

Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und
Energiespeicherung (IGTE); ehemals ITW

IGTE

Forschungsbericht zum BMWi-Vorhaben

Entwicklung eines neuartigen, auf CFD Simulationen und virtuellen Kollektorprüfungen basierenden Entwicklungs- und Optimierungswerkzeug für Flachkollektoren

Akronym „VirtColl+“

Förderkennzeichen: 0325556A
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2015 bis 30.06.2019

Bearbeitung: Universität Stuttgart
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE);
ehemals Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS)
Beate Vetter, Stephan Fischer, Harald Drück
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart
Tel. 0711/685-63231, Fax 0711/685-63503
E-Mail: stephan.fischer@igte.uni-stuttgart.de
harald.drueck@igte.uni-stuttgart.de

Stuttgart, 15. Januar 2020

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BWi) unter dem Förderkennzeichen 0325556A gefördert. Die Autorinnen und Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hinweis:

Durch die Zusammenführung des ITW mit zwei anderen Instituten am 01.07.2018 ergibt sich der neue Institutsname Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE). Das Institutskürzel IGTE wird ab diesem Datum verwendet. Für Dokumente oder Textpassagen die vor dem 01.07.18 erstellt wurden, wird die Abkürzung ITW bzw. TZS beibehalten.

Kurzfassung

Im Projekt VirtColl+ wurde ein auf CFD Simulationen (CFD: Computational Fluid Dynamics) und virtuellen Kollektorprüfungen basierendes Entwicklungs- und Optimierungswerkzeug für Flachkollektoren entwickelt das in seinem Umfang bislang einzigartig ist.

Für die gängigsten Durchströmungsformen wurden hinsichtlich geometrischen Größen parametrisierte CAD-Kollektormodelle aufgebaut. Durch die Anpassung der Parameter (Design Parameter) können die CAD-Kollektormodelle zum Beispiel hinsichtlich der Größe, der Materialstärke, der Anzahl an Steigrohren (Harfenabsorber) bzw. Serpentinaen ((Doppel-) Mäanderabsorber) sowie diverser weiterer Größen variiert werden. Der parametrisierte Aufbau ermöglicht Kollektorherstellern die Nachbildung eigener Produkte in vereinfachter Form. Basierend auf den parametrisierten CAD-Kollektormodellen wurde eine effiziente Vernetzungsstrategie entwickelt und implementiert.

Als kollektorspezifische Größen gehen neben der Geometrie von Absorber und Gehäuse die Material- und optischen Oberflächeneigenschaften der Komponenten (transparente Abdeckung, Absorber Wärmedämmung und Gehäuse) ein. Die optischen Oberflächeneigenschaften, vor allem von selektiver Absorberbeschichtung und transparenter Abdeckung, sind von der Wellenlänge abhängig. Innerhalb der CFD-Modelle wurden zwei Spektralbänder definiert, für die Absorptions-, Reflektions-, Emissions- und Transmissionsgrad der einzelnen Oberflächen festgelegt werden.

Basierend auf den Anforderungen der ISO 9806, die die Prüfverfahren für thermischen Kollektoren normt, wurde ein virtuelles Prüfverfahren auf der Basis von CFD-Simulationen entwickelt. Das virtuelle Prüfverfahren legt Umgebungs- und Betriebsbedingungen sowie die Auswertung der Simulationsergebnisse fest. Die Ergebnisse des virtuellen Prüfverfahrens sind die charakteristischen Kollektorkennwerte (Spitzenwirkungsgrad, Wärmedurchgangskoeffizienten und Einfallswinkelkorrekturfaktoren) und damit die Wirkungsgradkennlinie sowie der daraus resultierende Kollektorjahresertrag, aber auch die Bauteiltemperaturen. Durch die Anpassung der Umgebungs- und Betriebsbedingungen können zusätzlich Worst Case Szenarien betrachtet werden.

Die CFD-Modelle bzw. das virtuelle Prüfverfahren wurde an zwei Serienprodukten validiert. Es wurden sehr gute bis gute Übereinstimmungen hinsichtlich Bauteiltemperaturen, Wirkungsgradkennlinien und Kollektorjahreserträgen erzielt.

Mit Hilfe des entwickelten Verfahrens zur virtuellen Kollektorprüfung können nun also die thermische Leistungsfähigkeit und der Kollektorjahresertrag einer Neu- oder Weiterentwicklung bereits vor dem Bau eines Prototyps mit einer guten Genauigkeit berechnet werden. Praxisrelevante Fragestellungen können mit umfangreichen Parameterstudien in kurzer Zeit und mit guter Genauigkeit virtuell untersucht werden.

Abschließend werden die Inhalte und Ergebnisse des Forschungsberichts zusammengefasst und bewertet.

Abstract

In the VirtColl+ project, a development and optimization tool for flat plate collectors based on CFD simulations (CFD: Computational Fluid Dynamics) and virtual collector tests was developed, which is unique in its scope.

For the most common flow forms, CAD collector models parameterized in terms of geometric sizes were built. By adjusting the parameters (design parameters), the CAD collector models can be varied, for example, in terms of size, material thickness, number of risers (harp absorbers) or serpentines ((double) meander absorbers) and various other sizes. The parameterized design enables collector manufacturers to reproduce their own products in a simplified form. Based on the parameterized CAD collector models, an efficient meshing strategy was developed and implemented.

Collector-specific parameters include the geometry of the absorber and housing as well as the material and optical surface properties of the components (transparent cover, absorber thermal insulation and housing). The optical surface properties, especially of selective absorber coating and transparent cover, depend on the wavelength. Within the CFD models, two spectral bands have been defined for which absorption, reflection, emissivity and transmittance of the individual surfaces are determined.

Based on the requirements of ISO 9806, which standardizes the test procedures for thermal collectors, a virtual test procedure based on CFD simulations was developed. The virtual test procedure defines environmental and operating conditions as well as the evaluation of the simulation results. The results of the virtual test procedure are the characteristic collector values (peak efficiency, heat transfer coefficients and angle of incidence correction factors) and thus the efficiency curve and the resulting annual collector yield, but also the component temperatures. By adjusting the ambient and operating conditions, worst case scenarios can also be considered.

The CFD models and the virtual test procedure were validated on two series products. Very good to good agreement was achieved with regard to component temperatures, efficiency curves and annual collector yields.

With the help of the developed method for virtual collector testing, the thermal performance and the annual collector yield of a new or further development can now be calculated with good accuracy even before the construction of a prototype. Questions of practical relevance can be examined virtually with extensive parameter studies in a short time and with good accuracy.

Finally, the contents and results of the research report are summarized and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract	III
Nomenklatur	VII
Große lateinische Symbole	VII
Kleine lateinische Symbole	VII
Kleine griechische Symbole	VIII
Abkürzungen.....	VIII
Indizes	IX
1. Einführung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen	1
1.3 Abgrenzung und Innovationscharakter von VirtColl+	1
1.4 Zielsetzung und Aufbau	2
2. Auswahl einer geeigneten Simulationssoftware (AP 1)	3
3. Erstellung von Berechnungsgittern aus CAD Dateien der Flachkollektoren (AP 2)	5
3.1 Erstellung der parametrisierten CAD-Kollektormodelle	5
3.2 Vorbereitung der CAD Daten für die CFD Berechnungen.....	13
3.3 Erstellung der Berechnungsgitter.....	14
4. Erstellung der CFD Kollektormodelle (AP 3).....	20
4.1 Strahlungsmodellierung	22
4.2 Modellierung der Wärmeverluste durch Wärmestrahlung und Konvektion.....	23
4.3 Wärmeleitung durch die Wärmedämmung	24

4.4	Luftströmung im Spalt zwischen Absorber und Abdeckung	25
4.5	Wärmeübertragung ans Wärmeträgerfluid.....	26
4.6	Validierung der CFD Kollektormodelle hinsichtlich der Bauteiltemperaturen ..	27
4.6.1	Bauteiltemperaturen des Kollektors vom Typ K1.....	27
4.6.2	Bauteiltemperaturen des Kollektors vom Typ K2.....	33
4.8	Automatisierte Auswertung	37
5.	Entwicklung des virtuellen Kollektorprüfverfahrens (AP4)	38
5.1	Vorgehensweise beim virtuellen Kollektorprüfverfahren.....	38
5.2	Validierung des virtuellen Kollektorprüfverfahrens	44
6.	Messtechnische Untersuchung der Kollektoren und Komponenten (AP 5)	49
6.1	Beschreibung der Kollektoren	49
6.2	Ergebnisse der Leistungsprüfungen	52
6.3	Untersuchung der Homogenität der Durchströmung	54
6.4	Exposition der Kollektoren	60
6.5	Bestimmung der optischen Materialeigenschaften der Komponenten	67
6.6	Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmungen	73
7.	Exemplarische Anwendungen (AP 6).....	76
7.1	Variation des Abstands zwischen den Steigrohren.....	83
7.2	Untersuchung der Luftwechselrate	87
7.3	Variation des Volumenstroms	95
7.4	Variation der Absorberblechdicke	96
7.5	Variation der Steigrohrdurchmesser	98
7.6	Fazit	99
8.	Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit (AP 7)	100
8.1	Projektkoordination	100
8.2	Öffentlichkeitsarbeit	100

9. Zusammenfassung	102
10. Danksagung	103
11. Literaturverzeichnis	104
Anhang	105
Anhang A.....	105
Anhang B.....	107
Anhang C.....	109
Anhang D.....	111

Nomenklatur

Große lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche
D	m	Innendurchmesser
G	W/m^2	Hemisphärische Bestrahlungsstärke
\dot{Q}	W	Wärmestrom
T	K	Temperatur

Kleine lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a_1	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	Wärmedurchgangskoeffizient
a_2	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^2)$	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient
b	$\text{W}/(\text{m K } ^\circ\text{C})$	Koeffizient zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit
c	$\text{W}/(\text{m K})$	Effektive Wärmeleitfähigkeit bei $0\text{ }^\circ\text{C}$
c_p	$\text{J}/(\text{kg K})$	Spezifische Wärmekapazität
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
u	m/s	Windgeschwindigkeit
v	m/s	Fluidgeschwindigkeit

Kleine griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	-	Absorptionskoeffizient
α	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient
β	°	Anstellwinkel zur Horizontalen
ε	-	Emissionskoeffizient
η	-	Wirkungsgrad
η_0	-	Spitzenwirkungsgrad
θ	°	Einfallswinkel
ϑ	°C	Temperatur
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
λ	m	Wellenlänge
μ	kg/(m s)	Dynamische Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	W/(m ² K ⁴)	Stefan Boltzmann Konstante
τ	-	Transmissionskoeffizient

Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung
AP	Arbeitspaket
IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung

Symbol	Bezeichnung
ITW	Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart
K1	Kollektor vom Typ K1
K2	Kollektor vom Typ K2
PTJ	Projekträger Jülich
Re	Reynolds-Zahl
TZS	Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart

Indizes

Symbol	Bezeichnung
amb	Ambient
aus	Austritt
b	direkt
d	diffus
ein	Eintritt
G	brutto
glas	Glas
hem	hemisphärisch
konv	Konvektion
komb	kombiniert
m	mittlere

Symbol	Bezeichnung
--------	-------------

Mess	Messung
------	---------

sky	Himmel
-----	--------

Sim	Simulation
-----	------------

str	Strahlung
-----	-----------

1. Einführung

1.1 Motivation und Problemstellung

Mit Hilfe der Solarthermie kann der Einsatz fossiler Energieträger zur Wärme- und Kälteerzeugung maßgeblich reduziert werden. Für eine wirtschaftliche Umsetzung ist aber eine massive Kostenreduktion bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung von solarthermischen Anlagen notwendig. Das Projekt VitColl+ setzt am Herzstück einer Solarthermieanlage, dem Kollektor an. Die Entwicklung eines virtuellen Entwicklungs- und Optimierungstools für Flachkollektoren soll die Neu- und Weiterentwicklung von Flachkollektoren zum einen beschleunigen, zum anderen eine Effizienzsteigerung ermöglichen.

1.2 Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen

CFD Strömungssimulationen werden in vielen Bereichen der industriellen Entwicklung und akademischen Forschung als Werkzeug zur Produktentwicklung und –optimierung eingesetzt. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Untersuchungen zur Fertigungstechnik und Kollektorkonstruktion von Vollkunststoff-Kollektoren“ (FKZ: 0325986A) an der Hochschule Ingolstadt wurde beispielsweise die Entwicklung der Fertigungstechnik und die Kollektorkonstruktion für einen Vollkunststoffkollektor mit Hilfe von CFD Simulationen unterstützt.

Mit Strömungssimulationen können diverse Konstruktionsvarianten oder Auswirkungen unterschiedlicher Materialien bereits vor dem Bau eines Prototyps untersucht werden. Da der Einsatz von CFD Strömungssimulationen in der Solarthermie bisher wenig verbreitet ist, sind die Produktentwicklungszyklen allerdings noch relativ lange. Werden Produktänderungen im Vorfeld nicht simulativ untersucht, muss jeweils ein Prototyp gebaut werden, um die erwarteten bzw. gewünschten Ergebnisse mit einer experimentellen Leistungsprüfung verifizieren zu können.

1.3 Abgrenzung und Innovationscharakter von VirtColl+

Das entwickelte Verfahren verfolgt einen in der Solarthermie bisher einzigartigen Ansatz. Es werden nicht einzelne Bauteile, wie beispielsweise Durchströmungsformen eines Absorbers untersucht, sondern es steht die Erarbeitung einer allgemein gültigen Entwicklungsmethodik im Vordergrund. Durch die parametrisiert aufgebauten CAD-Kollektormodelle ist es zunächst möglich eine Vielzahl von Flachkollektorenvarianten simulativ abzubilden. Das entwickelte virtuelle Prüfverfahren ermöglicht dann die Identifikation der charakteristischen Kollektorkennwerte und damit die Berechnung des Kollektorjahresertrags. Erzielt der entwickelte, virtuelle Kollektor nicht den erwarteten bzw. gewünschten Ertrag, können sowohl geometrische

als auch materialspezifische Variationen schnell erstellt und berechnet werden. Systematische Parameterstudien können so schnell und effizient untersucht werden. Der Bau und die experimentelle Prüfung von Prototypen sind somit erst im letzten Entwicklungsschritt notwendig. Zudem ist die Bestimmung von Bauteiltemperaturen schon in der Entwicklungsphase vorgesehen. Dies ermöglicht schon im frühen Stadium die Auswahl geeigneter Materialien.

1.4 Zielsetzung und Aufbau

Das Ziel des Projekts VirtColl+ ist die Entwicklung eines auf CFD Simulationen (CFD: Computational Fluid Dynamics) und virtuellen Kollektorprüfungen basierenden Entwicklungs- und Optimierungswerkzeug für Flachkollektoren zur Unterstützung der Solarthermiebranche.

Zunächst wurden parametrisierte CAD-Kollektormodelle für verschiedene Durchströmungsformen erstellt. Damit ist es möglich eine Vielzahl an virtuellen Kollektoren schnell aufzubauen. Die Aufbereitung dieser CAD-Kollektormodelle im CFD Programm ermöglicht eine sofortige Verwendung der Geometrie für Strömungssimulationen. Die Umgebungs- und Betriebsbedingungen für eine virtuelle Leistungsprüfung wurden in Anlehnung an EN ISO 9806 definiert. Durch die Aufprägung der normkonformen Umgebungs- und Betriebsbedingungen können die charakteristischen Kollektorkennwerte direkt aus den Simulationsergebnissen mittels Parameteridentifikation identifiziert werden. Damit ist sowohl die Bestimmung der thermischen Leistungsfähigkeit der virtuellen Kollektoren möglich, als auch die Berechnung des Kollektorjahresertrags. Die Bestimmung von Bauteiltemperaturen in Abhängigkeit beliebiger Umgebungs- und Betriebsbedingungen ist ebenfalls möglich.

2. Auswahl einer geeigneten Simulationssoftware (AP 1)

CFD, computational fluid dynamics ist die englische Bezeichnung für numerische Strömungsmechanik. Mit CFD Simulationen werden strömungsmechanische Fragestellungen approximativ gelöst. Hierzu werden numerische Methoden verwendet. CFD Simulationen beruhen zumeist auf den Navier-Stokes-Gleichungen bzw. vereinfachter Formen derselben. Für die Simulationen wird das Berechnungsgebiet mit einem Berechnungsgitter diskretisiert. Da es sich bei CFD Simulationen immer um numerische Näherungsverfahren handelt, müssen diese mit experimentellen Untersuchungen validiert werden.

Auswahlkriterien für die CFD-Software waren die Verfügbarkeit zentraler Bausteine für z. B. Wärmeübertragungsmechanismen, die Möglichkeit eigene physikalische Modelle integrieren zu können, eine breite Akzeptanz des jeweiligen CFD-Programms in der Industrie sowie die Kosten für Forschungs- und Industrielizenzen. Als unter diesen Aspekten geeignete CFD-Programme wurden StarCCM+, ANSYS Fluent, und ANSYS CFX identifiziert. Diese CFD-Programme wurden näher untersucht. Die Verwendung von ANSYS CFX wurde ausgeschlossen, da dieses Softwarepaket kein Solarstrahlungsmodell enthält. Eine manuelle Implementierung ist grundsätzlich möglich aber sehr aufwendig. Das in ANSYS Fluent verfügbare Tool zur Erzeugung von Berechnungsgitter ist schlecht automatisierbar und bei komplexen Geometrien instabil. Außerdem ist das Post-Processing in ANSYS Fluent sehr aufwendig. In StarCCM+ sind alle notwendigen Tools von der Erstellung der CAD-Daten, der Erzeugung von Berechnungsgitter und dem Post-Processing vorhanden. Der Workflow ist vollständig automatisierbar. Daher wurde für das Projekt **StarCCM+** ausgewählt.

Das StarCCM+ Softwarepaket beinhaltet neben dem eigentlichen CFD-Programm zur Berechnung der physikalischen Vorgänge ebenfalls ein integriertes 3D-CAD-Werkzeug für den Aufbau der CAD-Kollektormodelle, Algorithmen zur Gittergenerierung sowie die Möglichkeit die Ergebnisse der Berechnungen zu visualisieren.

Obwohl die wesentlichen physikalischen Modelle bereits in Star CCM+ implementiert sind, gibt es eine Reihe von Einschränkungen im Bereich der Strahlungsmodellierung.

1. Die optische Brechung bei der Strahlungstransmission z. B. beim Übergang von Luft zu Glas wird nicht berücksichtigt.
2. Die Mikrostrukturen von Oberflächen wie z. B. strukturierte transparente Abdeckungen, können nicht aufgelöst werden. Die Oberflächen werden als ebene Oberflächen abgebildet.
 - a. Dies führt unter anderem dazu, dass die diffuse Streuung der Strahlung nicht aufgelöst wird.

- b. Die Mikrostrukturen von Oberflächen werden in Koeffizienten für Reflexion, Absorption und Transmission überführt.

StarCCM+ bietet über sogenannte Feldfunktionen und Makros umfangreiche Möglichkeiten auf Simulationsvariablen zuzugreifen und zusätzliche Modelle zu implementieren. Folgende zusätzliche Modelle und Gleichungen wurden implementiert.

1. Ein Modell zur Abbildung der Konvektions- und Strahlungsverluste zur Umgebung.
2. Temperaturabhängige Stoffwerte für die Fluide Luft und Wasser sowie für jeden Kollektortyp eine Gleichungen für die temperaturabhängige, effektive Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung.
3. Die Darstellung des dimensionslosen Wandabstands y^+ für laminare Rohströmungen.

Das Arbeitspaket AP1 beinhaltet ebenfalls eine Sensitivitätsanalyse. Ausgewählte Flachkollektoren, die in den Jahren 2013 und 2014 am Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) geprüft wurden, wurden hinsichtlich bauartbedingter Unterschiede und Gemeinsamkeiten analysiert. Untersucht wurden Brutto-, Absorber- und Aperturfläche, die Höhe des Kollektors bzw. des Luftspalts, die Dicke von Absorberblech, transparenter Abdeckung und Wärmedämmung, die Wandstärke der Absorberverrohrung sowie die Anzahl der Steigrohre bzw. der Serpentin. Die untersuchten Kollektoren wiesen immer mehrere bauartbedingten Unterschiede auf. Es zeigte sich, dass keine grundsätzlichen Abhängigkeiten von einzelnen Charakteristika abgeleitet werden können, da die Kollektorleistung von zu viele Einflussfaktoren abhängt. Eine virtuelle Untersuchung einzelner Einflussfaktoren zeigen die exemplarischen Anwendungen in Kapitel 7.

3. Erstellung von Berechnungsgittern aus CAD Dateien der Flachkollektoren (AP 2)

Die verwendete CFD-Software StarCCM+ verwendet zur approximativen Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen die Finite-Volumen-Methode. Hierzu wird das Berechnungsgebiet mit Hilfe eines Berechnungsgitters in einzelne Volumenelemente unterteilt. Der Wärme- und Stofftransport wird über die Volumengrenzen hinweg berechnet. An Stellen hoher Gradienten muss das Berechnungsgitter sehr fein sein, um die Gradienten auflösen zu können.

Die Berechnungsgitter basieren auf der Kollektorgeometrie, das heißt auf den CAD-Daten. Teil dieses Arbeitspakets war die Erstellung einer modular aufgebauten Bauteilbibliothek, mit dem Ziel durch die Kombination einzelner Komponenten eine Vielzahl an Kollektoren schnell aufzubauen bzw. abbilden zu können. Um eine möglichst weitreichende Automatisierung zu gewährleisten sowie Kompatibilitätsproblemen zwischen verschiedenen Softwarepaketen zu vermeiden und Lizenzkosten einzusparen, wurden im 3D-CAD-Tool von StarCCM+ parametrisierbare CAD-Kollektormodelle erstellt. Geometrische Größen wie beispielsweise die Länge und Breite des Absorbers oder die Anzahl der Steigrohre werden als Parameter (Design Parameter) festgelegt und können somit schnell an die Geometrie eines zu untersuchenden Kollektors angepasst werden. Es wurde jeweils ein parametrisiertes CAD-Kollektormodell für einen Flachkollektor mit Harfenabsorber, Mäanderabsorber und Doppelmäanderabsorber entwickelt. Die Auswahl der abzubildenden Durchströmungsformen erfolgte auf Grundlage der in Kapitel 2 dargestellten Sensitivitätsanalyse entsprechend der Häufigkeit ihrer Verwendung.

Der Aufbau der allgemeinen, parametrisierten CAD-Flachkollektormodelle wird an den Beispielen der Flachkollektormodelle mit Harfenabsorber, Mäanderabsorber und Doppelmäanderabsorber beschrieben. Der Aufbau der parametrisierten CAD-Flachkollektormodelle der im Projekt untersuchten modifizierten Serienprodukte K1 und K2 des Projektpartners Bosch Solarthermie GmbH erfolgte weitestgehend analog.

3.1 Erstellung der parametrisierten CAD-Kollektormodelle

Die Flachkollektormodelle bestehen aus den Komponenten transparente Abdeckung, Absorberblech, Verrohrung, Rahmen, Wärmedämmung und Dichtung, sowie aus den Fluiden Luft (im Zwischenraum zwischen Absorber und Abdeckung) und dem Wärmeträgerfluid in der Verrohrung. Auf Bauteile wie Rohrdurchführungen, Abstandshalter und Befestigungselemente wird verzichtet. Die Reduzierung der CAD-Modelle auf die notwendigen Komponenten führt bei reduzierter Rechenzeit und –Leistung zu hinreichend genauen Simulationsergebnissen. Aus gleichem Grund ist die Komplexität der Bauteile geringgehalten, was sich beispielsweise in

einer vereinfachten Rahmengeometrie widerspiegelt. Die Komponenten transparente Abdeckung, Rahmen, Wärmedämmung und Dichtung sowie die Fluide werden mit dem in StarCCM+ integrierten 3D-CAD-Werkzeug erstellt. Die Komponenten Absorberblech und Verrohrung werden in der Nachbearbeitung als sogenannten „Shell-Regionen“ erzeugt. Eine Shell-Region bezeichnet ein Volumen, dessen Dicke so gering ist, dass es als Oberfläche mit der Dicke einer einzelnen Zelle in Richtung der Flächennormalen abgebildet werden kann. Anstatt die Verrohrung als Volumen zu erstellen, wird also im ersten Schritt nur das Volumen erstellt, das das Wärmeträgerfluid in der Verrohrung abbildet. Anschließend wird auf das virtuelle Wärmeträgerfluid eine Mantelfläche aufgeprägt, die die Verrohrung darstellt. Die Wandstärke der Verrohrung wird als „Shell-Dicke“ festgelegt. Die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung wird trotzdem in alle Richtungen abgebildet.

Es wurden allgemeine, parametrisierte CAD-Flachkollektormodelle mit Harfenabsorber (vgl. Abbildung 3-1, a), Mäanderabsorber (vgl. Abbildung 3-1, b) und Doppelmäanderabsorber (vgl. Abbildung 3-1, c) erstellt. Geometrische Größen werden mit Hilfe von Design Parameter angepasst. Mit Ausnahme der Verrohrung sind die Flachkollektormodelle mit Harfen-, Mäander- und Doppelmäanderverrohrung identisch aufgebaut. Im Folgenden werden die Komponenten und Fluide sowie die zugehörigen Design Parameter beschrieben.

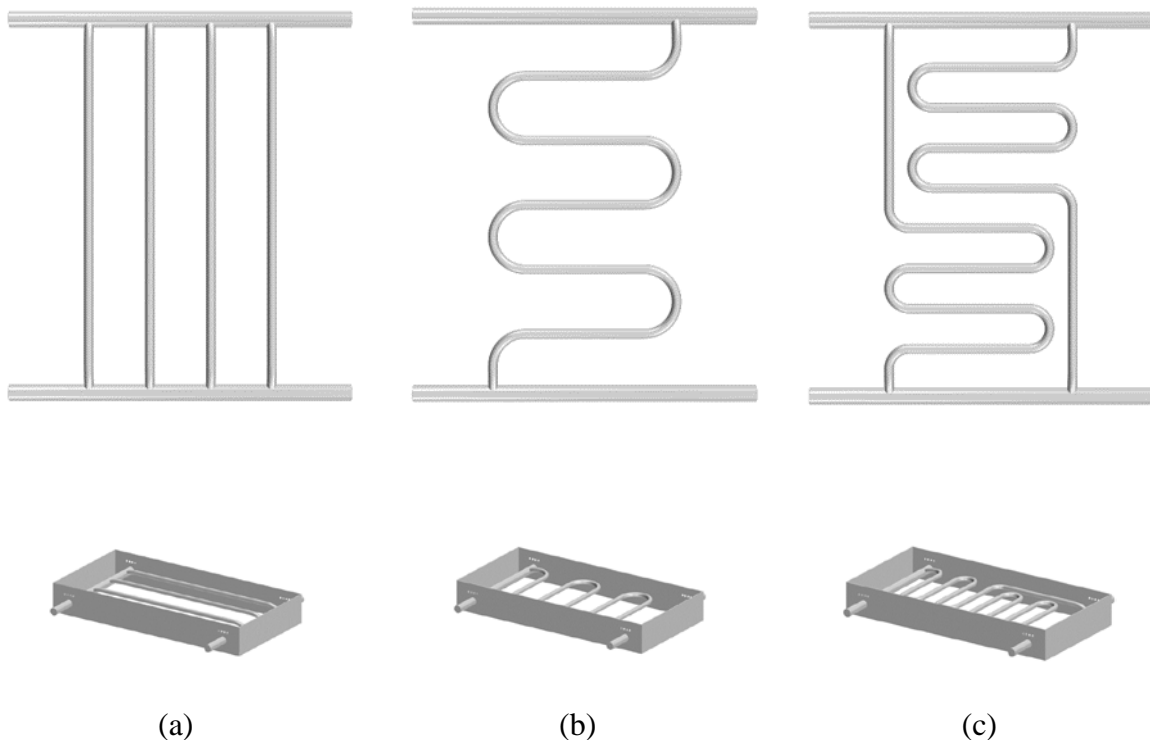


Abbildung 3-1: Allgemeine CAD-Flachkollektormodelle mit, a) Harfenabsorber, b) Mäanderabsorber, c) Doppelmäanderabsorber

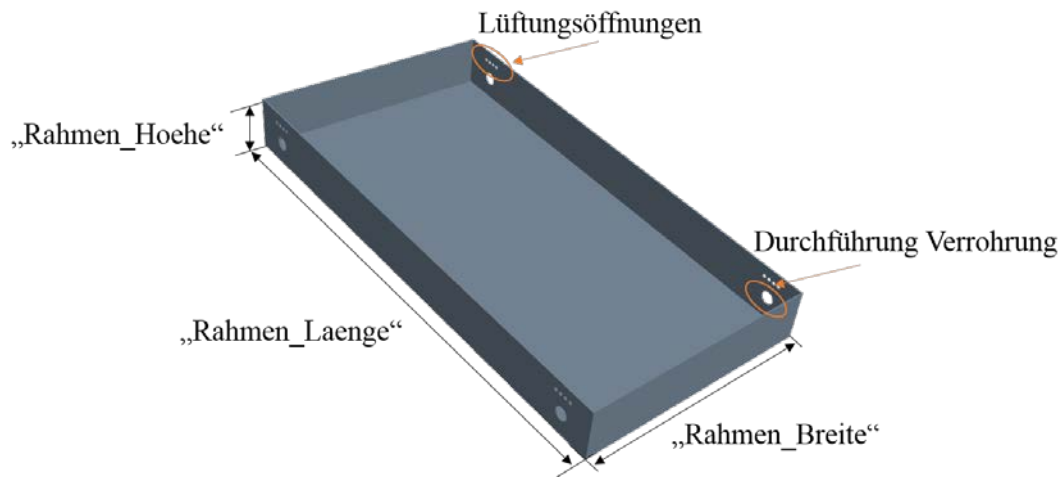


Abbildung 3-2: Kollektorrahmen der allgemeinen Flachkollektormodelle

Der Kollektorrahmen hat die vereinfachte Form einer Kiste. Länge, Breite und Höhe werden durch die Design Parameter „Rahmen_Laenge“, „Rahmen_Breite“ und „Rahmen_Hoeh“ festgelegt, vgl. Abbildung 3 2. Die Wandstärke des Rahmens definiert der Design Parameter „Rahmen_Wandstaerke“. Symmetrisch angeordnet sind kreisförmige Aussparungen für die Durchführung der Verrohrung sowie die Lüftungsöffnungen. Es sind jeweils vier Lüftungsöffnungen oberhalb der Durchführung der Verrohrung angeordnet. Größe und Position können Abbildung 3-3 entnommen werden.

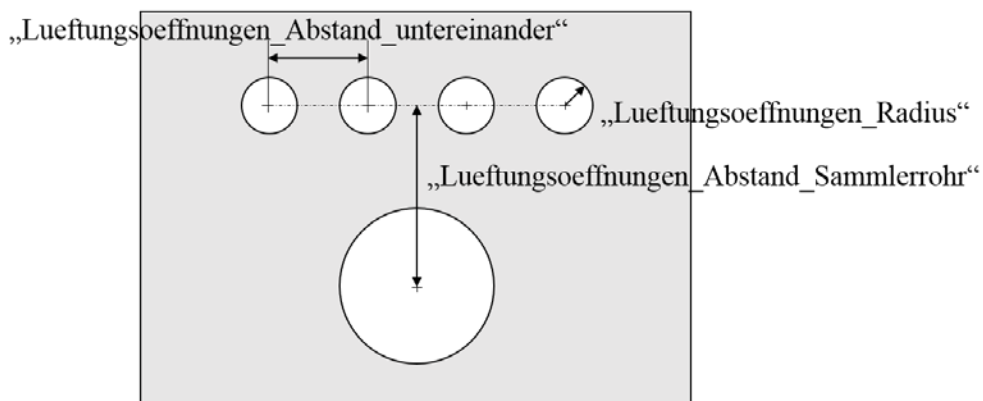


Abbildung 3-3: Größe und Position der Lüftungsöffnungen

Die **transparente Abdeckung** ist von einer U-förmigen Dichtung umgeben. Länge und Breite der Abdeckung sind durch die Design Parameter Länge und Breite des Rahmens (Design Parameter „Rahmen_Laenge“ und „Rahmen_Breite“) definiert, vgl. Abbildung 3-4. Die Dicke der transparenten Abdeckung wird durch den Design Parameter „Abdeckung_Dicke“ festgelegt

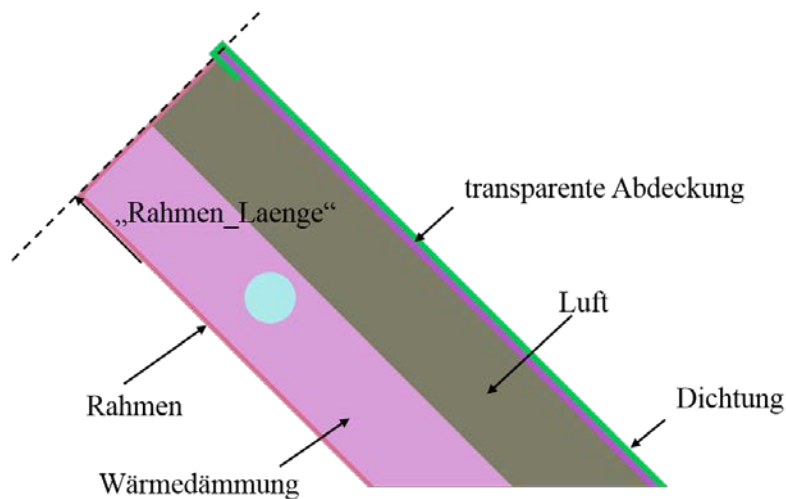


Abbildung 3-4: Vertikaler Schnitt durch ein Flachkollektormodell

Die **Dichtung** liegt auf dem Kollektorrahmen auf. Der Design Parameter „Dichtung“ legt die Dicke der Dichtung und den Abstand fest, den die Dichtung über den Rahmen hinaussteht, vgl. Abbildung 3-5. Die Variable x ist von den Design Parametern „Aperturlaenge“ und „Aperturbreite“ abhängig.

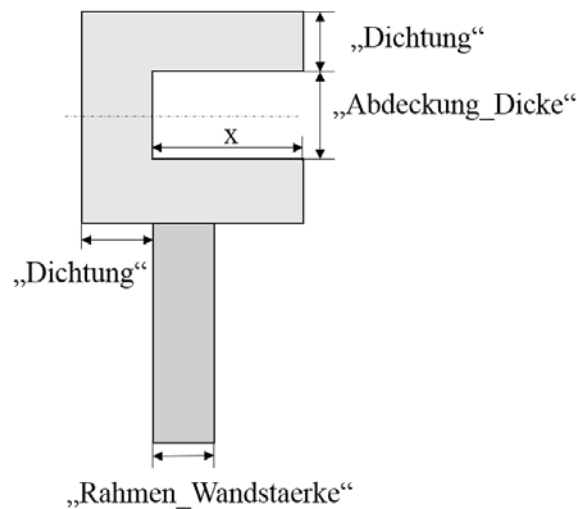


Abbildung 3-5: Design Parameter zur Definition der Dichtung

Das Fluid **Luft** füllt den Hohlraum zwischen Absorberblech und transparenter Abdeckung aus, vgl. Abbildung 3-6. Außerdem findet durch die Lüftungsöffnungen ein Austausch der Luft im Kollektorinneren mit der Umgebung statt. Die Luft ist nicht parametrisiert, da sich ihre Maße vollständig aus den Maßen anderen Komponenten ergeben.

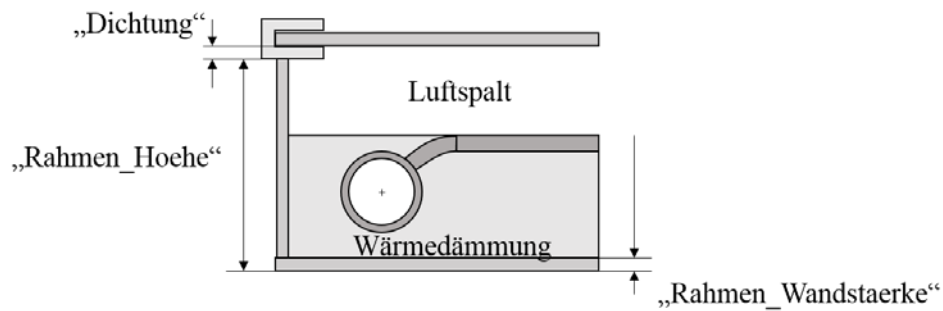


Abbildung 3-6: Luftspalt

Die **Wärmedämmung** (WD, vgl. Abbildung 3-7) dämmt die Rückseite des Absorbers. Sie liegt zwischen Boden und Absorber und wird vom Rahmen und Absorber eingeschlossen. Die Größe der Wärmedämmung ist ebenfalls vollständig durch die Design Parameter anderer Bauteile definiert.

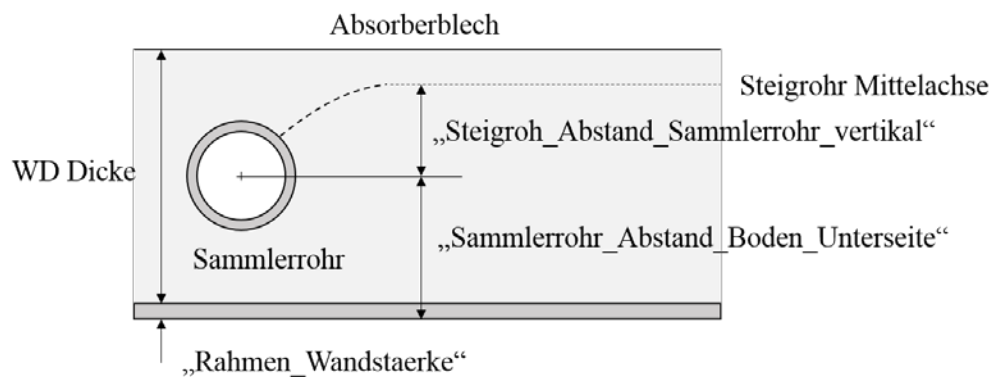


Abbildung 3-7: Querschnitt Wärmedämmung

Die **Verrohrung** besteht aus zwei Sammlerrohren und einer beliebigen Anzahl an Steigrohren im Falle einer Harfe bzw. Serpentina im Falle einer Mäanderverrohrung. Die Steigrohre bzw. die Mäanderverrohrung knickt nach unten zu den Sammlerrohren ab, vgl. Abbildung 3-8. Das Absorberblech liegt dann eben auf den Steigrohren bzw. auf der Mäanderverrohrung, aber nicht auf den Sammlerrohren auf. Der Abstand zwischen Absorberblech und Sammlerrohren wird über den Design Parameter „Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_vertikal“ definiert.

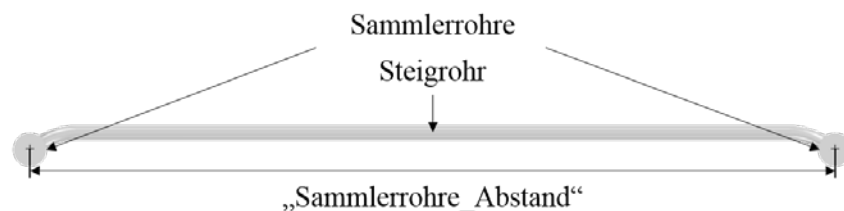


Abbildung 3-8: Abknicken der Steig- bzw. Mäanderverrohrung zu den Sammlerrohren

Der Abstand der Sammlerrohre zueinander in Längsrichtung ist durch den Design Parameter „Sammlerrohre_Abstand“ festgelegt. Dieser bezieht sich auf die Mittelachse der Sammlerrohre. Durch die Design Parameter „Sammlerrohr_Laenge“ und „Sammlerrohr_Radius“ sind die Sammlerrohre vollständig definiert. Die Verrohrung ist als „Shell-Region“ aufgebaut, die Dicke der Verrohrung wird in den Regionen als „Shell-Thickness“ definiert. Der Design Parameter „Sammlerrohr_Radius“ bezieht sich entsprechend auf den Außenradius des Wärmeträgerfluids, bzw. den Innenradius der Verrohrung.

Das **Absorberblech** wird durch die zwei Design Parameter „Absorberblech_Laenge“ und „Absorberblech_Breite“ definiert. Die Dicke des Absorbers wird wiederum als „Shell thickness“ festgelegt. Die Verrohrung wird virtuell an das Absorberblech angeschweißt. Es entsteht eine Kontaktfläche, die virtuelle Schweißnaht. Durch die Kontaktfläche wird das Wärmeträgerfluid in der Verrohrung abgeflacht. Der Querschnitt eines Steigrohrs im Bereich der Schweißnaht ist also nicht vollständig kreisförmig, vgl. Abbildung 3-9.

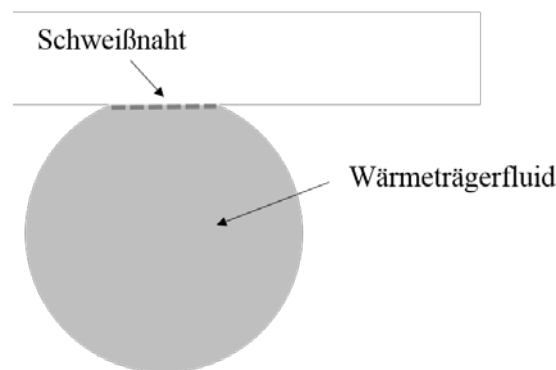


Abbildung 3-9: Querschnitt eines Steigrohrs

Die Geometrie der Schweißnaht wird durch die Design Parameter „Schweissnaht_Laenge“, „Schweissnaht_Breite“ festgelegt. Die „Schweissnaht_Laenge“ gibt den Abstand der Schweißnahtenden in Längsrichtung an. Die Schweißnaht endet dort, wo sich das Steigrohr nach unten zum Sammlerrohr biegt. Eine größere „Schweissnaht_Laenge“ verringert also den Abstand von Punkt A zu Punkt B, vgl. Abbildung 3-10.

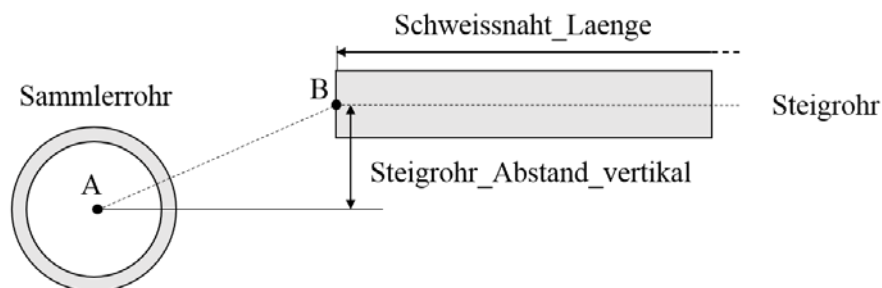


Abbildung 3-10: Längsschnitt durch die Verrohrung

Die Design Parameter „Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_vertikal“ vgl. Abbildung 3-10 und „Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_horizontal“ vgl. Abbildung 3-11 dienen dem Positionieren des Steigrohrs.

Auch beim Mäander und Doppelmäander wird der gerade Teil vor dem Beginn der Serpentina als Steigrohr bezeichnet um Analogie und Verständlichkeit zu gewährleisten. Der Design Parameter „Sammlerrohr_Abstand_Boden_Unterseite“ dient der Positionierung der Sammlerrohre relativ zum Rahmen, vgl. Abbildung 3-7. Hierbei bezieht sich das Maß auf den Abstand zwischen der Mittelachse des Sammlerrohrs und der Unterseite des Bodens. Im Falle des harfenförmigen Absorbers gibt es die Design Parameter „Steigrohr_Anzahl“ und „Steigrohr_Radius“, in den Fällen des mäanderförmigen und doppelmäanderförmigen Absorbers gibt es die Design Parameter „Serpentina_Anzahl“ und „Serpentina_Radius“.

Die Design Parameter „Schweissnaht_Laenge“ bestimmt die Länge der Schweißverbindung in Längsrichtung und der Design Parameter „Schweissnaht_Breite“ gibt die Breite der Kontaktfläche zwischen Absorberblech und Verrohrung an.

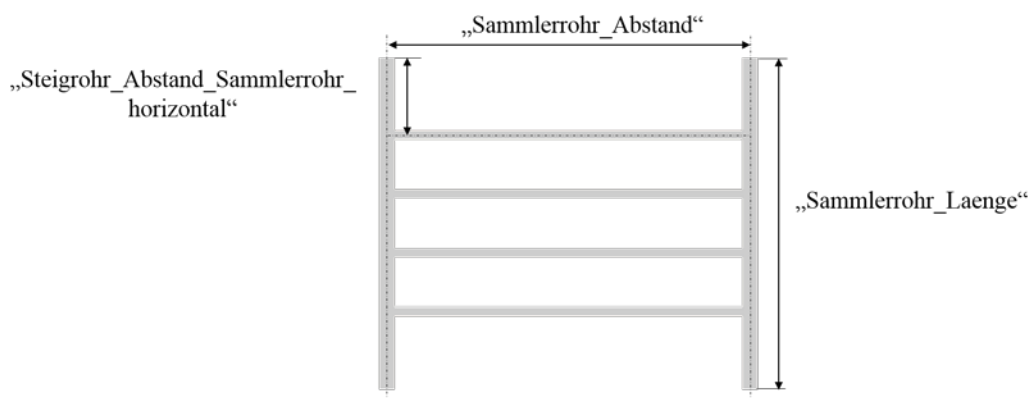


Abbildung 3-11: Verrohrung

Beim Doppelmäander kann nur eine gerade Serpentinaanzahl gewählt werden.

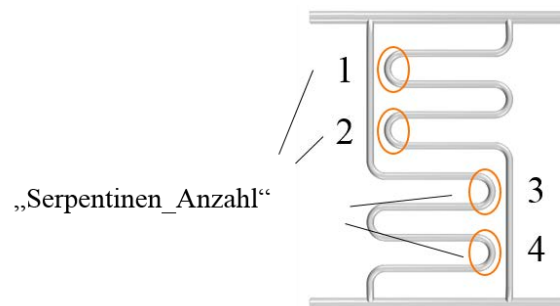


Abbildung 3-12: Anzahl der Serpentina beim Doppelmäander

In Abbildung 3-12 wird beispielsweise ein doppelmäanderförmiger Absorber mit vier Serpentinaugen gezeigt. Die Zählweise der Serpentinaugen ist mit Hilfe von Markierungen und Zahlen illustriert. Die Zählweise der Serpentinaugen beim mäanderförmigen Absorber verläuft analog.

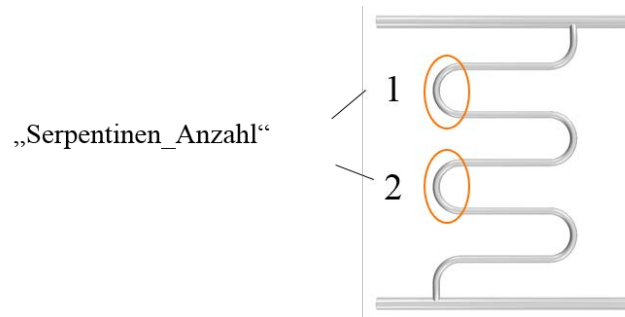


Abbildung 3-13: Mäanderförmiger Absorber

Abbildung 3-14: zeigt eine beispielhafte Geometrie eines Kollektors mit Harfenabsorber.

Alle Größen des Kollektors werden über die „Design Parameter“, vgl. Tabelle 3-1.

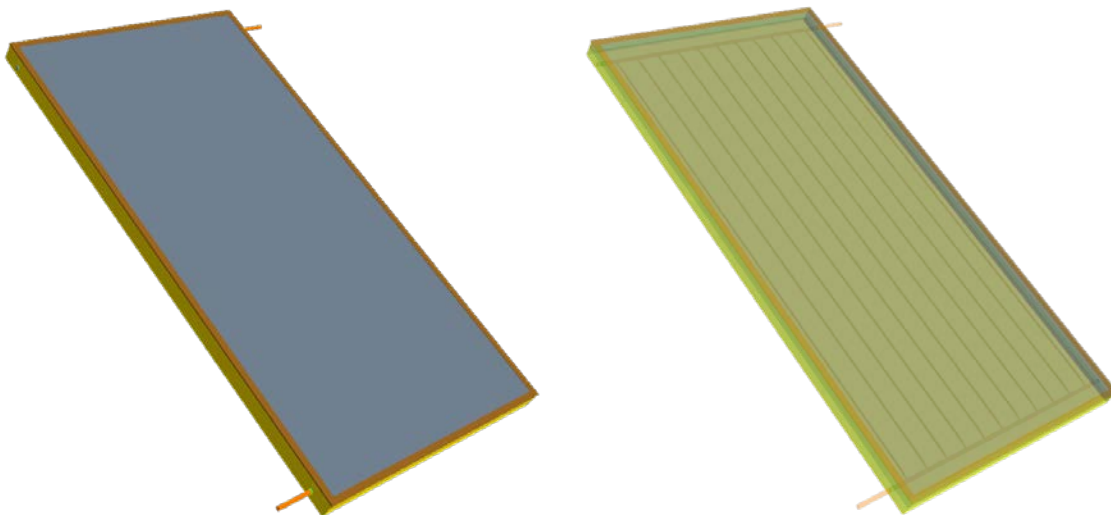


Abbildung 3-14: Beispielhafte Geometrie eines Flachkollektors mit Harfenabsorber

Tabelle 3-1: Auflistung der „Design Parameter“ für das CAD-Kollektormodell mit Harfenabsorber

Design Parameter	
Abdeckung_Dicke	Rahmen_Laenge
Absorberblech_Breite	Rahmen_Wandstaerke
Absorberblech_Laenge	Sammlerrohr_Abstand_Boden_Unterseite
Aperturbreite	Sammlerrohr_Laenge
Aperturlaenge	Sammlerrohre_Radius
Dichtung	Sammlerrohre_Abstand
Lueftungsoeffnungen_Abstand_Sammlerrohr	Schweissnaht_Breite
Lueftungsoeffnungen_Abstand_untereinander	Schweissnaht_Laenge
Lueftungsoeffnungen_Radius	Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_horizontal
Neigungswinkel	Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_vertikal
Rahmen_Breite	Steigrohr_Anzahl
Rahmen_Hoehe	Steigrohr_Radius

3.2 Vorbereitung der CAD Daten für die CFD Berechnungen

Nach dem Aufbau der parametrisierten 3D-CAD Kollektormodelle wurden die Oberflächen der virtuellen Kollektorkomponenten und der Fluide an den Kontaktstellen getrennt. Die Komponente „Abdeckung“ wird beispielweise durch die Oberflächen „int_Abdeckung-Dichtung“, d. h. der Kontaktfläche (Interface) zwischen transparenter Abdeckung und Dichtung, „int_Abdeckung-Luft“, d. h. der Kontaktfläche zwischen transparenter Abdeckung und der Luft im Kollektor sowie durch die Oberfläche „Umgebung“, d. h. der Oberfläche hin zur Umgebung beschrieben, vgl. Abbildung 3-15. Diese Unterteilung bleibt auch nach einer Veränderung der Design Parameter erhalten, die Oberflächen werden ausschließlich hinsichtlich ihrer Größe angepasst. Dies ermöglicht die bereits erwähnte weitreichende Automatisierung der Simulationen, da Randbedingungen, wie beispielsweise Wärmeübergangskoeffizienten zur Umgebung oder optische Oberflächeneigenschaften auch nach Anpassung der Design Parameter erhalten bleiben. Die Trennung der Bauteil- und Fluidoberflächen in einzelnen Kontaktflächen ist zeitaufwendig. Die Automatisierung dieses Arbeitsschritts führt zu einer wesentlichen Beschleunigung von Parameterstudien. Dies ist auch der Grund, warum entgegen der ursprünglich geplanten Bauteilbibliothek die parametrisierten

CAD-Kollektormodelle aufgebaut wurden. Beispiele für systematische Parametervariationen zur Kollektoroptimierung zeigt Kapitel 7.

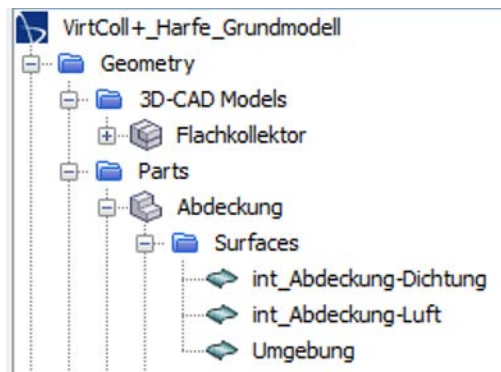


Abbildung 3-15: Blick in StarCCM+, Oberflächen der Komponenten „Abdeckung“

3.3 Erstellung der Berechnungsgitter

Ein Schlüsselfaktor für die Anwendbarkeit des Verfahrens zur virtuellen Kollektorprüfung ist die Größe des Berechnungsgitters. Die Größe des Berechnungsgitters hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Dauer der Simulation sowie den benötigten Speicherplatz. Zur Untersuchung des Aufbaus der CAD-Kollektormodelle sowie zur Untersuchung Vernetzungsstrategien wurde zunächst ein deutlich verkleinerter Kollektor verwendet. Es wurde ein Kollektor mit Harfenabsorber und zwei Steigrohren und $L \times B \times H = 500 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ aufgebaut, vgl. Abbildung 3-16.

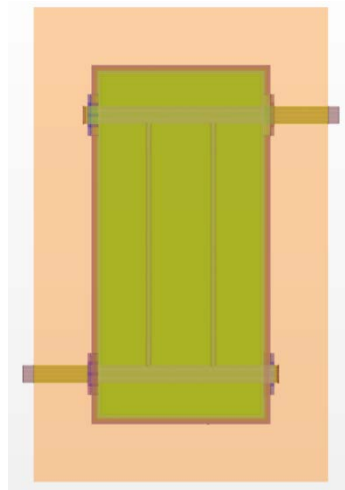


Abbildung 3-16: Teilmodell zur Untersuchung von Vernetzungsstrategien

Das Teilmodell beinhaltet den Kollektorrahmen, die transparente Abdeckung, eine Wärmedämmung, Rohrdurchführungen, einen volumetrischen Aufbau des Absorberblechs und der

Absorberverrohrung, ein den Kollektor umgebendes Luftvolumen und eine L-förmige Dichtung zwischen Kollektorrahmen und transparenter Abdeckung (vgl. hierzu auch Abbildung 3-17 und Abbildung 3-18).

Am Teilmodell wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Vernetzungsstrategien untersucht.

1. Ein Mesh Continuum (knotenkonforme Vernetzung, 1,83 Mio Zellen), Abbildung 3-17.
2. Drei Mesh Continuo (nicht knotenkonform, 1,05 Mio Zellen), Abbildung 3-18.

Als Mesh Continuum wird ein Zusammenschluss von einer oder mehreren Komponenten bezeichnet die gemeinsam mit den gleichen Randbedingungen wie z. B. der minimalen und maximalen Zellgröße vernetzt werden. Sind mehrere Komponenten in einem Kontinuum zusammengeschlossen, wird ein knotenkonformes Netz erstellt. Dabei wird jede Komponente einzeln und vollständig, d. h. inklusive aller Kontaktflächen zu anderen Komponenten vernetzt. Eine knotenkonforme Vernetzung bedeutet dann, dass das Berechnungsgitter der verschiedenen Komponenten innerhalb eines Kontinuums an den Kontaktflächen deckungsgleich ist. Das Berechnungsgitter zwischen Komponenten unterschiedlicher Kontinuo ist üblicherweise nicht knotenkonform.

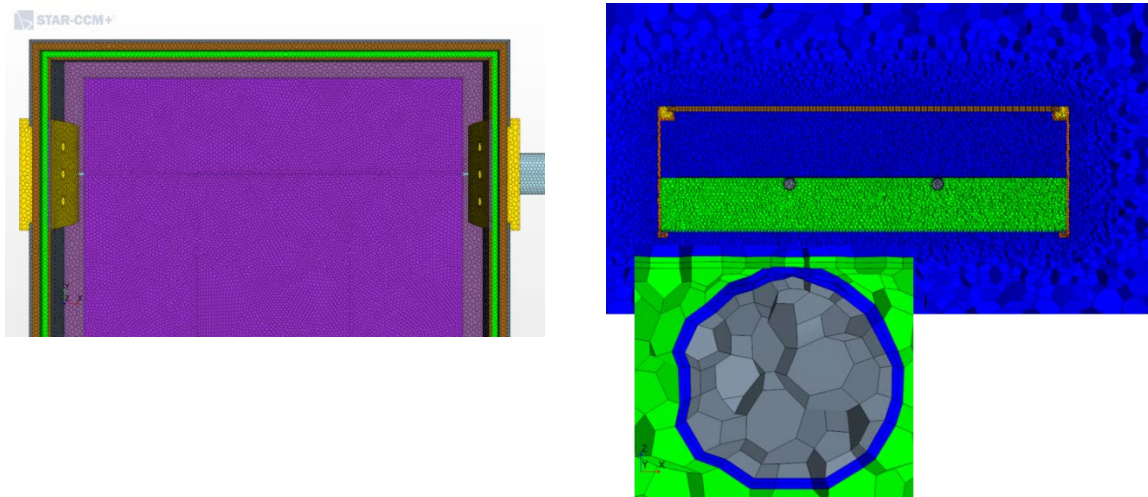


Abbildung 3-17: Vernetzung des Teilmodells mit einem Mesh Continuum (knotenkonform)

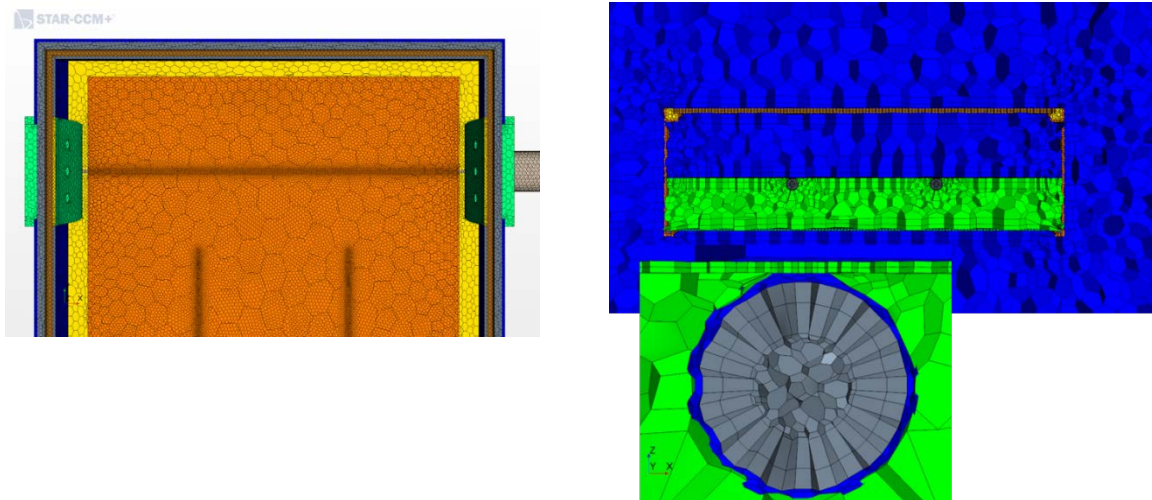


Abbildung 3-18: Vernetzung des Teilmodells mit drei Mesh Continua (nicht knotenkonform)

Die knotenkonforme Vernetzung des Teilmodells (1) führt zu einer ca. 1,7-mal höheren Anzahl an Zellen als die nicht knotenkonforme Vernetzung des Teilmodells (2). Das Luftvolumen im Kollektor und die Wärmedämmung im Falle der knotenkonformen Vernetzung sind unnötig fein aufgelöst. Das Wärmeträgerfluid in der Verrohrung wiederum ist bei der knotenkonformen Vernetzung relativ grob aufgelöst. Außerdem konnten keine sogenannten „Prism Layer“ zwischen Verrohrung und Fluid erstellt werden. Diese orthogonalen, prismatischen Zellen zwischen Solid und Fluid sind zur Grenzschichtauflösung aber notwendig. Für das weitere Vorgehen wurde daher die nicht-knotenkonforme Vernetzungsstrategie verfolgt.

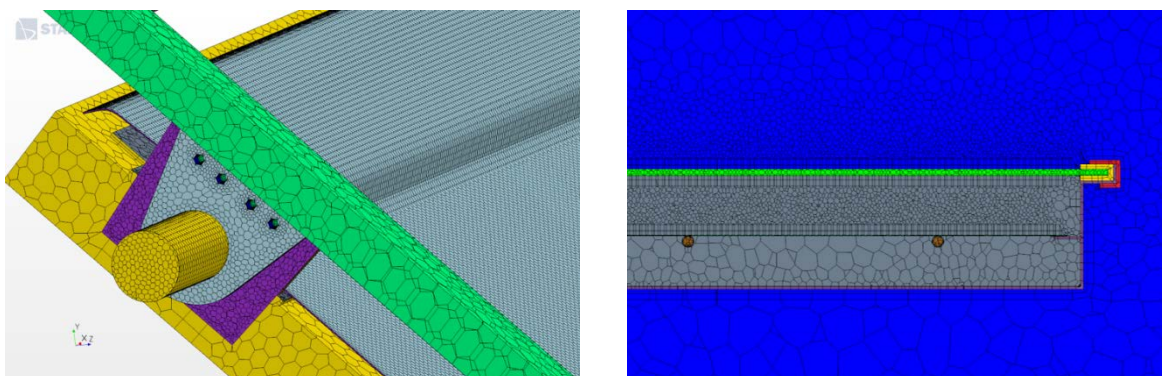


Abbildung 3-19: Erste nicht knotenkonforme Vernetzung des virtuellen Kollektors vom Typ K1 vom Projektpartner

Die Validierung des entwickelten Verfahrens zur virtuellen Kollektorprüfung wurde an zwei Serienprodukten des Projektpartners durchgeführt. Abbildung 3-19 zeigt das erste Berechnungsgitter des virtuellen Kollektors vom Typ K1. Das Berechnungsgitter ist mit zwei Mesh Continua aufgebaut. Das Berechnungsgitter ist mit ca. 23 Mio. Zellen sehr groß. Effiziente

Parametervariationen waren mit diesem Berechnungsgitter nicht möglich. Das Berechnungsgitter wurde daher weiter optimiert.

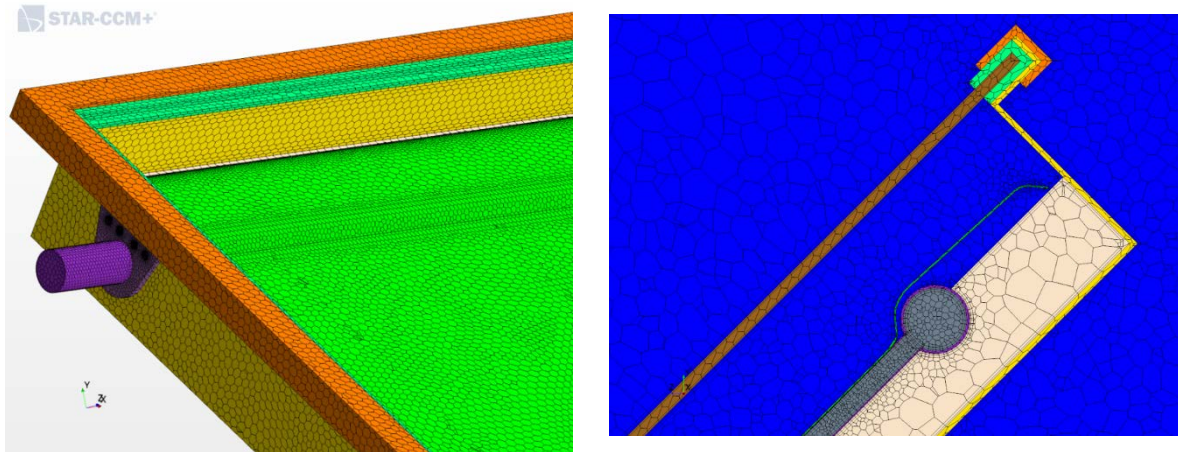


Abbildung 3-20: Zweite nicht knotenkonforme Vernetzung des virtuellen Kollektors vom Typ K1 vom Projektpartner

Abbildung 3-20 zeigt das optimierte Berechnungsgitter des Kollektors vom Typ K1. Die Anzahl der Zellen und die Berechnungsdauer wurden um ca. 55 % reduziert. Mit 10,5 Mio. Zellen war aber auch dieses Berechnungsgitter noch sehr groß. Eine Schwierigkeit beim Aufbau und der Vernetzung des CAD-Modells eines Flachkollektors besteht darin, dass die Abmessungen im horizontalen Bereich (Länge und Breite der transparenten Abdeckung, der Wärmedämmung usw.) im Bereich von Metern, und die Materialstärken (Absorberblech, Verrohrung) im Bereich einiger Zehntel Millimeter liegen. Die Materialstärke dieser extrem dünnen Komponenten zu vernetzen hat sich aufgrund der enorm großen Anzahl an benötigten Zellen als nicht praktikabel erwiesen. Im nächsten Schritt wurde daher das sogenannte 3D-Shell-Modell für das Absorberblech und die Absorberverrohrung verwendet. Komponenten die mit diesem Modell aufgebaut werden repräsentieren ein Volumen im Raum, dessen Dicke so klein ist, dass sie als Oberfläche mit der Dicke einer einzelnen Zelle in der senkrechten Richtung dargestellt werden können. Anstatt die Verrohrung beispielsweise als Volumen aufzubauen, wird im ersten Schritt nur das Volumen des Wärmeträgerfluids in der Verrohrung erzeugt. Anschließend wird auf die Flüssigkeit ein Mantel aufgeprägt, der die Verrohrung repräsentiert. Die Wandstärke wird über einen Parameter gesteuert. Die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung wird nach wie vor auch in der Verrohrung in lateraler Richtung berechnet. Außerdem wurde das Luftvolumen um den Kollektor entfernt. Die konvektiven Wärmeverluste zur Umgebung wurden dann mit Hilfe von Wärmeübergangskoeffizienten abgebildet, vgl. Kapitel 4.2. Schlussendlich wurden die Rohrdurchführungen entfernt. Die Reduzierung der CAD-Modelle auf die wesentlichen Komponenten führt zu hinreichend genauen Ergebnissen bei reduzierter Berechnungszeit und –Leistung.

Im finalen Berechnungsgitter werden schließlich mehrere Mesh Continua verwendet, die das Berechnungsgitter der darin enthaltenen Komponenten bzw. Fluide definieren. Das finale Berechnungsgitter besteht aus ca. 6 Mio. Zellen. Abbildung 3-21 zeigt einen Längsschnitt (links) und einen Querschnitt (rechts) des Standardflachkollektormodells mit Harfenabsorber. Für die dünnwandigen Bauteile „Rahmen“, „Abdeckung“, und „Dichtung“ wurde ein Mesh Continuum mit dem sogenannten „Thin Mesher“ verwendet. Dieser erstellt qualitativ hochwertige Zellen in dünnwandigen Komponenten. In Richtung der Flächennormalen werden zwei Zellen verwendet, da im Gegensatz zu den Komponenten Absorberblech und der Absorberverrohrung (3D shell Modell) von einem Temperaturgradient in senkrechter Richtung ausgegangen werden muss. Je ein weiteres Mesh Continuum wurde für die Komponente „Wärmedämmung“ sowie das Fluid „Luft“ im Kollektor erstellt. Als Mesher wurde der sogenannte „Trimmed Cell Mesher“ verwendet, der ein strukturiertes Berechnungsgitter erstellt. Sogenannte „Prism Layer“ lösen die Grenzschicht im Fluid zum Solid auf. Ein letztes Mesh Continuum mit polyedrischem Berechnungsgitter wurde für das Wärmeträgerfluid in der Verrohrung verwendet. Die Grenzschicht zwischen Verrohrung und Wärmeträgerfluid wird wiederum durch Prism Layer aufgelöst. Nur innerhalb eines Mesh Continuums wird ein knotenkonformes Berechnungsgitter über verschiedene Komponenten hinweg erstellt.

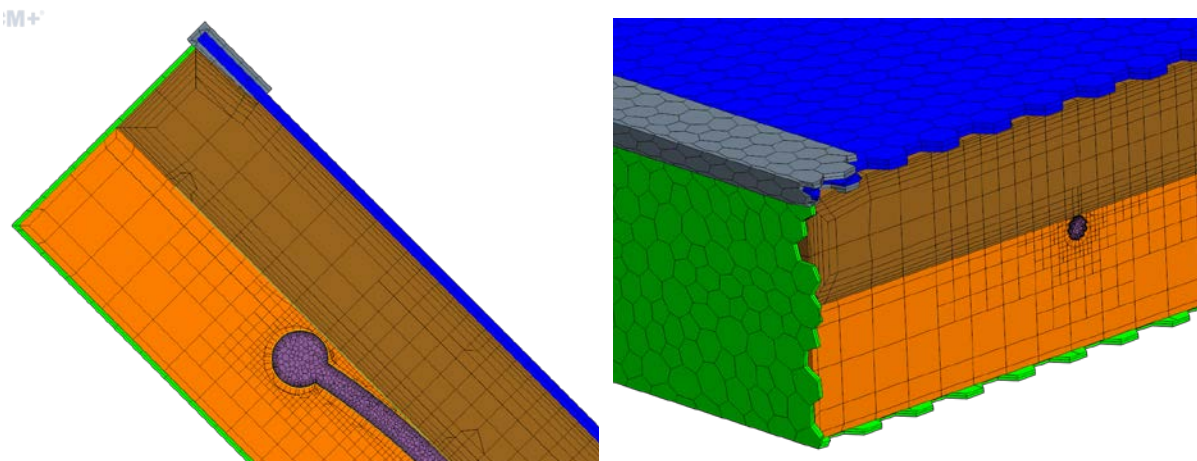


Abbildung 3-21: Berechnungsgitter: Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts) eines Flachkollektormodells mit Harfenabsorber

An Stellen großer Temperaturgradienten, wie beispielsweise an der Kontaktfläche zwischen Absorberblech und Absorberverrohrung werden lokale Verfeinerungen des Berechnungsgitters vorgenommen, vgl. Abbildung 3-22. Verfeinerungen, aber auch Vergrößerungen des Berechnungsgitters können innerhalb der Mesh Continua an Oberflächen oder Interfaces definiert werden. Abbildung 3-22 zeigt einen beispielhaften Temperaturverlauf des Absorberblechs eines Flachkollektors mit Harfenabsorbers. An den Kontaktflächen zwischen

Absorberblech und Absorberverrohrung treten hohe Temperaturgradienten auf dem Absorberblech auf. Das Berechnungsgitter wurde an diesen Stellen verfeinert.

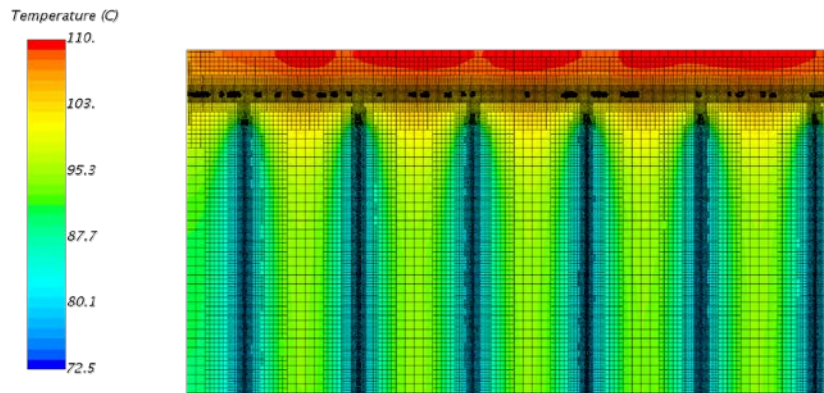


Abbildung 3-22: Beispielhafter Temperaturverlauf eines Absorberblechs mit Harfenverrohrung (Ausschnitt).

Die Mesh Continua sind innerhalb der parametrisierten CAD-Flachkollektormodelle so erstellt, dass sie nach Änderung der Design Parameter lediglich neu ausgeführt werden müssen („Execute All“, vgl. Abbildung 3-23).

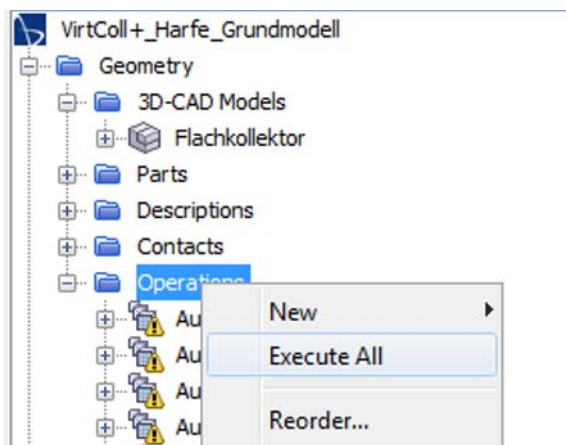


Abbildung 3-23: Blick in StarCCM+: (Neu-)Aufbau des Berechnungsgitters

Ein Berechnungsgitter für einen 2 m² Harfenabsorber mit 10 Steigrohren enthält mit den beschriebenen Einstellungen ca. 5,5 Mio. Zellen.

4. Erstellung der CFD Kollektormodelle (AP 3)

Die CFD Modelle werden auf Grundlage der Konstruktionsdaten und der physikalischen Vorgänge im und am Flachkollektor aufgebaut. Basierend auf dem typischen Aufbau eines Flachkollektors werden zunächst die physikalischen Vorgänge im und am Flachkollektor erläutert. Anschließend werden die im CFD Modell implementierten, physikalischen Modelle vorgestellt.

Ein typischer Flachkollektor besteht aus einem selektiv beschichteten Absorber aus Kupfer oder Aluminium mit einer durch Laser- oder Ultraschallschweißung rückseitig angebrachten Verrohrung aus Kupfer. Der Absorber ist in einen Rahmen mit Rückwand eingebaut und zur Vorderseite mit einer transparenten Abdeckung, vornehmlich aus Glas abgedeckt. Die transparente Abdeckung wird beispielsweise mit Hilfe eines 2-Komponenten-Silikons in den Rahmen geklebt. Rahmen, transparente Abdeckung und Klebung bzw. Dichtung bilden zusammen das Gehäuse. Die rückseitigen Wärmeverluste werden durch eine Wärmedämmung, zumeist aus Mineralwolle reduziert.

Die physikalischen Vorgänge im und am Flachkollektor zeigt Abbildung 4-1.

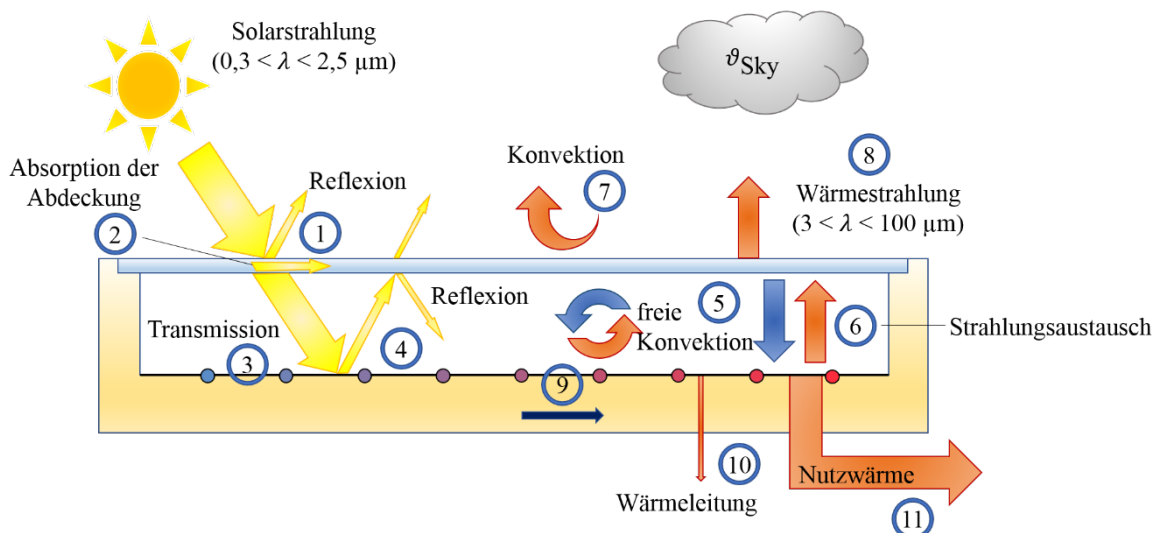


Abbildung 4-1: Physikalischen Vorgänge in und am Flachkollektor

Die Solarstrahlung mit Wellenlängen von ca. $0,3 \mu\text{m}$ bis ca. $2,5 \mu\text{m}$ trifft auf die transparente Abdeckung auf. Die Solarstrahlung wird in Abhängigkeit der optischen Eigenschaften der transparenten Abdeckung teilweise reflektiert (1), teilweise absorbiert (2) und hauptsächlich transmittiert. Die transmittierte Strahlung wird größtenteils am Absorber absorbiert (3) und in Wärme umgewandelt (photothermische Wandlung), zu einem geringen Anteil aber auch reflektiert. Zwischen Absorber und Gehäuse, vor allen zwischen Absorber und transparenter Abdeckung treten Mehrfachreflexionen der transmittierten Solarstrahlung auf (4). Getrieben durch die Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Gehäuse und den daraus resultierenden Dichteunterschieden der Luft im Spalt zwischen transparenter Abdeckung und Absorber, wird

eine Konvektionsströmung angeregt (5), die zu einer turbulenten Luftströmung mit Wirbeln und Konvektionswalzen führt. Zwischen Absorber und Gehäuse findet ein Strahlungsaustausch (6) statt, der wiederum vor allem zwischen Absorber und transparenter Abdeckung relevant ist. Thermische Verluste zur Umgebung treten durch natürliche und erzwungene Konvektion (7) sowie durch Wärmestrahlung (8) auf. Wärmeleitung erfolgt hauptsächlich im Absorber (9) sowie rückseitig durch die Wärmedämmung (10). Die Nutzwärme wird durch natürliche (im Fall von Thermosiphonanlagen) oder erzwungene Konvektion (11) in den Strömungskanälen des Absorbers abgeführt.

Die optischen Eigenschaften Transmission, Reflektion und Absorption der Kollektorbauteile sind spektrale, richtungsabhängige Größen. Sie sind sowohl von der Wellenlänge (λ) als auch der Richtung der eintreffenden Strahlung abhängig. Beim Flachkollektor ist die Wellenlängenabhängigkeit der optischen Eigenschaften in besonderem Maße für die selektive Absorberbeschichtung und die transparente Abdeckung relevant. Selektive Absorberbeschichtungen zeichnen sich durch ihr hohes Absorptionsvermögen im Bereich der Solarstrahlung, und ihre geringe Emission im Bereich der Wärmestrahlung aus. Den spektralen Reflexionsgrad einer typischen Absorberbeschichtung zeigt Abbildung 4-2. Als Wärmedämmung wird meist Mineralwolle verwendet. Durch die mit Luft gefüllten Hohlräume ist die Wärmeleitfähigkeit von Mineralwollen gering.

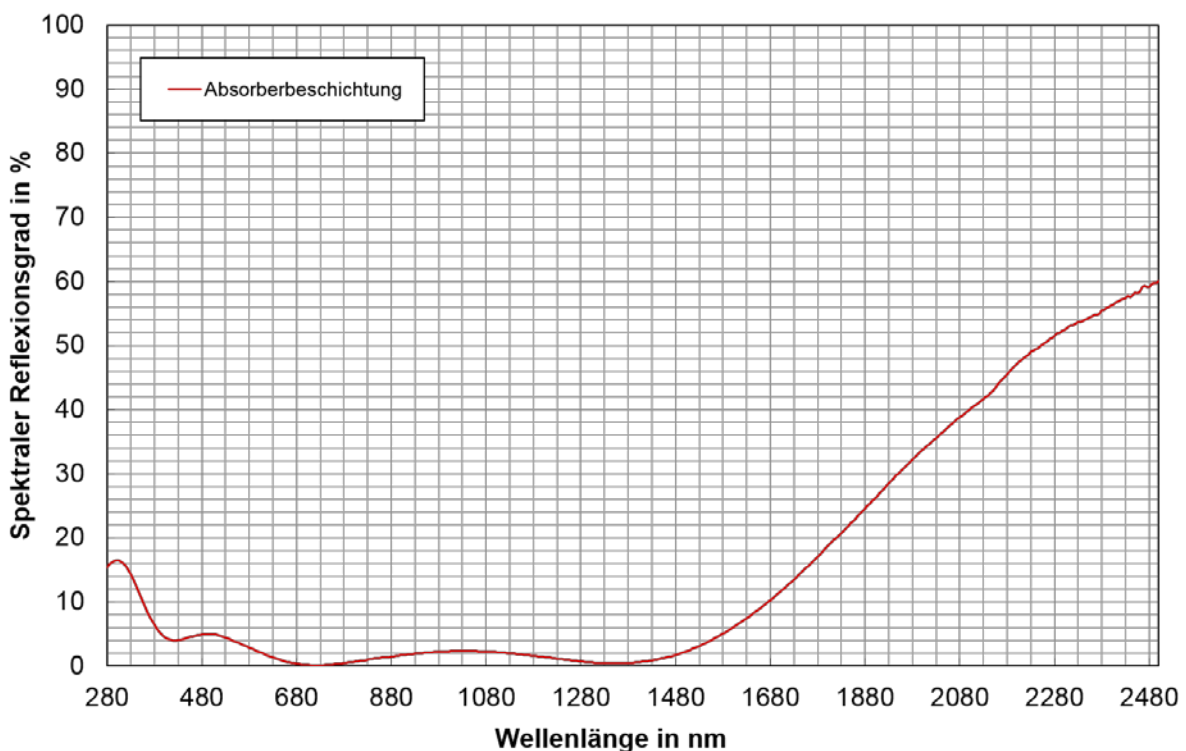


Abbildung 4-2: Spektraler Reflexionsgrad einer typischen Absorberbeschichtung

4.1 Strahlungsmodellierung

Die virtuelle Solarstrahlung wird mit Hilfe des sogenannten „Solar Loads“ Modells implementiert. Das Sonnenspektrum kann hierbei in beliebig viele Spektralbänder unterteilt werden. Die Strahlungsleistung wird als integraler Wert des festgelegten Wellenlängenbereichs aufgeprägt.

Als Strahlungsmodell wird das „Surface to Surface“ Modell verwendet. Das „Surface to Surface“ Modell betrachtet Strahlung als reines Oberflächenphänomen. Die Oberflächeneigenschaften werden über die optischen Eigenschaften Absorption (α), Transmission (τ) und Reflektion (ρ) definiert. Fluide werden transparent betrachtet. Sie nehmen nicht am Wärmetransport teil, und absorbieren, reflektieren oder streuen die Strahlung nicht.

Basierend auf einen Raytracing-Algorithmus werden sogenannte „Patch-Paare“ ermittelt, zwischen denen ein Strahlungsaustausch stattfindet. Die übertragende Energiemenge berechnet sich aus der Strahlungstransportgleichung und den Randbedingungen. Das Strahlungsmodell wird nur in die Kontinuos „Luft“ und „Abdeckung“ integriert. Da das „Surface to Surface“ Modell Strahlung als reines Oberflächenphänomen betrachtet, ist dies zulässig. Strahlung wird dann zwischen allen Oberflächen im Kollektor ausgetauscht, die eine Grenzfläche zur Luft oder zur transparenten Abdeckung haben. Als Beispiele sind alle Oberflächen des Absorbers und des Rahmens zu nennen, die keinen direkten Kontakt zu anderen Feststoffen haben.

Die optischen Eigenschaften Transmission, Reflektion und Absorption sind spektrale, richtungsabhängige Größen. Sie sind also sowohl von der Wellenlänge (λ) als auch der Richtung der eintreffenden Strahlung abhängig. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist die spektrale, gerichtete Emission (ε) gleich der spektral gerichteten Absorption (α). In der verwendeten Strömungssimulationssoftware StarCCM+ wird die Richtungsabhängigkeit nicht berücksichtigt. Das Kirchhoffsche Gesetz wird im wellenlängenabhängigen „Multiband Thermal Radiation“ Modell mit Gl. (4-1) und im wellenlängenunabhängigen „Gray Thermal Radiation“ Modell mit Gl. (4-2) umgesetzt.

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \quad (4-1)$$

$$\varepsilon = \alpha \quad (4-2)$$

Die Wellenlängenabhängigkeit der optischen Oberflächeneigenschaften ist in besonderem Maße für die selektive Absorberbeschichtung und die transparente Abdeckung relevant und wird durch das „Multiband Thermal Radiation“ Modell abgebildet. Es erlaubt die Definition beliebig vieler Spektralbänder, für die die optischen Eigenschaften aller am Strahlungsaustausch teilnehmenden Oberflächen festgelegt werden. Da die benötigte Rechenkapazität linear mit der Anzahl der Spektralbänder steigt, ist es sinnvoll diese auf ein Mindestmaß zu begrenzen. Es werden zwei Spektralbänder definiert. Entsprechend dem Messbereich des

Pyranometers, mit dem die hemisphärische Bestrahlungsstärke bei Kollektorprüfungen gemessen wird, wird das erste Spektralband (Spektrum der Solarstrahlung) im Wellenlängenbereich von 270 nm – 3000 nm festgelegt. Das zweite Spektralband (Spektrum der IR Strahlung) umfasst den Wellenlängenbereich von 3000 nm – 1 mm.

4.2 Modellierung der Wärmeverluste durch Wärmestrahlung und Konvektion

Wärmeverluste an die Umgebung treten durch Konvektion und Wärmestrahlung an der transparenten Abdeckung und dem Rahmen auf.

Die transparente Abdeckung steht im Strahlungsaustausch mit der Umgebung und dem Himmel als Gegenstrahler, Gl. (4-3).

$$\dot{Q}_{str} = \varepsilon_{glas} \cdot A_{glas} \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{sky}^4) \quad (4-3)$$

Mit:

\dot{Q}_{str}	W	Wärmestrom durch Wärmestrahlung
ε_{glas}	-	Emissionskoeffizient der transparenten Abdeckung
A_{glas}	m ²	Fläche der transparenten Abdeckung
σ	W/(m ² K ⁴)	Stefan Boltzmann Konstante; $\sigma = 5,670367 \cdot 10^{-8}$ W/(m ² K ⁴)
T	K	Oberflächentemperatur
T_{sky}	K	Fiktive Himmelstemperatur

Umfangreiche Untersuchungen von Berdahl und Martin (1984) wiesen einen Unterschied zwischen Umgebungstemperatur und Himmelstemperatur von 5 °C in einem heiß-feuchten und 30 °C in einem kalt-trocken Klima auf. Außerdem steigt die Himmelstemperatur mit zunehmendem Bewölkungsgrad. Für die thermische Leistungsfähigkeit eines mit einer Glasscheibe versehenen Kollektors spielt die Himmelstemperatur eine untergeordnete Rolle. (Duffie und Beckman 2013)

Nach (DIN EN ISO 9806) wird ein Kollektor während einer thermischen Leistungsprüfung von Luft mit einer Geschwindigkeit von 3 ± 1 m/s, parallel zu den Außenflächen, umströmt. In der Literatur ist eine Vielzahl von Korrelationen zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten über flachen Oberflächen bzw. speziell für Flachkollektoren zu finden. Die Korrelationen wurden entweder aus der Grenzschichttheorie entwickelt oder empirisch ermittelt. Übersichten über mögliche Korrelationen finden sich in (Sartori 2006). Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird nach Gl. (4-4) modelliert.

$$\alpha_{konv} = 2,8 + 3,0 \cdot u \quad (4-4)$$

Mit:

α_{konv}	W/(m ² K)	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
u	m/s	Windgeschwindigkeit

Der Wärmeverlust durch Wärmestrahlung und Konvektion vom Rahmen an die Umgebung wird durch einen kombinierten Wärmeverlustkoeffizienten aufgeprägt, Gl. (4-5). Diese Gleichung ist unter der Annahme gültig, dass der Rahmen gegen Bauteile mit Umgebungstemperatur strahlt (STAR CCM+).

$$\alpha_{komb} = \frac{Q_{str+konv}}{T - T_{amb}} = \alpha_{konv} + \sigma \cdot \varepsilon_{Rahmen} \cdot [(T^2 + T_{amb}^2) \cdot (T + T_{amb})] \quad (4-5)$$

Mit:

α_{komb}	W/(m ² K)	Kombinierter Wärmeübergangskoeffizient
$Q_{str+konv}$	W/m ²	Wärmestromdichte, Wärmestrahlung und Konvektion
T	K	Oberflächentemperatur
T_{amb}	K	Umgebungstemperatur
ε_{Rahmen}	-	Emissionsgrad der Oberfläche

4.3 Wärmeleitung durch die Wärmedämmung

Die Wärmeübertragung in einem porösen Stoff, wie z. B. einer Wärmedämmung, ist das Ergebnis des Zusammenwirkens von Wärmestrahlung und Wärmeleitung und deren Wechselwirkung mit der Stoffübertragung für den Fall feuchter Materialien. Konvektion in Luftschichten beeinflusst die Wärmeübertragung erst ab Schichtstärken von 1 cm merklich. Bei Schichtdicken unter 1 cm dominiert die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung (Krischer und Kast 1992).

Das thermische Verhalten einer Wärmedämmung kann auf Grundlage folgender Überlegungen modelliert werden: Ein poröser Stoff besteht aus Feststoffpartikeln beliebiger Form und Größe und aus einem den Hohlraum füllenden Fluid. Bei trockenen Proben ist das Fluid Luft. Die Wärmeleitfähigkeit ist deshalb ganz allgemein eine Kombination aus der Wärmeleitfähigkeit der Feststoffpartikel und des Fluides und dem Wärmeübergang zwischen den Feststoffpartikeln und dem Fluid in den Hohlräumen. Basierend auf diesen Überlegungen stellen (Krischer und Kast 1992) ein Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit

von der Temperatur vor. Bei steigender mittlerer Temperatur steigt der Einfluss der Wärmestrahlung. Die Wärmeleitfähigkeit steigt exponentiell mit steigender mittlerer Temperatur, da diese in vierter Potenz eingeht. Im für Flachkollektoren interessierenden Bereich bis ungefähr 150 °C mittlerer Temperatur, welche als arithmetisches Mittel von Absorber- und Umgebungstemperatur betrachtet werden kann, kann die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmungen aber in guter Näherung mit einer Geradengleichung, Gl. (4-6) abgebildet werden. (Vetter et al. 2015)

$$\lambda(\vartheta_m) = c \cdot \vartheta + b \quad (4-6)$$

Mit:

λ	W/(m K)	Effektive Wärmeleitfähigkeit
ϑ_m	°C	Mittlere Temperatur der Wärmedämmung
c	W/(m K)	Effektive Wärmeleitfähigkeit bei 0 °C
b	W/(m K °C)	Koeffizient zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit

Für die Validierung der CFD Modelle anhand der Serienprodukte des Projektpartners wurde die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur der Wärmedämmung mit einer Zwei-Platten-Apparatur bestimmt, vgl. Kapitel 5.6. Da die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur einer Wärmedämmung in hohem Maße von der Art der Wärmedämmung abhängt, wird empfohlen die Geradengleichung der im eigenen Produkt verwendeten Wärmedämmung zu bestimmen und im CFD Programm zu implementieren.

4.4 Luftströmung im Spalt zwischen Absorber und Abdeckung

Flachkollektoren sind aus Kostengründen nur in den seltensten Fällen hermetisch dicht ausgeführt. Feuchte Luft kann in den Kollektor eintreten. Um eine Ansammlung von Feuchtigkeit im Kollektorinneren zu vermeiden bzw. um vorhandene Feuchtigkeit wieder aus dem Kollektor auszutragen, ist die Belüftungsstrategie ein wichtiger Aspekt bei der Konstruktion. Die Belüftungsstrategie wird durch Lüftungsöffnungen verschiedener Form, Größe und Position realisiert. Die Lüftungsöffnungen gewährleisten einen Austausch der Luft aus dem Kollektorinneren mit der Umgebungsluft und sind meist innerhalb des Rahmens oder den Rohrdurchführungen angebracht.

Unter Bestrahlung stellt sich infolge des Temperaturgradienten zwischen Absorber und transparenter Abdeckung, sowie über die Höhe des Kollektors durch die Dichteänderung der Luft eine von unten nach oben gerichtete, turbulente Luftströmung ein. Luft aus der Umgebung wird durch die unteren Lüftungsöffnungen angesaugt und tritt durch die oberen Lüftungsöffnungen wieder aus.

Grundsätzlich ist die Abbildung der Luft im Spalt softwareseitig als vollständig kompressibles ideales Gas, als ideales Gas mit der Option „inkompressibel“ oder mit der Boussinesq Approximation möglich.

1. Bei der Betrachtung der Luft als vollständig kompressibles ideales Gas ist die Dichte von der lokalen Temperatur und dem lokalen hydrodynamischen Druck abhängig. Eine vollständig kompressible Formulierung der Erhaltungsgleichungen ist im Allgemeinen für große Mach-Zahlen notwendig und kann die Stabilität der Simulation maßgeblich beeinträchtigen.
2. Die Boussinesq-Approximation ignoriert jegliche Änderungen der Fluidichte aufgrund von Temperaturgradienten mit Ausnahme des Gewichtsterms in der Impulsgleichung. Es wird außerdem angenommen, dass die Fluidichte linear mit der Temperaturänderungen variiert. Diese Annahme ist nur für kleine Dichteänderungen, und damit nur für kleine Temperaturänderungen, d. h. für $\Delta T \ll T_{\text{amb}}$ zulässig. Als Grenzwert wird $\Delta T/T_{\text{amb}} \leq 10\text{-}20\%$ angenommen.
3. Bei Betrachtung der Luft als ideales Gas mit der Option „inkompressibel“ wird die Dichte in Abhängigkeit vom absoluten Druck sowie der lokalen Temperatur modelliert. Der Auftrieb der Luft im Kollektor durch den Dichteunterschied infolge der nach oben zunehmenden Temperatur wird also gewährleistet. Diese Modellierung ist im Allgemeinen bis zu einer Mach-Zahl von $Ma \leq 0,3$ gültig. (STAR CCM+)

Der Grenzwert zur Verwendung der Boussinesq-Approximation wird im Kollektor in vielen Fällen überschritten. Die Modellierung der Luft mit Hilfe dieser Approximation ist daher nicht zulässig. Die Strömungsgeschwindigkeiten der Luft im Kollektor sind gering, so dass die Mach-Zahl immer $Ma < 0,3$ ist. Die Bedingung zur Modellierung der Luft als ideales Gas mit der Option „inkompressibel“ ist erfüllt und wird verwendet.

4.5 Wärmeübertragung ans Wärmeträgerfluid

Getrieben durch den definierten Massenstrom erfolgt die Wärmeübertragung ans Wärmeträgerfluid durch erzwungene Konvektion in der Kollektorverrohrung. Entsprechend der Reynolds-Zahl, Gl. (4-7) bzw. Gl. (4-8) für kreisförmige Rohre wird das laminare Strömungsmodell bzw. das k- ϵ -Turbulenzmodell gewählt. Von einer turbulenten Strömung wird ausgegangen, wenn die Reynolds-Zahl die kritische Reynolds-Zahl von $Re_{\text{krit}} = 2300$ übersteigt.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (4-7)$$

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu} \quad (4-8)$$

Mit:

Re	-	Reynolds-Zahl
ρ	kg/m ³	Fluidichte
v	m/s	Fluidgeschwindigkeit
D	m	Innendurchmesser
μ	kg/(m s)	Dynamische Viskosität
\dot{m}	kg/s	Massenstrom

4.6 Validierung der CFD Kollektormodelle hinsichtlich der Bauteiltemperaturen

Die Validierung der CFD Modelle erfolgte unter anderem hinsichtlich der Bauteiltemperaturen. Vom Projektpartner wurden zwei Kollektortypen zur Verfügung gestellt. Jeweils ein Kollektor je Typ wurde mit diversen Temperatursensoren, vor allem an den Absorbern und den Gehäusen, ausgestattet. Eine ausführliche Beschreibung der Kollektoren und Komponenten, sowie der Anbringung der Temperatursensoren findet sich in Kapitel 6. Die Auswahl der Temperaturmessstellen erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner.

4.6.1 Bauteiltemperaturen des Kollektors vom Typ K1

Abbildung 4-3 zeigt einen Ausschnitt des Längsschnitts, Abbildung 4-4 einen Ausschnitt aus dem Querschnitt des CAD-Modells vom Kollektor des Typs K1.

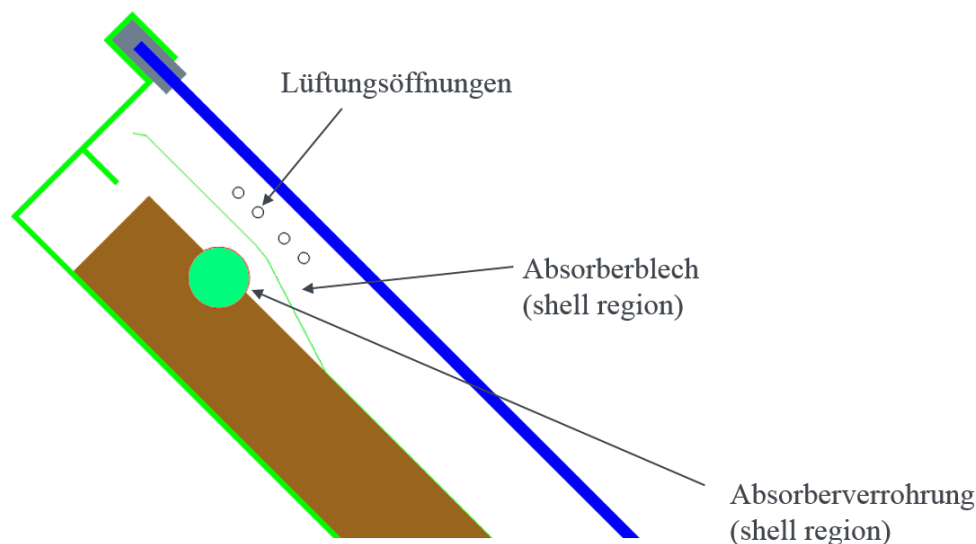


Abbildung 4-3: Längsschnitt durch das CAD-Modell, Kollektor vom Typ K1 (Ausschnitt)

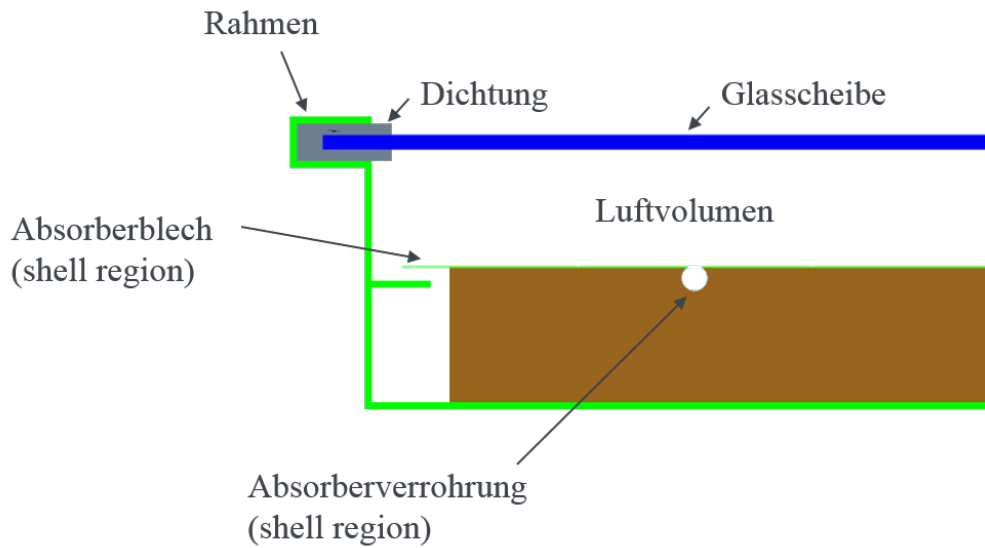


Abbildung 4-4: Querschnitt durch das CAD-Modell, Kollektor vom Typ K1 (Ausschnitt)

Die Temperaturmessstellen am Kollektor vom Typ K1 zeigt Abbildung 4-5. An der Rückseite des Absorberblechs sind sieben Temperatursensoren angebracht, innen im Gehäuse, zwischen Gehäuse und Wärmedämmung drei, sowie ein weiterer mittig bezüglich der Breite zwischen Abdeckung und EPDM Dichtung.

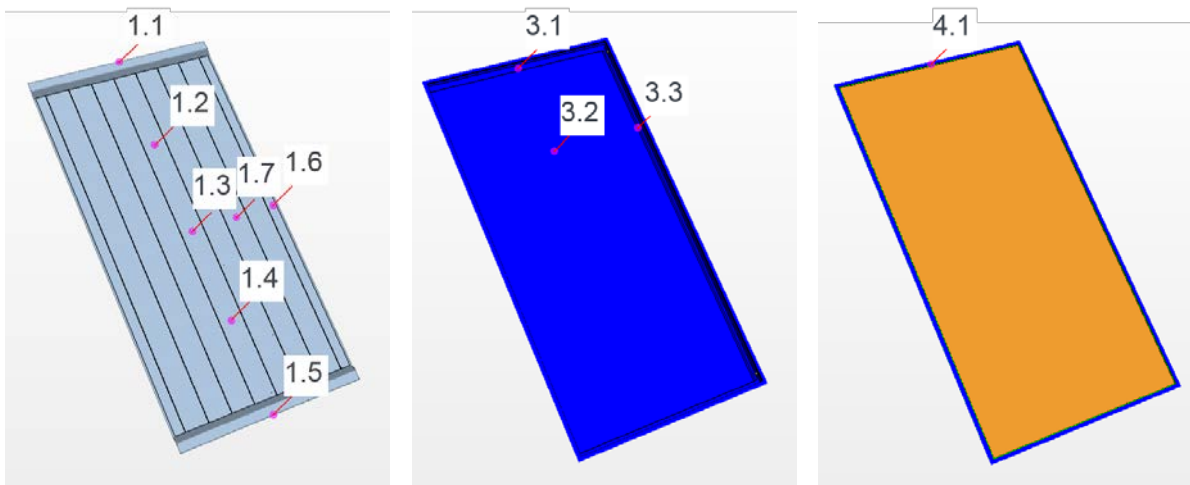


Abbildung 4-5: Temperaturmessstellen am Kollektor vom Typ K1, links: auf der Rückseite des Absorberblechs; Mitte: am Gehäuse, innen; rechts: zwischen Abdeckung und EPDM Dichtung

Zunächst wurde eine stationäre Messung im dynamischen Sonnensimulator durchgeführt. Die Umgebungsbedingungen zeigt Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Stationäre Messung im dynamischen Sonnensimulator, Umgebungsbedingungen

ϑ_{amb}	22 °C	Umgebungstemperatur
ϑ_{sky}	22 °C	Himmelstemperatur (Temperatur des kalten Himmels im Simulator)
G_{hem}	788 W/m ²	Hemisphärische Bestrahlungsstärke
θ	0 °	Einstrahlungswinkel (senkrechte Einstrahlung)
u	2 m/s	Windgeschwindigkeit

Die Eintrittstemperatur in den Kollektor wurde stufenweise erhöht. Während der Messung wurden die Umgebungs- und Betriebsbedingungen sowie die Bauteiltemperaturen aufgezeichnet. Anschließend wurden die Umgebungs- und Betriebsbedingungen der Messung in die Simulation überführt und die berechneten Bauteiltemperaturen an den entsprechenden Stellen ausgewertet. Die Auswertung erfolgte an fünf stationären Messpunkten. Tabelle 4-2 zeigt die Differenz zwischen den gemessenen und den simulierten Bauteiltemperaturen ($(\vartheta_{Mess} - \vartheta_{Sim})$ [K]) für fünf mittlere Fluidtemperaturen (ϑ_m [°C]), wobei die mittlere Fluidtemperatur das arithmetische Mittel zwischen Ein- und Austrittstemperatur ist. Die Messstellen sind analog zur Abbildung 4-5 mit 1.1 bis 4.1 bezeichnet.

Tabelle 4-2: Validierung der Bauteiltemperaturen im dynamischen Sonnensimulator, Kollektor durchströmt

Messstellen	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	3.1	3.2	3.3	4.1
$\vartheta_{Mess} - \vartheta_{Sim}$ [K]											
$\vartheta_m = 23$ °C	8,0	0,1	1,2	2,0	19,7	2,0	2,6	1,3	-0,7	1,0	1,9
$\vartheta_m = 43,4$ °C	5,6	-0,9	0,5	1,5	15,5	1,7	1,8	0,2	-1,8	0,3	0,7
$\vartheta_m = 62,5$ °C	6,4	1,1	1,7	1,8	11,0	2,5	2,6	-0,2	-2,3	0,3	0,3
$\vartheta_m = 80,7$ °C	3,3	0,6	1,0	1,2	6,7	2,5	1,8	-1,3	-3,5	-0,5	-1,2
$\vartheta_m = 96,3$ °C	1,5	0,3	0,8	0,8	2,6	2,5	1,3	-2,3	-4,6	-1,2	-2,2

Betrachtet werden zunächst die Temperaturen am Absorber. Die Differenz zwischen gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen an den Messstellen 1.2, 1.3, 1.4, 1.6 und 1.7 ist gering. Die maximale Abweichung liegt bei 2,6 K. Diese Bauteiltemperaturen werden über den gesamten untersuchten Temperaturbereich gut abgebildet. An den Hotspots, Messstellen 1.1 und 1.5 zeigen sich für die geringe mittlere Fluidtemperatur von 23 °C hohe Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen, wobei die gemessenen Absorbtemperaturen höher sind als die in der Simulation bestimmten. Die Abweichungen nehmen mit steigender mittlerer Fluidtemperatur ab. Bei der mittleren Fluidtemperatur von

96,3 °C sind die Differenzen der gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen am gesamten Kollektor gering.

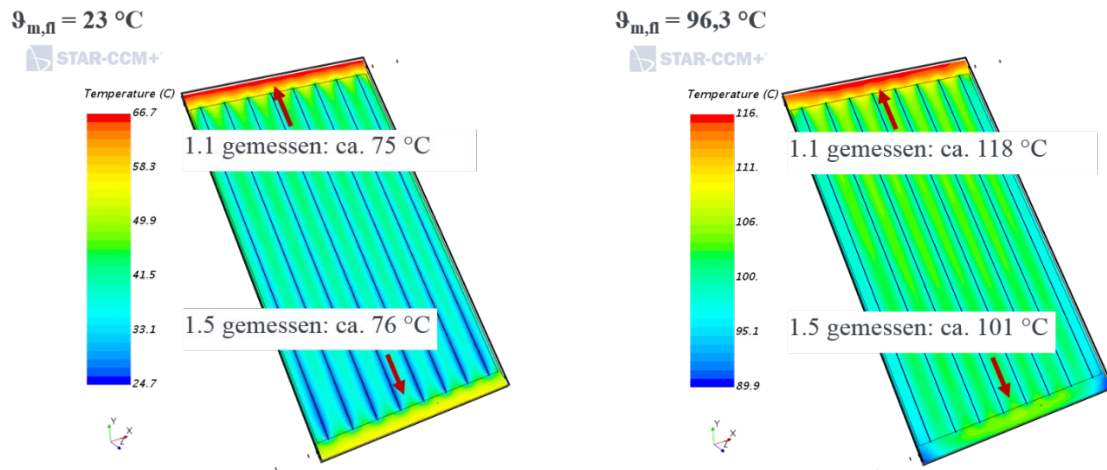


Abbildung 4-6: Betrachtung der Hotspots (Messstellen 1.1 und 1.5) am Absorber bei einer mittleren Fluidtemperatur von $\vartheta_m = 23$ °C (links) und $\vartheta_m = 96,3$ °C (rechts)

Ebenfalls geringe Abweichungen weisen die gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen am Gehäuse und zwischen Abdeckung und EPDM Dichtung auf. Die maximale Abweichung liegt bei 4,6 K an der Messstelle 3.2 bei einer mittleren Fluidtemperatur von 96,3 °C. Die Bauteiltemperaturen am Gehäuse sind in hohem Maße von der Luftgeschwindigkeit um den Kollektor abhängig. Diese wird im Simulator zwar punktuell gemessen, über am Gehäuse eventuell auftretende Turbulenzen und Wirbel sowie Strömungsverteilung kann jedoch keine Aussage getroffen werden.

Im nächsten Schritt wurde eine Validierung der Bauteiltemperaturen während Stagnation im undurchströmten Kollektor vorgenommen. Für die Validierung wurden die Bauteiltemperaturen sowie die Umgebungsbedingungen, die während der Exposition gemessen wurden verwendet. Die CFD-Simulationen des Gesamtkollektors eignen sich nicht für die Abbildung ganzer Tagesgänge. Eine exemplarische Validierung der Bauteiltemperaturen wurde mit einem 5 Minuten Mittelwert der Messdaten von 13:15 Uhr bis 13:20 Uhr vom 14.02.2018 durchgeführt. Die 5 Minuten Mittelwerte der Umgebungsbedingungen sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Umgebungsbedingungen, 5 Minuten Mittelwert von 13:15 Uhr bis 13:20 Uhr vom 14.02.2018

ϑ_{amb}	1,4 °C	Umgebungstemperatur
ϑ_{sky}	-15 °C	Himmelstemperatur
G_b	837 W/m ²	Direktstrahlung
G_d	149 W/m ²	Diffusstrahlung
θ	26°	Einstrahlungswinkel (senkrechte Einstrahlung)
u	1 m/s	Windgeschwindigkeit

Den Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung und der beispielhaften Bauteiltemperaturen an den Messstellen 1.2 und 3.2 zeigt Abbildung 4-7. Die gemessenen Bauteiltemperaturen (wiederrum 5 Minuten Mittelwerte) sowie die aus der Simulation mit Randbedingungen nach Tabelle 4-3 bestimmten Bauteiltemperaturen zeigen Tabelle 4-4.

Die gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen weisen eine gute Übereinstimmung auf. Eine größere Abweichung zeigt sich an den Messstellen 3.1 und 4.1, beide Messstellen sind mittig am Kollektor oben abgebracht. Ein möglicher Grund ist der Wind. In der Simulation wird der Wind ideal aufgeprägt, in der Simulation wird die Windgeschwindigkeit an einer Stelle gemessen. Wie hoch die Windgeschwindigkeit an den einzelnen Stellen des Kollektors tatsächlich ist, ist unklar.

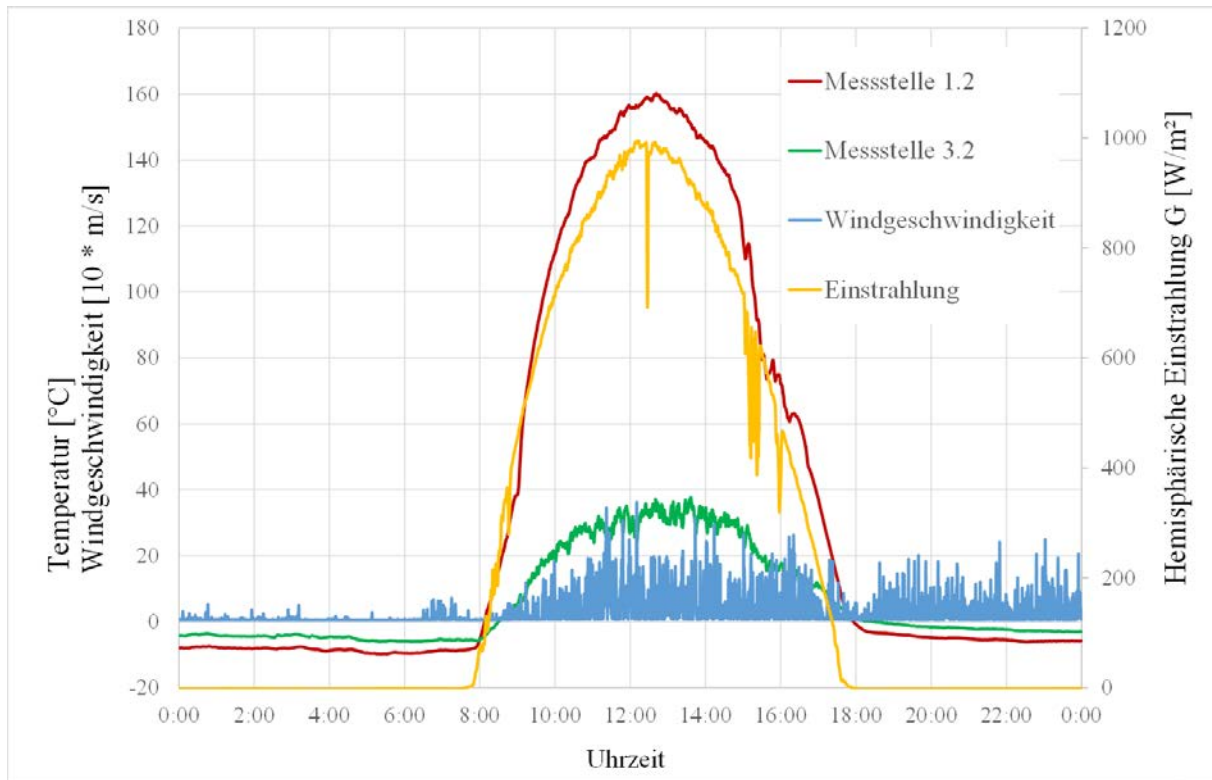


Abbildung 4-7: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung und der Bauteiltemperaturen an den Messstellen 1.2 und 3.2

Tabelle 4-4: Validierung der Bauteiltemperaturen in Exposition, Kollektor undurchströmt

Messstellen	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	3.1	3.2	3.3	4.1
$\vartheta_{\text{Mess}} [^{\circ}\text{C}]$	154,0	159,8	158,9	151,3	121,9	147,3	155,5	32,0	35,2	36,8	34,4
$\vartheta_{\text{Sim}} [^{\circ}\text{C}]$	157,3	159,5	157,8	151,1	118,5	143,1	156,6	39,3	38,9	36,7	40,4
Diff [K]	-3,3	0,3	1,1	0,2	3,4	4,2	-1,1	-7,2	-3,7	-2,4	-6,0

Fazit

Die Bauteiltemperaturen vom Kollektor vom Typ K1 werden mit einer guten Genauigkeit abgebildet. Als Ausnahme ist der Hotspot an der Messstelle 1.5 bei geringen mittleren Fluidtemperaturen zu nennen. Außerdem hat die lokale Windgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Rahmentemperatur. Um die benötigte Rechenkapazität zu begrenzen ist es trotzdem sinnvoll den konvektiven Wärmeübergangskoeffizient in der Simulation idealisiert abzubilden und gegebenenfalls den Worst Case zu betrachten.

4.6.2 Bauteiltemperaturen des Kollektors vom Typ K2

Abbildung 4-8 zeigt einen Ausschnitt der Absorberblechrückseite inklusive Verrohrung des Kollektors vom Typ K2, Abbildung 4-9 einen Ausschnitt aus dem Längsschnitt des CAD-Modells desselben Kollektors.

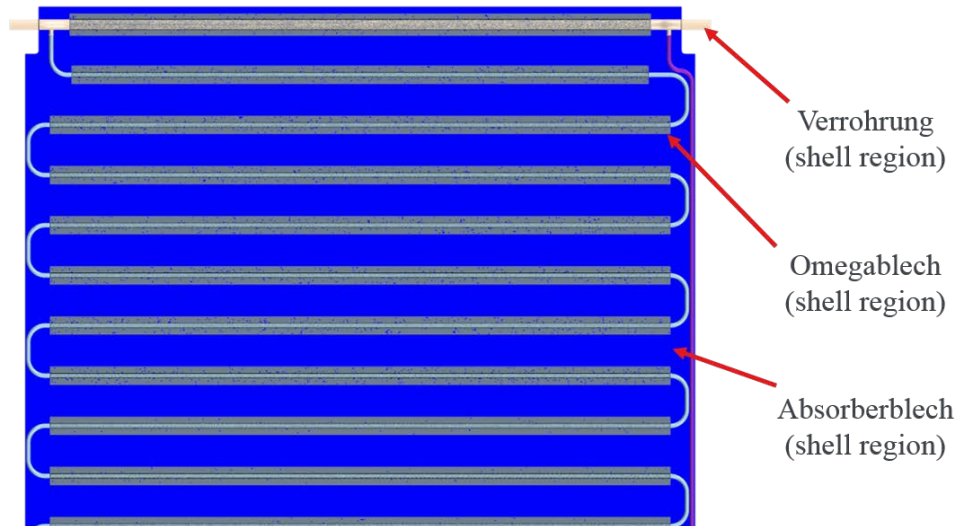


Abbildung 4-8: Absorberblechrückseite inklusive Verrohrung des CAD-Modells, Kollektor vom Typ K2 (Ausschnitt)

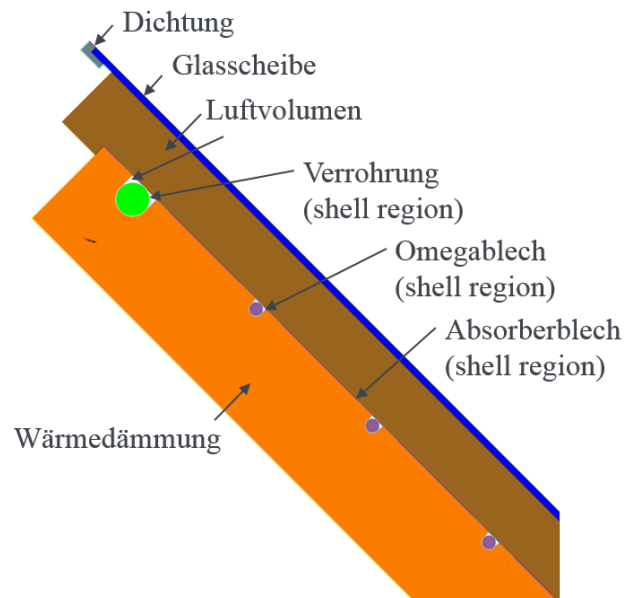


Abbildung 4-9: Längsschnitt durch das CAD-Modell, Kollektor vom Typ K2 (Ausschnitt)

Die Temperaturmessstellen am Kollektor vom Typ K2 zeigt Abbildung 4-10. An der Rückseite des Absorberblechs sind 14 Temperatursensoren angebracht (Messstellen 1.1-1.14), auf dem Omegablech drei (Messstellen 2.1-2.3), vier weitere Temperatursensoren sind auf der Verrohrung angebracht (Messstellen 2.4-2.7) sowie acht Temperatursensoren innen im Gehäuse (Messstellen 3.1-3.8), zwischen Gehäuse und Wärmedämmung.

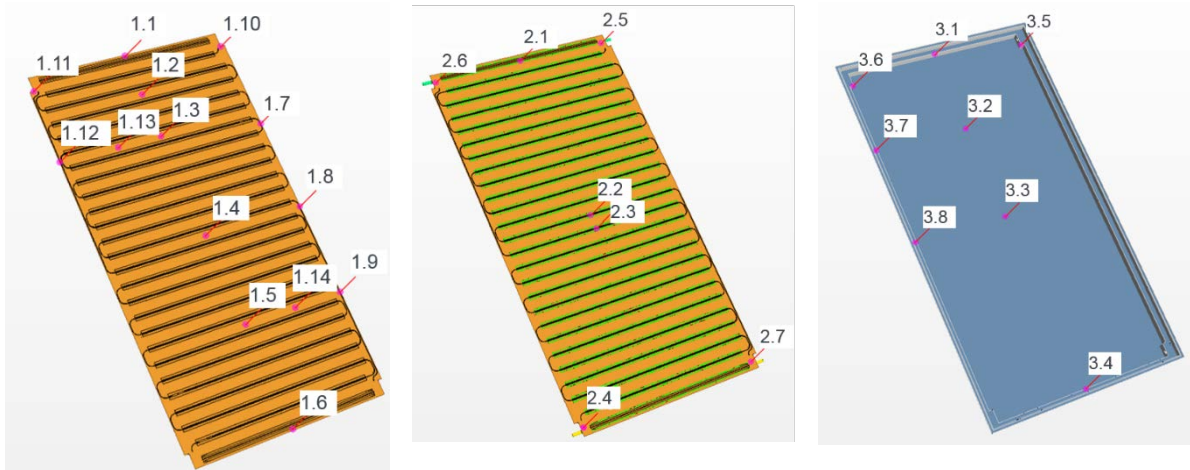


Abbildung 4-10: Temperaturmessstellen am Kollektor vom Typ K2, links: auf der Rückseite des Absorberblechs; Mitte: auf dem Omegablech (2.1-2.3) und der Verrohrung (2.4-2.7); rechts: am Gehäuse, innen

Es wurde wieder eine stationäre Messung im dynamischen Sonnensimulator durchgeführt. Die Umgebungsbedingungen zeigt Tabelle 4-5.

Tabelle 4-5: Stationäre Messung im dynamischen Sonnensimulator, Umgebungsbedingungen

ϑ_{amb}	25 °C	Umgebungstemperatur
ϑ_{sky}	25 °C	Himmelstemperatur (Temperatur des kalten Himmels im Simulator)
G_{hem}	763 W/m ²	Hemisphärische Bestrahlungsstärke
θ	0 °	Einstrahlungswinkel (senkrechte Einstrahlung)
u	2 m/s	Windgeschwindigkeit

Analog zur Messung am Kollektor vom Typ K1 wurde die Eintrittstemperatur in den Kollektor stufenweise erhöht. Während der Messung wurden die Umgebungs- und Betriebsbedingungen sowie die Bauteiltemperaturen aufgezeichnet. Die Umgebungs- und Betriebsbedingungen der Messung wurden in die Simulation überführt, die berechneten Bauteiltemperaturen an den entsprechenden Stellen ausgewertet. Die Auswertung erfolgte für die fünf stationären Eintrittstemperaturen. Betrachtet werden zunächst die Messstellen am Absorberblech (Messstellen 1.1-1.14), vgl. Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7.

Tabelle 4-6: Validierung der Bauteiltemperaturen im dynamischen Sonnensimulator, Kollektor durchströmt, Messstellen 1.1-1.7

Messstellen $\vartheta_{\text{Mess}} - \vartheta_{\text{Sim}} [\text{K}]$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
$\vartheta_m = 24,8 \text{ °C}$	6,0	3,6	3,1	3,8	3,0	4,3	12,4
$\vartheta_m = 42,8 \text{ °C}$	4,3	1,4	1,2	2,9	1,1	4,1	7,4
$\vartheta_m = 65,4 \text{ °C}$	2,8	0,7	0,6	1,0	0,7	2,3	4,2
$\vartheta_m = 84,4 \text{ °C}$	1,5	0,2	0,0	1,6	0,6	0,9	1,6
$\vartheta_m = 95 \text{ °C}$	0,9	-0,2	-0,3	1,2	0,5	0,1	0,0

Tabelle 4-7: Validierung der Bauteiltemperaturen im dynamischen Sonnensimulator, Kollektor durchströmt, Messstellen 1.8-1.14

Messstellen $\vartheta_{\text{Mess}} - \vartheta_{\text{Sim}} [\text{K}]$	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14
$\vartheta_m = 24,8 \text{ °C}$	14,1	19,9	20,5	23,7	24,4	5,3	3,3
$\vartheta_m = 42,8 \text{ °C}$	8,7	14,6	15,8	19,5	18,5	3,1	2,5
$\vartheta_m = 65,4 \text{ °C}$	6,2	9,6	12,0	14,9	12,9	2,3	1,8
$\vartheta_m = 84,4 \text{ °C}$	3,7	6,9	8,1	11,1	8,8	1,5	1,4
$\vartheta_m = 95,0 \text{ °C}$	2,4	4,7	6,0	8,9	6,7	1,2	1,2

Die Differenz zwischen gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen an den Messstellen 1.1-1.6, 1.13 und 1.14, ist gering. Die maximale Abweichung liegt bei 6 K. Am Absorberrand, Messstellen 1.7-1.12 zeigen sich größere Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen. Die Bögen der Absorbervorrohrung sind nicht ans das Absorberblech angeschlossen. Der Kontakt zwischen Absorberblech und Absorbervorrohrung ist an diesen Stellen nicht einheitlich bzw. nicht definiert und daher auch nicht modellierbar. Grundsätzlich bildet die Modellierung den Kollektor aber gut ab, was sich an den guten bis sehr guten Übereinstimmungen zwischen Messung und Simulation an den anderen Messstellen und der Berechnung der thermischen Leistungsfähigkeit zeigt. Die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen am Absorberrand nehmen mit zunehmender mittlerer Fluidtemperatur, analog den Untersuchungen am Kollektor vom Typ K1, ab.

Den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen am Omegablech (Messstellen 2.1-2.3) und an der Verrohrung (Messstellen (2.4-2.7) zeigt Tabelle 4-8. Den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen am Gehäuse (Messstellen 3.1-3.8) zeigt Tabelle 4-9. Es wurde eine gute Übereinstimmung erreicht. Die maximale Abweichung dieser Messstellen zeigt die Messstelle 3.1 bei einer mittleren Fluidtemperatur von 95 °C. Sie beträgt 5 K.

Tabelle 4-8: Validierung der Bauteiltemperaturen im dynamischen Sonnensimulator, Kollektor durchströmt, Messstellen 2.1-2.7

Messstellen $\vartheta_{\text{Mess}} - \vartheta_{\text{Sim}} [\text{K}]$	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
$\vartheta_m = 24,8 \text{ }^\circ\text{C}$	2,5	3,5	0,9	0,1	0,3	0,2	0,0
$\vartheta_m = 42,8 \text{ }^\circ\text{C}$	1,6	2,9	0,5	0,0	-0,4	-0,1	-0,2
$\vartheta_m = 65,4 \text{ }^\circ\text{C}$	0,8	2,1	0,1	-0,3	-1,2	-0,5	-0,4
$\vartheta_m = 84,4 \text{ }^\circ\text{C}$	0,3	1,5	0,1	-0,5	-1,7	-0,6	-0,5
$\vartheta_m = 95,0 \text{ }^\circ\text{C}$	0,0	1,2	0,1	-0,6	-2,0	-0,7	-0,6

Tabelle 4-9: Validierung der Bauteiltemperaturen im dynamischen Sonnensimulator, Kollektor durchströmt, Messstellen 3.1-3.8

Messstellen $\vartheta_{\text{Mess}} - \vartheta_{\text{Sim}} [\text{K}]$	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8
$\vartheta_m = 24,8 \text{ }^\circ\text{C}$	0,6	0,8	0,6	0,4	0,5	1,2	3,9	0,9
$\vartheta_m = 42,8 \text{ }^\circ\text{C}$	-1,2	0,6	-0,2	0,2	0,7	1,6	2,5	0,9
$\vartheta_m = 65,4 \text{ }^\circ\text{C}$	-2,8	-0,3	-1,3	0,4	1,8	1,5	0,2	-0,1
$\vartheta_m = 84,4 \text{ }^\circ\text{C}$	-4,2	-1,1	-2,2	0,6	1,6	2,3	-1,2	-1,2
$\vartheta_m = 95 \text{ }^\circ\text{C}$	-5,0	-1,7	-2,9	0,7	3,0	1,1	-2,6	-1,8

Fazit

Die Bauteiltemperaturen vom Kollektor vom Typ K2 werden ebenfalls mit einer guten Genauigkeit abgebildet. Am Absorberrand zeigen sich größere Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen. Die Abweichungen nehmen mit zunehmender mittlerer Fluidtemperatur, analog den Untersuchungen am Kollektor vom Typ K1, ab.

Insgesamt wurde eine gute Genauigkeit zwischen gemessenen und simulierten Bauteiltemperaturen für beide untersuchten Kollektortypen erreicht.

Die CFD Modelle wurden außerdem anhand der gemessenen und berechneten Kollektorwirkungsgradkennlinie und des Kollektorjahresertrags validiert. Von einer Validierung anhand der Fluidtemperaturen wurde abgesehen, da bei gleichen Umgebungs- und Betriebsbedingungen bereits Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Fluidaustrittstemperatur von $\pm 0,5 \text{ K}$ zu inakzeptablen Differenzen hinsichtlich berechneter und gemessener Kollektorleistung bzw. gemessenem und berechnetem Kollektorwirkungsgrad führen. Die Validierung hinsichtlich der Wirkungsgradkennlinien wird in Kapitel 5 erläutert.

4.8 Automatisierte Auswertung

Bereits in die CFD Modelle implementiert wurden außerdem einige qualitative sowie quantitative Auswertungen, die es zum einen ermöglichen bereits während den ersten Iterationen Plausibilitätsprüfungen vorzunehmen und später den stationären Zustand zu erkennen. Zu nennen sind hier zum Beispiel Abbildungen der Temperaturverteilung der einzelnen Bauteile, oder der Wärmeträgermassenstrom sowie die Wärmeträgertemperatur am Kollektorein- und Austritt in Abhängigkeit der Iterationen. Beispiele für die Temperaturverteilung einzelner Bauteile zeigt Abbildung 4-11, links die Temperaturverteilung eines Absorberblechs, rechts die Temperaturverteilung einer Abdeckung. Bereits während der ersten Iterationen zeigt sich qualitativ die charakteristische Temperaturverteilung an einem Absorberblech entsprechend der Absorberverrohrung. Zusätzlich kann die maximale Temperatur der Abdeckung in Abhängigkeit der Wärmeträgereintrittstemperatur abgeschätzt werden. Fehlerquellen wie zum Beispiel nicht plausible optische Eigenschaften können somit schnell aufgedeckt werden. Eine über diverse Iterationen konstante Wärmeträgertemperatur am Austritt sowie der mittleren Bauteiltemperaturen zeigt hingegen das Erreichen eines stationären Zustands. Die Beobachtung der Residuen ist hierfür nicht ausreichend.

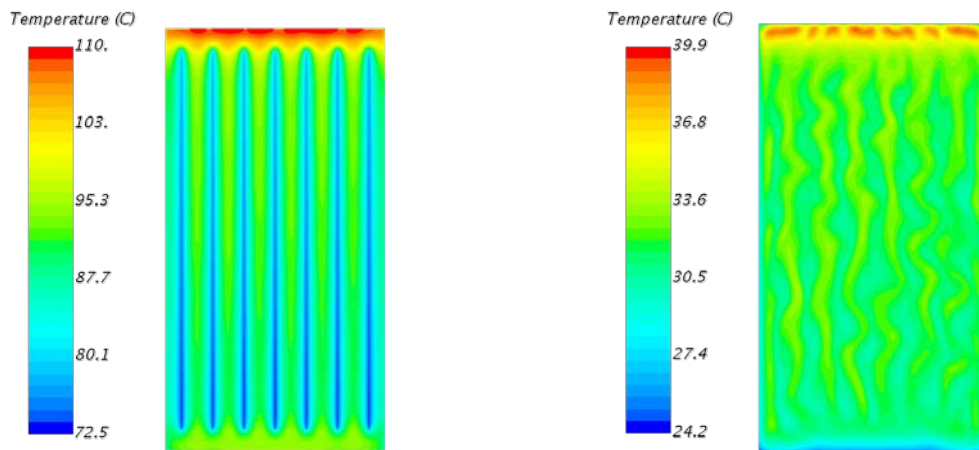


Abbildung 4-11: Temperaturverläufe an verschiedenen Bauteilen, links Absorberblech mit Harfenverrohrung und sieben Steigrohren, rechts Abdeckung

5. Entwicklung des virtuellen Kollektorprüfverfahrens (AP4)

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung eines virtuellen Kollektorprüfverfahrens. Auf Grundlage der (DIN EN ISO 9806) werden Standardprüfbedingungen definiert, mit denen eine virtuelle Leistungsprüfung durchgeführt werden kann. Aus den Simulationsergebnissen werden dann die charakteristischen Kollektorkennwerte identifiziert, die die Berechnung des Kollektorjahresertrags ermöglichen. Das Verfahren zur virtuellen Leistungsprüfung besteht aus einer Reihe stationärer Simulationen. Die Parameteridentifikation erfolgt auf normkonformen Wege in Excel.

5.1 Vorgehensweise beim virtuellen Kollektorprüfverfahren

Die Umgebungs- und Betriebsbedingungen für die experimentelle Leistungsprüfung sind in der (DIN EN ISO 9806) genormt. Aus den Ergebnissen der Leistungsprüfung werden die charakteristischen Kollektorkennwerte $\eta_{0,hem}$, a_1 und a_2 identifiziert. Die Kollektorleistung unter stationären Bedingungen wird nach Gleichung (5-1) berechnet.

$$\frac{\dot{Q}}{A_G} = \eta_{0,hem} \cdot G - a_1 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_{amb}) - a_2 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_{amb})^2 \quad (5-1)$$

Mit:

\dot{Q}	W/m ²	Nutzwärmeleistung
A_G	m ²	Bruttokollektorfläche
G	W/m ²	Hemisphärische Bestrahlungsstärke
$\eta_{0,hem}$	-	Spitzenwirkungsgrad (η_{hem} bei $T_m^* = 0$)
a_1	W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient bei $(\vartheta_m - \vartheta_{amb} = 0)$
a_2	W/(m ² K ²)	Temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient
ϑ_m	°C	Mittlere Temperatur des Wärmeträgers
ϑ_{amb}	°C	Temperatur der Umgebungsluft

Das Verfahren zur virtuellen Leistungsprüfung wurde ebenfalls auf Grundlage der Anforderungen der (DIN EN ISO 9806) entwickelt. Folgende genormte Umgebungs- und Betriebsbedingungen wurden in die Standardprüfbedingungen überführt:

- Massenstrom 0,02 kg/(s m²), bezogen auf die Bruttokollektorfläche
- Eintrittstemperaturen: mindestens 4, gleichmäßig über den gesamten Temperaturbereich verteilt

- Zur Bestimmung des Spitzenwirkungsgrads η_0 ist eine Eintrittstemperatur zu wählen, die im Bereich von ± 3 K der Umgebungstemperatur liegt
- Direktstrahlung ≥ 700 W/m² in Kollektorebene
- Diffusstrahlung ≤ 30 %
- Einfallswinkel der direkten Bestrahlungsstärke: senkrecht
- Windgeschwindigkeit (3 ± 1) m/s

Weitere Bedingungen für die experimentelle Prüfung, wie die, dass der Kollektor während der Prüfung nicht verschattet werden darf, oder keine Einstrahlung durch Reflexion von Gebäuden auf den Kollektor treffen darf sind in der Simulation bereits gegeben, bzw. müssten explizit implementiert werden. Die Standardrandbedingungen für die Simulationen zeigt Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Standardrandbedingungen zur Identifikation der charakteristischen Kollektorkennwerte $\eta_{0,hem}$, a_1 und a_2

Standardrandbedingungen			
G_b	850	W/m ²	Direktstrahlung
G_d	150	W/m ²	Diffusstrahlung
ϑ_{amb}	20	°C	Umgebungstemperatur
ϑ_{sky}	10	°C	Himmelstemperatur
ϑ_{ein}	20, 45, 70, 95	°C	Eintrittstemperatur
u	3	m/s	Windgeschwindigkeit
\dot{m}	0,02	kg/(s m ²)	Massenstrom
β	45	°	Anstellwinkel

Für jede Kollektoreintrittstemperatur wird die Kollektoraustrittstemperatur berechnet. Die Auswertung erfolgt in Excel. Die charakteristischen Kollektorkennwerte $\eta_{0,hem}$, a_1 und a_2 werden durch eine Regression bestimmt. Hierzu wird zunächst eine Tabelle analog Tabelle 5-2 aufgebaut (Beispiel 1). Die spezifische Wärmekapazität (c_p) wird nach (DIN EN ISO 9806) in Abhängigkeit der mittleren Fluidtemperatur ($\vartheta_{m,fluid}$) berechnet. Die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ ist die Differenz von mittlerer Fluidtemperatur und Umgebungstemperatur (ϑ_{amb}). Der Wirkungsgrad η wird nach Gleichung (5-2) berechnet.

Tabelle 5-2: Aufbau der Auswertetabelle (Beispiel 1)

c_p	$G (=G_b+G_d)$	\dot{m}_{dot}	ϑ_{ein}	ϑ_{aus}	$\vartheta_{aus}-\vartheta_{ein}$	$\vartheta_{m,fluid}$	ϑ_{amb}	$\Delta\vartheta$	$\Delta\vartheta/G$	$\Delta\vartheta^2/G$	η
4,1821	1000	0,05	20	28,02	8,02	24,01	20	4,01	0,004	0,0161	0,6681
4,1797	1000	0,05	45	51,95	6,95	48,48	20	28,48	0,0285	0,8111	0,5787
4,1908	1000	0,05	70	75,72	5,72	72,86	20	52,86	0,0529	2,7942	0,4775
4,2124	1000	0,05	95	99,44	4,44	97,22	20	77,22	0,0772	5,9629	0,3726
Eingangsparameter Simulation											
Ausgangsparameter Simulation											
Aus Ein- und Ausgangsparametern berechnet											

$$\frac{\eta}{A_b \cdot G_{hem}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{aus} - \vartheta_{ein}) \quad (5-2)$$

Anschließend wird die Regression durchgeführt.

Y-Eingabebereich: η

X-Eingabebereich: $\Delta\vartheta/G$ und $\Delta\vartheta^2/G$

Das Ergebnis der Regression aus Beispiel 1 zeigt Abbildung 5-1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	AUSGABE: ZUSAMMENFASSUNG								
2									
3	<i>Regressions-Statistik</i>								
4	Multipler Korrelationskoeffizient	0,999968481							
5	Bestimmtheitsmaß	0,999936962							
6	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,999810886							
7	Standardfehler	0,001754929							
8	Beobachtungen	4							
9									
10	ANOVA								
11		<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>	<i>Prüfgröße (F)</i>	<i>F krit</i>			
12	Regression	2	0,0489	0,0244	7931,2310	0,0079			
13	Residue	1	0,0000	0,0000					
14	Gesamt	3	0,0489						
15									
16		<i>Koeffizienten</i>	<i>Standardfehler</i>	<i>t-Statistik</i>	<i>P-Wert</i>	<i>Untere 95%</i>	<i>Obere 95%</i>	<i>Untere 95,0%</i>	<i>Obere 95,0%</i>
17	Schnittpunkt	0,683	0,0021	331,2979	0,0019	0,6564	0,7088	0,6564	0,7088
18	X Variable 1	-3,495	0,1235	-28,2961	0,0225	-5,0645	-1,9256	-5,0645	-1,9256
19	X Variable 2	-0,007	0,0015	-4,6393	0,1352	-0,0255	0,0118	-0,0255	0,0118

Abbildung 5-1: Ergebnis der Regression (Beispiel 1)

Die charakteristischen Kollektorkennwerte sind dann, vgl. Tabelle 5-3:

Tabelle 5-3: Charakteristische Kollektorkennwerte aus Regression (Beispiel 1)

$\eta_{0,hem}$	0,683 [-]	Schnittpunkt
α_1	3,495 [W/(m ² K)]	(X Variable 1)
α_2	0,007 [W/(m ² K ²)]	(X Variable 2)

Mit Hilfe der charakteristischen Kollektorkennwerte wird schließlich die Wirkungsgradkennlinie erstellt, vgl. Abbildung 5-2.

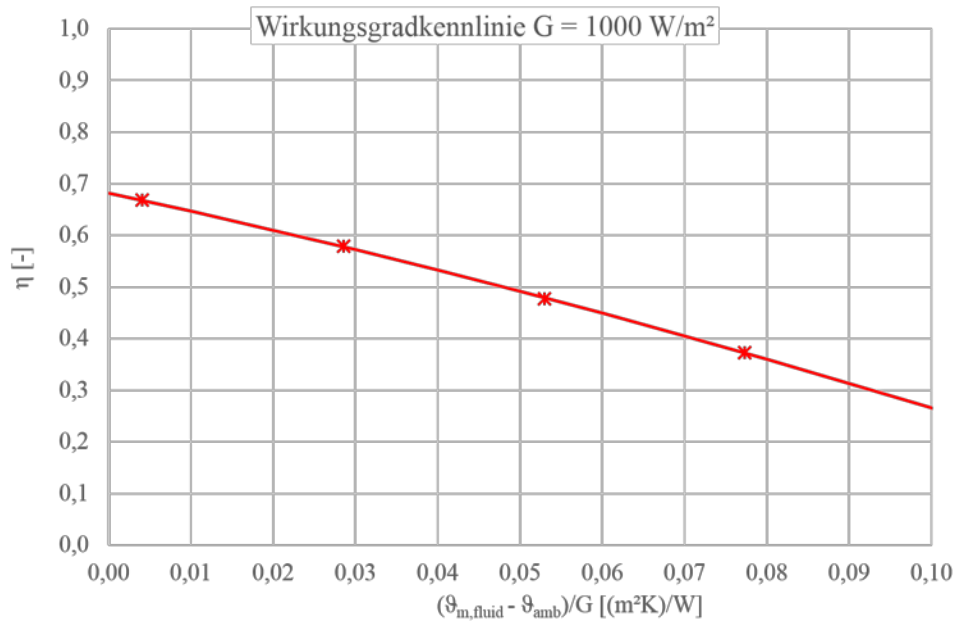


Abbildung 5-2: Wirkungsgradkennlinie (Beispiel 1)

Zur Berechnung des Kollektorjahresertrags ist außerdem der Einfallswinkelkorrekturfaktor der direkten Bestrahlungsstärke K_b notwendig. Dieser setzt sich aus dem Einfallswinkelkorrekturfaktor des Gehäuses, der Absorberbeschichtung sowie der Abdeckung zusammen, Gleichung (5-3).

$$K_b(\theta) = K_{b,Gehäuse}(\theta) \cdot K_{b,Absorberbeschichtung}(\theta) \cdot K_{b,Abdeckung}(\theta) \quad (5-3)$$

Mit:

K_b	-	Einfallswinkelkorrekturfaktor der direkten Bestrahlungsstärke
θ	°	Einfallswinkel
$K_{b,Gehäuse}$	-	Einfallswinkelkorrekturfaktor des Gehäuses
$K_{b,Absorberbeschichtung}$	-	Einfallswinkelkorrekturfaktor der Absorberbeschichtung
$K_{b,Abdeckung}$	-	Einfallswinkelkorrekturfaktor der Abdeckung

Die Einfallswinkelkorrekturfaktoren für die Absorberbeschichtung und die Abdeckung sind Materialkennwerte. Diese können gemessen, oder für typische Glasabdeckungen und Absorberbeschichtungen nach (Duffie und Beckman 2013) modelliert werden. Ein beispielhafter Verlauf zeigt Abbildung 5-3.

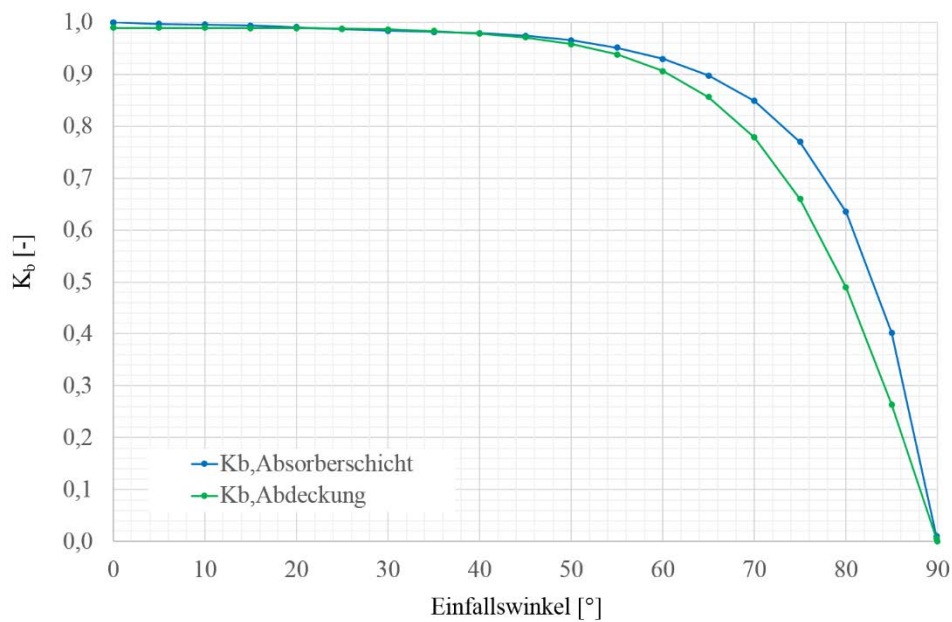


Abbildung 5-3: Beispielhafter Verlauf der Einfallswinkelkorrekturfaktoren für einer Absorberbeschichtung und einer Glasabdeckung

Der Einfallswinkelkorrekturfaktor des Gehäuses ist von der Geometrie des Kollektors abhängig und wird simulativ bestimmt. Hierzu wird der Einfallswinkel der direkten Bestrahlungsstärke variiert. Zusätzlich zum Einfallswinkel $\theta = 0^\circ$ (senkrechter Einfallswinkel) wird die Kollektoraustrittstemperatur bei $\theta = 20^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ und 70° berechnet. Die Kollektoreintrittstemperatur bei dieser Variation bleibt konstant bei $\vartheta_{in} = 20^\circ\text{C}$. Der Einfallswinkelkorrekturfaktor des Gehäuses in Abhängigkeit des Einfallswinkels wird dann nach Gleichung (5-4) berechnet. Tabelle 5-4 zeigt die Einfallswinkelkorrekturfaktoren in Abhängigkeit des Einfallswinkels von Beispiel 1.

$$K_{b,Gehäuse}(\theta) = \frac{\eta(\theta = 0^\circ)}{\eta(\theta)} \quad (5-4)$$

Tabelle 5-4: Einfallswinkelkorrekturfaktoren in Abhängigkeit des Einfallswinkels (Beispiel 1)

θ [°]	20	40	50	60	70
$K_{b,Gehäuse}(\theta)$	1,00	0,99	0,97	0,95	0,91
$K_{b,Absorberbeschichtung}(\theta)$	0,99	0,98	0,97	0,93	0,85
$K_{b,Abdeckung}(\theta)$	0,99	0,98	0,96	0,91	0,78
$K_b(\theta)$	0,98	0,95	0,90	0,80	0,60

Mit den nun virtuell erzeugten charakteristischen Kollektorkennwerten $\eta_{0,hem}$, a_1 , a_2 und $K_b(\theta)$ stehen alle, für die Berechnung des Kollektorjahresertrags benötigten Kennwerte zur Verfügung. Die Berechnung des Kollektorjahresertrags erfolgt mit dem Excel basierten Berechnungsprogramm (ScenoCalc). Abbildung 5-4 zeigt die Eingabemaske von (ScenoCalc).

Steady state - outdoor								
$\eta_{0,hem}$	a_1	a_2						
-	W/(m ² K)	W/(m ² K ²)						
0.683	3.495	0.007						

Quasi dynamic - outdoor										
No	Angle	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$K_{GT, coll}$			0.98		0.95	0.90	0.80	0.60		0.00
$K_{GT, coll}$			0.98		0.95	0.90	0.80	0.60		0.00

Abbildung 5-4: Auszug aus (ScenoCalc), Eingabemaske

Abbildung 5-5 zeigt die Ausgabemaske von (ScenoCalc). (ScenoCalc) berechnet den Kollektorjahresertrag für standardisierte Umgebungs- und Betriebsbedingungen für die Standorte Athen, Davos, Stockholm und Würzburg.

Collector name	θ_m	Athens			Davos			Stockholm			Würzburg		
		25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C	25°C	50°C	75°C
Beispiel 1		2,597	1,801	1,165	1,949	1,331	844	1,431	920	560	1,555	987	591

Abbildung 5-5: Auszug aus (ScenoCalc), Ausgabemaske

5.2 Validierung des virtuellen Kollektorprüfverfahrens

Zur Validierung des entwickelten Verfahrens wurde eine experimentelle Leistungsprüfung nach DIN EN ISO 9806 an einem Kollektor vom Typ K1 durchgeführt. Außerdem wurde eine virtuelle Leistungsprüfung mit dem CFD Modell des K1 Kollektors durchgeführt. Aus den Ergebnissen beider Prüfungen wurden die charakteristischen Kollektorkennwerte identifiziert, Tabelle 5-5.

Tabelle 5-5: Charakteristische Kollektorkennwerte $\eta_{0,hem}$, a_1 und a_2 , Typ K1

Messung		Simulation	
$\eta_{0,hem}$	0,660 [-]	$\eta_{0,hem}$	0,649 [-]
a_1	3,725 [W/(m ² K)]	a_1	3,194 [W/(m ² K)]
a_2	0,009 [W/(m ² K ²)]	a_2	0,010 [W/(m ² K ²)]

Grafisch aufbereitet zeigt Abbildung 5-6 die Wirkungsgradkennlinien. Zwischen zwei experimentellen Prüfungen an Kollektoren vom gleichen Typ wird eine Abweichung von $\pm 2\%$ -Punkten als akzeptabel betrachtet. Der Bereich der messtechnisch akzeptablen Abweichung ist ebenfalls in Abbildung 5-6 dargestellt. Die Wirkungsgradkennlinie aus den virtuell bestimmten Kollektorkennwerten zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Wirkungsgradkennlinie mit Kennwerten aus der experimentellen Leistungsprüfung.

Tabelle 5-6 zeigt die Einfallswinkelkorrekturfaktoren in Abhängigkeit des Einstrahlungswinkels für den Kollektor vom Typ K1. Die Einfallswinkelkorrekturfaktoren für die Absorberschichtung ($K_{b,Schicht}(\theta)$) und die Abdeckung ($K_{b,Glas}(\theta)$) wurden modelliert. Der Einfallswinkelkorrekturfaktor des Gehäuses ($K_{b,Gehäuse}(\theta)$) wurde aus Simulationen bestimmt. Der virtuell bestimmte Einfallswinkelkorrekturfaktor des Gesamtkollektors $K_{b,Simulation}(\theta)$ ist das Produkt der drei Einzelfaktoren. $K_{b,Messung}(\theta)$ ist der aus der experimentellen Leistungsprüfung identifizierte Einfallswinkelkorrekturfaktor.

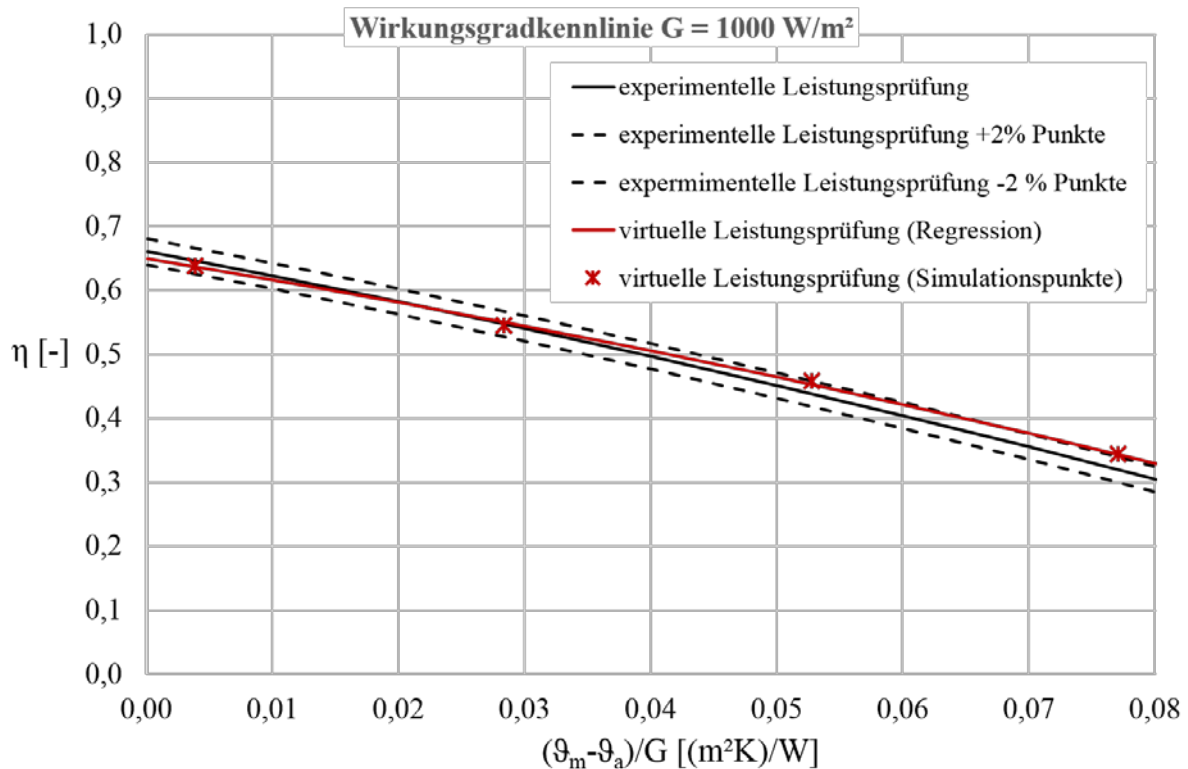


Abbildung 5-6: Wirkungsgradkennlinien K1, experimentell und virtuell

Tabelle 5-6: Einfallswinkelkorrekturfaktoren K1

Einfallswinkel θ [°] ISO 9806	$K_{b,\text{Gehäuse}}(\theta)$	$K_{b,\text{Schicht}}(\theta)$	$K_{b,\text{Glas}}(\theta)$	$K_b(\theta)_{\text{Simulation}}$	$K_b(\theta)_{\text{Messung}}$
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,00	0,99	0,99	0,98	0,99
40	1,00	0,98	0,98	0,96	0,98
50	1,00	0,97	0,96	0,93	0,95
60	0,99	0,93	0,91	0,84	0,87
70	0,99	0,85	0,78	0,66	0,64

Die Tabellen Tabelle 5-7 und Tabelle 5-8 zeigen die mit den Kollektorkennwerten (Tabelle 5-5, Tabelle 5-6) berechneten Kollektorjahreserträge für die Standorte Athen, Davos, Stockholm und Würzburg. Die Kollektorjahreserträge wurden sowohl mit den Kollektorkennwerten berechnet die aus der experimentellen wie auch aus der virtuellen Prüfung identifiziert wurden. Es wurde eine gute bis sehr gute Übereinstimmung erzielt.

Tabelle 5-7: Kollektorjahreserträge für die Standorte Athen und Davos, K1

-	Athen			Davos		
	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Mittlere Fluidtemperatur	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Exp. Leistungsprüfung [kWh]	2210	1494	918	1629	1070	631
Virt. Leistungsprüfung [kWh]	2101	1467	938	1583	1076	664
Differenz [kWh]	109	27	-20	46	-6	-33
Abweichung [%]	4,9 %	1,8 %	-2,2 %	2,8 %	-0,6 %	-5,2 %

Tabelle 5-8: Kollektorjahreserträge für die Standorte Stockholm und Würzburg, K1

-	Stockholm			Würzburg		
	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Mittlere Fluidtemperatur	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Exp. Leistungsprüfung [kWh]	1203	744	423	1318	806	450
Virt. Leistungsprüfung [kWh]	1163	747	445	1265	804	471
Differenz [kWh]	40	-3	-22	53	2	-21
Abweichung [%]	3,3 %	-0,4 %	-5,2 %	4,0 %	0,2 %	-4,7 %

Analog zur Validierung der Wirkungsgradkennlinie und des Kollektorjahresertrags am Kollektor vom Typ K1 wurde die Validierung am Kollektor vom Typ K2 vorgenommen. Die charakteristischen Kollektorkennwerte zeigt Tabelle 5-9. Die grafische Ausbereitung der Wirkungsgradkennlinien ist in Abbildung 5-7 dargestellt.

Tabelle 5-9: Charakteristische Kollektorkennwerte $\eta_{0,hem}$, a_1 und a_2 , K2

Messung		Simulation	
$\eta_{0,hem}$	0,741 [-]	$\eta_{0,hem}$	0,712 [-]
a_1	3,331 [W/(m ² K)]	a_1	2,963 [W/(m ² K)]
a_2	0,015 [W/(m ² K ²)]	a_2	0,013 [W/(m ² K ²)]

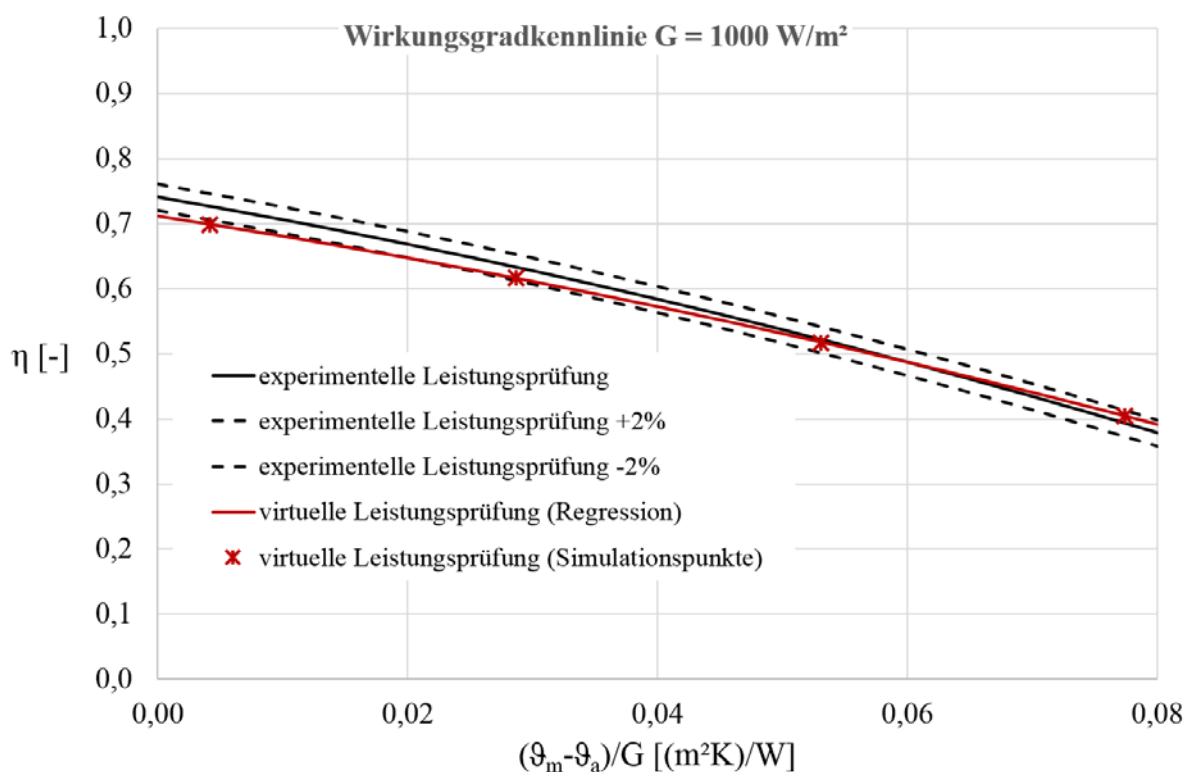


Abbildung 5-7: Wirkungsgradkennlinien K2, experimentell und virtuell

Die Einfallswinkelkorrekturfaktoren und schließlich die Kollektorjahreserträge zeigen die Tabellen Tabelle 5-10, Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12.

Tabelle 5-10: Einfallswinkelkorrekturfaktoren K2

Einfallswinkel $\theta [^\circ]$ ISO 9806	$K_{b,Gehäuse}(\theta)$	$K_{b,Schicht}(\theta)$	$K_{b,Glas}(\theta)$	$K_b(\theta)_{Simulation}$	$K_b(\theta)_{Messung}$
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,00	0,99	0,99	0,98	0,99
40	1,00	0,98	0,98	0,96	0,98
50	1,00	0,97	0,96	0,93	0,96
60	0,99	0,93	0,91	0,84	0,86
70	0,97	0,85	0,78	0,64	0,67

Tabelle 5-11: Kollektorjahreserträge für die Standorte Athen und Davos, K2

-	Athen			Davos		
	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Mittlere Fluidtemperatur	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Exp. Leistungsprüfung [kWh]	2983	2137	1387	2283	1579	982
Virt. Leistungsprüfung [kWh]	2916	2075	1334	2224	1528	941
Differenz [kWh]	67	62	53	59	51	41
Abweichung [%]	2,2%	2,9%	3,8%	2,6%	3,2%	4,2%

Tabelle 5-12: Kollektorjahreserträge für die Standorte Stockholm und Würzburg, K2

-	Stockholm			Würzburg		
	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Mittlere Fluidtemperatur	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Exp. Leistungsprüfung [kWh]	1672	1097	658	1818	1184	700
Virt. Leistungsprüfung [kWh]	1631	1063	633	1772	1145	671
Differenz [kWh]	41	34	25	46	39	29
Abweichung [%]	2,5%	3,1%	3,8%	2,5%	3,3%	4,1%

Auch für den zweiten Kollektor wurde eine gute Übereinstimmung von Wirkungsgradkennlinien und Kollektorjahresertrag aus experimentell und virtuell identifizierten Kollektorwerten erreicht.

Das entwickelte Verfahren zur virtuellen Prüfung von Flachkollektoren wurde an zwei Serienprodukten hinsichtlich Bauteiltemperaturen (Kapitel 4), Wirkungsgradkennlinie und Kollektorjahresertrag validiert. Die Untersuchungen zeigen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

6. Messtechnische Untersuchung der Kollektoren und Komponenten (AP 5)

Die Validierung der in AP 4 auf Basis von CFD-Simulationen ermittelten charakteristischen Kollektorkennwerte und der in AP 3 ermittelten Bauteiltemperaturen erfolgt durch messtechnische Untersuchungen der Kollektoren und Komponenten. An jeweils einem Kollektor je Typ werden die Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten untersucht. Jeweils ein Kollektor je Typ wird mit diversen Temperatursensoren ausgestattet und exponiert sowie im dynamischen Sonnensimulator unter stationären Bedingungen vermessen. Jeweils zwei weitere Kollektoren je Typ werden mit nur einem Temperatursensor auf $\frac{3}{4}$ der Höhe und mittig bezüglich der Breite ausgestattet. Jeweils einer dieser Kollektoren je Typ wird exponiert, am jeweils zweiten der Kollektoren wird eine Leistungsprüfung nach DIN EN ISO 9806 durchgeführt.

6.1 Beschreibung der Kollektoren

Im Projekt wurden modifizierte Serienprodukte K1 und K2 des Projektpartners Bosch Solarthermie GmbH verwendet.

Der Kollektor vom Typ K1 ist ein Flachkollektor mit einer Bruttofläche von 2,1 m². Er hat einen Harfenabsorber mit acht Steigrohren. Die Glasabdeckung ist von einer EPDM Dichtung umgeben. Mit Hilfe einer Klemmschiene werden Abdeckung und Dichtung auf den Rahmen aus Aluminium geklemmt. Eine ebenfalls aus Aluminium bestehende Rückwand ist eingeklebt. Der Aluminiumabsorber ist selektiv beschichtet. Die Kupferverrohrung ist mit Hilfe einer Ultraschallschweißung am Absorber befestigt. Abbildung 6-1 zeigt einen Kollektor vom Typ K1.

Der Kollektor vom Typ K2 ist ein Flachkollektor mit einer Bruttofläche von 2,55 m². Das Absorberblech ist selektiv beschichtet und aus Aluminium. Die Verrohrung ist ein Doppelmäander aus Kupfer. Die Verbindung zwischen Absorberblech und Verrohrung wird durch eine Omegablech-Ultraschallschweißung realisiert. Die Kollektorwanne ist aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Die Glasabdeckung ist mit einer Silikonfuge mit der Kollektorwanne verklebt. Abbildung 6-2 zeigt einen Kollektor vom Typ K2.



Abbildung 6-1: Kollektor vom Typ K1



Abbildung 6-2: Kollektor vom Typ K2

6.2 Ergebnisse der Leistungsprüfungen

Die Validierung der CFD Modelle wurde hinsichtlich der Wirkungsgradkennlinie, des Kollektorjahresertrags und der Bauteiltemperaturen vorgenommen (Kapitel 5). Die zur Bestimmung der Wirkungsgradkennlinie und des Kollektorjahresertrags notwendigen Kollektorkennwerte wurden aus experimentellen Leistungsprüfungen identifiziert.

Am Kollektor vom Typ K1 wurde die Wirkungsgradkennlinie unter stationären Bedingungen im dynamischen Sonnensimulator (Indoor) gemessen. Außerdem wurde eine quasidynamische Leistungsprüfung im Außentest (Outdoor) inklusive der Bestimmung der Einfallswinkelkorrektur durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 6-1.

Tabelle 6-1: Kollektorkennwerte aus experimentellen Prüfungen, Kollektor Typ K1

Messung Indoor		Messung Outdoor	
$\eta_{0,hem}$	0,661 [-]	$\eta_{0,hem}$	0,660 [-]
a_1	3,795 [W/(m ² K)]	a_1	3,725 [W/(m ² K)]
a_2	0,010 [W/(m ² K ²)]	a_2	0,009 [W/(m ² K ²)]
$K_b(20^\circ)$	-	$K_b(20^\circ)$	0,99 [-]
$K_b(40^\circ)$	-	$K_b(40^\circ)$	0,98 [-]
$K_b(50^\circ)$	-	$K_b(50^\circ)$	0,95 [-]
$K_b(60^\circ)$	-	$K_b(60^\circ)$	0,87 [-]
$K_b(70^\circ)$	-	$K_b(70^\circ)$	0,64 [-]

Abbildung 6-3 zeigt die mit den charakteristischen Kollektorkennwerten aus Tabelle 6-1 erstellten Wirkungsgradkennlinien. Die Wirkungsgradkennlinien sind nahezu deckungsgleich.

Zur Berechnung des Kollektorjahresertrags ist zusätzlich zu den charakteristischen Kollektorkennwerten $\eta_{0,hem}$, a_1 , a_2 der Einfallswinkelkorrekturfaktor $K_b(\theta)$ notwendig. Der Kollektorjahresertrag wurde aus den Kennwerten der Outdoor Messung berechnet. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 6-2.

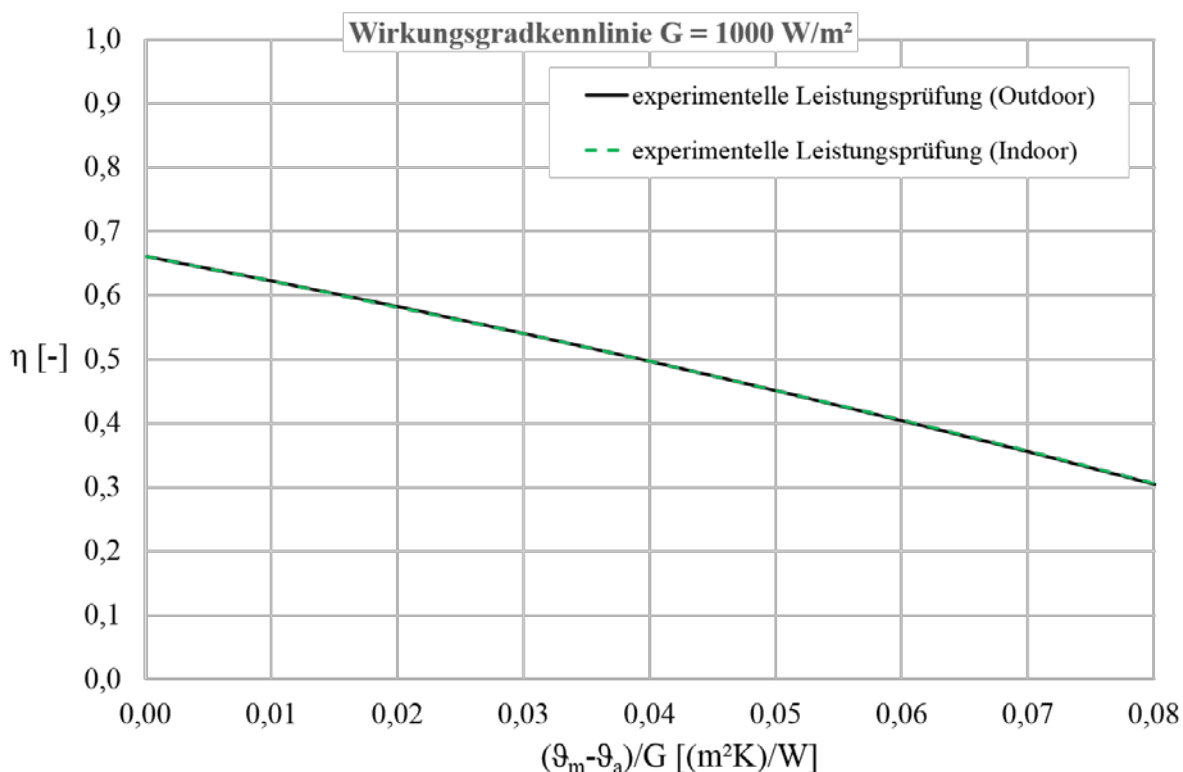


Abbildung 6-3: Wirkungsgradkennlinien aus experimentellen Prüfungen, Kollektor K1

Tabelle 6-2: Kollektorjahreserträge, Kollektor Typ K1

-	Athen			Davos		
Mittlere Fluidtemperatur	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Exp. Leistungsprüfung [kWh]	2210	1494	918	1629	1070	631
-	Stockholm			Würzburg		
Mittlere Fluidtemperatur	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Exp. Leistungsprüfung [kWh]	1203	744	423	1318	806	450

Am Kollektor vom Typ K2 wurde die Wirkungsgradkennlinie unter stationären Bedingungen im dynamischen Sonnensimulator (Indoor) gemessen. Außerdem wurde der Einfallswinkelkorrekturfaktor im Außentest (Outdoor) bestimmt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 6-3. Die daraus berechneten Kollektorjahrerträge zeigt Tabelle 6-4.

Tabelle 6-3: Kollektorkennwerte aus experimentellen Prüfungen, Kollektor Typ K2

Messung Indoor		Messung Outdoor	
$\eta_{0,hem}$	0,741 [-]	$\eta_{0,hem}$	-
a_1	3,331 [W/(m ² K)]	a_1	-
a_2	0,015 [W/(m ² K ²)]	a_2	-
$K_b(20^\circ)$	-	$K_b(20^\circ)$	0,99 [-]
$K_b(40^\circ)$	-	$K_b(40^\circ)$	0,98 [-]
$K_b(50^\circ)$	-	$K_b(50^\circ)$	0,96 [-]
$K_b(60^\circ)$	-	$K_b(60^\circ)$	0,86 [-]
$K_b(70^\circ)$	-	$K_b(70^\circ)$	0,67 [-]

Tabelle 6-4: Kollektorjahreserträge, Kollektor Typ K2

-	Athen			Davos		
Mittlere Fluidtemperatur	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Exp. Leistungsprüfung [kWh]	2983	2137	1387	2283	1579	982
-	Stockholm			Würzburg		
Mittlere Fluidtemperatur	25 °C	50 °C	75 °C	25 °C	50 °C	75 °C
Exp. Leistungsprüfung [kWh]	1672	1097	658	1818	1184	700

6.3 Untersuchung der Homogenität der Durchströmung

Mitentscheidend für einen guten Wirkungsgrad eines Sonnenkollektors ist die gleichmäßige Wärmeabfuhr vom Absorber an das Fluid. Da die Absorberfläche homogen von der Sonne bestrahlt wird, müssen auch die Absorberrohre gleichmäßig verteilt und durchströmt werden. Bei Kollektoren mit Harfenabsorbern wird dies durch eine Durchströmung nach Tichelmann begünstigt. Fertigungstoleranzen bei der Ausführung der Verbindungen zwischen Verteiler-/Sammlerrohr und Absorberrohren können in ungünstigen Fällen zu verringerten Teilmassenströmen in einzelnen Absorberrohren und sogar zu Rückströmungen führen. Messungen in Absorberrohren ohne Störung der Strömung wären technisch äußerst aufwändig und praktisch schwer umsetzbar. Deswegen wurde für die Untersuchung eine indirekte Methode mit Hilfe der Thermografie gewählt. Innerhalb des Projekts ist die Untersuchung der Homogenität der Durchströmung notwendig um überprüfen zu können ob sich die reale Strömungsverteilung von der Strömungsverteilung in der CFD-Simulation unterscheidet.

Bei geringer erzwungener Konvektion, also niedrigen Luftgeschwindigkeiten im Raum, besteht der Wärmeverlust/-gewinn eines von der anderen Bauteilen thermisch entkoppelten Absorbers

überwiegend aus freier Konvektion und thermischer Strahlung (IR-C). Bei gleichmäßiger vertikaler Durchströmung der parallelen Absorberrohre, einem einheitlichen Emissionsgrad des Absorberbleches und der Absorberrohre werden sich entlang der Höhe des Absorbers gleichförmige Oberflächentemperaturverteilungen einstellen.

Untersucht wurde in wie weit die Kollektorverrohrung des Kollektors vom Typ K1, im Besonderen die 8 parallelen Absorberrohre, homogen durchströmt werden. Hierzu wurde der Absorber mitsamt der Verrohrung aus dem Kollektorgehäuse ausgebaut und die Rückseite, Aluminiumblech und Kupferrohre, mit mattschwarzer Farbe ($\varepsilon = 0.94$) lackiert. Für die Untersuchung wurde der Absorber von drei Seiten strahlungsgeschützt, vertikal aufgehängt und an ein thermostatisiertes Bad angeschlossen. Mit Hilfe des Bades wurden dem Absorber 2 schnelle Temperaturänderungen aufgeprägt. Hierfür wurde die Fluideintrittstemperatur sprunghaft verändert, bei der ersten Untersuchung von 15 °C auf 70 °C, bei der Zweiten von 30 °C auf 15 °C. Die zeitliche Veränderung der Oberflächentemperaturen auf der Rückseite des Absorbers wurde mit einer schnelle Folge von Thermografie-Aufnahmen dokumentiert.

Abbildung 6-4 zeigt den Untersuchungsaufbau mit der Thermografie-Kamera links, dem Auswerterechner rechts und dem aufgehängten, mattschwarz lackierten Absorber im Hintergrund. Der grüne Schlauch, unten links, speißt den Absorber mit temperiertem Fluid.



Abbildung 6-4: Untersuchungsaufbau mit der Thermografie-Kamera, dem Auswerterechner und dem mattschwarz lackierten Absorber

Der Absorber wurde bei beiden Untersuchungen von unten links nach oben rechts durchströmt. Um eine gute thermische Auflösung bei der Thermografie zu erzielen wurde nur eine Teilfläche

des Absorbers, die untere Hälfte, mit Verteilerrohr detailliert untersucht. Bei Aufnahmen mit höheren Temperaturunterschieden zeigt sich auf dem Absorberblech entlang des Verteilerrohres ein Streifen mit niedrigeren bzw. höheren Temperaturen im Vergleich zur Mitte des Absorberbleches. Aufgrund von vorangegangenen Untersuchungen am Kollektor vom Typ K1 und bedingt durch den Ausbau des Absorbers hatten sich die Schweißnähte zwischen Absorberrohren und Absorberblech cirka um 10 cm am Anfang und Ende gelöst. Somit besteht hier keine wärmeleitende Verbindung mehr. Dies hatte keine Auswirkung auf die Ergebnisse der Untersuchung.

Abbildung 6-5 bis Abbildung 6-7 sind Thermografien und zeigen die untere Hälfte des Absorbers vor, während und nach dem Temperatursprung von 15 °C auf 70 °C. Zunächst strömt Fluid mit 15 °C in das Verteilerrohr, dieses und die Absorberrohre werden somit in der Abbildung mit schwarzer Farbe dargestellt (vgl. Abbildung 6-5). Auf dem Absorberblech stellt sich eine Temperatur von 18 °C bis 20 °C ein. Um den Absorber herum ist der Strahlungsschutz zu sehen. Seine Temperatur beträgt etwa 27 °C und ist gleich der Umgebungslufttemperatur.

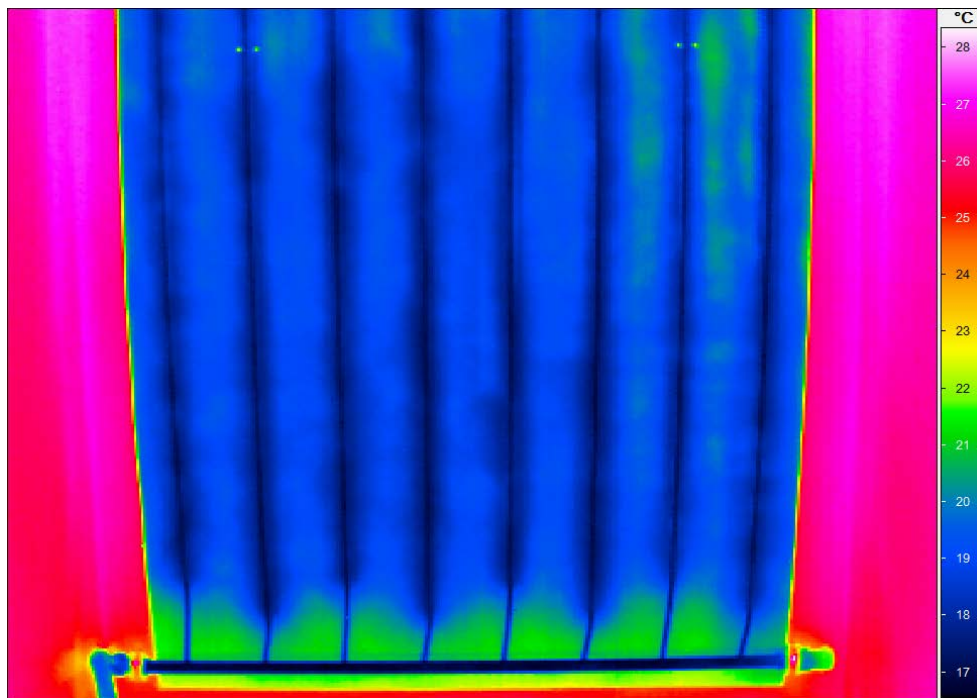


Abbildung 6-5: Thermografie der unteren Hälfte des Absorbers mit kaltem Fluid durchströmt.

Schon 15 Sekunden nach Änderung der Eintrittstemperatur auf 70 °C lässt sich sehr gut erkennen wie die Verrohrung durchströmt wird (vgl. Abbildung 6-6). Da die Sammlerrohre einen deutlich größeren Querschnitt als die Absorberrohre haben, kommt die Temperaturfront hier nicht so schnell voran. Die Absorberrohre werden eines nach dem anderen von links nach rechts von heißem Fluid gleichmäßig durchströmt, wie der Farbverlauf veranschaulicht.

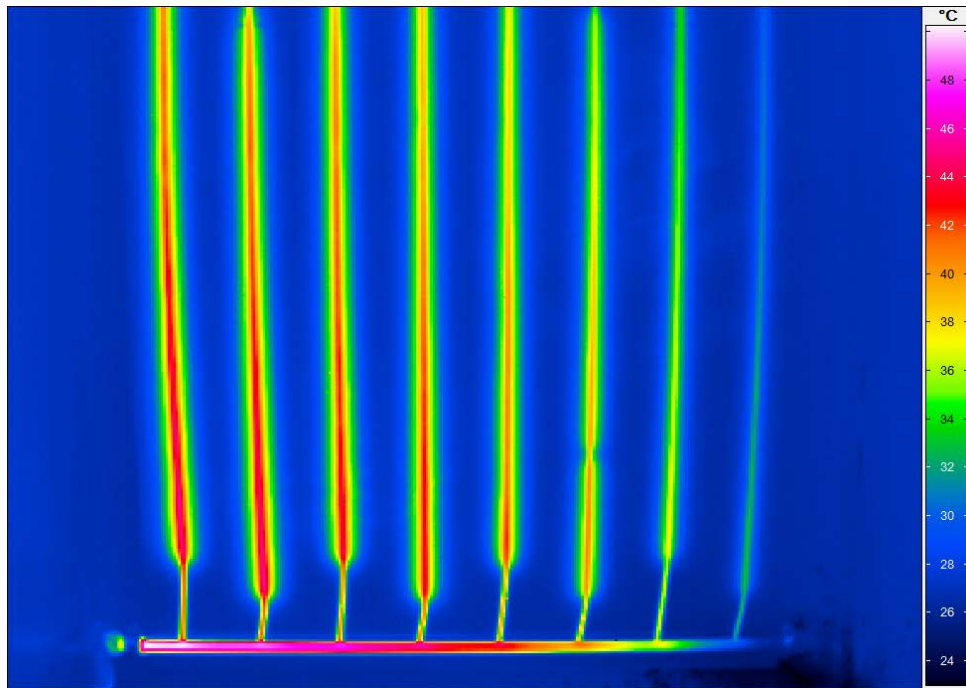


Abbildung 6-6: Thermografie 15 Sekunden nachdem heißes Fluid links unten in das Verteilerrohr strömt.

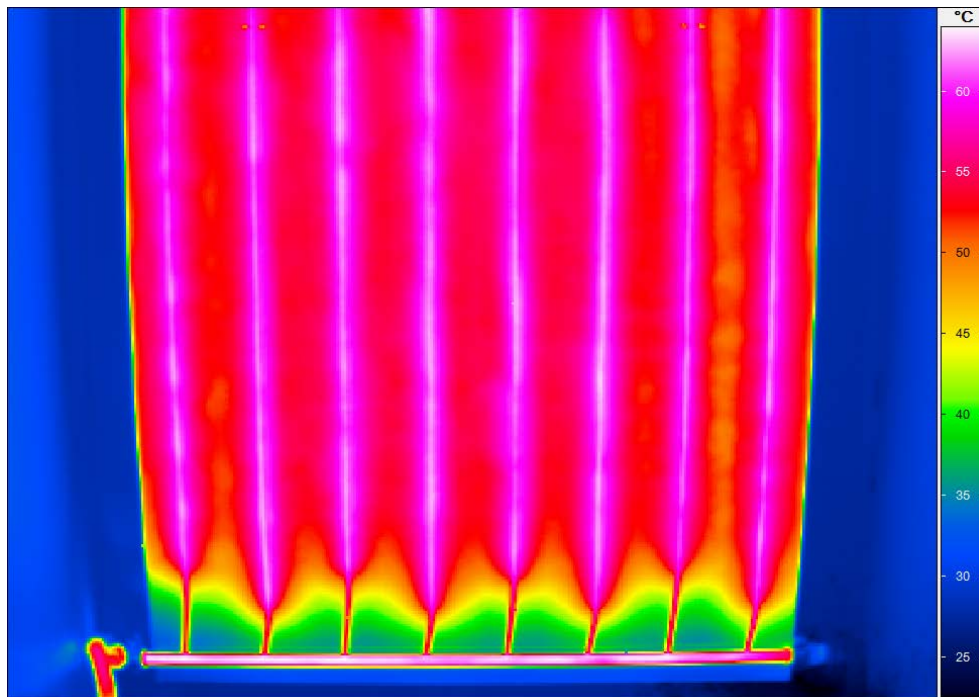


Abbildung 6-7: Thermografie 60 Sekunden nachdem heißes Fluid links unten in das Verteilerrohr strömt.

Weitere 45 Sekunden später ist das Absorberblech schon nahezu auf homogener Temperatur. Verteilerrohr und Absorberrohre sind in hellem Pink gut zu erkennen und weisen die höchsten

Temperaturen auf (vgl. Abbildung 6-7). An den vertikalen seitlichen Rändern des Absorberbleches ist die Oberflächentemperatur auf Grund von Randverlusten etwas geringer als in der Mitte.

Bei der zweiten Untersuchung wurde der Absorber abgekühlt. Abbildung 6-8 bis Abbildung 6-10 zeigen die untere Hälfte des Absorbers vor, während und nach dem Temperatursprung von 30 °C auf 15 °C. Zu Beginn war der Absorber sehr homogen etwas über Umgebungstemperatur erwärmt (vgl. Abbildung 6-8). Die Absorberrohre sind hier auf der Thermografie nicht zu erkennen.

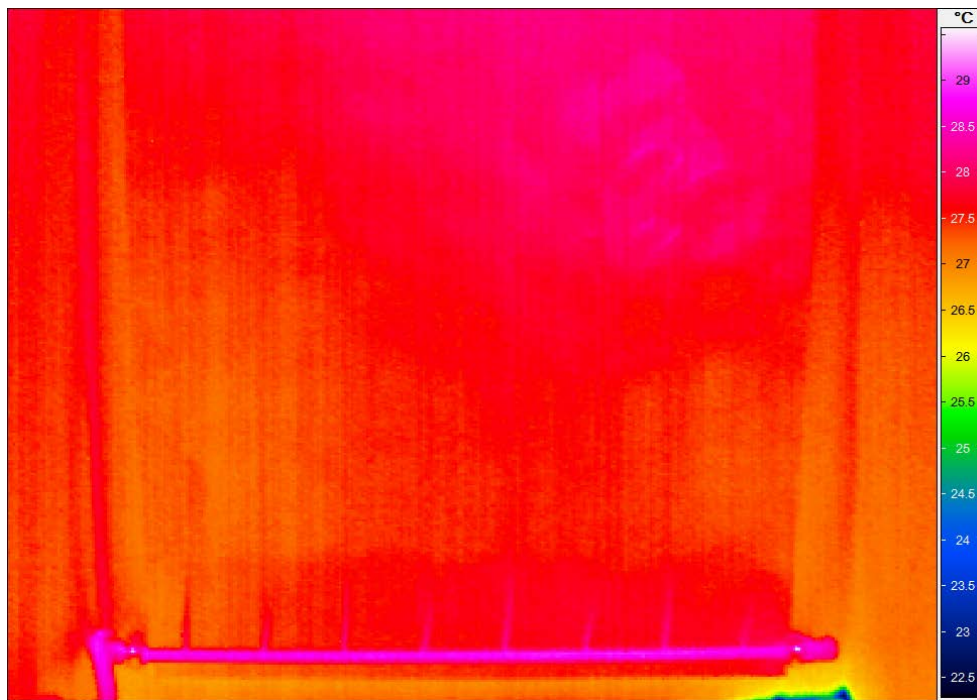


Abbildung 6-8: Thermografie der unteren Hälfte des Absorbers bei Raumtemperatur.

Nach Einströmen von kaltem Fluid zeigt sich die selbe Verteilung wie bei der ersten Untersuchung mit umgedrehter Farbzuoordnung (vgl. Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10).

Somit konnte gezeigt werden, dass der Absorber des Kollektors vom Typ K1 mit Harfe homogen und ähnlich der CFD Simulationsergebnisse durchströmt wird.

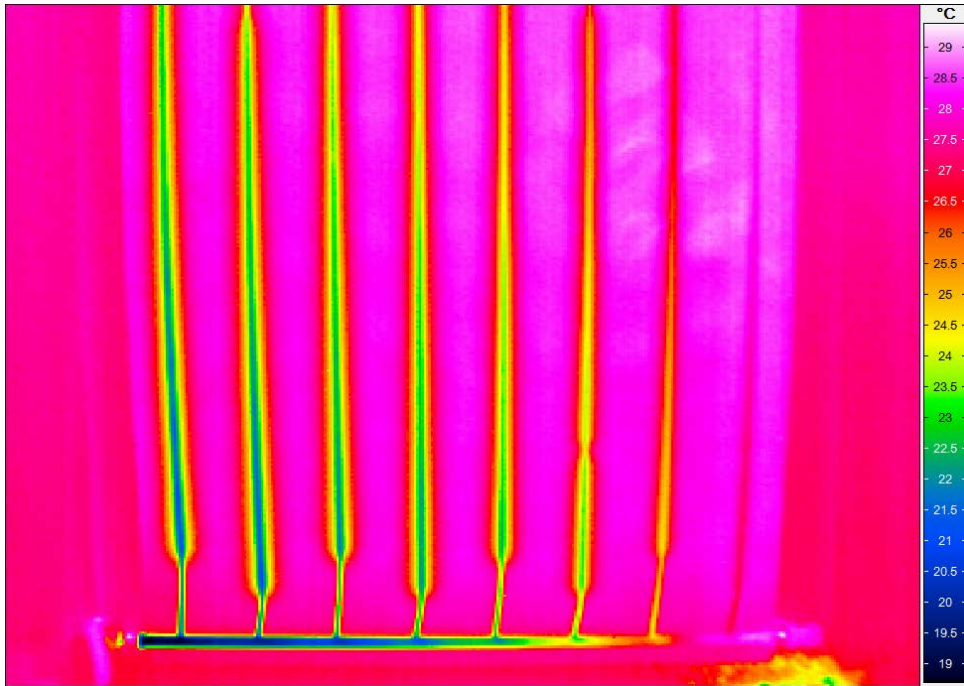


Abbildung 6-9: Thermografie 25 Sekunden nachdem kaltes Fluid links unten in das Verteilerrohr strömt.

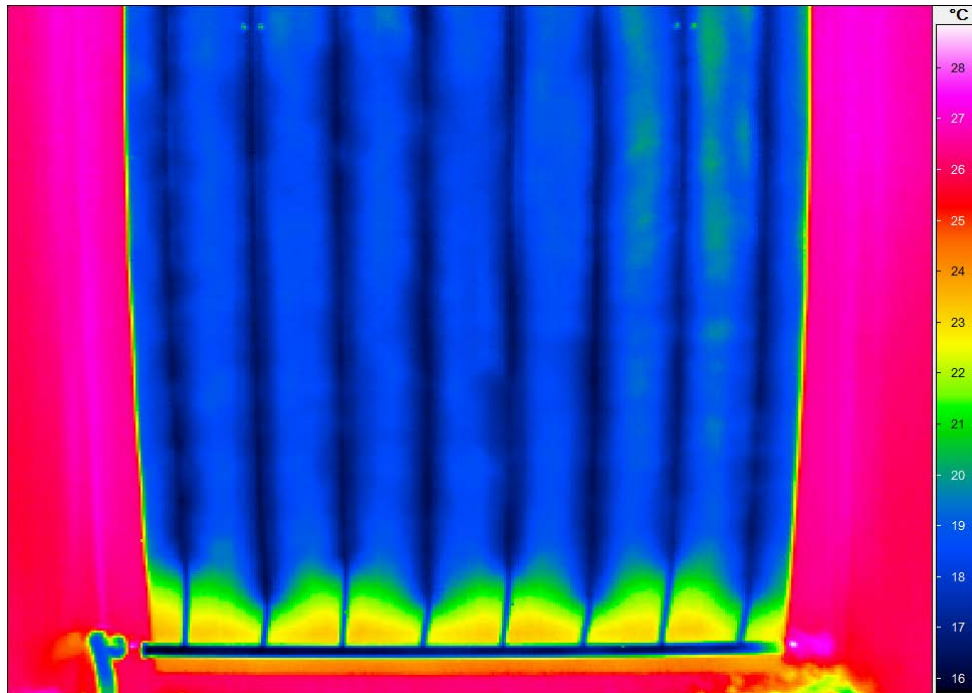


Abbildung 6-10: Thermografie 90 Sekunden nachdem kaltes Fluid links unten in das Verteilerrohr strömt.

6.4 Exposition der Kollektoren

Zur Validierung der CFD Modelle wurden Kollektoren vom Typ K1 und K2 mit Temperatursensoren ausgestattet. Die Positionen der Temperatursensoren wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner festgelegt. Es wurde an jeweils einem Kollektor je Typ ein Temperatursensor auf $\frac{3}{4}$ der Höhe und mittig bezüglich der Breite angebracht. Ein weiterer Kollektor vom Typ K1 wurde mit insgesamt 11 Temperatursensoren ausgestattet. Ein weiterer Kollektor vom Typ K2 wurde mit insgesamt 29 Temperatursensoren ausgestattet. Aufgrund ihrer geringen Kapazität wurden als Temperatursensoren Thermoelemente vom Typ K verwendet. Sie wurden mit Kupfer- bzw. Aluminiumklebeband an den Kollektorbauteilen befestigt.

Die Temperatursensoren am Kollektor vom Typ K1 wurden rückseitig auf dem Absorberblech, in der Kollektorwanne hin zur Wärmedämmung, sowie ein weiterer zwischen Glasscheibe und Dichtung angebracht. Die Positionen aller Temperatursensoren zeigt Abbildung 4-5. Die beispielhafte Montage der Temperatursensoren auf der Rückseite des Absorberblechs und die Kabeldurchführung durch den Rahmen am Kollektor vom Typ K1 zeigt Abbildung 6-11.

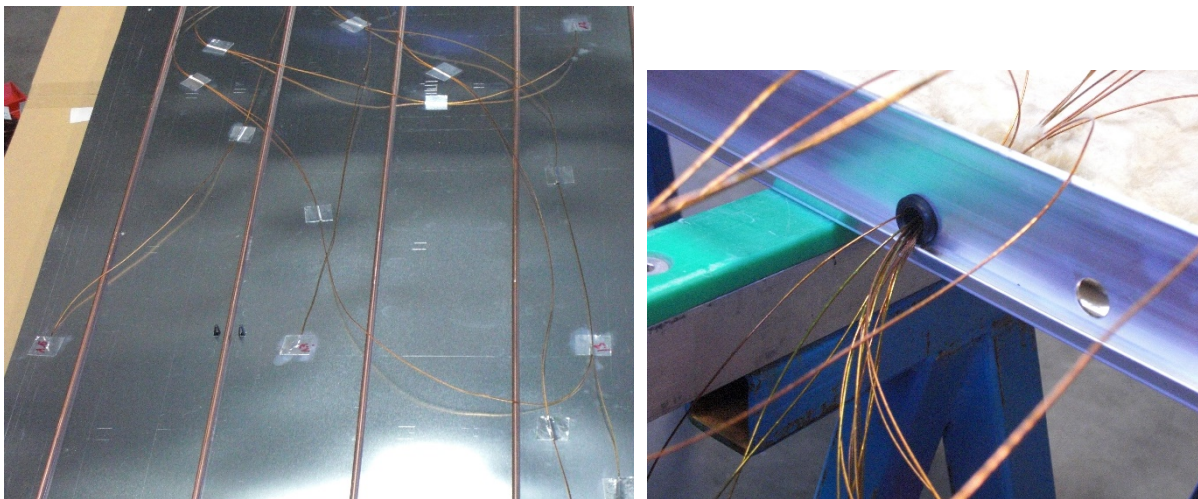


Abbildung 6-11: Montage der Temperatursensoren auf der Rückseite des Absorberblechs (links) und Kabeldurchführung durch den Rahmen (rechts) am Kollektor vom Typ K1

Am Kollektor vom Typ K2 wurden die Temperatursensoren ebenfalls rückseitig am Absorberblech, an der Mäanderverrohrung sowie am Omegablech und in der Kollektorwanne hin zur Wärmedämmung angebracht. Die Montage eines Temperatursensors an der Absorberverrohrung, dem Absorberblech und weiterer Temperatursensoren in der Kollektorwanne am Kollektor vom Typ K2 zeigt Abbildung 6-12. Die Positionen aller Temperatursensoren zeigt Abbildung 4-10.

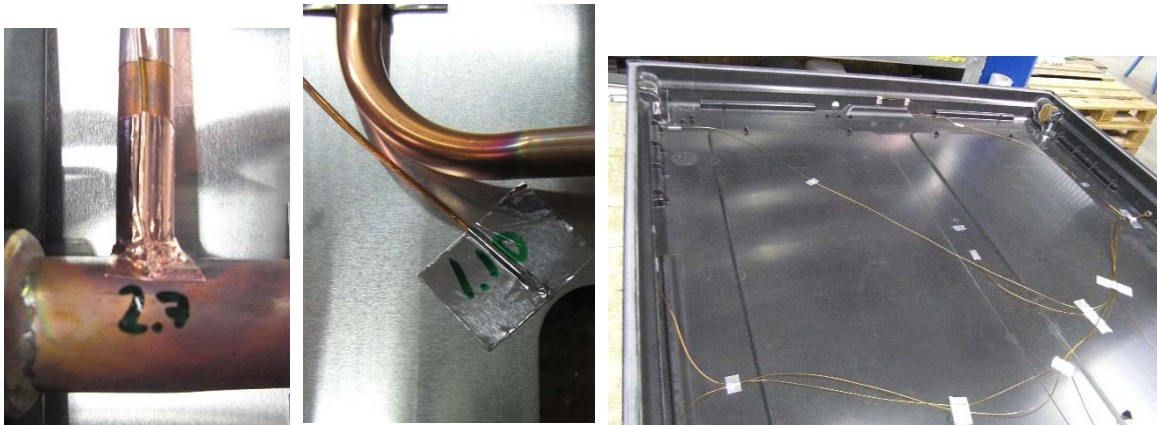


Abbildung 6-12: Montage eines Temperatursensors an der Absorbierverrohrung (links), dem Absorberblech (Mitte) und weiterer Temperatursensoren in der Kollektorwanne (rechts) am Kollektor vom Typ K2

Die Kollektoren wurden am IGTE in Stuttgart exponiert, vgl. Abbildung 6-13. Bei der Exposition wurden neben den Bauteiltemperaturen die direkte und hemisphärische Bestrahlungsstärke in Kollektorebene, die Umgebungstemperatur und die Windgeschwindigkeit gemessen.



Abbildung 6-13: Exposition der Kollektoren vom Typ K1 (Kollektoren 1 und 4 von links) und K2 (Kollektoren 2 und 3 von links)

Die Kollektoren vom Typ K1 wurden ab Mai 2017, die Kollektoren vom Typ K2 wurden ab September 2016 exponiert. Beendet wurde die Exposition im November 2017.

Abbildung 6-14 zeigt exemplarisch die Temperaturverläufe mittig über die Höhe am Absorber (Temperaturmessstellen 1.1 bis 1.5) vom Kollektor K1 sowie die Umgebungstemperatur auf der linken Achse, außerdem die hemisphärische Einstrahlung auf der rechten Achse am 19.06.2017. Die hemisphärische Einstrahlung weist den Verlauf einer Glockenkurve auf. Die Temperaturen am Absorber folgen der Glockenkurve auf verschiedenen Temperaturniveaus. Nachts, sowie in den frühen Morgen- und Abendstunden hat der Absorber eine konstante Temperatur. Trifft Strahlung auf den Kollektor bildet sich ein Temperaturgradient aus. Der Absorber wird nach oben hin wärmer, wobei das obere Ende, ähnlich dem unteren Ende, ein geringeres Temperaturniveau erreicht. An diesen Stellen ist der Einfluss der Randverluste dominant. An den Messstellen 1.2 und 1.3 ist die Temperatur auch bei Einstrahlung nahezu identisch. Das Temperaturniveau der Messstelle 1.4 liegt geringfügig tiefer.

Abbildung 6-15 zeigt exemplarisch die Temperaturmessstellen 3.1 bis 3.3 am Rahmen des Kollektors K1, ebenfalls am 19.06.2017. Auch die Rahmentemperaturen folgen grundsätzlich der Glockenkurve der hemisphärischen Einstrahlung. Faktoren wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung führen aber zu deutlichen Amplituden.

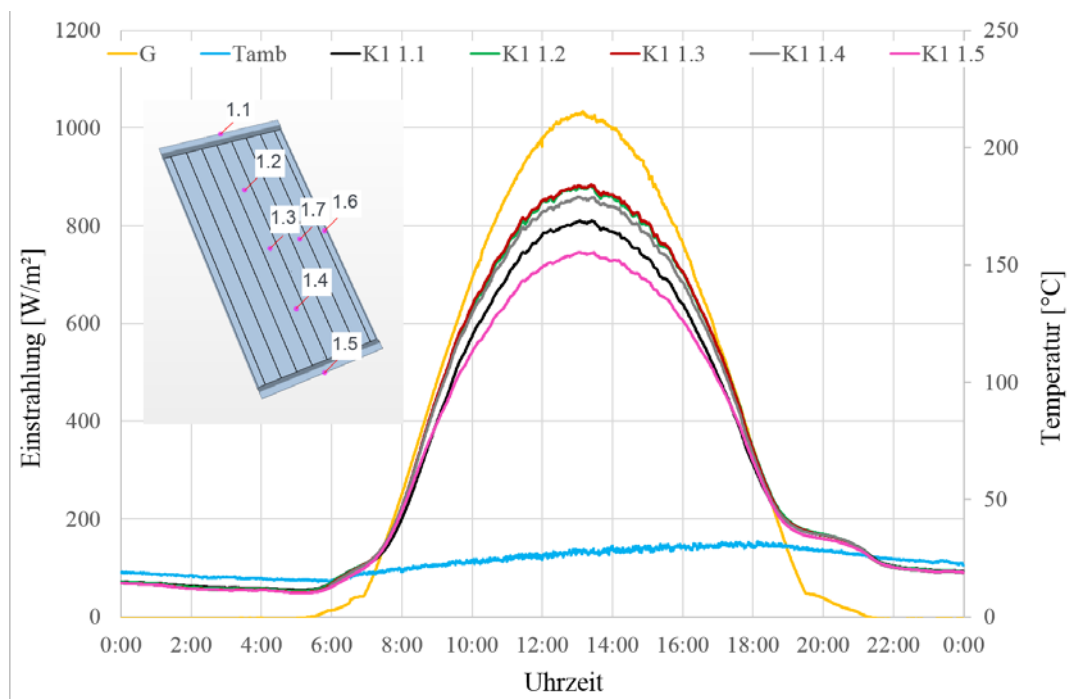


Abbildung 6-14: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung, der Umgebungstemperatur sowie der Temperatursensoren K1 1.1 - K1 1.5 am 19.06.2017, Kollektor Typ K1

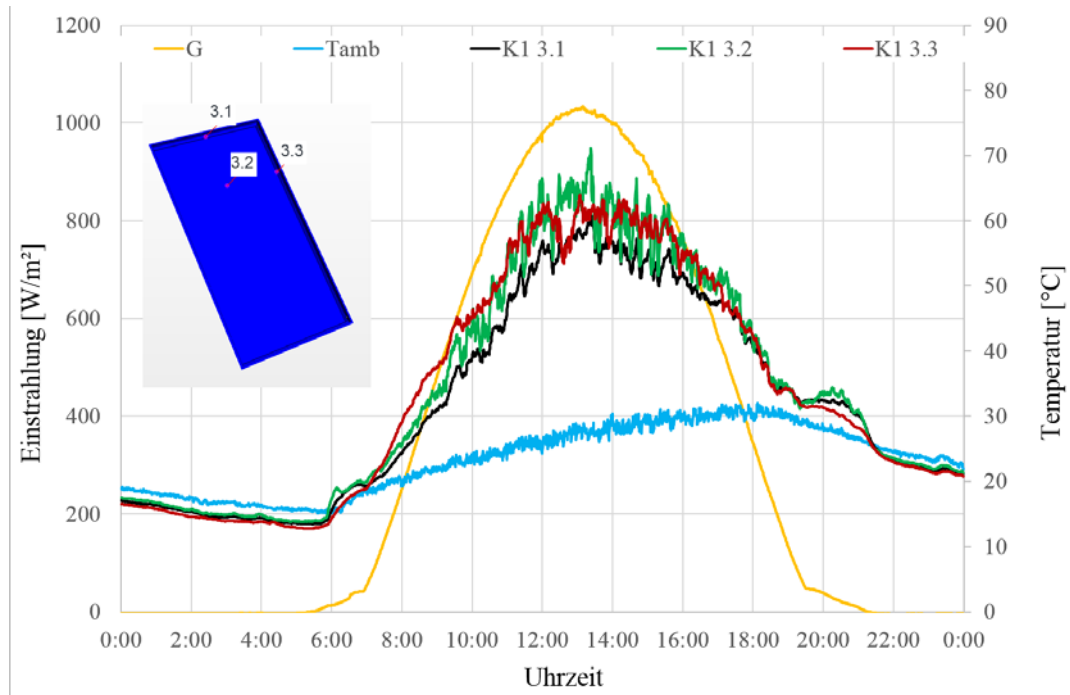


Abbildung 6-15: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung, der Umgebungstemperatur sowie der Temperatursensoren K1 3.1 - K1 3.3 am 19.06.2017, Kollektor Typ K1

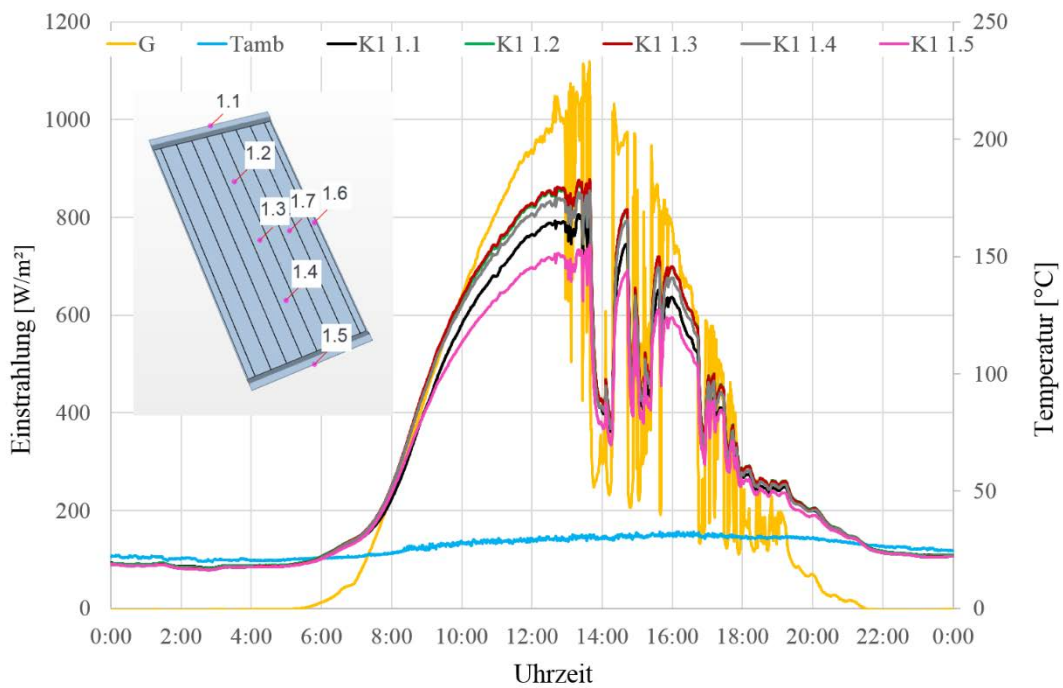


Abbildung 6-16: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung, der Umgebungstemperatur sowie der Temperatursensoren K1 1.1 - K1 1.5 am 20.06.2017, Kollektor Typ K1

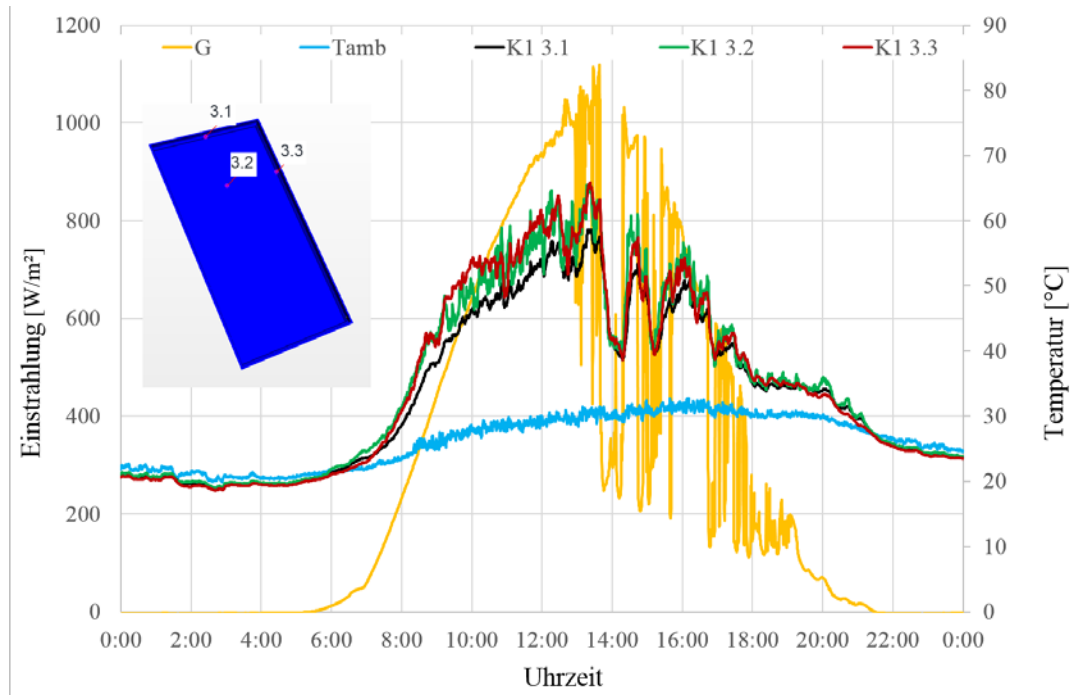


Abbildung 6-17: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung, der Umgebungstemperatur sowie der Temperatursensoren K1 3.1 - K1 3.3 am 20.06.2017, Kollektor Typ K1

Die Abbildungen Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 zeigen wieder die Temperaturmessstellen mittig am Absorber sowie am Rahmen am Kollektor vom Typ K1, allerdings am 20.06.2017. An diesem Tag folgte die hemisphärische Einstrahlung bis ca. 13 Uhr wieder dem Verlauf einer Glockenkurve. Nach 13 Uhr zeigt sich ein rascher Wechsel in der Einstrahlung. Die Temperaturen am Absorber folgen dem Verlauf der hemisphärischen Einstrahlung praktisch ohne Verzögerung. Eine etwas höhere Trägheit weisen die Temperaturmessstellen am Rahmen auf.

Analog Abbildung 6-14 zeigt Abbildung 6-18 die Temperaturverläufe mittig über die Höhe am Absorber (Temperaturmessstellen 1.1 bis 1.6) vom Kollektor Typ K2 sowie die Umgebungstemperatur auf der linken Achse, außerdem die hemisphärische Einstrahlung auf der rechten Achse am 19.06.2017. Die Temperaturen am Absorber folgen wiederum der Glockenkurve auf verschiedenen Temperaturniveaus. Ohne Einstrahlung ist die Absorbtemperatur nahezu einheitlich, trifft Strahlung auf den Kollektor bildet sich ein Temperaturgradient aus. Der Absorber des Kollektors vom Typ K2 wird ähnlich dem Absorber des Kollektors vom Typ K1 nach oben hin wärmer, wobei das obere und untere Ende ein geringeres Temperaturniveau erreichen. An diesen Stellen ist der Einfluss der Randverluste dominant. An den Messstellen 1.3, 1.4 und 1.5 ist die Temperatur auch bei Einstrahlung ähnlich. Das Temperaturniveau der Messstelle 1.2 liegt geringfügig tiefer. Der Randeinfluss an der Messstelle 1.2 ist noch erkennbar.

Abbildung 6-19 zeigt die Temperaturmessstellen 3.1, 3.2 und bis 3.5 am Rahmen des Kollektors K2, ebenfalls am 19.06.2017. Auch die Rahmentemperaturen folgen grundsätzlich der Glockenkurve der hemisphärischen Einstrahlung. Faktoren wie Windgeschwindigkeit und Windrichtung führen aber zu deutlichen Amplituden. Im Gegensatz zu den analogen Temperaturmessstellen am Kollektor vom Typ K1 liegen die Temperaturen hier deutlich auseinander. Dies ist auf die geringere Wärmeleitfähigkeit des Rahmenmaterials zurückzuführen.

Die Abbildungen Abbildung 6-20 und Abbildung 6-21 zeigen wieder die Temperaturmessstellen mittig am Absorber sowie am Rahmen am Kollektor vom Typ 2, am 20.06.2017. Analog der Temperaturen am Kollektor vom Typ K1 folgen am Kollektor vom Typ K2 am Absorber dem Verlauf der hemisphärischen Einstrahlung praktisch ohne Verzögerung. Eine etwas höhere Trägheit weisen die Temperaturmessstellen am Rahmen auf. Wie bereits an den Temperaturverläufen vom 19.06.2017 liegen die Temperaturverläufe am Rahmen an den einzelnen Messstellen aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Rahmenmaterials deutlich auseinander.

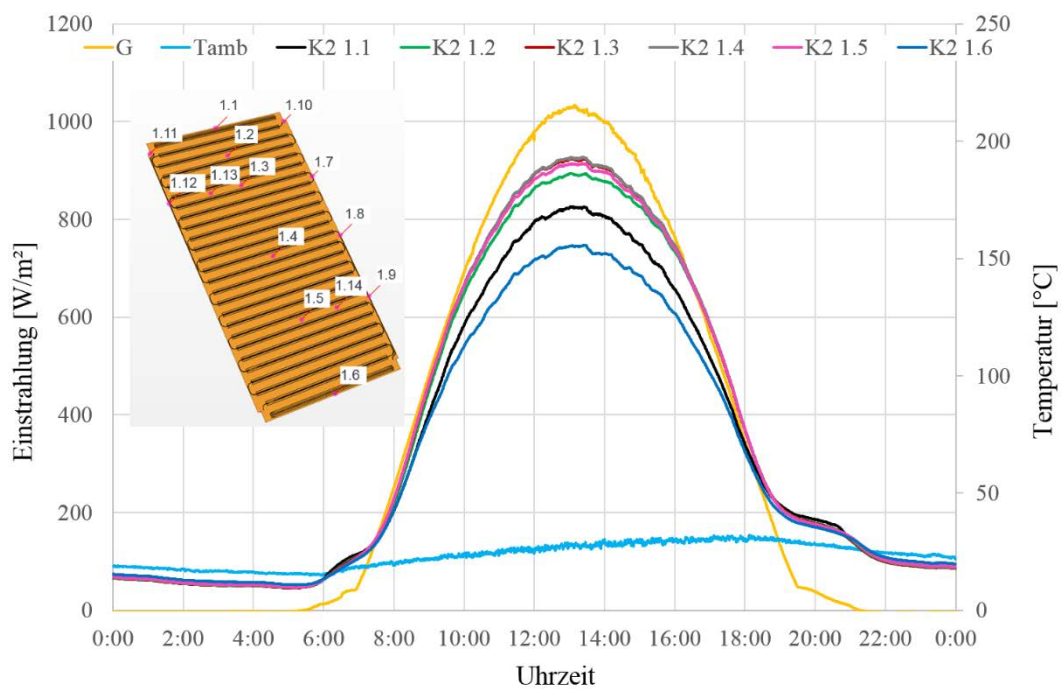


Abbildung 6-18: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung, der Umgebungstemperatur sowie der Temperatursensoren K2 1.1 – K2 1.6 am 19.06.2017, Kollektor Typ K2

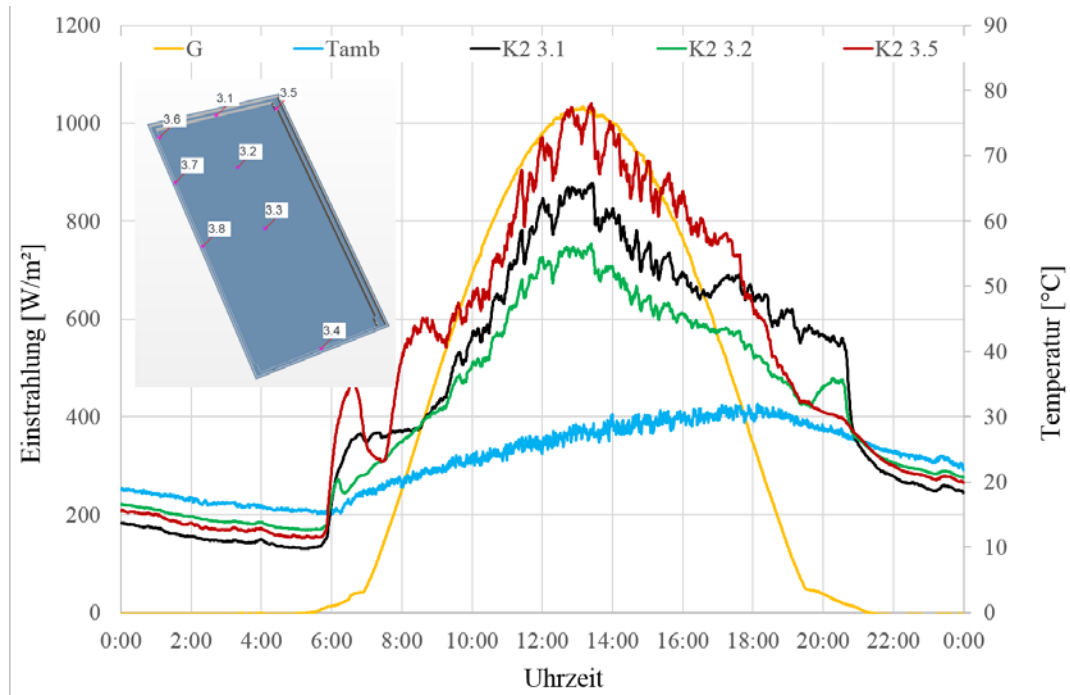


Abbildung 6-19: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung, der Umgebungstemperatur sowie der Temperatursensoren K2 3.1, K2 3.2 und K2 3.5 am 19.06.2017, Kollektor Typ K2

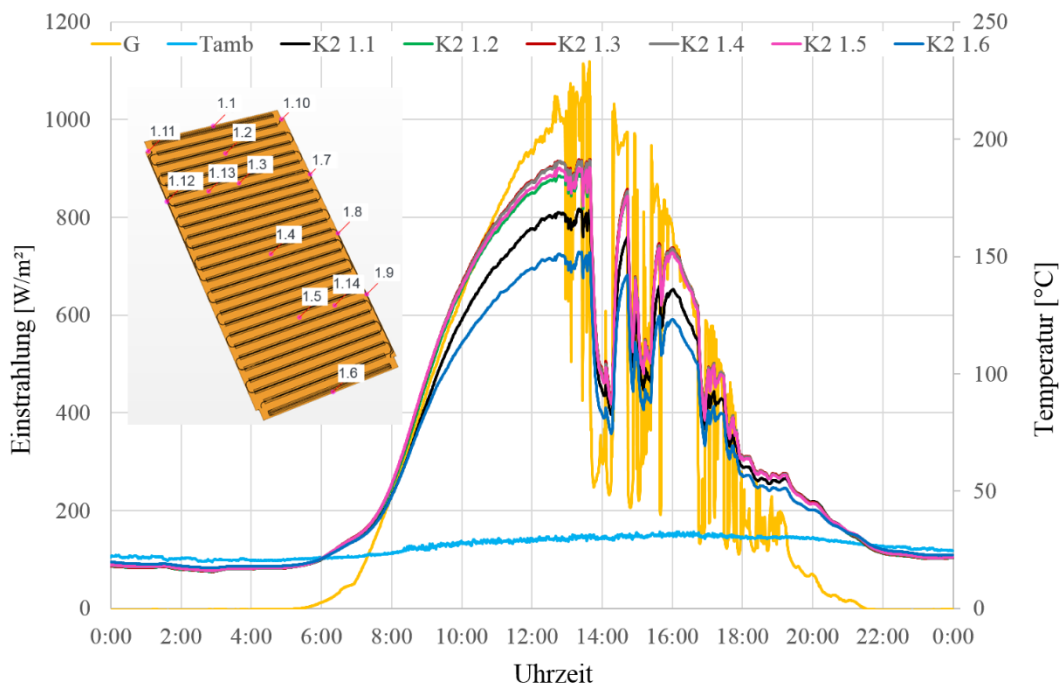


Abbildung 6-20: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung, der Umgebungstemperatur sowie der Temperatursensoren K2 1.1 – K2 1.6 am 20.06.2017, Kollektor Typ K2

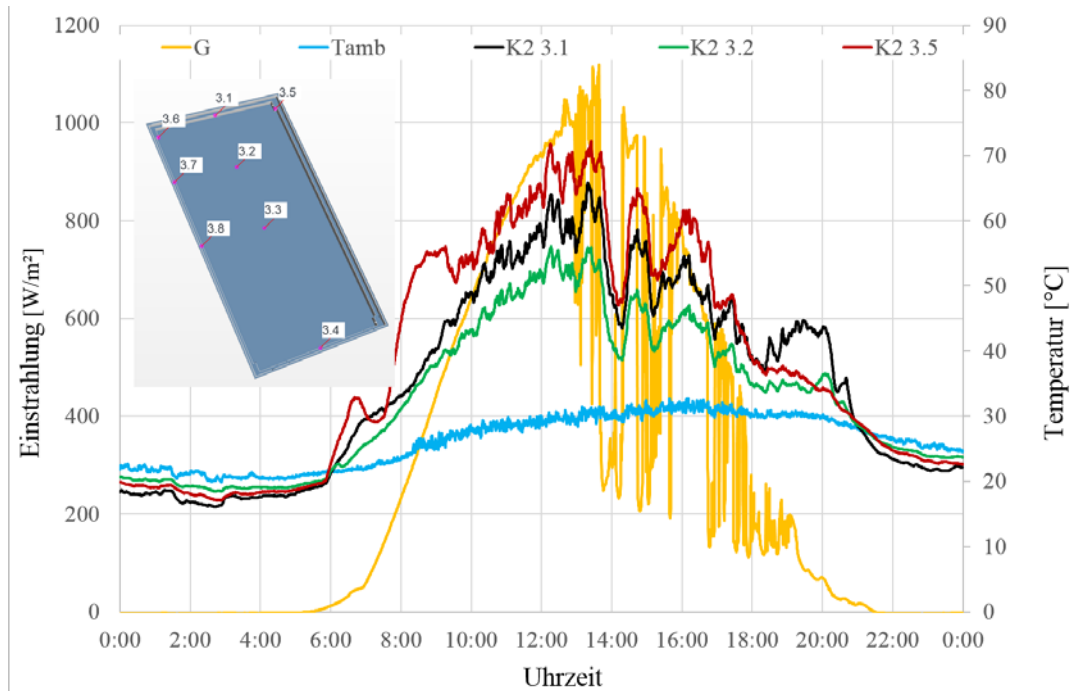


Abbildung 6-21: Tagesverlauf der hemisphärischen Einstrahlung, der Umgebungstemperatur sowie der Temperatursensoren K2 3.1, K2 3.2 und K2 3.5 am 19.06.2017, Kollektor Typ K2

6.5 Bestimmung der optischen Materialeigenschaften der Komponenten

Von den Kollektoren vom Typ K1 und Typ K2 wurden Materialproben entnommen und die optischen Eigenschaften mit dem Spektrometer Agilent Cary 5000 und dem Emissiometer OPTOSOL bestimmt.

Die Bestimmung der Absorption im Wellenlängenbereich der Solarstrahlung erfolgt über die Messung der Reflexion im Wellenlängenbereich von 280 nm bis 2500 nm in Schritten von 5 nm. Die spektralen Reflexionswerte werden mit der spektralen Bestrahlungsstärke der Solarstrahlung, siehe Abbildung 6-22, gewichtet, die Summe aller Einzelwerte ergibt den Reflexionsgrad der jeweiligen Probe. Bei opaken Proben ist der Absorptionsgrad 1 minus Reflexionsgrad.

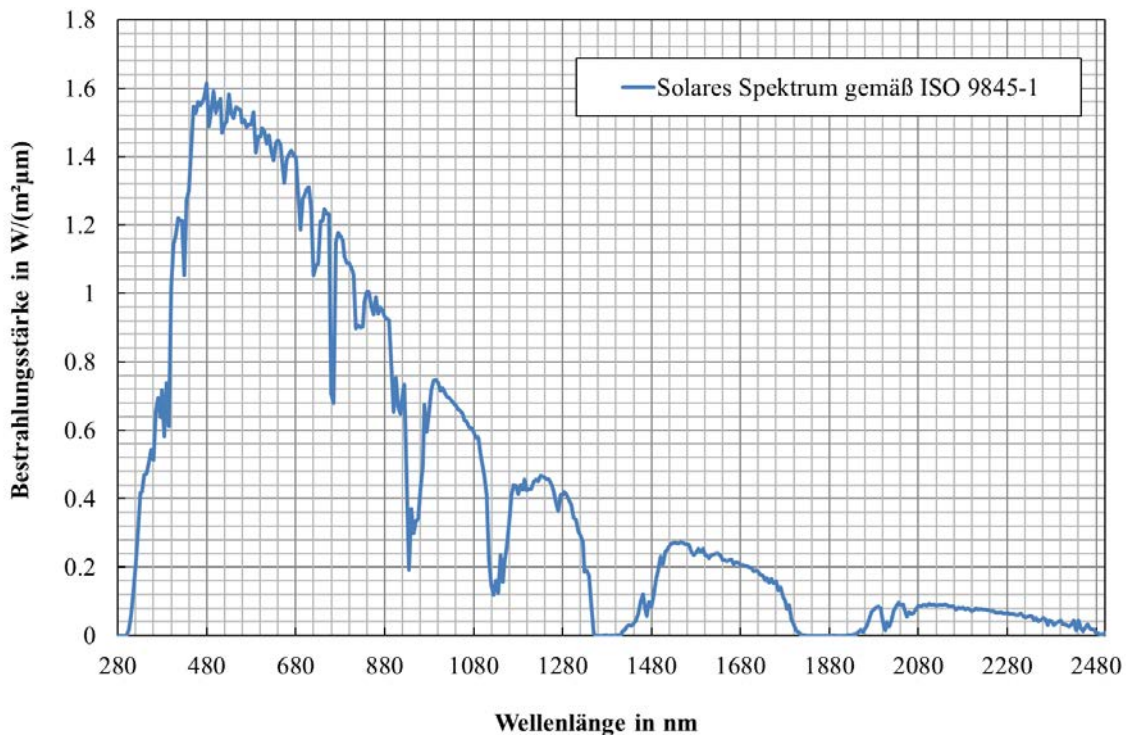


Abbildung 6-22: Solare Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit der Wellenlänge

Vom dem Kollektor vom Typ K1 (interne Prüflingsnummer C1376) wurden die Absorptionsgrade von den folgenden Materialien durchgeführt:

- Aluminiumblech des Absorbers, vorne, selektiv beschichtet, Proben aus der Mitte und vom Rand
- Aluminiumblech des Absorbers, hinten, blanke Rückseite, Proben aus der Mitte und vom Rand
- Aluminium Rahmen, außen
- Rückwand, Innenseite
- Rückwand, Außenseite
- Eckverbinder des Rahmens, Kunststoff, schwarz
- Silikon, schwarz

Vom Kollektor des Typs K1 konnte außerdem eine Materialprobe der transparenten Abdeckung untersucht werden. Bestimmt wurde der Transmissionsgrad der Glasscheibe.

Abbildung 6-23 zeigt beispielhaft den spektralen Reflexionsgrad des Absorbers (Typ K1). Die selektive Beschichtung der Vorderseite reflektiert im sichtbaren Bereich (VIS) der Solarstrahlung und im nahen Infrarot (IR-A) fast keine Strahlung, damit wird fast alle Strahlung absorbiert. Die blanke Rückseite weist dagegen einen hohen Reflexionsgrad auf. Insbesondere von den Absorberproben wurden mehrere Messungen auch mit unterschiedlicher Einbaulage

und damit richtungsabhängig durchgeführt. In Tabelle 6-5 sind Mittelwerte aus allen Messreihen je Materialoberfläche angegeben.

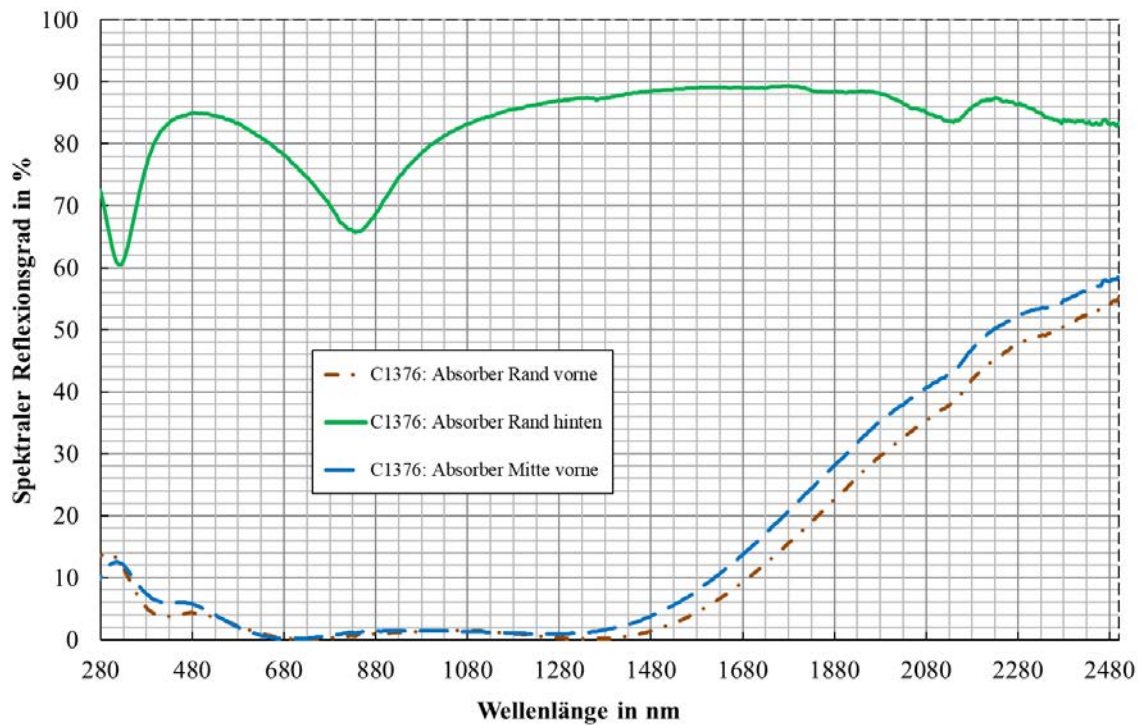


Abbildung 6-23: Spektraler Reflexionsgrad von Vorder- und Rückseite des Absorbers des Kollektors vom Typ K1

Vom dem Kollektor vom Typ K2 (interne Prüflingsnummer C1349) wurden die Absorptionsgrade von den folgenden Materialien durchgeführt:

- Aluminiumblech des Absorbers, vorne, selektiv beschichtet, Proben aus der oberen (A1) und unteren Hälfte sowie aus der Mitte (A2), siehe Abbildung 6-24
- Aluminiumblech des Absorbers, hinten, blanke Rückseite, Proben aus der oberen und unteren Hälfte sowie aus der Mitte (A2)
- Kunststoffrahmen, Innenseite
- Kunststoffrahmen, Außenseite
- Rückwand, Innenseite
- Rückwand, Außenseite
- Silikon, schwarz



Abbildung 6-24 Materialproben von K2, Absorberblech, selektiv beschichtete Vorderseite

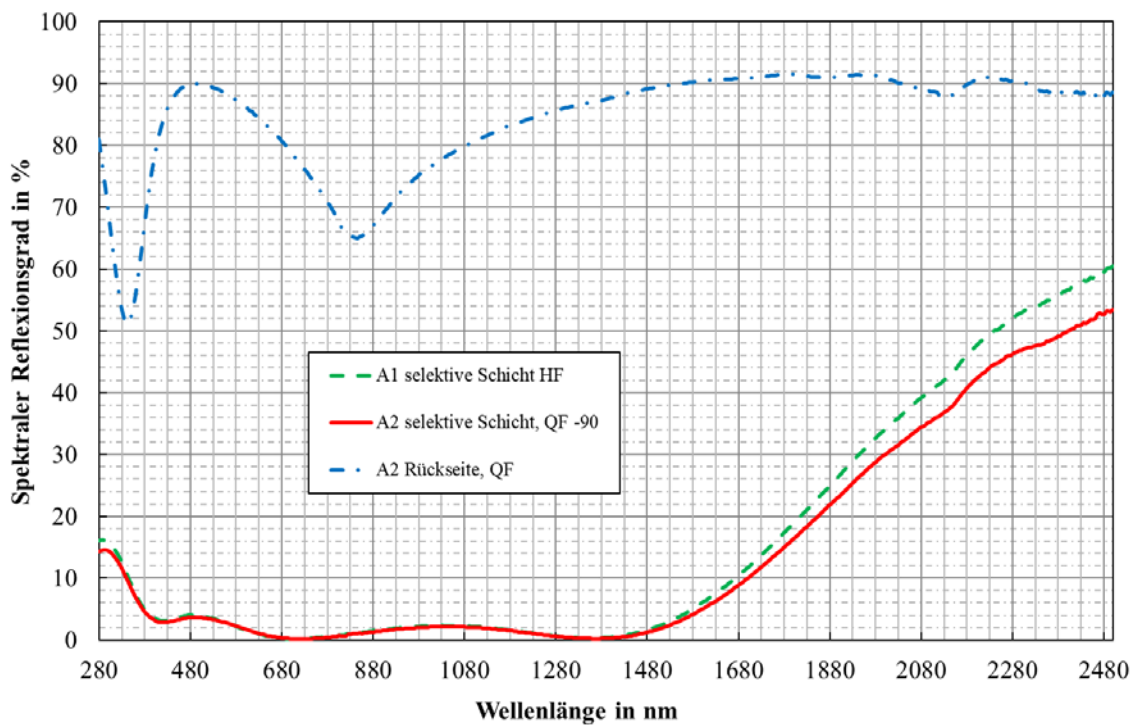


Abbildung 6-25: Spektraler Reflexionsgrad von Vorder- und Rückseite des Absorbers des Kollektors vom Typ K2

Abbildung 6-25 zeigt beispielhaft den spektralen Reflexionsgrad des Absorbers (Typ K2). Die selektive Beschichtung der Vorderseite und die blanke Rückseite weisen sehr ähnliche spektrale Verläufe auf wie die des Kollektors vom Typ K1. Insbesondere von den Proben des Absorbers und der Rückwand wurden mehrere Messungen auch mit unterschiedlicher Einbaulage und damit richtungsabhängig durchgeführt. In Tabelle 6-5 sind Mittelwerte aus allen Messreihen je Materialoberfläche angegeben.

Weitere Untersuchungen der Absorptionsgrade wurde an fabrikneuen Absorberproben durchgeführt, welche der Hersteller des Kollektors vom Typ K1 zur Verfügung gestellt hat.

Von allen, den Kollektoren vom Typ K1 und vom Typ K2 entnommenen, Materialproben wurden mit dem Emissiometer OPTOSOL, siehe Abbildung 6-26, die Bestimmung des Emissionsgrades für den Wellenlängenbereich von $8\ \mu\text{m}$ – $14\ \mu\text{m}$ durchgeführt. An den Rückseiten der fabrikneuen Absorberproben konnten diese Untersuchungen nicht durchgeführt werden, da diese beschriftet waren.

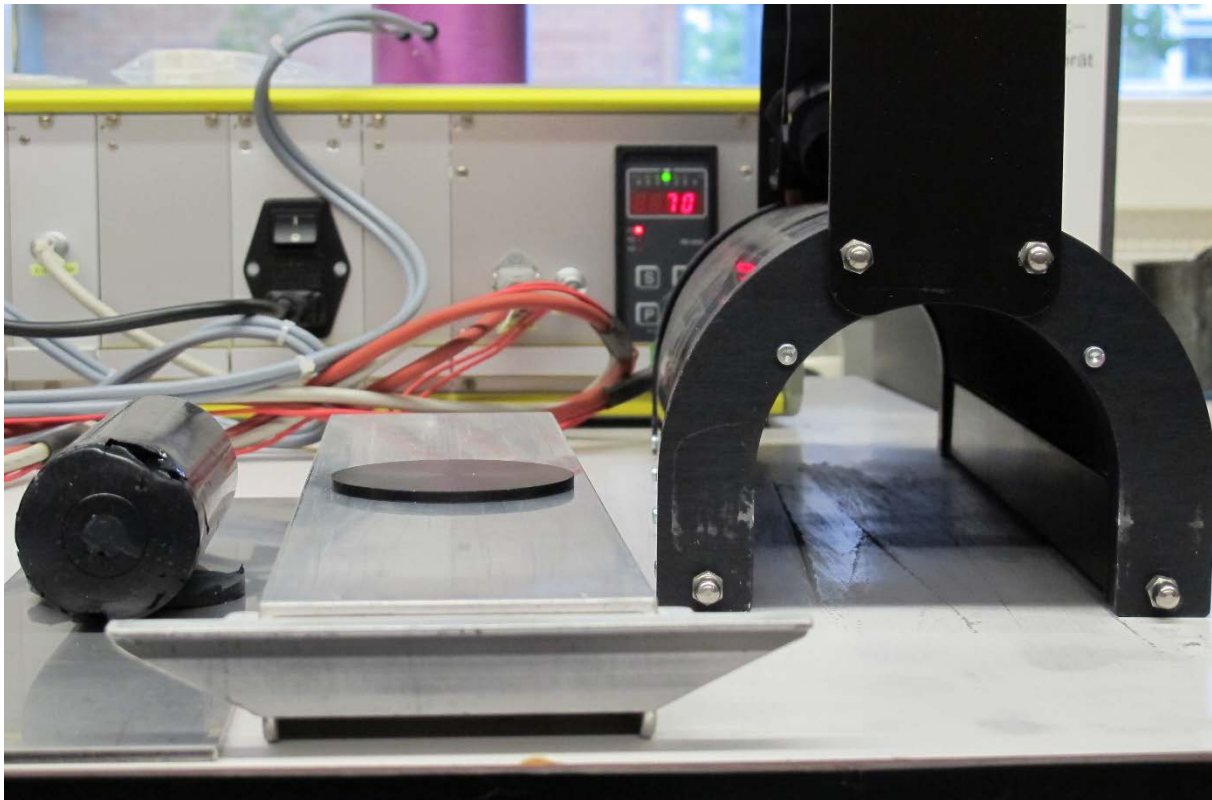


Abbildung 6-26: Messgerät OPTOSOL zur Bestimmung des Emissionsgrades im langwelligen Bereich IR-C, links zylindrische Silikonprobe, Mitte links Probenschlitten darauf Referenz Standard mit hoher Emissivität, Heiztunnel mit Strahlungssensor

Die Ergebnisse der Bestimmung der Absorptionsgrade im Wellenlängenbereich der Solarstrahlung (kurzwellig) sowie der Emissionsgrade im langwelligen Bereich IR-C aller Materialproben sind in Tabelle 6-5 zusammengestellt.

Tabelle 6-5: Absorptionsgrad und Emissionsgrad der untersuchten Materialproben sowie Transmissionsgrad Solarglas Typ K1

Materialprobe	Absorptionsgrad kurzwellig	Emissionsgrad langwellig
Vom Kollektortyp K1		
Aluminiumblech des Absorbers, selektiv beschichtet	0.952	0.048
Aluminiumblech des Absorbers, blanke Rückseite	0.181	0.040
Aluminium Rahmen, außen	0.191	0.013
Rückwand, Blech, Innenseite	0.350	0.037
Rückwand, Blech, Außenseite	0.375	0.038
Eckverbinder des Rahmens, Kunststoff, schwarz	0.953	0.935
Silikon, schwarz	0.955	0.910
Fabrikneue Absorberproben		
MiroTherm1300 vom Rand des Coils	0.959	-
MiroTherm1300 aus der Mitte des Coils	0.947	-
Vom Kollektortyp K2		
Aluminiumblech des Absorbers, selektiv beschichtet	0.962	0.061
Aluminiumblech des Absorbers, blanke Rückseite	0.212	0.048
Kunststoff-Rahmen, Innenseite	0.943	0.906
Kunststoff-Rahmen, Außenseite	0.945	0.898
Kunststoff-Rückwand, Innenseite	0.944	0.910
Kunststoff-Rückwand, Außenseite	0.942	0.897
Silikon, schwarz	0.936	0.880
Materialprobe	Transmissionsgrad kurzwellig	Emissionsgrad langwellig
Vom Kollektortyp K1		
Transparente Abdeckung, Solarglas	0.911	-

Die in Tabelle 6-5 genannten Werte wurden auf die zweite Nachkommastelle gerundet und dann innerhalb der CFD-Simulationen (vgl. Kapitel 4) verwendet.

6.6 Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmungen

Die Wärmeübertragungseigenschaft einer Wärmedämmung kann unter Umständen von den Prüfbedingungen abhängig sein. Sie kann z. B. vom Komprimierungsgrad der Proben und/oder der Temperaturdifferenz bei gleicher mittlerer Prüftemperatur beeinflusst werden. Die Wärmeübertragungseigenschaft einer Wärmedämmung ist daher keine reine Stoffeigenschaft und wird im Folgenden als **effektive Wärmeleitfähigkeit** bezeichnet.

Die messtechnische Untersuchung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmungen wurde in einer sogenannten Zweiplatten-Apparatur durchgeführt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit $\lambda(\vartheta_m)$ wird in Abhängigkeit von der mittleren Proben temperatur nach Gl. (6-1) berechnet. Die Koeffizienten c und b werden nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate aus den Messwerten bestimmt. Für weitere Informationen zur Prüfmethode wird auf (Vetter et al. 2015) verwiesen.

$$\lambda(\vartheta_m) = c + b * \vartheta_m \quad (6-1)$$

Mit:

b	W/(m K)	Effektive Wärmeleitfähigkeit bei 0 °C
c	W/(m K °C)	Koeffizient zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit
ϑ_m	°C	Probenmitteltemperatur

Entsprechend der Dicke der Wärmedämmung nach Einbau in den Kollektor, wurde die Wärmedämmung des Kollektors vom Typ K1 bei einer Dicke von 30 mm gemessen. Die Wärmedämmung des Kollektors vom Typ K2 wurde bei einer Dicke von 50 mm gemessen. Die grafische Auswertung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmungen zeigen die Abbildungen Abbildung 6-27 und Abbildung 6-28.

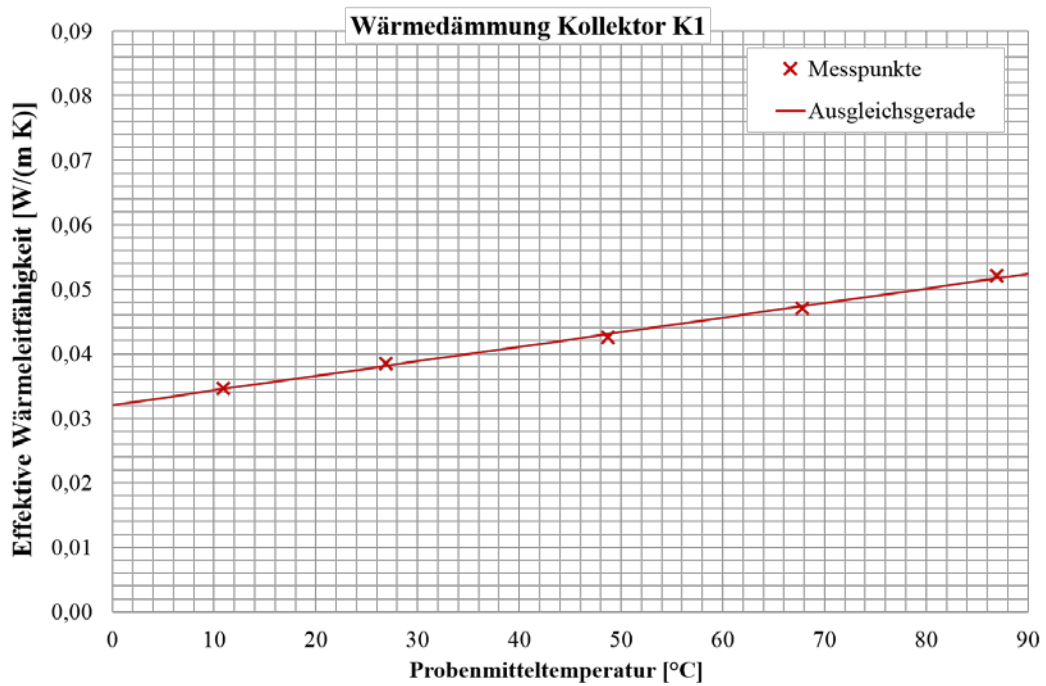


Abbildung 6-27: Grafische Auswertung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung aus dem Kollektor Typ K1 bei einer Dicke von 30 mm

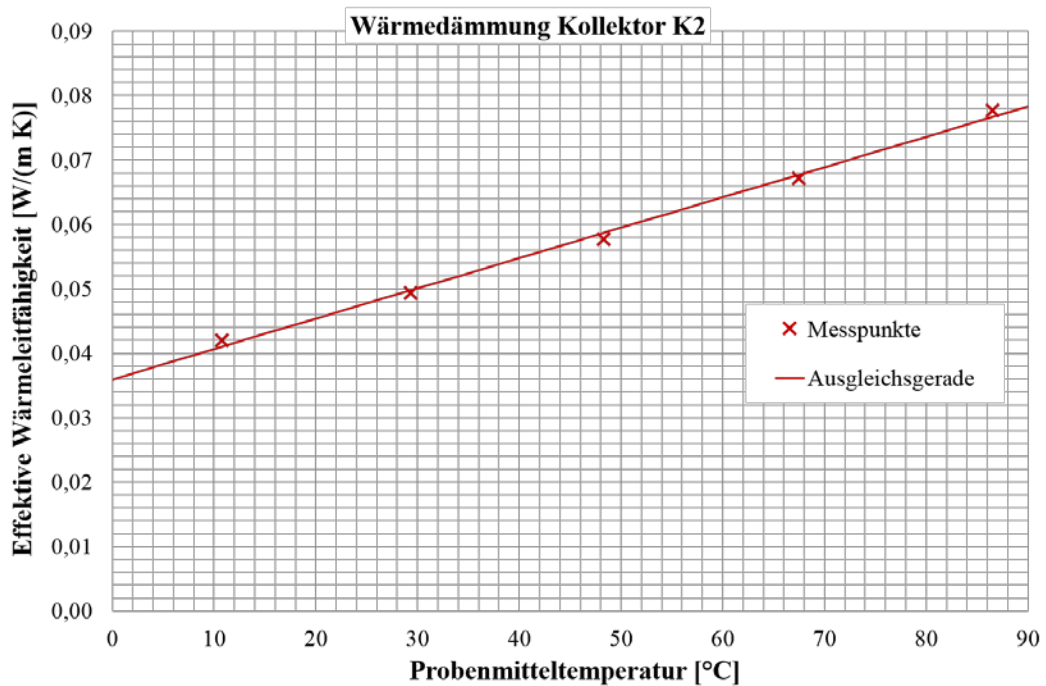


Abbildung 6-28: Grafische Auswertung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung aus dem Kollektor Typ K2 bei einer Dicke von 50 mm

Tabelle 6-6 zeigt die Koeffizienten c und b sowie den Standardfehler der Koeffizienten aus der Regression wieder für die beiden Wärmedämmungen.

Tabelle 6-6: Koeffizienten c und b und Standardfehler für die beiden Wärmedämmungen

Messung Wärmedämmung K1	Standardfehler
c = 0,0321 W/(m K)	$4,3 \cdot 10^{-4}$ W/(m K)
b = 0,00023 W/(m K °C)	$7,7 \cdot 10^{-6}$ W/(m K °C)
Messung Wärmedämmung K2	Standardfehler
c = 0,0359 W/(m K)	$1,0 \cdot 10^{-3}$ W/(m K)
b = 0,00047 W/(m K °C)	$1,8 \cdot 10^{-5}$ W/(m K °C)

7. Exemplarische Anwendungen (AP 6)

In diesem Arbeitspaket wurden einige praktische Anwendungen und Kollektorvariationen untersucht. Das Ziel hierbei war zum einen die grundsätzliche Eignung des entwickelten Verfahrens zur Bearbeitung praxisrelevanter Fragestellungen zu demonstrieren und das Verfahren zu validieren, sowie zum anderen das entwickelte Verfahren und die Anwendungsfreundlichkeit weiter zu verbessern. Zur Demonstration wird im Folgenden der Workflow von der Geometrie hin zur Auswertung an einem Beispiel vorgestellt.

Der gesamte Workflow der virtuellen Kollektorentwicklung ist in Abbildung 7-1 visualisiert. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden mit Blick ins Simulationsprogramm StarCCM+ betrachtet.

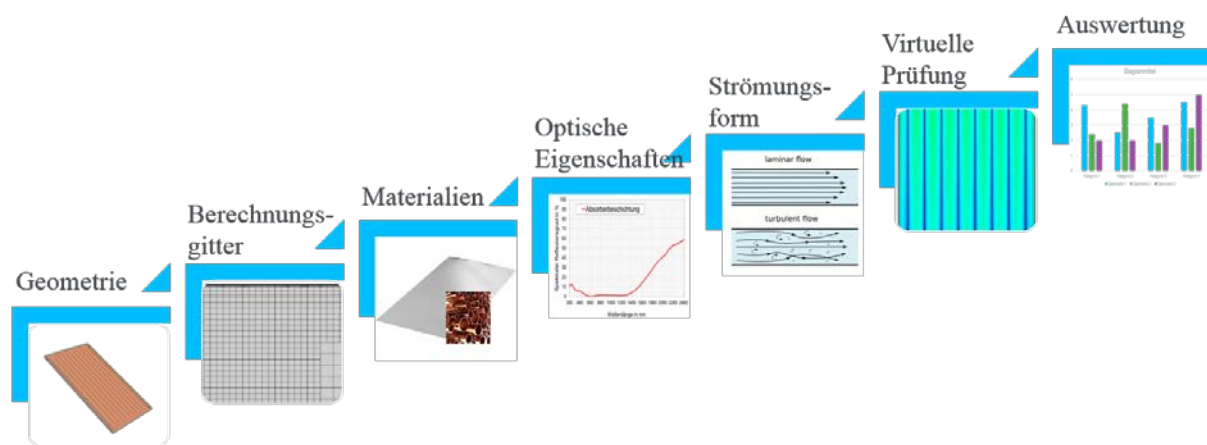


Abbildung 7-1: Workflow der virtuellen Kollektorentwicklung

Geometrie

Im ersten Schritt werden die geometrischen Größen des vorhandenen Kollektors (Grundmodell) in die Design Parameter überführt und in StarCCM+ übertragen, vgl. Abbildung 7-2. Die Design Parameter zeigt Anhang A. Dieses Grundmodell dient als Standardkollektor für die nachfolgenden exemplarischen Anwendungen.

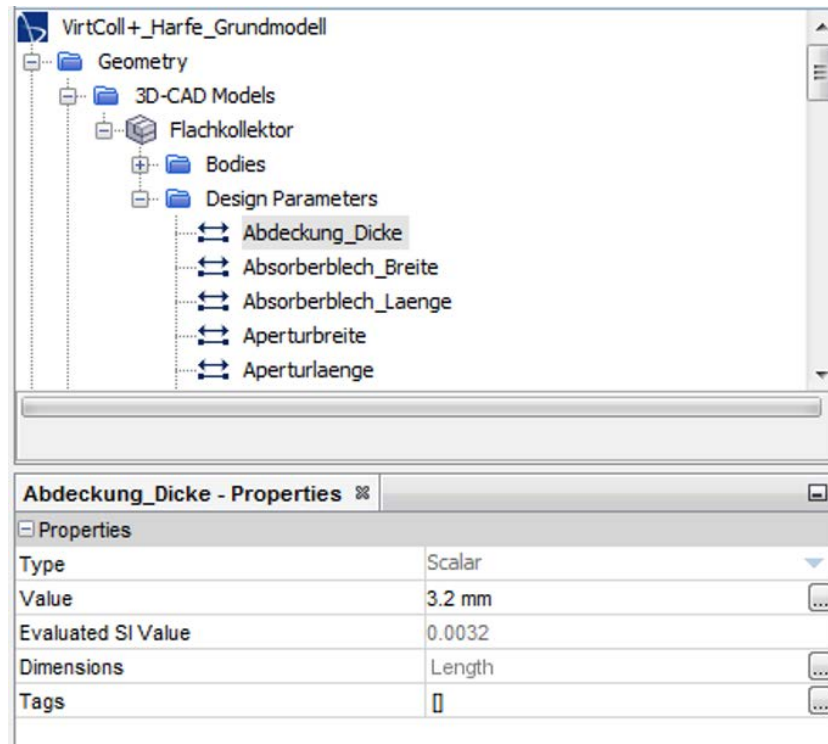


Abbildung 7-2: Definition der Design Parameter in StarCCM+

Sind alle Design Parameter definiert, wird die Geometrie neu aufgebaut (Rechtsklick → Update, vgl. Abbildung 7-3).

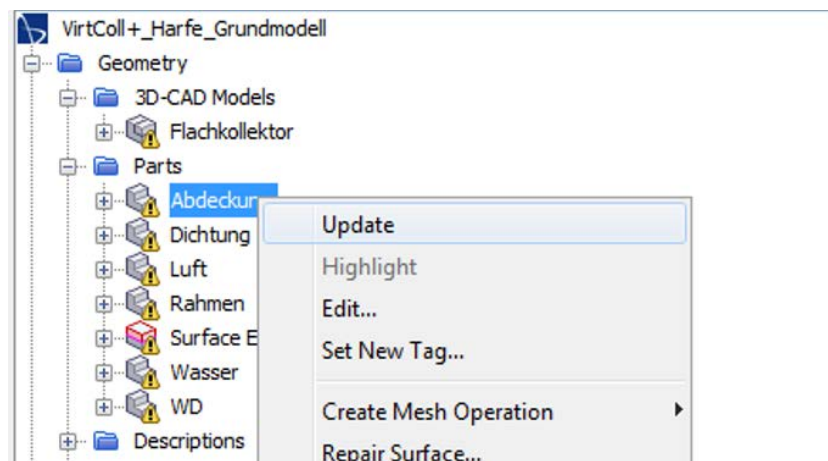


Abbildung 7-3: Update der Geometriedaten

Abbildung 7-4 zeigt den resultierenden Kollektor, links intransparent, rechts transparent.

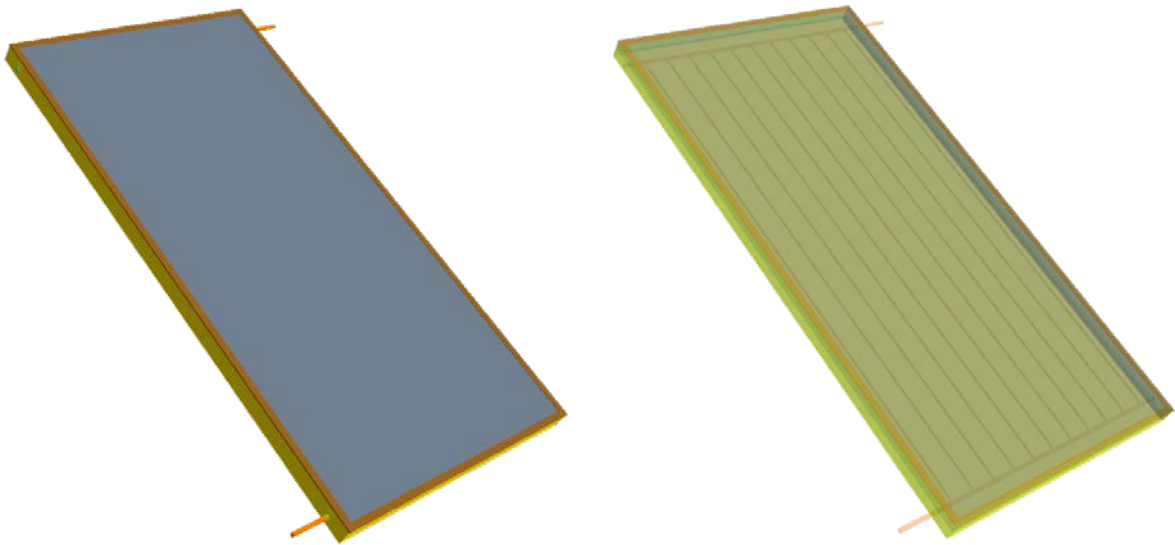


Abbildung 7-4: CAD-Kollektormodell mit Harfenabsorber

Auch nach dem Neuaufbau der Geometrie sind die Oberflächen der einzelnen Komponenten entsprechend den angrenzenden Komponenten getrennt und benannt. Die Abdeckung hat beispielsweise eine Kontaktfläche zur Dichtung (int_Abdeckung-Dichtung), zur Luft im Kollektor (int_Abdeckung-Luft) sowie zur Umgebung, vgl. Abbildung 7-5. An diesen Kontaktflächen (Interfaces) werden später zum Beispiel optischen Eigenschaften oder Wärmeübergangskoeffizienten definiert.

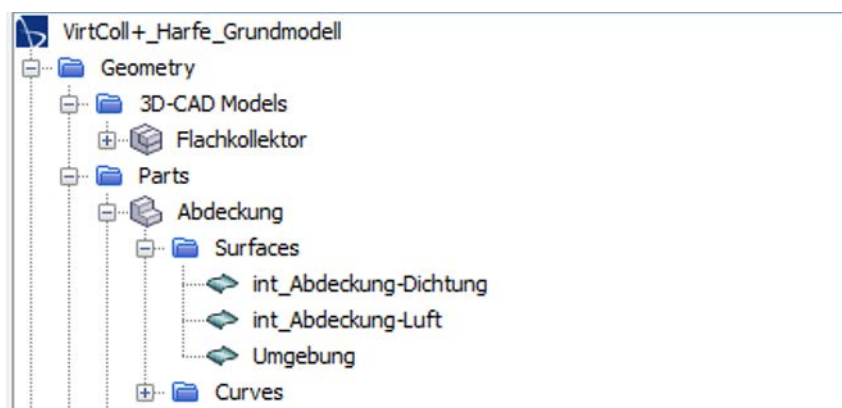


Abbildung 7-5: Oberflächen der einzelnen Komponenten

Berechnungsgitter

Für alle Komponenten des Kollektors sind die Randbedingungen für das Berechnungsgitter definiert, vgl. Abbildung 7-6. Eventuell sind Anpassungen sinnvoll oder notwendig.

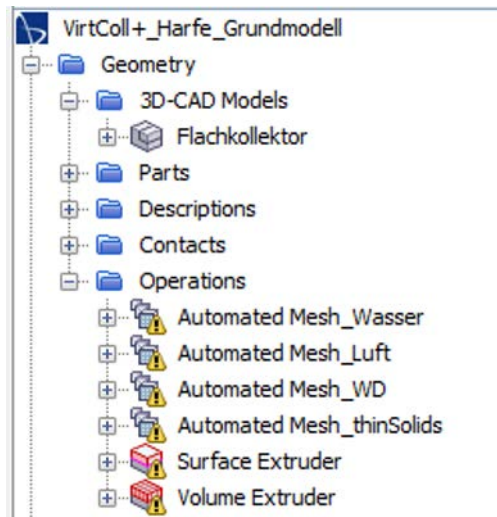


Abbildung 7-6: Definition der Berechnungsgitter in den „Operations“

Anschließend wird das Berechnungsgitter ausgeführt (Rechtsklick → Execute All, vgl. Abbildung 7-7).

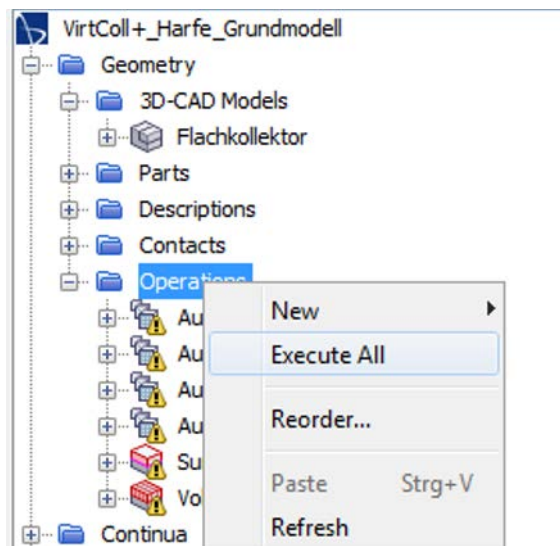


Abbildung 7-7: Ausführen des Berechnungsgitters

Abbildung 7-8 zeigt einen Quer- und einen Längsschnitt durch das Berechnungsgitter.

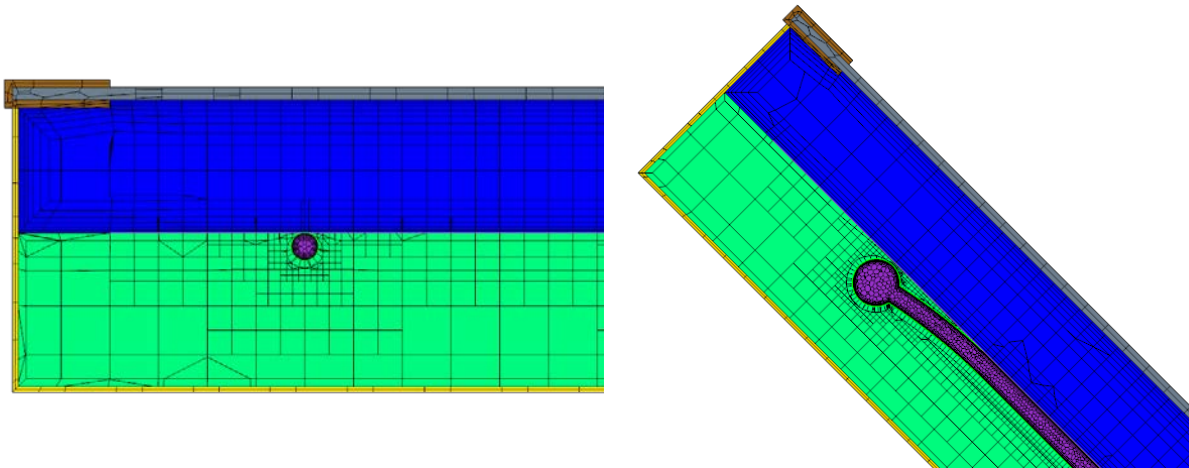


Abbildung 7-8: Querschnitt (links) und Längsschnitt (rechts) durch den Kol

Materialien und Fluide

Nun werden die Materialeigenschaften definiert, vgl. Abbildung 7-9. Für alle Feststoffe müssen die Dichte, die spezifische Wärmekapazität sowie die Wärmeleitfähigkeit definiert werden. Möglich sind sowohl konstante als auch temperaturabhängige Angaben. Als Wärmeträgerfluid ist Wasser vordefiniert. Die Stoffeigenschaften für Wasser sind bereits temperaturabhängig hinterlegt. Im Zwischenraum zwischen Abdeckung und Absorber ist Luft. Die Luft ist als ideales Gas modelliert. Die Dichteänderung wird in den Erhaltungsgleichungen berücksichtigt.

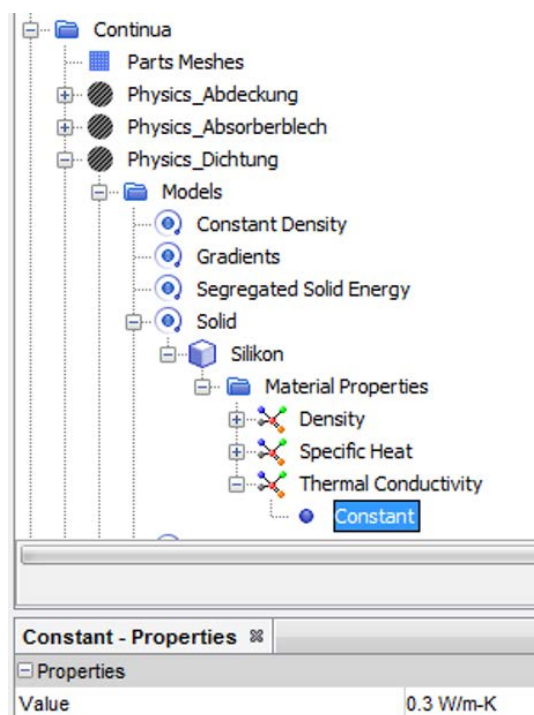


Abbildung 7-9: Definition der Materialeigenschaften in StarCCM+

Optische Eigenschaften

Nun werden der Absorptionsgrad im Bereich der Solarstrahlung (z. B. Absorberblech kurz), der Emissionsgrad im Bereich der Wärmestrahlung (z. B. Absorberblech lang) und für lichtdurchlässige Komponenten der Transmissionsgrad für beide Spektralbereiche festgelegt, vgl. Abbildung 7-10.

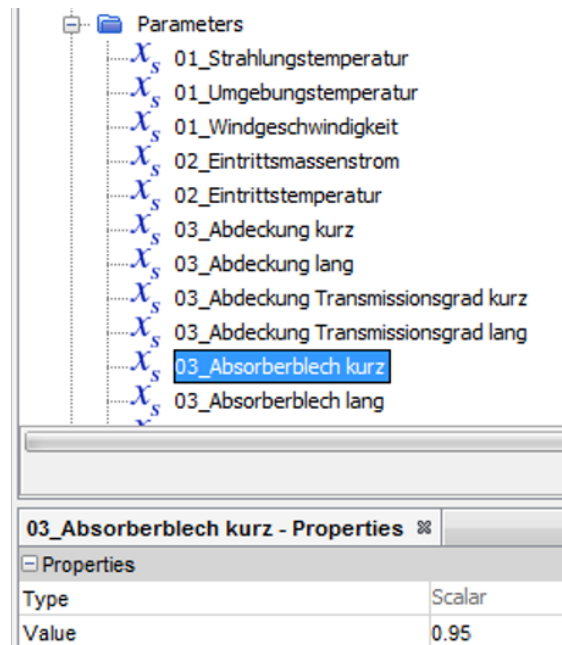


Abbildung 7-10: Festlegung der optischen Eigenschaften

Strömungsform

Schließlich muss für jede Temperaturstufe das Strömungsmodell laminar oder turbulent definiert werden, vgl. Abbildung 7-11. Das Strömungsmodell wird entsprechend der Reynolds-Zahl festgelegt. Die kritische Reynolds-Zahl, ab der ein turbulentes Strömungsmodell gewählt wird beträgt $Re_{krit} = 2300$.

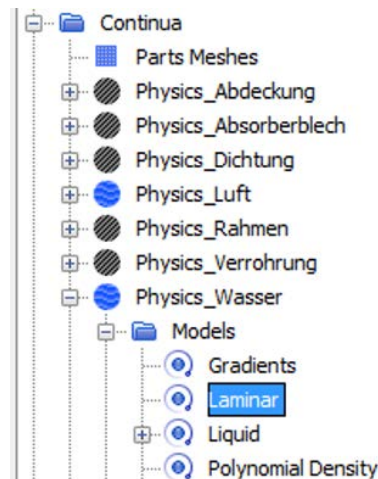


Abbildung 7-11: Festlegung des Strömungsmodells (laminar oder turbulent)

Virtuelle Leistungsprüfung

Jetzt sind alle notwendigen Angaben gemacht. Die virtuelle Leistungsprüfung nach Standardrandbedingungen, vgl. Tabelle 7-1 kann durchgeführt werden.

Tabelle 7-1: Standardrandbedingungen für die virtuelle Leistungsprüfung

Standardrandbedingungen			
G_b	850	W/m ²	Direktstrahlung
G_d	150	W/m ²	Diffusstrahlung
ϑ_{amb}	20	°C	Umgebungstemperatur
ϑ_{sky}	10	°C	Himmelstemperatur
ϑ_{ein}	20, 45, 70, 95	°C	Eintrittstemperatur
u	3	m/s	Windgeschwindigkeit
\dot{m}	0,02	kg/(s m ²)	Massenstrom
θ	20, 40, 50, 60, 70	°	Einfallswinkel
β	45	°	Anstellwinkel

Auswertung

Für jeden Simulationspunkt werden die Austrittstemperatur, Bauteiltemperaturen etc. qualitativ oder quantitativ ausgelesen. Mit den Austrittstemperaturen können die charakteristischen Kollektorkennwerte, und damit die Wirkungsgradkennlinie sowie der Kollektorjahresertrag bestimmt werden.

7.1 Variation des Abstands zwischen den Steigrohren

Als erste exemplarische Anwendung wird untersucht, wie der Abstand zwischen den Steigrohren und damit die Anzahl an Steigrohren den Wirkungsgrad bzw. den Kollektorjahresertrag beeinflussen. Das Ergebnis der Untersuchung ist aus Erfahrung qualitativ bekannt, so dass diese Untersuchung ebenfalls der Validierung des Verfahrens dient.

Der Abstand zwischen den Steigrohren wird durch Änderung des Design Parameters „Steigrohr_Anzahl“ variiert. Durch die zusätzliche Änderung des Parameters „Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_horizontal“ wird der Abstand der äußeren Steigrohre zum Rand des Absorberblechs auf den halben Abstand zwischen zwei Steigrohren angepasst. Das CAD-Modell ist so programmiert, dass die Verrohrung immer mittig zum Absorberblech aufgebaut wird. Abbildung 7-12 verdeutlicht das Vorgehen.

Anpassung der „Design Parameter“

- a. Steigrohr_Anzahl
- b. Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_horizontal
- c. **Abstände zwischen den Steigrohren wird automatisch berechnet**

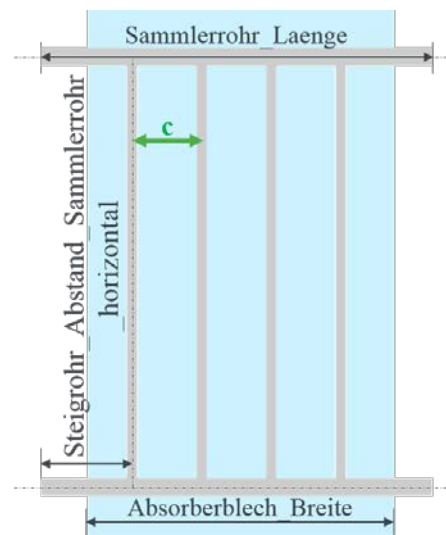


Abbildung 7-12: Anpassung der Abstände zwischen den Steigrohren

Das weitere Vorgehen ist in Abbildung 7-13 aufgezeigt. Die Design Parameter werden angepasst, die Geometrie mit einem einzelnen Mausklick aktualisiert, anschließend das Berechnungsgitter - ebenfalls mit einem einzelnen Mausklick. Durch die Änderung der Anzahl der Steigrohre bei konstantem Massenstrom ändern sich die Geschwindigkeit des Wärmeträgerfluids in der Verrohrung und damit möglicherweise die Strömungsform. Eine Änderung des Strömungsmodells laminar/turbulent wird manuell vorgenommen. Anschließend werden die Simulationen zur virtuellen Leistungsprüfung durchgeführt und ausgewertet.

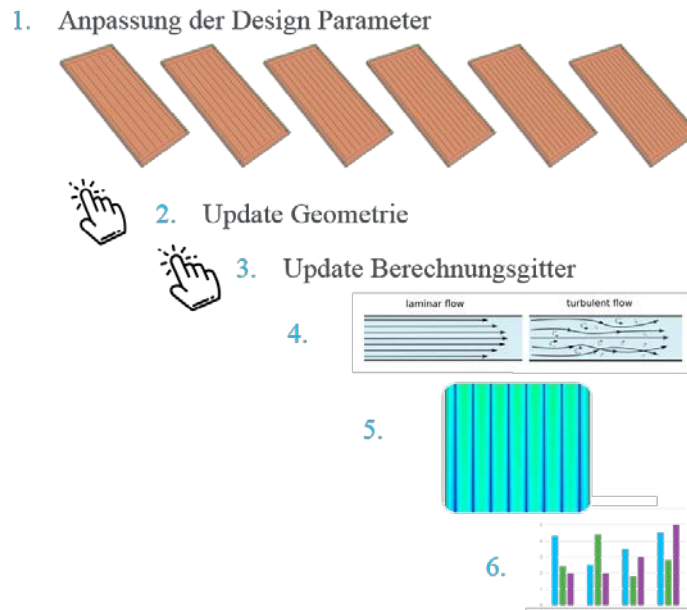


Abbildung 7-13: Workflow der Design Studie

Die Design Studie wurde für sechs verschiedene Harfen mit sieben bis 12 Steigrohren bzw. einem Abstand zwischen den Steigrohren von 92 mm bis 157 mm durchgeführt. Tabelle 7-2 gibt die Harfenvarianten wieder.

Tabelle 7-2: Steigrohranzahl und –Abstand

Anzahl Steigrohre	Abstand zwischen den Steigrohren
7	157 mm
8	137 mm
9	122 mm
10	110 mm
11	100 mm
12	92 mm

Aus den Ergebnissen der Simulationen wurden die charakteristischen Kollektorkennwerte identifiziert und die Wirkungsgradkennlinien erstellt, vgl. Abbildung 7-14.

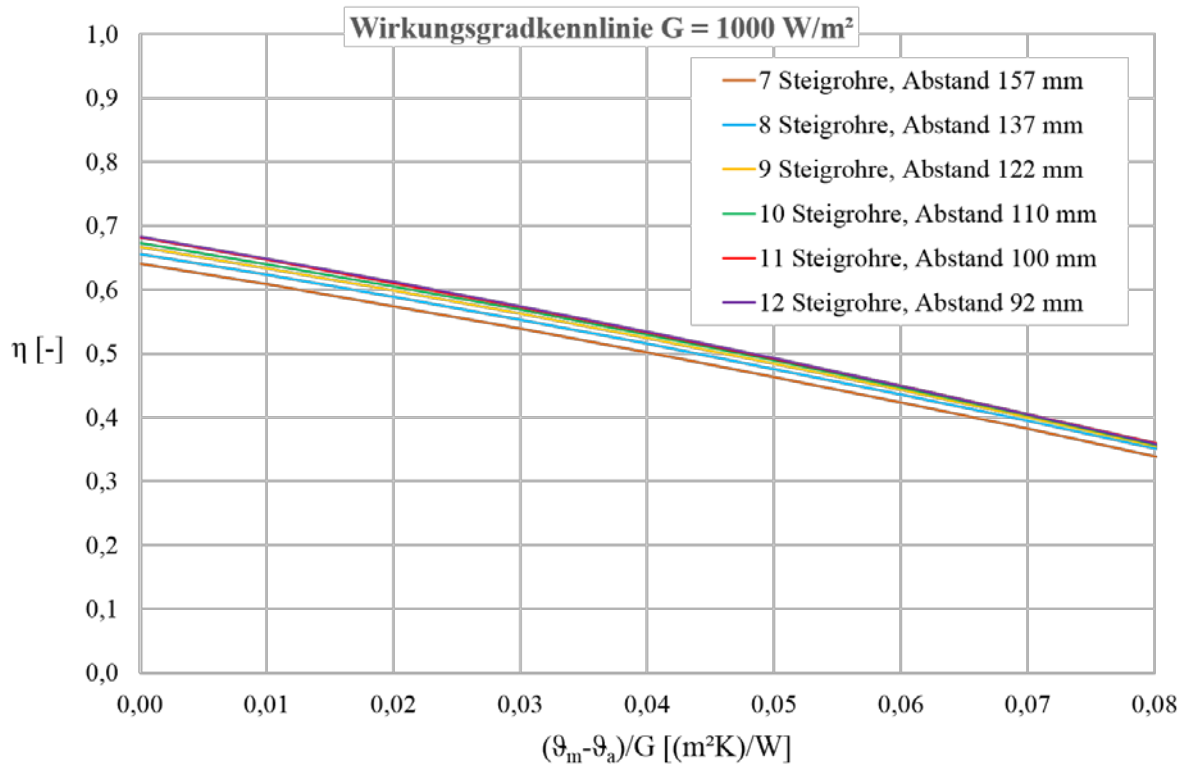


Abbildung 7-14: Wirkungsgradkennlinien: Variation Abstand zwischen den Steigrohren bzw. Anzahl der Steigrohre

Zur Ertragsberechnung sind noch die Einfallswinkelkorrekturfaktoren notwendig. Eine Möglichkeit zur weiteren Beschleunigung der Untersuchungen ist es den Einfallswinkelkorrekturfaktor für das Gehäuse nur bei einem Einfallswinkel von 50° simulativ zu bestimmen, und die restlichen Einfallswinkelkorrekturfaktoren für das Gehäuse mit dem sogenannten b_0 Ansatz zu berechnen, Gl. (7-1). b_0 ist eine Konstante.

$$b_0 = \frac{1 - K_b(\theta)}{\frac{1}{\cos(\theta)} - 1} \quad (7-1)$$

Die aus den Simulationsergebnissen bestimmten charakteristischen Kollektorkennwerte $\eta_{0,hem}$, a_1 und a_2 für die untersuchten Varianten zeigt Tabelle 7-3. Der Kollektorjahresertrag für Würzburg sowie der für die Steigrohre notwendige Materialeinsatz sind Tabelle 7-4 zu entnehmen.

Tabelle 7-3: Variation des Abstands zwischen den Steigrohren, Kollektorkennwerte

Abstand Steigrohre	$\eta_{0,hem}$ [-]	a_1 [W/(m ² K)]	a_2 [W/(m ² K ²)]
157 mm	0,641	3,215	0,007
137 mm	0,656	3,253	0,007
122 mm	0,667	3,261	0,008
110 mm	0,673	3,233	0,009
100 mm	0,682	3,470	0,007
92 mm	0,683	3,413	0,008

Tabelle 7-4: Variation des Abstands zwischen den Steigrohren, Kollektorjahresertrag für Würzburg und Materialeinsatz für die Steigrohre

Abstand Steigrohre	Kollektorjahresertrag [kWh] Würzburg, $\vartheta_m = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	Kollektorjahresertrag [kWh] Würzburg, $\vartheta_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$	Kollektorjahresertrag [kWh] Würzburg, $\vartheta_m = 75 \text{ }^\circ\text{C}$	Materialeinsatz Steigrohre [kg] (Kupfer)
157 mm	1464	935	562	2,56
137 mm	1501	964	584	2,93
122 mm	1529	982	592	3,30
110 mm	1546	995	598	3,66
100 mm	1554	989	594	4,02
92 mm	1560	995	595	4,39

Betrachtet man die Wirkungsgradkennlinie beträgt der ideale Abstand zwischen den Steigrohren 100 mm. Eine Verkleinerung dieses Abstands führt zu keiner maßgeblichen Erhöhung der Wirkungsgradkennlinie. Eine Vergrößerung des Abstands zwischen den Steigrohren führt zunächst zu einer Abnahme des Spitzenwirkungsgrads. Bei weiterer Vergrößerung des Abstands zwischen den Steigrohren zeigt sich die Abnahme des Wirkungsgrads auch bei größeren Temperaturdifferenzen. Ab ungefähr den mittleren Temperaturdifferenzen sind die Wirkungsgrade für die Abstände 92 mm, 100 mm und 110 mm nahezu identisch. Dies liegt auch an der Änderung der Strömungsform laminar/turbulent in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl, vgl. Anhang B. Bis einschließlich einem Abstand der Steigrohre von 110 mm ist die Strömung an zwei der vier Stützstellen der virtuellen Leistungsprüfung turbulent. Für die kleineren Abstände (11 und 12 Steigrohre) ist die Strömung nur noch am höchsten Simulationspunkt turbulent. Dieses zeigt sich auch im Kollektorertrag, vgl. Tabelle 7-4. Für mittlere Fluidtemperaturen von 50 °C und 75 °C liegt der Kollektorertrag für einen Abstand von 110 mm gleich bzw. höher als für einen Abstand von 92 mm. Die Differenzen zu den

Kollektorjahresertägen bei Abständen zwischen den Steigrohren von 100 mm bzw. 92 mm sind allerdings so gering (max 0,7 %), dass auch Rundungsfehler und Ungenauigkeiten der Simulation nicht ausgeschlossen werden können. Die Entscheidung für einen Abstand zwischen den Steigrohren ist zusammen mit dem Steigrohrdurchmesser und der dann resultierenden Strömungsform sowie dem Materialeinsatz zu treffen.

Bewertung bzw. Validierung der Ergebnisse:

Das Beispiel zeigt die Eignung des Verfahrens zur Untersuchung praxisrelevanter Fragestellungen mit einer guten Genauigkeit bei geringem Aufwand. Die Wirkungsgradkennlinien zeigen das erwartete Bild. Die durch Simulation erzielten Ergebnisse stimmen mit den Erfahrungswerten der Prüfstelle Solar des IGTE überein.

7.2 Untersuchung der Luftwechselrate

Kollektoren sind in Folge der Witterungsbedingungen starken Temperaturschwankungen ausgesetzt. Eine luftdichte Abdichtung des Kollektorinneren gegenüber der Umgebung über eine gewünschte Lebensdauer von 20-30 Jahren ist technisch anspruchsvoll und kostenintensiv. Flachkollektoren sind daher meist für einen Luftaustausch zwischen Kollektorinnerem und Umgebung ausgelegt. Zur Regulierung des Mikroklimas (Klima im Kollektor) haben Standardflachkollektoren Lüftungsöffnungen. Besonders morgens, wenn der Kollektor warm wird, kann Wasser aus der feuchten Luft im Kollektor an der Innenseite der Kollektorabdeckung kondensieren. Durch einen hinreichend großen Luftaustausch zwischen Kollektor und Umgebung kann gewährleistet werden, dass die in den Kollektor eingetragene Feuchtigkeit diesen wieder verlässt. Andererseits erhöht der Luftaustausch die thermischen Verluste des Kollektors.

Mit dem entwickelten Verfahren der virtuellen Kollektorprüfung kann der Einfluss der Luftwechselrate effizient untersucht werden. Der Einfluss der Luftwechselrate auf die Wirkungsgradkennlinie wird mit einer Designstudie untersucht, als Grundmodell wurde der in der ersten exemplarischen Anwendung beschriebene Kollektor mit 11 Steigrohren verwendet. Die Lüftungsöffnungen sind jeweils oberhalb der Rohrdurchführungen angebracht, vgl. Abbildung 3-2. Der Durchmesser der Lüftungsöffnungen wird in drei Varianten untersucht. Er wird jeweils so angepasst, dass sich der Querschnitt der Lüftungsöffnung verdoppelt. Die Luftwechselrate nimmt ungefähr linear mit der Vergrößerung der Lüftungsöffnung zu, vgl. Tabelle 7-5.

Trotz dieser hohen Luftwechselraten sind die thermischen Verluste gering. Der Spitzenwirkungsgrad bleibt näherungsweise konstant, lediglich bei hohen Temperaturdifferenzen zeigt sich eine geringe Abnahme des Wirkungsgrads bei Vergrößerung der Lüftungsöffnungen, vgl. Abbildung 7-15 und Tabelle 7-6.

Tabelle 7-5: Luftwechselrate in Abhängigkeit des Lüftungsöffnungsquerschnitts und der mittleren Wärmeträgertemperatur

	A = 7,1 mm	A = 14,1 mm	A = 28,3 mm
$\vartheta_m \approx 24 \text{ °C}$	0,7 1/h	1,4 1/h	2,8 1/h
$\vartheta_m \approx 48 \text{ °C}$	1,0 1/h	2,0 1/h	4,0 1/h
$\vartheta_m \approx 73 \text{ °C}$	1,2 1/h	2,4 1/h	4,8 1/h
$\vartheta_m \approx 97 \text{ °C}$	1,3 1/h	2,7 1/h	5,5 1/h

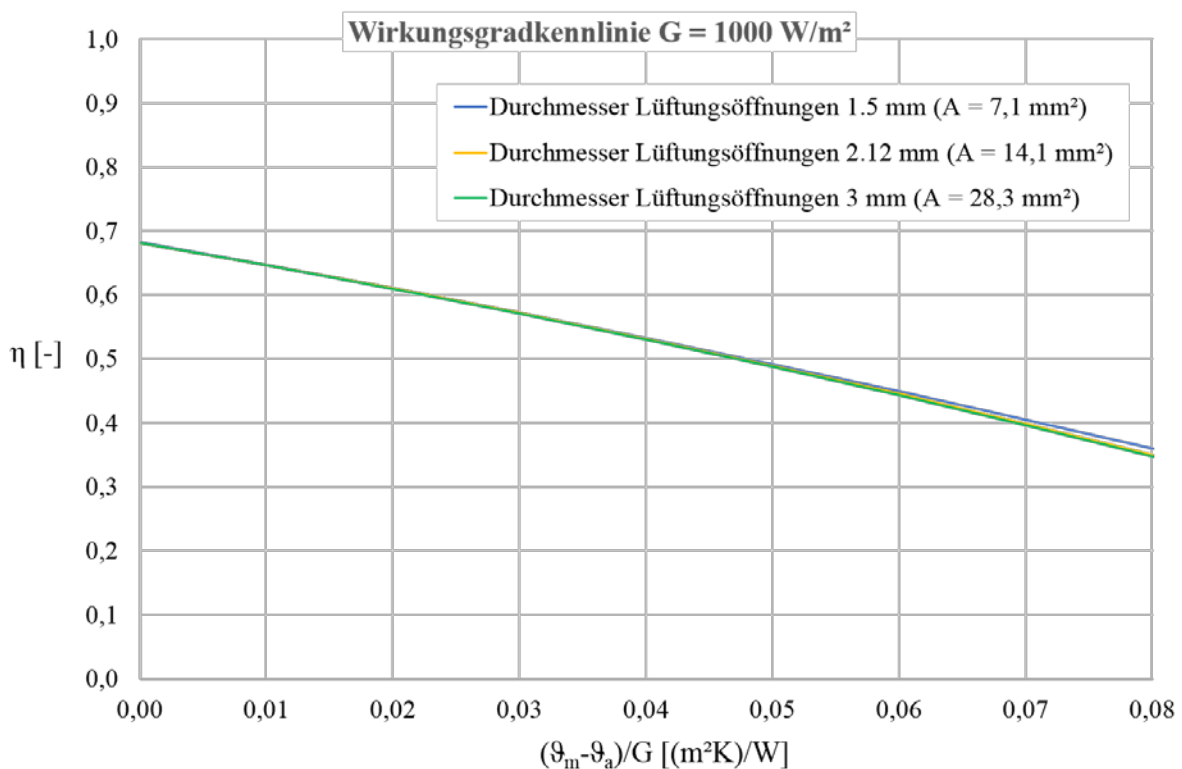


Abbildung 7-15: Wirkungsgradkennlinien: Variation der Luftwechselrate

Tabelle 7-6: Kollektorkennwerte in Abhängigkeit des Lüftungsöffnungsquerschnitts

Querschnitt Lüftungsöffnungen	$\eta_{0,hem}$ [-]	a_1 [W/(m ² K)]	a_2 [W/(m ² K ²)]
A = 7,1 mm ²	0,682	3,470	0,007
A = 14,1 mm ²	0,681	3,336	0,010
A = 28,3 mm ²	0,681	3,374	0,010

Bewertung bzw. Validierung der Ergebnisse:

Zur Validierung der Parameterstudie und zur Untersuchung der Luftströmung zwischen Absorber und transparenter Abdeckung wurde eine PIV (Particle Image Velocimetry) Messeinrichtung aufgebaut, vgl. Abbildung 7-16.

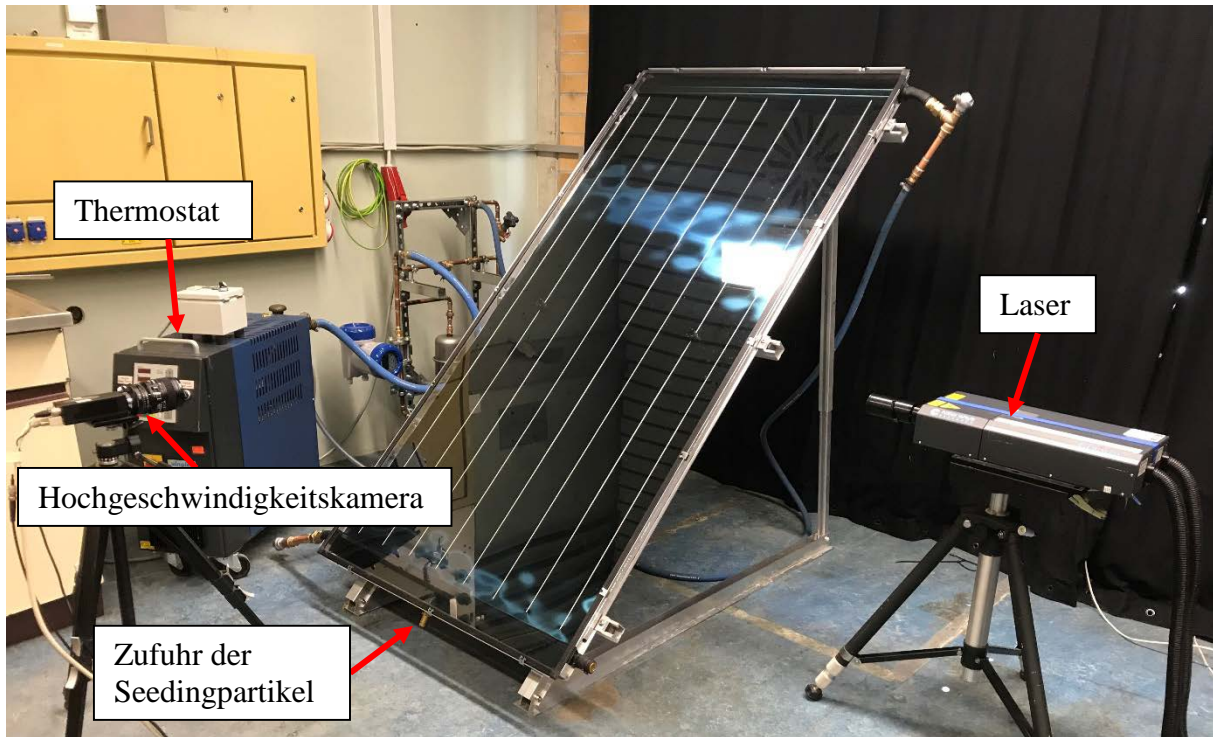


Abbildung 7-16: PIV Messeinrichtung zur Untersuchung der Luftströmung zwischen Absorber und transparenter Abdeckung

PIV ist ein berührungsloses optisches Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern. Eine schematische Darstellung einer PIV Untersuchung zeigt Abbildung 7-17. Der Luftströmung werden Partikel zugegeben, die der Luftströmung schlupffrei folgen. Die Partikel werden mit einem sogenannten Seedinggenerator (vgl. Abbildung 7-21) erzeugt, und unter Druck der Luftströmung zugeführt. Mit einem gepulsten Laser wird eine Strömungsebene beleuchtet. Hierzu wird der Laserstrahl mit einem Objektiv aufgeweitet. Der Laser gibt zwei kurze Lichtimpulse im Abstand weniger Mikrosekunden ab. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera werden während der Lichtimpulse Aufnahmen gemacht. Durch den Versatz der Partikel zwischen den beiden Aufnahmen kann das Geschwindigkeitsfeld berechnet werden.

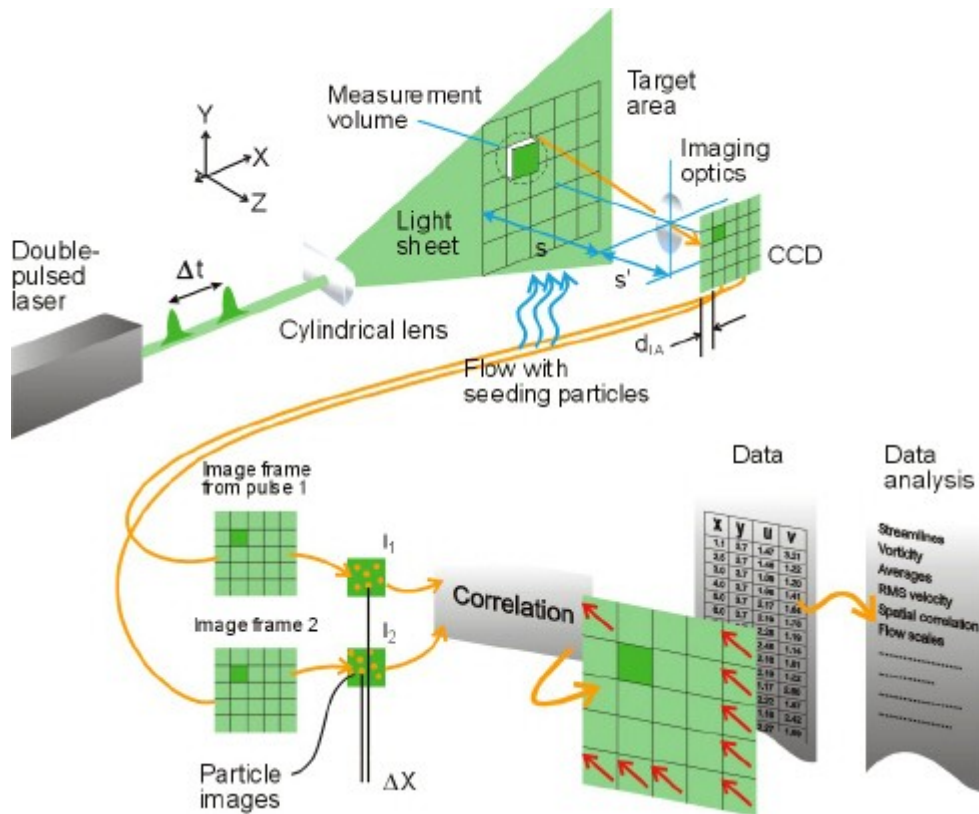


Abbildung 7-17: Schematische Darstellung einer PIV Untersuchung. Quelle:

<https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>

Basierend auf einem am Institut ausgearbeiteten Konzept wurde vom Projektpartner ein Testkollektor gebaut. An den Seitenflächen des Rahmens über die Höhe wurden Plexiglas-scheiben eingesetzt, vgl. Abbildung 7-18. Das aufgeweitete Laserlicht dringt durch das Plexiglas auf der dem Laser zugewandten Seite ein, und verlässt den Kollektor auf der gegenüberliegenden Seite. Da die Seedingpartikel milchige Rückstände hinterlassen, wurde die transparente Abdeckung nur mit Klemmen auf dem Rahmen befestigt. Durch diese lösbare Verbindung kann die Glasscheibe bei Bedarf abgenommen und gereinigt werden.

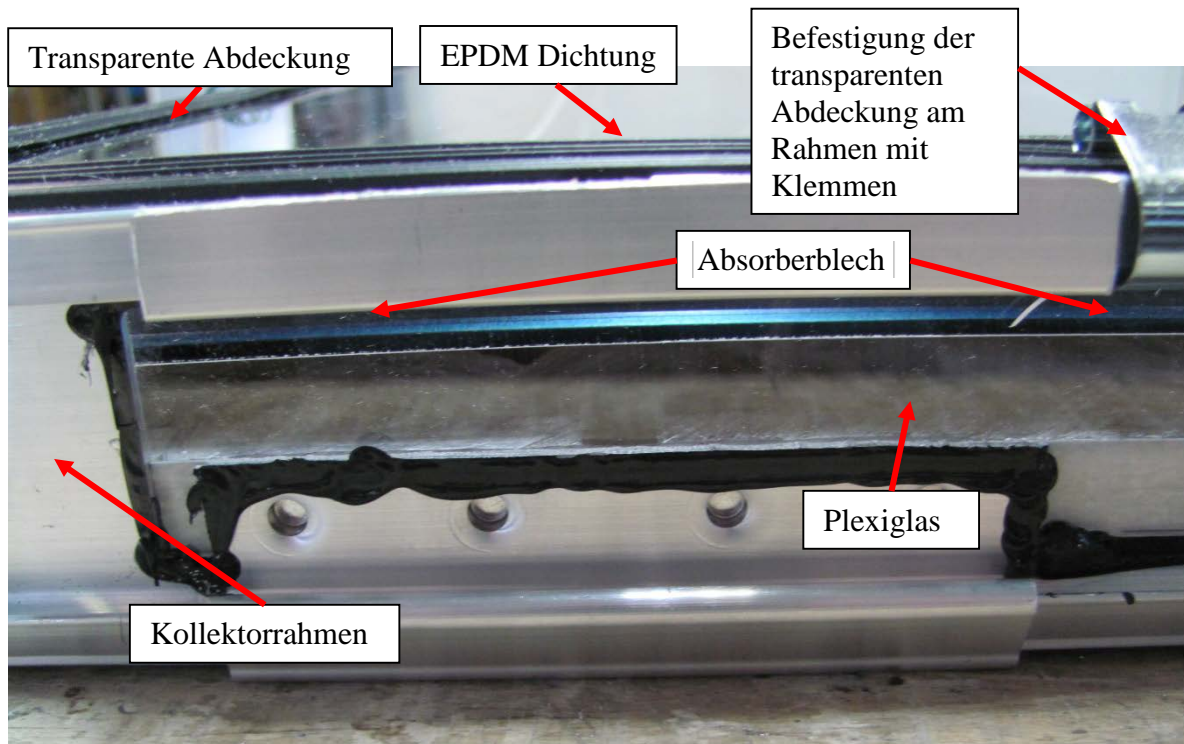


Abbildung 7-18: Testkollektor, Seitenansicht

Zur Anregung der Luftströmung im Zwischenraum zwischen transparenter Abdeckung und Absorber muss der Kollektor beheizt werden. Hierfür wurde ein Thermostat angeschlossen, vgl. Abbildung 7-16. Zur Volumenstromregelung wurde ein Bypass installiert. Die Volumenstrommessung erfolgte mit einem MID (Magnetisch induktiver Durchflussmesser), ein Membranausdehnungsgefäß nimmt die Volumenausdehnung infolge der Temperaturerhöhung auf, vgl. Abbildung 7-19. Die Fluidtemperaturmessung am Ein- und Austritt des Kollektors erfolgte mit PT100, vgl. Abbildung 7-21.

Vor den Messungen musste ein sicherheitsrelevanter Aspekt beachtet werden. Beim Arbeiten mit einem Klasse 4 Laser muss der Laserbereich abgetrennt werden. Daher wurde ein, auf die Laserleistung ausgelegter Schutzvorhang beschafft. Dieser umgibt nun den gesamten Versuchsaufbau und trennt diesen vom restlichen Labor ab. Abbildung 7-20 zeigt den Laserschutzvorhang.

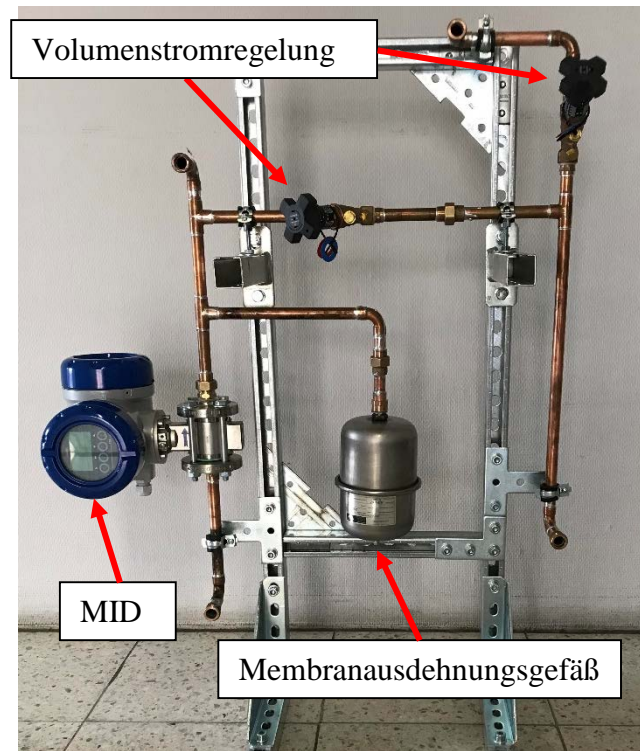


Abbildung 7-19: Volumenstromregelung und -messung

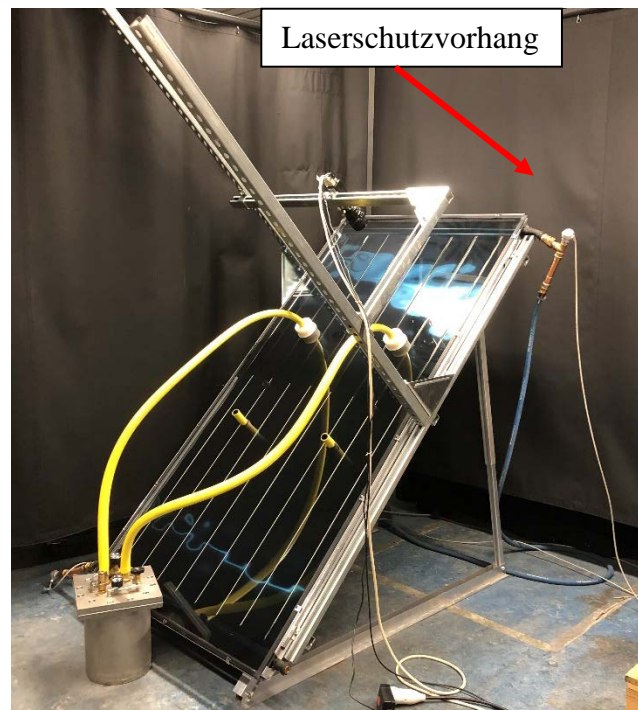


Abbildung 7-20: Laserschutzvorhang

Auf Grundlage einiger Untersuchungen mit der PIV (particle image velocimetry) Mess-einrichtung wurden einige Erweiterungen und Verbesserung des Versuchstandes umgesetzt.

Es hat sich beispielsweise gezeigt, dass beim ursprünglichen Versuchsaufbau – mit Zufuhr der Partikel durch das Gehäuse unten (vgl. Abbildung 7-16) – die Partikel nicht in ausreichender Konzentration im interessierenden, oberen Kollektordrittel ankommen. Der Versuchsaufbau wurde daraufhin modifiziert, so dass die Partikel nun auf verschiedenen Höhen, direkt durch die Glasscheibe in den Zwischenraum zwischen Absorber und Glasabdeckung eingebracht werden.

Für einen senkrechten Blick der Hochgeschwindigkeitskamera auf den Kollektor, war beim ursprünglichen Versuchsaufbau der Abstand zwischen Kollektor und Kamera sehr hoch. Dies führte dazu, dass die Auflösung der einzelnen Partikel nicht ausreichend war. Der Versuchsaufbau wurde mit einem direkt am Kollektor befestigten Gestell erweitert. Die Hochgeschwindigkeitskamera wurde an diesem Gestell montiert, so dass der Abstand der Kamera vom Kollektor, sowie die Höhe der Kamera bezüglich der Kollektorlänge, unabhängig vom Kollektorneigungswinkel stufenlos verstellbar ist, vgl. Abbildung 7-21.

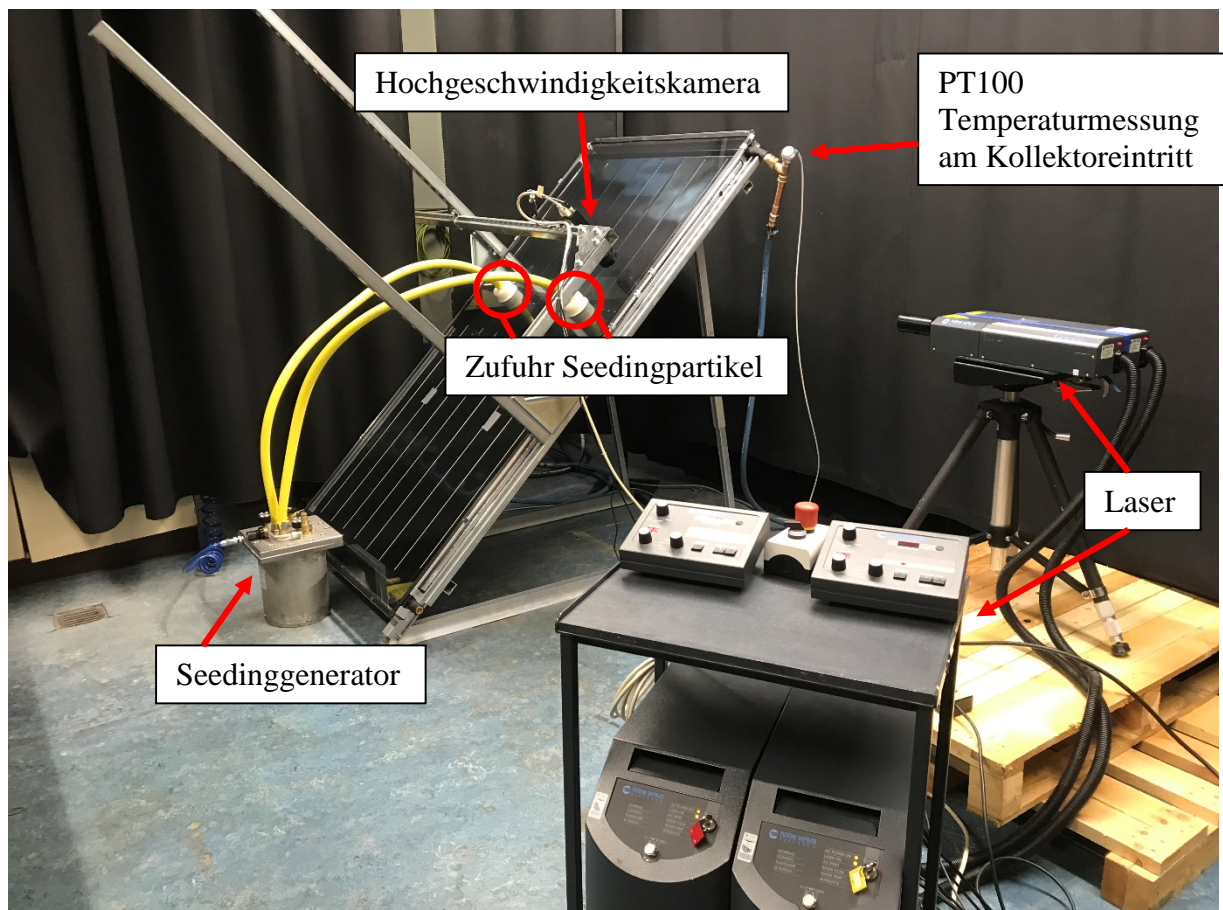


Abbildung 7-21: PIV Messeinrichtung zur Untersuchung der Luftströmung zwischen Absorber und transparenter Abdeckung

Weitere Probleme ergaben sich durch Reflexionen des Laserlichts an den Schweißnähten sowie am Kollektorrahmen innen, auf der dem Lasereintritt gegenüberliegenden Seite. Dieses Problem konnte reduziert werden, in dem die Schweißnähte sowie der Kollektorrahmen an den entsprechenden Stellen mit einem schwarzen Klebeband abgeklebt wurde. Weitere Probleme durch die Bewegungen bzw. Verformungen des Absorbers infolge von Temperaturänderungen konnten in der Projektlaufzeit nicht gelöst werden.

Die Partikel werden mit dem Seedinggenerator erzeugt und unter Druck der Luftströmung zugeführt. Es entsteht ein Nebel. Die Partikel haben bereits durch das Einbringen in die Luftströmung eine Geschwindigkeit. Es wäre notwendig einige Zeit abzuwarten, bis die Partikel zunächst zur Ruhe kommen, bzw. der durch Dichteunterschiede der Luft entstehenden Luftströmung folgen. Allerdings verflüchtigt sich der Seedingnebel innerhalb einiger Sekunden, bzw. entweicht durch kleinste Öffnungen zwischen Rahmen und Abdeckung – die aufgrund der notwendigen, regelmäßigen Reinigung der transparenten Abdeckung lediglich mit Klemmen verbunden sind. Das Austreten des Seedingnebels aus den Lüftungsöffnungen, aber auch zwischen Rahmen und Abdeckung zeigt Abbildung 7-22.

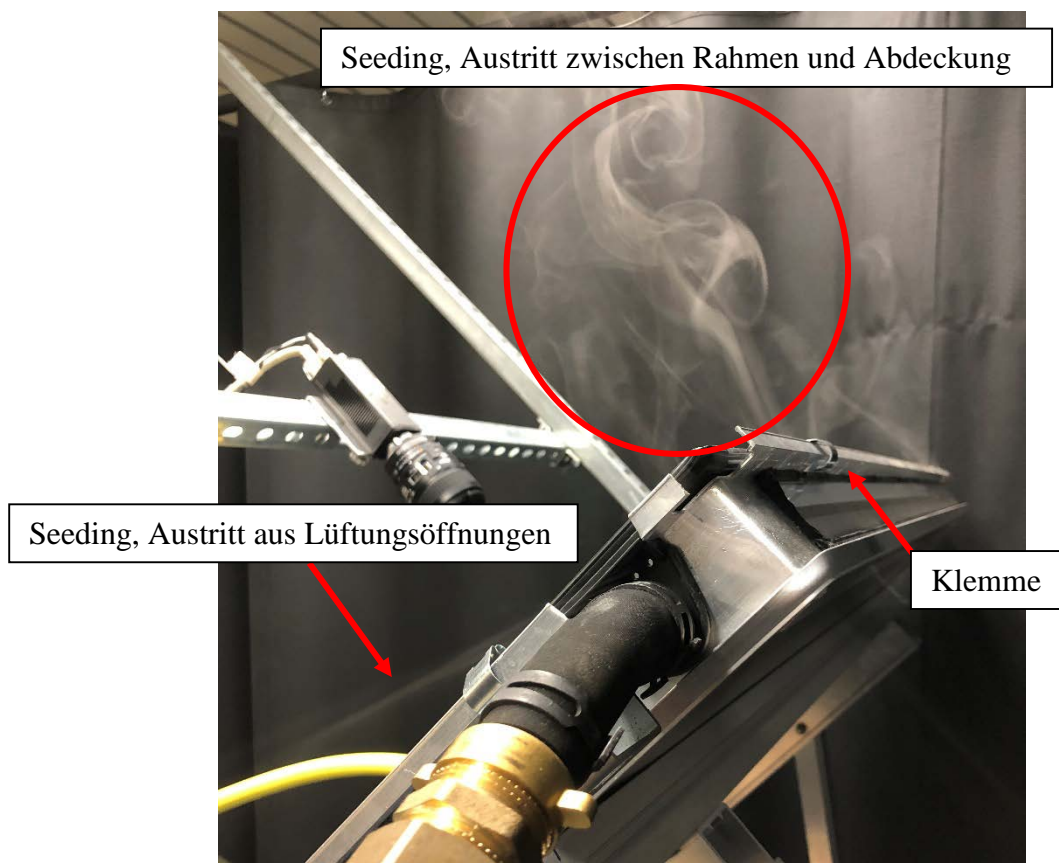


Abbildung 7-22: Austritt des Seedings aus den Lüftungsöffnungen und zwischen Rahmen und Abdeckung

Innerhalb des Projekts konnte keine geeignete Methode zur Einbringung des Seedings entwickelt werden, die eine Messung der Luftgeschwindigkeit im Kollektor aufgrund der Dichteunterschiede erlaubt. Eine Validierung der Luftströmung durch Messungen mit der PIV Messeinrichtung konnte daher nicht erfolgen. Die Untersuchung der Luftwechselrate erfolgte rein simulativ.

7.3 Variation des Volumenstroms

Sofern nicht anders festgelegt, wird eine thermische Leistungsprüfung nach ISO 9806 mit einem Massenstrom von etwa 0,02 kg/s bzw. einem Volumenstrom von ca. 72 l/h durchgeführt. Als Wärmeträgerfluid wird Wasser verwendet. Im Rahmen der Prüfungen kommt immer wieder die Frage über den Einfluss des Volumenstroms auf die charakteristischen Kollektorkennwerte und damit auf die Wirkungsgradkennlinie und den Kollektorjahresertrag auf. Dieser Einfluss wurde nun virtuell untersucht. Als Kollektormodell wurde der in der ersten exemplarischen Anwendung beschriebene Kollektor mit 11 Steigrohren verwendet. Die charakteristischen Kollektorkennwerte wurden für Volumenströme von 15 l/h, 35 l/h, 72 l/h, 150 l/h und 300 l/h bestimmt. Durch die Variation des Volumenstroms ändert sich die Reynolds-Zahl der Fluidströmung. Entsprechend der Reynolds-Zahl wurde das laminare Strömungsmodell ($Re < 2300$), bzw. das k - ε -Turbulenzmodell für $Re > 2300$ verwendet. Die Reynolds-Zahlen der Simulationen zeigt Anhang C. Die charakteristischen Kollektorkennwerte sowie den Kollektorjahresertrag für Würzburg bei einer mittleren Wärmeträgertemperatur von $\vartheta_m = 50$ °C zeigt Tabelle 7-7. Die Wirkungsgradkennlinien zeigt Abbildung 7-23. Durch eine Vergrößerung des Normvolumenstroms von 72 l/h auf 150 l/h verbessert sich der Spitzenwirkungsgrad um lediglich 0,8 %-Punkte auf 0,690. Eine weitere Verdopplung des Volumenstroms auf 300 l/h führt zu keiner weiteren Verbesserung. Eine Verringerung des Volumenstroms auf 35 l/h bzw. 15 l/h führt zu einer Verringerung des Spitzenwirkungsgrads auf 0,674 bzw. 0,669.

Tabelle 7-7: Variation des Volumenstroms, Kollektorkennwerte und Kollektorjahresertrag für Würzburg bei $\vartheta_m = 50$ °C

Volumenstrom [l/h]	$\eta_{0,hem}$ [-]	a_1 [W/(m ² K)]	a_2 [W/(m ² K ²)]	Kollektorjahresertrag [kWh] Würzburg, $\vartheta_m = 50$ °C
15	0,669	3,481	0,007	963
35	0,674	3,344	0,009	979
72	0,682	3,470	0,007	989
150	0,690	3,329	0,010	1013
300	0,690	3,271	0,011	1010

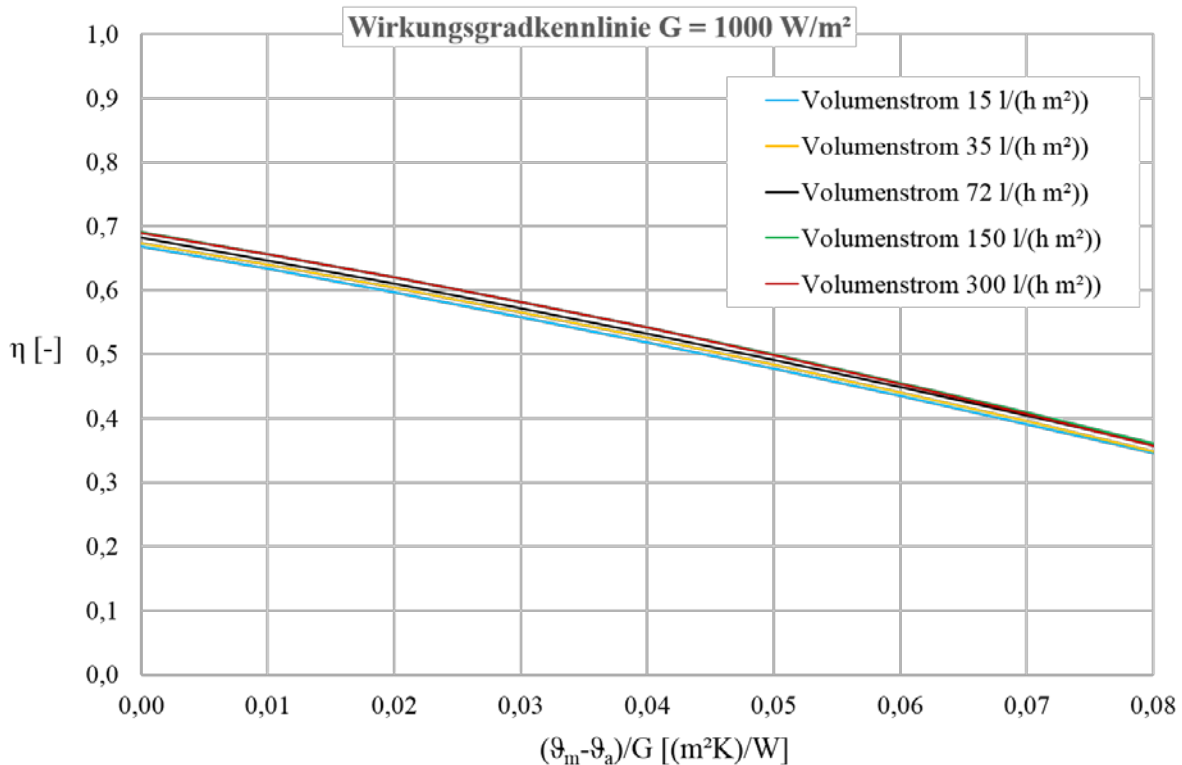


Abbildung 7-23: Wirkungsgradkennlinien: Variation des Volumenstroms

Bewertung bzw. Validierung der Ergebnisse:

Die durch Simulation erzielten Ergebnisse stimmen mit den Erfahrungswerten der Prüfstelle Solar des IGTE überein.

7.4 Variation der Absorberblechdicke

Im Zuge von Kosten- und Gewichtseinsparungen wurden die Absorberblechdicken bei der Kollektorentwicklung stetig reduziert. Den Einfluss der Absorberblechdicke wurde ebenfalls im Rahmen einer Design Studie untersucht. Basierend auf dem Standardkollektor mit Harfenabsorbers und 11 Steigrohren wurden Absorberblechdicken von 0,2 mm– 0,5 mm virtuell untersucht. Die Wirkungsgradkennlinien zeigt Abbildung 7-24, die Kollektorkennwerte sowie der Kollektorjahresertrag in Würzburg bei $\vartheta_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ zeigt Tabelle 7-8. Eine Reduzierung der Absorberblechdicke von 0,5 mm auf 0,4 mm wirkt sich in geringem Maße auf den Spitzenwirkungsgrad aus. Bei höheren Temperaturdifferenzen nähern sich die Wirkungsgradkennlinien an. Die weitere Reduzierung auf 0,3 mm Absorberblechdicke zeigt sich in geringem Maße mit einer Abnahme über die gesamte Wirkungsgradkennlinie. Die Wirkungsgradkennlinie für eine Absorberblechdicke von 0,2 mm liegt nochmals deutlich darunter.

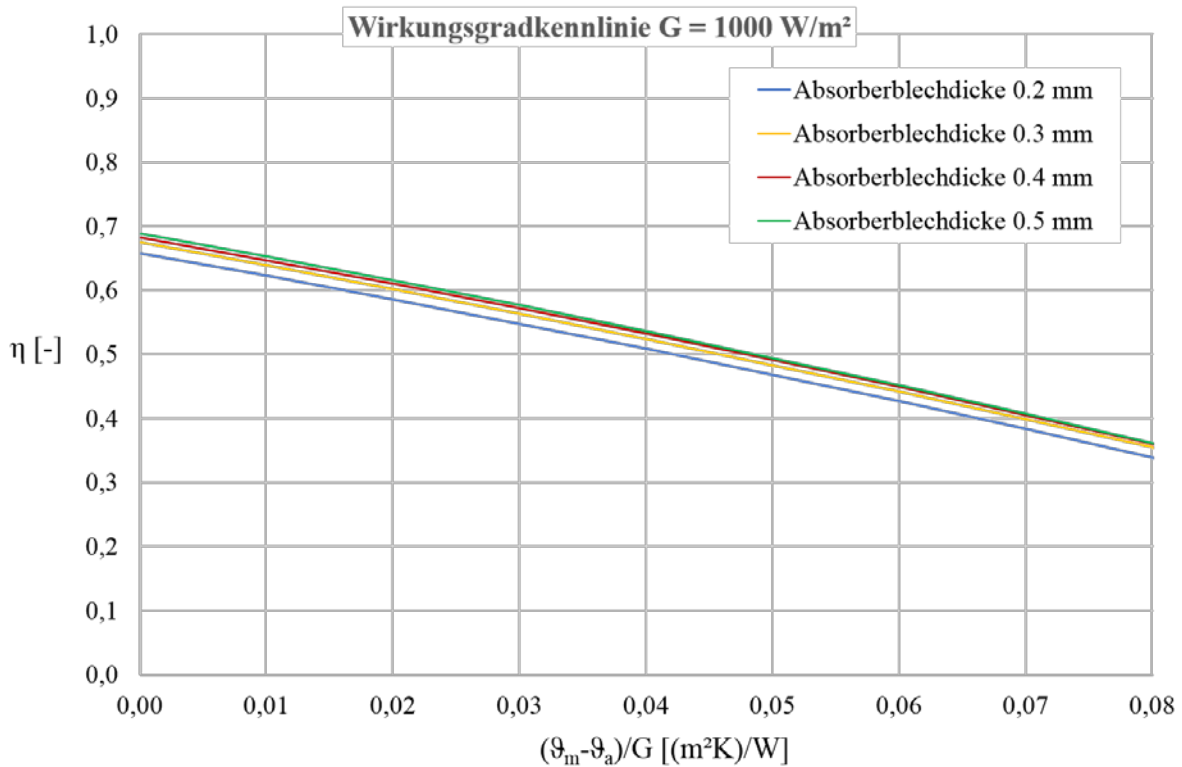


Abbildung 7-24: Wirkungsgradkennlinien: Variation der Absorberblechdicke

Tabelle 7-8: Variation der Absorberblechdicke, Kollektorkennwerte und Kollektorjahresertrag für Würzburg bei $\vartheta_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

Absorberblechdicke [mm]	$\eta_{0,hem}$ [-]	a_1 [W/(m ² K)]	a_2 [W/(m ² K ²)]	Kollektorjahresertrag [kWh] Würzburg, $\vartheta_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$	Materialeinsatz Absorberblech [kg] (Aluminium)
0,2	0,658	3,503	0,006	937	1,26
0,3	0,675	3,595	0,005	964	1,89
0,4	0,682	3,470	0,007	989	2,52
0,5	0,689	3,445	0,007	993	3,15

Bewertung bzw. Validierung der Ergebnisse:

Die durch Simulation erzielten Ergebnisse stimmen mit den Erfahrungswerten der Prüfstelle Solar des IGTE überein.

7.5 Variation der Steigrohrdurchmesser

Eine weitere Design Studie wurde zur Untersuchung der Auswirkung der Steigrohrdurchmesser durchgeführt. Es wurden Steigrohrinnendurchmesser von 7,2 mm, 9,2 mm und 11,2 mm untersucht. Die Variation der Innendurchmesser führt wieder zur Änderung der Strömungsgeschwindigkeit und damit der Reynolds-Zahl, vgl. Anhang D. Die Wirkungsgradkennlinien unterscheiden sich im Spitzenwirkungsgrad deutlich um 3,3 %-Punkte, vgl. Tabelle 7-9. Bei höheren Temperaturdifferenzen nimmt der Einfluss des Steigrohrdurchmessers ab, vgl. Abbildung 7-25.

Tabelle 7-9: Variation des Steigrohrdurchmessers, Kollektorkennwerte

Innendurchmesser [mm]	$\eta_{0,hem}$ [-]	a_1 [W/(m ² K)]	a_2 [W/(m ² K ²)]
7,2	0,682	3,470	0,007
9,2	0,665	2,996	0,011
11,2	0,649	2,610	0,015

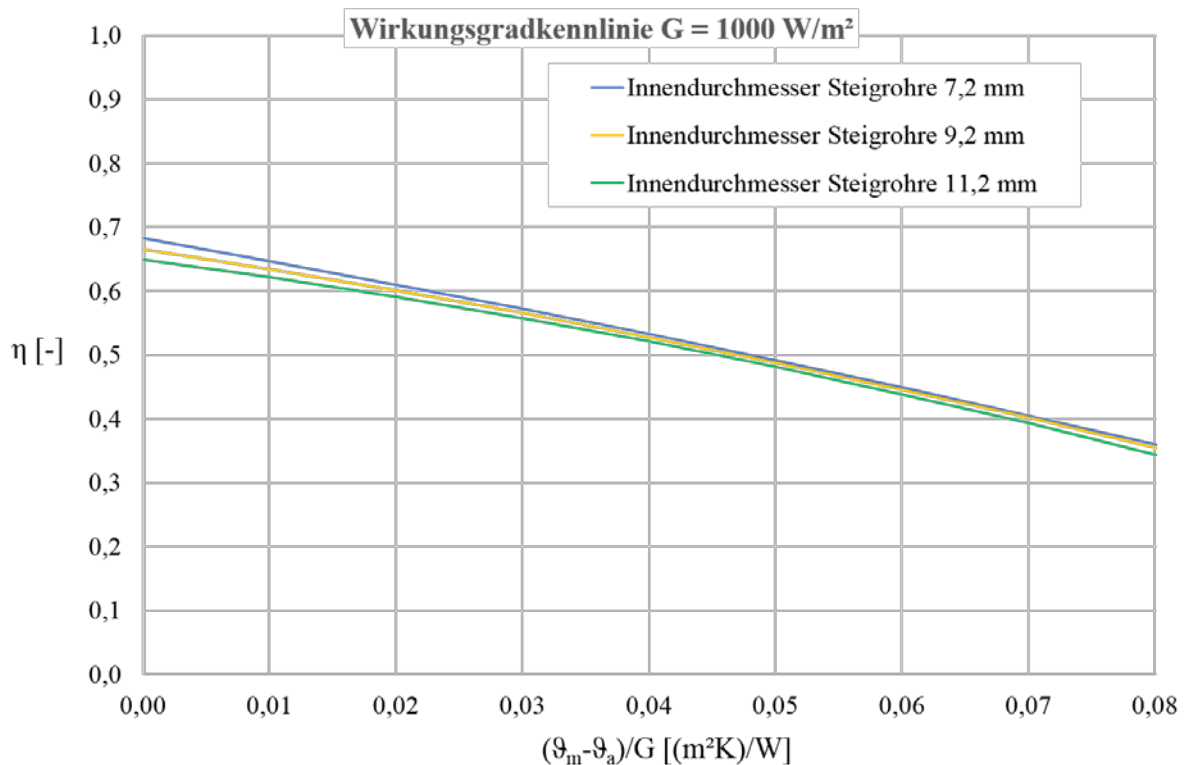


Abbildung 7-25: Wirkungsgradkennlinien: Variation des Steigrohrdurchmessers

Die Kollektorjahreserträge für Würzburg zeigt Tabelle 7-10.

Tabelle 7-10: Variation des Steigrohrdurchmessers, Kollektorserträge Würzburg

Innendurchmesser [mm]	Kollektorjahresertrag [kWh] Würzburg, $\vartheta_m = 25 \text{ °C}$	Kollektorjahresertrag [kWh] Würzburg, $\vartheta_m = 50 \text{ °C}$	Kollektorjahresertrag [kWh] Würzburg, $\vartheta_m = 75 \text{ °C}$
7,2	1554	989	594
9,2	1533	997	600
11,2	1517	1002	597

Bewertung bzw. Validierung der Ergebnisse:

Die durch Simulation erzielten Wirkungsgradkennlinien stimmen mit den Erfahrungswerten der Prüfstelle Solar des IGTE überein.

7.6 Fazit

Das entwickelte Verfahren eignet sich sehr gut zur Untersuchung praxisrelevanter Fragestellungen. In diesem Arbeitspaket wurden Design Studien sowohl hinsichtlich geometrischer Änderungen als auch hinsichtlich Änderungen der Betriebsbedingungen durchgeführt. Ebenfalls schnell umzusetzen sind Änderungen der Material- und Oberflächeneigenschaften. Die Implementierung der einzelnen Variationen erforderte jeweils nur wenige Minuten. Die Berechnungsdauer einzelner Wirkungsgradkennlinien wenige Stunden. Das entwickelte Verfahren ermöglicht somit schnelle und kosteneffiziente Parameterstudien sobald der zu untersuchende Kollektor im CFD Programm aufgebaut ist.

Kleinere Ungenauigkeiten treten bei der Berechnung der Kollektorjahreserträge auf. Unterschiede der Kollektorjahreserträge in der Größenordnung von $\pm 1\%$ werden nicht zuverlässig berechnet.

8. Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit (AP 7)

Zur erfolgreichen Realisierung des Vorhabens und dem Austausch mit dem Projektpartner wurden Projekttreffen und eine Telefonkonferenz durchgeführt. Zu Beginn des Projekts wurde ein offener Industrieworkshop angeboten und durchgeführt, um die Industrie über das geplante Werkzeug zu informieren und Wünsche hinsichtlich des Funktionsumfangs abzufragen. Zum Ende des Projekts wurde ein offener Abschlussworkshop inkl. Webzugang angeboten und durchgeführt. Hier wurde das entwickelte Werkzeug vorgestellt. Eine Auflistung der Treffen und Workshops ist in den Abschnitten 8.1 Projektkoordination und 8.2 Öffentlichkeitsarbeit aufgeführt.

8.1 Projektkoordination

1. Projekttreffen (Kick-Off Meeting) am 30.04.2015 in Stuttgart
2. Projekttreffen am 04.08.2015 in Wettringen
3. Telefonkonferenz am 12.08.2016
4. Projekttreffen am 06.02.2017 in Stuttgart
5. Projekttreffen am 21.09.2017 in Wettringen
6. Projekttreffen am 05.04.2018 in Stuttgart
7. Projekttreffen (Abschlusstreffen) am 07.05.2019 in Stuttgart und per Webzugang

Die Inhalte der Projekttreffen wurden protokollarisch dokumentiert und im Nachgang an den Projektpartner übermittelt.

8.2 Öffentlichkeitsarbeit

Zu Beginn und am Ende des Projekts wurde jeweils ein Workshop angeboten, zu dem die Solarverbände BSW und BDH sowie Kollektorhersteller eingeladen wurden.

1. Offener Industrieworkshop am 09.04.2015 in Stuttgart
2. Offener Abschlussworkshop am 07.05.2019 in Stuttgart und per Webzugang

Ausgewählte Projektergebnisse wurden in folgenden Fach- und Konferenzbeiträgen vorgestellt:

- Vortrag und Veröffentlichung beim 27. Symposium Thermische Solarenergie im Kloster Banz in Bad Staffelstein im Mai 2017, Titel „VirtColl+ - erste Schritte zu einem CFD basierten Entwicklungs- und Optimierungswerkzeug für Flachkollektoren“ (Vetter et al. 2017)

- Posterbeitrag und Veröffentlichung bei der EuroSun 2018, 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, in Rapperswill im September 2018, Titel: „CFD based development, testing and optimization of flat plate collectors“ (Vetter et al. 2018)
- Posterbeitrag und Veröffentlichung beim Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“ im Kloster Banz in Bad Staffelstein im Mai 2019, Titel „VirtColl+ - Das CFD basierte Entwicklungs- und Optimierungswerkzeug für Flachkollektoren“ (Vetter et al. 2019)

9. Zusammenfassung

Das Ziel des Projekts VirtColl+ bestand in der Entwicklung eines Entwicklungs- und Optimierungsverfahrens für Flachkollektoren, basierend auf den physikalischen Vorgängen im und am Flachkollektor mit Hilfe von Strömungssimulationen. Außerdem sollte eine Bauteilbibliothek erstellt werden, die es ermöglichen soll verschiedene sich Flachkollektoren individuell zusammen zu stellen.

Im Rahmen des Projekts wurden parametrisierte CAD-Kollektormodelle für die gängigsten Durchströmungsformen Harfe, Mäander und Doppelmäander entwickelt. Die Parametrisierung ermöglicht es hinsichtlich der Geometrie individuelle Flachkollektormodelle zu erstellen. Die parametrisierten CAD-Modelle wurden so erstellt, dass die für CFD Simulationen notwendige Aufbereitung der CAD Daten auch nach geometrischen Änderungen weiterhin gewährleistet ist. Es wurde eine effiziente Vorgehensweise zur Generierung der Berechnungsgitter entwickelt. An Stellen hoher Gradienten wird das Berechnungsgitter lokal verfeinert, während beispielsweise der Kollektorrahmen relativ grob vernetzt wird. Im nächsten Schritt wurde die physikalische Modellierung, vor allem hinsichtlich Strahlung und Konvektion erstellt, um das physikalische Verhalten des Kollektors in Abhängigkeit der Umgebungs- und Betriebsbedingungen in guter Näherung nachzubilden.

Basierend auf der DIN EN 9806 wurde ein virtuelles Prüfverfahren entwickelt. Das virtuelle Prüfverfahren ermöglicht es die charakteristischen Kollektorkennwerte aus den Simulationen zu identifizieren, und damit die Wirkungsgradkennlinie bzw. die thermische Leistungsfähigkeit sowie den Kollektorjahresertrag zu berechnen. Gemeinsam mit dem parametrisierten Aufbau der CAD-Kollektormodelle ist es nun möglich Parameterstudien innerhalb kürzester Zeit durchzuführen. Ein Prototyp muss somit erst am Ende des Entwicklungsprozesses gebaut und experimentell geprüft werden. Die Produktneu- und Weiterentwicklung kann damit bei reduzierten Kosten deutlich beschleunigt werden.

Die Validierung der Simulationen erfolgte mit Messungen an zwei Serienprodukten anhand der Bauteiltemperaturen, der Wirkungsgradkennlinien und des Kollektorjahresertrags. Es wurde eine sehr gute bis gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulationen erreicht. Mit dem entwickelten Verfahren ist es nun möglich, Neu- und Weiterentwicklungen von Flachkollektoren zunächst rein virtuell durchzuführen. Erst wenn die Ergebnisse der der Simulationen zufriedenstellend sind muss ein Prototyp experimentell geprüft werden.

10. Danksagung

Das Projekt VirtColl+ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 0325556A gefördert. Die Bosch Solarthermie GmbH hat sich als Projektpartner beteiligt. Die Autorinnen und Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.

11. Literaturverzeichnis

Duffie, John A.; Beckman, William A. (2013): Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Krischer, Otto; Kast, Werner (1992): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Korrigierter und ergänzter Nachdruck der dritten, neubearbeiteten Aufl. Berlin [etc.]: Springer (Trocknungstechnik, Band 1 ED. 3 REPRINT).

Sartori, Ernani (2006): Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces. In: *Solar Energy* 80 (9), S. 1063–1071. DOI: 10.1016/j.solener.2005.11.001.

ScenoCalc. Solar Collector Energy Output Calculator. Online verfügbar unter <https://www.sp.se/en/index/services/solar/ScenoCalc/Sidor/default.aspx>.

DIN EN ISO 9806, Juni 2014: Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren. STAR CCM+ (Hg.): Theory Guide.

Vetter, Beate; Fischer, Stephan; Drück, Harald (2017): VirtColl+ Erste Schritte zu einem CFD basierten Entwicklungs- und Optimierungswerkzeug für Flachkollektoren. In: *Tagungsband zum 27. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Kloster Banz, Deutschland*.

Vetter, Beate; Fischer, Stephan; Drück, Harald (2018): CFD based development, testing and optimization of flat plate collectors. In: *Tagungsband zur EuroSun 2018, 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, Rapperswill, Schweiz*.

Vetter, Beate; Fischer, Stephan; Drück, Harald (2019): VirtColl+ - Das CFD basierte Entwicklungs- und Optimierungswerkzeug für Flachkollektoren. In: *1. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, Bad Staffelstein, Kloster Banz, Deutschland*.

Vetter, Beate; Kofler, Philipp; Fischer, Stephan; Drück, Harald (2015): Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmmaterialien für Sonnenkollektoren. In: *Tagungsband zum 25. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Kloster Banz, Deutschland*.

Anhang

Anhang A

AP6 Exemplarische Anwendungen: Design Parameter des Standardkollektors (Grundmodell)

Design Parameter	Größe (Quelle)
Abdeckung_Dicke	3,2 mm (Sensitivitätsanalyse)
Absorberblech_Breite	1100 mm (Annahme, $A_{\text{Absorber}} = 2,332 \text{ m}^2$)
Absorberblech_Laenge	2120 mm (Annahme, $A_{\text{Absorber}} = 2,332 \text{ m}^2$)
Aperturbreite	1100mm (Annahme, $A_{\text{Apertur}} \equiv A_{\text{Absorber}}$)
Aperturlaenge	2120 mm (Annahme, $A_{\text{Apertur}} \equiv A_{\text{Absorber}}$)
Dichtung	2 mm (Annahme)
Lueftungsoeffnungen_Abstand_Sammlerrohr	25 mm (Annahme)
Lueftungsoeffnungen_Abstand_Untereinander	7 mm (Annahme)
Lueftungsoeffnungen_Radius	1,5 mm (Annahme)
Neigungswinkel	45° (Annahme)
Rahmen_Breite	1150 mm ($A_{\text{Brutto}} \equiv 2,51 \text{ m}^2$) ¹⁾
Rahmen_Hoehe	72,8 mm ($H_{\text{Brutto}} \equiv 80 \text{ mm}$) ²⁾
Rahmen_Laenge	2170 mm ($A_{\text{Brutto}} \equiv 2,51 \text{ m}^2$) ³⁾
Rahmen_Wandstaerke	1,5 mm (Annahme)
Sammlerrohr_Abstand_Boden_Unterseite	31,38 mm (Dicke Wärmedämmung $\equiv 40 \text{ mm}$) ⁴⁾
Sammlerrohr_Laenge	1160mm
Sammlerrohr_Radius	9 mm (Sensitivitätsanalyse)
Sammlerrohre_Abstand	2000 mm (Annahme)
Schweissnaht_Breite	2 mm (Annahme)
Schweissnaht_Laenge	1900 mm (Annahme)
Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_horizontal	80 mm (entspricht 100 mm Abstand zwischen den Steigrohren und 50 mm zum Absorberrand) ⁵⁾
Steigrohr_Abstand_Sammlerrohr_vertikal	6 mm (Annahme: Sammlerrohre ohne Kontakt zum Absorberblech, Abstand 0,5 mm)
Steigrohr_Anzahl	11 (entspricht 100 mm Abstand zwischen den Steigrohren und 50 mm zum Absorberrand)
Steigrohr_Radius	4 mm (Sensitivitätsanalyse)
Steigrohr_Wandstraerke	0,4 mm (Sensitivitätsanalyse)

Zu¹): $\text{Rahmen}_{\text{Breite}} = \text{Bruttobreite} - 2 * \text{Dichtung}$ (vgl. Abbildung 3-4)

Zu²): $\text{Rahmen}_{\text{Hoehe}} = \text{Bruttohoehe} - (2 * \text{Dichtung} + \text{Abdeckung}_{\text{Dichtung}})$

Zu³): $\text{Rahmen}_{\text{Laenge}} = \text{Bruttolaenge} - 2 * \text{Dichtung}$

Zu⁴):

Wärmedämmung Dicke

$$= \left(\text{Steigrohr}_{\text{Abstand}_{\text{sammlerrohr}_{\text{vertikal}}} \right) + \sqrt{(\text{Steigrohr}_{\text{Radius}})^2 - \left(\frac{\text{Schweissnaht}_{\text{Breite}}}{2} \right)^2} + \text{Sammlerrohr}_{\text{Abstand}_{\text{Boden}_{\text{Unterseite}}} - \text{Rahmen}_{\text{Wandstärke}}$$

Zu⁵):

Abstand zwischen den Steigrohren

$$= \frac{(\text{Sammlerrohre}_{\text{Laenge}}) - 2 * (\text{Steigrohr}_{\text{Abstand}_{\text{sammlerrohr}_{\text{horizontal}}})}{(\text{Steigrohr}_{\text{Anzahl}}) - 1}$$

Anhang B

AP6 Exemplarische Anwendungen: Variation des Abstands zwischen den Steigrohren bzw. deren Anzahl

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	7			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0071			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Temperatur [°C]	2,49E+01	4,92E+01	7,28E+01	9,71E+01
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	9,88E+02	9,76E+02	9,60E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,98E-04	5,58E-04	3,88E-04	2,93E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	1,76E-01	1,77E-01	1,80E-01	1,83E-01
Reynolds-Zahl	1407	2262	3255	4313

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	8			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0063			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Temperatur [°C]	2,50E+01	4,93E+01	7,29E+01	9,71E+01
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	9,88E+02	9,76E+02	9,60E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,96E-04	5,57E-04	3,88E-04	2,93E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	1,54E-01	1,55E-01	1,57E-01	1,60E-01
Reynolds-Zahl	1233	1983	2851	3778

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	9			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0056			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Temperatur [°C]	2,50E+01	4,93E+01	7,29E+01	9,72E+01
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	9,88E+02	9,76E+02	9,60E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,95E-04	5,57E-04	3,87E-04	2,92E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	1,37E-01	1,38E-01	1,40E-01	1,42E-01
Reynolds-Zahl	1098	1764	2536	3360

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	10			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0050			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	71	95
Mittlere Temperatur [°C]	2,51E+01	4,94E+01	7,40E+01	9,72E+01
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	9,88E+02	9,75E+02	9,60E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,94E-04	5,56E-04	3,82E-04	2,92E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	1,23E-01	1,24E-01	1,26E-01	1,28E-01
Reynolds-Zahl	989	1589	2313	3026

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0045			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Temperatur [°C]	2,51E+01	49,44	73,68	97,28
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	988,3	975,6	960,3
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,93E-04	5,56E-04	3,84E-04	2,92E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	1,12E-01	1,13E-01	1,14E-01	1,16E-01
Reynolds-Zahl	900	1446	2093	2751

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	12			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0042			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Temperatur [°C]	2,51E+01	4,95E+01	7,37E+01	9,73E+01
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	9,88E+02	9,76E+02	9,60E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,93E-04	5,56E-04	3,84E-04	2,92E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	1,03E-01	1,04E-01	1,05E-01	1,07E-01
Reynolds-Zahl	825	1326	1920	2523

Anhang C

AP6 Exemplarische Anwendungen: Variation des Volumenstroms

Volumenstrom [l/h]	15			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0009			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Fluidtemperatur [°C]	3,98E+01	6,20E+01	8,38E+01	1,05E+02
Dichte [kg/m ³]	9,92E+02	6,20E+01	9,69E+02	9,59E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	6,95E-04	4,66E-04	3,44E-04	2,87E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	2,25E-02	3,60E-01	2,30E-02	2,33E-02
Reynolds-Zahl	231	345	467	560

Volumenstrom [l/h]	35			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0022			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Fluidtemperatur [°C]	2,94E+01	5,31E+01	7,67E+01	3,71E-04
Dichte [kg/m ³]	2,94E+01	9,87E+02	9,74E+02	9,60E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,23E-04	5,25E-04	3,71E-04	2,88E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	1,82E+00	5,43E-02	5,50E-02	5,58E-02
Reynolds-Zahl	469	735	1040	1337

Volumenstrom [l/h]	72			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0045			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Fluidtemperatur [°C]	2,51E+01	49,44	73,68	97,28
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	988,3	975,6	960,3
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,93E-04	5,56E-04	3,84E-04	2,92E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	1,12E-01	1,13E-01	1,14E-01	1,16E-01
Reynolds-Zahl	900	1446	2093	2751

Volumenstrom [l/h]	150			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0095			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Fluidtemperatur [°C]	2,28E+01	4,68E+01	7,15E+01	9,61E+01
Dichte [kg/m ³]	9,98E+02	9,89E+02	9,77E+02	9,61E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	9,38E-04	5,80E-04	3,95E-04	2,97E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	2,35E-01	2,37E-01	2,40E-01	2,44E-01
Reynolds-Zahl	1800	2909	4278	5684

Volumenstrom [l/h]	300			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0190			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Fluidtemperatur [°C]	2,11E+01	4,59E+01	7,08E+01	9,56E+01
Dichte [kg/m ³]	2,11E+01	9,90E+02	9,77E+02	9,62E+02
Dynamische Viskosität [kg/(m s)]	9,75E-04	5,89E-04	3,98E-04	2,99E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	2,21E+01	4,71E-01	4,77E-01	4,85E-01
Reynolds-Zahl	3446	5702	8434	11232

Anhang D

AP6 Exemplarische Anwendungen: Variation des Steigrohrdurchmessers

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0045			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0072			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	4,07E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Fluidtemperatur [°C]	2,51E+01	49,44	73,68	97,28
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	988,3	975,6	960,3
dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,93E-04	5,56E-04	3,84E-04	2,92E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	0,1120	0,1130	0,1144	0,1163
Reynolds-Zahl	900	1446	2093	2751

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0045			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0092			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	6,65E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Fluidtemperatur [°C]	2,54E+01	4,99E+01	7,42E+01	98,34
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	9,88E+02	9,75E+02	960,1
dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,89E-04	5,52E-04	3,82E-04	2,91E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	0,0686	0,0692	0,0701	0,0712
Reynolds-Zahl	708	1139	1648	2165

Massenstrom [kg/s]	0,05			
Anzahl Steigrohre	11			
Massenstrom/Steigrohr [kg/s]	0,0045			
Innendurchmesser Steigrohr [m]	0,0112			
Querschnittsfläche Steigrohr [m ²]	9,85E-05			
Eintrittstemperatur [°C]	20	45	70	95
Mittlere Fluidtemperatur [°C]	2,59E+01	5,08E+01	7,54E+01	9,96E+01
Dichte [kg/m ³]	9,97E+02	9,88E+02	9,75E+02	9,60E+02
dynamische Viskosität [kg/(m s)]	8,79E-04	5,45E-04	3,77E-04	2,90E-04
Geschwindigkeit/Steigrohr [m/s]	0,0463	0,0467	0,0473	0,0481
Reynolds-Zahl	588	949	1372	1783