
Abschlussbericht über alle Teilvorhaben:

Verbundvorhaben WPVT-Freeze:

Charakterisierung der Leistungsfähigkeit von Wärmepumpe-Heizsystemen mit quellenseitig installierten PVT-Kollektoren und Modellentwicklung zur Integration in kommerzielle Planungswerkzeuge



Teilvorhaben A: Untersuchung von Kondensations- und Vereisungseffekten sowie Modellentwicklung

Förderkennzeichen: 0325854A

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2016 bis 31.12.2018

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)

Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg



Teilvorhaben B: Reglerentwicklung und Evaluierung verschiedener Systemkonzepte

Förderkennzeichen: 0325854C

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2016 bis 31.12.2018

PA-ID PROCESS GmbH

Bruchtannenstraße 9, 63801 Kleinostheim

Projektleiter

Christian Schmidt

Autoren

Teil A: Christian Schmidt, Arim Schäfer, Dr. Korbinian Kramer, Christoph Thoma, Konstantin Geimer, Ezekiel Rajkiran Jayachandran, Florian Rzepka, Manuel Lämmle; Alban Hessberger

Teil B: Alban Hessberger, Maximilian Neubauer

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt **WPVT-Freeze** wurde in der Zeit vom 01.01.2016 bis zum 31.12.2018 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter den Förderkennzeichen 0325854A und 0325854C betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	2
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
1 Kurze Darstellung	8
1.1 Aufgabenstellung	8
1.2 Voraussetzungen	9
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	10
1.4 Stand der Wissenschaft und Technik	11
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
2 Eingehende Darstellung	14
2.1 Vergleich der erreichten und vorgegebenen Ziele	14
2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	17
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	17
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans	17
2.4.1 Erfindungen/Schutzrechanmeldungen	17
2.4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	17
2.4.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	18
2.4.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche nächste Phase	19
2.5 Fortschritte auf dem gleichen Gebiet durch andere Stellen	19
2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	20
3 Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit - Teilprojekt A (ISE): Untersuchung von Kondensations- und Vereisungseffekten sowie Modellentwicklung	21
3.1 AP1: Erweiterung PVT-Modell und Validierung (AP-Leitung: ISE)	21
3.1.1 M1.1: Messtechnik für Kollektorprüfstände ausgewählt, beschafft, Prüfstände für Messungen erweitert	21
3.1.2 Prüfmatrix - Einzelmodulmessungen	24
3.1.3 M1.2: PVT-Kollektormodell erweitert	28
3.1.4 Untersuchung zu Kondensatbildungspotential	31
3.1.5 M1.2: Abgleich mit Messungen an den Prüfständen - Messungen	35
3.1.6 M1.2: Abgleich mit Messungen an den Prüfständen und Freigabe für Integration in Planungswerkzeug – Auswertungen	46
3.1.7 M1.2: Freigabe für Planungswerkzeug	55
3.1.8 M1.3: Review Journal Paper zur Veröffentlichung eingereicht	55
3.2 AP4: Experimentelle Untersuchungen am Gesamtsystemaufbau (AP-Leitung: ISE)	56
3.2.1 M4.1: Messtechnik für Systemprüfstand ausgewählt und beschafft; Erweiterungsmaßnahmen am Systemprüfstand abgeschlossen, Prüfmatrix in Übersichtsplan festgelegt	56

3.2.2	M4.3 Durchführung aller Messungen und Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die zu Projektbeginn formulierten Fragestellungen abgeschlossen	66
3.2.3	M4.2 Aufbereitete Messdaten für Abgleich mit Polysun-Systemsimulation bereitgestellt.	78
3.2.4	M4.2 Durchführung aller Messungen und Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die zu Projektbeginn formulierten Fragestellungen abgeschlossen.	78
3.3	LCoH – Kostenrechnung	79
3.4	AP6: Projektmanagement (AP-Leitung: ISE)	80
3.5	Unterstützung PA-ID	81
3.5.1	AP2: Definition Systemkonfigurationen und Systemregelung (AP-Leitung: PA-ID)	81
3.5.2	AP3: Hardwareimplementierung von neuen Regleralgorithmen (AP-Leitung: PA-ID)	81
3.5.3	AP5: Systemoptimierung und Auswertungen mit erweiterter Polysun-Version (AP-Leitung: PA-ID)	81
4	Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit - Teilprojekt B (PAID): Reglerentwicklung und Evaluierung verschiedener Systemkonzepte.....	82
4.1	AP2: Definition Systemkonfigurationen und Systemregelung (AP-Leitung: PA-ID).....	82
4.2	AP3: Hardwareimplementierung von neuen Regleralgorithmen (AP-Leitung: PA-ID).....	84
4.3	AP4: Experimentelle Untersuchungen am Gesamtaufbau (AP-Leitung: Fraunhofer ISE).....	87
4.4	AP5: Systemoptimierungen und „Auswertungen mit erweiterter Polysun-Version (AP-Leitung: PA-ID)	91
4.4.1	Systemkonfigurationen	91
4.4.2	Simulationen zur Validierung des Kollektormodells.....	93
4.4.3	Jahressimulation.....	95
4.5	Unterstützung Fraunhofer ISE.....	96
4.5.1	AP1: Erweiterung PVT-Modell und Validierung (AP-Leitung: ISE)	96
4.5.2	AP4: Experimentelle Untersuchungen am Gesamtsystemaufbau (AP-Leitung: ISE)	96
5	Literatur	97
6	Anhang A: Übersicht zu relevanten Forschungsprojekten zum Zeitpunkt der Antragstellung	99
7	Anhang B: Recherche „Eismesstechnik“	104
8	Anhang C: Prüfmatrix.....	105
8.1	Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung in Klimakammer	105
8.2	Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung am Außenprüfstand	106
9	Anhang D: Grafiken zur Auswertung von AP1	107
9.1	Grafiken – Parametersatz #51 (sunny)	107
9.2	Grafiken – Parametersatz #52 (mixed).....	108
9.3	Grafiken – Parametersatz #53 (latent)	109

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Inhalte der Arbeitspakete von WPVT-Freeze sowie Zusammenhänge zum Zeitpunkt der Vorhabensplanung.	11
Abbildung 2: Exemplarisch wird in [10] bei einer Feldanlage, die über ein Jahr kontinuierlich vermessen wurde, ein Tag im März analysiert. Die Abbildungen zeigen gefrorenen Tau auf unabgedeckten, selektiv beschichteten Kollektoren am Morgen (Bild links).	13
Abbildung 3: Gezeigt wird der Messaufbau für den Vorversuch mit PVT-Kollektor auf einer hochgenauen Waage während der Messung. Auf dem linken Foto ist Kondensat auf der Kollektoroberfläche erkennbar.	22
Abbildung 4: Gezeigt wird ein Schema des geplanten Messaufbaus in der Klimakammer des mechanischen Lastteststands des TestLab Solar Thermal Systems.	23
Abbildung 5: Aktivität #5 – No. 1 Schematische Visualisierung aller am System möglichen Betriebsmodi durch Visualisierung aller hydraulischen Kreise.	26
Abbildung 6: Aktivität #5 – No. 2 Tool zur Auswertung der Betriebsmodi im Jahresverlauf auf Basis von Simulationsdaten. Im Beispiel eine grafische Darstellung der Auswertung des Systems mit zusätzlicher Wärmequelle.	26
Abbildung 7: Energiemenge beim Kondensieren von Wasser in der Luft Abhängigkeit der Temperatur.	32
Abbildung 8: Energiemenge beim Gefrieren von Wasser der Luft in Abhängigkeit der Temperatur.	32
Abbildung 9: Abschätzung der Kondensations- und Vereisungserscheinungen des AP4 Testsystems mit ideal an die Umgebung angebundenen Kollektor als einzige Wärmequelle - gerechnet mit Polysun für den Standort Straßburg.	33
Abbildung 10: Systemkonfiguration zur Potentialabschätzung.	34
Abbildung 11: Li.:Klimakammer mit Kollektor und Messtechnik. Re.: Kollektor an den Trageseile hängend mit Sensoren und Auffangeinrichtung.	36
Abbildung 12: Ermittelte lineare Wärmeverluste des Kollektors (Messpunkte!) in Watt eingezeichnet über der mittleren Fluidtemperatur des Kollektors bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (ohne Kondensation).	37
Abbildung 13: Ermittelte lineare Wärmeverluste des Kollektors (Messpunkte!) in Watt eingezeichnet über der mittleren Fluidtemperatur des Kollektors bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten ohne Kondensation (durchgezogene Linie) und mit Kondensation (gestrichelte Linie).	38
Abbildung 14: Temperaturwerte der ersten Kondensationsversuche (vgl. Abbildung 3) über den Messpunkten (1 Messpunkt = 10 Sec.). Orange dargestellt ist die Taupunkttemperatur T_{Tp} , gestrichelt die Oberflächentemperaturen (T_{Glas1} und T_{Glas2}) auf dem Kollektor. Rot und grün dargestellt sind die Fluidtemperaturen im Kollektor. Violett dargestellt ist die Umgebungstemperatur T_{amb} . Die Eintrittstemperatur T_{in} wurde für je 3h auf einem festen Wert eingestellt. Bei Messpunkt 2880 unterschreiten die Glas-Oberflächentemperaturen (gestrichelte Linien) die Taupunkttemperatur und es beginnt Kondensation auf dem Kollektor.	38
Abbildung 15: Diagramm zeigt das gemessene Absolutgewicht der Waage über die Zeit der Kondensationsmessung.	39
Abbildung 16: Gewonnene Wassermenge [g] in Abhängigkeit von der Differenz aus Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur.	39
Abbildung 17: Fotostrecke mit unterschiedlichen Abscheidungsraten des Kondensats in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur.	40
Abbildung 18: Schema – Messaufbau - Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand.	42
Abbildung 19: Hydraulik der Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand.	43
Abbildung 20: PVT-Modul – rückseitig isoliert während der Messung.	43
Abbildung 21: PVT-Modul – ohne rückseitige Wärmendämmung während der Messung – Rückseite vereist.	44
Abbildung 22: Messbetrieb – sichtbar sind ebensno Bewindungselemente von vorne, sowie für die Rückseite.	44
Abbildung 23: Übersicht zu den Auswertungsstufen.	48
Abbildung 24: Vermessene PVT-Module.	48

Abbildung 25: Übersicht zum Auswerteverfahren	49
Abbildung 26: Parametersätze für AP5.....	50
Abbildung 27: Darstellung Abweichungen – Annahmen für Parameter a_4 und a_{11}	53
Abbildung 28: Anlagenschema des Testsystems (in erster Version) einschließlich neu entwickelter Schnittstelle mit dem Systemteststand des TestLab Solar Thermal Systems. Gelb eingefärbte Sensoren gehören zum Messkonzept.	57
Abbildung 29: Dargestellt ist eine Messstelle mit besonderen Anforderungen am Fluidkreislauf-Anschluss eines PVT-Moduls, das Teil des PVT-Kollektorfelds des Testsystems bildet (links). Rechts ist ein speziell auf die Anforderungen zugeschnittener Anlegefühler.	58
Abbildung 30: Anlagenschema des Testsystems (zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme) einschließlich neu entwickelter Schnittstelle mit dem Systemteststand des TestLab Solar Thermal Systems. Gelb eingefärbte Sensoren gehören zum Messkonzept.	58
Abbildung 31: Sensor-Aktorliste für das Testsystem	59
Abbildung 32: Fotos der Messtechnik, eingesetzt am Testsystem	61
Abbildung 33: Systemverschaltung, incl. Notwendige Teststandserweiterung – Emulation der Verbraucherkreise, sowie der 2. Wärmequelle	62
Abbildung 34: Unterstand incl. Thermostat als 2. Wärmequelle	63
Abbildung 35: Fotos Erweiterung für die Heizungsemulation	65
Abbildung 36: Im Februar 2017 wurde die Wärmepumpe einschließlich Hydraulikeinheit (links) und der Wärmespeicher geliefert.	67
Abbildung 37: Netzwerk – Strommesskonzept des Testsystems.....	68
Abbildung 38: Komponenten - Netzwerk – Strommesskonzept des Testsystems	68
Abbildung 39: Schematische Darstellung (nach TASK44) des Testsystems	69
Abbildung 40: Fotos vom installierten Testsystem.....	70
Abbildung 41: Schema Solarkreis, vor und nach dem Umbau.....	71
Abbildung 42: Eisbildung auf der Vorderseite der PVT-Module.....	71
Abbildung 43: Trinkwarmwasser Zapfungen, sowie Entnahmetemperaturen	73
Abbildung 44: Arbeitszahlen mit Bilanzgrenzen	75
Abbildung 45: Arbeitszahlen der ausgewählten Messtage.....	76
Abbildung 46: Eisdicken am 28.2.2018.....	77
Abbildung 47: Formel Wärmegestehungskosten (LCoH).....	79
Abbildung 48: Übersicht Wärmegestehungskosten (LCoH).....	79
Abbildung 49: Agenda des Workshops	80
Abbildung 50: Hydraulikschema des WPVT-Freeze-Systems.....	82
Abbildung 51: Sensor-Aktor-Regelgeräte-Aufstellung	83
Abbildung 52: Kombination aus Solarregler und Wärmepumpenregler	85
Abbildung 53: Schema Wärmepumpe.....	86
Abbildung 54: Anlagenaufbau des Fraunhofer ISE	88
Abbildung 6: PVT-Kollektoren auf dem Dach des Fraunhofer ISE.....	89
Abbildung 56: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit.....	89
Abbildung 57: WP-Speicherbeladung.....	90
Abbildung 58: Systemkonfiguration WPVT-Freeze Teststand ISE.....	91
Abbildung 59: Systemkonfiguration WPVT-Freeze optimiert.....	92
Abbildung 60: Parametersatz von Fraunhofer ISE	93
Abbildung 61: Formel Berechnung diffuse und direkte Globaleinstrahlung	94
Abbildung 62: Exceltabelle zur Validierung und Potentialabschätzung des 2Power-PVT-Kollektors	94

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1: Vergleich der erreichten und vorgegebenen Ziele, Teilprojekt A (ISE).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabelle 2: Vergleich der erreichten und vorgegebenen Ziele, Teilprojekt B (PA-ID).....</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 3: Verwertungsmöglichkeiten für antragstellende Forschungsgruppe am Fraunhofer ISE.</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 4: Veröffentlichungen im Rahmen des Verbundvorhabens WPVT-Freeze.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 5: Vorarbeiten zur Erstellung der Prüfmarix</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 6: Prüfmatrix für Einzelmodulmessungen am Außenteststand</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 7: Formelzeichen und deren Beschreibung</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 8: Messgrößen zur Systemvermessung</i>	<i>57</i>
<i>Tabelle 9: Erweiterungsmaßnahmen - Systemvermessung – Aufgabe-Lösung</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 10: Übersicht zu relevanten Forschungsprojekten.....</i>	<i>99</i>

Hinweis:

Zwischenergebnisse sind in diesem Bericht in kurzer Formulierung in einem Kasten dargestellt.

1 KURZE DARSTELLUNG

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Der Primärenergieverbrauch von Gebäuden wird in Deutschland und der EU auf 40% geschätzt [1]. Gleichzeitig besitzt der Gebäudebereich ein hohes Potenzial zur Energieeinsparung. Wärmepumpen, Niedertemperatur-Solarthermie und Photovoltaik gelten als Schlüsseltechnologien zur Reduktion des primärenergetischen Energieverbrauchs der technischen Gebäudeausrüstung [2].

Herausforderungen: Thermische Kollektoren wurden bisher in der Regel in solarthermischen Anlagen installiert, entsprechend waren Betriebsbedingungen, bei denen Wasser auf den Kollektoroberflächen kondensiert oder gefriert für die thermische Leistungsfähigkeit irrelevant. Anders ist dies, wenn Heizsysteme unabgedeckte (photovoltaisch-thermische) Kollektoren als Wärmequelle für die Wärmepumpe nutzen: Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems kann je nach Regelung wesentlich das Verhalten unter diesen Betriebsbedingungen beeinflussen. Trotz der umfangreichen Arbeiten, i.e. im Rahmen des IEA SHC Task 44/Annex 38 [3], bestehen weiterhin Defizite, wie etwa Analysen zur Qualität der Erscheinungen, über Einflussfaktoren oder gar Systembewertungen. Dies liegt auch daran, dass validierte Rechenmodelle für solche Analysen bislang fehlen. In Simulationsstudien wurde Vereisung entweder ignoriert oder mit Hilfe der Regelung ausgeschlossen. Abgesehen von dieser Problematik ist die Vorhersage der elektrischen und thermischen Leistung von photovoltaisch-thermischen Kollektoren (PVT-Kollektoren) trotz mehrerer Modellansätze noch nicht zufriedenstellend. Normative Prüfverfahren erlauben bisher nur eine Charakterisierung des thermischen Verhaltens von PVT-Kollektoren. Auf Grund dieser Situation sehen sich Softwarehersteller von Simulationswerkzeugen nicht in der Lage, ihre Produkte entsprechend den neuen Anforderungen anzupassen. Deren Kunden, d.h. Ingenieurbüros, Planer und Hersteller, stehen aber akut vor der Herausforderung, ihre Systeme an die individuellen Gegebenheiten (z. B. vorhandene Heizung und Wärmeverteilsystem) und Wünsche der Kunden anzupassen und entsprechend auszulegen. Demnach basiert die Auslegung auf Erfahrungswerten und Faustformeln. Hierdurch werden Anlagen teils überdimensioniert oder sind schlicht falsch ausgelegt, sodass der Energiebedarf nicht effizient gedeckt werden kann.

Um diese vielschichtigen Probleme anzugehen wird folgender Lösungsansatz gewählt:

Erweiterung der Rechenmodelle und Bewertungsmethoden für PVT-Kollektoren: Umfangreiche experimentelle Untersuchungen an PVT-Kollektoren zur Erweiterung der Prüfverfahren, um zukünftig eine vollständige Charakterisierung des thermischen und elektrischen Verhaltens in allen leistungsrelevanten Betriebsbereichen zu ermöglichen.

Optimierung des Gesamtsystems: Aufbau und autonomer Betrieb einer vollständigen Heizungsanlage mit PVT-Kollektoren, Wärmepumpe und Speicher im Labor zur praxisbezogenen Prüfung und Optimierung von im Rahmen des Projekts auf die neuen Betriebsbedingungen hin entwickelten Regelalgorithmen.

Kooperation zwischen Forschungspartner, Systemanbieter und Hersteller eines Simulations- und Planungswerkzeugs: Unmittelbare Implementierung der Forschungsergebnisse in das weit verbreitete Simulations- und Planungswerkzeug „Polysun“. Dies ermöglicht die direkte Beteiligung des Systemanbieters bei der Durchführung der Optimierungsarbeiten mit Hilfe von Systemsimulationen. Durch die Implementierung der Ergebnisse in die Planungssoftware stehen diese zu Projektende in unmittelbar anwendbarer Form allen Marktteilnehmern zur Verfügung.

1.2 VORAUSSETZUNGEN

Fraunhofer ISE bearbeitet seit vielen Jahren Fragestellungen im Kontext der Charakterisierung technischer Lösungen im solarthermischen, sowie photovoltaischen Bereich. Die Arbeitsgruppe Vermessung, Prüfung und Qualitätssicherung befasst sich intensiv mit der messtechnischen Parametrisierung von technischem Verhalten, sowie der simulatorischen Modellentwicklung neuartiger technischer Lösungen.

Maßgeblich für die erfolgreiche Durchführung des Projekts ist einerseits die Modellweiterentwicklung für PVT-Kollektoren sowie die Entwicklung geeigneter Prüfprozeduren zur vollständigen Charakterisierung des PVT-Verhaltens. In diesem Bereich kann der Antragsteller bereits auf Erfahrung aus den folgenden erfolgreich abgeschlossenen Vorhaben zurückgreifen:

- PVT-Kollektor Projekte:
 - o PVT-Norm: Modell- und Prüfmethodeentwicklung
 - o PVTgen2, PVTmax, PVTcol, PVTcol2: Prototypenentwicklung
- Luftkollektor Projekte: Prüfmethodeentwicklung, Modellentwicklung, Normenentwicklung
- Q-Trafo: Charakterisierung von Wärmetransformationssystemen (Wärmepumpen und Kälteanlagen) im Labor und Prüfmethodeentwicklung
- Projekt MechTest: Entwicklung einer realitätsnahen Methode zur Prüfung der mechanischen Widerstandsfähigkeit von tragwerks-angebundenen Elementen (PV & ST)
- Projekt RefleC: Aufbau eines Prozesswärmeteststands und Erweiterung der entsprechenden Prüfmethode
- Uvm.

Die **PA-ID GmbH** ist durch die kontinuierliche Erweiterung und Optimierung der 2Power-Produktpalette zu einem Komplett-Lösungs-Energieanbieter herangewachsen und konnte bereits weltweit beachtete Energie-Plus-Haus-Projekte realisieren wie z.B. das Projekt B10 in der renommierten Weißenhofsiedlung in Stuttgart. Darüber hinaus erfolgen im Hause PA-ID Entwicklungen im Bereich der Hausautomation wobei hier in erster Linie die Energieeffizienz aber auch der Komfort steht. Das Projekt nennt sich „2Power Smart Control“. Im Zuge dieser Entwicklung hat sich PA-ID auch mit Regeloptimierung und intelligentem Energiemanagement beschäftigt. Auch spielt in den 2Power Energie-Plus-Projekten der Stromspeicher eine wesentliche Rolle. Auch hier konnte sich PA-ID wesentliches Know-Hows erarbeiten und bindet den Stromspeicher mit in das Energiemanagement mit ein.

Höchste Erträge unabgedeckter von PA-ID angebotenen PVT-Kollektoren sind im Niedertemperaturbereich zu erzielen. In solchen Anlagenkonfigurationen ist als Kernkomponente in der Regel die Sole-Wasser-Wärmepumpe verbaut. Folglich wurden solche Anlagenkonzepte von PA-ID verfolgt und realisiert. Die Planung der Anlagen musste mangels korrekter Prozessabbildung durch eigene Anpassungen von Simulationsmodellen und Erfahrungswerten erfolgen. Letztendlich wurden auch realisierte Anlagen im Feld vermessen und mit den abgeschätzten Werten der selbst erstellten Simulationsanpassungen verglichen. Unter den Kundengruppen von PA-ID befinden sich auch Planer und Ingenieurbüros für Haus- und HLK-Technik genauso wie auch Hersteller von Wärmepumpen. Mit diesen Kunden steht PA-ID seit Jahren in intensivem Austausch über aktuelle Technologien und Fähigkeiten der einzelnen Systemkomponenten um gemeinsam mit dem jeweiligen Kunden möglichst effiziente und auf die speziellen Anforderungen abgestimmte PVT-Wärmepumpensysteme zu entwerfen.

Weiter hat sich PA-ID in verschiedenen Projekten wie z.B. PVT-Norm engagiert und konnte auch hier durch die wissenschaftliche Arbeit entsprechendes Fachwissen auf diesem Gebiet aufbauen. Die Auslegung und Simulation der Systeme erfolgt bereits seit mehreren Jahren (mit den im Antrag genannten Problemen) auf Basis von Polysun, so dass die in AP 5 geplanten Simulationsarbeiten durchgeführt werden können.

1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Das Vorhaben hatte eine Projektlaufzeit vom 01.01.2016 bis zum 31.12.2018. Die Fragestellungen des Projektes wurden in insgesamt fünf wissenschaftlichen Arbeitspaketen (AP) bearbeitet, wobei nachfolgend die jeweils verfolgten Ansätze skizziert sind:

- **Erweiterung des Simulations- und Planungswerkzeugs „Polysun“ mit einem erweiterten Modell für unabgedeckte (PVT-) Kollektoren**
(Relevante AP: 1, 2, 5)
- **Systementwicklung mit experimentellen Untersuchungen**
(Relevante AP: 2, 3, 4)
- **Systementwicklung mit Simulationsstudien**
(Relevante AP: 2, 5)
- **Bereitstellung der wissenschaftlichen Basis für Normungsarbeit durch neues Prüfverfahren**
(Relevante AP: 1)

Eine Kurzzusammenfassung der Inhalte der jeweiligen Arbeitspakete sowie deren Zusammenhänge untereinander sind in *Abbildung 1* dargestellt. Arbeitspakete des Teilvorhabens A (Fraunhofer ISE) sind grün schattiert; Arbeitspakete des Teilvorhabens B (PA-ID) sind lila schattiert. Arbeiten des assoziierten Projektpartners Vela Solaris (vgl. Kapitel 1.5) sind orange schattiert.

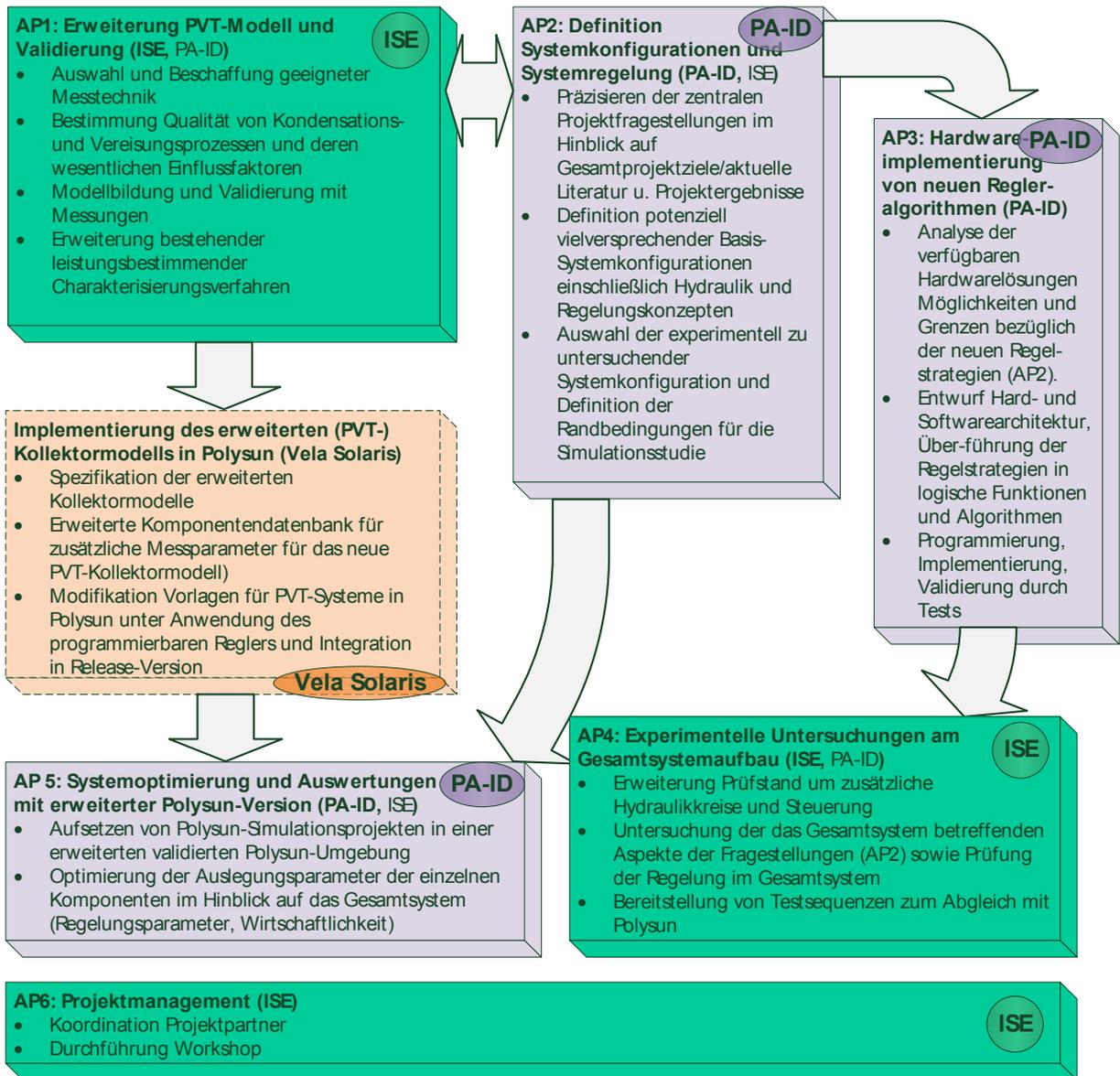


Abbildung 1: Inhalte der Arbeitspakete von WPVT-Freeze sowie Zusammenhänge zum Zeitpunkt der Vorhabensplanung.

1.4 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Im Rahmen des IEA SHC Task 44/Annex 38 wurde innerhalb mehrerer Projekte¹ (z. B. Sol-Pump-Eff, Solar-Geo-WP, MacSheep, Q-Trafo, WP-Sol u. A.) Heizsysteme, die verschiedene Arten solarthermischer Kollektoren mit Wärmepumpenkonzepten kombinieren, klassifiziert, simuliert, im Feld getestet und im Labor vermessen. Die skizzierten abgeschlossenen und teils noch andauernden Projekte und Arbeiten ermöglichen ein gutes Verständnis für die am Markt angebotenen Systemkonfigurationen, die prinzipiellen Ver-

¹ Im **Anhang** sind die für das Vorhaben relevanten aktuellen und abgeschlossene Projekte zu, Zeitpunkt der Planung mit wesentlichen Projektinhalten und jeweils betrachtete(n) Komponente(n)/Systemkonfiguration(en) in chronologischer Reihenfolge zu finden. Dies gilt auch für alle in diesem Abschnitt genannten Projekte (gekennzeichnet durch Unterstreichung).

schaltungsvarianten, typischen Betriebssituationen, Vor- und Nachteile individueller Anlagenkonzepte sowie Optimierungspotentiale. Trotz der umfangreichen Arbeiten bestehen weiterhin Defizite:

Modellierung PVT-Kollektoren: Ausgangsbasis für das erweiterte PVT-Kollektor-Modell sind bestehende Modelle für die synchrone thermische und elektrische Leistungserzeugung. Dabei kann zwischen folgenden Modellklassen unterschieden werden:

- Kopplung der thermischen mit der elektrischen Komponenten über die Zelltemperatur [4],[5]
- Zwei-Knoten-Modell, z.B. ISFH (TRNSYS Type 203), entwickelt in BiSolar-WP oder Perers Modell [6] (TRNSYS Type 832)
- Quasi-dynamische Methode mit der Helters-Kramer-Erweiterung (H&K) (PVTNorm [7], [8] ISE)
- Äquivalente-Zell-Temperatur-Methode ECT (PVTNorm [7], TÜV)
- Parametrische Kopplung über quasi-dynamische Messungen (ECT [7], H&K [8])

Die genannten Modelle haben teils Schwächen in Bezug auf die korrekte Berechnung der thermischen und elektrischen Leistung unter folgenden Betriebsbedingungen:

- Insbesondere Eisbildungs- und Abtauvorgänge waren in der Vergangenheit bisher nicht im Fokus, da i.e. in solarthermischen Anlagen mit Nachheizung eine direkte thermische Nutzung ohnehin nicht gegeben war. Bei Nutzung von Kollektoren auf der Quellenseite der Wärmepumpe kann je nach Wetterlage zu Kondensation und Eisbildung kommen.
- Kondensation: außer Perers Type 832 [6] berücksichtigt kein Modell Kondensationseffekte. Unklar ist, inwiefern der Einfluss verschiedener Anstellwinkel und dadurch ablaufendes Kondensat berücksichtigt werden.
- Synchrone Betriebsweise: PVT-Kollektoren werden in der Regel im Hybrid-Modus betrieben mit synchroner Wärme- und Stromabnahme. Alle bisher bekannten PVT-Kollektormodelle setzen voraus, dass die PV-Zellentemperatur gleich der Absorbentemperatur entspricht. Diese Vereinfachung führt in Simulationsstudien zu vermeintlich besseren Erträgen.
- Asynchrone Betriebsweise: Je nach Konfiguration des Systems und der Regelung, treten ebenfalls folgende asynchrone Betriebszustände auf:
 - o Thermischer Vorzug: rein thermischer Betrieb ohne Stromabnahme (OC-Modus)
 - o Elektrischer Vorzug: rein elektrischer Betrieb ohne Durchströmung des Kollektors (Stagnation)
 - Massenstromvariation
 - Speziell Helters-Kramer-Erweiterung: Keine Berücksichtigung der Windabhängigkeit der elektrischen Leistung.

Prüfverfahren für Systeme: Bei Komplettsystemtests wird nur der thermische Beitrag von PVT-Kollektoren berücksichtigt, was zu einer eklatanten Unterbewertung der Leistungsfähigkeit führt. Da bei diesen Tests der Kollektor auf Basis eines genormten Kollektortests emuliert wird, lässt sich das Systemverhalten bei Kondensation und Eisbildung nicht untersuchen. Entsprechend sind simulationsbasierte Langzeitprognosen nicht möglich.

Die auf Komponententests und Simulation basierende Systemtest-Methode für Solarthermie-Wärmepumpe-Systeme nach EN 12977 wurde im Rahmen des Projekts WP-Sol weiterentwickelt: In der Abschlussveröffentlichung des [IEA SHC Task 44/Annex38 [9] wird ein dynamisches Modell für die Wärmepumpe vorgestellt. Auch Kondensations- und Vereisungsprozesse sollten im Rahmen des Projekts untersucht werden. Es hat sich gezeigt, dass im Rahmen der Untersuchungen nicht alle relevanten Fragen beantwortet werden konnten. Insbesondere bilden Systeme mit PVT-Kollektoren gemäß Projektbeschreibung nicht Teil der Untersuchungen.

Systembewertungen: Bisherige Untersuchungen über das Verhalten und die Betriebsbedingungen von Kollektoren, die einer Wärmepumpe als Wärmequelle dienen, sind einerseits Simulationsstudien. Hier

bleibt jedoch die energetischen Effekte des Vereisungsverhaltens unberücksichtigt (Modelldefizite, siehe oben).

Feldmessungen und Untersuchungen an Kollektoren betrachten das Verhalten exemplarisch, der Fokus liegt in der Regel auf Leistungen und Energiebilanzen, wie etwa in [10]. Veröffentlichungen mit tiefergehender Ursachenforschung über das Kondensations- und Vereisungsverhalten, mit der Identifikation relevanter Parameter und entsprechenden Sensitivitätsanalysen sind bisher nicht bekannt.



Abbildung 2: Exemplarisch wird in [10] bei einer Feldanlage, die über ein Jahr kontinuierlich vermessen wurde, ein Tag im März analysiert. Die Abbildungen zeigen gefrorenen Tau auf ungedeckten, selektiv beschichteten Kollektoren am Morgen (Bild links).

Das theoretische Potenzial zur Gewinnung von Wärme aus Kondensationsvorgängen wird mit bis zu 25% des gesamten Kollektorertrags angegeben [6]. Untersuchungen zur praktischen Erschließung dieses Potentials mit Hilfe von entsprechenden Regelungsstrategien gibt es derzeit nicht. Das Potential zur Gewinnung von Latentwärme aus vereisenden (PVT-) Kollektoroberflächen ist unbekannt.

Explizite Abgrenzung zu Projekten PVT-Max, BiSolar WP, PVT-Norm (siehe Anhang: Grün markierte PVT-Projekte):

Ziel des Projekts WPVT-„Freeze“ ist die Entwicklung eines Modellansatzes, mit dem die thermischen Effekte der Vereisung/des Abtauens von Kondenswasser auf der Oberfläche von (PVT-)Kollektoren wiedergegeben werden können (vgl. Abschnitt 1.1) Damit soll es möglich werden, präzisere Aussagen und Bewertungen über Systeme vorzunehmen, in denen diese thermischen Effekte - zufällig oder gewünscht - auftreten.

Lediglich in den beiden letztgenannten Projekten werden Systeme betrachtet, bei denen die (PVT-) Kollektoren als Wärmequelle der Wärmepumpe genutzt werden und damit die besagten Effekte prinzipiell auftreten können. Wenn überhaupt wurden die Effekte beobachtet, eine gezielte Betrachtung und Untersuchung fand jedoch (auf Grund des anderen Projektschwerpunkts) nicht statt:

1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Im Rahmen des Verbundvorhabens WPVT-Freeze wurde zur Erreichung der Projektziele mit Partnern, die im Bereich Simulation und kommerzielle Simulationswerkzeuge aktiv sind, zusammengearbeitet. Vertreter des Institute of Computational Physics der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften und der Vela Solaris AG (Polysun) an Projekttreffen teil. Die Projektpartner unterstützten insbesondere bei der Definition von Anforderungen geeignete Rechenmodelle und sowie Schnittstellen für deren Integration in das kommerzielle Simulations- und Planungswerkzeug Polysun.

2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

2.1 VERGLEICH DER ERREICHTEN UND VORGEgebenEN ZIELE

Tabelle 1: Vergleich der erreichten und vorgegebenen Ziele, Teilprojekt A (ISE)

Überschrift	Ziel	Ergebnis
Erweiterung des Simulations- und Planungswerkzeugs „Polysun“ mit einem erweiterten Modell für ungedeckte (PVT-) Kollektoren	Das Modell soll in der Lage sein, die energetischen Effekte und Einflüsse beim Betrieb dieser Komponenten unterhalb der Umgebungstemperaturen wie Kondensatbildung, Vereisung und Abtauvorgänge am Kollektor wiederzugeben. Das Modell wird mit Hilfe von Messungen validiert und im Anschluss in Kooperation mit der Firma Vela Solaris AG in das bei Anwendern, Industrie und Ingenieurbüros weit verbreitete Planungs- und Auslegungswerkzeug „Polysun“ integriert werden. (Hierfür relevante AP: 1, 2, 5)	<p>Eine Modellerweiterung für ungedeckte PVT-Kollektoren wurde entwickelt. Die Generierung der Messdaten zur Validierung ergaben sich als wesentlich zeitaufwendiger als geplant. Die Validierung des Modells auf Basis der Messdaten ergab, dass die Modellansätze für die Effekte von Kondensation und Eisbildung nicht zufriedenstellend sind.</p> <p>Eine Erweiterung von Polysun ist prinzipiell über zwei Wege möglich:</p> <ul style="list-style-type: none"> Mockup-Interface Natives Modell <p>Um dies umzusetzen bedarf es jedoch der zufriedenstellenden Validierung der Modellerweiterung. Somit konnte eine Integration in Polysun nicht umgesetzt werden.</p>
Systementwicklung mit experimentellen Untersuchungen	Wenigstens ein in Bezug auf besagte Effekte (Siehe 1.) vielversprechendes Regelungskonzept (AP2) – in Hardware implementiert (AP3) und im Gesamtsystem auf Funktion und Leistungsfähigkeit geprüft (AP4) – wird realisiert und die Einsatzfähigkeit nachgewiesen.	<p>Ein Modellsystem wurde aufgebaut und gemeinsam mit dem Projektpartner im Rahmen der Inbetriebnahme /Betriebsführung realisiert und optimiert.</p> <p>Es konnte nachgewiesen werden, dass das Gesamtsystem mit PVT-Kollektoren als alleinige Wärmequelle für eine Wärmepumpe den Bedarf eines Einfamilienhauses an Heiz- und Warmwasserenergie decken kann.</p> <p>Voraussetzung ist der Betrieb der Quelle bei bis zu -20°C und der Nutzung von Kondensation und Vereisung.</p> <p>Weitere Entwicklungspotentiale konnten ermittelt werden.</p>

Systementwicklung mit Simulationsstudien	Identifikation aussichtsreicher Anwendungsfälle für besagte Wärmepumpe-PVT-Systeme i.e. Neubau/Heizungssanierung, Fertighausanbieter und Nischenmärkte wie Hotels oder Campingplätze (AP2, AP5)	Eine sinnvolle Systemkonfiguration wurde mit Hilfe der Simulationssoftware Polysun auf Grundlage von Kundenanfragen und Erfahrungen entwickelt.
Bereitstellung der wissenschaftlichen Basis für Normungsarbeit	Im Projekt wird auch ein Verfahren zur Bestimmung der Kennwerte des (PVT-) Kollektormodells (vgl. 1.) auf Basis von Messungen entwickelt. Damit soll die Effizienz von Wärmepumpe-Heizsystemen mit quellenseitig integrierten PVT-Kollektoren auf vergleichbare Art und Weise darstellbar werden. Die neu entwickelte Prozedur soll in entsprechende Normungsgremien zur Erweiterung der relevanten Prüfnormen (i.e. EN 12977, ISO 9806) eingebracht werden.	Die im Rahmen des Projektes entwickelte Modellerweiterung ergab, dass die reine Energiegewinnung durch Kondensation und Vereisung gering ausfällt. Dies steht im Widerspruch zu vorangegangenen Untersuchungen. Das Ergebnis ist nicht aussagekräftig genug, um abschließen einen Vorschlag für die Normungsarbeit einzureichen. Eine wesentliche Energieausnutzung besteht durch den erweiterten Quell-Betriebstemperaturbereich bis -20°C.

Die Projektziele des Teilprojekt A konnten zu großen Teilen erreicht werden. Darüber hinaus gab es unerwartet positive weitreichende Ergebnisse siehe Tabelle zuvor. Es gab Verschiebungen bezüglich der Zeitplanung, so gestalteten sich Aufgaben im Bereich der durchzuführenden Messungen als aufwendiger als geplant.

Tabelle 2: Vergleich der erreichten und vorgegebenen Ziele, Teilprojekt B (PA-ID)

Überschrift	Ziel	Ergebnis
Identifikation der Systemkonfiguration hinsichtlich ihrer Anwendungsfälle	Es sind Möglichkeiten zur Nutzung zusätzlicher Wärmequellen sowie die Erfahrungen der Firma PA-ID zu berücksichtigen. Durch die von Vela Solaris bereitgestellten Polysun Simulationsprojekte können die energetisch und ökonomisch vielversprechenden Systemkonfigurationen evaluiert, optimiert und bewertet werden. Im Vordergrund hierbei steht immer das ganze System und nicht die Betrachtung der einzelnen Komponente.	Eine sinnvolle Systemkonfiguration wurde mit Hilfe der Simulationssoftware Polysun auf Grundlage von Kundenanfragen und Erfahrungen entwickelt. Im Rahmen der Simulation wurden gleichzeitig erste Regelkonzepte getestet. Das Testsystem besteht aus 2Power PVT-Kollektoren, Sole-Wärmepumpe, 1000l Pufferspeicher und einem Hydraulikmodul. Stellvertretend als Nutzungsmöglichkeit zusätzlicher Wärmequellen und Senken wurde ein Thermostat eingeplant.

Festlegung der hydraulischen Verschaltung der Komponenten	Hinsichtlich der Auswahl einer oder mehrerer Wärmequellen für die Wärmepumpe, müssen diese so miteinander verknüpft werden, dass primär der elektrische Energiebedarf der Wärmepumpe so niedrig wie möglich gehalten wird. Im Systemteststand selbst werden zunächst so viele Regelventile wie möglich eingebaut, um alle eventuellen hydraulischen Möglichkeiten abzufahren und zu bewerten.	Auf Basis des Simulationsschemas wurde das detaillierte Hydraulikschema entwickelt. Ergänzend zum Hydraulikschema wurde eine Gerätebauliste der Sensoren, Aktoren und Regelgeräte erstellt, um eine Übersicht zu erhalten und um für die Datenaufzeichnung und Auswertung eindeutige und einheitliche Bezeichnungen festzulegen.
Regelung des gesamten Systems	Entwicklung von Regelungsstrategien an bestimmten Systemkonfigurationen und Vorbereitung für die Implementierung in das Systemmodell, um diese im Rahmen von AP4 und AP5 zu evaluieren.	Im Rahmen der Erstellung der Systemkonfiguration wurden in der Simulation auch die Steuer- und Regelfunktionen getestet. So konnten die gewünschten Betriebszustände erfasst und die Anforderungen an die Hardware definiert werden.
Hardwareimplementierung von neuen Regleralgorithmen	Wegen der starken Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilsystemen können handelsübliche vorgeprogrammierte Regler diese komplexe Aufgabenstellung nicht mehr umsetzen. Um eine erfolgreiche Validierung der erarbeiteten Systemkonfiguration durchführen zu können, ist es also notwendig die erarbeiteten Regelstrategien in logische und automatische Funktionen umzusetzen um im Regler zu implementieren. Um später Systemoptimierungen vornehmen zu können, ist eine detaillierte Analyse des Betriebs der Anlage unbedingt erforderlich. Dafür ist auch die Erfassung und Archivierung von sämtlichen relevanten Daten und Messwerten aus der Anlage notwendig.	Um die komplexen Regelstrategien umzusetzen wurde eine Kombination aus dem Solarregler ES6522 SZ und dem Regler der Wärmepumpe SE6024 WPC eingesetzt. Beide Regler sind frei programmierbar und arbeiten voneinander unabhängig. Die Datenerfassung wiederum erfolgt zentral für beide Geräte gemeinsam. Das Testsystem und die Steuerung konnten erfolgreich in Betrieb genommen und getestet werden. Das Testsystem läuft ohne ständige Betreuung autark und zeichnet Daten auf. Der Test der automatischen Abtaufunktion war ebenfalls erfolgreich.
Erstellen von firmenspezifischen Polysun-Simulationsprojekten auf Basis der in AP2 definierten Systemkonfiguration und Randbedingungen	Aufsetzen von Polysun-Simulationsprojekten in einer erweiterten validierten Polysun-Umgebung (AP1) auf Basis der in AP2 definierten Systemkonfigurationen und Implementierung der Regelungsstrategien, Integration der Simulationsszenarios mit unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen und Nutzerlasten und Überführung in ausführbare Polysun-Simulationsprojekte, Durchführen von Sensitivitätsanalysen, Durchführen der Simulationen und Dokumentation der Ergebnisse, Interpretation der Simulationsergebnisse	Eine erste optimierte Systemkonfiguration mit verbesserter Regelstrategie wurde erstellt und ausgewertet. Dies führte schon im ersten Schritt zu Effizienzsteigerungen um ca. 30%. Das erweiterte Kollektormodell wurde in der Tabellenkalkulationssoftware Excel aufgestellt und validiert. Die Validierung war für die Parametersätze „sunny“ und „latent“ erfolgreich. Für den Parameterstz „mixed“ muss die Modelgleichung noch optimiert werden. Entgegen der Erwartungen spielt der Energieeintrag durch Kondensation und Vereisung eine geringe Rolle.

Es waren keine Änderungen der Zielstellung erforderlich.

2.2 WICHTIGE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Positionen weitestgehend wie geplant verausgabt.

In Teilprojekt A wurde der größte Teil der Ausgaben für die Planung, Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme, sowie Durchführung der Prüfungen sowie für die Auswertung und Validierung der Modellerweiterung verausgabt.

In Teilprojekt B wurde der größte Teil der Ausgaben für die Planung der Systemkonfiguration, den Aufbau des Testsystems, die Reglerentwicklung und Implementierung, die Auswertung und Validierung der Ergebnisse sowie die Optimierung der Simulationsumgebung verausgabt.

2.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER ARBEIT

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Projekt sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben soweit zielführend, wenn auch nicht immer abschließend bearbeitet wurden (vgl. Kapitel 3 und 4). Für die Fortführung der Arbeiten sind zusätzlichen Ressourcen notwendig.

2.4 VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE IM SINNE DES FORTGESCHRITTENEN VERWERTUNGSPLANS

2.4.1 ERFINDUNGEN/SCHUTZRECHTANMELDUNGEN

Im Projekt ergaben sich keine projektbezogenen Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen während der Projektlaufzeit.

2.4.2 WIRTSCHAFTLICHE ERFOLGSAUSSICHTEN NACH PROJEKTENDE

Für das **Fraunhofer ISE** ergeben sich auf Basis der Arbeiten im Projekt kurz und mittelfristig entsprechende Verwertungsmöglichkeiten (*Tabelle 1*).

Tabelle 3: Verwertungsmöglichkeiten für antragstellende Forschungsgruppe am Fraunhofer ISE.

Beschreibung	Verwertungshorizont
Folgeantrag i.e. „WPVT-Freeze 2“ mit dem Ziel, die in diesem Antrag theoretisch definierten und evaluierten Betriebs-/Regelstrategien in der Praxis (Messungen am Gesamtsystem im Labor) zu erproben und zu verbessern.	Antragstellung Ende 2016 geplant, bislang nicht erfolgt.
Bisher wurde das Thema energetische Effekte von Kondensation auf unbedeckten Solarkollektoren nur vereinzelt untersucht, im Falle von Vereisung überhaupt nicht (vgl. Kapitel 2). Durch die Arbeiten in AP 1 sowie ggf. im Folgeantrag positioniert sich das Fraunhofer ISE gegenüber anderen Forschungseinrichtungen und für die Industrie als wichtigster Forschungspartner zu weiteren Fragestellungen auf diesem Gebiet (i.e. neue Untersuchungen im Kontext von anderen Systemkonfigurationen, Verbesserung der Messtechnik, etc.).	Beantragung neues Forschungsprojekt/Mitarbeit in anderem Forschungsprojekt mit Industriebeteiligung ab Mitte 2017 realistisch. Wurde mit Antragsstellung „integrate“ und starker Definition des Task 60 umgesetzt.

<p>In AP 1 wird neuartige Messtechnik zur Erfassung von Vereisungsprozessen beschafft und erstmals zu Fragestellungen im Bereich von regenerativen Heizsystemen eingesetzt. Im Projekt werden dabei neue Verfahren zur Auswertung der mit der Messtechnik erfassten Daten entwickelt. Dies ermöglicht der antragstellenden Gruppe, die das TestLab Solar Thermal innerhalb des Fraunhofer ISE betreibt, ihr bestehendes Angebot der Leistungsmessung an (unabgedeckten) Solarkollektoren um Betriebsbedingungen mit Kondensation und Eisbildung zu erweitern – Eine Dienstleistung mit (voraussichtlich) Alleinstellungsmerkmal am Markt.</p>	<p>Erweiterung des Service-Angebots ab 2018 realistisch. Potential aufgrund der experimentell sehr schwierig umzusetzenden und für die Größenordnung deshalb zu aufwendigen Testbedingungen leider eher niedrig.</p>
---	--

Das Projekt erbrachte Erkenntnisse, die sich auch wirtschaftlich nutzen lassen. Dies ist insbesondere die detaillierte Beschreibung der energetischen Performanz des Gesamtsystems und in Zusammenschau auch der Komponenten. Das bedeutet das Fragen der Key Performance Criteria (KPI) erstmalig mit empirischen Daten gebildet werden können. Die Vorschläge der Bewertungsgrößendefinition ist bereits in den internationalen Fachgremien zur Diskussion. Daraus leitet sich ab, dass Fraunhofer ISE für Industriekunden die Ermittlung der notwendigen Kennzahlen im Service anbieten kann. Zudem wurden einige Forschungsfragen identifiziert, die in Forschungsanträgen zusammen mit entsprechenden Industriepartnern bearbeitet werden sollten.

2.4.3 WISSENSCHAFTLICHE UND/ODER TECHNISCHE ERFOLGSAUSSICHTEN NACH PROJEKTENDE

Die technische Bewertung sowie die wissenschaftliche Verwertung ergeben sich für das Fraunhofer ISE entsprechend dem Verwertungsplan des Antrags. Diese sind nicht öffentlich.

2.4.4 WISSENSCHAFTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE ANSCHLUSSFÄHIGKEIT FÜR EINE MÖGLICHE NÄCHSTE PHASE

Neben der Weiterentwicklung der Bewertungsmethodik sind die Systementwicklung und Markterschließung weitere wesentliche Projektziele: In Kooperation mit der Firma Vela Solaris sollen die oben genannten erweiterten Modelle erstmals in die bei Anwendern von Industrie und Ingenieurbüros weit verbreitete Planungs- und Auslegungssoftware Polysun integriert werden. Hierzu wurden die PVT-Simulationsmodelle gemäß den Zwischenresultaten aus dem Projekt verfeinert und die Produktdatenbank erweitert. Weiter wurden die bereits bestehenden Firmenvorlagen von PA-ID aktualisiert. Die Resultate werden durch die Firma Vela Solaris im Rahmen der Polysun Software bereitgestellt und an die Polysun Benutzer ausgeliefert. Mit einer Anzahl von ~20'000 Polysun Lizenzen weltweit gibt es eine große Zahl von Benutzern, an welche die Erweiterung um die neuen PVT Modelle ausgeliefert werden können.

Alle Modellerweiterungen werden mit diesem Bericht publiziert, so dass die Projektresultate allen Anbietern von Planungswerkzeugen zur Verfügung stehen.

Die erarbeiteten wissenschaftlichen Ergebnisse wurden der Fachwelt durch Veröffentlichungen und Vorträge auf einschlägigen Fachtagungen zugänglich gemacht. Zur ausgewiesenen Expertise der Arbeitsgruppe des Fraunhofer ISE gehört auch die intensive Normungsarbeit im Bereich der Solarthermie. Damit fließen die Ergebnisse des Vorhabens – im Einzelnen die Arbeiten zum verbesserten (PVT-) Kollektormodell und die erarbeiteten Prüfmethode – direkt in die normative Arbeit ein und werden früher oder später ihren Niederschlag in den ausgearbeiteten nationalen und internationalen Normen finden, auf die sich insbesondere auch das „Solar Keymark Network“ stützt. Eine Arbeitsgruppe innerhalb des SKN konnte zum Thema PVT gegründet werden, Fraunhofer ISE brachte dabei die Erfahrung ein. Ein entsprechender Anhang zur Leistungsbewertung und Zertifizierung wurde bereits erstellt und wird im Oktober Treffen des Netzwerks zur Abstimmung gestellt. Die Grenzen der empirischen Bewertbarkeit sind auch eine wichtige Erkenntnis, die in die Arbeiten der Subtask B des IEA SHC Task 60 eingebracht werden konnten.

Erkenntnisse und Ergebnisse sowie die entstandene Laborinfrastruktur aus dem Projekt werden in neu beantragten Projekten wie „integrate“ weiter als Ausgangspunkt genutzt.

2.5 FORTSCHRITTE AUF DEM GLEICHEN GEBIET DURCH ANDERE STELLEN

Das Thema der Mehr-Quellen Systeme wird selbstverständlich nicht nur am Fraunhofer ISE bearbeitet. Derzeit laufen eine Vielzahl Projekte im grundsätzlich selben Anwendungsbereich national, europaweit und in anderen Teilen der Welt. Im Rahmen der IEA Task und der diesbezgl. Vorbereitung wurde eine Übersicht der laufenden Projekte in Deutschland mit dem konkreten spezifischen Inhalt PVT+HP begonnen. Diese wurde genutzt, um der inhaltlichen Abstimmung und Orientierung zu Grunde gelegt zu werden. Dazu gab es auch ein Abstimmungstreffen am Fraunhofer ISE im Rahmen des ersten IEA Task Treffens, an dem auch Vertreter der PTJ teilnahmen. Auch eine daraus abgeleitete relevante Zuarbeit zum internationalen Task wurde darauf basierend diskutiert. Einige der Projekte sind weiterhin in Arbeit andere sind abgeschlossen oder mussten abgebrochen werden.

2.6 ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Dieses Kapitel stellt die Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes dar. Dazu werden die im Rahmen des Projektes vorgestellten Konferenzbeiträge und die abgeschlossenen wissenschaftlichen bzw. studentischen Arbeiten in *Tabelle 4* aufgeführt.

Tabelle 4: Veröffentlichungen im Rahmen des Verbundvorhabens WPVT-Freeze.

#	Jahr	Autoren	Titel des Beitrags	Art des Beitrags	Details
1	2017	E. Rajkiran Jaychandran	Performance of Flat Plate PVT Collectors: Modelling, Simulation and Parameter Identification	Masterarbeit	Hochschule Offenburt
2	2017	C. Schmidt, M. Lämmle, K. Kramer	Quellenseitig in Wärmepumpe-Heizsysteme eingebundene Kollektoren - Definition von Anforderungen und Bewertung von Rechenmodellen sowie Messverfahren zur Modellkalibrierung	Konferenzbeitrag	27. Symposium Thermische Solarenergie, 10. – 12. Mai 2017 in Bad Staffelstein
3	2018	A. Heßberger	System examples of PVT-Collectors and first results of the common project WPVT-FREEZE with Fraunhofer ISE	Vortrag	PVT-Workshop Fraunhofer ISE, 16.05.2019
4	2018	C. Schmidt, A. Schäfer, C. Thoma, E. Rajkiran Jaychandran, M. Lämmle, K. Geimer, K. Kramer	Quellenseitig in Wärmepumpen-Heizsystem integrierte PVT-Kollektoren – Experimentelle Messungen am Einzelmodul und am Gesamtsystem	Konferenzbeitrag	28. Symposium Thermische Solarenergie, 10. – 12. Juni 2018 in Bad Staffelstein
5	2018	C. Schmidt, A. Schäfer, K. Kramer	Single source "solar thermal" heat pump for residential heat supply: Performance with an array of unglazed PVT collectors	Konferenzbeitrag	EuroSun2018 - International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, 10.-13. September, Rapperswil, Switzerland
6	2018	K. Kramer, M. Lämmle, A. Schäfer	Workshop, im Rahmen des Auftaktes des IEA Task 60 (PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems)	Workshop	am 15./16. Mai 2018 am Fraunhofer ISE
7	2019	K. Kramer, A. Schäfer	Industry Workshop - kombiniert mit IEA Task 60 – Treffen (PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems)	Industry Workshop	Eindhoven, 08.05.2019

3 DARSTELLUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN ARBEIT - TEILPROJEKT A (ISE): UNTERSUCHUNG VON KONDENSATIONS- UND VEREISUNGSEFFEKTEN SOWIE MODELL-ENTWICKLUNG

3.1 AP1: ERWEITERUNG PVT-MODELL UND VALIDIERUNG (AP-LEITUNG: ISE)

Hauptautoren: Chrisitan Schmidt, Arim Schäfer, Korbinian Kramer

ISE

AP#	Meilenstein Nummerierung und Beschreibung	
1	M1.1	Messtechnik für Kollektorprüfstände ausgewählt, beschafft, Prüfstände für Messungen erweitert, Prüfmatrix in Übersichtsplan festgelegt.
	M1.2	PVT-Kollektormodell erweitert, Abgleich mit Messungen an Prüfständen durchgeführt und Freigabe für Integration in Planungswerkzeug gegeben.
	M1.3	Review Journal Paper zur Veröffentlichung eingereicht

3.1.1 M1.1: MESSTECHNIK FÜR KOLLEKTORPRÜFSTÄNDE AUSGEWÄHLT, BESCHAFFT, PRÜFSTÄNDE FÜR MESSUNGEN ERWEITERT

M1.1: Messtechnik für Kollektorprüfstände ausgewählt, beschafft, Prüfstände für Messungen erweitert, Prüfmatrix in Übersichtsplan festgelegt.

3.1.1.1 DURCHFÜHRUNG VORVERSUCH

Ziel der Messung bestand darin, bei geringem Aufwand die grundsätzliche Machbarkeit der ersten Messkonzept-Idee für die Klimakammer zu untersuchen. Damit dient der Vorversuch als wertvolle Planungshilfe. Weitere Fragen, die beantwortet werden sollten:

- Kann Kondensat mit Hilfe einer genauen Waage signifikant und ausreichend genau erfasst werden? Gibt es dabei störende Effekte durch die befüllten und betriebenen Anschlusschläuche an den Kollektor?
- Mit welchen Kondensatmengen ist in Abhängigkeit von Fluidtemperatur und Kollektor-Oberflächentemperatur zu rechnen?

Für den Vorversuch wurde ein PVT-Kollektor von PA-ID aus dem Projekt PVT-Norm auf eine hochgenaue Waage (Ungenauigkeit +-2g) positioniert und fixiert. Der Kollektor wurde am Wasserhydraulikkreis angeschlossen, wobei jedoch keine Erfassung der Leistung durchgeführt wurde. Neben dem Gewicht wurden, Umgebungstemperatur und Taupunkttemperatur sowie Oberflächentemperatur erfasst.



Abbildung 3: Gezeigt wird der Messaufbau für den Vorversuch mit PVT-Kollektor auf einer hochgenauen Waage während der Messung. Auf dem linken Foto ist Kondensat auf der Kollektoroberfläche erkennbar.

Die mit dem Vorversuch gesetzten Ziele konnten erreicht werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse waren hilfreich für die Planung des Messaufbaus in der Klimakammer des TestLab Solar Thermal Systems. Dabei wird auch die im Vorversuch getestete Wäge-Methode zur quantitativen Erfassung von Kondensatmengen (flüssig oder gefroren) und angewendet werden.

3.1.1.2 AUSWAHL, RECHERCHE, IDENTIFIKATION UND BESCHAFFUNG VON MESSTECHNIK FÜR DEN MESSAUFBAU IN DER KLIMAKAMMER

Für die Untersuchungen wurde die Klimakammer des „Mechanischen Lastteststands des TestLab Solar Thermal Systems“ verwendet.

Die Messungen in AP1 unterscheiden sich von den sonst üblichen Messungen von Kollektoren (i.e. Leistungsmessung nach ISO 9806) erheblich. Die Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung,...) müssen in einem weiten Bereich variiert und idealerweise einstellbar sein. Eine Messung ist daher an den „etablierten“ Kollektortestständen nicht durchführbar. Die Messung wird in der Klimakammer des mechanischen Lastteststands des TestLab Solar Thermal Systems erfolgen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dieser wurde gemäß den neuen Anforderungen für diese Aufgabe vorbereitet.

- 2 Kreise
- Thermostat aus Solsim
 - 8 kW-Kältemaschine
 - -40 °C 160 °C
 - Arbeitsmedium normalerweise Wasser → füllen mit Glykol
- Entleerung, jedoch Restwasser... → c_p ?
- Plattenwärmeübertrager
- Solarstation
- Drehzahlgeregelte Pumpe, geregelt über PID-Regler
- Erfassung der Umgebungsluft um Kollektor

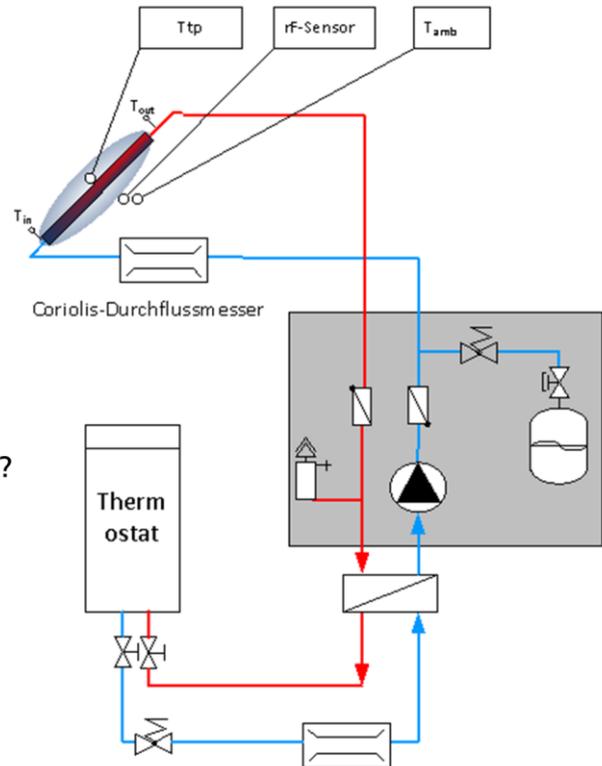


Abbildung 4: Gezeigt wird ein Schema des geplanten Messaufbaus in der Klimakammer des mechanischen Lastteststands des TestLab Solar Thermal Systems.

Im Hinblick auf die „Standard-Messtechnik“ ist zu beachten, dass die übertragenen Leistungen, die bei Kondensations- und Vereisungsvorgängen am Kollektor zu erwarten sind, um ein bis zwei Größenordnungen niedriger liegen als bei sonst üblichen Messungen (i.e. Leistungsmessung nach ISO 9806).

- Entsprechend muss mit entsprechend niedrigeren Volumenströmen gearbeitet werden. Daher wurde ein hochgenauer Coriolis-Durchflussmesser angeschafft, dessen Arbeitsbereich die niedrigen Volumenströme bei höherer Genauigkeit abdeckt.
- Statt üblicherweise Wasser wird nun ein frostsicheres Wärmeträgermedium eingesetzt. Dessen spezifische Wärmekapazität wird durch den Coriolis-Durchflussmesser ebenfalls erfasst.
- Um mit die bewährten PT-100 Messtechnik verwenden zu können, sind ähnliche Strömungsverhältnisse auch bei einem Zehntel des Durchflusses zu gewährleisten. Dafür wurde eine neue Messfühleraufnahme entwickelt. Diese beinhaltet eine „Mischkammer“ mit einem deutlich reduzierten Strömungsquerschnitt.
- Mit einem Hochpräzisions-Taupunktspiegel-Messgerät können die Lufteigenschaften in unmittelbarer Kollektor-Oberflächennähe erfasst werden.
- Das in *Abbildung 4* grau eingefärbte Messbrett mit Pumpengruppe, Ausdehnungsgefäß, Rückschlagklappen und Überdruckventil konnte fertig gestellt werden.

Hinsichtlich der Erfassung von Vereisungs- und Schmelzvorgängen auf dem Kollektor konnte ein weiterer Anbieter identifiziert werden, der die technischen Anforderungen im Vergleich zu den bisherigen Anbietern am besten erfüllt bzw. hinsichtlich Genauigkeit übertrifft. Problematisch ist jedoch, dass auch in diesem Fall, dass wiederum nur ein kleiner Teilbereich des Kollektors erfasst werden kann, nicht jedoch die gesamte Oberfläche oder gar die Rückseite. Des Weiteren liegen die Kosten für die Messtechniklösung mehr als eine Größenordnung über dem dafür vorgesehenen Budget. Aus diesen Gründen wurde entschieden, eine rein thermische Erfassung besagter Vereisungsvorgänge über Temperatursensoren durchzuführen. Eine qualitative Auswertung in der Klimakammer soll mit Hilfe einer wetterbeständigen Kamera erfolgen.

Weiter zum Aufbau der Messungen, siehe auch die Kapitel [Messaufbau der Einzelmodulmessungen in der Klimakammer](#) [Messaufbau der Einzelmodulmessungen am Außenteststand](#)

Ergebnis:

Das Messkonzept, sowie die Recherche und die Beschaffung der notwendigen Sensorik wurde durchgeführt.

Die Erfassung der Eisdicke zeigte sich umfangreicher Recherche als große Herausforderung und wurde durch ein optisches Verfahren gelöst.

3.1.2 PRÜFMATRIX - EINZELMODULMESSUNGEN

M1.1: Messtechnik für Kollektorprüfstände ausgewählt, beschafft, Prüfstände für Messungen erweitert, **Prüfmatrix in Übersichtsplan festgelegt.**

3.1.2.1 VORARBEITEN ZUR ERSTELLUNG DER PRÜFMATRIX - PRÜFPLAN

In folgender Tabelle sind Aspekte gelistet, die bei der Erstellung des Prüfplans berücksichtigt wurden:

Tabelle 5: Vorarbeiten zur Erstellung der Prüfmarix

#	Aspekt	Berücksichtigungsform
1	Prinzipiell sind bei Prüfungen stets Extrembetrachtungen sinnvoll, um zu ersten aussagekräftigen Aussagen zu gelangen. Hierfür sind beispielsweise „Best/Worst Cases“ zu definieren.	Erkenntnis berücksichtigt in Form von Zielen von Testsequenzen
2	Übersicht zu Einflussfaktoren und Einstellbarkeit an Testständen.	Erkenntnis berücksichtigt durch Auswahl der Sollwerte und farbliche Hervorhebung (vgl. <i>Prüfplan für die Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand</i> oben)
3	Schema zur Visualisierung der Energieströme am Kollektor.	Keine Berücksichtigung, da Erkenntnis veraltet: Relevant ist das Verhältnis zwischen $T_{\text{Tau/Frost}}$ und $T_{\text{Oberfläche,Koll}}$ an, ein dynamisches Ergebnis der jeweiligen Energieströme
4	Im Bereich der Kondensation und Vereisung befindet sich die Kollektorkennlinie nicht mehr im ersten Quadranten des kartesischen Koordinatensystems, sondern im zweiten. Dabei ändern sich auf der X-Achse Bezugsgrößen. Gegebenenfalls ist eine neue Art der Darstellung der thermischen Leistungskennlinie notwendig. Erste Entwürfe wurden im Rahmen von Besprechungen angefertigt. Aus diesen Darstellungen ergeben sich mögliche Betriebspunkte.	Berücksichtigung erfolgt einerseits durch Verzicht auf klassische Darstellung, stattdessen Leistung über T_m .

<p>5 Polysun-Simulationen: Von Industriepartner PA-ID wurde ein aktuelles Simulationsdeck des Systems zur Verfügung gestellt. Hier werden Betriebszustände aller hydraulischen Kreise sowie das Verhalten des PVT-Kollektorfelds analysiert. Es wurde versucht mit Hilfe von bestimmten Diagrammen, die die Häufigkeit von klimatischen Ereignissen wiederspiegeln (i.e. Temperaturverteilung, Feuchte, etc. über Betriebsjahr) auf die Häufigkeit von der Kondensations- und Vereisungerscheinungen</p> <p>zu schließen. Hier zeigte sich eine wichtige Erkenntnis: Es kommt diesbezüglich nur auf das Verhältnis zwischen $T_{\text{Tau/Frost}}$ und $T_{\text{Oberfläche, Koll an}}$. Letzte lässt sich jedoch mit Polysun nicht berechnen!</p> <p>Ergebnisse:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Schematische Visualisierung der Betriebsmodi 2. Statistische Auswertung der aktiven Kreise in einem Betriebsjahr in Form eines Kuchendiagramms. 3. Abschätzung durch $T_{\text{Oberfläche}}$ und Interpretation der Ergebnisse für diesen Anwendungsfall. 4. Ableiten von Testsequenzen im Kontext von Punkt 2. und 3. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Schematische Visualisierung der Betriebsmodi (s. Abb. unten) <p>Anpassung in Bezug auf aktuelle Umbauten, Ergänzung um Schema für eine Wärmequelle (s. Abb. unten)</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Statistische Auswertung der aktiven Kreise in einem Betriebsjahr in Form eines Kuchendiagramms. <p>(s. Abb. unten)</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Abschätzung durch $T_{\text{Oberfläche}}$ und Interpretation der Ergebnisse für diesen Anwendungsfall (s. Abb. unten) <p>Eine weitere Detailanalyse der Simulation wünschenswert</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Ableiten von Testsequenzen im Kontext von Punkt 2. und 3 <p>Ein Ableiten von Testsequenzen erschien nicht zielführend, da keine sinnvolle Methode zur Abschätzung von $T_{\text{Oberfläche, Koll}}$ gefunden werden konnte.</p>
<p>6 Fragestellungen aus AP2 Zuerst Überarbeitung der Projektfragestellungen nötig, vgl. Abschnitt zu M2.1</p>	<p>Begrenzt konkreter Input für die Projektfragestellungen</p>
<p>7 Internes Excel-Tool wurde zur Auswertung der Klimakammer Messungen in AP1 verwendet. Dieses eignet sich jedoch noch nicht für die experimentellen Messungen und soll angepasst werden.</p> <p>Einige Prinzipien wie das bilden von „Messgruppen“ und „Messtagen“ können übernommen werden.</p> <p>Hilfreicher erschien jedoch als Vorlage für das Design einer Prüfmatrix für AP1 die aktuelle Norm ISO9806.</p>	<p>Berücksichtigung erfolgt, siehe Abbildung <i>Vorläufige Version des Prüfplans für die Einzelmodul-Messungen in der Klimakammer</i></p>
<p>8 Erkenntnisse aus PVT-Norm</p> <p>(in 2/2016 nicht genannt, ergänzt!) Immer wieder wurden in Besprechungen auf (angebliche/tatsächliche) Ergebnisse zu AP1 PVT-Norm verwiesen. Schriftliches Festhalten der Erkenntnisse aus dem vergangenen Projekt PVT-Norm zu bestimmten Fragestellungen.</p>	<p>Relevante Erkenntnisse des vergangenen Projekts PVT-Norm für WPVT-Freeze zusammengefasst. Erkenntnisse gering, relevant für Schlussbericht.</p>

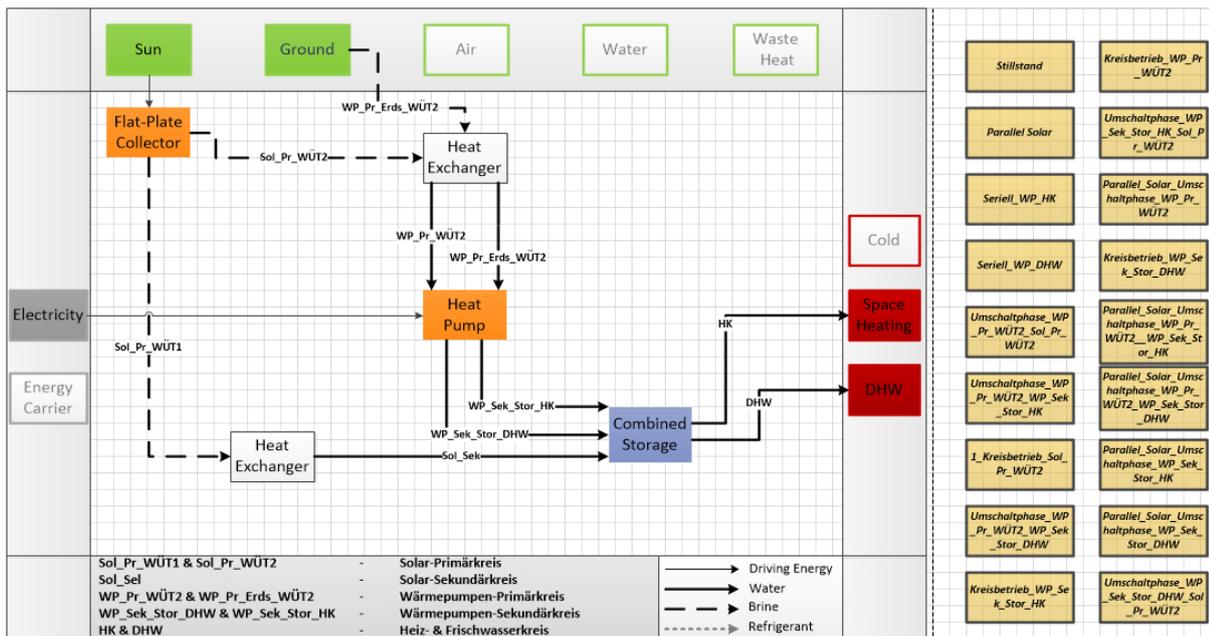


Abbildung 5: Aktivität #5 – No. 1 Schematische Visualisierung aller am System möglichen Betriebsmodi durch Visualisierung aller hydraulischen Kreise.

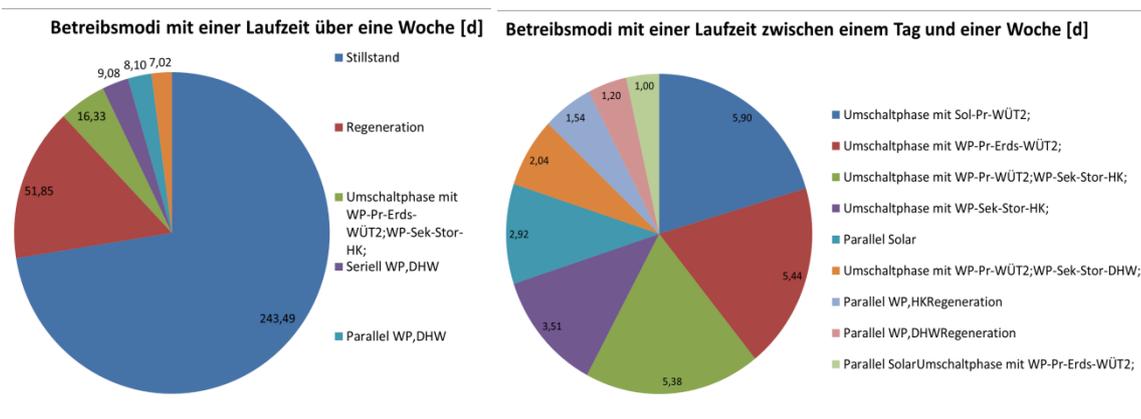


Abbildung 6: Aktivität #5 – No. 2 Tool zur Auswertung der Betriebsmodi im Jahresverlauf auf Basis von Simulationsdaten. Im Beispiel eine grafische Darstellung der Auswertung des Systems mit zusätzlicher Wärmequelle.

3.1.2.2 PRÜFMATRIX FÜR EINZELMODUL- MESSUNGEN AM AUßENTESTSTAND

Die in folgender Tabelle ist die Prüfmatrix dargestellt. Diese wurde entwickelt, um alles messtechnischen Größen zu ermitteln, auf Basis der aktuell gültigen ISO 9806:2017, sowie der erweiterten Modellgleichung notwendig sind. Siehe:

Tabelle 6: Prüfmatrix für Einzelmodulmessungen am Außenteststand

Betriebsmodus	Einstrahlung	Wind [m/s]	Himmel
solar (alle laut ISO 9806:2017)	ja	kein Wind	klar/bedeckt
solar (alle laut ISO 9806:2017)	ja	1,5 m/s	klar/bedeckt
solar (alle laut ISO 9806:2017)	ja	3 m/s	klar/bedeckt
Wärmetauscherfunktion	keine	kein Wind	klar

Wärmetauscherfunktion	keine	1,5 m/s	klar
Wärmetauscherfunktion	keine	3 m/s	klar
Wärmetauscherfunktion	keine	kein Wind	bedeckt
Wärmetauscherfunktion	keine	1,5 m/s	bedeckt
Wärmetauscherfunktion	keine	3 m/s	bedeckt
Wärmetauscherfunktion + Kondensat	keine	kein Wind	klar
Wärmetauscherfunktion + Kondensat	keine	1,5 m/s	klar
Wärmetauscherfunktion + Kondensat	keine	3 m/s	klar
Wärmetauscherfunktion + Kondensat	keine	kein Wind	bedeckt
Wärmetauscherfunktion + Kondensat	keine	1,5 m/s	bedeckt
Wärmetauscherfunktion + Kondensat	keine	3 m/s	bedeckt
Wärmetauscherfunktion + Vereisung	keine	kein Wind	klar
Wärmetauscherfunktion + Vereisung	keine	1,5 m/s	klar
Wärmetauscherfunktion + Vereisung	keine	3 m/s	klar
Wärmetauscherfunktion + Vereisung	keine	kein Wind	bedeckt
Wärmetauscherfunktion + Vereisung	keine	1,5 m/s	bedeckt
Wärmetauscherfunktion + Vereisung	keine	3 m/s	bedeckt

Die Prüfmatrizen und Prüfpläne zu den Messungen am Einzelmodul befinden sich in [Anhang C: Prüfmatrizen](#), siehe: [Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung Vorgabe](#)

3.1.3 M1.2: PVT-KOLLEKTORMODELL ERWEITERT

M1.2: PVT-Kollektormodell erweitert, Abgleich mit Messungen an Prüfständen durchgeführt und Freigabe für Integration in Planungswerkzeug gegeben.

3.1.3.1 STAND DER WISSENSCHAFT

Der Stand der Wissenschaft, sowie die Anforderungen an eine Modellerweiterung wurde im Rahmen des Projektes erarbeitet. Die Ausarbeitung wurde veröffentlicht, siehe:

SYMPOSIUM SOLAROTHERMIE UND INNOVATIVE WÄRMESYSTEME - 2017
KLOSTER BANZ, BAD STAFFELSTEIN

Titel:

Collectors integrated in heat pump heating systems on the source side - Definition of requirements and evaluation of calculation models as well as measurement methods for model calibration

Autoren:

Christian Schmidt, Manuel Lämmle, Korbinian Kramer

3.1.3.2 MODELLGLEICHUNG ERWEITERT

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Modellgleichungsansätze untersucht. Erster Ansatz war die Modellgleichung der H&K-Methode (veröffentlicht in - *Mult-linear performance model for hybrid (C)PVT solar collectors* – Henning Helmer, Korbinian Kramer – 2012)

Es wurde entschieden, auf Basis der gültigen Norm zu arbeiten. ISO 9806 wurde 2017 neu aufgelegt. In der Projektlaufzeit 2016-2018 wurde mit der Version 2013 gearbeitet.

Die elektrische Seite des PVT-Moduls wird hier nicht betrachtet. Jedoch basiert der Ansatz darauf, dass bei der Vermessung der Module die elektrische Seite im MPP betrieben wird.

Im folgenden ist die weiter entwickelte Modellgleichung beschrieben. Siehe auch Kapitel [Beschreibung der Auswertemethodik](#)

Modellgleichung

Legende: *rot* – In Auswertung identifizierter Wert *blau* – Gemessene Größe und/oder Konstante

Thermischer Output: In Anlehnung an ISO 9806:2013

$$P_{ther} = k_b G_b \eta_{0,b} + k_a G_a \eta_{0,b} + a_1 (\vartheta_m - \vartheta_a) + a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 + a_3 u (\vartheta_m - \vartheta_a) + a_4 (E_L - \sigma T_a^4) + a_5 d\vartheta/dt + a_6 u G$$

(hier alle Terme mit + versehen; somit ergibt das Vorzeichen des Parameters die Energieflussrichtung an)

WPVT- Freeze Modifikationen/Weiterentwicklungen

Ergebnis:

Weder ISO 9806, noch Bunea [15] oder Perers [6] verwenden bei den Formeln für den Wärmestrahlungsaustausch (vorne und hinten) den Emissionsgrad ε der jeweiligen Oberfläche.

Wenn die Oberflächen unterschiedlichen materials sind ist dies jedoch erforderlich.

Bei Parameter a_4 kann der Emissionsgrad ε vernachlässigt werden, wenn die Oberfläche des Kollektors, sowie das Strahlungsmessgerät (Pyrogeometer) als Oberfläche Glas haben.

Bei Parameter a_{11} kann nicht auf den Emissionsgrad ε verzichtet werden, da die Oberflächen aus unterschiedlichen Materialien bestehen

$$+a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a) |\vartheta_m - \vartheta_a| \quad |\vartheta_m - \vartheta_a| \text{ statt } (\vartheta_m - \vartheta_a) \text{ sowie}$$

$$+a_4 (E_L - \sigma T_m^4) \quad T_m \text{ statt } T_a \text{ [nach Bunea et al. [15]]}$$

$$+a_{10} (2.8 + 3u) (\mu_a - \mu_{sat}(\vartheta_m)) \text{ [Perers [6]]}$$

$$+a_{11} (\sigma T_a^4 \varepsilon - \sigma T_m^4 \varepsilon) \quad a_{11} (\sigma T_b^4 - \sigma T_m^4) \text{ [nach Bunea et al. [15]]}$$

$$T_b = T_a \text{ Vereinfachung Christian Schmidt (Fraunhofer ISE)}$$

Ergebnis:

Modellgleichung mit WPVT- Freeze Modifikationen

$$P_{ther} = k_b G_b \eta_{0,b} + k_a G_a \eta_{0,b} + a_1 (\vartheta_m - \vartheta_a) + a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a) |\vartheta_m - \vartheta_a| + a_3 u (\vartheta_m - \vartheta_a) + a_4 (E_L - \sigma T_m^4) + a_5 d\vartheta_m/dt + a_6 u G + a_{10} (2.8 + 3u) (\mu_a - \mu_{sat}(\vartheta_m)) + a_{11} (\sigma T_a^4 \varepsilon_b - \sigma T_m^4 \varepsilon_{surf})$$

Tabelle 7: Formelzeichen und deren Beschreibung

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
\dot{q}	Flächenspezifische Nutzwärmeleistung des Kollektors	W
Q'	Nutzwärmeleistung des Kollektors	W
A_k	Bezugsfläche des Kollektors	m ²
G_b	direkte Bestrahlungsstärke in Kollektorebene	W/m ²
G_d	diffuse Bestrahlungsstärke in Kollektorebene	W/m ²
G_{hem}	hemisphärische Bestrahlungsstärke	W/m ²
ϑ_m	mittlere Fluidtemperatur im Kollektor	°C
ϑ_a	Umgebungstemperatur	°C
ϑ_b	Gebäudetemperatur	°C
T	Absoluttemperatur	K
$d\vartheta_m/dt$	Gradient der mittleren Fluidtemperatur	°C/s
u	Windgeschwindigkeit	m/s
u'	Reduzierte Windgeschwindigkeit $u' = u - 3$ m/s	m/s
η_0	Konversionsfaktor bei $T_m=0$ und senkrechter Einstrahlung	--
$\eta_{0\ th,b}$	Konversionsfaktor bei $T_m=0$ und senkrechter direkter Einstrahlung	--
θ_{ls}	Solarer Longitudinalwinkel	°
θ_i	Projektion des Sonnenstandes auf die Transversalebene des Kollektors	°
$K_b(\theta_{ls}, \theta_i)$	Einfallswinkelkorrekturfaktor der direkten Sonneneinstrahlung	--
K_d	Einfallswinkelkorrekturfaktor der diffusen Sonneneinstrahlung	--
a_1	thermischer Verlustkoeffizient erster Ordnung	W/(m ² K)
a_2	thermischer Verlustkoeffizient zweiter Ordnung	W/(m ² K ²)
a_3	Koeffizient zur Berechnung des windabhängigen Wärmedurchgangskoeffizienten	J/(m ³ K)
a_4	Koeffizient zur Berechnung des Himmeltemperatur-abhängigen Wärmedurchgangskoeffizienten	--
a_5	effektive Wärmekapazität des Kollektors	J/(m ² K)
a_6	Koeffizient für den windabhängigen Konversionsfaktor der optischen Verluste	s/m
a_7	Koeffizient zur Berechnung des Wind- und Himmeltemperatur-abhängigen Wärmedurchgangskoeffizienten	W/(m ² K ⁴)
a_8	thermischer Verlustkoeffizient vierter Ordnung	W/(m ² K ⁴)
a_{10}	Koeffizient für latente Wärme – Kondensat und Vereisung	J/kg
a_{11}	Koeffizient zur Berechnung des Gebäudetemperatur-abhängigen Wärmedurchgangskoeffizienten der Kollektor-Rückseite	--
μ_a	absolute Feuchte der Umgebungsluft	kg/m ³
$\mu_{sat}(\vartheta_m)$	gesättigte absolute Feuchte der Umgebungsluft bei Temperatur T_m	kg/m ³
EL	Langwellige Strahlung ($\lambda > 3$ μ m)	W/m ²
ε	Emissionsgrad der Oberfläche	--
σ	Stefan-Boltzmann Konstante	W/(m ² K ⁴)

3.1.4 UNTERSUCHUNG ZU KONDENSATBILDUNGSPOTENTIAL

3.1.4.1 KONDENSATIONSMESSUNGEN IN DER KLIMAKAMMER

Zur Abschätzung, welche Kondensatmengen erreichbar sind, wurde eine Untersuchung in der Klimakammer durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgten an dem PVT-Modultyp, welches im Rahmen des Projektes auch im Gesamtsystem eingesetzt wurde (rückseitig isoliert).

Die Untersuchung und Ergebnisse wurden veröffentlicht, siehe:

SYMPOSIUM SOLAR THERMIE UND INNOVATIVE WÄRMESYSTEME - 2018
KLOSTER BANZ, BAD STAFFELSTEIN

Titel:

Quellenseitig in Wärmepumpen-Heizsystem integrierte PVT-Kollektoren – Experimentelle Messungen am Einzelmodul und am Gesamtsystem

Autoren/Mitarbeitende:

Christian Schmidt, Arim Schäfer, Christoph Thoma, Ezekiel Rajkiran Jayachandran, Manuel Lämmle, Konstantin Geimer, Korbinian Kramer

3.1.4.2 THEORETISCHE ENERGIEMENGEN BEI KONENSATION UND EISBILDUNG

Es wurden Berechnung durchgeführt, welche Energiemengen bei Kondensation und Vereisung theoretisch möglich sind:

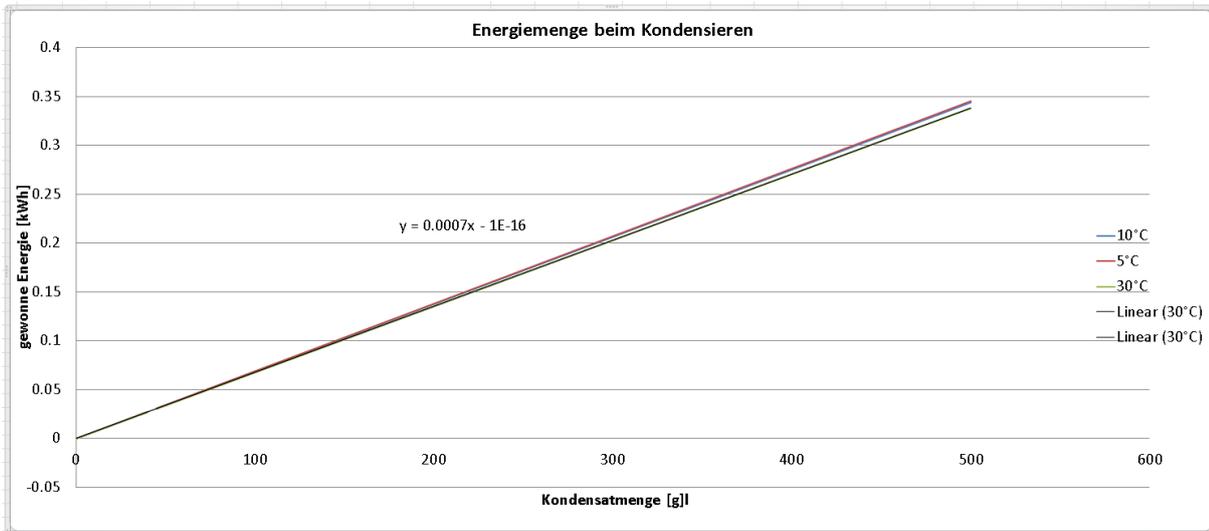


Abbildung 7: Energiemenge beim Kondensieren von Wasser in der Luft Abhängigkeit der Temperatur.

Ergebnis:

Faustformel:
15g/15kg
Kondensat ergeben
~10 Wh / ~10 kWh

Die theoretische Energiemenge bei Kondensation ist (Fausformel):

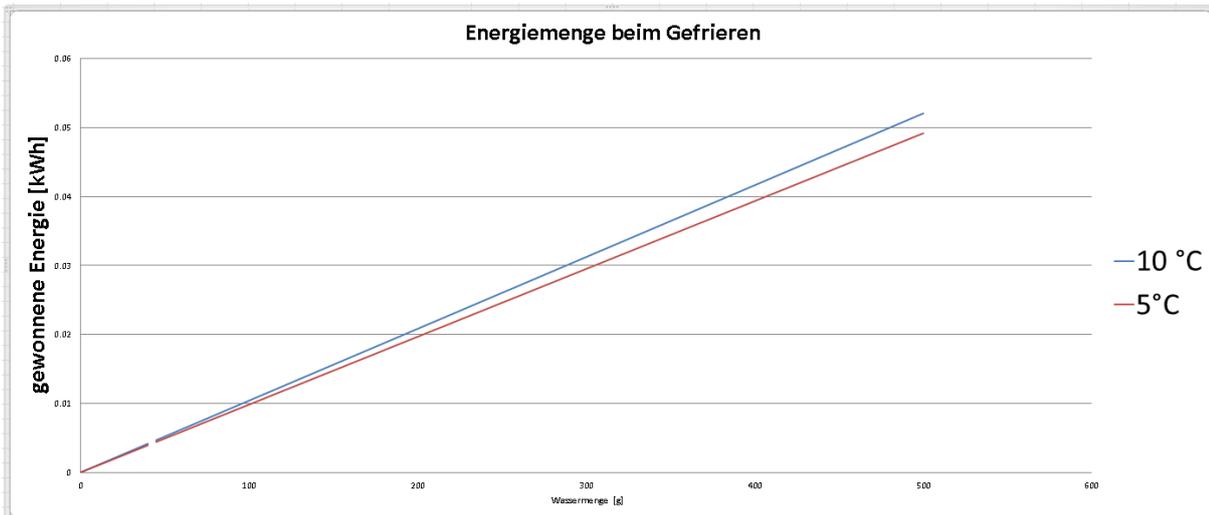


Abbildung 8: Energiemenge beim Gefrieren von Wasser der Luft in Abhängigkeit der Temperatur.

Ergebnis:

Faustformel:
15g / 15kg
Eis ergeben
~1.5 Wh / 1,5 -kWh

Die theoretische Energiemenge bei Vereisung ist (Fausformel):

3.1.4.3 SIMULATION VON HÄUFIGKEITEN VON KONDENSATION UND VEREISUNG

Im Rahmen einer Polysun Simulation wurden die Häufigkeiten des Auftretens von Konensation und Vereisung simuliert. Als Basis der Simulation wurden die Kollektor-Parameterssätze #51 und #53 aus Kapitel [Auswertung der Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand – PVT-Modul - ohne rückseitige Wärmedämmung](#) verwendet

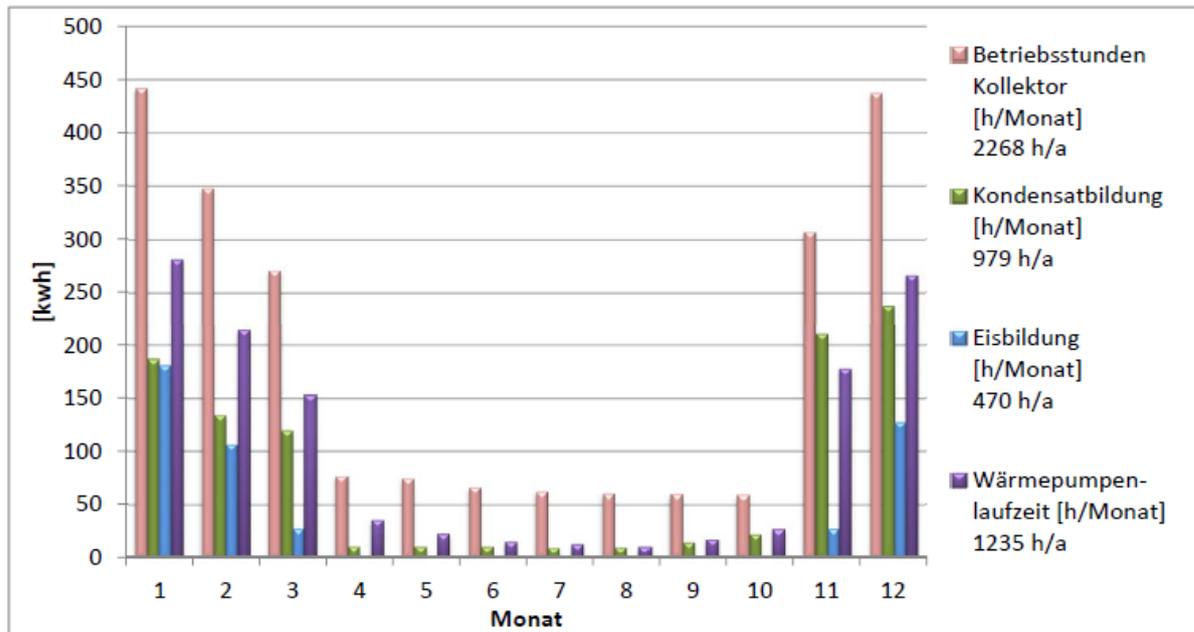


Abbildung 9: Abschätzung der Kondensations- und Vereisungserscheinungen des AP4 Testsystems mit ideal an die Umgebung angebundenen Kollektor als einzige Wärmequelle - gerechnet mit Polysun für den Standort Straßburg.

Die Rahmenbedingungen zur Simulation, sowie das Systemschema sind in *Abbildung 9* dargestellt.

Ergebnis:

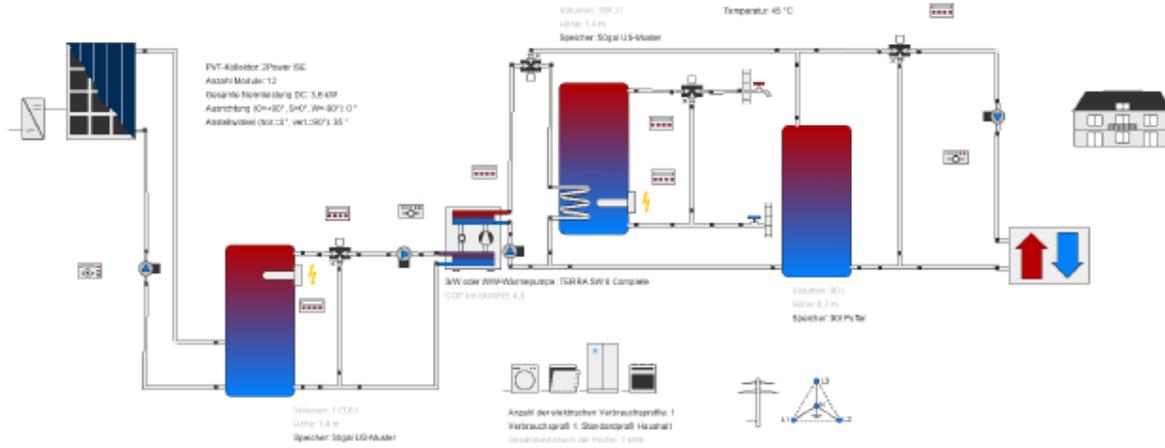
Eine Jahressimulation mit Polysun ergab, dass mit dem simulierten Anlagenschema an 979 h/a Kondensation auftritt, zusätzlich an 470 h/a Vereisung.

Professioneller Report



WPVT-Freeze

2Power - WP+ System TASK44 SFH015



Standort der Anlage

Frankreich
Strasbourg
Längengrad: 7,75°
Breitengrad: 48,58°
Höhe ü.M.: 140 m

Dieser Report wurde erstellt durch:

PA-ID Process GmbH - 2Power
Alban Heißberger
Bruchtannenstraße 9
63801 Kleinostheim
info@pa-id.de

Systemübersicht (Jahreswerte)

Gesamter Brennstoff- und Strom-Verbrauch des Systems [Etof]	-2.057,5 kWh
Gesamter Stromverbrauch [Ecs]	1.643 kWh
Nutzenergie [Quse]	6.268 kWh
Systemjahresarbeitszahl (SJAZ)	3,8
Anlagenaufwandszahl	0,26
Komfortanforderungen	Energiebedarf ist gedeckt

Abbildung 10: Systemkonfiguration zur Potentialabschätzung

3.1.5 M1.2: ABGLEICH MIT MESSUNGEN AN DEN PRÜFSTÄNDEN - MESSUNGEN

M1.2: PVT-Kollektormodell erweitert, **Abgleich mit Messungen an Prüfständen durchgeführt** und Freigabe für Integration in Planungswerkzeug gegeben.

3.1.5.1 ÜBERSICHT MESSUNGEN EINZELMODUL

Folgende Aktivitäten wurden durchgeführt

1. Experimenteller Aufbau in der Klimakammer
2. Durchführung der Messungen in der **Klimakammer**

Die Messungen in der Klimakammer wurden an einem **PVT-Modul mit rückseitiger Wärmedämmung** durchgeführt, welches ebenso in AP4 im Gesamtsystemaufbau eingesetzt wurde

- a. Kollektor-Wärmegewinne/-verluste im Austausch mit der Umgebung
- b. zusätzliche Wärmegewinne durch Kondensation in Abhängigkeit der Kondensatmenge

In der Klimakammer konnten aufgrund technischer Rahmenbedingungen keine Vereisungsmessungen durchgeführt werden. Daher war es notwendig ebenso Messungen unter natürlichen Wetterbedingungen/ Außenteststand durchgeführt werden.

3. Experimentelle Aufbau am Außenprüfstand
4. Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand – **PVT-Modul rückseitig isoliert**

Im Projektverlauf wurde sichtbar, dass ein PVT-Modul mit rückseitiger Wärmedämmung, wie es vom Projektpartner PAID zur Verfügung gestellt wurde, als Wärmequelle für eine Wärmepumpe aufgrund der rückseitigen Wärmedämmung Potential „verschenkt“. Die Rückseite des Moduls kann als zusätzliche Wärmeübertragungsfläche dienen, um Umgebung „Wärme“ zu nutzen.

PAID entwickelte während des Projektes einen **Prototypen ohne rückseitige Wärmedämmung**. Ebenso mit dem Ziel, den fluidführenden Absorber besser an das vorne liegende PV-Modul anzubinden. Ziel war es, ebenso dieses Modul auf dem Außenteststand zu vermessen. Vereisungszustände lassen sich nur bei entsprechend niedrigen Außentemperaturen erreichen.

Es wurde somit entschieden, das PVT-Modul mit rückseitiger Wärmedämmung, auch bei nicht vollständig durchgeführter Prüfmatrix vom Teststand zu nehmen, damit noch Messzeit bleibt, um das PVT-Modul ohne rückseitige Wärmedämmung zu vermessen.

5. Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand – PVT-Modul **ohne rückseitige Wärmedämmung**
- Realisierung der kompletten Prüfmatrix aus Kapitel [Prüfmatrix für Einzelmodul- Messungen am Außenteststand](#)

3.1.5.2 MESSAUFBAU DER EINZELMODULMESSUNGEN IN DER KLIMAKAMMER

Es wurde der Aufbau der Messung in der Klimakammer durchgeführt. Es wurde eine präzise Waage auf den Traversen installiert, an der der Kollektor mit Messtechnik und Sammelvorrichtung mit Behälter hängend daran befestigt ist. Es wurden unter anderem folgende Sensoren installiert, konfiguriert und ggf. kalibriert.

- Tin / Tout für die Leistungsmessung, (kalibriert)
- 2x Glastemperatur der Oberfläche (kalibriert) 2x berührungslose IR-Sensoren Glasoberfläche
- 2x Temperaturen der Rückseite
- 3x Strömungs- & Temperatursensoren (kalibriert) auf der Glasoberseite + 1x Strömungs- & Temperatursensor am Windgenerator
- Taupunkt-Spiegel und relative Feuchte Sensoren (kalibriert)
- Umgebungstemperatur (kalibriert)
- Waage

Alle Sensoren mussten durch die Klimakammer nach außen geführt werden. Vor der Klimakammer selber sind Datenerfassung und eine Hydraulik mit Pumpe und Thermostat platziert.

Mit zwei Kameras wird die Oberfläche des Kollektors kontinuierlich abfotografiert. Mit diesem System können die Stellen detektiert werden, an denen die Kondensation & die Eisbildung einsetzt.

Für die Bewindung des Kollektors wird ein frequenzumrichter gesteuertes Querstromgebläse eingesetzt. Durch die fest einstellbare Drehzahl des Ventilators können reproduzierbar die Windgeschwindigkeiten eingestellt werden.

Die Aufhängung des Kollektors ist über verstellbare Drahtseile realisiert, wodurch der Kollektorneigungswinkel variiert werden kann. Rückseitig ist unterhalb des Kollektors eine gebogene, transparente Polycarbonat-Scheibe für das Auffangen von abtropfenden Wassertropfen installiert. Wassertropfen die sich vom Kollektor lösen werden in einem Eimer aufgefangen. In Eimer befindet sich neben dem kondensierten und abgetropften Wassers eine Schicht mit Öl, welches das Wiederverdampfen des kondensierten Wassers verhindert.

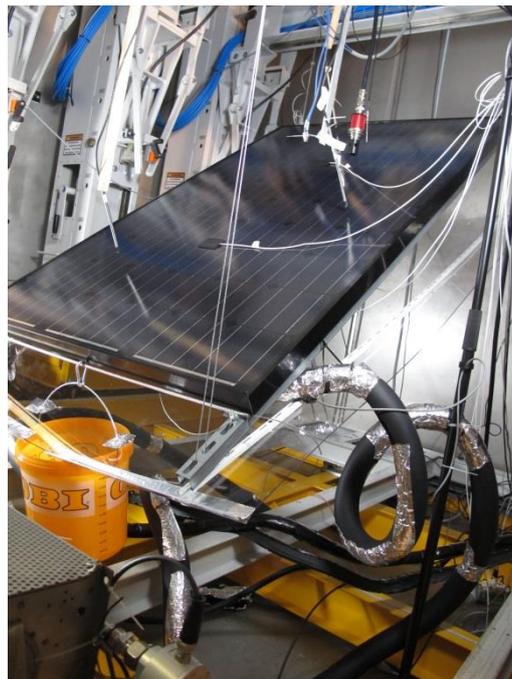


Abbildung 11: Li.: Klimakammer mit Kollektor und Messtechnik. Re.: Kollektor an den Trageseile hängend mit Sensoren und Auffangeinrichtung.

3.1.5.3 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN IN DER KLIMAKAMMER – PVT-MODUL RÜCKSEITIG ISOLIERT

Die Herangehensweise zur Bestimmung der physikalischen Parameter des Kollektors besteht darin, dass die Effekte und Kenngrößen nacheinander ermittelt werden. Bei der ersten Messreihe sollten die Wärmegewinne/-verluste ermittelt werden, die sich immer ergeben, wenn die mittlere Fluidtemperatur nicht auf Umgebungstemperatur ist. Nach Erhalt dieser Parameter werden die zusätzlichen Wärmegewinne durch die Kondensation in Abhängigkeit der aus der Luft entfeuchteten Wassermenge ermittelt. Zum späteren Zeitpunkt wird zusätzlich der Effekt der Vereisung betrachtet.

- Wärmegewinne/-verluste durch direkte Wärmeleitung zum und vom Kollektor zur Umgebung
- Zusätzliche Wärmegewinne durch Kondensation in Abhängigkeit der Kondensatmenge
- Zusätzlichen Wärmegewinne durch die Vereisung auf dem Kollektor (nicht erfolgt, siehe Abschnitt „Probleme bei der Messung“)

a. Ermittlung der linearen Wärmeverluste und Wärmegewinne des Kollektors

Bei der ersten Messreihe wurden die linearen Wärmeverluste des Kollektors ermittelt. Hierzu wird die Umgebungsluft auf 20 °C fixiert. Durch die Variation der Fluidtemperaturen (≥ 20 Wärmeverluste, ≤ 20 °C Wärmegewinne) und in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit über den Kollektor wird die Leistung ermittelt. Die relative Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer wurde dabei so gesetzt, dass es zu keiner Zeit auf dem Kollektor zur Kondensation kommt. Die Windgeschwindigkeiten wurden bei der Messreihe im Bereich von 0 bis 4,5 m/s variiert um auch die Sensitivität vom Wind über den Kollektor zu erfassen. Im folgenden Diagramm sind die ersten ausgewerteten Messpunkte abgebildet.

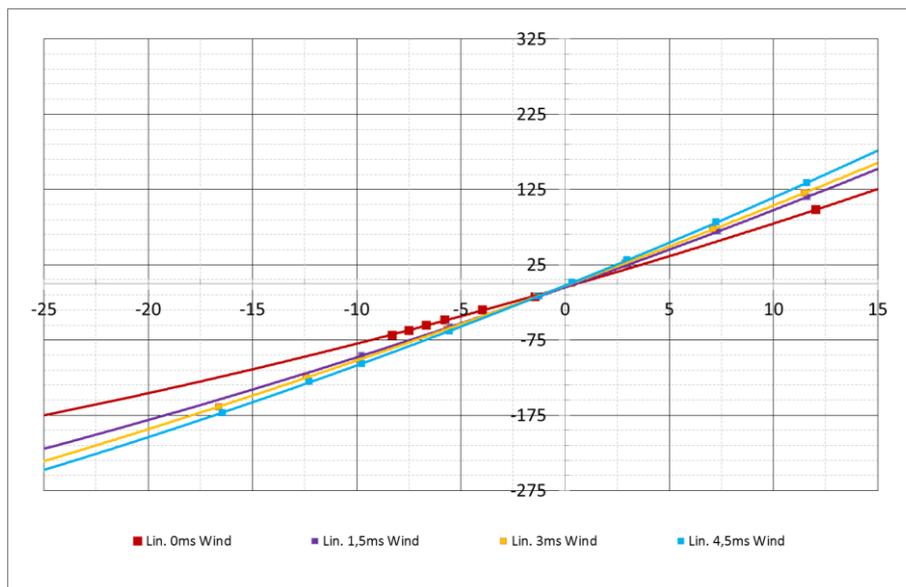


Abbildung 12: Ermittelte lineare Wärmeverluste des Kollektors (Messpunkte!) in Watt eingezeichnet über der mittleren Fluidtemperatur des Kollektors bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (ohne Kondensation).

Im weiteren Schritt wurde die Klimakammer so eingestellt, dass die relative Luftfeuchtigkeit in der Kammer etwa 80 % rF betrug. Unter diesen Bedingungen stellt sich ein Taupunkt von etwa 17,6 °C ein. Durch das weitere Absenken der Fluidtemperaturen im Kollektor wurde erreicht, dass die Glastemperatur sich jetzt unterhalb des Taupunktes befindet.

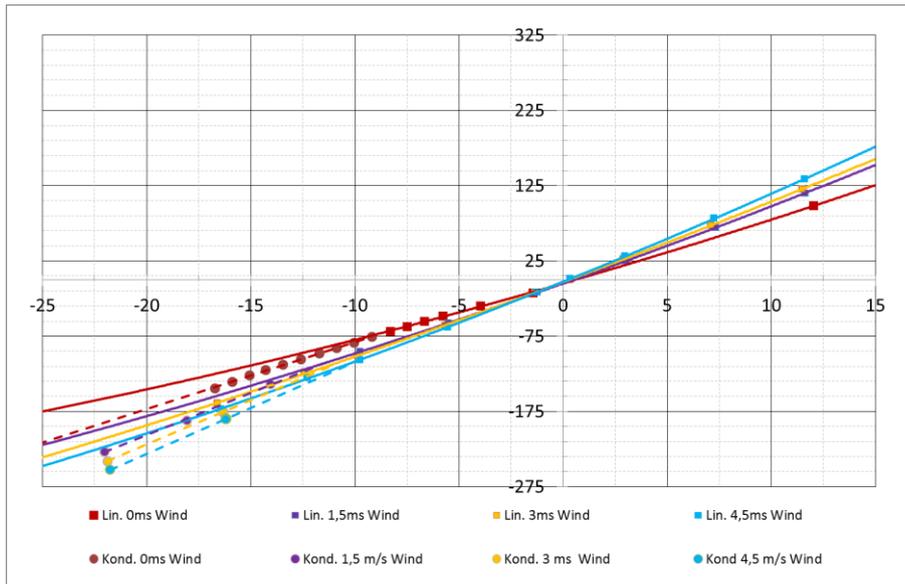


Abbildung 13: Ermittelte lineare Wärmeverluste des Kollektors (Messpunkte!) in Watt eingezeichnet über der mittleren Fluidtemperatur des Kollektors bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten ohne Kondensation (durchgezogene Linie) und mit Kondensation (gestrichelte Linie).

In dem Diagramm sind nun auch die Werte eingezeichnet, bei denen zusätzlich Wärme durch die Kondensationseffekte gewonnen wurde. In dem Diagramm sind das die kreisförmigen Punkte mit gestrichelter Linie. Es sind deutliche Differenzen zu den Linien mit Wärmegewinne durch die Umgebung zu erkennen. Die Differenz entspricht der Kondensationswärme durch die jeweils entnommene Menge Wasser im Betrieb.

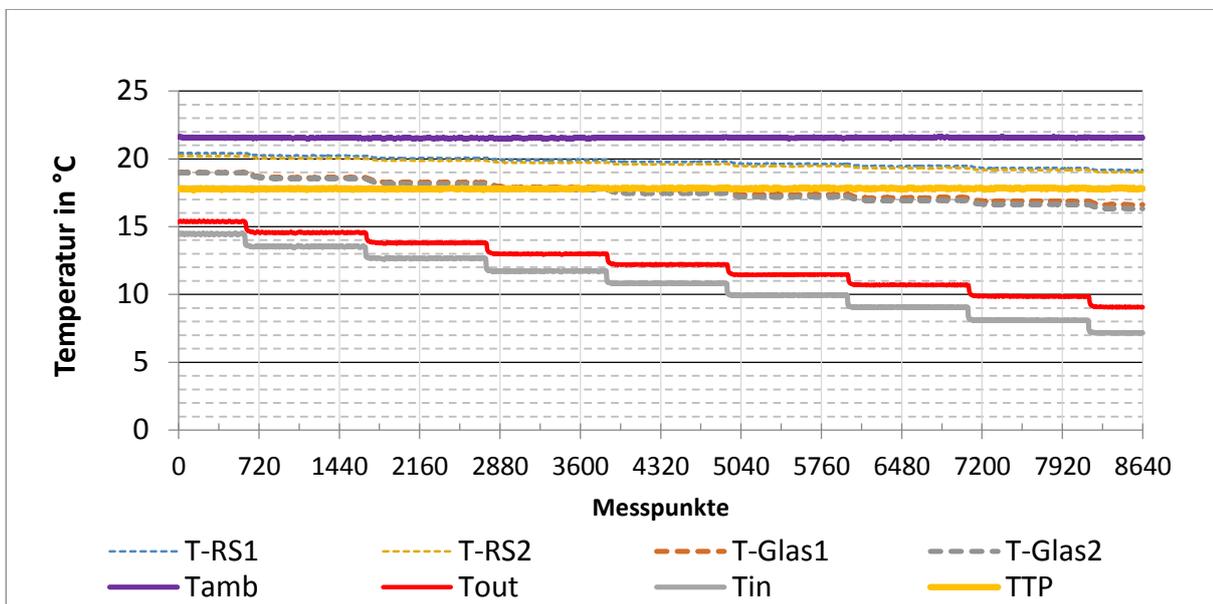


Abbildung 14: Temperaturwerte der ersten Kondensationsversuche (vgl. Abbildung 3) über den Messpunkten (1 Messpunkt = 10 Sec.). Orange dargestellt ist die Taupunkttemperatur T_{TP} , gestrichelt die Oberflächentemperaturen (T_{Glas1} und T_{Glas2}) auf dem Kollektor. Rot und grün dargestellt sind die Fluidtemperaturen im Kollektor. Violett dargestellt ist die Umgebungstemperatur T_{amb} . Die Eintrittstemperatur T_{in} wurde für je 3h auf einem festen Wert eingestellt. Bei Messpunkt 2880 unterschreiten die Glas-Oberflächentemperaturen (gestrichelte Linien) die Taupunkttemperatur und es beginnt Kondensation auf dem Kollektor.

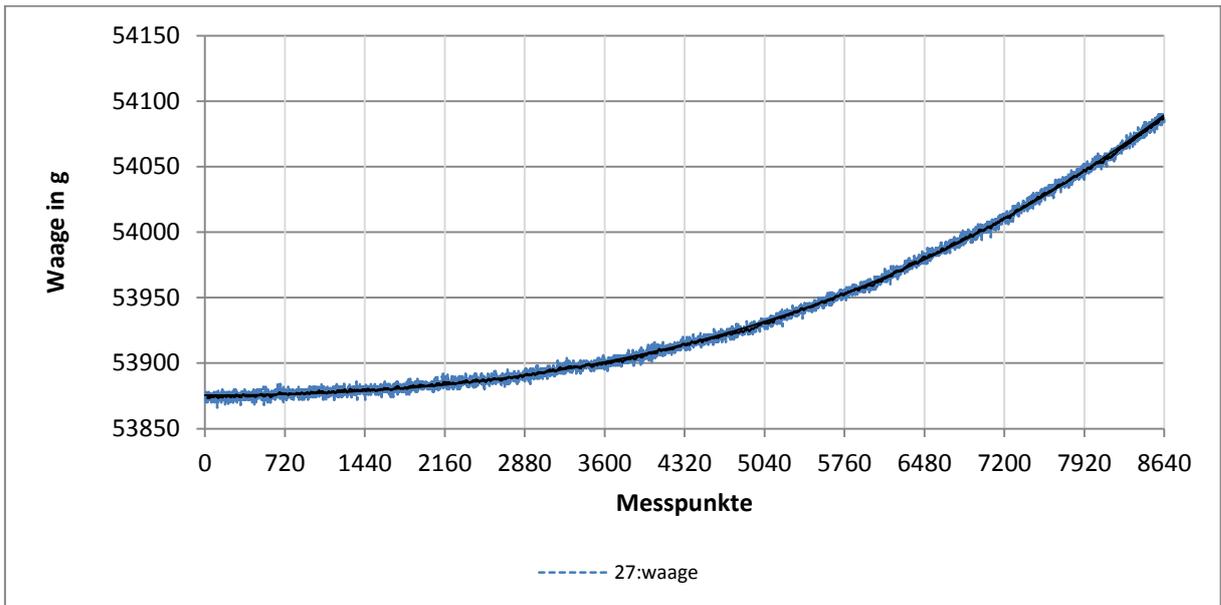


Abbildung 15: Diagramm zeigt das gemessene Absolutgewicht der Waage über die Zeit der Kondensationsmessung.

In dieser Abbildung ist die Gewichtszunahme der Waage dargestellt. Bis zum Messpunkt 2880 ist nur ein geringer Anstieg des Gewichtes auf der Waage zu erkennen. Ab dem Messpunkt 2880 fällt deutlich Wasser aus.

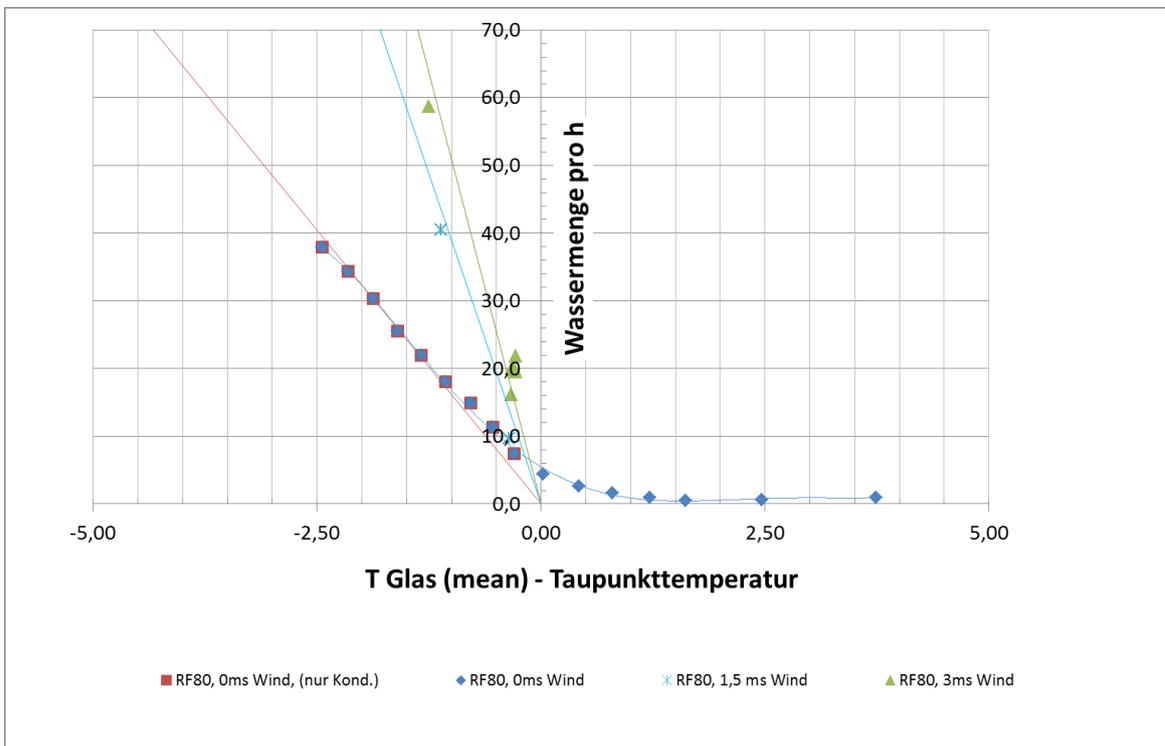


Abbildung 16: Gewonnene Wassermenge [g] in Abhängigkeit von der Differenz aus Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur

Aus der ersten Messreihe lassen sich nun die gewonnene Wassermenge in Abhängigkeit der Glasktemperatur und die hieraus gewonnenen zusätzliche Leistung auf den Kollektor ermitteln. In den ersten Messungsabschlussbericht – WPVT-Freeze

gen wurde gezeigt, dass der gewählte Versuchsaufbau die zu untersuchenden physikalischen Effekte sehr gut ermitteln lassen. Im Weiteren wird die Prüfmatrix mit den Messungen erstellt, die notwendig sind, um den Kollektor gänzlich zu beschreiben und entsprechend werden die Versuche durchgeführt. Anschließend wird der Effekt der Vereisung untersucht.

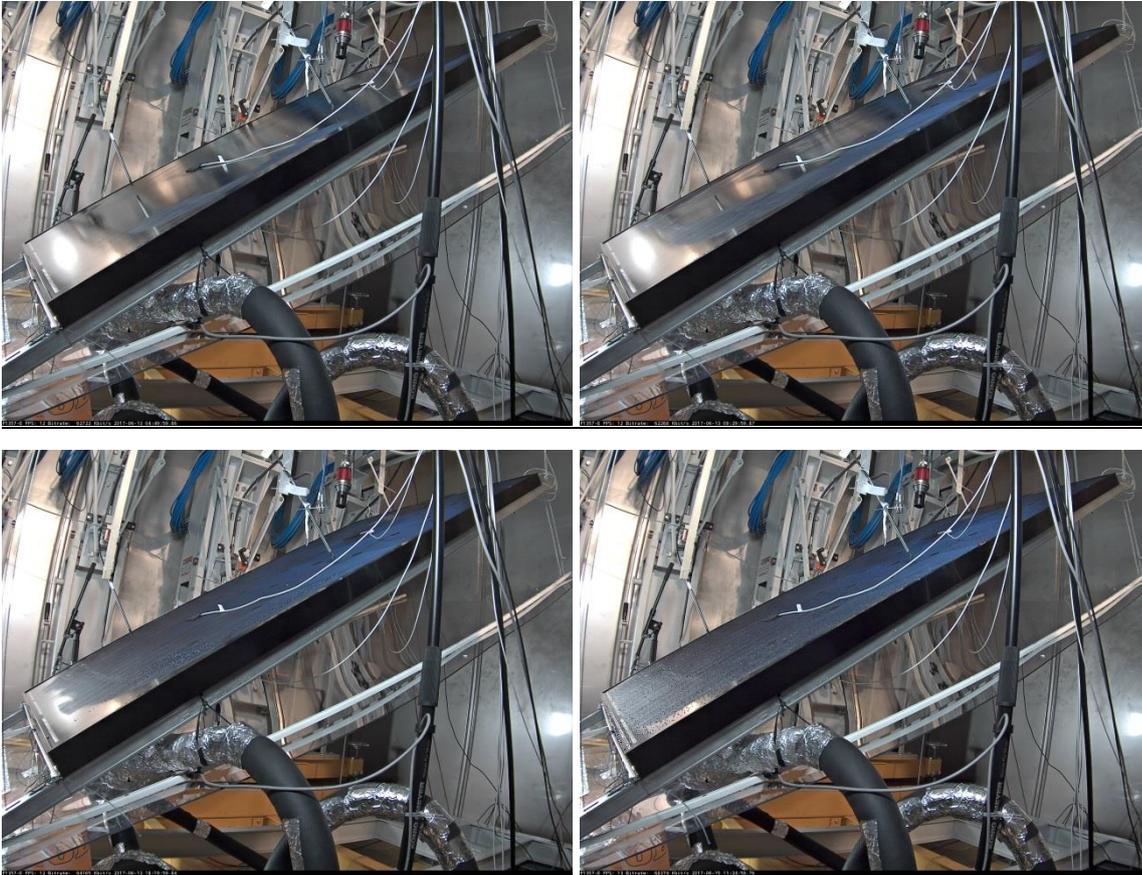


Abbildung 17: Fotostrecke mit unterschiedlichen Abscheidungsraten des Kondensats in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur.

O.Li.: Erste beginnende Kondensation auf dem Kollektor
O.Re.: Erweiterte Zone mit Kondensat
U.Li.: Erstes ablaufendes Kondensat
U.Re.: Kontinuierlich ablaufendes Kondensat

Probleme bei der Messung:

Beim Betreiben der Klimakammer wurde festgestellt, dass die Klimakammer selber eine Sicherheitsschaltung aktiviert, sofern die Lufttemperatur sich unterhalb von 10 °C befindet und die Luft auf etwa 30 % relative Feuchte entfeuchtet. Hintergrund der Schaltung ist, dass die Wärmetauscher, die die Klimakammer temperieren deutlich kälter sind als die Luft selber und somit eine Entfeuchtung der Luft und anschließender Vereisung der Wärmetauscher verhindert. Herstellerseitig wäre der Betrieb der Kammer bei höheren Feuchtwerten sicherheitstechnisch möglich, die Funktion der Kammer jedoch nicht abschaltbar. Erste Versuche, die Kammer händisch mittels Heizplatte und Topf zu befeuchten waren erfolgreich.

Auch bei dem eingesetzten Thermostat zur Temperierung der Hydraulikseite musste festgestellt werden, dass die auf dem Datenblatt des Thermostaten einstellbaren Temperaturen bis -15 °C nicht eingestellt werden konnten. Die Temperatur ließ sich nur bis auf 0 °C am Regler einstellen. Für eine erste Messreihe ließ sich der Thermostat jedoch auf bis -10 °C durch eine Offsetvorgabe auf den IST-Wert Sensors stellen. Die Kondensationsversuche konnten mit dieser Einstellung erfolgreich durchgeführt werden. Für die Eisbildung und Vereisung des Kollektors ist diese Temperatur nicht ausreichend, da die Glasoberseite auf-

grund der nicht optimalen Koppelung zwischen Fluidkanäle und PV-Zellen nicht kaltgenug wurde. Kurzzeitig konnte die Glasterperatur jedoch unterhalb des Eispunktes gebracht werden und erste Eiskristalle auf der Oberfläche wurden sichtbar. Zurzeit ist der Regler beim Hersteller zur Erweiterung des Temperaturregelbereichs eingeschickt.

Der Prüfplan ist angehängt in [Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung in Klimakammer](#)

Ergebnis:

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Kondensatmenge in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur des Moduls vorne waren erfolgreich und wurden im aktuellen Kapitel grafisch dargestellt.

Es wurde gezeigt, dass der gewählte Versuchsaufbau geeignet ist, die zu untersuchenden physikalischen Effekte gut zu beschreiben.

3.1.5.4 MESSAUFBAU DER EINZELMODULMESSUNGEN AM AUßENTESTSTAND

Ziel der Messung waren Messung zum Vereisungsverhalten des Moduls. Diese Messungen konnten aufgrund technischer Randbedingungen nicht in der Klimakammer durchgeführt werden.

Nach Abschluss der Messungen in der Klimakammer wurde der Versuchsaufbau an einen Außenprüfstand umgezogen. Adaptionen waren notwendig:

- Speziell entwickelte Aufständerung für diese Vermessung
 - Bewicklung (Querstromgeläse) **von vorne und von hinten**, separat einstellbar
 - Winkelveränderbare Aufständerung
 - Anpassung der rückseitigen Kondensat-Auffangwanne
 - Hydraulische Integration in den Testand (Hier wurde der Thermostat verwendet, der ebenso in AP4 als 2. Wärmequelle dienen sollte)
 - Umbau der Messtechnik, die bereits in der Klimakammer eingesetzt wurde
 - Pt100-Fluidsensoren
 - Pt100-Umgebungstemperatursensoren
 - Feuchtesensor
 - Erweiterung der Messtechnik
 - Global und Diffusstrahlungsmesstechnik
 - 2D-Anemometer
 - Kamera für Aufnahmen (Bild/20min)
 - LED-Strahler für Aufnahmen in der Nacht
 - MPP-Tracker
- Alle Messungen wurden durchgeführt, mit PV-Modul im MPP-Betrieb

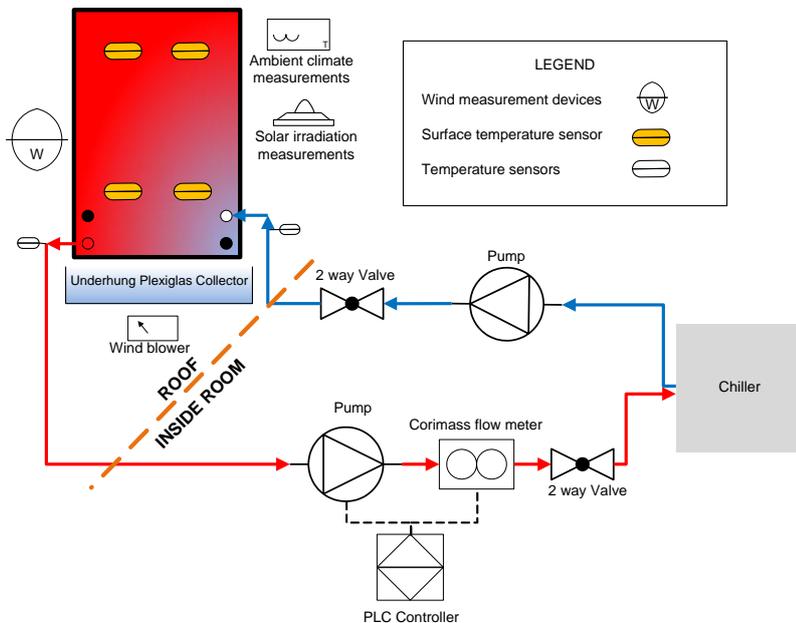


Abbildung 18: Schema – Messaufbau - Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand



Abbildung 19: Hydraulik der Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand.

3.1.5.5 DURCHFÜHRUNG DER EINZELMODUL-MESSUNGEN AM AUßENPRÜFSTAND – PVT-MODUL RÜCKSEITIG ISOLIERT

Der Prüfplan ist angehängt in [Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung PVT-Modul-rückseitig-isoliert – durchgeführte Prüfungen](#)



Abbildung 20: PVT-Modul – rückseitig isoliert während der Messung.

3.1.5.6 DURCHFÜHRUNG DER EINZELMODUL-MESSUNGEN AM AUßENPRÜFSTAND – PVT-MODUL OHNE RÜCKSEITIGE WÄRME-DÄMMUNG



Abbildung 21: PVT-Modul – ohne rückseitige Wärmedämmung während der Messung – Rückseite vereist



Abbildung 22: Messbetrieb – sichtbar sind ebenso Bewindingselemente von vorne, sowie für die Rückseite

Anmerkung:

Die Messungen am unisolierte PVT-Modul konnten nicht im Winterzeitraum 2017-2018 abgeschlossen werden. Diese wurden im Herbst 2018 fortgesetzt. Im Verlauf des Sommers löste sich die Verklebung zwischen fluidführendem Absorber und PV-Modul. Der Absorber wurde provisorisch mechanisch an das PV-Modul gepresst, um wieder einen guten Kontakt herzustellen.

Beeinflussung der Messergebnisse können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

3.1.6 M1.2: ABGLEICH MIT MESSUNGEN AN DEN PRÜFSTÄNDEN UND FREIGABE FÜR INTEGRATION IN PLANUNGSWERKZEUG – AUSWERTUNGEN

Im Winterhalbjahr 2017/2018 wurde eine Masterarbeit betreut, mit dem Ziel eine Auswerteroutine für die erweiterte Modellgleichung zu entwickeln. Dies fand in der Arbeitsumgebung Modelica statt.

Ein Ergebnis war, dass sich Modelica nicht hinreichend eignet, um als „Tool“ für die anstehenden Aufgaben verwendet zu werden.

Die Entscheidung fiel dann für die QDT-Methode nach ISO 9806, mit Verwendung der Multilinearen Regression in der Programmiersprache Python.

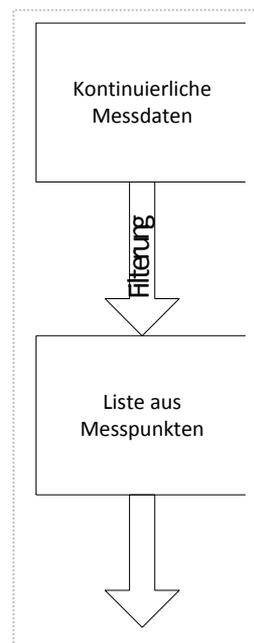
3.1.6.1 BESCHREIBUNG DER AUSWERTEMETHODIK

Ausgangspunkt sind Messdaten im 5 Sekunden Intervall.

Diese werden nach den Kriterien für QDT Messungen nach ISO 9806 gefiltert.

Diese Vorgaben stellen zum einen sicher, dass Messpunkte zur Auswertung verwendet werden, die bei für den Kollektor repräsentativen Prozessbedingungen aufgenommen wurden. Zum anderen sorgen diese Anforderungen dafür, dass die Messdaten in eine Form gebracht werden, die mit dem in der Norm dargestellten Modell ausgewertet werden können. Z.B. werden Daten aus 5 Minuten zu einem Punkt gemittelt, um die Auswertung nach einem ein Knoten Modell zu unterstützen (Kollektor wird als ein Knoten betrachtet, Tin und Tout werden zum gleichen Zeitpunkt bilanziert, obwohl es konstruktiv ja einen Laufzeitversatz zwischen den beiden gibt) etc.

Die Auswertung der Modellgleichung erfolgt mittels multilinearer Regression - eine allgemein gültige mathematische Methode. Eine Voraussetzung dafür ist, dass der Zusammenhang unter den Parametern linear ist.



Der Auswertung der Messdaten liegt die in Kapitel [M1.2: PVT-Kollektormodell erweitert](#) beschriebene Modellgleichung zugrunde.

Nebenstehen ist die zuvor genannte Modellgleichung, angepasst für rotationssymmetrische Kollektoren (darunter auch Flachkollektoren) mit den vereinfachenden b_0 Ansatz. Das ersetzt den biaxialen Ansatz $K_b(\dots)$

1.

Diese Gleichung wird im ersten Schritt genommen um die Parameter zu bestimmen. Die abhängige Größe ist dabei q_{gesamt} (therm + pv) → 1. MLR Rechnung. Dabei werden die Parameter b_0 (direkt Einstrahlungs IAM) und K_d (diffus Abhängigkeit) bestimmt.

2.

b_0 und K_d werden dann in einem Zweiten Schritt genommen um das PV Modell berechnen zu können. An den gezeigten Stellen werden die Parameter eingesetzt um die Gleichung MLR fähig zu machen. Damit werden dann letztendlich die PV Parameter bestimmt. Ebenfalls mittels einer linearen Regression.

$$q_{ges} = \frac{\dot{Q}}{A_k} = \eta_{0,b} \cdot G_b + \eta_{0,b} \cdot b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) G_b + \eta_{0,b} \cdot K_d \cdot G_d$$

$$+ a_1 (T_m - T_{amb}) + a_2 (T_m - T_{amb})^2$$

$$+ a_3 u' (T_m - T_{amb}) + a_4 (E_L - \sigma T_{amb}^4) + a_5 \left(\frac{dT_m}{dt} \right)$$

$$+ a_6 u' G_{hem} + a_7 u' (E_L - \sigma T_{amb}^4) + a_8 (T_m - T_{amb})^4$$

$$\dot{q}_{pV} = -b_{0,pV} \cdot (K_b \cdot G_b + K_d \cdot G_d) + b_{1,pV} \cdot (K_b \cdot G_b + K_d \cdot G_d) \cdot T_m$$

$$+ b_{2,pV} \cdot (K_b \cdot G_b + K_d \cdot G_d) \cdot T_a + b_{3,pV} \cdot (K_b \cdot G_b + K_d \cdot G_d)^2$$

Umgesetzt wurde die Durchführung der Multilinearen Regression in der Programmiersprache Python mithilfe der Bibliothek „statsmodels“. Diese Berechnung kann prinzipiell jede etwas weiterentwickelte Rechenumgebung leisten (angefangen bei Excel).

Die Auswertemethodik wurde im Rahmen des Projektes ZeKon in-situ (Förderkennzeichen: 0325560) entwickelt. Hier war die Notwendigkeit, dass die Auswertung auch vollautomatisiert werden sollte und somit z.B. mehrere hundert Auswertungen automatisch durchgeführt werden.

Es kam die Skritpsprache Python zum Einsatz. Diese Umgebung ist gut skalierbar (z.B. Optimierung für Mehrkernnutzung, maximale Größe zu bearbeitender Dateien, bessere Nutzung von Hardware Ressourcen wie RAM oder Prozessorleistung), weshalb die Bearbeitungszeit wesentlich geringer ist, verglichen mit üblicher Tabellenkalkulations-Software

Diese Auswerteroutine wurde für die Anwendung im Rahmen von WPVT-Freeze angepasst.

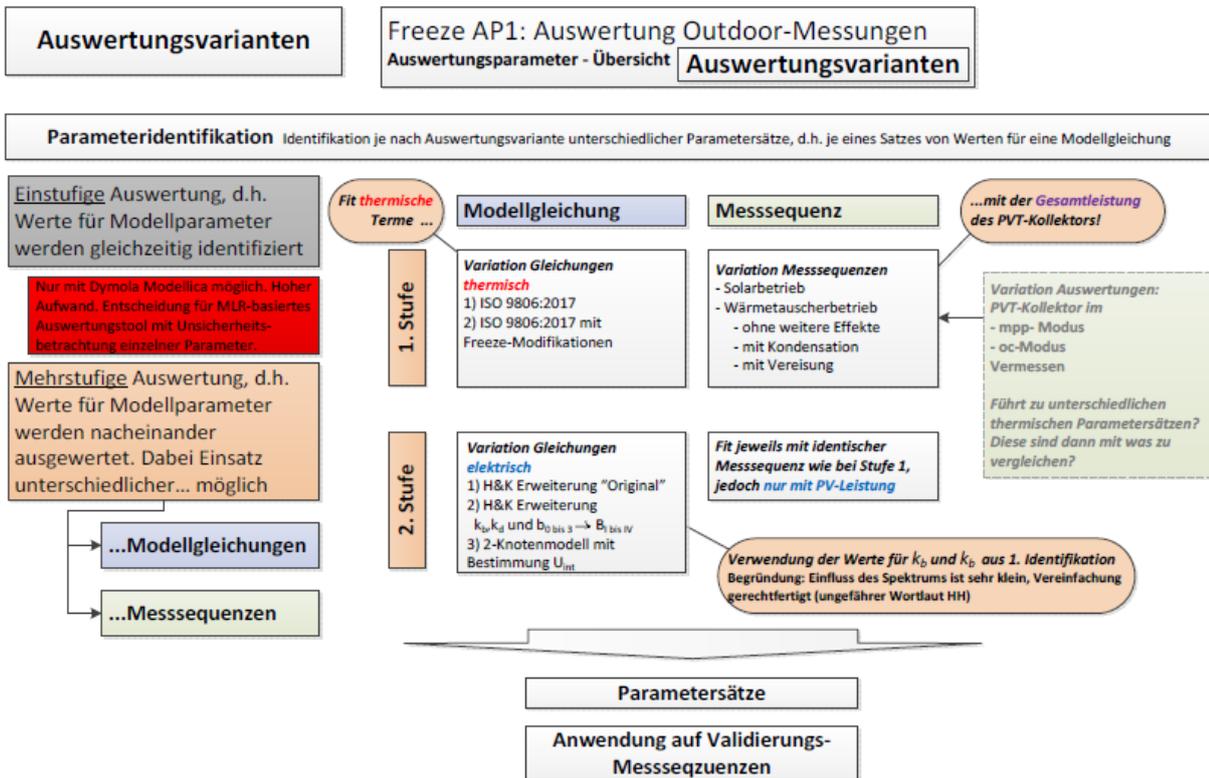


Abbildung 23: Übersicht zu den Auswertungsstufen

Freeze AP1: Auswertung Outdoor-Messungen
 Übersicht Auswertungsparameter **WISC-PVT-Kollektortypen**



Abbildung 24: Vermessene PVT-Module

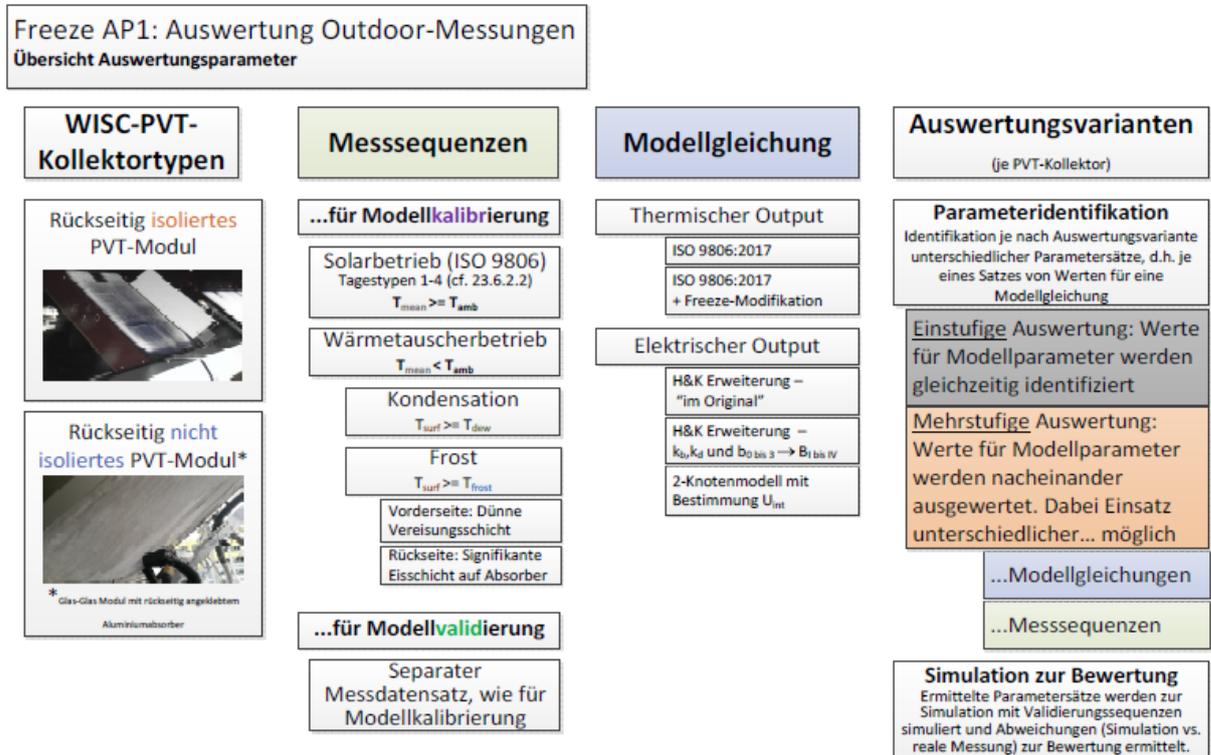


Abbildung 25: Übersicht zum Auswerteverfahren

3.1.6.2 AUSWERTUNG DER EINZELMODUL-MESSUNGEN AM AUßENPRÜFSTAND – PVT-MODUL RÜCKSEITIG ISOLIERT

Das PVT-Modul rückseitig isoliert wurde in der Klimakammer und im Winter 2017/2018 am Außenteststand vermessen. Die Prüfmatrix konnte aus zuvor genanntem Grund nicht vollständig gemessen werden. Siehe dazu auch Kapitel [Durchführung der Messungen in der Klimakammer – PVT-Modul rückseitig isoliert](#) und [Durchführung der Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand – PVT-Modul rückseitig isoliert](#)

Die Auflistung der durchgeführten Messungen ist in Kapitel [Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung in Klimakammer](#) und [Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung PVT-Modul-rückseitig-isoliert – durchgeführte Prüfungen](#) abgelegt.

Die Messungen am PVT-Modul mit rückseitiger Wärmedämmung wurden vorzeitig abgebrochen. Im Projektverlauf wurde ein neues PVT-Modul entwickelt. Mit Berücksichtigung des Projektplans wurde entschieden, der Vermessung des neuen Prototypen PVT-Modul- ohne rückseitige Wärmedämmung, sowie optimierter Absorber, den Vorrang zu geben.

Da die Messungen am rückseitig isolierten PVT-Modul nicht vollständig waren, ergab die Auswertung der Messdaten keinen sinnvollen Parametersatz.

3.1.6.3 AUSWERTUNG DER EINZELMODUL-MESSUNGEN AM AUßENPRÜFSTAND – PVT-MODUL - OHNE RÜCKSEITIGE WÄRMEDÄMMUNG

In diesem Kapitel wird die Auswertung der Messungen am PVT-Modul ohne rückseitige Wärmedämmung beschrieben. Dieses PVT-Modul wurde vom Projektpartner PA-ID im Projektrahmen entwickelt und als Prototyp zur Verfügung gestellt.

Durchführung der Messungen, siehe Kapitel [Durchführung der Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand – PVT-Modul ohne rückseitige Wärmedämmung](#).

Es konnten ausreichend Messdaten ermittelt werden, um eine Auswertung, mit dem Ziel der Parameteridentifikation durchzuführen. Die Messperioden waren März-Mai 2018 und Oktober-November 2018, siehe auch Anhang [Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung PVT-Modul-rückseitig-ohne Wärmedämmung – durchgeführte Prüfungen – Teil1](#) und [Prüfmatrix – AP1 – Einzelmodulvermessung PVT-Modul-rückseitig-ohne Wärmedämmung – durchgeführte Prüfungen – Teil2](#).

Hinweis:

Wie schon in Kapitel [Modellgleichung erweitert](#) zitiert, werden Modellgleichungsansätze aus den Arbeiten nach **M.Bunea** (*Mathematical modelling of unglazed solar collectors under scetrem operating conditions – 2015*) verwendet. Hier wird die Notwendigkeit beschrieben, dass es erforderlich ist mehr als einen Parametersatz für den gesamten Betriebsbereich des Kollektors zu bestimmen, da sich die Parameter nicht gleich „verhalten“.

Es wurde über 50 Parameteridentifikationen durchgeführt, bei denen unterschiedliche Untersuchungen im Focus waren.

3 Parametersätze sollen hier präsentiert werden, die auch zur Weiterverarbeitung für AP5 (Ertragssimulationen) verwendet wurden.

Bezugsfläche= Bruttofläche 1.624 m²

Parameterbez.	#51 sunny	#52 mixed	#53 latent	Einheit	Beschreibung
eta_0_beam	0.348	0.332	0.298	-	direct radiation conversion factor
b0	-0.055	-0.028	0 gesetzt	-	direct radiation IAM coefficient
Ktd	1.059	1.212	1.527	-	diffuse radiation IAM
a6	-0.038	-0.031	-0.021	s/m	wind dependency on eta_0_b
a1	-11.136	-8.372	-7.926	W/(m ² ·K)	convective (and conductive) losses/gains (calm)
a3	-4.485	-1.921	-1.571	J/(m ³ ·K)	wind dependency on a1
a4	0 gesetzt	0 gesetzt	0 gesetzt	-	long wave radiation losses/gains
a5	-24236	-16341	-13777	J/(m ² ·K)	capacity losses/gains
a11		0 gesetzt	0 gesetzt	-	rear long wave radiation losses/gains
a_10		4.403	4.864	J/Kg	latent heat

Abbildung 26: Parametersätze für AP5

Vorgehensweise/Beschreibung der Parametersätze/Interpretation:

Parametersatz #51 (sunny)

- Auswertung der Messdaten nach Kriterien von ISO 9806:2013 für Betriebsbedingungen unter Sonne (keine Kondensation oder Vereisung). Dies waren insgesamt 1030 Messpunkte (5 min Mittelwerte).
- Messungen wurden zu typischen Betriebspunkten im Betrieb mit Wärmepumpe durchgeführt. D.h. Betriebstemperaturen zwischen -10°C und 30°C .
- Parameter \mathbf{a}_4 wurde zu 0 gesetzt (laut Vorgabe in der Norm), da Wert sehr niedrig, bzw. Unsicherheit auf den Parameter größer als der Wert selbst
- Mögliche Ursache ist, dass aufgrund der sehr niedrigen Betriebstemperaturen, der Austausch mit der Himmelsstrahlung unwesentlich wird, da sich die Temperaturen auf ähnlichem Niveau bewegen.
- Parameter \mathbf{a}_{11} (Koeffizient zur Berechnung des Gebäudetemperatur-abhängigen Wärmedurchgangskoeffizienten der Kollektor-Rückseite) wurde in ersten Schritten mit identifiziert. Es ergaben sich unrealistische Zahlenwerte. Mögliche Ursachen:
 - Die Annahme, dass die Oberflächentemperatur = T_{ambient} gesetzt wird ist zu ungenau (Bestätigung siehe Kapitel Vereinfachungen innerhalb der Modellgleichung – Überprüft mit Messdaten)
 - Die Rückseite des Moduls besteht aus Aluminium, mit einem Emissionsgrad, der ca. bei 5% liegt. Somit findet hier quasi kaum Strahlungsaustausch statt
- Parameter \mathbf{a}_{11} wird somit bei allen weiteren Parameteridentifikationen zu 0 gesetzt
- Insgesamt ergibt sich ein Parametersatz mit realistischen Parameterwerten für diesen PVT-Modultyp

Parametersatz #53 (latent)

- Es wurden ausschließlich Messdaten verwendet, bei denen die Kollektor_mittel_Temperatur unter der Taupunkttemperatur lag. Dies waren insgesamt 3979 Messpunkte (5 min Mittelwerte).
- Verglichen mit Parametersatz #51 (sunny variieren die Parameter, wenn Messdaten mit latenten Effekte (Kondensation und Vereisung) ausgewertet werden. Dies scheint plausibel, wenn man sich beispielsweise vorstellt, wie sich die optischen Parameter (z.B. $\mathbf{\eta}_0$ und \mathbf{b}_0) verändern, wenn Kondensat oder Vereisung auf der transparenten Abdeckung (Vorderseite) des Kollektors vorhanden sind.
- Parameter \mathbf{a}_4 und Parameter \mathbf{a}_{11} wurden zu 0 gesetzt, siehe Erläuterung von Parametersatz #51.
- Parameter \mathbf{b}_0 wurde ebenso zu null gesetzt, da dieser unrealistische Werte annahm. Dies ist plausibel, da dies ein Parameter für direkt Einstrahlung ist. Dies ist bei zuvor genannten Betriebsbedingungen nicht erforderlich.
- Großer Focus lag auf der Bestimmung von Parameter \mathbf{a}_{10} (Koeffizient für latente Wärme – Kondensat und Vereisung). **Der Wert ist mit 4,864 J/kg sehr gering**. Spätere Ertragssimulationen zeigen, dass der Ertrag aus latenter Wärme, beschrieben mit diesem Modellansatz deutlich unter dem abgeschätzten Potential liegt. Verglichen mit der Veröffentlichung von M.Bunea (2015) differieren die Erträge um Faktor 500 (wissend, dass es sich hier um einen anderen Kollektor handelt). Zu berücksichtigen ist, dass M.Bunea eine geringe Anzahl an Messdaten hat, die unter Laborbedingungen erzeugt wurden.

Parametersatz #52 (mixed)

- Mit Parametersatz #52 (mixed) soll untersucht werden, in wie fern es doch möglich ist eine Ertragssimulation durchzuführen, bei der ein Gesamt-Parametersatz vorliegt.

- An der Stelle ist bewusst, dass es sich hierbei nur um eine „Näherung“ handeln kann. Wie repräsentativ ein solcher Parametersatz sein kann hängt von dem Umfang der Messdaten ab, sowie die Messdaten dem späteren Einsatz entsprechen
- Es wurden die Summe aller validen Messdaten verwendet. Dies waren insgesamt 4995 (5 min Mittelwerte).
- Parameter a_4 und Parameter a_{11} wurden zu 0 gesetzt, siehe Erläuterung von Parametersatz #51.

Grafiken zu den Auswertungen/Parameteridentifikation befinden sich in [Anhang D: Grafiken zur Auswertung von AP1](#)

Ergebnis:

- 3 Parametersätze wurden zur Weiterverwendung für die Ertragssimulation in AP5 aufbereitet. (sunny, latent, mixed)
- Die Größenordnung des Parameters a_{10} (latent) fällt deutlich geringer aus, als vorherige Potentialabschätzungen zu erwarten ließen.
- Die entwickelte Modellgleichung (basierend auf Modellansätzen von M.Bunea/B.Perers (2015)), hier angewendet, ist noch nicht zufriedenstellend, um die latenten Energiegewinne abzubilden.

3.1.6.4 VEREINFACHUNGEN INNERHALB DER MODELLGLEICHUNG – ÜBERPRÜFT MIT MESSDATEN

In Kaptiel [Modellgleichung erweitert](#) wurde die erweitertet Modellgleichung beschrieben. Es wurden Vereinfachung getroffen, siehe Parameter a_4 und Parameter a_{11} .

Diese Annahme soll hier untersucht werden.

Es liegen real gemessene Daten der Oberflächen vorne und hinten vor!

Folgende Grafik zeigt die Abweichungen zwischen Oberflächentemperatur vorne und hinten gegenüber der mittleren Kollektortemperatur, sowie der Umgebungstemperatur.

Dargestellt werden alle validen 4995 Messpunkte

(siehe Kaptiel [Durchführung der Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand – PVT-Modul ohne rückseitige Wärmedämmung](#))

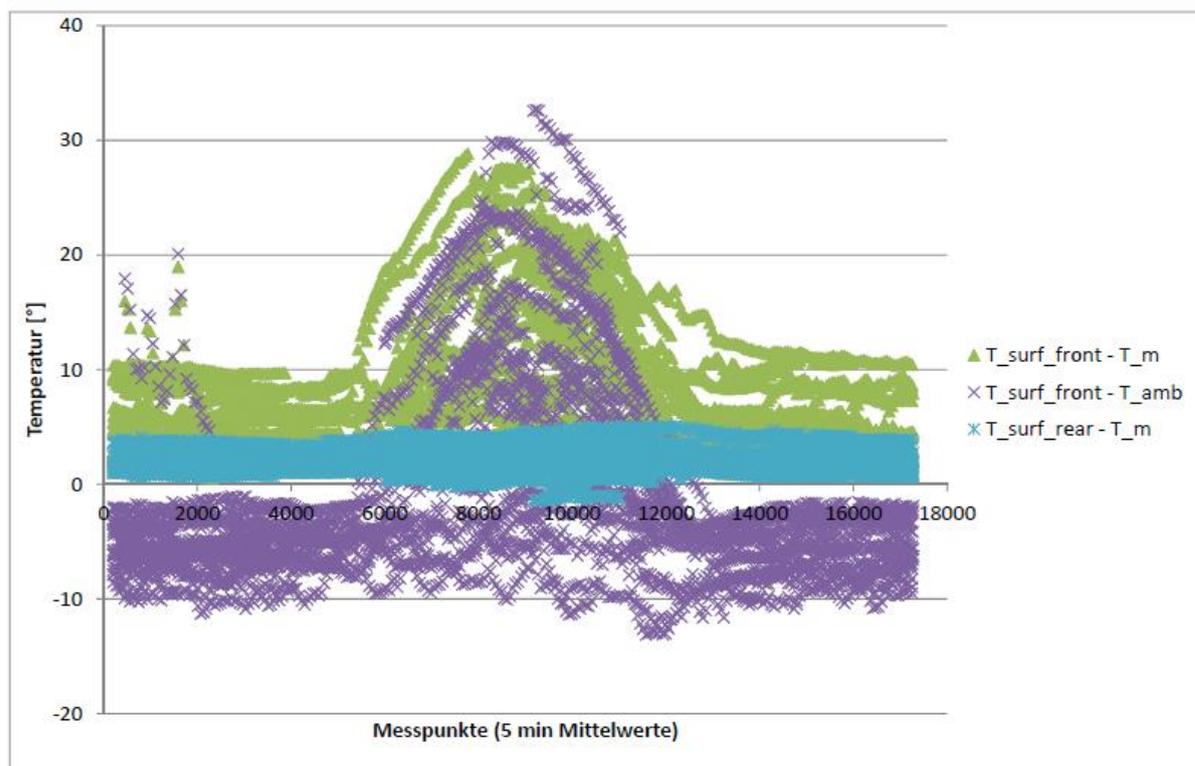


Abbildung 27: Darstellung Abweichungen – Annahmen für Parameter a_4 und a_{11}

Legende zum Diagramm:

FRONTSEITE:

grün -> Vereinfachung $T_{\text{surface}} = T_{\text{mean}}$

lila -> Vereinfachung $T_{\text{surface}} = T_{\text{amb}}$

-->> beide Annahmen zeigen Abweichung bis zu 30K. Damit lässt sich ein Effekt des Wärmestrahlungsaustausches schwerlich beschreiben.

RÜCKSEITE:

blau -> Vereinfachung $T_{\text{surface}} = T_{\text{mean}}$

-->> passt besser, plausibel weil die Rückseite unisoliert ist, sowie kein PV-Modul zwischen fluidführendem Absorber und Oberfläche ist.

Ergebnis:

Parameter-Bestimmung **a₄** laut Iso 9806 (Annahme Oberflächentemperatur entspricht T_{ambient}),
sowie

Parameter-Bestimmung **a₄** laut Ansatz aus WPVT-Freeze (Annahme Oberflächentemperatur entspricht T_{mean}),

Experimentel konnte ein Unterschied zwischen realer gemessener Oberflächentemperatur und den beiden zuvor genannten Ansätzen nachgewiesen werden.

Ergebnis:

Sowohl bei der Verwendung der Umgebunstemperatur (laut ISO9086), als auch bei der Verwendung der mittleren Fluidtemperatur (laut WPVT-Freeze-Ansatz) als Bezugstempertur zur Taupunkttemperatur entsteht ein erheblicher Fehler.

3.1.7 M1.2: FREIGABE FÜR PLANUNGSWERKZEUG

M1.2: PVT-Kollektormodell erweitert, Abgleich mit Messungen an Prüfständen durchgeführt und **Freigabe für Integration in Planungswerkzeug** gegeben.

Die in Kapitel [Auswertung der Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand – PVT-Modul - ohne rückseitige Wärmedämmung](#) gelisteten Parametersätze wurden an den Projektpartner PAID zur Integration in das Planungswerkzeug weiter gegeben.

Die Simulationen/Berechnungen im Rahmen von AP5 werden damit durchgeführt.

3.1.8 M1.3: REVIEW JOURNAL PAPER ZUR VERÖFFENTLICHUNG EINGEREICHT

M1.3: Review Journal Paper zur Veröffentlichung eingereicht

Die Veröffentlichungen sind gelistet in Kapitel [Erfolgte und geplante Veröffentlichungen](#).

Während der Projektlaufzeit entstand folgendes Reviewed Journal Paper:

Lämmle, Manuel; Oliva, Axel; Hermann, Michael; Kramer, Korbinian (2017):

PVT collector technologies in solar thermal systems: a systematic assessment of electrical and thermal yields with the novel characteristic temperature approach.

Solar Energy (155), pp. 867–879. DOI: 10.1016/j.solener.2017.07.015. 11 citations.

3.2 AP4: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AM GESAMTSYSTEMAUFBAU (AP-LEITUNG: ISE)

AP Nr.	Meilenstein Nummerierung und Beschreibung	
4	M4.1	Messtechnik für Systemprüfstand ausgewählt und beschafft; Erweiterungsmaßnahmen am Systemprüfstand abgeschlossen, Prüfmatrix in Übersichtsplan festgelegt.
	M4.2	Aufbereitete Messdaten für Abgleich mit Polysun-Systemsimulation bereitgestellt.
	M4.3	Durchführung aller Messungen und Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die zu Projektbeginn formulierten Fragestellungen abgeschlossen.

3.2.1 M4.1: MESSTECHNIK FÜR SYSTEMPRÜFSTAND AUSGEWÄHLT UND BESCHAFFT; ERWEITERUNGSMAßNAHMEN AM SYSTEMPRÜFSTAND ABGESCHLOSSEN, PRÜFMATRIX IN ÜBERSICHTSPLAN FESTGELEGT

3.2.1.1 MESSTECHNIK FÜR SYSTEMPRÜFSTAND AUSWÄHLEN UND BESCHAFFEN

Voraussetzung für die Auswahl und Beschaffung der Messtechnik war die Entwicklung des Anlagenschemas, daraus die parallel zu den Projektfragestellungen, die erforderlichen Messgrößen der hydraulischen Kreise und aller anderen Sensorik. Im Anschluss folgt dann ein Messstellenplan.

Diese Arbeiten sind wesentlich von dem Gesamtsystem abhängig. Die Konzeption, Beschaffung, Lieferung wurde nicht als wesentlicher Zeitaspekt in der Projektplanung berücksichtigt. Dies gestaltete sich jedoch als deutlich zu berücksichtigen, siehe auch Kapitel [Beschaffung und Lieferung des Testsystems](#)

Das in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner PA-ID entwickelte Anlagenschema einschließlich Messstellen *Abbildung 28* ist wie folgt abgebildet.

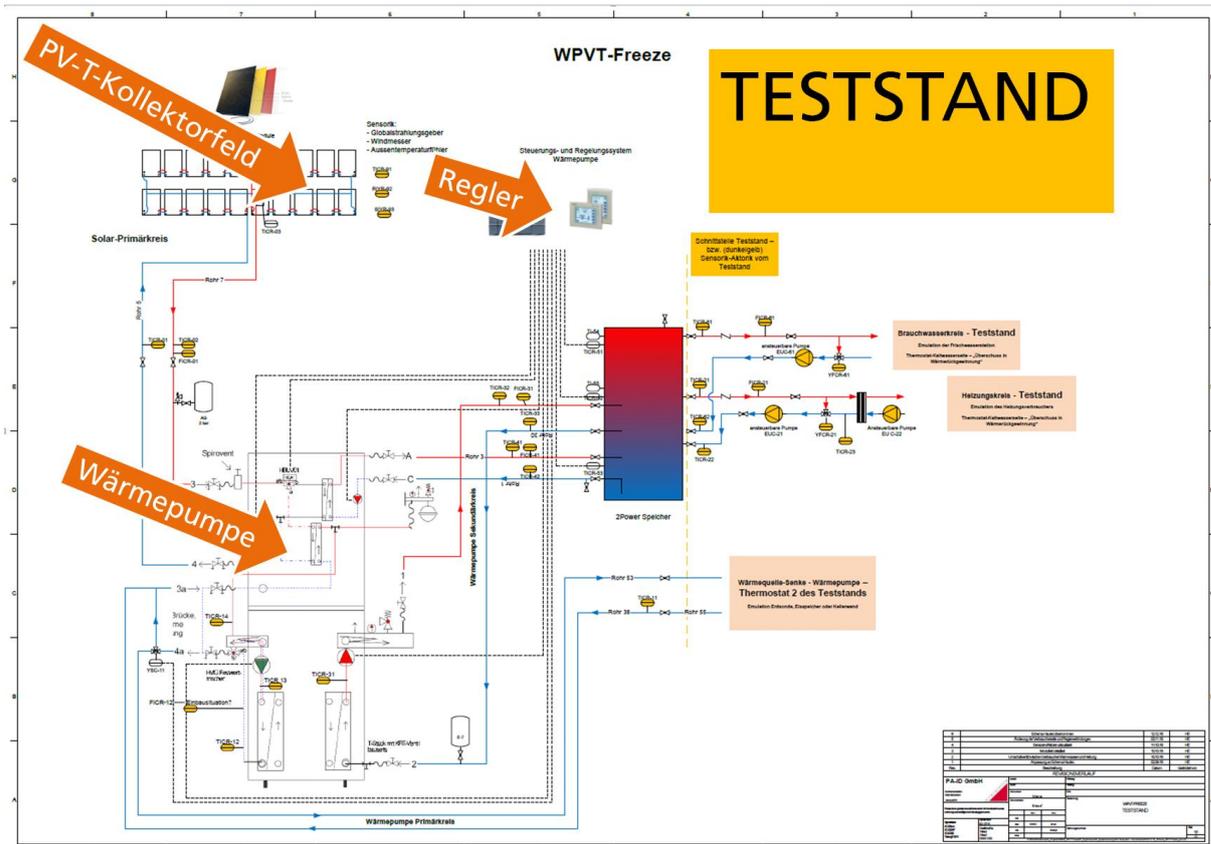


Abbildung 28: Anlagenschema des Testsystems (in erster Version) einschließlich neu entwickelter Schnittstelle mit dem Systemteststand des TestLab Solar Thermal Systems. Gelb eingefärbte Sensoren gehören zum Messkonzept.

Im Wesentlichen umfasst das Messkonzept folgende Messgrößen:

Tabelle 8: Messgrößen zur Systemvermessung

Messgrößen	Beschreibung
Temperatur	Fluidkreissensoren, Anlagefühler am Kollektorfeld, Umgebungstemperatursensor
Volumenstrom	Magnetisch-induktive Durchflussmesser
Einstrahlung	Pyranometer
Umgebungsfeuchte	Polymerfühler
Kondensat, Eis	Kamera zur qualitativen Erfassung einschließlich LED-Strahler für Nachtaufnahmen, Entwicklung einer Routine zur Integration von Messdaten in die Fotoaufnahmen
Strom	Leistungsmesser

Zur Umsetzung des Messkonzepts sind insbesondere folgende Arbeitsschritte notwendig.

- Auslegung: Anforderungen der Messstelle identifizieren und festlegen
- Recherche nach am Markt verfügbaren Lösungen (vgl. Abbildung 29).
- Beschaffung der Sensoren
- Installation am Prüfstand: Praktische Umsetzung des Messkonzepts (Abbildung 28), d.h. Identifikation der tatsächlichen Messstellen und Anschlüsse zum Testsystem sowie zum Teststand
- Kalibrierung aller Sensoren
- Einbindung in Messwerterfassung

Insbesondere die ersten drei Arbeitsschritte Auslegung, Recherche und Beschaffung konnten mit Ausnahme des Leistungsmessers (Strom) in der zweiten Jahreshälfte 2016 umgesetzt werden. Teils konnten bereits erste Sensoren kalibriert werden. Die weiteren Schritte werden zu Beginn der ersten Jahreshälfte mit Lieferung des Testsystems umgesetzt werden.



Abbildung 29: Dargestellt ist eine Messstelle mit besonderen Anforderungen am Fluidkreislauf-Anschluss eines PVT-Moduls, das Teil des PVT-Kollektorfelds des Testsystems bildet (links). Rechts ist ein speziell auf die Anforderungen zugeschnittener Anlegefühler.

An dem Mess- und Steuerkonzept wurde kontinuierlich weiter gearbeitet. Mit folgender Version wurde die Messtechnik am Gesamtsystem in Betrieb genommen, siehe Abbildung 30. Abbildung 31 zeigt die zugehörige Sensor-/Aktorliste.

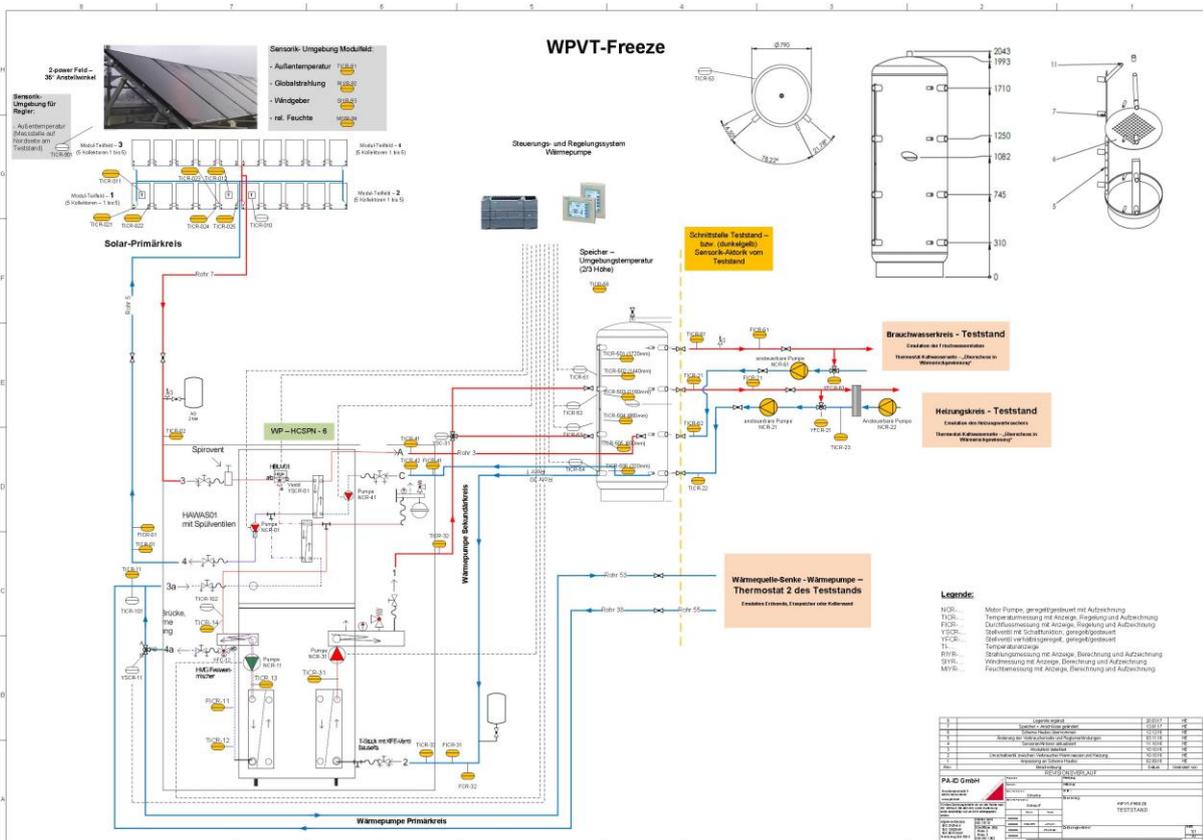


Abbildung 30: Anlagenschema des Testsystems (zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme) einschließlich neu entwickelter Schnittstelle mit dem Systemteststand des TestLab Solar Thermal Systems. Gelb eingefärbte Sensoren gehören zum Messkonzept.

Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit - Teilprojekt A (ISE): Untersuchung von Kondensations- und Vereisungseffekten sowie Modellentwicklung

SARG-LISTE (SENSOR-AKTOR-REGELGERÄTE)																	
PROJEKTBEZEICHNUNG	SENSOR- AKTOR	WPVT-Freeze	BÜHNGRUPPE / BAUTEILTYP	FUNKTION	In	Out	Wo wird der Messwert erfasst (wofür notwendig)	Ausgabe an aus RCT/000 für Mess-	Kommentar	Erweitere Steuerkanal?	Welche Messstelle/ Steuerkanal?	Biz. Im Mess-Daten-File	Biz. Im Datenlogger	Sollwert			
Solar-Prim	A Pumpe	NCR-01	Umwälzpumpe: Solarkreis	Drehzahl 0-10V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja					(01:50) Kollektorpumpe	0 - 100%			
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-01	Temperaturfühler Rücklauf Solarkreis	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja				T_sol_p_in_st3					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-02	Temperaturfühler Vorlauf Solarkreis	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Umbenennung, bisher T_dw_in_st3			T_sol_p_out_st3					
Solar-Prim	S.Vol.	FICR-01	Durchflussmesser: Solarkreis	FICR 0-24 mA	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	4-20 mA Signal	122		V_sol_prim					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-010	Temperaturfühler: Modultemperatur	TICR PT1000			Regler (Interne Steuerung)	ja					(00:14) Kollektortemperatur	-20°C - +80°C			
Solar-Prim	A Ventill	YSCR-01	Umschaltventil (Brauchwasser/Solarhebung)	YSC Auf/Zu	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja					(01:52) Umschaltventil	0 - 1			
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-011	OBERFLÄCHEN-Temp.: Modultemperatur	Spezial-Anlegefühler	1	1	API - Modultab und Validierung	-	an Modul 1_1 (Chip-Fühler-Teflon verschweißt - auf Glasoberfläche)			T_Abd_1					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-012	OBERFLÄCHEN-Temp.: Modultemperatur	Spezial-Anlegefühler	1	1	API - Modultab und Validierung	-	an Modul 1_1 (Chip-Fühler-Teflon verschweißt - auf Glasoberfläche)			T_Abd_2					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-013	OBERFLÄCHEN-Temp.: Modultemperatur	Spezial-Anlegefühler	2	1	API - Modultab und Validierung	-	an Modul 1_5 (Chip-Fühler-Teflon verschweißt - auf Glasoberfläche)			T_Abd_3					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-014	OBERFLÄCHEN-Temp.: Modultemperatur	Spezial-Anlegefühler	3	1	API - Modultab und Validierung	-	an Modul 1_5 (Chip-Fühler-Teflon verschweißt - auf Glasoberfläche)			T_Abd_4					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-021	Temperaturfühler: Spezial-ROHR-Anlegefühler	Spezial-Anlegefühler	1	1	API - Modultab und Validierung	-	T_in - Teilfeld 1 - Modul 1			T_col_in_1_1					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-022	Temperaturfühler: Spezial-ROHR-Anlegefühler	Spezial-Anlegefühler	1	1	API - Modultab und Validierung	-	T_out - Teilfeld 1 - Modul 1			T_col_out_1_1					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-023	Temperaturfühler: Spezial-ROHR-Anlegefühler	Spezial-Anlegefühler	1	1	API - Modultab und Validierung	-	T_out - Teilfeld 1 - Modul 4			T_col_out_1_4					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-024	Temperaturfühler: Spezial-ROHR-Anlegefühler	Spezial-Anlegefühler	1	1	API - Modultab und Validierung	-	T_in - Teilfeld 1 - Modul 5			T_col_in_1_5					
Solar-Prim	S.Temp.	TICR-025	Temperaturfühler: Spezial-ROHR-Anlegefühler	Spezial-Anlegefühler	1	1	API - Modultab und Validierung	-	T_out - Teilfeld 1 - Modul 5			T_col_out_1_5					
WP-Prim	A Pumpe	NCR-11	Umwälzpumpe: Primärkreis WP	Drehzahl 0-10V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja									
WP-Prim	S.Temp.	TICR-101	Temperaturfühler Rücklauf Primärkreis WP	NTC	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Pos. Direkt an T-Stück, Anschluss an 3s-Anlegefühler, gleich Pos. Wie TICR-11				(3) - (0) SOLAR / (00:16) Puffertemperatur unten / 2	-20°C - +35°C			
WP-Prim	S.Temp.	TICR-102	Temperaturfühler Vorlauf Primärkreis WP (nach WT)	NTC	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Betrieb mit nur einer Quelle: TU-2 im Regler - Info für Solarregler (Temp des 2. Spießers unten)								
WP-Prim	S.Temp.	TICR-11	Temperaturfühler Rücklauf Primärkreis WP	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Position wie TICR-14 - Information für Solarregler, wieviel "Energie" nach WT noch für WP vorhanden			T_wp_prim_in1					
WP-Prim	S.Temp.	TICR-12	Temperaturfühler Vorlauf Primärkreis WP	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja				T_wp_prim_out		-20°C - +35°C			
WP-Prim	S.Temp.	TICR-13	Temperaturfühler: Rücklauf Primärkreis WP (nach Notfall-Elektrozestab)	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja				T_wp_prim_in3		-20°C - +35°C			
WP-Prim	S.Temp.	TICR-14	Temperaturfühler: Rücklauf Primärkreis WP (vor Notfall-Elektrozestab)	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	zusätzlicher Sensor nach Tel mit Alban 161215 - nach Notfall-Elektrozestab			T_wp_prim_in2					
WP-Prim	S.Vol.	FICR-11	Durchflussmesser: Primärkreis WP	FICR 0-24 mA	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	4-20 mA Signal	221		V_WP_prim					
WP-Prim	A Ventill	YSCR-11	Umschaltventil: Wärmequelle/Senke od. Solar	YSC Auf/Zu	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	WP -								
WP-Prim	A Ventill	YFRC-12	Endschalter - Signal von YSC-11	Signal 0/1	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Berücksichtigung als Spannungsmesskanal		??						
WP-Prim	A Ventill	YFRC-12	Verhältnis-Misch-Ventil: Temperaturbegrenzung WP	Mischer	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	WP - Temperaturbegrenzung am Eingang - max. 30°C laut Tabelle Manual bei Verwendung von R410a								
Heizkreis	A Pumpe	NCR-21	Umwälzpumpe: Heizkreis 1	Drehzahl 0-10V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	st3-Pumpe (Teststandpumpe - durch FU angesteuert)								
Heizkreis	A Pumpe	NCR-22	Umwälzpumpe: Heizkreis 1 - Thermostatseite	Drehzahl 0-10V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	kann Standard Heizpumpe sein								
Heizkreis	S.Temp.	TICR-21	Temperaturfühler Vorlauf Heizkreis 1	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	6mm/2mm Sensor			T_heat_out_st3	HAU / (5) HEIZKREIS 2 /	10,1°C Fest-Widerstand			
Heizkreis	S.Temp.	TICR-22	Temperaturfühler Rücklauf Heizkreis 1	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	6mm/2mm Sensor			T_heat_in_st3					
Heizkreis	S.Temp.	TICR-23	Temperaturfühler: Rücklauf WT	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Temp. Zur Regelung von YFCR-21, Temp nach WT			T_heat_crlf_st3					
Heizkreis	S.Vol.	FICR-21	Durchflussmesser: Heizkreis 1	FICR 0-24 mA	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	4-20 mA Signal	321		V_dot_st3					
Heizkreis	A Ventill	YFCR-21	Mischventil Heizkreis 1	YFCR 230V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Zapfung aus Speicher, Mischung mit Kaltwasser auf Zieltemp/Energiemenge zum Rücklauf in Speicher								
WP-Sek	A Pumpe	NCR-31	Umwälzpumpe: Sekundärseite WP	Drehzahl 0-10V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja									
WP-Sek	S.Temp.	TICR-31	Temperaturfühler Vorlauf Sekundärseite WP (vor Notfall-Elektrozestab)	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	zusätzlicher Sensor vor Tel mit Alban 161215 - nach Notfall-Elektrozestab			T_aux_in1_st3	HAU / (1) WAERMEPUMPE / (00:07)	30°C - 50°C			
WP-Sek	S.Temp.	TICR-32	Temperaturfühler Vorlauf Sekundärseite WP	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	bisher aux_el			T_aux_in2_st3					
WP-Sek	S.Temp.	TICR-33	Temperaturfühler: Rücklauf Sekundärseite WP	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	6 mm Lanze - 222-ST-2.24			T_aux_out_st3	HAU / (1) WAERMEPUMPE /	20°C - 40°C			
WP-Sek	S.Vol.	FICR-31	Durchflussmesser: Sekundärseite WP	FICR Impuls	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	4-20 mA Signal	222		V_WP_sek					
WP-Sek	S.Wärme-menge	FCR-32	Wärmemengenzähler - Sika: Sekundärseite WP	YFCR Impuls	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	im Lieferumfang, installiert zum Abgleich mit ISE-Messtechnik								
WP-Sek	A Ventill	YFC-31	Umschaltventil WP - Vorlauf Brauchw./Heizung - Einspeisung	YFCR 230V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Umschaltung, Einspeisung in unterschiedlichen Höhen in den Speicher - Vorlauf								
WP-Sek	A Ventill	YFC-32	Umschaltventil WP - Rücklauf Brauchw./Heizung - Einspeisung	YFCR 230V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Umschaltung, Einspeisung in unterschiedlichen Höhen in den Speicher - Rücklauf								
WP-Sek	A Ventill	YFC-32	Umschaltventil WP - Rücklauf Brauchw./Heizung - Einspeisung	YFCR 230V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	noch installieren								
Solar-Sek	A Pumpe	NCR-41	Umwälzpumpe: Sekundärseite Solarkreis	Drehzahl 0-10V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja									
Solar-Sek	S.Temp.	TICR-41	Temperaturfühler Vorlauf Sekundärseite Solar	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	6mm/2mm Sensor			T_sol_in_st3					
Solar-Sek	S.Temp.	TICR-42	Temperaturfühler Rücklauf Sekundärseite Solar	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	6mm/2mm Sensor			T_sol_out_st3					
Solar-Sek	S.Vol.	FICR-41	Durchflussmesser: Sekundärseite Solar	FICR 0-24 mA	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	4-20 mA Signal	322		V_sol_sek					
Speicher	S.Temp.	TICR-51	Temperaturfühler: Warmwasser Speicher Oben	NTC	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	an Speicher außen auf Höhe 1440 mm (wie TICR-502)				HAU / (7) WARMWASSERKR	40°C - 65°C			
Speicher	S.Temp.	TICR-52	Temperaturfühler: Speicher Oben/Mitte	NTC	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	an Speicher außen auf Höhe 1160 mm (wie TICR-503) - Einschaltbed. Für WP - Nachheizung- für Heizungskreis								
Speicher	S.Temp.	TICR-53	Temperaturfühler: Speicher Mitte/Unten	NTC	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	an Speicher außen auf Höhe 880 mm (90° zum Anschluss verdreht installiert) (wie TICR-504) - Ausschaltbed. Für WP - Nachheizung- für Heizungskreis								
Speicher	S.Temp.	TICR-54	Temperaturfühler: Speicher Unten	NTC	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	an Speicher außen auf Höhe 320 mm (wie TICR-506) - an Solarregler				(00:16) Puffertemperatur	20°C - 65°C			
Speicher	S.Temp.	TI-54	Thermometer: Speicher Oben	TI			Regler (Interne Steuerung)	-	Analoge Temperaturanzeige								
Speicher	S.Temp.	TI-55	Thermometer: Speicher Mitte	TI			Regler (Interne Steuerung)	-	Analoge Temperaturanzeige								
Speicher	S.Temp.	TICR-56	Temperaturfühler: Umgebung Speicher	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-				T_sa_st3					
Speicher	S.Temp.	TICR-501	Temperaturfühler: Speicher Oben	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-	Anlegefühler an Klemmschine - Speicherhöhe 1720 mm			T_storage_1					
Speicher	S.Temp.	TICR-502	Temperaturfühler: Speicher Oben	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-	Anlegefühler an Klemmschine - Speicherhöhe 1440 mm			T_storage_2					
Speicher	S.Temp.	TICR-503	Temperaturfühler: Speicher Mitte	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-	Anlegefühler an Klemmschine - Speicherhöhe 1160 mm			T_storage_3					
Speicher	S.Temp.	TICR-504	Temperaturfühler: Speicher Mitte	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-	Anlegefühler an Klemmschine - Speicherhöhe 880 mm			T_storage_4					
Speicher	S.Temp.	TICR-505	Temperaturfühler: Speicher Unten	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-	Anlegefühler an Klemmschine - Speicherhöhe 600 mm			T_storage_5					
Speicher	S.Temp.	TICR-506	Temperaturfühler: Speicher Unt Unten	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-	Anlegefühler an Klemmschine - Speicherhöhe 320 mm			T_storage_6					
Tankw.-Kreis	A Pumpe	NCR-61	Umwälzpumpe: Brauchwasserkreis	Drehzahl 0-10V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	st3-Pumpe (Teststandpumpe - durch FU angesteuert)								
Tankw.-Kreis	S.Temp.	TICR-61	Temperaturfühler Vorlauf BW	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja				T_S_st3					
Tankw.-Kreis	S.Temp.	TICR-62	Temperaturfühler Rücklauf BW	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja				T_cw_st3					
Tankw.-Kreis	S.Vol.	FICR-61	Durchflussmesser: Brauchwasser	FICR 0-24 mA	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	vorhanden - mp_st3	121		V_dot_st3					
Tankw.-Kreis	A Ventill	YFCR-61	Mischventil Brauchwasserkreis	YFCR 230V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Zapfung aus Speicher, Mischung mit Kaltwasser auf Zieltemp/Energiemenge zum Rücklauf in Speicher								
	S.Temp.	TICR-901	Temperaturfühler: Außenfühler	TICR PT1000	1	1	Regler (Interne Steuerung)	ja	Außentemp für Regler (positioniert auf Nordseite am Teststand außen)								
	S.Temp.	TICR-91	Temperaturfühler: Außenfühler	TICR PT100	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-	vorhanden - T_ca_st3				T_ca_st3				
	S.GT	R1YR-91	Globalstrahlungsgeber	R1YR 0... micro V	1	1	Regler (Interne Steuerung)	-	vorhanden - G_st3 - unter 35° wie Modulfeld				G_st3				

Abbildung 31: Sensor-Aktorliste für das Testsystem
Abschlussbericht – WPVT-Freeze

Im folgenden sind auszugsweise Sensoren abgebildet, die am System eingesetzt wurden.



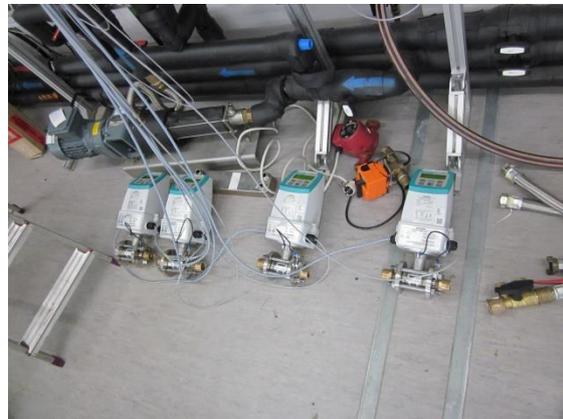
Umgebungslufttemperatursensor mit Strahlungsschutz und Bewicklung



Fluidtemperatursensoren, vorbereitet zur Installation



Umgebungsfeuchtesensor



Volumenstromzähler vorbereitet zur Installation



Rohranlege-Temperaturfühler (Spezialentwicklung) installiert



Temperaturanlegfühler am Speicher installiert



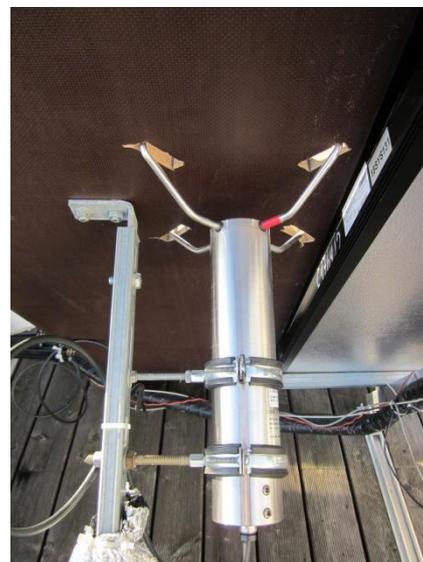
Kamera (vorne rechts) installiert. Dokumentation von Kondensat und Eis (Bild / 20sec)



Einstrahlungssensor – Pyranometer



Strahler für Nachtaufnahmen



2D-Ultraschallanemometer (Rückseite der Messfläche)



Oberflächen-Anlegetemperatursensoren (auf der Abdeckung)



Strommesstechnik - Energiemengenzähler

Abbildung 32: Fotos der Messtechnik, eingesetzt am Testsystem

3.2.1.2 ERWEITERUNGSMAßNAHMEN AM SYSTEMPRÜFSTAND - ÜBERBLICK

Die Messungen am Testsystem sollten am Speicher- und Systemteststand der Gruppe Vermessung- Prüfung- Qualitätssicherung durchgeführt werden.

Ziel war es, möglichst viel bestehende Infrastruktur zu nutzen. Folgende Darstellung zeigt, welche Einheiten des Testsystemaufbaus vom Teststand realisiert werden mussten.

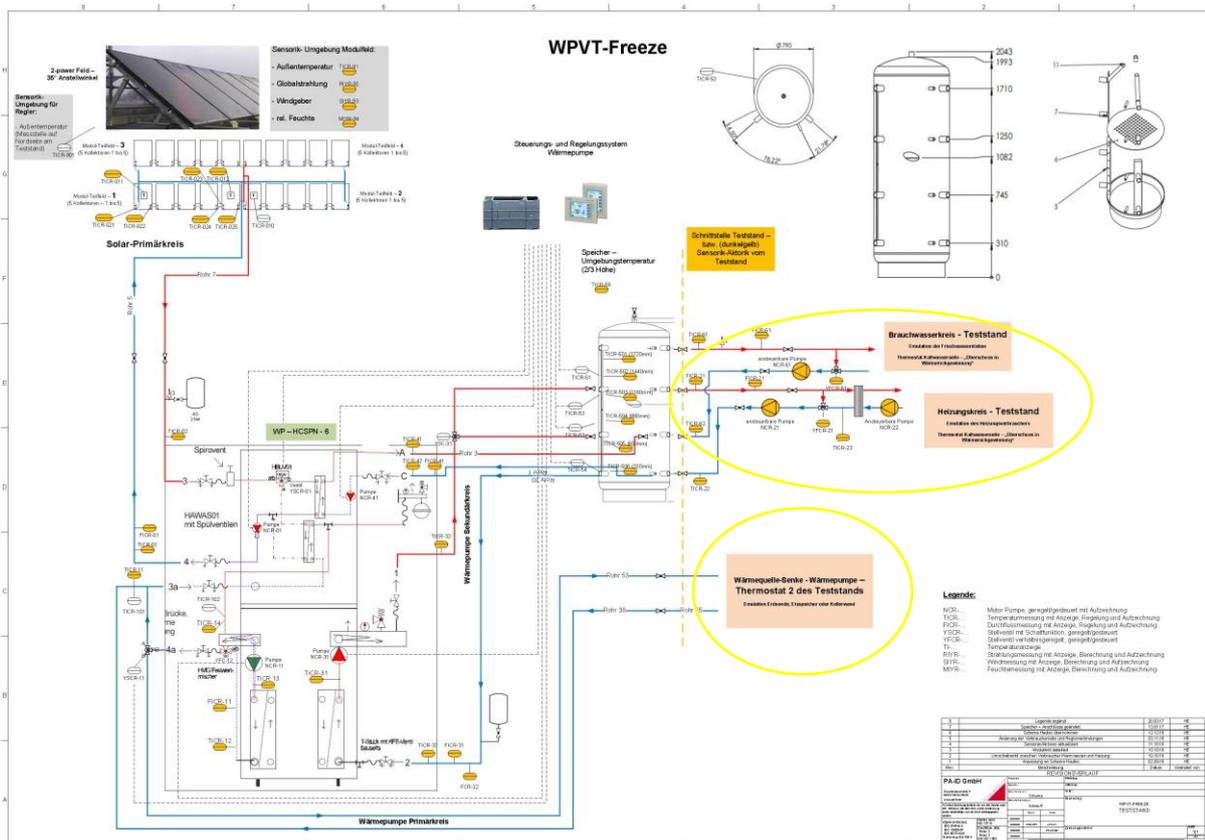


Abbildung 33: Systemverschaltung, incl. Notwendige Teststandserweiterung – Emulation der Verbraucherkreise, sowie der 2. Wärmequelle

Insgesamt konnte ein Konzept identifiziert werden, das einen realisierbaren Erweiterungsaufwand (Arbeitszeit, Komplexität, Zusammenspiel mit existierendem Teststand und Kosten) auf der einen und die geforderte Anforderungen aus Projektperspektive (Anzahl der hydraulischen Kreise, Fluide, Leistung, Dynamik, Flexibilität) auf der anderen Seite erfüllt.

In diesem Kontext wurde entschieden, dass zwei der insgesamt vier Teststandbereiche für die anstehenden Arbeiten in AP4 reserviert werden. In diesem Kontext notwendige Erweiterungsmaßnahmen betreffen die Emulation der Wärmequelle/Senke und der 2. hydraulischen Verbraucherkreise (Heizungskreises, Trinkwasserkreis). Mit Emulation ist die Simulation des thermischen Verhaltens eines Geräts/Anlage mit Hilfe von „Hardware“, wie z.B. einem Heizstab oder Thermostaten sowie entsprechender Steuerung, gemeint.

Tabelle 9: Erweiterungsmaßnahmen - Systemvermessung – Aufgabe-Lösung

Aufgabe	Lösung
Emulation einer zusätzlichen (neben PVT-Kollektorfeld) Wärmequelle sowie bei je nach Art auch gleichzeitig einer Wärmesenke. Konkret sind dies eine Erdsonde/ein Erdkollektorfeld , eine thermisch aktivierte Kellerwand sowie ein Eisspeicher	Thermostat, der sämtliche Aufgaben erfüllt
Emulation der Verbraucherkreise, d.h. eines Heizungskreises und eines Trinkwasserkreises.	Realisierung der Zapfungen (direkt am Pufferspeicher des Testsystems durch direkt angeschlossene hydraulische Kreise mit Exzentrerschneckenpumpen, die eine Volumenstromregelung in den Zapfkreisen ermöglichen (vgl. <i>Abbildung 33</i> , links vom Speicher). Die Ansteuerung der Pumpen erfolgt dynamisch basierend auf den gemessenen Temperaturen im Zapfkreis in Abhängigkeit der je Zapfung erforderlichen Energiemenge. Die erforderlichen Energiemengen werden vorgegeben durch Profile (Prüfmatrix oder Simulation im Falle des Monitoring).

3.2.1.3 EMULATION DER 2. WÄRMEQUELLE (BZW. SPÄTER NUTZUNG EBENSO FÜR DIE AUßENMESSUNGEN VON AP1) – THERMOSTAT

Der Speicher- und Systemteststand war räumlich bereits sehr ausgelastet. Folgedessen wurde entschieden einen Unterstand, direkt gekoppelt an den Teststand zu bauen. Hier war wichtig:

- Räumliche Nähe zum Gesamtsystem (möglichst kurze Leitungen)
- Baulich groß genug, um Wartung/Reparaturen zu ermöglichen
- Geringe Kosten
- Gute Belüftung, da der Thermostat die Außenluft als Kühlquelle hat



Abbildung 34: Unterstand incl. Thermostat als 2. Wärmequelle

Einige Hauptanforderungen waren:

- Kühl- und Heizleistungen, um verschiedene Wärmequellen zu Emulieren, wie
 - Erdsonde
 - Eisspeicher
- Betriebstemperaturbereich bis -20°C
- Hohe Temperaturstabilität ($\pm 0,5\text{ K}$ in allen Temperaturbereichen (-20°C bis $+40^{\circ}\text{C}$))
- Geringes Budget durfte nicht überschritten werden.

Nach Recherche, Bestellung, weitere Abstimmung mit dem Hersteller, Lieferung, folgte die Inbetriebnahme. Hier erforderte es jedoch einige Vorort-Treffen mit dem Hersteller, bis der Thermostat zufriedenstellend alle Kriterien erfüllte.

3.2.1.4 EMULATION DER LASTEN, BZW. VERBRAUCHER – TRINKWARMWASSER UND HEIZUNG

Für die Emulation der Lasten sollte möglichst viel bestehende Infrastruktur des Teststandes genutzt werden. Notwendig waren 2 Kreise:

- Trinkwarmwasser (Orientierung an den Lastprofilen aus der ErP (Energy related products) - Richtlinie der EU (23 Zapfungen pro Tag))
- Heizungskreis (Emulation einer Fußbodenheizung für ein Einfamilienhaus)

Für die Emulation der Trinkwarmwasserentnahme waren nur geringe hydraulischen, bzw. elektrischen Erweiterungen notwendig. Es war jedoch erforderlich, Umprogrammierungen bezüglich der Computerseitigen Ablaufsteuerung vorzunehmen.

Die Emulation der Raumheizung war deutlich aufwendig, da nur ein bestehender Thermostat am Teststand, beide zuvor genannten Kreise „bedienen“ sollte. Es war erforderlich die Kreise hydraulisch zu entkoppeln. Dies gelang mit vorhandenen Komponenten. Folgende Arbeiten waren notwendig:

- Entwicklung eines Konzeptes, welche die Anforderungen erfüllt (siehe Kapitel 3.2.1.2)
- Inbetriebnahme/Überprüfung der Komponenten aus dem Bestand
 - Wärmetauscher
 - Pumpe
 - 3-Wege-Ventil
 - Temperaturfühler (zur Regelung)
 - Ansteuerungskomponenten wie D/A Wandler
- Hydraulischer Aufbau der Komponenten
- Elektrische Verdrahtung der Komponenten, sowie Aufbau eines Schaltschranks
- Programmierung eines PID-Reglers für das 3-Wege-Ventil (incl. Inbetriebnahme + Versuchsdurchläufe)
- Programmierung der Ablaufsteuerung



Hydraulikverschaltung für Heizungsemulation



Hydraulische Erweiterungskomponenten



Schaltschrank für Ansteuerung der Erweiterungskomponenten

Abbildung 35: Fotos Erweiterung für die Heizungsemulation

3.2.1.5 PRÜFMATRIX IN ÜBERSICHTSPLAN FESTGELEGT

Erfahrung mit der Inbetriebnahme des Systems und der zahlreichen Funktionsprobleme haben gezeigt, dass es im Sinne der Ziele des Arbeitspakets sinnvoller erscheint, anstelle eines detaillierten Prüfplans zu Beginn der Messungen eher bedarfsorientiert gemäß des Fortschritts den konkreten Bedarf der Messungen dynamisch zu konkretisieren.

Als Ausgangsbasis für dieses Vorgehen dient das Dokument der Projektfragestellungen aus Meilenstein M2.1. Kurz vor Beginn des ersten autonomen Betriebs des Systems wurde eine Priorisierung der Projektfragestellungen vorgenommen und dementsprechend das Ziel der ersten Messungen festgelegt (Volllastbetrieb des Systems, Vereisung des Kollektorfelds).

Weitere Betriebsmodi wurden im Projektverlauf anhand der auftretenden Vorkommnisse, sowie Erkenntnisse entschieden.

3.2.2 M4.3 DURCHFÜHRUNG ALLER MESSUNGEN UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE IN BEZUG AUF DIE ZU PROJEKTBEGINN FORMULIERTEN FRAGESTELLUNGEN ABGESCHLOSSEN

Im Kontext des Berichtsablauf scheint es sinnvoller M4.3 (DURCHFÜHRUNG ALLER MESSUNGEN UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE IN BEZUG AUF DIE ZU PROJEKTBEGINN FORMULIERTEN FRAGESTELLUNGEN ABGESCHLOSSEN) vor M4.2 (AUFBEREITETE MESSDATEN FÜR ABGLEICH MIT POLYSUNSYSTEMSIMULATION BEREITGESTELLT) zu berichten.

3.2.2.1 BESCHAFFUNG UND LIEFERUNG DES TESTSYSTEMS

Die benötigten Ressourcen und der Zeitaufwand zur Beschaffung des Testsystems (Detailauslegung von PA-ID, Ausschreibungsunterlagen erstellen und Prüfung intern/extern, Einholen von Angeboten, Lieferzeitverzögerungen) wurden bei der Planung des Projekts erheblich unterschätzt (nicht kalkuliert). Die lag auch daran, dass das Testsystem in dieser Konfiguration bereits eine Weiterentwicklung war. Dies gilt auch für die ausgewählte Wärmepumpe der Fa. Hautec/Nelskamp. In 2016 führte dies zu deutlichen Verzögerungen der Arbeiten die daran gekoppelt waren, ebenso Arbeitspaket M4.1. Ende November 2016 konnten die Bestellvorgänge abgeschlossen werden, die Lieferung des Testsystems (Wärmepumpe und Speicher, sowie Systemkomponenten) wurde nach mehreren Verzögerungen auf Ende Januar terminiert.

Das erforderliche Material zum Aufbau des Kollektorfeldes sowie die dazugehörigen elektronischen Komponenten wie Wechselrichter, Energy-Meter und Homemanager wurden im Juli 2016 geliefert und von PAID und ISE aufgebaut.

Die Beschaffung des Testsystems konnte mit erfolgter Lieferung von Wärmepumpe, Hydraulikeinheit und Wärmespeicher im Februar 2017 abgeschlossen werden.

Im Anschluss an die Lieferung erfolgte die Inbetriebnahme des Systems sowie die Einbindung in das geplante Messkonzept. Die konkrete Umsetzung des Messkonzepts interagierte dabei an vielen Stellen mit dem hydraulischen Anschluss sowie der Inbetriebnahme des Testsystems durch PA-ID. Dies erforderte erheblichen Abstimmungs- und Planungsaufwand im Vorfeld des Aufbaus und der Inbetriebnahme.

Abgesehen von vielen zu klärenden technischen Einzelheiten hinsichtlich noch zu liefernder Komponenten (Dämmung für Solarkreis, zusätzliches Magnetventil zur Speicherbeladung auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus, Kleinteile etc.) nahm die Abstimmung bezüglich der geplanten Sensorik (wer beschafft, wo genau installiert, teststandsseitige Aufnahme von durch das Testsystem erfassten Messgrößen etc.) einen wesentlichen zeitlichen Raum ein.

Ein Protokoll/Logbuch des Ablaufes ab Lieferung bis zur Inbetriebnahme ist angehängt in [Inbetriebnahme-Protokoll Testsystem AP4](#)

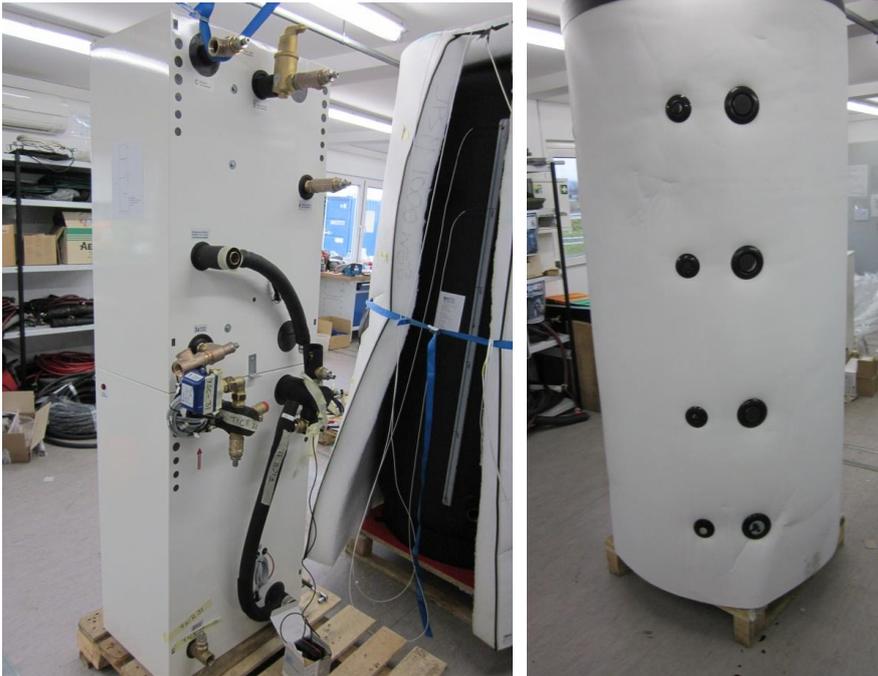


Abbildung 36: Im Februar 2017 wurde die Wärmepumpe einschließlich Hydraulikeinheit (links) und der Wärmespeicher geliefert.

3.2.2.2 INBETRIEBNAHMEPROZESS DES TESTSYSTEMS

Nach dem Kollektorfeld samt Zubehör wurden auch Wärmepumpe, Speicher, Steuerungen mit Zubehör geliefert und aufgebaut. Die Inbetriebnahme der gesamten Anlage hatte sich dann in der Folge mehrfach verzögert. Die Gründe hierfür waren mehrere Undichtigkeiten an der Wärmepumpe bzw. am Hydraulikmodul um welche zu beheben ein Kundendienstesinsatz des Herstellers notwendig wurde sowie die dann einsetzende Urlaubszeit in der eigentlich der Testbetrieb und die Messungen schon laufen sollte.

Nachdem die aufgetretenen Probleme behoben waren, konnte der Teststand erfolgreich in Betrieb genommen werden. Er arbeitet zuverlässig ohne permanente Betreuung, kann per Remote Control fernbedient werden und zeichnet regelmäßig Daten auf. Die verschiedenen geplanten Messungen konnten durchgeführt werden. Nach einigen Optimierungen an der Anlage konnte nicht nur Kondensatbildung sondern auch Eisbildung auf der Moduloberfläche erzeugt werden. Auch die Messdatenerfassung läuft sowohl über das interne Datenerfassungssystem der Wärmepumpe als auch über die externen Messstellen des ISE.

Siehe auch [Inbetriebnahme-Protokoll Testsystem AP4](#)

3.2.2.3 ZUGRIFF AUF DAS TESTSYSTEM

Im Rahmen des Projektes sollte dem Projektpartner PA-ID ermöglicht werden, über remote auf das Testsystem und dessen Regelung zuzugreifen.

Hier war eine intensive Abstimmung erforderlich, um das Datensicherheitskonzept seitens Fraunhofer ISE und den Anforderung im Rahmen des Projektes zu genügen. Nach mehreren Entwicklungsschritten war es möglich, das PA-ID auf das System zugreifen kann. Dies zeigte sich als grundlegend und hilfreich, um einen Betrieb und Weiterentwicklung der Regelung zu ermöglichen.

Folgende Abbildung zeigt eine Skizze der Komponenten:

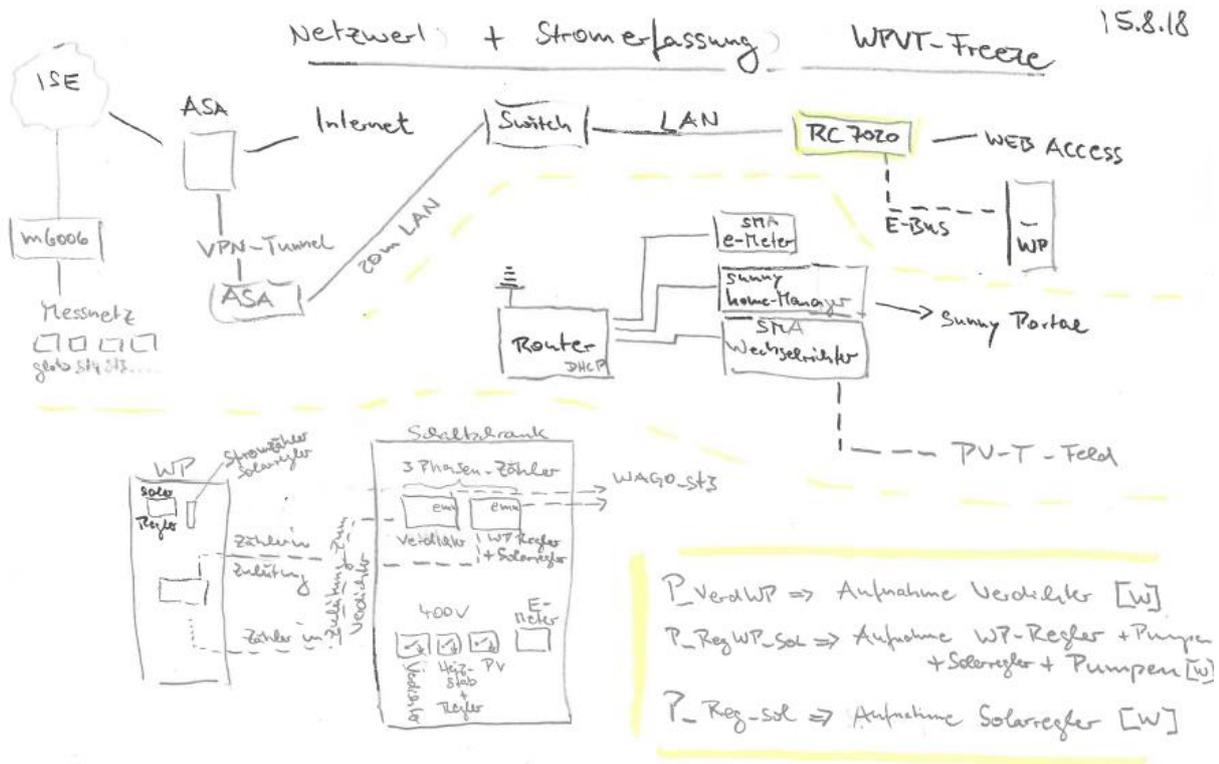


Abbildung 37: Netzwerk – Strommesskonzept des Testsystems



Abbildung 38: Komponenten - Netzwerk – Strommesskonzept des Testsystems

3.2.2.4 DAS TESTSYSTEM INSTALLIERT

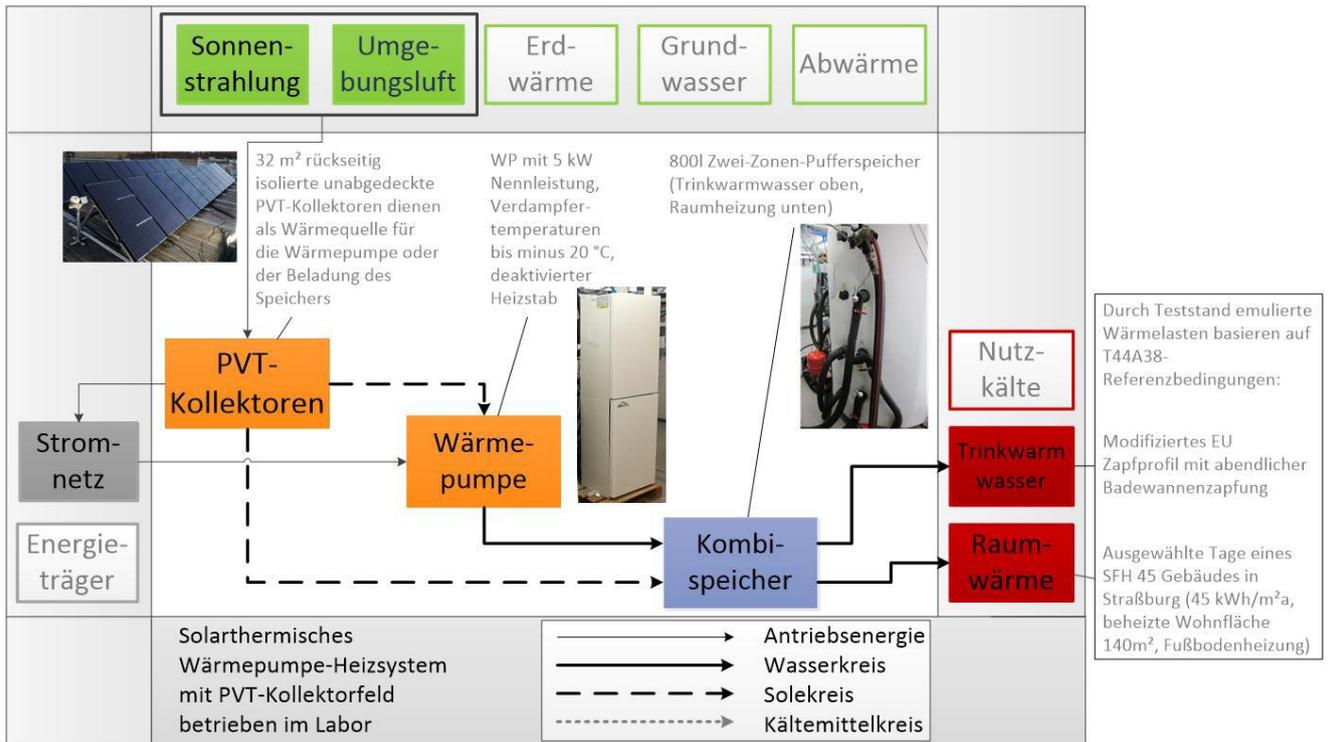


Abbildung 39: Schematische Darstellung (nach TASK44) des Testsystems



PVT-Modulfeld 2. Reihe



Abschlussbericht – WPVT-Freeze

PVT-Modulfeld



PV-Wechselrichter



PVT-Module – Rückseite



PVT-Modulfeld in Betrieb im Winter



Kombispeicher und Wärmepumpe

Abbildung 40: Fotos vom installierten Testsystem



Hydraulikverschaltung mit Messtechnik



Speicheranschlüsse

3.2.2.5 WEITERENTWICKLUNG DES TESTSYSTEMS

Es wurde bereits vorher erwähnt, dass der Liefer- und Inbetriebnahmeprozess den Projektablauf deutlich verzögert hat. Im Dezember 2017 konnte mit erstem Betrieb/Messungen des Systems begonnen werden. 1. Ziel war es, den Vereisungszustand des Modulfeldes zu erreichen. Sehr schnell wurde klar, dass über den Wärmetauscher des Solarkreises eine zu große Temperaturdifferenz entsteht. Dies hatte zur Folge, dass die Temperaturen nicht niedrig genug waren, um Eis auf der Moduloberfläche zu erreichen.

In Abstimmung mit PA-ID wurde der Wärmetauscher im Solarkreis ausgebaut.

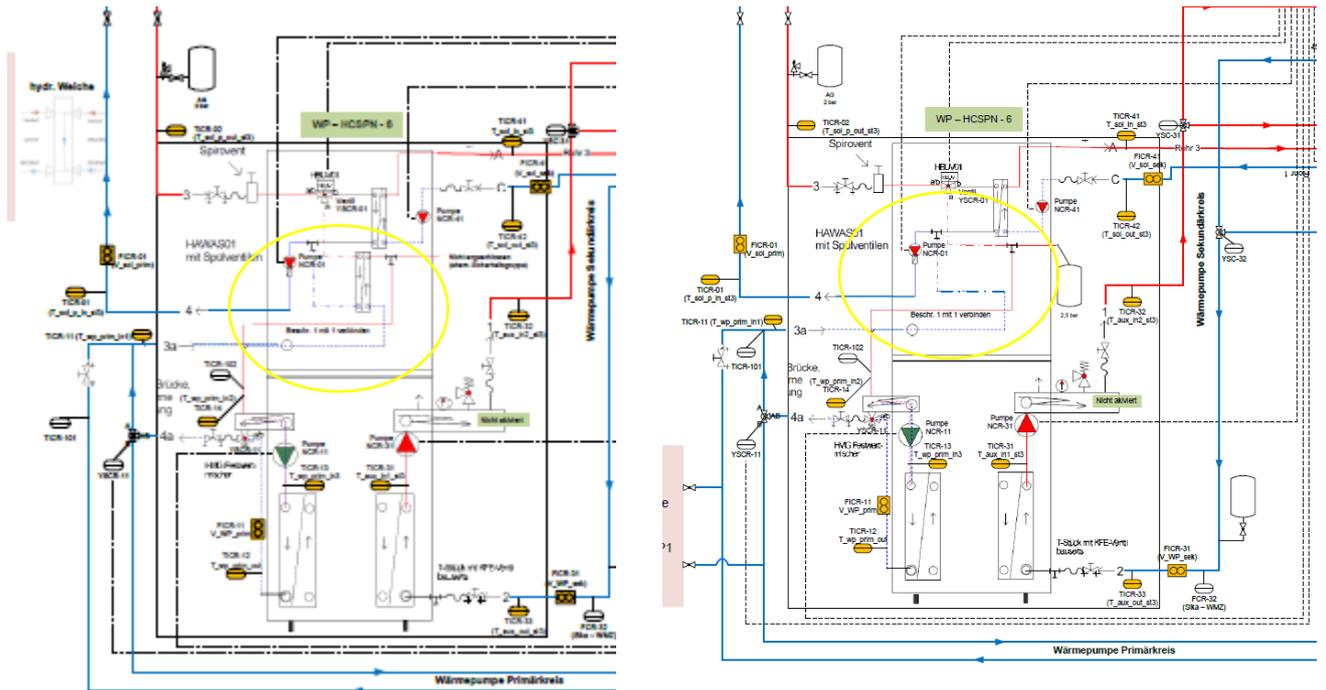


Abbildung 41: Schema Solarkreis, vor und nach dem Umbau

Nach dem Umbau wurden um ca. 10 K niedrigere Temperaturen an dem PVT-Modul eintritt gemessen. Dies führte bei entsprechend tiefen Umgebungstemperaturen im Februar zu Kondensat und Eisbildung auf den Modulen:



Abbildung 42: Eisbildung auf der Vorderseite der PVT-Module

Im laufenden Betrieb wurden noch zahlreiche Beobachtung am Betriebsverhalten gemacht. Dies führte zu Optimierungen/Korrekturen an Einstellungen:

- Einstellungen am Festwertmischer
- Positionierung von Sensoren am Speicher
- Zordnung von Sensoren für den Regler
- Schaltpunkte des Reglers anhand von Messergebnissen

3.2.2.6 ERSTE MESSUNGEN IM WINTER MIT REALISIERTEN LASTEN

Das Testsystem wurde zuerst als Single-Source-System betrieben (PVT-Module als alleinige Wärmequelle). Es sollte aufgezeigt werden, wie ergibt diese alleinige Wärmequelle unter „worst case“, also Winter sein kann.

Anfang März 2018 konnten erste Messergebnisse ermittelt werden, mit einem komplett funktionierenden Testsystem, mit Trinkwarmwasserlasten, sowie Heizungsbetrieb.

Dies Messergebnisse wurden aufbereitet und Veröffentlicht:

- ISES – EuroSun 2018, Rapperswil, Switzerland, 10 – 13 September 2018
Titel:
Single Source “Solar Thermal” Heat Pump for Residential Heat Supply: Performance with an Array of Unglazed PVT Collectors
(Christian Schmidt, Arim Schäfer, Korbinian Kramer)

Zentrales Ergebnis:

Das PVT – Wärmepumpensystem, mit PVT-Modulfeld als einzige Wärmequelle ist in der Lage die vorgegebenen Lasten (23 Zapfungen Trinkwarmwasser nach ErP, sowie einer Winterheizlast von 65 kwh/d) nahezu vollständig zu erreichen.

Dies basierte auf quellenseitigen Betriebstemperaturbereichen bis zu -20°, wodurch Kondensat und Vereisung genutzt wurden.

Diese Ergebnis war positiv überraschend und veränderte einige der zuvor entwickelten Projektfragestellungen. Wie z.B. Dimensionierung, bzw. Reduzierung der zweiten Wärmequelle wurden überflüssig, da gezeigt werden konnte, dass eine Wärmequelle ausreichen kann.

3.2.2.7 MESSUNGEN AM GESAMTSYSTEM AUSGEWERTET

Im Zeitraum Herbst 2017 bis Januar 2019 wurden Messungen am Gesamtsystem durchgeführt. Nach dem wichtigen Ergebnis, dass das System mit einem PVT-Kollektorfeld als alleinige Wärmequelle für die Wärmepumpe betrieben werden kann folgte die Abstimmung mit den Projektpartnern PAID und Polysun, welche Messdaten weiterhin erforderlich sind. Es wurde entschieden, dass weiterhin Tageszyklen gefahren werden, mit Jahreszeiten entsprechenden Lasten. Diese lehnen sich an ErP bezüglich Trinkwarmwasser an und Heizlasten, wie in TASK44 entwickelt.

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- 1 Woche – Sommer (Trinkwarmwasser nach ErP, Heizlast keine)
- 1 Woche – Übergangsjahreszeit (Herbst) – Trinkwarmwasser nach ErP, Heizlast 35 kWh/d
 - Tage mit Sonne
 - Tage ohne Sonne
 - Tag mit Regen
- 1 Woche – Winter - Trinkwarmwasser nach ErP, Heizlast 54 kWh/d
 - Tage mit Sonne
 - Tage ohne Sonne
 - Kalte Tage (T_{amb} kleiner 0°C)

Alle Messungen wurden mit deaktiviertem Heizstab durchgeführt. Ziel war es zu beurteilen, in wie weit der Bedarf alleinig über die Quelle (PVT) gedeckt werden kann.

3.2.2.8 MESSUNGEN AM GESAMTSYSTEM – THERMISCHE AUSWERTUNG

Wie in der Veröffentlichung

ISES – EuroSun 2018, Rapperswil, Switzerland, 10 – 13 September 2018

Titel:

Single Source “Solar Thermal” Heat Pump for Residential Heat Supply: Performance with an Array of Unglazed PVT Collectors

beschrieben, kann das System selbst im Winter nahezu den kompletten Bedarf decken. Die Trinkwarmwasserlast nach Erp sieht 23 Zapfungen vor. Am 7. Tag der Woche entspricht die 23. Zapfung einem Volumen einer Badewanne. Bei dieser Zapfung kann das Temperaturniveau von 48°C nicht gehalten werden.

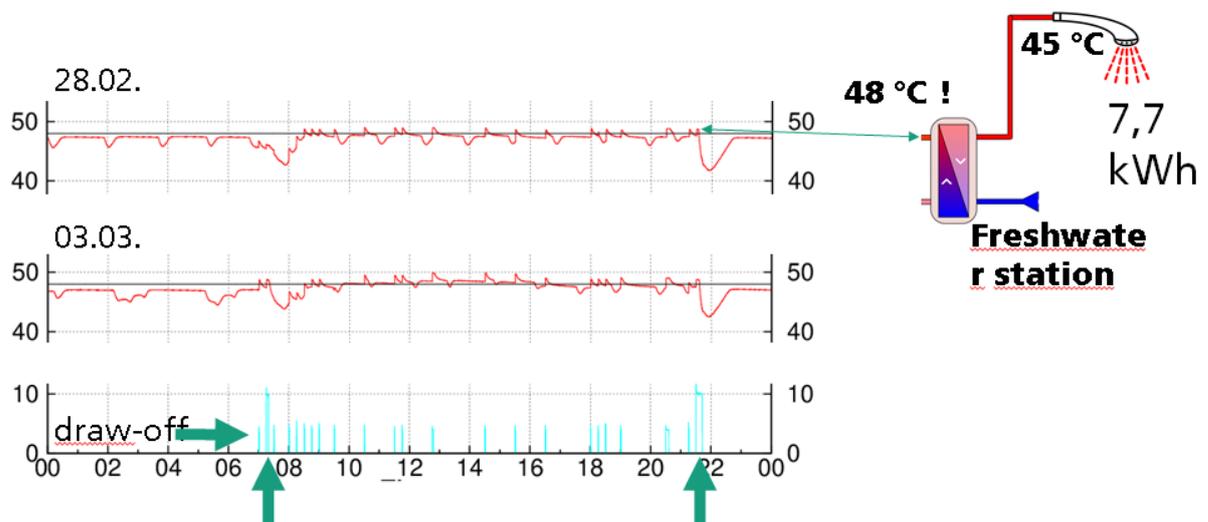


Abbildung 43: Trinkwarmwasser Zapfungen, sowie Entnahmetemperaturen

Messungen im Sommer zeigten jedoch das gleiche Verhalten. Dies bestätigte die Vermutung, dass dies am Systemdesign, bzw. der Speicherdimensionierung, bzw. keiner guten Ausnutzung des Speichers liegt. Denn das Bereitschaftsvolumen des Speichers ist ausreichend dimensioniert um auch die größeren Zapfungen zu „bedienen“.

In Kapitel [Übersicht Messungen Einzelmodul](#) wurde bereits erwähnt, dass das PVT-Modul, welches im Gesamtsystem zum Einsatz kam, rückseitig isoliert ist. Da die Wärmepumpe Quellenseitig bis -20°C arbeitet geht es um Energiegewinne aus der Umgebungsluft. Durch die rückseitige Isolierung geht somit Potential verloren.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

Der Bedarf an Trinkwarmwasser (23 Zapfungen nach ErP), sowie die Heizlast für eine Fußbodenheizung (in Anlehnung an die Lasten, entwickelt in TASK 44) können zum größten Teil gedeckt werden.

Ein effizienteres Speicherdesign, bzw. Auslastung des Speichers kann dazu führen, dass der komplette Bedarf gedeckt werden kann.

Der Einsatz eines PVT-Modul ohne rückseitige Wärmedämmung (wie in AP1 beschrieben) könnte zu weiteren Ertragsgewinnen führen.

3.2.2.9 MESSUNGEN AM GESAMTSYSTEM – ARBEITSAZAHLEN AZ - SPF

Die Messungen am Gesamtsystem wurden hinsichtlich ihrer Arbeitszahlen ausgewertet. Es wurden Tagesbilanzen durchgeführt. Sogenannte SPF (Sesonal Performance Factor (hier daily), bzw. Arbeitszahlen wurden ermittelt. Es wurden repräsentative Tage aus den zuvor genannten Messungen ausgewählt.

$$AZ = Q_{\text{Nutzwärme}} / Q_{\text{Einsatz_elektrisch}}$$

Folgende Abbildung zeigt die gebildeten Bilanzgrenzen der Arbeitszahlen

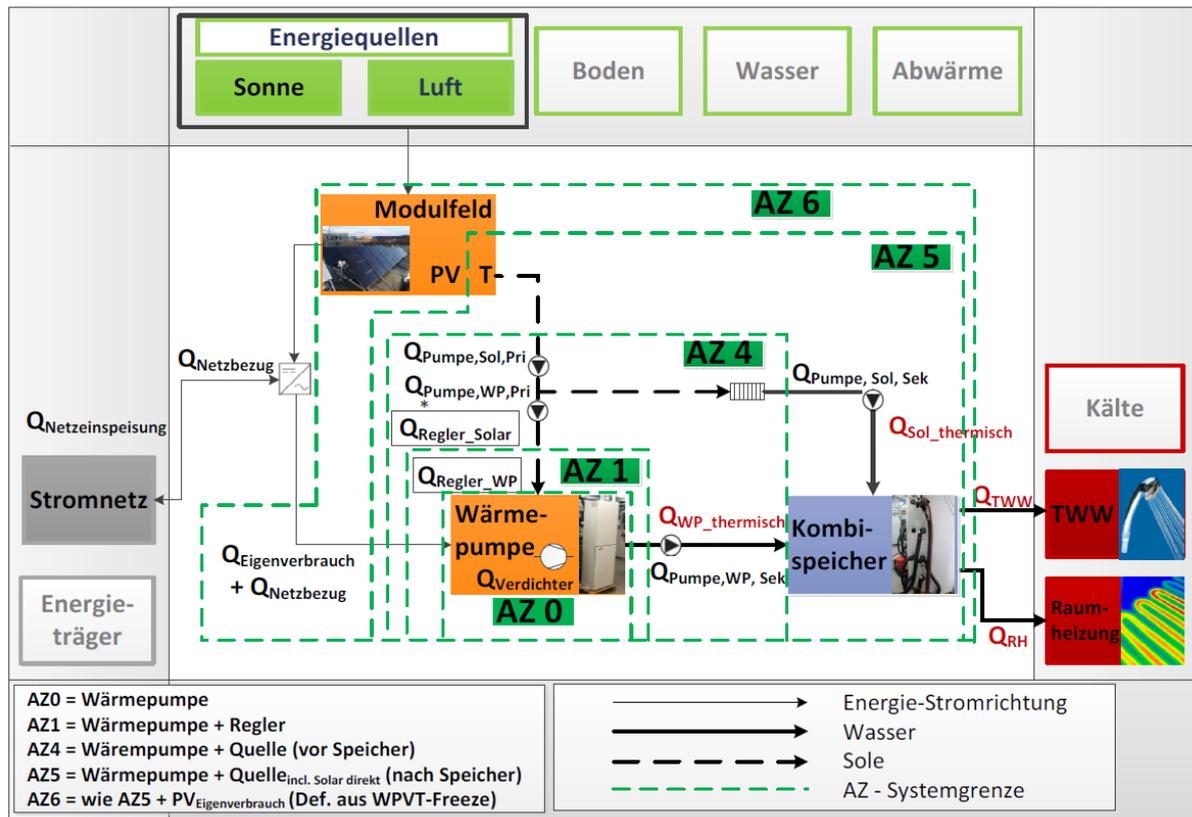


Abbildung 44: Arbeitszahlen mit Bilanzgrenzen

Die Bilanzgrenzen wurden in Anlehnung an folgende Projekte vorgenommen:

- WP Monitor – Wärmepumpenfeldtest in neuen Einfamilienhäusern (II) www.wp-monitor.de
- SHC TASK 44 - Solar and Heat Pump Systems <http://task44.iea-shc.org/>
- SEPemo-Build - SEasonal PErfomance factor and MOnitoring for heat pump systems in the building sector <http://sepemo.ehpa.org/>

Folgende Tage wurden aus allen Messtagen ausgewählt:

- 18.08.2018 – warmer Sommertag mit Einstrahlung von 18 MJ
- 24.08.2018 – Sommertag, geringe Einstrahlung 6,7 MJ
- 27.10.2018 – Herbsttag, bedeckt, mittlere Umgebungstemperaturen, mit 14 mm Regen
- 06.11.2018 – Hberbsttag, bedeckt, wie 27.10.2018, jedoch ohne Regen
- 03.11.2018 – Herbsttag, sonnig
- 24.01.2018 – Wintertag, kalt, bedeckt („worst case“)

- 29.01.2018 – Wintertag, sonnig

Tagestyp	Datum:	18.08.2018	24.08.2018	27.10.2018	06.11.2018	03.11.2018	24.01.2019	29.01.2019	Jahres-Arbeitszahlen
	Tages-Charakteristik	Sommer-sonnig	Sommer-wenig Sonne	Herbst-Regen	Herbst-bedeckt	Herbst-sonnig	Winter-kalt	Winter-sonnig	
Last	Trinkwarmwasser [kwh]	9.1	9.1	8.3	8.0	8.4	8.5	8.5	(Hochrechnung - Gewichtung der Bezugs-tage)
	Sollwert (23 Zapfungen, ErP)	8	8	8	8	8	8	8	
	Heizlast [kwh]	-	-	34.8	33.9	34.2	53.8	51.6	
	Sollwerte (in Anl. an TASK44)	-	-	35	35	35	54	54	
Arbeitszahl	AZ 0	4.0	3.9	3.5	3.5	3.7	2.9	3.2	3.6
	AZ 1	2.6	2.7	3.3	3.3	3.5	2.8	3.1	3.1
	AZ 4	1.7	2.4	2.7	2.6	2.9	2.3	2.5	2.5
	AZ 5	2.9	2.4	2.4	2.6	2.2	2.0	2.2	2.4
	AZ 6 incl. PV-Eigenverbrauch	5.3	3.4	2.5	2.8	2.6	2.1	2.5	3.2
PV	PV - Tagesertrag [kwh]	19.7	7.9	2.1	1.7	8.6	0.6	6.4	
	PV- Eigenverbrauch [kwh]	1.4	1.1	1.1	1.1	2.8	0.5	3.3	
	PV - Anteil Eigenverbrauch vom Tagesertrag	7%	14%	54%	66%	32%	95%	52%	
	PV - Anteil (Eigenverbrauch) am Strombedarf	45%	29%	6%	7%	15%	2%	12%	
Meteo	Einstrahlung - Tagessumme [MJ/m ²]	18.0	6.7	1.8	0.4	12.5	1.1	9.7	
	T_amb min [°C]	16.7	14.3	5.0	4.8	6.5	-2.8	0.0	
	T_amb max [°C]	28.5	24.2	10.2	13.1	12.5	-1.3	6.0	
	Regen - Tagessumme [mm]	0	0	14	0	0	0	0	

Abbildung 45: Arbeitszahlen der ausgewählten Messtage

Ergebnisdiskussion

Lasten:

Der Bedarf an Trinkwarmwasser und Heizung wird in an allen Tagen nahezu gedeckt. Dies wurde bereits in Kapitel [Messungen am Gesamtsystem – thermische Auswertung](#) beschrieben. Die Tabelle zeigt auch die Sollwerte. Wie bereits zuvor genannt, wurde ein Trinkwasserprofil hinterlegt, welches sich an dem „worst case“ – Tag (7. Tag nach ErP-Richtlinie; 23 Zapfungen mit 23. Zapfung als „Badewanne“) orientiert. Die Heizlast wurde in Anlehnung an die in TASK44 entwickelten Lasten emuliert.

AZ - Arbeitszahlen:

AZ0 ist dann hoch, wenn Einstrahlung auf der Quelle (PVT-Modul). Der höchste Wert von 4.0 wird im Sommer am 18.8.2018 erreicht, wobei 18 MJ/d noch kein Maximalwert ist. Der liegt am Standort Freiburg im Sommer bei knapp 30 MJ/d.

AZ5 steigt gegenüber AZ4 am 18.8., weil an diesem Tag solar Direktbeladung in den Speicher einen nennenswerten Rolle spielt. An den vergleichbaren Sonnentagen im Herbst und Winter findet nur wenig solare Direktbeladung statt, die nicht sichtbar wird. Das liegt aber auch daran, dass AZ5 auch die Speicherverluste beinhaltet.

AZ6 ist neu eingeführt. Hier soll dargestellt werden wie es sich auswirkt, wenn die PV Eigennutzung/Eigenverbrauch in der Arbeitszahl auswirkt. Dieser Stromanteil wird entsprechend weniger vom Stromnetz benötigt.

PV - Ertrag:

Neben dem PV-Tagesertrag und dem PV-Eigenverbrauch ist der PV-Anteil (Eigenverbrauch vom Tagesertrag) dargestellt. An dem sonnigen Wintertag sind dies 52%, was 12 % des Strombedarfs für das System sind.

An dem sonnigen Sommertag können 45% des Strombedarfs durch die PV gedeckt werden.

3.2.2.10 EISDICKENBILDUNG – GEFÄHRDUNGSPOTENTIAL

Eine wichtige Frage zur Eisdickenbildung wurde ebenfalls untersucht. Gibt es ein Gefährdungspotential durch Eisbildung, mit dem Risiko, dass beim Abtauen Eisplatten vom Modulfeld rutschen könnten?

Ergebnis

Beim installierten Testsystem waren maximale Eisdicken im Betrieb von 2-3 mm zu beobachten. Die Moduleintrittstemperatur war dabei bis -20°C . Auch im Abtauvorgang konnten keine rutschenden Eisplatten beobachtet werden.

Unter Niederschlag konnten maximal Eisdicken von max. 5 mm beobachtet werden.

Bei diesem Modultyp war die Rückseite isoliert, somit entstand keine Eisbildung auf der Rückseite. Der unisolierte Modultyp, beschrieben in AP1 zeigte hingegen deutliche Eisbildung auf der Modulrückseite, bis zu 20 mm (rund um Moduleintritts-Anschluss) konnten beobachtet werden. Da die Eisbildung auf der Modulrückseite stattfindet kann beim Abtauen das Eis nur rückseitig runter rutschen.

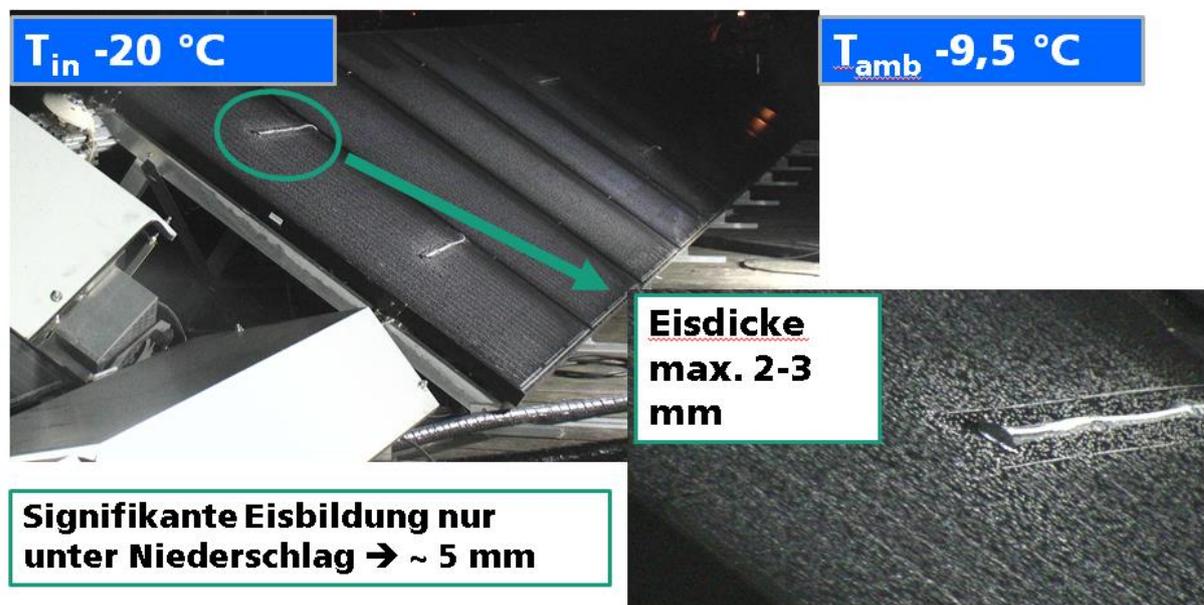


Abbildung 46: Eisdicken am 28.2.2018

3.2.3 M4.2 AUFBEREITETE MESSDATEN FÜR ABGLEICH MIT POLYSUN-SYSTEMSIMULATION BEREITGESTELLT.

In Abstimmung mit dem Projektpartner Polysun wurden Messungen durchgeführt, um einen Abgleich mit Polysun-Systemsimulation durchführen zu können.

Siehe hierzu Kapitel [Messungen am Gesamtsystem ausgewertet](#).

3.2.4 M4.2 DURCHFÜHRUNG ALLER MESSUNGEN UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE IN BEZUG AUF DIE ZU PROJEKTBEGINN FORMULIERTEN FRAGESTELLUNGEN ABGESCHLOSSEN.

Es wurden umfangreiche Messungen am Gesamtsystem durchgeführt. Diese wurden berichtet, siehe Kapitel [Messungen am Gesamtsystem ausgewertet](#), sowie [Messungen am Gesamtsystem – thermische Auswertung](#) und [Messungen am Gesamtsystem – Arbeitszahlen - SPF](#)

3.3 LCOH – KOSTENRECHNUNG

Es wurde beispielhaft eine Wärmegestehungs-Kostenrechnung durchgeführt. Diese wurde im Rahmen des *Industry Workshop - Eindhoven, 08.05.2019 – kombiniert mit IEA Task 60 (PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems) – Treffen* vorgestellt mit folgenden Foien:

Cost calculation: Levelized cost of heat (LCOH)

$$LCOH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t(1 - TR) - DEP_t \cdot TR}{(1 + r)^t} - \frac{RV}{(1 + r)^T}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1 + r)^t}} \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Labels in the diagram:
 - Investment costs (€) → I_0
 - Operating and maintenance costs (€/a) → C_t
 - Corporate tax (%) → TR
 - Depreciation (€/a) → DEP_t
 - Residual value (€) → RV
 - Service time (years) → T
 - Saved energy (kWh/a) → E_t
 - Discount rate (%/a) → r

This formula can be simplified within IEA SHC Task 54 with:

- Discount rate = 0 %
- Corporate tax = 0 €/a
- Depreciation = 0 €/a
- Residual value = 0 €

Abbildung 47: Formel Wärmegestehungskosten (LCOH)

Basis für folgende Berechnung, siehe auch [Messungen am Gesamtsystem – Arbeitszahlen AZ - SPF](#)

Cost calculation: Levelized cost of heat (LCOH)

Thus,

$$LCOH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T C_t}{\sum_{t=1}^T E_t} \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

- I_0 = Investment costs
- C_t = O&M costs
- T = Service years
- E_t = DHW and heating energy [kWh]
- AZ6 = **3.2** or AZ5 = **2.4**
- **LCOH**

	PVT incl. PV selfconsumption PV feed-in tariff not considered !!	Thermal System (PV-system deducted)	PVT incl. PV self consumption PV feed-in tariff considered
I_0 = Investment costs	31 985 €	21 985 €	31 985 €
C_t = O&M costs	320 €	220 €	320 €
T = Service years	20	20	20
E_t = DHW and heating energy [kwh/a]	8483	8483	8483
AZ6 (3.2) or AZ5 (2.4)	3.2	2.4	3.2
LCOH	0.07 €	0.06 €	0.05 €

Abbildung 48: Übersicht Wärmegestehungskosten (LCOH)

3.4 AP6: PROJEKTMANAGEMENT (AP-LEITUNG: ISE)

Die Projektleitung/Projektmanagement wurde im Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2018 von Christian Schmidt (Fraunhofer ISE) durchgeführt.

In der Projektlaufzeit gab es Veröffentlichungen, die in Kapitel [Erfolge und geplante Veröffentlichungen](#) gelistet sind.

Zwei Workshops wurden durchgeführt:

1. Workshop im Rahmen des Auftaktes des IEA Task 60 (PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems) am 15./16. Mai 2018 am Fraunhofer ISE

Preliminary agenda for the «International seminar on the status of PVT systems»		
09:00 - 09:45 Opening Session		
09:00	Lämmle, Kramer	Welcome, Agenda
09:10	Hadorn	Motivation for PVT, IEA SHC Task
09:30 - 09:45 Coffee Break 1		
09:45 - 12:15 Session 1: Status of PVT collectors		
09:45	Lämmle, Kramer, Hadorn	Introduction
09:55	Keizer, SEAC	Study on available PVT products with a focus on the Dutch PVT market
10:15	Leibfried, Consolar	Solink heat pump collector
10:30	Giovanetti, ISFH	Development of unglazed PVT collectors
10:30 - 10:45 Coffee Break 2		
10:45	Lämmle, Piekarczyz, ISE	Development of glazed and unglazed PVT collectors
11:05	Jäger, Solvis	Development of glazed PVT collectors: status & challenges
11:20	Matuksa, CVUT	Glazed PVT with polysiloxane gel encapsulation: development, testing, monitoring
11:35	Cabral, SOLARUS	Low concentrating PVT collectors: Advantages & Challenges
11:50	Corina, SunOyster	SunOyster: High concentrating PVT system
12:00	Lämmle, Kramer, Hadorn	Wrap-Up
12:15 - 13:00 Lunch Break		
13:00 - 15:00 Session 2: Status of PVT systems		
13:00	Lämmle, Kramer, Hadorn	Introduction
13:10	Zenhäusern, SPF	PVT-Wrap-Up: Status of PVT systems
13:30	Witzig, ZHAW	Dynamic simulations of PVT systems
13:45	Brottier, DualSun	Field test results of unglazed PVT collectors in for DSHW and indoor swimming pools
14:00	Heßberger, PA-ID	PVT system concepts with unglazed PVT collectors
14:15	Kramer, Lämmle, ISE	Applications of unglazed and glazed PVT collectors
14:30	Alejandro, ABORA	PVT systems with glazed PVT collectors: Sports centre, University of Zaragoza, Nursing home
14:45	Lämmle, Kramer, Hadorn	Wrap-Up
15:00 Coffee Break 3		
15:30 - 17:00 Technical tours		
15:30	Arim Schäfer, ISE	System tests, PVT field
16:00	Fahr, Thoma, Mühlhöfer ISE	Testing of PVT collectors
16:30	Peter Engelmann, ISE	Visit of new town hall Freiburg
19:00 Workshop dinner (upon registration)		

Abbildung 49: Agenda des Workshops

2. Industry Workshop - kombiniert mit IEA Task 60 – Treffen (PVT Systems: Application of PVT Collectors and New Solutions in HVAC Systems) (gehalten von Dr. K. Kramer)
Eindhoven, 08.05.2019

3.5 UNTERSTÜTZUNG PA-ID

3.5.1 AP2: DEFINITION SYSTEMKONFIGURATIONEN UND SYSTEMREGELUNG (AP-LEITUNG: PA-ID)

Beschreibung des Arbeitspakets erfolgt in Kapitel 4 (Teilprojekt B).

Maßgebliche Zuarbeit durch Fraunhofer ISE erfolgte durch die kontinuierliche Abstimmung und Entwicklung der Projektfragestellungen. Es entstand eine große Auflistung an Fragestellungen (Aufgrund der Größe wurde entschieden, diese Tabelle nicht diesem Bericht anzuhängen). Es zeigte sich, dass ein Großteil der erarbeiteten Projektfragestellungen, sich dadurch erübrigten, da nachgewiesen werden konnte, dass PVT als einzige Wärmequelle für die Wärmepumpe ausreicht.

3.5.2 AP3: HARDWAREIMPLEMENTIERUNG VON NEUEN REGLERALGORITHMEN (AP-LEITUNG: PA-ID)

Beschreibung des Arbeitspakets erfolgt in Kapitel 4 (Teilprojekt B). Es erfolgte keine Zuarbeit durch Fraunhofer ISE.

3.5.3 AP5: SYSTEMOPTIMIERUNG UND AUSWERTUNGEN MIT ERWEITERTER POLYSUN-VERSION (AP-LEITUNG: PA-ID)

Beschreibung des Arbeitspakets erfolgt in Kapitel 4 (Teilprojekt A). Die maßgebliche Zuarbeit durch Fraunhofer ISE erfolgte in M 5.1 im **Rahmen der Vorbereitungen zur Bereitstellung der Simulationsumgebung für AP5**, durch

- Ausarbeitung des Konzepts zur Implementierung neuer Modelgleichungen in Polysun in enger Abstimmung mit ZHAW, Vela Solaris und PA-ID
 - o Diskussion der Implementierungsmöglichkeiten einer neuen Modellgleichung in die Software Polysun einschließlich notwendiger Voraussetzungen zusammen mit dem Projektpartnern Vela-Solaris und ZHAW.
 - o Diskussion und konkrete Erarbeitung eines Konzepts einer nutzerbasierten Implementierungsmöglichkeit mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms zusammen mit den Projektpartnern Vela-Solaris und ZHAW.
 - o Validierung des Tabellenkalkulationsprogramms mittels Messdaten, die zur Parameteridentifizierung verwendet wurden (mit Projektpartner PA-ID)
- Klären und Bereitstellen der Randbedingungen Klima und Last für die Simulationen in Anlehnung an Task 44/Annex 38 des Solar Heating and Cooling Program der Internationalen Energieagentur sowie Begleitung von PA-ID bei der Implementierung als Ansprechpartner.

In M 5.2 gab es eine enge Zusammenarbeit zwischen Projektpartner PA-ID und Fraunhofer ISE. Die ermittelten Parametersätze dienten für die Tabellenkalkulation, die als Eingabe für Eingabe in Polysun diente. Die Ergebnisse wurden mehrfach diskutiert und iteriert.

4 DARSTELLUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN ARBEIT - TEILPROJEKT B (PAID): REGLERENTWICKLUNG UND EVALUIERUNG VERSCHIEDENER SYSTEMKONZEPTE

4.1 AP2: DEFINITION SYSTEMKONFIGURATIONEN UND SYSTEMREGELUNG (AP-LEITUNG: PA-ID)

Ziel und Aufgabe von PA-ID ist es die zentralen Projektfragestellungen im Hinblick auf das Gesamtprojektziel zu präzisieren. Dazu werden im Hinblick auf AP 4 und 5 sinnvolle Systemkonfigurationen definiert.

AP 2	M2.1	Präzisieren der zentralen Projektfragestellungen im Hinblick auf Gesamtprojektziele/aktuelle Literatur u. Projektergebnisse abgeschlossen		x														
	M2.2	Definition sinnvolle Systemkonfiguration einschließlich Regelungskonzepten für AP4 abgeschlossen				x												
	M2.3	Definition sinnvoller Systemkonfigurationen, Vergleichssysteme und Simulations-Randbedingungen für AP 5 abgeschlossen						x										

M2.1

Prinzipiell ist mit Erstellung des zuvor beschriebenen Arbeitspapiers der M2.1 erfüllt. Es hat sich aber als sehr hilfreich und sinnvoll herausgestellt dieses Papier im Laufe des Projektes weiterzuführen und zu ergänzen, da sich während der Arbeit im Projekt automatisch weitere Fragen ergeben deren Beantwortung wichtige Erkenntnisse bringen werden.

M2.2

Eine sinnvolle Systemkonfiguration wurde mit Hilfe der Simulationssoftware Polysun auf Grundlage von Kundenanfragen und Erfahrungen entwickelt. Im Rahmen der Simulation wurden gleichzeitig erste Regelkonzepte getestet. Folgendes Schema ergibt sich nach der Optimierung der Simulationen unter Einbezug von Erfahrungen und Kundenanfragen.

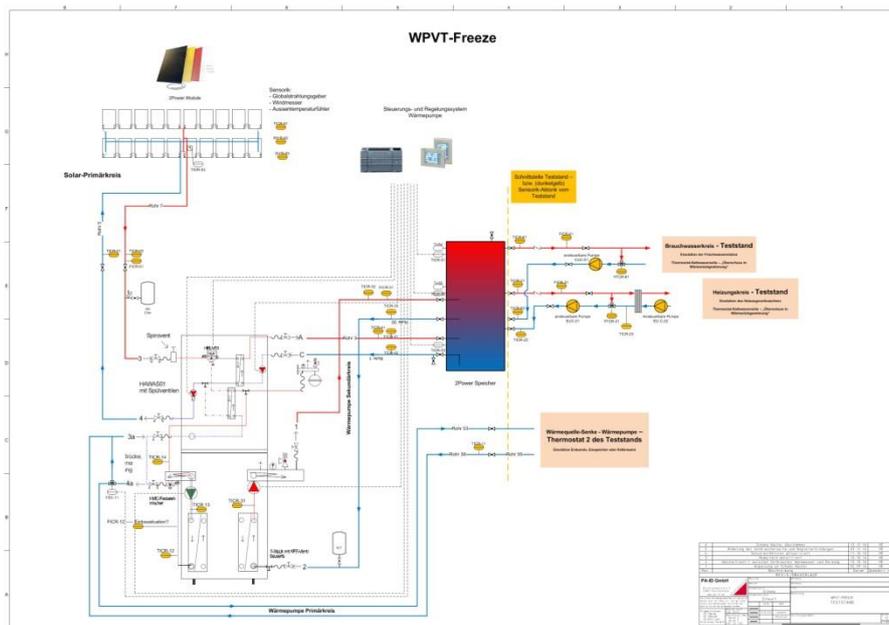


Abbildung 50: Hydraulikschema des WPVT-Freeze-Systems

Im Rahmen der Simulation wurden gleichzeitig erste Regelkonzepte getestet. Folgende Sensor-Aktor-Regelgeräte-Aufstellung hat sich für die oben definierte Systemkonfiguration ergeben:

S ARG-LISTE (SENSOR-AKTOR-REGELGERÄTE)										vorhanden, einsatzbereit		NEUBESCH. Oder andere Arbeit notwendig						
PROJEKTBEZEICHNUNG	WP/VT-Freeze	KREIS	SENSOR AKTOR	TAG	BAUGRUPPE / BAUTEILTYP	FUNKTION	In	OUT	BEMERKUNGEN	ART	Wer liefert?	vorhanden/Wenn Ja (Bez.) - oder NEUBESCHAFFUNG	Wo wird der Messwert erfasst (wofür notwendig)	Muss dies ein Sensortyp wie in Spalte "Funktion" geschr. sein? (ja/nein)	Kommentar	Erweiterung der Teststandssteuerung notwendig?	Neuer PT100 - Tauchfühler?	Welche Messstelle/ Steuerkanal ?
Solar-Prim	A: Pumpe	EUC-01	Umwälzpumpe: Solarkreis			Drehzahl 0-10V		1	max.: 12000h	E	Bestandteile Lieferung WP	-	Regler (interne Steuerung)	ja				
Solar-Prim	S: Temp.	TICR-01	Temperaturfühler Rücklauf Solarkreis			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	T_sol_p_in_st3	zur Bilanzierung (Teststand)	nein	Umbenennung, bisher T_dw_in_st3			6mm/2mm Sensor
Solar-Prim	S: Temp.	TICR-02	Temperaturfühler Vorlauf Solarkreis			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	T_sol_p_out_st3	zur Bilanzierung (Teststand)	nein	Umbenennung, bisher T_dw_out_st3			6mm/2mm Sensor
Solar-Prim	S: Temp.	TICR-03	Temperaturfühler Modultemperatur			TICR PT1000	1			E	Lieferumfang Kollektor	-	Regler (interne Steuerung)	ja				
Solar-Prim	S: Vol.	FICR-01	Solarkreis			FICR Impuls	1		max.: 12000h	E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	zur Bilanzierung (Teststand)	nein	4-20 mA Signal			122
Solar-Prim	A: Ventil	YSC-01	UmSchaltventil Direktbetrieb/Solelanhebung			YSC Auf/Zu		1		E	Bestandteile Lieferung WP	-	Regler (interne Steuerung)	ja				
WP-Prim	A: Pumpe	EUC-11	Umwälzpumpe: Primärkreis WP			Drehzahl 0-10V	1			E	Bestandteile Lieferung WP	-	Regler (interne Steuerung)	nein				
WP-Prim	S: Temp.	TICR-11	Temperaturfühler Rücklauf I Primärkreis WP			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	zur Bilanzierung (Teststand)	nein				1
WP-Prim	S: Temp.	TICR-12	Temperaturfühler Vorlauf Primärkreis WP			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	zur Bilanzierung (Teststand)	nein				1
WP-Prim	S: Temp.	TICR-13	Temperaturfühler Rücklauf II Primärkreis WP			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	zur Bilanzierung (Teststand)	nein				1
WP-Prim	S: Temp.	TICR-14	Temperaturfühler Rücklauf II Primärkreis WP (nach Notfall-Elektroheizstab)			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	Messortanweisung zur Bilanzierung (Teststand)	nein	zusätzlicher Sensor nach Teil mit Alban 161215 - nach Notfall-Elektroheizstab			1
WP-Prim	S: Vol.	FICR-11	Durchflussmesser: Primärkreis WP			FICR Impuls	1		max.: 2400	E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	zur Bilanzierung (Teststand)	nein	4-20 mA Signal			221
WP-Prim	A: Ventil	YSC-11	UmSchaltventil Wärmequelle/Senke			YSC Auf/Zu		1		E	Bestandteile Lieferung WP	-	Regler (interne Steuerung)	ja				
Heizkreis	A: Pumpe	EUC-21	Umwälzpumpe: Heizkreis 1			Drehzahl 0-10V	1			E	Beschaffung durch ISE	st2-Ezenter-schneckenpumpe	Steuerung Teststand	nein	st2-Pumpe (Teststandpumpe - durch FU angesteuert)			
Heizkreis	A: Pumpe	EUC-22	Umwälzpumpe: Heizkreis 1 - Thermostatselle			Drehzahl 0-10V	1			E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	Steuerung Teststand	nein	kann Standard Heizungspumpe sein	ja		
Heizkreis	S: Temp.	TICR-21	Temperaturfühler Vorlauf Heizkreis 1			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	T_heat_out_st3	zur Bilanzierung (Teststand)	nein	6mm/2mm Sensor			
Heizkreis	S: Temp.	TICR-22	Temperaturfühler Rücklauf Heizkreis 1			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	T_heat_in_st4	zur Bilanzierung (Teststand)	nein	6mm/2mm Sensor			
Heizkreis	S: Temp.	TICR-23	Temperaturfühler Rücklauf WT			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	Regelung 3-Wege-Mischventil	nein	EINTRAGUNG in Schema zwischen YFCR-21 und WT			1
Heizkreis	S: Vol.	FICR-21	Durchflussmesser: Heizkreis 1			FICR Impuls	1			E	Beschaffung durch ISE	V_dot_st2	Messortanweisung zur Bilanzierung (Teststand)	nein				321
Heizkreis	A: Ventil	YFCR-21	Mischventil Heizkreis 1			YFCR 230V		1		E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	Regler (interne Steuerung)	ja	Zapfung aus Speicher, Mischung mit Kaltwasser auf Zieltemp/Energemenge zum Rücklauf in Speicher	ja		
WP-Sek	A: Pumpe	EUC-31	Umwälzpumpe: Sekundärseite WP			Drehzahl 0-10V	1			E	Bestandteile Lieferung WP	-	Regler (interne Steuerung)	ja				
WP-Sek	S: Temp.	TICR-31	Temperaturfühler Vorlauf Sekundärseite WP (vor Notfall-Elektroheizstab)			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	Messortanweisung zur Bilanzierung (Teststand)	nein	zusätzlicher Sensor nach Teil mit Alban 161215 - nach Notfall-Elektroheizstab			1
WP-Sek	S: Temp.	TICR-32	Temperaturfühler Rücklauf Sekundärseite WP			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	T_aux_in_st3	zur Bilanzierung (Teststand)	nein	2mm ganze Länge -> neuer Sensor			1
WP-Sek	S: Temp.	TICR-33	Temperaturfühler Vorlauf Sekundärseite WP			TICR PT100	1			E	Beschaffung durch ISE	T_aux_out_st3	zur Bilanzierung (Teststand)	nein	aktueller Sensor defekt			1
WP-Sek	S: Vol.	FICR-31	Durchflussmesser: Sekundärseite WP			FICR Impuls	1		max.: 2400	E	Beschaffung durch ISE	NEUBESCH.	Messortanweisung zur Bilanzierung (Teststand)	nein	4-20 mA Signal			222
Solar-Sek	A: Pumpe	EUC-41	Umwälzpumpe: Sekundärseite Solarkreis			Drehzahl 0-10V	1			E	Bestandteile Lieferung WP	-	Regler (interne Steuerung)	ja				

Abbildung 51: Sensor-Aktor-Regelgeräte-Aufstellung

M2.3

Die erarbeitete Systemkonfiguration soll für verschiedene Anwendungsfälle und Standorte variiert werden. In erster Linie betrifft dies die Größe des Kollektorfeldes im Bezug auf die konventionelle Quelle für die Wärmepumpe. Dies ist auch im Arbeitspapier aus AP2 M2.1 berücksichtigt. Die Standorte und Systemgrößen sind noch nicht definiert.

Um eine bessere System-Vergleichbarkeit auch mit den Ergebnissen aus anderen Projekten zu ermöglichen wurde beschlossen über das im vorherigen Zwischenbericht beschriebene „Landkartenmodell“ hinaus die Simulations-Randbedingungen aus dem Projekt IEA SHC & HPP Task 44 zu verwenden.

Der Inhalt des Arbeitspakets 2.3 wurde dann nochmals geändert, da die Ergebnisse aus den Messungen am Teststand immer wieder Anregungen zur Systemoptimierung gegeben haben und die optimale Systemkonfiguration sich im Laufe des Projektes immer weiter entwickelt hat. Als Vergleichssysteme werden die weit verbreitete Luft-Wärmepumpe mit PV-Anlage herangezogen und als eine hoch effiziente Version die Sole-Wärmepumpe mit Erdsonde und ebenfalls einer PV-Anlage. Damit die Ergebnisse auch mit den Resultaten anderer Projekte verglichen werden können haben wir entschieden uns bei den Simulations-Randbedingungen an den IEA Task 44 anzulehnen.

Die Simulationsrandbedingungen sind:

Standorte:

- Helsinki
- Strasbourg
- Athen
- Davos
- Montreal
- Freiburg

Gebäudetypen je 140m² Bodenfläche:

- SFH 15
- SFH 45
- SFH 100

Warmwasserbedarf:

- M/324 tapping cycle M - 140 L/d at 45 °C

4.2 AP3: HARDWAREIMPLEMENTIERUNG VON NEUEN REGLERALGORITHMEN (AP-LEITUNG: PAID)

Arbeitspaket 3 – Hardwareimplementierung von neuen Regelalgorithmen

Es sollen Definition von Anforderungsprofilen für Systemregler unter der Berücksichtigung der in AP 2 erarbeiteten Ergebnisse gefunden werden. Weiterhin soll eine Hard- und Softwarearchitektur entworfen werden und in logische Funktionen und Algorithmen umgesetzt werden. Eine detaillierte Analyse des Anlagenbetriebs mit Archivierung aller relevanten Daten soll getätigt werden.

AP 3	M3.1	Definition Anforderungsprofil für Systemregler (AP 4) unter Berücksichtigung der potenziell interessanten Systemkonfigurationen aus M2.3 abgeschlossen.																			
	M3.2	Entwurf der Hard- und Softwarearchitektur sowie Überführung der Regelstrategien in logische Funktionen und Algorithmen abgeschlossen.																			
	M3.3	Implementierung der Logiken in funktionelle Hardware einschließlich Tests durchgeführt, Gesamtsystemregelung für AP4 bereitgestellt.																			

M3.1

Die beiden zur Wärmepumpe und Kollektoranlage zugehörigen Regler wurden analysiert und die zugehörige Dokumentation studiert. Beide sind frei programmierbar und prinzipiell geeignet. Aktuell unklar ist noch die Verwendung der Datenschnittstelle zum gemeinsamen Datenlogging in einer Datei.

Mit Hilfe der freiprogrammierbaren Steuerung in Polysun wurde versucht im Vorfeld die notwendigen Funktionen zu erstellen um alle Betriebsstände abzubilden. Dies ist gelungen, das zugehörige Ergebnis ist in AP 2.2 dokumentiert. Mit Hilfe dieser Simulation und den Funktionen wurden die Betriebsstände ermittelt und mögliche Regler Anforderungen erstellt.

Ein Ergebnis dieses Anforderungsprofils ist die Erkenntnis, dass ein Regler alleine die notwendigen Aufgaben nicht erfüllen kann. Deshalb wurde entschlossen eine Kombination aus dem Solarregler ES 6522 SZ und dem Regler der Wärmepumpe SE 6024 WPC einzusetzen. Die beiden Regler teilen sich Sensordaten und kommunizieren über den eBUS. Zusätzlich gibt es die Schnittstelle RC7000 zum PC zur Parametrierung der Regler sowie für die Datenerfassung.

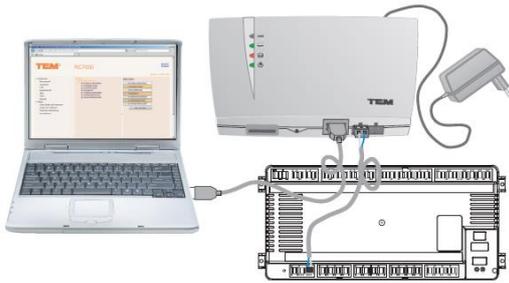
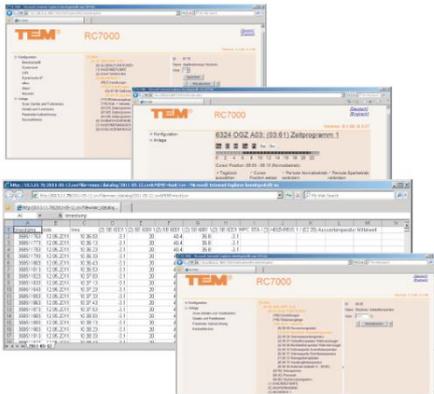


Abbildung 52: Kombination aus Solarregler und Wärmepumperegler



M3.2

Einzelne Funktionen wurden auf ihre gewünschte und tatsächliche Leistung geprüft, dabei wurden mögliche Fehler behoben und bestimmte Funktionen angepasst um die Betriebsstände optimal darstellen zu können.

Die einzelnen Bauteile wurden validiert. Verbesserungspotenzial wurde vor allem bei der Messdatenerfassung der Wärmepumpe identifiziert. Aufgrund dieser Analyse wurde die Absprache mit dem Hersteller der Wärmepumpe getroffen mehr Messstellen anzubringen um auf diese Weise mehr Daten aufzeichnen zu können.

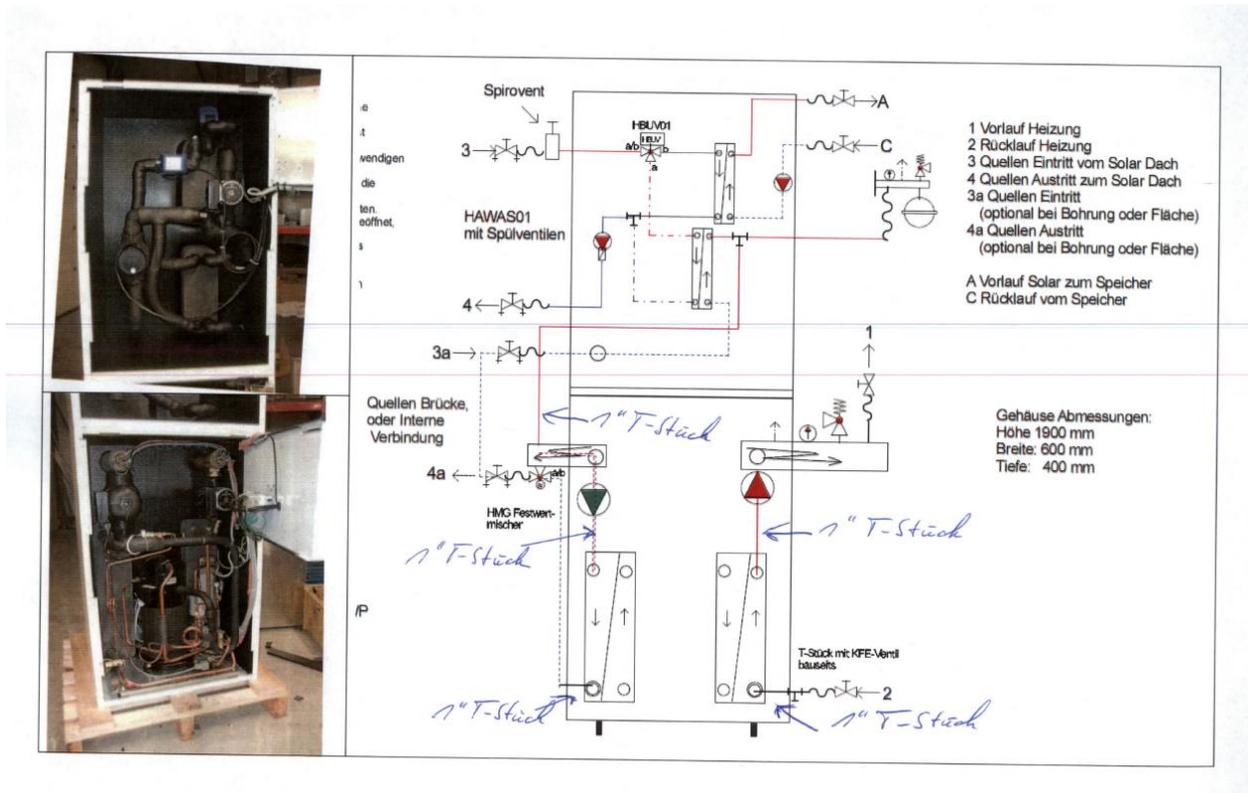


Abbildung 53: Schema Wärmepumpe

M3.3

Das Testsystem und die Steuerung konnten nach Beseitigung der bereits beschriebenen Schwierigkeiten beim Aufbau erfolgreich in Betrieb genommen und getestet werden. Die einzelnen Funktionen werden bei entsprechend anstehenden Schaltbedingungen zuverlässig ausgeführt so dass das Testsystem selbstständig ohne permanente Betreuung läuft und Daten aufzeichnet. Ein internes Highlight war der erfolgreiche Test der automatischen Abtaufunktion.

4.3 AP4:EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AM GESAMTAUFBAU (AP-LEITUNG: FRAUNHOFER ISE)

Aufgabe von PA-ID in diesem Arbeitspaket ist die Unterstützung bei der Erstellung einer Prüfmatrix sowie bei der Auswertung der Mess- und Modellierungsergebnisse.

AP 4	M4.1	Messtechnik für Systemprüfstand ausgewählt und beschafft; Erweiterungsmaßnahmen am Systemprüfstand abgeschlossen, Prüfmatrix in Übersichtsplan festgelegt.				x													
	M4.2	Aufbereitete Messdaten für Abgleich mit Polysun-Systemsimulation bereitgestellt.																	
	M4.3	Durchführung aller Messungen und Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die zu Projektbeginn formulierten Fragestellungen abgeschlossen.																	

M4.1

Als Unterstützung zur Planung des Systemprüfstandes wurden folgende Unterlagen von PA-ID erstellt:

- Fließbild des Prüfstandes
- Sensor-, Aktor-, Regelgeräteleiste
- Simulierte Temperatur-, Leistungs- und Durchflussverläufe um Grenzwerte zu definieren

Das erforderliche Material zum Aufbau des Kollektorfeldes sowie die dazugehörigen elektronischen Komponenten wie Wechselrichter, Energy-Meter und Homemanager wurden geliefert und aufgebaut.

Nach dem Kollektorfeld samt Zubehör wurden auch Wärmepumpe, Speicher, Steuerungen mit Zubehör geliefert und aufgebaut. Die Inbetriebnahme der gesamten Anlage hatte sich dann in der Folge mehrfach verzögert. Die Gründe hierfür waren mehrere Undichtigkeiten an der Wärmepumpe bzw. am Hydraulikmodul um welche zu beheben ein Kundendienstesatz des Herstellers notwendig wurde sowie die dann einsetzende Urlaubszeit in der eigentlich der Testbetrieb und die Messungen schon laufen sollte.



Abbildung 54: Anlagenaufbau des Fraunhofer ISE

Nach den im 3. Zwischenbericht geschilderten Verzögerungen konnte das Gesamtsystem erfolgreich in Betrieb genommen werden und die verschiedenen geplanten Messungen durchgeführt werden. Nach einigen Optimierungen an der Anlage konnte nicht nur Kondensatbildung, sondern auch Eisbildung auf der Moduloberfläche erzeugt werden. Auch die Messdatenerfassung läuft sowohl über das interne Datenerfassungssystem der Wärmepumpe als auch über die externen Messstellen des ISE.



Abbildung 55: PVT-Kollektoren auf dem Dach des Fraunhofer ISE

M4.2

Nachdem der Aufbau des Testsystems sich nochmals geändert hatte, wurde auch die Referenz-Simulationsstudie entsprechend überarbeitet, durchgeführt und die Ergebnisse an die Projektpartner übergeben.

M4.3

Erste Messreihen konnten aufgenommen werden und als übersichtliche Diagramme dargestellt werden um die Ergebnisse entsprechend besser interpretieren zu können.

Die Daten wurden aufbereitet an das Fraunhofer ISE übergeben.

Beispiel vom 04.02.2018:

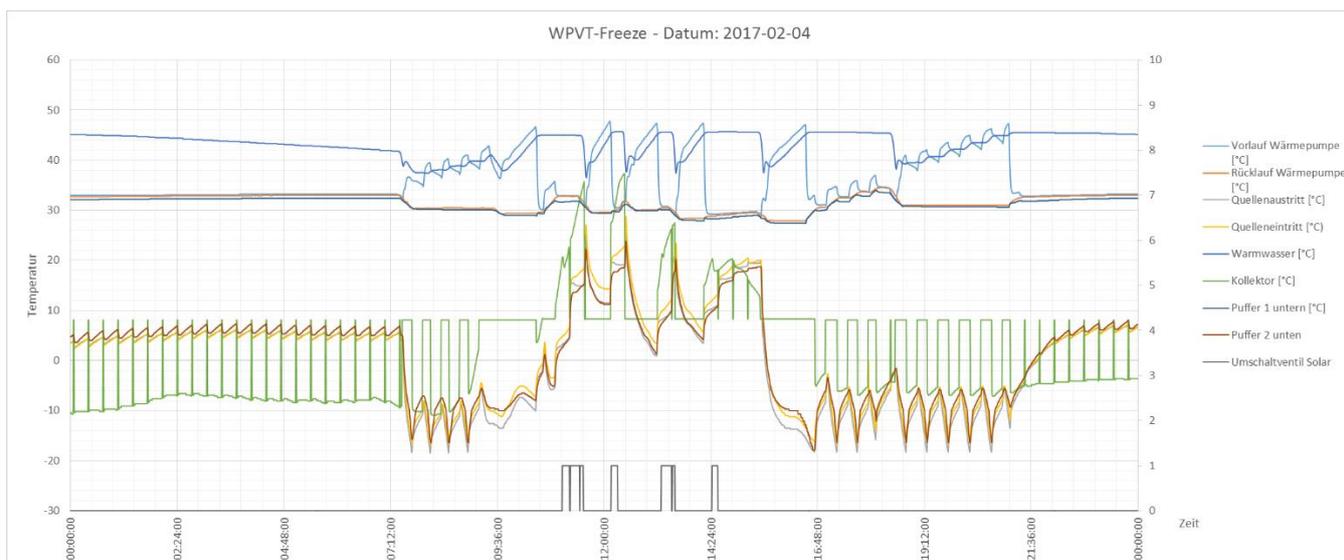


Abbildung 56: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit

Ein wichtiges Ziel während des Betriebs des Teststandes ist die Erreichung einer Eisbildung auf dem Kollektorfeld. Dieses Ziel konnte aktuell noch nicht erreicht werden. Anhand der Diagramme konnte festgestellt werden, dass am Wärmetauscher zwischen Solarkreis und Wärmepumpen-Primärkreis zu viel Temperatur verloren geht. Es wurde beschlossen den Wärmetauscher zu überbrücken und den Solarkreis direkt auf den Wärmepumpen-Primärkreis zu führen. Diese Maßnahme ermöglicht niedrigere Temperaturen im Solarkreis und damit auch im Kollektor und auf dessen Oberfläche.

Die gewünschten Messreihen konnten nach erfolgter Änderung durchgeführt und erfasst werden. Eine Interpretation der Messergebnisse sowie der Bezug zu den formulierten Projektfragestellungen wurden hergestellt.

Eine elementare Frage war, ob die herkömmliche Wärmequelle der Wärmepumpe vollständig durch PVT-Kollektoren ersetzt werden kann. Diese Frage konnten wir u.a. im Rahmen eines PVT-Workshops vom 15.05.2018 beim Fraunhofer ISE mit JA beantworten.

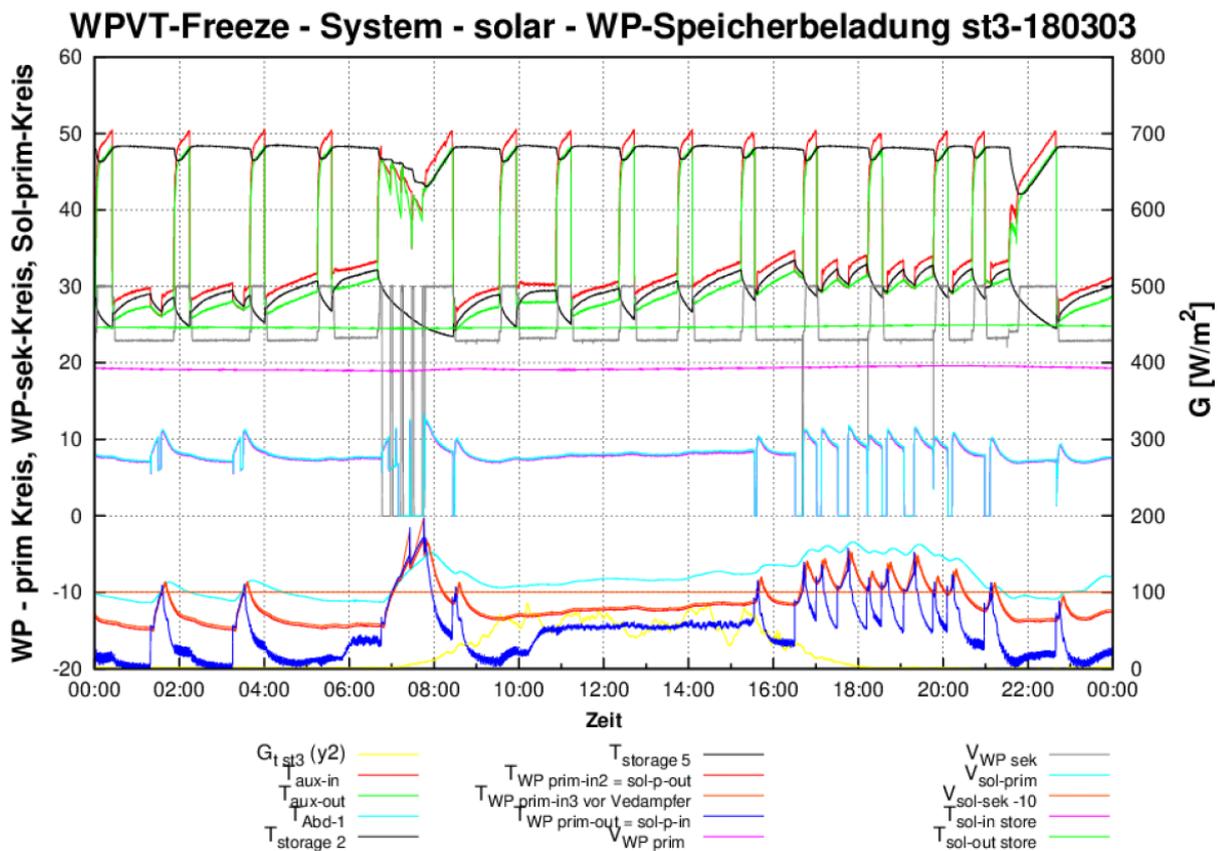


Abbildung 57: WP-Speicherbeladung

4.4 AP5: SYSTEMOPTIMIERUNGEN UND ,AUSWERTUNGEN MIT ERWEITERTER POLYSUN-VERSION (AP-LEITUNG: PA-ID)

Ziel im AP 5 ist es mit Hilfe des erweiterten Modells für PVT-Kollektoren die in AP2 definierten Systemkonfigurationen zu implementieren, zu simulieren und auszuwerten mit dem Ziel die gefundenen Anlagenkonfigurationen weiter zu verbessern sowie die Regelstrategien und Einstellparameter weiter zu optimieren. Auch soll eine Wirtschaftlichkeitsanalyse erstellt werden.

AP 5	M5.1	Erstellung aller Polysun-Simulationsprojekte auf Basis der Arbeiten von AP2 (M2.3) abgeschlossen.										X		
	M5.2	Abschluss aller Simulationsarbeiten und Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die zu Projektbeginn formulierten Fragestellungen abgeschlossen.												X

4.4.1 SYSTEMKONFIGURATIONEN

M5.1

Systemkonfiguration WPVT-Freeze Teststand ISE:

Eine erste Systemkonfiguration mit verbesserter Regelstrategie für das Test-Gesamtsystem wurde erstellt und ausgewertet. Hierbei wurde zunächst noch auf das herkömmliche PVT-Kollektormodell zurückgegriffen.

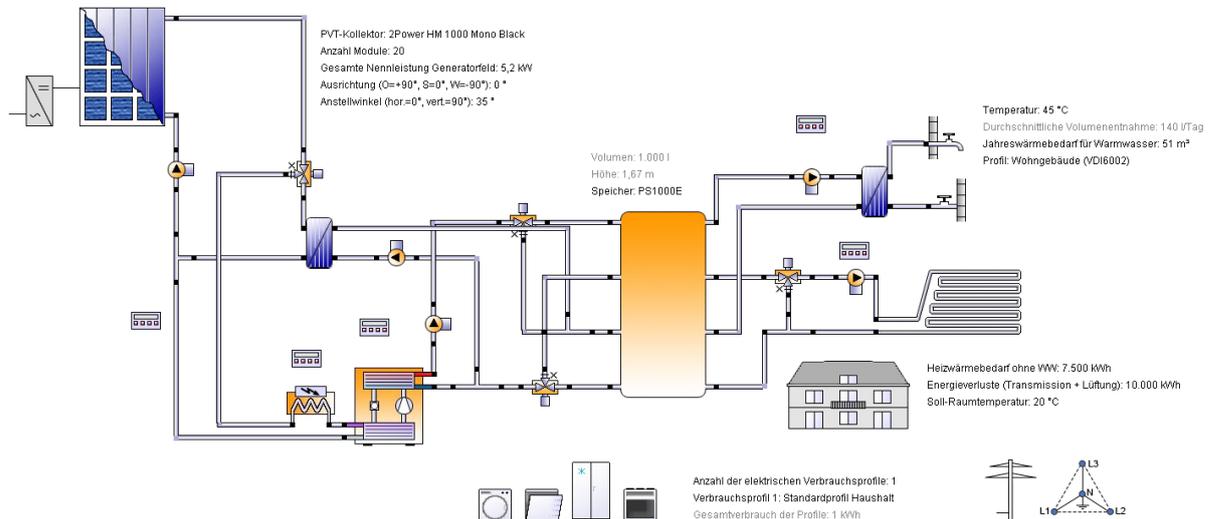


Abbildung 58: Systemkonfiguration WPVT-Freeze Teststand ISE

Systemkonfiguration WPVT-Freeze Optimiert:

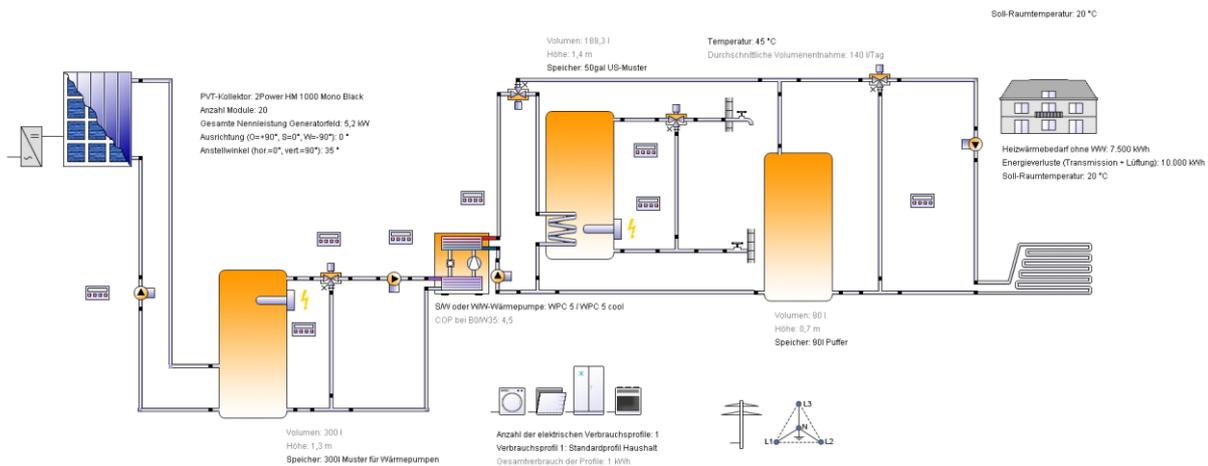


Abbildung 59: Systemkonfiguration WPVT-Freeze optimiert

Systembeschreibung:

Auf Anforderung durch den Wärmebedarf des Gebäudes, der über die Fußbodenheizung gedeckt wird oder auf Anforderung durch den Warmwasserverbrauch, der über einen 200l Warmwasserspeicher gedeckt wird, springt die Sole-Wärmepumpe an und liefert Wärme an die beiden Verbraucher. Der kleine Pufferspeicher an dem die Fußbodenheizung angeschlossen ist fungiert eher als hydraulische Weiche um, sollten die Heizkreise der Fußbodenheizung gedrosselt sein und nicht ausreichenden Volumenstrom bieten, der Sole-Wärmepumpe den notwendigen Volumenstrom sekundärseitig zu ermöglichen.

Primärseitig zieht die Sole-Wärmepumpe die notwendige Energie aus dem 300l Sole-Pufferspeicher. Um den zulässigen primärseitigen Temperaturbereich der Wärmepumpe abzusichern, begrenzt ein 3-Wege-Ventil die Temperatur nach oben hin. Das Unterschreiten der zulässigen Temperatur verhindert die Elektro-Heizpatrone im Sole-Pufferspeicher.

Der Solepufferspeicher wird durch die 2Power PVT-Kollektoren nachgeladen sobald die Modulaustrittstemperatur um einen definierten Betrag höher ist als die Sole-Pufferspeicher-Temperatur im unteren Bereich.

Vorteile gegenüber der Systemkonfiguration WPVT-Freeze Teststand ISE

Der wesentliche Vorteil des optimierten Systems liegt darin, dass gerade in Zeiten des erhöhten Wärmebedarfs (Heizperiode) auch die sehr niedrige Temperatur der 2Power PVT-Kollektoren in den Sole-Speicher geladen und zeitversetzt von der Wärmepumpe genutzt werden kann. In der Systemkonfiguration WPVT-Freeze Teststand ISE reicht das Temperaturniveau oft nicht aus, um den großen Pufferspeicher direkt zu beladen. Das niedrige oder sehr niedrige Temperaturniveau der Kollektoren kann nur während der Laufzeit der Wärmepumpe genutzt werden. In den Stillstandszeiten der Wärmepumpe bleibt das Wärmepotential ungenutzt. Dieser Nachteil wird mit dem Sole-Pufferspeicher behoben und steigert die Systemeffizienz erheblich.

Die Speicher auf der Sekundärseite der Wärmepumpe wurden stark verkleinert um Kosten und Platz zu sparen. Der Einfluss auf die Systemeffizienz ist gering, da der sommerliche Wärmebedarf für Warmwasser relativ gering ist und Energie im Überfluss vorhanden ist.

4.4.2 SIMULATIONEN ZUR VALIDIERUNG DES KOLLEKTORMODELLS

Zunächst wurde das erweiterte Kollektormodell in der Tabellenkalkulationssoftware Excel aufgestellt und validiert. Hierzu wurden die Wetterdaten und weitere Basisdaten aus realen Messreihen in Excel übertragen und dann das theoretische Ergebnis, also der Kollektorertrag mit dem realen Ertrag verglichen. Dieser Schritt wurde jeweils für die Wettersituation Sunny, Latent und Mixed durchgeführt. Für die jeweiligen Wetterbedingungen wurden von Fraunhofer eigene Parametersätze erstellt und übergeben:

Tabelle angepasst für Kommunikation PAID-ISE - für Simulationen AP5 - auf Basis von Tabellenblatt *models*

Aperturfläche= 1,570 m ²		Bezugsfläche bei der Parameteridentifikation			Stand: 12.06.2018			
Parameterbez.	Parameterbez. - Polysun/EXCEL-Tool	#51 sunny	#52 mixed	#53 latent	Einheit	Beschreibung	ISO 9086:2017 QDM equation	ISO QDM modifications/extensions
eta_0_beam		0,348	0,332	0,298	-	direct radiation conversion factor	G _b	(equal to ISO)
b0	noch zu klären (Ambrosetti, als Tabelle)	-0,055	-0,028	0 gesetzt	-	direct radiation IAM coefficient	$1 - (1/\cos(\theta_{\text{theta}_i}) - 1)^{G_b}$	(equal to ISO)
Ktd	keine Eingabe	1,059	1,212	1,527	-	diffuse radiation IAM	G _d	(equal to ISO)
a6	c6 (bu)	-0,038	-0,031	-0,021	s/m	wind dependency on eta_0_b	u ^G	(equal to ISO)
a1	c1 (b1)	-11,136	-8,372	-7,926	W/(m ² ·K)	convective (and conductive) losses/gains (calm)	T _m -T _{amb}	(equal to ISO)
a3	c3 (b2)	-4,485	-1,921	-1,571	J/(m ² ·K)	wind dependency on a1	u ⁿ (T _m -T _{amb})	(equal to ISO)
a4	c4	0 gesetzt	0 gesetzt	0 gesetzt	-	long wave radiation losses/gains	E _{L,net}	(E _L - σ(273,15°C+T _m) ⁴)
a5	c5 (dynamische Wärmekapazität)	-24236	-16341	-13777	J/(m ² ·K)	capacity losses/gains	(T _m (n)-T _m (n-1))/t _{meas_interval}	(equal to ISO)
a4,rear			0 gesetzt	0 gesetzt	-	rear long wave radiation losses/gains	-	(σ ⁿ (273,15°C+T _{amb}) ⁴ - σ ⁿ (273,15°C+T _m) ⁴)
a_lat	c7		4,403	4,864	l/Kg	latent heat	-	(2,417 ^{1000/T_m} - 1) · u _g · lat(T _m)
eta_0 (brutto)	eta_0	0,340	0,342	0,311	-			
eta_0 (aperture)	eta_0	0,352	0,342	0,322	-	global radiation conversion factor	-	

Thermal side

a4, rear wird nicht bestimmt, somit fällt diese Spalte weg

Abbildung 60: Parametersatz von Fraunhofer ISE

Folgende **Modellgleichung** wurde genutzt:

Siehe Kapitel [Modellgleichung erweitert](#)

Die Abweichung zwischen gemessenen und errechneten Werten für die Parametersätze beträgt:

- Sunny = 5,68 %
- Latent = 1,92 %
- Mixed = 27,29 %

Wir sehen das Modell sowie die Parametersätze für Die Wetterbedingungen Sunny sowie Latent als Validiert an und nutzen diese für weitere Berechnungen und Analysen. Das Modell und der Parametersatz Mix muss noch weiter analysiert werden und kann aktuell für weitere Berechnungen nicht eingesetzt werden.

4.4.3 JAHRESSIMULATION

Im nächsten Schritt wurden die Sunny Parameter in das Kollektormodell der Software Polysun übertragen und die zuvor beschriebene optimierte Systemkonfiguration mit dem Standort Strasbourg simuliert. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte auf Stundenbasis und die Wetterdaten sowie Kollektor-Temperaturen wurden aus Polysun extrahiert und in die validierte Exceltabelle zur detaillierten Berechnung übertragen. Um ein möglichst exaktes Ergebnis zu erhalten verfügt das Excel Berechnungstool über eine Parameterumschaltung. Sobald die Modultemperatur unter den Taupunkt fällt, wird der Parametersatz Latent zur Berechnung des Kollektorertrags herangezogen.

M 5.2

In bisherigen Anlagenkonzepten in denen PVT-Kollektoren zum Einsatz kamen, beispielsweise in Eisspeicherheizungssystemen, wurden die Kollektoren ausschließlich über Frosttemperatur betrieben. Eine erste wichtige Erkenntnis ist dass die Erweiterung des Temperaturbereichs bis -18°C einen deutlichen Energiegewinn bringt. In der zu Grund liegenden Anlagenvariante werden folgende Jahreserträge mit 12 Stück 2Power HM2000 Mono Black NI erzielt:

Über 0°C : 3.545,8 kWh/a (188,2 kWh/m²a)

Unter 0°C : 1.089,3 kWh/a (57,8 kWh/m²a)

Summe: 4.635,1 kWh/a (246,0 kWh/m²a)

Der von Polysun berechnete Wert beträgt 4.964 kWh/a (263,5 kWh/m²a)

Das bedeutet, dass allein durch die Erweiterung des Temperaturbereiches der Jahresertrag um etwa 30% gesteigert werden kann.

Ergebnis:

Mit der Erweiterung des Temperaturbereichs auf -18°C lässt sich der Jahresertrag um ca. 30% steigern.

4.5 UNTERSTÜTZUNG FRAUNHOFER ISE

4.5.1 AP1: ERWEITERUNG PVT-MODELL UND VALIDIERUNG (AP-LEITUNG: ISE)

Beschreibung des Arbeitspakets erfolgt in Kapitel 3 (Teilprojekt A).

Die maßgebliche Zuarbeit durch PA-ID erfolgte im Meilenstein M1.1 in Form von Planungsunterstützung bei Messtechnik und Prüfablauf sowie durch die Bereitsstellung eine 2Power PVT-Kollektors.

In Meilenstein M1.2 wurden die Messergebnisse durch PA-ID gegengeprüft und mit den bisherigen Messungen nach Solar Keymark verglichen.

In Meilenstein C erfolgte keine Zuarbeit durch PA-ID.

M1.2

Um die Validierung des erweiterten Kollektormodells auch mit einem nicht isolierten PVT-Kollektor durchführen zu können wurde von PA-ID eine spezielle Version des 2Power PVT-Kollektors gefertigt und zu Testzwecken dem Labor des ISE zur Verfügung gestellt.

4.5.2 AP4: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AM GESAMTSYSTEMAUFBAU (AP-LEITUNG: ISE)

Beschreibung des Arbeitspakets erfolgt in Kapitel 3 (Teilprojekt A).

Die maßgebliche Zuarbeit durch PA-ID erfolgte im M 4.1 im Rahmen von Planungsunterstützung bei der Definition der Messstellen, bei der Erstellung von Fließbildern und durch Zuarbeit beim Aufbau des Kollektorfeldes sowie der Wärmepumpe.

In Meilenstein M4.2. wurde durch PA-ID die internen Messdaten der Wärmepumpenanlage erfasst, aufbereitet und als ergänzende Daten übergeben.

In Meilenstein M4.3. erfolgte keine Zuarbeit durch PA-ID.

M1.1

Als Unterstützung zur Planung des Systemprüfstandes wurden folgende Unterlagen von PA-ID erstellt:

- Fließbild des Prüfstandes
- Sensor-, Aktor-, Regelgeräteliste
- Simulierte Temperatur-, Leistungs- und Durchflussverläufe um Grenzwerte zu definieren

Das erforderliche Material zum Aufbau des Kollektorfeldes sowie die dazugehörigen elektronischen Komponenten wie Wechselrichter, Energy-Meter und Homemanager wurden geliefert und aufgebaut

5 LITERATUR

- [1] Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung - Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (Version vom 30. Dezember 2014)
<http://www.bmbf.de/pubRD/6-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.pdf>
- [2] T. Vahlenkamp, L. Birnbaum, et.al., „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland - Sektorperspektive Gebäude“, McKinsey & Company, Inc,
http://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/dotcom/client_service/Sustainability/cost%20curve%20PDFs/Sektorbericht_Gebäude.ashx
- [3] [IEA SHC Task 44/Annex38] Abschlussveröffentlichung des IEA SHC Task 44/Annex 38 „Solar and Heat Pump“, Chapter 5 „Laboratoy test methods“, Antragsteller ist Hauptautor, Veröffentlichung steht unmittelbar bevor.
- [4] Florschuetz, L. W. (1979): Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. In: Solar Energy 22 (4), S. 361–366. DOI: 10.1016/0038-092X(79)90190-7.
- [5] Chow, T. T. (2003): Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. In: Solar Energy 75 (2), S. 143–152. DOI: 10.1016/j.solener.2003.07.001.
- [6] B. Perers, „An Improved Dynamic Solar Collector Model Including Condensation And Asymetric Incidence Angle Modifiers“, Eurosun 2010 - International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Graz, Österreich, 28.09.2010 - 01.10.2010 (2010).
sowie
Haller, Michael; Perers, Bengt; Bale, Chris; Paavilainen, Janne; Dalibard, Antoine; Fischer, Stefan; Bertram, Erik (2012): TRNSYS Type 832 v5. 00 „Dynamic Collector Model by Bengt Perers “:
- [7] M. Adam, K. Kramer, U. Fritzsche, S. Hamberger, „Verbundprojekt: Standardisierung und Normung von multifunktionalen PVT Solarkollektoren (PVT-Norm)“, Abschlussbericht, FKZ: 01FS12035 (2014).

- [8] H. Helmers, K. Kramer, „Multi-linear performance model for hybrid (C)PVT solar collectors“, Solar Energy, 92(2013), 313–322. doi:10.1016/j.solener.2013.03.003
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1300100X>
- [9] J.-C.h Hadorn (Editor), „Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings“, ISBN: 978-3-433-03040-0, (2015)
- [10] Energie Solaire S.A., „CHAUFFAGE PAR POMPE A CHALEUR SOLAIRE AVEC DES CAPTEURS SÉLECTIFS NON VITRÉS ET ACCUMULATEUR A CHANGEMENT DE PHASE“ Projektzwischenbericht, FKZ: OFEN N° SI/500'481 (2011).
<http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000010908.pdf&name=000000290681>
- [11] U. Najeeb Mughal and M. Shakeel Virk, „Atmospheric Icing Sensors – An Insight“, SENSORCOMM 2013: The Seventh International Conference on Sensor Technologies and Applications, Barcelona, Spanien, 25.08.2013 - 31.08.2013 (2013)
- [12] T. Richards, „ON Wing Ice Detection and Monitoring System“, Abschlussbericht Projekt ON-WINGS, FKZ: ACP8-GA-2009-233838 (2012).
- [13] L. Fierz, A. Witzig, et.al., SIMULATION MODULIERENDER WÄRMEPUMPEN, Schlussbericht Projekt Bundesamt für Energie, Dezember 2013.
http://www.velasolaris.com/files/schlussbericht_polysun_integration_lw_wp.pdf
- [14] Adam, M., Wirth H.P., Radosavljevic, R., Abschlussbericht zum Vorhaben Standardisierung und Normung von multifunktionalen PVT Solarkollektoren (PVT-Norm, Förderkennzeichen: 01FS1203), FH-Düsseldorf (2014)
- [15] M. Bunea, B. Perers, S. Eicher, C. Hildebrand, J. Bony, S Citherlert
„Mathematical modelling of unglazed solar collectors under extreme operating conditions“, Solar Energy 118 (2015) 547-561

Relevante Standards zum Zeitpunkt des Projektes:

DIN EN 12977:2012-06 „Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kundenspezifisch gefertigte Anlagen“

6 ANHANG A: ÜBERSICHT ZU RELEVANTEN FORSCHUNGSPROJEKTEN ZUM ZEITPUNKT DER ANTRAGSTELLUNG

Farblegende:

Für die vorliegende Vorhabens Beschreibung wurden in jeweiligen Projekt relevante Inhalte...		
...nicht speziell betrachtet, Projektergebnisse sind aber dennoch relevant, übertragbar, wichtig	... betrachtet und im Projekt untersucht (nicht Hauptprojekthalt)	- PVT-Kollektor/System ist wesentlicher Projekthalt
ISE Projekt		

Tabelle 10: Übersicht zu relevanten Forschungsprojekten

Wann	Wer	Projektname	Inhalte / Arbeitspakete	Untersuchte(s) System(e)
2012-2016	SPF (CH), SERC (SE), CEA INES (FR), CTU (CZ), IWT (AT), Regulus, Ratiotherm, Viessmann, Energie Solaire	MacSheep New Materials and Control for a next generation of compact combined Solar and heat pump systems with boosted energetic and exergetic performance	"The goal is to achieve 25% energy savings compared to current state of the art systems, with still competitive prices on the market." Vorgehensweise: Systematischer Ansatz - Recherche technische Möglichkeiten bei Systemkomponenten (gleichzeitig ökonomische Betrachtung!) auf Potenziale, danach Auswahl sog. technische "Breakthrough"-Techniken. - Harmonisierung mehrerer Systemtest-Prüfmethoden	Entwicklung, Vermessung und Bewertung von drei vielversprechenden Systemvarianten → Eines davon wird vermutlich mit PVT-Kollektoren ausgestattet sein
2013-2015	Fraunhofer ISE Solvis GmbH & Co. KG (BMWfi)	PVTgen2 Entwicklung und Pilotfertigung eines abgedeckten Photovoltaisch - Thermischen Hybrid-Kollektors der zweiten Generation mit verbesserter thermischer Leistungsfähigkeit	Das Ziel des laufenden Projektes ist die Entwicklung eines gegenüber dem Stand der Technik deutlich verbesserten „abgedeckten“ PVT-Kollektors zweiter Generation mit kompletter PVT-Systemtechnik sowie Konzeption, Planung und Aufbau einer Pilotlinie zur Fertigung des PVT-Kollektors. Im Rahmen des Projektes werden mehrere wissenschaftliche Teilfragen bearbeitet mit folgender Zielsetzung: - Low-E-Schicht: Optimierung einer Low-E-Schicht - Optimierter Aufbau Modul-Absorberverbund - Vakuumtechnik: Entwicklung eines PVT-Kollektors mit regelbarem U-Wert - Alternative Stagnationsschutzkonzepte: Zusätzlich zum Vakuumkonzept werden alternative Stagnationsschutzkonzepte experimentell untersucht und ihre Praxisfähigkeit bewertet - Sicherheits- und Funktionsprüfungen: Erarbeiten neuer Prüfverfahren für PVT-Kollektoren	Basierend auf den geeignet identifizierten Marktsegmente in PVT-max, sowie den spezifischen Anforderungen an abgedeckte PVT-Kollektoren hinsichtlich Temporniveau und Stagnationssicherheit fokussiert sich die Entwicklung auf folgende Systeme: - Trinkwassererwärmung und Kombisystem im Einfamilienhaus - Trinkwassererwärmung und Kombisystem im Mehrfamilienhaus - Low-Ex Konzepte in Kombination für Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern mit Erdspeicher und Wärmepumpen

Wann	Wer	Projektname	Inhalte / Arbeitspakete	Untersuchte(s) System(e)
2013- 2014	Fraunhofer ISE, FH-Düsseldorf, Solarzentrum Allgäu, TÜV Rheinland	PVT-Norm Standardisierung und Normung von multifunktionalen PVT Solarkollektoren	Ziel: Erstellung eines Vorschlages für eine Prüfprozedur für PVT-Kollektoren und ihre Einbringung in die einschlägigen Normungsgremien - Marktrecherche - Modellerweiterung zur besseren Abbildung - Simulationsstudie zur Erfassung der Betriebszustände von PVT-Kollektoren	Je Konfig. mit abgedeckten und PVT-Kollektoren evaluiert: - Parallel: PVT-Kollektor + Kessel, Kombispeicher - Parallel/Seriell: PVT-Kollektor + WP (solar als Wärmequelle), Kombispeicher - Parallel/Seriell/Regenerativ: PVT-Kollektor + WP (Solar + Erdsonde als Wärmequelle), Kombispeicher
2013	HTW Berlin	Masterarbeit	- Simulationsstudie: Abschätzung der Einsatzmöglichkeiten eines einfachen Heizstabs zur Nutzung von Überschussstrom aus PV-Anlagen unterschiedlicher Größe für die Brauchwarmwassererwärmung	Standard-Kombianlage mit PV-Modulen statt solarthermischen Kollektoren sowie System mit WP
2012- 2014?	SPF (CH)	HighIce	Identifikation effizienter Systemkonfigurationen - Modellerweiterung Eisspeicher (Wärmetauschher) - Experimentelle Untersuchungen - Simulationsstudien	Sonnenkollektoren, Wärmepumpen Eisspeicher, Abwasserwärmrückgewinnung
2012	Marc Bättschmann, Meyer Burger AG	Einbindung von PV/T Kollektoren in erdsondengekoppelte Wärmepumpen-Systeme (500735)	Wegbereitung zur Praxistauglichkeit sowie Verifizierung des Potentials von Niedertemperatur- PV/T-Kollektoren und Einbindung in die Gebäudetechnik mit Wärmepumpe und Erdsonde	PV/T-Kollektoren, Wärmepumpe mit Erdsonde
2011-2015	Fraunhofer ISE, mehrere Industriepartner mit Prüflingen	Q-Trafo: Kompetenzzentrum Wärmetransformation	1 Entwicklung von Komponenten/Systemen 2 Charakterisierung von Wärmetransformationssystemen (WTS) im Labor und Erweiterung von Bewertungsverfahren für WTS 3 Evaluierung von WTS in Feldtests	<u>Experimentelle Vermessung:</u> - WP/Kältemaschinen mit versch. Antrieben (Gas, Heißwasser, Stromnetz, PV) <u>Simulationsstudie:</u> 4 Varianten 1 - Referenz: Luft WP Kombispeicher 2 Parallel: Solarkoll. 3 Parallel/Seriell, Quellseitig Pufferspeicher 4 Wie 3, nur mit PCM Speicher
2011	Energie Solaire SA	PACSOL ESSA: Chauffage par pompe à chaleur solaire avec des capteurs sélectifs non vitrés et accumulateur à changement de phase (500481)	Monitoring einer Pilotanlage im Feld und Auswertung des Verhaltens	Serielle arbeitende Anlage mit unabgedeckten selektiv beschichteten Kollektoren und Eisspeicher
2010-2014	Institut für Solartechnik SPF	Sol-HEAP - Solarthermie-Wärmepumpen-Kombisysteme (500494)	- Evaluation ST+WP Kombination mit Hilfe experimenteller Messungen --> Erweiterung Systemprüfmethode CCT für Wärmepumpen - Frage: Unter welchen Umständen ist eine quellenseitige Einbindung der Solarenergie energetisch vorteilhaft?	11 ST + W P + Kombispeicher, 7 Parallel, 4 Parallel/Serial, davon mit 2 mit Solarenergie als alleinige Wärmequelle, (kein PVT)

Wann	Wer	Projektname	Inhalte / Arbeitspakete	Untersuchte(s) System(e)
2010-2014	ITW Uni Stuttgart, General Solar Systems, Prometall-Fertigungstechnik, Schüco International, Viessmann	WP-Sol: Leistungsprüfung und ökologische Bewertung von kombinierten Solar-Wärmepumpenanlagen	In Situ Messungen (Feldtests) - Entwicklung eines Leistungsprüfverfahrens am Wärmepumpenprüfstand (Erweiterung CTSS-Methode für Wärmepumpen) - Simulation von Wärmepumpen unter dynamischen Betriebsbedingungen - Simulation des Jahresenergieertrags von kombinierten Gesamtsystemen - Validierung der mathematischen Modelle anhand von Messdaten - Erstellung von Ökobilanzen und primärenergetische Beurteilung - Modellierung von Kondensations- und Eisbildungsprozessen an Solarkollektor und Verdampfer der Wärmepumpe	Anlagen in Feldmessungen 1) Air/water split heat pump with solar thermal flat plate collectors and condensing gas boiler (hybrid system) 2) Air/water split heat pump with flat plate collectors and hydraulic platform 3) Brine/water heat pump with ice store, solar thermal flat plate collectors and "solar-air"-absorbers 4) Brine/water heat pump with borehole heat exchangers, flat plate collectors, extra brine storage, regeneration, passive cooling 5) Air/water heat pump, solar thermal flat plate collectors, stratifying load device 6) Brine/water heat pump with solar roof tile collectors and geothermal heat source
2010-2014	Institut für Solarenergieforschung - ISFH	Geo-Solar-WP „Hocheffiziente Wärmepumpensysteme mit Geo- und Solarthermie-Nutzung“	Teilprojekt ISFH: - Modellentwicklung Erdwärmesonde auf Basis experimenteller Messungen - Simulationsstudie, Standort Straßburg (T44), verschiedene Regelungskonzepte	Erdwärmesonden, quellenseitige, senkenseitige und kombinierte Solareinbindung, weitere Unterkonfigurationen, weitere Untersuchungen mit Luft als Wärmequelle (Kein PVT)
2010- 2013	AEE INTEC, IWT TU Graz, SOLution - Greiner RE, Ochsner Wärmepumpen	Sol-Pump-Eff Hocheffiziente Kombination von Solarthermie und Wärmepumpenanlagen	- Untersuchung: Existierende Systemkombinationen - Feldmessungen - Messungen im Labor: Untersuchung unterschiedlicher Strategien zur Einbindung der Solarenergie, Taupunktverhalten bei abgedecktem Kollektor - Entwicklung von Simulationsmodellen (WP, Eisspeicher) - Umfangreiche Simulationsstudien - Ökologische & wirtschaftliche Bewertung (VDI 2067)	Experimentelle Messungen: - Unterschiedliche Einbindung der Solarenergie Simulationsstudien: - Ohne Solar und mit abgedeckten Kollektoren (Parallel): Luft/Erdreich-WP, Puffer bzw. Kombispeicher - Serielle Systeme: 1 - Unabgedeckte Koll. als einzige Wärmequelle 2 - wie 1 mit zusätzl. kleinem Eisspeicher 3,4 - Luft-WP mit untersch. Solareinbindung, 5,6 - Pellet,-Gaskessel Feldmessungen: - 6 versch. P und PS Systeme
2010 - 2012	Fraunhofer ISE Solvis GmbH & Co. KG (DBU)	PVTmax Photovoltaisch-thermische Kollektorsysteme mit maximiertem Gesamtertrag	Ziel des Projektes PVTmax war es, mögliche Lösungsansätze zur Weiterentwicklung von PVT-Kollektoren und PVT-Anlagen zu entwickeln, die die folgenden Anforderungen erfüllen: • hohe solarthermische Effizienz (Raumheizungsunterstützung) • hohe Flächeneffizienz (Stromertrag, Wärmeertrag) • Einfach Installation und Betrieb, hohe Betriebssicherheit • architektonisch ansprechende Integration in Dach bzw. Fassade <u>Inhalte Abschlussbericht:</u> - Untersuchung und Bewertung PVT-Systemkonzepte	Im Abschnitt „Untersuchung und Bewertung PVT-Systemkonzepte“ des Abschlussberichts werden sinnvolle Einsatzbereiche sowie Marktsegmente für PVT-Kollektoren vorgeschlagen und mit Simulationen vertieft. Dabei geht es primär um den Vergleich: ST+PV vs. PVT.

Wann	Wer	Projektname	Inhalte / Arbeitspakete	Untersuchte(s) System(e)
			<ul style="list-style-type: none"> - Solarzellentechnologien - Modul-Absorberverbund (MAV) - Kollektorkonstruktion - PVT Prototyp mit Low-e-Schicht - Vakuumisolierter PVT-Prototyp-Kollektor 	
2008-2011	Fraunhofer ISE EDF -Electricité de France	PVTcol Experimental development and simulation investigation of a Photovoltaic-Thermal hybrid solar collector	Fraunhofer ISE und EDF kooperierten im Rahmen der Dissertation von Patrick Dupeyrat mit dem Ziel der experimentellen und simulativen Entwicklung photovoltaisch-thermischer Hybridkollektoren. Durch Verbesserung von Laminierungsprozessen und -materialien wurde ein äußerst effizienter abgedeckter PVT-Kollektor entwickelt und getestet. Der thermische Übergang von Zelle ins Fluid wurde durch Direktlamination der Zelle auf einen flachen Absorber realisiert.	Systemsimulationen in TRNSYS wurden für Trinkwassererwärmungsanlagen an vier verschiedenen Standorten in Frankreich durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass der PVT-Kollektor vorteilhaft gegenüber Standardsystemen unter energetischen, exergetischen als auch unter Umweltaspekten abschneidet.
2004- 2008	ISFH, RHEIN-ZINK GmbH & Co. KG (DBU)	UMSys - Unverglaste Metalldach-Sonnenkollektoren in Wärmeversorgungssystemen	Vermessung zweier Pilotanlagen, Messungen am Teststand, begleitende Simulationen durchgeführt, Prüfung der Auslegung für Hydraulik und Regelung	R/S Konzept mit Erdsonde, ungedeckter Metalldachkollektor
2008-2011	ISFH, GEFGA (BMU)	Bi-Solar-WP Solare Gebäude-Wärmeversorgung mit unverglastem PVT Kollektor, Erdsonde und Wärmepumpe für 100% solaren Deckungsanteil	<ul style="list-style-type: none"> - Vermessung und Bewertung der BiSolar-WP Pilotanlage - Ermittlung des photovoltaischen Mehrertrags aufgrund der niedrigeren Temperaturen im PVT-Kollektor und der Stromersparnis an Wärmepumpen durch die eingebrachte Wärme des PVT-Kollektors. - Charakterisierung und Bewertung verschiedener PVT-Kollektortypen an outdoor Testständen des ISFH - Modellentwicklung eines Kollektor-Simulationsmodells und Erstellung und Verifizierung eines Referenzanlagen-Simulationsmodells zur Systemoptimierung und Auslegung 	siehe Blatt Rheinzink und Bisolar R/S Konzept mit Erdsonde, PVT-Kollektor
2008	FH Ingolstadt	Kurzstudie Niederst- und Niedertemperatur-kollektoren (DSTTP)	<ul style="list-style-type: none"> - Marktüberblick: Kollektoren und Systemkonfigurationen - Einsatzbedingungen für Kollektoren 	PVT-Kollektoren
2007-2009	Jointly Ratio-therm Heizung	Solares Heizen mit WP und Latentwärmespeicher (BMBF)	<ul style="list-style-type: none"> - Marktüberblick: Kollektoren und Systemkonfigurationen - Einsatzbedingungen für Kollektoren 	Parallel/Seriell (Abgedeckte ?) Solarkollektoren, Wärmepumpe, Kombispeicher, Eisspeicher
2003-2005	gostadt, Ratiotherm Heizung u. Solartech	Solares Heizen mit Wärmepumpe und Latentwärmespeicher (BMW Projekt)	- Produktentwicklung: Wahl Komponenten, Dimensionierung...	Parallel/Seriell (Abgedeckte ?) Solarkollektoren, Wärmepumpe, Kombispeicher, Eisspeicher

Weitere Untersuchungen/relevante Literatur

[Phillippen, Frank et al 2011] Einfluss der Neigung auf den äusseren konvektiven Wärmeübergang ungedeckter Absorber

[A. Abdul-Zahra, T. Faßnacht, A. Wagner] EVALUATION OF THE COMBINATION OF HYBRID PHOTOVOLTAIC SOLAR THERMAL COLLECTORS WITH AIR TO WATER HEAT PUMPS, Eurosun, 2014

[Dypeyrat, Menezo et. al. 2014] Dupeyrat, P., Ménéz, C., & Fortuin, S. (2014). Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system. Energy and Buildings, 68(2014), 751–755. doi:10.1016/j.enbuild.2012.09.032

[Haller 2013] Haller, M. Y. (2013). Präsentation: Solar and Heat Pump Systems - A Question of Technology? September 23, Solar Heating & Cooling conference, Freiburg.

[Haller, Frank 2014] Haller, M. Y., Frank, E. (2014). Solarwärme & Wärmepumpen - Interpretationen der Simulationen des IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38. In OTTI - 24. Symposium Thermische Solarenergie.

[Phillippen, Frank et al 2011] Einfluss der Neigung auf den äusseren konvektiven Wärmeübergang ungedeckter Absorber

7 ANHANG B: RECHERCHE „EISMESSTECHNIK“

Im Rahmen des Projektes war das Ziel eine Aussage über das Potential von Kondensat und Eis im Betrieb eines PVT-Wärmepumpen-Systems zu machen.

Ursprünglicher Ansatz war es, Messtechnik zu finden, die eine quantitative Aussage über die Eisbildung machen kann. Eine intensive Recherche ergab hier kein zufriedenstellendes Ergebnis. Auch eine Aussage über die Eisschichtdicke alleine gibt noch keine Auskunft über die Beschaffenheit des Eises.

Weitere Überlegungen gingen in die Richtung, eine qualitative Aussage der Eisentstehung machen zu können. Dies sollte mittels Kamerabilder während der gesamten Messperiode sein. Es war notwendig, einen Zeitschritt für die Bildaufnahmen zu finden, der einerseits hoch aufgelöst genug ist, um die aussagekräftigen Veränderungen zu dokumentieren, ebenso ein verhältnismäßiges Datenvolumen zu generieren.

Eine Recherche zu Kameras wurde durchgeführt. Folgende Kamera kam zum Einsatz:

AXIS Q6035 PTZ Dome Network Camera

Ebenso wurden drei LED-Strahler für Nachtaufnahmen eingesetzt.



Kamera (vorne rechts) installiert. Dokumentation von Kondensat und Eis (Bild / 20sec)



Strahler für Nachtaufnahmen

8 ANHANG C: PRÜFMATRIZEN

8.1 PRÜFMATRIX – AP1 – EINZELMODULVERMESSUNG IN KLIMAKAMMER

Kollektortyp	Anstellwinkel [°]	Ziel der Messequenz	Diagramm [Nr.]	Zeitraum Messung	Sollwertvorgaben				
					T _{amb} [°C]	rF [%]	U _{Wind} [m/s]	T _{in} [°C]	m _{bkt} [kg/h]
Selber Kollektortyp wie im Testsystem verbaute Module rückseitig isoliert thermisch geringe Anbindung des Rohrregisters an das PV-Modul (PA-ID)	35°	1. Wärmeverluste/-gewinne linear OHNE Kondensation - Variation Bewindung 2. Validität der Messung (Prüfung Nulldurchgang)	1,2	2.-3. Jun.	20	20	0	5 bis 35	60
				7.-8. Jun.		30	3		
				9.-10. Jun.		30, 80	4,5		
				19. Jun.			1,5		
		Erster Kondensationsversuche - ohne Bewindung		11. Jun.		80	0		
		Bestimmung Wärmeverluste und -gewinne bei einsetzender Kondensation, kein Bewindung		12.-14. Jun.					
		Bestimmung Wärmeverluste und -gewinne bei einsetzender Kondensation, kein Bewindung		14.-15. Jun.					
		Bestimmung Wärmegewinne - Kondensation - Bewindungsgeschw. Variiert		16.-17. Jun.					
				15.-16. Jun.			3		
				16. Jun.			4,5		
	Wärmeverluste linear und Kondensation T _{amb} = 10°C (ohne Bewindung)			10	?	0			
	Wärmeverluste linear und Kondensation RF 50 % (ohne Bewindung)			70	50	0			
	Wärmeverluste linear und Kondensation RF 70 %, Variation Wind				0				
					1,5				
					3				
	Wärmeverluste linear und Kondensation RF 80 % (Wdh.) Variation Wind			20		0			
		Wärmeverluste linear und Kondensation Wanne undicht					1		
							2		
							3		
				80		2,7			
Wärmeverluste linear und Kondensation Neuer Anstellwinkel, Variation Bewindung			4,3						
			0						
			1,8						
75°	Wärmeverluste linear und Kondensation mit Öl, Variation Bewindung				2,7				
					4,3				
					0				
	wie oben				?				
	wie oben				0..1				
					0..2				

Prüfplan für die Einzelmodul-Messungen in der Klimakammer.

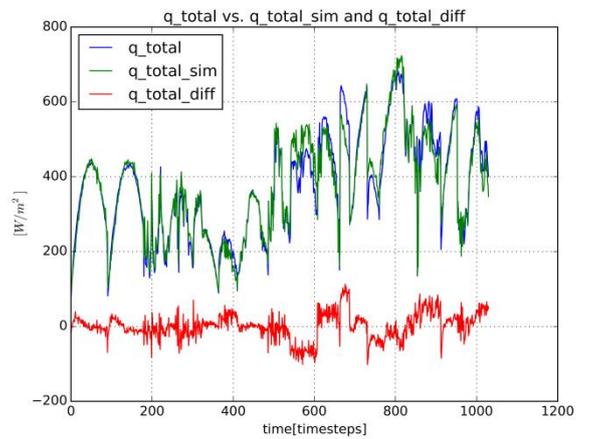
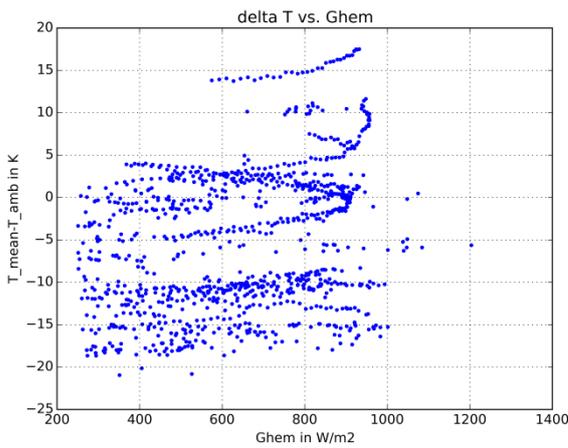
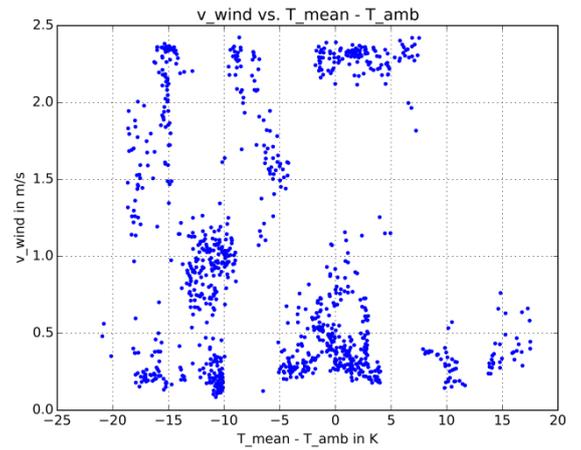
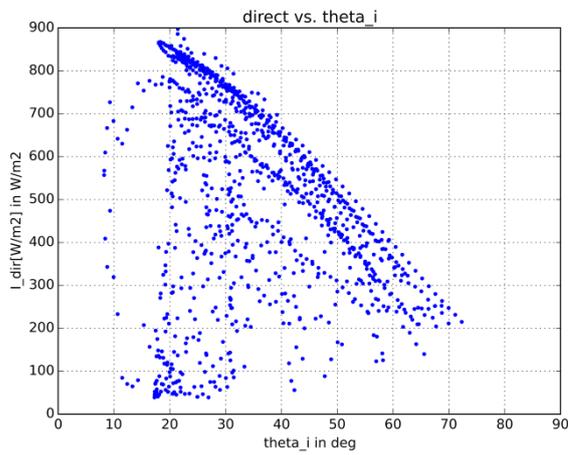
8.2 PRÜFMATRIX – AP1 – EINZELMODULVERMESSUNG AM AUßENPRÜFSTAND

Day	Date measurement	Hours	Outcomes	Day measurement	Tin	Ta	RH	Uv	Ur	Tout	Tfip	Tdp	Ts,m	Ts,g	G	Id	EI	Vmpp	Impp
		hr	ISO 9806 measurement: Identify Parameters c1, c2, c3, c4, c5, c6, n _{0,ther} , HuK Electrical Parameters	Clear Day Clear Day Clear Day Clear Day Partially Clouded Day Partially Clouded Day Partially Clouded Day Partially Clouded Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day	10 10 15 15 20 20 20 25 25 25 25	Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin Ta<Tin	- - - - - - - - - - - -	1.5 3 1.5 3 3 4.5 7 1.5 3 4.5 7	m/s - - - - - - - - - - -	°C C C C C C C C C C C	°C - - - - - - - - - - -	°C M M M M M M M M M M M	°C - - - - - - - - - - -	W/m ² 500>G>300 500>G>300 500>G>300 300>G>100 300>G>100 300>G>100 300>G>100 300>G>100 300>G>100 300>G>100 300>G>100 300>G>100	W/m ² ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300	W/m ² M M M M M M M M M M M	W M M M M M M M M M M M	V A M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M M M
			Condensation Parameter (Ccond) and condensation mass estimations from front and back & HuK Electrical Parameter	Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Night Partially Clouded Night Clear Night	[-2,0] [0,3] [-2,0] [0,3] [-2,0] [0,3] [-2,0] [0,3] [-2,3] [-2,3] [-2,3]	80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100 80<RH<100	1.5 1.5 3 3 4.5 4.5 7 7 1.5, 3, 5, 7 1.5, 3, 5, 7 1.5, 3, 5, 7	M M M M M M M M M M M	M C C C C C C C C C C	M M M M M M M M M M M	°C M M M M M M M M M M	°C M M M M M M M M M M	°C M M M M M M M M M M	<100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100	~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 200<EK<300 ~200	M M M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M M M		
			Frost Parameter (Ccond) and frost mass estimations from front and back & HuK Electrical Parameter	Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Day Cloudy Night Partially Clouded Night Clear Night Melting	[-15,-11] [-11,-8] [-15,-11] [-11,-8] [-15,-11] [-11,-8] [-15,-11] [-11,-8] [-15,-8] [-15,-8] [-15,-8] 10	90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100 90<RH<100	1.5 1.5 3 4.5 4.5 7 7 0.5, 1.5, 3, 4.5 0.5, 1.5, 3, 4.5 0.5, 1.5, 3, 4.5	M M M M M M M M M M M	M C C C C C C C C C C	M M M M M M M M M M M	°C M M M M M M M M M M	°C M M M M M M M M M M	<100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100 <100	~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300 ~300	M M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M M			
			Direct control by test facility No control (weather dependent) <u>required</u> No control (weather dependent)																
					θ	Mdot	Mrain	Mcond											
					°	Kg/hr	Kg/s	Kg/s											
					65	60	-	-/M											

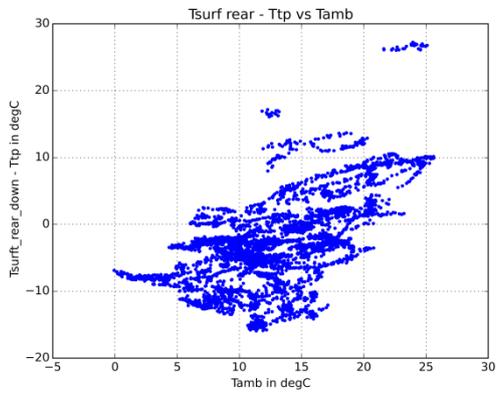
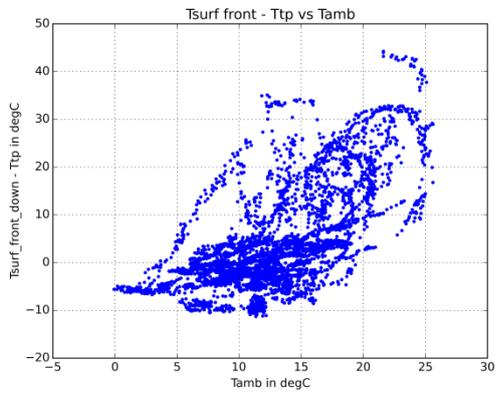
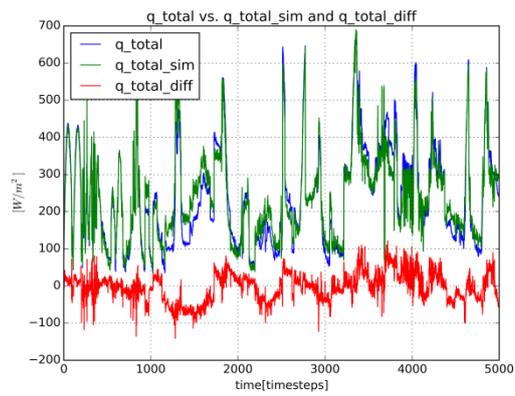
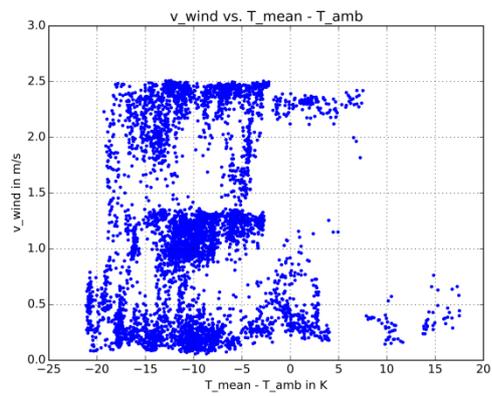
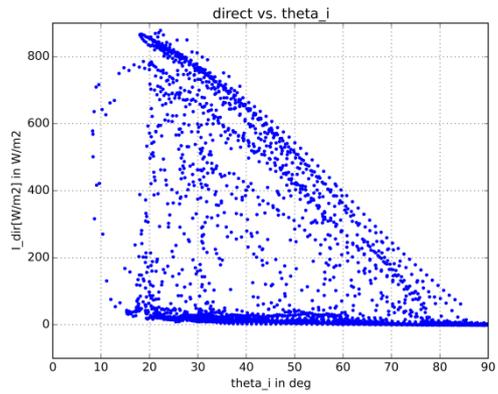
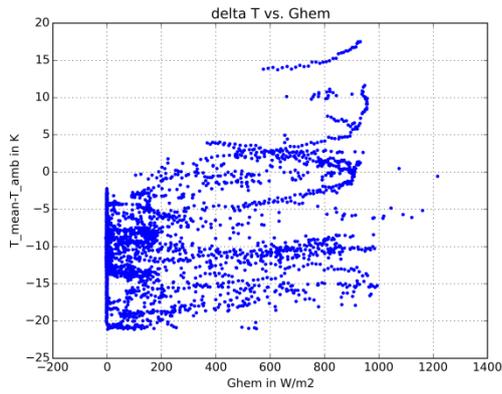
Prüfplan für die Einzelmodul-Messungen am Außenprüfstand.

9 ANHANG D: GRAFIKEN ZUR AUSWERTUNG VON AP1

9.1 GRAFIKEN – PARAMETERSATZ #51 (SUNNY)



9.2 GRAFIKEN – PARAMETERSATZ #52 (MIXED)



9.3 GRAFIKEN – PARAMETERSATZ #53 (LATENT)

