

Michael Franz HÖRTENHUBER, B.Sc.

Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Ermittlung des thermischen Verhaltens eines integralen Fassadenelementes

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau
eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Institut für Wärmetechnik

Betreuer:

Dipl.–Ing. Daniel Brandl

Mitbetreuer:

Dipl.–Ing. Dr.techn. Thomas Mach

SV Arch. Dipl.–Ing. Helmut Schober

Beurteiler: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Hochenauer

Graz, im März 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

VORWORT

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projekte UNAB (Umsetzung nachhaltigen Bauens) am Institut für Wärmetechnik. Der Zeitraum zur Durchführung dieser Masterarbeit erstreckte sich von Juli 2016 bis März 2017.

Ich möchte mich zuallererst bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christoph Hochenauer für die Möglichkeit bedanken, diese Arbeit inklusive ihrer Beurteilung und der zur Verfügung gestellten Arbeitsmittel und Einrichtungen zu absolvieren.

Ein besonderer Dank geht an meinen Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Daniel Brandl, der mir immer helfend zur Seite stand und auch manchmal tatkräftig mit anpacken musste/durfte. Unbedingt erwähnenswert ist hier auch die Mithilfe des SV Arch. BM Dipl.-Ing. Helmut Schober, welcher an der Auslegung, Konstruktion und Errichtung des Versuchsstandes fleißig beteiligt war. Danke, dass ich immer mit deiner Hilfe rechnen konnte.

Im selben Zuge muss hier auch Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Mach erwähnt werden. Er war der Initiator dieser Masterarbeit und kümmerte sich um die finanziellen Mittel, welche für diese Arbeit nötig waren.

Besonders bedanken möchte ich mich aber bei meiner Frau Teresa Hörtenhuber, welche mich über das ganze Studium hinweg tatkräftig unterstützt hat, sich neben ihrer Berufstätigkeit immer gut um unsere beiden Kinder gesorgt hat und mir dadurch den Abschluss dieses Studiums ermöglicht hat. Bei diesen Menschen konnte ich immer mit einem starken Rückhalt rechnen.

Zu guter Letzt dürfen hier meine Eltern und Schwiegereltern natürlich auch nicht fehlen. Vielen Dank für eure große Hilfe während dieser Zeit und danke, dass ihr immer an mich geglaubt habt.

Graz im März 2017

Michael Franz Hörtenhuber

KURZFASSUNG

Titel: Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur Ermittlung des thermischen Verhaltens eines integralen Fassadenelementes

Autor: Michael Franz Hörtenhuber

- Stichwort 1: Integrales Fassadenelement der TU Graz
- Stichwort 2: Kollektorkennlinie
- Stichwort 3: In-situ Messung und thermographische Aufnahmen

Diese Arbeit handelt von der Konzeptionierung, Errichtung und Inbetriebnahme eines Versuchsprüfstandes zur Messung des thermischen Verhaltens und in weiterer Folge zur ersten Abschätzung des Energieertrags eines integralen Tragwerkselements. Dieses integrale Fassadenelement wurde fakultätsübergreifend an der Technischen Universität Graz im Rahmen des Projektes UNAB (Umsetzung nachhaltigen Bauens) [1] entwickelt und ist grundsätzlich wie ein Sandwichpaneel aufgebaut. Ein wesentlicher Unterschied zu den herkömmlichen Sandwichpaneelen liegt jedoch in der Integration von Fluidkanälen zur Nutzung der Sonnenenergie zur Warmwassergenerierung. Im Zuge der Arbeit wird neben der Bezeichnung „integrales Tragwerkselement“ auch noch die Bezeichnung „thermisch aktiviertes Fassadenpaneel“ verwendet.

Nach Wahl der Messmethode im Freien - unter dem Einfluss realer vorherrschender klimatischer Bedingungen (im Unterschied zu Laborversuchen) - wurde ein Konzept für einen in-situ Versuchsstand erstellt, in dem zwei baugleiche Boxen, jeweils mit einem integralen Fassadenelement ausgestattet, Platz finden sollten. Beide Fassadenelemente besitzen innen- und außenseitig integrierte Fluidkanäle, in denen das durchfließende Wasser durch die solare Strahlung aufgeheizt werden kann. Da im Messaufbau lediglich eines der beiden Fassadenelemente tatsächlich von Wasser durchströmt wurde, diente das zweite Fassadenelement als Referenz, weil es sich aus thermischer Sicht wie ein Teil eines handelsüblichen Sandwichpaneels verhält.

Nach der Fertigstellung des Messaufbaus und der hydraulischen Anbindung wurden an den Oberflächen der beiden Paneele, innerhalb des Dämmkerns sowie im Innenraum der beiden Boxen mehrere Temperaturmesssensoren installiert. Zusätzlich wurden auch noch Ein- und

Austrittstemperaturen sowie der Massenstrom des Fluids (in diesem Fall Wasser) gemessen, welches das thermisch aktivierte Sandwichpaneel durchfloss.

Nach Inbetriebnahme des Versuchsstandes wurden im Zeitraum vom 01.09.2016 bis zum 03.11.2016 mehrere Messungen durchgeführt. Dabei wurde, ausgehend von einem Basismessszenario, tageweise verschiedene Parameter (wie beispielsweise die Höhe des Durchflusses oder die Wassereintrittstemperatur) variiert um deren Einfluss auf das thermische Verhalten des Paneels und die Aufheizung des Wassers zu ermitteln.

Nach Bewertung der Messergebnisse - dem Vergleich zwischen thermisch aktiviertem Paneel und Referenzpaneel - wurde im Anschluss unter Zuhilfenahme der generierten Messdaten eine Kollektorkennlinie erstellt, die zur Beschreibung der Effizienz der solaren Konversion dient und einen Vergleich mit herkömmlichen solarthermischen Kollektoren ermöglicht.

Während der laufenden Messungen wurden teilweise auch thermographische Aufnahmen erzeugt, um zusätzlich das dynamische thermische Verhalten des Sandwichpaneels zu untersuchen und eine genauere Analyse der Temperaturverteilung an der Paneeloberfläche durchführen zu können.

Außerdem wurde mittels Thermographiekameraaufnahmen in Kombination mit den Messdaten ein bereits bestehendes, im Zuge des UNAB Projektes [1] erstelltes CFD Modell bewertet, mit dem weitere Varianten des thermisch aktivierten Paneels untersucht und untereinander verglichen werden können.

ABSTRACT

Title: Construction, assembly and commissioning of an experimental test stand for the analysis of the thermal behavior of an integral façade element

Author: Michael Franz Hörtenhuber

- 1st keyword: Integral façade element constructed by TU Graz
- 2nd keyword: Collector characteristic curve
- 3rd keyword: In-situ measurements and thermographic recordings

This thesis is introducing the construction, assembly and start-up of an experimental test stand for measuring the thermal behavior and estimating the energy output of a thermally activated integral façade element. The development of this integral façade element was a cooperation between different institutes of the Technical University of Graz as part of the research project UNAB (Umsetzung nachhaltigen Bauens). [1]

The façade element's structure is similar to a so-called "sandwich panel" but it is additionally equipped with fluid channels at the inner as well as the outer surface. Such a façade element can be used for hot water production due to incoming solar radiation.

In order to determine the influence of some parameter variations on the thermal performance of the integral façade element, an experimental test stand – accommodating two structurally identical boxes each equipped with a integral façade element - was designed. The test stand was especially constructed for performing 'in-situ' measurements, where the façade elements were exposed to real climate conditions. Furthermore, this test stand enabled the simultaneous measurement of two façade elements under influence of the same climate conditions. For this purpose, only one façade element was thermally activated while the other element was acting as an ordinary sandwich panel (as a reference).

After finalizing the assembly and providing the hydraulic connection, several temperature-measuring sensors were installed on the surfaces of the two panels, within the insulation and inside the two boxes. Additionally, inlet and outlet temperatures as well as the mass flux of the fluid (water flowing through the thermally activated panel) were recorded.

After commissioning the test stand, several measurements were performed between 1st of September and 3rd of November 2016. In the course of these measurements, the most important parameters were varied (mass-flow of the fluid inside the pipes of the thermally activated façade

element or fluid inlet temperature e.g.), and the data were collected for analyzing the influence on the thermal performance and the energy output of the façade element.

After a comprehensive analysis on the thermal performance of the integral façade element (in relation to the reference panel), the collector's efficiency was determined on the basis of the collector characteristic curve created with the help of the monitored data to enable a comparison with common solar thermal collectors.

Some measurements were accompanied by thermographic recordings in order to analyze the dynamic thermal effects of the integral façade element and obtain the temperature contours at the façade's exterior surface. The recorded temperature contours as well as the measured temperatures were used for the validation of a three dimensional CFD model of the façade element which was previously designed in the course of the UNAB research project [1].

INHALTSVERZEICHNIS

1	<u>EINLEITUNG</u>	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele	1
2	<u>GRUNDLAGEN</u>	3
2.1	Sonnenstrahlung	3
2.1.1	Globalstrahlung (<i>IGlob</i>)	4
2.1.2	Direktstrahlung (<i>IDir</i>)	4
2.1.3	Diffusstrahlung (<i>IDiff</i>)	5
2.1.4	Strahlungsmessung	5
2.1.5	Abschattung	6
2.2	Wärmeübergangsmechanismen	7
2.2.1	Wärmeleitung	7
2.2.2	Wärmestrahlung	8
2.2.3	Konvektion	9
2.3	Geschichte der solarthermischen Energienutzung	9
2.4	Energiebilanz eines Kollektors	11
2.5	Kollektorkennlinie	13
2.6	Kollektortypen	15
2.6.1	Kunststoffabsorber zur Beckenwassererwärmung (Schwimmbadabsorber)	16
2.6.2	Flachkollektoren	17
2.6.3	Vakuumkollektoren	17
2.7	Entwicklung von modernen Fassaden	18
2.8	Integrales Fassadenelement der TU Graz	19
3	<u>ERRICHTUNG DES MESSAUFBAUS</u>	24
3.1	Konstruktionsfindung, Konstruktionen und Entwürfe	24
3.2	Anforderungsprofil	25
3.2.1	Konstruktion mit zwei Boxen	26
3.2.2	Orientierung	29
3.3	Materialien	30
3.4	Aufbau	31
3.4.1	Rohbau	31
3.5	Hydraulik	35
3.6	Messtechnik	39
3.6.1	Komponenten der Messtechnik	39
3.6.2	Montage der Messtechnik	40
3.6.3	Kalibrierung der Temperatursensoren	44

4	AUSBAUSTUFEN DES INTEGRALEN FASSADENELEMENTES UND VERBESSERUNGEN AM VERSUCHSSTAND	47
4.1	Ausbaustufen	47
4.1.1	Ausbaustufe 1 – Oberfläche Aluminium	47
4.1.2	Ausbaustufe 2 – Solarlack	47
4.1.3	Ausbaustufe 3 – Glasabdeckung	48
4.1.4	Ausbaustufe 4 – Glasabdeckung mit aufgeklebten Photovoltaikzellen	49
4.2	Verbesserungen und Modifikationen	50
4.2.1	Zu warmes Wasser in der Zuleitung	50
4.2.2	Strangreguliertventile	52
4.2.3	Einstellbare Vorlauftemperatur	53
5	ERGEBNISSE DER MESSUNGEN AM VERSUCHSSTAND	55
5.1	Szenarien	55
5.1.1	Variation von α	56
5.1.2	Variation der Durchflüsse	56
5.1.3	Variation der Vorlauftemperatur	56
5.2	Vergleichsmessung (ohne Durchfluss)	57
5.3	Messungen	59
5.3.1	Auswertungen von Messtagen	60
5.3.2	Auswirkung der Sonnenstandshöhe	62
5.3.3	Auswirkung des Solarlacks	64
5.3.4	Vergleich der Temperaturen im Boxeninnenraum	66
5.3.5	Beispiel: Wärmegenerierung des thermisch aktivierten Fassadenelements	67
5.4	Kollektorkennlinie	69
5.4.1	Kennlinie am blanken Aluminiumblech	70
5.4.2	Kennlinie des Paneels mit Solarlack	71
5.5	Thermographische Aufzeichnungen (23.09.2016)	71
6	VERGLEICH ZWISCHEN MESSUNG UND SIMULATION	75
6.1	Aufbau und Kurzbeschreibung des CFD Modells	75
6.2	Vergleich mit CFD Simulation mit Windabschätzung direkt an der Fassade	76
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN, ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	80
7.1	Schlussfolgerungen	80
7.2	Zusammenfassung und Ausblick	82
	LITERATURVERZEICHNIS	84
	TABELLENVERZEICHNIS	86

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	87
ANHANG	89
ANHANG 1: WINDKRAFTBERECHNUNG	90
ANHANG 2: KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN	91
ANHANG 3: DATENBLATT SOLARLACK	93
ANHANG 4: DATENBLATT DURCHFLUSS TRANSMITTER	95
ANHANG 5: DATENBLATT PT100	99
ANHANG 6: DATENBLATT THERMOELEMENTE (OBERFLÄCHENMESSUNG)	102

Nomenklatur und Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
I_0	Extraterrestrische Strahlung	$\frac{W}{m^2}$
I_{Glob}	Globalstrahlung	$\frac{W}{m^2}$
I_{gN}	Globalstrahlung normal zur Kollektorfläche	$\frac{W}{m^2}$
\dot{G}_{Dr}	Direktstrahlung	$\frac{W}{m^2}$
ψ	Einfallswinkel	°
α	Neigungswinkel	°
β	Azimut (Abweichung von der Südausrichtung)	°
φ	Breitengrad	°
δ	Sonnendeklination	°
ω_{St}	Stundenwinkel der Sonne	°
\dot{q}	Wärmestrom	$\frac{W}{m^2}$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$
T	Temperatur	K
x	Stoffdicke	m
\dot{e}_S	Energiestromdichte	$\frac{W}{m^2}$
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
\dot{Q}_{Koll}	Nutzenergie des Kollektors	W
$\dot{Q}_{re,Abs}$	Verluste durch Reflektion am Absorber	W
\dot{Q}_{abst}	Verluste durch Abstrahlung	W
\dot{Q}_{konv}	Konvektive Verluste des Kollektors	W

\dot{Q}_{leit}	Leistungsverluste des Kollektors	W
T'_a	Himmelstemperatur über dem Kollektor	K
α_{Abs}	Absorptionskoeffizient des Absorbers	-
τ_{Abd}	Transmissionskoeffizient der Kollektorabdeckung	-
ε_{Abs}	Emissionskoeffizient des Absorbers	-
U_{Koll}^*	Mittlerer Wärmeverlustkoeffizient für konvektive und Leistungsverluste bei Windstille oder eine angegebene Windgeschwindigkeit	$\frac{W}{m^2 * K}$
$T_{Abs,fl}$	Mittlere Fluidtemperatur	K
$T_{Abs,ein}$	Temperatur am Kollektoreingang	K
$T_{Abs,aus}$	Temperatur am Kollektorausgang	K
c_0	Konversionsfaktor des Kollektors	-
c_1	Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors	$\frac{W}{m^2 * K}$
c_2	Stellt eine Annäherung der realen Strahlungsverluste und die Veränderlichkeit des Wärmeverlustkoeffizienten bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen dar	$\frac{W}{m^2 * K^2}$
η	Wirkungsgrad des Kollektors	-
T_{Abs}	Mittlere Absorbenttemperatur	K
T_a	Außentemperatur	K
T_{RL}	Rücklauftemperatur	K
T_{VL}	Vorlauftemperatur	K
\dot{Q}_P	Paneelleistung	W
c_W	Spezifische Wärmekapazität von Wasser	$\frac{J}{kg * K}$
A_{Koll}	Fläche des Panels bzw. des Kollektors	m^2
α	Absorptionsgrad	-
τ	Reflexionsgrad	-

ε	Emissionsgrad	-
\dot{q}_P	Spezifische Paneelleistung	$\frac{W}{m^2}$
\dot{m}_A	Massenstrom Paneel Außen	$\frac{kg}{s}$
T_{RL}	Rücklauftemperatur	K
T_{VL}	Vorlauftemperatur	K
Q_P	Paneelertrag	Wh
Q_{WW}	Energiemenge zur Warmwasseraufheizung	J
m	Masse des aufzuheizenden Wassers	kg
ΔT	Temperaturdifferenz der Aufheizung	K
A_P	Paneeloberfläche	m^2
H	Paneelhöhe	M
B	Paneelbreite	M
A_{WW}	Notwendige Fläche zur Warmwassererzeugung	m^2
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$v_{Wind\ Fassade}$	Windgeschwindigkeit an der Fassade	$\frac{m}{s}$

Abkürzung	Bedeutung
UNAB	Umsetzung Nachhaltigen Bauens
CFD	Computational Fluid Dynamics
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
EPDM	Ethylen- Propylen- Dien- Monomer
OSB	Oriented structural board
EPS	Expandiertes Polystyrol
MPC	Model Predictive Control
TC	Thermocouple (Thermoelemente)
PT100	Widerstandsthermometer (R=100 Ω)
VSG	Verbund-Sicherheitsglas
ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas

1 EINLEITUNG

1.1 Motivation

In Zeiten zunehmenden Energiehunger, welcher massive Auswirkungen auf den Klimawandel hat, sollte die Suche nach alternativen Energiegewinnungskonzepten als einer der wichtigsten Punkte an der Tagesordnung der technischen Forschung stehen. Ein Schritt in diese Richtung kann dabei eine funktionale Fassade sein, welche die Energie der einfallenden Sonne nutzt und somit die damit ausgestatteten Gebäude ein Stück weit unabhängiger von anderen, nicht erneuerbaren Energiequellen werden lässt. Unter diesem Aspekt wurde im Rahmen des Projektes UNAB (Umsetzung nachhaltigen Bauens) [1] an der TU Graz ein Fassadenpaneel entwickelt, welches zum einen die Funktion der thermische Gebäudehülle übernimmt und zum anderen zwei integrierte, voneinander unabhängige Oberflächenwärmetauscher beinhaltet. Der Aufbau eines solchen Fassadenpaneels entspricht im Groben jenem eines sogenannten Sandwichpaneels, jedoch wurden die Bleche mittels Roll-bonding Verfahrens von vornherein mit Kanälen versehen. Diese Kanäle können von einem Fluid durchströmt werden, welches unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung auf der Außenseite erwärmt wird und somit diese Sonnenstrahlung in Wärme umwandelt. Gleichzeitig kann an der Innenseite der Fassade der dahinterliegende Raum mittels durchströmendem Fluid konditioniert werden (Flächenheizung). Diese Konditionierung kann sowohl im Sommer mit einem kühlen Fluid zur Temperatursenkung, als auch im Winter mit einem warmen Fluid zur Heizungsunterstützung erfolgen.

1.2 Ziele

Das erste Ziel dieser Arbeit war, für diese modifizierte (multifunktionale) integrale Tragwerkskonstruktion einen Versuchsstand zu konzipieren, zu konstruieren, zu bauen und in Betrieb zu nehmen. Die daran durchgeführten Messungen haben den Zweck, die tatsächliche, reale und praxisnahe Energiegenerierung des Paneels in einem Feldversuch nachzuweisen und zu quantifizieren. Der Messaufbau wurde dabei extra für einen zuvor entwickelten und produzierten Prototypen eines thermisch aktivierten Fassadenelements konzipiert. Die Bleche mit den Fluidkanälen wurden vom Aluminiumwerk *TALUM d.d. Kidričevo* vorgefertigt und anschließend in der Fertigungsstraße der *BruchaPannele GesmbH* unter Zugabe des Dämmmaterials zu einem Paneel vereinigt. Um zusätzlich auch die Auswirkung der Kühlung bzw. Heizung durch die Anspeisung der innen liegenden Fluidkanäle zu untersuchen, wurde das Fassadenelement in eine wärme gedämmte Box eingesetzt. Für einen simultanen Vergleich mit

einem nicht aktivierten Paneel wurden zwei Boxen gebaut. In jede dieser Boxen wurde ein Fassadenelement eingebaut, wobei nur eine Box aktiviert und somit hydraulisch angeschlossen wurde. Für die beiden Boxen wurde ein Unterstand gebaut, welcher die Boxen und die darin enthaltene Mess- und Steuerungstechnik gegen die äußeren Witterungsverhältnisse schützt.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, die Temperaturen am Fassadenelement und die Aufheizung des durch die Fluidkanäle durchströmenden Wassers messtechnisch zu erfassen, um mit dieser Temperaturdifferenz und dem vorherrschenden Massenstrom die thermische Performance zu ermitteln.

Außerdem sollte der reale, gemessene Energieeintrag, welcher im Fassadenpaneel durch die Sonneneinstrahlung generiert wird, aufgezeichnet werden.

Vom Betreuer dieser Masterarbeit, Herrn Dipl.-Ing. Daniel Brandl, wurden während der Entstehung dieser Arbeit Simulationen für ein identes Paneel, wie es im Versuchsstand eingebaut wurde, erstellt und verschiedene Randbedingungen simuliert. Anschließend wurden die Erträge und Temperaturen der Simulation mit jenen der Messung verglichen, um eine qualitative Abschätzung über eine gute Verwendbarkeit der Simulation treffen zu können. Die Beurteilung der Aussagekraft der Simulation ist somit ebenfalls Ziel dieser Arbeit.

Ein aussagekräftiges Ergebnis soll zu guter Letzt die Kollektorkennlinie, die mithilfe der gemessenen und aufgezeichneten Werte ermittelt wird, liefern. Anhand dieser Kennlinie kann dank einer geeigneten Software eine Beurteilung über eine optimale Anlagengröße und -ausrichtung getroffen werden.

2 GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Mechanismen und Gegebenheiten der Sonnenstrahlung behandelt, welche für die Funktionalität der Fassade Voraussetzung sein müssen. Anfangs wird die Sonnenstrahlung selbst erklärt. Dieses Kapitel beinhaltet aber auch den Aufbau von solaren Kollektoren, welche in Bezug auf die Wärmegenerierung Ähnlichkeiten mit dem Paneel haben.

2.1 Sonnenstrahlung

Die Sonnenstrahlung weist ein gewisses Spektrum auf, welches verschiedene Wellenlängen beinhaltet. Aber nicht nur die Wellenlängen sind spektral verteilt, auch die Intensität und der Energiegehalt variieren über den Verlauf der Wellenlänge. Wie dieser Verlauf aussieht ist in der Abbildung 2-1 dargestellt. Bei der Integration der Fläche unter der Kurve kommt als Ergebnis die Extraterrestrische Strahlung I_0 zustande. [2]

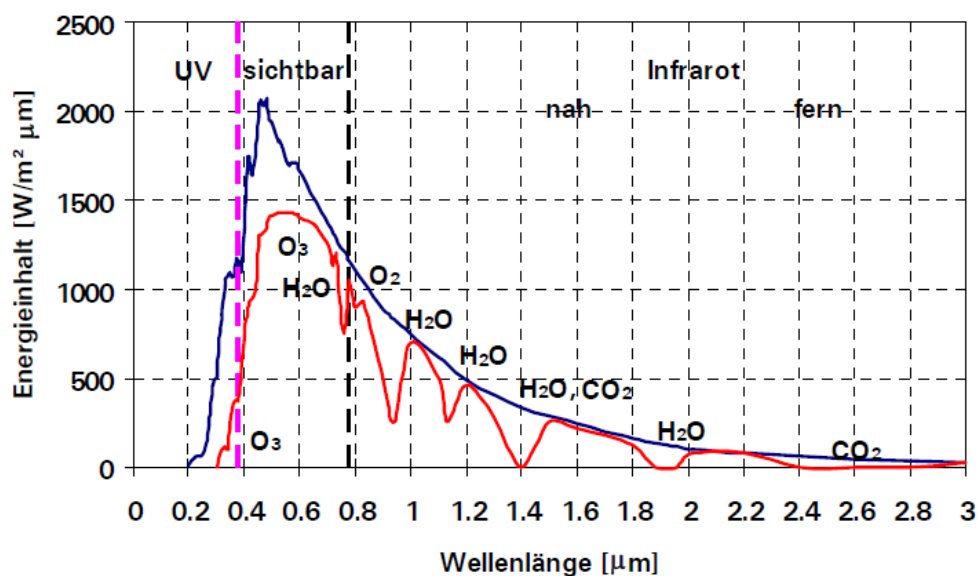


Abbildung 2-1: Spektrum der Sonnenstrahlung [2]

Die Sonnenstrahlung trifft auf die Erdhülle, welche die Atmosphäre und die Erdkruste bis 16 km Tiefe beinhaltet, mit einer Intensität von rund $1353 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Der tatsächliche Betrag der Sonnenstrahlung variiert im Laufe des Jahres - abhängig von Sommer und Winter und somit abhängig von der Umlaufbahn der Erde um die Sonne - hat das rechnerische Mittel jedoch bei genau diesen $1353 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Dieser Wert wurde von der NASA im Jahre 1971 ermittelt. Bis die

Sonnenstrahlung dann schlussendlich auf der Erdoberfläche ankommt, wird diese noch durch mehrere Faktoren abgeschwächt. Dabei kommt es an Molekülen in der Luft zur Absorption, Streuung und Reflexion an Gasen, Wasserdampf und Staub. Aus diesem Grund geht ein Teil der ankommenden Strahlung wieder in den Weltraum zurück, ein anderer Teil findet sich als diffuse Strahlung auf der Erdoberfläche wieder. [2]

Praktisch die gesamte Energie der Sonnenstrahlung liegt im Wellenlängenbereich zwischen 0,3 und 3 μm . Der von uns sichtbare Wellenlängenbereich wird an der Seite der kürzeren Wellenlängen von der sehr energiereichen ultravioletten Strahlung und am anderen Ende von der langwelligen und energieärmeren Infrarotstrahlung begrenzt. [3]

2.1.1 Globalstrahlung (I_{Glob})

In unserem Breitengrad kommt letzten Endes eine Globalstrahlung zwischen 0 und 1000 $\frac{W}{m^2}$ auf der horizontalen Fläche an. Dieser Wert hängt von der Sonnenstandshöhe ab und ist somit im Winter bei tiefstehender Sonne im Vergleich zum Sommer, wo die Sonne sehr hoch steht, bedeutend kleiner. Die Globalstrahlung setzt sich aus der Diffusstrahlung, welche auch durch Reflexion von verschiedenen umliegenden Flächen entstehen kann, und der Direktstrahlung der Sonne auf die horizontale Fläche zusammen. In Mitteleuropa beträgt der Anteil der Diffusstrahlung in etwa 60%. [4]

2.1.2 Direktstrahlung (I_{Dir})

Unter Direktstrahlung wird die direkt von der Sonne auf eine Fläche auftretende Strahlung verstanden. Grundvoraussetzung einer vorhandenen Direktstrahlung ist die klare Sicht zur Sonne, also keine Bewölkung innerhalb der Atmosphäre zwischen Erdoberfläche und Sonne. Jene direkte Sonnenstrahlung, welche auf eine geneigte Fläche auftrifft, wird durch den Einfallswinkel ψ bestimmt (Abbildung 2-2). Dieser Winkel hängt wiederum von der Ausrichtung und Neigung der Kollektorfläche (Empfangsfläche) ab (Abbildung 2-2). [5]

$$\begin{aligned} \cos \psi = & (\cos \alpha * \sin \varphi - \cos \beta * \sin \alpha) \\ & * \sin \delta + (\sin \varphi * \cos \beta * \sin \alpha + \cos \alpha * \cos \varphi) * \cos \delta \\ & * \cos \omega_{St} + \sin \beta * \sin \alpha * \cos \delta * \sin \omega_{St} \end{aligned} \quad (2-1)$$

I_{Dir} ... Direktstrahlung entspricht \dot{G}_{Dr} in Abbildung 2-2 $[\frac{W}{m^2}]$

ψ ... Einfallswinkel $[\circ]$

α ... Neigungswinkel $[\circ]$

β ... Azimut (Abweichung von der Südausrichtung) $[\circ]$

φ Breitengrad [°]

δ Sonnendeklination [°]

ω_{St} ... Stundenwinkel der Sonne (dieser liegt beim Sonnenhöchststand bei 0° und ist vormittags positiv beziehungsweise nachmittags negativ)

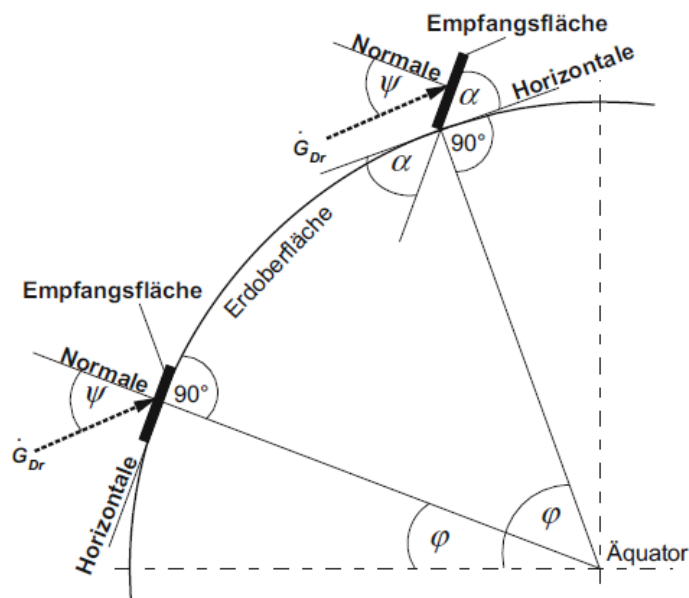


Abbildung 2-2: Geometrische Zusammenhänge der Sonneneinstrahlung auf geneigte Flächen [5]

2.1.3 Diffusstrahlung (I_{Diff})

Diese Strahlung kommt theoretisch aus allen Richtungen, praktisch jedoch verstärkt aus der Richtung der Sonne. Die Art der Bewölkung hat erheblichen Einfluss auf die Strahlungsverteilung, wodurch diese bei wechselhaften Bedingungen ebenfalls stark variiert. Die diffuse Strahlung setzt sich aus der durch die Bewölkung resultierende Streuung und der aus der Umgebung reflektierten Strahlung zusammen.

Bei unseren Berechnungen ergibt sich die Diffusstrahlung aus der Subtraktion der Direktstrahlung von der Globalstrahlung. Bei der Strahlungsberechnung auf das Paneel werden vorerst nur die Direktstrahlung und deren Einfallswinkel auf das Paneel ermittelt. Anschließend ist es wichtig, die Diffusstrahlung zu kennen, da diese in der Gesamtstrahlung, welche an der Fassade ankommt, enthalten ist. Es ist also notwendig, dass diese Diffusstrahlung am Ende zu der auftretenden Direktstrahlung addiert wird.

2.1.4 Strahlungsmessung

Bei der Strahlungsmessung kommen im Wesentlichen zwei Geräte zum Einsatz. Das Messprinzip der beiden Messinstrumente ist sehr ähnlich. Die Sonnenstrahlung trifft auf eine schwarze Fläche

und wird dadurch in Wärme umgewandelt. Diese Fläche steht nun in Interaktion mit der Umgebung, an die sie Wärme mittels Wärmeleitung und Wärmestrahlung abgibt. Bei konstanter Einstrahlung wird sich dennoch ein Gleichgewicht einstellen und die Temperaturerhöhung der schwarzen Fläche stellt ein Maß für die Strahlungsintensität dar.

Zur Messung der Direktstrahlung wird ein Pyrheliometer verwendet. In diesem Messgerät befinden sich zwei gleichfarbige, dunkle Streifen aus Manganin, wobei einer durch die Sonne beschienen wird. Der andere ist dieser Strahlung nicht ausgesetzt, wird aber mittels elektrischem Strom auf die gleiche Temperatur gebracht wie die der Sonne ausgesetzte Fläche. Dabei ist die dadurch verursachte Wärmeentwicklung proportional dem Quadrat der angelegten Stromstärke. Somit ist diese Stromstärke äquivalent zur absorbierten Strahlungsenergie. Diese Messgeräte werden normal zur einfallenden Sonnenstrahlung positioniert. Um die Messung der Direktstrahlung gewährleisten zu können, befindet sich dieses Pyrheliometer in einem Rohr, welches den Einfluss der Diffusstrahlung beseitigt.

Zur Messung der Globalstrahlung wird ein Pyranometer herangezogen. In diesem Messgerät befindet sich eine Thermosäule (in Serie geschaltete Thermoelemente), deren Gegenlötstellen mit dem Gehäuse gekoppelt sind. Infolge der Einstrahlung kommt es nun zu einer Erwärmung der Thermosäule und so zu einem Temperaturunterschied. Dieser Temperaturunterschied hat nun eine Thermospannung zur Folge (Seebeckeffekt), wodurch auf die vorherrschende Strahlung geschlossen werden kann. Als Schutz vor Witterung sind diese Thermosäulen mit einer Kuppel aus verschiedenen Materialien abgedeckt. Dabei kann durch die Wahl des Materials beeinflusst werden, welche Wellenlänge zur Messstelle durchgelassen wird. Soll mit diesem Gerät die Diffusstrahlung gemessen werden, muss der direkte Strahlungsanteil mittels eines Schattenringes ausgeblendet werden. Die Ausrichtung dieser Geräte erfolgt in den meisten Fällen horizontal. Ist die Messung einer Strahlungsbilanz erwünscht, dann werden zwei Pyranometer benötigt, wobei eines den oberen Halbraum und das andere den unteren Halbraum abdeckt. [5]

2.1.5 Abschattung

Ein wichtiger Punkt bei der Betrachtung der Sonnenenergienutzung ist jener der Abschattung durch sich in der Nähe befindliche Gebäude, Berge, Bäume oder andere Gegebenheiten, welche einen Schatten auf die vorgesehene Fläche werfen. Um diese Abschattung schon im Vorfeld für das gesamte Jahr zu erfahren, gibt es für die verschiedenen Breitengrade je ein Diagramm, welches für unsere Breite von 47° in Abbildung 2-3 zu sehen ist. Die in diesem Diagramm eingezeichneten farblichen Linien stellen den Sonnenverlauf am jeweils 21. Tag des Monats dar. Auf der vertikalen Achse ist die Sonnenhöhe mit ihrem Winkel aufgetragen und auf der horizontalen Achse ist der Azimuth, also die Winkelabweichung zur Südausrichtung, abgebildet.

In diesem Diagramm kann nun der Horizont mit einem geeigneten Messgerät abgefahren und die Umrisse im Diagramm aufgetragen werden. Dort, wo sich die Monatslinien unterhalb der aufgetragenen Horizontlinie befinden, liegt der Messpunkt zu der dazugehörigen Uhrzeit im Schatten. Somit ist dieses Diagramm ein gutes Werkzeug zur Ermittlung des besten Standortes für die Aufstellung von sonnenenergienutzenden Anlagen. [2]

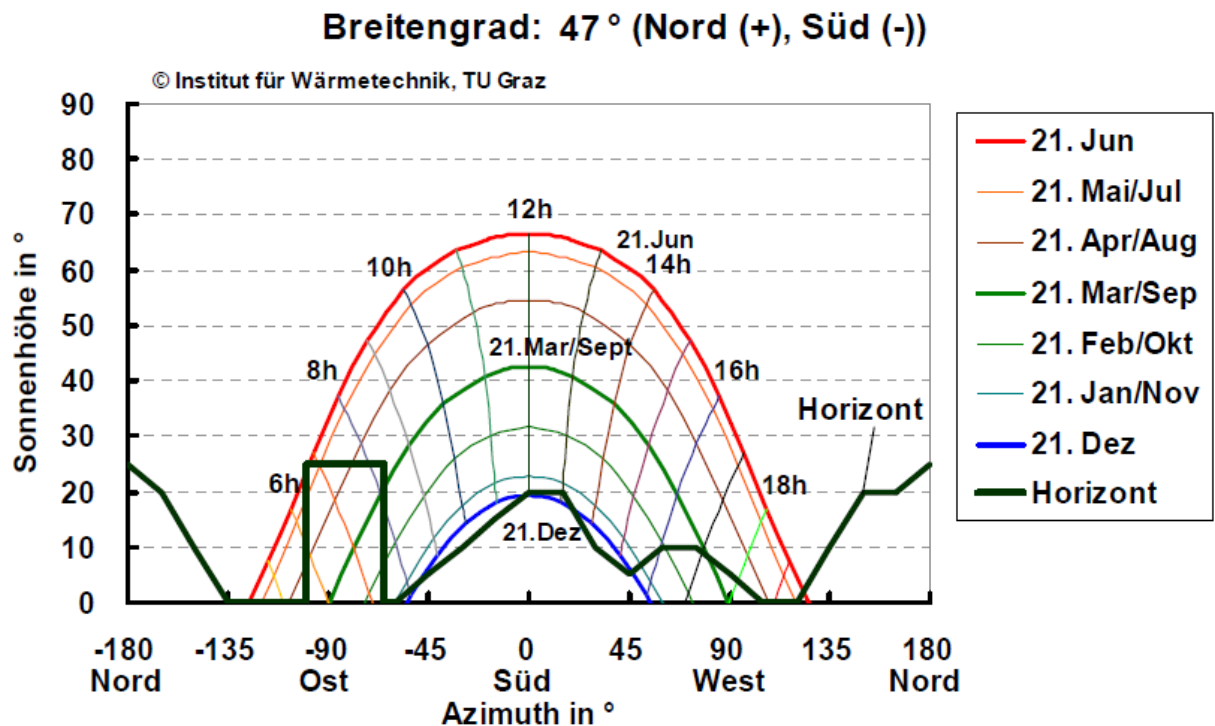


Abbildung 2-3: Sonnenweg-Diagramm für Standorte mit 47° nördlicher Breite [2]

2.2 Wärmeübergangsmechanismen

Grundsätzlich kann Wärme mittels drei Mechanismen übertragen werden. Meistens werden bei der Übertragung von Wärme alle drei Arten der Wärmeübertragung, nämlich Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion, genutzt.

2.2.1 Wärmeleitung

Zur Wärmeleitung in Flüssigkeiten, Gasen oder Festkörpern kommt es aufgrund von mehr oder weniger schwankenden Molekülen um ihre Ruhelage. Dabei nimmt der Ausschlag der Schwankungen und somit die kinetische Energie mit steigender Temperatur zu. Aufgrund molekularer Wechselwirkungen wird bei der Wärmeleitung Energie vom wärmeren und somit

kinetisch energiereicheren Bereich zu einem energieärmeren Bereich geleitet. Wie gut die Wärmeleitung eines Körpers ist, hängt von einem Stoffwert, nämlich der Wärmeleitfähigkeit λ , ab. Um einen Wärmestrom mittels der Beziehung des Temperaturgradienten und der Wärmeleitfähigkeit zu berechnen, kann das Fouriersche Gesetz (1822) herangezogen werden, welches folgendermaßen dargestellt werden kann:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-2)$$

\dot{q} Wärmestrom $[\frac{W}{m^2}]$
 λ Wärmeleitfähigkeit $[\frac{W}{m \cdot K}]$
 T Temperatur [K]
 x Stoffdicke [m]

Das negative Vorzeichen in dieser Formel resultiert aus der Tatsache, dass der Wärmestrom immer entgegen des Temperaturgradienten, nämlich vom wärmeren zum kälteren Körper fließt. [6]

2.2.2 Wärmestrahlung

Jeder Körper, welcher eine Temperatur von über 0 K aufweist, strahlt Wärme ab. Diese emittierte elektromagnetische Strahlung ist nicht von einem Medium abhängig, somit funktioniert dieser Mechanismus auch im Vakuum. Umso wärmer ein Körper ist, umso mehr Wärmestrahlung wird emittiert. Die maximale Energiestromdichte ergibt sich aus folgendem Zusammenhang: [6]

$$\dot{e}_S = \sigma * T^4 \quad (2-3)$$

\dot{e}_S Energiestromdichte $[\frac{W}{m^2}]$
 σ Stefan – Boltzmann – Konstante $[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}]$
 T Temperatur [K]

Jener Körper, welcher diese maximale Strahlung emittiert, wird als schwarzer Körper bezeichnet. Aus der Formel (2-3) ist ersichtlich, dass die Energiestromdichte abhängig von der Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 * 10^{-8} [\frac{W}{m^2 \cdot K^4}]$) und proportional der vierten Potenz der Temperatur ist. [6]

2.2.3 Konvektion

Bei dieser Form der Wärmeübertragung spielt die Strömung des bewegten Mediums eine wesentliche Rolle. Dabei kommt es zum Wärmetransport durch Übertragung von Wärme an das vorbei strömende Medium und somit zu einem Abtransport der Wärme. Somit hängt die Intensität der Übertragung von der Strömung des Mediums und der Wärmeleitfähigkeit des Körpers und des Mediums ab.

Wesentlich bei der Betrachtung der Konvektion ist das Verhalten der Strömung im wandnahen Bereich. Ein wichtiges Instrument bei der Beschreibung des Wärmeübergangs an der Wand ist die Prandtl'sche Grenzschichttheorie. [6]

2.3 Geschichte der solarthermischen Energienutzung

Die Anfänge der Solarnutzung gehen schon sehr weit zurück. Bereits um etwa 1500 v. Chr. wurden in Ägypten Techniken zur Spiegelherstellung entwickelt. Mit Hilfe dieser Spiegel war es möglich, das Sonnenlicht umzulenken und zu konzentrieren. Durch die Konzentration der Sonnenstrahlung konnten höhere Temperaturen erreicht und somit mit dieser Technik bereits Feuer entzündet werden. Aus einer historischen Legende geht hervor, dass Archimedes circa 200 v. Chr. ebenfalls mittels Brennspiegeln eine ganze Flotte römischer Schiffe bei der Belagerung von Syrakus in Brand gesetzt und somit besiegt haben soll.

Im Jahre 1645 wurde die Konstruktion einer solarbetriebenen Wasserpumpe öffentlich zugänglich gemacht. Wahrscheinlich stammt die Idee dazu aus einer Schrift von Herons von Alexandrien, die 1575 wiederveröffentlicht wurde. Das Interessante an dieser Schrift ist, dass seine Entstehung auf etwa 200 v. Chr. zurückzuführen ist.

Abbildung 2-4 stellt die Skizze des französischen Architekten und Ingenieurs Salomon de Caus dar, in der eine Apparatur zum Betreiben eines Springbrunnens zu sehen ist. Angetrieben werden sollte dieser durch die Volumenausdehnung infolge der Wassererwärmung. Die Aufheizung funktioniert bei diesem Entwurf durch die Sonneneinstrahlung, die dann über Brennlinsen auf zwei Kupferkessel trifft. [7]

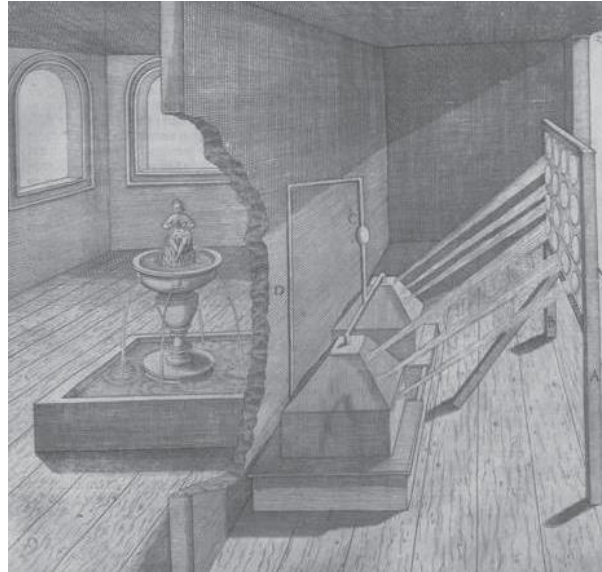


Abbildung 2-4: Zeichnung des französischen Architekten und Ingenieurs Salomon de Caus aus dem Jahr 1615 [7]

Im Jahre 1878 wurde in Paris bei der Weltausstellung die erste solar betriebene Dampfmaschine des Franzosen Augustin Mouchot präsentiert. Diese Maschine erbrachte eine Leistung von 50 kW und sollte die Energie zum Aufbau der französischen Kolonie in Algerien liefern. [7]

Auch in den USA wurde die Entwicklung von solarthermischen Kraftwerken vorangetrieben. Der aus Philadelphia stammende Frank Shuman konstruierte ein Demonstrationskraftwerk mit einer Leistung von rund 88 kW aus Parabolrinnenspiegel und einem Verdampferrohr, welches 1912 bei Kairo am Nil erbaut wurde. Dieses und ähnliche Projekte scheiterten jedoch meist an den eingesetzten Materialien. Die Rohre aus Zink waren zu wenig temperaturbeständig und die vorherrschenden Sandstürme in dieser Gegend ließen die Spiegel rasch altern.

Neben der Entwicklung von solaren Kraftwerken wurden in den wärmeren Gegenden der USA ab 1980 bis circa 1940 thermische Trinkwassererwärmungsanlagen gebaut. Nur in Florida wurden in den sechs Jahren vor 1941 rund 25.000 solcher Warmwasseranlagen installiert. Diese Art der Wasseraufbereitung galt zu dieser Zeit als etabliert und als eine günstige und komfortable Heiztechnik. Durch die Beteiligung der USA am zweiten Weltkrieg wurden jedoch zu dieser Zeit einige Rohstoffe, vor allem Kupfer, knapp und gleichzeitig gab es ein Überangebot an billigem Erdgas. Diese Faktoren setzten dem Aufschwung der Solarthermie zu dieser Zeit ein vorläufiges Ende. [7]

Auch am deutschen Markt war von einem Aufschwung der Solarthermie über Jahrzehnte nichts zu spüren. Schon vor Beginn der Ölpreiskrise, welche im Jahre 1973 ihren Anfang hatte, verabschiedete die deutsche Bundesregierung ein Ausbauprogramm zur Verringerung der Ölabhängigkeit. Eine zeitgleich stattfindende Krise der deutschen Raumfahrtindustrie brachte große deutsche Unternehmen dazu, in die Solarforschung zu investieren. Jedoch bremsten auch hier Materialprobleme einen Aufschwung des Solarkollektormarktes innerhalb weniger Jahre. Nun sprang die Heiztechnikindustrie auf eine neue Art der Brauchwassererwärmung auf, nämlich

die Weiterentwicklung der Wärmepumpe. Die sukzessive Forschung in der Solarthermie lag nun in den Händen weniger Kleinstunternehmen, welche die Kollektortechnik vorantrieben. Später folgende negative Erfahrungen, vor allem im Bereich der Kernkraftwerke (Tschernobyl 1986, Fukushima 2011), und die Erkenntnisse zum Klimawandel geben jenen Personen recht, welche die Technik der Solarthermie immer weiter vorangetrieben haben und vorantreiben, sodass sie mittlerweile einen wichtigen und etablierten Teil am heimischen Energiemarkt darstellt.

2.4 Energiebilanz eines Kollektors

Abbildung 2-5 zeigt den schematischen Aufbau eines thermischen Solarkollektors und die Energieströme über die Systemgrenze des Kollektors. Aus welchen Parametern sich die einzelnen Terme der Ein- und Abstrahlung zusammensetzen, ist in den Formeln (2-4) und (2-5) dargestellt.

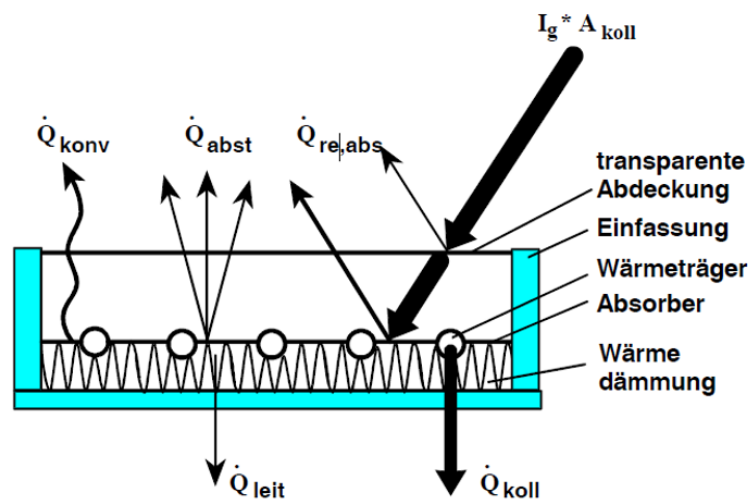


Abbildung 2-5: Energieflüsse eines Kollektors [2]

$$\dot{Q}_{Koll} = I_{gN} * A_{Koll} - \dot{Q}_{re,Abs} - \dot{Q}_{abst} - \dot{Q}_{konv} - \dot{Q}_{leit} \quad (2-4)$$

Dabei setzen sich die einzelnen Verluste wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{re,Abs} &= I_{gN} * A_{Koll} * (1 - \tau_{Abd} * \alpha_{Abs}) \\ \dot{Q}_{abst} &= \epsilon_{Abs} * A_{Koll} * \sigma * (T_{Abs}^4 - T_a'^4) \\ \dot{Q}_{konv} + \dot{Q}_{leit} &= A_{Koll} * U_{Koll} * (T_{Abs} - T_a) \end{aligned} \quad (2-5)$$

I_{gN} Sonneneinstrahlung normal zur Kollektorebene $\left[\frac{W}{m^2} \right]$

\dot{Q}_{Koll} Nutzenergie des Kollektors [W]

$\dot{Q}_{re,Abs}$ Verluste durch Reflektion am Absorber [W]

- \dot{Q}_{abst} *Verluste durch Abstrahlung* [W]
 \dot{Q}_{konv} *konvektive Verluste des Kollektors* [W]
 \dot{Q}_{leit} *Leistungsverluste des Kollektors* [W]
 A_{Koll} *Kollektorfläche* [m²]
 T'_a *Himmelstemperatur über dem Kollektor* [K]
 α_{Abs} *Absorptionskoeffizient des Absorbers* [–]
 τ_{Abd} *Transmissionskoeffizient der Kollektorabdeckung* [–]
 ε_{Abs} *Emissionskoeffizient des Absorbers* [–]
 σ *Stefan – Boltzmann – Konstante mit $5,67 * 10^{-8} [\frac{W}{m^2 * K^4}]$*
 U_{Koll}^* *mittlerer Wärmeverlustkoeffizient für konvektirve und
 Leitungsverluste bei Windstille oder für eine angegebene
 Windgeschwindigkeit $[\frac{W}{m^2 * K}]$*

Da die mittlere Kollektortemperatur T_{Abs} meist nur sehr schwer messbar ist, wird anstelle dieser Temperatur zur Berechnung die mittlere Temperatur des Fluids ($T_{Abs,fl}$) herangezogen (2-6) [2]. Der Unterschied zwischen den beiden Methoden zur Ermittlung der mittleren Temperatur an der Außenfläche ist vernachlässigbar klein.

$$T_{Abs,fl} = \frac{T_{Abs,ein} + T_{Abs,aus}}{2} \quad (2-6)$$

- $T_{Abs,fl}$ *mittlere Fluidtemperatur* [K]
 $T_{Abs,ein}$... *Temperatur am Kollektoreingang* [K]
 $T_{Abs,aus}$... *Temperatur am Kollektorausgang* [K]

Allgemein ist der Wirkungsgrad mit dem Verhältnis von Nutzen zu Aufwand definiert. In unserem Fall stellt die generierte Wärmemenge (\dot{Q}_{Koll}) den Nutzen dar. Den „Aufwand“ bei der Wirkungsgradberechnung von Solarkollektoren stellt die normal zur Kollektorebene einfallende Sonnenstrahlung, multipliziert mit der Kollektorfläche $I_{gN} * A_{Koll}$ dar. [2]

$$\begin{aligned} \eta_{Koll} &= \frac{\dot{Q}_{Koll}}{I_{gN} * A_{Koll}} = \\ &= \tau_{Abd} * \alpha_{Abs} - \frac{U_{Koll}^*}{I_{gN}} * (T_{Abs,fl} - T_a) - \frac{\varepsilon_{Abs} * \sigma}{I_{gN}} * (T_{Abs,fl}^4 - T_a^4) \end{aligned} \quad (2-7)$$

In der Formel (2-7) sind die auftretenden Verluste in die Wirkungsgradberechnung integriert. Im nächsten Schritt werden die Transmissions-, Absorptions- und Emissionsglieder sowie der

U-Wert zu konstanten Faktoren zusammengefasst. Mit der Anwendung dieser Vereinfachung ergibt sich aus der Formel (2-7) die nun folgende Formel (2-8). [2]

$$\eta_{Koll} = c_0 - c_1 * \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)}{I_{gN}} - c_2 * \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)^2}{I_{gN}} \quad (2-8)$$

c_0 Konversionsfaktor des Kollektors (ist der maximal mögliche Wirkungsgrad bei gleicher Temperatur von Kollektor und Umgebung ($\tau_{Abd} * \alpha_{Abs}$)) [-]

c_1 Wärmeverlustkoeffizient des Kollektors (bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung); (U_{Koll}^*) [$\frac{W}{m^2 * K}$]

c_2 stellt eine Annäherung der realen Strahlungsverluste und die Veränderlichkeit des Wärmeverlustkoeffizienten bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen dar [$\frac{W}{m^2 * K^2}$]

2.5 Kollektorkennlinie

Abbildung 2-6 zeigt entwickelte Kennlinien von verschiedenen Kollektortypen. In diesem Diagramm stellt die horizontale Achse das Verhältnis von der mittleren Absorbtemperatur abzüglich der Umgebungstemperatur zur ankommenden Sonnenstrahlung dar. Die vertikale Achse entspricht dem Wirkungsgrad des Kollektors, also dem Verhältnis von der durch den Kollektor generierten Wärmemenge (2-12) zur eingestrahnten, maximalen Wärmemenge, die von der Sonne kommt (2-11). [2]

Diese Sonneneinstrahlung (I_{gN}) berechnet sich aus den Formeln (2-9) und (2-10). Die Direktstrahlung (I_{Dir}) ist ein gemessener Wert. Wird diese durch den Tangens der Sonnenstandshöhe (Altitude) geteilt, so ergibt das Ergebnis die direkte Sonnenstrahlung in Richtung der Horizontalen. Mit der Multiplikation dieser Sonnenstrahlung durch den Kosinus des Azimuths (Abweichung der Sonnenstrahlung von der Südausrichtung) und anschließender Addition der Diffusstrahlung (I_{Diff}) kann auf die gesamte Sonneneinstrahlung normal auf eine senkrechte Oberfläche geschlossen werden.

$$I_{Hor} = \frac{I_{Dir}}{\tan(90^\circ - \psi)} \quad (2-9)$$

$$I_{gN} = I_{Hor} * \cos(\beta) + I_{Diff} \quad (2-10)$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_P}{I_{gN} \cdot A_{Koll}} \quad (2-11)$$

$$\dot{Q}_P = c_W * \dot{m}_A * (T_{RL} - T_{VL}) \quad (2-12)$$

I_{Hor} horizontaler Anteil der direkten Sonneneinstrahlung $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

I_{Dir} direkte Sonneneinstrahlung $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

I_{Diff} Diffusstrahlung $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

I_{gN} Sonneneinstrahlung normal zur Kollektorebene $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$90^\circ - \psi$... Altitude $[\circ]$

β Azimuth $[\circ]$

η Wirkungsgrad des Kollektors $[-]$

T_{Abs} mittlere Absorbtemperatur $[K]$

T_a Außentemperatur $[K]$

T_{RL} Rücklauftemperatur $[K]$

T_{VL} Vorlauftemperatur $[K]$

\dot{Q}_P Paneel – Leistung $[W]$

c_W spezifische Wärmekapazität von Wasser $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

\dot{m}_A Massenstrom Paneel Außen $\left[\frac{kg}{s}\right]$

A_{Koll} Fläche des Paneels bzw. Kollektors $[m^2]$

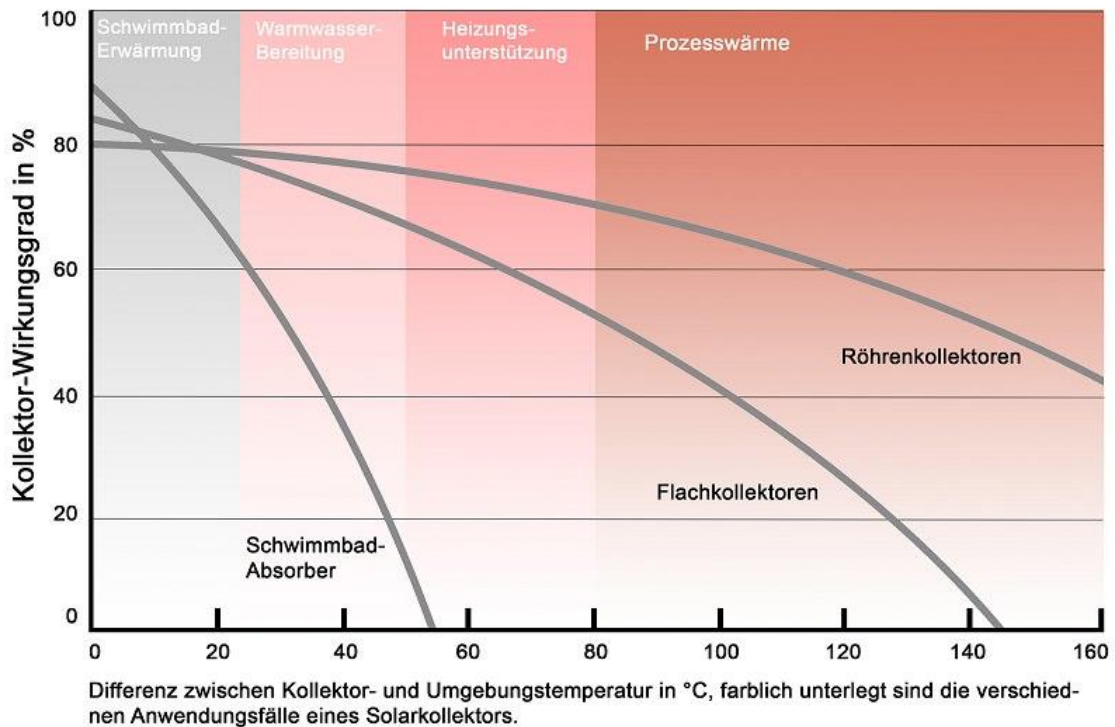


Abbildung 2-6: Wirkungsgradkennlinie und Einsatzgebiete verschiedener Kollektortypen [8]

Die Kennlinien geben zum einen gleich einen Überblick über den Kollektortyp in Bezug auf den Einsatzbereich des Kollektors und zum anderen sind diese Beziehungen zwischen der Einstrahlung und bestimmten Temperaturen, welche die Kennlinien darstellen, ein gutes Instrument zur Ermittlung der Leistungserbringung. Mithilfe der Kollektorkennlinie ist es über ein geeignetes Programm, welches einen Satz von Klimadaten enthält, möglich, die Höhe des Jahresertrages abzuschätzen.

Aus Abbildung 2-6 wird ersichtlich, dass nicht abgedeckte Schwimmbadabsorber zum Teil auch zur Unterstützung der Raumheizung herangezogen werden können, besonders dann, wenn es sich bei der Heizung um ein Niedertemperaturheizsystem handelt.

Im Kapitel 5 findet sich eine Anwendung dieser hier beschriebenen Ermittlung der Kollektorkennlinie. Zum Erstellen dieser wurden die vom Versuchsstand ausgewerteten Messergebnisse herangezogen.

2.6 Kollektortypen

Es sind verschiedenste Kollektortypen am Markt erhältlich. Die Auswahl der Type richtet sich dabei im Wesentlichen nach dem dafür vorgesehenen Einsatzbereich. Abbildung 2-6 zeigt die gängigsten Kollektortypen im direkten Vergleich ihres Wirkungsgrades. Wie die allgemeine

Wärmegenerierung eines solchen Kollektors funktioniert, ist in Abbildung 2-5 dargestellt. Bei der groben Erklärung der nachfolgenden Kollektortypen werden diese gegebenen Energieflüsse in und aus dem Kollektor je nach Verwendungszweck unterschiedlich anhand der Kollektorausführung berücksichtigt. Unter dem Aspekt von Kosten und Nutzen und dem angedachten Verwendungszweck der Kollektoren ergeben sich die nachfolgenden verschiedenen Kollektortypen.

2.6.1 Kunststoffabsorber zur Beckenwassererwärmung (Schwimmbadabsorber)

Die einfachsten Schwimmbadabsorber zur Beckenwassererwärmung (Abbildung 2-7) werden aus schwarz gefärbten Kunststoffrohrmatten hergestellt. Schwimmbadabsorber besitzen weder eine Glasabdeckung noch ein Gehäuse oder eine rückseitige Wärmedämmung, daher bezeichnet man sie auch als nicht abgedeckte Kollektoren. Diese Absorbermatten werden auf einem Dach oder auf der Wiese ausgelegt, wo sie direkt mit dem Beckenwasser durchströmt werden. Zur Herstellung eignet sich jeder Kunststoff, der UV-, chlor- und dauertemperaturbeständig bis etwa 100 °C bzw. resistent gegenüber Hydrolyse ist. Verwendet werden daher Werkstoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), PVC und EPDM. Der Wirkungsgrad von Schwimmbadabsorbern reicht entsprechend Abbildung 2-6 nur bei geringen Temperaturdifferenzen zur Umgebung aus, bei höheren Wassertemperaturen und gleichzeitig geringen Lufttemperaturen wird er rapide schlechter. Der Schwimmbadabsorber hat jedoch den Vorteil, dass er sehr einfach herzustellen ist und durch das Fehlen der Glasabdeckung kein Reflexionsverlust aufgrund einer solchen Abdeckung auftritt. Dadurch kann dieser Kollektor bei einem bestimmten Verhältnis von Temperaturdifferenz und Sonneneinstrahlung sehr hohe Wirkungsgrade erzielen. [3]



Abbildung 2-7: Schwimmbadabsorber mit Rippenrohr [9]

2.6.2 Flachkollektoren

Der Flachkollektor setzt sich zusammen aus: Kollektorgehäuse, Absorber, Wärmedämmung und transparenter Abdeckung. [10]

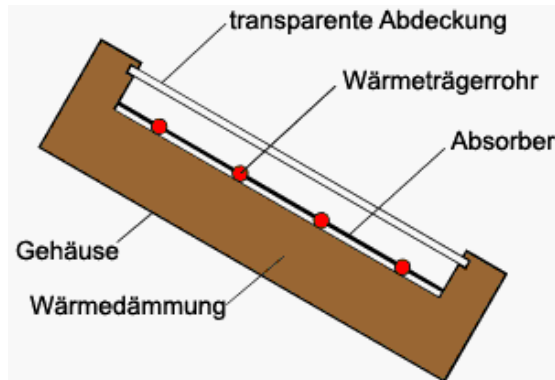


Abbildung 2-8: Prinzipieller Aufbau eines Flachkollektors [11]

Die Sonnenstrahlung trifft zunächst auf die transparente Abdeckung des Kollektors auf. Da ein Teil der Strahlung an der Oberfläche reflektiert wird beziehungsweise die Abdeckung einen Teil absorbiert, kann nicht die gesamte Strahlung für den Kollektor genutzt werden (Abbildung 2-5). Der größte Teil der auf den Absorber auftreffenden Strahlung wird durch die spezielle Beschichtung an der Absorberoberfläche in Wärme umgewandelt. Daher sollte die Beschichtung möglichst viel der Strahlung absorbieren und so wenig als möglich emittieren. Das Absorptionsvermögen ist dabei durch die schwarze Farbe des Absorbers bedingt, dessen Absorptionskoeffizient bei einer Solarlackbeschichtung oder bei guten selektiven Schichten zwischen 0,94 und 0,97 liegt. Ein großer Unterschied ergibt sich beim Emissionskoeffizienten, der bei der Solarlackbeschichtung zwischen 0,86 und 0,88 liegt, bei selektiven Schichten jedoch lediglich 0,05 bis 0,20 beträgt. Die Beschichtung kann bei Solarlackbeschichtungen über ein Spritzverfahren aufgebracht werden. Bei selektiven Schichten erfolgt dies elektrochemisch (Schwarzchrom, Schwarznickel) beziehungsweise mittels Klebefolie. Des Weiteren gibt es seit 1996 selektive Schichten, die mittels physikalischer Verfahren wie Vakuumbeschichtung bzw. Sputtertechnik aufgebracht werden. Dank dieser physikalischen Verfahren ist eine wesentlich umweltfreundlichere und weniger energieaufwändige Beschichtung als bei galvanischen Verfahren möglich.

Durch die Konvektion im Kollektor und Wärmeverluste an der Rückseite des Absorbers ergeben sich weitere Verluste. [10]

2.6.3 Vakuumkollektoren

Aus herstellungstechnischen Gründen werden Vakuumkollektoren vor allem als Röhrenkollektoren ausgeführt. Das bedeutet, dass ein schmaler, selektiv beschichteter

Absorberstreifen in eine Glasröhre, die hoch lichtdurchlässig und wärmebeständig ist, eingehängt wird. Um die Konvektions- und Wärmeleitverluste zu minimieren, wird die Glasröhre evakuiert (Abbildung 2-9).

Obwohl mit einem Vakuumröhrenkollektor in Brauchwasseranlagen höhere Jahresnutzwärmeerträge pro Flächeneinheit im Vergleich zu Flachkollektoren zu erreichen sind, haben sie sich aufgrund des höheren Preises am Markt bisher nicht breit durchsetzen können. Da vor allem im Bereich von hohen Kollektortemperaturen der Mehrertrag von Vakuumröhrenkollektoren rapide ansteigt, eignet er sich aber sehr gut für die Erzeugung von Prozesswärme. [10]

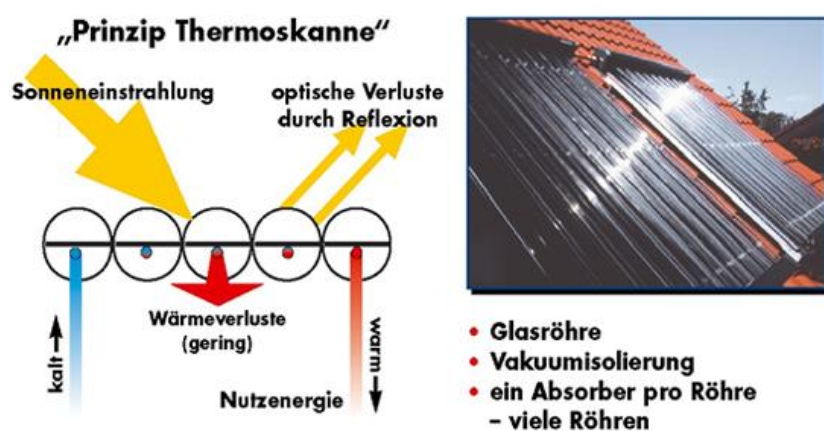


Abbildung 2-9: Vakuumröhrenkollektor [12]

2.7 Entwicklung von modernen Fassaden

Die ersten wesentlichen Akzente zukunftssträchtiger Fassaden, wie diese heute bei uns eingesetzt werden, wurden im 19. Jahrhundert gesetzt. In diesem Jahrhundert wurde versucht, die Gebäudehülle vom Gebäudeträgerwerk zu trennen. Mit dem Bau von sogenannten Skelettkonstruktionen wurde dies möglich. Ein weiterer Vorteil dieser entkoppelten Bauweise war, dass ein hoher Grad an Vorfertigungen auch auf der Baustelle realisierbar wurde, was zur Entwicklung von Sandwichkonstruktionen und Plattenbauweisen führte. [13]

Bedingt durch die Ölkrise 1973 hat der Einfluss der Verbrauchsenergie in den letzten Jahrzehnten wesentlich zur Veränderung der Erwartungen an den Gebäudehüllen geführt. Durch die dämmende Funktion der geschlossenen Strukturen sowie die Möglichkeit der Energiegewinnung durch solare Strahlung im Bereich der offenen/transparenten Strukturen haben sich die Wand- und Fassadensysteme weiterentwickelt. Daher reduzierte man als eine der ersten Maßnahmen in der Architektur in westlichen Ländern den Anteil der Fenster an der Gebäudehülle und zur Verminderung von Kältebrücken wurde eine thermische Trennung in Fensterprofilen eingeführt. Dann entstand-auch aus ästhetischen Gründen-eine Generation von zur Sonne orientierten

Gebäuden, die in „Haus im Glashaus“-Konzepten gipfelten, die Sonnenenergie nicht nur einfangen, sondern auch speichern sollten. Damit kam aber auch die Problematik der Überhitzung auf, die eine konsequente Planung von Be- und Entlüftung sowie Verschattung erforderlich machte. Aus diesen ersten Konzepten entwickelten sich in den späten 1990er-Jahren Doppelfassaden, die dank einer äußeren Glashülle die Sonnenenergie einfangen konnten und zusätzlich noch als äußerer Witterungsschutz dienten, wodurch die innere Fassade einfacher ausgebildet werden konnte. Dabei wurde anfangs ein großer Scheibenzwischenraum gewählt, wodurch sich maximale Steuerungsmöglichkeiten ergaben und auch die Erfahrungen der „Haus im Glashaus“-Lösungen angewendet werden konnten. Diese Zwischenräume wurden aber immer weiter verkleinert und dank der differenzierten Luftführung mit gezielter Ab- und Zuluftführung konnten Luftqualität und Temperatur kontrolliert werden. Der Raum zwischen der äußeren Scheibe (Abdichtung und Sonnendurchlass) und der inneren Fassade (Winddichtigkeit und Raumabschluss) beträgt bei der Korridorfassade noch nahezu einen Meter. Durch die Ausbildung des minimierten Scheibenzwischenraumes bei der Schacht-Kasten-Fassade strömt die Zuluft etagenweise über den Zwischenraum zu, wohingegen die Abluft dank der Thermik über einen Schacht in der Fassade nach oben abgeführt wird. Aufgrund dieser Entwicklung übernimmt die Gebäudehülle zusätzlich zu den oben beschriebenen, klassischen Funktionen auch noch die der integrierten Gebäudetechnik. Darunter fällt die aktive Beeinflussung der Raumluft und Temperatur durch dezentrale, in die Fassade integrierte Heizungs- beziehungsweise Kühlanlagen. Auch die Beleuchtung kann über die Fassade gesteuert werden, indem nicht nur Tageslicht aktiv reguliert sondern auch Kunstlicht in die Fassade integriert werden kann. [13]

2.8 Integrales Fassadenelement der TU Graz

„Ziel ist nicht die architektonisch-technische Sonderlösung, sondern die Entwicklung eines allgemein einsetzbaren, massentauglichen Fassadenbauteiles, welches sich leicht an architektonisch-gestalterische Vorgaben anpassen lässt („Mass Customization“). [14]

Im Rahmen des UNAB Projektes (UNAB= Umsetzung Nachhaltigen Bauens) [1] entstand dieses modifizierte, multifunktionale integrale Fassadenelement. Integrales Fassadenelement oder auch integrales Tragwerkselement genannt bedeutet, dass das Element, welches die thermische Gebäudehülle darstellt, aus mehreren Materialien besteht. Wobei die Zug- und Druckkräfte, welche aus Biegemomente resultieren und durch auftretende Lasten entstehen, in den Deckblechen und die Schubkräfte im Schaumkern des Paneels abgetragen werden. Dieses Paneel kommt ohne tragende Unterkonstruktion (Sekundärtragkonstruktion) aus, somit ist keine Pfosten-Riegel-Bauweise erforderlich (vgl. Sandwich- Theorie). Das Besondere dieses Paneels ist

nun, dass die beiden Blechplatten mit Fluidkanälen durchzogen sind und mit einem Wärmeträgermedium durchströmt werden können.

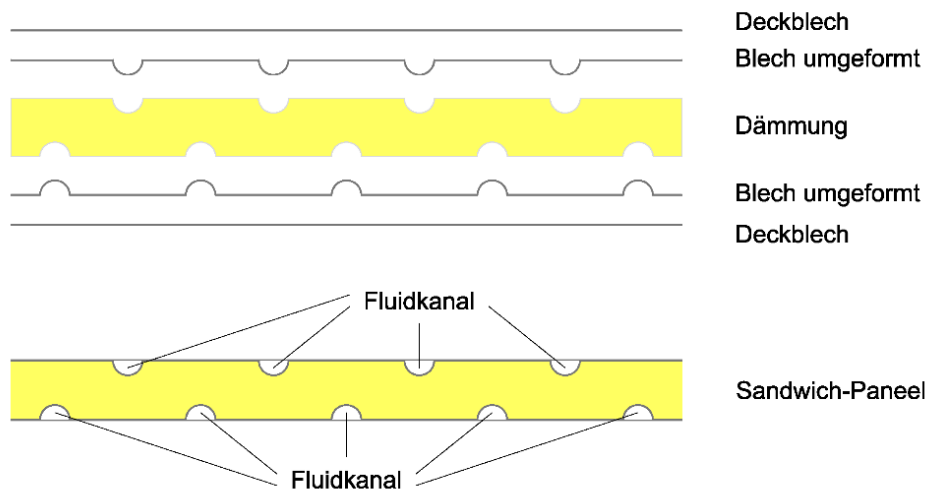


Abbildung 2-10: Aufbau Sandwichpaneel (vier Bleche) [14]

Abbildung 2-10 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Paneele. Hier sind die beiden Blechpaare (insgesamt also vier Bleche) gut zu erkennen. Dadurch, dass die Kanäle auf beiden Seiten des Dämmkerns eingebracht sind, kann gleichzeitig sowohl die der Sonne zugewandten Seite als auch die dem dahinterliegenden Raum zugewandten Seite durchströmt werden. Dank dieser Funktion des Paneels kann durch die Sonnenstrahlung Wärme generiert und simultan der Raum konditioniert werden (heizen und kühlen). (Abbildung 2-11)

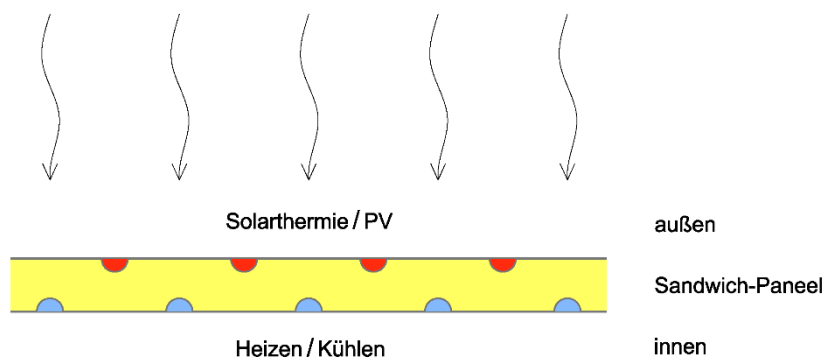


Abbildung 2-11: Sandwichpaneel mit Fluidkanälen [14]

Mit der Entwicklung dieser aktivierten thermischen Gebäudehülle gingen zahlreiche Simulationen einher, welche die beste fertigmögliche Kanalgeometrie mit einer geeigneten

Kanalführung als Ergebnis haben sollten. Diese Simulationen wurden von meinem Betreuer Dipl.-Ing. Daniel Brandl im Rahmen des Projektes UNAB [1] abgearbeitet.

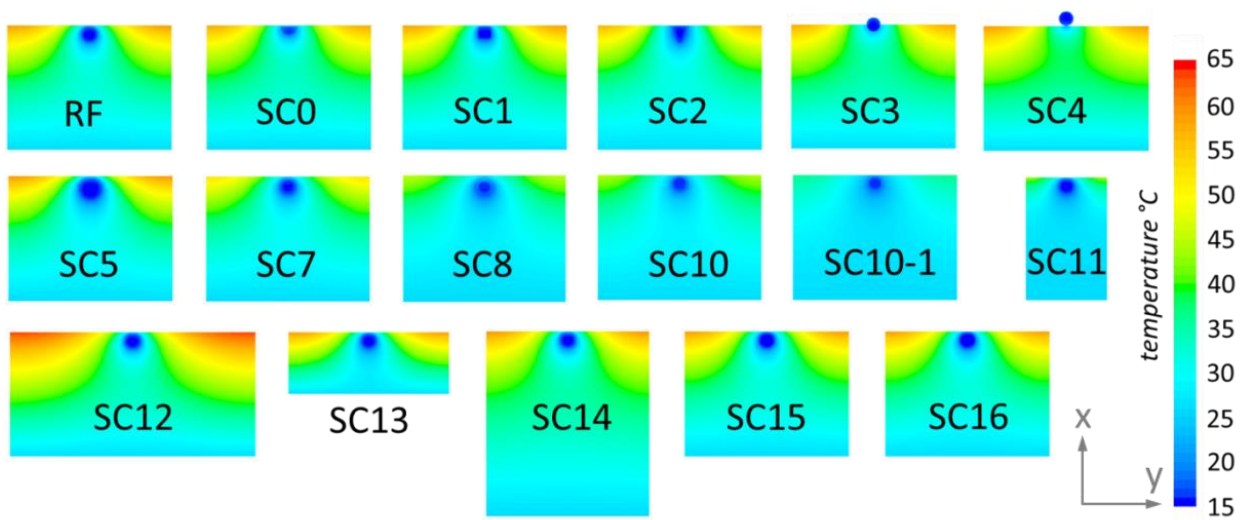


Abbildung 2-12: Darstellung der Temperaturverläufe innerhalb des Fassadenelementes für verschieden Szenarien im Sommerfall [14]

In Abbildung 2-12 ist ein Teil der Temperaturverläufe, welche für die Parameterstudie ausgearbeitet wurden, zu sehen. Bei diesen Simulationen wurde sowohl die Kanalgeometrie (Dreieck, Halbkreis, Viereck) als auch die Kanalquerschnittsgröße variiert. Diese Studie war also Teil der Entscheidungsfindung für die anschließend produzierten Fassadenbleche. Des Weiteren wurde mit Parameterstudien auf die optimale Höhe des Massenstromes geschlossen.

Anschließend wurde mit diesen ermittelten Parametern nach einem Hersteller gesucht, welcher dazu imstande war, entsprechende Bleche zu formen. Letztendlich wurde dafür das Aluminiumwerk *TALUM d.d. Kidričevo* [15] in Slowenien ausgewählt, welches sechs Absorberbleche kostenlos zur Verfügung stellte.

Der nächste Schritt war die Herstellung der Sandwichpaneele. Hierzu wurde ein Unternehmen benötigt, welches die beiden Bleche mit einem Dämmkern ausstattet, sodass daraus als Endergebnis ein modifiziertes, integrales Tragwerkselement resultiert. Für dieses Unterfangen wurde der Paneelhersteller BRUCHAPaneel [16] mit Hauptsitz in Niederösterreich kontaktiert. Auch dieser Hersteller teilte sein Knowhow und die zur Fertigung benötigten Ressourcen kostenlos mit uns.

Abbildung 2-13 zeigt den ausgewählten Kanalquerschnitt. In der Abbildung auf der linken Seite ist der Querschnitt der Kanäle über die gesamte Fläche zu sehen. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die Geometrie der Kanalzuleitung dargestellt. Das Fluid folgt also einem runden Kanal bis zum tatsächlichen Blech, danach schließt der flach gedrückte, breitere Kanal an. Durch die breitere Form sollte eine bessere Wärmeabfuhr an der Oberfläche des Paneels gewährleistet sein.

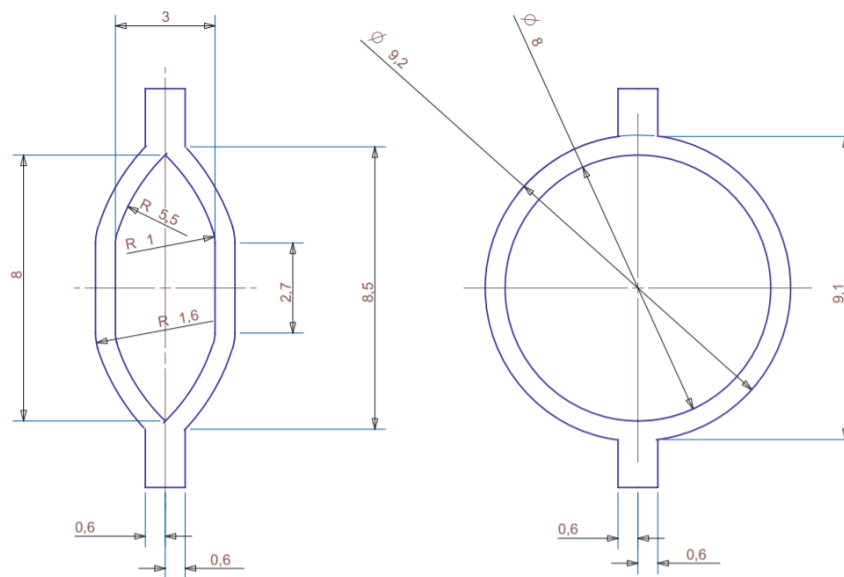


Abbildung 2-13: Mögliche Kanalgeometrien [15]

Für die Herstellung der Kanäle wurde das sogenannte Roll-Bond-Verfahren (auch Roll-bonding) angewendet. Bei dieser Technik werden unter großem Druck zwei (oder mehr) Bleche durch Walzen zusammengefügt. Sollen sich bestimmte Bereiche nicht verbinden, werden diese zuerst mit einem Trennmittel behandelt (meist Graphit im Siebdruckverfahren). Diese nicht verbundenen Bereiche werden danach mit Druckluft „aufgeblasen“, wodurch sich die Fluidkanäle an den gewünschten Stellen und mit der gewünschten Querschnittsgeometrie ausbilden können. [14] Diese Art der Kanalgenerierung wird sehr gerne bei der Produktion von Kühlschranksorberblechen verwendet.

Abbildung 2-14 zeigt zwei der drei produzierten Fassadenelemente mit verschiedenen Varianten der Dämmung. Das dritte Fassadenpaneel wurde als Dank an die Firma *TALUM d.d. Kidričevo* [15] geschickt, welche ebenfalls an einer solchen Fassade interessiert ist und an diesem Paneel Messungen durchführt.

Das vordere Element in Abbildung 2-14 besitzt als Dämmmaterial Mineralwolle, das hintere dagegen ist mit Polyurethan (PU) gedämmt. Grundsätzlich ist es möglich, fast jedes Dämmmaterial als Dämmkern auszuführen. Dabei stehen oft ökologische und nachhaltige Argumente im Vordergrund. Polyurethan liefert zwar einen sehr guten Dämmwert, ist jedoch kein nachhaltiges Produkt und leicht entflammbar.

In Abbildung 2-14 sind die in die Deckbleche integrierten Kanäle zur Wärmegenerierung beziehungsweise zur Raumkonditionierung dargestellt. Diese besondere Kanalführung stammt von einem Absorberblech einer Kühlschranksrückwand und sollte mit ihren zahlreichen Verzweigungen ein gutes Strömungsverhalten des Fluids auf die gesamte Paneelbreite sicherstellen.

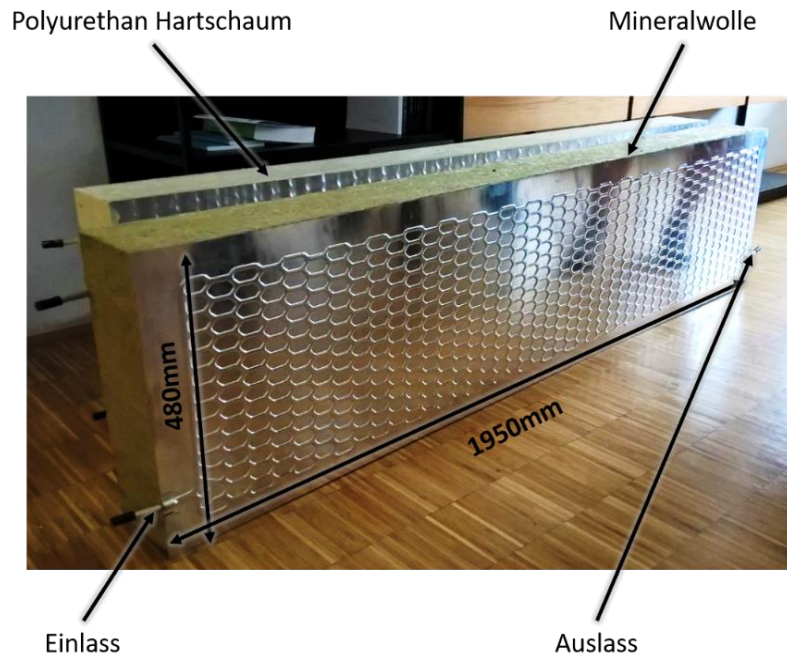


Abbildung 2-14: Integrales Fassadenelement der TU Graz

Erwähnenswert ist, dass dieses Fassadenelement durch die Zusammenarbeit mehrerer Institute sogar fakultätsübergreifend entstanden ist. Mitwirkend bei diesem Projekt waren und sind die Fakultät Maschinenbau mit dem Institut für Wärmetechnik und dem Institut für Umformtechnik und die Fakultät Bauingenieurwesen mit dem Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie und dem Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft sowie die Fakultät für Architektur mit dem Institut für Architekturtechnologie und dem Institut für Architektur und Medien.

Für diese Paneelprototypen soll nun ein Messaufbau gestaltet werden, der das thermische Verhalten dieser Fassadenelemente untersucht. Dabei sollte ein möglichst einfacher Aufbau, jedoch mit der Möglichkeit eine Vielzahl von Parameterveränderungen durchführen zu können, im Vordergrund stehen. Dieser Messaufbau wird im nun folgendem Kapitel 3 gezeigt und erklärt.

3 ERRICHTUNG DES MESSAUFBAUS

3.1 Konstruktionsfindung, Konstruktionen und Entwürfe

Nach einer ausgedehnten Entwurfsphase, in der einige Varianten eines Versuchsstandes zur Diskussion standen, fiel die Wahl letztendlich auf einen Messaufbau im Freien, der aus einer Reihe mit Luft gefüllter, gedämmter, baugleicher Boxen zusammengesetzt ist, an welchen die Paneele befestigt werden. Umfangreiche Diskussionen bezüglich des Aufstellungsortes ergaben schlussendlich eine klare Präferenz für die Positionierung im Freien, da die Paneele so gut als nur irgend möglich praxisnahen Einsatzbedingungen ausgesetzt werden sollten. Durch diese in-situ Messungen kommen somit die wechselnden Bedingungen des Wetters auch unter Berücksichtigung des Windes im Messergebnis mit vollem Umfang zur Geltung. Dieser Umstand war uns besonders wichtig, da die erzielten guten Wärmeeinträge durch perfekte Bedingungen im Labor nicht geschmälert werden können und tatsächliche Aussagen über die Anwendung in der Praxis zulassen. Die umgesetzte Konstruktion baut auf geänderten beziehungsweise nicht gefertigten Konstruktionen auf. Anfangs war angedacht, zwei bis drei Boxen auf dem Dach eines Containers, welcher die Technik für ein bereits laufendes Projekt (MPC Boxen; Projekt des IWT; neben Inffeldgasse 24, 8010 Graz) beinhaltet, mittels einer darauf errichteten Plattform aufzubauen. Die Anzahl der Boxen ergibt sich daraus, dass ein thermisch nicht aktiviertes Paneel als Referenz simultan mit dem thermisch aktivierten integralen Fassadenelement verglichen werden sollte. Bei diesem Entwurf wurde von einer Einbindung in die für dieses laufende Projekt bestehende Kühlanlage ausgegangen. Jedoch war aufgrund fehlender zusätzlicher Ressourcen der schon installierten Wärmesenke eine Einbindung unseres Versuchsstandes in dieses System nicht möglich. Somit waren wir gezwungen eine andere Lösung für unser Vorhaben zu entwickeln.

Im Zuge der Ideenfindung und nach Ausschöpfung der uns zur Verfügung stehenden Möglichkeiten und Ressourcen (im Projekt UNAB [1]) legten wir uns letztendlich auf die Konstruktion einer Einhausung als Witterungsschutz für die darin enthaltenen Prüfboxen fest. Diese Einhausung wird auf drei Seiten mit OSB Platten verschalt und mit einem Dach aus Bitumenwellplatten abgedeckt (Abbildung 3-2).

Zu diesem Versuchsstand gab es jedoch die Auflage, dass er nur temporär bestehen darf. Dies wurde mit dem zuständigen Personal von Gebäude und Technik so vereinbart, um die Erlaubnis zur Errichtung zu erhalten. Diese zeitliche Begrenzung wurde während der Konstruktion und Planung der Ausführung stets beachtet und der Versuchsstand im Hinblick auf die Rückbaubarkeit dementsprechend ausgeführt.

3.2 Anforderungsprofil

Der Versuchsstand sollte einen realen Einbau für das Paneel darstellen. Um verschiedene Szenarien abspielen zu können, musste es möglich sein, einige Parameter zu verändern. Unsererseits gefordert wurde eine Variation folgender Parameter:

- Massenstrom
- Vorlauftemperatur
- Einseitige Durchströmung
- Beidseitige Durchströmung
- Mehrere Ausbaustufen des Fassadenelementes

Gemessen werden sollte vorrangig der durch das Paneel zu erzielende Energieeintrag. Damit hierzu eine Aussage getroffen werden kann, ist die Installation von Hydraulikkomponenten inklusive Messtechnik Voraussetzung. Diese Messtechnik und die Boxen müssen vor der Witterung im Freien geschützt werden, was eine Konstruktion zur Folge hat, in welcher sämtliche Komponenten Platz finden. Der Grund für den Bau von Boxen ist jener, dass die Temperaturen IN den Boxen ebenfalls zur Analyse herangezogen werden sollten. Unter diesem Aspekt hat uns der Einfluss der innenseitigen Kühlung bei gleichzeitigem Wärmeentzug auf der Außenseite des Paneels in Bezug auf die Veränderung der Raumtemperatur besonders interessiert.

Ebenfalls wichtig war uns, dass die Temperaturen in den Boxen simultan gemessen werden konnten, um einen aussagekräftigen Vergleich zwischen einem thermisch aktivierten Paneel und einem thermisch nicht aktivierten Paneel anstellen zu können.

Gefordert war des Weiteren die Möglichkeit, dass verschieden Ausbaustufen am Versuchsstand erprobt werden können. Insgesamt wurden an diesem Stand vier Ausbaustufen angedacht.

Grundvoraussetzung war es, eine einfache Bauweise zu gewährleisten. Dies hatte mehrere Gründe. Zum einen musste der Aufbau möglichst rasch vorangetrieben werden, um noch genügend warme Tage für die Messungen nützen zu können und zum anderen war dieser Versuchsstand von Beginn an nur temporär geplant. Das heißt, dass dieser Messaufbau nach Beendigung der Messreihen vollständig und ohne zu hohen Aufwand rückgebaut werden muss. Ein weiterer Grund für einen möglichst einfachen Aufbau sind klarerweise die anfallenden Kosten.

Die Aufzeichnung der Temperaturmessungen sollte bei diesem Versuchstand über mehrere Tage möglich sein. Die Messauflösung sollte dabei relativ hoch sein, sprich die Intervalle zwischen den Parameteraufzeichnungen sollten möglichst klein sein.

3.2.1 Konstruktion mit zwei Boxen

Bei den Besprechungen mit meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Brandl Daniel und mit Herrn SV Arch. Dipl.-Ing. Schober Helmut, welcher für die Statik der Paneele zuständig und von Anfang an bei der Konstruktion des Versuchstandes eingebunden war, kristallisierte sich heraus, dass das Ergebnis unserer Messungen vorerst aus dem direkten Vergleich zwischen einem herkömmlichen, nicht hydraulisch aktivierten Sandwichpaneel und dem modifizierten, hydraulisch angeschlossenen Sandwichpaneel der TU Graz resultieren sollte. Da sich der Versuchstand im Freien befindet und er somit den Wetterverhältnissen inklusive Wind ausgesetzt ist, war es uns wichtig, dass wir sämtliche Parameter wie Temperaturen oder Durchflüsse bei beiden Boxen simultan messen können, um die Messwerte bei den gleichen vorherrschenden Verhältnissen abnehmen zu können. Aus diesem Grund baut die Konstruktion auf zwei Boxen auf (Abbildung 3-1; eine größere Darstellung der Zeichnung befindet sich im Anhang 2), wobei bei den nachfolgenden Konstruktionszeichnungen und Bildern immer die rechte Seite das hydraulisch angeschlossene und somit aktivierte Paneel zeigt und die linke Seite das nicht hydraulisch durchströmte Referenzpaneel darstellt. Am Beginn der Diskussionen wurde auch über drei Boxen gesprochen. Dabei hätte die Möglichkeit von zwei verschiedenen ausgeführten, hydraulisch angeschlossenen Paneelen und einem nicht aktivierten Referenzpaneel bestanden. Aufgrund des noch höheren Aufwandes durch die dritte Box sind wir jedoch von dieser Überlegung abgekommen und haben den Versuchstand mit nur zwei Boxen ausgeführt. Die Möglichkeit der hydraulischen Nachrüstung für das Referenzpaneel besteht jedoch, sodass dieses in weiterer Folge ebenfalls aktiviert werden könnte, falls gewünscht oder erforderlich.

3 Errichtung des Messaufbaus

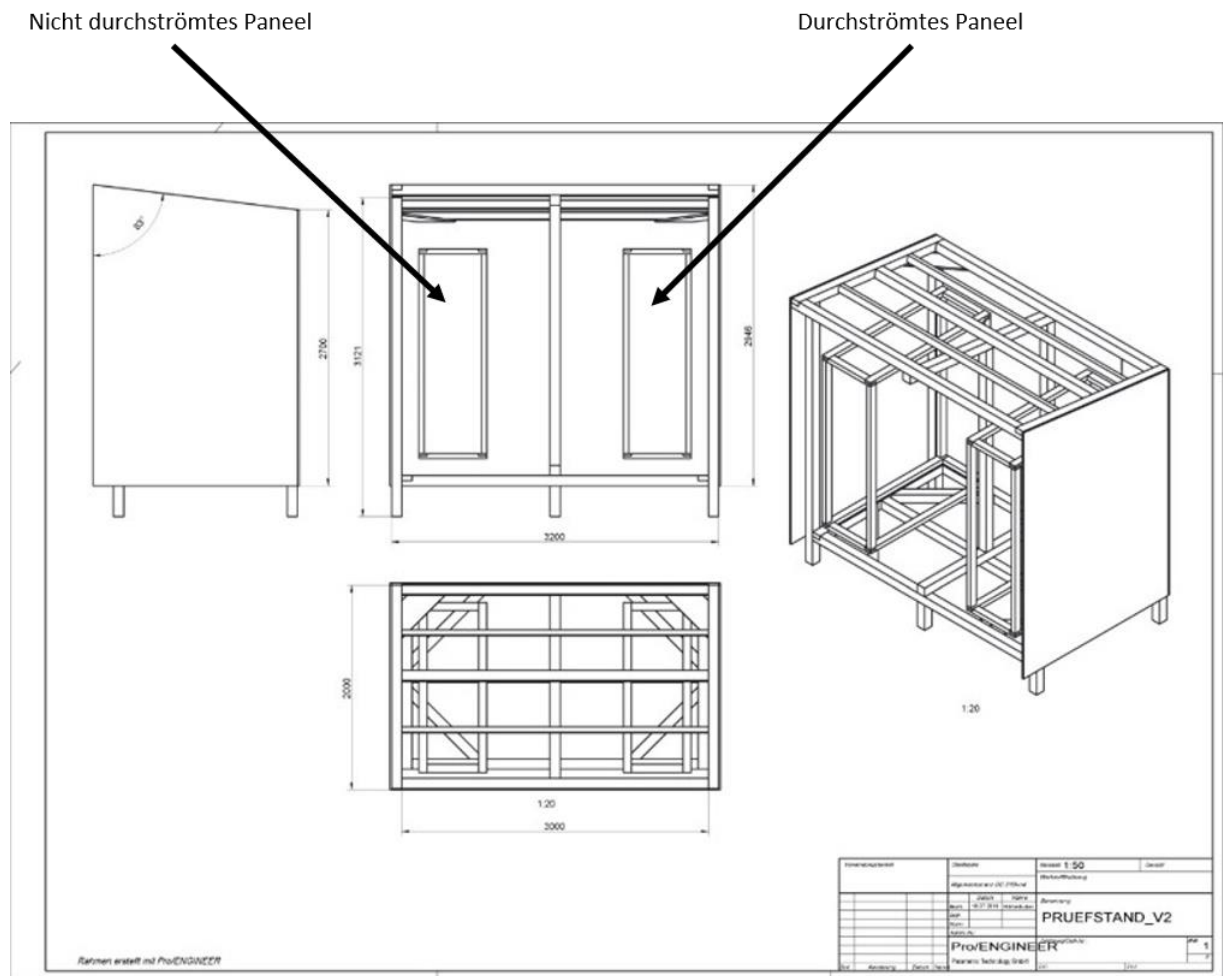


Abbildung 3-1: Konstruktionszeichnung Versuchsstand

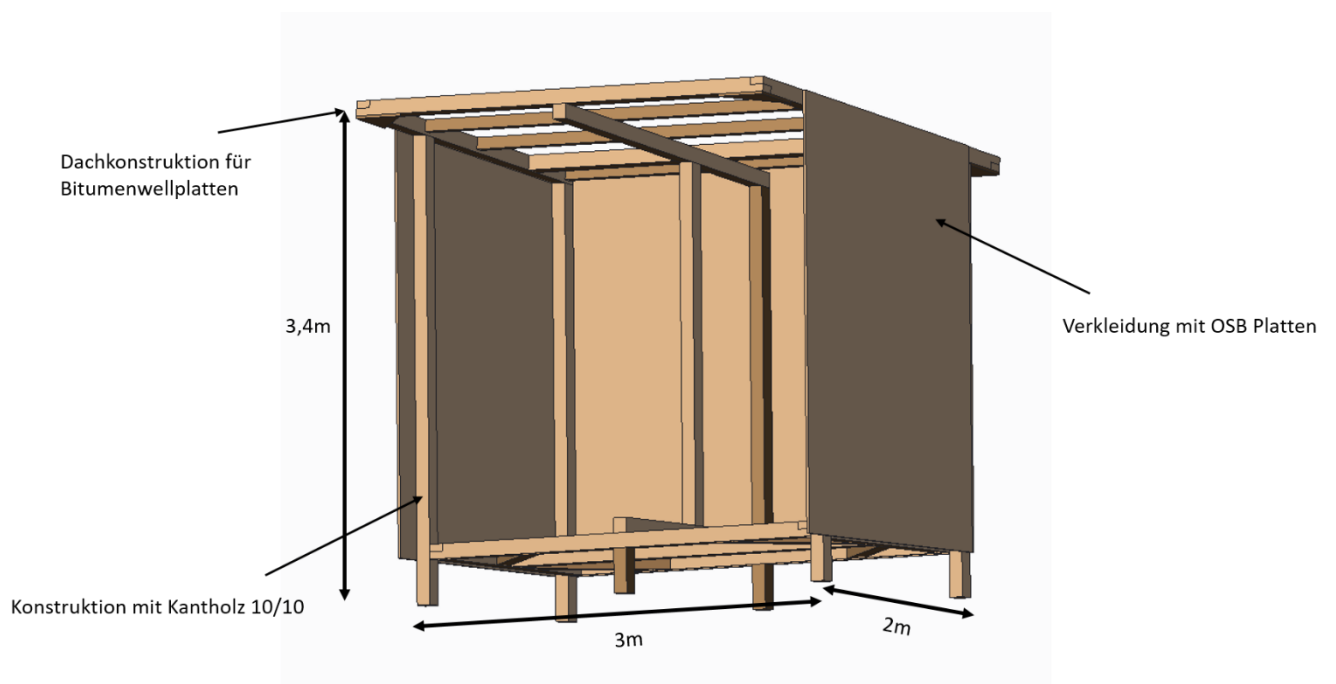


Abbildung 3-2: Versuchsstand – Einhausung

3 Errichtung des Messaufbaus

In der Einhausung, wie in Abbildung 3-2 gezeigt, befinden sich zwei gedämmte Boxen, in denen je ein Paneel verbaut ist. Die Boxen (Abbildung 3-3) sind aus einem Rahmen bestehend aus Kanthölzern aufgebaut. Anschließend wurde dieser Rahmen komplett bis auf die Front, wo später das Paneel eingesetzt wird, mit Grobspanplatten (OSB (oriented strand/structural board) Platten) verkleidet. Diese Verkleidung sorgt für die nötige Stabilität der Boxen und dient als Träger für die Dämmplatten aus expandiertem Polystyrol (EPS).

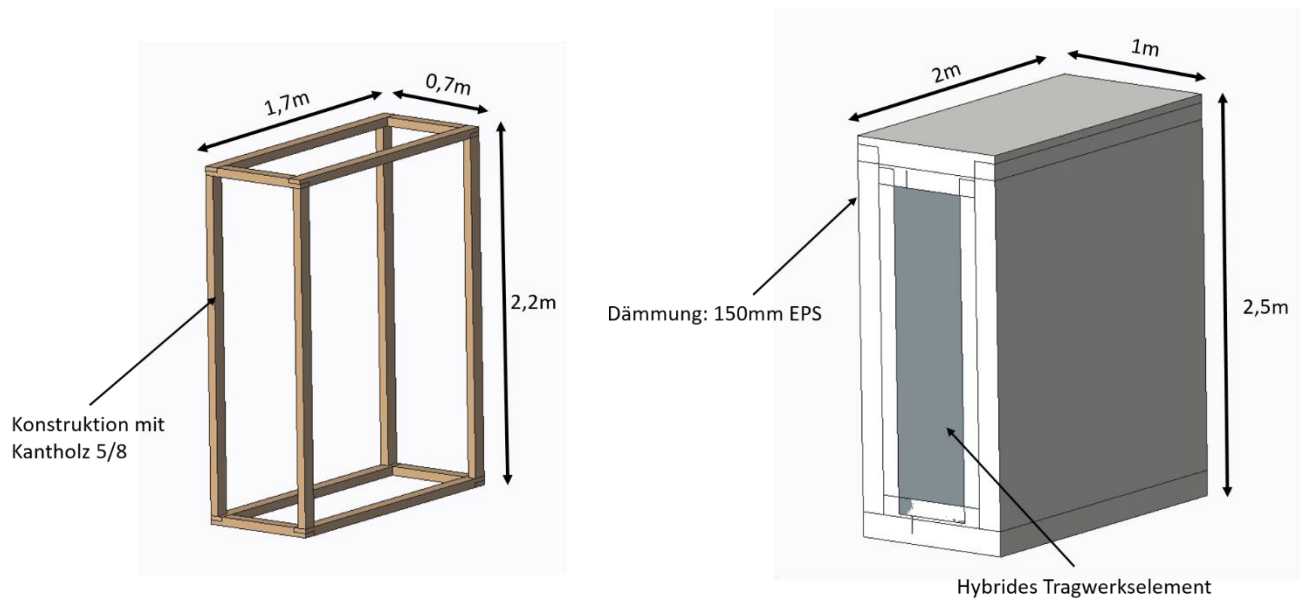


Abbildung 3-3: Boxenaufbau

In Abbildung 3-4 sind die beiden Boxen im Versuchsstand integriert zu sehen. Dieser Versuchsstand ist aufgrund des Platzbedarfs der Hydraulik und der Steuerung etwas breiter konzipiert. Somit ist eine geschützte Umgebung der Mess- und Steuerungstechnik zwischen den beiden Boxen gewährleistet. Der Rechner, welcher alle Messwerte aufzeichnet und speichert, steht im nahegelegenen Technikcontainer der schon erwähnten MPC Boxen (neben dem Bautechnikzentrum in der Inffeldgasse 24, 8010 Graz).

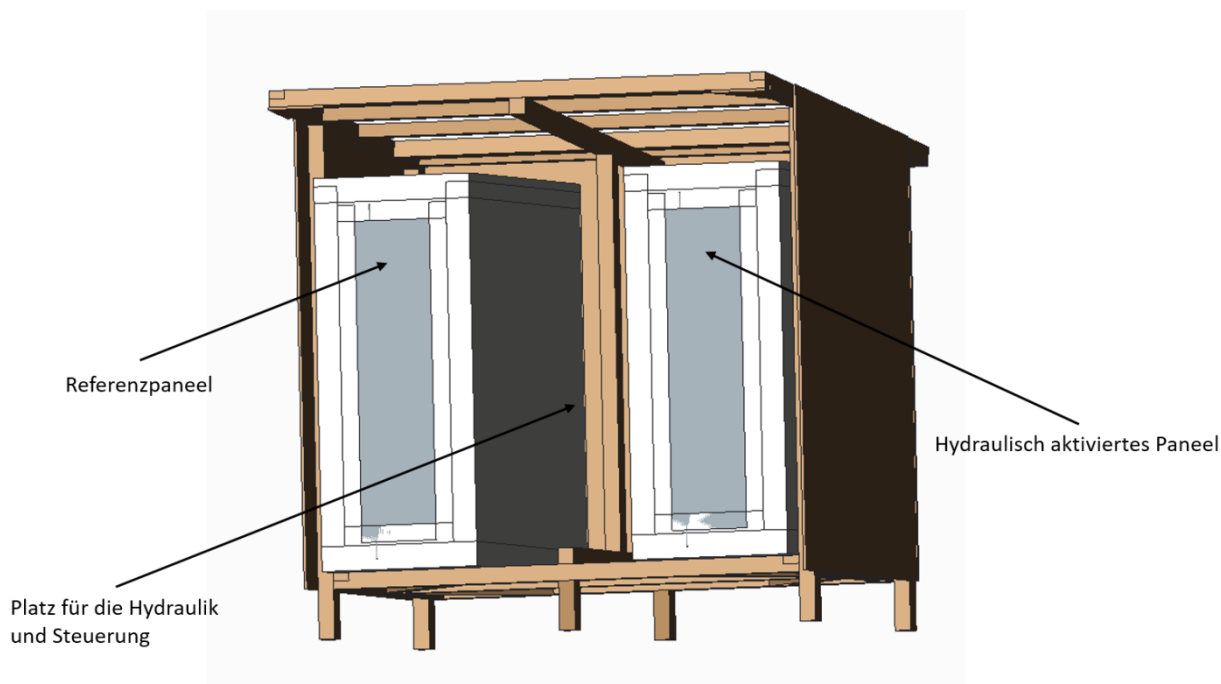


Abbildung 3-4: Versuchsstand mit integrierten Boxen

Bei der Konstruktionsfindung wurde zwischen einer einfacheren Lösung, welche keine geschlossenen und gedämmten Boxen beinhaltet hätte, und der schließlich ausgeführten Konstruktion mit den beiden vollständig gedämmten Boxen abgewogen. Der Grund für die aufwändigere Ausführung mit der geschlossenen und gedämmten Box war jener, die Untersuchung des Kühl- bzw. Heizeffekts im Raum beziehungsweise in der Box durch die Aktivierung des Paneels zu ermöglichen. In weiterer Folge soll über das Fassadenpaneel auch die Konditionierung des Innenraums möglich sein, weshalb es auch von großem Interesse ist, diese Funktionalität zu testen und zu messen. Die äußeren Abmessungen einer Box inklusive 150 mm EPS Dämmung ergaben schlussendlich 1000 x 2500 x 2000 (BxHxT; Angaben in mm).

3.2.2 Orientierung

Der Versuchsstand wurde genau nach Süden ausgerichtet um einen guten Wärmeeintrag auf die Paneele zu gewährleisten. Bei der Standortauswahl wurde darauf geachtet, dass keine Gebäude oder Bäume in unmittelbarer Nähe sind, die somit eine längere, nicht gewollte Verschattung der Paneele hervorrufen würden. In Abbildung 3-5 ist die Lage des Versuchsstandes eingezeichnet, welcher sich am westlichen Ende der Inffeldgasse befindet (unmittelbar neben dem Bautechnikzentrum). Die Aufzeichnung der Messungen wird vor allem in den Übergangszeiten, sprich im Herbst und im Frühling stattfinden. Grund hierfür ist, dass der Bau des Versuchsstandes erst am 31. August abgeschlossen war und somit vorher keine Aufzeichnungen gemacht werden konnten. Jedoch bringen diese beiden Jahreszeiten die Eigenschaft einer tief stehenden Sonne mit sich, was wiederum den Vorteil hat, dass die Sonne einen deutlich flacheren Winkel

(Sonnenstandshöhe) (siehe Abbildung 2-3) zur Erdoberfläche aufweist als in den Sommermonaten und somit die Sonnenstrahlung wegen des guten Einstrahlwinkels auf vertikale Wände besser genutzt werden kann.

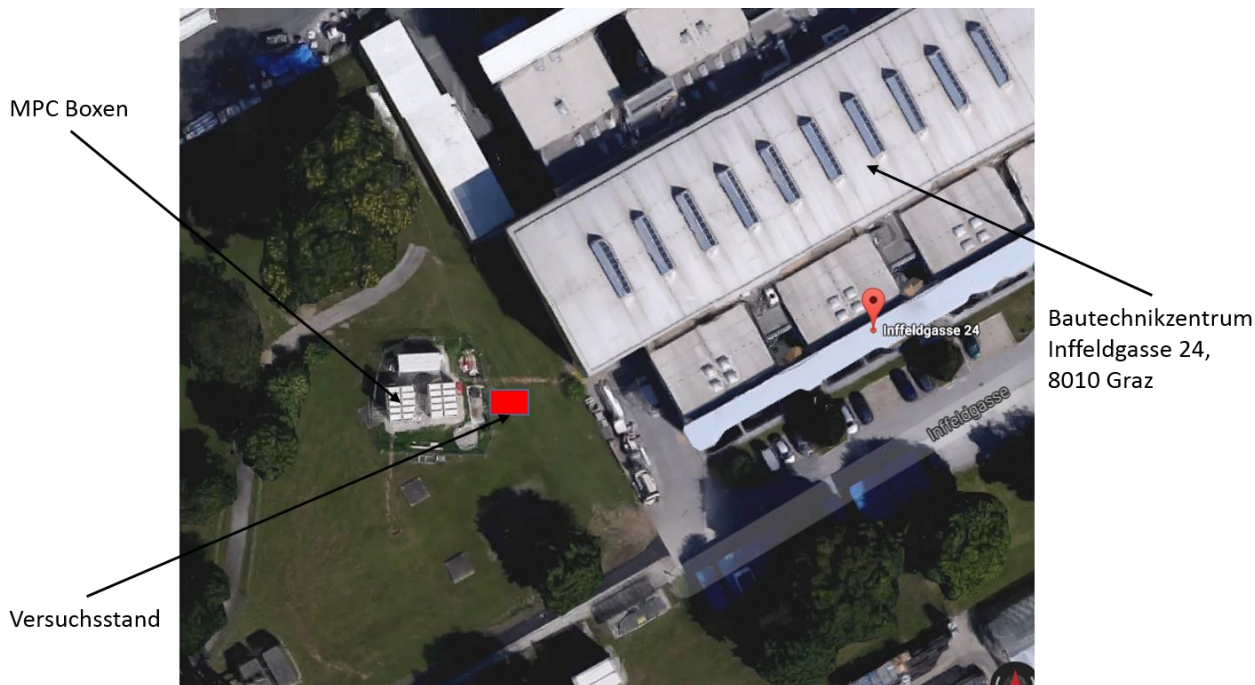


Abbildung 3-5: Lageplan Versuchsstand

3.3 Materialien

Für den Versuchsstand als Einhausung der Boxen wurde das Material Holz gewählt. Einerseits soll dieser Versuchsstand wie erwähnt nur temporär eingesetzt und wahrscheinlich bis 31.03.2017 wieder rückgebaut werden, andererseits sollten aus Projekt-budgetären Gründen die Kosten geringgehalten werden – zwei wichtige Aspekte, die für die Verwendung von Holz als Baustoff sprachen. Ein weiterer Grund ist die sehr gute wärmedämmende Eigenschaft von Holz im Vergleich zu Metall, welche für die beiden im Unterstand integrierten Boxen sehr wichtig war, da wir den äußeren Wärmeeintrag in die Boxen so gering als möglich halten wollten. Mit der Verwendung von Holz war außerdem eine relativ rasche Errichtung des Versuchsstandes möglich. Dies war entscheidend, da die Messungen noch in den warmen Sommer- beziehungsweise Herbstmonaten laufen sollten.

Für die Dämmung der Boxen wurden - wie bereits erwähnt - EPS Dämmplatten verwendet, wobei die Wärmedämmung im Speziellen aus zwei Dämmplattenschichten mit verschiedener Stärke besteht. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die beiden Platten versetzt geklebt werden konnten und somit keine durchgehende Fuge entstehen konnte, zum anderen resultierte diese Ausführung einfach aus dem Umstand, dass am Markt keine Dämmplatte mit 150 mm Stärke

erhältlich ist. Der Grund dafür, dass die Dämmung eine Stärke von genau 150 mm aufweisen sollte, war jener, dass dies der Paneelstärke entspricht und somit rundherum eine einheitlich dicke Wärmedämmschicht an den Boxen angebracht werden konnte. Deshalb setzt sich die Dämmung aus einer 50 mm starken und einer 100 mm starken Dämmplatte zusammen. Die 50 mm starken EPS Platten wurden auf die OSB Platten mittels Schrauben und Dämmplattendübel montiert, die 100 mm EPS Platten anschließend mit einem Klebespachtel auf die erste Lage der Dämmung geklebt. Dabei wurde der Kleber ganzflächig mit einer Zahnspachtel aufgetragen. Für die Dacheindeckung wurden Bitumenwellplatten verwendet. Diese Platten stellen eine sehr kostengünstige Variante dar und sind bei geeignetem Unterbau für den temporären Einsatz bei diesem Versuchsstand völlig ausreichend. Zusätzlich wurde unter den Bitumenwellplatten noch eine Abdichtung mittels Unterspannbahnen angebracht. Diese nach außen diffusionsoffene Folie wurde zum zusätzlichen Schutz auch an den mittels OSB Platten verschalteten Wänden vorgehängt. Dadurch ist der Unterstand noch besser vor der Witterung geschützt. (Abbildung 3-8)

3.4 Aufbau

Der Aufbau des konstruierten Versuchsstandes erfolgte aus Kostengründen vorwiegend durch Eigenleistung. Die Aufbauphase erstreckte sich über 33 Tage vom 30.07.2016 bis zum 31.08.2016. Am 31.08.2016 wurde der Versuchsstand zum ersten Mal in Betrieb genommen und auf Funktionalität überprüft. Das heißt, das Paneel wurde das erste Mal mit Wasser durchströmt und die vorher kalibrierten Sensoren wurden getestet.

3.4.1 Rohbau

Wie bei jedem Bauwerk wurde auch hier mit dem Fundament begonnen. Für dieses wurden sechs Bodeneinschlaghülsen in den Boden getrieben. Diese Hülsen haben einen versenkbaren Dorn mit der Länge von 750 mm und sind für ein Kantholz mit je 90 mm Seitenlänge konzipiert (Abbildung 3-6). Aufgrund der Belastungen auf das Fundament durch die Windkraft (Anhang 1) sollte je ein Einschlagdorn eine vertikal auftretende Zugkraft von mindestens 800 N aufnehmen können, damit der Versuchsstand weder kippen noch aus seiner Verankerung gezogen werden kann. Diese Forderung wurde im Zuge des Aufbaus getestet und für ausreichend befunden. Auf diesen Punktfundamenten befindet sich anschließend der untere Rahmen aus Kanthölzern. Nachdem die Kantholzkonstruktion (Abbildung 3-7) stand, wurden die drei nicht nach Süden zeigenden Seiten mit OSB Platten verschalt. Diese Maßnahme wurde aus zwei Gründen ergriffen. Zum einen wurde der Versuchstand durch die Platten dementsprechend gegen Verwindung versteift, zum anderen werden nun die im Unterstand befindlichen Boxen und deren Messtechnik gut vor der Witterung, vor allem von der West- und Nordseite geschützt.

3 Errichtung des Messaufbaus

Abbildung 3-8 zeigt den fertiggestellten Unterstand. In dieser Abbildung ist die schwarze Unterspannbahn gut zu erkennen.



Abbildung 3-6: Bodeneinschlaghülse



Abbildung 3-7: Kantholzkonstruktion

3 Errichtung des Messaufbaus



Abbildung 3-8: Unterstand

Der nächste Schritt war die Dämmung der beiden Boxen, welche in der Abbildung 3-8 zu sehen sind. Dabei wurden zuerst 50 mm starke EPS Platten auf die OSB Platten geschraubt und anschließend 100 mm starke EPS Platten versetzt auf die untere Lage mit einer handelsüblichen Klebspachtel geklebt. Die Verklebung erfolgte dabei vollflächig, aufgetragen mittels Zahnpachtel (Abbildung 3-9).



Abbildung 3-9: Unterstand mit gedämmten Boxen

Anschließend wurden Rahmen aus OSB Platten für die Paneele zugeschnitten und die Paneele mithilfe von Blechschrauben daran befestigt (Abbildung 3-10). Die Paneele konnten somit samt Rahmen in die dafür vorgesehene Aussparung an der Boxenfront eingeschraubt werden

3 Errichtung des Messaufbaus

(Abbildung 3-11). Vor der Anbringung des Rahmens samt Paneel wurde stirnseitig ein Klebeband, das somit zwischen dem Holzrahmen und dem Rahmen mit dem montierten Paneel klebt, zur Abdichtung aufgebracht. Nach der Platzierung des Paneels wurde die vordere Front ebenfalls mit 150 mm EPS Platten gedämmt (Abbildung 3-12).



Abbildung 3-10: Paneel mit Rahmen

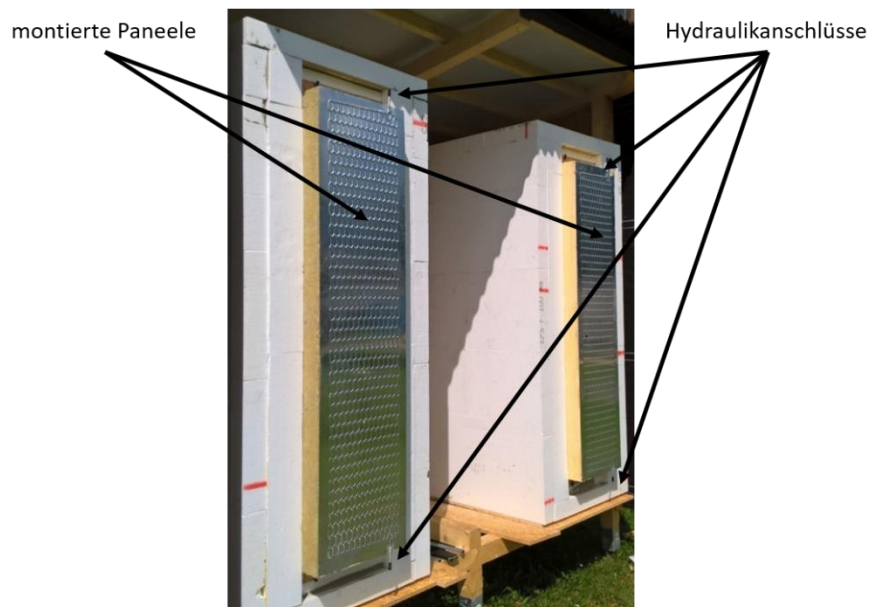


Abbildung 3-11: Boxen mit montierten Paneelen

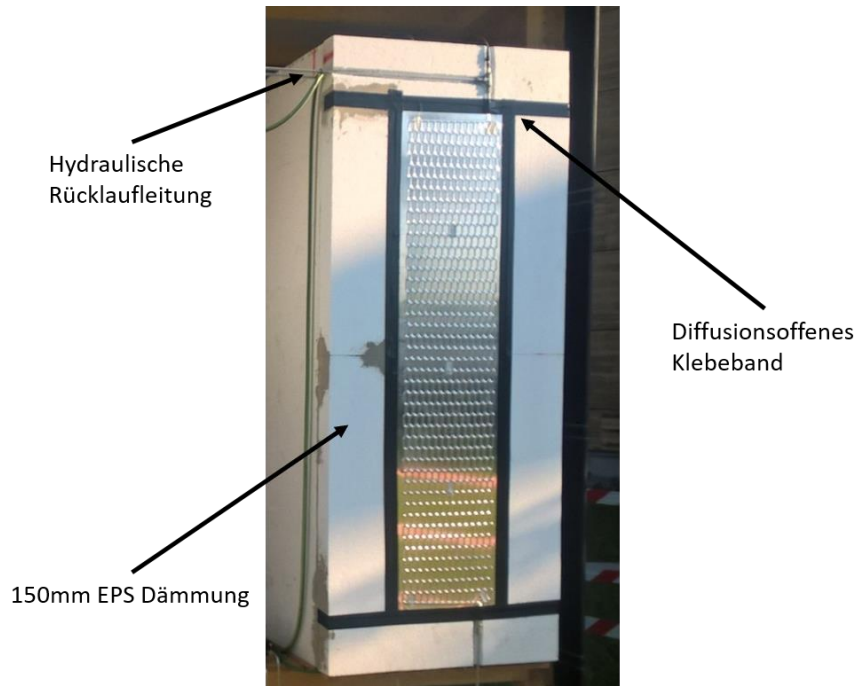


Abbildung 3-12: fertig gedämmte Box

3.5 Hydraulik

Für die hydraulische Versorgung des Versuchszustandes inklusive Wärmeabfuhr wurden zwei mögliche Varianten diskutiert. Zum einen gab es die kostenintensivere Möglichkeit der Ausführung mittels geschlossenem Wasserkreislauf und einer integrierten Rückkühlung des Fluids, zum anderen stand die Variante des Betriebes mit Frischwasser zur Verfügung (Abbildung 3-13).

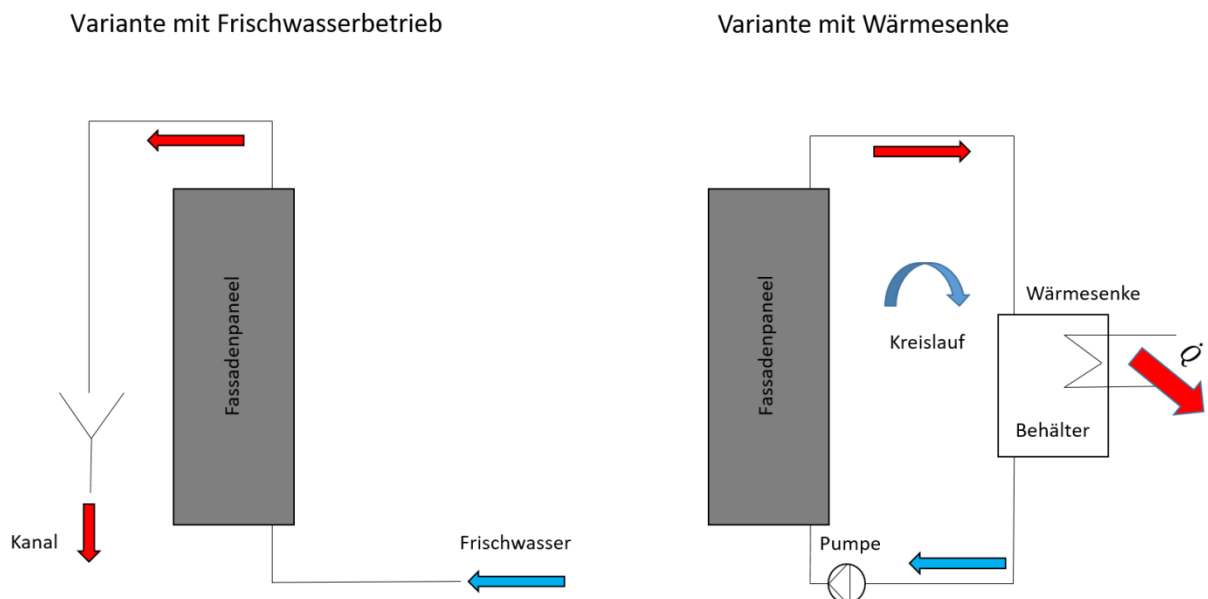


Abbildung 3-13: Wasserversorgungsvarianten

Nach reiflicher Überlegung wurde eine Entscheidung gefällt. Da die bestehende Kälteanlage der sich in unmittelbarer Nähe befindlichen Model Predictive Control (MPC) Boxen nicht noch einen Abnehmer aufnehmen konnte und eine eigene Wärmesenke im Rahmen dieses Projektes nicht finanzierbar gewesen wäre, fiel die Entscheidung, den Wärmeabtransport (zumindest vorerst) über das Frischwasser zu gewährleisten. Ein weiterer Grund dafür war, dass der Zeitraum zur Durchführung der Messungen begrenzt war und zusätzlich noch der Massenstrom zum Betreiben des Panels sehr gering ist. Der Wasserverbrauch hielt sich dadurch in vertretbarem Ausmaß. Zur Abschätzung des Wasserverbrauches wurde mit 20 Messtagen gerechnet. Pro Messtag kann von einer maximalen Betriebszeit von zehn Stunden ausgegangen werden. Der durchschnittliche Massenstrom zum Betreiben des Versuchsstandes würde bei etwa 30 kg/h liegen. Aus diesen Bedingungen ergibt sich ein Wasserverbrauch für den gesamten Messzeitraum von etwa 6000 Liter Frischwasser. Wird dieser Betrag in Relation mit sonstigen Wasserverbräuchen der Technischen Universität gesetzt, ist dieses Volumen an Wasser verschwindend gering.

Nach einem Gespräch mit Herrn Dipl.-Ing. Siegfried Pabst (Gebäude und Technik) wurde durch einen externen Installateur ein Kunststoffschlauch für die Wasserzuleitung des Versuchsstandes verlegt. Diese Zuleitung ist am nahegelegenen Betonschneideplatz des Bautechnikzentrums (Inffeldgasse 24, 8010 Graz) angeschlossen und verläuft bis zum Versuchsstand vorerst zum großen Teil oberirdisch (Abbildung 3-14). Dass dieser Aspekt der Verlegung im Betrieb einen entscheidenden Nachteil hatte, war uns in dieser Phase des Projektes noch nicht bewusst.



Abbildung 3-14: oberirdische Wasserzuleitung

Eine besondere Herausforderung die Messtechnik betreffend waren die sehr geringen Massenströme, welche durch die Paneele geschickt wurden. Der Massenstrom, der sich zum Betreiben des Paneels am besten eignet, konnte zuvor bereits durch diverse CFD Simulationen ermittelt werden. Aus den Ergebnissen der Simulationen ergab sich ein Betriebsbereich, der zwischen 10 und 100 l/h liegt (jedoch für ein Element mit der vierfachen Absorberfläche) [14]. Im Zuge der Messkampagne wurde deshalb ein niedrigerer Bereich der Durchflussmenge als in der Simulation (10 bis 50 l/h) abgedeckt. Aus diesem Grund musste in der Auslegung der Hydraulik darauf geachtet werden, dass der Massenstrom variierbar ist. Leider sind die meisten Volumenstrommessgeräte bei diesen geringen Durchflüssen sehr ungenau. Jene Messgeräte, welche mit einer hohen Genauigkeit messen, sind sehr teuer und somit aus finanzieller Sicht für dieses Projekt nicht realisierbar. Der Kosten/Nutzenfaktor wurde hier stark eingebunden und am Ende ist die Entscheidung auf ein magnetisch induktives Messverfahren mit noch vertretbaren Messabweichungen (laut Herstellerangaben) gefallen. Die Messunsicherheit bei diesem Messgerät liegt bei 2,5 % vom Messwert (bei einem Durchfluss von mindestens 0,005 l/h). Für weitere Details zu diesem Durchflussmessgerät befindet sich das dazugehörige Datenblatt im Anhang 4. Eine Alternative dazu wäre ein Coriolis-Messgerät gewesen. Dieses ist zwar sehr genau, jedoch auch ausgesprochen teuer.

In Abbildung 3-15 sind die meisten eingebauten hydraulischen Komponenten zu sehen. Am Eingang der Heizpatrone ist die Wasserzuleitung angeschlossen. Mit Hilfe dieser Heizpatrone sollte eine beliebige Vorlauftemperatur einstellbar sein. Nach der Heizung durchströmt das Wasser ein Druckeinstellventil. Dieses ist dafür zuständig, die Druckschwankungen in der Wasserzuleitung zu kompensieren und nicht auf das Paneel weiterzugeben. Im Anschluss an dieses Ventil wird die Leitung auf zwei Stränge aufgeteilt, wobei ein Strang die Innenseite des Paneels und der zweite Strang die Außenseite des Paneels versorgt. Dabei ist in jeder Leitung ein Strangregelventil zum Einstellen des gewünschten Durchflusses eingebunden. Bei jenem Strang, welcher die Außenseite des Paneels versorgt, wurde zusätzlich ein PT100 (elektrisches Widerstandsthermometer) zur Messung der Vorlauftemperatur integriert. Die beiden schwarzen magnetisch induktiven Messgeräte, die auf der Abbildung 3-15 im Anschluss an die Regelventile zu sehen sind, dienen zur Messung des Volumenstroms. Mit der Dichte des Wassers bei der aktuellen Temperatur kann auf den Massenstrom umgerechnet werden.

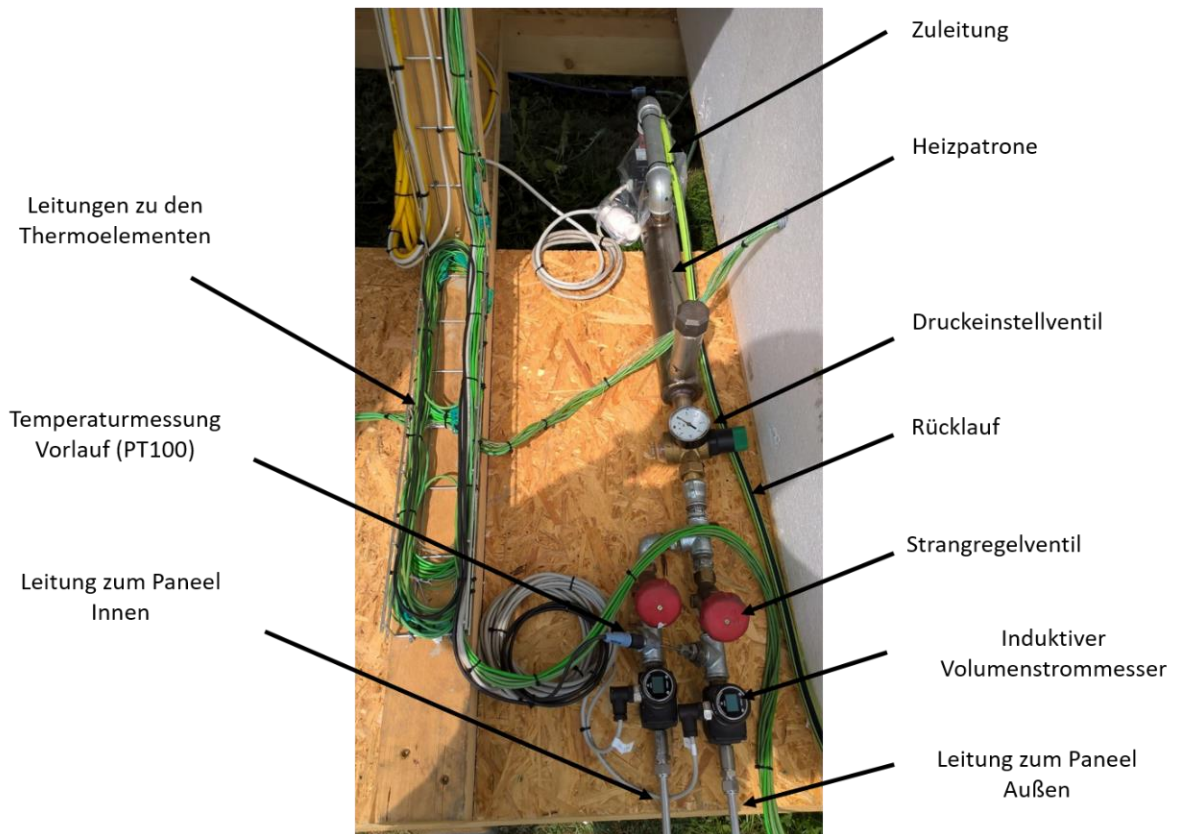


Abbildung 3-15: Hydraulikkomponenten

Abbildung 3-16 zeigt die Rücklaufleitungen mit den eingebauten PT100 zur Messung der Rücklauftemperaturen. Mit der Vorlauf- beziehungsweise Rücklauf-temperatur ist es nun möglich, die Temperaturerhöhung zu messen und mit dieser und dem gemessenen Volumenstrom auf die Leistung des Paneels zu schließen. Nach der Zusammenführung der beiden Rücklaufleitungen wird das Wasser über einen Schlauch abgeleitet und versickert in der Nähe des Versuchsstandes.

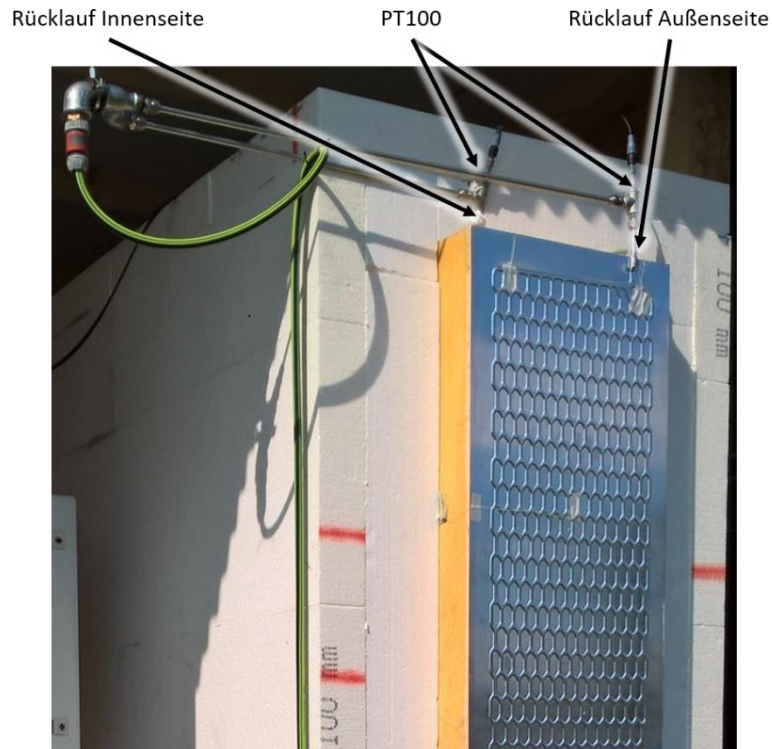


Abbildung 3-16: Rücklaufleitungen mit Temperaturmessung

3.6 Messtechnik

3.6.1 Komponenten der Messtechnik

Um das thermische Verhalten des Paneels und seiner generierten Wärmeleistung durch die Sonne messtechnisch erfassen zu können, bedarf es an unterschiedlichen Komponenten, welche nun folgend näher beschrieben werden. Abbildung 3-17 zeigt beispielhaft eine Variante eines Thermoelementes des Typs k. Von diesem Thermoelement wurden am Versuchsstand insgesamt 30 (29 Stück waren geplant – 1 Stück wurde für eine bessere Steuerung der Vorlauftemperatur noch nachträglich eingebaut) Stück verbaut. In Abbildung 3-18 sind mehrere Ausführungen eines Widerstandsthermometers PT100 zu erkennen. Von diesen Temperaturfühlern wurden drei Stück in den Vor- und Rücklaufleitungen der Hydraulik implementiert (Abbildung 3-15 & Abbildung 3-16). Um den Durchfluss zu messen und somit auf den momentanen Massenstrom zu schließen wurde je ein Messgerät (Abbildung 3-19) in den beiden Vorlaufleitungen (beidseitig durchströmtes Paneel) integriert. Die Datenblätter dieser Sensoren befinden sich im Anhang 4 bis 6.

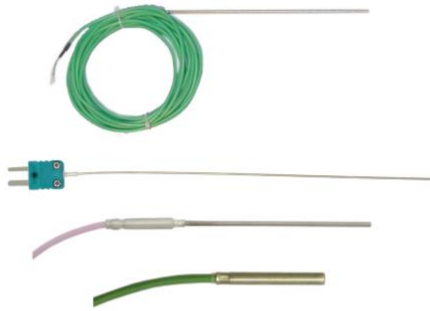


Abbildung 3-17: Thermoelement Typ k



Abbildung 3-18: Widerstandsthermometer PT100



Abbildung 3-19: Durchflusstransmitter OMNI-MID1

3.6.2 Montage der Messtechnik

In den Boxen wurden zur Messung der Innenraumtemperatur mehrere Thermoelemente angebracht (Abbildung 3-21). In der Box mit dem thermisch aktivierten Fassadenelement sind dabei mehr Temperatursensoren verbaut als in der Referenzbox, um dort eine höhere Auflösung der Raumtemperaturdifferenzen in der Messung zu erzielen. In der aktiven Box sind somit sechs Thermoelemente, in der inaktiven Box nur drei Thermoelemente verbaut (Abbildung 3-20).

3 Errichtung des Messaufbaus

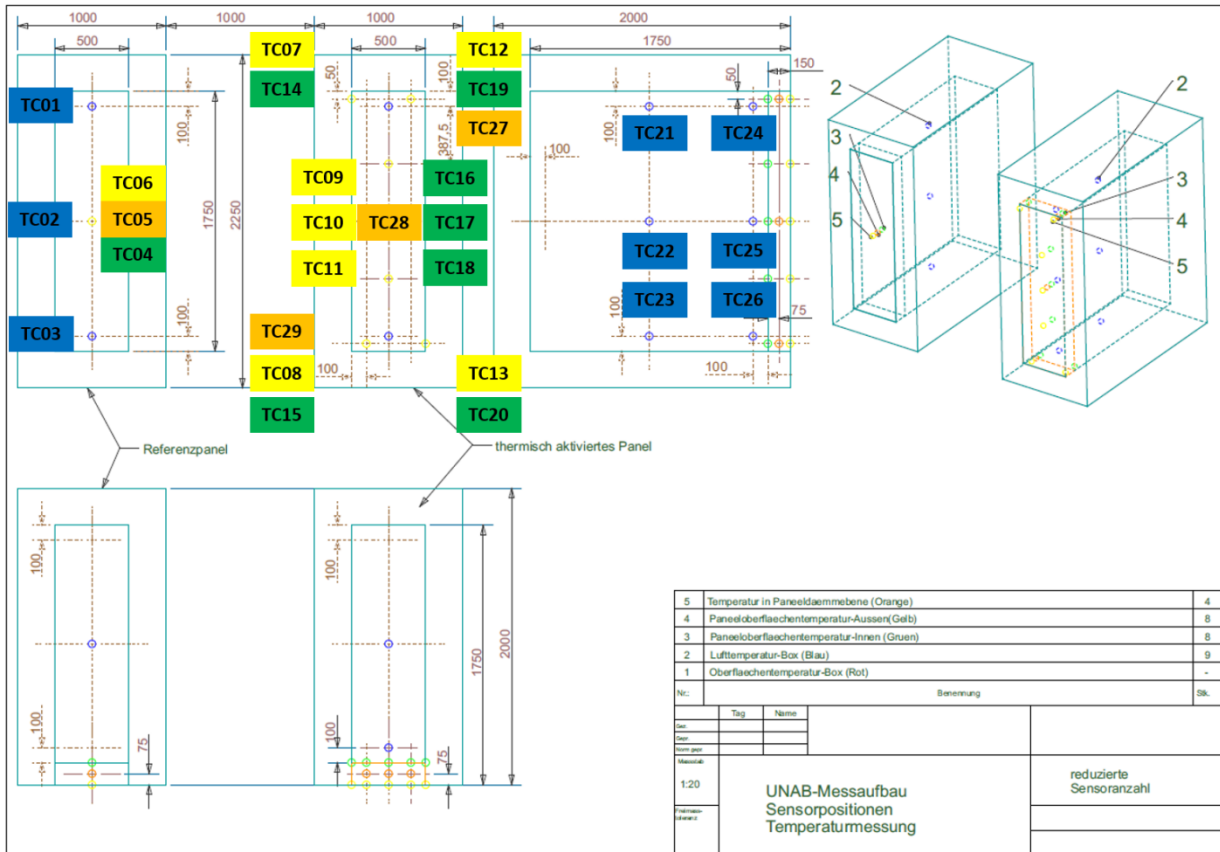


Abbildung 3-20: Position der Thermoelemente

Um den Verlauf der Oberflächentemperaturen in ausreichend genauer Auflösung erfassen zu können beziehungsweise um genügend Punkte für einen Vergleich mit den Ergebnissen aus der Simulation zu haben, sind am aktivierten Fassadenpaneel je sieben Thermoelemente an der Außen- und an der Innenseite angebracht. Im Gegensatz zum aktivierten Paneel ist am Referenzpaneel nur je ein Thermoelement an den Oberflächen montiert, da man von einer einheitlichen Temperatur über die ganze Fläche des Fassadenelements ausgehen kann. Dies hat sich später auch durch die Aufnahmen der Thermographiekamera in Begleitung zu den laufenden Messungen bestätigt. Bei der Anbringung der Oberflächentemperatursensoren galt es, darauf zu achten, dass die Montage der Sensoren selbst an den einzelnen Positionen nicht zur Beeinflussung der Messergebnisse führt. Von diesem Problem sind hauptsächlich die Temperatursensoren betroffen, die der Sonnenstrahlung ausgesetzt sind. Zur Lösung dieses Problems wurden zwei Ansätze verfolgt. Zum Ersten gab es die Möglichkeit einer Klemmung mittels einer Schraube samt Scheibe, zum Zweiten haben wir die Anbringung durch Klebung mittels eines durchsichtigen Klebebandes diskutiert. Bezüglich der geklebten Variante gab es seitens der Beständigkeit über den Aufstellungszeitraum anfangs Bedenken, jedoch konnten wir aus Erfahrungen von Kollegen am Institut profitieren, welche schon geklebte Ausführungen zur Messung verbaut hatten. Diese Kollegen konnten uns das Klebeband Tesa® Ultra empfehlen, bei dem es sich um ein durchsichtiges Gewebeklebeband handelt, welches letzten Endes auch zur

Anwendung kam. Mit dieser Art der Anbringung erhofften wir uns eine möglichst genaue Abnahme der Oberflächentemperatur. Seitens der Thermoelemente wurde auf eine besonders kleine Ausführung der Messspitze geachtet. Das Datenblatt der verwendeten Thermoelemente ist im Anhang 6 zu finden. Bei der zweiten Variante, nämlich der Klemmung mittels Scheibe, wäre die Art der Anbringung mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund der Wärmespeicherkapazität der Scheibe stärker in die Messungen eingeflossen. Diese Wärmespeicherfähigkeit würde eine geringe Phasenverschiebung bei den Messsensoren auslösen und dadurch die Messung geringfügig verfälschen, weshalb wir von dieser Variante Abstand nahmen.

Ein weiterer zu untersuchender Aspekt dieses Versuchszustandes war der Verlauf der Temperaturen im Dämmkern. Da hier beim aktivierten Paneel die Wärme schon am Außenblech der Fassade entzogen wird, sollte sich die Temperatur im Inneren der Dämmung ebenfalls dementsprechend von jener des Referenzpaneels unterscheiden. Um dies zu messen, sind in der Mitte der Dämmung Thermoelemente eingebracht (Abbildung 3-21 rechts). Hierbei wurden am aktivierten Paneel drei Stück über die Höhe aufgeteilt. Am Referenzpaneel befindet sich hingegen nur ein Thermoelement in der Mitte des Paneels. Die Temperatursensoren wurden wie auf Abbildung 3-21 zu sehen ist nachträglich in die fertig ausgehärtete Dämmung eingeführt.



Abbildung 3-21: eingebaute Thermoelemente

Nachdem die einzusetzende Messtechnik festgelegt wurde, wurde der Bestand an Gerätschaften des Institutes für Wärmetechnik in Bezug auf die benötigte Technik durchsucht. Damit die Qualität der Messungen jedoch nicht unter den Sparmaßnahmen leiden muss, wurden für die Messungen der Oberflächentemperaturen von den benötigten 29 Thermoelementen 16 neu gekauft. Diese sind mit einer besonders fein verschweißten Spitze versehen. Durch diese feine

Spitze sind die Elemente genauer anzubringen und aufgrund der sehr kleinen Masse des Schweißpunktes reagieren diese Thermoelemente sehr schnell auf auftretende Temperaturschwankungen. Alle verwendeten Thermoelemente sind vom Typ k. Für die Anbringung an der Oberfläche wurde ein spezielles Klebeband (Tesa® Ultra) verwendet. Auch hierbei ist auf eine minimale Verfälschung durch die Installation geachtet worden.

Für die Aufzeichnung der Messwerte wurde das Programm LabVIEW von National Instruments™ verwendet [17]. Mithilfe dieses Programms wurde eine benutzerfreundliche Oberfläche erzeugt, auf welcher alle angebrachten Messsensoren visualisiert sind (Abbildung 3-22).

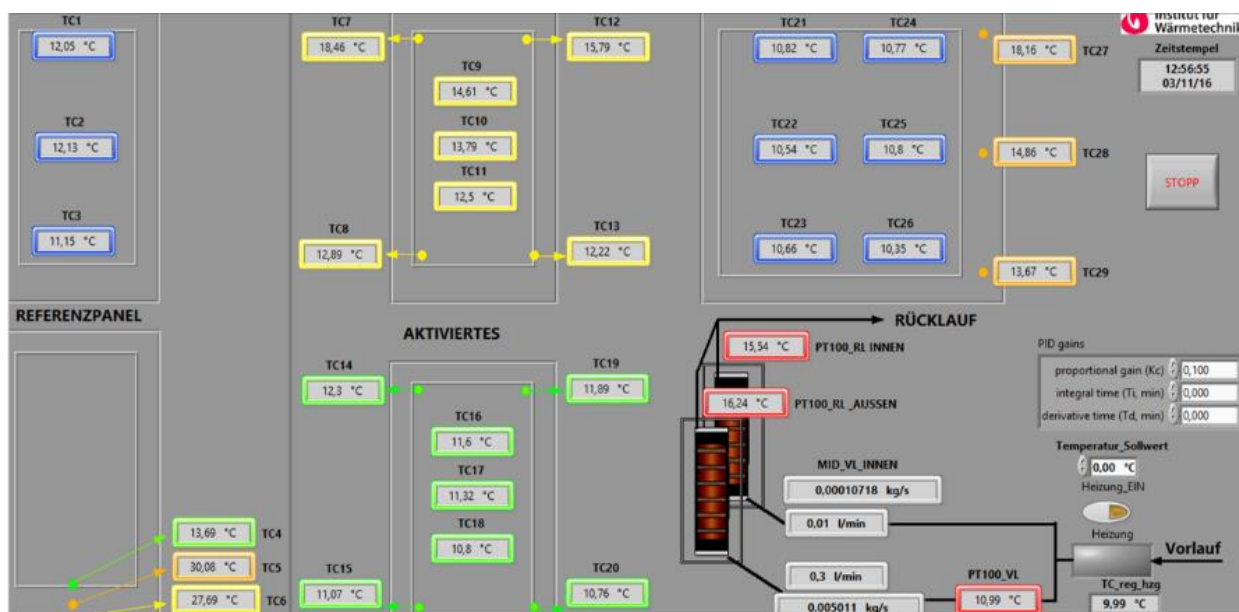


Abbildung 3-22: LabVIEW Oberfläche

Auf der linken Seite ist wie vom Messaufbau gewohnt das Referenzpaneel dargestellt. Die drei Innenraum-Temperatur Sensoren sind oben auf der linken Seite in blau abgebildet. Bei der Darstellung links unten sind die drei Messsensoren im Paneel und an den Oberflächen des Paneels zu erkennen. Bei dieser Visualisierung stellt die Farbe Grün immer jene Thermoelemente dar, welche die Temperatur an der inneren Oberfläche des Paneels, also an jener Seite, welche dem Boxinnenraum zugewandt ist, abnehmen. In orange sind jene Messpunkte gehalten, die in der Mitte der 150 mm starken Dämmschicht eingebaut sind. Die Oberflächensensoren an der Außenseite des Paneels, also an der der Sonne zugewandten Seite, sind mit der Farbe Gelb hinterlegt. Diese Farbcodierung gilt natürlich auch für die aktivierte Box, wobei hier wesentlich mehr Temperatursensoren - vor allem an den Oberflächen - verbaut sind.

Beim aktivierten Paneel kommt es lokal zu unterschiedlichen Temperaturen, vor allem auf der Paneelaußenseite. Dies ist mit der mehr oder weniger gleichmäßigen Durchströmung der Fluidkanäle beziehungsweise mit der resultierenden unterschiedlichen Aufheizung des Fluids in

den einzelnen Kanalabzweigungen über die Paneelhöhe zu erklären. Somit kann auch aufgrund der gemessenen Oberflächentemperaturen bis zu einem gewissen Grad auf die Qualität der Strömungsverteilung geschlossen werden.

3.6.3 Kalibrierung der Temperatursensoren

Um eine genaue Messung der Temperaturen gewährleisten zu können, müssen die Temperatursensoren zuerst kalibriert werden. Dazu wurden alle 32 Sensoren in ein Wasserbecken (LAUDA ECO GOLD RE 1225) mit einstellbarer Temperatur getaucht (Abbildung 3-23).

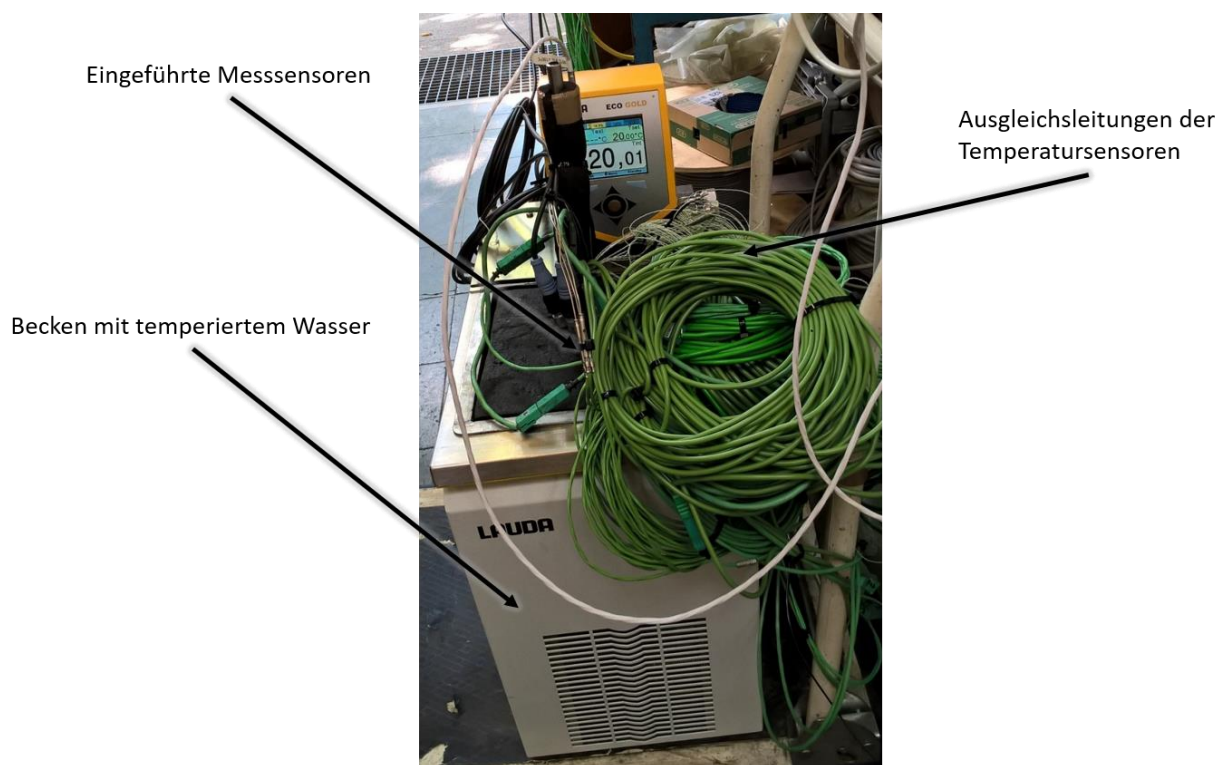


Abbildung 3-23: Kalibrierung im Wasserbecken LAUDA ECO GOLD RE 1225 [18]

Abbildung 3-24 zeigt den gesamten Aufbau der Kalibrierung. In dieser Abbildung sind alle wichtigen Komponenten für die Erfassung der Messungen zu erkennen. Man sieht zum Beispiel den Schaltkasten, welcher unter anderem eine Reihe von Modulen für die Signalumwandlung der Temperatursensoren beinhaltet. Dabei werden die analogen Ausgangssignale der Messsensoren in digitale Signale umgewandelt, um diese anschließend im LabVIEW sichtbar zu machen und weiter zu verarbeiten. Außerdem sind in diesem Schaltkasten noch die allgemeine Spannungsversorgung und die Ansteuerung der elektrischen Heizpatrone untergebracht. Das Notebook ist dabei mittels Netzkabel mit dem Schaltkasten verbunden. Bei der Kalibrierung der Sensoren ist es von großer Bedeutung, dass alle Kabel, die so genannten Ausgleichsleitungen, nach der Kalibrierung nicht mehr verlängert oder gekürzt werden. Dies beruht darauf, dass jede

3 Errichtung des Messaufbaus

elektrische Leitung einen gewissen Eigenwiderstand aufweist, welcher bei anschließender Veränderung der Leitungslänge die Messungen verfälschen würde. Deshalb ist es wichtig, dass bei der Kalibrierung die gesamte Messkette (Sensor, Leitung, Messdatenerfassung) vorhanden ist.

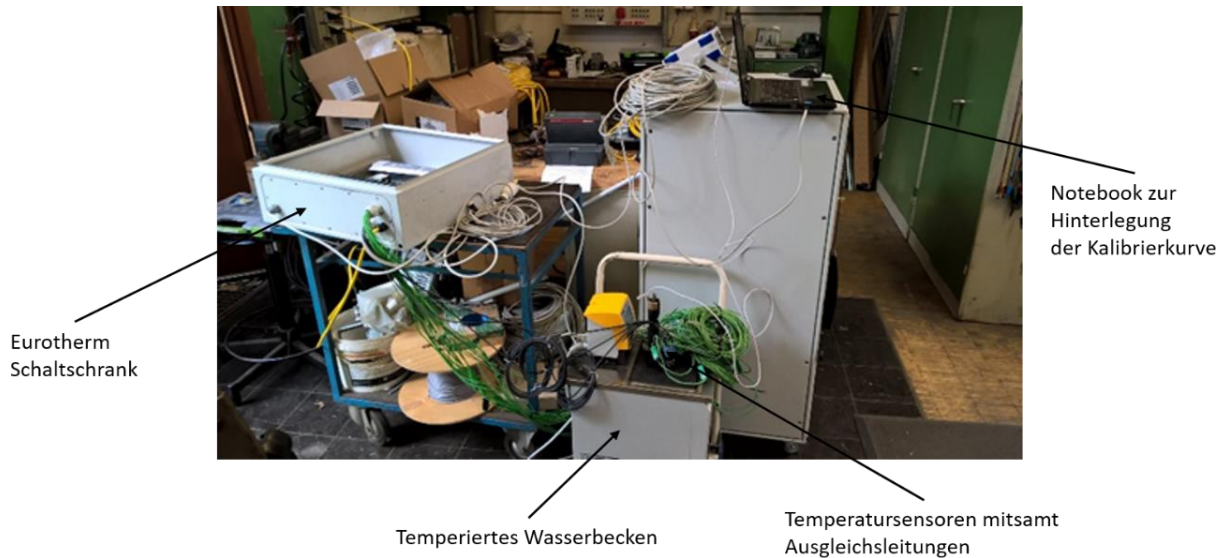


Abbildung 3-24: Aufbau der Kalibrierung

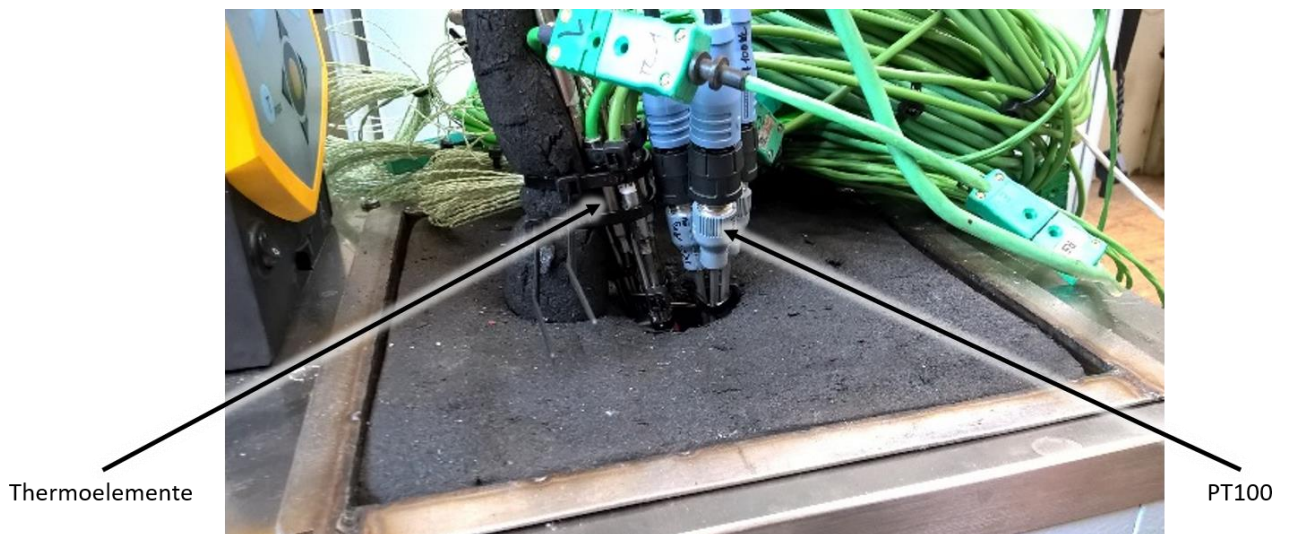


Abbildung 3-25: Temperatursensoren im Wasserbecken eingetaucht

Der Ablauf der Kalibrierung stellt sich folgendermaßen dar: Es werden alle Sensoren in das Wasserbecken eingetaucht (Abbildung 3-25). Danach werden dem Becken mehrmals verschiedene Temperaturen verteilt auf das zu messende Intervall (+10 °C bis +75 °C) zugeteilt, welche dieses nach Abwarten einiger Minuten mit hoher Konstanz (+/- 0,01 K laut Hersteller) halten kann. Des Weiteren ist in diesem Becken ein zusätzliches, geeichtes Thermometer (Dostmann T995; Genauigkeit +/- 0,015 °C laut Hersteller) eingebracht, um die genaue Temperatur zu messen, da die integrierte Temperaturanzeige des Beckens derzeit nicht geeicht

ist. Anschließend wird über LabVIEW eine Temperaturmessung aller Sensoren von fünf Minuten für eine Temperatur im Messintervall aufgezeichnet. Sobald diese Aufzeichnung abgeschlossen ist, werden die gespeicherten Werte der einzelnen Sensoren gemittelt. Durch diesen Vorgang ist die mittlere Abweichung der Sensoren klar ersichtlich. Diese Temperaturdaten werden anschließend in ein eigens zu diesem Zweck geschriebenes Excel-File geladen, welches bei Herrn Sackl Markus in der Werkstätte aufliegt. Mit diesen Daten erzeugt das Excel-File Korrekturfaktoren, welche nun der Messkurve im LabVIEW hinterlegt werden (Abbildung 3-26). Zum Abschluss wurde eine Kontrollmessung bei 30 °C angefahren. Da bei dieser Kontrollmessung die Genauigkeit von $\pm 0,15$ K eingehalten werden konnte, war der Kalibriervorgang damit erfolgreich abgeschlossen.

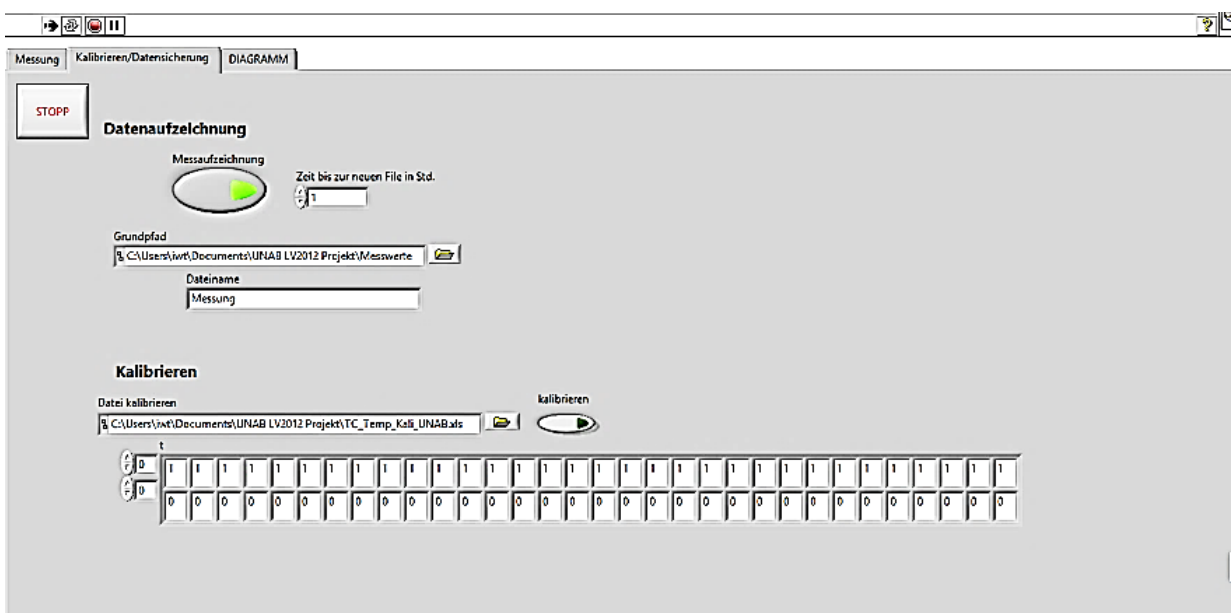


Abbildung 3-26: LabVIEW Aufzeichnung und Kalibrierung

4 AUSBAUSTUFEN DES INTEGRALEN FASSADENELEMENTES UND VERBESSERUNGEN AM VERSUCHSSTAND

4.1 Ausbaustufen

Bei den Messungen am Versuchsstand kamen verschiedene Ausbaustufen zum Tragen. Auch wurden wir beim Betrieb dieses Versuchsstandes mit unerwarteten Problemen konfrontiert, die zu diversen Verbesserungen am Messaufbau führten, welche im nächsten Abschnitt genauer erläutert werden.

4.1.1 Ausbaustufe 1 – Oberfläche Aluminium

Wie auf den bisherigen Abbildungen (beispielsweise Abbildung 3-11) zu sehen ist, bestehen die beiden begrenzenden Bleche des Sandwichpaneels aus Aluminium. Ausbaustufe 1 stellt also die Variante des Fassadenelementes direkt nach seiner Herstellung dar. Dieses Metall besitzt zwar eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, welche für den Wärmeübergang auf das Fluid durchaus von Vorteil ist, jedoch reflektiert diese Aluminium-Oberfläche in unbehandelter Form sehr viel der einfallenden Sonnenstrahlung. Ebenso ist der Absorptionsgrad des unbehandelten Aluminiums aufgrund des hohen Reflexionsgrades im Vergleich zu einer beschichteten Oberfläche sehr niedrig (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Eigenschaften Aluminium bezüglich der Sonnenstrahlung

Eigenschaften Aluminium	Reflexionsgrad τ	Mittlerer Absorptionsgrad für Sonnenstrahlung α	Hemisphärischer Gesamtemissionsgrad ϵ
Aluminium hochglänzend	0,8-0,85	0,2	0,04
Aluminium mattiert	0,5-0,7	0,2	0,04

4.1.2 Ausbaustufe 2 – Solarlack

Bei der Ausbaustufe 2 wurde ein spezieller, nicht spektral selektiver Solarlack (das Datenblatt befindet sich im Anhang 3) mit Hilfe einer Druckluft-Spritzpistole direkt am Versuchsstand auf das Paneel aufgetragen. Dabei wurden die Thermoelemente an der Oberfläche sowie die zum Anbringen der Temperatursensoren (oder der Thermoelemente) verwendeten Klebestreifen mitlackiert, um über die gesamte Oberfläche eine durchgehende Beschichtung sicherzustellen

(Abbildung 4-1). Tabelle 4-2 zeigt die wesentlichen Eigenschaften des Solarlacks in Bezug auf seine Verwendung. Durch seine dunkle Farbe und die daraus resultierende erhöhte Absorption der Sonnenstrahlung kommt es auf der Oberfläche zu weitaus höheren Temperaturen und in weiterer Folge zu einer Erhöhung des Temperaturniveaus in der Rücklaufleitung im Vergleich zur Ausbaustufe 1 mit dem blanken Aluminiumblech (siehe Messauswertung in Kapitel 5.3.3).

Tabelle 4-2: Eigenschaften Solarlack

Eigenschaften Solarlack	Temperaturbeständigkeit t	Absorptionskoeffizient α	Emissionskoeffizient ϵ
Solarlack M 40 Li	-60°C bis +250°C	0,95	0,86

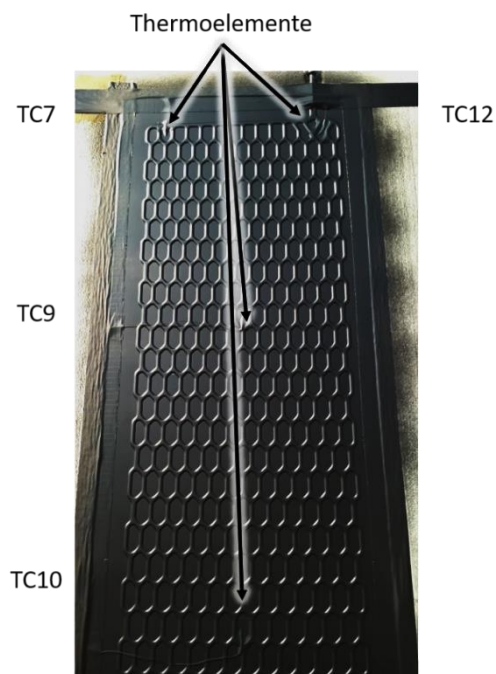


Abbildung 4-1: Paneel mit aufgebrachtem Solarlack

4.1.3 Ausbaustufe 3 – Glasabdeckung

Bei der Glasabdeckung handelt es sich um eine Klarglasscheibe mit möglichst hohem Energiedurchlassgrad. Diese Glasscheibe bringt den wesentlichen Vorteil, dass trotz des geringeren auf den Absorber auftreffenden solaren Strahlungsanteils (Reflexionen durch die Glasscheibe) der Einfluss des Windes und somit der konvektive Wärmeverlust erheblich vermindert wird. Somit können vor allem bei kälteren Witterungsverhältnissen bessere Leistungen über das Paneel erbracht werden. Bei dieser Glasscheibe wird aus Gründen des hohen Energiedurchlassgrades wahrscheinlich nicht ein Verbundsicherheitsglas (VSG) zur Anwendung

kommen, sondern eine einfache, spannungsgehärtete Sicherheitsglasscheibe (Einscheibensicherheitsglas, ESG).

Diese Ausbaustufe kommt im Rahmen dieser Masterarbeit leider aus zeitlichen und saisonalen Gründen nicht mehr zustande, sondern wird weiterführende Projekte an diesem Versuchsstand betreffen.

4.1.4 Ausbaustufe 4 – Glasabdeckung mit aufgeklebten Photovoltaikzellen

Eine zusätzliche Möglichkeit bei der Ausführung einer Vorsatzscheibe ist, diese mit Photovoltaikzellen zu versehen, um zusätzlich auch noch solare Strahlung in Elektrizität umzuwandeln. Diese Photovoltaikzellen können entweder zwischen zwei Scheiben in einem VSG-Verbund eingebettet oder auf einer ESG-Scheibe auf der Rückseite aufgeklebt sein. Somit kann an der vorderen Glasabdeckung Strom direkt abgenommen werden und die Sonnenstrahlung, welche zwischen den Zellen auf das Paneel trifft, kann zur Warmwassergenerierung herangezogen werden. Bei der Ausführung dieser Abdeckung wird ein Verhältnis des Anteils an Photovoltaikzellen zur freien Glasscheibenfläche (welche die Sonnenstrahlung weitestgehend unbehindert durchlässt) von etwa 0,5 angestrebt. Dabei können die Zellen in Form von verschiedenen Mustern angebracht werden.

Bei der Betrachtung der maximalen Ausbeute (Strom- und Wärmegenerierung) wird die Variante mit der ESG-Scheibe etwas effizienter sein, da mit diesem System nur eine Scheibe vor der Fassade eingebracht wird und somit weniger an Sonnenstrahlung durch die Glasscheibe reflektiert beziehungsweise absorbiert wird. Aus Sicherheitsgründen wird üblicherweise jedoch die VSG-Ausführung bevorzugt verwendet und ist bei Überkopfmontage sogar gesetzlich verpflichtend. Der Vorteil des Verbundsicherheitsglases (VSG) ist jener, dass bei einem Bruch der Scheiben keine Glasstücke herabfallen können, da diese durch die zwischen den beiden Scheiben liegende Folie zusammengehalten werden. Nachteilig sind hier aber die höheren Investitionskosten und das höhere Gewicht. Abbildung 4-2 zeigt ein Dach aus Verbundsicherheitsglas mit eingearbeiteten Photovoltaikzellen. Dabei sind die Abstände zwischen den Zellen gut zu erkennen.



Abbildung 4-2: Nipon Industrial College, Tokyo;2001 [19]

4.2 Verbesserungen und Modifikationen

Aufgrund von unerwarteten Schwierigkeiten und/oder nicht kalkulierten (kalkulierbaren) Fehlerquellen mussten noch ein paar Modifikationen am Versuchsstand durchgeführt werden.

4.2.1 Zu warmes Wasser in der Zuleitung

Im Zuge der Inbetriebnahme des Messaufbaus und der ersten Messversuche bei thermischer Aktivierung des Fassadenelementes wurden zu hohe Wassertemperaturen am Zulauf festgestellt. Die Ursache lag klarerweise an der ungefähr 50 m langen Zuleitung aus schwarzem Kunststoff (ähnlich wie ein Schwimmbadabsorber), welcher direkt von der Sonne beschienen wurde (ursprünglicher (oberirdischer) Verlauf des Schlauches siehe Abbildung 4-4), in Kombination mit den sehr niedrigen Massenströmen. Somit war es uns bei diesem Versuchsstand mit dieser Art von Zulaufleitung nicht möglich, den Innenraum der Boxen zu kühlen, da das Wasser in der Zuleitung nicht selten eine Temperatur von 30 °C beim Versuchsstand überschritt. Um dieses Problem in den Griff zu bekommen, wurden verschiedene Lösungen diskutiert. Einer dieser Ansätze war es, den Schlauch auf seiner gesamten Länge zu dämmen und somit eine Aufheizung des Wassers gering zu halten. Da wir uns aber nicht sicher waren, ob diese Maßnahme für eine ausreichend kühle Vorlauftemperatur sorgen würde, überlegten wir, ob der Schlauch mittels Bagger ins Erdreich eingegraben werden sollte. Letzten Endes haben wir uns jedoch aus

4 Ausbaustufen des integralen Fassadenelementes und Verbesserungen am Versuchsstand

budgetären Gründen für die arbeitsintensivste, jedoch kostengünstigste Variante entschieden und haben den Schlauch manuell ca. 30 cm in den Boden eingegraben (Abbildung 4-3). Den Verlauf der eingegrabenen Zuleitung zeigt die nachfolgende Abbildung 4-4.



Abbildung 4-3: Eingraben der Zuleitung

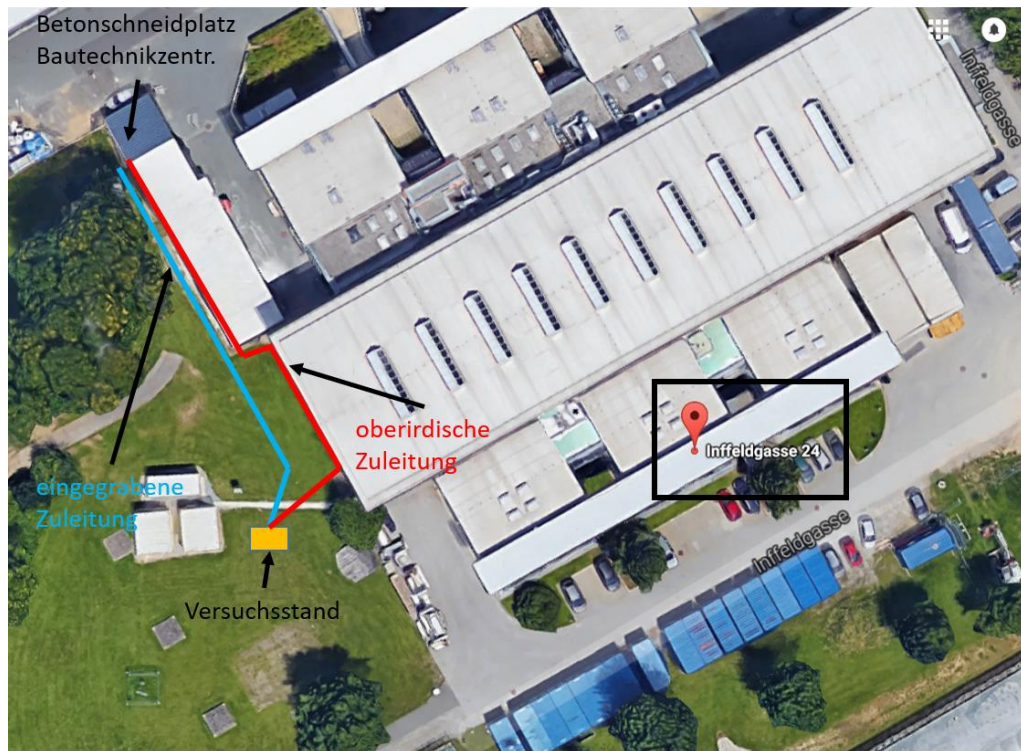


Abbildung 4-4: Position der Zuleitungen

Durch diese Maßnahme wurde nun eine maximale Vorlauftemperatur von 22 °C erreicht. Ein weiterer positiver Aspekt durch die Eingrabung war jener, dass die Zuleitung nun bei den Mäharbeiten am Gelände keinem Risiko mehr ausgesetzt ist.

4.2.2 Strangreguliertventile

Beim Test des Versuchsstandes hat sich gezeigt, dass die eingebauten Strangreguliertventile (Abbildung 4-5) für unsere Anwendung zum einen überdimensioniert sind und zum anderen zu ungenau arbeiten. Der Hauptgrund für die Verwendung solch überdimensionierter Ventile war die Tatsache, dass im Zeitraum des Aufbaus und der Messungen keine anderen Ventile verfügbar waren und dass das Projekt, das den Messaufbau finanziert, keine weiteren finanziellen Aufwände mehr zuließ. Ein weiterer negativer Aspekt dieser Ventile ist die beobachtete Veränderung des Durchflusses bei Schwankungen der Umgebungstemperatur beziehungsweise bei Veränderung der Fluidtemperatur. Diese Abweichungen des eingestellten Massenstromes sind auch in den Abbildungen der Messauswertungen deutlich zu sehen, weil der Durchfluss mit steigender Temperatur abnimmt. Es wird vermutet, dass sich der Ventilsitz mit der Temperaturschwankung dementsprechend ausdehnt beziehungsweise zusammenzieht. Der Versuchsstand wurde dennoch mit diesen Ventilen betrieben, da sich der verändernde Massenstrom zwar auf die erreichbare Maximaltemperatur im Rücklauf auswirkt, aber diese Veränderung auch ständig durch die Durchflusszähler aufgezeichnet wird und somit bei der Leistungsberechnung ebenfalls einfließt. Aus diesem Grunde ist die Leistungsberechnung dennoch korrekt.

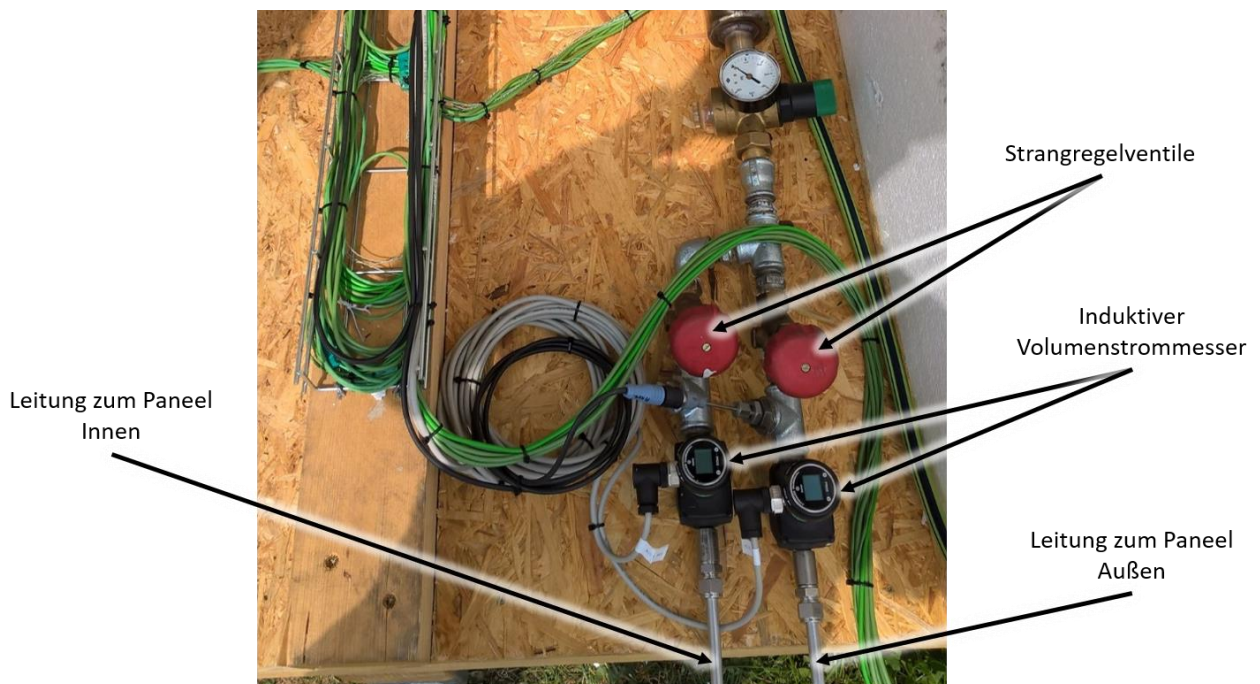


Abbildung 4-5: Strangregelventile für die beiden Vorläufe

4.2.3 Einstellbare Vorlauftemperatur

Am Ende der Zuleitung (kurz bevor die Leitung aufgeteilt wird) strömt das Wasser in eine elektrische Heizpatrone (Abbildung 4-6). Diese sollte zur Einstellung einer gewünschten Vorlauftemperatur dienen. Auch diese Heizpatrone war keine Neuanschaffung für dieses Projekt. Hier hat sich aufgrund der kleinen Durchflüsse ebenfalls das Problem einer Überdimensionierung gezeigt. Für die Regelung der Wassertemperatur wurde davon ausgegangen, dass der eingebaute PT100 nach dem Strangregulierungsventil als Temperaturfühler für die Ist-Temperatur fungieren sollte. Bei dem Versuch, eine Vorlauftemperatur halbwegs konstant auf einem Wert zu halten, hat sich jedoch herausgestellt, dass dieses System nicht regelbar ist. Das liegt erstens an dem zu großen Abstand des PT100 zur Heizpatrone und zweitens an dem zu leistungsstarken eingebauten Elektroregister. Die lange Regelstrecke bis zum Temperaturfühler wurde mit einem zusätzlichen Thermoelement direkt am Heizrohr beseitigt. Nun funktioniert die Aufheizung und die Beibehaltung einer eingestellten Soll-Temperatur mit einer Schwankung von $\pm 1,5$ °C. Da auch hier die Temperatur am hydraulischen Eingang des Paneels ständig aufgezeichnet wird, ist die Leistungsberechnung über die Temperaturdifferenz am Ausgang und am Eingang des Paneels gültig.



Abbildung 4-6: Heizregister zum Einstellen der Vorlauftemperatur

5 ERGEBNISSE DER MESSUNGEN AM VERSUCHSSTAND

In erster Linie dienen die Messungen am Versuchsstand zum Nachweis einer erbrachten Wärmeleistung, welche durch das betrachtete integrale Fassadenelement an der zur Sonne zugewandten Seite generiert wird. Aber auch weitere, durch den Vergleich der beiden Paneele erhaltene Daten, wie beispielsweise das Verhalten der jeweiligen Oberflächentemperaturen der zwei Paneele, wurden betrachtet. Um eine Reihe von brauchbaren Messwerten zu erhalten, wurde der Versuchsstand so konzipiert, dass verschiedene Szenarien damit abgehandelt werden können.

5.1 Szenarien

Grundsätzlich können bei diesem Versuchsstand 4 Parameter variiert werden. Diese Parameter sind in Abbildung 5-1 rund um die Basiseinstellung zu sehen. Die Basis wird mit folgenden Parametern betrieben:

- $T_{VL} \approx 20^\circ\text{C}$ Variation der Vorlauftemperatur
- $\alpha = 0,95$ Variation des Absorptionsgrades der Oberfläche
- $\dot{V}_{VLI} = 0 \frac{\text{l}}{\text{h}}$ Variation des Durchflusses Innen
- $\dot{V}_{VLA} = 20 \frac{\text{l}}{\text{h}}$ Variation des Durchflusses Außen

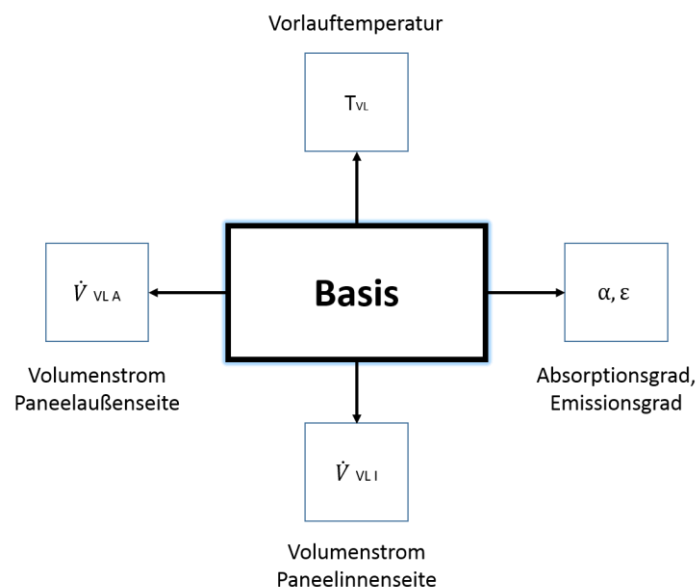


Abbildung 5-1: Parametervariationen

5.1.1 Variation von α

Bei der Variation von α ist der Unterschied zwischen der blanken, nicht-beschichteten Aluminiumoberfläche und der später mittels Solarlack beschichteten Oberfläche gemeint. Hier ist es also möglich, zwei ähnliche Tage mit den beiden Ausführungen zu betrachten und auf diese Weise die Steigerung des Wärmeertrages zu beurteilen. Diese Modifizierung der Paneel-Oberfläche wurde am 13.09.2016 durchgeführt.

5.1.2 Variation der Durchflüsse

Der Versuchsstand wurde so konzipiert, dass die beiden Durchflüsse, also jener für die Innenseite und jener, welcher die zur Sonne geneigten Außenseite durchströmt, variabel einstellbar sind. Dabei wurde im Vorfeld mittels Simulation ein sinnvoller Durchfluss von maximal 50 l/h ermittelt. Bei den praktischen Feldversuchen am Versuchsstand wurde meist ein Durchfluss von 20 l/h bis 25 l/h gewählt, da hierbei noch eine ausreichende Temperaturerhöhung im Paneel auftrat, welche in den Diagrammen bei der Auswertung gut ersichtlich ist.

Auf der Innenseite, also jener Seite, welche die Box innen konditioniert, ist der Durchfluss für die Kühlung und die Heizung des Raumes ebenfalls variabel einzustellen.

Der Durchfluss der beiden Stränge sollte sich aufgrund des gewählten Durchflussmessgerätes zwischen 0 l/h und 60 l/h bewegen. Sollten höhere Durchflüsse gewählt werden, müsste das Messgerät ausgetauscht werden, da diese somit außerhalb des Messbereichs der Instrumente liegen würden.

5.1.3 Variation der Vorlauftemperatur

Um verschiedene Vorlauftemperaturen einstellen zu können, ist im Versuchstand eine elektrische Heizpatrone in der Zuleitung installiert. Diese Heizpatrone wurde aus Kostengründen nicht neu angeschafft, sondern aus einem vorhandenen Versuchsstand, welcher nicht mehr benötigt wurde, ausgebaut, gereinigt und wiederverwendet. Der Hauptgrund für die variable Vorlauftemperatur ist jener, eine steigende Speichertemperatur beim Aufheizen über das Paneel simulieren zu können. Ein weiterer Grund für die Installation des Heizregisters war der Gedanke, bei tiefen Temperaturen die Box heizen zu können. Unglücklicherweise waren wir anfangs mit Problemen bei der Steuerung dieser Heizpatrone konfrontiert (siehe Kapitel 4.2.3). Bis wir das Problem einigermaßen im Griff hatten, war die Messsaison schon fast abgeschlossen, sodass die Variation der Vorlauftemperatur nicht mehr angewandt, sondern nur mehr auf Funktionalität überprüft werden konnte. Aus diesem Grund gibt es im Kapitel 5.3 zu dieser Parametervariation keine Messauswertung.

5.2 Vergleichsmessung (ohne Durchfluss)

Hierzu wurde eine Messung ohne Durchfluss des aktivierbaren Panels durchgeführt. Grund dafür ist, dass das durchströmte Panel einen Dämmkern aus Polyurethan besitzt, während das Referenzpanel mit einer ökologischeren Variante, nämlich Mineralwolle, gedämmt ist. Wie in Abbildung 5-2 ersichtlich, ergeben sich dadurch zum Teil relativ eindeutige Temperaturunterschiede im zur Sonne gerichteten Bereich. Je weiter in Richtung Boxeninnenraum gemessen wird, desto geringer werden die Temperaturdifferenzen. Auf der Innenseite der Paneele ist schlussendlich kaum mehr ein Unterschied zu erkennen und es stellen sich beinahe idente Temperaturen auf der Oberfläche ein.

Die Erklärung dafür vermuten wir in der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der beiden Materialien. Während das Polyurethan ein $\lambda = 0,024 - 0,035 \frac{W}{mK}$ aufweist, bewegt sich die Wärmeleitfähigkeit bei der Mineralwolle im Bereich von $\lambda = 0,030 - 0,050 \frac{W}{mK}$! Ein weiterer Grund für die nicht identen Temperaturverläufe ist die Tatsache, dass diese beiden Materialien eine unterschiedliche Wärmespeicherfähigkeit besitzen. Grundsätzlich korrelieren die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmespeicherfähigkeit mit der Dichte des Materials. Da die Mineralwolle erheblich schwerer als das Schaummaterial Polyurethan ist, sind die unterschiedlichen Verläufe wahrscheinlich ein Resultat der unterschiedlichen Dichte. Dass der Vergleich der beiden Boxen dennoch zulässig ist, beruht auf den fast identen Temperaturen an der Paneeleinnenseite (wie bei den Messungen und in Abbildung 5-2 zu erkennen ist). Aus dem Verlauf der Temperaturen kann die Erkenntnis gewonnen werden, dass sich die Temperaturen an den Oberflächen der Bleche des Fassadenelements mit zunehmender Stärke der Wärmedämmung immer mehr annähern und somit der Effekt der unterschiedlichen Dämmungen immer kleiner wird.

Bezugnehmend auf die Temperaturunterschiede an der Außenseite des Panels kann von einer noch höheren Oberflächentemperatur gegenüber jener am Vergleichspaneel gemessenen Temperaturausgangenen werden. Das wiederum bedeutet, dass noch höhere Rücklauftemperaturen möglich sind, wenngleich diese Erhöhung maximal 3 K, meistens aber noch weniger an Temperaturdifferenz in der Rücklaufleitung des Fluids ausmacht. Aus diesem Grund ist ein Vergleich der beiden Paneele gültig, da die Abweichung durch die unterschiedliche Dämmung marginal ist. Diese beiden unterschiedlichen Verläufe sind in der Abbildung 5-2 mit der roten und der darunterliegenden blauen Linie dargestellt.

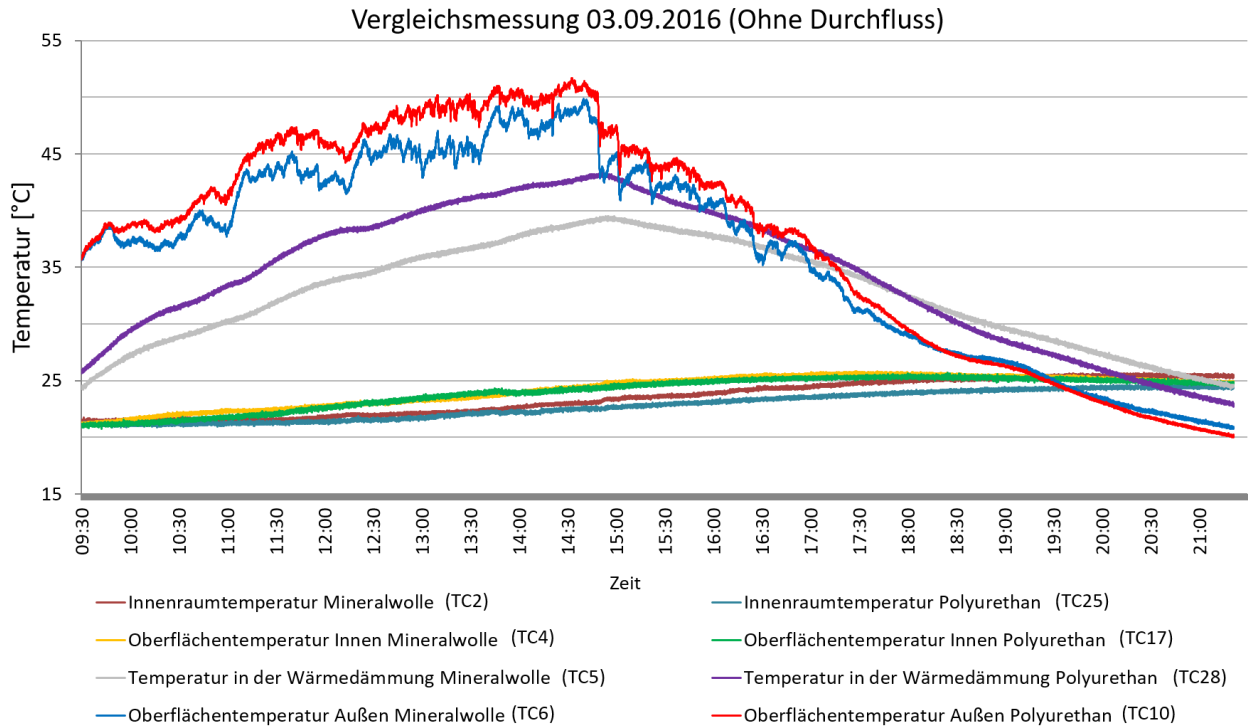


Abbildung 5-2: Vergleichsmessung der beiden Paneele

Beim Vergleich der Temperaturen innerhalb der Wärmedämmung zwischen dem Referenzpaneel mit der Mineralwollendämmung (grauer Temperaturverlauf) und dem Paneel mit der Polyurethandämmung (violette Linie) kann der Unterschied in der spezifischen Wärmekapazität gut erkannt werden. Dass die Temperatur der Mineralwolle bei Sonneneinstrahlung unter jener des Polyurethan liegt, beruht auf der Tatsache, dass die Mineralwolle ein klein wenig mehr Wärme speichern kann und diese Wärme auch besser leiten kann. Die Speicherkapazität des Polyurethans ist im Vergleich jedoch rasch ausgeschöpft und somit wird dieses Material schneller warm. Ganz markant ist jener Punkt, wo sich diese beiden Linien kreuzen. Wird das Paneel von der Sonne nicht mehr beschienen, kühlt die Polyurethandämmung schneller aus als die Dämmung aus Mineralwolle, da das Polyurethan weniger an Wärmeenergie über den Tagesverlauf speichern kann. An dieser Stelle sollte auch erwähnt werden, dass die Positionierung der Temperatursensoren ebenfalls einen geringen Einfluss haben könnte. Es wurde zwar bei der Einführung der Sensoren in das Dämmmaterial auf die korrekte Position geachtet, jedoch könnte es dabei zu geringen Abweichungen gekommen sein. Eine messtechnische Erfassung ist hier aber nicht möglich, eine eventuelle Abweichung sollte sich jedoch in einem Toleranzbereich von nur wenigen Millimetern befinden.

Beim Vergleich der beiden Temperaturverläufe, die an der Oberfläche des Innenblechs gemessen wurden (Verlauf der gelben und der grünen Linie), tritt kaum mehr ein Unterschied auf. Je dicker die Dämmschicht ist, desto kleiner wird somit die Temperaturdifferenz im Vergleich der beiden Dämmmaterialien sein. Bei der vorhandenen Stärke von 150 mm liegen deshalb wie in Abbildung

5-2 ersichtlich nahezu dieselben Temperaturen auf der Paneeloberfläche an der Boxinnenseite vor.

5.3 Messungen

Insgesamt wurde an 22 Tagen gemessen, wobei es sich bei der Messung am 31.08.2016 um die erste Probemessung handelt und an diesem Tag vorwiegend der Versuchsstand mit seinen Funktionen getestet wurde. Deshalb ist dieser Tag nicht in der Tabelle 5-1 mit der Auflistung der Temperatur und Niederschlagsdaten angeführt. Von den anderen 21 Messtagen, welche in den Monaten September, Oktober und November lagen, sind in der Tabelle 5-1 die Höchsttemperatur sowie die Tiefsttemperatur und der Niederschlag dieser Tage zu sehen. Prinzipiell wurde der Versuchsstand nur an Tagen aktiviert, an denen auch die Sonneneinstrahlung und die Außentemperatur entsprechend hoch waren, sodass hier von einem gut messbaren Ertrag ausgegangen werden konnte. An Tagen mit Schlechtwetter wurde der Versuchsstand also nicht betrieben.

Da in dieser Ausbaustufe des Versuchsstandes der Betrieb mit Leitungswasser läuft und bei der Hydraulik kein Wasserkreislauf installiert ist, kann diesem Wasser kein Frostschutz beigemischt werden. Das hat den Nachteil, dass der Betrieb nur an frostfreien Tagen aufgenommen werden kann. Damit ist der Aufzeichnungsstopp für Messungen mit dem thermisch aktivierten Fassadenelement im Dezember zu erklären.

Der Versuchsstand wurde vor der Frostperiode wintersicher gemacht, was heißt, dass sämtliche gefährdete Leitungen entleert wurden und die Zuleitung vom Schneideplatz des Bautechnikzentrums abgeschlossen wurde. Somit war ein sicheres Überwintern der Hydraulik gewährleistet.

Tabelle 5-1: Temperaturen und Niederschlag an den aufgezeichneten Tagen

Datum	Höchsttemperatur/ Tiefsttemperatur	Niederschlag
01.09.2016	26°/12°	11 mm
02.09.2016	27°/14°	0 mm
07.09.2016	24 °C/12 °C	0 mm
08.09.2016	26 °C/13 °C	0 mm
12.09.2016	29 °C/13 °C	0 mm
14.09.2016	26 °C/14 °C	1 mm
15.09.2016	26 °C/11 °C	0 mm
16.09.2016	27 °C/11 °C	0 mm
20.09.2016	20 °C/10 °C	0 mm
21.09.2016	17 °C/6 °C	0 mm
23.09.2016	21 °C/5 °C	0 mm
29.09.2016	24 °C/7 °C	0 mm
30.09.2016	24 °C/7 °C	0 mm
13.10.2016	12 °C/-2 °C	0 mm
19.10.2016	9 °C/7 °C	32 mm
20.10.2016	7 °C/6 °C	20 mm
27.10.2016	14 °C/5 °C	0 mm
28.10.2016	13 °C/3 °C	0 mm
31.10.2016	12 °C/-1 °C	0 mm
02.11.2016	17 °C/1 °C	5 mm
03.11.2016	12 °C/4 °C	3 mm

5.3.1 Auswertungen von Messtagen

Es wurden alle vorhandenen Messtage mit Hilfe der Software Excel ausgewertet. Dabei wurden die aufgezeichneten Sekundenwerte auf 10-Minutenwerte beginnend mit der Uhrzeit 00:00 bereinigt, es wurde also immer nur eine Messaufzeichnung alle 10 Minuten herausgepickt und in ein eigenes File geschrieben. Die Durchführung dieses Vorgangs erfolgte mithilfe eines Makros, da eine manuelle Bearbeitung der Daten in diesem Umfang nicht mehr möglich gewesen wäre. Dieser Schritt war erforderlich, da die erhaltenen Wetterdaten der Zentralanstalt für

Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) ebenfalls in einem Intervall von 10 Minuten aufgezeichnet wurden. Anschließend wurden Diagramme aus einigen gegenübergestellten Messwerten je Messtag erstellt. Unter anderem wurden in einem dieser Diagramme die Messwerte der von der Sonne kommenden Globalstrahlung, gemessen auf die horizontale Fläche, mit der durch das Fassadenelement generierten spezifischen Paneelleistung verglichen.

$$\dot{q}_P = c_W * \dot{m}_A * \frac{(T_{RL} - T_{VL})}{A_P} \quad (5-1)$$

$$\dot{Q}_P = \dot{q}_P * A_P \quad (5-2)$$

\dot{Q}_P Paneelleistung [W]

\dot{q}_P spezifische Paneelleistung [$\frac{W}{m^2}$]

c_W spezifische Wärmekapazität von Wasser [$\frac{J}{kg * K}$]

\dot{m}_A Massenstrom Paneel Außen [$\frac{kg}{s}$]

T_{RL} Rücklauftemperatur [K]

T_{VL} Vorlauftemperatur [K]

Diese Formel (5-1) inkl. ihrer Komponenten ist im Kapitel 6 in der Tabelle 6-2 nochmals genauer dargestellt.

Für die Berechnungen der Leistungen wurde die spezifische Wärmekapazität bei einer Temperatur von 20 °C ($c_W = 4182 \frac{J}{kg * K}$) angewendet. Da wir uns in einem Temperaturbereich von ca. +20 °C bis maximal +75 °C bewegen, sind hier die Abweichungen sehr gering und wurden bei diesen Berechnungen vernachlässigt.

Mit der Aufsummierung der spezifischen Paneelleistung über einen gesamten Tag (5-3) ergibt sich der Paneelertrag dieses Tages. Würden nun alle Tage des Jahres aufsummiert und addiert werden, so würde sich der Gesamtertrag eines Jahres bei bestimmten Rücklauftemperaturen ergeben. Da der Versuchsstand im Rahmen dieser Masterarbeit jedoch nur von September bis November im Einsatz war, kann mit dieser Herangehensweise nicht auf den Jahresertrag geschlossen werden und somit muss über einen anderen Weg (siehe Kollektorkennlinie in Kapitel 5.4) der Jahresertrag abgeschätzt werden.

$$Q_P = \int_0^t \dot{Q}_P * dt \quad (5-3)$$

Q_P Paneelertrag [Wh]

5.3.2 Auswirkung der Sonnenstandshöhe

Bei der Auswertung der Messungen fällt auf, dass sich der Sonnenwinkel massiv auf das Verhältnis der Globalstrahlung zur Paneelleistung auswirkt. In den Sommermonaten ist die Globalstrahlung, welche die Sonnenstrahlung auf die Horizontale gemessen definiert, deutlich über der spezifischen Paneel-Leistung, wie in Abbildung 5-3 dargestellt ist. Je niedriger der Sonnenstand jedoch wird und sich somit der vertikale Winkel normal auf die Paneel-Oberfläche verkleinert, umso besser wird das Verhältnis der beiden Leistungen bis zu dem Punkt, an dem sich das Verhältnis sogar „umdreht“. Was dies bedeutet zeigen Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5. Hier sind die orange und die grüne Linie, welche zum einem die Globalstrahlung und zum anderen die spezifische Paneel-Leistung abbilden, plötzlich umgekehrt angeordnet als in der Abbildung 5-3 zuvor. An diesen Messtagen ist die spezifische Paneel-Leistung deshalb höher als die von der Sonne einfallende Globalstrahlung gemessen auf die horizontale Fläche. Nachfolgende Tabelle 5-2 zeigt die Sonnenstände in Grad. Hier ist die deutliche Reduktion des Winkels zwischen dem 15.09.2016 und dem 31.10.2016 zu erkennen.

Tabelle 5-2: Altitude (Sonnenstandshöhe) der betrachteten Tage zu den angegebenen Uhrzeiten

Datum	Uhrzeit		
	08:00	12:00	16:00
15.09.2016	13,35°	44,31°	30,29°
30.09.2016	9,86°	38,87°	27,74°
31.10.2016	11,17°	28,58°	6,01°

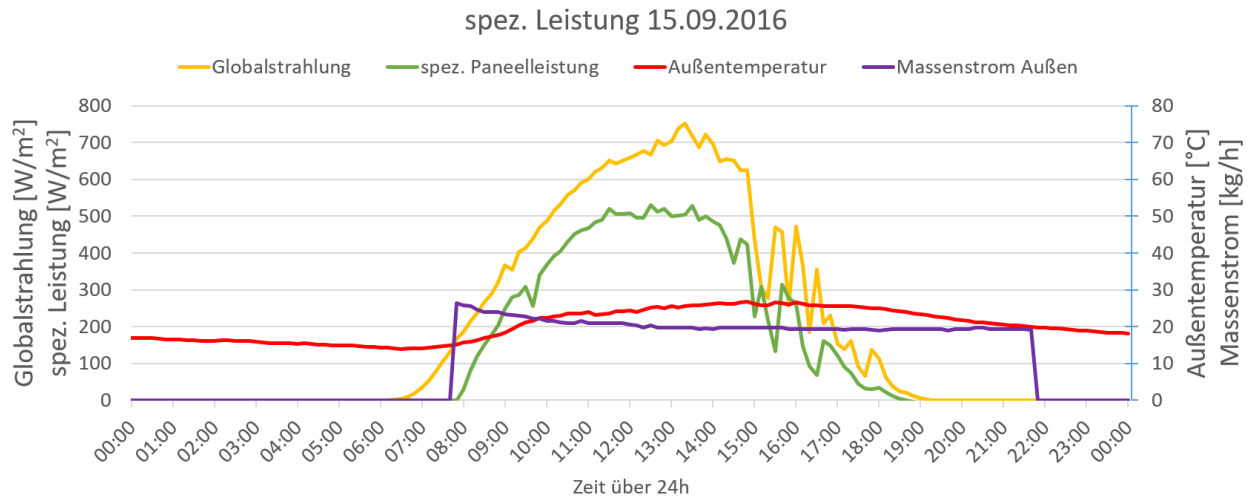


Abbildung 5-3: Leistungsgegenüberstellung 15.09.2016 (Pannele mit Solarlack)

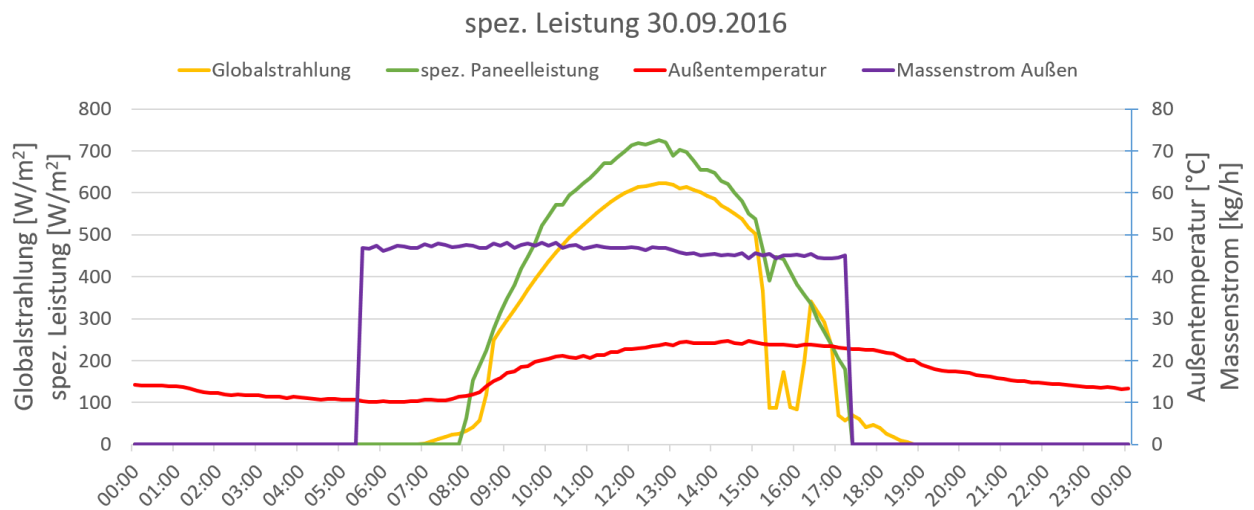


Abbildung 5-4: Leistungsgegenüberstellung 30.09.2016 (Pannele mit Solarlack)

Anhand der Aufzeichnung vom 30.09.2016 ist schon eine höhere spezifische Paneelleistung (grün) im Vergleich zur ankommenden Globalstrahlung (orange) zu erkennen (Abbildung 5-4). In der folgenden Gegenüberstellung der Leistungen (Abbildung 5-5) ist dann der Unterschied der beiden Leistungen sehr deutlich zu sehen. An diesem Tag war es schon deutlich kälter als an den Tagen zuvor, dennoch kam eine sehr hohe spezifische Paneelleistung von über $660 \frac{W}{m^2}$ zustande.

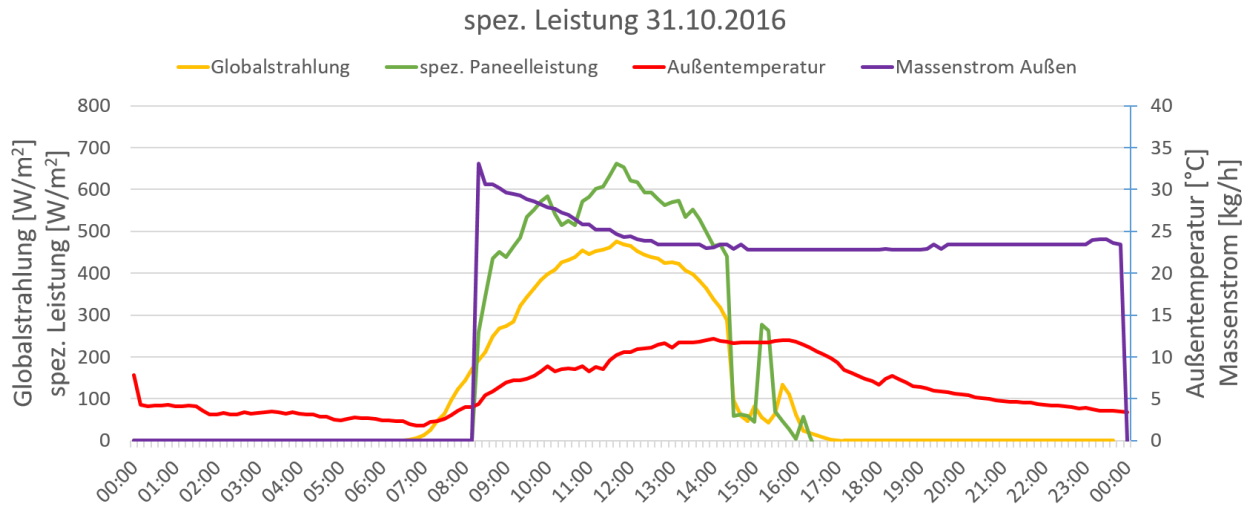


Abbildung 5-5: Leistungsgegenüberstellung 31.10.2016 (Pannele mit Solarlack)

5.3.3 Auswirkung des Solarlacks

Die beiden Diagramme in Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 stellen einen Vergleich von zwei Aufzeichnungen dar: einmal vor der Aufbringung des Solarlacks (08.09.2016) und einmal mit der Solarlackbeschichtung (15.09.2016). Diese beiden Tage waren in Bezug auf Außentemperaturen und Wetterbedingungen sehr gut vergleichbar (Tabelle 5-1). Die höhere Wärmeausbeute am beschichteten Panel ist dabei nicht zu übersehen.

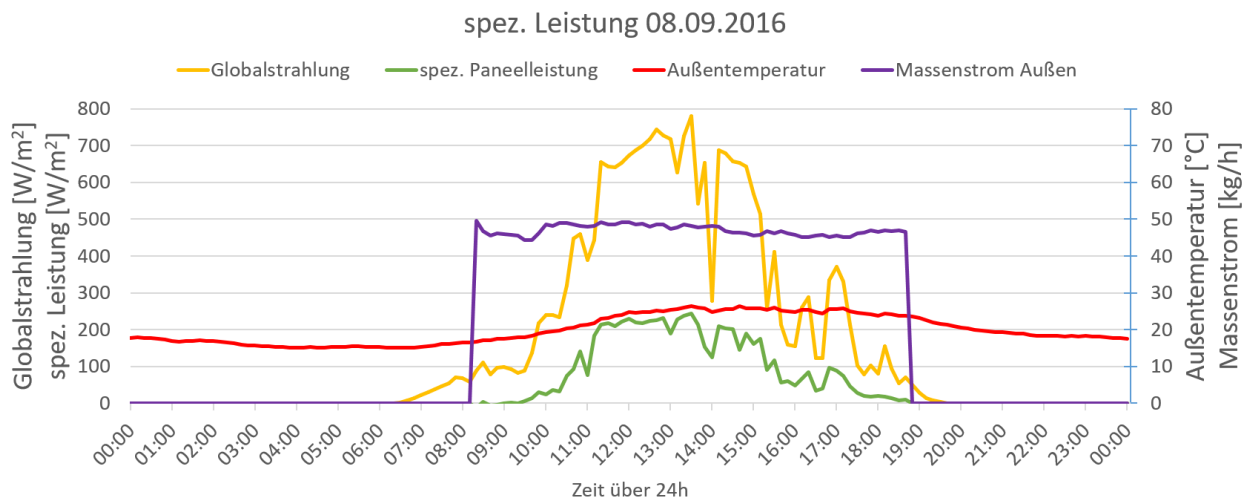


Abbildung 5-6: Diagramm der spezifischen Leistung - blankes Aluminium

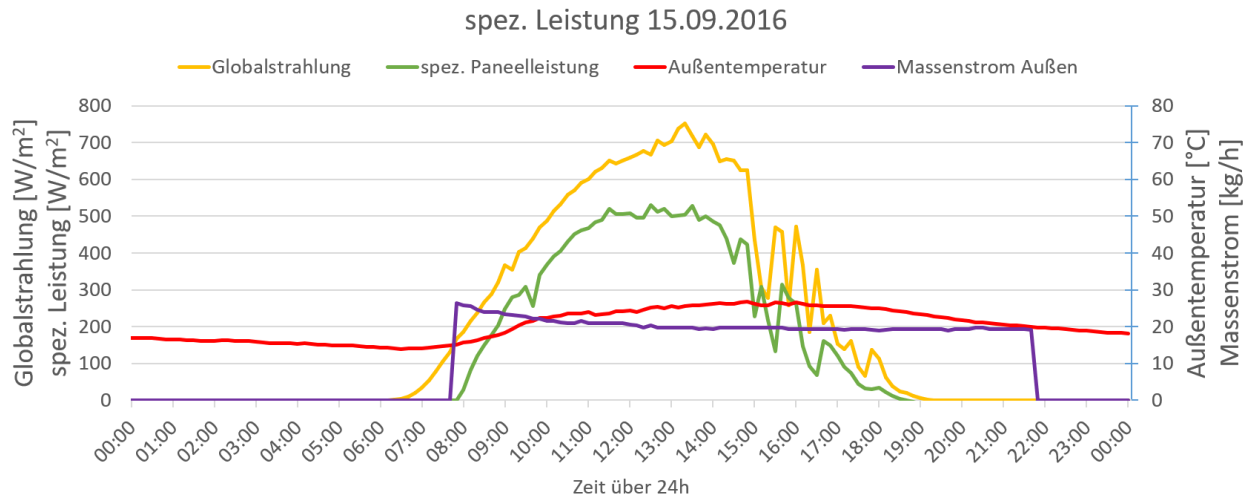


Abbildung 5-7: Diagramm der spezifischen Leistung mit Solarlackbeschichtung

Vergleich der Paneeleistungen:

Mit den oben beschriebenen Formeln (5-1) und (5-2) ergibt sich die Paneeleistung (\dot{Q}_P). Nachfolgende Tabelle 5-3 zeigt die Gegenüberstellung der berechneten Paneeleistungen mit anschließender Berechnung des Faktors der Leistungssteigerung aus der Beschichtung mit Solarlack.

Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der Paneeleistungen mit und ohne Solarlackbeschichtung zu den angegebenen Uhrzeiten an verschiedenen Tagen

	$\dot{Q}_P [W]$	
	12:00	15:00
Nicht beschichtetes Paneel (08.09.2016)	229,39	162,02
Mit Solarlack beschichtetes Paneel (15.09.2016)	508,08	227,98
Faktor der Leistungssteigerung	2,2	1,4

Beim Vergleich der Oberflächentemperaturen des Referenzpaneels ist ebenfalls ein erheblicher Unterschied zu erkennen. Hier ist die Temperatur der dunklen, wenig reflektierenden, beschichteten Oberfläche deutlich höher als jene des blanken Aluminiums. Diese erreichbare hohe Temperatur ist insofern wichtig, da sie die theoretisch maximale Rücklauftemperatur darstellt. So ist aus Abbildung 5-8 zu erkennen, dass am 15.09.2016 die Möglichkeit bestanden hat, über mehrere Stunden hinweg 60 °C heißes Warmwasser zu generieren. Im direkten Vergleich dazu ist die Oberflächentemperatur des blanken Aluminiums deutlich niedriger bei einem Maximalwert von weniger als 50 °C! Die aufgetragenen Temperaturen in der Abbildung 5-8 sind die aufgezeichneten Werte jenes Thermoelementes, welches in der Mitte der Sonne

zugewandten Seite des Panels angebracht ist (TC6 am Referenzpaneel- siehe Abbildung 3-20 und Abbildung 3-22)

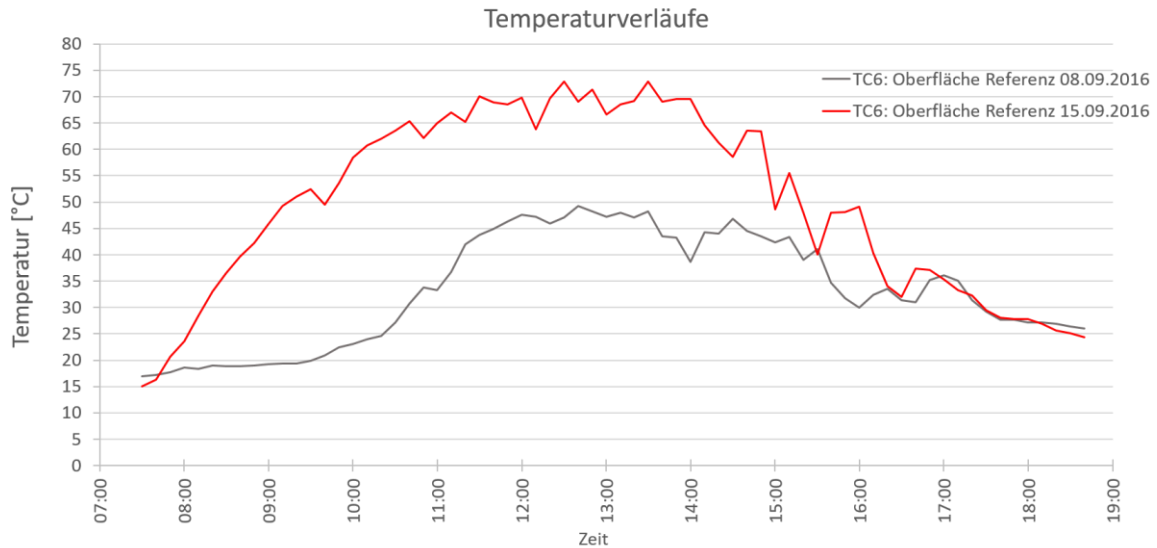


Abbildung 5-8: Vergleich des Temperaturverlaufes der Oberflächentemperaturen am Referenzpaneel vom 08.09.2016 zum 15.09.2016

In Tabelle 5-4 sind die Sonnenstandshöhen der beiden betrachteten Tage aufgelistet. Hier kann, wie auch in Tabelle 5-1, erkannt werden, dass es sich bei diesen Tagen um gut vergleichbare Aufzeichnungen handelt.

Tabelle 5-4: Altitude (Sonnenstandshöhe) der betrachteten Tage zu den angegebenen Uhrzeiten

Datum	Uhrzeit		
	08:00	12:00	16:00
08.09.2016	14,9°	46,76	32,83
15.09.2016	13,35°	44,31°	30,29°

5.3.4 Vergleich der Temperaturen im Boxinnenraum

Bei dieser Gegenüberstellung (Abbildung 5-9) wollten wir den Temperaturunterschied in der Box aufgrund der Wärmeabfuhr an der Paneelaußenseite aufzeigen. Bei dieser Messaufzeichnung wurde also nicht aktiv auf der Paneelinnenseite gekühlt, sondern lediglich passiv, also die der Sonne zugewandten Paneelseite durchströmt. Auch wenn die Temperaturdifferenz zwischen der thermisch aktivierten Box und der Referenzbox nicht übermäßig hoch ist, kann doch ein eindeutiger Einfluss durch die Durchströmung an der Außenseite des Panels festgestellt werden. Die Differenz der Innenraumtemperaturen beträgt zum Teil etwa 1,8 K! Leider hatten wir während unserer Messtage keine längere, bis in die Nächte andauernde Hitzeperiode. Hätte

sich solch eine Hitzephase eingestellt, dann wäre der Temperaturunterschied in der Box wahrscheinlich eindeutig größer.

In Abbildung 5-9 sind sämtliche im Innenraum implementierten Thermolemente zu sehen (die Positionierung der Thermolemente ist in der Abbildung 3-20 und der Abbildung 3-22 dargestellt). Aus dieser Gegenüberstellung der Temperaturen, welche alle sich im Innenraum befindlichen Thermolemente beinhaltet, kann eine geringfügige Temperaturschichtung in den Boxen ersichtlich gemacht werden. Da es im Inneren der Boxen zu keinen Verwirbelungen kommen kann, war dieses Phänomen vorherzusehen und spiegelt lediglich die Gesetze der Physik wieder.

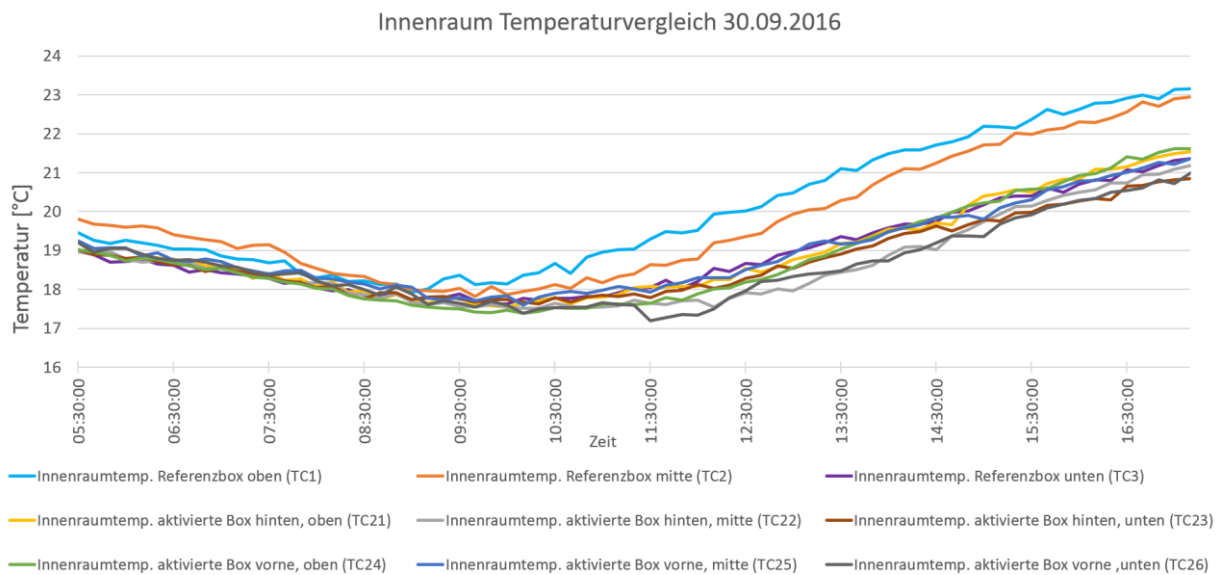


Abbildung 5-9: Temperaturvergleich der Boxeninnerräume (30.09.2016)

5.3.5 Beispiel: Wärmegenerierung des thermisch aktivierten Fassadenelements

Die nachfolgende Berechnung behandelt die notwendige Energie zur Aufbereitung der Menge an Warmwasser, welche bei uns im Durchschnitt eine Person am Tag benötigt. Dabei wird von einer Wassermenge von 40 Litern am Tag ausgegangen.

$$Q_{WW} = m * c_W * \Delta T \tag{5-4}$$

Q_{WW} Energiemenge zur Warmwasseraufheizung [J]

$m = 40$ Masse des aufzuheizenden Wassers [kg]

$c_W = 4182$ spezifische Wärmekapazität von Wasser [$\frac{J}{kg \cdot K}$]

$\Delta T = 65 - 10 = 55$ Temperaturdifferenz der Aufheizung [K]

$$Q_{WW} = 40 * 4182 * 55 = 9\,200\,400 \text{ J} \tag{5-5}$$

Generierte Wärmemenge am 15.09.2016: 3,5 kWh entspricht:

$$Q_P = 3,5 * 1000 * 3600 = 12\,600\,000\,J \quad (5-6)$$

Wird diese Wärmemenge auf einen Quadratmeter Paneel-Oberfläche bezogen:

$$A_P = H * B \quad (5-7)$$

A_P Paneel – Oberfläche [m^2]

H Paneelhöhe [m]

B Paneelbreite [m]

$$A_P = 1,95 * 0,48 = 0,936\,m^2 \quad (5-8)$$

Spezifische Paneelleistung:

$$q_P = \frac{Q_P}{A_P} \quad (5-9)$$

$$q_P = \frac{12\,600\,000}{0,936} = 13\,461\,538\,\frac{J}{m^2} \quad (5-10)$$

Benötigte Fläche des Paneels zur Warmwasseraufheizung:

$$A_{WW} = \frac{Q_{WW} * 1m^2}{q_P} \quad (5-11)$$

A_{WW} notwendige Fläche zur Warmwassererzeugung [m^2]

$$A_{WW} = \frac{9\,200\,400 * 1}{13\,461\,538} = 0,68\,m^2 \quad (5-12)$$

In Worten ausgedrückt würde an diesem Tag (15.09.2016) für die Aufheizung des Warmwassers eine Paneel-Oberfläche von $0,68\,m^2$ genügen. Bei dieser Berechnung sind jedoch nur die Energiemengen gegenübergestellt. Hier sind also weder die dafür benötigten Temperaturniveaus noch Verluste in irgendeiner Form integriert.

5.4 Kollektorkennlinie

Die Theorie zur Bedeutung und Entwicklung der Kollektorkennlinie ist im Grundlagenteil unter dem Absatz Kollektorkennlinie (Kapitel 2.5) erklärt. Nachfolgend (Abbildung 5-10 & Abbildung 5-11) werden die entwickelten Kennlinien für das eingesetzte integrale Fassadenelement dargestellt.

Da bei nicht abgedeckten Kollektoren der Wind einen erheblichen Einfluss hat, wurde bei der Auswahl der Messzeitpunkte für die Entwicklung der Kollektorkennlinie auf die auftretenden Windgeschwindigkeiten geachtet. Die Windgeschwindigkeit hat den Wert von $3 \frac{m}{s}$ bei den verwendeten Messzeitpunkten nie überschritten. Die Informationen zum gemessenen Wind wurden einer Homepage entnommen, die unter anderem auch Daten einer nahegelegenen Messstation enthielt (www.wundermap.com). [20]

Zur Erstellung der Kennlinien wurden die Datensätze der Messungen verwendet. Diese enthalten sämtliche Temperaturen und Durchflüsse. Gleichzeitig wurden uns für die Strahlungsberechnung die notwendigen Werte von Strahlungsintensitäten sowie der Umgebungstemperatur von der ZAMG zur Verfügung gestellt. Die aus den Messungen und den ZAMG-Daten berechneten Werte wurden anschließend in ein Diagramm eingetragen (Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11). Mit diesen eingetragenen Punkten konnte nachfolgend eine Trendlinie erstellt werden, welche der gewünschten Kennlinie entspricht. Bei den daraus resultierenden Kollektorkennlinien handelt es sich um Geraden. Die eigentlichen Kennlinien würden jedoch Kurven darstellen, da in der Definition des Kollektorwirkungsgrades (siehe Formel (2-8)) eine quadratische Komponente enthalten ist. Indem unsere Paneele jedoch eine Funktionsweise aufweisen, die jener eines Schwimmbadabsorber sehr ähnlich ist und somit die Temperaturen der Umgebung nahe der mittleren Absorbtemperatur sind, wird dieser quadratische Wert sehr klein und kann daher vernachlässigt werden. Somit wird

$$\eta_{Koll} = c_0 - c_1 * \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)}{I_{gN}} - c_2 * \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)^2}{I_{gN}} \quad (5-13)$$

zu

$$\eta_{Koll} = c_0 - c_1 * \frac{(T_{Abs,fl} - T_a)}{I_{gN}} \quad (5-14)$$

wobei

$$c_0 = \tau_{Abd} * \alpha_{Abs} \quad (5-15)$$

und

$$c_1 = U_{Koll} * \quad (5-16)$$

entspricht.

Da wir bei der betrachteten Ausbaustufe des Panels keine vorgesetzte Klarglasscheibe montiert haben, ergibt sich (5-15) mit $\tau_{Abd} = 1$ zu $c_0 = \alpha_{Abs}$. Dieser Wert des Absorptionskoeffizienten sollte also theoretisch den Startwert im Diagramm für die Kollektorkennlinie ergeben, zumindest für jenen speziellen Fall, dass die mittlere Kollektortemperatur gleich der Außentemperatur ist.

5.4.1 Kennlinie am blanken Aluminiumblech

Abbildung 5-10 zeigt die entwickelte Kennlinie des Panels mit der unbehandelten, blanken Aluminiumoberfläche. Die Trendlinie ergibt sich aus der Berechnung der Temperaturdifferenz ($T_{Abs,fl} - T_a$) im Verhältnis auf die zur normal auf das Paneel eintreffende Sonnenstrahlung (I_{gN}). Der Wirkungsgrad, welcher auf der vertikalen Achse aufgetragen ist, ist ebenfalls auf diese Einstrahlintensität bezogen. Bei der Berechnung der normal einfallenden Sonnenstrahlung wurde sowohl der Sonnenstand, als auch der Azimut beim jeweiligen Messzeitpunkt berücksichtigt (Formel (2-9) und (2-10)).

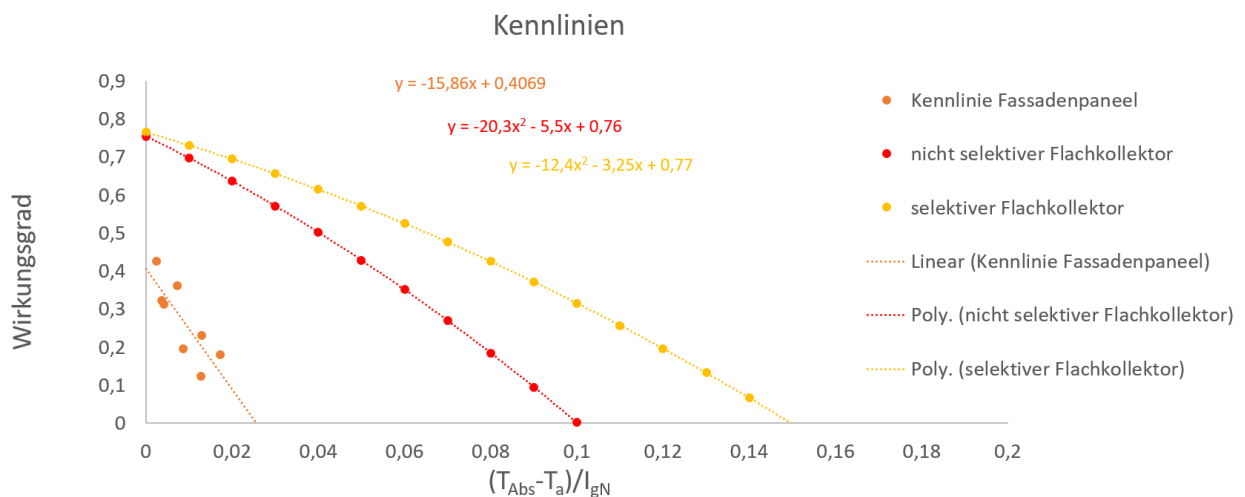


Abbildung 5-10: Kennlinien des Panels mit blankem Aluminium

Die rote und die gelbe Kollektorlinie (Flachkollektor) in der Abbildung 5-10 sind nicht im Zuge dieser Arbeit gemessen worden, sondern dienen lediglich zur Orientierung um die Lage der

Kollektorkennlinie des Paneels besser darzustellen und somit die Aussagekraft der Abbildung zu erhöhen. Selbiges gilt auch für die Abbildung 5-11.

5.4.2 Kennlinie des Paneels mit Solarlack

Abbildung 5-11 stellt die Kennlinie des Paneels mit aufgetragenem Solarlack dar. Gegenüber dem Paneel mit der blanken Aluminiumoberfläche ist bei dieser Kennlinie schon eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrades zu erkennen. Auch hier ist wieder jene Strahlung die Bezugsstrahlung, welche normal auf die Paneeloberfläche auftrifft. Dabei handelt es sich um dieselbe Herangehensweise, wie sie schon in der Beschreibung der Abbildung 5-10 erläutert wurde.

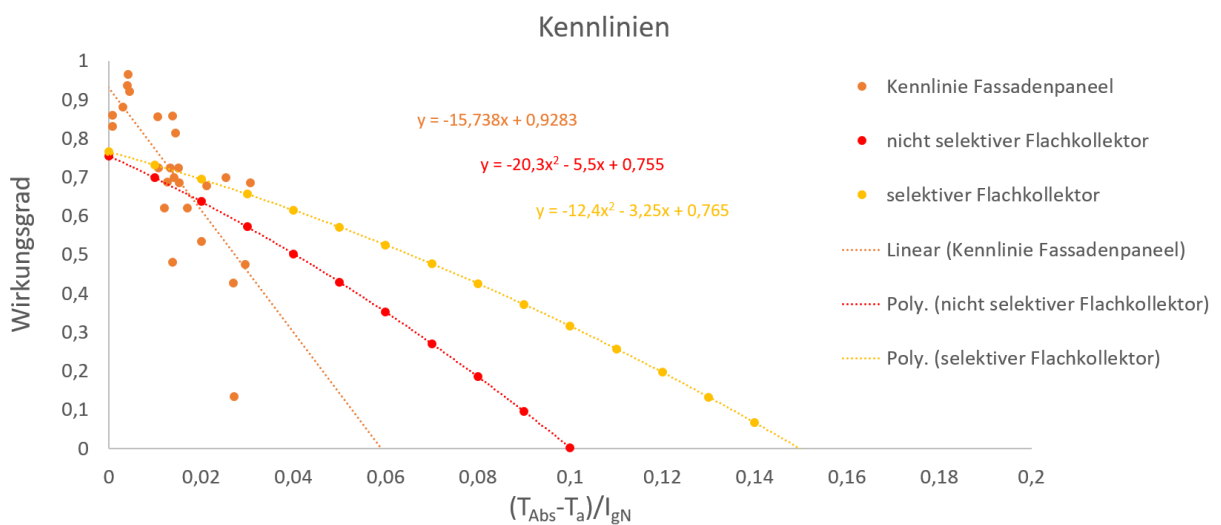


Abbildung 5-11: Kennlinien des Paneels mit Solarlack

Diese Kennlinie kann nun in ein geeignetes Simulationsprogramm implementiert werden. Mithilfe solcher Programme kann auf die Jahresertragsmengen (über ein Vergleichsjahr) geschlossen werden und dadurch eine optimale Auslegung von Anlagen erfolgen.

5.5 Thermographische Aufzeichnungen (23.09.2016)

Für eine detailliertere Analyse der Temperaturverteilung am Außenblech des durchströmten Paneels machten wir uns eine Thermographiekamera zunutze. Im Zuge der Aufnahmen haben wir die stationäre Temperaturverteilung am durchströmten Paneel abgebildet, sowie Videos vom Abkühlen der Paneel-Oberfläche mittels durchströmendem Fluid beziehungsweise vom anschließenden Aufheizen durch die Sonnenstrahlung aufgezeichnet.

Bei der Betrachtung des Abkühlvorgangs wurde das Paneel zuerst durch die Sonne aufgeheizt und vorerst noch nicht mit Wasser durchströmt. Anschließend, als das Paneel vollflächig dieselbe

Oberflächentemperatur aufwies, wurde die Durchströmung aktiviert und die Änderung der Oberflächentemperaturen mittels der Thermographie-Kamera aufgezeichnet. Für die Kühlung des Paneels wurde ein Durchfluss von 28 l/h gewählt. Mit diesem Massenstrom hatte sich an der Paneel-Oberfläche nach ca. 4 Minuten eine konstante, quasistationäre Temperaturverteilung eingestellt.

Nach Beendigung des Abkühlvorgangs wurde die Aufheizung der Oberfläche betrachtet. Ziel war hier, die an die Beendigung der Wasserzufuhr anschließende Aufheizung der Paneel-Oberfläche mithilfe der Sonnenstrahlung aufzuzeichnen. Dieser Vorgang dauerte an diesem Tag etwa 10 Minuten, anschließend war wieder eine homogene Temperaturverteilung an der gesamten Paneel-Oberfläche zu erkennen.

Auf den Bildern in der Abbildung 5-12 ist der Vorgang der Aufheizung des Paneels zu sehen. Bevor das mittels Heizpatrone erwärmte Wasser in das Paneel eingeleitet wurde, ist dieses mit kaltem Wasser gekühlt worden um den Strömungsverlauf in den Kanälen besser ersichtlich zu machen. Schön zu erkennen ist der seitliche Einlass auf der Unterseite der Front und die unsymmetrische Ausbreitung des Fluids. Dieser Versuch hat somit unsere Bedenken hinsichtlich einer gleichmäßigen und guten Durchströmung bestätigt. Im stationären, gleichbleibenden Betrieb ist die Temperaturverteilung bis auf die Ecken des Paneels zwar einigermaßen zufriedenstellend, jedoch wird bei den zukünftigen Blechen des Fassadenelementes eine veränderte Kanalführung beziehungsweise zumindest eine mittige Ein- und Ausströmung erforderlich werden. Simulationen mit einer veränderten, möglicherweise besseren Kanalführung wurden schon während dieser Arbeit von meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Daniel Brandl, durchgeführt, sodass bei folgenden Untersuchungen diese optimierten Fluidkanalführungen betrachtet werden können.

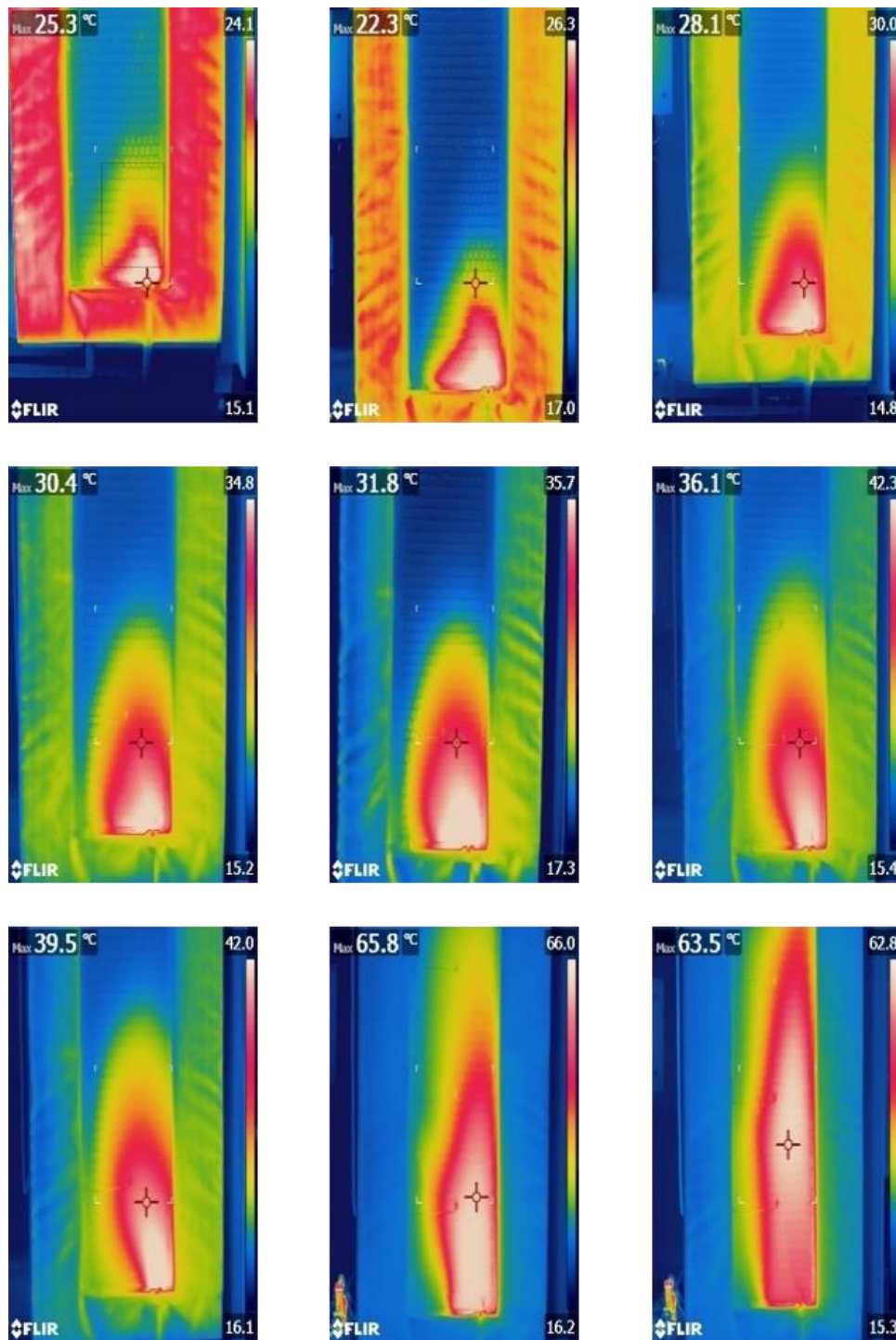


Abbildung 5-12: Temperaturverlauf beim Durchströmen mit Warmwasser

Die Abbildung 5-13 zeigt den Verlauf der Temperatur bei der Durchströmung der heißen Panel-Oberfläche mit kaltem Wasser. Diese Aufnahmen wurden bei einem vorherrschenden Massenstrom von etwa $10 \frac{l}{h}$ erstellt. Der Zeitraum, in dem die Aufzeichnungen getätigt wurden, erstreckte sich über neun Minuten, vom ersten Bild links oben bis zum letzten rechts unten. Auch hier ist die nicht symmetrische Verteilung des Fluids wie schon in der Abbildung 5-12 deutlich zu erkennen. Nach diesen neun Minuten stellten sich an diesem Tag, dem 20.09.2016, die am letzten Bild zu sehenden Temperaturbereiche ein.

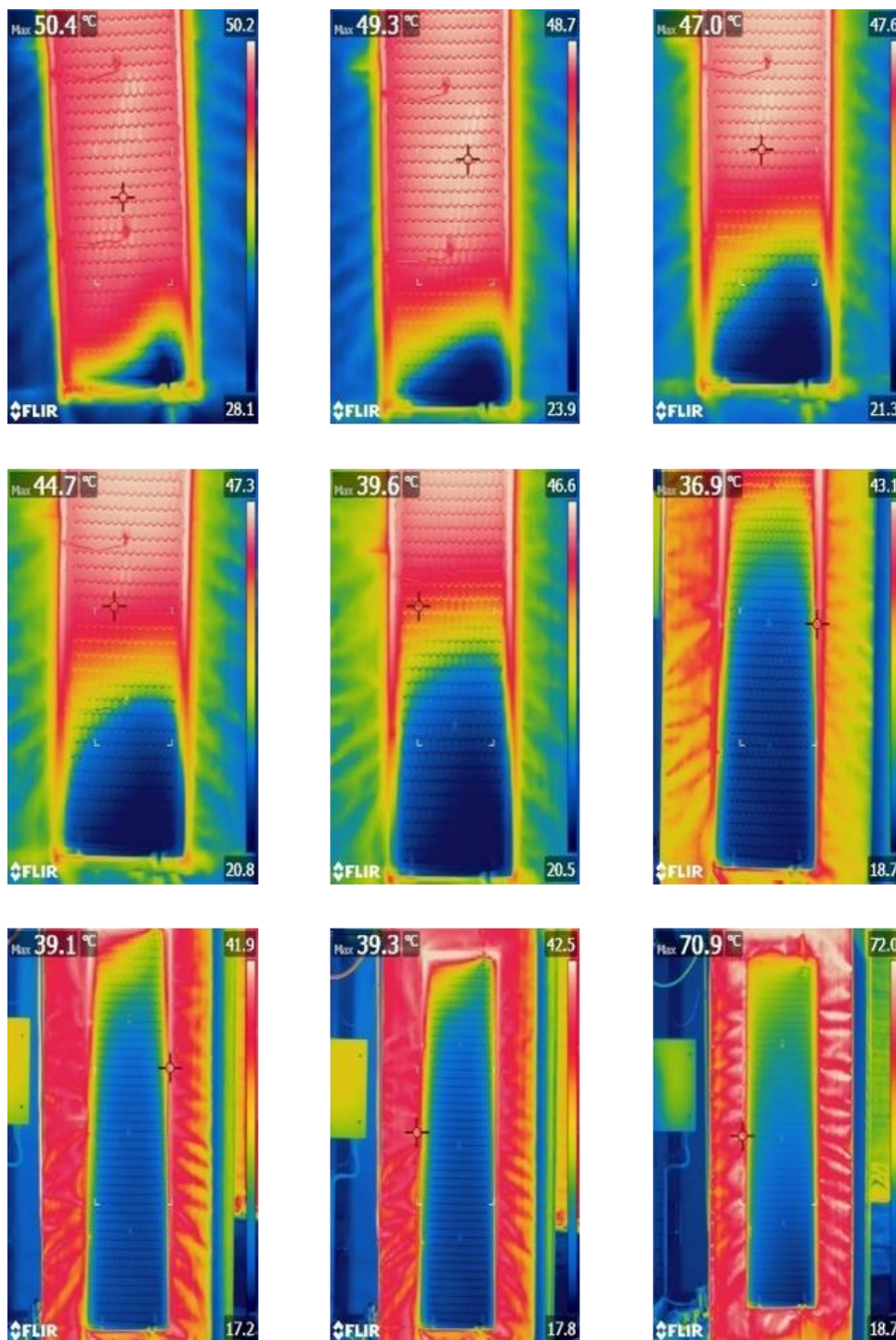


Abbildung 5-13: Temperaturverlauf beim Durchströmen mit Kaltwasser

Zusätzlich eigneten sich die thermographischen Aufnahmen sehr gut für einen Vergleich mit den Ergebnissen aus bereits durchgeführten dreidimensionalen Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen des Panels. Dieser Vergleich ist im folgendem Kapitel 6. genauer beschrieben.

6 VERGLEICH ZWISCHEN MESSUNG UND SIMULATION

Die CFD Simulationen wurden im Rahmen des Projekts UNAB [1] durchgeführt. Dazu wurde mit Hilfe der Software *ANSYS Fluent R15.0* [21] ein dreidimensionales CFD Modell erstellt. Beim ersten Vergleich zwischen gemessenen Werten und der Simulation (Abbildung 6-2) wurde der Wind direkt am Paneel abgeschätzt. Dabei wurde der bodennahe, reduzierte Wind in der Nähe des Versuchsstandes zu diesem Zeitpunkt gemessen und aufgezeichnet. [20] Die Windgeschwindigkeit direkt an der ruhenden Paneel-Oberfläche wurde mit 10% des Windes angenommen, basierend auf den Erkenntnissen und CFD Simulationsergebnissen aus dem Forschungsprojekt „denkmalaktiv I“ [22]. In weiterer Folge wird bei der Simulation ein Luftraum vor dem Paneel simuliert, welcher die Windgeschwindigkeiten an der Oberfläche noch genauer zum Ausdruck bringen soll.

6.1 Aufbau und Kurzbeschreibung des CFD Modells

Das CFD Modell für den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Oberflächen- und Wasseraustrittstemperaturen besteht aus einer soliden Zone (dem Absorberblech) und einer Fluidzone (dem Wasser, das den Absorber durchströmt). An der Außenseite dienen die Messdaten der eingehenden Solarstrahlung und Außentemperatur, sowie die aus den Messdaten abgeleitete Windgeschwindigkeit (siehe Tabelle 6-1) als Randbedingungen in der Simulation. An der Innenseite wurde die 150 mm dicke Wärmedämmung in Form einer virtuellen Schicht berücksichtigt, als innere Randbedingung diente die gemessene Temperatur in der Box. Das in der Simulation verwendete Netzgitter besteht aus ca. 10.8 Mio. Zellen und ist in der folgenden Abbildung 6-1 dargestellt. Zusätzlich enthält diese Abbildung noch Temperatur- und Strömungsgeschwindigkeitskonturen für den Ausschnitt am Wassereintritt des Paneels, um einen ersten Überblick bezüglich Temperatur- und Strömungsverteilung zu gewähren.

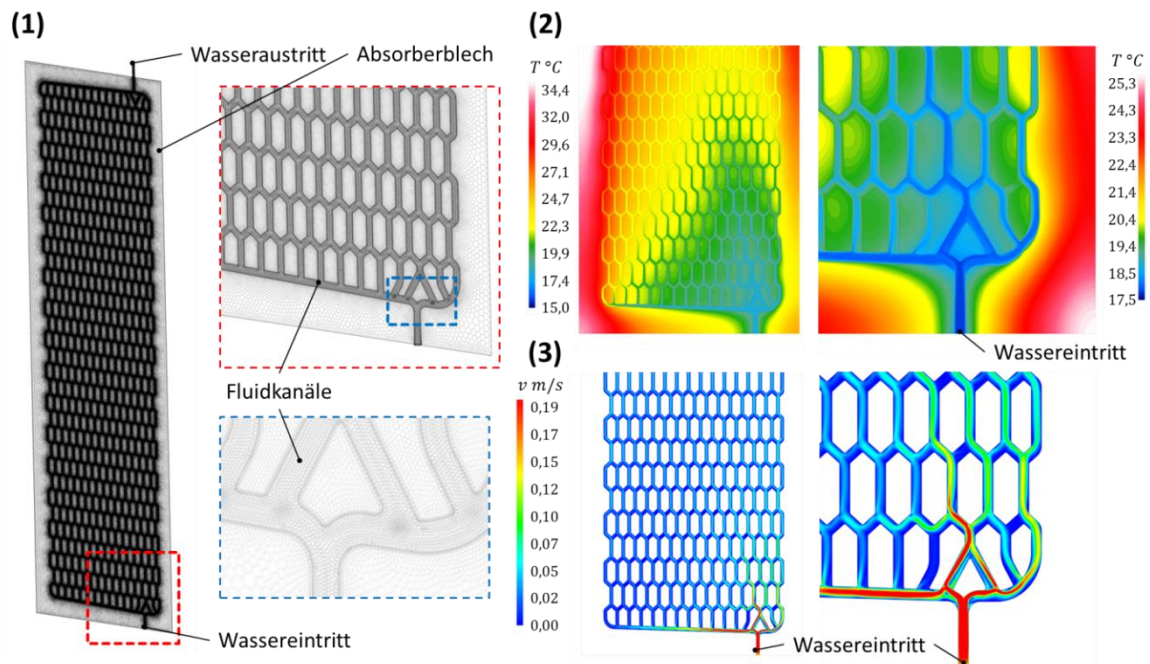


Abbildung 6-1: Darstellung (1) des CFD Netzgitters sowie (2) der Temperaturkonturen an der Absorberblechoberfläche und (3) Konturen der Strömungsgeschwindigkeit in den Fluidkanälen zu den Randbedingungen aus der Messung vom 23.09.2016 um 12:00 Uhr. [1]

In der Simulation wurde das Standard $k-\varepsilon$ Turbulenzmodell zur Abbildung des Strömungsverhaltens verwendet. Weiter wurden in der Simulation die Schwerkraft aktiviert und die Dichte des in der Simulation verwendeten Fluids (Wasser) von konstant auf temperaturabhängig umgestellt. Dadurch wird in der Simulation auch der Einfluss der natürlichen Konvektion mitberücksichtigt, was aufgrund des relativ niedrigen Massenstroms relevant ist. Eine ausführlichere Beschreibung der Simulationsmodellierung sowie der daraus erzielten Ergebnisse sind im Endbericht des Projekts UNAB [1] zu finden, alle verwendeten numerischen Modelle sind im ANSYS User- bzw. Theory-Guide im Detail beschrieben [23].

6.2 Vergleich mit CFD Simulation mit Windabschätzung direkt an der Fassade

Beim Vergleich der Simulation mit der thermographischen Aufnahme (Abbildung 6-2) wurden die Wetterbedingungen, welche bei der Aufnahme vorgeherrscht haben, als Randbedingungen in die Simulation miteinbezogen (Tabelle 6-1).

6 Vergleich zwischen Messung und Simulation

Tabelle 6-1: Randbedingungen Simulation

	V _{Wind}	V _{Wind_Fassade}	Massenstrom \dot{m}	Umgebungstemperatur	Globalstrahlung
Datum/ Uhrzeit	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	$\left[\frac{l}{h}\right]$	[°C]	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
23.09.2016 12:00	1,4	0,14	25,8	16,6	701

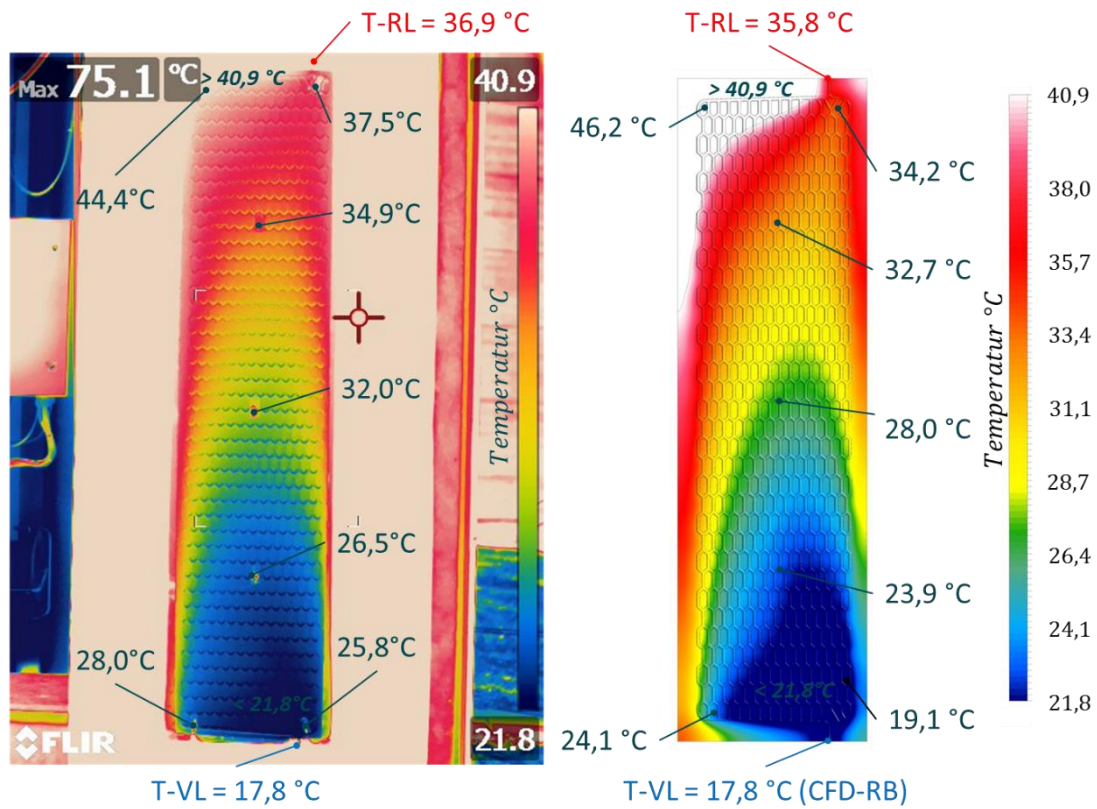


Abbildung 6-2: Gegenüberstellung Thermographieaufnahme vs. Simulation ohne Luftkörper vor der Fassade [1]

Tabelle 6-2: Gegenüberstellung der Leistungsberechnung

gemessen	simuliert
$\Delta T = T_{RL} - T_{VL}$	$\Delta T = T_{RL} - T_{VL}$
$\Delta T = 36,9 - 17,8 = 19,1 \text{ K}$	$\Delta T = 35,8 - 17,8 = 18 \text{ K}$
$A = 1,95 * 0,48 = 0,936 \text{ m}^2$	$A = 1,95 * 0,48 = 0,936 \text{ m}^2$
$c_W = 4182 \frac{\text{W}}{\text{kg} * \text{K}}$	$c_W = 4182 \frac{\text{W}}{\text{kg} * \text{K}}$
$\dot{m}_A = 25,8 \frac{\text{l}}{\text{h}} \triangleq 0,007167 \frac{\text{l}}{\text{s}}$	$\dot{m}_A = 25,8 \frac{\text{l}}{\text{h}} \triangleq 0,007167 \frac{\text{l}}{\text{s}}$
Mit (5-1):	Mit (5-1):
$\dot{q}_P = c_W * \dot{m}_A * \frac{T_{RL} - T_{VL}}{A}$	$\dot{q}_P = c_W * \dot{m}_A * \frac{T_{RL} - T_{VL}}{A}$
$\dot{q}_P = 4182 * 0,007167 * \frac{19,1}{0,936}$	$\dot{q}_P = 4182 * 0,007167 * \frac{18}{0,936}$
$= 611,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	$= 576,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$\Delta \dot{q}_P = 35,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}.$	

Wie in Abbildung 6-2 ersichtlich wird, stimmen die Temperaturen und deren Verläufe über das Paneel qualitativ und quantitativ bereits sehr gut zusammen. Beim Vergleich der einzelnen Oberflächentemperaturen kommt es an manchen Positionen zwar noch zu Abweichungen, diese können aber auch durch den Einfluss des Aufklebens der Thermoelemente mittels Klebeband zustande gekommen sein. Es wurde bei der Errichtung des Versuchstandes zwar stets auf eine minimalinvasive Anbringung der Messinstrumente in Bezug auf das Betreiben der Anlage geachtet, jedoch konnten nicht alle Einflüsse, welche zu Abweichungen führen können, gänzlich vermieden werden. Dies kann somit ein Grund für die verschiedenen Temperaturen an den Messstellen sein.

Beim Vergleich der beiden Rücklauftemperaturen konnte jedoch eine recht gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen Wert und jenem der Simulation erzielt werden. Der Temperaturunterschied des Vergleiches der beiden Werte liegt bei gerade einmal 1,1 K. Die Gegenüberstellung der beiden Leistungen ist in Tabelle 6-2 ersichtlich. Dabei ergibt sich eine momentane Differenz der spezifischen Paneelleistung von $\Delta\dot{q}_p = 35,2 \frac{W}{m^2}$.

An dieser Stelle kann als Fazit gezogen werden, dass auf Grund der aus der Simulation nur geringfügig niedrigeren resultierenden Rücklauftemperaturen bzw. Energieerträge das CFD Modell und der verwendete Modellierungsansatz für weitere Analysen und zur Optimierung der Fluidkanäle sehr gut geeignet ist. Die Gefahr einer Überschätzung der resultierenden Energieerträge ist nach diesem Vergleich nicht zu vermuten.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN, ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

7.1 Schlussfolgerungen

Die Planungsphase dieses Versuchstandes erstreckte sich vom 15.06.2016 bis zum 19.07.2016. Es konnte leider nicht viel Zeit in diese erste Phase investiert werden, da danach erst die benötigten Materialien bestellt und besorgt werden konnten, wir aber ehest möglich mit dem Aufbau beginnen mussten, um noch einige warme und sonnenreiche Tage zum Betreiben des Versuchstandes zur Verfügung zu haben. Auch diese rasche Planung hat wahrscheinlich dazu beigetragen, dass der Versuchstand zu Beginn noch ein paar Mängel aufgewiesen hat und zum Teil nicht in jeglicher Hinsicht nach Plan funktionierte. So musste noch mehrmals modifiziert werden. Auch der finanzielle Aspekt war aufgrund des großteils ausgeschöpften Budgets eine große Herausforderung für dieses Projekt. Dies war mitunter der Hauptgrund, dass kein geschlossenes Kreislaufsystem im System integriert wurde, in dem das Fluid mit einer eigens dafür eingebunden Kühlung wieder rückgekühlt hätte werden können, sondern der Versuchstand mittels Frischwasser betrieben werden musste.

Die Aufbauphase musste aus den bereits erwähnten Gründen auch sehr rasch abgeschlossen werden. Aus Kostengründen waren wir gezwungen, einen sehr hohen Anteil an Eigenleistung beim Bau des Versuchstandes einzubringen. Daher sind mein Betreuer, Herr Dipl.-Ing. Daniel Brandl, und Herr SV Arch. Dipl.-Ing Helmut Schober, welcher für die Statik des integralen Fassadenelementes zuständig war und am Institut für Hochbau an der TU Graz seine Dissertation schreibt, besonders bezüglich ihrer tatkräftigen Mithilfe bei sämtlichen Baumaßnahmen zu nennen.

Letztlich ist dieser Versuchstand trotz der zuvor beschriebenen Erschwernisse durchaus gut gelungen und es kann mit den Ergebnissen der Versuche gut weitergearbeitet werden.

Die gewonnenen Messdaten aus den aufgezeichneten Messtagen können zum Füttern von Simulationstools verwendet werden. Die Randbedingungen, wie beispielsweise die zum Zeitpunkt der Messung vorherrschenden Außentemperaturen, werden in unmittelbarer Nähe des Versuchstandes aufgezeichnet und können somit beim Erstellen der Simulation berücksichtigt und eingebunden werden.

Es sollen hier auch die Aspekte erwähnt werden, welche am Versuchstand nicht den erhofften Effekt aufgezeigt haben. Zum einen hatten wir uns mit dem Bau der beiden wärmegeprägten Boxen wesentlich mehr Temperaturunterschiede im Innenraum durch die Kühlung der aktivierten Box erhofft. Zu diesem Effekt ist es in den aufgezeichneten Tagen nicht gekommen,

da es in den Nächten doch zu stark abgekühlt hatte, wir deshalb keine längere, durchgängige Hitzeperiode wie im Jahr zuvor hatten und der Kühleffekt des Tages an der Außenseite des Paneels sich in der Nacht wieder ausglich. Wären die Temperaturen nachts höher gewesen, so hätten sich nicht beide Boxen über den Zeitraum einiger Stunden wieder auf idente Temperaturen abgekühlt. Ein nächstes anfängliches Problem war die hohe Aufheizung des Wassers in der Zuleitung vom Schneideplatz bis zum Versuchsstand. Dadurch, dass der ungefähr 50 m lange Zuleitungsschlauch aus schwarzem Kunststoff bestand und bei gleichzeitig sehr kleinen benötigten Durchflüssen fast gänzlich der Sonnenstrahlung ausgesetzt war, hatte sich das Wasser in der Zuleitung an schönen Tagen auf etwas über 30°C aufheizen können. Durch diese starke Aufheizung war das Wasser nicht mehr zur Kühlung des Innenraumes der Box geeignet, hier hätte eine Durchströmung sogar den gegenteiligen Effekt einer Aufheizung bewirkt. Eine Lösung wäre das Dämmen der Leitung gewesen. Bei diesem Unterfangen wären jedoch weitere Kosten für das Projekt entstanden und gleichzeitig konnte nur sehr schwer abgeschätzt werden, ob diese Maßnahme ausreichen würde, um die Temperatur in der Zuleitung niedrig genug zu halten. Ein weiterer Ansatz war das Eingraben des Schlauches. Dabei musste entschieden werden, ob diese Maßnahme mithilfe eines Baggers durchgeführt werden sollte und dadurch weitere Kosten das Budget belasten würden, oder ob diese Eingrabung händisch abgewickelt werden könnte. Nach Abstimmung mit dem dafür zuständigen Personal von Gebäude und Technik haben wir uns dann für die händische Variante entschieden. Die Zuleitung wurde somit ungefähr 30 cm tief eingegraben, wodurch das Wasser auch an heißen Tagen nur mehr eine maximale Temperatur von 22 °C aufweisen sollte. Auch hier muss betont werden, dass dies nur durch das Zusammenhelfen der schon zuvor erwähnten Personen und zusätzlich mit Hilfe eines Kollegen von Herrn SV Arch. Dipl.-Ing Helmut Schober innerhalb eines Nachmittages möglich war.

An dieser Stelle soll aber auch die von der ersten Simulation an gute Übereinstimmung der gemessenen Werte zu den simulierten Werten ihren Platz finden. Dies weist auf ein sehr gutes Simulationsmodell hin, mit welchem weitere Ausführungen und Varianten, beispielsweise in der Kanalführung oder in der Kanalgeometrie, vor der Fertigung von Prototypen simuliert und bewertet werden können.

Grundsätzlich kann bei diesem Fassadenpaneel von einem großen Zukunftspotential ausgegangen werden. Der Industrieverband für Bausysteme im Metallbereich (IFBS) spricht von einer jährlichen Produktion von 65 Millionen Quadratmetern allein in Europa im Jahr 2015. [14] Klarerweise hat hier nur ein Teil dieser Fläche die Berechtigung der Ausführung als thermisch aktiviertes Fassadenelement, nämlich jener Teil, welcher ausreichend von der Sonne beschienen wird und nicht durch die Ausrichtung der Gebäudewand oder durch andere Verschattungen nicht

brauchbar zur Warmwassergenerierung ist. Dennoch würde abzüglich dieser Flächen noch genügend an Paneelfläche übrigbleiben.

Seitens des lokalen Herstellers (Firma **BRUCHAPaneel**[®] [16]) von Sandwichpaneelen ist die Frage eines kontinuierlichen Produktionsverfahrens von großer Bedeutung, um bei den Herstellungskosten des modifizierten Fassadenelementes nicht allzu weit von jenen eines kommerziell hergestellten Sandwichpaneels zu liegen. Bei der Fertigung der Sandwichpaneelle werden die beiden begrenzenden Bleche von Coils abgewickelt und anschließend mit dem jeweiligen Dämmmaterial in der Mitte versehen. Erst am Ende, wenn das Paneel an sich fertig ist, werden diese auf die gewünschte Länge gekappt. Dies sollte auch der Ablauf bei der Herstellung der neu entwickelten Paneelle sein. Dabei ist sicherlich die entscheidende Frage, ob es möglich ist, die Bleche mittels Roll-bonding zu verbinden und auf Coils aufzuwickeln, um anschließend eine kontinuierliche Fertigung der Paneelle sicher zu stellen? Zusätzlich muss die Kanalführung bezüglich des Sammelrohrs noch verändert werden, da bei kontinuierlicher Fertigung mit Paneelen von verschiedenen Längen nur eine kontinuierliche Kanalführung zu verwirklichen ist und das notwendige Sammelrohr möglicherweise als separater Teil zur hydraulischen Anbindung geliefert werden muss.

7.2 Zusammenfassung und Ausblick

Wie schon erwähnt, kommen bei diesem Versuchsstand verschiedene Ausbaustufen zum Tragen. Die ersten beiden, also der Betrieb mit der blanken Aluminium-Oberfläche und die anschließende Behandlung mit einem speziellen Solarlack, sind im Rahmen der Messungen dieser Masterarbeit abgearbeitet worden. Die beiden weiteren Ausbaustufen, nämlich durch Anbringung einer Klarglasscheibe vor dem Paneel, damit der konvektive Einfluss des Windes weitestgehend eliminiert wird und des Weiteren durch Anbringung von Photovoltaikzellen auf dieser Klarglasscheibe, sind gerade im Entstehen. Die Konstruktion und der Aufbau dieser Klarglasscheibenkonstruktion, die Messungen und der Betrieb des Versuchsstandes mit dieser Modifikation wird Teil von nachfolgenden Projekten sein.

Das Grundkonzept der Wärmegenerierung des Paneels mit vorgehängter Klarglasscheibe ist ähnlich dem des abgedeckten thermischen Kollektors. Wenn diese Klarglasscheibe anschließend noch mit Photovoltaikzellen (PV-Zellen) versehen ist, kann über diese Zellen durch die Sonnenstrahlung elektrischer Strom abgegriffen werden. Jene Sonnenstrahlung, welche zwischen den aufgeklebten Zellen durchscheint und auf das dahinterliegende Paneel trifft, kann dabei zur Wärmegenerierung verwendet werden. Sind diese beiden Möglichkeiten der Energiegewinnung vereint, dann wird von sogenannten PVT-Modulen gesprochen. Ein

wesentlicher Vorteil dieses Systems ist dabei die Kühlung der PV-Zellen und dadurch ein etwas höherer Wirkungsgrad, da diese Zellen bei niedrigeren Temperaturen effizienter arbeiten.

Eine weitere Verbesserung bei der Auswertung und Analyse der Daten wird ein am Versuchsstand angebrachtes Anemometer sein, welches die Windverhältnisse an der Fassade noch genauer abgreifen kann, als dies mit einer Berechnung für den reduzierten Wind abgehandelt werden könnte. Mit dieser Modifizierung und den aufgezeichneten Daten ist es nun möglich, ein noch exakteres Simulationsmodell zu erzeugen.

Um den Kühleffekt durch die aktivierte Innenseite des Panels besser darstellen und beschreiben zu können, wäre es beispielsweise möglich, interne Wärmequellen in den Boxeninnenräumen anzubringen. Diese Maßnahme würde zu höheren Innenraumtemperaturen führen und mit diesen erhöhten Temperaturen könnte eine größere Temperaturdifferenz erzeugt werden.

Ein weiterer Punkt für zukünftige Arbeiten und Untersuchungen wird noch die genauere Betrachtung der Paneele mit ihrer später angedachten Größe von etwa 3,5 m Höhe bei einer Standardbreite von ungefähr 1 m bis 1,2 m sein. Dabei sind möglicherweise die Strömungen in den Kanälen sowie die Temperaturverteilung an der Oberfläche interessante Betrachtungspunkte.

Sind genügend Messungen durchgeführt und genügend Messparameter abgefahren worden, kann eine Kollektorkennlinie ermittelt werden. Mittels dieser Kennlinie kann mit Verwendung von Gebäudesimulationsprogrammen der Jahresertrag solcher Anlagen ausgegeben werden. Dies ist vor allem bei der Auslegung von Anlagen von großer Bedeutung, da so ein Deckungsgrad dieser Anlage abgeschätzt werden kann. Die Verwendung von solchen Simulationsprogrammen ist außerdem in Bezug auf die Ausrichtung der Anlagen gut zu verwenden. Sehr interessant dabei ist beispielsweise eine horizontale beziehungsweise nahezu horizontale Montage der Paneele als Gebäudedach.

Beim Gespräch mit dem lokalen Hersteller [16] von Sandwichpaneelen ist eine erhöhte Aufmerksamkeit auf die Verwendung dieser Paneele als Gebäudedach gerichtet worden. Bei dieser Verwendung würde sich der Vorteil einer weiteren Spannweite mit solchen Paneelen ergeben, da diese eine höhere Steifigkeit wegen der eingearbeiteten Kanäle aufweisen und sich somit die Durchbiegung etwas verringert. Ein weiterer Vorteil beim hydraulischen Betrieb wäre die Kühlung der Paneele, welche sich somit ebenfalls positiv auf die Steifigkeit der Elemente auswirkt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „UNAB - Umsetzung Nachhaltigen Bauens durch optimierte Projektsteuerungsprozesse und integrale Gebäudehüllen, Forschungsprojekt im Rahmen des Zukunftsfonds Steiermark, Technische Universität Graz,“ 2013-2017.
- [2] W. Streicher, TU Graz, 2009.
- [3] T. Schabbach und P. Leibbrandt, Solarthermie, Hochschule Nordhausen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [4] Kerschbaumer, Diplomarbeit: Computersimulation von Solaranlagen zur Brauchwasserbereitung, TU Graz, 1987.
- [5] M. Kaltschmitt, W. Streicher und A. Wiese, Erneuerbare Energien, Springer Vieweg, 2014.
- [6] V. D. Ingenieure, VDI Wärmeatlas, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013; 11. Auflage.
- [7] V. Wesselak, L. Thomas, J. Fischer und T. Schabbach, Regenerative Energietechnik, Springer Vieweg, 2013.
- [8] D. Brumme, „Paradigma,“ 06 2015. [Online]. Available: <http://blog.paradigma.de/waermeverluste-des-kollektors/>. [Zugriff am 14 03 2017].
- [9] K. Hirschfeld, „Schwimmbadabsorbershop,“ [Online]. Available: <http://www.schwimmbadshop.com>. [Zugriff am 14 03 2017].
- [10] W. Weiß und G. Pukarhofer, „Thermische Solarenergie,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2010.
- [11] „SolarServer Das Internetportal zur Sonnenenergie,“ Heindl Server GmbH, 2010. [Online]. Available: www.solarserver.de. [Zugriff am 15 03 2017].
- [12] „Veriox,“ 2017. [Online]. Available: www.veriox.de. [Zugriff am 18 03 2017].
- [13] C. Kromrei, C. Renner, M. Ernst, S. Hickert, U. Knaack, U. Pottgiesser, H. Strauß, S. Zymla und A. Ewert, „Baunetz Wissen Fassade,“ 02 11 2016. [Online]. Available: <http://www.baunetzwissen.de/>.
- [14] H. Schober und D. Brandl, „Paper Gleisdorf Solar 2016,“ TU Graz, 2016.
- [15] *Talum; Tovarniška cesta 10, 2325 Kidričevo; www.talum.si.*
- [16] *Brucha Gesellschaft m.b.H.; Rusterstraße 33, 3451 Michaelhausen; www.brucha.at.*
- [17] N. Instruments, „National Instruments,“ 2017. [Online]. Available: www.ni.com. [Zugriff am 15 03 2017].
- [18] LAUDA, „LAUDA,“ LAUDA DR. R. WOBSE GMBH & CO. KG, [Online]. Available: www.lauda.de. [Zugriff am 28 03 2017].
- [19] „tectonica-online,“ [Online]. Available: www.tectonia-online.com. [Zugriff am 28 03 2017].
- [20] A. S. L. A. Program, „wundermap,“ The Weather Company, LLC, 2017. [Online]. Available: www.wunderground.com. [Zugriff am 2017 03 18].
- [21] *Fluid Dynamics software “ANSYS Fluent 15.0.0”, ANSYS Inc., Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, http://www.ansys.com, Release 14.0 (2011).*
- [22] *“denkmalaktiv I, Sanierung alter, denkmalgeschützter Häuser (refurbishment of old, historical buildings)”, project Nr. 82120.*
- [23] *ANSYS Fluent 15.0. Userguide/Theoryguide.*

- [24] H. Schober, D. Brandl, M. Zellinger, T. Mach und O. Englhardt, „Hybrid Element Facade - Thermal Engineering and Related Structural Evaluation of a Solar Activated Integral Panel,“ TU Graz, Graz, 2015.
- [25] E. O. GmbH und O. H. Obercunnersdorfer Straße 4, „Ofenseite,“ [Online]. Available: www.ofenseite.com. [Zugriff am 15 03 2017].

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4-1: Eigenschaften Aluminium bezüglich der Sonnenstrahlung	47
Tabelle 4-2: Eigenschaften Solarlack.....	48
Tabelle 5-1: Temperaturen und Niederschlag an den aufgezeichneten Tagen.....	60
Tabelle 5-2: Altitude (Sonnenstandshöhe) der betrachteten Tage zu den angegebenen Uhrzeiten	62
Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der Paneelleistungen mit und ohne Solarlackbeschichtung zu den angegebenen Uhrzeiten an verschiedenen Tagen.....	65
Tabelle 5-4: Altitude (Sonnenstandshöhe) der betrachteten Tage zu den angegebenen Uhrzeiten	66
Tabelle 6-1: Randbedingungen Simulation	77
Tabelle 6-2: Gegenüberstellung der Leistungsberechnung	78

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Spektrum der Sonnenstrahlung [2]	3
Abbildung 2-2: Geometrische Zusammenhänge der Sonneneinstrahlung auf geneigte Flächen [5]	5
Abbildung 2-3: Sonnenweg-Diagramm für Standorte mit 47° nördlicher Breite [2]	7
Abbildung 2-4: Zeichnung des französischen Architekten und Ingenieurs Salomon de Caus aus dem Jahr 1615 [7].....	10
Abbildung 2-5: Energieflüsse eines Kollektors [2].....	11
Abbildung 2-6: Wirkungsgradkennlinie und Einsatzgebiete verschiedener Kollektortypen [8] ...	15
Abbildung 2-7: Schwimmbadabsorber mit Rippenrohr [9].....	16
Abbildung 2-8: Prinzipieller Aufbau eines Flachkollektors [11]	17
Abbildung 2-9: Vakuumröhrenkollektor [12]	18
Abbildung 2-10: Aufbau Sandwichpaneel (vier Bleche) [14]	20
Abbildung 2-11: Sandwichpaneel mit Fluidkanälen [14]	20
Abbildung 2-12: Darstellung der Temperaturverläufe innerhalb des Fassadenelementes für verschieden Szenarien im Sommerfall [14]	21
Abbildung 2-13: Mögliche Kanalgeometrien [15]	22
Abbildung 2-14: Integrales Fassadenelement der TU Graz	23
Abbildung 3-1: Konstruktionszeichnung Versuchsstand.....	27
Abbildung 3-2: Versuchsstand – Einhausung	27
Abbildung 3-3: Boxenaufbau	28
Abbildung 3-4: Versuchsstand mit integrierten Boxen	29
Abbildung 3-5: Lageplan Versuchsstand	30
Abbildung 3-6: Bodeneinschlaghülse	32
Abbildung 3-7: Kantholzkonstruktion	32
Abbildung 3-8: Unterstand	33
Abbildung 3-9: Unterstand mit gedämmten Boxen	33
Abbildung 3-10: Paneel mit Rahmen	34
Abbildung 3-11: Boxen mit montierten Paneelen	34
Abbildung 3-12: fertig gedämmte Box	35
Abbildung 3-13: Wasserversorgungsvarianten	35
Abbildung 3-14: oberirdische Wasserzuleitung	36
Abbildung 3-15: Hydraulikkomponenten.....	38
Abbildung 3-16: Rücklaufleitungen mit Temperaturmessung.....	39
Abbildung 3-17: Thermoelement Typ k	40
Abbildung 3-18: Widerstandsthermometer PT100.....	40
Abbildung 3-19: Durchflusstransmitter OMNI-MID1.....	40
Abbildung 3-20: Position der Thermoelemente	41
Abbildung 3-21: eingebaute Thermoelemente.....	42
Abbildung 3-22: LabVIEW Oberfläche.....	43
Abbildung 3-23: Kalibrierung im Wasserbecken LAUDA ECO GOLD RE 1225 [18]	44
Abbildung 3-24: Aufbau der Kalibrierung	45
Abbildung 3-25: Temperatursensoren im Wasserecken eingetaucht	45
Abbildung 3-26: LabVIEW Aufzeichnung und Kalibrierung.....	46
Abbildung 4-1: Paneel mit aufgebrachtem Solarlack.....	48
Abbildung 4-2: Nipon Industrial College, Tokyo;2001 [19].....	50

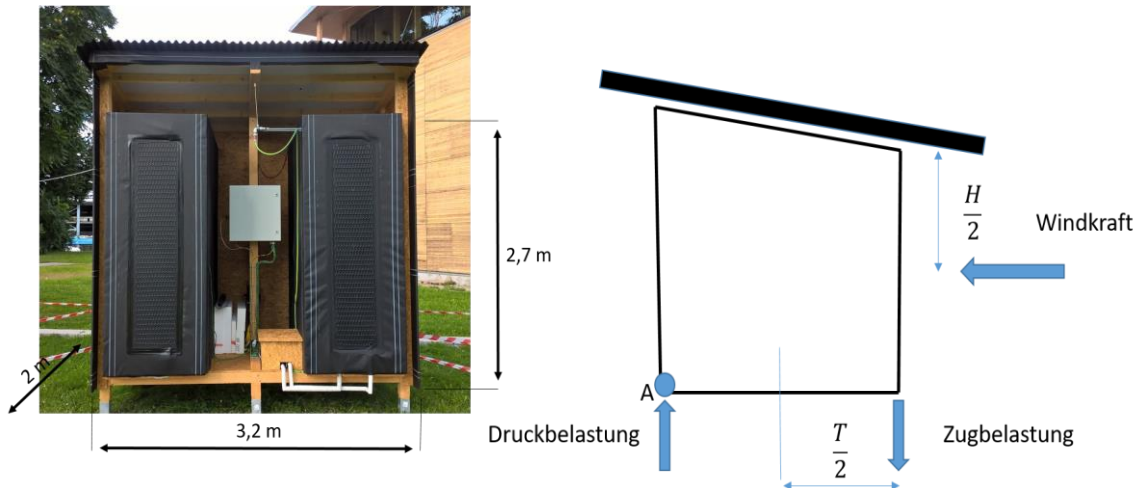
Abbildung 4-3: Eingraben der Zuleitung	51
Abbildung 4-4: Position der Zuleitungen	52
Abbildung 4-5: Strangregelventile für die beiden Vorläufe	53
Abbildung 4-6: Heizregister zum Einstellen der Vorlauftemperatur	54
Abbildung 5-1: Parametervariationen	55
Abbildung 5-2: Vergleichsmessung der beiden Paneele.....	58
Abbildung 5-3: Leistungsgegenüberstellung 15.09.2016 (Paneele mit Solarlack).....	63
Abbildung 5-4: Leistungsgegenüberstellung 30.09.2016 (Paneele mit Solarlack).....	63
Abbildung 5-5: Leistungsgegenüberstellung 31.10.2016 (Paneele mit Solarlack).....	64
Abbildung 5-6: Diagramm der spezifischen Leistung - blankes Aluminium.....	64
Abbildung 5-7: Diagramm der spezifischen Leistung mit Solarlackbeschichtung	65
Abbildung 5-8: Vergleich des Temperaturverlaufes der Oberflächentemperaturen am Referenzpaneel vom 08.09.2016 zum 15.09.2016	66
Abbildung 5-9: Temperaturvergleich der Boxeninnerräume (30.09.2016)	67
Abbildung 5-10: Kennlinien des Paneels mit blankem Aluminium	70
Abbildung 5-11: Kennlinien des Paneels mit Solarlack	71
Abbildung 5-12: Temperaturverlauf beim Durchströmen mit Warmwasser	73
Abbildung 5-13: Temperaturverlauf beim Durchströmen mit Kaltwasser	74
Abbildung 6-1: Darstellung (1) des CFD Netzgitters sowie (2) der Temperaturkonturen an der Absorberblechoberfläche und (3) Konturen der Strömungsgeschwindigkeit in den Fluidkanälen zu den Randbedingungen aus der Messung vom 23.09.2016 um 12:00 Uhr. [1]	76
Abbildung 6-2: Gegenüberstellung Thermographieaufnahme vs. Simulation ohne Luftkörper vor der Fassade [1]	77

ANHANG

ANHANG 1: WINDKRAFTBERECHNUNG

Windbelastungsberechnung auf das Fundament

Maße der Rückseite (Nordseite) und Tiefe



$$A_{\text{Stand}} = B \cdot H$$

Breite [m]	Höhe [m]	Tiefe [m]	Fläche [m ²]	Windkraft [kN/m ²]	Res Windkraft [kN]	Anzahl der Bodeneinschlaghülsen
3,2	2,7	2	8,64	0,4	3,456	3

$$\Sigma M_A = 0 = \frac{H}{2} * F_W - T * F_{\text{Fund}}$$

F_WWindkraft
 F_{Fund}Zugbelastung auf Fundament

F_{fund} [kN]

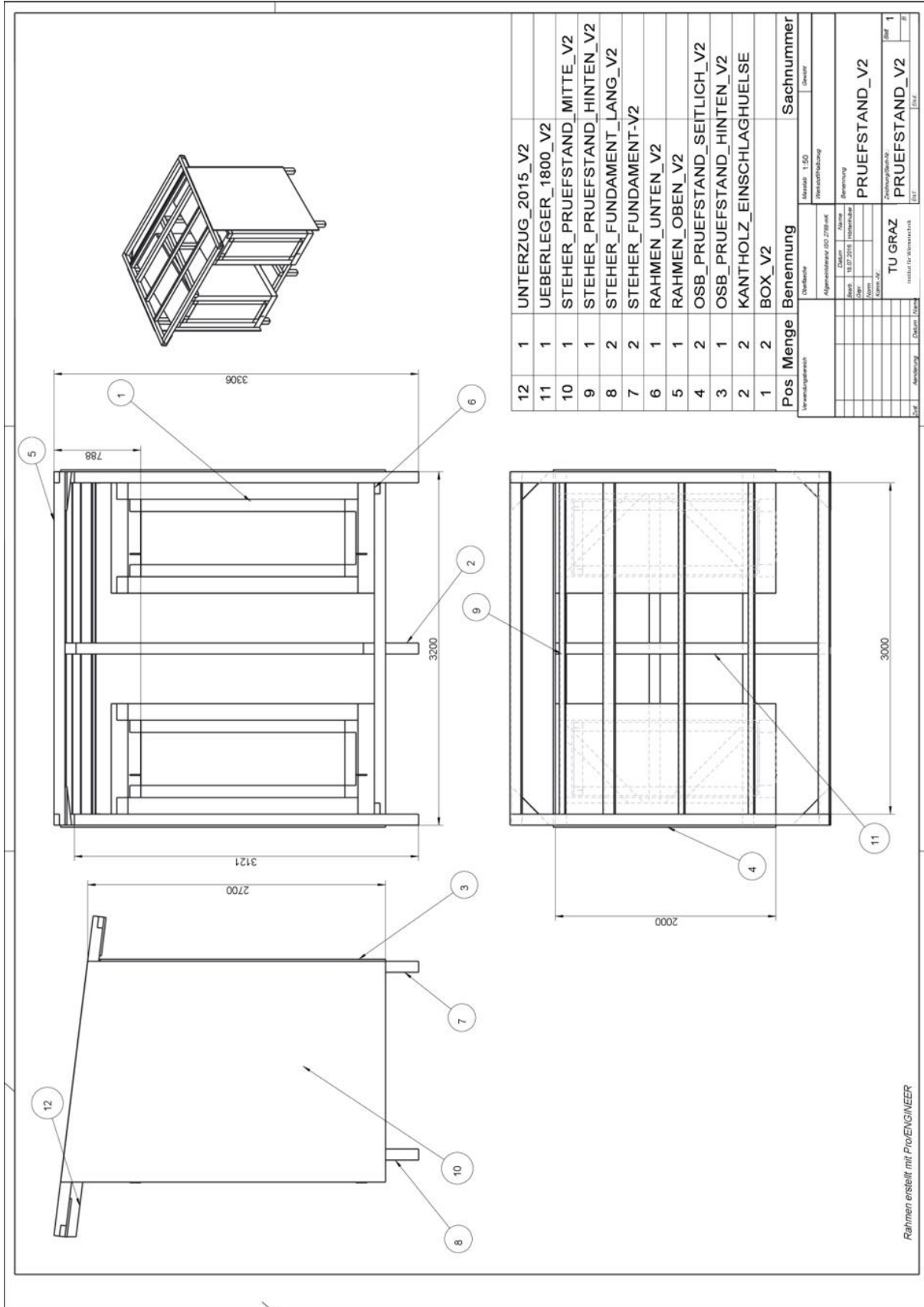
0,7776

Spezifischer Wert für die Windkraftberechnung im Raum Graz: $F_W = 0,4 \frac{kN}{m^2}$.

Bei einer 100-jährigen Windlast mit $F_W = 1,0 \frac{kN}{m^2}$ würde sich eine Zugbelastung auf das Fundament von $F_{\text{Fund}} = 1,944 kN$ ergeben.

In der Angabe der spezifischen Windkraft sind bereits der Außendruck und der Innendruck überlagernd einbezogen.

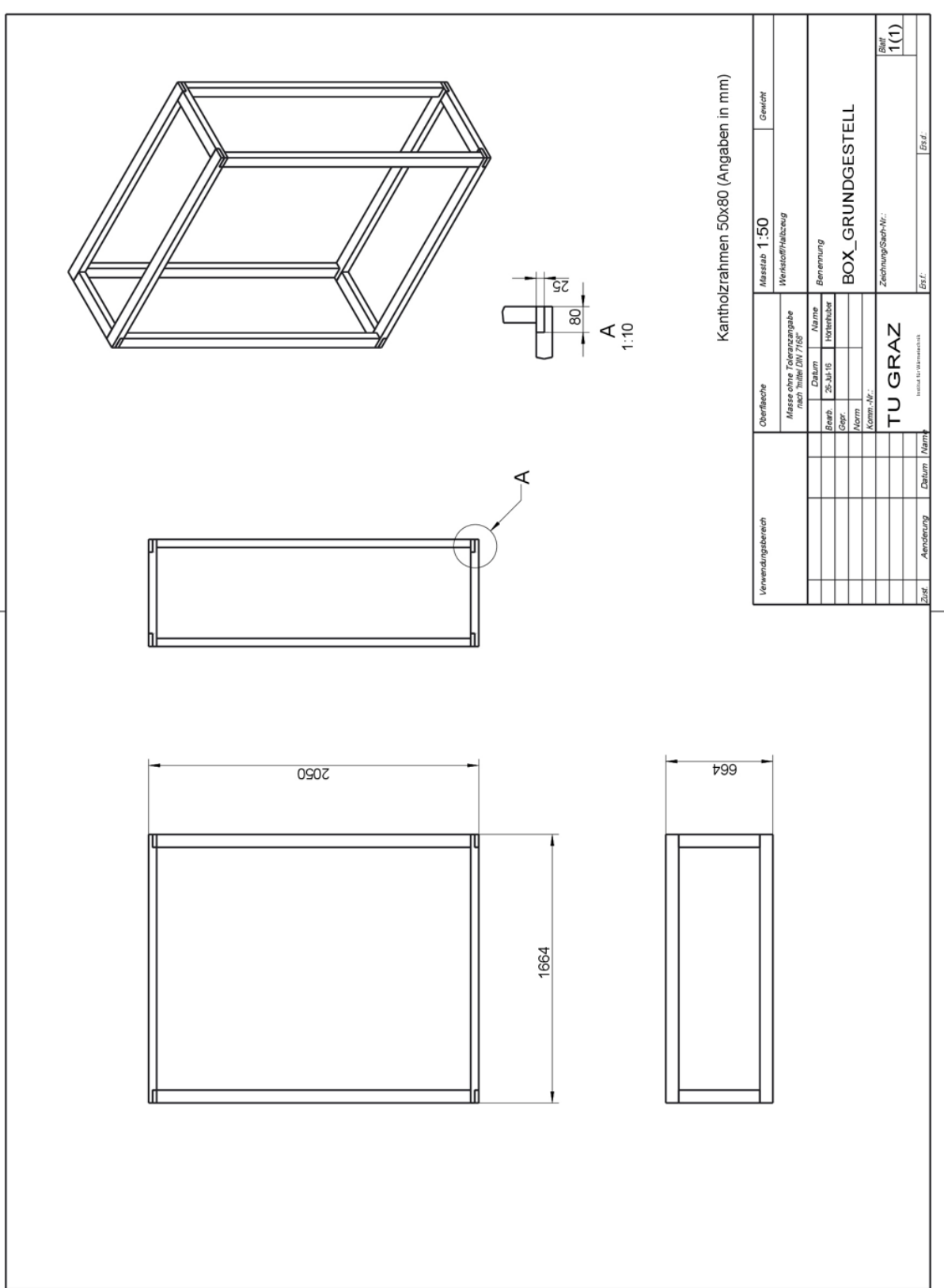
ANHANG 2: KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN



Pos	Menge	Benennung	Sachnummer
12	1	UNTERZUG_2015_V2	
11	1	UEBERLEGER_1800_V2	
10	1	STEHER_PRUEFSTAND_MITTE_V2	
9	1	STEHER_PRUEFSTAND_HINTEN_V2	
8	2	STEHER_FUNDAMENT_LANG_V2	
7	2	STEHER_FUNDAMENT_V2	
6	1	RAHMEN_UNTEN_V2	
5	1	RAHMEN_OBEN_V2	
4	2	OSB_PRUEFSTAND_SEITLICH_V2	
3	1	OSB_PRUEFSTAND_HINTEN_V2	
2	2	KANTHOLZ_EINSCHLAGHUELSE	
1	2	BOX_V2	

Benennung		Sachnummer	
Material	1.50		
Hersteller	Hersteller		
Administrativ			
Agens	278-ink		
Benennung	PRUEFSTAND_V2		
Datum	18.07.2018		
Historie			
Erstellt			
Geprüft			
Komplex-Nr.			
TU GRAZ			
Institut für Wasserbau			
Blatt			
Abbildung			
Blatt			

Rahmen erstellt mit ProENGINEER



Kantholzrahmen 50x80 (Angaben in mm)

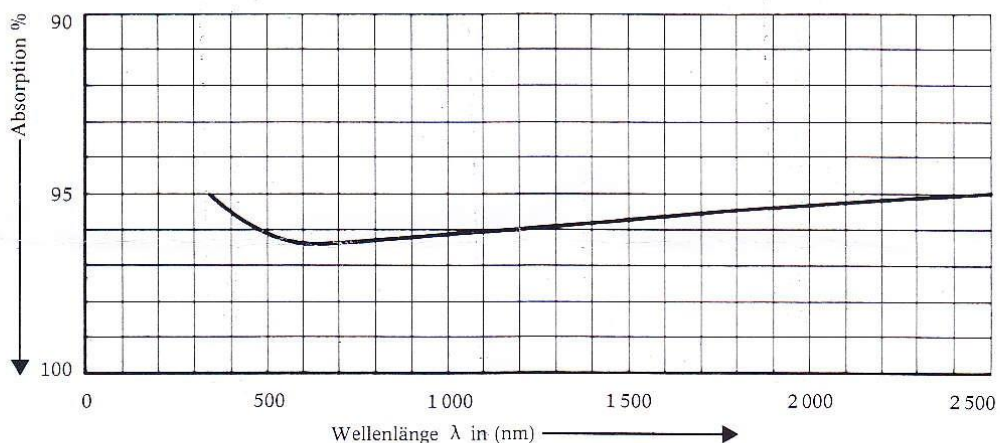
Verwendungsbereich		Oberfläche		Massestab 1:50	
		Masse ohne Toleranzangabe nach Teller DIN 7168	Werkstoff/ Holzart		Gewicht
		Bearb. 25. Juli 16	Datum		
		Gepr.	Name		
		Norm	Höhenhuber		
		Kommentar:	Benennung		
			BOX_GRUNDGESTELL		
			Zeichnungs-Nr.:		
			Blatt		
			1(1)		
			Erst.		
			Erst.		

ANHANG 3: DATENBLATT SOLARLACK

TRANSFER-ELECTRIC**SOLARLACK®**

Die umweltfreundliche Beschichtung für Sonnenkollektoren.

Mit ABSORPTIONSPIGMENTEN angereicherter, besonders temperaturbeständiger Speziallack.



Absorptionskurve in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei 135° C.

SOLARLACK M 40 Li

Temperaturbeständiger Lack auf Basis von Mischpolymerisaten für Metall- und Kunststoffkollektoren.

Dichte	1,04 g/cm ³
Ergiebigkeit	ca. 6 m ² / kg
Absorptionskoeffizient	$\alpha = 0,95$
Emissionskoeffizient	$\epsilon = 0,86$
Temperaturbeständigkeit	- 60 °C bis + 250 °C
Flammpunkt nach DIN 51 755	nicht entflammbar

© eingetragenes Warenzeichen der Transfer-ELECTRIC

TRANSFER-ELECTRIC GmbH · Postfach 13 27 · D-49442 Lemförde
Telefon 0 54 43 / 18 08 · Telefax 0 54 43 / 27 15

PRODUKTINFORMATION

Allgemeines

Ein namhaftes Entwicklungs- und Forschungsteam befaßt sich seit über 15 Jahren mit der Absorption und Emission von Schwarzlackbeschichtungen für Energieumwandlungen. Die Detailarbeit in der Praxis und das Modifizieren von neuen Systemen ermöglichen ein Höchstmaß an Erfahrungs- und Informationsweitergabe.

Besondere Vorteile

TRANSFER-SOLARLACK ist eine umweltfreundliche Ein-Komponenten-Beschichtung auf Basis von lösungsmittelfreier, wäßriger Dispersion, die z.B. im Druckluft-Spritzverfahren verarbeitet werden kann. Die Dispersion ist verarbeitungstechnisch vorteilhaft, weil sie einen hohen Festgehalt bei niedriger Viskosität besitzt und außerdem keine Lösungsmittelprobleme bereitet.

Verarbeitungsvorbereitungen

Die Oberflächen von Metallkollektoren sollten vor dem Beschichten mit **TRANSFER-CLEANER** gereinigt werden. Korrosionsanfällige Metalle sind vor der Lackierung mit dem **ALLZWECKPRIMER** zu beschichten. Verzinkte und Zinkoberflächen sollten grundsätzlich mit Allzweckprimer vorlackiert werden. Kunststoff-Oberflächen müssen sauber und frei von Ölen und Fetten sein.

TRANSFER-SOLARLACK muß generell vor der Verarbeitung und bei längeren Arbeitsunterbrechungen aufgerührt werden.

Wichtige Verarbeitungshinweise

TRANSFER-SOLARLACK ist in einem weiten Druckbereich einwandfrei versprühbar. Gute Ergebnisse werden mit Becherpistolen, Spritzdruck ca. 4 bar, Düsenweite 1,5 – 2 mm, erzielt. Der Spritzdruck und das Strahlregelventil sind so einzustellen, daß eine dünne Beschichtung erfolgt. Aufgrund der hohen Füllstoffanteile ist das Airless-Spritzverfahren nicht zu empfehlen, herkömmliche Spritzautomaten können jedoch für die Verarbeitung vorgesehen werden. Die Trocknung des **TRANSFER-SOLARLACKS** kann durch Luft-trocknung oder Wärmetrocknung bis ca. 80 °C erfolgen. Empfehlenswert ist die Wärmebehandlung mit Infrarotstrahlern, Schnelltrocknern oder Durchlauföfen, die eine optimale Kratz- und Abriebfestigkeit der Beschichtung bei verkürzter Trocknungszeit gewährleisten.

Trocknungszeiten

Bei ausreichender Luftbewegung liegen folgende Trocknungszeiten vor:

Temperatur	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C
Stapelfestigkeit	15 – 30 Min.	10 – 15 Min.	5 – 10 Min.	4 – 5 Min.

TRANSFER-SOLARLACK ist weder brennbar noch explosionsfähig, so daß Vorsichtsmaßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen (z.B. ex-geschützte Verarbeitungsgeräte) nicht erforderlich sind. Der Solarlack ist physiologisch unbedenklich und nicht toxisch.

Reinigung der Arbeitsgeräte

Die verwendeten Arbeitsgeräte sollten sofort nach Beendigung des Arbeitsvorgangs mit Wasser gereinigt werden, da angetrocknete Rückstände nur schwer entfernt werden können.

Lagerfähigkeit und Gebindegrößen

TRANSFER-SOLARLACK ist in verschlossenen Kunststoffgebinden bei sachgemäßer, vor Frost geschützter Lagerung mindestens sechs Monate lagerfähig. Günstigste Lagertemperatur zwischen + 5 °C und 30 °C.

Unsere Angaben sind aufgrund praktischer Erfahrungen nach dem neuesten Stand der Technik zusammengestellt. Ein eigener Versuch wird Sie von den Vorzügen des **TRANSFER-SOLARLACKS** überzeugen; prüfen Sie, ob sich das Produkt für Ihre Zwecke eignet.

Verpackung: Einweg-Kunststoffgebinde à 1,5 / 3 / 5 / 10 und 60 kg, Mindestabnahme 1,5 kg.

TRANSFER-ELECTRIC GmbH

Postfach 13 27 · D-49442 Lemförde

Telefon 0 54 43 / 18 08 · Telefax 0 54 43 / 27 15

ANHANG 4: DATENBLATT DURCHFLUSS TRANSMITTER

GHM Messtechnik GmbH – Standort Honsberg
 Tenter Weg 2-8 • 42897 Remscheid • Germany
 Fon +49-2191-9672-0 • Fax -40
 www.ghm-messtechnik.de • info@honsberg.com



OMNI-MID1

Produktinformation

**Durchflusstransmitter /
-schalter OMNI-MID1**



- Für alle elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten
- Keine bewegten Teile im Strömungsraum
- Hohe Überlastsicherheit
- Niedriger Druckverlust
- Analogausgang, zwei Schaltausgänge
- Klare, gut lesbare, beleuchtete Grafik-LCD-Anzeige
- Wechselbare Dimensionen in der Anzeige
- Kleine kompakte Baumaße

Merkmale

Das MID1-System besteht aus einer Anzahl von Sensoren, die die Durchflussgeschwindigkeit einer strömenden Flüssigkeit nach dem Prinzip des Faradayschen Induktionsgesetzes messen. Die Flüssigkeit muss dazu eine elektrische Mindestleitfähigkeit von 50 µS/cm aufweisen. Es sind drei verschiedene Nennweiten verfügbar.
 Die Sensoren sind mit verschiedenen Auswertelektroniken erhältlich, die sich in Art und Zahl der Ausgänge und im Bedienungskomfort unterscheiden.

Der auf dem Messwertempfänger befindliche OMNI-Messumformer besitzt ein grafisches hintergrundbeleuchtetes LCD-Display, das sowohl im Dunkeln als auch in hellem Sonnenlicht sehr gut ablesbar ist. Das Grafikdisplay erlaubt die Anzeige von Messwerten und Parametern in klarer verständlicher Form. Die Messwerte werden 4-stellig zusammen mit ihrer physikalischen Einheit angezeigt, die auch vom Benutzer verändert werden kann. Die Elektronik verfügt über einen Analogausgang (4..20 mA oder 0..10 V) und zwei Schaltausgänge, die als Grenzwertschalter zur Minimum- oder Maximum-Überwachung oder als Zweipunktregler verwendet werden können.

Die Schaltausgänge sind als Push-Pull-Treiber ausgeführt und können daher sowohl als PNP- als auch als NPN-Ausgang verwendet werden. Die Überschreitung von Grenzwerten wird mit einer weit sichtbaren roten LED und durch eine Klarschriftmeldung im Display signalisiert. Das Edelstahlgehäuse besitzt eine gehärtete kratzeste Mineralglasscheibe. Die Bedienung erfolgt durch einen magnetbetätigten Programmiering, so dass keine Gehäusedurchbrüche für Bedienelemente notwendig sind und die Dichtigkeit des Gehäuses dauerhaft gewährleistet ist.

Der Ring erlaubt durch Drehen nach links und rechts einfaches Verändern der Parameter (z.B. Schwellpunkt, Hysterese...). Als Schutz vor unbeabsichtigter Programmierung kann er abgenommen und um 180° gedreht wieder aufgesetzt oder wie ein Schlüssel komplett abgenommen werden.

OPTION C:
 Vorwahlzähler mit externer Rücksetzmöglichkeit, antivalenten Schaltausgängen und Momentanwertanzeige.

OPTION C1:
 Momentanwertanzeige mit Analogausgang, Volumen-Pulsausgang und Summenzähler.

Technische Daten

Sensor	magnetisch-Induktiv	
Nennweite	DN 8..25	
Anschlussart	Außengewinde R 1/4", R 1/2", R 1"	
Messbereiche	0,05..60 l/min	Details siehe Tabelle
Messunsicherheit	0,05..1,5 l/min	„Bereiche“
Wiederholgenauigkeit	1 %	
Elektrische Mindestleitfähigkeit (Medium)	50 µS/cm	
Druckfestigkeit	PN 10 bar	
Druckverlust	max. 0,3 bar bei max. Durchfluss	
Medientemperatur	0..+60 °C (Frost und Betauung vermeiden)	
Umgebungstemperatur	0..+60 °C	
Lagertemperatur	-20..+80 °C	
Werkstoffe medienberührt	Edelstahl 1.4404, PPS, FKM	
Werkstoffe nicht medienberührt	Gehäuse Glas Magnet Ring	Edelstahl 1.4305 Mineralglas, gehärtet Samarium-Cobalt POM
Versorgung	18..24 V DC	
Leistungsaufnahme	< 1 W	
Analogausgang	4..20 mA / Last max. 500 Ω oder 0..10 V / Last min. 1 kΩ	
Schaltausgänge	Transistorausgang "Push-Pull" (kurzschluss- und verpolungsfest) I _{out} = 100 mA max.	
Hysterese	einstellbar, Lage der Hysterese von Min. oder Max. abhängig	
Anzeige	grafisches LCD-Display erweiterter Temperaturbereich -20..+70 °C, 32 x 16 Pixel, Hintergrundbeleuchtung, zeigt Wert und Einheit, LED-Meldeleuchte blinkend mit gleichzeitiger Meldung im Display	
Elektr.-Anschluss	für Rundsteckverbinder M 12x1, 5-polig	
Schutzart	IP 64	
Gewicht	R 1/4" R 1/2" R 1"	ca. 0,35 kg ca. 0,35 kg ca. 0,45 kg

... professionelle Messtechnik „MADE IN GERMANY“

GHM Messtechnik GmbH – Standort Honsberg
 Tenter Weg 2-8 • 42897 Remscheid • Germany
 Fon +49-2191-9672-0 • Fax -40
 www.ghm-messtechnik.de • info@honsberg.com



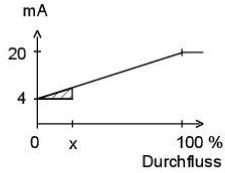
OMNI-MID1

Produktinformation

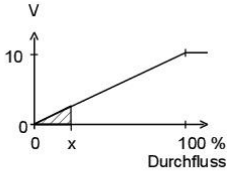
Signalausgangskennlinien

Wert x = Anfang des spezifizierten Messbereichs
 = nicht spezifizierter Bereich

Stromausgang



Spannungsausgang

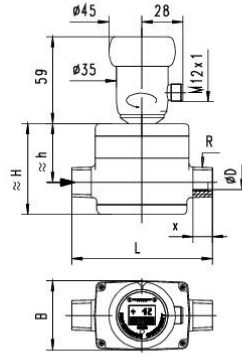


Andere Kennlinien auf Anfrage

Bereiche

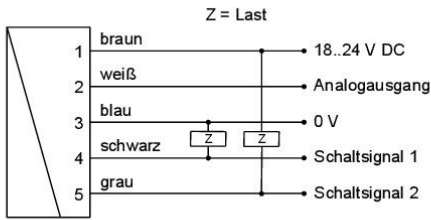
R	Nennweite	Messbereich l/min H2O	Messunsicherheit
R 1/4"	DN 8	0,05.. 1	2,5 % vom Messwert, mindestens 0,005 l/min
R 1/2"	DN 15	0,50..10	2,5 % vom Messwert, mindestens 0,05 l/min
R 1"	DN 25	3,00..60	2,5 % vom Messwert, mindestens 0,3 l/min

Abmessungen



	L	H	h	R	x	B	D
	mm	mm	mm		mm	mm	mm
OMNI-MID 1-008	85	59	39	1/4"	9	47	5
OMNI-MID 1-015	95	63	42	1/2"	13	47	10
OMNI-MID 1-025	110	72	45	1"	16	49	20

Anschlussbild



Anschlussbeispiel: PNP NPN



Steckverbinder M12x1

Siehe separates Anschlussbild von Option C und C1 in separaten Beschreibungen.

Vor der Elektroinstallation ist darauf zu achten, dass die Versorgungsspannung den Datenangaben entspricht.
 Die Verwendung abgeschirmter Leitung wird empfohlen.

... professionelle Messtechnik „MADE IN GERMANY“

GHM Messtechnik GmbH – Standort Honsberg
 Tenter Weg 2-8 • 42897 Remscheid • Germany
 Fon +49-2191-9672-0 • Fax -40
 www.ghm-messtechnik.de • info@honsberg.com



OMNI-MID1

Produktinformation

Handhabung und Betrieb

Montage

Das Gerät wird mittels zweier Außengewinde in die Rohrleitung oder geeignete Anschlussstücke eingeschraubt. Hierbei ist auf die Richtung zu achten (auf dem Gehäuse angebrachter Pfeil in Durchflussrichtung). Die Eindichtung erfolgt z.B. mit Teflonband oder Flüssigdichtung.

Folgende Anzugsdrehmomente sind anzuwenden:

R 1/4 "	3 ±0,5 Nm
R 1/2 "	5 ±0,5 Nm
R 1	12 ±1,0 Nm

Der Betrieb des Sensors ist in jeder Lage möglich. Luftblasen sollten aber vermieden werden. Durchfluss von unten nach oben wird empfohlen.
 Der Elektronikkopf wird auf dem Sensorkörper montiert geliefert.

Eine Winkelbelastung des Sensors ist zu vermeiden. Die Rohre, in die eingebaut wird, sollen fluchten. 10 x D im Einlauf und Auslauf sind zu berücksichtigen.

Programmierung

Der Ringspalt des Programmierings lässt sich in die Pos. 1 und Pos. 2 auslenken. Folgende Aktionen sind möglich:



**Tasten auf 1 = weiter (STEP)
 Tasten auf 2 = ändern (PROG)**

Ruhelage zwischen 1 und 2

Der Ring ist als Schlüsselssystem abnehmbar oder verdreht wieder aufsteckbar um Programmierschutz zu erhalten. Die Bedienung erfolgt im Dialog mit den Displaymeldungen, was eine einfache Handhabung sicherstellt. Wird ausgehend von der Normalanzeige (Momentanmesswert mit Einheit) wiederholt auf 1 (STEP) getastet, so wird die Anzeige nacheinander folgende Informationen anzeigen:

Anzeige der Parameter mit Pos. 1

- Schaltwert S1 (Schaltpunkt 1 in der gewählten Einheit)
- Schaltcharakteristik von S1
 MIN = Minimalwertüberwachung
 MAX = Maximalwertüberwachung
- Hysterese 1 (Hysteresewert von S1 in der eingestellten Einheit)
- Schaltwert S2
- Schaltcharakteristik von S2
- Hysterese 2
- Code
 Nach Eingabe des **Code 111** können weitere Parameter bestimmt werden:
- Filter (Einschwingzeit von Anzeige und Ausgang)
- Physikalische Einheit (Units)
- Ausgang (Output): 0..20 mA oder 4..20 mA
- 0/4 mA (Messwert, der 0/4 mA entspricht)
- 20 mA (Messwert, der 20 mA entspricht)

Bei Ausführungen mit Spannungsausgang sind 20 mA sinngemäß durch 10 V zu ersetzen.

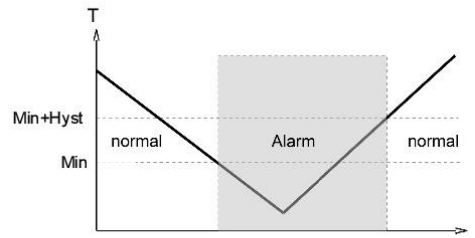
Ändern (editieren) mit Pos. 2

Wenn der gerade sichtbare Parameter geändert werden soll:

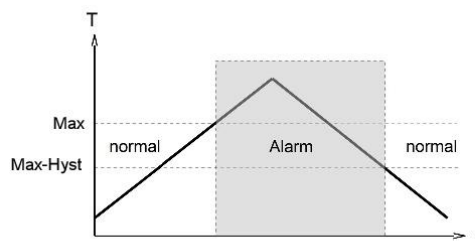
- Ringspalt auf Pos. 2 drehen und es erscheint ein blinkender Cursor, der die änderbare Stelle anzeigt
- Durch wiederholtes Drehen auf Pos. 2 werden die Werte erhöht, durch Drehen auf Pos. 1 wandert der Cursor zur nächsten Stelle
- Verlassen des Parameters durch Drehen auf Pos. 1 (bis Cursor die Zeile verlässt) heißt die Änderung übernehmen
- Bei keiner Aktion innerhalb 30 Sekunden springt das Gerät wieder auf den normalen Anzeigebereich zurück, ohne dass die Änderung übernommen wird

Die Grenzwertschalter S1 und S2 können zur Minimum- oder Maximum-Überwachung verwendet werden.

Bei einem Minimum-Schalter führt das Unterschreiten des Grenzwertes zum Umschalten in den Alarmzustand. Die Rückkehr in den Normalzustand erfolgt, wenn der Grenzwert zuzüglich der eingestellten Hysterese wieder überschritten wird.



Bei einem Maximum-Schalter führt das Überschreiten des Grenzwertes zum Umschalten in den Alarmzustand. Die Rückkehr in den Normalzustand erfolgt, wenn der Grenzwert abzüglich der eingestellten Hysterese wieder unterschritten wird.



Das Wechseln in den Alarmzustand wird durch die integrierte rote LED und eine Klarschriftmeldung im Display angezeigt. Die Schaltausgänge sind im Normalzustand auf Versorgungsspannungsspannungspegel, im Alarmzustand auf 0 V, so dass ein Kabelbruch beim Signalempfänger ebenfalls Alarmzustand anzeigen würde.

Überlastanzeige

Überlast eines Schaltausganges wird detektiert, auf dem Display angezeigt ("Check S1/S2") und der Schaltausgang wird abgeschaltet.

... professionelle Messtechnik „MADE IN GERMANY“

GHM Messtechnik GmbH – Standort Honsberg
 Tenter Weg 2-8 • 42897 Remscheid • Germany
 Fon +49-2191-9672-0 • Fax -40
 www.ghm-messtechnik.de • info@honsberg.com



OMNI-MID1

Produktinformation

Simulationsmodus

Zur einfacheren Inbetriebnahme bietet der Sensor einen Simulationsmodus des analogen Ausgangs. Es ist möglich einen programmierbaren Wert im Bereich 0..21,0 mA (bzw. 10 V) am Ausgang zu erzeugen (ohne die Prozessgröße zu verändern). Hiermit kann bei der Inbetriebnahme die Strecke zwischen Sensor und nachgeschalteter Elektronik getestet werden. Zu erreichen ist dieser Modus über **Code 311**.

Werkseinstellung

Nach Veränderung der Konfigurationsparameter ist ein Zurückstellen zur Werkseinstellung mit **Code 989** jederzeit möglich.

Bestellschlüssel

Bestellt wird das Grundgerät z.B. MID1-xxx mit Auswerteelektronik z.B. OMNI-MID1-xxx

MID1- 1. 2. **A** 3. **P** 4. 5. **E**

OMNI - MID1- 6. 7. 8. **S** 9.

○ = Option

1. Nennweite			
008	DN 8 - R 1/4"		
015	DN 15 - R 1/2"		
025	DN 25 - R 1"		
2. Anschlussart			
A	Außengewinde		
3. Gehäusematerial			
P	PPS		
4. Messbereich			
001	0,05.. 1 l/min		•
010	0,50..10 l/min		•
060	3,00..60 l/min		•
5. Anschluss für			
E	Auswerteelektronik		
6. Für Nennweite			
008	DN 8 - R 1/4"		
015	DN 15 - R 1/2"		
025	DN 25 - R 1"		
7. Analogausgang			
I	Stromausgang 0/4..20 mA		•
U	○ Spannungsausgang 0/2..10 V		•
K	ohne		•
8. Elektrischer Anschluss			
S	Für Rundsteckverbinder M12x1, 5-polig		
9. Optionen			
C	○ Zähler C		
C1	○ Zähler C1		

Optionen

- Zähler C (Hard- und Software-Option): Vorwahlzähler mit externer Rücksetzmöglichkeit, antivalenten Schaltausgängen und Momentanwertanzeige (geändertes Anschlussbild!)
- Zähler C1 (Software-Option): Momentanwertanzeige mit Analogausgang, Volumen-Pulsausgang und Summenzähler

siehe separate Information zu Zähleroption C und C1.

- Gehäusematerial PEEK

Zubehör

- Rundsteckverbinder / Kabel (KB...)
Weitere Informationen erhalten Sie im Hauptverzeichnis „Zubehör“
- Gerätekonfigurator ECI-1

... professionelle Messtechnik „MADE IN GERMANY“

ANHANG 5: DATENBLATT PT100

PTS-P Mantel – Widerstandsthermometer M12

Sensorelement:

Messwiderstand: Pt 100 DIN EN 60751 Kl. F 0,15 / 0 °C; Einfachelement, 4 - Leiterschaltung

Thermometer: Kl. A / 0 °C; Einsatztemperatur: -40 bis 500 °C

Fühlerrohr:

Einbaulänge L: 100 mm

Durchmesser: 3 mm

Werkstoff: Edelstahl AISI 316ss; 1.4401

Prozessanschluss:

Stecker direkt montiert Type: M12 4-polig Male (PIN 1/2 und 3/4)

Aufdruck auf Stecker Ω bei 0 °Celsius

Performance Level auf Basis der MTTF: 100075 Jahre

Zolltarifnummer: 90259000 Ursprungsland: IT

Type: PTS-P-0100.30.M12; PMR Nr.: 10185

PTS

Platin Temperature Sensor – Plug Pt100
Pt100 Mantelwiderstandsthermometer – Stecker



Beschreibung:

Der **PTS-P** ist der ideale Pt100-Temperaturfühler für die Kombination von hoher Genauigkeit und rauen Umgebungsbedingungen. Die einfache Montage durch den M12-Stecker mit goldbeschichteter Oberfläche und 4-Leiter Anschluss vereinfachen die Montage in Einsatzfällen. Der IP67 dichte Stecker erhöht die Verfügbarkeit und Standzeit von Anlagen erheblich. Das Steckergehäuse ist direkt kunststoffumspritzt und gegen Umwelteinflüsse geschützt. Die hohe Verarbeitungsqualität umfasst die Verarbeitung von Edelstahl-Mantelmaterial, einen Einsatzbereich von -70°C bis 550°C sowie der Klassengenauigkeit „A“. Der Widerstandswert bei 0°C ist auf Kunststoffstecker aufgedruckt.

Zubehör:

- Anschlussleitungen mit M12-Buchse, Länge 5m und 10m
- Aufsteckbare Messumformer auf 4 ... 20mA-Signal

Description:

The **PTS-P** is the ideal RTD100 temperature sensor for combining high accuracy and harsh environments. The simple installation through the M12-connector with gold-coated surface and 4-wire connection simplify assembly in use cases. The IP67 sealed connectors increases the availability and service life of systems considerably. The connector housing is directly plastic molding and protected against environmental influences. The high quality finish includes the processing of mineral isolated sheath material, a range of use from -70 °C to 550 °C and accuracy of class „A“. The resistance value at 0 °C is printed on plastic plug temperature sensor.

Accessories:

- Connection cables with M12 socket, length 5m and 10m
- Plug on transmitter 4 ... 20mA-signal.

- **Robuster Aufbau / Strong construction**
- **Schutzgrad IP67 / protection degree IP67**
- **Einfache Montage/ Easy mounting**

Zertifikate/Certification

CE	SIL 2	EAC	Werkszertifikate	Kalibrierzertifikate
			2.2	Werk / ÖKD / DAkks

Technische Daten Technical Data	PTS-P	
Sensorelement / Sensorelement	Pt 100 DIN EN 60751 Kl. A / 0°C; 4-Leiterschaltung / 4-wire connection	
Mantelmaterial / Sheath material	Edelstahl 1.4401 / Stainless steel AISI 316SS mineral - insulated	
Einsatztemperatur/ Oper. temperature	-70°C bis/up to 550°C	
Druckbeständig / Pressure resistant	ab/from Ø 3mm ≤ 400 bar @ 25°C	
MTTF	10075 Jahre / Years	
Einbaulänge / Built-in length	100mm/150mm/200mm/250mm/ 500mm/Standard Andere Einbaulängen auf Anfrage Other lengths on request	
Durchmesser / Diameter	Von/from 1,6mm bis 6mm - 3mm/Standard Verjüngte Spitze 3mm / 6mm reduced tip 3mm / 6mm	
Biegeradius / Bending radius	3 x Ø	
Anschluss / Connection	M12 Stecker 4 Kontakte, Schutzart IP67 Pin 1-2 / Pin 3-4 M12 Plug 4 contacts, protection IP67 Pin 1-2 / Pin 3-4	
Einsatztemperatur/ Oper. temperature	Stecker / Plug max. 105°C	
Zubehör / Accessories	Anschlussleitung mit M12 Buchse / Extension-cable with M12 female	
Kabelaufbau / Cable construction	4 x 0,2mm ² AWG 24	
Einsatztemperatur / Oper. temperature	Max. 105°C	
Kabellängen / Cable lengths	5m / 10m – Andere Kabellängen auf Anfrage / Other cable-lengths on request	

Typenschlüssel / Type code: **PTS-P**

PTS-P	0100		100mm*
	0150		150mm*
	0200	Einbaulänge / Built-in length	200mm*
	0250		250mm*
	0500		500mm
	XXXX	Auf Anfrage / On request	bis 1.000mm / up to 1.000mm
	16	Durchmesser / Diameter	1,6mm
	20		2mm
	30		3mm*
	45		4,5mm
	60		6mm
	16/30		3mm/6mm mit verjüngter Spitze / with reduced tip
	30/60		3mm/6mm mit verjüngter Spitze / with reduced tip
		M12	Stecker / Plug
PTS-P			M12

*Lagerware / On stock

Beispiel / Example: **PTS-P-0150.30/60.M12**

Pt100-Temperaturfühler; Einbaulänge: 150mm; Durchmesser: Ø 3/6mm – verjüngte Messspitze; Stecker: M12

PTT-P

Platin Temperature Transmitter – Plug Pt100
Pt100 Messumformer mit M12-Anschluss



Technische Daten Technical Data	PTT-P
Eingang / Input	Pt100 mit M12-Stecker / RTD100 with M12-Plug
Ausgang / Output	4...20mA 2Leiter / 2wire / max 700Ω @ 24V DC
Messbereich / Measuring range:	-50...550°C einstellbar / adjustable Min. Span. 50 K
Sensorbruch / Sensor break	Upscale
Spannungsversorgung / Power supply	9V...32 V DC

Typenschlüssel / Type code: **PTT-P**

PTT-P	PM	Gehäuse / Housing	Kunststoffgehäuse / Plastic molded
	SS		Edelstahlgehäuse / Stainless steel
	(X...Y)	Ausgang / Output 4...20mA	Messbereich / Range °C (im Klartext angeben / text in clear)
PTT-P			

Beispiel / Example: **PTT-P (-10...40°C)**

Pt100-Messumformer – Einsatzbereich von -10°C bis 40°C

ANHANG 6: DATENBLATT THERMOELEMENTE (OBERFLÄCHENMESSUNG)

TC-C1 Kabel – Thermoelement Typ „K“ 78528622

Thermopaarung Typ: K (NiCr-Ni); Klasse 1, einfach
Einsatztemperatur: -75...250 °C; SCHWEISSPERLE offen
Einbaulänge: 800 mm
Draht Durchmesser: 0,2 mm Draht verdrillt
Isolation: PTFE
Stecker direkt an Fühler montiert – Type: Mini
Zolltarifnummer: 90259000 Ursprungsland: AT
Type: TC-C1-K.0800.02.OR.PDM.0.MS; PMR-Nr.: 10701

Thermoelemente

TC

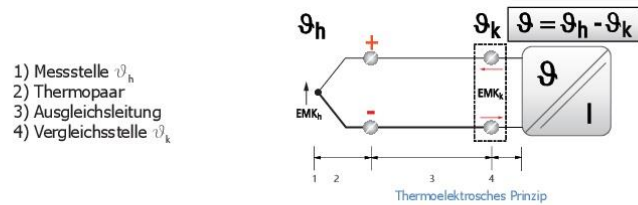
Thermocouple

Allgemeine Informationen:

Ist in einem elektrischen Leiter ein Temperaturgefälle vorhanden, wird ein Elektronenfluss (EMK) erzeugt. Die Größe und Richtung der EMK (Elektromotorische Kraft) wird von Größe und Richtung des Temperaturgefälles und dem Material des elektrischen Leiters bestimmt (Seebeck Effekt). Die Spannung an den Enden des Leiters ist die Summe der in diesem Leiter erzeugten Einzel-EMKs. In einem Thermoelement werden zwei Materialien (Thermopaar) mit unterschiedlichen Temperatur - Charakteristika kombiniert, um eine messbare EMK zu erzielen.

General information:

If a temperature gradient is present in an electrical conductor, an electron flow (EMF) is generated. The magnitude and direction of the EMF (electromotive force) is determined by the magnitude and direction of the temperature gradient and the material of the electrical conductor (Seebeck effect). The voltage at the ends of the conductor is the sum of the individual EMFs generated in this conductor. In a thermocouple, two materials (Thermocouple) with different temperature characteristics are combined in order to achieve a measurable EMF.

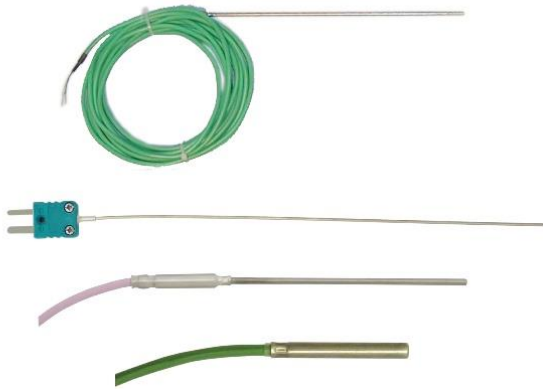


Toleranzklasse gemäß: Europäische Norm EN 60584 / IEC 584

Typ	Klasse 1	Klasse 2
K (NiCr - Ni)	-40 °C bis 375°C +/- 1,5 K 375°C bis 1000°C +/- 0,4 %	-40°C bis 333°C +/-2,5 K 333°C bis 1200°C +/- 0,75%
N (NiCrSi - NiSi)	-40 °C bis 375°C +/- 1,5 K 375°C bis 1000°C +/- 0,4 %	-40°C bis 333°C +/-2,5 K 333°C bis 1200°C +/- 0,75%
J (Fe - CuNi)	-40 °C bis 375°C +/- 1,5 K 375°C bis 750°C +/- 0,4 %	-40°C bis 333°C +/-2,5 K 333°C bis 750°C +/- 0,75%
R (Pt13%Rh - Pt)	0 °C bis 1100°C +/- 1,5 K 1100°C bis 1600°C +/- 0,4 %	0°C bis 600°C +/-1,0 K 600°C bis 1600°C +/- (0,3%-2,3°C)
S (Pt10%Rh - Pt)	0 °C bis 1100°C +/- 1,0 K 1100°C bis 1600°C +/- (0,3 %-2,3°C)	0°C bis 600°C +/-1,5 K 600°C bis 1600°C +/- 0,25%
T (Cu - CuNi)	-40 °C bis 125°C +/- 0,5 K 125°C bis 350°C +/- 0,4	-40°C bis 133°C +/-1,0 K 133°C bis 350°C +/- 0,75%
B (Pt30%Rh - Pt6%Rh)	-----	600°C bis 1700°C +/-0,25%

Type	Material		Temperaturbereich	EMK	IEC 584	DIN 43714	ANSI / MC 96.1	BS 1843	JIS C 1610 - 1981	NF C 42-323
	+	-								
K	Ni - Cr	Ni - Al	-200 ... 1372 °C	-5,891 ... 54,886 mV						
N	Ni - Cr - Si	Ni - Si - Mg	-200 ... 1300 °C	-3,990 ... 47,514 mV						
J	Fe	Cu - Ni	-210 ... 1200 °C	-8,096 ... 69,556 mV						
L	Fe	Cu - Ni	-200 ... 900 °C	-8,166 ... 53,147 mV						
R	Pt-13% Rh	Pt	-20 ... 1767 °C	-0,101 ... 21,089 mV						
S	Pt-10% Rh	Pt	-20 ... 1767 °C	-0,103 ... 18,682 mV						
T	Cu	Cu - Ni	-250 ... 400 °C	-6,161 ... 20,873 mV						
U	Cu	Cu - Ni	-200 ... 600 °C	-5,693 ... 34,320 mV						
B	Pt-30% Rh	Pt-6% Rh	600 ... 1620 °C	1,792 ... 13,820 mV						
C	W-5% Re	W-26% Re	0 ... 2316 °C	0 ... 37,079 mV					Thermocoax	
E	Ni - Cr	Cu - Ni	-250 ... 1000 °C	-9,719 ... 76,370 mV						
D	W-3%	W-25%	0 ... 1800 °C						Thermocoax	

TC
Thermo Couple - Cable
Kabel- Thermoelement



- Robuster Aufbau/ Strong construction
- Schutzgrad bis IP67/ protection degree to IP67
- Einfache Montage/ Easy mounting

Beschreibung:

Die Mantel- Thermoelemente der Serie **TC-C** sind für den Einsatz im Prüfstands-, Maschinen- und Anlagenbau sowie in zahlreichen industriellen Anwendungen bestens geeignet. Die hochwertigen Ausgangsmaterialien und der robuste Aufbau ermöglichen eine präzise Temperaturmessung bis über 1300°C. Die Ausführungen sind anwendungsspezifisch möglich. Schnelle Ansprechzeiten, hohe Materialbelastungen und einfache Montage sind besondere Merkmale für die verschiedenen Aufgaben in der thermischen Prozesstechnik. Prüfprotokolle rückführbar auf internationale Standards werden auf Wunsch mitgeliefert.

Zubehör:

- Tauchhülsen
- Klemmringverschraubung
- Stecker
- Ausgleichsleitung

Description:

The mineral insulated thermocouples of series **TC-C** are ideally suited for use in the test stand, mechanical and plant engineering as well as in numerous industrial applications. The high-quality materials and robust design enable precise temperature measurement up to 1300 °C. The designs are for specific applications possible. Fast response times, high stress and easy installation are special features for the different tasks in the thermal process. Audit protocols traceable to international standards will be supplied on request.

Accessories:

- Thermowells
- Compression Fittings
- Connectors
- Compensation Cable

Zertifikate/Certification

CE	EAC	CQI-9	Werkzertifikate	Kalibrierzertifikate
			2.2	Werk / ÖKD / DAkkS

Technische Daten Technical Data	TC-C
Sensorelement	Type „K“, Type „N“, Type „T“, Type „J“; Class 1
Mantelmaterial / Sheath material	Edelstahl/stainless steel 1.4571, 1.4841 ; Inconel 600 ; Microbell ; Alloy 617
Aufbau / Construction	Elektrisch isoliert / Electrically isolated
Einsatztemperatur/ Oper. temperature	Bis/up to 1250°C
Einbaulänge / Built-in length	Von/from 50mm bis/up to 20.000mm Andere Einbaulängen auf Anfrage / Other lengths on request
Durchmesser / Diameter	Von/from 1mm bis/up to 6mm Andere Durchmesser auf Anfrage / Other diameters on request
Anschluss / Connection	Ausgleichsleitung wahlweise mit Stecker / Compensation Cable with optional plug
Kabel / Cable	PVC 105°C FEP/Silikon bis/up to 180°C FEP/FEP bis/up to 200°C PFA/PFA bis/up to 260°C PTFE/PTFE bis/up to 300°C Glasseide (Glas silk)/Metallgeflecht (metal-mesh) bis/up to 400°C

Typenschlüssel / Type code: **TC-C**

TC-C1	Einfach Thermoelement / Single Thermocouple				
TC-C2	Doppel-Thermoelement / Double Thermocouple				
K N J T OR	Type			NiCr/NiAl NiCrSi/NiSiMg Fe/CuNi Cu/CuNi Auf Anfrage / On request OR	
XXXX	Einbaulänge / Built-in length			Angabe/Declaration in mm (50mm Schritte/steps)	
10 15 20 30 60 OR	Durchmesser / Diameter			1mm 1,5mm 2mm 3mm 6mm OR	
SS INC NIC 617 OR	Werkstoff / Material			Edelstahl/Stainless steel Inconel Microbell Alloy 617 OR	
PVC FSI FEP PFA PTFE GM PDM OR	Kabelmaterial / Cable-material (1)			PVC FEP/Silikon FEP/Silicone FEP/FEP PFA/PFA PTFE/PTFE Glasseide/Metallgeflecht Fibreglass/Wire braid Stecker direkt montiert / Plug mounted Auf Anfrage / On request OR	
YYYY 0	Kabellänge / Cable length			Angabe/Declaration in mm (100mm Schritte/steps) Ohne Kabel / Without cable	
MS MK S2 SK OKE OR	Kabelende / Cable-end			Mini-Stecker bis 200°C Mini-Stecker-Keramik bis 600°C Standard-Stecker bis 200°C Standard-Stecker-Keramik bis 600°C Kabelende offen / Free Cable-ends Auf Anfrage / On request OR	
TC-C1					
TC-C2					

(1): Bei geschrimtem Kabel ein „S“ hinzufügen / Add an „S“ for shielded cable

Beispiel/ Example: **TC-C1-N.0150.20.INC.PFA.01000.OKE**

Kabelthermoelement; Typ N; Einbaulänge: 150mm; Durchmesser: Ø2mm; Material: Inconel; Kabelmaterial: PFA/PFA; Kabellänge: 1.000mm; Kabelende: offen

