

Technische Hochschule Köln  
Fakultät für Anlagen-, Energie- und Maschinensysteme  
Cologne Institute for Renewable Energy (CIRE)

Bachelorarbeit  
<Allgemeiner Maschinenbau>

**Untersuchung eines Wasser-Kalorimeters zur  
Messung der Flussdichte in der Großforschungsanlage Synlight**  
*Investigation of a water calorimeter for  
measuring the flux density in the large-scale research facility Synlight*

vorgelegt von

Julius Walter Diel

Matr.-Nr. 11148523

Betreuer:

Prof. Dr. Peter Stenzel

Dr.-Ing. Dmitrij Laaber, DLR e.V., FF-SPR

## Eigenständigkeitserklärung

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

Pulheim, 28.07.2024

---

Ort, Datum



---

Unterschrift

## Abstract

The measurement of the flux density of concentrated solar radiation is of great importance for the utilisation of solar thermal systems, especially high-flux solar simulators. In this thesis, a water calorimeter for measuring the flux density in the Synlight large-scale research facility is investigated. Based on the series of tests carried out, the accuracy, the possible measuring range and the reliability of the developed system are analysed. Other aspects analysed relate to the angular dependence, the type of coating and the size of the aperture used. Due to the widely varying results of the different tests, it is initially not possible to make a well-founded statement on the possible utilisation of the method. There are deviations of at least 20 per cent and a maximum of over 40 per cent in comparison with the internal reference measurement FMAS. The results indicate a significant influence of various external error sources. For this reason, further future investigation is necessary to determine and eliminate the sources of error. One possibility for further testing is a comparison with a Kendall radiometer as an absolute reference measurement.

### Keywords:

high flux solar simulators - flux density - water calorimeter – Synlight - measurement technology – radiometry – calibration – concentrated solar radiation

## Kurzfassung

Die Messung der Flussdichte konzentrierter Solarstrahlung ist für die Nutzung solarthermischer Anlagen, insbesondere von Hochfluss-Sonnensimulatoren, von großer Bedeutung. In dieser Arbeit wird ein Wasser-Kalorimeter zur Messung der Flussdichte in der Großforschungsanlage Synlight untersucht. Basierend auf den durchgeführten Versuchsreihen werden die Genauigkeit, der mögliche Messbereich und die Zuverlässigkeit des entwickelten Systems analysiert. Weitere betrachtete Aspekte beziehen sich auf die Winkelabhängigkeit, die Art der Beschichtung und die Größe der verwendeten Apertur. Aufgrund stark variierender Ergebnisse der verschiedenen Versuche ist es zunächst nicht möglich, eine fundierte Aussage zu der möglichen Nutzung des Verfahrens zu treffen. Es liegen Abweichungen von mindestens 20 Prozent und maximal über 40 Prozent im Vergleich mit der Anlagen-internen Referenzmessung FMAS vor. Die Ergebnisse deuten auf einen signifikanten Einfluss verschiedener äußerer Fehlerquellen hin. Aus diesem Grund ist eine weitere zukünftige Untersuchung notwendig, um die Fehlerquellen zu ermitteln und zu beseitigen. Eine Möglichkeit für die weitere Überprüfung bietet der Vergleich mit einem Kendall-Radiometer als absolute Referenzmessung.

### Stichworte:

Flussdichte – Synlight – Messtechnik - Wasser-Kalorimeter – Sonnensimulatoren – Radiometrie – Kalibration – konzentrierte Solarstrahlung

## Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung.....	II
Abstract .....	III
Kurzfassung.....	III
Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis .....	VII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Nomenklatur .....	VIII
Formelverzeichnis .....	IX
1 Einleitung .....	1
2 Stand der Technik und Wissenschaft .....	3
2.1 Sonnensimulatoren und konzentrierte Solarenergie.....	3
2.2 Großforschungsanlage Synlight .....	5
2.3 Mess- und Kalibrierungsverfahren solarthermischer Anlagen .....	6
2.3.1 Gardon-Radiometer .....	7
2.3.2 Kendall-Radiometer .....	8
2.3.3 Wasser-Kalorimeter.....	9
2.3.4 FMAS-Messungen .....	10
2.3.5 Temperatursensoren .....	12
2.3.6 Durchflussmessung.....	13
2.4 Thermodynamische Grundlagen .....	14
2.4.1 Wärmestrom und Flussdichte.....	14
2.4.2 Temperaturabhängige Stoffeigenschaften.....	16
2.4.3 Wärmeübertragung .....	17
3 Methodik .....	19
3.1 Bisherige Arbeit .....	19
3.1.1 Konzeptionierung und Fertigung des Kalorimeters .....	19
3.1.2 Auswahl des Aufbaus und der Komponenten.....	21
3.1.3 Implementieren der Versuchssteuerung.....	22
3.2 Geplante Versuche.....	27
4 Durchführung .....	28

4.1	Versuchsreihe 1 – Untersuchung der Wärmekapazität und Genauigkeit der Messergebnisse .....	28
4.1.1	Test 1-1 .....	28
4.1.2	Test 1-2 .....	29
4.1.3	Test 1-3 .....	30
4.2	Versuchsreihe 2 - Verringerung der Aperturgröße $A$ des Kalorimeters .....	31
4.3	Versuchsreihe 3 – Winkelabhängigkeit.....	32
4.4	Versuchsreihe 4 – Auswirkungen der Empfängerbeschichtung.....	32
5	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.....	34
5.1	Untersuchung der Einfluss-Parameter .....	34
5.1.1	Volumenstrom .....	34
5.1.2	Ansprechverhalten .....	35
5.1.3	Einfluss der Beschichtung .....	36
5.1.4	Winkelabhängigkeit .....	39
5.2	Ergebnisse der Versuchsreihen mit großer Apertur.....	40
5.2.1	Test 1-1 .....	41
5.2.2	Test 1-2 .....	41
5.2.3	Test 1-3 .....	43
5.3	Ergebnisse der Versuchsreihen mit verkleinerter Apertur.....	45
6	Fehlerbetrachtung.....	48
6.1	Verluste durch ungewollte Wärmeleitung .....	48
6.2	Fehlerpotenzial durch Sensorik und Aktorik .....	49
6.3	Druckschwankungen im System und der Wasserzufuhr .....	51
6.4	Einfluss der Durchströmung des Kalorimeters .....	51
6.5	Geometrische Fehlerquellen .....	52
6.6	Einfluss der Tiefe des Kühlkanals und Winkelabhängigkeit.....	53
6.7	Aufbringung und Qualität der absorptiven Beschichtungen.....	55
7	Fazit und Ausblick .....	57
	Literatur .....	59
	Anhangsverzeichnis .....	62

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Solarturmkraftwerk in Ouarzazate, Marokko.....	3
Abbildung 2: Schematische Frontal- (links) und Seitenansicht (rechts) eines HFSS..	4
Abbildung 3: Xenon-Kurzbogenlampe (links) und Reflektorelement (rechts) der GA Synlight.....	5
Abbildung 4: Synlight in Testausrichtung .....	6
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Gardon-Radiometers .....	7
Abbildung 6: Prinzipskizze eines Kendall-Radiometers.....	8
Abbildung 7: Schematische Darstellung Kalorimeter.....	9
Abbildung 8: FMAS – Bedienoberfläche .....	11
Abbildung 9: FMAS - Ergebnisbildschirm .....	11
Abbildung 10: Kalorimeter in Einzelteilen (links) und zusammengebaut inkl. Kühlkörper (rechts) .....	19
Abbildung 11: Konzipierter Versuchsaufbau .....	21
Abbildung 12: Ein- und Ausgänge des Programms .....	23
Abbildung 13: Erzeugung Messdaten.....	24
Abbildung 14: Berechnung Wärmemenge und Flussdichte .....	25
Abbildung 16: Grafische Nutzeroberfläche des Programms.....	26
Abbildung 15: Sicherheitslogik.....	26
Abbildung 17: Strahleranordnung Test 1-1 .....	28
Abbildung 18: Strahleranordnung Test 1-2 .....	29
Abbildung 19: Radiometrischer Messaufbau .....	31
Abbildung 20: Aufbau und Strahler-Anordnung - Versuch 3 .....	32
Abbildung 21: Ansprechverhalten Kalorimeter - T1-1 und T1-2.....	35
Abbildung 22: Abweichung der Beschichtungen in Abhängigkeit der Flussdichte ....	37
Abbildung 23: Zweite Vergleichsmessung der Beschichtungen.....	38
Abbildung 24: Winkelabhängigkeit - Ofenlack .....	39
Abbildung 25: Visualisierung der Raumeinfallswinkel der Strahlerelemente .....	40
Abbildung 26: Vergleich Flussdichte - Test 1-1 .....	41
Abbildung 27: Vergleich Flussdichte - Test 1-2.....	42
Abbildung 28: Vergleich Flussdichte – Test 1-3 .....	44
Abbildung 29: Abweichung in Abhängigkeit der Flussdichte - Test 1-3.....	45
Abbildung 30: Vergleich der verschiedenen Aperturen .....	46
Abbildung 31: Abweichung in Abhängigkeit der Flussdichte - Vergleich beider Aperturen.....	47
Abbildung 32: Volumenstrom Versuch 1-3.....	50
Abbildung 33: Schematische Darstellung der Kühlkörper-Geometrie.....	53
Abbildung 34: Beschichtungen der Empfängerplatten mit Thermolack (links) und Pyromark (rechts) nach dem Einsatz.....	55
Abbildung 35: Rückseiten einer normalen (links) und beschädigten (rechts) Empfängerplatte .....	56

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Variablen Korrelationsgleichungen Wasser .....	17
Tabelle 2: Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Metalle .....	17
Tabelle 3: Verwendete Datenmodule und Sensoren .....	23
Tabelle 4: Strahler-Konfiguration - 18 Strahler (Test 1-2).....	30
Tabelle 5: Messdaten - Test 1-2.....	42
Tabelle 6: Messdaten - Test 1-3.....	43
Tabelle 7: Messdaten - Test 2 .....	46
Tabelle 8: Verbleibender Einfallswinkel nach Kühlkörper.....	54

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung / Symbol</b>	<b>Erläuterung</b>
CCD	Charge-coupled device
CSP	Concentrated Solar Power
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
FMAS	Flux mapping acquisition system
HFSS	High Flux Solar Simulator
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TDMS	Technical data management system
VI	Virtual instrument

## Nomenklatur

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$U$	Spannung	V
$T$	Temperatur	K
$k$	Thermokoeffizient	$\frac{V}{K}$
$m$	Masse	kg
$\dot{m}$	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
$V$	Volumen	$m^3$
$\dot{V}$	Volumenstrom / Durchfluss	$\frac{m^3}{s}$ ; $\frac{l}{min}$
$\rho$	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
$Q$	Wärmeenergie	J
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$\dot{q}$	Wärmestromdichte / Flussdichte	$\frac{kW}{m^2}$
$A$	Aperturgröße / bestrahlte Fläche	$m^2$
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität	$\frac{kJ}{kg * K}$
$A, B, C, D, E, F$	Variable	-
$R$	Spezifische Gaskonstante	$\frac{kJ}{kg * K}$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{K * m}$
$\varphi$	Apertur-Öffnungswinkel	°
$\gamma$	Neigungswinkel des Kühlkörpers	°
$\varepsilon$	Emissionsgrad	%
$\beta$	Raumeinfallswinkel	°
$\delta$	Grenzschichtdicke	m
$\vartheta$	Temperaturgradient / -niveau	K
$h$	Tiefe des Kühlkörpers	m
$r$	Radius des Kühlkörpers	m
$\omega$	Hilfswinkel	°
$\Delta s$	Abgewichene Distanz	m
$f$	Fehler / Abweichung	%
$S$	Signal	mA; A; V; %; l/min

## Formelverzeichnis

Formel 1: Thermospannung .....	12
Formel 2: Volumen und Massenstrom .....	13
Formel 3: Zusammenhang Massen- und Volumenstrom .....	14
Formel 4: Wärmeenergie .....	15
Formel 5: Temperaturdifferenz.....	15
Formel 6: Wärmestrom .....	15
Formel 7: Flussdichte .....	16
Formel 8: Korrelationsgleichung - Dichte gesättigter Flüssigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur .....	16
Formel 9: Korrelationsgleichung - Spezifische Wärmekapazität von Flüssigkeiten bei konstantem Druck.....	16
Formel 10: Wärmestrom bei einer einschichtigen Wand .....	18
Formel 11: Berechnung eines Referenzwertes der maximal messbaren Flussdichte <sup>20</sup>	
Formel 12: Umrechnung der Eingangssignale des Durchfluss-Sensors und Stellventils .....	24
Formel 13: Berechnung der Wärmeleitung durch die Überwurfmutter des Kalorimeters .....	48
Formel 14: Beispielrechnung Fehler durch Geometrie .....	52
Formel 15: Trigonometrische Berechnung des Apertur-Öffnungswinkels $\varphi$ .....	54

## 1 Einleitung

Angesichts der fortschreitenden Klimakrise und der dringenden Notwendigkeit, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, steht die Welt vor einem entscheidenden Wandel in der Energiegewinnung. Fossile Brennstoffe müssen zunehmend durch nachhaltige und erneuerbare Energiequellen ersetzt werden, um den globalen Temperaturanstieg zu begrenzen und die Umwelt zu schützen. Unter den alternativen Energiequellen spielt neben Wind und Wasser besonders die Solarenergie eine große Rolle. Das Feld der konzentrierten Solarstrahlung bietet vielversprechende Möglichkeiten für die Energiegewinnung sowie für industrielle Fertigungs- und Prozessverfahren. [1]

Ein besonderer Anwendungsbereich der konzentrierten Solarstrahlung sind Hochfluss-Solar-Simulatoren (HFSS). Sie sind essenzielle Werkzeuge in der Solarthermie-Forschung und -Entwicklung und ermöglichen die Erzeugung von konzentriertem Licht, das die Strahlung der Sonne nachahmt. Diese Simulatoren sind von großer Bedeutung, da sie unabhängig von Wetterbedingungen und Tageszeit kontrollierte und wiederholbare Experimente erlauben. HFSS werden genutzt, um Materialien und Systeme unter extremen Bedingungen zu testen, die in realen Anwendungen mit konzentrierter Solarstrahlung auftreten können. Untersucht werden beispielsweise die thermische Beständigkeit von Materialien, die Effizienz von Solarkollektoren und die Entwicklung neuer Technologien zur Energieumwandlung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit, die am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) durchgeführt wird, liegt der Fokus auf der messtechnischen Erweiterung der Großforschungsanlage Synlight. Synlight ist der weltweit größte Hochfluss-Solar-Simulator und wird vom Institut für Future Fuels, Abteilung Solare Prozessdemonstration, betrieben. Diese Forschungsarbeit ist Teil des DLR internen SolTran-Projekts, welches die Entwicklung und Optimierung von Technologien zur Nutzung konzentrierter Solarstrahlung verfolgt. Im Rahmen des konkreten Arbeitspakets sollen neue Messverfahren erprobt und validiert werden, um die Effizienz und Zuverlässigkeit von HFSS weiter zu steigern. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Verifizierung der Messverfahren unter den spezifischen Bedingungen der Synlight-Anlage gelegt.

Trotz der bestehenden Bedeutung gibt es zum aktuellen Stand wenige umfassend erforschte und verlässliche Mess- und Kalibrierungsverfahren, die speziell für die Bedingungen in HFSS entwickelt und validiert wurden. Aus diesem Grund besteht das Hauptziel dieser Arbeit darin, ein bereits entwickeltes kalorimetrisches Messverfahren unter den spezifischen Bedingungen der Großforschungsanlage Synlight zu erproben. Dies umfasst die Bestätigung der Funktionalität und Verlässlichkeit des Verfahrens sowie die Untersuchung des Einflusses verschiedener Faktoren wie der Strahlungsmenge, der Winkelabhängigkeit und der verwendeten Empfängerinheit.

Frühere Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass durch kalorimetrische Messungen und Kalibrierungen für „echtes“ Sonnenlicht verlässliche Ergebnisse erzielt werden können [2]. Diese Ergebnisse lassen sich möglicherweise auch auf das

sonnenähnliche Spektrum des Synlights übertragen. Eine ausführliche Diskussion dieser Aspekte und weiterer vorangegangener Untersuchungen erfolgt im Kapitel „Stand der Technik und Wissenschaft“.

Insgesamt soll diese Arbeit einen Beitrag zur Verbesserung der Messgenauigkeit im gesamten Forschungsfeld der Solarthermie leisten und damit die Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten und Anwendungen in diesem Bereich schaffen.

Die Arbeit wird auf Basis eines vorangegangenen Projektes erstellt, welches den Aufbau des untersuchten Versuchsstandes als Ziel hat. Im Kapitel Methodik werden die Konzeption und Herstellung des Aufbaus ausführlich erläutert. Die durchgeführte Untersuchung erfolgt experimentell und wird im Laufe der Bearbeitung iterativ an die erzielten Ergebnisse und ermittelten Problemstellungen angepasst. Dazu werden vor Beginn der Messungen verschiedene Versuchsreihen festgelegt, welche nacheinander durchgeführt werden. Die erhaltenen Messergebnisse werden anschließend ausgewertet und eine Fehlerbetrachtung durchgeführt. Der genaue Ablauf der Arbeit wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Nach dieser Einleitung, in der Motivation und Vorgehensweise beschrieben werden, folgt zunächst der aktuelle Stand der Technik und Wissenschaft. Darin werden die Funktionsweise von Sonnensimulatoren inklusive der Synlight-Anlage sowie verschiedener genutzter Messverfahren und thermodynamischer Hintergründe dargelegt.

Anschließend wird die bereits erwähnte Methodik noch einmal umfangreicher behandelt. Dazu wird die bisherige Arbeit genauer beschrieben und in den Kontext dieser Untersuchung eingebunden. Zusätzlich werden die geplanten Versuchsreihen und ihr Nutzen betrachtet.

Der nachfolgende Hauptteil der Arbeit beinhaltet die chronologische Beschreibung der Durchführung der Versuche sowie die thematisch sortierte Darstellung und Diskussion der daraus resultierenden Ergebnisse und den Vergleich mit ähnlichen Untersuchungen.

Um die Arbeit gesamtheitlich einzuordnen und zu verifizieren, werden im vorletzten Kapitel die möglichen Fehlerquellen betrachtet. Neben getroffenen Annahmen und vorgenommenen Vereinfachungen sind auch systematische Abweichungen durch Messfehler oder Materialeinflüsse hierfür relevant.

Zum Abschluss wird ein gesamtheitliches Fazit zur untersuchten Aufgabenstellung gezogen und ein Ausblick auf zukünftige Anwendungen, Versuche und mögliche Entwicklungen gegeben.

## 2 Stand der Technik und Wissenschaft

Die folgenden dargestellten Informationen und Zusammenhänge bilden die wissenschaftliche Grundlage für diese Arbeit. Daher sind sie für das weitere Verständnis essenziell. Hierzu zählen die Definition und Erklärung von Sonnensimulatoren inklusive der Großforschungsanlage Synlight sowie die für die Nutzung verwendeten Mess- und Kalibrierungsverfahren und thermodynamischen Hintergründe.

### 2.1 Sonnensimulatoren und konzentrierte Solarenergie

Im Zuge der Erschließung alternativer Energiequellen wird die Nutzung der Sonnenenergie neben der Stromerzeugung mithilfe von Photovoltaik oder Solarturmkraftwerken auch in sog. solaren Prozessanlagen genutzt und erforscht. All diese Prozesse, unter Ausnahme der Photovoltaik, gehören zum Bereich der CSP, also *concentrated solar power* oder *konzentrierte Solarenergie*. Sie verwenden bestehende Strahlungsenergie der Sonne in konzentrierter Form. [3, S. 215 f.]



Abbildung 1: Solarturmkraftwerk in Ouarzazate, Marokko [4]

In Abbildung 1 ist mit dem Solarturmkraftwerk in Ouarzazate, Marokko ein Beispiel für direkte CSP zu erkennen. Die zu sehenden Reflektoren, fachlich als Heliostate bezeichnet, bündeln die einfallende Sonnenstrahlung auf den Empfänger an der Spitze des mittig stehenden Turmes. Dadurch wird die Strahlung in Wärmeenergie konvertiert, welche wiederum in Dampf und über eine Turbine schließlich in elektrische Energie umgewandelt wird. Alternativ ist die Nutzung der Wärme in industriellen Prozessen möglich. Durch das Zuschalten von thermischen Speichersystemen können bestehende Engpässe bei solarer Energiegewinnung überbrückt werden. [4]

Im Gegensatz zu Anlagen wie Solarturmkraftwerken oder Sonnenöfen, welche auf Basis direkter Sonnenstrahlung arbeiten, operieren Sonnensimulatoren auf Grundlage von elektrisch erzeugtem Licht mit einem sonnenähnlichen Spektrum. Während bei der Erforschung von Photovoltaik dafür auf LED-basierte Lichtquellen zurückgegriffen werden kann, reicht die zur Verfügung gestellte Flussdichte für die Anwendung in CSP-Prozessen nicht aus. In diesem Fall werden Entladungslampen (engl. discharge lamps) wie Xenon-Kurzbogen- oder Wolfram-Halogen-Lampen, welche auch bei Kinoprojektoren oder in der Automobilindustrie zum Einsatz kommen, genutzt. Diese Lampen können das Sonnenspektrum ebenfalls nachbilden, weisen aber zusätzlich eine deutliche höhere Flussdichte und damit solarthermische Strahlungsenergie auf. Um das erzeugte Licht zu bündeln und damit nutzbar zu machen, werden diese Lampen mit elliptischen oder annähernd elliptischen Reflektorelementen kombiniert. [3, S. 215 f.]

Begründet ist diese Anwendung durch die teilweise limitierte Verfügbar- und Skalierbarkeit von tatsächlicher Sonnenstrahlung. Neben der Nutzung in der Materialforschung und zur Erforschung der Photovoltaik ist besonders bei der Erforschung und Entwicklung thermochemischer solarer Prozesse eine vorhersehbare und abgeschlossene Versuchsumgebung von großer Relevanz. [3, S. 215 f.]

Die Größe der Simulatoren ist stark abhängig von der Art der Anwendung sowie den entstehenden Material- und Energiekosten. Aus diesem Grund wird für die wenigen Anlagen mit mehr als 30 kW Bestrahlungsenergie die Bezeichnung *HFSS* oder *high flux solar simulators* verwendet. HFSS kennzeichnet die besonders hohe mögliche Flussdichte und Gesamtleistung dieser Sonnensimulatoren. [3, S.215 f.]

In Abbildung 2 ist ein typischer Aufbau eines HFSS dargestellt. Zu erkennen sind die Reflektorelemente inklusive der Lampen in hexagonaler Anordnung. In der Seitenansicht ist zusätzlich die Ausrichtung auf einen Zielpunkt demonstriert. Die Umsetzung dieses Prinzips kann in der Realität je nach Anlage variieren. [3, S. 215 f.]

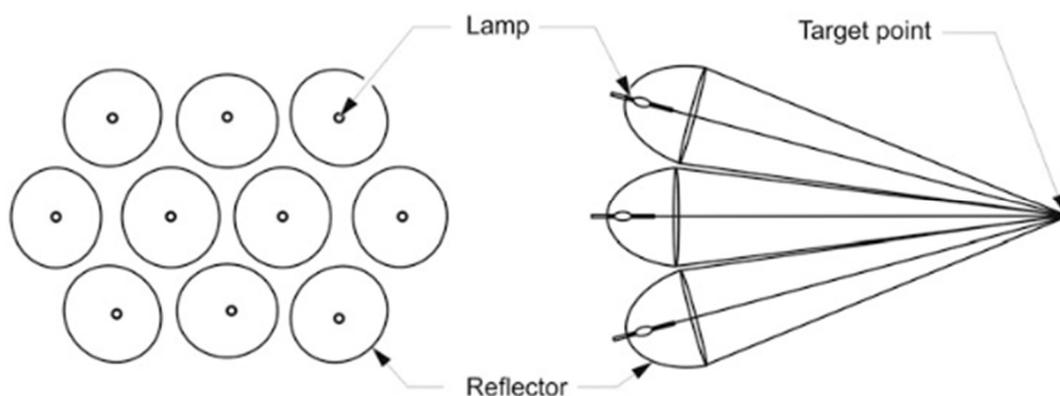


Abbildung 2: Schematische Frontal- (links) und Seitenansicht (rechts) eines HFSS [3, S.232 f.]

## 2.2 Großforschungsanlage Synlight

Die Großforschungsanlage Synlight des DLR sticht unter den HFSS als Besonderheit hervor. Sie ist bei voller Auslastung mit einer maximalen Strahlungsleistung von bis zu 400 kW und dadurch erreichbaren Temperaturspitzen von bis zu 3000 °C der weltweit größte Simulator für konzentrierte sonnenähnliche Strahlung. [5, S. 1]

Diese Leistung wird durch 148 individuelle Strahlerelemente mit Einzelleistungen von ca. 2,7 kW erbracht. Mithilfe einer SPS-basierten Anlagensteuerung können die Strahler vollständig modular und stufenlos konfiguriert werden. Damit kann die Bestrahlungsintensität sowie Flussdichte und Anordnung präzise eingestellt werden. In insgesamt drei Versuchsräumen können nutzbare Bestrahlungsleistungen von maximal 310 kW in der mittleren und für die beiden äußeren Kammern maximal 250 kW erreicht werden. [5, S. 1]

Zur Erzeugung der sonnenähnlichen Strahlung werden im Synlight Xenon-Kurzbogenlampen in Kombination mit elliptisch geformten und speziell reflektiv beschichteten Reflektorelementen verwendet. Diese sind in Abbildung 3 dargestellt. [6, S. 2]

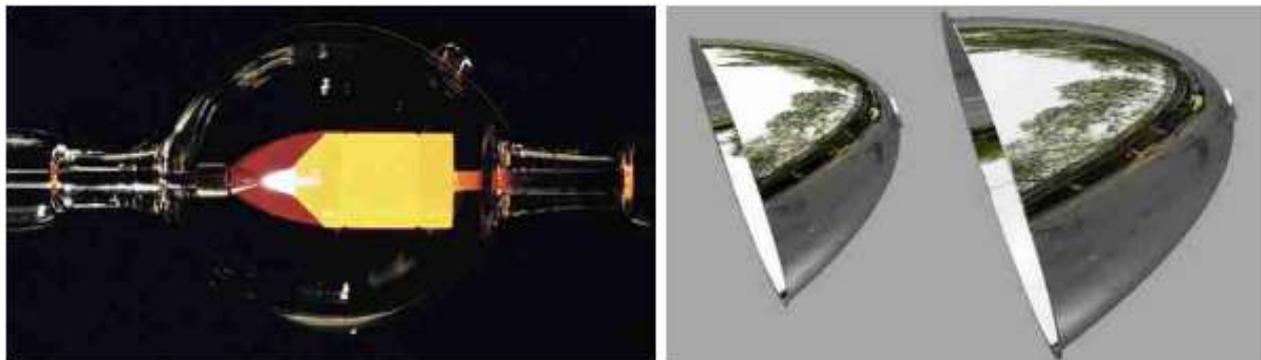


Abbildung 3: Xenon-Kurzbogenlampe (links) und Reflektorelement (rechts) der GA Synlight [6, S.2]

Das Zusammenspiel dieser Komponenten ermöglicht eine präzise Bündelung der ausgesandten Strahlung mit einer Brennweite von ca. 8 m. Die Ausrichtung der einzelnen Elemente erfolgt auf drei Achsen mithilfe von Schrittmotoren. [6, S. 2]

In Abbildung 4 ist die gesamte Anlage mit 121 ausgerichteten, wabenförmig angeordneten Modulen zu erkennen. [7, S. 1]

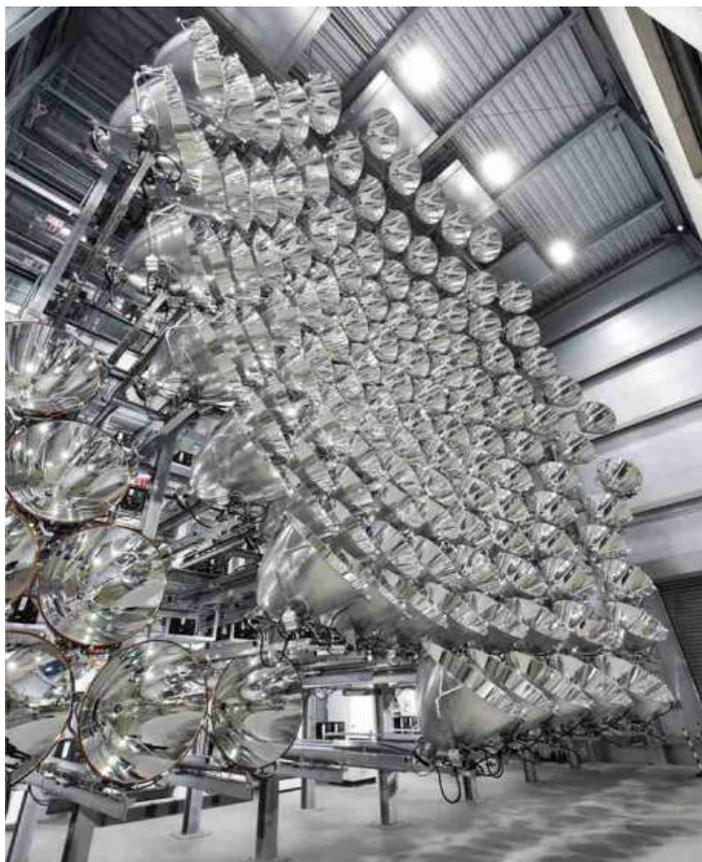


Abbildung 4: Synlight in Testausrichtung [7]

Durch diese Spezifikationen ist die Anlage bestens dazu geeignet, um die Lücke zwischen bisherigen kleineren Simulatoren und den Tests mit tatsächlicher Sonnenstrahlung an Sonnenöfen oder Solarturmkraftwerken zu schließen. Sie ermöglicht die räumlich abgeschlossene Erforschung und Entwicklung von Technologien in Bereichen der thermochemischen Prozesstechnik, Energiegewinnung und Materialforschung. [6, S. 1-2]

### 2.3 Mess- und Kalibrierungsverfahren solarthermischer Anlagen

Die Anlagenparameter der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Sonnensimulatoren werden mithilfe verschiedener Messverfahren überwacht. Nur wenn Attribute wie Flussdichteverteilung und Strahlungsspektrum bekannt sind, ist es möglich, durchzuführende Prozesse korrekt auslegen und Messergebnisse einordnen zu können.

In seiner Dissertation aus dem Jahr 2003 untersucht Dr. Steffen Ulmer unterschiedliche Messverfahren für punktkonzentrierende solarthermische Kraftwerke an der Plataforma Solar de Almería in Spanien. Die Arbeit liefert wichtige Erkenntnisse zu realen Messergebnissen und Fehlern der genutzten Sensorik und gibt Ausblicke auf potenzielle Korrekturen und Verbesserungen. [8] Eine weitere Publikation aus dem Jahr 2013 behandelt verschiedene radio- und kalorimetrische Messverfahren. Diese werden am Sonnenofen in Odeillo, Frankreich getestet und bzgl. ihrer Genauigkeiten und Unterschiede analysiert. Die in diesen und weiteren Publikationen beschriebenen Messverfahren und Erkenntnisse werden im Folgenden genauer beschrieben. [2, S. 2090 f.]

Zusätzlich werden einzelne weitere Verfahren sowie die theoretischen Grundlagen der Temperatur- und Durchflussmessung unter Verwendung verschiedener Sensorik aufgearbeitet.

### 2.3.1 Gardon-Radiometer

Die Flussdichtemessung von Sonnensimulatoren wird entweder direkt oder indirekt, bspw. zur Kalibrierung von Kamerasystemen, über Gardon-Radiometer vorgenommen. Diese zeichnen sich durch eine schnelle Reaktionszeit, welche bei knapp unter einer Sekunde liegt, aus. Ausschlaggebend für diese Eigenschaft ist der Aufbau und die Funktionsweise der Radiometer.

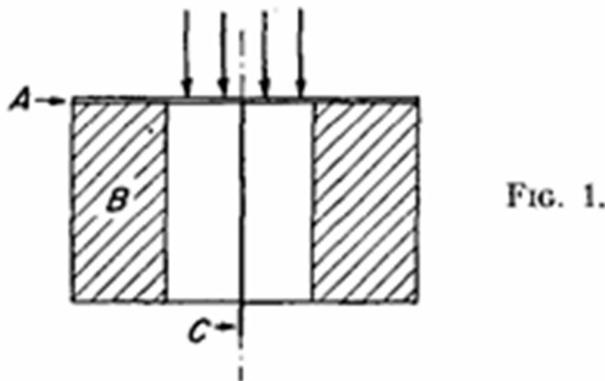


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Gardon-Radiometers [9]

Das im Jahr 1953 erstmals präsentierte und nach seinem Erfinder Robert Gardon benannte Radiometer wurde zur Messung von thermischer Strahlung in Bereichen von  $50 \text{ kW/m}^2$  bis  $4000 \text{ kW/m}^2$  und Umwandlung dieser in elektrische Signale entwickelt. Es nutzt eine Kombination aus einer schwarz beschichteten runden Konstantanfolie (A) und einem umliegenden wassergekühlten Kühlkörper aus Kupfer (B). Diese Anordnung ist in Abbildung 5 dargestellt. Dadurch entsteht ein Temperaturunterschied zwischen dem Zentrum und den Rändern der bestrahlten Folie, welcher der Flussdichte der einfallenden Strahlung entspricht. Durch eine Verbindung der Ränder, des Mittelpunktes der Folie (C) und des Kühlkörpers über Kupferdrähte entsteht ein Thermoelement, das eine der Flussdichte äquivalente Spannung ausgibt. [9]

Bei einer messtechnischen Nutzung des Radiometers ist stets eine Kalibrierung notwendig, um die Genauigkeit der Messungen zu gewährleisten. Dies ergibt sich aus der Abhängigkeit des Messverfahrens von der individuellen Beschaffenheit des Radiometers und den Testanforderungen. [2, S. 2091 f.]

Ursprünglich wurden Gardon-Radiometer für den Einsatz bei längeren Messzeiträumen in der Plasma- und Verbrennungsforschung entwickelt. Die Kalibrierung für diese Verwendung wird daher mithilfe von sogenannten schwarzen Körpern durchgeführt. Diese bestehen aus zylindrisch geformtem Grafit, welches elektrisch auf eine Temperatur von  $850 \text{ °C}$  aufgeheizt wird. Ein schwarzer Körper sendet gleichmäßige und symmetrische Strahlung aus. Die Strahlung ist hierbei abhängig von der zugeführten

Wärme. In einer abgeschlossenen Umgebung wird diese nachfolgend zur Kalibrierung der Radiometer genutzt. [10]

Das Spektrum von realer oder künstlich erzeugter Sonnenstrahlung unterscheidet sich jedoch von dieser Kalibrierung. Dieser Unterschied verursacht signifikante Messfehler. Je nach Beschichtung der Konstantanfolie liegen die Messfehler zwischen 3 % und 27 % höherer gemessener Strahlungsenergie. [11]

### 2.3.2 Kendall-Radiometer

Das im Jahr 1970 veröffentlichte Kendall-Radiometer stellt eine weitere Ausführung eines radiometrischen Messverfahrens dar. Es wird in vielen Versuchen als Referenz oder zur Kalibrierung der genutzten Sensorik verwendet, so auch in den Untersuchungen von Ballestrin, Guillot und Ulmer. [2, 8, 10, 11]

Die Nutzung als Referenzinstrument ergibt sich dabei aus der Fähigkeit des Radiometers, sich selbst durch elektrische Substitution zu kalibrieren. Aus diesem Grund werden sie auch als absolute Radiometer bezeichnet. [8, S. 21 f.]

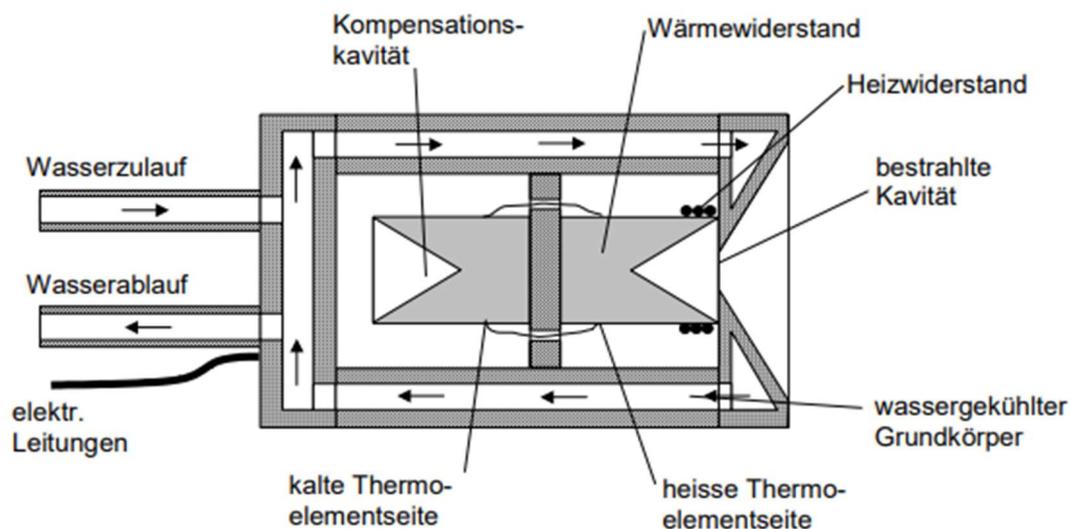


Abbildung 6: Prinzipskizze eines Kendall-Radiometers [8, S. 22 f.]

Abbildung 6 stellt den Aufbau des Kendall-Radiometers dar. Auf der rechten Seite ist die bestrahlte Kavität hinter einer entsprechenden Apertur platziert. Diese Kavität ist ein schwarz beschichteter Hohlraum mit einer nahezu idealen Absorption von ca. 99 %. Der aus der Absorption resultierende Wärmestrom fließt anschließend über einen Wärmewiderstand zum wassergekühlten Grundkörper. Die entstehende Temperaturdifferenz zwischen der warmen (bestrahlten) und kalten (unbestrahlten) Seite des Widerstandes wird über die gekennzeichneten Thermoelemente erfasst. Bei der unbestrahlten Referenzseite handelt es sich um eine baugleiche zweite Kavität mit denselben thermischen Eigenschaften wie der in der bestrahlten Kavität. So werden Temperaturschwankungen des Gesamtkörpers erfasst, um Messfehler zu vermeiden. [8, S. 21 f.]

Der Aspekt der Eigenkalibrierung wird über einen in die bestrahlte Öffnung eingebauten Heizwiderstand umgesetzt. Dieser kann den Wärmestrom der absorbierten Strahlung elektrisch nachbilden. Durch eine genaue Messung der zugeführten elektrischen Leistung und Thermospannung des Widerstandes ist eine Kalibrierung des Radiometers ohne äußere Referenzen möglich. [8, S. 22 f.]

### 2.3.3 Wasser-Kalorimeter

Eine vom Wirkprinzip und Gesamtaufbau wesentlich einfachere Messmethode stellen Kalorimeter, insbesondere Wasser-Kalorimeter, dar. Dabei handelt es sich um absolute Radiometer, die über einen hoch absorptiven schwarzen Empfänger die Strahlung aufnehmen und an ein Übertragungsmedium abgeben. Aus dem Massen- oder Volumenstrom und den Temperaturveränderungen des verwendeten Mediums kann die absorbierte Energiemenge ermittelt werden. Aus der ermittelten Energiemenge kann schließlich die Flussdichte berechnet werden. Für solarthermische Prozesse wird dazu überwiegend Wasser verwendet, da es einfach zu handhaben ist und eine sehr umfassende Dokumentation aller Stoffwerte aufweist [12]. [2, S. 2093 f.]

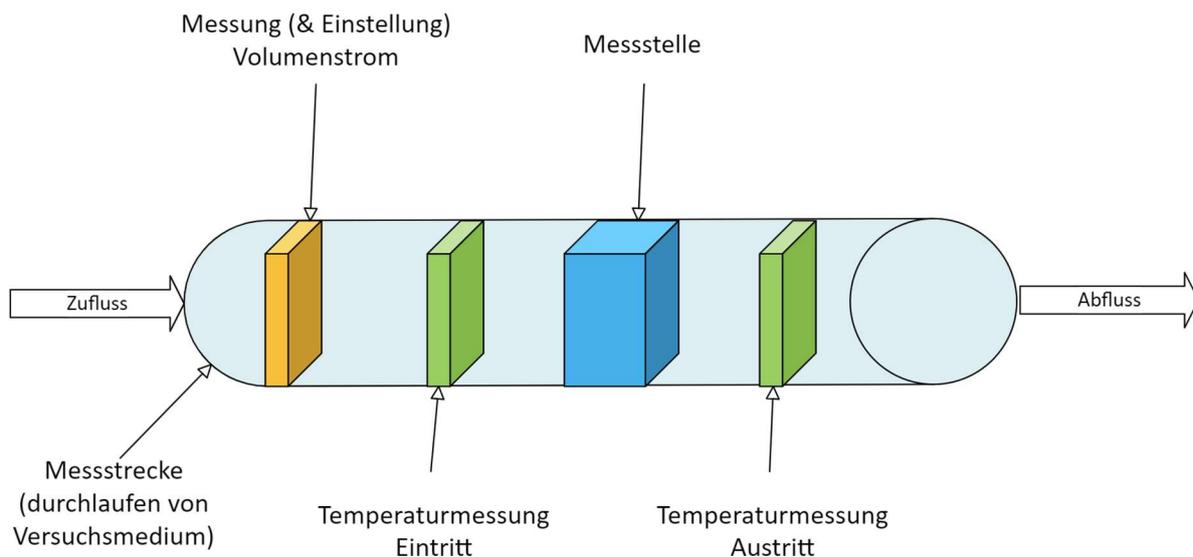


Abbildung 7: Schematische Darstellung Kalorimeter (eigene Darstellung)

Ein möglicher Messaufbau ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt. Die Genauigkeit der erzielbaren Messergebnisse ist bei der Verwendung eines Kalorimeters unmittelbar abhängig von der genutzten Sensorik. Zu der Sensorik zählen die Durchfluss- und Temperaturmessung. Außerdem sind die Stoffeigenschaften des genutzten Übertragungs- oder Versuchsmediums bei der Messwert-Bestimmung entscheidend. Relevante Stoffeigenschaften sind in diesem Fall die spezifische Wärmekapazität und die Dichte des Mediums in Abhängigkeit von der Temperatur. [2, S. 2093 f.]

Ein weiterer Faktor sind die Geometrie und der gewählte Aufbau des Kalorimeters. Aspekte wie die Form und Beschichtung des Empfängerareals, die tatsächliche bestrahlte Fläche und Einflüsse wie Energieverluste durch Konvektion oder ähnliche Effekte müssen bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Ein

genereller Nachteil bei der Nutzung von Kalorimetern ist dabei die im Vergleich zu Gardon- oder Kendall-Radiometern lange Reaktionszeit von mehreren Sekunden bis Minuten. [2, S. 2093 f.]

Die Anwendung eines Wasser-Kalorimeters zur Flussdichtebestimmung einer solarthermischen Anlage wird bereits in einer Untersuchung von Ballestrin aus dem Jahr 2006 behandelt. Dort ist eine Referenzmessung zur Kalibrierung der untersuchten Gardon-Radiometer erfolgreich möglich. [10] In den Untersuchungen von Guillot et al. bewegen sich die Messergebnisse des verwendeten Kalorimeters neben Rauscheffekten innerhalb eines Rahmens von 10 % zu den untersuchten Radiometern und der Referenzmessung. Zusätzlich scheint kein signifikanter Einfluss des Einfallswinkels der Strahlung auf die resultierenden Ergebnisse vorzuliegen. Die Verwendung eines weiteren Kalorimeters mit geringerer Energiekapazität wird als sinnvolle zukünftige Erweiterung der Untersuchungen angedacht. [2, S. 2097 f.]

#### 2.3.4 FMAS-Messungen

Die Abkürzung FMAS steht für *flux mapping acquisition system*, also ein Messsystem, welches die Flussdichte der in einem Versuch genutzten Strahler erfassen kann. Es wurde im Jahr 2016 als Teil einer Masterarbeit im DLR entwickelt und wird seitdem in der Großforschungsanlage Synlight für Referenzmessungen verwendet. [13]

Das System basiert auf der Erfassung optischer Daten durch ein CCD-Kamerasystem. Über ein zusätzliches Filtersystem kann die auf eine Lambert'sche Oberfläche auftreffende Strahlung erfasst und über ein LabVIEW-Programm in Messwerte umgerechnet werden. Der zentrale Wert bei der Erfassung der Strahlung ist dabei die Intensität, welche von der Kamera in Form von Grauwerten registriert wird und in äquivalente Flussdichten umgerechnet wird. Die Kalibrierung, also die Verknüpfung der Grauwerte mit den entsprechenden Flussdichte-Messwerten, erfolgt in regelmäßigen Abständen über ein Gardon-Radiometer. [13, S. 30 f.]

Eine Lambert'sche Oberfläche ist eine ideal diffus reflektierende Empfänger- oder Emitterfläche. Dies bedeutet, dass durch eine hohe Rauheit die auftreffende Strahlung an der Oberfläche reflektiert wird und diese aus allen Blickwinkeln gleich hell beleuchtet ist. Der Effekt ist für optische Messungen notwendig, um verlässliche Ergebnisse unabhängig vom Betrachtungswinkel zu erhalten. [13, S. 14 f.]

In Abbildung 8 ist die Bedienoberfläche des Programms dargestellt. Mithilfe dieser können bei stetiger Anzeige der aktuellen Messkonfiguration die notwendigen Einstellungen getroffen werden, um anschließend anhand einer Momentaufnahme die Messung vorzunehmen. Die Einstellungen beinhalten das Platzieren eines konkreten Messbereiches inklusive gewünschter Apertur in verschiedenen Formen sowie die Auswahl der optimalen Filterkonfiguration. [13, S. 40 f.]

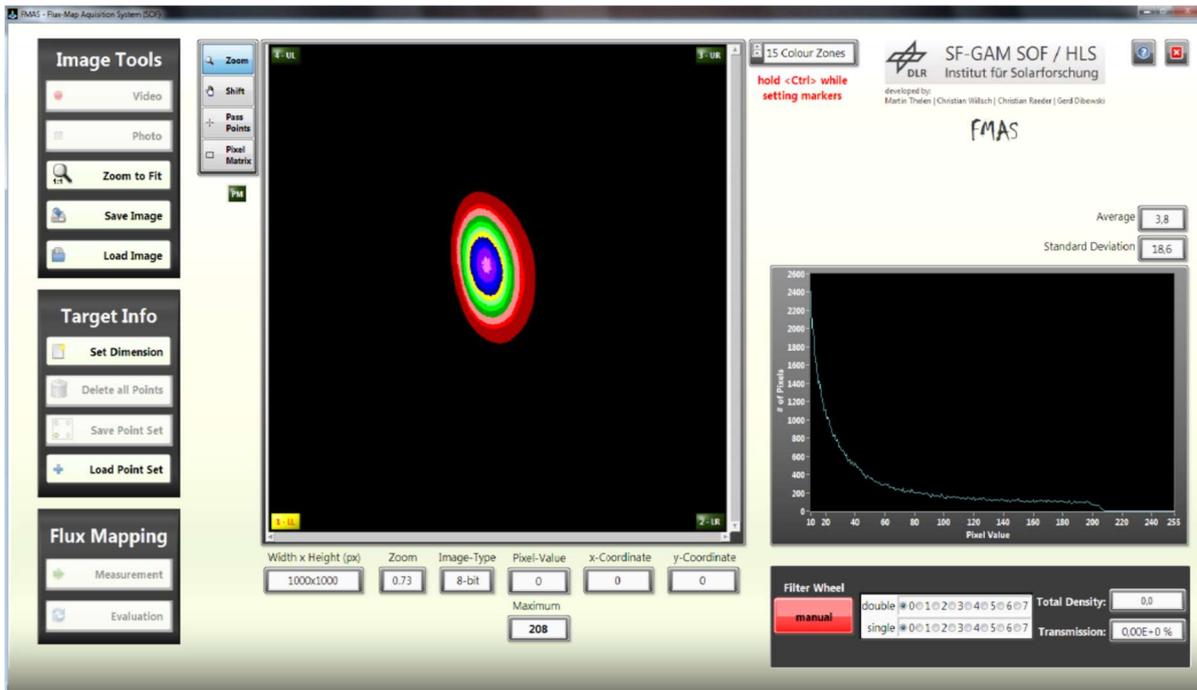


Abbildung 8: FMAS – Bedienoberfläche [13, S. 42]

Im Anschluss an die Durchführung der Messung wird der nachfolgende Ergebnisbildschirm angezeigt.

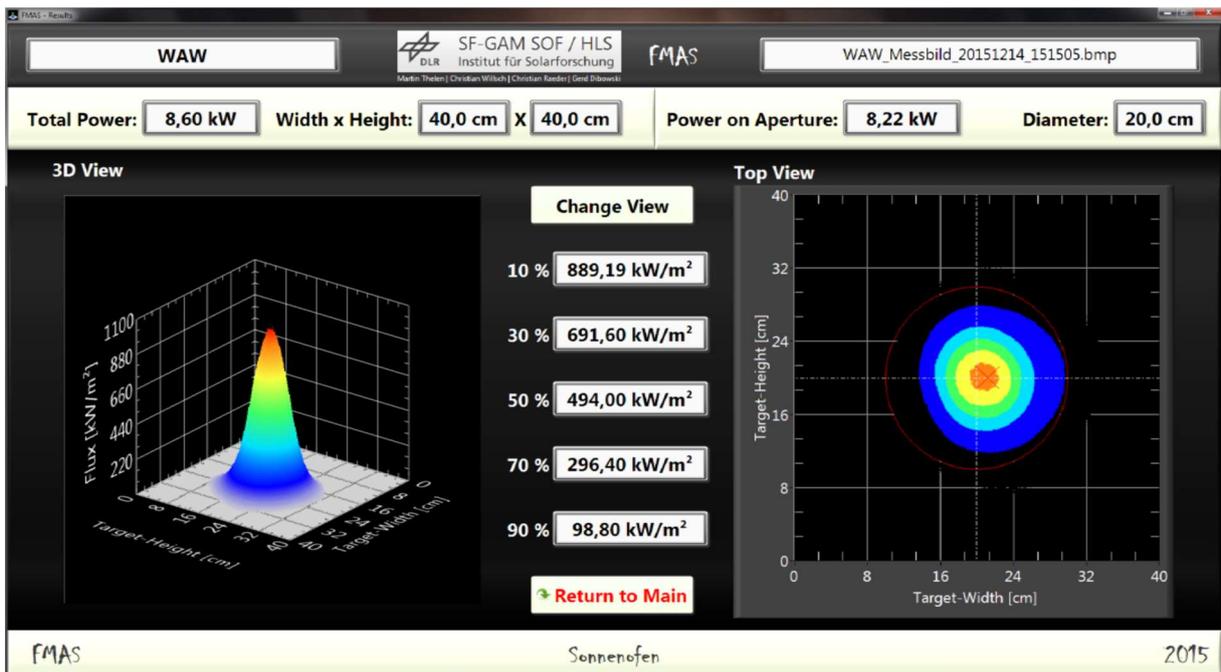


Abbildung 9: FMAS - Ergebnisbildschirm [13, S. 44]

In der Darstellung sind die Messwerte für die Gesamtenergie sowie die auf die festgelegte Apertur auftreffende Energiemenge zu erkennen. Zusätzlich werden die Messwerte für verschiedene Abweichungsstufen angegeben. Auf der linken Seite ist eine dreidimensionale Grafik der Flussdichte-Verteilung auf der gemessenen Fläche abgebildet. Die Höhe und Farbe des Graphen geben hierbei Aufschluss über die Intensität. Auf der rechten Seite ist eine zweidimensionale Abbildung derselben Grafik zu erkennen. Sie stellt die Frontalansicht des bestrahlten Objektes dar. Die ermittelten Messergebnisse werden in Ergänzung zu der grafischen Darstellung darüber hinaus in einer separaten Messdaten-Datei abgespeichert. [13, S. 40 f.]

### 2.3.5 Temperatursensoren

Widerstandsthermometer und Thermoelemente stellen die in der Praxis am meisten genutzten Sensoren zur elektrischen Temperaturmessung dar. [14, S. 215]

Widerstandsthermometer funktionieren dabei durch die annähernd konstanten und positiven Temperaturkoeffizienten von Metallen. Die verwendeten Materialien, beispielsweise Platin für Pt-100 oder Pt-1000 Sensoren, verfügen über einen spezifischen ohmschen Widerstandswert für die jeweiligen Messtemperaturen. Bei steigenden Messtemperaturen steigt dieser Widerstand proportional zur Temperatur. Unter Verwendung eines konstanten Stromes ändert sich somit die gemessene Spannung proportional zur Temperatur und kann als Messsignal genutzt werden. [14, S. 215 f.]

Sensoren mit höheren Widerständen weisen den Vorteil auf, dass für Messungen kleinere Konstantströme benötigt werden und eine Eigenerwärmung so maßgeblich vermindert wird. Zusätzlich wird zwischen Zwei- und Vierleitertechnik unterschieden. Bei letzterem wird der temperaturabhängige Messleitungswiderstand durch den jeweils identischen dritten und vierten Leiter kompensiert, wodurch Messergebnisse besonders bei längeren Messleitungen, insgesamt weniger fehleranfällig werden. [14, S. 215 f.]

Thermoelemente nutzen hingegen den sogenannten Seebeck-Effekt. Danach entsteht in einem Stromkreis mit zwei unterschiedlichen Metallen durch ihre Potenzialunterschiede ein elektrischer Strom, wenn die Verbindungsstellen der Metalle dabei unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt sind. Der Effekt liegt auch bei einem Metall vor, dort gleichen sich die Potenziale allerdings gegenseitig aus. Die entstehende Thermospannung  $U_{th}$  kann durch Formel 1 vereinfacht beschrieben werden. [14, S. 221 f.]

$$U_{th} = k_{th} * (T_M - T_2)$$

$$U_{th} = \text{Thermospannung [V]}$$

$$k_{th} = \text{Thermokoeffizient } \left[ \frac{\text{V}}{\text{K}} \right]$$

$$T_M = \text{Temperatur an der Messstelle [K]}$$

$$T_2 = \text{Vergleichstemperatur [K]}$$

Formel 1: Thermospannung [14, S. 221 f.]

Der beschriebene Thermokoeffizient ist hierbei abhängig von den zwei verwendeten Metallen und kann somit beliebig an die Einsatzbedingungen angepasst werden. Der zweite Faktor ist die gemessene Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur an der Messstelle und der Vergleichstemperatur. Wenn also der Thermokoeffizient und die Vergleichstemperatur bekannt sind, liegt auch bei dieser Messmethode ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Thermospannung und der Temperatur an der Messstelle vor. [14, S. 221 f.]

Diese Form der Temperaturmessung deckt mit einem Messbereich von  $-200\text{ °C}$  bis ca.  $2300\text{ °C}$  (abhängig von Material und Ausführung) eine deutlich größere Anzahl an Anwendungen ab als die Messung mit Widerstandsthermometern. Diese können nur in Bereichen zwischen  $-200\text{ °C}$  und  $850\text{ °C}$  eingesetzt werden und haben zusätzlich eine längere Ansprechzeit. Die Widerstandsthermometer bieten dagegen den Vorteil einer höheren Genauigkeit und benötigen keine zusätzliche Vergleichsstelle für die Messungen. Voraussetzung für die höhere Genauigkeit ist die Nutzung von 4-Leiter-Technik. Dadurch wird die Nutzung insgesamt weniger aufwendig. [14, S. 215 f.]

### 2.3.6 Durchflussmessung

Das Prinzip der Durchflussmessung wird in vielen Einsatzgebieten und Umgebungsbedingungen angewandt. Dabei geht es stets um die Ermittlung der Masse  $m$  oder des Volumens  $V$  eines Stoffes, der pro Zeiteinheit  $t$  einen definierten Raum durchfließt. Diese werden als Volumenstrom  $\dot{V}$  und Massenstrom  $\dot{m}$  bezeichnet. [14, S. 229 f.]

$$\dot{V} = \frac{V}{t} ; \dot{m} = \frac{m}{t}$$

$$\dot{m} = \text{Massenstrom} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{V} = \text{Volumenstrom} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$V = \text{Volumen} [\text{m}^3]$$

$$m = \text{Masse} [\text{kg}]$$

$$t = \text{Zeit} [\text{s}]$$

*Formel 2: Volumen und Massenstrom [14, S. 229 f.]*

Der Massen- und Volumenstrom stehen dabei über die Dichte  $\rho$  des fließenden Mediums in Abhängigkeit zueinander. Formel 3 zeigt diesen Zusammenhang. Dies gilt allerdings nur für inkompressible Medien wie beispielsweise Wasser. Bei Gasen ist eine Messung aufgrund ihrer Kompressibilität komplizierter. Zusätzlich können auch Veränderungen der äußeren Umstände wie der Temperatur Einflüsse auf die Dichte des Mediums haben. [14, S. 229 f.]

$$\dot{m}(T) = \dot{V} * \rho(T)$$

$$\dot{m} = \text{Massenstrom} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$T = \text{Temperatur} [\text{K}]$$

$$\dot{V} = \text{Volumenstrom} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$\rho = \text{Dichte des Stoffes} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Formel 3: Zusammenhang Massen- und Volumenstrom [14, S. 229 f.]

Die Messungen sind durch die Nutzung verschiedener physikalischer Grundprinzipien möglich. Bei der Messung über Drosselgeräte werden strömungsdynamische Zusammenhänge genutzt, um über Querschnittsveränderungen und dadurch induzierte Druckdifferenzen den Durchfluss zu bestimmen. [14, S. 230 f.]

Messungen unter Verwendung von Ultraschall agieren hingegen mit der Reaktion von angeregten Teilchen des Mediums. Diese werden beschallt und reflektieren das Signal abhängig von der vorliegenden Strömungsrichtung und -geschwindigkeit. Über die entstehenden Differenzen in der Laufzeit des Schalls kann schließlich die Fließgeschwindigkeit des Mediums ermittelt werden. Bei bekanntem Querschnitt lässt sich dies schließlich in einen Volumenstrom übersetzen. [14, S. 233 f.]

Eine weitere Methode stellen magnetisch-induktive Messungen dar. Dabei wird ein isolierendes Rohr von einem leitfähigen Medium durchströmt. Durch Zuschaltung eines Wechselladungsfeldes wird eine Ladungstrennung innerhalb des Mediums induziert, welche wiederum über eine Differenzspannung gemessen wird. Wenn der Leitungsquerschnitt bekannt ist, ist diese Spannung proportional zum vorliegenden Volumenstrom. [14, S. 237 f.]

## 2.4 Thermodynamische Grundlagen

Die in dieser Arbeit untersuchte Größe, die Wärmefluss- oder Wärmestromdichte  $\dot{q}$ , ist Teil des Fachgebietes der Thermodynamik im spezifischen der Wärmeübertragung. Zum besseren Verständnis der Zusammenhänge und der im Laufe der Arbeit durchgeführten Berechnungen werden in diesem Kapitel die verwendeten Formeln dargestellt und gemeinsam mit ihren Variablen erläutert. [15]

### 2.4.1 Wärmestrom und Flussdichte

Bevor die Flussdichte  $\dot{q}$  und der Wärmestrom  $\dot{Q}$  berechnet werden können, muss zunächst die Wärmeenergie  $Q$  ermittelt werden. Diese ist in Formel 4 beschrieben.

$$Q = c_p(T) * m(T) * \Delta T$$

$Q$  = Wärmeenergie [J]

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ]

$m$  = Masse [kg]

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz [K]

Formel 4: Wärmeenergie [16, S. 1 f.]

Die Formel setzt sich aus der spezifischen Wärmekapazität des Mediums  $c_p$  und der Masse  $m$  in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$  sowie der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zusammen. Die Temperaturdifferenz stellt den Unterschied zwischen der betrachteten Anfangstemperatur  $T_A$  und Endtemperatur  $T_E$  dar (Formel 5).

$$\Delta T = T_E - T_A$$

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz [K]

$T_E$  = Endtemperatur [K]

$T_A$  = Anfangstemperatur [K]

Formel 5: Temperaturdifferenz [16, S. 1 f.]

Wird ein Zeitraum und nicht wie bei der Wärmeenergie ein fester Zeitpunkt betrachtet, ergibt sich daraus der Wärmestrom  $\dot{Q}$ . In der Formel 6 wird entsprechend anstatt einer festen Masse  $m$  der Massenstrom  $\dot{m}$  (Formel 2) berücksichtigt.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = c_p(T) * \frac{m(T)}{t} * \Delta T$$

$$= c_p(T) * \dot{m}(T) * \Delta T$$

$\dot{Q}$  = Wärmestrom [W]

$Q$  = Wärmeenergie [J]

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ]

$m$  = Masse [kg]

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz [K]

Formel 6: Wärmestrom [15]

Um die untersuchte Wärmeflussdichte  $\dot{q}$  zu ermitteln, wird der erhaltene Wärmestrom  $\dot{Q}$  anschließend in Relation zu der untersuchten Fläche  $A$  gesetzt. Es ergibt sich der Gesamtzusammenhang in Formel 7.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{c_p(T) * \dot{m}(T) * \Delta T}{A}$$

$\dot{q}$  = Wärmestromdichte / Flussdichte [ $\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ ]

$\dot{Q}$  = Wärmestrom [W]

$A$  = Fläche [ $\text{m}^2$ ]

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$ ]

$m$  = Masse [kg]

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz [K]

Formel 7: Flussdichte [15]

## 2.4.2 Temperaturabhängige Stoffeigenschaften

Für eine maximale Genauigkeit der Berechnungen sollten bei veränderlicher Temperatur des Systems die spezifische Wärmekapazität und die für den Massenstrom notwendige Dichte (Formel 3) des Mediums in Abhängigkeit der gemessenen Temperatur ermittelt werden. Die nachfolgenden Korrelationsgleichungen (Formel 8; Formel 9) bilden diesen Zusammenhang ab.

$$\rho_{fl} = \rho_c + A * \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{0,35} + B * \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{2}{3}} + C * \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) + D * \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{\frac{4}{3}}$$

$\rho_{fl}$  = Dichte des Stoffes [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]

$\rho_c$  = Dichte am kritischen Punkt [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]

$A, B, C, D$  = stoffspezifische Variablen [-]

$T$  = Messtemperatur [K]

$T_c$  = Temperatur am kritischen Punkt [K]

Formel 8: Korrelationsgleichung - Dichte gesättigter Flüssigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur [17]

$$c_p^{fl} = R * \left(\frac{A}{1 - \frac{T}{T_c}} + B + C \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) + D \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2 + E \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^3 + F \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^4\right)$$

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$ ]

$R$  = spezifische Gaskonstante [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$ ]

$A, B, C, D, E, F$  = stoffspezifische Variablen [-]

$T$  = Messtemperatur [K]

$T_c$  = Temperatur am kritischen Punkt [K]

Formel 9: Korrelationsgleichung - Spezifische Wärmekapazität von Flüssigkeiten bei konstantem Druck [17]

Die verwendeten Variablen sind hierbei abhängig vom betrachteten Stoff und gelten nur in den vordefinierten Temperaturbereichen. Für Wasser gelten die in Tabelle 1 angegebenen Werte.

Tabelle 1: Variablen Korrelationsgleichungen Wasser [17, 18]

Variable	Formel 8	Formel 9
$R$	-	$0,461526 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$
$\rho_c$	$322 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	-
$T_c$	647,069 K	647,069 K
$A$	1094,0233	0,2399
$B$	- 1813,2295	12,8647
$C$	3863,9557	-33,6392
$D$	- 2479,8130	104,7686
$E$	-	-155,4709
$F$	-	92,3726

### 2.4.3 Wärmeübertragung

Grundlegend gibt es drei Formen des Wärmetransportes genauer gesagt der Wärmeübertragung, die bei thermischen Prozessen zu berücksichtigen sind. Diese sind:

- Wärmeleitung,
- Konvektion und
- Wärmestrahlung.

Das Prinzip der Wärmeleitung beschreibt den Transport von Wärmeenergie innerhalb oder zwischen Stoffen unterschiedlicher Temperatur (vgl. Formel 5). Es stellt eine der drei Arten des Wärmetransportes dar, ist unabhängig von erzwungenen Bewegungen und gilt für alle Festkörper, Flüssigkeiten und Gase gleichermaßen. Falls nur reine Wärmeleitung vorliegt, hängt die Intensität dieser vollständig von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des oder der involvierten Stoffe ab. Bei Festkörpern liegt die Wärmeleitfähigkeit zwischen  $1 \frac{\text{W}}{\text{K} * \text{m}}$  und  $450 \frac{\text{W}}{\text{K} * \text{m}}$  und ist damit höher als bei Fluiden. Die Kennwerte für die Metalle Kupfer, Aluminium und Stahl sind in der nachfolgenden Tabelle 2 angegeben. [15]

Tabelle 2: Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Metalle [15]

Material	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [in $\frac{\text{W}}{\text{K} * \text{m}}$ ]
Kupfer	395
Aluminium	220
Stahl (18Cr8Ni)	21

Für eine einschichtige Wand kann mit diesen Kennwerten und der nachfolgenden Formel der Wärmestrom durch Wärmeleitung berechnet werden.

$$\dot{Q} = A * \frac{\lambda}{\delta} * (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

$\dot{Q}$  = Wärmestrom [W]

$A$  = Fläche [m<sup>2</sup>]

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit [ $\frac{W}{K \cdot m}$ ]

$\delta$  = Grenzschichtdicke [m]

$\vartheta_1$  = wärmeres Temperaturniveau [K]

$\vartheta_2$  = kälteres Temperaturniveau [K]

*Formel 10: Wärmestrom bei einer einschichtigen Wand [19]*

Neben der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  sind die Dicke des durchströmten Körpers  $\delta$ , die Wirkfläche  $A$  sowie die vorliegenden Temperaturen ( $\vartheta_1, \vartheta_2$ ) für die Stärke des Wärmestromes von Bedeutung. [19]

Die Konvektion beschreibt den Wärmestrom, welcher in einem strömenden Medium übertragen wird. Sie tritt zusätzlich zur Wärmeleitung auf und ist neben den Stoffwerten des Mediums außerdem von strömungstechnischen Prozessparametern abhängig. Die Stärke des Effektes nimmt mit der vorliegenden Temperaturdifferenz zwischen Medium und Bewandung zu. [15]

Im Gegensatz zu den beiden beschriebenen Effekten benötigt Wärmestrahlung kein Transportmedium. Es handelt sich dabei um elektromagnetische Strahlung, welche von jedem Körper mit einer Temperatur über 0 K ausgesandt wird. Die Stärke der Strahlung nimmt mit steigender Temperatur zu. Die zuvor beschriebenen schwarzen Körper beschreiben einen Zustand, indem sämtliche vorhandene Wärmeenergie in Form von Strahlung emittiert wird. Bei realen Körpern kann der Emissionsgrad  $\varepsilon$  mit dem Ausdruck  $0 \leq \varepsilon < 1$  definiert werden. [15]

### 3 Methodik

In diesem Kapitel soll die zur Erstellung der Arbeit verwendete Methodik genauer betrachtet und erläutert werden. Zunächst wird dazu die bereits geleistete Arbeit in Form der Konzeption des Messverfahrens erklärt. Anschließend folgt eine Auflistung der geplanten Versuche sowie ein Ausblick auf die erwarteten Ergebnisse.

#### 3.1 Bisherige Arbeit

Das in dieser Arbeit untersuchte Wasser-Kalorimeter sowie der Versuchsstand wurden in einem vorangegangenen Projekt konzipiert und realisiert. Da der genaue Aufbau die verwendeten Komponenten und die Funktionsweise der Steuerung und Auswertung für die Diskussion der erzielten Ergebnisse von großer Relevanz sind, werden diese im Folgenden dargestellt.

##### 3.1.1 Konzeptionierung und Fertigung des Kalorimeters

Die Konzeptionierung des Kalorimeters erfolgte als Eigenkonstruktion auf Basis der im Stand der Technik beschriebenen Grundprinzipien. Als Medium wurde aufgrund der einfachen Handhabung und für diese Anwendung gut geeigneten und dokumentierten Stoffeigenschaften Wasser ausgewählt. [12]

Die Geometrie ist durch die Anlagenspezifikationen und den konkreten Anwendungsfall bedingt. Als Hauptwerkstoff wurde Messing ausgewählt, welches aus Kupfer und Zink besteht. Die Kombination dieser Materialien bietet eine gute Korrosionsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Verarbeitbarkeit. [20, S. 65 f. & 71 f.]



Abbildung 10: Kalorimeter in Einzelteilen (links) und zusammgebaut inkl. Kühlkörper (rechts) (eigene Aufnahme)

In der obigen Abbildung 10 ist die fertige Baugruppe in Einzelteilen und zusammgebaut zu erkennen. Der Zusammenbau erfolgte zu großen Teilen über Schraubverbindungen. Nur das Adapterstück (4) wurde mit einer Lötverbindung an dem Kalorimeter (1) angebracht. Dem Anhang sind Zeichnungen mit den genauen Spezifikationen des Kalorimeters (1; Anhang 1), des Adapterstückes (4; Anhang 2) sowie Diffusors (5; Anhang 3) zu entnehmen.

Das Wasser strömt durch die untere Öffnung in Bauteil 1 ein. Im Inneren wird es anschließend an der Innenseite des Diffusors (5) entlang bis zur Empfängerplatte (3) geleitet. Es strömt zwischen der Austrittsplatte des Diffusors (5) und der Empfängerplatte (3) hindurch und danach seitlich an dem Diffusor vorbei, zu dem seitlichen Adapterstück (4). Durch dieses tritt das durch die Bestrahlung erwärmte Wasser wieder aus dem Kalorimeter aus. Der bestrahlte Bereich der Empfängerplatte besitzt einen Durchmesser von 40 mm und damit eine Gesamtfläche  $A$  von oder  $0,001257 \text{ m}^2$ .

Der Einfluss der Beschichtung der Empfängerplatte (3) soll in einer der Versuchsreihen genauer untersucht werden. Aus diesem Grund und zur Wartung kann die Platte durch das Abschrauben einer Überwurfmutter (2) flexibel ausgetauscht werden. Die Abdichtung erfolgt mit einer Ringdichtung (6) zwischen der Empfängerplatte und der Innenseite des Kalorimeters (1). Für die ersten beiden Versuchsreihen wird eine Platte aus Aluminium mit einer Beschichtung aus stark absorptivem schwarzem Thermolack der Firma Champion Color verwendet. Dieser bietet eine Temperaturbeständigkeit von bis zu  $800 \text{ °C}$  sowie Korrosionsschutz, welcher bei einem wasserbasierten System von Vorteil ist. [21]

Die Überwurfmutter (2) wird nachfolgend mithilfe einer Schraubverbindung an der Rückseite des Aluminium-Kühlkörpers (Abbildung 10 rechts) montiert. Der Kühlkörper hat eine Größe von  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ , eine Dicke von  $20 \text{ mm}$  und verfügt über eine separate Wasserzufuhr zur Kühlung. Er schirmt sämtliche Strahlung ab, welche außerhalb des bestrahlten Bereiches auftrifft.

Zur Konstruktion und Auslegung wurde mithilfe der Formeln 7 bis 9 ein erster Referenzwert für die aufnehmbare Flussdichte errechnet. Für einen hypothetischen erreichbaren Volumenstrom  $\dot{V}$  von  $10 \frac{1}{\text{min}}$  oder  $0,00017 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  und bei einer maximalen Temperaturdifferenz  $\Delta T$  von  $45 \text{ K}$  ergeben sich folgende Werte.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{max} &= \frac{c_p(60 \text{ °C}) * \dot{V} * \rho(60 \text{ °C}) * \Delta T}{A} \\ &= \frac{4,183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 0,00017 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 983,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 45 \text{ K}}{0,001257 \text{ m}^2} = 25030 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Formel 11: Berechnung eines Referenzwertes der maximal messbaren Flussdichte

Dieser Wert liegt weit über dem angestrebten Messbereich von ca.  $2000 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ . Konkret bedeutet dies, dass der Durchfluss während Versuchen mit wenigen Strahlern deutlich reduziert werden muss. Zusätzlich ist bei korrekter Verwendung eine hohe Sicherheit gewährleistet.

Diese erste Annahme gilt es in den Versuchen experimentell zu überprüfen, da die Berechnungen aufgrund von Idealwerten durchgeführt wurden. Im finalen Ergebnis ist

mit einer signifikanten Abweichung zu rechnen. Dafür relevante Effekte werden im Laufe der Arbeit untersucht und erläutert.

### 3.1.2 Auswahl des Aufbaus und der Komponenten

Für den Aufbau des Versuches wurde eine open-loop-Lösung verwendet. Das verwendete Wasser in den Haupt- und Kühlleitungen wird direkt aus den Wasserleitungen des Gebäudes entnommen und nach einmaligem Durchlaufen wieder abgeleitet wird. Dadurch ist keine Kühlung des verwendeten Wassers erforderlich und der Aufbau wird vereinfacht. Zusätzlich ist keine Verwendung eines speziellen Mediums notwendig, wie bereits in Kapitel 2.3.3 beschrieben.

Ein Schema des konzipierten und umgesetzten Versuchsaufbaus ist in Abbildung 11 dargestellt. Darin ist zusätzlich die Flussrichtung sowie der Bereich des Apertur-Öffnungswinkels  $\varphi$  angegeben. Zusätzlich sind die einzelnen Komponenten aufgeführt.

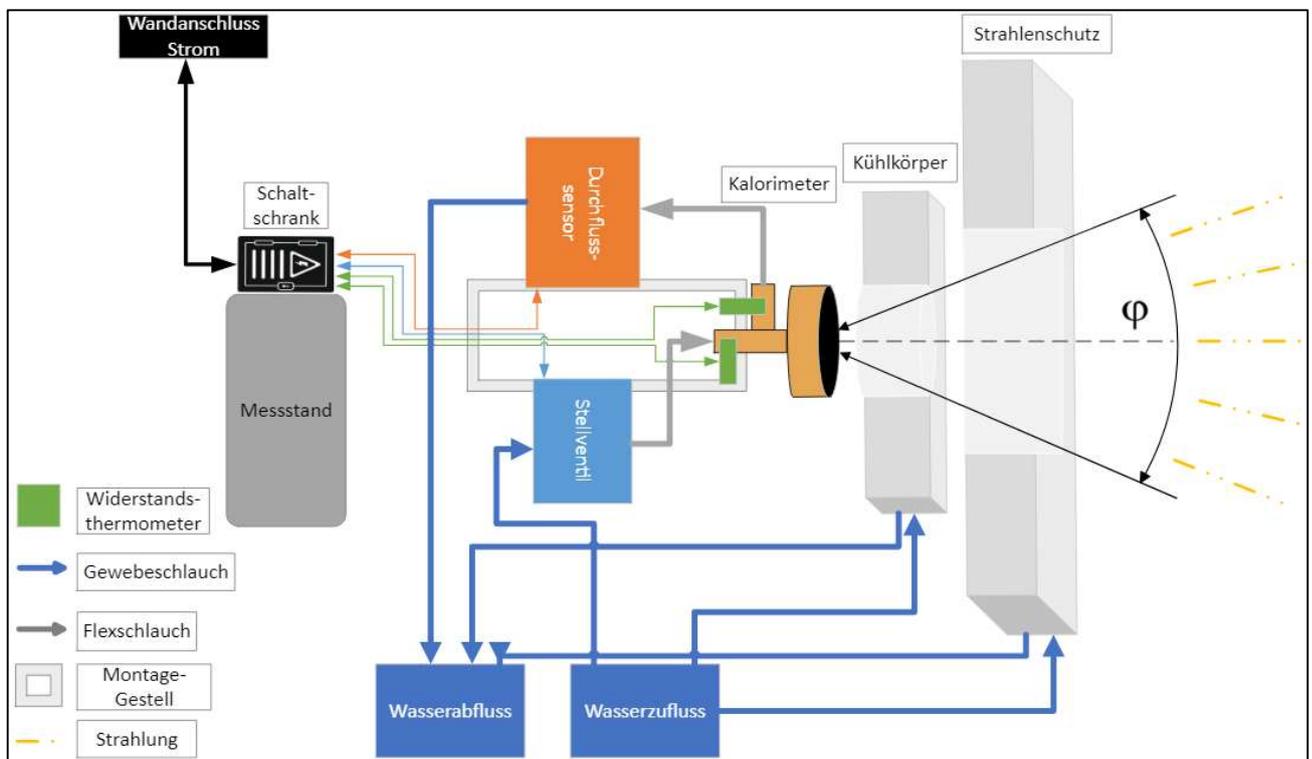


Abbildung 11: Konzipierter Versuchsaufbau (eigene Darstellung)

Als erstes Bauteil wird das Stellventil *EB 5827-2* der Firma *Samson* eingesetzt, welches den Volumenstrom des Wassers variabel steuert. Es wird über eine Spannung von 0 V bis 10 V oder einen Strom von 0 mA bis 20 mA angesteuert und gibt die aktuelle Einstellung ebenfalls über eine Spannung von 0 V bis 10 V aus. Im Kreislauf wird das Ventil aufgrund einer maximalen Betriebstemperatur von 60 °C vor dem Kalorimeter eingebaut. Dadurch werden Fehlfunktionen oder Ausfälle verhindert. [22]

Zur Messung der Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur des Wassers am Kalorimeter werden Widerstandsthermometer (*16-1-3,0-4-100-PDT-PT1000-A-4,5m-Lead TEF/SIL-G0*) der Firma *RC Mess- und Regelungstechnik GmbH*

eingesetzt. Es handelt sich dabei nach Herstellerangaben um Widerstandsthermometer mit Schutzrohr der Klasse PT1000 mit einem Durchmesser von 3 mm und Vier-Leiter-Technik. Die Länge des Thermometers beträgt 100 mm bei Toleranzklasse A (Messabweichung von  $\pm 0,15$  °C bei 0 °C und  $\pm 0,35$  °C bei 100 °C) und einem Kabel von 4,5 m Länge. Für die Montage sind an den entsprechenden Stellen T-Stücke mit 4 mm Einschraub-Fixierungen in den Wasserkreislauf eingebaut. [23]

Um den Durchfluss für die Kontrolle sowie spätere Berechnungen erfassen zu können, wird nach dem Kalorimeter ein magnetisch-induktiver Durchflusssensor *SM6120* der Firma *ifm* verbaut. Er bestimmt den zeitgenauen Volumenstrom des Wassers im Hauptkreislauf in Litern pro Minute und gibt diese Daten als Signalspannung von 0 V bis 10 V aus. Nach Herstellerangaben ist der Sensor bis zu einer Temperatur von 100 °C einsetzbar und somit für die erwarteten Belastungen auch nach Durchlaufen des Kalorimeters geeignet. [24]

Für die Leitung des Wassers werden größtenteils handelsübliche Gewebeschräuche aus PVC mit einem Innendurchmesser von 12,5 mm und einer 3 mm starken Wandung verwendet. Als unmittelbare Zu- und Ableitungen des Kalorimeters werden sogenannte Flexschläuche genutzt. Diese sind durch eine metallische Ummantelung verstärkt und dadurch besser gegen eine mögliche Belastung durch Reststrahlung und Wärmeeinflüsse geschützt. Das verwendete Modell ist bis zu einer Temperatur von 70 °C nutzbar. [25]

Bei dem genutzten Strahlenschutz handelt es sich um eine Eigenkonstruktion aus Aluminiumprofilen in Kombination mit einer stark reflektiv beschichteten Oberfläche. Bei der Beschichtung handelt es sich um einen weißen Hochtemperatur-Lack der Firma *Spray-Color GmbH*. Dieser ist beständig bis zu einer Temperatur von 650 °C und weist nach internen Untersuchungen eine Reflektivität von 80 % auf. Im unmittelbar bestrahlten Bereich sind vier manuell einstellbare Kühlkörper verbaut. Darüber kann die Größe der mittigen Öffnung stufenlos eingestellt werden. [26]

### 3.1.3 Implementieren der Versuchssteuerung

Zur Steuerung und Datenverarbeitung der verschiedenen Aktoren und Sensoren sind diese über Datenschnittstellen der Firma *National Instruments®* an einen Steuerungsrechner angebunden. Die verwendeten Daten- und Steuerungsmodule und ihre zugehörigen Aufbau-Komponenten sind in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgelistet und erläutert. Zu erkennen sind die bereits erwähnten Standardsignale von 0 V bis 10 V und 4 mA bis 20 mA oder alternativ 0 mA bis 20 mA sowie die Temperatur der Widerstandsthermometer.

Tabelle 3: Verwendete Datenmodule und Sensoren [27, 28]

Modulbezeichnung	Spezifikationen	Funktion	Datenformat
<b>NI 9219</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Universelles Analogeingangsmodul</li> <li>• 4 Kanäle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 x Spannungseingang Widerstandsthermometer</li> <li>• 1 x Spannungseingang Stellventil</li> <li>• 1 x Stromeingang Durchflussmessgerät</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• °C (interne Verrechnung)</li> <li>• 0-10 V</li> <li>• 4-20 mA</li> </ul>
<b>NI 9265</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stromausgangsmodul</li> <li>• 4 Kanäle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 x Stromausgang Stellventil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0-20 mA</li> </ul>

Nach der Herstellung der entsprechenden Verbindungen erfolgt die Überwachung, Steuerung und Datenverarbeitung für den Versuch über das Programm LabVIEW®, welches ebenfalls von *National Instruments®* stammt. Es handelt sich um eine grafikbasierte Programmiersprache mit einer umfangreichen bestehenden Dokumentation, welche speziell für die messtechnische Anwendungen geeignet ist. [29]

Die in das System eingelesenen und nach der Verarbeitung ausgegebenen Daten sind zum besseren Verständnis nachfolgend dargestellt. Eingelesen werden die erhaltenen Messdaten der Sensorik sowie die Nutzerdaten. Das Programm verarbeitet die Daten und gibt einen Steuerungsstrom für die Aktorik, eine Datei mit Messdaten, eine grafische Nutzeroberfläche und im Notfall ein Notsignal aus.

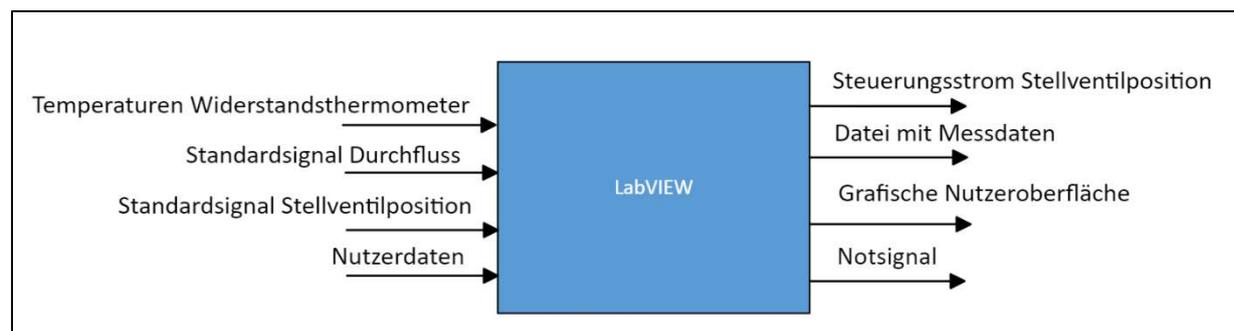


Abbildung 12: Ein- und Ausgänge des Programms (eigene Darstellung)

Konkret bearbeitet und realisiert werden die Ein- und Ausgänge über ein Hauptprogramm sowie verschiedene Unterprogramme - in LabVIEW® VI (virtual instrument) genannt - welche im Anhang (Anhang 4; Anhang 5) dokumentiert sind und nachfolgend erläutert werden. Dazu ist zunächst eine Deklaration der über die Datenmodule aufgenommenen Messsignale über das Programm *NI Max* notwendig. Es handelt sich dabei um eine zu LabVIEW zugehörige Schnittstelle, über die Sensoren getestet und direkt

angesteuert werden können. Zusätzlich können Kanäle, Skalen und Signaltypen eingestellt und weitere Anpassungen vorgenommen werden. [30]

Um die gemessenen Daten zu dokumentieren, wird über verschiedene Sub-VIs vor Beginn der Programmschleife eine Datei im TDMS-Format (engl. *technical data management system*), einem Format der Firma *National Instruments* zur Verarbeitung technischer Messdaten, erzeugt. Diese enthält Zeitstempel, den manuell eingegebenen Dateipfad sowie Versuchs- und Nutzerdaten und Spaltennamen. Während der Programmschleife werden die Messdaten bei jedem Durchlauf in die erzeugte Datei geschrieben. Nach Ende der Schleife wird die Datei anschließend abgespeichert. Das TDMS-Format ist für die weitere Verwendung in Programmen wie Excel gedacht und vereinfacht die Aufbereitung der Daten. Die verwendete Logik ist in Abbildung 13 erläutert. Der Originalcode ist in Anhang 4 abgebildet.

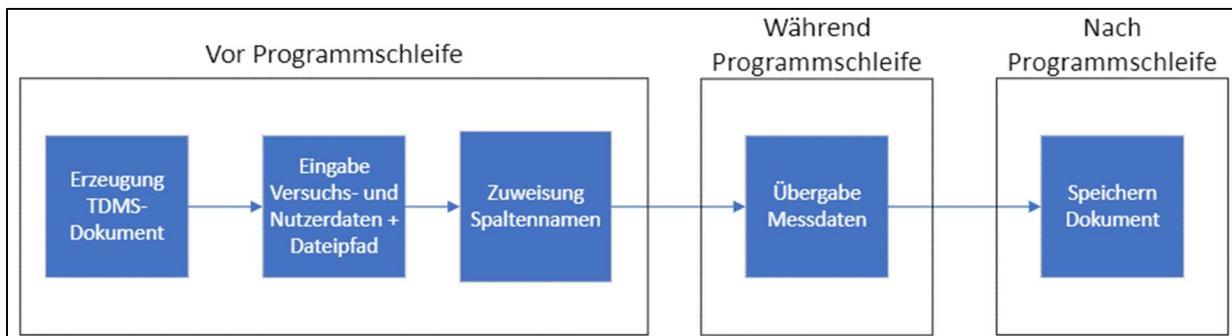


Abbildung 13: Erzeugung Messdaten (eigene Darstellung)

Bevor die Daten abgespeichert werden, müssen diese allerdings zunächst aus den Signalen umgerechnet und die gewünschten Größen berechnet werden. Die erhaltenen Signale der Widerstandsthermometer werden vom Programm direkt in Zahlenwerte in der Einheit °C umgerechnet und können so ohne weitere Umrechnungen verwendet werden.

Die Stromeingangssignale des Stellventils  $S_{SV}$  und Spannungseingangssignale des Durchfluss-Messgerätes  $S_{DS}$  werden für die Verwendung in den Messungen so multipliziert, dass ihre Stärke direkt äquivalent zum abgedeckten Messbereich ist. Dies ist durch die Funktionsweise der Sensoren bedingt (s. Kapitel 2.3). Die folgende Formel stellt die vorgenommenen Rechen-Operationen dar.

$$S_{DS} = S_E [A] * 1000 \frac{\text{mA}}{A} = (S_E [\text{mA}] - 4) / 16 = S_E [\%] * 35 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

$$S_{SV} = S_E [V] * 10 \frac{\%}{V}$$

$S_{DS}$  = Signal Durchfluss-Sensor [l/min]

$S_{SV}$  = Signal Stellventil [%]

$S_E$  = Eingangssignal [A; V]

Formel 12: Umrechnung der Eingangssignale des Durchfluss-Sensors und Stellventils

Das Signal des Durchfluss-Messgerätes (4 mA bis 20 mA) wird von mA in A umgerechnet, anschließend auf 0 % bis 100 % normiert und schließlich mit dem Messbereich des Sensors multipliziert.

Für das Stellventil wird das Eingangssignal (0 V bis 10 V) mit dem Faktor 10 multipliziert, um die Öffnung in Prozent zu erhalten.

Zusätzlich werden unplausible wie beispielsweise negative Werte und vernachlässigbar kleine Werte durch Logiken auf 0 gesetzt. Dies erleichtert das Monitoring über die Nutzeroberfläche während der Versuche und vermeidet inkorrekte Messergebnisse.

Mit den dadurch erhaltenen Messwerten in den korrekten Einheiten kann die Berechnung der aufgenommenen Wärmemenge  $\dot{Q}$  und Umrechnung in die Flussdichte  $\dot{q}$  erfolgen. Dazu werden die in Kapitel 2.4 erläuterten Formeln in einem Unterprogramm hinterlegt. In diesem Unterprogramm werden ebenfalls die Dichte  $\rho$  und die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt, um möglichst genaue Messwerte zu erhalten. Eine schematische Darstellung des entstandenen Codes ist in Abbildung 14 dargestellt (basierend auf Anhang 5).

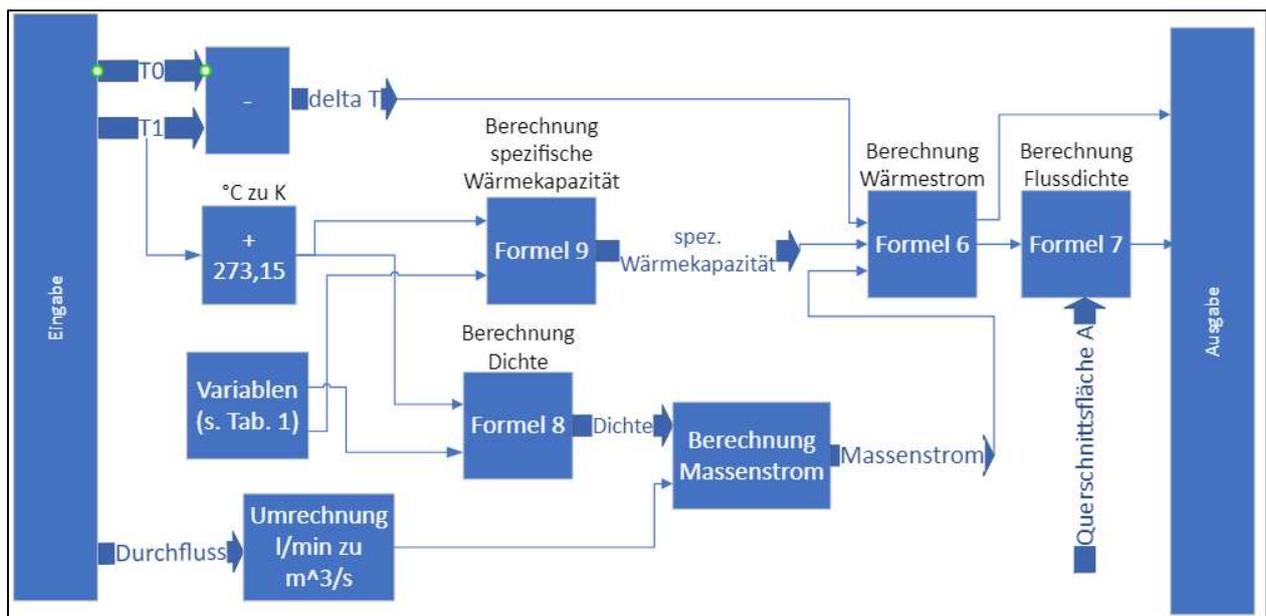


Abbildung 14: Berechnung Wärmemenge und Flussdichte (eigene Darstellung)

Die berechneten Werte werden anschließend dem Strom der Messdaten zugeführt und dem Nutzer zusätzlich in Echtzeit über die grafische Nutzeroberfläche angezeigt. Eine Darstellung des Wärmestroms mittels eines Graphen ist zur besseren Nachvollziehbarkeit eingefügt.

Zur Ansteuerung des genutzten Stellventils und darüber des Durchflusses wird die bereits in Tabelle 3 beschriebene Ausgabe eines Stromes im Bereich von 0 mA bis 20 mA benötigt. Die Stromstärke wird direkt in der grafischen Nutzeroberfläche eingestellt und über das Datenmodul an das Ventil übergeben. Dazu wird die Nutzereingabe der

Ventilöffnung von 0 % bis 100 % direkt proportional in den ausgesandten Strom umgerechnet (Anhang 4, Mitte unten).

An dieser Stelle ist zusätzlich eine Sicherheitslogik eingebaut. Falls eines der beiden Widerstandsthermometer eine Temperatur von über 60 °C registriert, wird der angelegte Strom über eine Fallunterscheidung auf das Maximum erhöht und das Stellventil vollständig geöffnet. Über die Einbindung beider Thermometer kann so auch bei einer Vertauschung die Sicherheit des Systems gewährleistet werden. Die Logik ist nachfolgend schematisch dargestellt.

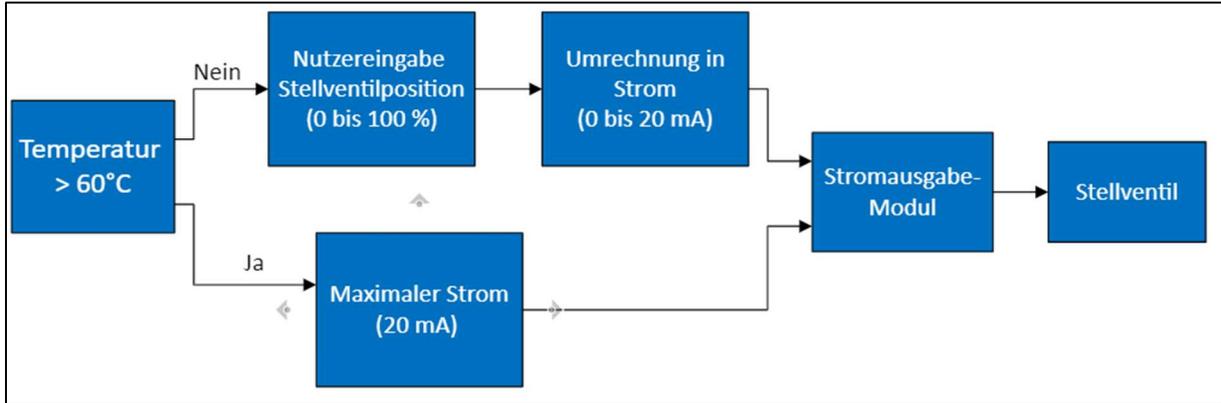


Abbildung 16: Sicherheitslogik (eigene Darstellung):



Abbildung 15: Grafische Nutzeroberfläche des Programms (eigene Aufnahme)

Die bereits beschriebene Nutzeroberfläche ist in Abbildung 15 zu erkennen. Oben links kann zur genauen Zuweisung der Messdaten ein Name, Nutzererkennung sowie die

Bezeichnung des Versuches hinterlegt werden. Darunter ist ein Terminal, welches im Falle eines Programmfehlers den zugehörigen Fehlercode ausgibt.

Oben in der Mitte sind die Eingabe und Ist-Position des Stellventils sowie die weiteren gemessenen und berechneten Datenwerte angeordnet. Unter diesen sind die zugehörigen Graphen platziert, an denen Tendenzen im System unmittelbar erkannt werden können.

In der rechten oberen Ecke ist schließlich die Warn- und Stopp-Logik positioniert. Die Lampen geben direkte Auskunft darüber, ob sich das System in einem sicheren oder kritischen Zustand befindet. Über den Stopp-Knopf kann der Benutzer das Programm beenden, ohne den Durchfluss zu verändern.

### 3.2 Geplante Versuche

Um die Eignung des entwickelten Messverfahrens zur tatsächlichen Verwendung in der Anlage ermitteln zu können, sind drei separate Versuchsreihen geplant. Diese sind im Folgenden aufgelistet:

1. Untersuchung des Flusssdichte-Messbereiches und der Genauigkeit des Aufbaus
2. Betrachtung des Einflusses verschiedener Einfallswinkel
3. Überprüfung der Einflüsse des Empfängermaterials

Ziel des ersten Versuches ist es, zu ermitteln, welche Strahlungsenergie und Flusssdichte bzw. wie viele Strahlerelemente simultan gemessen werden können. Dazu werden sukzessive Elemente hinzu geschaltet und die Reaktionen des Systems sowie die erhaltenen Messdaten betrachtet. Weiterhin wird die Abweichung zum genutzten Referenz-Messsystem FMAS untersucht.

Für den zweiten Versuch wird der Einfluss von Abweichungen auf den vertikalen und horizontalen Achsen untersucht. Die Messwerte werden kontinuierlich festgehalten, um Abstufungen bei unterschiedlichen Neigungswinkeln gegenüber der Strahlung zu überprüfen. Dies soll ähnlich den Untersuchungen von Ballestrin und Ulmer umgesetzt werden (s. Kapitel 2.3).

Zuletzt soll die Einwirkung der Empfängerbeschichtung auf die Messungen des Kalorimeters betrachtet werden. Der Empfänger stellt als Ort der direkten Strahlungsaufnahme eines der wichtigsten Bauteile innerhalb des Versuches dar. Hierfür werden verschiedene absorptionssteigernde Beschichtungen erfasst. (s. Kapitel 3.1.1)

In Summe sind diese verschiedenen Versuchsreihen ausgewählt worden, um eine möglichst umfangreiche Bewertung des Verfahrens für den Einsatz im Anlagenbetrieb zu ermöglichen.

## 4 Durchführung

Das nachfolgende Kapitel stellt den Beginn des eigentlichen Hauptteils der Arbeit dar. Es wird die Vorbereitung sowie Durchführung der verschiedenen, bereits benannten Versuchsreihen dokumentiert. Dies bedeutet, dass die folgenden Unterkapitel je eine Versuchsreihe beschreiben. Besonders relevant sind dabei die iterativen Anpassungen während der Versuche, ausgehend von gewonnenen Erkenntnissen.

### 4.1 Versuchsreihe 1 – Untersuchung der Wärmekapazität und Genauigkeit der Messergebnisse

Nach Abschluss der Vorbereitungsarbeiten in Form von Abdichtungen der Schläuche und dem Überprüfen der Kabelverbindungen konnten erste Tests des Aufbaus (Abbildung 11) stattfinden. Zunächst wurde ein Durchlauf ohne Bestrahlung durchgeführt. Dieser diente dem Überprüfen der Dichtigkeit und Kühlfähigkeit des Systems. Außerdem wurde die korrekte Aufzeichnung der Messdaten und Echtzeit-Überwachung über den Programmcode untersucht.

#### 4.1.1 Test 1-1

Anschließend konnte ein erster Test unter Bestrahlung der Anlage vorgenommen werden. Dazu wurde der Durchfluss maximiert und ein einzelnes Strahlerelement schrittweise auf die Empfängerplatte ausgerichtet. Die Messdaten wurden erfasst und der Durchfluss ebenfalls stufenweise gedrosselt, um das Verhalten des Systems zu beobachten. Anschließend wurden, stets beginnend bei maximalem Durchfluss, weitere Strahlerelemente zugeschaltet und der Durchfluss wieder verringert. Dieser Vorgang wurde bis zu einer Anzahl von sechs simultan operierenden Strahlern fortgesetzt und die Daten parallel aufgezeichnet. Der Abbildung 17 können die gewählte Konfiguration und die nummerierte Reihenfolge der Zuschaltungen entnommen werden.

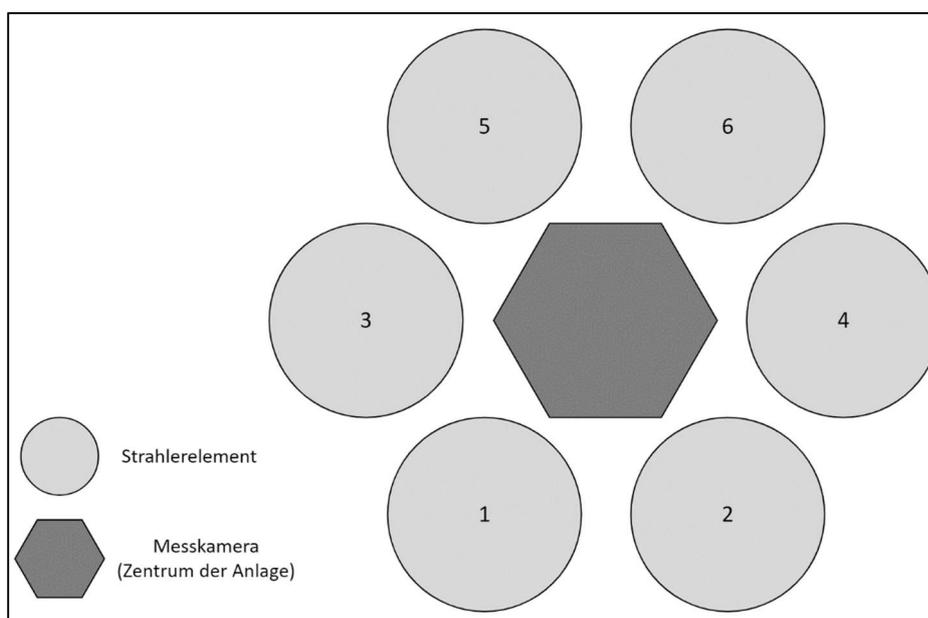


Abbildung 17: Strahleranordnung Test 1-1 (eigene Darstellung)

Um die Genauigkeit der ermittelten Messergebnisse beurteilen zu können, wurde eine Referenzmessung mit FMAS (s. Kapitel 2.3.4) durchgeführt. Das System wird im regulären Anlagenbetrieb zur Flussdichtemessung genutzt und liefert somit Referenzwerte für nachfolgende Vergleiche.

#### 4.1.2 Test 1-2

Zur weiteren Bestimmung der maximalen Bestrahlungskapazität des Versuchsaufbaus wurde eine zweite Messung durchgeführt. In dieser wurde die Anzahl der verwendeten Strahlerelemente um einen zusätzlichen Ring von 6 auf insgesamt 18 erhöht. Diese wurden jeweils unter maximalem Durchfluss in Stufen von zwei Elementen zugeschaltet. Die nachfolgende Messung wurde für diesen Test rückläufig vorgenommen. Nacheinander wurden je zwei Elemente paarweise abgeschaltet. Die verwendete Konfiguration ist in der Abbildung 18 dargestellt, inklusive der internen Strahler-Bezeichnungen.

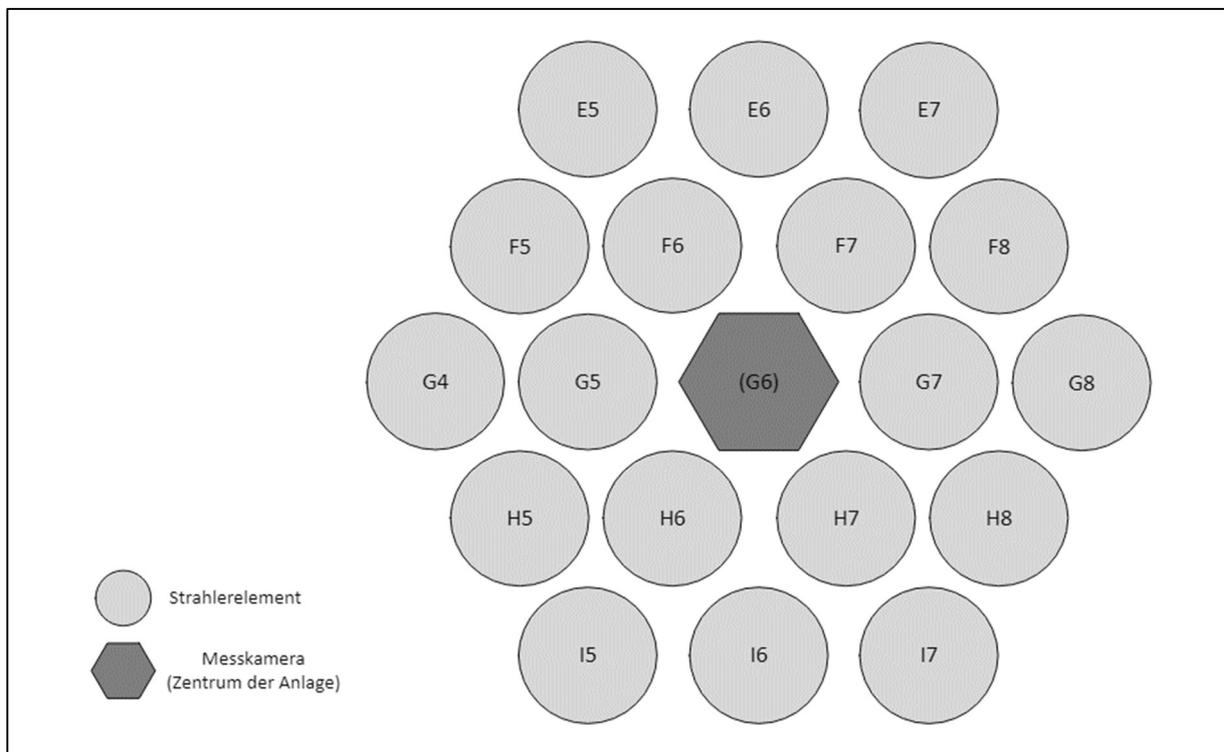


Abbildung 18: Strahleranordnung Test 1-2 (eigene Darstellung)

gen.

Die Reihenfolge der abgeschalteten Strahler ist in der nachfolgenden Tabelle 4 aufgeführt. Die Abschaltung erfolgte bestmöglich symmetrisch, da asymmetrische Bestrahlung aufgrund von Winkelabhängigkeiten zu nicht repräsentativen Messergebnissen führen würde.

Tabelle 4: Strahler-Konfiguration - 18 Strahler (Test 1-2)

Messung	Anzahl Strahler	Bemerkung
1	18	
2	16	Abschaltung E5, E7
3	14	Abschaltung I5, I7
4	12	Abschaltung I6, E6
5	10	Abschaltung F5, F8
6	8	Abschaltung H5, H8
7	6	Abschaltung G4, G8

Zusätzlich wurde auf die Wahrung eines Temperaturunterschiedes zwischen Ein- und Austritt des Kalorimeters von mindestens 10 K geachtet. Bei wenigen Elementen wurde der Durchfluss entsprechend reduziert. Anschließend wurden auch für diesen Versuch FMAS-Referenzmessungen durchgeführt. Zu beachten ist, dass die Strahlerelemente zwischen den Versuchen neu ausgerichtet wurden und eine direkte Vergleichbarkeit der Tests aus diesem Grund nicht gewährleistet ist.

#### 4.1.3 Test 1-3

Aufgrund unerwarteter Ergebnisse des zweiten Tests (s. Kapitel 5.2.2) wurde ein dritter Test innerhalb der ersten Messreihe durchgeführt. Ziel war die Ermittlung möglicher Fehlerquellen, welche die Unstimmigkeiten in den vorherigen Messergebnissen ausgelöst haben könnten. Aus diesem Grund sollten dieselben Strahlerelemente in derselben Konfiguration wie in Test 1-2 genutzt werden.

Während der Durchführung musste die Konfiguration jedoch aufgrund eines temporären Ausfalls des Strahlers F7 angepasst werden. Nachfolgende Messungen haben deshalb die folgenden Strahler-Anzahlen:

→ 18 – 15 – 13 – 11 – 9 – 8 – 7 – 6 – 4

Der Strahler F7 wurde nach der ersten Messung gemeinsam mit den Elementen E5 und E7 abgeschaltet.

Für den Test wurde neben der kalorimetrischen Messung und den Aufnahmen mit dem FMAS-System eine radiometrische Messung mit zwei verschiedenen Gardon Radiometern durchgeführt. Das erste Radiometer wurde für 1 MW/m<sup>2</sup> und das zweite für 5 MW/m<sup>2</sup> kalibriert, um unterschiedliche Anzahlen von Strahlerelementen erfassen zu können. Diese wurden ähnlich den kalorimetrischen Messungen in einen Kühlkörper eingebaut und hinter dem Strahlenschild montiert. Im Gegensatz zum Kalorimeter war

dabei eine Montage in und nicht hinter dem Kühlkörper möglich. Nachfolgend ist eine schematische Darstellung des verwendeten Aufbaus zu sehen.

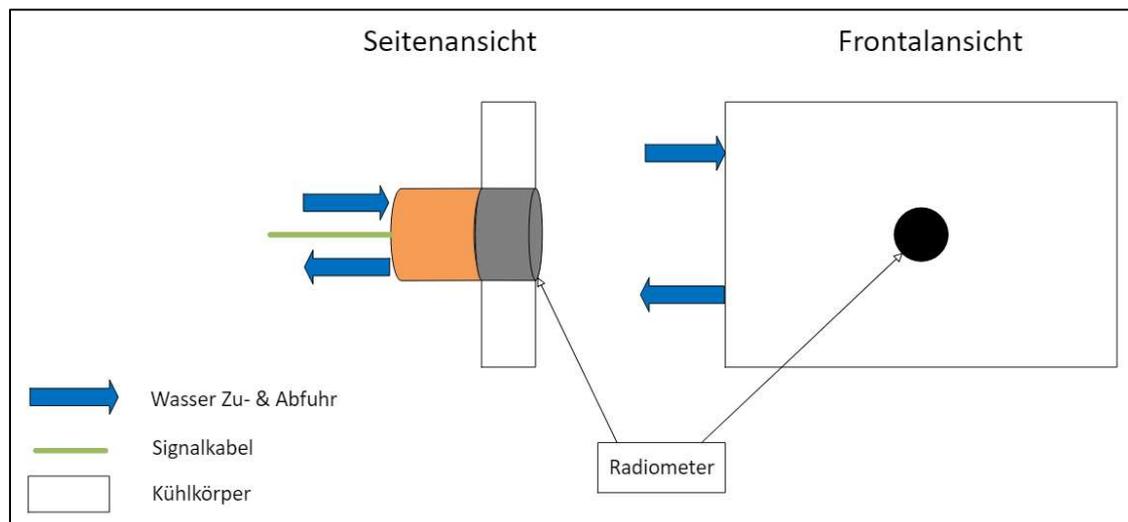


Abbildung 19: Radiometrischer Messaufbau (eigene Darstellung)

Zusätzlich wurde zur Verminderung der Wärmeleitung am Kalorimeter zwischen dem Kühlkörper und der montierten Mutter eine thermische Isolierung eingebaut. Die Begründung für diese Anpassung sowie weitere Untersuchung wird bei der Fehlerbetrachtung in Kapitel 6.1 durchgeführt.

#### 4.2 Versuchsreihe 2 - Verringerung der Aperturgröße $A$ des Kalorimeters

Die zweite durchgeführte Messreihe unterscheidet sich von dem ursprünglichen Messkonzept. Aufgrund der abweichenden Messwerte in Versuchsreihe 1 erfolgte eine Anpassung der Versuchs-Reihenfolge. Eine weitere Untersuchung der auftretenden Messabweichungen war zunächst sinnvoller als eine Betrachtung der Abhängigkeit durch Einfallswinkel.

Das neu gesetzte Ziel der zweiten Versuchsreihe ist infolgedessen die Anpassung der bestrahlten Fläche  $A$  auf der Empfängerplatte des Kalorimeters. Dazu wird die zur Fixierung der Empfängerplatte genutzte Mutter durch eine zweite Mutter mit einer kleineren Apertur ersetzt. Es erfolgt dadurch eine Reduktion der bestrahlten Fläche von einem Durchmesser von 40 mm auf 16 mm, also von  $12,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  auf  $2,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Diese entspricht der Messfläche des für die Referenzmessungen verwendeten Gardon-Radiometers, um weitere Aufschlüsse über mögliche Fehlerquellen zu erhalten und die Messabweichungen zu reduzieren.

Um die Messungen durchzuführen, wird das Kalorimeter mit der verkleinerten Apertur hinter dem Kühlkörper des Radiometers montiert. Der Aufbau ist also analog zu dem dargestellten Konzept in Abbildung 11.

### 4.3 Versuchsreihe 3 – Winkelabhängigkeit

In Versuchsreihe 3 wurde die Untersuchung der Winkelabhängigkeit des Messverfahrens vorgenommen. Dazu wurde der Versuchsaufbau aus Versuch 1-3 mit einer Empfängerplatte mit Thermolack verwendet. Die Messung wurde mit 10, 8 und 6 Strahlerelementen und drei verschiedenen Neigungswinkeln des Kühlkörpers  $\gamma$  ( $0^\circ/15^\circ/30^\circ$ ) vorgenommen. Eine Skizze des Aufbaus sowie der genutzten Strahler ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

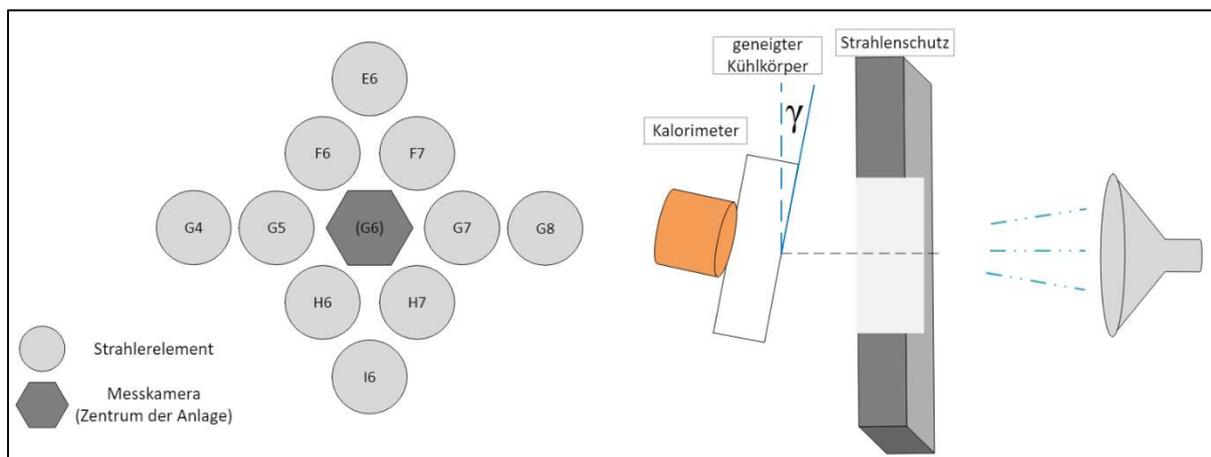


Abbildung 20: Aufbau und Strahler-Anordnung - Versuch 3 (eigene Darstellung)

Um eine Seitenungleichheit zu vermeiden, werden zunächst die Elemente G4 und G8 und anschließend G5 und G7 abgeschaltet. Durch dieses Vorgehen gleichen sich die Unterschiede in den Raumeinfallswinkeln  $\beta$  durch die Positionierung leicht ober- (F und E) und unterhalb (H und I) der Versuchskammer gegenseitig aus.

Im Idealfall würden für diese Messung nur wenige Elemente der G-Reihe genutzt werden. Dadurch wären minimale Raumeinfallswinkel realisierbar. Da das Kalorimeter allerdings erst ab einer Strahleranzahl von vier Elementen eine zuverlässige Messung ermöglicht, wären keine Messungen mit unterschiedlichen Strahler-Konfigurationen möglich.

Die Einflüsse der zusätzlichen Verschattung durch den Kühlkörper sowie die Position der genutzten Strahler in der Anlage werden im Kapitel 0 der Fehlerbetrachtung gesondert diskutiert.

### 4.4 Versuchsreihe 4 – Auswirkungen der Empfängerbeschichtung

Um die Auswirkungen der verwendeten Beschichtung des Empfängerplättchens zu untersuchen, wurde die für die anderen Versuche genutzte Platte ausgetauscht. Die neue Platte wurde mit einer Beschichtung aus Pyromark™ [31] versehen und in das Kalorimeter eingebaut. Es handelt sich dabei um einen Hochtemperatur-Thermolack mit stark absorptiver schwarzer Farbe. Der Lack ist eine etablierte Art der Oberflächen-Beschichtung im Bereich der CSP, da er die Absorptivität und damit den Wirkungsgrad des Prozesses erhöhen kann. Aus diesem Grund wären bei der Anwendung in diesem Prozess höhere kalorimetrische Flussdichte-Messwerte plausibel. [32]

Anschließend wurden Tests simultan zu dem Vorgehen in Test 1-3 mit bis zu 18 Strahlerelementen durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Test mit geringerer Auslastung, analog zu Versuchsreihe 3, zur Kontrolle der Ergebnisse durchgeführt.

Aufgrund einer Fehlfunktion des Messverfahrens und der Beschichtung bei einem ersten Versuch wurde dieser unter identischen Prozessbedingungen mit einer weiteren Empfängerplatte wiederholt. Die Komplikationen bei dem ersten Versuch werden in Kapitel 6.7 der Fehlerbetrachtung behandelt.

## 5 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

In dem folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Messreihen dargestellt und fachlich diskutiert. Ziel ist es, Erkenntnisse über die Funktionsweise und Zuverlässigkeit des Systems zu erlangen.

### 5.1 Untersuchung der Einfluss-Parameter

Bevor die Ergebnisse der einzelnen Versuche veranschaulicht und diskutiert werden, werden die allgemein vorliegenden Einfluss-Parameter betrachtet. Konkret werden dabei die beobachteten und verwendeten Volumenströme, das Ansprechverhalten des Systems sowie die Einflüsse verschiedener Empfänger-Beschichtungen untersucht.

Die ersten Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchsreihen beziehen sich auf die allgemeine Funktionalität und den Messbereich des entwickelten Versuchsaufbaus. Demnach ist eine Nutzung für die Großforschungsanlage Synlight bedenkenfrei möglich. Es entstanden während der Versuche keine größeren Leckagen oder unerwarteten Temperaturspitzen und die Versuchssteuerung funktionierte wie konzipiert. Eine zuverlässige Funktionalität und akzeptable Größe der Schwankungen in den Messwerten konnten erst ab einer Anzahl von 4 Strahlerelementen erreicht werden. Dies ist durch die Auslegung des Kalorimeters für einen höheren Energiebereich begründet. Bei geringer Flusssdichte und damit insgesamt niedrigen Messwerten ist das Verhältnis der Abweichung zur vorliegenden Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zu hoch.

#### 5.1.1 Volumenstrom

Der bei der Auslegung angenommene maximale Volumenstrom von 10 l/min kann bei den durchgeführten Versuchsreihen durchgängig übertroffen werden. Als höchster gemessener Wert liegt ein Durchfluss von ca. 11,5 l/min bei vollständiger Öffnung des Stellventils vor. Dies ermöglicht eine Messung von weitaus höheren Flusssdichten, als sie für diese erste Untersuchung genutzt werden.

Um verlässliche Messergebnisse erhalten zu können, wurde dieser für die Durchführung der Versuche jedoch deutlich gedrosselt, auf Werte zwischen 0,5 l/min und 2 l/min. Grund dafür ist die Herstellung einer ausreichenden Temperaturdifferenz  $\Delta T$  im System. Diese sollte zur Verringerung der prozentualen Messfehler stets über 5 K, im besten Fall bei um oder über 10 K liegen. Den verschiedenen Messdaten im Anhang zufolge hatte dies zunächst keine negativen Auswirkungen auf die Genauigkeit.

Da der Volumenstrom nicht weiter gedrosselt werden konnte, war eine zuverlässige Durchführung der Messungen erst ab einer Anzahl von 4 Strahlern möglich. Darunter ist die aufgenommene Wärmemenge zu gering und die Schwankungen zu stark.

In Vorversuchen wurde ein Mindestvolumenstrom identifiziert (0,5 l/min), der noch akzeptable Schwankungen aufwies. Bei Messungen wurde darauf geachtet, dass dieser auch bei kleineren Temperaturgradienten zwischen Eintritt und Austritt nicht unterschritten wurde. Dieses Phänomen wurde aufgrund der limitierten Versuchszeit zunächst nicht weiter untersucht.

Insgesamt könnte die starke Drosselung eine mögliche Ursache für Probleme darstellen, welche bei den Messungen aufgetreten sind. Aus diesem Grund werden verschiedene Aspekte des Volumenstroms bei der Fehlerbetrachtung genauer untersucht.

### 5.1.2 Ansprechverhalten

Das Hauptkriterium zur Auswahl der zur Auswertung der Versuche betrachteten Bereiche ist das Vorliegen eines stationären Zustandes. Bei kalorimetrischen Messungen kann das Erreichen dieses Zustandes, abhängig von den Prozessparametern, bis zu mehreren Minuten dauern (s. Kapitel 2.3.3). In der nachfolgenden Abbildung 21 sind die Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  der Versuche 1 und 2 der ersten Messreihe dargestellt. In diesen wurde die Reaktion des Systems bei Bestrahlung in variierender Intensität getestet.

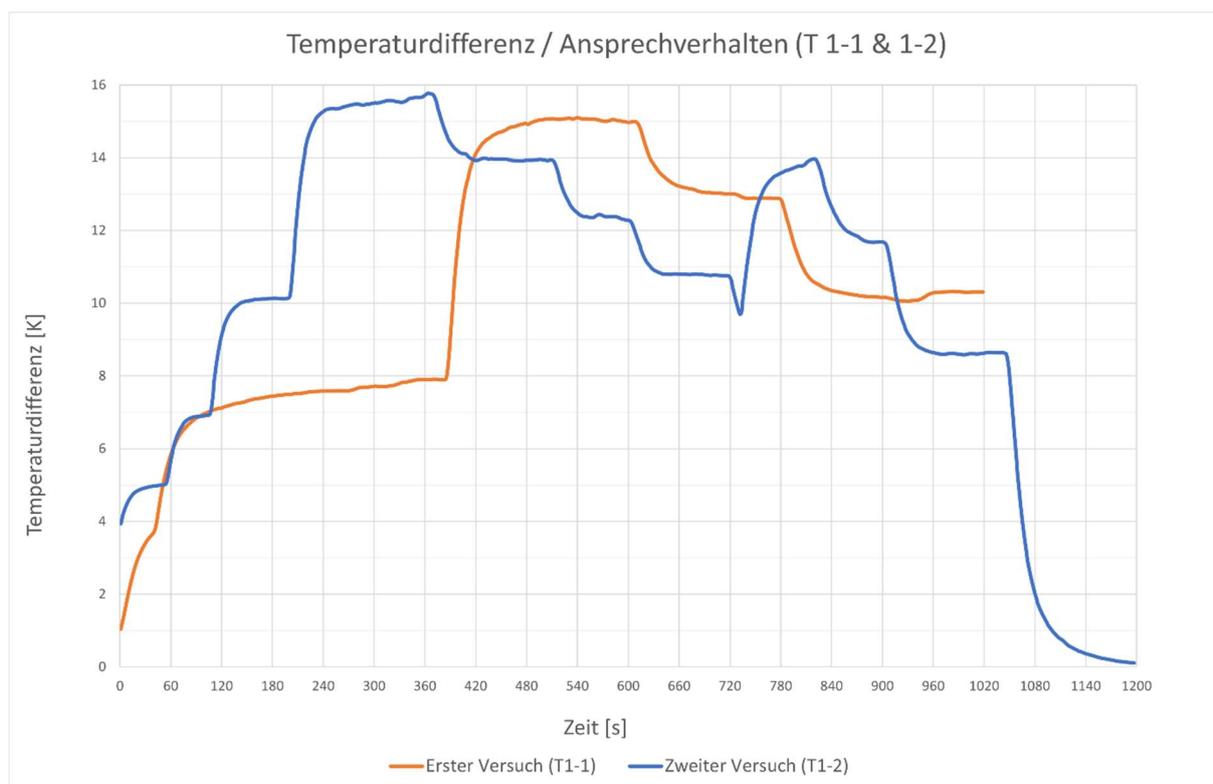


Abbildung 21: Ansprechverhalten Kalorimeter - T1-1 und T1-2 (eigene Darstellung)

Das System erreicht in den verglichenen Versuchen unterschiedlich schnell einen stationären Zustand. Die kürzeste Ansprechzeit in Versuch 1 liegt bei ca. 1:30 Minuten und die längste zwischen 3,5 und 4 Minuten. Der Volumenstrom bewegt sich dabei in einem Bereich von 0,5 l/min bis 1 l/min. Dieser Effekt ist durch die thermische Trägheit des Systems zu erklären.

Im zweiten Versuch liegt das Ansprechverhalten zwischen ca. 45 Sekunden für die kürzeste Reaktionszeit und 1:45 Minuten für die längste. Damit sind diese Zeiträume beachtlich kürzer als in dem Versuch 1. Zurückzuführen ist dies sowohl auf den höheren Durchfluss von 1 l/min bis 1,5 l/min als auch auf die höheren Wärmeströme bzw. Flussdichten.

Insgesamt ist das Ansprechverhalten für den kalorimetrischen Aufbau stark von dem durchgeführten Versuch und den Veränderungen abhängig. Die Ansprechzeit bei Zu- oder Abschaltung von mehreren Strahlerelementen ist merklich länger als bei Veränderungen des Durchflusses oder Abschaltung einzelner Elemente. Grund für die verzögerte Reaktion bei der Zuschaltung von Strahlern ist die benötigte Anfahrzeit der Xenon-Kurzbogenlampen. Diese erreichen ihre volle Leistung erst nach einigen Minuten. Bei der Abschaltung wird die Leistung hingegen sofort entzogen.

Die Unterschiede der betrachteten Versuche zeigen, dass ein höherer Durchfluss zu einem dynamischeren System führt, welches schneller auf Veränderungen reagiert. Dabei ist stets zu beachten, dass die Temperaturdifferenz in einem akzeptablen Bereich bleibt.

Das in der Publikation von Guillot et. al. verwendete Kalorimeter wies eine Ansprechzeit von ungefähr 30 Sekunden auf. Dieser Wert ist deutlich kürzer als die Ansprechzeit, die für diesen Versuch beobachtet wurde. Dabei muss berücksichtigt werden, dass es sich dabei um ein Kalorimeter mit einer Kavität handelt und die Messungen mit realer Sonnenstrahlung durchgeführt wurden. Eine Vergleichbarkeit ist aus diesem Grund nur bedingt gegeben. [2, S. 2093]

### **5.1.3 Einfluss der Beschichtung**

In die Gesamtbetrachtung werden die Ergebnisse der Vergleichsmessungen mit Pyromark und dem standardmäßig verwendeten Ofen-Thermolack aufgenommen. Der Vergleich bietet Einsichten über den Einfluss der genutzten Beschichtung auf die erhaltenen Messergebnisse. Die zur Auswertung genutzten Messdaten sind in Gesamtheit in Anhang 6 beigefügt. Als Vergleichsmessungen sind die FMAS-Referenzmessung sowie die kalorische Messung aus Versuch 1-3 ausgewählt worden. Die Wahl dieses Versuchs als Referenz ist durch die Vergleichbarkeit der Durchführung bedingt. Zwischen den Messungen wurde ausschließlich die Empfängerplatte getauscht und der restliche Aufbau beibehalten. Für den Umbau war allerdings eine erneute Positionierung des Versuchsaufbaus notwendig. Die Einstellungen der grundlegenden Parameter wie Durchfluss, Strahleranzahl und Temperaturdifferenz sind identisch.

In Abbildung 22 werden die verwendeten Beschichtungen hinsichtlich ihrer Abweichung zu der Referenzmessung und ermittelten Flussdichte verglichen. Für den niedrigsten registrierten Flussdichte-Wert liegt keine signifikante Differenz zwischen den Beschichtungen vor. Es ist eine Abweichung von der Referenz von ca. 34 % zu erkennen.

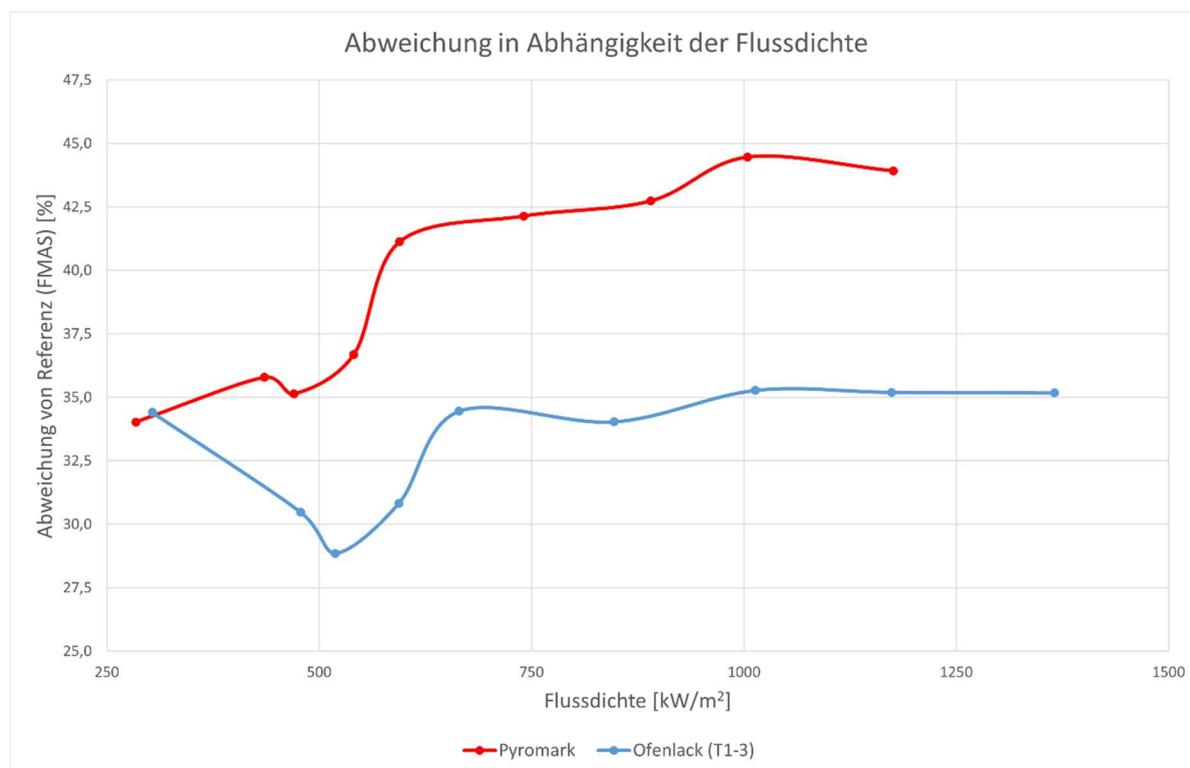


Abbildung 22: Abweichung der Beschichtungen in Abhängigkeit der Flussdichte (eigene Darstellung)

Nachfolgend verbessert sich die Abweichung bei Verwendung des Ofenlackes zunächst auf einen Minimalwert von ca. 29 % bei einer Flussdichte von 500 kW/m<sup>2</sup>. Anschließend stabilisiert sie sich für Flussdichten über 600 kW/m<sup>2</sup> bei 34 % bis 35 % Differenz zur FMAS-Messung. Der aufgenommene Höchstwert für die Flussdichte liegt bei ca. 1400 kW/m<sup>2</sup>.

Die Abweichung der Pyromark-Messwerte steigt jedoch außer für eine kurze Verbesserung bei ungefähr 450 kW/m<sup>2</sup> mit zunehmender Flussdichte stetig an. Für Werte über 550 kW/m<sup>2</sup> kann ein Messfehler von über 40 % beobachtet werden, im Maximum liegt dieser bei knapp 45 %. Zusätzlich wird bei der Pyromark-Messung lediglich eine maximale Flussdichte von ca. 1200 kW/m<sup>2</sup> registriert.

Für die Beschichtung mit Pyromark liegt am oberen Ende also eine Verschlechterung der Abweichung von bis zu 10 Prozentpunkten gegenüber des Ofenlackes vor. Der Grund für diese Verminderung kann im Wesentlichen durch zwei Fehlerquellen beschrieben werden. Zunächst kann bei einer erneuten Messung im Synlight nicht die exakte Position der vorangegangenen Messung repliziert werden. Als zweiten, in Gesamtheit wahrscheinlicheren Grund für die Abweichungen kann die Qualität der

Pyromark-Beschichtung angegeben werden. Beide Fehlerquellen werden in Kapitel 6.7 ausführlich diskutiert.

Um die beobachteten Ergebnisse zu bestätigen, wurde eine zweite Vergleichsmessung der Beschichtungen durchgeführt. Die Messdaten sind ebenfalls in Anhang 7 hinterlegt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 23 dargestellt.

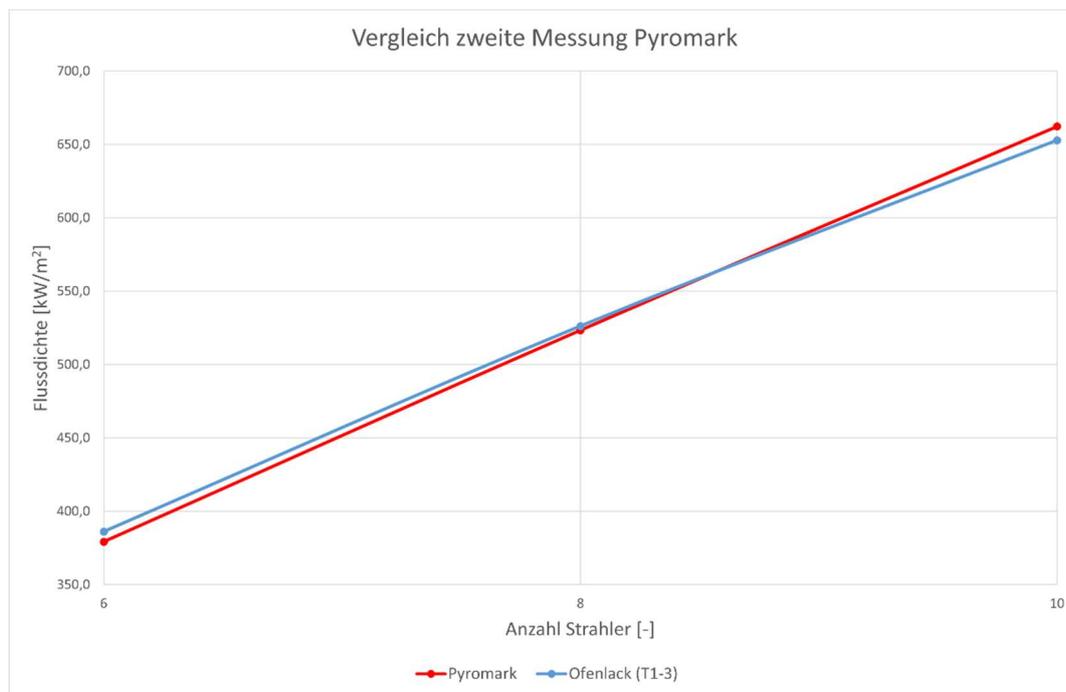


Abbildung 23: Zweite Vergleichsmessung der Beschichtungen (eigene Darstellung)

Es ist zu erkennen, dass die Beschichtungen bei dieser Messung beinahe keinen Unterschied in der gemessenen Flussdichte aufweisen. Die Messwerte bewegen sich in einem Bereich von 1 % bis 2 % zueinander.

Aus diesem Grund ist es nicht möglich, belastbare Aussagen auf Basis der erhaltenen Messdaten zu tätigen. Es bedarf weiteren Untersuchungen und Anpassungen, um in den Bereich der Referenz-Messergebnisse zu gelangen. Auch eine Abhängigkeit in Bezug auf den Einfallswinkel der Strahlung wurde in diesem Vergleich nicht berücksichtigt.

### 5.1.4 Winkelabhängigkeit

Um Einflüsse durch eine winkelabhängige Absorption des vorrangig genutzten Ofenlackes zu untersuchen, werden in der nachfolgenden Abbildung 24 die drei untersuchten Winkeleinstellungen gegenübergestellt. Die gesamten Messdaten sind in Anhang 8 tabellarisch dargestellt.

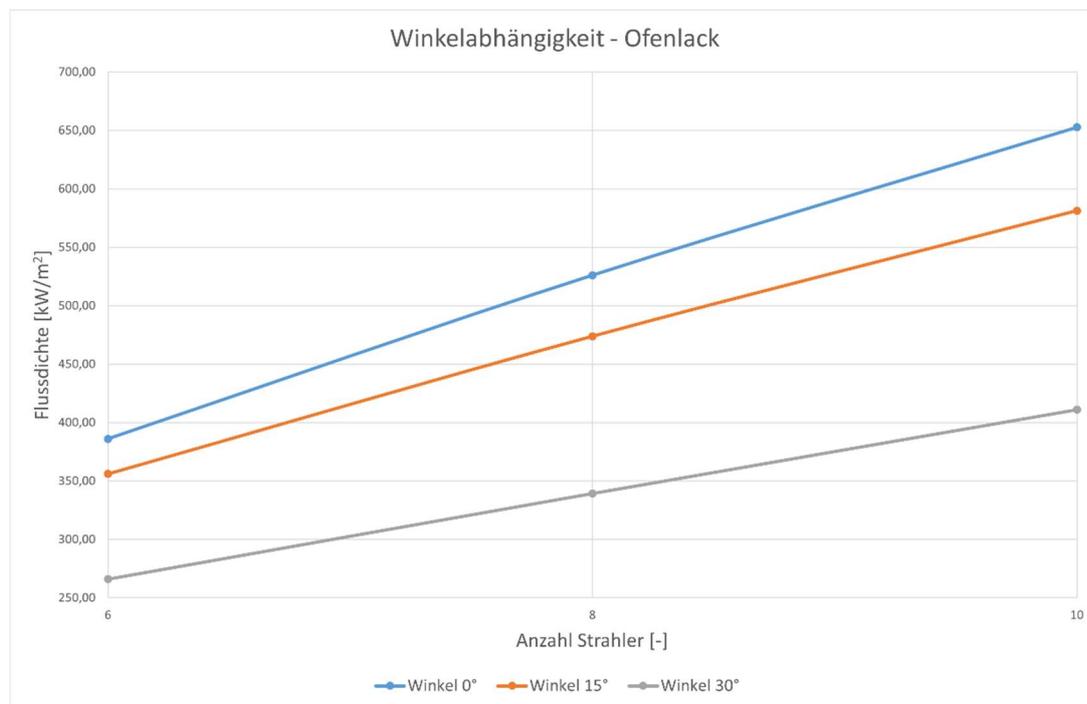


Abbildung 24: Winkelabhängigkeit - Ofenlack (eigene Darstellung)

Bei der Betrachtung der Messwerte fallen unmittelbar große Unterschiede in der gemessenen Flussdichte für alle drei Strahler-Konfigurationen auf. Bei einem Einfallswinkel von 15° weisen die Messwerte bereits eine Abweichung von ungefähr 10 % auf. Wird dieser Winkel auf 30° erhöht, steigt die Abweichung auf 30 % bei 6 Strahlern und bis zu 40 % bei 10 Strahlern.

Da sich ein Großteil der für die Versuche genutzten Strahler-elemente in einem Winkel von mehr als 5° ober- oder unterhalb der Apertur befindet, kann von großen Messfehlern durch diese Winkelabhängigkeit ausgegangen werden. Dies erklärt auch die steigenden Abweichungen bei zunehmender Strahler-Anzahl, da diese sich durch die Anlagenbedingungen in einem immer größeren Winkel zur Apertur befinden. In Anhang 9 sind unter dem Wert  $\beta$  die vorliegenden Einfallswinkel der Anlage dokumentiert.

Zur Veranschaulichung sind die genutzten Strahlerreihen mit ihren ungefähren Positionen und Winkeln in Abbildung 25 schematisch dargestellt. Dabei wird deutlich, dass auch die mittlere G-Reihe in einem gewissen Winkel oberhalb des Kalorimeters angeordnet ist. Ein gewisser Neigungswinkel ist also bei allen Messungen vorhanden.

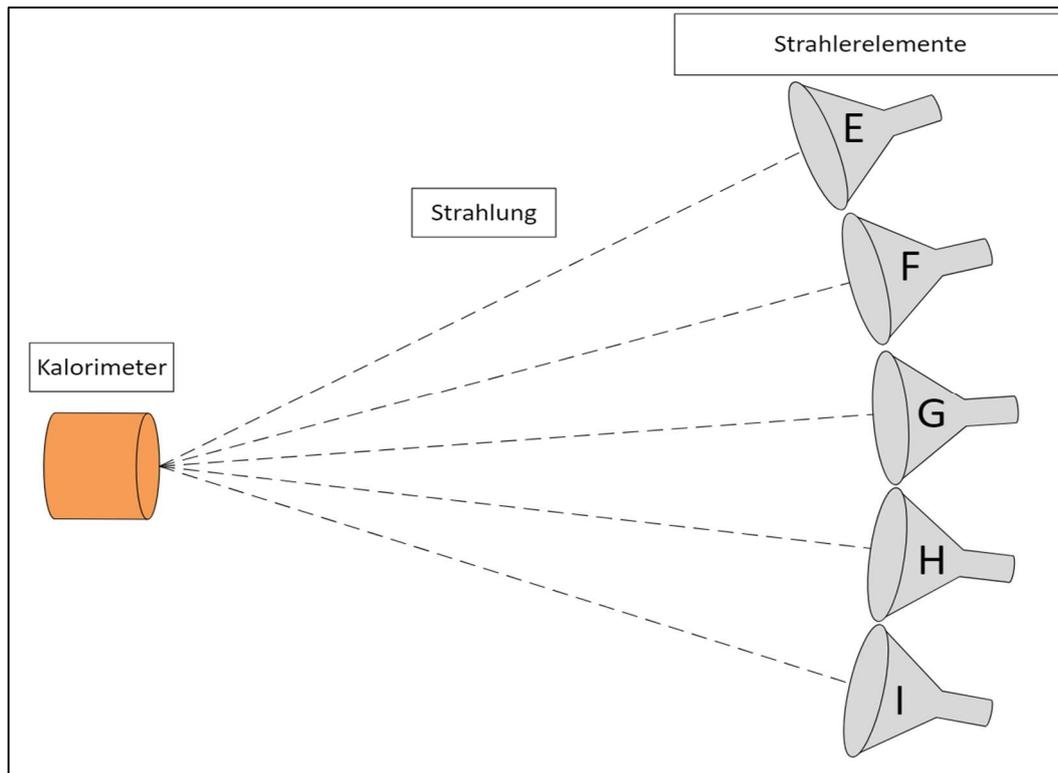


Abbildung 25: Visualisierung der Raumeinfallswinkel der Strahlerelemente (eigene Darstellung)

## 5.2 Ergebnisse der Versuchsreihen mit großer Apertur

In den folgenden Unterkapiteln sind die drei Versuche unter Nutzung der größeren 40 mm Apertur dokumentiert. Die Messergebnisse, insbesondere die Genauigkeit in Hinblick auf die Referenzmessung mit FMAS und die bisherigen Erkenntnisse, werden diskutiert und weiterführende Schlüsse daraus gezogen.

### 5.2.1 Test 1-1

Der Test 1-1 stellt den ersten Versuch mit dem entwickelten kalorimetrischen Aufbau dar. Auf Basis der Messdaten wurde zusätzlich das nachfolgende Diagramm erstellt. Darin werden die Flussdichte-Messdaten der kalorimetrischen Messung mit der Referenz verglichen. Die vollständigen Messdaten sind tabellarisch in Anhang 10 dargestellt.

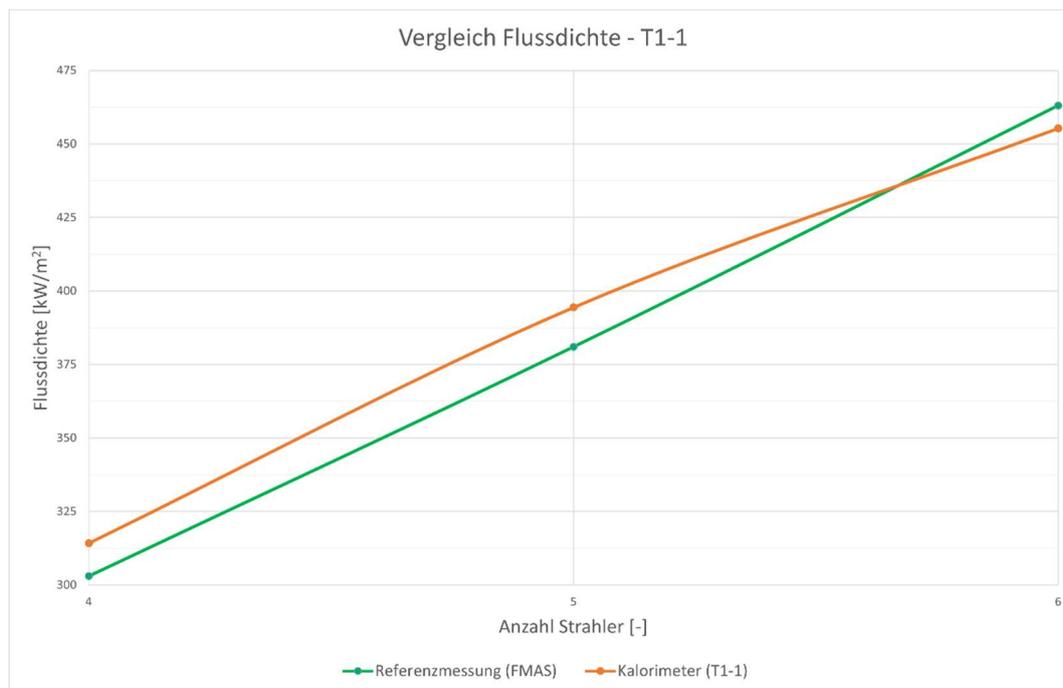


Abbildung 26: Vergleich Flussdichte - Test 1-1 (eigene Darstellung)

Anhand der Graphen ist zu erkennen, dass die beiden Messsysteme in dem betrachteten Bereich beinahe identische Ergebnisse liefern. Die Referenzmessung beginnt mit niedrigeren Werten, übersteigt die kalorimetrischen Messwerte allerdings ab einer Flussdichte von ca. 430 kW/m<sup>2</sup>.

Insgesamt liegt die Abweichung der Messergebnisse für alle getesteten Strahler-Konfigurationen in einem Bereich zwischen 1,7 % und 3,7 %. Im Vergleich mit den im Stand der Technik behandelten Messfehlern und Abweichungen anderer Messverfahren sind diese Ergebnisse zunächst vielversprechend. Zu beachten ist dabei, dass es sich um Messungen mit niedrigen Flussdichten von 300 kW/m<sup>2</sup> bis 500 kW/m<sup>2</sup> und Wärmeströmen von 400 W bis 600 W handelt. Diese Ergebnisse bestätigen zunächst die getroffene Annahme, dass das System im Bereich von niedrigen Flussdichten und dadurch von weniger Strahlern und geringeren Einfallswinkeln gute Messergebnisse liefern kann.

### 5.2.2 Test 1-2

Die Messergebnisse des zweiten Tests des Kalorimeters mit bis zu 18 Strahlerelementen sind in der nachfolgenden Tabelle dokumentiert.

Tabelle 5: Messdaten - Test 1-2 (eigene Daten)

Messung	1	2	3	4	5	6	7
Anzahl Strahler	18	16	14	12	10	8	6
Durchfluss [l/min]	1,57	1,56	1,54	1,56	0,96	0,96	0,95
$\Delta T$ [K]	15,5	13,9	12,4	10,8	13,8	11,6	8,6
Wärmestrom [W]	1688	1508	1321	1169	922	775	568
Flussdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	1343	1200	1052	930	734	617	452

Aufgrund der deutlich gesteigerten Gesamtenergie durch die dreifache Anzahl an Strahlern wurde der Durchfluss zur Kühlung des Systems insgesamt erhöht. Dennoch wurde auf die notwendige Temperaturdifferenz von ca. 10 K geachtet, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Aus diesem Grund wurde zwischen der Erfassung der Ergebnisse in den Messungen 4 und 5 der Durchfluss gedrosselt. Es kann beobachtet werden, dass pro abgeschaltetem Strahler-Paar die Flussdichte gleichmäßig um 100 kW/m<sup>2</sup> bis 150 kW/m<sup>2</sup> abnimmt. Die Ergebnisse für die letzte Messung (7) decken sich mit den Messungen von 6 Strahlerelementen des ersten Versuches. Dadurch scheint eine grundlegende Vergleichbarkeit trotz angepasster Positionierung der Strahler zunächst gegeben zu sein.

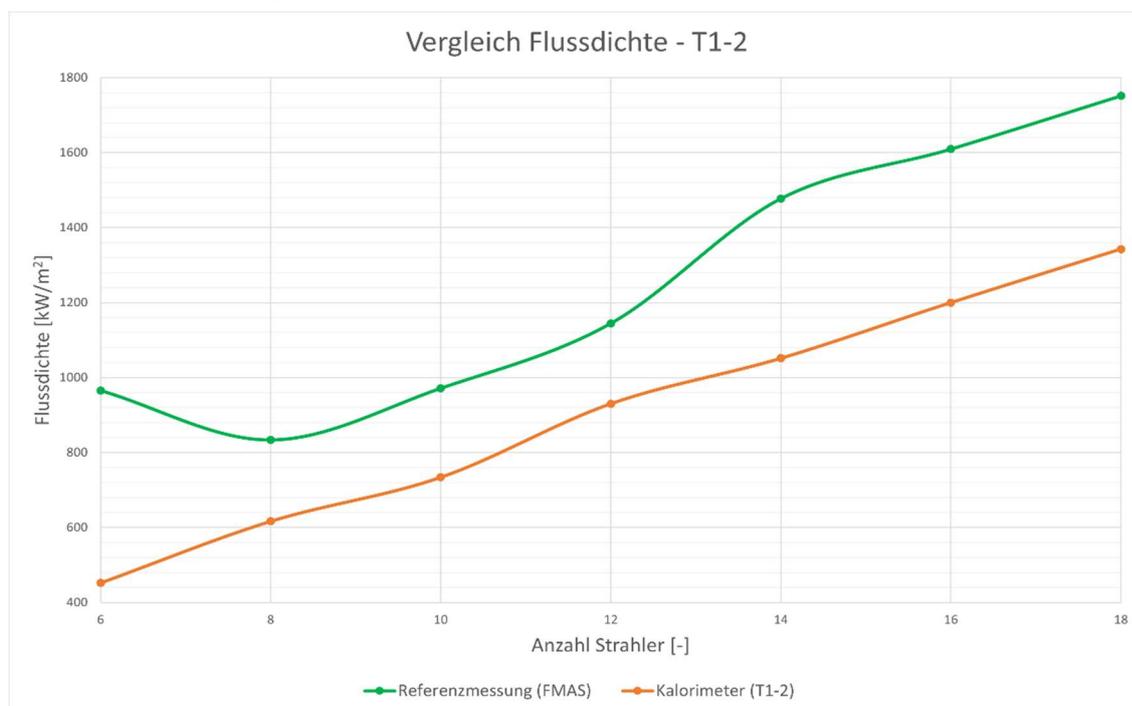


Abbildung 27: Vergleich Flussdichte - Test 1-2 (eigene Darstellung)

In Abbildung 27 werden die Ergebnisse der kalorimetrischen Messung erneut mit den FMAS-Referenzmessungen verglichen. Sie wurde aus den Messdaten in Anhang 11 erstellt.

Die Abweichung zwischen den Referenzmessungen und den Messungen des Kalorimeters ist im zweiten Versuch deutlich größer. Im Bereich von 8 bis 12 Strahlerelementen liegt eine Mindest-Abweichung von 200 kW/m<sup>2</sup> oder 18 % vor. Anschließend steigt diese stark an und weist ab 14 Strahlern eine Höchst-Abweichung von bis zu 400 kW/m<sup>2</sup> oder 29 % auf. Dies lässt auf ein grundlegendes Problem bei der Messung höherer Strahlungsenergie schließen.

Die Ergebnisse der Messung mit 6 Strahlern wurden bei der vorigen Betrachtung bewusst ausgelassen. Wie bereits zuvor beschrieben, sind die Werte der kalorimetrischen Messung in diesem Bereich nahezu identisch zur vorangegangenen Messung. Die FMAS-Referenzmessung liegt in diesem Bereich jedoch deutlich über dem Messwert des ersten Versuches. Dies bedingt entsprechend die entstehende Abweichung von über 50 %. Es scheint an dieser Stelle ein Messfehler des Referenzsystems vorzuliegen, welcher ein inkorrektes Ergebnis ausgibt.

Aus diesem Grund wurde für die dritte Messung eine direkte radiometrische Referenzmessung mit Gardon-Radiometern durchgeführt und FMAS anhand dieser Messung neu kalibriert.

### 5.2.3 Test 1-3

Wie bereits bei den vorherigen Versuchen werden im dritten Test zunächst die Messergebnisse des Kalorimeters betrachtet und relevante Bereiche diskutiert. Die Messdaten sind dazu nachfolgend tabellarisch dargestellt. Eine vollständige Tabelle ist in Anhang 12 hinterlegt.

Tabelle 6: Messdaten - Test 1-3 (eigene Daten)

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Anzahl Strahler	18	15	13	11	9	8	7	6	4
Durchfluss [l/min]	1,89	1,89	1,89	1,89	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
$\Delta T$ [K]	13,1	11,3	9,7	8,1	10,2	9,1	8	7,3	4,6
Wärme-strom [W]	1716	1475	1274	1065	835	746	652	601	381
Flussdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	1366	1174	1014	847	665	594	519	478	303

Die in der Durchführung beschriebene limitierte Nutzbarkeit der Strahler ist in der Anzahl zu erkennen. Aus diesem Grund sind nur die Ergebnisse der Messungen 1, 6, 8 und 9 mit den vorherigen Messungen vergleichbar. Dabei muss jedoch eine gewisse Abweichung durch Position und Strahlerausrichtung berücksichtigt werden. Dennoch liegen die Abweichungen der Werte in allen vergleichbaren Bereichen unter einer Grenze von 5 % und sind damit insgesamt als vernachlässigbar einzustufen.

Der Durchfluss wurde zwischen den Messungen 4 und 5 reduziert, um die Temperaturdifferenz in einem für die Messung akzeptablen Bereich beizubehalten. Für diesen

Versuch ist festzustellen, dass die Temperaturdifferenz niedriger als bei Test 1-2 ist. Dies kann ein Faktor für mögliche Mess- oder Berechnungsfehler sein.

Die Referenzmessung durch FMAS wurde für diesen Versuch direkt radiometrisch kalibriert, um Messfehler durch fehlerhafte oder veraltete Kalibrierung zu minimieren. Da wie in Kapitel 2.3.1 erläutert, die verwendeten Gardon-Radiometer jedoch ebenfalls einer regelmäßigen Kalibrierung bedürfen, kann ein systematischer Messfehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse werden in Abbildung 28 inklusive der Abweichung präsentiert.

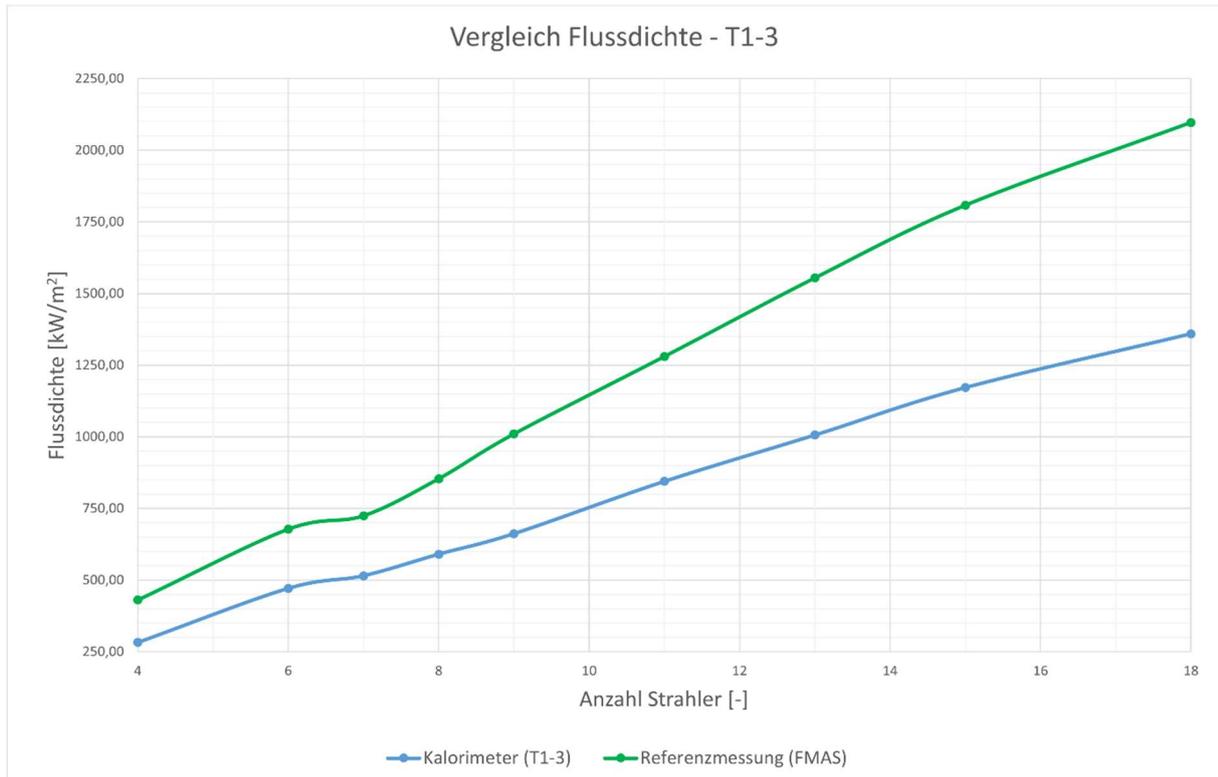


Abbildung 28: Vergleich Flussdichte – Test 1-3 (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse haben sich entgegen dem gewünschten Effekt in diesem Versuch weiter verschlechtert. Dies ist hierbei größtenteils auf die durch die erneute Kalibrierung gesteigerten FMAS-Werte zurückzuführen.

Nennenswert ist der Anstieg in der Differenz ab den Messungen 5 und 6 (8 und 9 Strahlerelemente). An dieser Stelle wurde bei den Gardon-Kalibrierungsmessungen von einem Radiometer, welches für 5 MW kalibriert ist, zu einem Radiometer mit einer Kalibrierung für 1 MW gewechselt. Während zu Beginn eine Differenz von ca. 150 kW/m<sup>2</sup> zu erkennen ist, steigert sich diese dadurch bis auf einen Höchstwert von über 700 kW/m<sup>2</sup>.

Um diese Auffälligkeit weiter zu untersuchen, wurde in Abbildung 29 die Abweichung der kalorimetrischen Messwerte in Abhängigkeit der vorliegenden Flussdichte dargestellt.

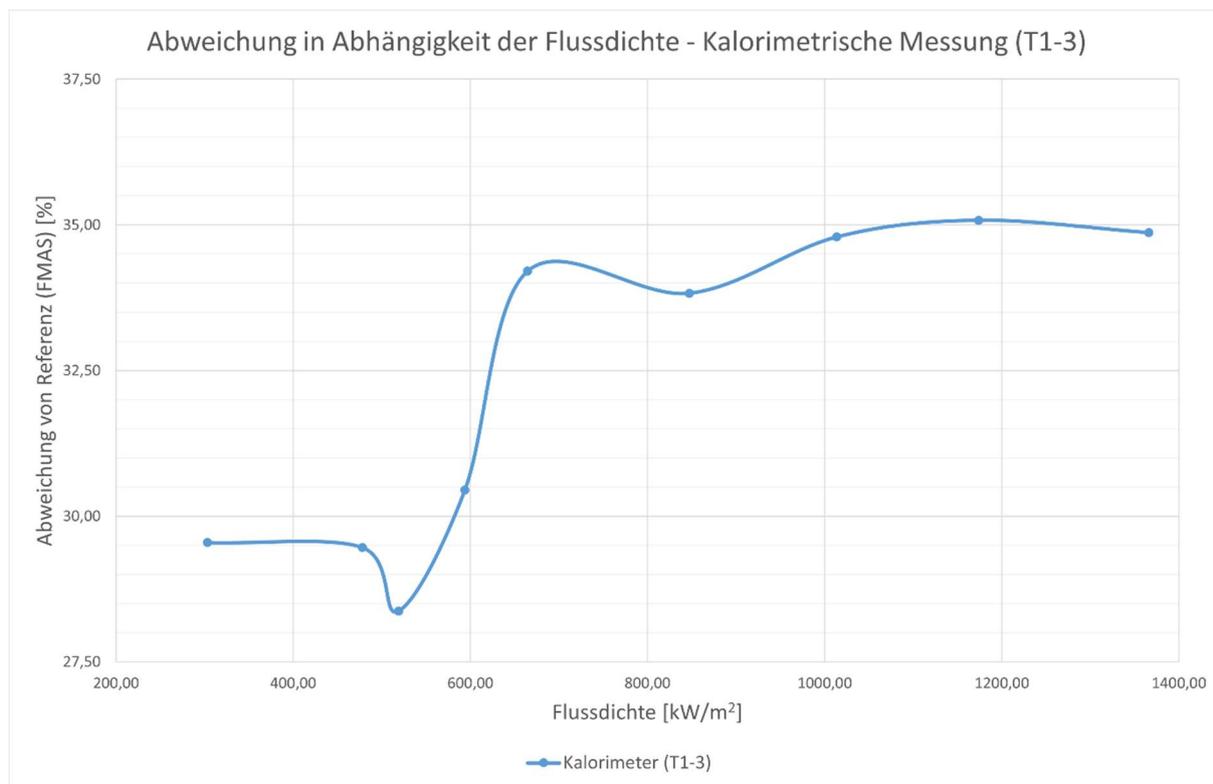


Abbildung 29: Abweichung in Abhängigkeit der Flussdichte - Test 1-3 (eigene Darstellung)

Auch in dieser Darstellung ist die starke Zunahme der Abweichung für höhere Flussdichte-Messwerte deutlich zu erkennen. Während sie zu Beginn bei ca. 29,5 % liegt und für 500 kW/m<sup>2</sup> zunächst sogar sinkt, steigt sie ab einer Schwelle von 600 kW/m<sup>2</sup> drastisch an. Zum Ende der Messung stabilisiert sich die Abweichung schließlich auf einen Maximalwert von 34,5 % bis 35 %.

Auch bei dieser Messung zeigt sich folglich eine deutliche Verschlechterung der Messergebnisse bei höheren Flussdichten. Die zugrunde liegende Abweichung von 29,5 % kann aus den bisherigen Daten nicht weiter erklärt werden. Mögliche Ursachen werden in Kapitel 6 in der Fehlerbetrachtung aufgearbeitet. Zusätzlich ist eine erneute Kalibrierung der Referenz-Radiometer zur sicheren Vergleichbarkeit sinnvoll.

### 5.3 Ergebnisse der Versuchsreihen mit verkleinerter Apertur

Die Messergebnisse des Versuches mit einer verringerten Aperturgröße von 16 mm werden zunächst in Form einer Tabelle präsentiert. Zur besseren Vergleichbarkeit sind für den Durchfluss die gleichen Einstellungen wie in der ersten Versuchsreihe getroffen worden. Aufgrund einer deutlich niedrigeren Energieaufnahme über die kleinere Apertur konnte damit allerdings nur eine Temperaturdifferenz von 0,5 K bis 2 K erreicht werden.

Tabelle 7: Messdaten - Test 2 (eigene Daten)

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Anzahl Strahler	18	15	13	11	9	8	7	6	4
Durchfluss [l/min]	1,88	1,88	1,88	1,88	1,23	1,22	1,23	1,22	1,21
$\Delta T$ [K]	1,93	1,69	1,48	1,24	1,56	1,42	1,28	1,19	0,79
Wärme-strom [W]	253	221	194	163	134	120	109	101	67
Flussdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	1259	1100	964	808	667	596	542	504	331

Die Tabelle mit den gesamten ermittelten Messwerten und Abweichungen ist in Anhang 13 beigefügt. In dieser Tabelle ist ein wesentlicher Unterschied durch die verkleinerte Apertur zu erkennen. Der gemessene Wärmestrom  $\dot{Q}$  ist im Vergleich zu Test 1-3 beinahe um den Faktor 10 reduziert. Dieser Unterschied ist durch die reduzierte bestrahlte Fläche begründet und wird durch die Verrechnung zur Flussdichte ausgeglichen. So werden dennoch Messwerte im Bereich der bereits durchgeführten Versuche erzielt.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden die ermittelten Flussdichte-Messwerte in Abbildung 30 mit den Werten aus Versuch 1-3 sowie der FMAS -Messung verglichen.

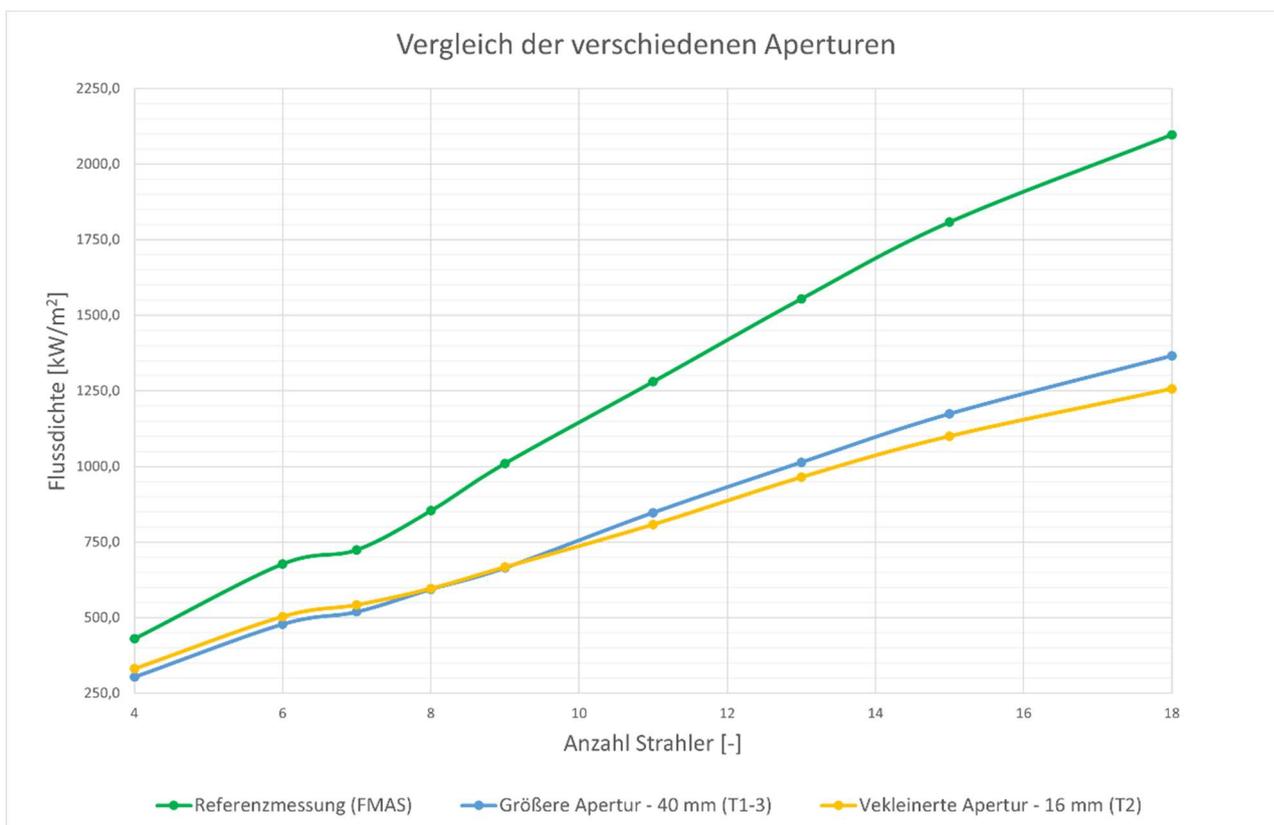


Abbildung 30: Vergleich der verschiedenen Aperturen (eigene Darstellung)

Für den ersten Bereich bis zu 8 Strahlern kann die verkleinerte Apertur zunächst höhere Messwerte erzielen. Bei 8 und 9 Strahlern sind die Messwerte beider Aperturen nahezu identisch. Danach fällt die 16 mm - Apertur langsam ab. Zur genaueren Betrachtung sind die Abweichungen der Messergebnisse beider Aperturen in der folgenden Abbildung in Abhängigkeit der Flussdichte dargestellt.

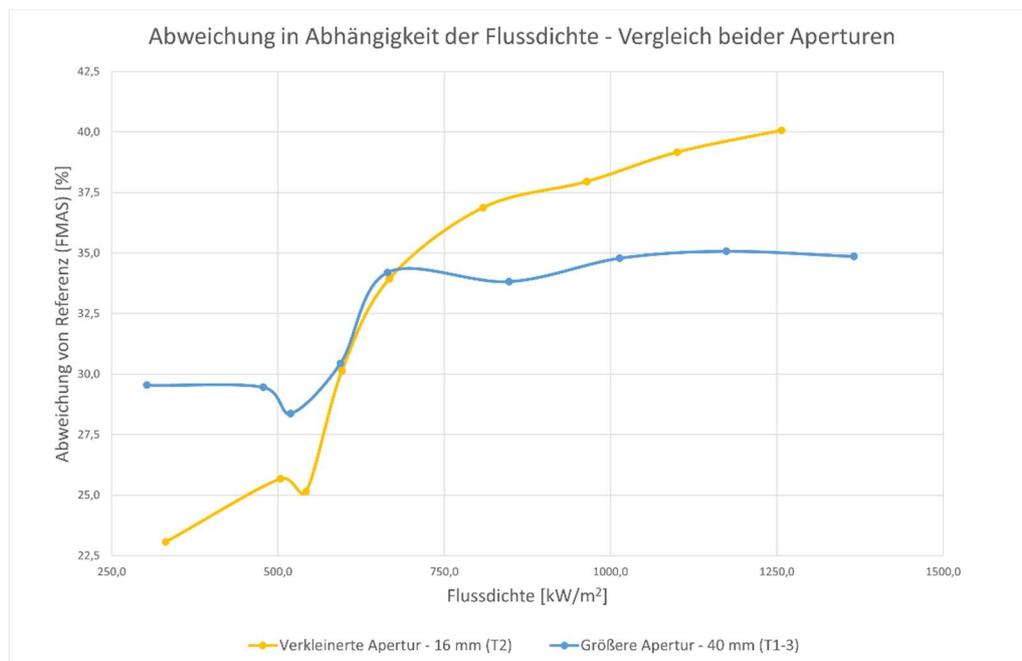


Abbildung 31: Abweichung in Abhängigkeit der Flussdichte - Vergleich beider Aperturen (eigene Darstellung)

Im Gegensatz zur 40 mm - Apertur ist die Abweichung der kleineren Apertur bei niedrigen Strahlungswerten mit 23 % deutlich geringer. Ab einer Flussdichte von 550 kW/m<sup>2</sup> steigt sie allerdings drastisch an und überschreitet schließlich die Abweichung der größeren Apertur. Beide Aperturen weisen nach einer Grenze von 500 kW/m<sup>2</sup> einen temporäre Verringerung der Abweichung auf. Dies könnte durch die Abweichung der Leistung eines einzelnen Strahlerelementes bedingt sein, welches zu diesem Zeitpunkt zugeschaltet wird.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Winkelabhängigkeit sind diese Ergebnisse plausibel. Die kleinere Apertur weist insgesamt eine höhere Verschattung durch den Kühlkörper auf. Durch die größeren Einfallswinkel bei einer höheren Strahler-Anzahl kann sie also in diesen Bereichen eine geringere Energieaufnahme erzielen.

Die Verbesserung der Messwerte im vorderen Bereich gibt dagegen Anlass, über einen grundlegenden Wechsel zu der kleineren Apertur zu diskutieren. Zum aktuellen Stand scheint eine Nutzung des Messverfahrens für höhere Strahlungsmengen aufgrund der Winkelabhängigkeit nicht effektiv möglich zu sein. Wenn es aber möglich ist, die Werte im nutzbaren, niedrigeren Energiebereich zu verbessern, könnte das Verfahren dort zur Anlagenkalibrierung eingesetzt werden. Dazu bedarf es jedoch weiterführender Untersuchungen.

## 6 Fehlerbetrachtung

Um die in der Diskussion erzielten Ergebnisse weiter zu untersuchen, werden in diesem Kapitel mögliche Fehlerquellen ausgewertet. Diese können einzelne Ergebnisse, aber auch systemische Abweichungen aufdecken und erklären. Zusätzlich werden nach Möglichkeit Lösungswege oder Anpassungen diskutiert.

### 6.1 Verluste durch ungewollte Wärmeleitung

Bei einem kalorimetrischen Messverfahren sind jegliche Wärmeströme relevant für die gemessenen Werte. Je nach Anwendung können durch Effekte wie Konvektion oder Wärmeleitung signifikante Mengen an Wärme außerhalb des gemessenen Areal fließen. Infolgedessen können Abweichung in der Messung entstehen.

Die eingesetzten Kühlkörper, welche zur Abschirmung der Reststrahlung vor dem Kalorimeter platziert sind, können aus diesem Grund einen negativen Einfluss auf die Messungen haben. In dem ursprünglichen verwendeten Aufbau (s. Kapitel 3.1.2) ist das Kalorimeter über die Überwurfmutter direkt an den Kühlkörper angeschraubt. Dies ermöglicht einen ungewollten Wärmeverlust an den wassergekühlten Strahlenschutz durch Wärmeleitung. Durch die Kühlung über den Kühlkörper wird dem kalorimetrischen System somit Wärme entzogen, die nicht an die Messstrecke übergeben und vom System registriert wird. Dies erfolgt über die Überwurfmutter mit einer Kontaktfläche von  $2,062 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Um den möglichen Einfluss dieser Wärmeleitung auf die Messergebnisse besser beurteilen zu können, wurde eine überschlägige Berechnung nach Formel 10 vorgenommen. Diese ist nachfolgend dargelegt.

$$\dot{Q} = 2,062 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 * \frac{21 \frac{\text{W}}{\text{K} * \text{m}}}{0,005 \text{ m}} * (303,15 \text{ K} - 293,15 \text{ K}) = 86,6 \text{ W}$$

*Formel 13: Berechnung der Wärmeleitung durch die Überwurfmutter des Kalorimeters*

Annahmen wie die konstante Temperatur des Kühlkörpers ( $T = 20 \text{ °C} = 293,15 \text{ K}$ ) und mittlere Temperatur des Kalorimeters ( $T = 30 \text{ °C} = 303,15 \text{ K}$ ) wurden auf Basis der erhaltenen Messwerte getroffen. Die Kontaktfläche zwischen Kühlkörper und Kalorimeter sowie Dicke der Überwurfmutter wurden manuell ausgemessen und errechnet.

Mit knapp 90 W ist die mögliche ermittelte Wärmeleitung größer als erwartet. Die angenommenen Werte stellen allerdings ein Maximum dar. Für die tatsächlichen Messungen wurden in wenigen Fällen die konstanten 10 K Temperaturunterschied beobachtet. Somit ist der Wert in einem Großteil der Messung deutlich niedriger.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die für die späteren Versuche eingesetzte thermische Isolierung zwischen Kalorimeter und Kühlkörper den Ergebnissen zufolge keine signifikante Veränderung bewirkte. Folglich scheint der Einfluss dieses Effektes insgesamt gering auszufallen. Dies könnte daran liegen, dass bereits davor stets ein Luftspalt zwischen der Mutter und dem Kühlkörper bestand und diese nicht vollständig

anlag. Auch ist die äußere Temperatur des Kalorimeters und der Empfängerplatte, welche an die Überwurfmutter angrenzen, niedriger als die zur Rechnung genutzte Temperatur des austretenden Wassers.

## 6.2 Fehlerpotenzial durch Sensorik und Aktorik

Bei den Fehlerquellen einer messtechnischen Untersuchung ist neben den Parametern des betrachteten Versuches die Qualität der verwendeten Sensorik und Aktorik von großer Bedeutung. Jedes Mess- oder Steuergerät besitzt einen individuellen Mess- oder Stellfehler, welcher bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Diese Fehler ergeben sich durch Rundungsfehler, Fehler bei der Datenübertragung oder fälschlich ausgelöste Messwerte. Sie sind in den Datenblättern der jeweiligen Komponenten angegeben. Für diesen Versuch relevant sind die Widerstandsthermometer, das Durchfluss-Messgerät sowie das verwendete Stellventil (s. Kapitel 3.1.2).

Die verbauten Widerstandsthermometer weisen als PT1000 und mit der genutzten 4-Leiter-Technik grundsätzlich eine hohe Genauigkeit auf. Die angegebene Toleranzklasse A wird vom Hersteller mit einer Messabweichung von  $\pm 0,15$  °C bei 0 °C und  $\pm 0,35$  °C bei 100 °C deklariert. Für den gemessenen Temperaturbereich von ca. 20 °C bis 45 °C bedeutet dies einen mittleren Messfehler von  $\pm 0,21$  °C oder ca. 0,6 % auf die gemessenen Ein- und Austrittstemperaturen des Wassers. Dieser kann bei Betrachtung der Messergebnisse bestätigt werden. [23]

Für das verwendete Durchfluss-Messgerät wird ein Messfehler von  $\pm 0,8$  % des Messwertes plus 0,2 % des Messbereich-Endwertes angegeben. Der Messbereich reicht von 0,05 l/min bis 35 l/min mit einer Auflösung von 0,02 l/min. [24]

Bei der Betrachtung der reinen Durchfluss- oder Volumenstrom-Messdaten fallen allerdings trotz oder gerade wegen der hohen Auflösung starke Schwankungen auf. Der nachfolgend abgebildete Graph des Durchflusses aus Versuch 1-3 soll das Phänomen veranschaulichen.

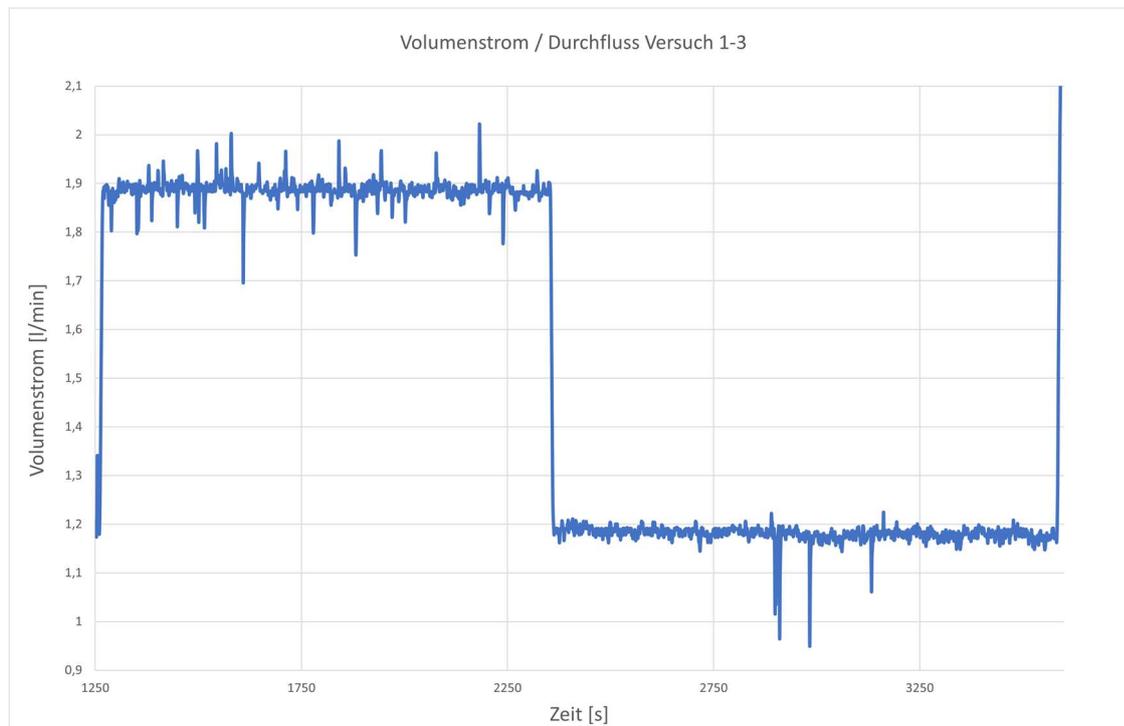


Abbildung 32: Volumenstrom Versuch 1-3 (eigene Darstellung)

Im linken Bereich mit einem höheren Volumenstrom von ca. 1,9 l/min ist eine höhere Unruhe, also Anzahl an Ausschlägen oberhalb des Mittels, zu erkennen. Im Mittel schwankt der Graph um  $\pm 0,02$  l/min, also der Auflösung des Sensors. Dies sind umgerechnet ca. 1 %.

Die Spitzen weisen Ausschläge von bis zu  $\pm 0,2$  l/min im Maximum auf. Diese entsprechen Fehlern von 10,5 %.

Im rechten Bereich mit einem Volumenstrom von 1,2 l/min verbleiben wenige Ausschläge. Die Schwankungen um die Auflösung des Sensors entsprechen allerdings aufgrund des geringeren Stromes einem Fehler von 1,5 %. Die maximale Abweichung stellt ein Abfall um 0,25 l/min oder ca. 21 % dar.

Der Fehler von 1 % aufgrund der Auflösung des Sensors ist für die Gesamtergebnisse als vernachlässigbar anzusehen. Die Einflüsse der Messspitzen, besonders im unruhigeren ersten Bereich, können sich allerdings in den erhaltenen Messwerten des Aufbaus niederschlagen. Ob es sich dabei um Fehler der Sensorik oder andere Einflüsse handelt, ist nicht eindeutig zu bestimmen. Aus diesem Grund werden weitere mögliche Faktoren in folgenden Kapiteln exemplarisch betrachtet.

Das verbaute Stellventil wird mit einem Steuerungsstrom eingestellt. Dieser kann vom Anwender konkret festgelegt werden und weist keine Schwankungen auf, insofern er nicht manuell angepasst wird. Es wird im Datenblatt für den Einstellbereich eine

Totzone von 0,5 % bis 5 % angegeben, je nach Stärke des Eingangssignals [22, Anhang B]. Da das Ventil situationsbedingt eingestellt und der resultierende Volumenstrom betrachtet wird, hat dies jedoch keinen Einfluss auf den Versuchsaufbau oder die Messergebnisse.

Insgesamt sind die Einflüsse der genutzten Sensorik und Aktorik mit Fehlern von maximal 1 % für die Messergebnisse sehr gering bis vernachlässigbar. Die gemessenen Extremwerte bei der Durchfluss- oder Volumenstrommessung könnten aufgrund der Stärke und Häufigkeit dagegen definitiv einen Einfluss auf die erhaltenen Messwerte ausüben. Ob dieser dabei von der Sensorik oder den Prozessgrößen ausgehend ist, kann nicht explizit festgestellt werden.

### **6.3 Druckschwankungen im System und der Wasserzufuhr**

Die im vorherigen Kapitel beschriebene und in Abbildung 32 dargestellte Unstetigkeit des Volumenstroms kann neben messtechnischen Ursachen auch durch Druckschwankungen im System bedingt sein.

Da für diesen Versuch ein open-loop-Aufbau verwendet wird, werden äußere Einflüsse wie Druckschwankungen in der Wasserversorgung unmittelbar an das System weitergeleitet. Bei einem zu hohen Druck wird dieser von dem Stellventil fast vollständig abgefangen, lässt der Druck allerdings abrupt nach, erreicht nicht mehr genug Wasser das Kalorimeter. Besonders bei den gewählten niedrigeren Gesamtströmen kann dies durch die entstehenden Extrema zu Messfehlern führen.

Um Druckschwankungen bei weiterführenden Messungen nicht an das Messsystem weiterzugeben, könnte es sinnvoll sein, das zugeführte Wasser zunächst in ein Reservoir einzufüllen und aus diesem den Aufbau zu speisen. Durch die bestehende Wassersäule werden Unterschiede in der Leitungszufuhr somit ausgeglichen.

### **6.4 Einfluss der Durchströmung des Kalorimeters**

Ein weiterer Einfluss oder eine Fehlerquelle kann die Durchströmung des Kalorimeters sein. Durch vorliegende Querschnittsveränderungen wie Engstellen und Umlenkungen des Volumenstroms treten Veränderungen der Flussgeschwindigkeit und des Druckes auf. Eine Konsequenz dieser Effekte kann eine ungleichmäßige Benetzung der Empfängerplatte und dadurch entstehende Störung in der Wärmeübertragung sein.

Die bereits bei Diskussion von Test 1-1 betrachteten Ergebnisse widerlegen jedoch, dass dadurch eine ungleichmäßige Benetzung entsteht. Auch Ergebnisse von Strömungssimulationen während der ursprünglichen Konzeptionierung zeigten keine Anfälligkeit diesen Effekten gegenüber. Die auftretenden Probleme sind infolgedessen wahrscheinlicher auf den niedrigen Volumenstrom und damit verbundenen Einfluss der Druckschwankungen zurückzuführen.

## 6.5 Geometrische Fehlerquellen

Eine weitere allgemeine Fehlerquelle ist die Großforschungsanlage selbst. Auch wenn die grundlegenden Kennwerte des Synlight bekannt sind, verbleiben bei der Durchführung von Versuchen einige Unstetigkeiten.

Durch das vorliegende Spiel in der Steuerung der Antriebe der Strahlerelemente ist bei der Positionierung eine Abweichung möglich. Je nach Größe oder Bauart des Versuches kann es bei der manuellen Ausrichtung dadurch zu Ungenauigkeiten kommen. Auch muss die Position zwischen den Versuchen überprüft werden. Durch Verschiebungen anderer Module oder Wartungsarbeiten können minimale Veränderungen auftreten, welche den Versuch letztlich beeinflussen.

Ein weiterer Faktor ist die Degradation der verwendeten Kurzbogen-Lampen sowie der Reflektorelemente. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Eigenschaften zu Beginn des Einsatzes mit den festgelegten Kennwerten übereinstimmen, verändern sich diese über die Zeit. Diese Veränderungen treten nicht für alle Elemente gleich auf. Dadurch können signifikante Unterschiede in der tatsächlichen Strahlungsleistung verschiedener Lampen vorliegen. Aus diesem Grund wurden die Referenzmessungen mit FMAS durchgeführt und das System auf den aktuellen Zustand der Anlage kalibriert. Gegenüber anderen Simulatoren ist eine Vergleichbarkeit durch diese Abweichungen stets kritisch zu bewerten.

Als dritten Faktor bei Ungenauigkeiten durch die Anlage muss die genaue Position des Versuches bzw. des Empfängers betrachtet werden. Diese Positionierung wird ebenfalls manuell vorgenommen und dokumentiert, wodurch ein manueller Messfehler oder weitere Abweichungen entstehen können. Für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse in dieser Arbeit wurden die Positionen über den gewählten Bereich der FMAS-Messungen und zusätzliche händische Referenzpunkte dokumentiert.

Um eine Einschätzung für die Größenordnung einer händischen oder mechanischen Abweichung bei der Einstellung der Anlage zu erhalten, wird im Folgenden ein Beispiel berechnet.

Der bei den Messungen betrachtete Bereich weist eine Größe von 40 mm x 40 mm oder 0,04 m x 0,04 m auf. Die Strahlerelemente sowie Messplattform der FMAS-Kamera sind ca. 8 m von der Blende entfernt. Falls sich eines der Elemente oder die Plattform um 0,5° von der ursprünglichen Position entfernt, entsteht die folgende Abweichung:

$$\Delta s = 8 \text{ m} * \tan(0,5^\circ) = 0,07 \text{ m} = 7 \text{ mm}$$

$$f = \frac{7 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} * 100 \% = 17,5\%$$

$$\Delta s = \text{Abgewichene Distanz [m]}$$

$$f = \text{Fehler / Abweichung [\%]}$$

Formel 14: Beispielrechnung Fehler durch Geometrie

Dieser Fehler durch ein einzelne geometrische Abweichungen ist bereits groß. Da bei den Messungen bis zu 18 Strahler und die Messplattform genutzt werden, kann davon ausgegangen werden, dass eine Abweichung bei mehr als einer Ausrichtung vorliegt. Die diskutierten  $0,5^\circ$  Abweichungen können bereits durch eine Totzone an einem der Schrittmotoren, die zur Positionierung verwendet werden, entstehen.

Insgesamt bestehen in der Großforschungsanlage Synlight eine Vielzahl an Unstetigkeiten bei der Steuerung und Positionierung. Diese können selbst bei kleinen Ungenauigkeiten durch ihre Anzahl einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse und besonders ihre Replizierbarkeit haben. Grund dafür ist die starke Punktfokussierung der Anlage, welche zu hohen örtlichen Flussdichte-Gradienten führt. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Einflüsse auch auf die kalorimetrischen und radiometrischen Messungen eingewirkt haben und die Ergebnisse somit durch zufällige Fehler verzerrt haben. Weitere Betrachtungen mit optimierten Methoden zur Positionierung und Vergleichbarkeit sind zukünftig notwendig.

### 6.6 Einfluss der Tiefe des Kühlkanals und Winkelabhängigkeit

Die Platzierung des Kalorimeters war nicht innerhalb, sondern jeweils nur hinter den genutzten Kühlkörpern möglich. Dies bedeutet, dass die Strahlung zunächst durch den entstehenden Kanal hindurch dringen muss, bevor sie auf die Empfängerfläche trifft.

Die Berechnung erfolgte auf Basis trigonometrischer Zusammenhänge, die sich aus der in Abbildung 33 dargestellten Geometrie ergeben.

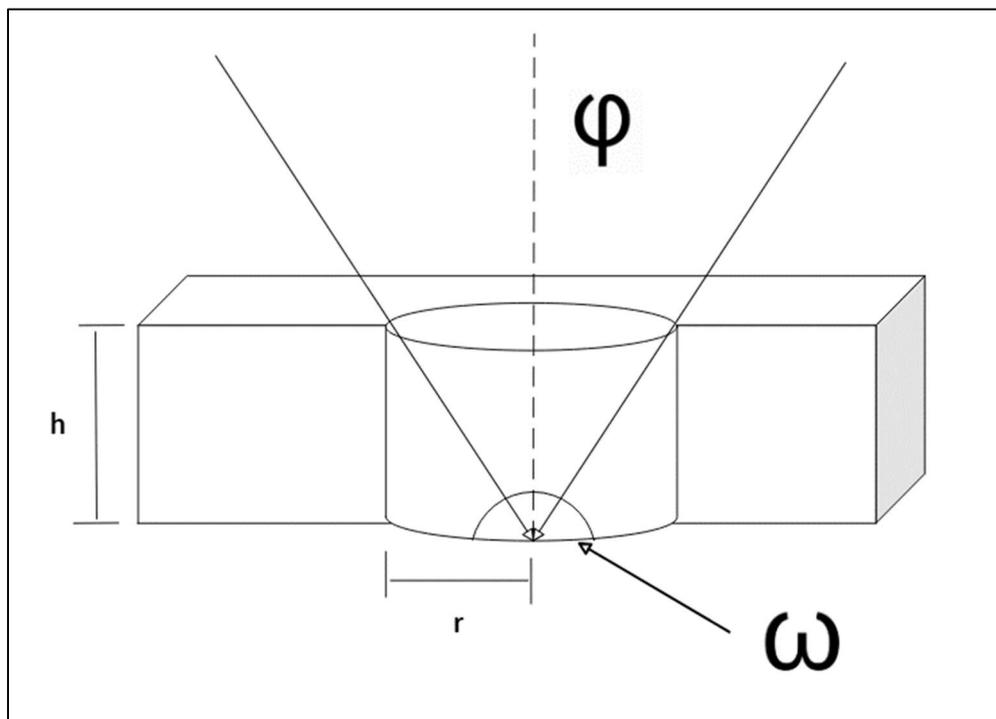


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Kühlkörper-Geometrie (eigene Darstellung)

Mit der vorliegenden Kühlkörpertiefe  $h$  und dem Radius des Kanals  $r$  ergibt sich die folgende Formel für den Apertur-Öffnungswinkel  $\varphi$ :

$$\varphi = 180^\circ - 2 * \omega = 180^\circ - 2 * \tan^{-1}\left(\frac{h}{r}\right)$$

$\varphi$  = Apertur-Öffnungswinkel [°]

$\omega$  = Hilfswinkel [°]

$h$  = Tiefe des Kühlkörpers [m]

$r$  = Radius des Kanals [m]

Formel 15: Trigonometrische Berechnung des Apertur-Öffnungswinkels  $\varphi$

In der nachfolgenden Tabelle sind die Maße für beide Kühlkörper-Konfigurationen sowie die dadurch verbleibenden Öffnungswinkel aufgelistet.

Tabelle 8: Verbleibender Einfallswinkel nach Kühlkörper (eigene Daten)

Bezeichnung	Tiefe des Kühlkörpers $h$	Durchmesser / Radius des Kanals $r$	Apertur-Öffnungswinkel $\varphi$
Kühlkörper 1	18 mm	40 mm / 20 mm	96°
Kühlkörper 2	15 mm	16 mm / 8 mm	56°

Während die Verschattung für den ersten Kühlkörper aufgrund der großen Öffnung eher gering ausfällt, wird beim zweiten Kühlkörper ein großer Teil der seitlich auftreffenden Strahlung reflektiert. Aus diesem Grund wurde für die gewählte Strahler-Konfiguration eine Überprüfung der Winkelabhängigkeit durchgeführt. Diese ist für die Anlage bei bekannter Art und Position der Blende sowie Auswahl der Strahler über ein internes Excel-Tool möglich. Das Ergebnis der Berechnung wird in Tabellenform angegeben und ist in Anhang 9 beigefügt.

Der relevante Wert ist in diesem Fall der Raumeinfallswinkel  $\beta$ . Dieser weist für die äußersten verwendeten Strahler E5, E7, I5 und I7 (s. Abbildung 18) einen maximalen Wert von 19,7° auf. Um die Raumeinfallswinkel der oberen und unteren Strahler gemeinsam zu betrachten, wird dieser Wert auf knapp 40° verdoppelt. Dies ist dennoch niedriger als der kleinere verbleibende Apertur-Öffnungswinkel von 56°.

Nach diesen theoretischen Berechnungen hat die Verschattung durch die Geometrie des Kühlkörpers keinen Einfluss auf die auftreffende Strahlung. Sämtliche von den Lampen ausgesandte Strahlung kann die Empfängerplatte des Kalorimeters erreichen. Die Messabweichungen haben folglich eine andere Ursache, wie beispielsweise die winkelabhängige Absorption der Beschichtung (s. Kapitel 5.1.4).

## 6.7 Aufbringung und Qualität der absorptiven Beschichtungen

Die untersuchten Beschichtungen der Empfängerplatten bergen ebenfalls Potenzial für Anwendungsfehler. Die Beschichtung erfolgte manuell. Allerdings waren dazu jeweils unterschiedliche Verfahren notwendig.

Vor dem Auftragen der Beschichtung wurden die Platten identisch präpariert, indem sie abgeschliffen und entfettet wurden. Für den Ofen-Thermolack wurde der Überzug aus einer Sprühdose direkt auf die Empfängerplatte aufgesprüht. Die einfache Handhabung ermöglichte eine nahezu homogene Oberfläche ohne Einschlüsse oder Unebenheiten.

Die Beschichtung mit Pyromark gestaltete sich dagegen komplizierter. Pyromark ist zwar ebenfalls ein Lack, wurde allerdings von Hand mit einem Lackroller aufgebracht. Während der Lackierung sind aus diesem Grund einige Unebenheiten auf der Oberfläche entstanden und das Endergebnis unterschied sich optisch bereits von der Platte mit Thermolack.



Abbildung 34: Beschichtungen der Empfängerplatten mit Thermolack (links) und Pyromark (rechts) nach dem Einsatz (eigene Aufnahmen)

Nach dem Einsatz der Platten wurde der Oberflächenzustand jeweils dokumentiert (s. Abbildung 34), der Unterschied ist noch stärker zu erkennen. Obwohl die Platte mit dem Thermolack (links) für mehrere Versuche genutzt wurde, ist bis auf die Abdrücke der Überwurfmutter keine Degradation zu erkennen. Die Oberfläche blieb homogen, ohne Verfärbungen oder andere Änderungen. Ein weiterer Einsatz ist bedenkenlos möglich.

Die Beschichtung mit Pyromark (rechts) weist dagegen eine deutliche Degradation auf. Stellen, an denen vorher Einschlüsse oder Unebenheiten entstanden waren, sind durch die Bestrahlung abgeplatzt und verfärbt. Ein erneuter Einsatz ist nicht möglich.

Bei der Untersuchung der Pyromark-Beschichtung ist zudem eine Störung aufgetreten. Eine der Platten wies deutlich Verfärbungen auf der Rückseite auf, obwohl dies bei keiner anderen Platte aufgetreten ist. In der folgenden Abbildung werden die Rückseiten verglichen.



Abbildung 35: Rückseiten einer normalen (links) und beschädigten (rechts) Empfängerplatte (eigene Aufnahmen)

Die reguläre Rückseite (links) weist bis auf einige Lackrückstände keinerlei Veränderungen auf. Die beschädigte Rückseite (rechts) weist neben Ablagerungen des Pyromarks jedoch Verfärbungen des Metalls auf. Diese Verfärbungen treten erst ab einer deutlich erhöhten Temperatur der Empfängerplatte auf.

Es liegt in diesem Fall nahe, dass bei diesem Versuch ein Einbaufehler vorlag. Dieser schränkte die Umströmung der Empfängerplatte ein, wodurch sich ein abgeschnittener Bereich stark erhitzte. Dieser Prozess war in den Messdaten und der äußeren Beobachtung nicht erkenntlich. Dadurch wurde allerdings weder das Kalorimeter selbst noch der Aufbau beschädigt. Es schmolz jedoch eine der verbauten Dichtungen.

Die Probleme bei der Beschichtung mit Pyromark wären durch eine professionelle Beschichtung lösbar. In diesem Fall müsste die Art und Dicke der Beschichtung noch einmal untersucht werden. Denn vorliegende Untersuchungen weisen auf unterschiedliche Absorptivitäten in Abhängigkeit der Schichtdicke des Pyromarks hin.

[32]

## 7 Fazit und Ausblick

Zum Abschluss der Arbeit soll in diesem Kapitel ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf zukünftige Anpassungen, Versuche und Entwicklungen gegeben werden. Diese schließen sowohl den unmittelbaren Anlagenkontext als auch den weitergehenden wissenschaftlichen und technischen Nutzen der erzielten Ergebnisse ein.

Die bei der Entwicklung und Konzeption der Projektidee erhoffte Messgenauigkeit konnte bei den durchgeführten Versuchen zunächst nicht erreicht werden. Dennoch weisen die gesammelten Messdaten und Erfahrungswerte darauf hin, dass eine weiterführende Untersuchung sinnvoll ist. So zeigt sich, dass eine Verbesserung der Art und Qualität der absorptiven Beschichtungen großes Potenzial für Verbesserungen der Absorptivität und Winkelabhängigkeit bietet. Die untersuchte Verkleinerung der Apertur des Kalorimeters konnte deutliche Verbesserungen der Aufnahme im Bereich niedriger Strahlungsenergie bewirken. Aus diesem Grund stellt sie eine Möglichkeit der zukünftigen Modifikation des Versuchsaufbaus dar.

Die Überarbeitung der Verbindung zwischen Kalorimeter, Kühlkörper und gegebenenfalls auch dem Strahlenschutz könnten Verbesserungen bei einer möglichen Verschattung und Verlusten durch ungewollte Wärmeübertragung bieten. Die Einflüsse dieser Verbindung scheinen bei bisheriger Betrachtung eine geringe Auswirkung zu haben. Jedoch könnte in Summe dennoch eine Beeinträchtigung der Messungen vorliegen.

Im Bereich der Volumenstrom-Messung liegen ebenfalls noch eine Reihe von Unstetigkeiten vor. Die Schwankungen im Bereich der genutzten niedrigen Volumenströme könnten durch die Auswahl eines besser geeigneten Durchfluss-Sensors möglicherweise verringert werden. Genauso sind Maßnahmen aufgeführt, um Schwankungen durch Druckunterschiede in der Wasserzufuhr oder geometrische Hindernisse im Kalorimeter zu senken.

Eine positive Beobachtung ist, dass das entwickelte Wasser-Kalorimeter und der zugehörige Versuchsaufbau trotz bestehender technischer Herausforderungen ein funktionales Grundsystem darstellen. Die genutzte Aktorik, Sensorik und Software stellen eine gute Grundlage für Messungen dar und bieten die Möglichkeit zukünftiger, modularer Anpassungen.

Eine zukünftig wichtige Untersuchung ist neben den bereits aufgeführten Ansätzen eine direkte Messung des kalorimetrischen Aufbaus mit dem Kendall-Radiometer des DLR am Standort Köln-Porz. Dieses dient durch seine Fähigkeit zur Eigenkalibrierung als interne Referenz und würde einen vollständigen Ausschluss der geometrischen Fehlerquellen des Synlights ermöglichen. Im Rahmen dessen wäre eine Beurteilung der tatsächlichen Größe dieser Fehlerquellen und der Genauigkeit des Verfahrens möglich.

Bei erfolgreicher Umsetzung der benannten Modifikationen wäre ein zukünftiger Einsatz im Anlagenbetrieb in der Großforschungsanlage Synlight denkbar. Weiterführend ist auch eine Verwendung in anderen solarthermischen Forschungsanlagen plausibel.

Voraussetzung dafür sind deutliche Verbesserungen der Genauigkeit und die Aufdeckung der konkreten Ursachen der ermittelten Fehler.

Die zu Beginn formulierte und der Arbeit zugrunde liegende Forschungsfrage kann abschließend nicht fundiert beantwortet werden. Es bedarf der benannten weiteren Messungen und Anpassungen, um Aufschlüsse über die tatsächliche Nutzbarkeit des Verfahrens zu erhalten.

## Literatur

- [1] BMWK (2022): *Klimaschutzbericht 2022*. Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/klimaschutzbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/klimaschutzbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=6) (Zugriff am: 14. Juli 2024).
- [2] Guillot, E. et al. (2014): *Comparison of 3 Heat Flux Gauges and a Water Calorimeter for Concentrated Solar Irradiance Measurement*. In: *Energy Procedia*, Jg. 49, S. 2090–2099, doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.221.
- [3] Alexopoulos, S. O.; Kalogirou, S. A. (Hrsg.) (2022): *Solar thermal energy*. New York, NY: Springer.
- [4] SolarPACES (2023): *How Concentrated Solar Power Works*. Verfügbar unter: <https://www.solarpaces.org/worldwide-csp/how-concentrated-solar-power-works/> (Zugriff am: 30. April 2024).
- [5] Laaber, D. et al.: *One year with synlight – Review of operating experience in SOLARPACES 2018: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, Casablanca, Morocco 2019, S. 170007, doi: 10.1063/1.5117677.
- [6] Wieghardt, K. et al.: *SynLight – the world’s largest artificial sun in SOLARPACES 2015: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, Cape Town, South Africa 2016, S. 30038, doi: 10.1063/1.4949090.
- [7] Wieghardt, K. et al.: *Synlight - A new facility for large-scale testing in CSP and solar chemistry in SolarPACES 2017: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, Santiago, Chile 2018, S. 40042, doi: 10.1063/1.5067078.
- [8] Ulmer, S. (2004): *Messung der Strahlungsflussdichte-Verteilung von punktkonzentrierenden solarthermischen Kraftwerken*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2003 (Nicht für den Austausch). Düsseldorf: VDI-Verl.
- [9] Gardon, R. (1953): *An Instrument for the Direct Measurement of Intense Thermal Radiation*. In: *Review of Scientific Instruments*, Jg. 24, Nr. 5, S. 366–370, doi: 10.1063/1.1770712.
- [10] Ballestrín, J. et al. (2006): *Calibration of high-heat-flux sensors in a solar furnace* (en). In: *Metrologia*, Jg. 43, Nr. 6, S. 495–500, doi: 10.1088/0026-1394/43/6/003.
- [11] Ballestrín, J. (2003): *Systematic error in the measurement of very high solar irradiance*. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Jg. 80, Nr. 3, S. 375–381, doi: 10.1016/j.solmat.2003.08.014.
- [12] IAPWS (2023): *International Association for the Properties of Water and Steam - Main page*. Verfügbar unter: <http://www.iapws.org/> (Zugriff am: 8. März 2024).
- [13] Thelen, M. (2016): *Entwicklung eines optischen Messsystems für Strahlungsflussdichteverteilung und Verifizierung anhand hochkonzentrierter Solarstrahlung*, Rheinische Fachhochschule Köln. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/109132/> (Zugriff am: 14. Juli 2024).

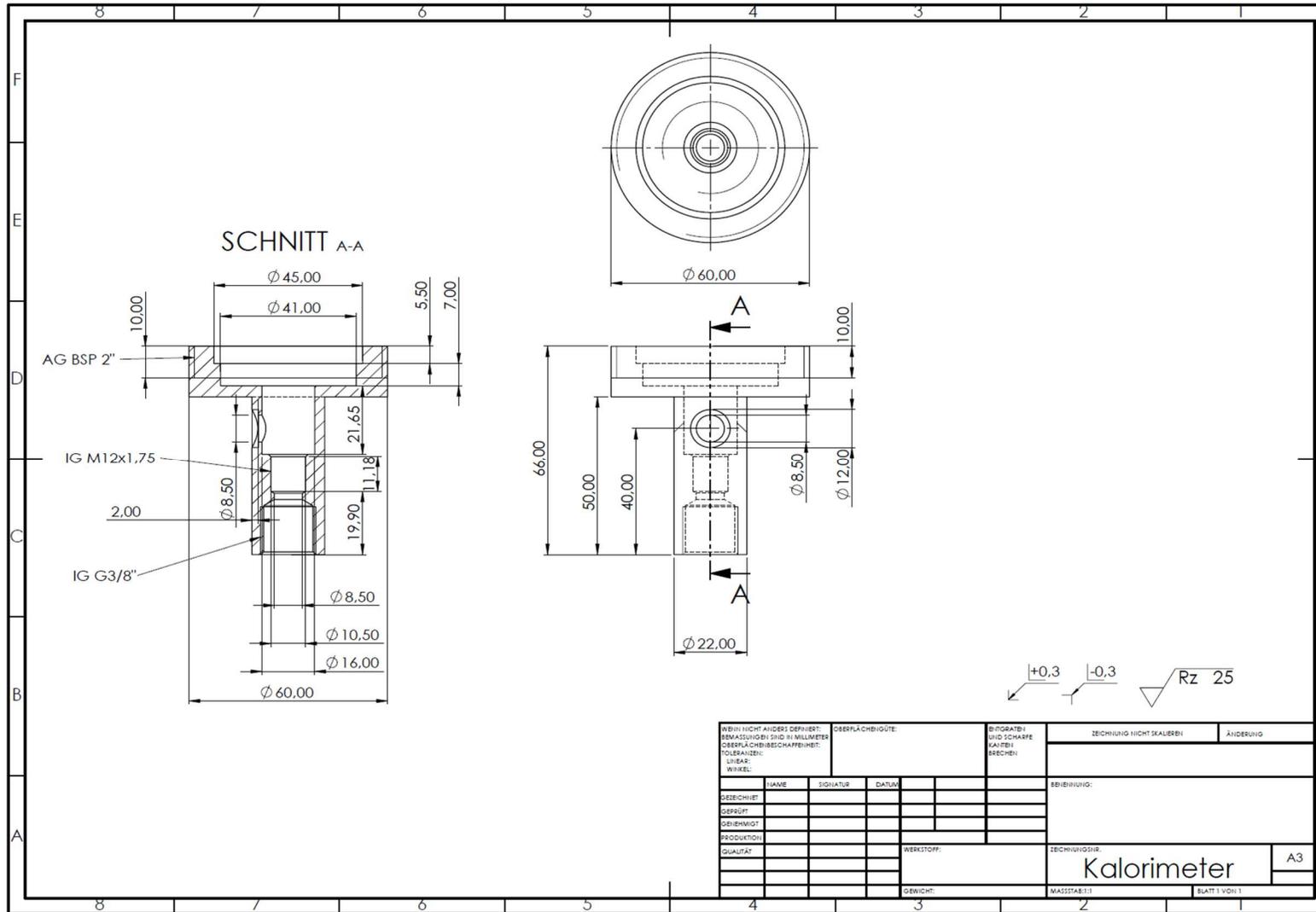
- [14] Parthier, R. (2020): *Messtechnik: Vom SI-Einheitensystem über Bewertung von Messergebnissen zu Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. 9. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [15] Stephan, P. (2019): *B1 Die Energieform Wärme und verschiedene Arten der Wärmeübertragung*. In: P. Stephan et al. (Hrsg.) *Springer Reference Technik: VDI-Wärmeatlas*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–21.
- [16] Baehr, H. D.; Stephan, K. (2019): *Wärme- und Stoffübertragung*. 10. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [17] Kleiber, M.; Joh, R. (2019): *D3.1 Thermophysikalische Stoffwerte sonstiger reiner Flüssigkeiten und Gase*. In: P. Stephan et al. (Hrsg.) *Springer Reference Technik: VDI-Wärmeatlas*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 355–445.
- [18] Kretzschmar, H.-J.; Wagner, W. (2019): *D2.1 Thermophysikalische Stoffwerte von Wasser (de)*. In: *VDI-Wärmeatlas*, S. 201–218, doi: 10.1007/978-3-662-52989-8\_12.
- [19] Baehr, H. D.; Stephan, K. (2010): *Wärme- und Stoffübertragung*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [20] Briehl, H. (2014): *Chemie der Werkstoffe*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [21] VAN ES INDUSTRIES GmbH (2024): *Ofenlack Ofenfarbe hitzebeständige Thermolack Kaminlack Farbe 800°C s, 7,20 €*. Verfügbar unter: <https://schlauchschellen-shop.de/Ofenlack-Ofenfarbe-hitzebestaendige-Thermolack-Kaminlack-Farbe-800C-schwarz-matt-400-ml> (Zugriff am: 12. Juli 2024).
- [22] SAMSON AG (2023): *EB 5827-2*. Verfügbar unter: <https://www.samson-group.com/document/e58272de.pdf> (Zugriff am: 3. Juni 2024).
- [23] TC Mess- und Regeltechnik GmbH (2019): *Widerstandsthermometer mit Schutzrohr*. Verfügbar unter: <https://www.tcgmbh.de/downloads/Widerstandsthermometer-mit-Schutzrohr-Typ-16.pdf> (Zugriff am: 11. Juni 2024).
- [24] ifm (2024): *SM6120 - Magnetisch-induktiver Durchflusssensor - ifm*. Verfügbar unter: <https://www.ifm.com/de/de/product/SM6120?tab=documents> (Zugriff am: 3. Juni 2024).
- [25] HORNBACH (2024): *Panzerschlauch für Wasser und Heizung 1/2 Zoll x 1/2 Zoll | HORNBACH*. Verfügbar unter: <https://www.hornbach.de/p/panzerschlauch-fuer-wasser-und-heizung-1-2-zoll-x-1-2-zoll-x-1000-mm/10606695/> (Zugriff am: 3. Juni 2024).
- [26] Spray-Color GMBH (2008): *Sparvar Standardsprays*. Verfügbar unter: <https://www.spraycolor.de/055eea9b760c5a703/index.html> (Zugriff am: 17. Juli 2024).
- [27] NI (2024): *NI-9219*. Verfügbar unter: <https://www.ni.com/de-de/shop/model/ni-9219.html> (Zugriff am: 21. Juni 2024).
- [28] NI (2024): *NI-9265*. Verfügbar unter: <https://www.ni.com/de-de/shop/model/ni-9265.html> (Zugriff am: 21. Juni 2024).

- [29] NI (2024): *LabVIEW-Übersicht - NI*. Verfügbar unter: <https://www.ni.com/docs/de-DE/bundle/labview/page/labview-overview.html> (Zugriff am: 11. März 2024).
- [30] NI (2024): *What is NI Measurement & Automation Explorer (NI MAX)*. Verfügbar unter: <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/21/what-is-ni-measurement---automation-explorer--ni-max--.html> (Zugriff am: 17. Juni 2024).
- [31] LA-CO Industries (2024): *Shared Folder – LA-CO Industries – Powered by Image Relay*. Verfügbar unter: <https://laco.imagere-lay.com/f7c715a7cb184e8d9bdda5331e319ac9/1063968> (Zugriff am: 12. Juli 2024).
- [32] Coventry, J.; Burge, P.: *Optical properties of Pyromark 2500 coatings of variable thicknesses on a range of materials for concentrating solar thermal applications in SOLARPACES 2016: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, Abu Dhabi, United Arab Emirates 2017, S. 30012, doi: 10.1063/1.4984355.

## Anhangsverzeichnis

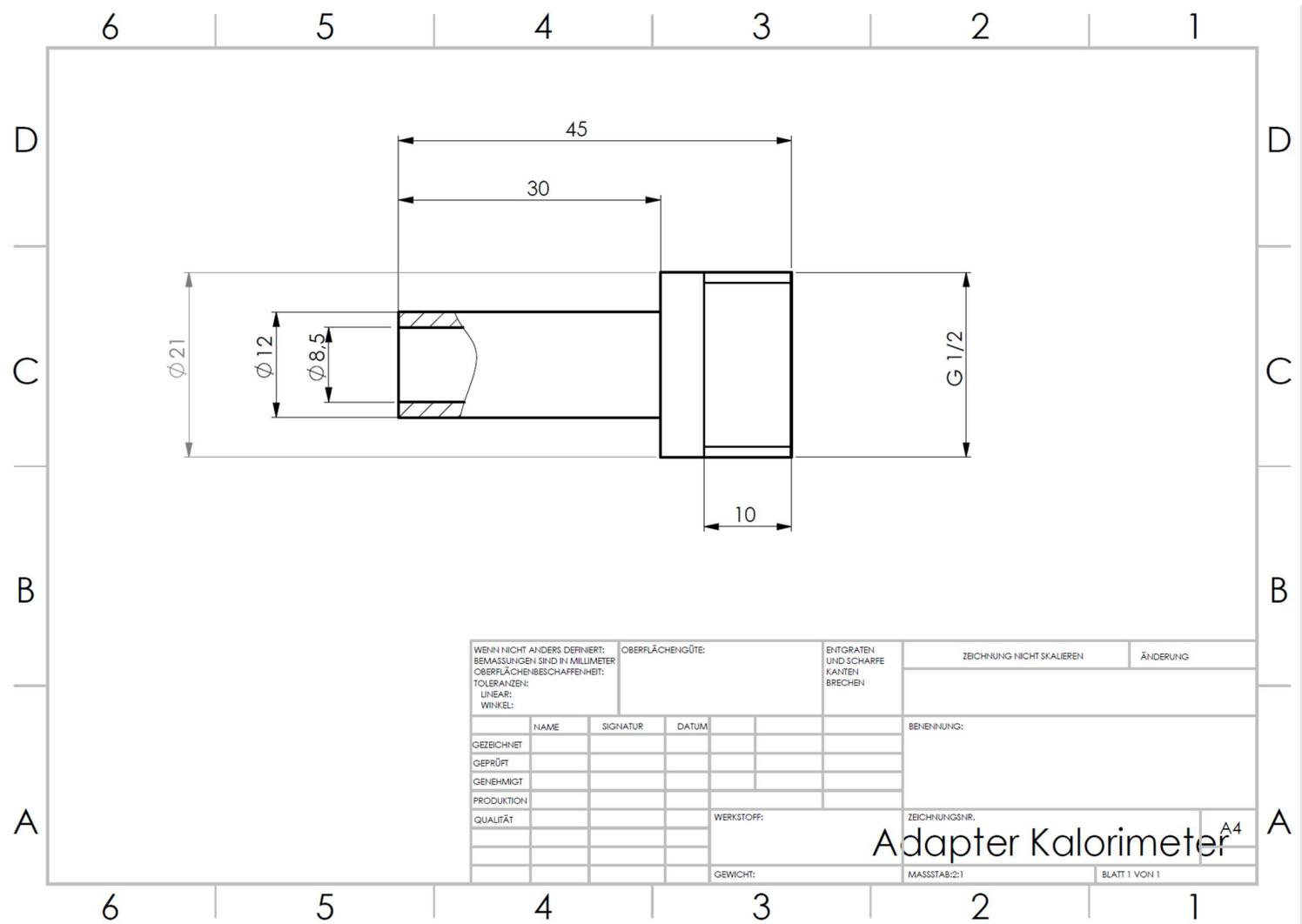
Anhang 1: Zeichnung Kalorimeter .....	63
Anhang 2: Zeichnung Adapterstück Kalorimeter.....	64
Anhang 3: Zeichnung Diffusor Kalorimeter .....	65
Anhang 4: Hauptcode in LabVIEW .....	66
Anhang 5: Berechnungscode Wärmestrom und Flussdichte .....	67
Anhang 6: Messdaten - Pyromark (erste Messung) .....	68
Anhang 7: Messdaten - Pyromark (zweite Messung) .....	69
Anhang 8: Messdaten - Winkelabhängigkeit.....	70
Anhang 9: Excel-Berechnungstool für Synlight.....	71
Anhang 10: Messdaten – große Apertur - Test 1-1 .....	72
Anhang 11: Messdaten – große Apertur - Test 1-2 .....	73
Anhang 12: Messdaten – große Apertur - Test 1-3 .....	74
Anhang 13: Messdaten - verkleinerte Apertur.....	75

# Anhang 1



Anhang 1: Zeichnung Kalorimeter

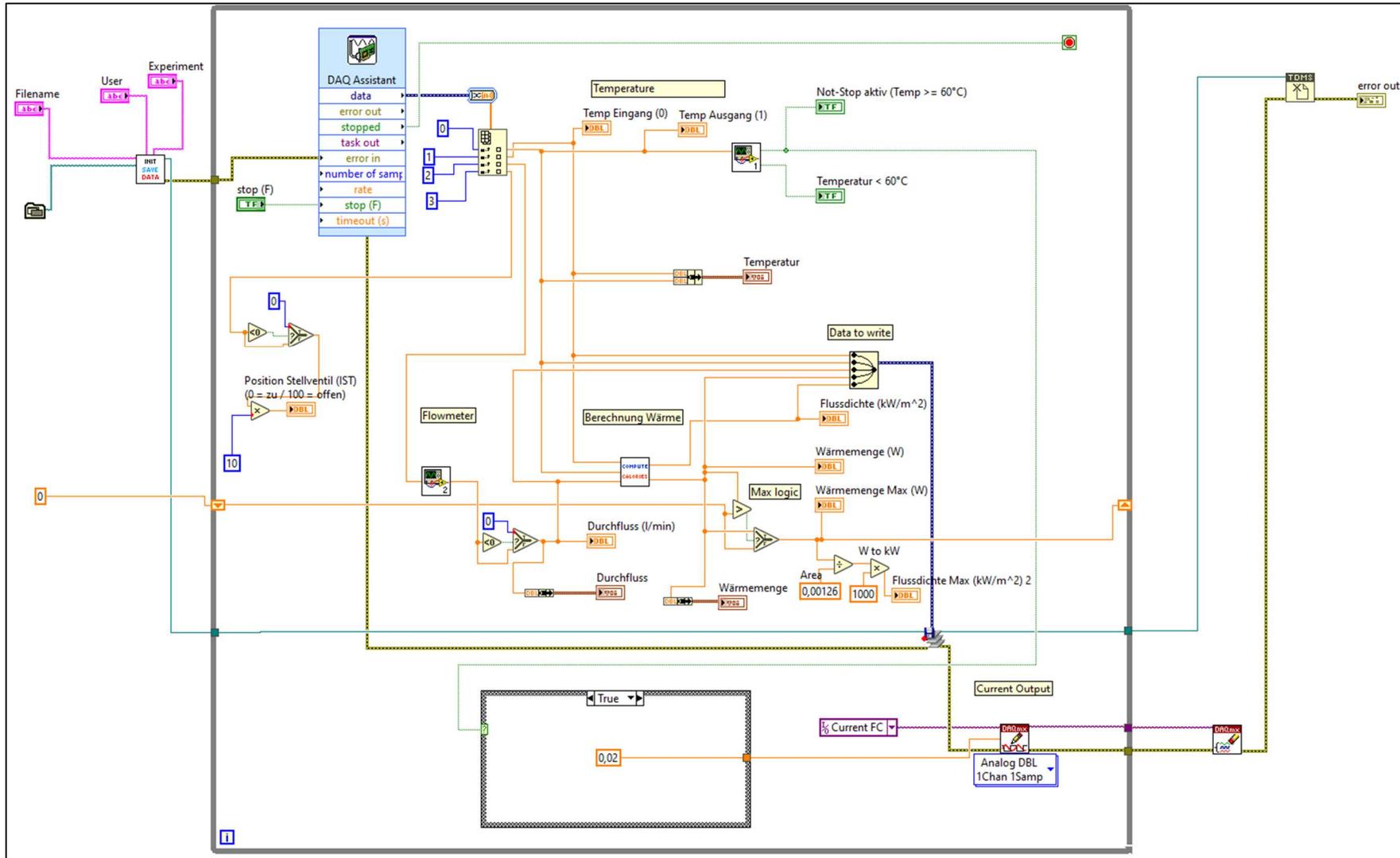
## Anhang 2



Anhang 2: Zeichnung Adapterstück Kalorimeter

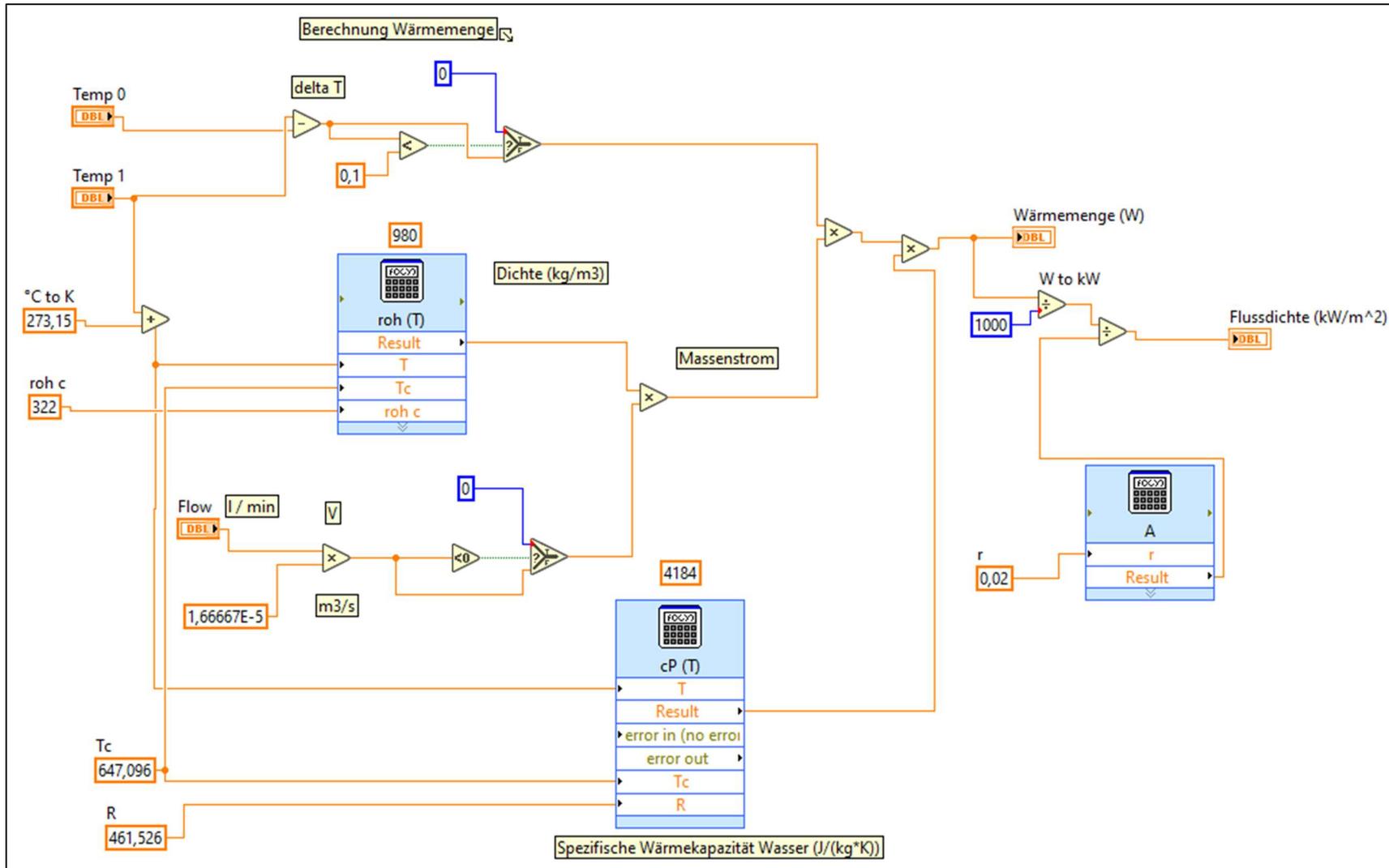


## Anhang 4



Anhang 4: Hauptcode in LabVIEW

## Anhang 5



Anhang 5: Berechnungscode Wärmestrom und Flussdichte

## Anhang 6

Abschnitt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Anzahl Strahler</b>	18	15	13	11	9	8	7	6	4
<b>Durchfluss [l/min]</b>	1,56	1,55	1,56	1,55	1,55	1,55	1,54	1,54	1,55
<b><math>\Delta T</math> [K]</b>	13,66	11,73	10,37	8,63	6,94	6,33	5,53	5,10	3,32
<b>Wärmestrom [W]</b>	1477,9	1262,1	1119,2	930,8	747,5	679,4	590,6	546,9	356,9
<b>Flussdichte (Pyromark) [kW/m<sup>2</sup>]</b>	1214,4	1039,8	914,4	761,3	616,4	547,6	484,5	448,9	295,5
<b>Abweichung zu FMAS[%]</b>	43,9	44,5	42,7	42,1	41,1	36,7	35,1	35,8	34,0
<b>Flussdichte (T1-3) [kW/m<sup>2</sup>]</b>	1176,1	1004,2	890,2	740,8	594,7	540,6	469,9	435,2	283,9
<b>Abweichung zu FMAS [%]</b>	34,9	35,1	34,8	33,8	34,2	30,5	28,4	29,5	29,6
<b>Flussdichte (FMAS) [kW/m<sup>2</sup>]</b>	2097,1	1808,1	1554,5	1280,3	1010	853,7	724,4	677,7	430,4

Anhang 6: Messdaten - Pyromark (erste Messung)

## Anhang 7

<b>Ofenlack</b>				<b>Pyromark</b>			
<b>Messung</b>	1	2	3	<b>Messung</b>	1	2	3
<b>Anzahl Strahler</b>	10	8	6	<b>Anzahl Strahler</b>	10	8	6
<b>Durchfluss [l/min]</b>	1,64	1,64	1,64	<b>Durchfluss [l/min]</b>	1,54	1,54	1,54
<b><math>\Delta T</math> [K]</b>	7,20	5,80	4,26	<b><math>\Delta T</math> [K]</b>	7,76	6,16	4,46
<b>Wärmestrom [W]</b>	820,08	661,33	485,11	<b>Wärmestrom [W]</b>	831,65	657,65	476,48
<b>Flussdichte [kW/m<sup>2</sup>]</b>	652,68	526,06	386,00	<b>Flussdichte [kW/m<sup>2</sup>]</b>	662,09	523,29	379,16

Anhang 7: Messdaten - Pyromark (zweite Messung)

## Anhang 8

Winkel	0° / Referenz			Winkel	15°			Winkel	30°		
<b>Messung</b>	1	2	3	<b>Messung</b>	1	2	3	<b>Messung</b>	1	2	3
<b>Anzahl Strahler</b>	10	8	6	<b>Anzahl Strahler</b>	10	8	6	<b>Anzahl Strahler</b>	10	8	6
<b>Durchfluss [l/min]</b>	1,64	1,64	1,64	<b>Durchfluss [l/min]</b>	1,64	1,63	1,63	<b>Durchfluss [l/min]</b>	1,68	1,68	1,67
<b>ΔT [K]</b>	7,20	5,8	4,3	<b>ΔT [K]</b>	6,42	5,26	3,95	<b>ΔT [K]</b>	4,42	3,65	2,88
<b>Wärmestrom [W]</b>	820,1	661,3	485,1	<b>Wärmestrom [W]</b>	730,5	595,6	447,3	<b>Wärmestrom [W]</b>	516,5	426,5	334,4
<b>Flussdichte [kW/m²]</b>	652,7	526,1	386,0	<b>Flussdichte [kW/m²]</b>	581,3	473,9	356,0	<b>Flussdichte [kW/m²]</b>	411,0	339,3	266,1
				<b>Abweichung [%]</b>	0,11	0,1	0,08	<b>Abweichung [%]</b>	0,37	0,35	0,31

Anhang 8: Messdaten - Winkelabhängigkeit

## Anhang 9

Strahlerausrichtung								Pos. in Kugel				Pos. zum Koordinatenursprung			Verzerrung auf Target			Fokuspunkt		
Strahler		$a_{ax,soll,n}$	$\epsilon_n$	$\alpha_n$	$s_{ax,soll,n}$	$s_{el,soll,n}$	$s_{az,soll,n}$	$Y_n$	$Z_n$	$\theta_n$	$\phi_n$	$x_{0,n}$	$Y_{0,n}$	$Z_{0,n}$	$\beta_n$	$\cos(\beta_n)$	$\gamma_n$	Nummer	$Y_{t,k}$	$Z_{t,k}$
Nr.	Bezeichn.	mm	°	°	Schritte	Schritte	Schritte	mm	mm	°	°	mm	mm	mm	°	-	°	-	mm	mm
51	E05	953,5101	-17,7176	8,692906	762808	189555	104180	-1100	2325,2	72,2824	188,6929	-6294,49	-1100	1905,2	19,67364	0,941626	25,31778	1	0	0
52	E06	869,9037	-17,7176	0	695923	189555	95000	0	2325,2	72,2824	180	-6378,1	0	1905,2	17,7176	0,952568	0	1	0	0
53	E07	953,5101	-17,7176	-8,69291	762808	189555	85820	1100	2325,2	72,2824	171,3071	-6294,49	1100	1905,2	19,67364	0,941626	334,6822	1	0	0
62	F05	815,1486	-10,3493	12,68119	652119	107900	108391	-1650	1372,6	79,65075	192,6812	-6432,85	-1650	952,6	16,31445	0,959734	50,24365	1	0	0
63	F06	651,9537	-10,3493	4,196387	521563	107900	99431	-550	1372,6	79,65075	184,1964	-6596,05	-550	952,6	11,15906	0,981094	21,83595	1	0	0
64	F07	651,9537	-10,3493	-4,19639	521563	107900	90569	550	1372,6	79,65075	175,8036	-6596,05	550	952,6	11,15906	0,981094	338,1641	1	0	0
65	F08	815,1486	-10,3493	-12,6812	652119	107900	81609	1650	1372,6	79,65075	167,3188	-6432,85	1650	952,6	16,31445	0,959734	309,7564	1	0	0
73	G04	843,1495	-3,15115	16,76071	674520	76965	112699	-2200	420	86,84885	196,7607	-6404,85	-2200	0	17,04601	0,95607	79,19177	1	0	0
74	G05	598,7722	-3,15115	8,290241	479018	76965	103754	-1100	420	86,84885	188,2902	-6649,23	-1100	0	8,865012	0,988054	69,10223	1	0	0
76	G07	598,7722	-3,15115	-8,29024	479018	76965	86246	1100	420	86,84885	171,7098	-6649,23	1100	0	8,865012	0,988054	290,8978	1	0	0
77	G08	843,1495	-3,15115	-16,7607	674520	76965	77301	2200	420	86,84885	163,2393	-6404,85	2200	0	17,04601	0,95607	280,8082	1	0	0
85	H05	706,8255	3,997186	12,50243	565460	40683	81797	-1650	-532,6	93,99719	192,5024	-6541,17	-1650	-952,6	13,11617	0,973912	107,8895	1	0	0
86	H06	545,9557	3,997186	4,13808	436765	40683	90630	-550	-532,6	93,99719	184,1381	-6702,04	-550	-952,6	5,750948	0,994967	134,0792	1	0	0
87	H07	545,9557	3,997186	-4,13808	436765	40683	99370	550	-532,6	93,99719	175,8619	-6702,04	550	-952,6	5,750948	0,994967	225,9208	1	0	0
88	H08	706,8255	3,997186	-12,5024	565460	40683	108203	1650	-532,6	93,99719	167,4976	-6541,17	1650	-952,6	13,11617	0,973912	252,1105	1	0	0
97	I05	734,403	11,20881	8,439744	587522	117228	86088	-1100	-1485,2	101,2088	188,4397	-6513,6	-1100	-1905,2	13,99837	0,970303	143,4748	1	0	0
98	I06	653,2404	11,20881	0	522592	117228	95000	0	-1485,2	101,2088	180	-6594,76	0	-1905,2	11,20881	0,980925	180	1	0	0
99	I07	734,403	11,20881	-8,43974	587522	117228	103912	1100	-1485,2	101,2088	171,5603	-6513,6	1100	-1905,2	13,99837	0,970303	216,5252	1	0	0

Anhang 9: Excel-Berechnungstool für Synlight

## Anhang 10

Messung	1	2	3	4
Anzahl Strahler	6	6	5	4
Durchfluss [l/min]	1,04	0,55	0,55	0,55
$\Delta T$ [K]	7,9	15	12,9	10,2
T0 [°C]	17,9	18,1	18,2	18,2
T1 [°C]	25,8	33,1	31,1	28,4
Wärmestrom [W]	570,6	572,1	495,6	394,9
Flussdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	454	455,3	394,4	314,2
Flussdichte (FMAS) [kW/m <sup>2</sup> ]	463,1	463,1	381	303
Abweichung [%]	2	1,7	3,5	3,7

Anhang 10: Messdaten – große Apertur - Test 1-1

## Anhang 11

Messung	1	2	3	4	5	6	7
<b>Anzahl Strahler</b>	18	16	14	12	10	8	6
<b>Durchfluss [l/min]</b>	1,57	1,56	1,54	1,56	0,96	0,96	0,95
<b><math>\Delta T</math> [K]</b>	15,5	13,9	12,4	10,8	13,8	11,6	8,6
<b>Wärmestrom [W]</b>	1687,5	1508	1321,3	1168,9	922,3	774,8	568,2
<b>Flussdichte [kW/m<sup>2</sup>]</b>	1342,8	1200	1051,5	930,2	733,9	616,6	452,1
<b>Flussdichte (FMAS) [kW/m<sup>2</sup>]</b>	1751,5	1609,6	1477,4	1144,4	971,3	833,5	965,4
<b>Abweichung [%]</b>	23,3	25,5	28,8	18,8	24,4	26	53,2

Anhang 11: Messdaten – große Apertur - Test 1-2

## Anhang 12

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Anzahl Strahler	18	15	13	11	9	8	7	6	4
Durchfluss [l/min]	1,89	1,89	1,89	1,89	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
$\Delta T$ [K]	13,1	11,3	9,7	8,1	10,2	9,1	8	7,3	4,6
Wärme-strom [W]	1716,4	1475,1	1273,8	1064,6	835,1	746,2	652,1	600,7	381,1
Flussdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	1365,9	1173,9	1013,6	847,2	664,6	593,8	518,9	478,0	303,2
Flussdichte (FMAS) [kW/m <sup>2</sup> ]	2097,1	1808,1	1554,5	1280,3	1010	853,7	724,4	677,7	430,4
Abweichung [%]	34,9	35,1	34,8	33,8	34,2	30,4	28,4	29,5	29,6

Anhang 12: Messdaten – große Apertur - Test 1-3

## Anhang 13

Messung	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Anzahl Strahler</b>	18	15	13	11	9	8	7	6	4
<b>Durchfluss [l/min]</b>	1,88	1,88	1,88	1,88	1,23	1,22	1,23	1,22	1,21
<b><math>\Delta T</math> [K]</b>	1,93	1,69	1,48	1,24	1,56	1,42	1,28	1,19	0,79
<b>Wärme-strom [W]</b>	252,7	221,2	193,9	162,5	134,2	119,9	109	101,3	66,6
<b>Flussdichte [kW/m<sup>2</sup>]</b>	1256,8	1100	964,4	808,2	667,3	596,4	542,2	503,7	331,1
<b>Abweichung zu FMAS[%]</b>	40,1	39,2	38,0	36,9	33,9	30,1	25,1	25,7	23,1
<b>Flussdichte (T1-3) [kW/m<sup>2</sup>]</b>	1176,1	1004,2	890,2	740,8	594,7	540,6	469,9	435,2	283,9
<b>Abweichung zu FMAS [%]</b>	34,9	35,1	34,8	33,8	34,2	30,5	28,4	29,5	29,6
<b>Flussdichte (FMAS) [kW/m<sup>2</sup>]</b>	2097,1	1808,1	1554,5	1280,3	1010	853,7	724,4	677,7	430,4

Anhang 13: Messdaten - verkleinerte Apertur