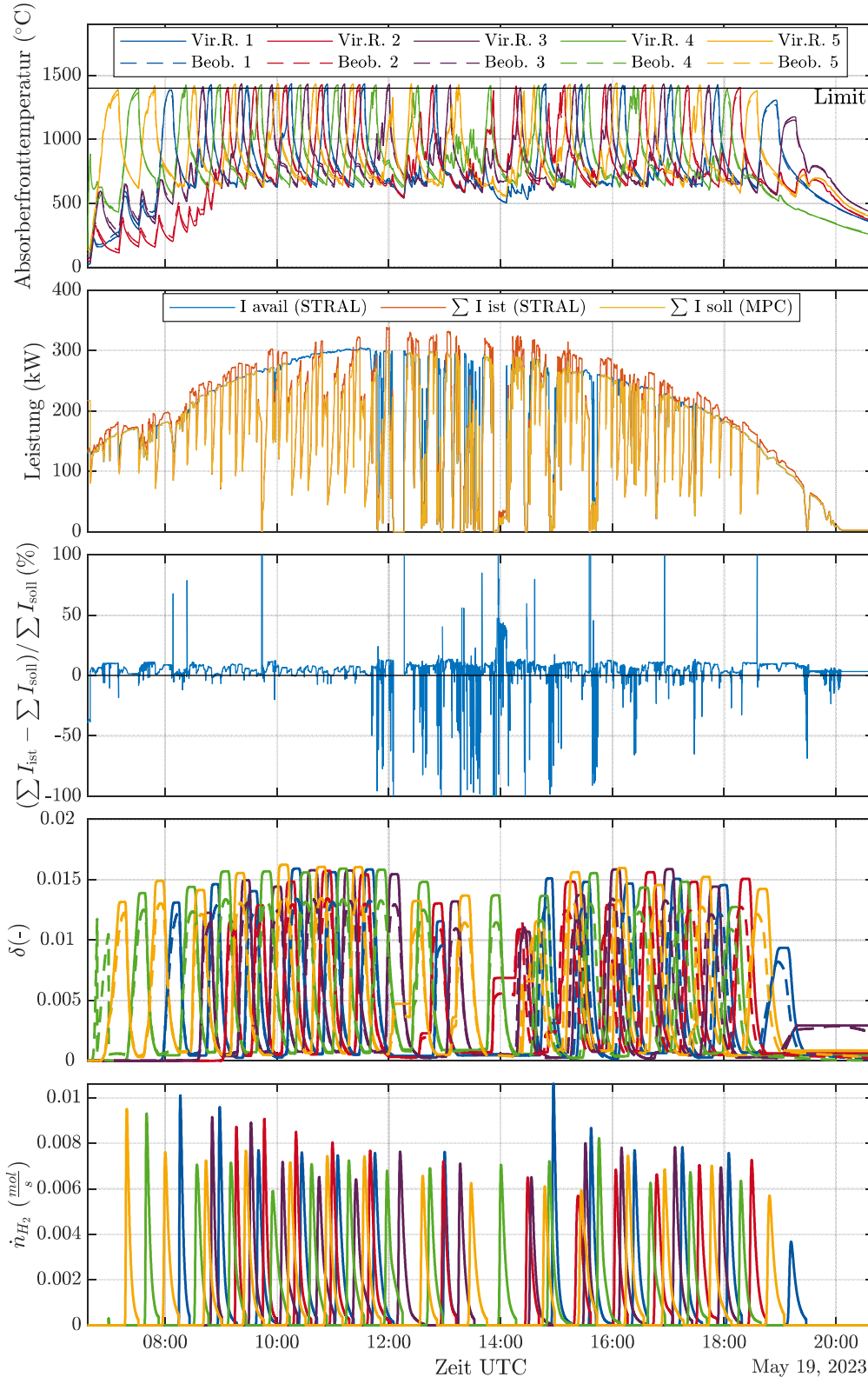


Abbildung 85: Simulation der Anlage über den Verlauf des 19.5.2023. Oben: Fronttemperaturen der Reaktoren, einmal in den virtuellen Reaktoren und geschätzt vom Beobachter.

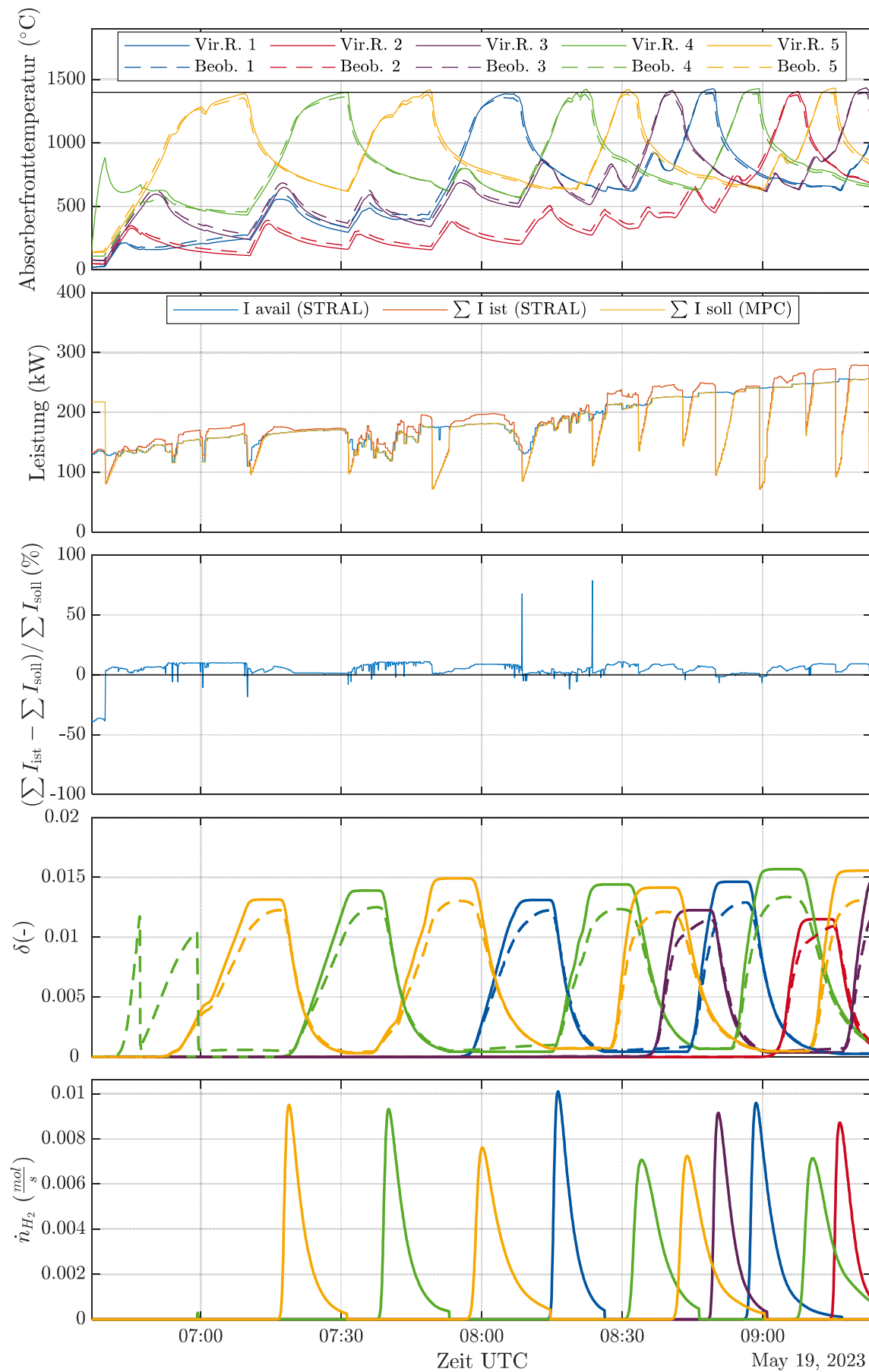


Abbildung 86: Anfahrverhalten in der Anlagensimulation vom 19.5.2023

Beim Anfahrvorgang in Abbildung 86 entscheidet sich die MPR, zunächst nur einen Reaktor zu betreiben. Mit zunehmender DNI werden dann aber mehr und mehr Reaktoren gleichzeitig aufgeheizt und die Zyklusdauern werden kürzer. Es kommt regelmäßig zu Abweichungen der Ist- von der Sollleistung, was auf Spillage zurückzuführen ist. In weiten Bereichen liegen die Abweichung von der Sollleistung unter 10%. Durch die Abweichung von der Sollleistung kommt es auch zur geringfügigen Überschreitung der Grenztemperatur von 1400°C an der Front des Absorbers. Bei größerer verfügbarer Leistung, vor allem ab 9 Uhr UTC gibt es Situationen, in denen die Sollleistung unter der verfügbaren Leistung liegt. Zu diesen Zeitpunkten sind keine Reaktoren für weitere Bestrahlung verfügbar, weil sie sich noch in der Oxidationsphase befinden.

Im eingefahrenen Zustand bei hoher DNI in Abbildung 87 tritt dieser Zustand relativ häufig auf, sodass ein beträchtlicher Teil der zur Verfügung stehenden Leistung nicht genutzt werden kann. Hier liegt weiteres Verbesserungspotential für die MPR, z.B. könnte die Umschaltbedingung von der Oxidation in die Reduktion angepasst werden, da ein verfrühter Abbruch der Oxidation bei hohen zur Verfügung stehenden Leistungen unter Umständen vorteilhaft wäre. In Abbildung 87 sind auch gut die Rampen zu sehen, die sich durch die Begrenzung der Temperaturgradienten im Absorber ergeben. Die Leistung steigt dort mehr als linear an, da die Verluste überproportional mit der Temperatur zunehmen.

Bei der hohen Variabilität in der DNI in Abbildung 88 entscheidet sich die MPR ohne Kenntnis einer Vorhersage mehrfach, mehrere Reaktoren zu bestrahlen, kann dann aber die Zieltemperaturen in allen Reaktoren nicht erreichen (um 13:30 UTC). Somit kühlen die Reaktoren wieder ab, ohne in der Oxidation Wasserstoff erzeugen zu können. Allerdings ist hier eine stärkere Bestrahlung eines einzelnen Reaktors statt der gleichzeitigen Bestrahlung mehrerer Reaktoren durch die Limitierung der erlaubten Aufheizrate im Absorber auch oft nicht möglich. Bei der hohen Variabilität der DNI kommt es auch zu größeren Abweichungen der Ist- von der Sollleistung.

Gegen Ende des Tages bei abfallender DNI in Abbildung 89 werden die Zykluszeiten wieder länger und am Ende erreichen die Reaktoren die Zieltemperatur nicht mehr, sodass ab 19:30 UTC kein Wasserstoff mehr produziert wird. Aber auch hier kommt es vereinzelt noch zu Situationen, in denen zur Verfügung stehende Leistung nicht genutzt werden kann.

Über den gesamten Tag kommt es in 3% der Zeit zu einem Überschreiten der Grenztemperatur von 1400°C, dabei dann im Durchschnitt um 17 K und maximal um 41 K. Dies wird als akzeptabel betrachtet, da die Grenze von 1400°C nicht scharf definiert ist². Um die Grenze besser einzuhalten, müsste Spillage in der Prädiktion der MPR berücksichtigt werden, was aktuell nicht geschieht. Summiert über den Tag nutzt die MPR 18% der zur Verfügung stehenden Energie nicht. Wie bereits beschrieben, liegt hier noch viel Potential für eine Weiterentwicklung der Umschaltbedingung.

² In anderen Reaktoren ähnlicher Bauart, wie z.B. im Sun2Liquid-Reaktor, sind deutlich höhere Temperaturen an der Front zulässig, was auch den Wirkungsgrad signifikant erhöht. Der Reaktor aus dem Projekt ASTOR-ST ist aber nicht für diese Temperaturen ausgelegt. Für eine Verbesserung des Wirkungsgrades sollte der Reaktor eine kleinere Apertur haben und mit höheren Konzentrationen und Temperaturen betrieben werden können. Dies war aber nicht das Thema des Projekts SolarFuelNow.

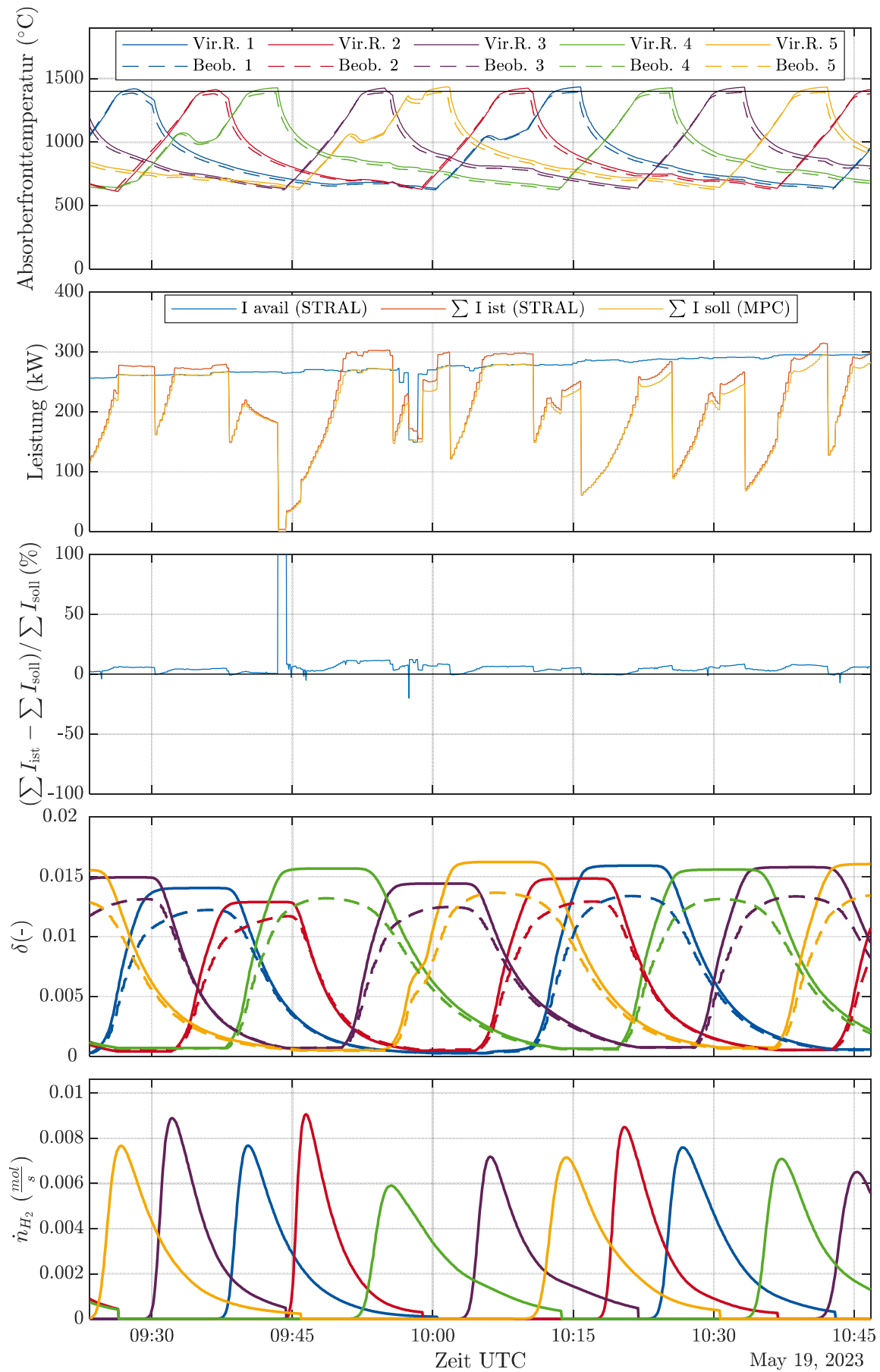


Abbildung 87: Eingefahrener Zustand mit konstanter DNI

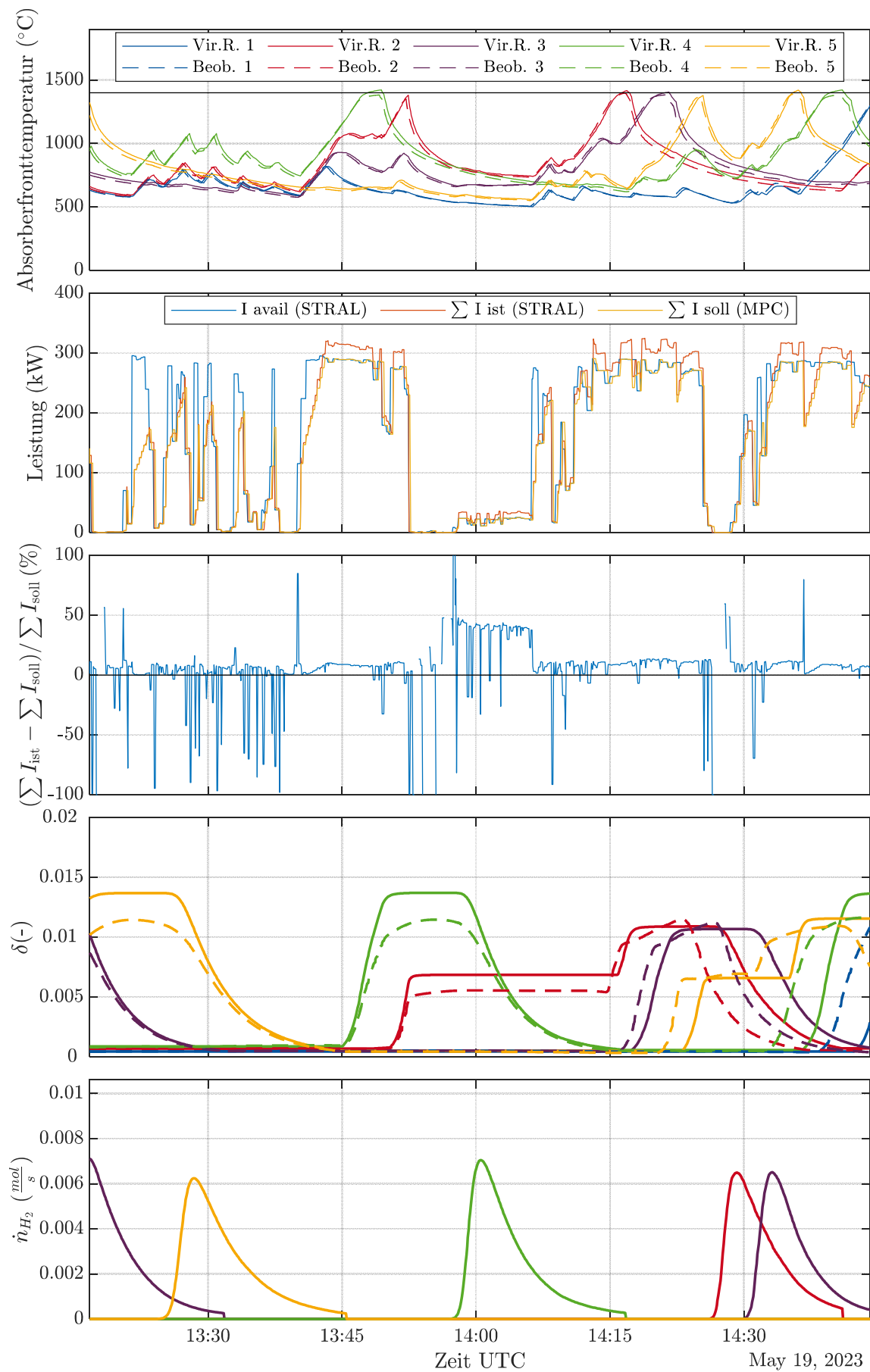


Abbildung 88: Bereich mit hoher Variation in der Einstrahlung

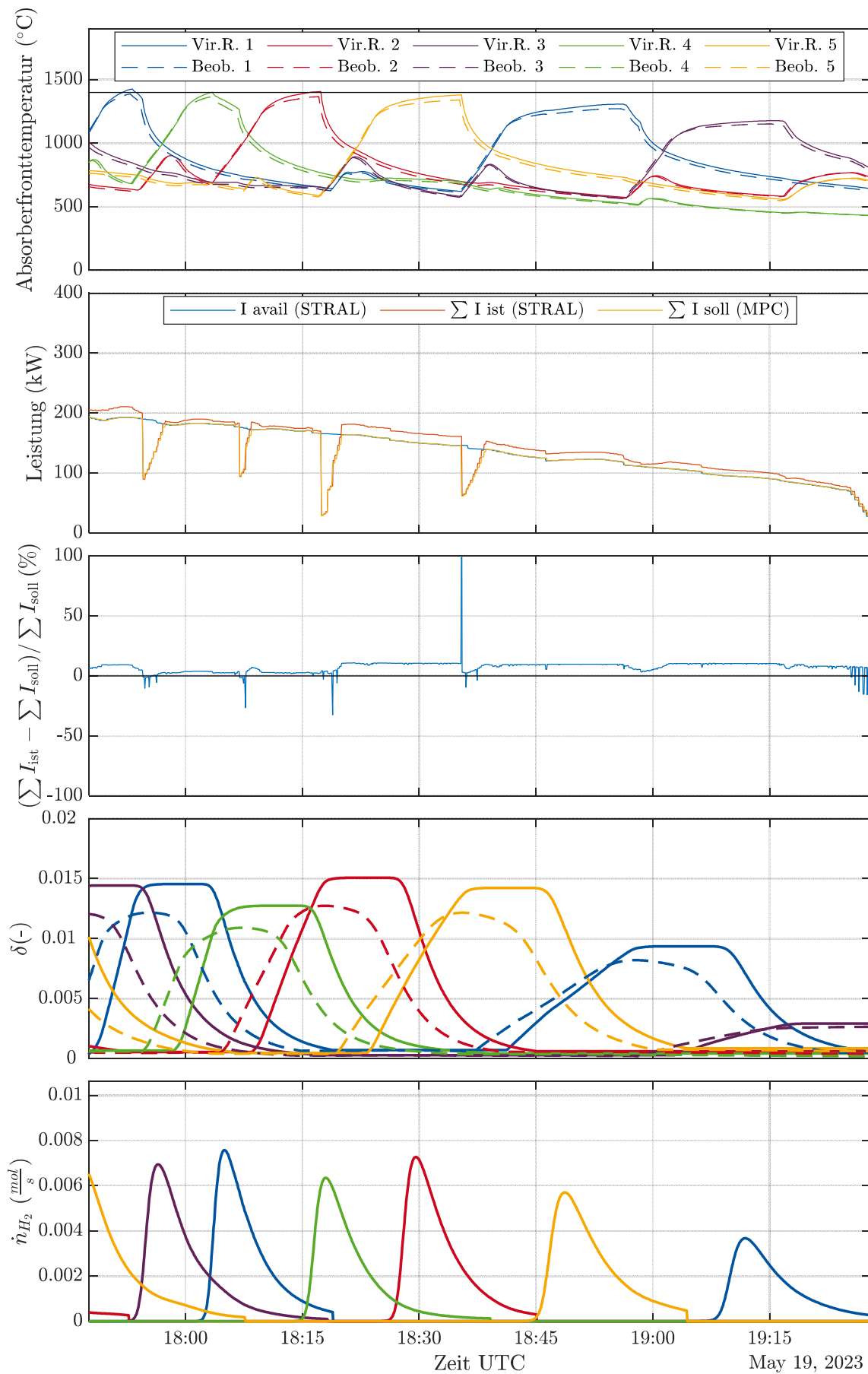


Abbildung 89: Bereich bei stabiler, aber abfallender DNI am Abend

C.6.3. Vergleich der H₂-Produktion mit und ohne Einbeziehung des Nowcastings (AP 6.3)

Hier wird nun die gleiche Simulation des 19.5.23 beschrieben, nun aber mit Einbeziehung des Nowcastings des WobaS-Systems. Der MPR nutzt nun das P_{50} -Quantil der in AP3 entwickelten probabilistischen Vorhersage für den Prädiktionshorizont. Mit der Einbindung ergibt sich ein sehr ähnliches Verhalten wie ohne das Nowcasting, in einigen Situationen unterscheidet sich das Verhalten jedoch leicht.

Abbildung 90 zeigt die akkumulierte Wasserstoffmenge, die in der Simulation im Verlaufe des 19.5.2023 erzeugt wurde. Auffällig ist, dass bei Einbindung der Nowcast-Information in die MPR die erzeugte Wasserstoffmenge vor allem im Bereich von Wolkendurchzügen zwischen 12 und 16 Uhr UTC höher ist, wie Abbildung 91 noch besser zu erkennen ist. So kann am Ende des Tages 5.9 mol mehr Wasserstoff erzeugt werden, was einer Erhöhung von 3,1 % entspricht.

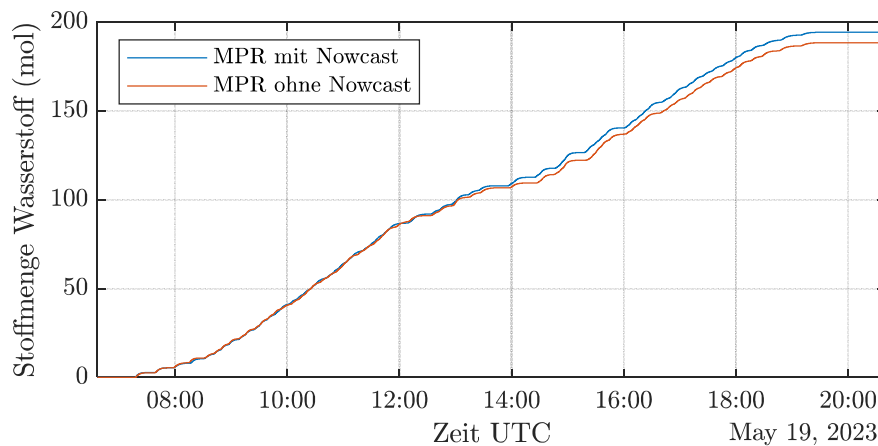


Abbildung 90: Kumulierte Menge des erzeugten Wasserstoffs in der Anlage, am 19.5.2023 (simuliert)

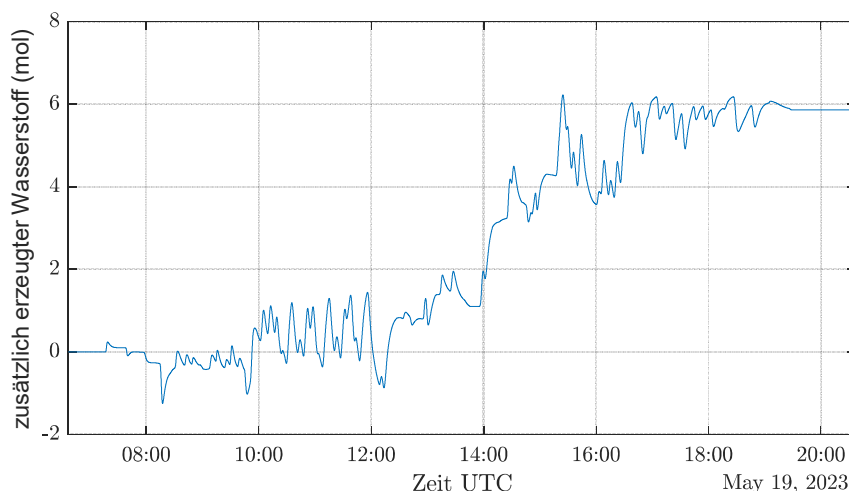


Abbildung 91: Zusätzlich erzeugter Wasserstoff durch die Einbindung der P50-Information in die MPR am 19.5.2023

Dies ist zwar eine relevante Zunahme, allerdings wird davon ausgegangen, dass das Potential der Einbindung der Nowcasts in die MPR bei Weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Im aktuellen Stand der Entwicklung prädiziert die MPR mit einer Abtastzeit von 3 Minuten und nutzt lediglich das P50-Quantil zur Ermittlung der verfügbaren Strahlung zu diesen

Zeitpunkten. Die Nowcasts umfassen aber noch wesentlich mehr Informationen, die im Projekt aus Zeitgründen aber nicht mehr in die Entwicklung der MPR einfließen konnten.

Neben der Verringerung der Abtastzeit zur Prädiktion wäre beispielsweise denkbar, die Information der Wolkensituation generell zu nutzen und dementsprechend bestimmte Betriebsstrategien zu fahren. Wie in AP6.2 beschrieben, spielt in der MPR aktuell die Heuristik eine große Rolle und bestimmt zu großen Teilen das Verhalten. Mit der aktuellen Heuristik bleibt zeitweise zur Verfügung stehende Energie im zweistelligen Prozentbereich ungenutzt. In einer Weiterentwicklung sollten die Wolkendaten Einfluss auf die Heuristik nehmen, was aktuell nicht geschieht.

C.6.4. Betrieb des Reaktorsystems und Demonstration der Regelung (AP 6.4)

In diesem Arbeitspaket sollte die entwickelte Regelung mit dem in AP4 und AP5 auf der Forschungsebene installierten System aus Reaktorattrappen demonstriert werden. Nach anfänglichen Kommunikationstests zwischen den Systemen im Sommer 2023 wurden an den in Tabelle 17 gezeigten Tagen Versuche mit Bestrahlung durchgeführt.

Tabelle 17: Testtage am Solarturm Jülich (WobaS-System 26.9.23 nicht genutzt)

Datum	Anzahl verwendeter Heliostate	Art des Versuchs
26.09.2023	10	Vortest
09.10.2023	10	Vortest
10.10.2023	10	Vortest
11.10.2023	10	Vortest
16.10.2023	38	Erster Test der MPR
17.10.2023	22	Anpassungen des Gesamtsystems
18.10.2023	80	Anpassungen des Gesamtsystems
31.10.2023	200	Anpassungen des Gesamtsystems
02.11.2023	233	Anpassungen des Gesamtsystems
15.11.2023	199	Parametrierung des Störgrößenbeobachters
22.11.2023	500	Parametrierung des Störgrößenbeobachters
07.12.2023	550	MPR mit aktiver Störgrößenbeobachtung

Die dazugehörigen Einstrahlungsbedingungen wurden bereits von CSPS in Tabelle 16 zusammengefasst. Bei den Versuchen waren immer Mitarbeiter von DLR und RWTH vor Ort am Solarturm beteiligt. Das Wolkensystem wurde per Remote-Verbindung von CSPS gestartet und überwacht.

Die Anzahl der verwendeten Heliostate wurde nach und nach bei den Versuchen gesteigert, da erst Erfahrung mit dem Kühlsystem gesammelt werden sollte, um die Anlage nicht zu beschädigen. Außerdem wurden parallel andere Versuche am Solarturm durchgeführt, die eine hohe Anzahl Heliostate benötigten.

Wie bereits erwähnt, stand der reale Reaktor während des Projektzeitraums nicht zur Verfügung, sodass die Regelung nur mit den 4 Reaktorattrappen erprobt wurde (Abschnitt C.6.4.2). Um auch bei einer niedrigen Anzahl verwendeter Heliostate die Regelung sinnvoll erproben zu können, wurde die Leistung in die virtuellen Reaktoren in diesem Falle skaliert.

Nach Projektende im Dezember 2023 erfolgten erste thermische Vortests mit dem realen Reaktor auf der Forschungsebene im Frühjahr 2024 im Rahmen anderer Vorhaben am DLR.

Da diese zeigen, dass die Reaktorattrappen das thermische Verhalten des realen Reaktors gut abbilden, wurde der Test mit den bisher höchsten Temperaturen der Vollständigkeit halber auch in diesen Bericht aufgenommen und ist in Abschnitt C.6.4.5 beschrieben.

C.6.4.1. Betrieb der Reaktorattrappen

Die Reaktorattrappen wurden wie geplant betrieben. Die Kühlwasserströme durch die Attrappen lagen bei allen Tests bei etwas mehr als 0.2 l/s. Am 22.11.2023 wurden die Attrappen am stärksten belastet, daher sind die Messwerte der Reaktorattrappen dieses Tages in Abbildung 92 gezeigt. Bei einer maximalen Flussdichten über 332 kW/m² lag die maximale Temperatur der Attrappe bei 91.5°C. Der Messpunkt ist an der Grenzfläche zwischen Kühlkörper und lackierter Oberfläche (vgl. Abbildung 60). Das Kühlwasser am Auslass lag bei dieser maximalen Belastung bei 81°C. Die Einlasstemperatur steigt während des Versuches an, da der Zwischenkühlkreis erst ab 40°C anfängt zu kühlen.

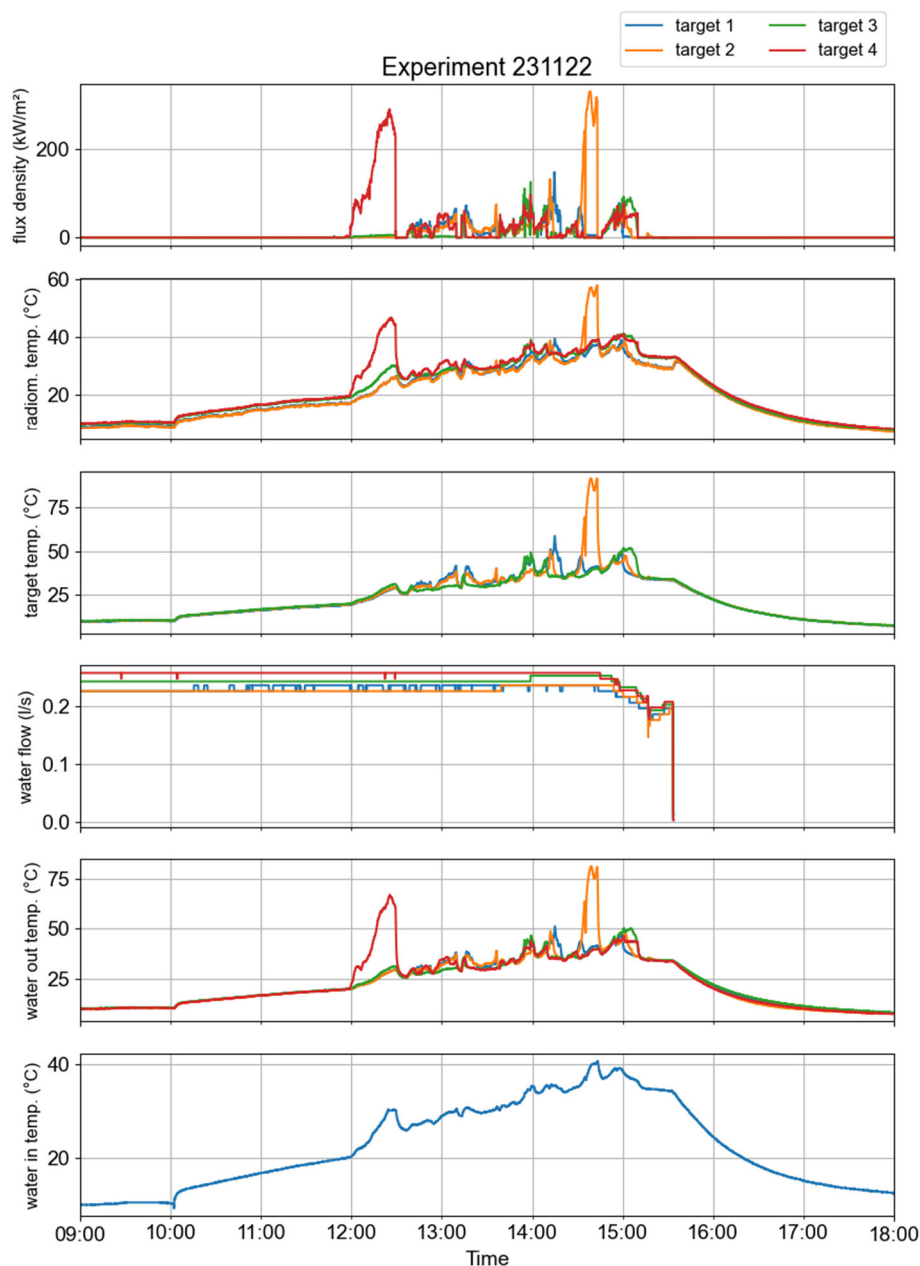


Abbildung 92: Physikalische Messwerte der Reaktorattrappen am 22.11.2023: Flussdichte des jeweiligen Radiometers, Kühlwasserdurchfluss, Temperaturen der Radiometer, Temperatur des Targets, Wasseraustritts- und Eintrittstemperatur

C.6.4.2. Kalibrierung und Skalierung der Leistung für die virtuellen Reaktoren

Für die Demonstrationstests der MPR wurden die Systeme wie in AP5 beschrieben nach Abbildung 69 verknüpft. Zu Beginn der Tests fiel auf, dass das FMAS-Messsystem nicht stabil Daten liefern konnte. Wenn alle Systeme gleichzeitig in Betrieb waren, wurden sporadisch (manchmal nach Stunden) NaN-Werte übermittelt, auf die wiederum die anderen Systeme nicht stabil reagieren konnten. Um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten, wurde die eingestrahlte Leistung auf eine Reaktorattrappe daher anders bestimmt. Dazu wurden die in Abschnitt C.4.1.2 und C.5.5 beschriebenen Radiometer verwendet, die die Strahlungsdichte I_{Radio} (in W/m^2) auf den Attrappen punktuell messen. Da sich die Strahlung nicht homogen über der Reaktorattrappe verteilt und ein virtueller Sekundärkonzentrator berücksichtigt werden muss, kann die tatsächliche Strahlungsleistung $\dot{Q}_{\text{ist,VR},i}$ (in W) in den virtuellen Reaktor der Reaktorattrappe nicht durch eine einfache Multiplikation mit der Fläche der Reaktorattrappe berechnet werden. Um die Inhomogenitäten der Strahlungsverteilung auf den Reaktorattrappen auszugleichen und dabei auch implizit die Eintrittsfläche sowie den Wirkungsgrad des Sekundärkonzentrators zu berücksichtigen, wird ein Kalibrierungsfaktor für die Flussmessung c_{FM} (in m^2) verwendet, der die Leistung in den virtuellen Reaktor einer Attrappe i jeweils mit

$$\dot{Q}_{\text{ist,VR,unscaled},i} = I_{\text{Radio},i} c_{\text{FM}} \quad (94)$$

angibt. Der Faktor c_{FM} wurde als konstant angenommen, aber vor jedem Versuch neu bestimmt, da bei jedem Versuch andere Heliostaten verwendet wurden, die einen anderen Wirkungsgrad des (virtuellen) Sekundärkonzentrators bedingen. Die Bestimmung von c_{FM} erfolgte durch einen Abgleich mit der verfügbaren Strahlung $\dot{Q}_{\text{verf,STRAL}}$, die STRAL liefert. STRAL berücksichtigt die (virtuellen) Sekundärkonzentratoren der (virtuellen) Reaktoren und die Auswahl der Heliostaten. Daher wird angenommen, dass $\dot{Q}_{\text{verf,STRAL}}$ die tatsächlich in einen Reaktor eintretende Leistung ausreichend genau wiedergibt. Aus einer Kalibrierungsmessung, bei der $\dot{Q}_{\text{verf,STRAL}}$ und I_{Radio} bei möglichst konstanter DNI aufgenommen werden, berechnet sich der Kalibrierfaktor mit der Methode der kleinsten Quadrate zu

$$c_{\text{FM}} = \dot{\mathbf{Q}}_{\text{verf,STRAL}}^+ \mathbf{I}_{\text{Radio}} \quad (95)$$

wobei die fett gedruckten Symbole Vektoren der Messwerte der Messreihe symbolisieren und

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\text{verf,STRAL}}^+ = (\dot{\mathbf{Q}}_{\text{verf,STRAL}}^T \dot{\mathbf{Q}}_{\text{verf,STRAL}})^{-1} \dot{\mathbf{Q}}_{\text{verf,STRAL}}^T \quad (96)$$

die Pseudoinverse der verfügbaren Strahlung $\dot{\mathbf{Q}}_{\text{verf,STRAL}}$ ist. Durch die Berechnung mithilfe der Pseudoinversen wird implizit eine quadratische Mittelung des Kalibrierungsfaktors bezogen auf die Messreihe durchgeführt.

In den Versuchen wurde stets nur ein Teil der Heliostaten des Solarfeldes verwendet. Um dennoch die Regelung sinnvoll erproben zu können, wurde die Eingangsleistung für die virtuellen Reaktoren mit einem weiteren Skalierungsfaktor c_{scale} nach oben skaliert, sodass sich bei Verwendung aller Heliostaten im Peak eine Strahlungsleistung von 300 kW ergibt: Auf Basis der Kalibrierungsmessung wurde mit dem maximal gemessenen Wert der verfügbaren Strahlungsleistung $\dot{Q}_{\text{verf,STRAL,max}}$ ein Skalierungsfaktor durch

$$c_{\text{scale}} = \frac{300 \text{ kW}}{\dot{Q}_{\text{verf,STRAL,max}}} \quad (97)$$

gewählt. Der MPR erhält in der Simulation somit die verfügbare Strahlungsleistung

$$\dot{Q}_{\text{verf,MPR}} = \dot{Q}_{\text{verf,STRAL}} c_{\text{scale}} \quad (98)$$

und die virtuellen Reaktoren die Leistung am jeweiligen Reaktoreintritt des Reaktors i von

$$\dot{Q}_{\text{ist,VR},i} = I_{\text{Radio},i} c_{\text{FM}} c_{\text{scale}} \quad (99)$$

Zur Simulation der virtuellen Reaktoren wird zwar $\dot{Q}_{\text{ist,VR},i}$ verwendet, jedoch könnte dieser Wert auf einem realen Reaktor nicht gemessen werden. Die Strahlung steht dem Beobachter und damit auch der Regelung daher nicht zur Verfügung. Stattdessen wird dem Beobachter die Sollleistung $\dot{Q}_{\text{soll},i}$ zur Verfügung gestellt, die durch die in Abschnitt C.2.4 eingeführte Störgröße d korrigiert wird

$$\tilde{\dot{Q}}_{\text{ist},i} = d * \dot{Q}_{\text{soll},i} \quad (100)$$

Der Beobachter schätzt die Störgröße d aufgrund des abweichenden Modellverhaltens von der Temperaturmessung und übergibt die korrigierte Strahlungsleistung $\tilde{\dot{Q}}_{\text{ist},i}$ der MPR über den Zustandsvektor x .

C.6.4.3. Demonstration der MPR ohne Korrektur der geschätzten-Strahlung

In einem ersten Versuch am 16.10.2023 wurden die 4 Reaktorattrappen mit der MPR geregelt. Die Störgröße zur Korrektur der Strahlungsfehler wurde hierbei noch nicht berücksichtigt, um die Genauigkeit der Strahlungssteuerung zu untersuchen. Tabelle 18 stellt die eingestellten Heliostatfeldparameter für diese Versuche dar.

Tabelle 18 Verfügbare Heliostaten und Feldanpassungen vom Versuchstag 16.10.2023

Heliostaten	38
Kalibrierungsfaktor c_{FM}	402 W/(kW/m ²)
Skalierungsfaktor c_{scale}	13

Die Ergebnisse sind in Abbildung 93 illustriert. In der oberen Grafik sind die Temperaturverläufe der 4 virtuellen Reaktoren an der Frontseite des Absorbers, sowie die entsprechenden geschätzten Werte durch den Beobachter dargestellt. An den summierten Ist- und Soll-Leistungen der Reaktoren (mittlere Grafik) ist zu sehen, dass die Abweichungen sehr dynamisch sind und sowohl positive als auch negative Werte von bis zu 60 % annehmen. Diese Fehler sind teilweise auf die geringe Aktualisierungsrate der verfügbaren Leistung zurückzuführen. Während diese bei einer Abtastzeit von 30 Sekunden berechnet wird, wird die Ist-Strahlung jede Sekunde ausgewertet.

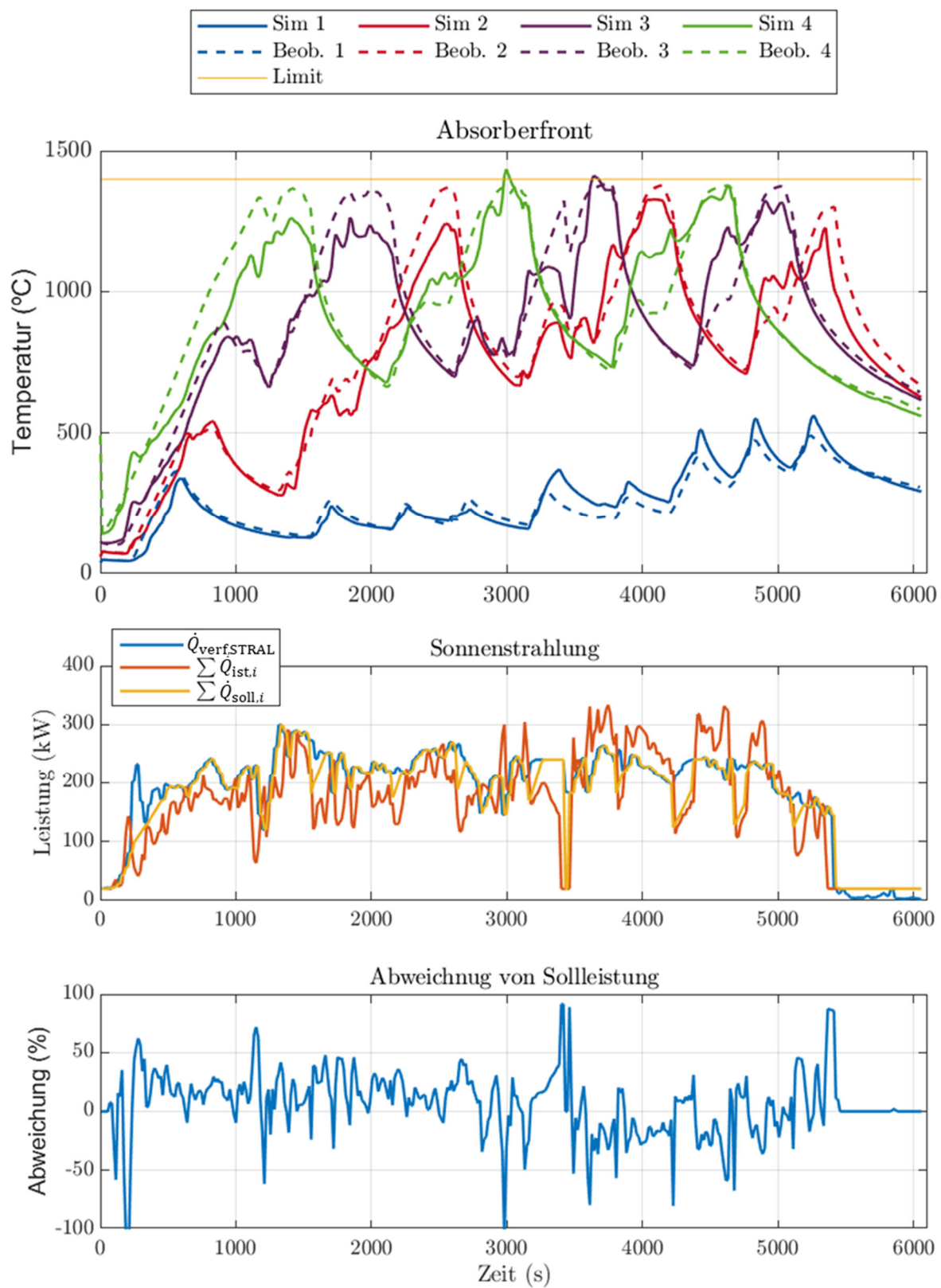


Abbildung 93 Demonstration der Regelung am 16.10.2023. Absorbertemperaturen und Strahlungsleistungen.

Somit entstehen die Fehler dadurch, dass die Heliostatfeldsteuerung stets von einer etwas veralteten Leistungsverteilung bzw. Sonnenstrahlung auf dem Feld ausgeht. Ebenso sind Aussetzer bei der verfügbaren Strahlung zu erkennen, z.B. nach etwa 3200 s Versuchszeit, bei denen sich die Werte der verfügbaren Leistung nicht ändern. Ein detaillierterer Verlauf der Ist- und Soll-Leistung für die einzelnen Reaktoren ist in Abbildung 94 zu sehen. Ohne Korrektur der geschätzten Strahlungen resultieren damit mittlere Abweichungen für die Reaktoren von ca. 20 %, die in Tabelle 19 aufgelistet sind. Für den ersten Reaktor fällt der Fehler etwas geringer aus, da dieser im Versuch weniger Strahlung empfing.

Tabelle 19 Mittlere Fehler der Strahlungssteuerung des Heliostatenfeldes über den einzelnen Reaktoren

Reaktor	1	2	3	4
Mittlerer quadratischer Fehler	9 %	21 %	21 %	20 %

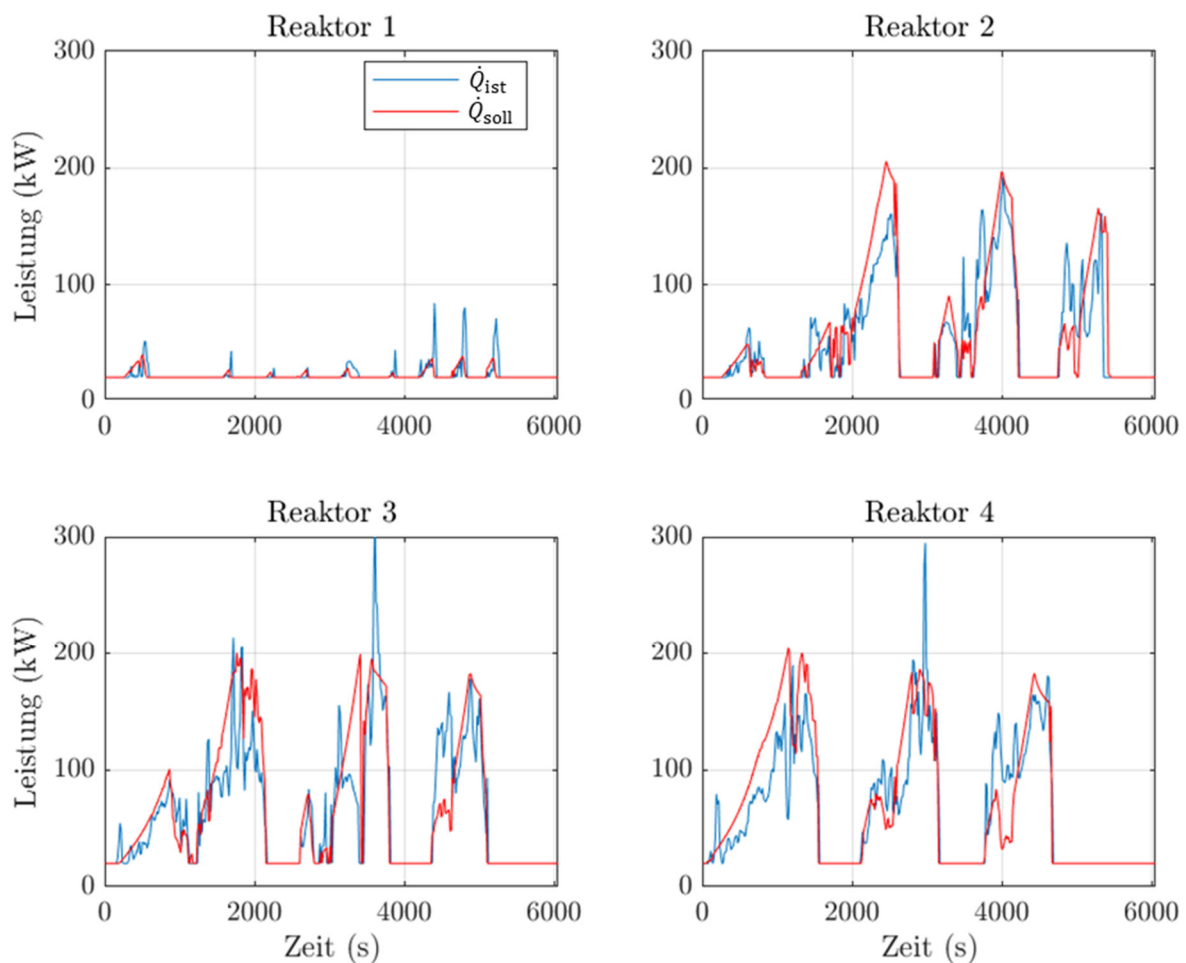


Abbildung 94 Tatsächliche und geforderte Strahlung auf den 4 virtuellen Reaktoren

Weiterhin stellt Abbildung 95 die gemittelten Reduktionsgrade in den virtuellen Reaktoren als auch die geschätzten Werte im Beobachter dar (mittlere Grafik). Die gestrichelten Linien repräsentieren hier die geschätzten Größen des Beobachters. An ihnen ist zu erkennen, dass die MPR wie erwartet die Reaktoren aufheizt, bis ein Reduktionsgrad erreicht ist, der dem Effizienzoptimum aus der Parameterstudie entspricht. Auch die Temperaturen des Absorbers kommen dabei sehr nah an die Grenztemperatur von 1400 °C heran, ohne diese zu überschreiten. Da die Eingangsstrahlung erhebliche Abweichungen aufweist und nicht korrigiert wird, haben auch die tatsächlichen Temperaturen an der Front des Absorbers größere Abweichungen zu den geschätzten Größen. Aus diesem Grund sind die tatsächlichen

Reduktionsgrade geringer, sodass die Reduktionsphasen etwas zu früh abgebrochen werden. In der vierten und fünften Aufheizphase zum Zeitpunkt 3000 s wird die Ist-Strahlung unterschätzt, wodurch leichte Temperaturüberschreitungen um ca. 20 °C auftreten, die jedoch nicht als sicherheitskritisch eingestuft werden. In den ersten drei Aufheizphasen liegen die Temperaturen weit unterhalb der Temperaturgrenzen.

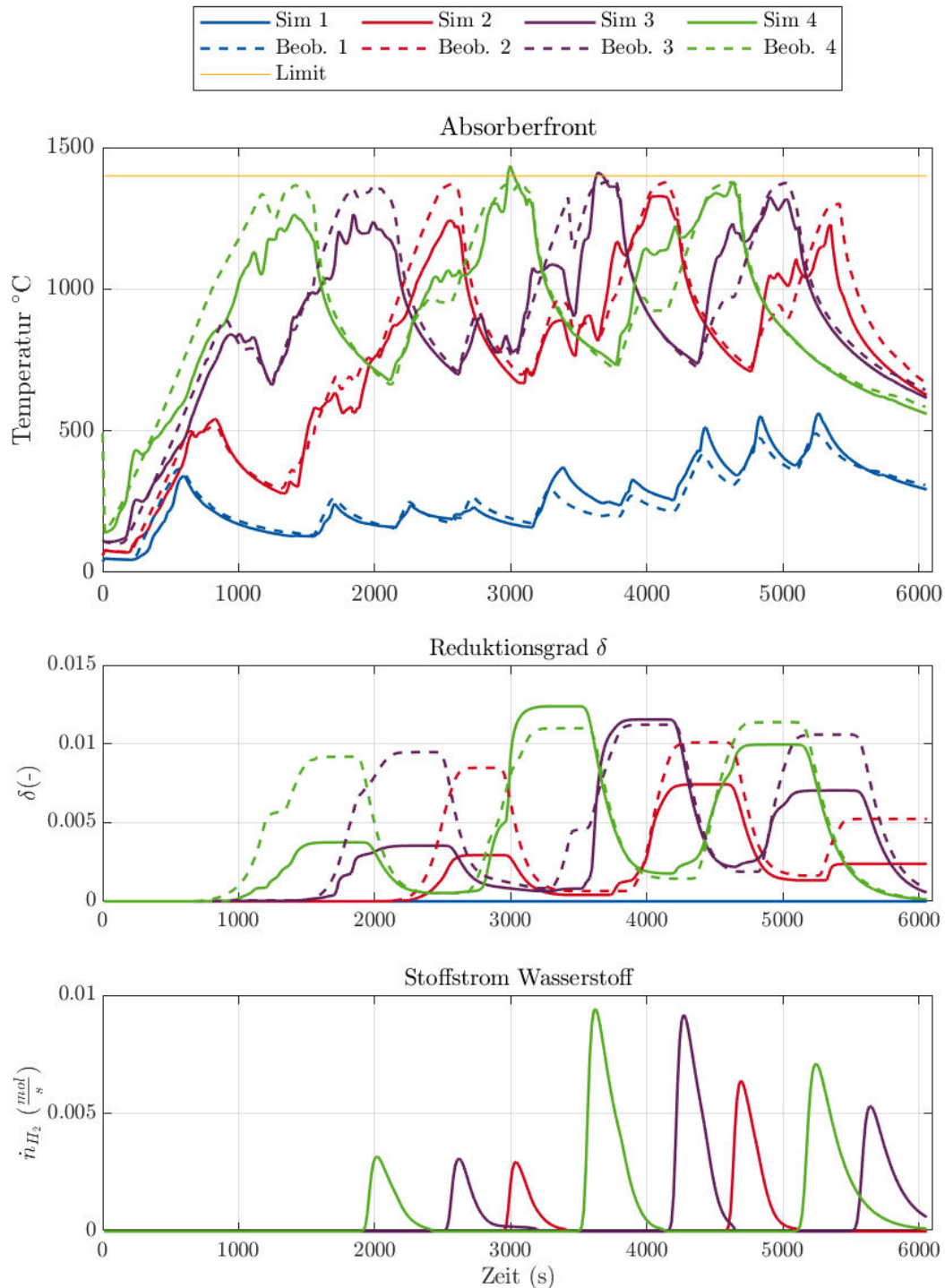


Abbildung 95 Demonstration der Regelung am 16.10.2023. Absorbertemperaturen, Reduktionsgrad und produzierte Wasserstoffströme.

C.6.4.4. Demonstration mit Korrektur der geschätzten Strahlung

Nachdem die Genauigkeit der Strahlungssteuerung und ihre Auswirkung auf die Regelung ohne Störgrößenkompensation untersucht wurde, wurde in einer weiteren Demonstration eine Korrektur der geschätzten Strahlung aktiviert und am 07.12.2023 erprobt. Abbildung 96 stellt die Ergebnisse dar. Dieser Versuch musste allerdings vorzeitig beendet werden, da die Kühlung eine Leckage erlitt und die Radiometer nicht ausreichend gekühlt werden konnten.

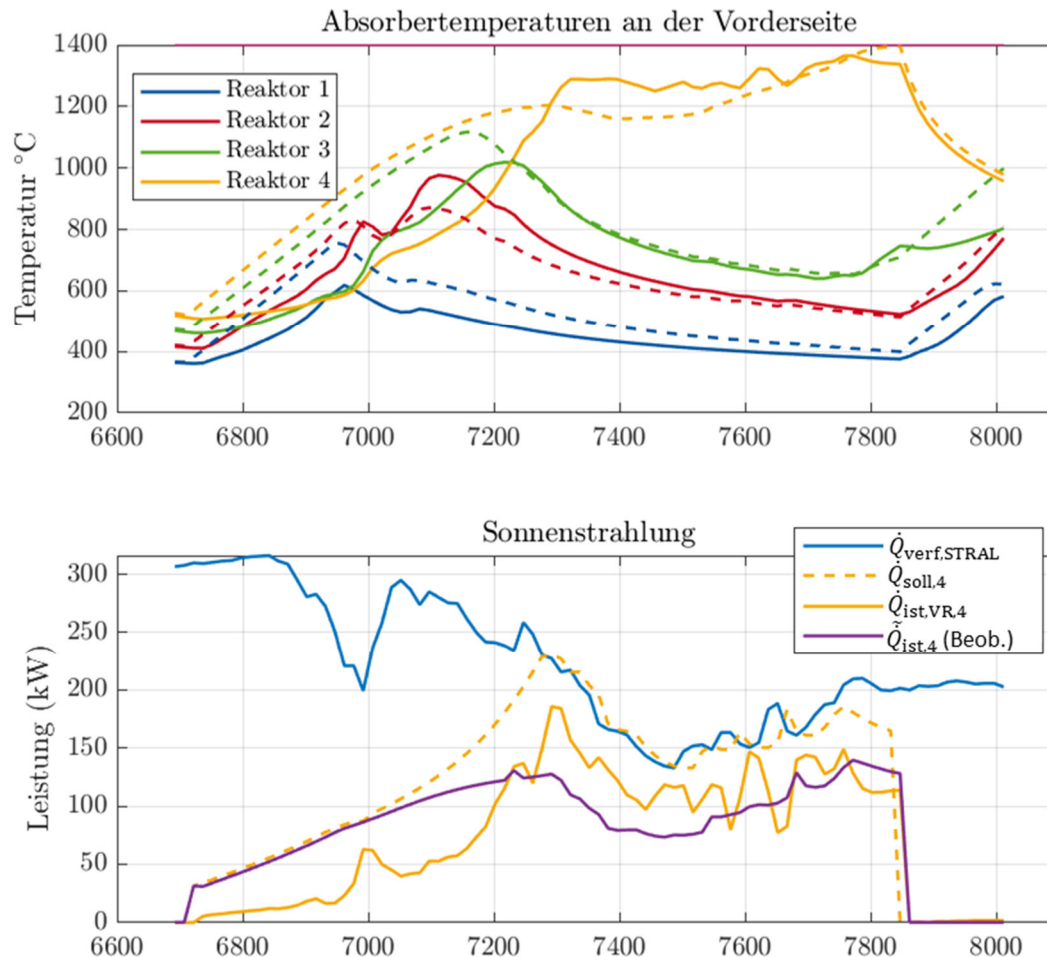


Abbildung 96 Versuch von 07.12.2023 mit Störgrößenbeobachter.

Wie zu erwarten ist, konnte die Sollleistung auch hier nicht umgesetzt werden. In diesem Fall erfolgt jedoch eine Anpassung der geschätzten Strahlung $\tilde{\dot{Q}}_{\text{ist},4}$, die sich der tatsächlichen Strahlung $\dot{Q}_{\text{ist},4}$ annähert. Dadurch wird auch die Abweichung bei der geschätzten Temperatur an der Front des Absorbers und beim gemittelten Reduktionsgrad reduziert. Es ist jedoch zu beachten, dass die Korrektur über die Temperatursensoren erfolgt, die sehr weit hinten im Absorber angebracht sind. Deshalb findet die Korrektur sehr träge bzw. mit einer gewissen Verzögerung statt, da die eingestrahlte Wärme erst nach hinten geleitet werden muss. Ebenso funktioniert die Korrektur erst bei höheren Einstrahlungswerten besser, da die Temperaturgradienten dann im Absorber höher sind und auch der Wärmetransport vor allem durch Strahlung innerhalb des Absorbers stärker ist. Die tatsächliche Temperatur schwingt aufgrund des Korrekturverzuges etwas über, konvergiert anschließend jedoch sehr gut auf den wahren Wert. Bei einem annähernd gleichen Reduktionsgrad des geschätzten und realen Wertes wird die Reduktionsphase letztendlich durch die MPR beendet, und die übrigen Reaktoren werden weiter aufgeheizt.

C.6.4.5. Betrieb des realen Reaktors und Vergleich mit Reaktormodell

Nach Abschluss des Projektes konnten Tests mit dem realen Reaktor aus dem ASTOR-ST-Projekt (s. Abbildung 97) am Solarturm Jülich durchgeführt werden. Ein erster Vortest mit wenigen Heliostaten erfolgte im März 2024, nach einigen Schlechtwetterperioden und weiteren Vortests erfolgte schließlich am 7.6.2024 ein thermischer Test mit erstmals signifikant hohen Temperaturen, allerdings bisher kein Test zur Wasserspaltung. Die thermischen Daten eignen sich dennoch, um zu validieren, wie gut eine Reaktorattrappe den realen Reaktor repräsentiert. Da die in den Reaktor eintretende Solarstrahlung nicht gemessen werden kann, wurde zeitgleich zum Reaktor die Reaktorattrappe 2 mit der gleichen Heliostatzahl bestrahlt, wie in Abbildung 98 gezeigt ist.



Abbildung 97: Reaktor während des Tests am 7.6.24 auf der Forschungsebene des STJ

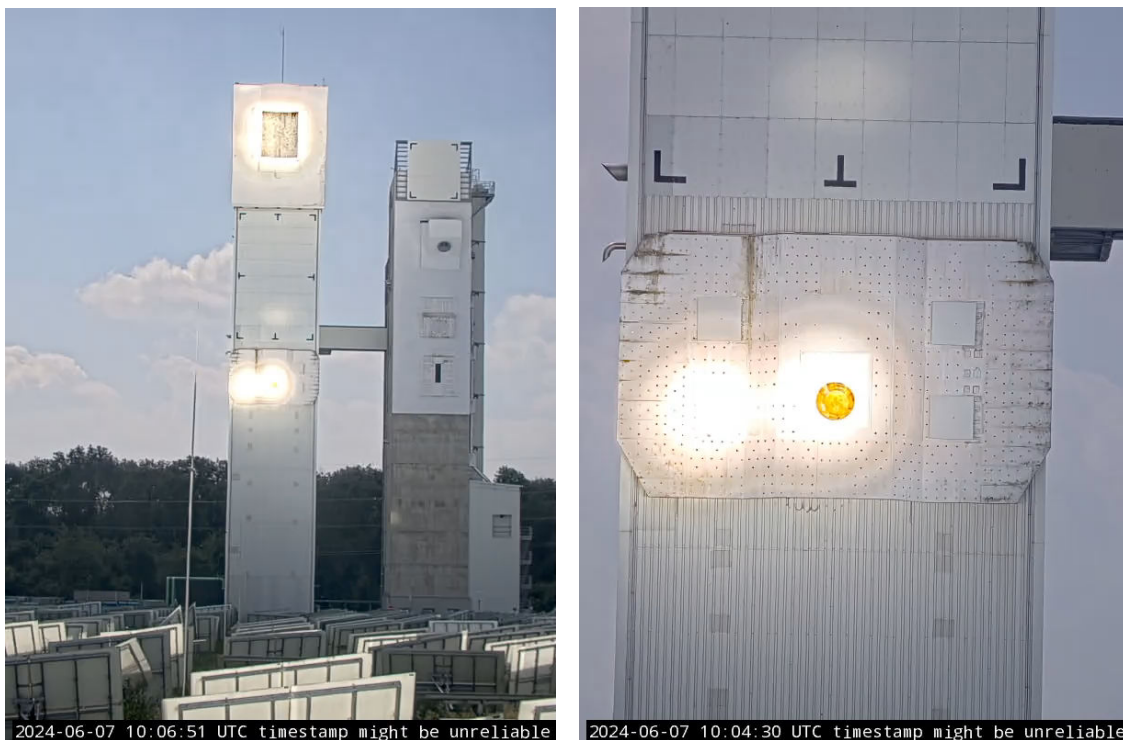


Abbildung 98: Solarturm und Forschungsebene während des Reaktortests am 7.6.24. Der Reaktor und Reaktorattrappe 2 wurde immer mit der gleichen Anzahl an Heliostaten bestrahlt.

Es wird davon ausgegangen, dass damit annähernd die gleiche Leistung auf die Reaktorattrappe und den realen Reaktor fällt. So soll überprüft werden, ob die Temperaturen im realen Reaktor bei gleicher Bestrahlung ähnlich denen des virtuellen Reaktors der Reaktorattrappe sind. Da die ersten Tests mit dem realen Reaktor noch aus Sicherheitsgründen manuell und nicht mit der MPR gefahren wurden, ist STRAL nicht mitgelaufen, das normalerweise im virtuellen Reaktor die Effizienz des Sekundärkonzentrators für die jeweiligen Einfallswinkel der Heliostaten berücksichtigt. Daher wurde der Transmissionsgrad des Sekundärkonzentrators aus [Buck2002] entnommen (s. Abbildung 99) und über alle jeweils auf dem Zielpunkt befindlichen Heliostaten gemittelt.

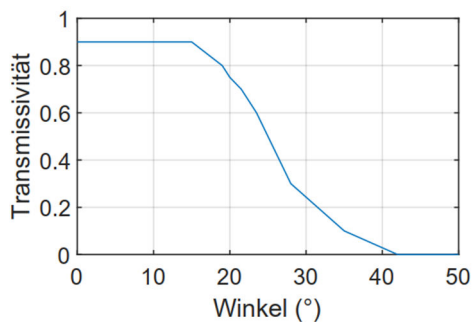


Abbildung 99: Transmissivität des Sekundärkonzentrators in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, Daten aus [Buck2002]

Abbildung 100 zeigt, dass der effektive Transmissionsgrad des Sekundärkonzentrators mit zunehmender Dauer des Versuches und zunehmender Anzahl an Heliostaten abfällt. Das liegt daran, dass zunehmend in einem schlechteren Winkel zum Sekundärkonzentrator stehende Heliostate ausgewählt werden mussten.

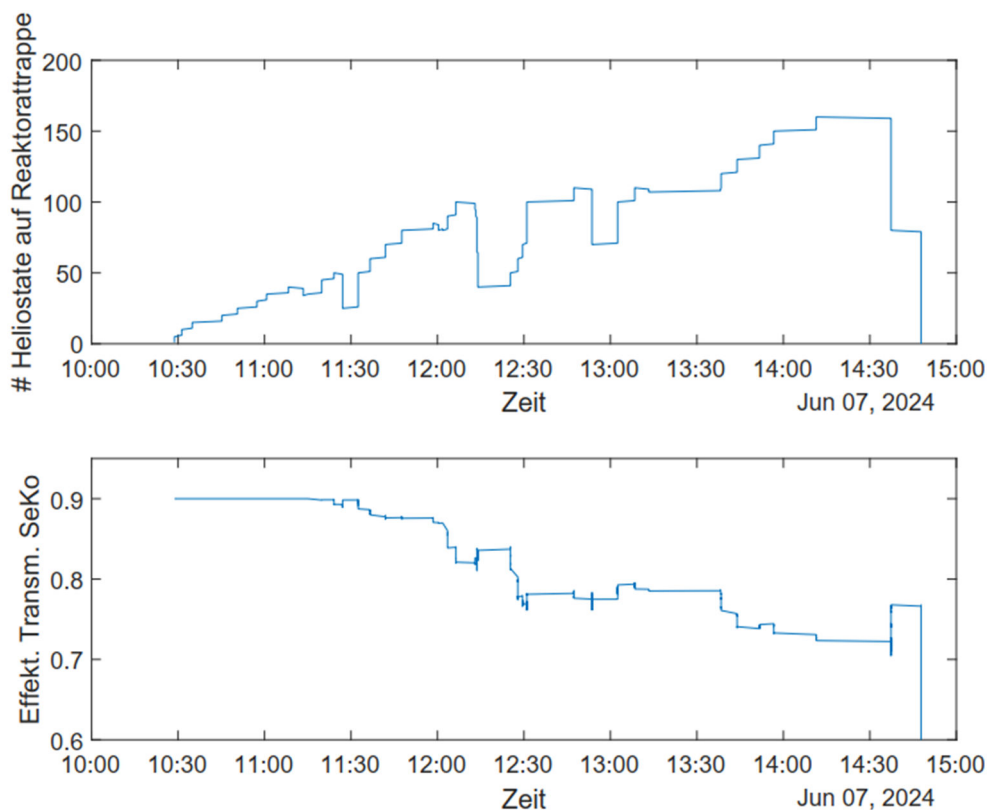


Abbildung 100: Anzahl der Heliostate auf Reaktorattrappe bzw. dem Reaktor und berechnete Effizienz des Sekundärkonzentrators für den Test am 6.7.24

Hinzu kam, dass durch einen zeitgleich stattfindenden Versuch auf dem Hauptreceiver des Solarturms (s. Abbildung 98) die Auswahl der Heliostate eingeschränkt war. Der Einfallswinkel ist generell eher hoch, da der Reaktor aus dem ASTOR-ST-Projekt nicht zum Feld geneigt wurde. Genauso wie in der Validierung mit den Daten aus den Synlight-Experimenten in Abschnitt C.1.2.2 wurden die Messdaten aus einer aus der Messdatenbank exportierten .csv-Datei geladen. Die Temperaturen des Absorbers wurden dann genauso zuerst innerhalb der Segmente und dann über die Segmente gemittelt. Einziger Unterschied war der Ort der Thermoelemente. Im Neuaufbau des Reaktors sind diese in Tiefen von etwa 10-30 mm von der Rückseite des Absorbers platziert. Der Einfachheit halber wurde daher eine Tiefe von der Rückseite von 20mm für alle Elemente angenommen (bei den Synlight-Experimenten war es noch 7.5 mm).

In der Simulation wurden die im Experiment verwendeten Gasströme eingestellt. Die in den Reaktor eintretende Flussdichte wurde aus dem Produkt aus Radiometerwert der Attrappe, effektiver Transmissivität des Sekundärkonzentrators und der Eintrittsfläche des Sekundärkonzentrators ermittelt.

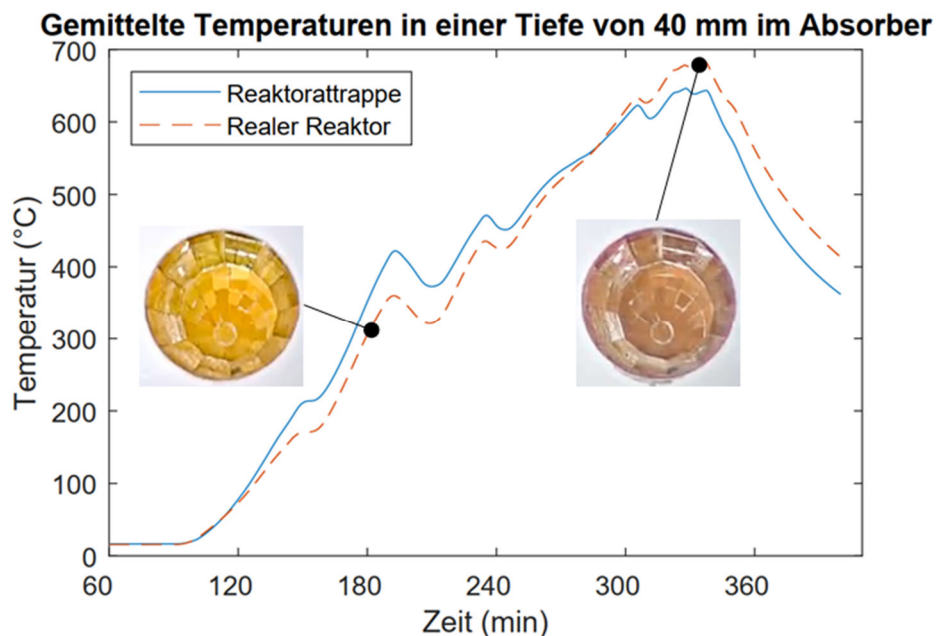


Abbildung 101: Vergleich der gemittelten Absorbertemperaturen in Reaktorattrappe (virtueller Reaktor) und realem Reaktor in einer Tiefe von 40 mm (von Rückseite aus 20 mm). Außerdem eingezeichnet: Sicht durch die Scheibe auf die Absorberfront des Reaktors während des Versuches, aufgenommen mit einer im Heliostatfeld stehenden optischen Kamera

Es ergibt sich eine maximale Abweichung von 63 K nach oben und 56 K nach unten, bei einer mittleren Abweichung von 2.8 K, was 3.7 % entspricht. Dies ist eine sehr gute Übereinstimmung, denn es gibt eine Vielzahl an Einflussfaktoren, die aus Zeitgründen bei der Validierung nicht berücksichtigt wurden:

- da unterschiedliche Heliostate für die Bestrahlung von Reaktor und Attrappe verwendet wurden, ist die eingestrahlte Leistung nicht auf beiden gleich. Dies wurde aber für den Vergleich angenommen
- beim Betrieb gelang es nicht immer, genau zeitgleich die gleiche Anzahl Heliostate auf Reaktor und Attrappe zu richten
- Zur Mittelung der Temperaturen wurde eine mittlere Tiefe der Thermoelemente statt der genauen Tiefe angenommen

- der Verlauf der Flussdichte auf den Attrappen wurde nicht berücksichtigt, sondern angenommen, dass der Radiometerwert für die gesamte Eintrittsfläche des Sekundärkonzentrators im Modell gilt
- Die optischen Eigenschaften des Sekundärkonzentrators sind durch leichte Schäden und Alterung nicht genau die wie in [Buck2002]
- (viele weitere Fehlerquellen, z.B. Stoff- und Geometriedaten im Modell, Messfehler, usw.)

Mit dem thermisch nun validierten Modell wurde die mittlere Fronttemperatur des Absorbers im realen Reaktor zu 1110 K abgeschätzt. Bei dieser Temperatur kann noch keine signifikante Reduktion des Ceroxids stattfinden. Eine helle Braunfärbung ist an der Absorberfront bei den höchsten Temperaturen im Experiment zwar zu erkennen (vgl. Abbildung 101), aber bei signifikanter Reduktion würde das Material noch deutlich dunkler erscheinen. Entsprechend wurde auch keine Reduktion am Sauerstoffsignal des Reaktors beobachtet. Daher kann kein Vergleich der Gasströme zwischen Reaktorattrappe und realem Reaktor durchgeführt werden.

Dennoch zeigt die gute Übereinstimmung in den Temperaturen zwischen Reaktorattrappe und realem Reaktor, dass eine Regelung für einen Solarreceiver bestehend aus mehreren Solarreaktoren mit Attrappen dieser Reaktoren demonstriert und getestet werden kann, auch weil ein Hauptziel der Regelung das Einhalten von maximalen Aufheizraten und das Betreiben der Reaktoren bei der Maximaltemperatur von 1400°C ist. Somit sind die im Projekt SolarFuelNow erfolgten und zuvor beschriebenen Tests der MPR ausschließlich auf den Reaktorattrappen auch ohne Einbeziehung des realen Reaktors aussagekräftig.

C.6.5. Bewertung der Ergebnisse (AP 6.5)

Die detaillierte Bewertung der Ergebnisse wurde bereits zusammen mit der Präsentation dieser in den vorherigen Abschnitten vorgenommen. Daher soll hier eine zusammenfassende Bewertung gegeben werden.

Es wurde gezeigt, dass mit der entwickelten MPR Aufheizraten und Temperaturgrenzen der betrachteten solarchemischen Reaktoren weitestgehend eingehalten werden können, insbesondere auch an Stellen, die messtechnisch kaum zu erfassen sind (z.B. Absorberfront), was einen deutlichen Mehrwert gegenüber dem Stand der Technik darstellt. Eine weitere Neuheit ist die automatisierte Regelung mehrerer Reaktoren. Das Verhalten der Mehrgrößen-MPR wird entscheidend durch eine Heuristik zum Umschalten der Reaktionsphasen bestimmt, deren Verwendung aufgrund der Komplexität der Problemstellung nötig war. Die Nutzung der Informationen des verbesserten Nowcasting-Systems in der MPR führt zudem zu einem höheren Ertrag an Wasserstoff. Hier wird allerdings noch deutlich mehr Potential gesehen, da aus Zeitgründen lediglich ein Quantil der probabilistischen Daten verwendet wurde. Die erstellte Simulationsumgebung mit den entwickelten und verknüpften Systemen inklusive ihrer Kommunikationsschnittstellen repräsentiert die reale Anlage, sodass sich damit in Zukunft verbesserte Regelungsstrategien und Betriebsweisen untersuchen lassen.

D. Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projektes wurden auf Konferenzen präsentiert und in wissenschaftlichen Journals veröffentlicht.

D.1. Konferenzen und Workshops

Fabel, Y., Nouri, B., Wilbert, S., Blum, N., Zarzalejo, L. F., & Pitz-Paal, R. (2022). All-sky imager based irradiance nowcasts: combining a physical and a deep learning model. *Webinar beim International Solar Energy Society (ISES)*. <https://elib.dlr.de/192515/>

Fabel, Y., Nouri, B., Wilbert, S., Blum, N., Schnaus, D., Triebel, R., ... & Pitz-Paal, R. (2023). Combining deep learning and physical models for solar nowcasting. <https://elib.dlr.de/198714/>

Fabel, Y., Schnaus, D., Nouri, B., Wilbert, S., Blum, N., Zarzalejo, L. F., & Pitz-Paal, R. (2023). Nowcasting systems for irradiance ramp event detection. <https://elib.dlr.de/201939/>

Fabel, Y., Schnaus, D., Nouri, B., Wilbert, S., Blum, N., Zarzalejo, L. F., & Pitz-Paal, R. (2024). Leveraging generative models for enhanced solar irradiance ramp detection. <https://elib.dlr.de/204099/>

Grobbe, J., Popp, R., Zanger, D., Giljanovic, A., Fend, T., Nouri, B., Piesche, G., Berger, S., Kraas, B., Oberkirsch, L., Schmitz, S., Thanda, V.K., Göhring, F., Schwarzbözl, P., Thomey, D., Sattler, C. (2023) *Demonstration of a Model Predictive Control for a Cluster of Solar Chemical Batch Reactors*. 17th International Conference on Energy Sustainability, 10.-12.7.2023, Washington DC, USA.

Grobbe, J. (2022) *Control of Solar Thermochemical Fuel Production Processes*. 25th Cologne Solar Colloquium, 22.6.2022, Jülich.

D.2. Veröffentlichungen in Journals

Nouri, B., Wilbert, S., Blum, N., Fabel, Y., Lorenz, E., Hammer, A., ... & Pitz-Paal, R. (2023). Probabilistic solar nowcasting based on all-sky imagers. *Solar Energy*, 253, 285-307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.060>

Fabel, Y., Nouri, B., Wilbert, S., Blum, N., Schnaus, D., Triebel, R., ... & Pitz-Paal, R. (2024). Combining Deep Learning and Physical Models: A Benchmark Study on All-Sky Imager-Based Solar Nowcasting Systems. *Solar RRL*, 2300808. <https://doi.org/10.1002/solr.202300808>

E. Literaturverzeichnis

[Belh2014] Belhomme, B., Pitz-Paal, R., Schwarzbözl, P. "Optimization of Heliostat Aim Point Selection for Central Receiver Systems Based on the Ant Colony Optimization Metaheuristic," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 136, 2014

[Bertasius2021] Bertasius, G., Wang, H., Torresani, L. (2021, July). Is space-time attention all you need for video understanding?. in *Int. Conf. on Machine Learning*, Vol. 139, 2021, p. 139.

[Buck2002] Buck, R., Bräuning, T., Denk, T., Pfänder, M., Schwarzbözl, F., 2002. Solar-hybrid gas turbine-based power tower systems (REFOS). *J. Solar Energy Eng.* 124 (1)

[Doso2020] Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., ... & Houlsby, N. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.

[Fabel2022] Fabel, Y., Nouri, B., Wilbert, S., Blum, N., Triebel, R., Hasenbalg, M., ... & Pitz-Paal, R. (2022). Applying self-supervised learning for semantic cloud segmentation of all-sky images. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(3), 797-809.

[Fabel2024] Fabel, Y., Nouri, B., Wilbert, S., Blum, N., Schnaus, D., Triebel, R., ... & Pitz-Paal, R. (2024). Combining Deep Learning and Physical Models: A Benchmark Study on All-Sky Imager-Based Solar Nowcasting Systems. *Solar RRL*, 2300808.

[Kumler2019] Kumler, A., Xie, Y., & Zhang, Y. (2019). A Physics-based Smart Persistence model for Intra-hour forecasting of solar radiation (PSPI) using GHI measurements and a cloud retrieval technique. *Solar Energy*, 177, 494-500.

[LaSalle2021] La Salle, J. L. G., David, M., & Lauret, P. (2021). A new climatology reference model to benchmark probabilistic solar forecasts. *Solar Energy*, 223, 398-414.

[Lauret2019] Lauret, P., David, M., & Pinson, P. (2019). Verification of solar irradiance probabilistic forecasts. *Solar Energy*, 194, 254-271.

[Nouri 2020] Nouri et al. (2020) *Evaluation of an all sky imager based nowcasting system for distinct conditions and five sites*. In: AIP Conference Proceedings, 2303 (180006). SolarPACES Conference 2019, 1.-4. Oktober 2019, Daego, South Korea. DOI: 10.1063/5.0028670

[Nouri2022] Nouri, B., Blum, N., Wilbert, S., & Zarzalejo, L. F. (2022). A hybrid solar irradiance nowcasting approach: Combining all sky imager systems and persistence irradiance models for increased accuracy. *Solar Rrl*, 6(5), 2100442.

[Paletta2021] Paletta, Q., Arbod, G., & Lasenby, J. (2021). Benchmarking of deep learning irradiance forecasting models from sky images—An in-depth analysis. *Solar Energy*, 224, 855-867.

[Roca2016] Roca, L., et al., A control based on a knapsack problem for solar hydrogen production. *Optimal Control Applications and Methods*, 2016. 37(3): p. 496-507.

[Säck2002] J.P. Säck, „Entwicklung und Simulation einer Wasserstoffherzeugungsanlage auf einem Solarturm“, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2012.

[Schr2018] Schroedter-Homscheidt, Marion und Kosmale, Miriam und Jung, Sandra und Kleissl, Jan (2018) *Classifying ground-measured 1 minute temporal variability within hourly*

intervals for direct normal irradiances. Meteorologische Zeitschrift, 27 (2), Seiten 161-179. Borntraeger Science Publishers.

[Schw2016] [5] P. Schwarzbözl, A. Rong, A. Macke, J.-P. Säck, and S. Ulmer, "An automated model-based aim point distribution system for solar towers," AIP Conference Proceedings, vol. 1734, 2016

[Synh2024] <https://synhelion.com/solar-fuels-and-plants/solar-fuel-plants>

[Thelen2016] Thelen, Willsch, Raeder, Dibowski: Hochauflösendes optisches Messsystem zur schnellen Erfassung von Flusssdichte-Kennfeldern. In: 19. Kölner Sonnenkolloquium 2016. Köln, Germany, 2016.

[Ulmer2003] Ulmer, S. "Messung der Strahlungsflusssdichte-Verteilung von punktkonzentrierenden solarthermischen Kraftwerken". Dissertation Universität Stuttgart, 2003.

[Zerveas2021] Zerveas, G., Jayaraman, S., Patel, D., Bhamidipaty, A., & Eickhoff, C. (2021, August). A transformer-based framework for multivariate time series representation learning. In *Proceedings of the 27th ACM SIGKDD conference on knowledge discovery & data mining* (pp. 2114-2124).

[Zoll2022] Zoller, S., Koepf, E., Nizamian, D., Stephan, M., Patané, A., Haueter, P. et al. (2022): A solar tower fuel plant for the thermochemical production of kerosene from H₂O and CO₂. In: *Joule* 6 (7), S. 1606–1616.

F. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspakete und deren Schnittstellen	6
Abbildung 2: Zeitplan zu Beginn des Vorhabens	8
Abbildung 3: Bisheriger Entwicklungsprozess der HYDROSOL-Technologie	9
Abbildung 4: Grundkonzept der HYDROSOL-Projektreihe	9
Abbildung 5: Heliostatfeld in Jülich	11
Abbildung 6: Durchschnittlicher absoluter Fehler (MAE) für verschiedene DNI-Variabilitätsklassen als Funktion der Vorlaufzeit, gezeigt für einen Datensatz über drei Jahre auf der PSA. Die über alle Zeitpunkte gemittelte Flussdichte beträgt 661 W/m^2 . Abbildung aus [Nouri2020]	12
Abbildung 7: Temperaturen der Absorberfront, Absorberrückseite und der Reaktorscheibe sowie erzeugter Wasserstoffstrom in einem Zyklus mit Flussdichte von 0 während der Oxidation und 1,5 MW während der Reduktion, aus Simulationsmodell zur Abschätzung der Reaktordynamik in AP1.1	12
Abbildung 8: Verlauf der maximalen Absorbertemperatur für verschiedene Stickstoffmassenströme. Ein typischer Betriebsmassenstrom für diese Reaktorgröße liegt bei 75 kg/h	13
Abbildung 9: Querschnitt des betrachteten Reaktors und Diagramm des Reaktormodells, aus [Grobbe2020]	15
Abbildung 10: Strahlungsaustausch im vorderen Bereich des Reaktors (im Raum zwischen Quarzglasscheibe und Absorber.	19
Abbildung 11: Strahlungsaustausch zwischen Absorberrückseite und der Innenseite von Wand 1	20
Abbildung 12: Veranschaulichung des chemischen Modells zur Reaktion des Ceroxids mit der Gasphase im Absorber	21
Abbildung 13: Gleichgewichtsfunktion der chemischen Reaktionen und deren analytische und über Newton-Verfahren numerisch berechneten Ableitung nach dem Partialdruck	23
Abbildung 14: Absorbersegmente des Reaktors	24
Abbildung 15: Temperaturmesspunkte in Absorbersegment IV	24
Abbildung 16: Gemessene Temperaturen im Absorberschaum am 6.7.21 (sog. „ASTOR-Test 4“)	25
Abbildung 17: Durch Mittelung erhaltene Segmenttemperaturen (ASTOR-Test 4, 6.7.21)	25
Abbildung 18: Vergleich der Absorbertemperatur sowie der Gasströme aus Experiment und Modell für den Test am 6.7.21 (ASTOR-Test 4)	26
Abbildung 19: Vergleich der Absorbertemperatur sowie der Gasströme aus Experiment und Modell für den Test am 21.7.21 (ASTOR-Test 6). Die Simulation endet hier früher als das Experiment, da im Experiment ab einem gewissen Zeitpunkt kein Eingangsmassenstrom für den Wasserdampf gemessen wurde und so für die Simulation keine Eingangsdaten mehr zur Verfügung standen.	27
Abbildung 20: Messungen aus dem Projekt Hydrosol-Plant. Die Schäume wurden in einem Rohrofen bei 1400°C reduziert und bei 1100°C mit Wasserdampf (60% H_2O , 40% N_2) oxidiert.	28
Abbildung 21: Schema des simplen Reaktormodells	29
Abbildung 22: Vergleich des simplen Reaktormodells in Python mit dem detaillierten Reaktormodell in MATLAB	30
Abbildung 23: Darstellung des Heliostatenfeldes in STRAL	31
Abbildung 24: Flussdichteverteilung bei Bestrahlung eines Reaktors. Solarturm Jülich. Spiegelfehler $2,8 \text{ mrad}$, 543 zufällig ausgewählte Heliostaten. Die Zahl im Kreis gibt die Leistung in kW für die Fläche an.	32
Abbildung 25: Sequenzdiagramm Zielpunktsteuerung	33

Abbildung 26: Vorberechnete Sonnenwinkel für den 21.06.2023.....	34
Abbildung 27: Komponentenmodell der Simulationsumgebung.....	35
Abbildung 28: Änderung der Flusssdichte mit dem Sonnenstand.....	37
Abbildung 29: Optimistische Flusssdichteverteilung am Solarturm in Jülich. (Die Zahlen geben den Interceptfaktor in % für den jeweiligen Reaktor an.).....	38
Abbildung 30: Temperatur (blau) und Reduktionsgrad (schwarz) der Reaktoren über eine Stunde. Zentraler Reaktor oben links.	39
Abbildung 31 Übersicht der Systeme auf der Solarturmanlage.....	42
Abbildung 32 Wasserstoffproduktion im zyklischen Prozess.....	43
Abbildung 33 Ein- und Ausgänge der Reaktoren. Temperaturen T können nur teilweise gemessen werden, Reduktionsgrad δ gar nicht.	43
Abbildung 34 Übersicht der Regelungsstruktur und Signalfussplan.	44
Abbildung 35 Prinzip der MPR.....	45
Abbildung 36 Versuchsreihe: Einstellung einer maximalen Reduktionsgrades $\delta_{\max}$ als Zielgröße.....	47
Abbildung 37 Verlauf der Effizienzen und Leistungserträge für eine Zielreduktionszahl von $\delta_{\max} = 0.0021$	48
Abbildung 38 Effizienz und Ertragsleistung in Abhängigkeit eines eingestellten Zielreduktionsgrades δ^*	49
Abbildung 39 Optimale Leistungsverteilung bei Erhöhung der Anzahl der Reaktoren. Grafiken oben gelten für einen Reaktor, in der Mitte für 2 Reaktoren und unten für 3 Reaktoren.....	51
Abbildung 40 Vergleich DLR-Modell und Beobachtermodell.....	56
Abbildung 41 Vergleich DLR-Modell und MPR-Modell.....	57
Abbildung 42 Temperaturverläufe unter Verwendung eines Extended Kalman Filters im Vergleich zu den Versuchswerten.....	58
Abbildung 43 Heuristik zur Erkennung eines Phasenwechsels.....	60
Abbildung 44 Heuristik zur Sortierung und Auswahl von drei Reaktoren.....	61
Abbildung 45 Kommunikationsstruktur zwischen den Rechnern.....	62
Abbildung 46 Integrationstest mit virtuellen Heliostatenfeld in STRAL: 0-1800 s.....	63
Abbildung 47 Integrationstest mit virtuellen Heliostatenfeld in STRAL: 1800-3600 s.....	63
Abbildung 48 Rechenzeit in Sekunden für die Tage 02/03/04/05/07/09/16/21/23. September 2019; blau = ohne Optimierungen; rot = mit Optimierungen; Ausreißer wurden entfernt.....	64
Abbildung 49 Rechenzeit in Sekunden für einen beispielhaft ausgewählten Tag.....	65
Abbildung 50 Positionen der Referenzstationen und ASIs (Quelle: Google Earth Google 2021, abgerufen am 25. Mai 2021).....	66
Abbildung 51 (Links) Verteilung DNI Variabilität beim Datensatz zur Ermittlung der Quantile. (Rechts) Verteilung DNI Variabilität Datensatz reserviert zur Validierung der Quantile.....	67
Abbildung 52 15-Minuten-Zeitintervall-Zusammensetzung aus historischen Bodenmessungen und deterministischen Vorhersagen, die für die DNI-Variabilitätsklassifikation für beispielhafte Vorlaufzeiten verwendet werden.	68
Abbildung 53 Streudiagramm, diskretisiert über die Vorlaufzeit und acht Variabilitätsklassen. Einige Quantile sind als Linien hervorgehoben.	68
Abbildung 54 Sechs Beispiele einer probabilistischen Vorhersage mit den Überdeckungswahrscheinlichkeiten PI 95.4% 80%, 68.3%, 40% und 20% sowie der $q(\tau=50\%)$ Vorhersage und der tatsächlich beobachteten Referenz.....	69
Abbildung 55 Schematische Darstellung der Erzeugung von Nowcasts mit dem DL End2end-Modell.....	73
Abbildung 56: Anordnung, Aufbau und Datenverarbeitung der Reaktorattrappen auf dem Solarturm Jülich.....	76
Abbildung 57: im Mai 2021 geplante Anordnung der Reaktorattrappen um den Reaktor aus dem Projekt ASTOR-ST.....	77

Abbildung 58: Elemente des Strahlenschutzes der Forschungsebene des STJ, die zur Anbringung der Reaktorattrappen teilweise entnommen wurden	77
Abbildung 59: Reaktorattrappe	78
Abbildung 60: Verbindung der beschichteten Aluminiumplatte mit den Kühlkörpern	78
Abbildung 61: R&I-Diagramm der Reaktorattrappen	79
Abbildung 62: Modell des Kühlsystems in OpenModelica	80
Abbildung 63: Modell eines Targets in OpenModelica zur Auslegung der Kühlung	81
Abbildung 64: Bilder der montierten Reaktorattrappen	83
Abbildung 65: Spektraler, hemisphärischer Reflektionsgrad der aufgespritzten „HiTemp1000 White“-Lackierung, gemessen mit dem Perkin Elmer UV-VIS-NIR Lambda 1050 Spektrophotometer im Quartz-Labor des DLR	84
Abbildung 66: Installation der Reaktorattrappen Ende März/Anfang April 2023	85
Abbildung 67: Installiertes Kühlsystem	85
Abbildung 68: Schnittstellendiagramm der Steuerungshard- und software am Solarturm Jülich	87
Abbildung 69: Vernetzung der Hardware Komponenten	89
Abbildung 70: OPC UA-Server-Schnittstelle zum Datenaustausch zwischen STRAL, MPC und SPS	91
Abbildung 71: Test der STRAL-HeliOS-Schnittstelle am Solarturm in Jülich	92
Abbildung 72: Kuppel des realen Reaktors mit Typ N Thermoelementen	93
Abbildung 73: Anbringung der Schaltschränke und Attrappen auf der Forschungsebene, von innen gesehen	93
Abbildung 74: Schaltschrank UR3 Attrappe1+2 links und UR4 Attrappe3+4 rechts mit Weidmüller EA-Baugruppen	94
Abbildung 75: Schaltschrank UR5 Seko mit Weidmüller EA-Baugruppen	94
Abbildung 76: Kühlsystem im Prozessleitsystem Labview 2017	95
Abbildung 77: Messprinzip FMAS in Ursprungsversion [Thelen2016]	96
Abbildung 78: Skizze einer Reaktorattrappe mit Eckpunkten zur Entzerrung, Position des Radiometers und gewählter Fläche zur Grauwertkalibrierung	96
Abbildung 79: Bilder der Wolkenkamera für den 17.10.23	99
Abbildung 80: Über das Heliostatfeld mit 1388 Heliostaten gemittelte DNI am 19.5.2023	100
Abbildung 81: Teilbedeckung des Feldes mit Wolken am 19.5.2023	100
Abbildung 82: Schnittstellendiagramm Simulationsumgebung	101
Abbildung 83: Sequenzdiagramm Simulation	102
Abbildung 84: Zur Simulation verwendete 1388 Heliostate. Im linken Bereich des Feldes wurden Umbauarbeiten durchgeführt, sodass dort keine Heliostate verwendet werden konnten.	102
Abbildung 85: Simulation der Anlage über den Verlauf des 19.5.2023. Oben: Fronttemperaturen der Reaktoren, einmal in den virtuellen Reaktoren und geschätzt vom Beobachter	103
Abbildung 86: Anfahrverhalten in der Anlagensimulation vom 19.5.2023	104
Abbildung 87: Eingefahrener Zustand mit konstanter DNI	106
Abbildung 88: Bereich mit hoher Variation in der Einstrahlung	107
Abbildung 89: Bereich bei stabiler, aber abfallender DNI am Abend	108
Abbildung 90: Kumulierte Menge des erzeugten Wasserstoffs in der Anlage, am 19.5.2023 (simuliert)	109
Abbildung 91: Zusätzlich erzeugter Wasserstoff durch die Einbindung der P50-Information in die MPR am 19.5.2023	109
Abbildung 92: Physikalische Messwerte der Reaktorattrappen am 22.11.2023: Flussdichte des jeweiligen Radiometers, Kühlwasserdurchfluss, Temperaturen der Radiometer, Temperatur des Targets, Wasseraustritts- und Eintrittstemperatur	111

Abbildung 93 Demonstration der Regelung am 16.10.2023. Absorbertemperaturen und Strahlungsleistungen.	114
Abbildung 94 Tatsächliche und geforderte Strahlung auf den 4 virtuellen Reaktoren	115
Abbildung 95 Demonstration der Regelung am 16.10.2023. Absorbertemperaturen, Reduktionsgrad und produzierte Wasserstoffströme.	116
Abbildung 96 Versuch von 07.12.2023 mit Störgrößenbeobachter.	117
Abbildung 97: Reaktor während des Tests am 7.6.24 auf der Forschungsebene des STJ .	118
Abbildung 98: Solarturm und Forschungsebene während des Reaktortests am 7.6.24. Der Reaktor und Reaktorattrappe 2 wurde immer mit der gleichen Anzahl an Heliostaten bestrahlt.	118
Abbildung 99: Transmissivität des Sekundärkonzentrators in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, Daten aus [Buck2002]	119
Abbildung 100: Anzahl der Heliostate auf Reaktorattrappe bzw. dem Reaktor und berechnete Effizienz des Sekundärkonzentrators für den Test am 6.7.24	119
Abbildung 101: Vergleich der gemittelten Absorbertemperaturen in Reaktorattrappe (virtueller Reaktor) und realem Reaktor in einer Tiefe von 40 mm (von Rückseite aus 20 mm). Außerdem eingezeichnet: Sicht durch die Scheibe auf die Absorberfront des Reaktors während des Versuches, aufgenommen mit einer im Heliostatfeld stehenden optischen Kamera	120

G. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abgeschätzte Dynamiken der Anlage (AP1.1)	13
Tabelle 2: Parameter für detailliertes MATLAB-Modell des solaren Reaktors	18
Tabelle 3: Abweichungen in der Absorbertemperatur zwischen Modell und Experiment.....	27
Tabelle 4: Sauerstoff- und Wasserstoffmengen in Reduktion bzw. Oxidation, sowohl gemessen als auch simuliert	28
Tabelle 5: Vergleich des simplen Reaktormodells in Python mit dem detaillierten Reaktormodell in MATLAB	29
Tabelle 6: Modellvereinfachungen im Beobachter und MPR.....	55
Tabelle 7 Vergleich der Temperaturen zwischen dem komplexen DLR-Modell und dem reduzierten Modell im Beobachter	55
Tabelle 8 Vergleich der Temperaturen zwischen dem komplexen DLR-Modell und dem reduzierten Modell in der MPR	56
Tabelle 9 Abdeckung und Auflösung des genutzten Datensatzes	66
Tabelle 10 Kurzbeschreibung der Klassen der DNI Variabilität.....	67
Tabelle 11 Validierungsergebnisse für das probabilistische ASI Modell sowie das klimatologische Benchmark Model CSD-Clim. Die Vorhersagen werden für die 9 Referenzstationen bewertet. Für jede Metrik wird der Mittelwert Score und seine Standardabweichung über die LTs angegeben.....	71
Tabelle 12 Verwendete Datensätze und ihre Anwendung in diesem Arbeitspaket. Station ID wie in Abbildung 50.	72
Tabelle 13 Validierungsergebnisse der deterministischen Vorhersagen für die verschiedenen Modelle. Die Vorhersagen werden für die 9 Referenzstationen bewertet. Für jede Metrik wird der Mittelwert-Score und seine Standardabweichung über die LTs angegeben.....	74
Tabelle 14 Validierungsergebnisse der probabilistischen Vorhersagen für die verschiedenen Modelle. Die Vorhersagen werden für die 9 Referenzstationen bewertet. Für jede Metrik wird der Mittelwert Score und seine Standardabweichung über die LTs angegeben.....	74
Tabelle 15: Datenliste SPS.....	90
Tabelle 16: Zusammenfassung der Einstrahlungssituation an den Demonstrationstagen der MPR	98
Tabelle 17: Testtage am Solarturm Jülich (WobaS-System 26.9.23 nicht genutzt).....	110
Tabelle 18 Verfügbare Heliostaten und Feldanpassungen vom Versuchstag 16.10.2023...	113
Tabelle 19 Mittlere Fehler der Strahlungssteuerung des Heliostatenfeldes über den einzelnen Reaktoren.....	115