



Technische Hochschule  
Ingolstadt

Institut für  
neue Energie-Systeme

## Untersuchungen zur Fertigungstechnik und Kollektorkonstruktion für Vollkunststoff-Kollektoren

### – Abschlussbericht –

Verfasser:	Mathias Ehrenwirth, M. Eng. (THI) Dr.-Ing. Michael Klärner (THI) Dr. Christoph Reiter (THI) Dr. Christoph Trinkl (THI) Prof. Dr.-Ing. Wilfried Zörner (THI) Dipl.-Ing. Wolfgang Hoellenriegel (Roth)
Verbundpartner:	Technische Hochschule Ingolstadt Institut für neue Energie-Systeme, Esplanade 10, D-85049 Ingolstadt  Roth Werke GmbH Am Seerain 2, D-352328 Dautphetal
Förderkennzeichen:	0325986 A+B
Datum:	23.12.2016

## Kurzfassung

Ziel dieses Forschungsprojektes war die Entwicklung eines solarthermischen Kollektors aus Massenkunststoffen unter Verwendung von modernen Kunststoff-Fertigungsverfahren. Die Projektergebnisse zeigen, dass eine Fertigung mit Hilfe des *Twin-Sheet-Thermoforming* grundsätzlich möglich ist. Kostenvorteile entstehen hierbei durch den hohen Automatisierungsgrad, der mit Verwendung dieses Fertigungsverfahrens einhergeht. Die spezifischen Herstellkosten der entwickelten Kunststoffkollektoren liegen mit 58,26 €/m<sup>2</sup> um ca. 27% unter zu erwartenden Herstellkosten konventioneller, marktverfügbarer Flachkollektoren. Es wurden unterschiedliche Kunststoffkollektor-Prototypen aufgebaut und messtechnisch eingehend untersucht. Darüber hinaus wurden Simulationsstudien zur Ermittlung der Effizienz und der maximalen Absorbentemperatur durchgeführt. Die Funktion der entwickelten Kollektoren konnte durch die Einbindung in ein *Drain-Back-System* nachgewiesen werden. Trotz eines verringerten Systemertrages führen die geringeren Investitionskosten der Kunststoffkollektoren zu einem wirtschaftlichen Vorteil von 2,5% - 6,2% (abhängig von der Gaspreissteigerungsrate und dem Betrachtungszeitraum) gegenüber dem Referenzsystem.

**Schlagwörter:** Kunststoffe, Solarthermie, Kollektor, Wirtschaftlichkeit, Drain-Back-System

## Abstract

The aim of this research project was the development of a solar thermal collector made of commodity plastics using modern plastic production processes. The results of the project show that the production of polymeric collectors is possible with the *Twin-Sheet-Thermoforming*-process. Cost advantages arise from the high level of automation of this manufacturing process. The specific production costs of the developed polymeric collectors (58,26 €/m<sup>2</sup>) are 27% lower than the expected production costs of conventional, commercially available collectors. Different polymeric collector prototypes were built up and thoroughly investigated by measurements. In addition, simulation studies were performed to determine the efficiency and the maximum absorber temperature. The functionality of the developed collectors could be demonstrated by integration into a *drain-back system*. Despite a lower system yield, the lower investment costs of the developed plastic collectors lead to an economic advantage of 2,5% - 6,2% (depending on the rate of gas price increase and the horizon of observation) compared to a reference system with conventional metallic collectors.

**Keywords:** Plastics, solar thermal, collector, economy, drain-back system

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325986 A+B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>iv</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>vii</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>viii</b>
<b>1 Motivation und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Gesamtziele des Vorhabens.....	1
1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens .....	2
1.3 Kooperation .....	3
1.3.1 Roth Werke GmbH.....	3
1.3.2 Institut für neuer Energie-Systeme, Technische Hochschule Ingolstadt.....	4
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>6</b>
2.1 Wandel des Solarthermie-Marktes .....	6
2.2 Potenziale für den Einsatz alternativer Werkstoffe und Fertigungsverfahren im Kollektorbau.....	7
2.3 Kunststoffe in solarthermischen Kollektoren.....	7
<b>3 Kollektorgestaltung und –fertigung.....</b>	<b>13</b>
3.1 Kollektorgestaltung .....	13
3.2 Absorberkonstruktion .....	17
3.3 Überblick über geeignete Fertigungsverfahren .....	18
3.3.1 Spritzgießen.....	18
3.3.2 Extrudieren .....	20
3.3.3 Extrusionsblasformen .....	21
3.3.4 Singlesheet-Thermoforming.....	23
3.3.5 Twinsheet-Thermoforming.....	25
3.4 Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahren.....	26
3.4.1 Kriterien für die Kollektorfertigung .....	27
3.4.2 Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens .....	27
3.5 Werkstoffauswahl.....	29
3.6 Fertigung.....	30
<b>4 Untersuchungen auf Bauteilebene .....</b>	<b>35</b>
4.1 Ermittlung der Kollektoreffizienz .....	35
4.1.1 Beschreibung der Prüflinge .....	35

4.1.2	Messung der Leistungsfähigkeit.....	37
4.1.3	Ergebnisse der Leistungsmessung.....	39
4.2	Durchströmungsverhalten.....	42
4.3	Druckverlustbestimmung .....	43
<b>5</b>	<b>Untersuchungen auf Systemebene .....</b>	<b>46</b>
5.1	Beschreibung des Systemtests .....	46
5.1.1	Container .....	46
5.1.2	Kombispeicher.....	46
5.1.3	Solarkreis.....	47
5.1.4	Trinkwarmwasser-Kreis .....	50
5.1.5	Backup-Kreis .....	51
5.2	Beschreibung der Messtechnik und der Datenerfassung.....	52
5.3	Regelstrategie .....	54
5.3.1	Solarkreis.....	54
5.3.2	Backup-Heizung.....	58
5.3.3	Warmwasser-Zapfung .....	58
5.4	Ergebnisse der Systemmessungen.....	60
5.4.1	Lastfall „Normalbetrieb“ .....	60
5.4.2	Lastfall „Defekte Pumpe“.....	68
5.4.3	Fazit Systemmessung .....	69
5.5	Durchströmungsverhalten.....	69
<b>6</b>	<b>Untersuchungen auf Simulationsebene .....</b>	<b>72</b>
6.1	Abgleich des Simulationsmodells mit den Messdaten .....	72
6.2	Beschreibung des Simulationsmodells .....	78
6.3	Ergebnisse der Systemsimulation.....	81
<b>7</b>	<b>Wirtschaftlichkeit.....</b>	<b>84</b>
7.1	Methoden der betriebswirtschaftlichen Bewertung von Investitionen.....	84
7.2	Definition der Berechnungsgrundlagen.....	85
7.2.1	Festlegung des Kalkulationszinssatzes.....	85
7.2.2	Festlegung der Preissteigerungsraten und Ermittlung der Basiswerte .....	86
7.2.3	Festlegung der Betrachtungszeiträume.....	86
7.2.4	Bestimmung der Aufwendungen.....	87
7.2.5	Betriebsgebundene Kosten .....	89
7.2.6	Sonstige Kosten .....	90
7.2.7	Bedarfsgebundene Kosten .....	90
7.3	Bestimmung der Rückflüsse.....	91
7.4	Berechnungsergebnisse .....	92

---

<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>96</b>
<b>9</b>	<b>Veröffentlichungen .....</b>	<b>viii</b>
<b>10</b>	<b>Fortschreibung des Verwertungsplans.....</b>	<b>x</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>xiii</b>
<b>12</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>xviii</b>
12.1	Datenblatt Polypropylen.....	xviii
12.2	Datenblatt Polypropylen mit Glasfaserfüllung.....	xix
12.3	Wärmespeicher Roth Quadroline TQ-K500.....	xx
12.4	Coriolis-Massendurchflussmesser (CMD) .....	xxi
12.5	Solarpumpe Wilo Star-RS 25/6 .....	xxii
12.6	Magnetventil.....	xxiii
12.7	Pumpe Wilo Star-ST 15/11 .....	xxiv
12.8	Motorstellventil Typ 3222 .....	xxv
12.9	Motorstellantrieb Typ 5824.....	xxvi
12.10	Magnetisch-Induktiver-Durchflussmesser Typ IFM 1080K DN10 .....	xxvii

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Kostenaufteilung eines solarthermischen Systems ([2] S. 93) .....	1
<b>Abbildung 2:</b> Interaktion der Kompetenzfelder Kollektortechnik, Werkstofftechnik und Fertigungstechnik bei der Entwicklung eines Kunststoffkollektors .....	2
<b>Abbildung 3:</b> Prüfmöglichkeiten am InES. Links: Indoor-Sonnensimulator. Rechts: Outdoor-Prüffläche. ....	5
<b>Abbildung 4:</b> Gewichts- und Kostenverteilung eines solarthermischen Kollektors (nach [3] S. 90 und [4]) .....	6
<b>Abbildung 5:</b> Relative Entwicklung der Rohstoffpreise in den letzten 5 Jahre (nach [5]) .....	6
<b>Abbildung 6:</b> Beheizung eines Schwimmbeckens als klassisches Einsatzgebiet ungedeckter Absorber aus Kunststoffen. ....	8
<b>Abbildung 7:</b> Ungedeckte Schwimmbadabsorber. Oben links: OKU®-Absorber mit integriertem Sammelrohr [10]. Oben rechts: SunStar-Absorber [11]. Unten: Roth HelioPool® [12]. ....	9
<b>Abbildung 8:</b> <i>One Sun One World Collector</i> . Links: Schematische Explosionszeichnung [13, Fig. 8]. Rechts: Fotorealistische Darstellung [14]. ....	9
<b>Abbildung 9:</b> Kunststoffabsorber der <i>Fa. Magen eco Energy</i> . Links: Schematische Gesamtansicht. Rechts: Anschluss der Steigrohre an die Sammelrohre. ....	10
<b>Abbildung 10:</b> Kollektor der <i>Fa. Aventa AS</i> . Links: Schematische Draufsicht. Oben rechts: Schematische Schnittansicht. Unten rechts: Schnittmodell [20]. ....	11
<b>Abbildung 11:</b> Kollektor-Wirkungsgradkennlinien kommerziell verfügbarer Kollektoren (Daten entsprechend [15], [17], [19]) .....	11
<b>Abbildung 12:</b> Absorberstruktur als maßgebliches Element des Kunststoffkollektors .....	13
<b>Abbildung 13:</b> Querschnitt durch eine Absorber-Finne. Links: Konventioneller Blech-Rohr-Absorber. Rechts: Volumetrisch durchströmter Kunststoffabsorber .....	14
<b>Abbildung 14:</b> Absorber (Schnittansicht) .....	15
<b>Abbildung 15:</b> Klassifizierung von Überhitzungsschutzmaßnahmen nach ([24] S. 47) .....	15
<b>Abbildung 16:</b> Gehäusekonzept mit geschäumter Wanne .....	16
<b>Abbildung 17:</b> Häufigkeitsverteilung der thermischen Lasten auf Kunststoffkollektor in Abhängigkeit von Temperaturniveau und Dauer bei einjähriger Stagnation .....	17
<b>Abbildung 18:</b> Messtechnische Untersuchung des Durchströmungsverhaltens (Links: Draufsicht mit transparenter Abdeckung aus einer 4 mm dicken Acrylplatte / Rechts: Detailansicht –Übergang Verteilerkanal / Einlassdüsen / Steigkanäle) .....	18
<b>Abbildung 19:</b> Prozessschritte beim Spritzgießen (eigene Darstellung) .....	19
<b>Abbildung 20:</b> Verwendung von extrudierten Bauteilen bei einem Kunststoffabsorber .....	20
<b>Abbildung 21:</b> Prozessschritte bei der Extrusion. (Eigene Darstellung. Oben: Funktionsskizze mit Trichter, Schnecke (hellgrau), Heizung (rot) und Stempel (dunkelgrau) / Unten: Extrudiertes Rechteckprofil) .....	21

<b>Abbildung 22:</b> Verwendung von blasgeformten Bauteilen bei einem Kunststoffabsorber .....	22
<b>Abbildung 23:</b> Prozessschritte beim Extrusionsblasformen (eigene Darstellung) .....	22
<b>Abbildung 24:</b> Prozessschritte beim Singlesheet-Thermoforming. Spalte 1: Herstellung des Unterteils. Spalte 2: Herstellung des Oberteils (eigene Darstellung).....	24
<b>Abbildung 25:</b> Prozessschritte beim Twinsheet-Thermoforming (eigene Darstellung).....	25
<b>Abbildung 26:</b> Exemplarische Durchführung eines paarweisen Vergleichs .....	26
<b>Abbildung 27:</b> Bewertung unterschiedlicher Kunststoffe hinsichtlich Struktur, Einsatztemperatur und Kosten entsprechend ([3] S. 132).....	29
<b>Abbildung 28:</b> Außenansicht der <i>Twinsheet-Thermoforming</i> -Anlage vom Typ <i>Geiss T10</i> .....	31
<b>Abbildung 29:</b> Innenansicht der <i>Twinsheet-Thermoforming</i> -Anlage vom Typ <i>Geiss T10</i> inkl. des Oberteils .....	32
<b>Abbildung 30:</b> Innenansicht der <i>Twinsheet-Thermoforming</i> -Anlage vom Typ <i>Geiss T10</i> inkl. des Unterteils .....	32
<b>Abbildung 31:</b> Ergebnisse der Prototypen-Fertigung mit einem Glasfaseranteil von 20% und einer maximalen Glasfaserlänge von 20 mm (Links: Gesamtansicht / Rechts: Detailansicht des Anschlussbereichs).....	33
<b>Abbildung 32:</b> Optimierte Ausführung der Kunststoffabsorber (Links: Strömungskanäle. Rechts: Detailansicht des Anschlussbereichs) .....	33
<b>Abbildung 33:</b> Definition der Temperaturverteilung bei der <i>Twinsheet</i> -Fertigung.....	34
<b>Abbildung 34:</b> Mangelhaft gefertigte Absorberstruktur aufgrund nicht-optimaler Prozessparameter .....	34
<b>Abbildung 35:</b> Aufbau der Kollektor-Prototypen (Links: Rückseitige Dämmung mit Polystyrol; Rechts: Rückseitige Dämmung mit Glaswolle und Abdeckplatte).....	35
<b>Abbildung 36:</b> Prototyp mit rückseitiger Isolierung aus Glaswolle (ohne Abdeckung).....	36
<b>Abbildung 37:</b> Prototyp mit rückseitiger Isolierung aus Polystyrol (ohne Abdeckung).....	36
<b>Abbildung 38:</b> Detailansichten der Prototypen. Links: Variante mit rückseitiger Isolierung Polystyrol (ohne Abdeckung). Rechts: Variante mit rückseitiger Isolierung aus Glaswolle (ohne Abdeckung) und Teile des umlaufenden Rahmens (Test der Kollektoren mit größerem Abstand zw. Absorber und Abdeckung).....	36
<b>Abbildung 39:</b> Prüfstand zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit (Links: Prinzipskizze / Rechts: Test der Variante 3).....	38
<b>Abbildung 40:</b> Ablösen der vorderseitigen Abdeckung während der Leistungsmessung .....	39
<b>Abbildung 41:</b> Ergebnisse der unabgedeckten Kollektoren (Variante 1 und 2).....	40
<b>Abbildung 42:</b> Ergebnisse der mit Glas abgedeckten Kollektoren (Varianten 3 – 5) ...	40
<b>Abbildung 43:</b> Ergebnisse der mit PMMA abgedeckten Kollektoren (Varianten 6 – 8) .....	41

<b>Abbildung 44:</b> Vergleich der Absorberstruktur mit PMMA-Abdeckung und Polystyrol-Isolierung mit marktverfügbaren Kollektoren.....	41
<b>Abbildung 45:</b> Thermographische Untersuchung des Kunststoffabsorbers .....	42
<b>Abbildung 46:</b> Strömungsmechanisches Modell zur Bestimmung des Druckverlusts (1: Übergang Einlass / 2: Sammelrohr / 3. Übergang Sammelrohr – Steigrohr / 4: Steigrohr / 5: Übergang Steigrohr – Sammelrohr / 6: Übergang Auslass).....	43
<b>Abbildung 47:</b> Widerstandsbeiwert des Steigrohrs (Links: Diffusor / Mitte: Rohr / Rechts: Düse).....	44
<b>Abbildung 48:</b> Druckverlust des Kunststoffabsorbers in Abhängigkeit des Volumenstroms .....	45
<b>Abbildung 49:</b> Außenansicht des Prüf-Containers .....	46
<b>Abbildung 50:</b> Wärmespeicher Quadroline TQ-K 500. Links: Einbindung in das Hydraulikschema. Rechts: Speicher im Systemtest (mit Isolierung).....	47
<b>Abbildung 51:</b> Solarkreis .....	48
<b>Abbildung 52:</b> Kollektorfeld (um 5° gegenüber der Horizontalen geneigt).....	48
<b>Abbildung 53:</b> Coriolis-Massendurchflussmesser (links) und Motorstellventil (rechts) .....	49
<b>Abbildung 54:</b> Drain-Back-Gefäß (Links: ohne Isolierung / Verschalung. Rechts: mit kompletter Einhausung).....	50
<b>Abbildung 55:</b> Warmwasser-Kreis .....	51
<b>Abbildung 56:</b> Backup-Kreis. Links: Einbindung in das Hydraulikschema. Rechts: Integration in den Systemtest.....	52
<b>Abbildung 57:</b> Ablaufdiagramm des Outdoor-Systemprüfstands .....	53
<b>Abbildung 58:</b> Messtechnik (Links: Datenlogger vom Typ 34972A / Rechts: Schaltschrank zur Ansteuerung der Komponenten.....	54
<b>Abbildung 59:</b> Regelung eines konventionellen, druckbehafteten Systems.....	55
<b>Abbildung 60:</b> Regelung des <i>Drain-Back-Systems</i> mittels zweier Temperaturfühler und einem Pyranometer. Links: <i>Drain-Back-System</i> im Betriebszustand. Rechts: <i>Drain-Back-System</i> im Ruhezustand .....	56
<b>Abbildung 61:</b> Flussdiagramm Solarregler.....	57
<b>Abbildung 62:</b> Schaltverhalten des Solarreglers (Beispiel .....	58
<b>Abbildung 63:</b> Lastprofil entsprechend [38] (ÜWH) .....	59
<b>Abbildung 64:</b> Harmonisiertes Lastprofil entsprechend [38] (ÜWH).....	59
<b>Abbildung 65:</b> Gegenüberstellung des harmonisierten Lastprofils entsprechend VDI 4655 (blaue Kurve) und des während des Tests verwendeten Lastprofil (gelbe Kurve) .....	60
<b>Abbildung 66:</b> Wetterdaten am 23. Juni 2016.....	61
<b>Abbildung 67:</b> Wetterdaten am 24. Juni 2016.....	61
<b>Abbildung 68:</b> Wärmeerzeugung / -verbrauch am 23. Juni 2016.....	62
<b>Abbildung 69:</b> Wärmeerzeugung / -verbrauch am 24. Juni 2016.....	62
<b>Abbildung 70:</b> Speichertemperaturen am 23. Juni 2016 .....	64
<b>Abbildung 71:</b> Speichertemperaturen am 24. Juni 2016 .....	65
<b>Abbildung 72:</b> Kollektorvor- und Kollektorrücklauftemperatur am 23. Juni 2016.....	66
<b>Abbildung 73:</b> Kollektorvor- und Kollektorrücklauftemperatur am 24. Juni 2016.....	66



<b>Abbildung 74:</b> Position der Temperaturfühler am Kollektor .....	67
<b>Abbildung 75:</b> Temperaturen des Kollektors am 23. Juni 2016.....	67
<b>Abbildung 76:</b> Temperaturen des Kollektors am 24. Juni 2016.....	68
<b>Abbildung 77:</b> Wetterdaten am 08. Juli 2016.....	68
<b>Abbildung 78:</b> Temperatursensoren am Kollektor am 08. Juli 2016 .....	69
<b>Abbildung 79:</b> Unabgedeckte Kollektoren zu Beginn der Thermographie-Messung ...	70
<b>Abbildung 80:</b> Thermographische Untersuchung des Kollektorfelds .....	71
<b>Abbildung 81:</b> Aufbau des Simulationsmodell (Validierung).....	73
<b>Abbildung 82:</b> Wetterdaten am 30. August 2016 .....	75
<b>Abbildung 83:</b> Wetterdaten am 31. August 2016 .....	75
<b>Abbildung 84:</b> Wärmeerzeugung / -verbrauch am 30. August 2016.....	76
<b>Abbildung 85:</b> Wärmeerzeugung / -verbrauch am 31. August 2016.....	77
<b>Abbildung 86:</b> Prinzipskizze des Simulationsmodells (Jahressimulation).....	78
<b>Abbildung 87:</b> Zusammenhang zwischen Schwellwert der Einstrahlung (Regelung) und solarthermischen Ertrag (Blaue Kurve: Volumenstrom der Solarpumpe in kg/(sm <sup>2</sup> ) / Rote Kurve: Ertrag des Kollektorfelds in kWh/a).....	80
<b>Abbildung 88:</b> Zusammenhang zwischen gewähltem Volumenstrom und solarthermischen Ertrag (Blaue Kurve: Volumenstrom der Solarpumpe in kg/(sm <sup>2</sup> ) / Rote Kurve: Ertrag des Kollektorfelds in kWh/a).....	81
<b>Abbildung 89:</b> Aufteilung der Investitionskosten (Links: Konventionelles System / Rechts: Drain-Back-System).....	89

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Ergebnisse der Parameterstudie .....	16
<b>Tabelle 2:</b> Kriterien für die Bewertung von Kunststoffverarbeitungsverfahren .....	28
<b>Tabelle 3:</b> Bewertung der betrachteten Fertigungsverfahren .....	28
<b>Tabelle 4:</b> Übersicht über die verschiedenen getesteten Kollektorvarianten.....	37
<b>Tabelle 5:</b> Ergebnisse der Leistungsmessung .....	39
<b>Tabelle 6:</b> Energiemengen im Lastfall „Normalbetrieb“ .....	63
<b>Tabelle 7:</b> Simulationsparameter (Validierung).....	74
<b>Tabelle 8:</b> Energiemengen am 30. August 2016 .....	76
<b>Tabelle 9:</b> Energiemengen am 31. August 2016 .....	77
<b>Tabelle 10:</b> Leistungsdaten der verwendeten Kollektoren [39] .....	79
<b>Tabelle 11:</b> Ergebnisse der Systemsimulation .....	81
<b>Tabelle 12:</b> Ergebnisse der Systemsimulation: Anteilige Energieeinsparung .....	82
<b>Tabelle 13:</b> Ergebnisse der Systemsimulation: Energiebedarf der Solarpumpe.....	83
<b>Tabelle 14:</b> Die monetären Verfahren der Investitionsrechnung .....	84
<b>Tabelle 15:</b> Vergleich der Nutzungsdauern einzelner Komponenten .....	87
<b>Tabelle 16:</b> Systematisierung verschiedener Kostenarten bei Investitionsprojekten.....	87

---

<b>Tabelle 17:</b> Aufwände für Inspektion, Wartung und Instandsetzung in Anlehnung an VDI 2067 Blatt 1 [44] .....	90
<b>Tabelle 18:</b> Elektrischer Strombedarf der Solarpumpe (auf Basis von Simulationsergebnissen) .....	91
<b>Tabelle 19:</b> Jährliche Rückflüsse der Vergleichssysteme in Abhängigkeit unterschiedlicher Gebäudetypen .....	92
<b>Tabelle 20:</b> Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung (SFH15, Betrachtungszeitraum 20 Jahre).....	93
<b>Tabelle 21:</b> Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung (SFH45, Betrachtungszeitraum 20 Jahre).....	93
<b>Tabelle 22:</b> Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung (SFH15, Betrachtungszeitraum 30 Jahre).....	94
<b>Tabelle 23:</b> Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung (SFH45, Betrachtungszeitraume30 Jahre).....	94

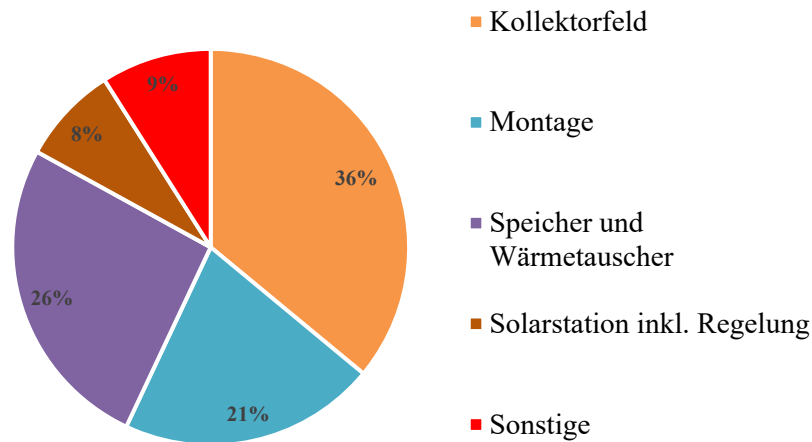
## Formelverzeichnis

<b>Formel 1:</b> Definition des Wirkungsgrads eines solarthermischen Kollektors .....	37
<b>Formel 2:</b> Druckverlust der strömungsmechanischen Komponenten .....	44
<b>Formel 3:</b> Definition des Warmwasser-Bedarfs nach VDI 4655 [38] .....	59
<b>Formel 4:</b> Definition der relativen Abweichung.....	75
<b>Formel 5:</b> Definition der anteiligen Energieeinsparung nach DIN EN 12977-2 [41]....	82

# 1 Motivation und Zielsetzung

## 1.1 Gesamtziele des Vorhabens

Angesichts der seit Jahren rückläufigen Zahlen bei der installierten Kollektorfläche [1] steigt der Kostendruck für die Hersteller von solarthermischen Kollektoren und Systemen. Um unter diesen Rahmenbedingungen weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben bzw. neue Absatzmärkte zu erschließen, müssen die Kosten für solarthermische Systeme gesenkt werden. Den höchsten Anteil an den Gesamtkosten eines solchen Systems versuchen die Kollektoren mit einem Anteil von 36% sowie die Installation mit einem Anteil von 21% [2] S. 93 (s. Abbildung 1).

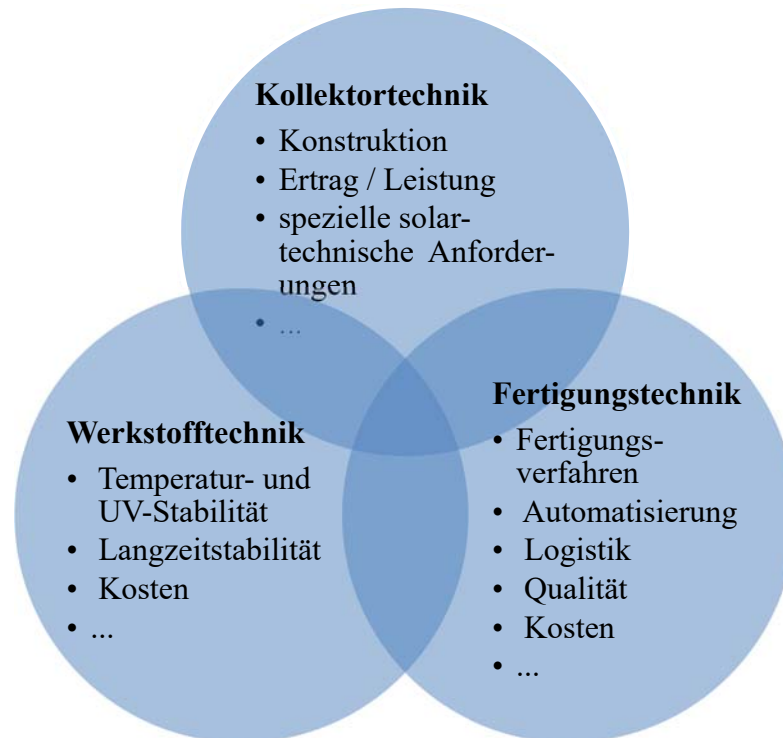


**Abbildung 1:** Kostenaufteilung eines solarthermischen Systems ([2] S. 93)

Die Verwendung kostengünstiger Massenkunststoffe in Kombination mit modernen Fertigungsverfahren verspricht eine Senkung der Herstellkosten für Kollektoren. Das primäre Ziel des Vorhabens ist deshalb die eingehende Untersuchung von Fertigungstechnik und Kollektorkonstruktion für solarthermische Vollkunststoff-Kollektoren. Der Fokus liegt hierbei auf der Weiterentwicklung verfügbarer Kunststoff-Verarbeitungsverfahren bzw. -Fertigungsverfahren. Dadurch sollen die Herstellkosten reduziert werden, einerseits durch den Einsatz von kostengünstigen Materialien und andererseits durch eine automatisierte Fertigung mit geringen Taktzeiten mit gleichzeitiger Möglichkeit zur Fertigung großer Stückzahlen. Die übergeordnete Ziel- und Bewertungsgröße ist die Wirtschaftlichkeit der Investition innerhalb der Lebensdauer auf Systemebene.

## 1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Die Untersuchungen zur Fertigungstechnik und Kollektorkonstruktion für Vollkunststoff-Kollektoren erfordern den Wissenstransfer aus den Kompetenzfeldern Kollektortechnik, Werkstofftechnik und Fertigungstechnik (s. Abbildung 2), die sich gegenseitig beeinflussen und aufeinander abgestimmt werden müssen, um den erreichbaren Kollektorsertrag im Zusammenspiel mit den entstehenden Kosten gesamtheitlich zu optimieren.



**Abbildung 2:** Interaktion der Kompetenzfelder Kollektortechnik, Werkstofftechnik und Fertigungstechnik bei der Entwicklung eines Kunststoffkollektors

Dabei sollte auf Basis etablierter Fertigungsverfahren eine Kollektorkonstruktion entwickelt werden, die eine auf die Komponentenanforderungen abgestimmte Werkstoffauswahl enthält.

Die Teilziele des Vorhabens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Entwicklung und Untersuchung von Konstruktionsprinzipien für Flachkollektoren unter Abstimmung der erreichbaren Kollektorleistung mit der maximalen Temperaturbelastung der einzelnen Bauteile (unter Einbeziehung von Maßnahmen zur Temperaturbegrenzung) und der Auswahl geeigneter Kunststoffe ( $T_{\max}$  bis 80 °C im Betrieb und 120 °C im Stagnationsfall).
- Untersuchung und Weiterentwicklung bestehender Kunststoff-Fertigungsverfahren der Fa. Roth Werke GmbH im Hinblick auf Kunststoffkollektoren und deren Konstruktion mit besonderem Augenmerk auf die erreichbaren Fertigungskosten.

- Herstellkostenziel: -30 % gegenüber handelsüblichen Flachkollektoren (auf Bauteilebene).
- Bewertung der Wirtschaftlichkeit von angepassten Solarsystemen mit Vollkunststoff-Kollektoren im Vergleich zu Solarsystemen mit herkömmlichen Flachkollektoren.
- Herstellung von Prototypen und Verifikation der Ergebnisse in Prüfstandmessungen.
- Durchführung eines Systemtests zur Verifikation der Leistungsfähigkeit und Umsetzbarkeit.

### 1.3 Kooperation

Das Forschungsvorhaben „*Untersuchungen von Fertigungstechnik und Kollektorkonstruktion für Vollkunststoff-Kollektoren*“ wurde als Verbundprojekt der Partner *Roth Werke GmbH* und dem *Institut für neue Energie-Systeme (InES)* der *Technischen Hochschule Ingolstadt (THI)* durchgeführt.

Die vorliegenden Arbeiten bauen unter anderem auf Vorarbeiten des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und dem Projektträger Jülich geförderte Forschungsvorhaben „Solarthermie 2000plus: Kunststoffe in solarthermischen Kollektoren - Anforderungsdefinition, Konzeptentwicklung und Machbarkeitsbewertung“ (FKZ: 0329285A) auf.

Die Forschungsarbeiten des vorliegenden Projekts waren in die IEA-Task 39 „*Polymeric Materials for Solar Thermal Applications*“ sowie die IEA-Task 54 „*Price Reduction of Solar Thermal Systems*“ integriert.

#### 1.3.1 Roth Werke GmbH

Mit verschiedenen Firmen und mehr als 1.300 MitarbeiterInnen weltweit gehört die *Roth Industries GmbH & Co. KG* zu den innovativsten Unternehmen mit marktführenden Stellungen in den Geschäftsbereichen Gebäudetechnik, Kunststofftechnik und Industrietechnik. Die Kernkompetenzen liegen in den Feldern Energie, Wasser und Kunststoff. Gegründet wurde das Unternehmen 1947. Die Zentrale des mittelständischen Traditionsunternehmens liegt im hessischen Dautphetal. Die *Roth Industries* hält alle Anteile der zur Unternehmensgruppe gehörenden Firmen im In- und Ausland. Die Gesellschaftsanteile liegen zu 100 % bei der Familie Roth. Die zur Unternehmensgruppe gehörende *Roth Werke GmbH* ist ein international tätiger Hersteller von Energie- und Sanitärsystemen. Unter dem Motto ‚*Leben voller Energie*‘ vernetzt *Roth* seine Produktsysteme von der regenerativen Energieerzeugung über wirtschaftliche Energielagerung und Energieverteilung zu einem Komplettsystem aus einer Hand:

- Erzeugung: Solarsysteme, Wärmepumpensysteme, Solar-Wärmepumpen, Energiesysteme, Wasser-Recyclingsysteme
- Lagerung: Speichersysteme für Trink- und Heizungswasser, für Regen- und Abwasser, für Brennstoffe und Biokraftstoffen

- Verteilung: Flächen-Heiz- und Kühlsysteme, Rohr-Installationssysteme, Duschsysteme

Seit nahezu 70 Jahren hat sich *Roth* Kompetenz in der Kunststofftechnik angeeignet und greift auf eine Vielzahl von Kunststoffverarbeitungsverfahren zurück, die an verschiedenen Produktionsstandorten zum Einsatz kommen:

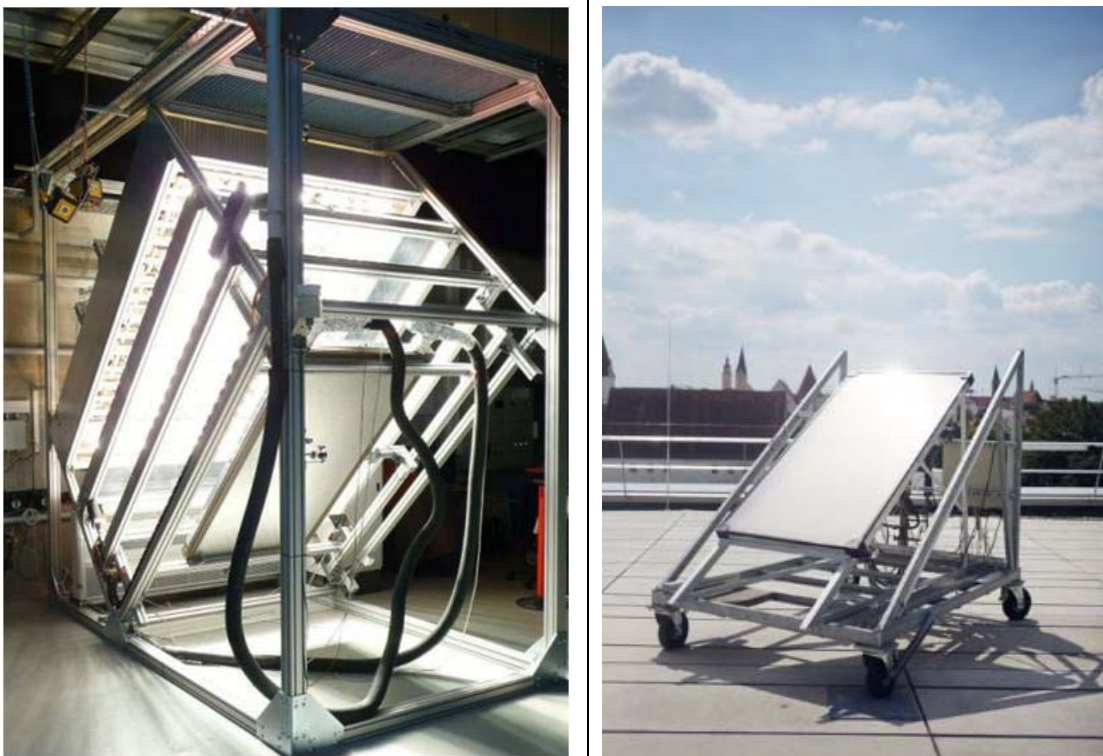
- Spritzgusstechnik,
- Blasformverfahren,
- Fibre/Plast-Verbundtechnologie,
- Rotation,
- Rohrextrusion,
- Vakuumtiefziehverfahren,
- Verbundverfahren,
- Schäumtechnik,
- Thermoforming

Auch der unternehmenseigene Maschinenbau stellt unter anderem Produktionsanlagen für die Kunststoffverarbeitung her, die ihren Einsatz auch in der *Roth*-Gebäudetechnik finden. Mit der hohen Fertigungstiefe im Firmenverbund gewährleistet *Roth* somit gleichbleibende Qualitätsstandards und sichert sein spezielles Fertigungs-Knowhow im eigenen Hause. *Roth* setzt die thermoplastischen Massenkunststoffe Polyethylen und Polypropylen insbesondere für Behälter und Rohre ein. Für Behälter kommt die Blasformtechnik, vor allem das Großblasformverfahren zum Einsatz. *Roth* besitzt zum Beispiel Blasformanlagen, mit denen Behälter bis 10.000 l Volumen hergestellt werden können. Für Großbehälter setzt *Roth* ebenfalls die Rotation ein. Kunststoffrohre werden mittels Extrusion hergestellt. Expandiertes Polystyrol wird für die Herstellung von Dämmplatten für Flächen-Heiz- und Kühlsysteme eingesetzt. Die Platten werden auf Schäumautomaten hergestellt und anschließend kaschiert. *Roth* verarbeitet auch Spezialkunststoffe. So werden zum Beispiel im Spritzgießverfahren die Fittings für das Rohr-Installationssystem aus Polyphenylsulfon (PPSU) gefertigt. Spezialkunststoffe werden auch mittels Vakuumtiefziehtechnik verarbeitet. So kommt beispielsweise Polycarbonat mit seiner Eigenschaft für gute Wärmespeicherung für die Kunststoffwanne des Flachkollektors *Heliostar* und Polyethylenterephthalat (PET) für die *ClimaComfort*-Systemplatte zur Anwendung.

### **1.3.2 Institut für neuer Energie-Systeme, Technische Hochschule Ingolstadt**

Das *Institut für neue Energie-Systeme* (InES) der *Technischen Hochschule Ingolstadt* (THI) beschäftigt sich seit dem Jahr 2000 mit zukunftsweisenden Technologien im Bereich der Erneuerbaren Energien. Neben der praxisnahen Ausbildung von Studentinnen und Studenten steht die Angewandte Forschung im Umfeld Erneuerbarer Energietechnik im Fokus der Aktivitäten.

Die anwendungsorientierten Forschungsvorhaben werden überwiegend in Zusammenarbeit mit mittelständischen Industriepartnern sowie Forschungseinrichtungen und Hochschulen durchgeführt. Das *Institut für neue Energie-Systeme* ist in einschlägigen nationalen und internationalen Gremien und Forschungsverbänden vertreten. An der *Technischen Hochschule Ingolstadt* verfügt das *InES* über insgesamt vier Labore mit einer Gesamtfläche von mehr als 1.000m<sup>2</sup>, die für die Ausbildung von Studierenden und die Durchführung von Forschungsprojekten genutzt werden. Im Technologiefeld *Solarenergietechnik* verfügt das *InES* über einen Indoor-Sonnensimulator und eine 450m<sup>2</sup> große Outdoor-Prüffläche zum Test solarthermischer Systeme unter idealen Testbedingungen (s. Abbildung 3).



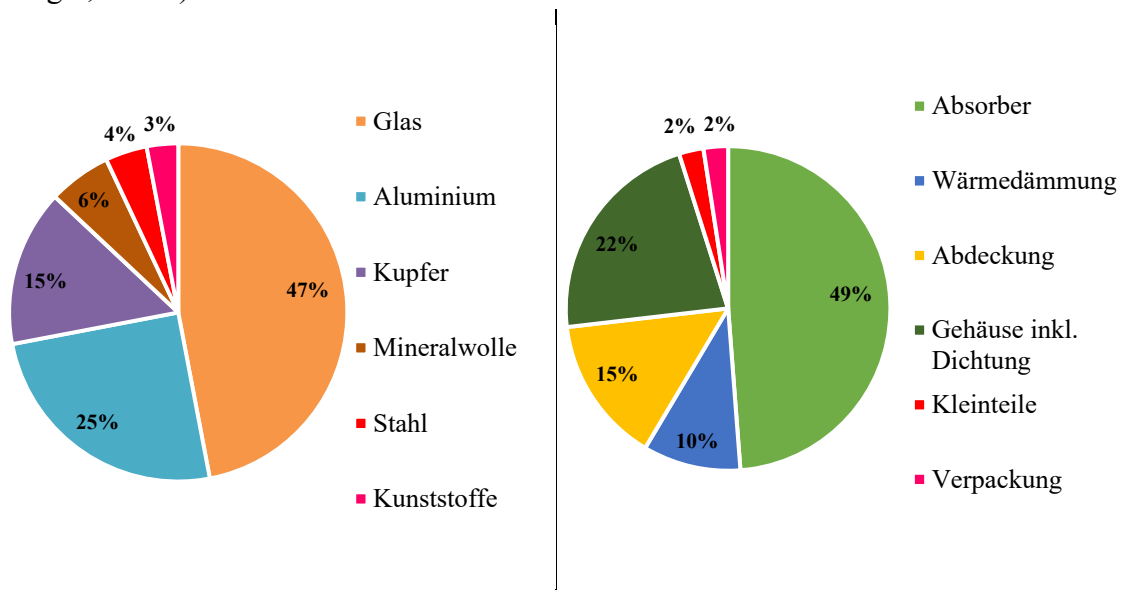
**Abbildung 3:** Prüfmöglichkeiten am InES. Links: Indoor-Sonnensimulator. Rechts: Outdoor-Prüffläche.

Im Bereich der Kollektor-, Speicher- und Systemtechnik kann das *Institut für Neue Energie-Systeme* auf umfangreiche Vorarbeiten und Erfahrungen mit industriellen Verbundpartnern in öffentlich geförderten Vorhaben und Forschungsverbänden, wie auch in der industriellen Auftragsforschung zurückgreifen.

## 2 Stand der Technik

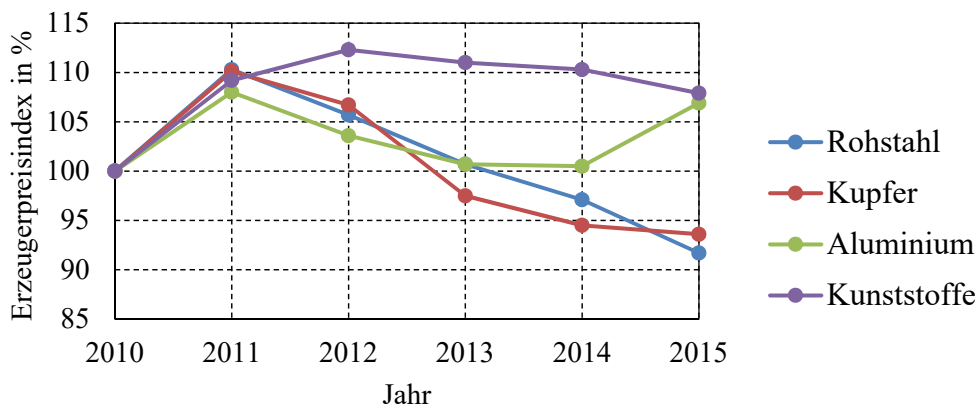
### 2.1 Wandel des Solarthermie-Marktes

Abbildung 4 (links) zeigt die durchschnittliche Gewichtsverteilung eines solarthermischen Flachkollektors. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Rohstoffpreise ergibt sich die Tatsache, dass die metallischen Werkstoffe Kupfer, Aluminium und Stahl gegenüber den nicht-metallischen Materialien die höchsten anteiligen Kosten verursachen (s. Abbildung 4, rechts).



**Abbildung 4:** Gewichts- und Kostenverteilung eines solarthermischen Kollektors (nach [3] S. 90 und [4])

Bedingt durch die hohe Schwankungsbreite der Weltmarktpreise für metallische Werkstoffe ( $\Delta_{2010-2015}^{Stahl} = -8,3\%$ ,  $\Delta_{2010-2015}^{Aluminium} = +6,9\%$ ,  $\Delta_{2010-2015}^{Kupfer} = -6,4\%$ , siehe Abbildung 5) unterliegen die Herstellkosten eines solarthermischen Flachkollektors somit ebenfalls hohen Schwankungen.



**Abbildung 5:** Relative Entwicklung der Rohstoffpreise in den letzten 5 Jahre (nach [5])



Angesichts einer weltweiten anhaltenden Nachfrage nach metallischen Erzeugnissen ist von einer weiteren Verknappung (und damit verbundenen Preissteigerung) dieser Rohstoffe auszugehen. Hierdurch wird einerseits die langfristige Kostenplanung für die Hersteller von thermischen Solarkollektoren erschwert, andererseits das Potential für mögliche Preissenkungen reduziert.

Trotz der aktuell rückläufigen Absatzzahlen [6] ist davon auszugehen, dass die installierte Kollektorfläche im Jahr 2050 640 Mio. m<sup>2</sup> betragen wird [7]. Gegenüber der momentan installierten Kollektorfläche von 19,2 Mio. m<sup>2</sup> wird das hohe Potential für Hersteller von solarthermischen Anlagen deutlich. Zusätzlich ist aktuell ein Wandel des Solarthermiemarktes weg von den nationalen Absatzmärkten hin zur Internationalität zu beobachten. In diesem Wettbewerb sieht sich die Branche mit erhöhten Anforderungen hinsichtlich der produzierten Kollektorfläche bei gleichzeitig geringeren Kosten, kürzeren Lieferzeiten und hohen Qualitätsansprüchen konfrontiert.

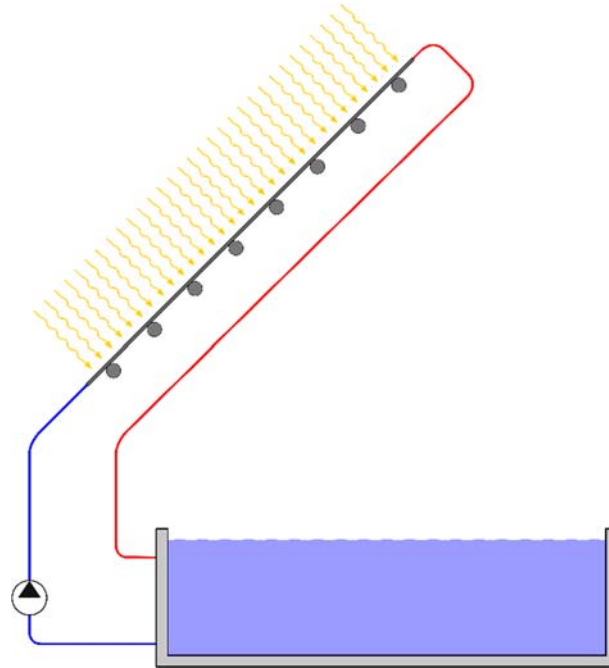
## **2.2 Potenziale für den Einsatz alternativer Werkstoffe und Fertigungsverfahren im Kollektorbau**

Ein Festhalten an den herkömmlichen Werkstoffen und den damit verbundenen Fertigungsverfahren führt zu einem begrenzten Ausschöpfen von positiven Skaleneffekten bei der Kollektorfertigung. Im Gegensatz hierzu sind Kunststoff-Fertigungsverfahren bzw. Kunststoff-Verarbeitungsverfahren typische Massenfertigungsverfahren. Für eine Amortisation der oftmals hohen Anfangsinvestitionen werden bei kunststoffverarbeitenden Prozessen große Stückzahlen benötigt. Werden diese Stückzahlen aber erreicht, können mit diesen Verfahren niedrige Stückkosten realisiert werden. Der Einsatz von Kunststoffen für Solarkollektoren zeigt sich daher prinzipiell als vielversprechend und kann insgesamt gleich mehrere Vorzüge bieten: Neben der Einsparung kostenintensiver Werkstoffe kann durch Nutzung moderner Fertigungstechnologien von Kunststoffformteilen die Kollektorfertigung automatisiert und damit die Kosten gesenkt werden. Darüber hinaus ist bei der Verwendung von Kunststoffen in der Kollektorfertigung von einer möglichen Gewichtsreduzierung und damit verbundenen Vorteilen im Handling und bei der Montage auszugehen. Die erfolgreiche Applikation von Kunststoffen in den Bereichen Fensterbau, Photovoltaik oder in der Automobiltechnik zeigen, dass diese Werkstoffe auch über längere Zeiträume den Witterungsbedingungen im Außenbereich standhalten können.

## **2.3 Kunststoffe in solarthermischen Kollektoren**

Der erfolgreiche Einsatz von Kunststoffen im Bereich der Solarthermie konnte bereits für mehrere Anwendungen nachgewiesen werden. Dabei handelt es sich in der Regel nicht um vollständige Kunststoffkollektoren, sondern meist um einzelne Bauteile bei denen konventionelle, metallische Werkstoffe durch Kunststoffe ersetzt werden, um deren Vorteile nutzen zu können. Der Haupteinsatzbereich von Kunststoffen liegt bei unverglasten Kollektoren, die in den meisten Fällen zur Schwimmbaderwärmung eingesetzt werden. Bei Schwimmbadabsorbern wird das zu erwärmende Poolwasser ohne Wärmetauscher direkt durch die Kollektoren gepumpt (s. Abbildung 6). Aus diesem Grund müssen die

für die Absorber verwendeten Materialien resistent gegenüber eventuell verwendeten Zusätzen (z.B. Chlor) des Poolwassers sein. Die für die Erwärmung des Schwimmbeckens maximal erzielbare Kollektorvorlauf-Temperatur liegt (abhängig von der Größe des Kollektorfelds und den Einstrahlungsbedingungen) zwischen 20 – 30 °C [8]. Durch den Druckaustausch über die Oberfläche des Schwimmbeckens handelt es sich um ein offenes System, der Maximaldruck ist in der Regel auf 1,2 – 1,5 bar begrenzt ([3] S. 221).

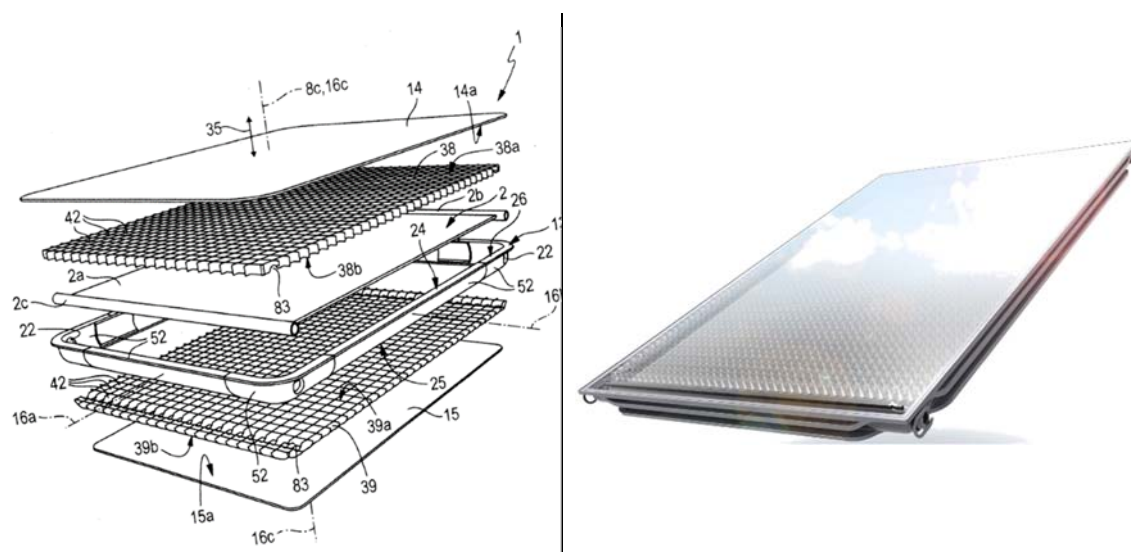


**Abbildung 6:** Beheizung eines Schwimmbeckens als klassisches Einsatzgebiet ungedeckter Absorber aus Kunststoffen.

Aufgrund des relativ geringen Betriebsdrucks und der maximal auftretenden Temperaturen am Absorber im Stagnationsfall können als Werkstoffe Massenkunststoffe (z.B. UV-beständiges PP, PVC, PE und EPDM) verwendet werden. Um Frostschäden an den Absorbern zu vermeiden, müssen diese im Winter entleert bzw. demontiert werden. Die Absorber werden oftmals vollflächig durchströmt (s. Abbildung 7, oben links und unten). Alternativ können auch flexible, mattenförmige Absorber als Schwimmbadabsorber verwendet werden (s. Abbildung 7, oben rechts). Neben den oben beschriebenen Schwimmbadabsorber gibt es mehrere Kollektoren mit Kunststoffabsorbern zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser bzw. zur Heizungsunterstützung. Beim *One World Solar Collector* wird als Absorber (Bruttokollektorfläche 0,95 m<sup>2</sup>) eine wabenartige Struktur verwendet, welche in einen Rahmen aus mehreren verschweißten Kunststoff-Teilen integriert ist (s. Abbildung 8, links). Zwischen Absorber und der transparenten Kunststoffabdeckung befindet sich eine wabenartige Struktur (sog. *Honeycomb*-Struktur), die die Abdeckung abstützt. Die Verwendung solcher *Honeycomb*-Strukturen im Zwischenraum zwischen Absorber und Abdeckung wurde bereits 1965 von Hollands untersucht, der eine Verringerung der konvektiven Wärmeverluste vermutete [9]. Zwischen Absorber und Rückseite des *One World Solar Collector* befindet sich die gleiche *Honeycomb*-Struktur wie zwischen Absorber und Abdeckung (s. Abbildung 8, links).



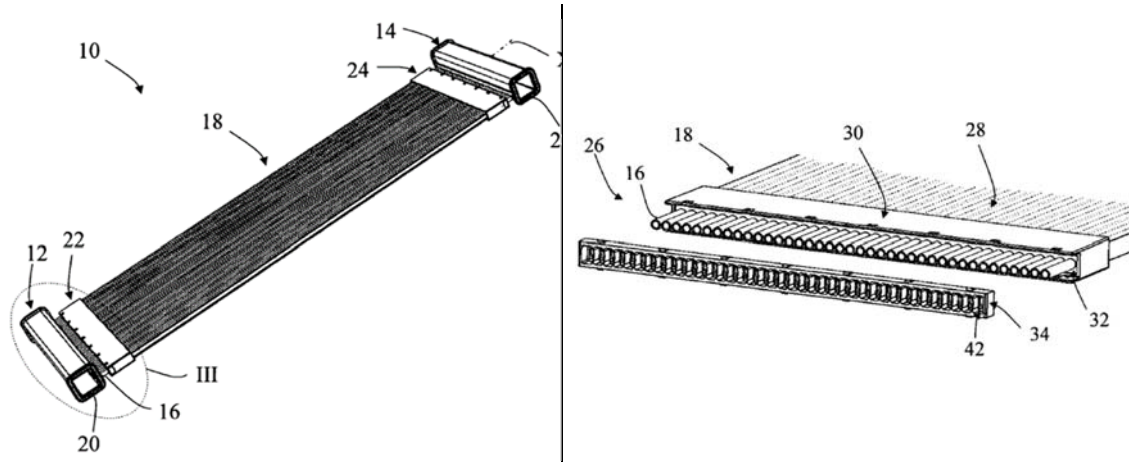
**Abbildung 7:** Unabgedeckte Schwimmbadabsorber. Oben links: OKU®-Absorber mit integriertem Sammelrohr [10]. Oben rechts: SunStar-Absorber [11]. Unten: Roth Heli-oPool® [12].



**Abbildung 8:** One Sun One World Collector. Links: Schematische Explosionszeichnung [13, Fig. 8]. Rechts: Fotorealistische Darstellung [14].

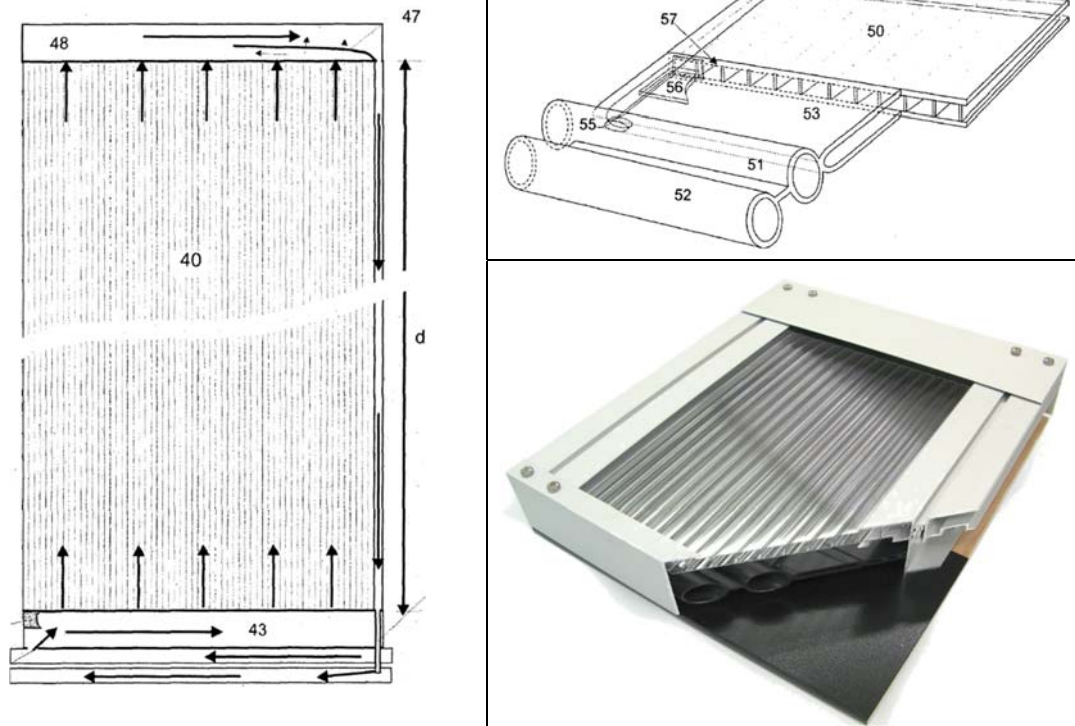
Neben der Reduzierung der konvektiven Wärmeverluste übernehmen die *Honeycomb*-Strukturen auch eine abstützende Funktion, um eine Deformation der vorderseitigen Abdeckungen (z. B. in Folge von Schneelasten) zu reduzieren. Die Effizienz des Kollektors wurde entsprechend EN ISO 9806 ermittelt [15]. Die Parameter der Wirkungsgradkennlinie wurden zu  $\eta_0 = 0,666$ ,  $a_1 = 6,37 \frac{W}{m^2K}$  sowie  $a_2 = 0,034 \frac{W}{m^2K^2}$  bestimmt. Die Kennlinie ist in Abbildung 11 dargestellt (blaue Kurve).

Bei dem vom israelischen Hersteller *Magen Eco Energy* patentierten Kollektor wird der Absorber (Bruttokollektorfläche  $2,25 \text{ m}^2$ ) aus einer Vielzahl einzelner Kunststoffrohre (z.B. aus PP oder PE) zusammengesetzt [16].

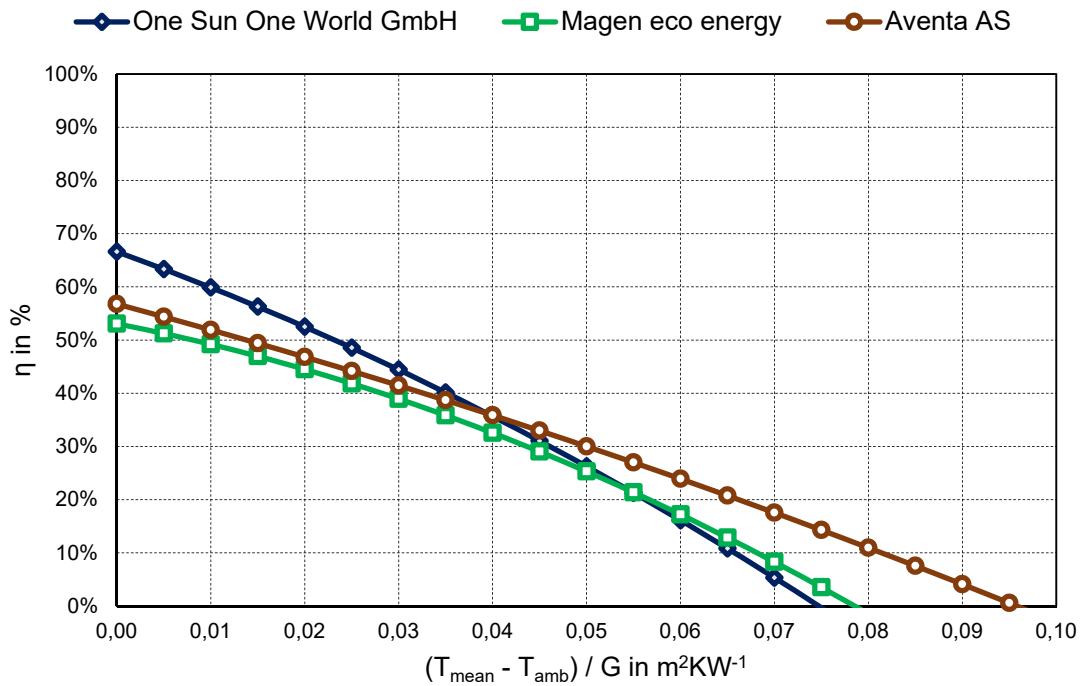


**Abbildung 9:** Kunststoffabsorber der *Fa. Magen eco Energy*. Links: Schematische Gesamtansicht. Rechts: Anschluss der Steigrohre an die Sammelrohre.

Diese Rohre werden mit Hilfe geeigneter Klemmen (30 – 42) zusammengefasst und anschließend an die Sammelrohre (20) angeschlossen (s. Abbildung 9, rechts). Die einzelnen Steigrohre verbinden die beiden Sammelrohre, die im vorliegenden Fall einen rechteckigen Querschnitt besitzen (s. Abbildung 9, links). Die Effizienz des Kollektors wurde entsprechend DIN EN 12975-2 ermittelt [17]. Die Parameter der Wirkungsgradkennlinie wurden zu  $\eta_0 = 0,642$ ,  $a_1 = 4,167 \frac{W}{m^2K}$  sowie  $a_2 = 0,051 \frac{W}{m^2K^2}$  bestimmt. Die Kennlinie ist in Abbildung 11 dargestellt (grüne Kurve). Die norwegische Firma *Aventa AS* verwendet bei ihrem Kollektor eine extrudierte Doppelstegplatte aus Polyphenylensulfid (PPS) als Absorber [18]. Eine Besonderheit dieses Kollektors (Bruttokollektorfläche  $2,65 \text{ m}^2$ ) ist die Anordnung der beiden Sammelrohre, die sich beide unterhalb des Absorbers befinden um die Selbstentleerung des Kollektors bei Einbindung in ein *Drain-Back-System* zu begünstigen (s. Abbildung 10, links und oben rechts). Als Abdeckung wird eine extrudierte PC-Platte verwendet. Mit Hilfe geeigneter Aluminiumprofile wird der Abstand zwischen Abdeckung, Absorber und der rückseitigen Dämmung aus Mineralwolle sichergestellt (s. Abbildung 10, unten rechts). Die Effizienz des Kollektors wurde entsprechend DIN EN 12975-2 ermittelt [19]. Die Parameter der Wirkungsgradkennlinie wurden zu  $\eta_0 = 0,679$ ,  $a_1 = 5,649 \frac{W}{m^2K}$  sowie  $a_2 = 0,015 \frac{W}{m^2K^2}$  bestimmt. Die Kennlinie ist in Abbildung 11 dargestellt (rote Kurve).



**Abbildung 10:** Kollektor der Fa. *Aventa AS*. Links: Schematische Draufsicht. Oben rechts: Schematische Schnittansicht. Unten rechts: Schnittmodell [20].



**Abbildung 11:** Kollektor-Wirkungsgradkennlinien kommerziell verfügbarer Kollektoren (Daten entsprechend [15], [17], [19])

Wie in Abbildung 11 zu sehen, hat der *One World Solar Collector* den höchsten optischen Wirkungsgrad  $\eta_0$ . Im Vergleich zu den beiden anderen Kollektoren weist der Kollektor der Fa. *Aventa AS* bei hohen Temperaturdifferenzen  $(T_{\text{mean}} - T_{\text{amb}}) / G > 0,05 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$  die höchsten Wirkungsgrade auf. Im Betriebspunkt  $(T_{\text{mean}} - T_{\text{amb}}) / G = 0,05 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$  haben alle Kollektoren vergleichbare Wirkungsgrade im Bereich von 25% bis 30%<sup>1</sup>.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Kunststoffe in solarthermischen Kollektoren und Anlagen grundsätzlich verwendet werden können und teilweise bereits eingesetzt werden. Viele der wissenschaftlich untersuchten und kommerziell umgesetzten Konzepte verfolgen bei der Konstruktion des Absorbers den Ansatz, vorgefertigte Halbzeuge (Doppel- / Mehrfachstegplatten, Rohre, etc.) zu verwenden und miteinander zu verbinden. Da diese Halbzeuge auch in anderen Industriezweigen benötigt werden, können diese Komponenten vergleichsweise günstig zugekauft oder ggf. selbst gefertigt werden. Hierdurch sinken zwar die Herstellkosten der Einzelteile, die kostenintensiven Aufwendungen für den Zusammenbau und die Montage bleiben jedoch bestehen. Darüber hinaus verbessert sich das Massenfertigungspotential für den Zusammenbau des Kollektors bei einer reinen Materialsubstitution nicht. Vor diesem Hintergrund konzentriert sich das vorliegende Projekt auf die gesamtheitliche Entwicklung eines Kunststoffkollektors.

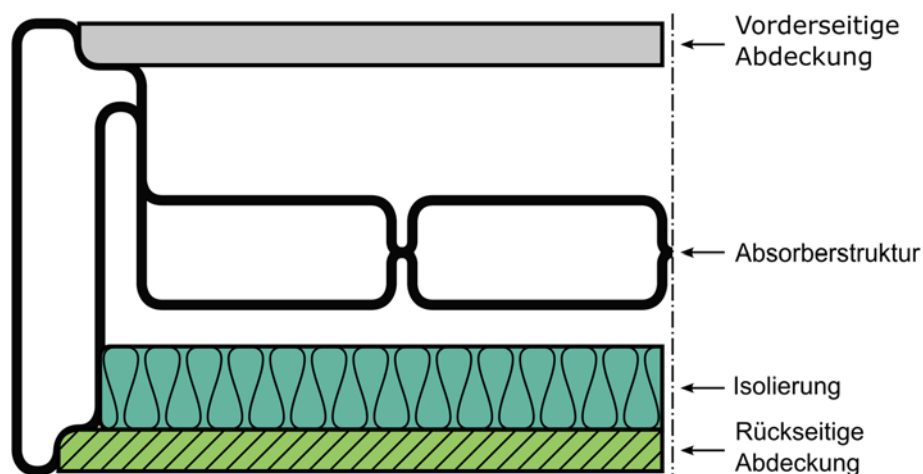
---

<sup>1</sup> Die Effizienz des Kollektors der Fa. Sunlumo wurde nach EN ISO 9806, die Effizienz der Kollektoren von Magen eco Energy und Aventa AS nach DIN EN 12975-2 bestimmt. Für eine Vergleichbarkeit der nach unterschiedlichen Normen bestimmten Effizienz wurden die Kennzahlen  $\eta_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  im Falle von Magen eco Energy und Aventa AS mit dem Verhältnis aus Apertur- zu Bruttokollektorfläche multipliziert [21].

## 3 Kollektorgestaltung und –fertigung

### 3.1 Kollektorgestaltung

Die klassischerweise im Kollektorbau verwendeten metallischen Halbzeuge wie Rohre, Bleche etc. bedingen üblicherweise eine hohe Fertigungstiefe und einen damit verbundenen hohen Personalaufwand bei der Herstellung von Absorbern [22]. Im Anschluss an die (meist manuelle) Fertigung der Absorber werden diese unter Verwendung weiterer Bauteile wie der transparenten Abdeckung und rückseitigen Dämmung in ein Gehäuse integriert. Durch die Verwendung moderner Kunststoff-Fertigungsverfahren entstehen große Spielräume bei der Gestaltung des Kollektors und seiner Bauteile. So wurde im vorliegenden Vorhaben das Konzept verfolgt, Funktionen, welche klassischerweise vom Kollektorgehäuse übernommen werden, direkt in die Absorberstruktur zu integrieren. Hierzu zählen beispielsweise die Aufnahme der vorderseitigen, transparenten Abdeckung und die Minimierung der konvektiven Randverluste durch entsprechende Hohlraumgeometrien (s. Abbildung 12 bzw. [23]).



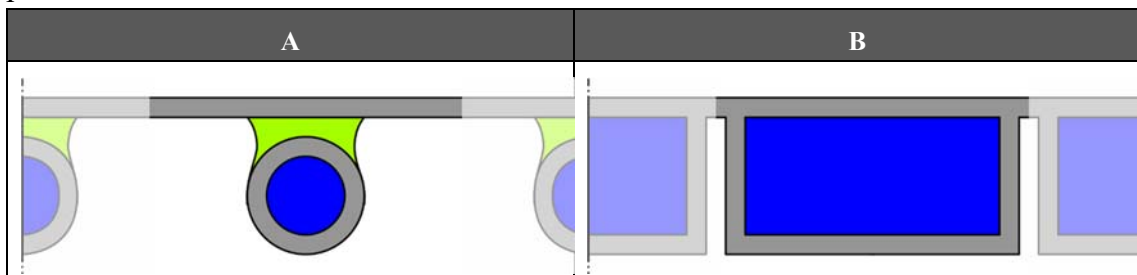
**Abbildung 12:** Absorberstruktur als maßgebliches Element des Kunststoffkollektors

In Kombination mit der vorderseitigen, transparenten Abdeckung führt die Absorberstruktur in Kunststoffbauweise zu einer hohen Verwindungssteifigkeit. Zur Minimierung der rückseitigen Wärmeverluste wird eine Isolierung (z.B. aus Styrodur) auf der Rückseite der Absorberstruktur eingebracht, die mittels einer rückseitigen Abdeckung fixiert werden kann. Die Absorberstruktur bietet sowohl für die vorder- als auch die rückseitige Abdeckung entsprechende Konstruktionsflächen, die eine hochautomatisierte Fertigung des Kunststoffkollektors ermöglicht. So kann die notwendige Klebe- / Dichtmasse mit Fertigungsrobotern auf die Absorberstruktur appliziert werden, anschließend können die Abdeckungen in die Absorberstruktur eingelegt werden. Die rückseitige Abdeckung ist so gestaltet, dass eine Dachanbindung sichergestellt ist. Zusammenfassend bietet die oben beschriebene Absorberstruktur mehrere Vorteile:

- Hohe Steifigkeit,
- Geringe Fertigungstiefe

- Wenige Einzelteile notwendig
- Hochautomatisierte Fertigung möglich

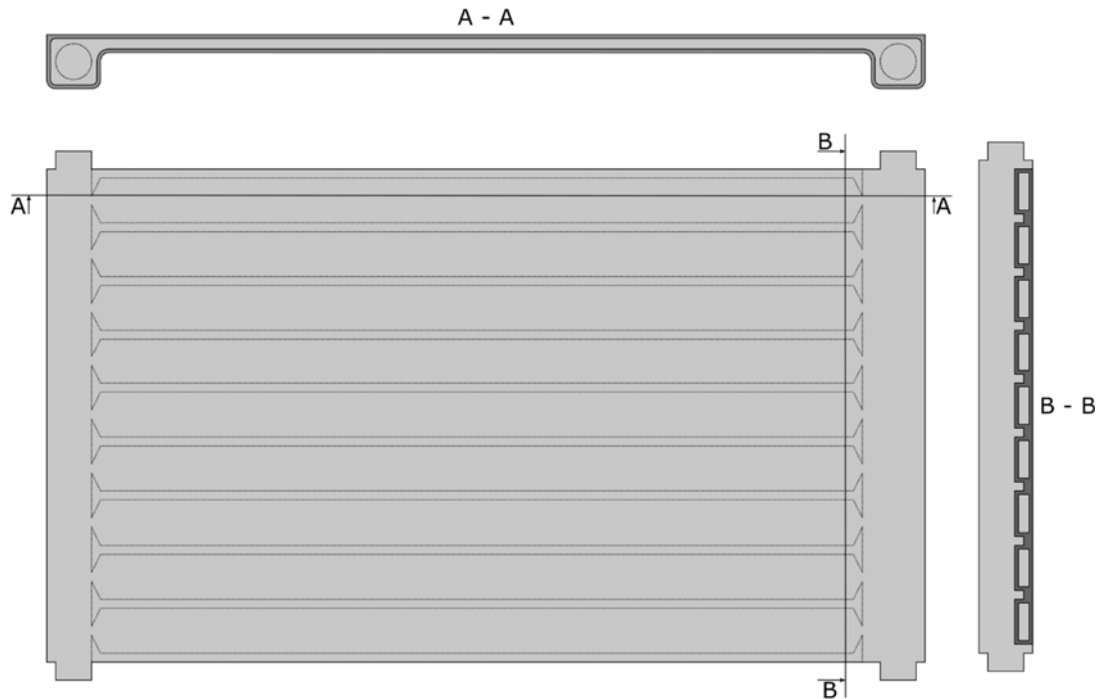
Konventionelle, metallische, solarthermische Flachkollektoren besitzen üblicherweise sog. Blech-Rohr-Absorber, bei denen einzelne Steigrohre mittels Schweiß- oder Lötverbindungen an ein Absorberblech angebunden sind (s. Abbildung 12, links). Der Absorberwirkungsgradfaktor eines solchen Blech-Rohr-Absorbers ist bauartbedingt limitiert, da nur ein gewisser Anteil der eintreffenden Strahlung an die Solarflüssigkeit übertragen werden kann. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Materials im Übergang zwischen Absorberblech und Steigrohr (s. Abbildung 12A, hellgrün hervorgehobener Bereich) ist hierbei besonders wichtig, um einen bestmöglichen Wärmeübergang zwischen den beiden Komponenten sicherzustellen.



**Abbildung 13:** Querschnitt durch eine Absorber-Finne. Links: Konventioneller Blech-Rohr-Absorber. Rechts: Volumetrisch durchströmter Kunststoffabsorber

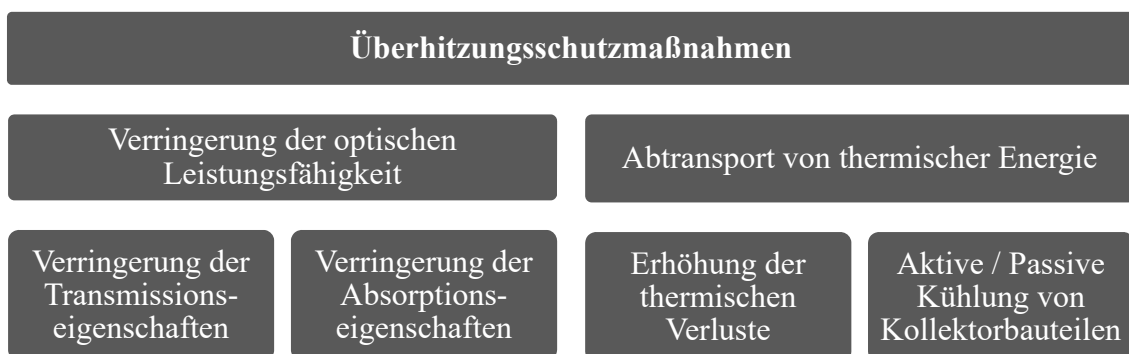
Aufgrund der im Vergleich zu Metallen deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen ist das oben beschriebene Konzept für die Entwicklung eines Kunststoffabsorbers nur eingeschränkt anwendbar. Um die materialbedingten Nachteile von Kunststoffen zu kompensieren, muss die absorbierte Solarstrahlung möglichst vollflächig auf der Rückseite des Absorbers an den Wärmeträger übertragen werden (s. Abbildung 12B). Aufgrund der geringeren Distanz sowie der höheren Wärmeübertragungsfläche zwischen der strahlungsempfangenden Fläche und dem Wärmeträger reduziert sich der thermische Widerstand zwischen Absorber und Wärmeträger gegenüber der eingangs beschriebenen Blech-Rohr-Anordnung. Der entwickelte Absorber greift das Konzept eines volumetrisch durchströmten Absorbers auf (s. Abbildung 13). Der Wärmeträger strömt zunächst in einen der beiden Sammelkanäle, von wo aus das Fluid auf mehrere Steigkanäle aufgeteilt wird. Zur Sicherstellung optimaler Strömungsbedingungen in diesem Bereich wird eine entsprechende Übergangsgeometrie zwischen Sammel- und Steigkanal benötigt. Die konische Verengung / Aufweitung dieser Übergangsgeometrie kann der Draufsicht in Abbildung 13 entnommen werden, die volumetrisch durchströmten Steigkanäle sind in der Schnittansicht B-B dargestellt. Schnittansicht A-A zeigt das unterschiedliche Höhenverhältnis zwischen Sammel- und Steigkanal (s. Abbildung 13).





**Abbildung 14:** Absorber (Schnittansicht)

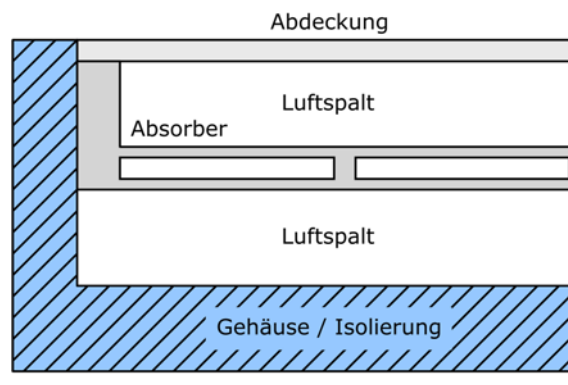
Aufgrund der im Vergleich zu metallischen Werkstoffen vergleichsweise niedrigen Einsatztemperaturen von Kunststoffen muss bei der Gestaltung von Kunststoffabsorbern auf einen geeigneten Überhitzungsschutz geachtet werden. Grundsätzlich lassen sich Überhitzungsschutzmaßnahmen in zwei Kategorien einteilen. So kann einerseits die optische Leistungsfähigkeit von Kunststoffkollektoren verringert werden, z.B. durch die Verringerung der Transmissions- bzw. Absorptionseigenschaften, andererseits kann der Abtransport thermischer Energie, z.B. durch eine Erhöhung thermischer Verluste oder durch Kühlung des Kollektors, erhöht werden (s. Abbildung 15). Eine umfassende Untersuchung zu verschiedenen Überhitzungsschutzmaßnahmen wurden im Rahmen des Vorprojekts bereits erarbeitet [24].



**Abbildung 15:** Klassifizierung von Überhitzungsschutzmaßnahmen nach ([24] S. 47)

Im Rahmen des Vorhabens wurde der Fokus auf eine Kombination aus einer Verringerung der Absorptionseigenschaften sowie eine die Erhöhung der thermischen Verluste gelegt, da diese Überhitzungsschutzmaßnahmen besonders kostengünstig zu realisieren

sind und damit in Übereinstimmung mit den Projektzielen stehen. Die Verringerung der Absorptionseigenschaften wurde durch eine fehlende selektive Beschichtung auf der Oberfläche des Kunststoffabsorbers realisiert. Eine Erhöhung der thermischen Verluste sollte durch eine angepasste rückseitige Isolierung des Kunststoffabsorbers erreicht werden. Um den Einfluss der rückseitigen Isolierung auf die Kollektoreffizienz zu überprüfen, wurde im Rahmen dieses Projekts ein geeignetes Kollektormodell in MATLAB / Simulink [25] aufgebaut, welches in der Lage ist, auftretende Maximaltemperaturen sowie die Effizienz der jeweiligen Kollektorkonstruktion zu prognostizieren. Die detaillierte Modellierung des Kollektormodells wird in [26] ausführlich beschrieben. Zwischen Absorber und Isolierung / rückseitiger Abdeckung befindet sich ein Luftspalt, der die Isolierwirkung erhöht und dabei gleichzeitig den Materialeinsatz reduziert (s. Abbildung 16).



**Abbildung 16:** Gehäusekonzept mit geschäumter Wanne

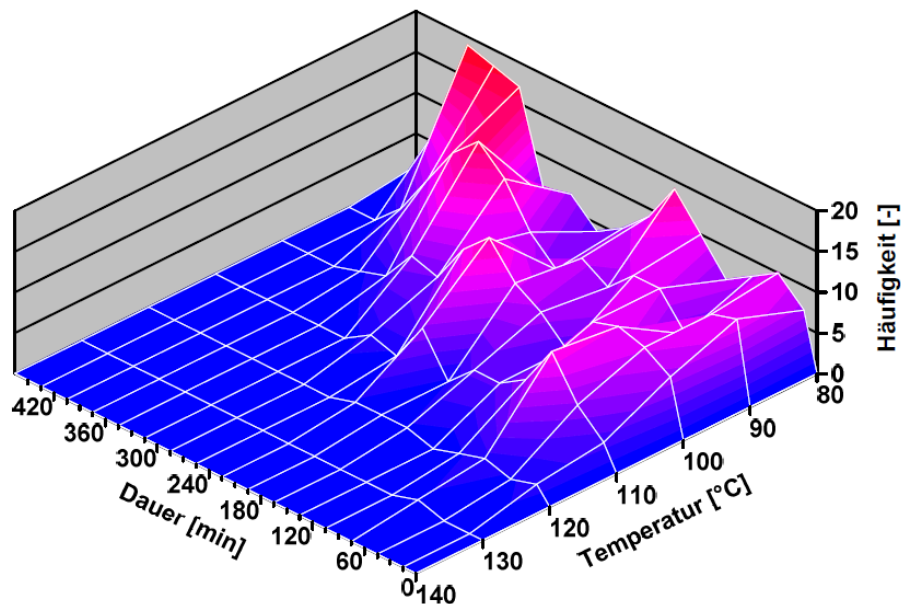
Im Rahmen einer Simulationsstudie mit MATLAB / Simulink [25] und unter Verwendung der CARNOT Blockbibliothek [27] wurde ein Simulationsmodell des oben beschriebenen Kollektorkonzepts entwickelt. Dabei wurden die Abmessungen des rückseitigen Luftspaltes und die Dicke der Isolierung variiert, um deren Einfluss auf die Kollektoreffizienz zu ermitteln. Anschließend wurde im Rahmen einer Stagnationsprüfung die maximale Gehäusetemperatur ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1:** Ergebnisse der Parameterstudie

Höhe des Luftspalts in mm	Dicke der Isolierung in mm	$\eta_0$	$a_1$ in W/m <sup>2</sup> K	$a_2$ in W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>	Max. Absorbertemperatur in °C
10	30	0,823	5,837	0,026	115
20	20	0,822	6,129	0,027	106
10	40	0,823	5,653	0,025	120
20	40	0,822	5,647	0,025	119

Es konnte festgestellt werden, dass die thermischen Verluste durch eine Erhöhung der Isolierung auf 40 mm reduziert werden können, die Kollektoreffizienz steigt dadurch an.

Eine Verdoppelung des Luftspalts von 10 mm auf 20 mm wirkt sich hingegen nur geringfügig auf die Effizienz und die maximalen Absorberrtemperaturen aus. Die während der Stagnationsuntersuchungen ermittelten maximalen Temperaturen sind für das verwendete PP als Absorberrmaterial als unkritisch einzustufen [28]. In einer weiteren Simulation wurde die maximale thermische Belastung der Kollektoren durch einen ganzjährig stagnierenden Kollektor simuliert. Die Ergebnisse sollen, neben der Maximaltemperatur unter Normbedingungen, weitere Anhaltswerte für die Materialauswahl der Bauteile geben. Abbildung 17 zeigt die Häufigkeit der thermischen Lasten auf den Kunststoffkollektor in Abhängigkeit von Temperatur und Dauer. Dabei tritt die Temperaturbelastung oberhalb der Dauergebrauchstemperatur von PP (= 100 °C [29] S. 228) hauptsächlich auf dem Temperaturniveau von 110 °C für eine Dauer von meist unter 2 h auf. Nur äußerst selten und sehr kurzzeitig liegen die Temperaturen oberhalb von 120 °C bis 130 °C überschritten. Somit liegt die thermische Belastung gemäß des Temperaturlevels und der Dauer (wenige Minuten bis 2 h) im angegebenen Bereich der kurzzeitigen Gebrauchstemperatur (= 140 °C [29] S. 228).

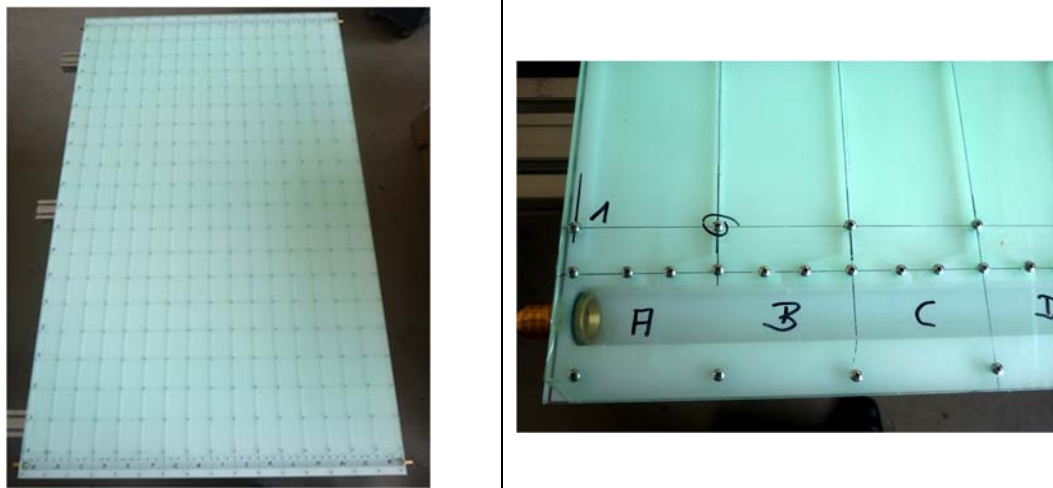


**Abbildung 17:** Häufigkeitsverteilung der thermischen Lasten auf Kunststoffkollektor in Abhängigkeit von Temperaturniveau und Dauer bei einjähriger Stagnation

### 3.2 Absorberkonstruktion

Die grundlegende Gestaltung der Strömungsgeometrie wurde von den Projektpartnern als Vorarbeit in das Projekt eingebracht. Die Zielsetzung bei der Konstruktion lag hierbei auf einer gleichmäßigen Durchströmung aller Steigkanäle, um einerseits einen möglichst geringeren Druckverlust, andererseits eine möglichst gleichmäßige Wärmeaufnahme des Absorbers zu gewährleisten. Auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt als Vorstufe für die konstruktive Umsetzung in ein Prototypenwerkzeug die Überprüfung des Durchströmungsverhaltens in einem praxisnahen Versuchsaufbau. Zu diesem Zweck wurde ein Modell mit einer Länge von 1.600 mm und einer Breite von 1.010 mm, (s. Abbildung 18) aufgebaut und strömungstechnisch untersucht. Die vorab im Rahmen einer

Strömungssimulation gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf den Strömungsquerschnitt des Verteil- und Sammelkanals, die düsenförmige Ausbildung des Ein- und Ausströmquerschnitts und den Querschnitt der volumetrischen Steigkanäle wurden dabei berücksichtigt. Im Rahmen der messtechnischen Untersuchung wurden die relevanten Einflussparameter variiert und deren jeweiliger Einfluss auf den Druckverlust und das Durchströmungsverhalten untersucht. Hierbei wurde die Strömungsgeschwindigkeit in dem Bereich zwischen 30 und 120 l/(hm<sup>2</sup>), der Neigungswinkel zwischen 0° und 60° sowie die Kollektoreintrittstemperatur im Bereich von 20 °C und 110 °C variiert. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Messergebnisse mit den Ergebnissen der Strömungssimulation wurde das Design der Strömungsgeometrie für die Prototypen übernommen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die für die Umsetzung des entwickelten Zieldesigns notwendigen Überlegungen hinsichtlich geeigneter Fertigungsverfahren und Werkstoffe beschrieben.



**Abbildung 18:** Messtechnische Untersuchung des Durchströmungsverhaltens (Links: Draufsicht mit transparenter Abdeckung aus einer 4 mm dicken Acrylplatte / Rechts: Detailansicht –Übergang Verteilerkanal / Einlassdüsen / Steigkanäle)

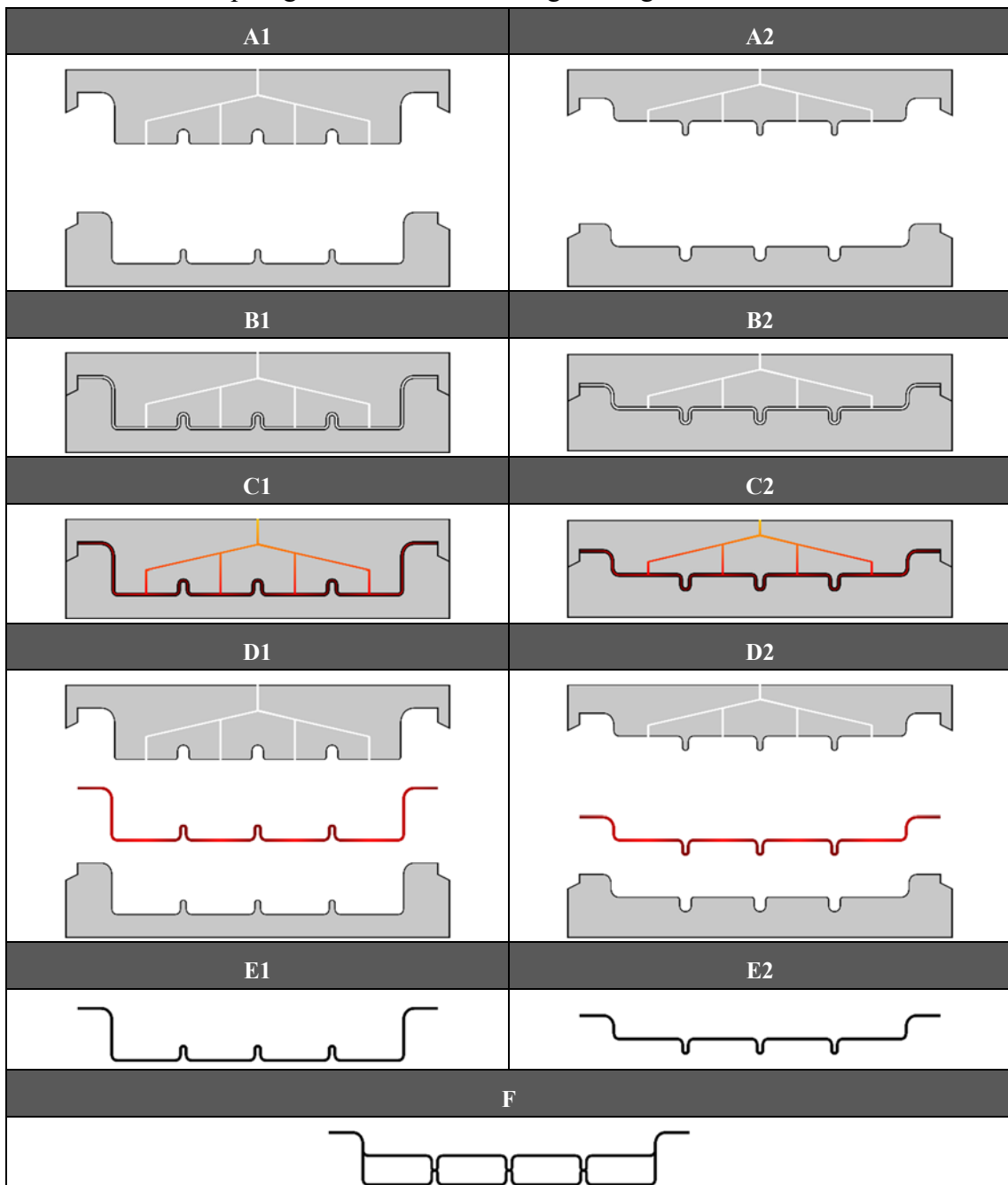
### 3.3 Überblick über geeignete Fertigungsverfahren

Da für die Fertigung eines Absorbers als integraler Bestandteil des Kunststoffkollektors prinzipiell mehrere Fertigungstechniken in Frage kommen, soll nachfolgend eine Übersicht über geeignete Verfahren gegeben werden.

#### 3.3.1 Spritzgießen

Als Ausgangsmaterial wird beim Spritzgießen eine flüssige Kunststoffschmelze benötigt, die üblicherweise durch Erhitzen von Kunststoffgranulat gewonnen wird. Im Vergleich zu plattenförmigen Halbzeugen ist Kunststoffgranulat günstiger zu beziehen, da geringere Kosten bei der Herstellung und für den Transport entstehen. Gegenüber anderen Herstellungsverfahren werden beim Spritzgießen von Kunststoffen komplexere Werkzeuge benötigt. Weiterhin muss beim Einfüllen des flüssigen Kunststoffs eine möglichst gleichmäßige

Temperatur der Schmelze sichergestellt werden, um eine gleichmäßige molekulare Struktur im Bauteil zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird bei komplexeren Bauteilen die flüssige Kunststoffmasse an mehreren Stellen gleichzeitig in die Form eingespritzt. Für eine hohe thermische und mechanische Stabilität und einen geringen Verzug des späteren Bauteils ist eine korrekte Dimensionierung und Positionierung dieser Anspritzpunkte notwendig. Eine gleichmäßige Temperatur der Schmelze in der Form wird darüber hinaus auch durch eine aktive Temperierung der Formhälften sichergestellt. Diese Temperierung führt zu teuren Anlagen und Werkzeughälften, weshalb Spritzgießen nur bei einer hohen Stückzahl vorteilhaft ist. Der Verfahrensablauf für die Herstellung eines Kunststoffabsorbers mit Hilfe des Spritzgießens ist in Abbildung 19 dargestellt.



**Abbildung 19:** Prozessschritte beim Spritzgießen (eigene Darstellung)

Für die Fertigung eines Absorbers ist jeweils ein Ober- und ein Unterteil notwendig, die jeweils zwei Werkzeuge benötigen. Das separat gefertigte Ober- und Unterteil wird nach der Fertigung miteinander zu einem fertigen Absorber verbunden. Die Herstellung des Unterteils kann der linken Spalte von Abbildung 19, die des Oberteils der rechten Spalte entnommen werden. Zu Beginn sind beide Formhälften geöffnet (s. Abbildung 19A). Die zur Zuführung der Kunststoffschmelze notwendigen Kanäle können dabei (wie dargestellt) nur in einer Werkzeughälfte oder in beiden eingebracht sein. Im nächsten Schritt werden die beiden Formhälften anschließend geschlossen (s. Abbildung 19B) und die Schmelze eingespritzt (s. Abbildung 19C). Nach Abkühlen des Bauteils (entweder durch aktive oder passive Kühlmechanismen) und einem Entgraten der Bauteile kann das für den Absorber benötigte Ober- und Unterteil aus dem geöffneten Werkzeug entnommen werden (s. Abbildung 19D). Die vollständig erkalteten Bauteile (s. Abbildung 19E) müssen im letzten Schritt zu einem funktionsfähigen Absorber miteinander verbunden werden (s. Abbildung 16F) ([30] S. 162–174).

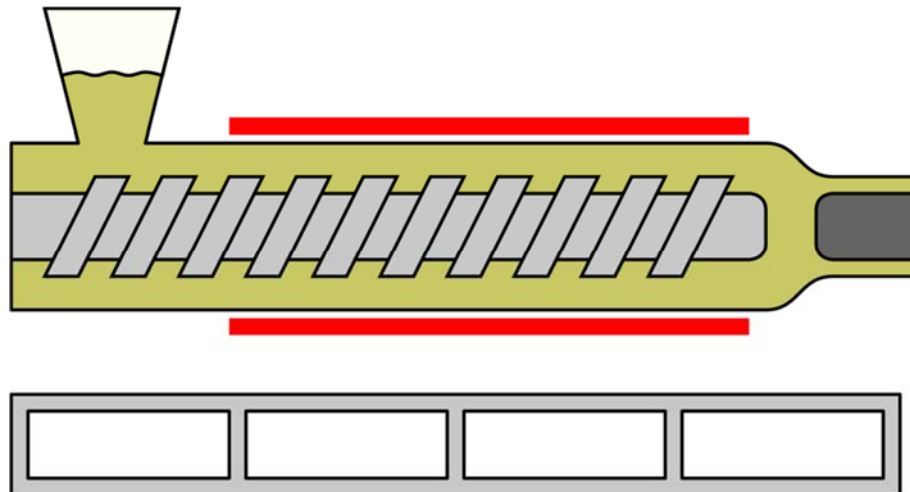
### 3.3.2 Extrudieren

Da mit Hilfe des Extrusionsprozesses nur Profile mit gleichbleibenden Querschnitten gefertigt werden können, kann dieses Verfahren im Falle solarthermischer Absorber zur Herstellung der Steigkanäle verwendet werden (s. Abbildung 20, grün markierter Bereich). Die Sammelkanäle und deren Anbindung an die extrudierten Steigkanäle müssen in diesem Fall mit einem anderen Herstellungsverfahren (z.B. Spritzgießen) gefertigt werden. Die Einzelteile müssen im Anschluss miteinander verbunden werden, um einen funktionsfähigen Absorber zu erhalten.



**Abbildung 20:** Verwendung von extrudierten Bauteilen bei einem Kunststoffabsorber

Beim Extrudieren wird Kunststoffgranulat in einen Trichter gegeben, wo es von einer Schnecke aufgeschmolzen, vermischt und vorwärtsbewegt wird (s. Abbildung 21 oben).



**Abbildung 21:** Prozessschritte bei der Extrusion. (Eigene Darstellung. Oben: Funktionsskizze mit Trichter, Schnecke (hellgrau), Heizung (rot) und Stempel (dunkelgrau) / Unten: Extrudiertes Rechteckprofil)

Mit Hilfe eines Heizgerätes, welches außerhalb und entlang des Zylinders angebracht ist, wird das Kunststoffgranulat aufgeschmolzen. Durch den Einsatz eines Stempels am Ende des Extruders können Hohlprofile mit beliebigen Querschnitten erzeugt werden. Im Falle des Kunststoffabsorbers können so einzelne Strömungskanäle bzw. eine Doppelstegplatte mit einem rechteckigen Querschnitt gefertigt werden (s. Abbildung 21 unten). Diese Platte muss anschließend mittels geeigneter Fügeverfahren an die restlichen Komponenten des Absorbers angebunden werden ([30] S. 176–183).

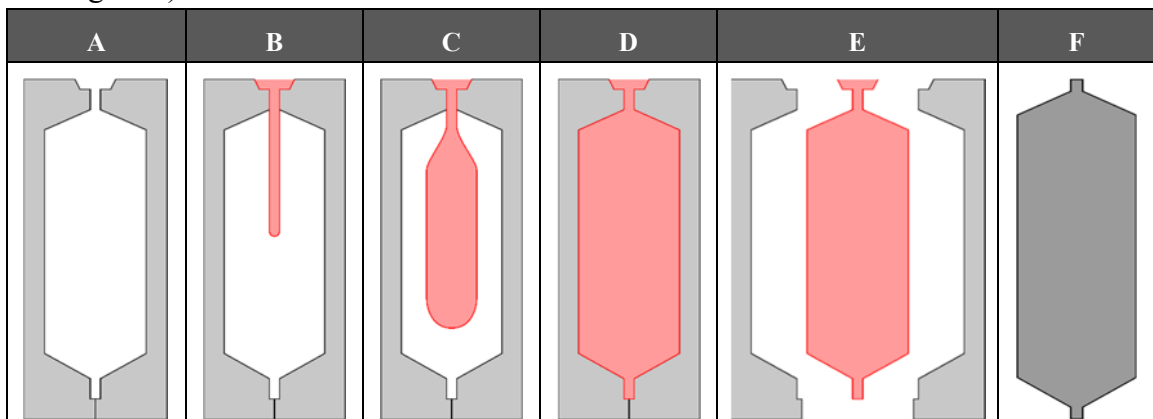
### 3.3.3 Extrusionsblasformen

Ähnlich wie beim Extrudieren können auch beim Extrusionsblasformen lediglich einzelne Bestandteile eines Kunststoffabsorbers gefertigt werden. Der Vorteil gegenüber dem Extrudieren liegt jedoch in der Tatsache begründet, dass auch Bauteile mit einem nicht-konstanten Querschnitt hergestellt werden können. So können beispielsweise die einzelnen Steigkanäle des Absorbers samt entsprechender Übergangsgeometrie mittels Extrusionsblasformen hergestellt werden (s. Abbildung 22).



**Abbildung 22:** Verwendung von blasgeformten Bauteilen bei einem Kunststoffabsorber

Beim Extrusionsblasformen wird ein Rohling in ein Werkzeug, bestehend aus zwei Formhälften, eingelegt. Dieser Rohling wird in einen vorgelagerten Extrusionsprozess (s. Abschnitt 3.3.2) hergestellt (nicht separat dargestellt) und dem Werkzeug zugeführt (s. Abbildung 23A).



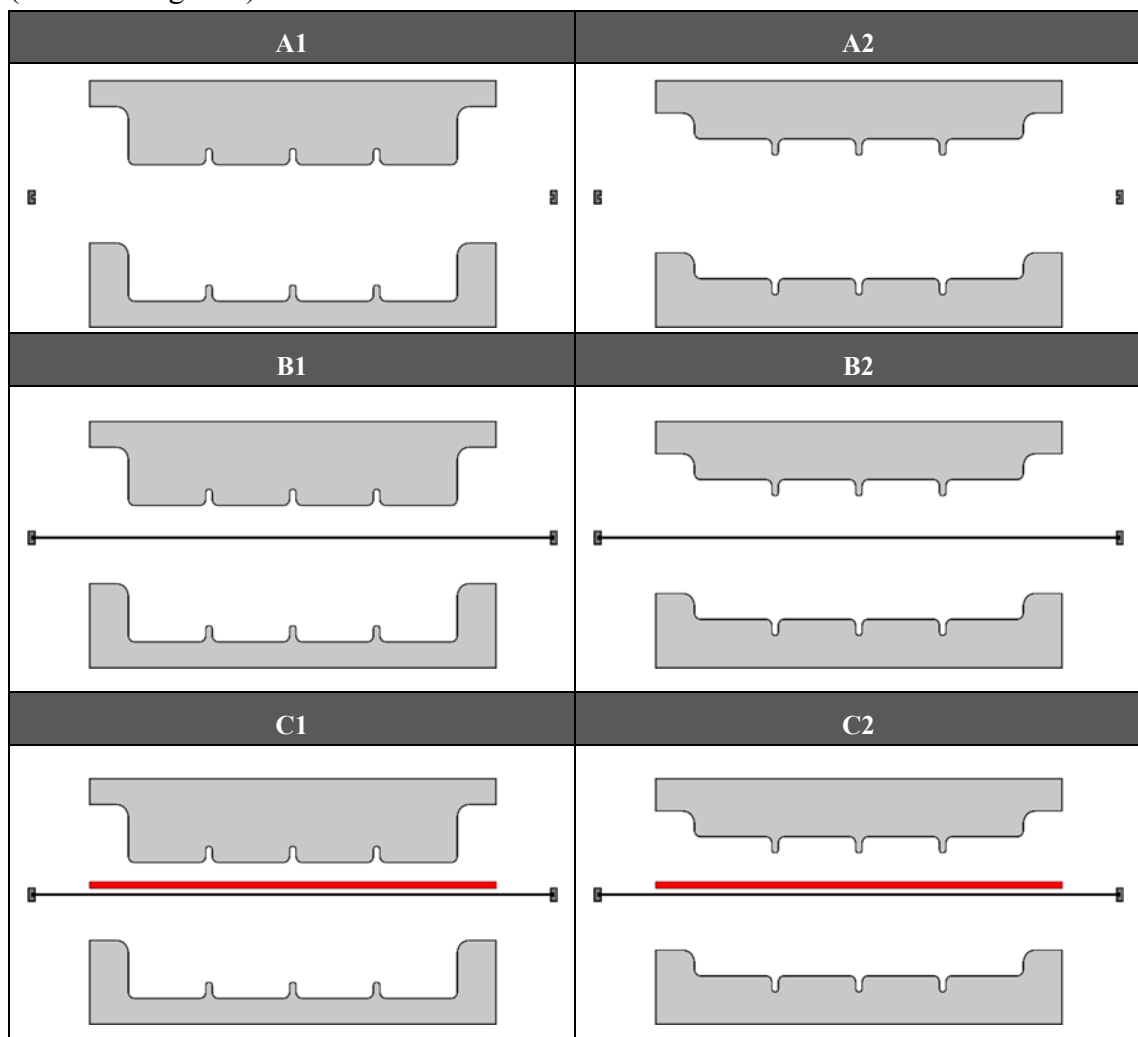
**Abbildung 23:** Prozessschritte beim Extrusionsblasformen (eigene Darstellung)

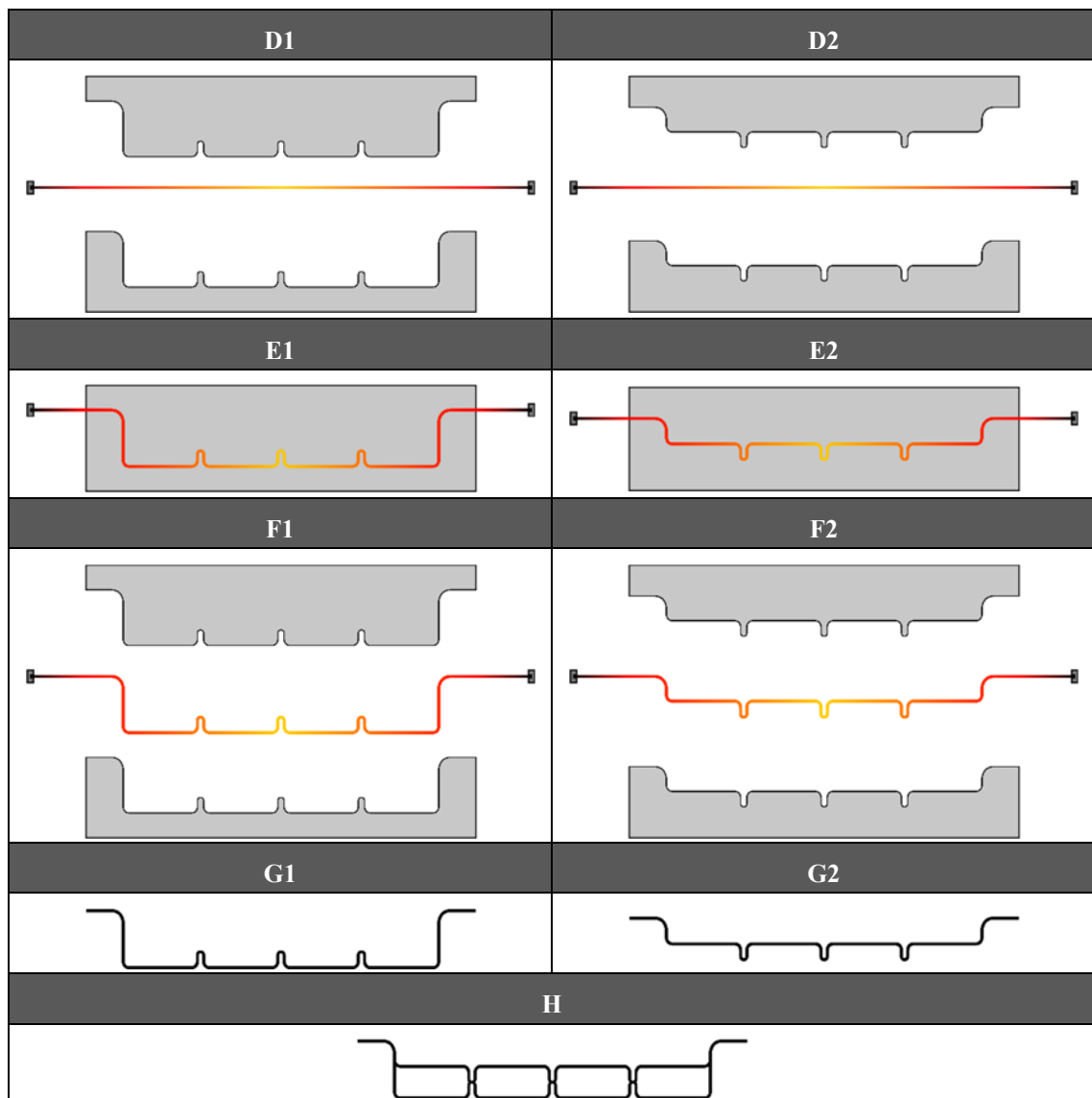
Anschließend wird der Rohling unter Druck in die gewünschte Form gebracht (s. Abbildung 23B-D). Nach dem Öffnen (s. Abbildung 23E) kann das fertige Bauteil entnommen werden. Der so entstandene Steigkanal muss am unteren und oberen Ende auf- bzw. abgesägt werden (s. Abbildung 23F) und kann anschließend an die Sammelkanäle (in diesem Fall z.B. mittels Extrusion hergestellt) angebunden werden ([30] S. 190–191).



### 3.3.4 Singlesheet-Thermoforming

Beim *Singlesheet-Thermoforming* werden flächige Halbzeuge als Ausgangsmaterial für die Herstellung komplexer Bauteile benötigt. Im Unterschied zum *Twinsheet-Thermoforming*, bei welchem der ganze Absorber mit lediglich zwei Prozessschritten hergestellt werden kann (*Twinsheet-Thermoforming* + Nachbearbeitung), ist bei Verwendung des *Singlesheet-Thermoforming*-Prozesses eine höhere Prozesstiefe notwendig. So werden insgesamt vier Formhälften für die Abformung eines Ober- und eines Unterteils benötigt, die anschließend noch miteinander verbunden werden müssen (z.B. durch Schweißen, Kleben, o.ä.). Im Vergleich zum *Twinsheet-Thermoforming* ist das *Singlesheet-Thermoforming* in der Praxis jedoch verbreiteter und benötigt weniger Prozessparameter, was die Maschinen- und Betriebskosten dieses Prozesses positiv beeinflusst. Die kostengünstigeren Formhälften sowie die fehlende Prozessluft sind als weitere Vorteile dieses Verfahrens zu nennen. Die Prozessschritte zur Herstellung eines Absorbers im *Singlesheet-Thermoforming*-Verfahren sind in Abbildung 24 dargestellt. Für die Herstellung eines Ober- und eines Unterteils werden jeweils zwei Formhälften benötigt. Die Fertigungsschritte zur Herstellung des Unterteils sind in der linken Spalte, die des Oberteils in der rechten Spalte 2 von Abbildung 24 dargestellt. Im geöffneten Zustand (s. Abbildung 24A) wird jeweils eine Kunststoffplatte zwischen das Ober- und Unterteil in einer Halterung fixiert (s. Abbildung 24B).



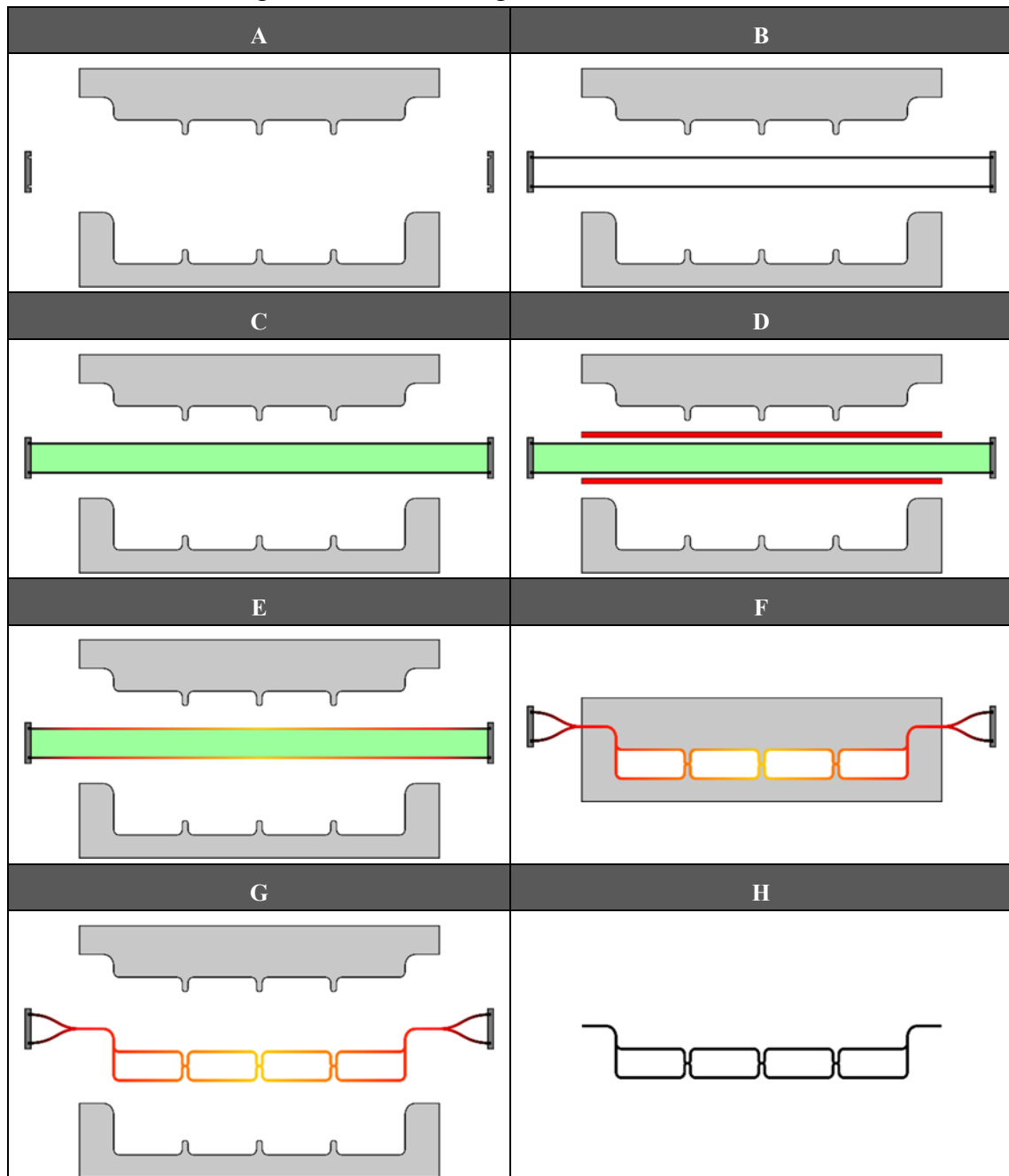


**Abbildung 24:** Prozessschritte beim Singlesheet-Thermoforming. Spalte 1: Herstellung des Unterteils. Spalte 2: Herstellung des Oberteils (eigene Darstellung)

Anschließend werden die eingespannten Platten mit Hilfe einer Infrarot-Heizung erwärmt, die zu diesem Zweck zwischen die beiden Formhälften gefahren wird (s. Abbildung 24C). Sobald die für die Umformung notwendige Temperatur erreicht ist, wird die Heizung wieder entfernt, um ein Verfahren des Ober- und Unterteils beim Abformprozess nicht zu behindern (s. Abbildung 24D). Im nächsten Schritt werden die beiden Formhälften geschlossen, dabei werden die erwärmten Kunststoffplatten in die gewünschte Form gebracht. (s. Abbildung 24E). Nach dem Öffnen des Werkzeugs (s. Abbildung 24F) kühlen die Formteile aus (s. Abbildung 24G), bevor diese im letzten Schritt mit Hilfe eines geeigneten Verfahrens miteinander verbunden werden (s. Abbildung 24H) ([30] S. 199).

### 3.3.5 Twinsheet-Thermoforming

Bei dem *Twinsheet-Thermoforming*-Verfahren handelt es sich um einen Verarbeitungsprozess, bei denen flächige Halbzeuge (Folien oder Platten) mittels Druck und Temperatur umgeformt werden. Als Werkstoffe können sowohl amorphe (z.B. PS, ABS, PMMA; PC) als auch teilkristalline Thermoplaste verwendet werden ([31] S. 243–244). Der Ablauf zur Fertigung eines Kunststoffabsorbers mittels des *Twinsheet-Thermoforming*-Prozesses ist in Abbildung 25 schematisch dargestellt.



**Abbildung 25:** Prozessschritte beim Twinsheet-Thermoforming (eigene Darstellung)

Das Werkzeug besteht aus einer oberen und einer unteren Formhälfte (s. Abbildung 25A). Im geöffneten Zustand werden zwei Kunststoffplatten zwischen die beiden Formhälften eingebracht und mit einer Klemmvorrichtung in Position gehalten (s. Abbildung 25B).

Die Luft zwischen oberer und unterer Platte (s. Abbildung 25C, grün markierter Bereich) wird als Stützluft bezeichnet. Maschinenseitig kann der Druck im Zwischenraum verändert werden, um wahlweise einen Über- oder Unterdruck zu realisieren. Zwei Heizregister heizen die beiden eingelegten Kunststoffplatten auf die notwendige Betriebstemperatur auf. (s. Abbildung 25D). Durch die hohen Temperaturen verändern die eingelegten Kunststoffplatten ihre mechanischen Eigenschaften, das Material verformbar. Eine fortlaufende Kontrolle und Anpassung der Druckbedingungen im Zwischenraum der beiden Platten (Stützluft) verhindert eine Beschädigung des Materials und des Werkzeugs während der Aufheizphase. Sobald die Platten hinreichend temperiert sind, werden die Heizregister entfernt (s. Abbildung 25E) und die beiden Werkzeughälften geschlossen (s. Abbildung 25F). Nach dem Wiederöffnen und Abkühlen des Formteils (s. Abbildung 25G) müssen im letzten Schritt überstehende Materialreste entfernt werden, z.B. durch eine Säge- oder Stanzbearbeitung (s. Abbildung 25H). Anschließend kann der fertige Absorber weiterverarbeitet werden.

### 3.4 Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahren

Da für die Fertigung eines Kunststoffkollektors prinzipiell mehrere Fertigungsverfahren in Frage kommen, wurde die Entscheidung über das am besten geeignete Verfahren mit Hilfe einer gewichteten Punktwertung ermittelt. Grundlage hierfür ist die Bewertung mehrerer unterschiedlicher Kriterien anhand des sog. *paarweisen Vergleichs* ([32] S. 65–70). Im ersten Schritt werden mehrere voneinander unabhängige Kriterien definiert, die anschließend miteinander verglichen werden. Hierzu werden die Kriterien in eine Matrix eingetragen, gegenübergestellt und ausgewertet. Ziel ist es, die Gewichtung der einzelnen Kriterien untereinander zu ermitteln. Im zweiten Schritt wird jedes einzelne Kriterium (I) mit jedem anderen Kriterium (II - IV) verglichen und entsprechend einem Bewertungsschlüssel beurteilt (z.B.: 0: Kriterium I ist weniger wichtig als Kriterium II, 1: Kriterium I ist gleich wichtig wie Kriterium II, 2: Kriterium I ist wichtiger als Kriterium II). Ein Beispiel eines paarweisen Vergleichs mit 4 Kriterien ist in Abbildung 26 dargestellt.

**Bewertungssystem:**

0: A ist weniger wichtiger als B  
 1: A ist gleich wichtig wie B  
 2: A ist wichtiger als B

	Kriterium A	Kriterium B	Kriterium C	Kriterium D	Summe	Prozentuale Gewichtung
Kriterium A		2	2	2	6	50%
Kriterium B	0		1	2	3	25%
Kriterium C	0	1		1	2	17%
Kriterium D	0	0	1		1	8%
					<b>12</b>	<b>100%</b>

**Abbildung 26:** Exemplarische Durchführung eines paarweisen Vergleichs

Im letzten Schritt werden die Wertungen der einzelnen Kriterien zeilenweise aufsummiert, um so die Relevanz jedes Kriteriums zu bestimmen. Da die Gesamtsumme (im o.g. Beispiel 12) aller Kriterien nicht notwendigerweise gleich ist, wird für das weitere Vorgehen die prozentuale Gewichtung jedes Kriteriums berechnet.

Basierend auf den Kriterien des paarweisen Vergleichs können im Anschluss unterschiedliche Kunststoffverarbeitungsverfahren bewertet werden. Hierbei wird bewertet, in welchem Maße das jeweilige Verfahren das entsprechende Kriterium erfüllt. Im Rahmen des Projekts wurde diese Gewichtung und Bewertung sowohl von Mitarbeitern des *InES* als auch der *Fa. Roth Werke GmbH* durchgeführt, um mehrere unterschiedliche Einschätzungen abzubilden. Im Gegensatz zu anderen Bewertungsverfahren werden unterschiedliche Kunststoffverarbeitungsverfahren mit Hilfe des *paarweisen Vergleichs* relativ beurteilt.

### **3.4.1 Kriterien für die Kollektorfertigung**

Zur Durchführung des in Abschnitt 3.4 beschriebenen *paarweisen Vergleichs* wurden insgesamt 21 Parameter definiert, die sich den Bereichen *Kosten*, *Qualität*, *Wartung* sowie *Bauteil* zuordnen lassen. Eine Beschreibung dieser Kriterien ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

### **3.4.2 Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens**

Im ersten Schritt wurden die in Abschnitt 3.4.1 ermittelten Kriterien von mehreren Mitarbeitern der beiden Projektpartner mit Hilfe der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Methode *des paarweisen Vergleichs* gewichtet. Die für die Auswahl der optimalen Fertigungsverfahren wichtigsten Kriterien waren (niedrige) *Stückkosten* und eine hohe *Maschinenzuverlässigkeit*. Die Kriterien *geringe Maschinen-*, und *Materialkosten* sowie eine hohe *Werkzeugzuverlässigkeit* haben ebenfalls hohen Bewertungen seitens der Teilnehmer erhalten. Die am wenigsten wichtigen Kriterien waren *Recycling* und *Energieverbrauch*. Den Themen *Füllstoffe*, *geringe Werkzeugkosten* sowie *Bauteildesign / Bauteilgröße* wurden im Vergleich zu den restlichen Kriterien eine ebenfalls untergeordnete Bedeutung zugeordnet. Im Anschluss wurde jedes der 5 betrachteten Fertigungsverfahren (Spritzgießen, Extrudieren, Extrusionsblasformen, *Singlesheet-Thermoforming* und *Twinsheet-Thermoforming*) in Bezug auf deren Eignung für die Fertigung eines Kunststoffabsorbers bewertet. Im letzten Schritt wurden die Gesamtpunkte eines jeden Verfahrens über die Anzahl der Teilnehmer gemittelt und auf die maximal mögliche Punktzahl normiert. Das Ergebnis der Auswertung ist in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 2:** Kriterien für die Bewertung von Kunststoffverarbeitungsverfahren

	Kriterium	Beschreibung
Kosten	Stückkosten	Kosten eines Kollektors pro Stück
	Maschinenkosten	Alle Kosten, die für die Projektierung, Auswahl, Bereitstellung, Aufstellung, Nutzung, Bereithaltung, Verbesserung und Ausmusterung von Maschinen anfallen
	Werkzeugkosten	Gesamtkosten für selbst oder fremdgefertigte Werkzeuge
	Materialkosten	Gesamtkosten, die beim Kauf des Kollektormaterials entstehen.
	Energieverbrauch	Benötigte Energie (z.B. Elektrizität, Wärme) zum Betrieb von Maschinen.
	Weiterverarbeitung	Anzahl Produktionsprozesse
	Personalkosten	Gesamtkosten für Personal
Qualität	Haltbarkeit	Erwartete Lebensdauer eines Produktes
	Füllstoffe	Möglichkeit der Hinzugabe von Materialien zur Verbesserung der Eigenschaften des Ausgangsmaterials (z.B. höhere Steifigkeit)
	Variabilität der Materialien	Möglichkeit, verschiedene Materialien mit dem Herstellungsverfahren verarbeiten zu können
	Steifigkeit	Widerstand eines Bauteils gegen äußere Verformungen
	Maßhaltigkeit	Eingehaltene Toleranzen innerhalb eines Produktionsschrittes, um Nachbearbeitungen zu reduzieren
Wartung	Werkzeugkomplexität	Anzahl der Werkzeugparameter
	Maschinenkomplexität	Anzahl der Maschinenparameter
	Werkzeugzuverlässigkeit	Robustheit des Werkzeugs
	Maschinenzuverlässigkeit	Robustheit der Maschine
Bauteil	Bearbeitungskomplexität	Notwendige Nachbearbeitungsschritte durch Mitarbeiter / Maschinen, um geforderte Toleranzen einhalten zu können
	Bauteildesign / Bauteilgröße	Gestalterische Freiheiten bezüglich Abmessungen und Geometrien der Bauteile.
	Stückzahlen	Anzahl von produzierten Bauteilen in einem definierten Zeitintervall.
	Produktionsaufwand/Sicherheit	Notwendige sicherheitstechnische Anforderungen für die Betreuung von Anlagen / Maschinen.
	Recycling	Wiederverwertbarkeit der eingesetzten Werkstoffe für die Zukunft.

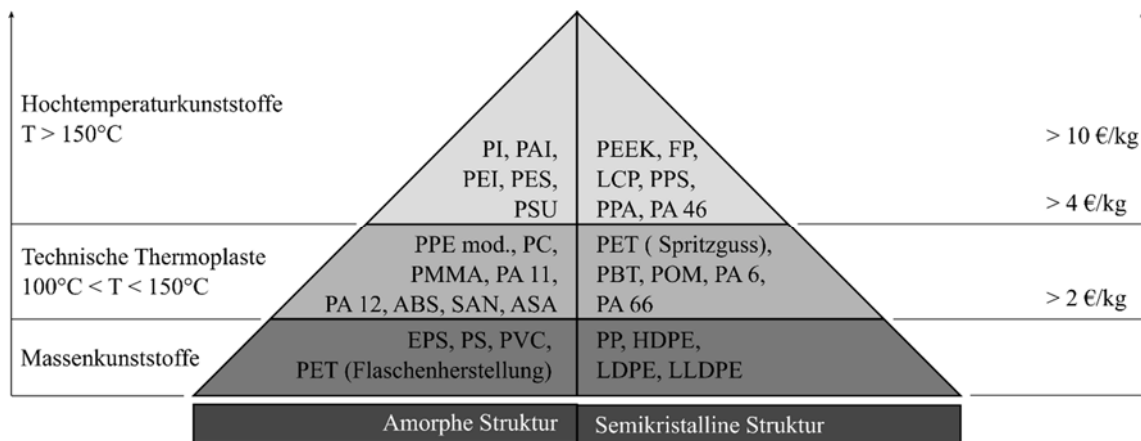
**Tabelle 3:** Bewertung der betrachteten Fertigungsverfahren

Verfahren	Bewertung
Spritzgießen	40%
Extrudieren	68%
Extrusionsblasformen	66%
Thermoforming	75%
Twinsheet-Thermoforming	85%

Die Auswertung zeigt, dass das Verfahren *Spritzgießen* von den Teilnehmern der Umfrage mit 40% am wenigsten geeignet eingestuft wurde. Die Verfahren *Extrusionsblasformen* und *Extrudieren* liegen mit 66% bzw 68% relativ eng beieinander. Die Verfahren *Singlesheet-Thermoforming* (75%) und *Twinsheet-Thermoforming* (85%) wurden für die Umsetzung eines Absorbers in Kunststoffbauweise als besonders vorteilhaft eingestuft. Basierend auf der durchgeführten Bewertung wurde deshalb für den weiteren Projektverlauf auf das Verfahren *Twinsheet-Thermoforming* zurückgegriffen. In Bezug auf dieses Verfahren wurden insbesondere die Werkzeugkosten, die erreichbare Maßhaltigkeit, sowie die Möglichkeiten bei der Weiterverarbeitung als vorteilhaft eingeschätzt.

### 3.5 Werkstoffauswahl

Neben der Festlegung des anzuwendenden Fertigungsverfahrens ist die Wahl eines geeigneten Werkstoffes für die späteren Produkteigenschaften von großer Bedeutung. Hierbei muss einerseits das Material des Kunststoffabsorbers selbst, andererseits das Material des Werkzeuges ausgewählt werden. Bei der Konstruktion des zweiteiligen Werkzeugs, welches beim *Twinsheet-Thermoforming* zum Einsatz kommt, wurden die materialspezifischen Eigenschaften, insbesondere das Schrumpfverhalten, entsprechend berücksichtigt. Da im Rahmen des Projekts der Fokus auf der Verwendung von Massenkunststoffen lag, wurden insbesondere die Werkstoffe Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polycarbonat (PC) einer näheren Bewertung unterzogen (s. Abbildung 27). Hierbei wurden sowohl die material- als auch die einsatzbedingten Anforderungen hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Alterungsbeständigkeit, UV-Beständigkeit sowie Druck- und Temperaturstabilität bewertet.



**Abbildung 27:** Bewertung unterschiedlicher Kunststoffe hinsichtlich Struktur, Einsatztemperatur und Kosten entsprechend ([3] S. 132)

Als Werkstoff für die Kunststoffabsorber wurde Polypropylen in einer für den Einsatzzweck modifizierten Ausführung als Werkstoff gewählt. Hierbei handelt es sich um den PP-Copolymer der *Fa. Metzeler Plastics GmbH* mit der Typenbezeichnung *Metzoplast PP/CT2-W* in schwarzer, glatter Ausführung. Das für den Einsatz in Tiefziehprozessen entwickelte Plattenmaterial verfügt durch den Zusatz einer 20%-igen Talkumfüllung über

eine verbesserte Wärmeformbeständigkeit. Weiterhin besitzt der Werkstoff eine erhöhte Steifigkeit und Schlagzähigkeit. Die Beschaffung des Plattenmaterials erfolgte für die ersten Fertigungszyklen als Zuschnitt in den Abmessungen 1.100 mm x 625 mm, in den abgestimmten Dicken von 2,5 mm, 3,0 mm und 3,3 mm. Die werkstofftechnischen Eigenschaften des Materials können dem Datenblatt in Abschnitt 12.1 entnommen werden. Für einen weiteren Fertigungszyklus wurde darüber hinaus ein Plattenkontingent aus PP-Copolymer mit Glasfaserfüllung beschafft, das über verbesserte mechanische und physikalische Eigenschaften verfügt. Dabei kommen zwei aus unterschiedlichen Chargen gefertigte Platten mit unterschiedlichem Glasfaseranteil zum Einsatz. Platten der ersten Charge verfügen über einen langfaserigen Glasfaseranteil von 20% mit der Typenbezeichnung PP/GF 20 (s. Datenblatt in Abschnitt 12.2). In einer weiteren Charge wird der Glasfaseranteil auf max. begrenzt und ist als Kurzfaser mit einer max. Länge von 10 mm darin enthalten.

### 3.6 Fertigung

Nach der Definition des Fertigungsverfahrens und des Werkstoffs wurde die Konstruktion der Kollektorgrundstruktur mit integriertem Absorbers bzw. des zur Fertigung aufzubauenden Werkzeugs durchgeführt. Die Größe des Absorbers wurde dabei mit Abmessungen von 1.050 mm x 565 mm ausgelegt, was ca. einem Viertel der Fläche eines typischen Flachkollektors entspricht. Auf Basis der Kollektorkonstruktion wurde nach konstruktiver Abstimmung mit der *Fa. Geiss AG* das für die Fertigung des Kunststoffbauteils notwendige Werkzeug gefertigt. Die *Fa. Geiss AG* entwickelt *Twinsheet-Thermoforming-Anlagen* und verfügt über langjährige Erfahrungen in der Fertigung entsprechender Werkzeuge. Für die Herstellung der Absorber wurde die Anlage mit der Typenbezeichnung *T 10* verwendet (s. Abbildung 28 bis Abbildung 30). Durch die motorgesteuerte Justierung der beiden Werkzeuge wird ein schneller und präziser Fertigungsprozess sichergestellt.

Die gefertigten Prototypen zeigten im Bereich der späteren Schlauchanschlüsse einige Fehlstellen auf, die auf zu hohe Verstreckungen während der Fertigung zurückgeführt werden konnten. Im Rahmen einer Überarbeitung des Prototypenwerkzeugs wurden daraufhin die notwendigen konstruktiven Anpassungen vorgenommen. Dabei wurden insbesondere die Radien in den betroffenen Bereichen vergrößert und somit die Bedingungen für den Materialfluss verbessert. Für die nachfolgenden Ziehversuche wurden ausschließlich Platten mit der Materialdicke von 3 mm eingesetzt. Die in zwei weiteren Ziehversuchen gefertigten Absorber zeigen eine deutliche Verbesserung, die es erlaubt, Kollektoren für Prüfzwecke aufzubauen und bezüglich der Leistungsfähigkeit messtechnisch zu untersuchen. Die für die hydraulische Integration des Absorbers notwendigen Anschlüsse wurden als Drehteil aus PP-Vollmaterial ausgeführt und mittels Spiegelschweißung mit dem Absorber verbunden.





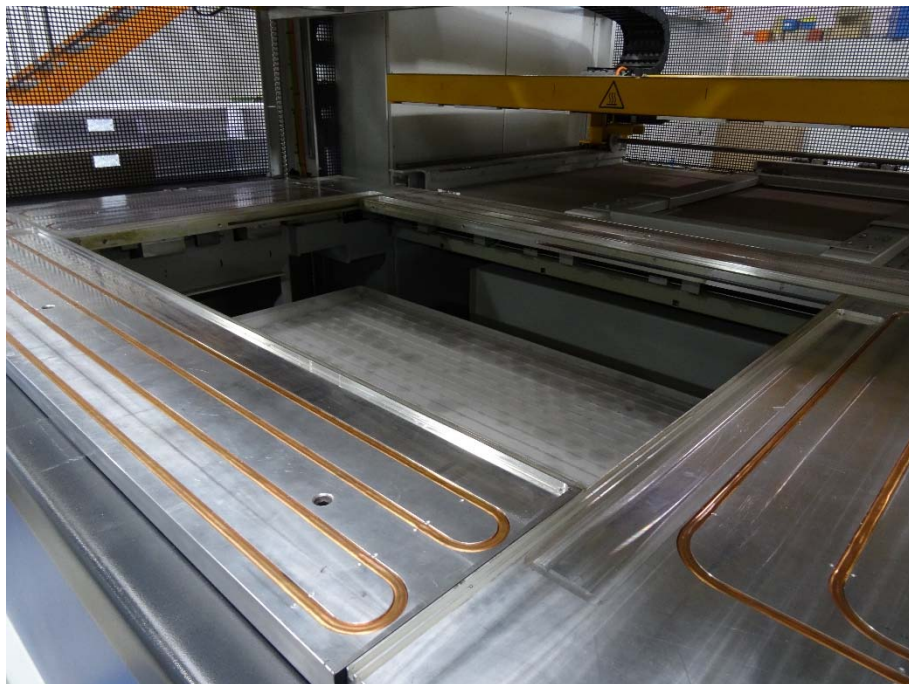
**Abbildung 28:** Außenansicht der *Twinsheet-Thermoforming-Anlage* vom Typ *Geiss T10*

Im Rahmen erster Leistungsprüfungen (s. Abschnitt 4.1.3) war festzustellen, dass die Absorber unter Temperatureinwirkung im Bereich der Kanäle deutliche Verformungen aufweisen, so dass in einer weiteren konstruktiven Anpassung zur Reduzierung der Verformung, Schweißpunkte als Abstandhalter zwischen Ober- und Unterplatte angebracht wurden. Die erfolgte Änderung durch die zusätzlich eingefügten Abstandhalter im Kanalquerschnitt bewirkte eine Stabilisierung der Kanalquerschnitte über die Breite des Prototyps. Es führte jedoch im Randbereich zu einer unvollständigen Verschweißung von Ober- und Unterplatte. Durch Anpassung der Maschineneinstellung, der Intensität der Stützluft sowie der Temperatur für die Ober- und Unterheizung und deren Verteilung über die Fläche konnten auch für die Randbereiche Verbesserungen erzielt werden, ohne jedoch in vollem Umfang die gewünschten Ergebnisse zu liefern.

In einem erneuten Ziehversuch wurden die PP-Platten mit einer Glasfaserfüllung von 20% und einer Faserlänge von 20 mm mit der Zielsetzung eingesetzt, die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Absorber zu verbessern. Dabei zeigte sich, dass eine Ausformung der feinen Konturen nicht mehr möglich war. Auch in den Randbereichen mit den größeren Verstreckungstiefen konnte kein befriedigendes Ergebnis bezüglich der Ausformung und Verschweißung erzielt werden (s. Abbildung 31).



**Abbildung 29:** Innenansicht der *Twinsheet-Thermoforming-Anlage* vom Typ *Geiss T10* inkl. des Oberteils

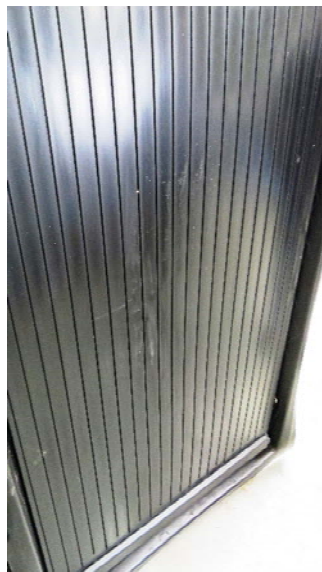


**Abbildung 30:** Innenansicht der *Twinsheet-Thermoforming-Anlage* vom Typ *Geiss T10* inkl. des Unterteils



**Abbildung 31:** Ergebnisse der Prototypen-Fertigung mit einem Glasfaseranteil von 20% und einer maximalen Glasfaserlänge von 20 mm (Links: Gesamtansicht / Rechts: Detailansicht des Anschlussbereichs).

Aus diesem Grund erfolgte der Aufbau eines weiteren Prototypenwerkzeugs unter Berücksichtigung aller Erkenntnisse aus den vorangegangenen Ziehversuchen. Das Werkzeug wurde gleichzeitig, um eine größere Nähe zum Serienwerkzeug zu realisieren, auf die Abmessung von 1.625 mm in der Länge und 1.000 mm in der Breite ausgelegt. Mit diesem Werkzeug wurden zwei weitere Tiefziehversuche unternommen. Dabei wurden einerseits Versuche mit PP-Platten mit einer Glasfaserfüllung von 8 % und einer Faserlänge von 10 mm eingesetzt, andererseits wurde der Einsatz von Platten aus einem ABS PC-Blend untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass mit beiden Varianten funktionsfähige Absorber hergestellt werden können.



**Abbildung 32:** Optimierte Ausführung der Kunststoffabsorber (Links: Strömungskanäle. Rechts: Detailansicht des Anschlussbereichs)

Bei den während der Projektlaufzeit durchgeführten Versuchen zur Fertigung der Absorberstruktur konnte festgestellt werden, dass eine geeignete Temperierung des Plattenmaterials einen maßgeblichen Einfluss auf die Güte der Absorberstruktur hat. Die *Twinsheet-Thermoforming-Anlage* der *Fa. Geiss* ermöglicht eine abgestufte Erwärmung unterschiedlicher Bereiche der Platte (s. Abbildung 33)



**Abbildung 33:** Definition der Temperaturverteilung bei der *Twinsheet*-Fertigung

Ein Beispiel eines mangelhaft gefertigten Absorbers ist in Abbildung 34 dargestellt. Bei diesem Versuch führte die unzureichenden Erwärmung des Rohmaterials zu einem großflächigen Einfallen der Strömungsgeometrie. Die prozessbedingte hohe Anzahl der Freiheitsgrade (Dauer und Druck der Stützluft, Temperierung des Rohmaterials, Dauer des Pressvorgangs, etc.) führte bis zu Identifizierung optimaler Prozessparameter während der Projektlaufzeit zu einer hohen Ausschussquote und damit verbundenen Verzögerungen im Projektablauf. Schlussendlich konnten die fertigungsbedingten Schwierigkeiten jedoch gelöst und prüffähige Prototypen gefertigt werden.



**Abbildung 34:** Mangelhaft gefertigte Absorberstruktur aufgrund nicht-optimaler Prozessparameter

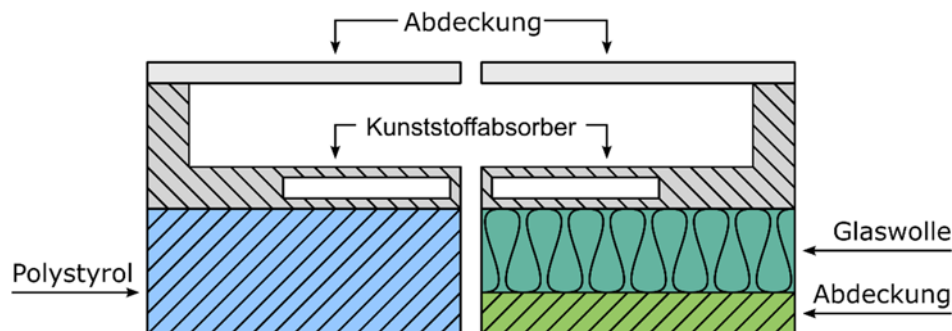
## 4 Untersuchungen auf Bauteilebene

### 4.1 Ermittlung der Kollektoreffizienz

Die nachfolgende Beschreibung zur Messung der Kollektoreffizienz wurde in dieser Form bereits in [33] veröffentlicht.

#### 4.1.1 Beschreibung der Prüflinge

Bei der vom Projektpartner Roth Werke GmbH entwickelten Absorberstruktur handelt es sich um Prototypen aus Polypropylen (PP). Zur Erhöhung des Wärmeübergangs zwischen Absorber und Wärmeträger wurden volumetrisch durchströmte Kanäle mit einem Breiten- zu Höhenverhältnis von  $> 10/1$  verwendet. Der Absorber besteht aus acht Steigrohren sowie zwei Sammelrohren und besitzt eine Bruttokollektorfläche von ca.  $0,6\text{ m}^2$ . Zur rückseitigen Isolation der Wärmeverluste wurde einerseits Polystyrol (Dicke 70 mm), andererseits eine Kombination aus Glaswolle und einer Abdeckplatte verwendet (s. Abbildung 35). Die getesteten Prototypen sind in Abbildung 36 - Abbildung 38 abgebildet. Die Dicke der Glaswollschicht beträgt 30 mm, die Dicke der Abdeckplatte 10 mm. Für die vorderseitige Abdeckung wurde sowohl eine Glasscheibe als auch eine transparente Kunststoffplatte aus PMMA verwendet ( $\tau_{\text{Glas}} = 0,90$ ,  $\tau_{\text{PMMA}} = 0,92$ ). Beide Abdeckungen sind 4 mm dick.



**Abbildung 35:** Aufbau der Kollektor-Prototypen (Links: Rückseitige Dämmung mit Polystyrol; Rechts: Rückseitige Dämmung mit Glaswolle und Abdeckplatte)

Mit den genannten Materialien wurden unterschiedliche Kollektoren aufgebaut. So wurden die unterschiedlichen rückseitigen Isolierungen mit den verschiedenen vorderseitigen Abdeckungen kombiniert. Die unterschiedlichen Konfigurationen sind in Tabelle 4 aufgelistet.



**Abbildung 36:** Prototyp mit rückseitiger Isolierung aus Glaswolle (ohne Abdeckung)



**Abbildung 37:** Prototyp mit rückseitiger Isolierung aus Polystyrol (ohne Abdeckung)



**Abbildung 38:** Detailansichten der Prototypen. Links: Variante mit rückseitiger Isolierung Polystyrol (ohne Abdeckung). Rechts: Variante mit rückseitiger Isolierung aus Glaswolle (ohne Abdeckung) und Teile des umlaufenden Rahmens (Test der Kollektoren mit größerem Abstand zw. Absorber und Abdeckung).

Bei den Varianten 1 und 2 handelt es sich um ungedeckte Kollektoren, bei denen nur auf der Rückseite eine entsprechende Isolierung vorhanden ist. Die Varianten 3 bis 5 sowie 6 bis 8 dienen der systematischen Untersuchung der unterschiedlichen rückseitigen Isolierung mit jeweils gleicher Abdeckung. Bei den Varianten 5 und 8 wurde ein umlaufender Rahmen zwischen Absorberstruktur und Abdeckung eingesetzt, um so den Abstand zwischen Abdeckung und Absorber um 28 mm zu vergrößern.

**Tabelle 4:** Übersicht über die verschiedenen getesteten Kollektorvarianten

Variante	Abdeckung	Isolierung
1	keine	Glaswolle / Holz
2		Polystyrol
3	Glas	Glaswolle / Holz
4		Polystyrol
5		Polystyrol + zusätzlicher Scheibenabstand
6	PMMA	Glaswolle / Holz
7		Polystyrol
8		Polystyrol + zusätzlicher Scheibenabstand

#### 4.1.2 Messung der Leistungsfähigkeit

Die Effizienz eines solarthermischen Kollektors ( $\eta_{Kollektor}$ ) ist definiert als das Verhältnis aus technisch nutzbarer Wärmeleistung  $\dot{Q}_{Aus}$  und der eintreffenden Strahlungsleistung  $\dot{Q}_{Ein}$  (s. Formel 1).

**Formel 1:** Definition des Wirkungsgrads eines solarthermischen Kollektors

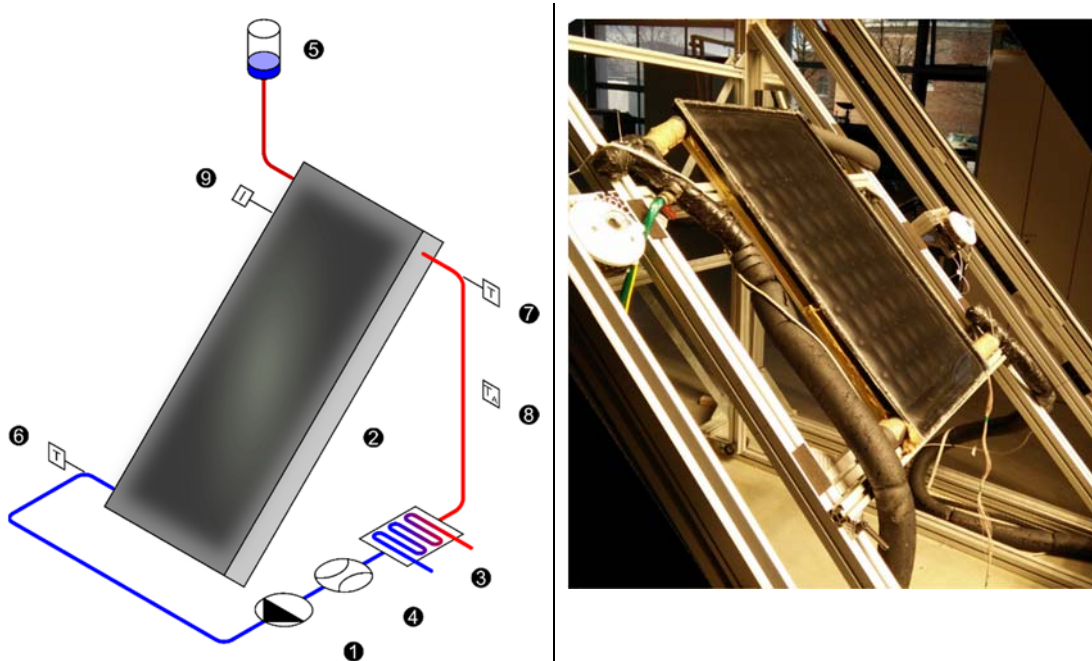
$$\eta_{Kollektor} = \frac{\dot{Q}_{Aus}}{\dot{Q}_{Ein}} = \frac{c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T}{I \cdot A_{Kollektor}} = \frac{c_p \cdot \dot{V} \cdot \rho \cdot (T_{Auslass} - T_{Einlass})}{I \cdot A_{Kollektor}}$$

mit:

- $\eta_{Kollektor}$  Kollektor-Wirkungsgrad in %
- $c_p$  Spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgers in J/kgK
- $\dot{V}$  Volumenstrom in m<sup>3</sup>/s
- $\rho$  Dichte in kg/m<sup>3</sup>
- $T_{Auslass}$  Kollektor-Austrittstemperatur in °C
- $T_{Einlass}$  Kollektor-Eintrittstemperatur in °C
- $I$  Einstrahlung in W/m<sup>2</sup>
- $A_{Kollektor}$  Absorberfläche in m<sup>2</sup>

Für die Ermittlung des Wirkungsgrads können unterschiedliche Teststandards herangezogen werden. Im englischsprachigen Raum wird dabei oft die Richtlinie ASHRAE 93-2003 [34], in Europa überwiegend die Norm EN ISO 9806 [35], welche die Vorgängernorm DIN EN 12975-2 [21] ersetzt hat, angewendet.

Zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit für die zuvor erwähnten unterschiedlichen Dämm- und Abdeckungskonzepte wurde die Leistungsfähigkeit entsprechend EN ISO 9806 ermittelt [35]. Der seitens der Norm definierte Prüfaufbau wurde dabei um ein zusätzliches Wasserreservoir (s. Abbildung 39, Komponente 5) erweitert, um eine Prüfung mit geringem Systemdruck zu gewährleisten. Das Reservoir ist dabei zur Umgebung hin offen. Der Systemdruck ist somit eine Funktion der Höhendifferenz zwischen Absorber und Reservoir und kann entsprechend dem Pascal'schen Gesetz bestimmt werden. Der Wärmeträger wird mit Hilfe einer Pumpe (1) durch den Prüfling (2) gepumpt. Die vom Kollektor aufgenommene Energie wird anschließend mit Hilfe eines Wärmetauschers (3) wieder abgegeben, um gleichbleibende Kollektoreintrittstemperaturen zu gewährleisten. Der Norm-Volumenstrom wird mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (4) überwacht. Das System ist zur Umgebung hin über ein zusätzliches Reservoir (5) offen. Während des Tests wird die Ein- (6) und Austrittstemperatur (7) sowie die Umgebungstemperatur (8) mit Temperatursensoren (6, 7) aufgezeichnet. Weiterhin wird die Einstrahlung in Kollektorebene mit Hilfe eines Pyranometers (9) aufgezeichnet.

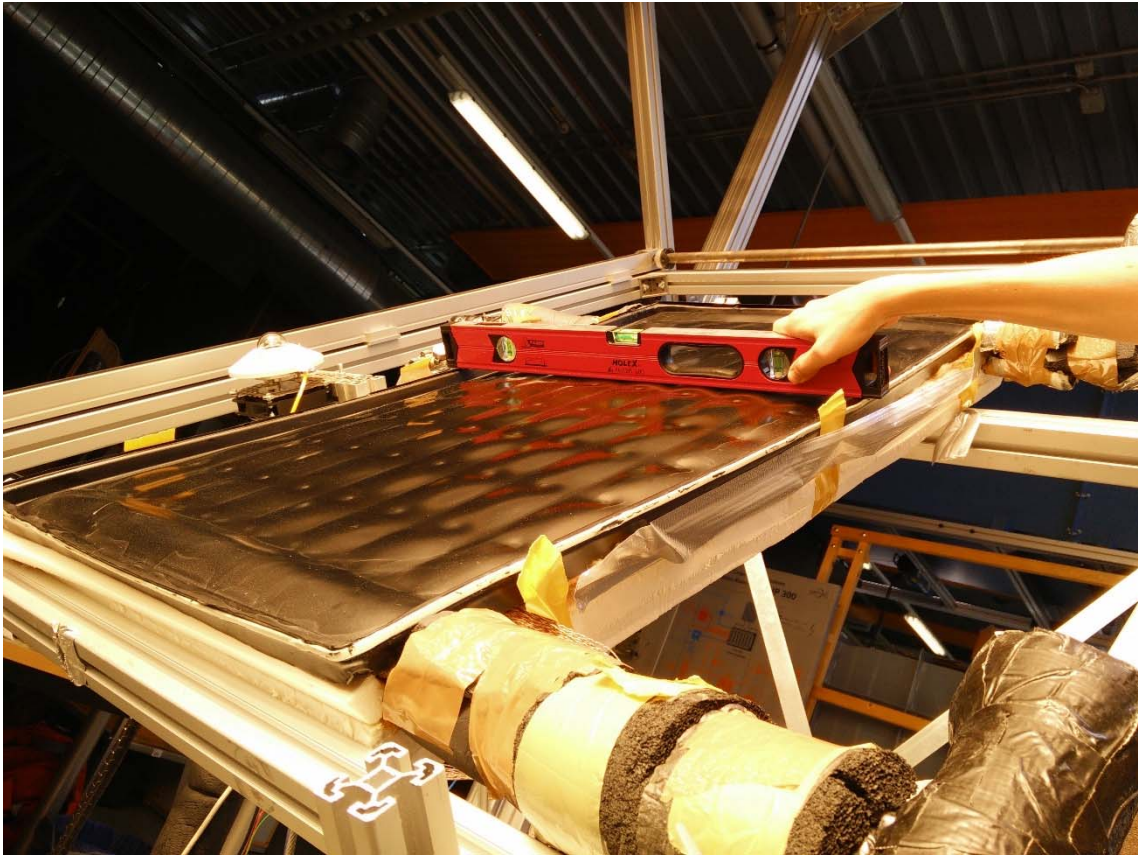


**Abbildung 39:** Prüfstand zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit (Links: Prinzipskizze / Rechts: Test der Variante 3)

Während der Messungen wurde bei einem der getesteten Kollektoren ein Ablösen der vorderseitigen Abdeckung festgestellt. Der Temperaturanstieg im Inneren der Absorberstruktur führte zu einer starken Expansion der volumetrisch durchströmten Kanäle. In der Folge wurde die Abdeckung von innen aus der Absorberstruktur gedrückt (s. Abbildung



40). Als Konsequenz aus diesen Beobachtungen wurde das Fertigungswerkzeug überarbeitet und ein durchgängiger Steg im Inneren der Steigkanäle vorgesehen. Der überarbeitete Absorber ist in Abbildung 32 (rechts) dargestellt.



**Abbildung 40:** Ablösen der vorderseitigen Abdeckung während der Leistungsmessung

### 4.1.3 Ergebnisse der Leistungsmessung

Die Ergebnisse der Leistungsmessung sind in Tabelle 5 aufgelistet sowie in Abbildung 41 bis Abbildung 43 dargestellt.

**Tabelle 5:** Ergebnisse der Leistungsmessung

	Variante							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\eta_0$	0,697	0,680	0,696	0,733	0,705	0,715	0,704	0,695
$a_1$ in W/m <sup>2</sup> K	14,560	16,334	8,111	7,241	7,452	9,049	6,149	5,696
$a_2$ in W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>	0,061	0,012	0,034	0,039	0,029	0,013	0,034	0,033

Ein Vergleich der Kollektoren mit Glas- und PMMA-Abdeckung zeigt, dass die Kollektoren mit PMMA-Abdeckung höhere Wirkungsgrade erreichen als Kollektoren mit Glas-Abdeckungen. Dies kann auf die niedrigere Wärmeleitfähigkeit von PMMA (0,19 W/mK) gegenüber Glas (0,80 W/mK) zurückgeführt werden. Angesichts vergleichbarer Wärme-

leitfähigkeit zwischen Polystyrol und Glaswolle konnte festgestellt werden, dass wie erwartet eine stärkere rückseitige Isolierung die Effizienz der abgedeckten Kollektoren positiv beeinflusst. Bei den ungedeckten Kollektoren konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass der Einfluss des vergrößerten Scheibenzwischenraums bei den Prototypen keinen wesentlichen Anstieg der Kollektoreffizienz bewirkt.

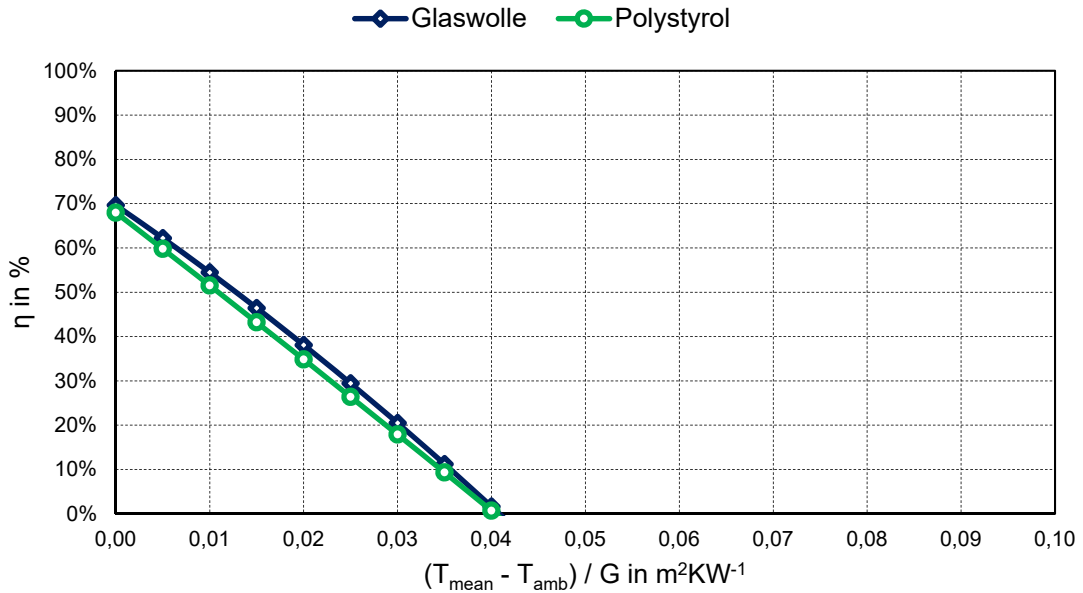


Abbildung 41: Ergebnisse der ungedeckten Kollektoren (Variante 1 und 2)

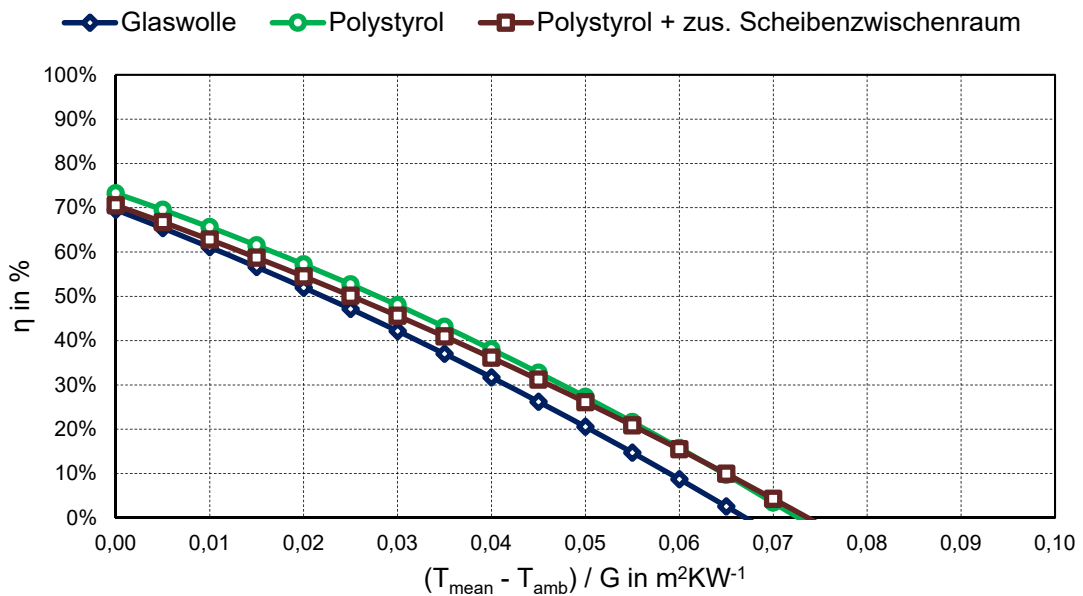
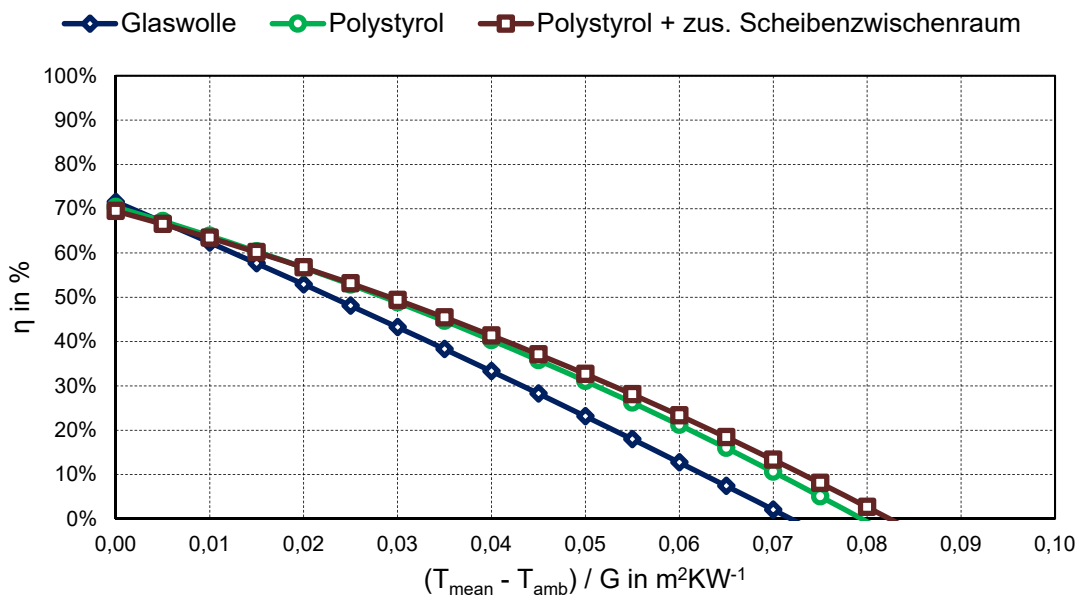
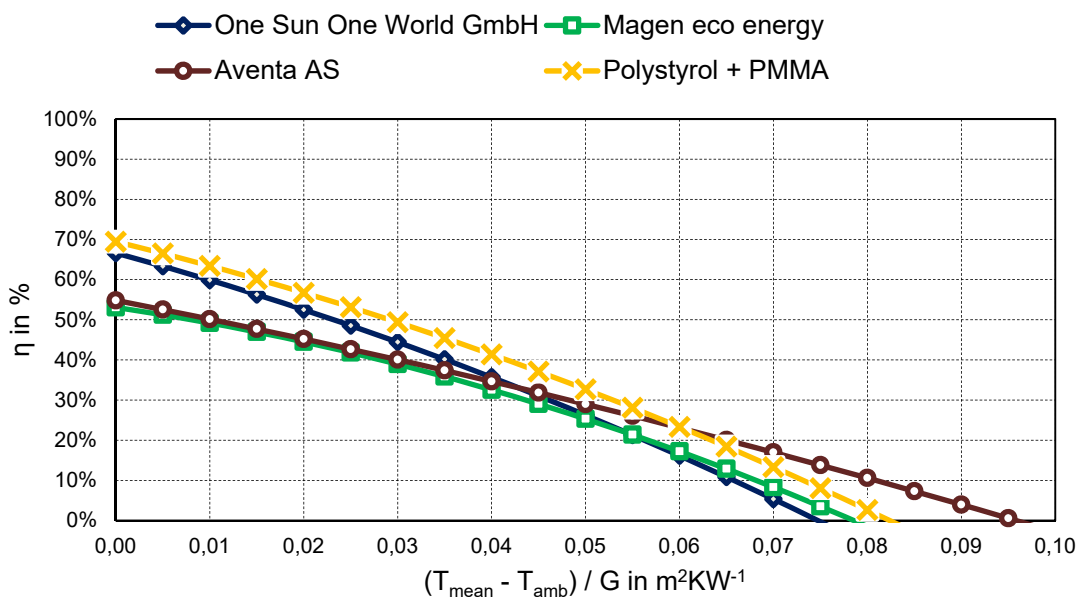


Abbildung 42: Ergebnisse der mit Glas abgedeckten Kollektoren (Varianten 3 – 5)



**Abbildung 43:** Ergebnisse der mit PMMA abgedeckten Kollektoren (Varianten 6 – 8)

Im Vergleich zu in Abschnitt 2.3 beschriebenen Kunststoffkollektoren zeigt die Auswertung der getesteten Kollektoren eine prinzipiell gute Übereinstimmung (s. Abbildung 44). So erreichte die getestete Absorberstruktur mit PMMA-Abdeckung und Polystyrol-Isolierung am Betriebspunkt von  $T_{\text{red}} = 0,05 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$  die höchste Effizienz zu den marktverfügbaren Kunststoffkollektoren.



**Abbildung 44:** Vergleich der Absorberstruktur mit PMMA-Abdeckung und Polystyrol-Isolierung mit marktverfügbaren Kollektoren

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass unterschiedliche Ansätze bei der Konstruktion des Absorbers zu vergleichbaren solarthermischen Erträgen führen. Es ist von

einer Erhöhung der Wirkungsgrade bei Verwendung einer serienreifen Absorberstruktur mit entsprechender seitlichen Dämmung auszugehen.

## 4.2 Durchströmungsverhalten

Zur Visualisierung des Strömungsverhaltens wurde der Kunststoffabsorber mit ca. 70 °C-warmen Wasser auf eine konstante Temperatur aufgeheizt. Anschließend wurde der getestete Prototyp mit kaltem Frischwasser durchspült. Die sich hierdurch ergebende Abkühlung wurde mit Hilfe einer Thermographie-Kamera aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Thermographie-Messung sind in Abbildung 45 abgebildet. Zu sehen ist, wie das kalte Wasser zu Beginn der Messung (s. Abbildung 45, oben links) unten rechts in den Kollektor eintritt. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Temperatur in der Mitte des Kollektors 58,9 °C. Nach 77 Sekunden (s. Abbildung 45, oben rechts) ist der Kollektor im unteren Teil bereits deutlich kälter als im oberen Teil, in der Mitte beträgt die Temperatur zu diesem Zeitpunkt 51,5 °C. Nach weiteren 74 Sekunden Messung (s. Abbildung 45, unten links) beträgt die Temperatur in der Kollektormitte 46,4 °C. Gegen Ende der Messung nach 3,5 Minuten (s. Abbildung 45, unten rechts) hat sich das Kollektorfeld gleichmäßig auf ca. 42 °C abgekühlt. Während der Messung wurde das Kollektorfeld mit einem Massenstrom von knapp 35 kg/h durchströmt. Die Ergebnisse zeigen eine gleichmäßige Durchströmung des Absorbers. Insbesondere im Bereich des unteren Sammelrohrs zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung des eintretenden Wassers auf die einzelnen Steigrohre.

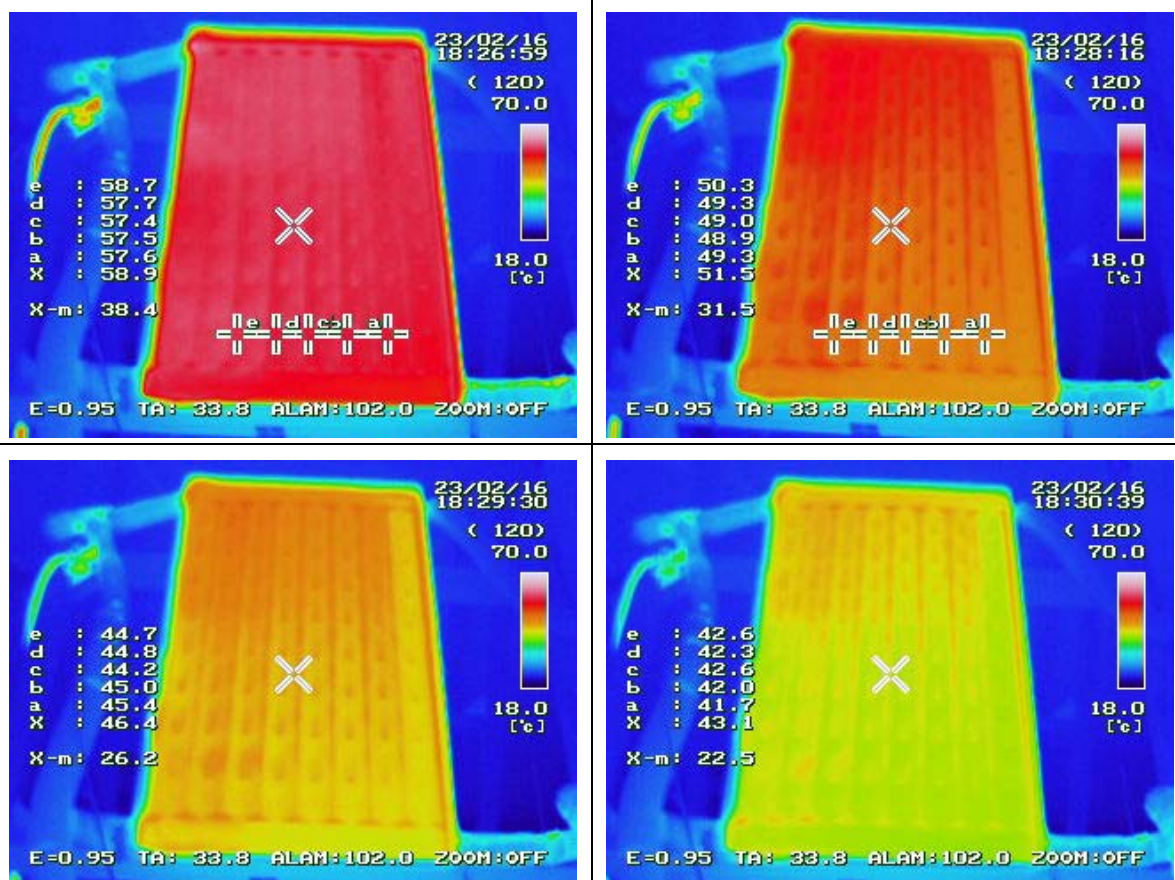
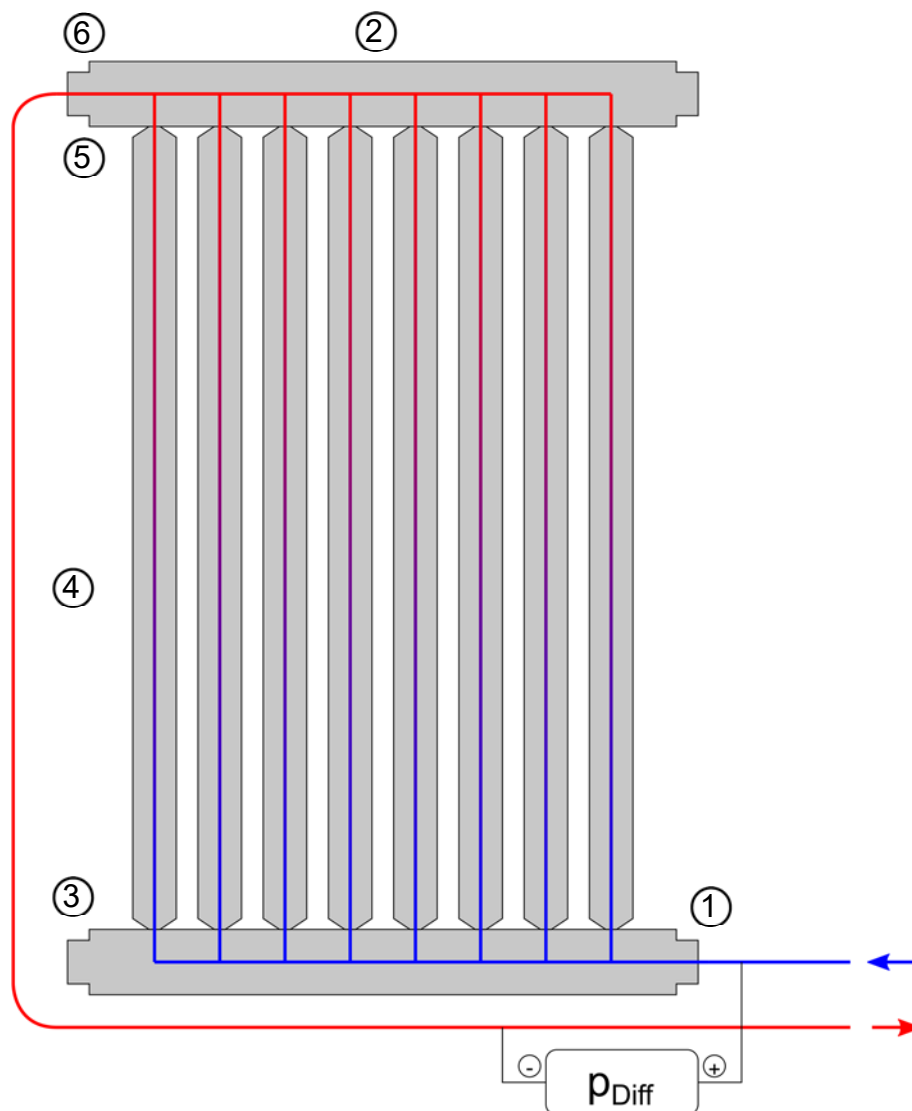


Abbildung 45: Thermographische Untersuchung des Kunststoffabsorbers

### 4.3 Druckverlustbestimmung

Zur Bestimmung des Druckverlusts wurde ein Differenzdrucksensor verwendet, der den Druck vor dem Kollektoreintritt bzw. nach dem Kollektoraustritt aufzeichnet. Der Volumenstrom wurde zwischen 0 und 400 kg/h in Abstufungen von 50 kg/h variiert. Der Versuch wurde für mehrere unterschiedliche Kollektor-Eintrittstemperaturen (20 °C, 40 °C und 60 °C) wiederholt. Die Messwerte wurden einem 5-Sekunden-Intervall aufgenommen, wobei jeder Messpunkt (z.B. 100 kg/h bei 20 °C Kollektoreintrittstemperatur) für insgesamt 6 Minuten aufgezeichnet wurde. Die sich ergebenden 72 Messungen pro Messpunkt wurden anschließend gemittelt.

Parallel zu den Messungen wurde ein strömungsmechanisches Modell in MATLAB [25] aufgebaut (s. Abbildung 46).



**Abbildung 46:** Strömungsmechanisches Modell zur Bestimmung des Druckverlusts (1: Übergang Einlass / 2: Sammelrohr / 3: Übergang Sammelrohr – Steigrohr / 4: Steigrohr / 5: Übergang Steigrohr – Sammelrohr / 6: Übergang Auslass)

Hierbei wurde das Modell in mehrere Abschnitte unterteilt (z.B. in Sammelrohr, Übergang von Sammel- auf Steigrohr, Steigrohr, plötzliche Verengung / Ausweitung, etc.). Für jeden Abschnitt wurde der strömungsmechanische Ersatzwiderstand  $R$  berechnet (s. Formel 2).

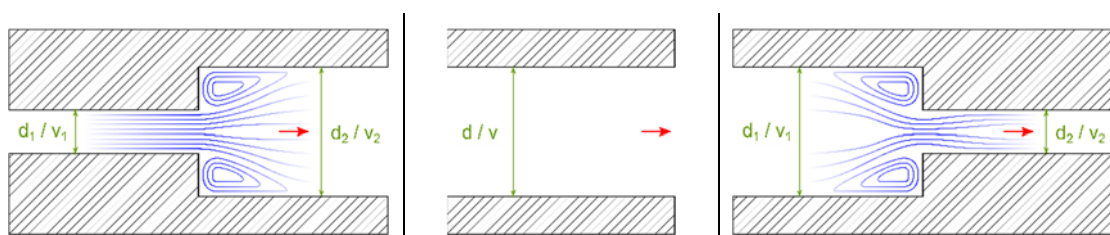
**Formel 2:** Druckverlust der strömungsmechanischen Komponenten

$$R = \frac{\zeta \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot V^2}$$

mit:

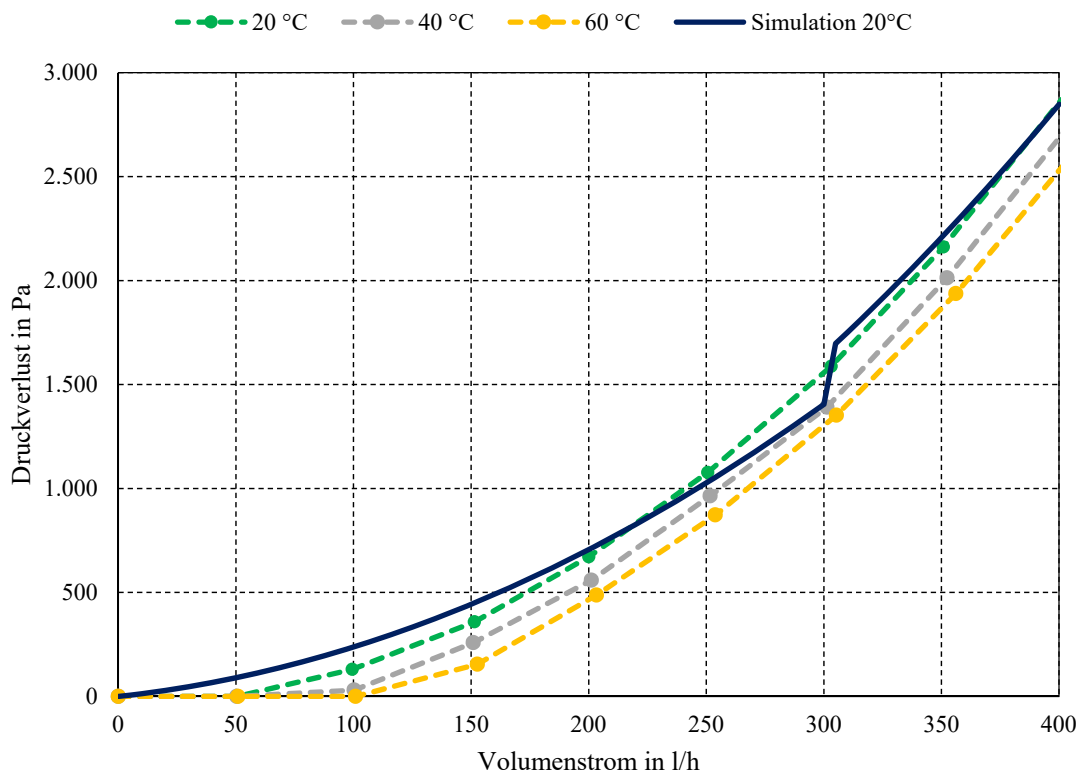
$R$	Widerstandsbeiwert in $\text{kg/m}^7$
$\zeta$	Druckverlustbeiwert
$\rho$	Dichte in $\text{kg/m}^3$
$v$	Strömungsgeschwindigkeit in $\text{m/s}$
$V$	Volumenstrom in $\text{m}^3/\text{s}$

Gemäß der Kirchhoffschen Knoten- und Maschenregeln wurde die einzelnen Komponenten des Absorbers zu einem Gesamtmodell verknüpft. So setzt sich beispielsweise der Widerstandsbeiwert des Steigrohrs aus dem Widerstandsbeiwert des Übergangs zwischen Sammel- und Steigrohr (s. Abbildung 46 / 3), dem Widerstandsbeiwert des Steigrohres selbst (s. Abbildung 46 / 4) und dem Widerstandsbeiwert des Übergangs von Steigrohr auf das Sammelrohr (s. Abbildung 46 / 5) zusammen (s. Abbildung 47). Die für die Bestimmung des Widerstandsbeiwerts notwendigen Zetawerte sind in der Literatur dokumentiert (z.B. [36]) und abhängig von der Geometrie der jeweiligen Komponente und den lokalen Strömungsbedingungen (laminare oder turbulente Strömung).



**Abbildung 47:** Widerstandsbeiwert des Steigrohrs (Links: Diffusor / Mitte: Rohr / Rechts: Düse)

Das Modell berücksichtigt strömungsmechanische Vorgänge, die beim Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung stattfinden. Darüber hinaus wird die Änderung der Materialdaten des Fluids (Dichte, Viskosität, etc.) in Abhängigkeit der Temperatur bei der Berechnung des Druckverlusts mitberücksichtigt. Die Ergebnisse der Messungen sowie der Berechnung (bei 20 °C Kollektoreintrittstemperatur) sind in Abbildung 31 dargestellt.



**Abbildung 48:** Druckverlust des Kunststoffabsorbers in Abhängigkeit des Volumenstroms

Der Druckverlust nimmt mit zunehmender Eintrittstemperatur ab (s. Abbildung 48). Dies kann mit der abnehmenden Viskosität von Wasser bei zunehmender Eintrittstemperatur erklärt werden. Vergleicht man die experimentell ermittelte Druckverlustkurve (Abbildung 48, grüne Kurve) mit der dazugehörigen, simulierten Druckverlustkurve (Abbildung 48, dunkelblaue Kurve) bei 20°C Kollektoreintrittstemperatur, kann eine hohe Übereinstimmung der beiden Kurven festgestellt werden. Der Sprung in der Kurve des simulierten Druckverlusts bei ca. 300 kg/h kann damit erklärt werden, dass an dieser Stelle der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung stattfindet. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Druckverlust des Kunststoffabsorbers in typischen Betriebszuständen (50 – 150 kg/h) mit weniger als 500 Pa als äußerst gering einzustufen ist.

## 5 Untersuchungen auf Systemebene

### 5.1 Beschreibung des Systemtests

In diesem Abschnitt werden die für die Durchführung des Systemtests im Outdoor-Prüfstand notwendigen Teilaspekte näher erläutert. Neben einer Beschreibung des Hydraulikschemas und der notwendigen Messtechnik werden auch die Regelstrategien der unterschiedlichen Wärmeerzeuger (Kollektorfeld und Backupheizung) und des Wärmeverbrauchers (TWW-Zapfung) detailliert beschrieben.

#### 5.1.1 Container

Der Outdoor-Prüfstand wurde in einem 20-Fuß-Bürocontainer auf dem Gelände der THI aufgebaut (s. Abbildung 49). Der Container bietet knapp 15 m<sup>2</sup> Grundfläche für die Installation der für den Betrieb des Prüfstands notwendigen Komponenten. Auf dem Dach des Containers wurde eine Aufständerung aus Profilschienen installiert, sodass die zu testenden Kollektoren mit einem Aufstellwinkel von 45° montiert werden können.



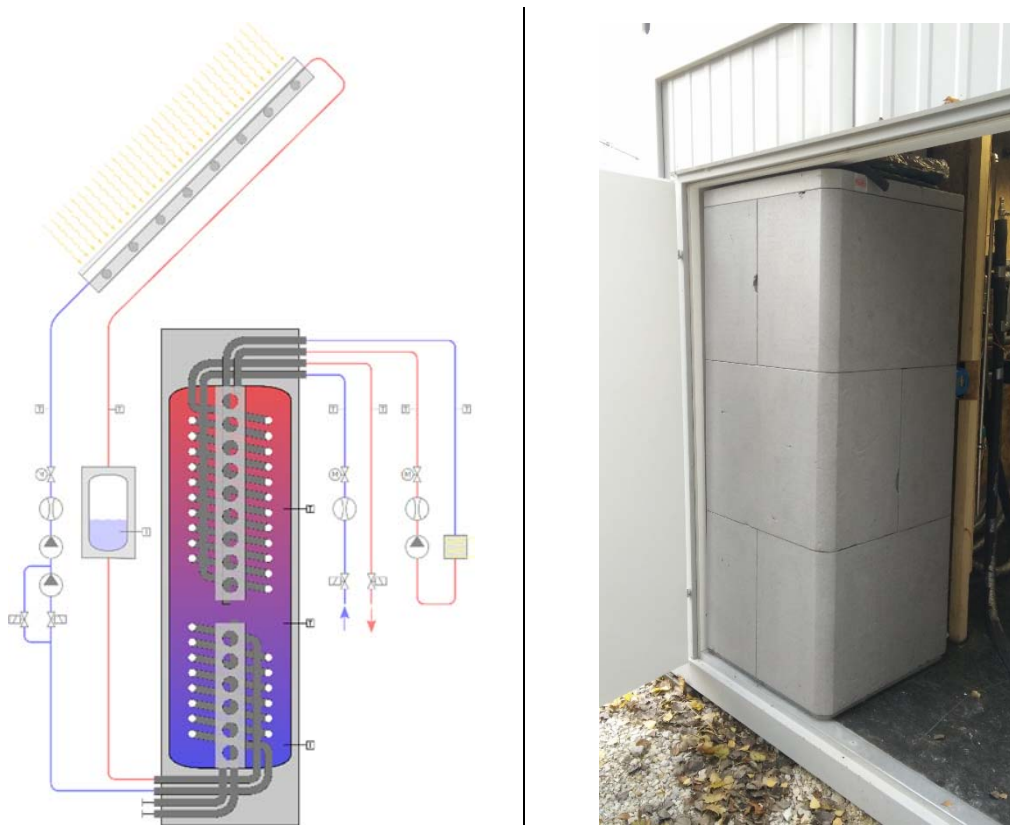
Abbildung 49: Außenansicht des Prüf-Containers

#### 5.1.2 Kombispeicher

Zentrales Element des Outdoor-Prüfstands ist der Kombispeicher Quadroline TQ-K 500 der Fa. Roth Werke GmbH. Der Kunststoff-Composite-Speicher hat ein Fassungsvermögen von knapp 500 l und kann über zwei Anschlusspaare beladen werden. So kann einerseits ein Kollektorfeld, andererseits ein konventioneller Wärmeerzeuger an den Kombi-



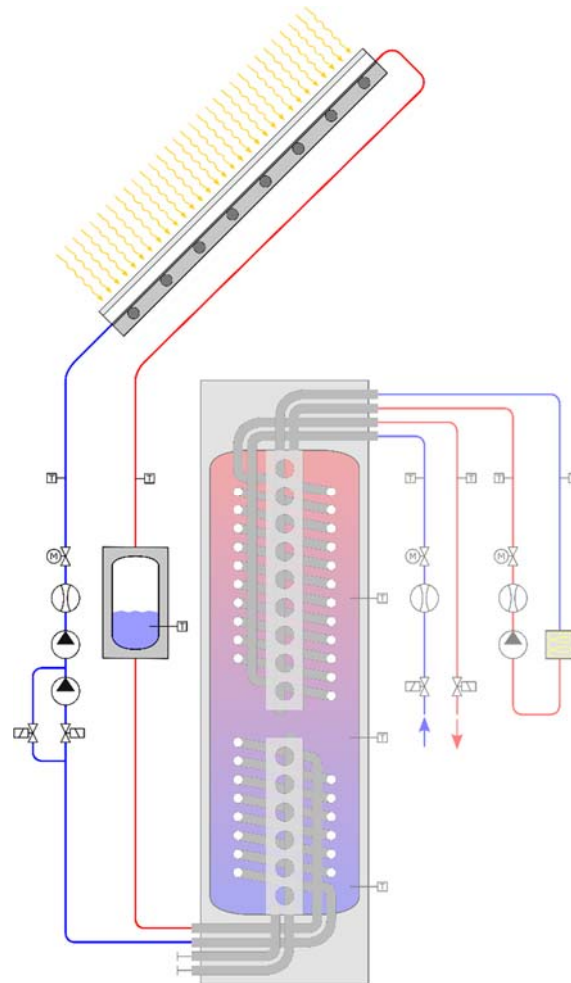
speicher angeschlossen werden. Wärme kann dem Speicher über einen Warmwasser-Anschluss sowie über einen Anschluss für eine Heizung (z.B. Fußboden- oder Radiatorheizung) entnommen werden. Der Speicher wurde mit drei Temperaturfühlern ausgestattet (Position Fühler 1:  $\frac{0}{3}$  H; Position Fühler 2:  $\frac{1}{3}$  H; Position Fühler 3:  $\frac{2}{3}$  H, s. Abbildung 50). Die Abmessungen des Speichers können dem Datenblatt in Abschnitt 12.3 entnommen werden.



**Abbildung 50:** Wärmespeicher Quadroline TQ-K 500. Links: Einbindung in das Hydraulikschema. Rechts: Speicher im Systemtest (mit Isolierung)

### 5.1.3 Solarkreis

Eine schematische Zeichnung des Solarkreises des Outdoor-Prüfstands ist in Abbildung 51 zu sehen. Hierbei handelt es sich um baugleiche Prototypen zu den im Indoor-Test verwendeten Kollektoren. Diese wurden auf der Vorderseite mit einer transparenten Abdeckung aus Glas und auf der Rückseite mit einer 30 mm starken Isolierung aus Glaswolle versehen. Diese Konfiguration entspricht Variante 3 (s. Abschnitt 4.1.1). Die vier verwendeten Kollektoren wurden seriell miteinander verschaltet. Vor und nach dem Kollektorfeld wird die Temperatur des Wärmeträgers (Wasser) mit Hilfe zweier PT100-Temperaturfühler ermittelt. Die Kollektoren sind gegenüber der Horizontalen um  $5^\circ$  zur Seite geneigt, um so die Selbstentleerung im Falle eines Stillstands zu gewährleisten (s. Abbildung 52).



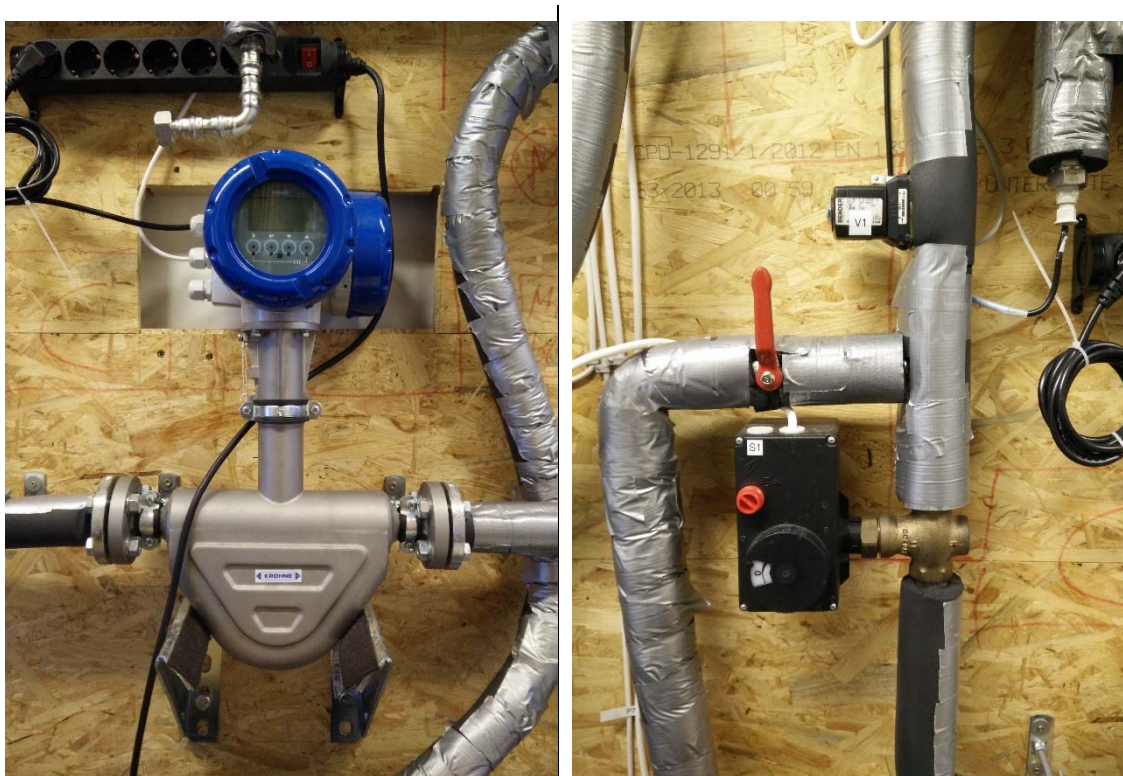
**Abbildung 51:** Solarkreis



**Abbildung 52:** Kollektorfeld (um 5° gegenüber der Horizontalen geneigt)

Der für die Ermittlung der Kollektorleistung notwendige Massenstrom wird mit Hilfe eines Coriolis-Massendurchflussmessgeräts (CMD) gemessen. Der Vorteil dieses Messsys-

tems gegenüber einer magnetisch-induktiven Durchflussmessung (MID) liegt in der Tatsache begründet, dass der CMD ohne weitere Umrechnungsschritte den tatsächlichen Massenstrom aufzeichnen kann. Der verwendete CMD „Optimass 6400C“ der Fa. Krohne Messtechnik GmbH kann Massenströme bis 400 kg/h bei einer Genauigkeit von  $\pm 0,1\%$  des Messwertes aufzeichnen (s. Abbildung 53). Weitere Kennzahlen des CMD können dem Datenblatt in Abschnitt 12.4 entnommen werden.



**Abbildung 53:** Coriolis-Massendurchflussmesser (links) und Motorstellventil (rechts)

Für die Zirkulation des Wärmeträgers durch den Solarkreis wurden zwei Pumpen vom Typ „Star-RS 25/6“ der Fa. Wilo SE verwendet. Die Pumpen besitzen eine maximale Förderhöhe von 6 m. Während des Betriebs wurde die Leistungsaufnahme der Pumpen zu jeweils 46 W bestimmt. Die Pumpen wurden so in den Solarkreis eingebaut, dass durch Betätigung zweier Magnetventile wahlweise eine oder zwei in Reihe geschaltete Pumpen verwendet werden können (s. Abbildung 51). Kennzahlen zu den Solarpumpen und den Magnetventilen können den Datenblättern in den Abschnitt 12.5 und 12.6 entnommen werden. Der erforderliche Massenstrom wird mithilfe eines Motorstellventils der vom Typ „3222“ in Kombination mit dem elektrischen Antrieb vom Typ „5824“ der Fa. Samson AG eingestellt (s. Abschnitt 12.8 bzw. 12.9). Für die Outdoor-Systemmessungen wurde ein Massenstrom von ca. 150 kg/h definiert.

Nach dem Kollektorfeld strömt der Wärmeträger in ein Drain-Back-Gefäß. Die Basis für dieses Gefäß stellt ein Flachspeicher vom Typ „V 140 L D2“ mit einem Fassungsvermögen 142,5 l der Fa. Roth Werke GmbH dar. Dieser Flachspeicher wurde mit Hilfe eines Rahmengerüsts im Inneren des Prüfcontainers installiert und anschließend verschalt (s.

Abbildung 54). Zur Minimierung der Wärmeverluste wurde der Zwischenraum zwischen dem Flachspeicher und der Verschalung im Anschluss mit losem, kugelförmigem Isoliermaterial aufgefüllt.

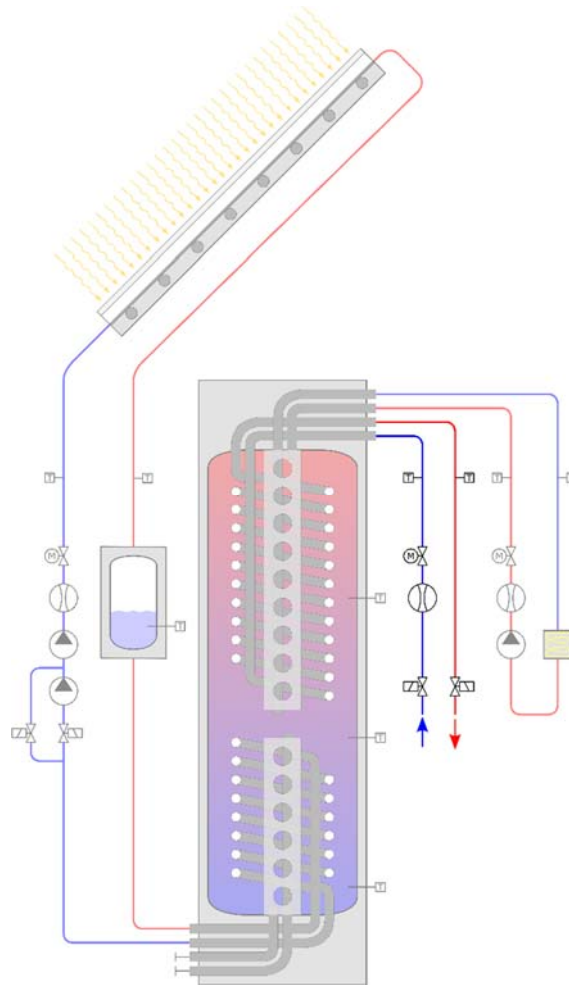


**Abbildung 54:** Drain-Back-Gefäß (Links: ohne Isolierung / Verschalung. Rechts: mit kompletter Einhausung)

#### 5.1.4 Trinkwarmwasser-Kreis

Der offene Trinkwarmwasser-Kreis ist in Abbildung 55 zu sehen. Die kalte Seite des Anschlusses wird mit externem Frischwasser versorgt. Durch das Schalten der beiden Magnetventile strömt kaltes Wasser in den Wärmespeicher und verdrängt dabei warmes Wasser, welches sich bereits im Speicher befindet. Innerhalb des WW-Kreises ist das gleiche Motorstellventil wie im Solarkreis (s. Abschnitt 5.1.3) verbaut, um den Massenstrom durch den Wärmespeicher exakt zu definieren. Der Massenstrom wird in diesem Kreis mit Hilfe eines MID vom Typ „IFM 1080K DN10“ der Fa. Krohne Messtechnik GmbH gemessen (s. Abschnitt 12.10). Dieser Sensor gibt Volumenströme von 84,83 l/h bis 3392 l/h bei einer Messgenauigkeit von 1% des Messwertes an. Die für die Bestimmung des Massenstroms notwendige Dichte wurde (basierend auf der mittleren Temperatur)

mit Hilfe eines Polynoms entsprechend DIN 9806 [35] ermittelt. Die Speicherein- und Speicheraustrittstemperatur wird mit Hilfe zweier PT100-Einsteckfühler gemessen.

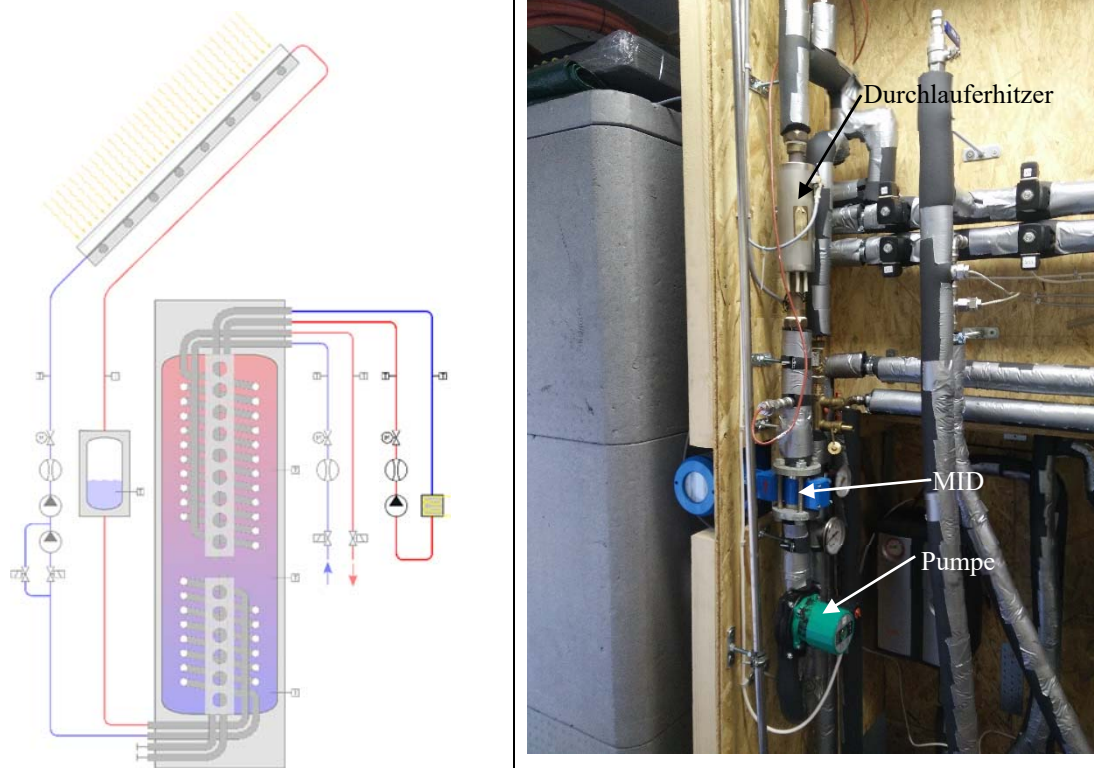


**Abbildung 55:** Warmwasser-Kreis

### 5.1.5 Backup-Kreis

Der für die Bereitstellung von Wärme verantwortliche hydraulische Kreis ist in Abbildung 56 dargestellt. Die im Trinkwarmwasser-Kreis (s. Abschnitt 5.1.4) beschriebenen Komponenten zur Ermittlung des Volumenstroms und der Temperatur sowie zur Regulierung des Volumenstroms werden auch in diesem Kreis verwendet. Für die Zirkulation des Wärmeträgers (Wasser) durch den Backup-Kreis wurde eine Pumpe vom Typ „Star-ST 15/11“ der Fa. Wilo SE (s. Anhang 12.7) verwendet. Die Pumpe besitzt eine maximale Förderhöhe von 11 m. Während des Betriebs wurde die elektrische Leistungsaufnahme

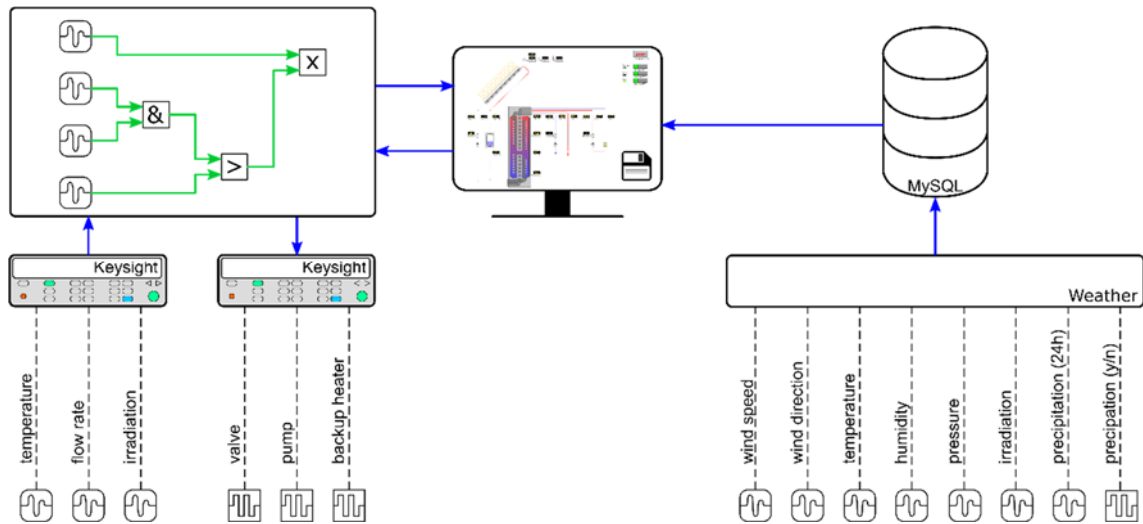
der Pumpe in Höhe von 46 W gemessen. Für die Erwärmung des Wärmeträgers wurde ein 9 kW-Durchlauferhitzer vom Typ „DLE 9 kW“ der Fa. Roth Werke GmbH verwendet.



**Abbildung 56:** Backup-Kreis. Links: Einbindung in das Hydraulikschema. Rechts: Integration in den Systemtest

## 5.2 Beschreibung der Messtechnik und der Datenerfassung

Die automatisierte Durchführung von Systemtests erfordert geeignete Regler, die entsprechende Prüfsequenzen innerhalb des Systemtests autonom abfahren können. Darüber hinaus müssen alle relevanten Messdaten erfasst und gespeichert werden. Für die Umsetzung der o.g. Anforderungen können marktverfügbare Regler verwendet werden, wobei hierbei proprietäre oder Open-Source-Lösungen verfügbar sind. Diese Regler haben den Vorteil, dass Hard- und Software entsprechend aufeinander abgestimmt sind und für die Implementierung in typische solarthermische Systeme ausgelegt sind. Für den Aufbau von Prüfständen sind solche marktverfügbaren Regler jedoch oftmals nicht ausreichend, insbesondere, wenn spezielle Regelalgorithmen umgesetzt werden sollen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projekts die Systemregelung PC-basiert in Kombination mit zwei Datenloggern vom Typ 34972A der Fa. Keysight Technologies umgesetzt. Eine graphische Darstellung der Regelung / Messdatenerfassung kann Abbildung 57 entnommen werden.



**Abbildung 57:** Ablaufdiagramm des Outdoor-Systemprüfstands

Zentrales Element der Regelung ist ein PC, der mit den beiden Datenloggern / Schaltsystemen über eine *Ethernet*-Schnittstelle verbunden ist. Ein Datenlogger wird für das Einlesen sämtlicher für den Test notwendiger Parameter (Temperaturen, Volumenströme, Ventilstellungen etc.) benötigt, das andere Gerät wird zum Ansteuern der für den Test notwendigen Komponenten (z.B. Pumpen, Ventile, Backup-Heizung) verwendet (s. Abbildung 57, unten links). Im ersten Schritt werden die eintreffenden Signale eingelesen (s. Abbildung 57, oben links). Basierend auf den aktuellen Messwerten dieser Signale werden Berechnungen durchgeführt (s. schematische Darstellung eines einfachen Regelalgorithmus Abbildung 57, oben links), deren Ergebnisse direkte Auswirkungen auf den Prüfstand haben (beispielsweise die Aktivierung eines Ventils oder einer Pumpe). Die berechneten Schaltzustände werden im Anschluss an einen weiteren Datenlogger (s. Abbildung 58, links) übermittelt, der mittels Relais die entsprechenden Komponenten ansteuert (s. Abbildung 58, rechts).

Zur Aufzeichnung der Umgebungsbedingungen wurde eine Wetterstation *der Fa. Adolf Thies GmbH & Co. KG* vom Typ TDL14 auf dem Dach des Containers installiert. Diese ist in der Lage, die Außentemperatur (in °C), die relative Luftfeuchtigkeit (in %), die (horizontale) Einstrahlung (in W/m<sup>2</sup>), den aktuellen Niederschlag, und die Niederschlagsmenge der letzten 24 h (in mm), den Umgebungsdruck (in mbar) und die Windgeschwindigkeit (in m/s) aufzuzeichnen. Die entsprechenden Sensoren wurden dabei an einen Datenlogger vom Typ TDL14 angeschlossen, der die Messdaten an eine Datenbank übermittelt. Der für den Systemtest verwendete PC hat Zugriff auf diese Datenbank und kann die aufgezeichneten Werte entsprechend weiterverarbeiten (s. Abbildung 57, rechts).



**Abbildung 58:** Messtechnik (Links: Datenlogger vom Typ 34972A / Rechts: Schaltkasten zur Ansteuerung der Komponenten)

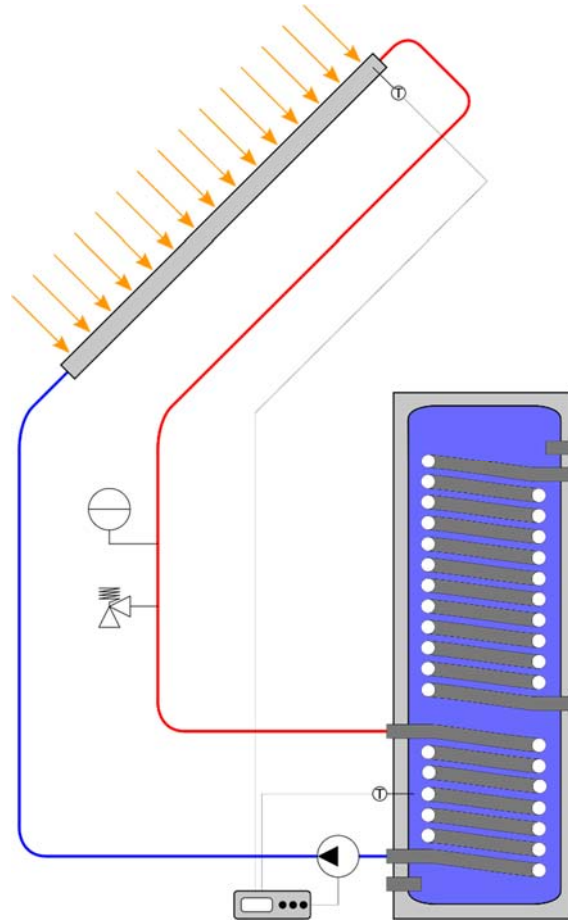
## 5.3 Regelstrategie

Im nachfolgenden Abschnitt werden die verwendeten Regelstrategien im Solar- und Heizkreis erläutert. Darüber hinaus wird das Zapfprofil zur Entnahme von Warmwasser beschrieben.

### 5.3.1 Solarkreis

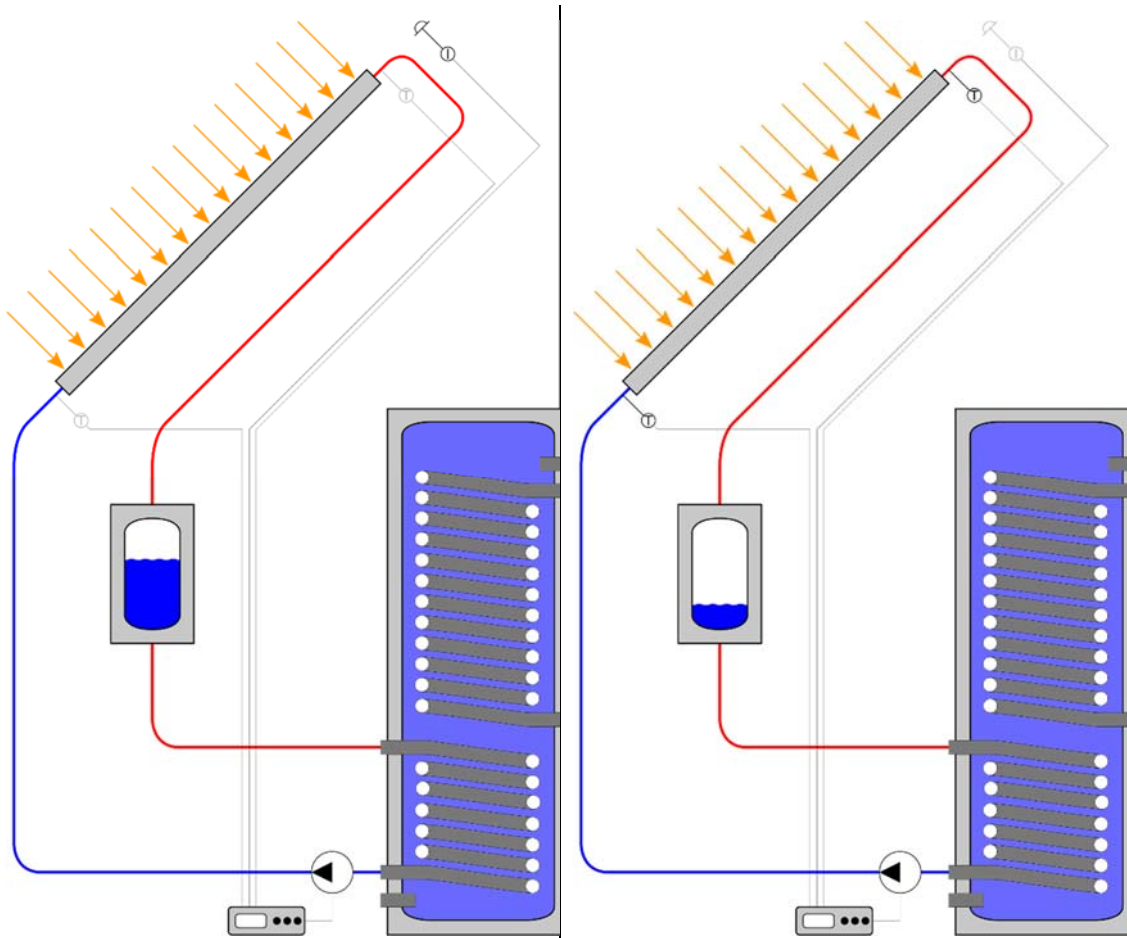
Im Gegensatz zu konventionellen, druckbehafteten Systemen werden bei der Verwendung von Kunststoffkollektoren in drucklosen, offenen *Drain-Back-Systeme* andere Strategien für die Regelung eines solchen solarthermischen Systems benötigt [37]. Konventionelle Systeme verfügen üblicherweise über zwei Temperaturfühler (s. Abbildung 59). So befindet sich einerseits ein Temperaturfühler im Inneren des Kollektors zur Messung der Kollektortemperatur, andererseits misst ein Temperaturfühler die Temperatur innerhalb des Wärmespeichers. Ein Temperaturdifferenz-Regler vergleicht diese beiden Temperaturen und gibt bei einer ausreichend hohen Temperaturdifferenz zwischen Kollektor- und Speichertemperatur ein entsprechendes Signal an die Solarpumpe.





**Abbildung 59:** Regelung eines konventionellen, druckbehafteten Systems

Bei offenen, drucklosen *Drain-Back-Systemen* kann das oben beschriebene Regelschema ggf. Nachteile aufweisen, da der verwendete Kollektorfühler im Falle der leeren Kollektoren nur die Temperatur der Luft im Inneren der Kollektoren misst. Aus diesem Grund wurde für das vorliegende *Drain-Back-System* ein anderes Regelkonzept verfolgt. Solange sich das System im ausgeschalteten Zustand (s. Abbildung 60, links) befindet, überwacht ein Pyranometer die momentane Einstrahlung in Kollektorebene. Übersteigt die Einstrahlung einen definierten Wert, wird die Solarpumpe aktiviert. Befindet sich das System im Betriebszustand (s. Abbildung 60, rechts), überwachen zwei Temperaturfühler (direkt vor bzw. nach dem Kollektor) die Leistungsabgabe des Kollektors.



**Abbildung 60:** Regelung des *Drain-Back-Systems* mittels zweier Temperaturfühler und einem Pyranometer. Links: *Drain-Back-System* im Betriebszustand. Rechts: *Drain-Back-System* im Ruhezustand

Ein detaillierter Ablaufplan der Regelstrategie ist in Abbildung 61 dargestellt. Nach dem Start überprüft die Regelung, ob die momentan eintreffende Strahlung in Kollektorebene (I) den Schwellwert der Einstrahlung ( $I_{\min}$ ) übersteigt. Solange dieses Kriterium erfüllt ist, wird die Solarpumpe aktiviert und anschließend (unabhängig von den Temperaturen und der Einstrahlung) für einen gewissen Zeitraum im aktiven Zustand belassen. Diese Einschaltverzögerung ist notwendig, damit die Solarpumpe die Kollektoren befüllen kann und ein häufiges Takten der Solarpumpe vermieden wird. Nach Ablauf der Vorlaufzeit wird geprüft, ob die Kollektor-Austrittstemperatur größer ist als die Kollektor-Eintrittstemperatur ( $T_{\text{Out}} > T_{\text{IN}}$ ). Solange dieses Kriterium erfüllt ist, erfolgt ein positiver Energieeintrag in das System, die Pumpe verbleibt im aktiven Zustand. Wird die Bedingung nicht mehr erfüllt, schaltet die Regelung die Pumpe ab. Anschließend wird die Pumpe (unabhängig von den Temperaturen und der Einstrahlung) für einen gewissen Zeitraum im deaktivierten Zustand belassen, um ein häufiges Takten der Pumpe zu verhindern.

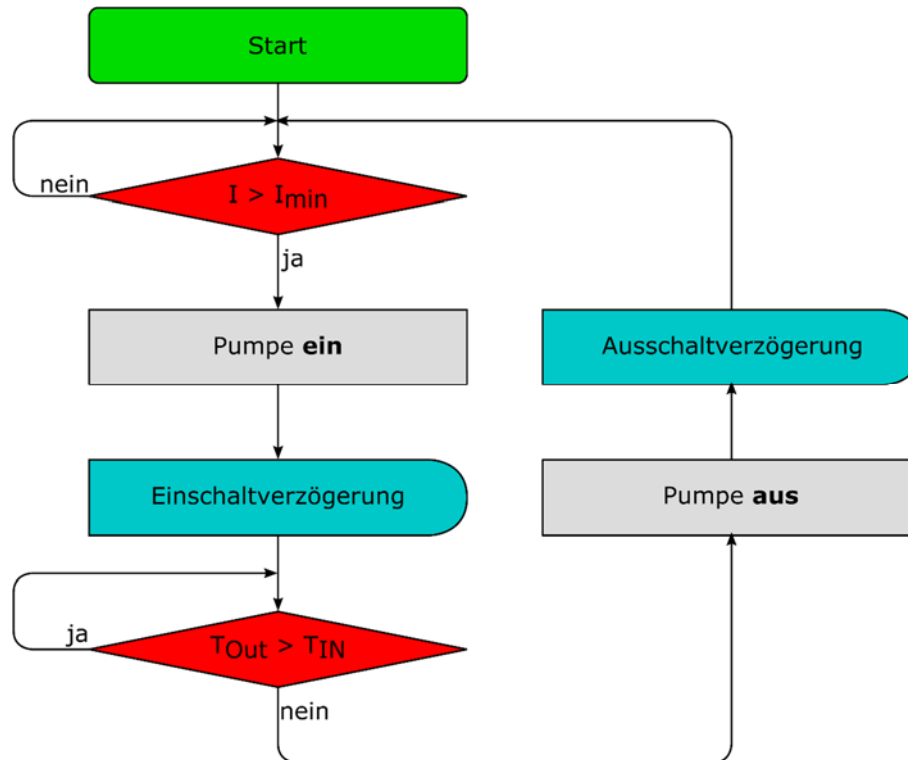
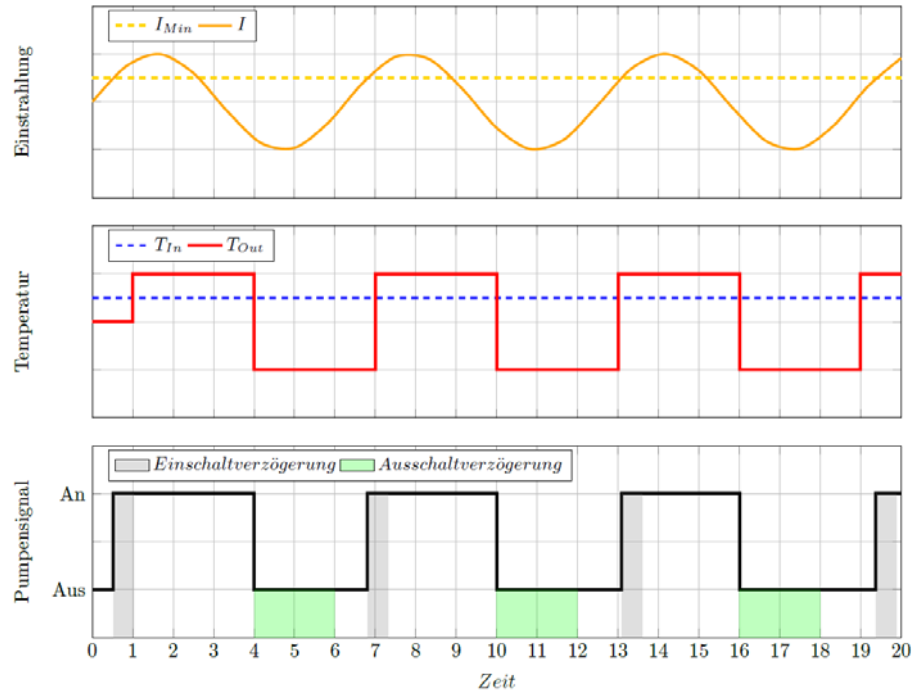


Abbildung 61: Flussdiagramm Solarregler

Der Einfluss von Strahlung und Temperatur auf das Signal der Solarpumpe kann dem Beispiel in Abbildung 62 entnommen werden. Im ersten Diagramm ist die in Kollektorebene eintreffende Einstrahlung ( $I$ ) als gelbe, sinusförmige Funktion dargestellt. Die gelb gestrichelte Linie symbolisiert den Schwellwert der Einstrahlung ( $I_{min}$ ). Die Kollektor-Ein- und Austrittstemperatur  $T_{in}$  bzw.  $T_{out}$  ist im zweiten Diagramm abgebildet. Im dritten Diagramm ist das Signal der Solarpumpe dargestellt.

Sobald die Einstrahlung den Wert der Mindesteinstrahlung überschreitet (Zeitpunkt  $t = 0,5$ ), wird die Solarpumpe eingeschaltet, die Einschaltverzögerung (grauer Bereich im 3. Diagramm) wird aktiviert. Nach Ablauf der Einschaltverzögerung (Zeitpunkt  $t = 1,0$ ) wird überprüft, ob die Kollektor-Austrittstemperatur ( $T_{out}$ ) oberhalb der Kollektor-Eintrittstemperatur ( $T_{in}$ ) liegt. Da dies der Fall ist, wird die Pumpe im eingeschalteten Zustand belassen. Aufgrund der Ausschalt Dominanz der Temperaturbedingung ( $T_{out} > T_{in}$ ) bleibt die Pumpe auch dann aktiv, wenn die Strahlung unter die Mindesteinstrahlung fällt ( $t = 2,6$ ). Sobald das Temperaturkriterium verletzt ist ( $t = 4,0$ ), wird die Pumpe ausgeschaltet sowie die Ausschaltverzögerung (grüner Bereich im 3. Diagramm) aktiviert. Nach Ablauf dieser Ausschaltverzögerung ( $t = 6,0$ ) wird wie zu Beginn das Einschaltkriterium überprüft ( $I > I_{min}$ ).



**Abbildung 62:** Schaltverhalten des Solarreglers (Beispiel)

Für den Solarregler wurde eine Mindesteinstrahlung von  $700 \text{ W/m}^2$  sowie eine Ein- und Ausschaltverzögerung von  $300 \text{ s}$  verwendet.

### 5.3.2 Backup-Heizung

Die Regelstrategie der Backup-Heizung basiert auf einer Zweipunktregelung mit Hysterese-Funktion. Dabei überwacht der Regler der Backup-Heizung laufend die Temperatur im oberen Warmwasser-Bereich des Speichers. Sobald die Speichertemperatur einen Wert von  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  unterschreitet, werden die Heizungspumpe und die Backupheizung durch den Regler aktiviert wird. Pumpe und Backupheizung bleiben so lange eingeschaltet, bis die Speichertemperatur einen Wert von  $48 \text{ }^\circ\text{C}$  überschreitet.

### 5.3.3 Warmwasser-Zapfung

Die Richtlinie VDI 4655 [38] definiert in Abhängigkeit vom Gebäudestandort, der Umgebungstemperatur und dem Bewölkungsgrad ein Lastprofil für Trinkwarmwasser (TWW), welches die Grundlage für das Lastprofil des Outdoor-Prüfstand ist. Hierbei wurde von einem 4-Personenhaushalt bei einem Pro-Kopf-Verbrauch von  $500 \text{ kWh/a}$  ausgegangen. Der TWW-Tagesbedarf am Standort Ingolstadt wurde entsprechend Formel 3 berechnet.

**Formel 3:** Definition des Warmwasser-Bedarfs nach VDI 4655 [38]

$$Q_{TTW,TT} = Q_{TWW,a} \left( \frac{1}{365} + N_{Pers/WE} \cdot F_{TWW,TT} \right)$$

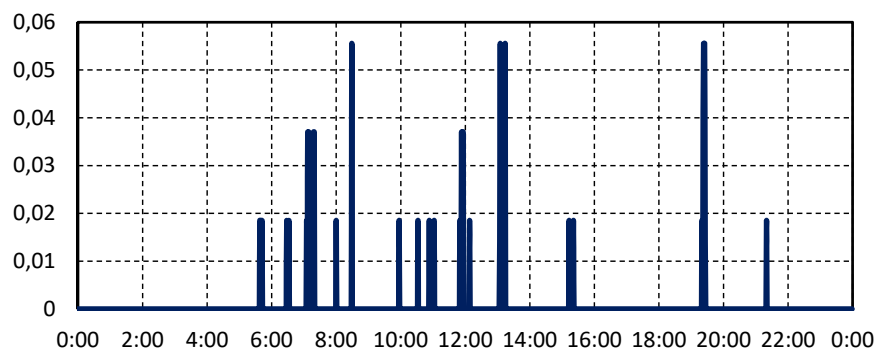
mit:

$Q_{TWW,a}$  TWW-Jahresbedarf in kWh/a, hier 2000 kWh/a

$N_{\frac{Pers}{WE}}$  Anzahl Personen pro Wohneinheit, hier 4 Personen

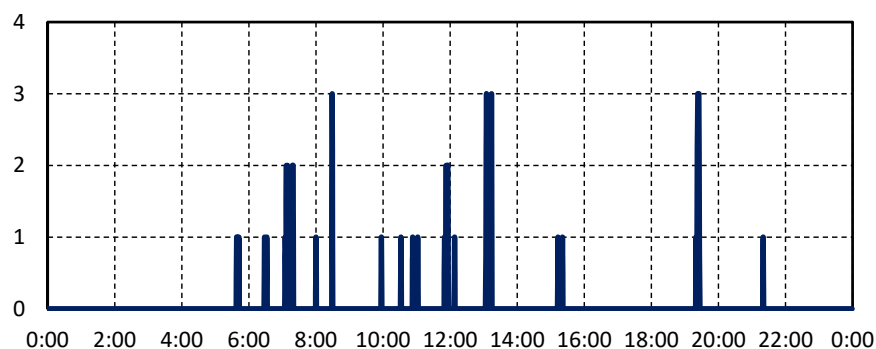
$F_{TWW,TT}$  Faktor für den Energiebedarf des Typtags ÜWH (= **Ü**bergang-**W**erktag-**H**eiter) für die Klimaregion 13 (Standort Ingolstadt), hier 7.1376e-5

Der Tagesenergiebedarf ergibt sich mit den o.g. Parametern zu ca. 6 kWh. Die Zeitpunkte der einzelnen, über den Tag verteilten Zapfungen werden von der Richtlinie vorgegeben. Die Auswertung des VDI-Profiles ergibt, dass über den Tag verteilt unterschiedlich stark ausgeprägte Zapfungen auftreten, wobei das betragsmäßig kleinste Niveau im Falle des ÜWH knapp 2 % des Gesamttagesbedarfs beträgt (z.B. gegen 10:00 Uhr, s. Abbildung 63).



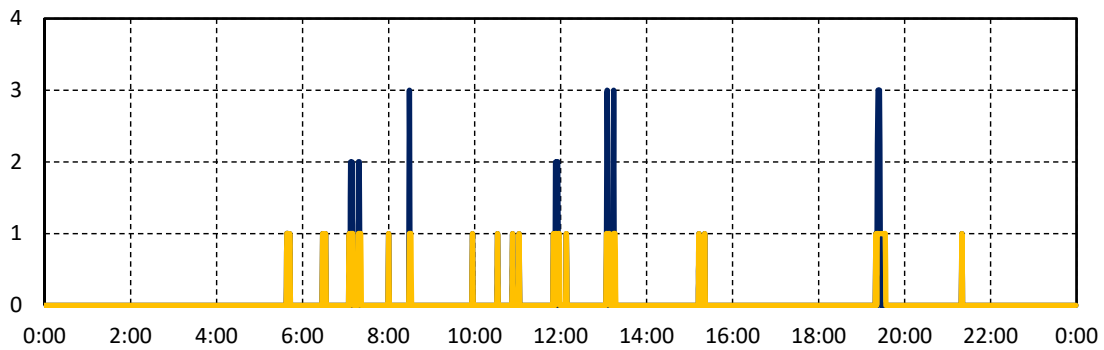
**Abbildung 63:** Lastprofil entsprechend [38] (ÜWH)

Basierend auf diesem kleinsten Vielfachen wurde das Profil anschließend harmonisiert, sodass nur noch ganzzahlige Vielfache des ursprünglichen Lastprofils verbleiben (s. Abbildung 64):



**Abbildung 64:** Harmonisiertes Lastprofil entsprechend [38] (ÜWH)

Da die Warmwasser-Entnahme unterschiedlicher Kategorien im Outdoor-Prüfstand schwierig zu realisieren ist, wurden alle Zapfungen der Kategorie 2 und 3 in Kategorie-1-Zapfungen umgewandelt (s. Abbildung 65). In der Konsequenz kommt es hierdurch zu längeren Zapfzeiten im Vergleich zum ursprünglichen Zapfprofil nach VDI 4655 (vgl. z.B. den Zeitraum gegen 12:00 Uhr). Die Vorteile der oben geschilderten Methode überwiegen diesen Nachteil jedoch deutlich, da die Verwendung von lediglich einer Zapfkategorie den Aufwand für die reale TWW-Zapfung während des Tests deutlich vereinfacht.



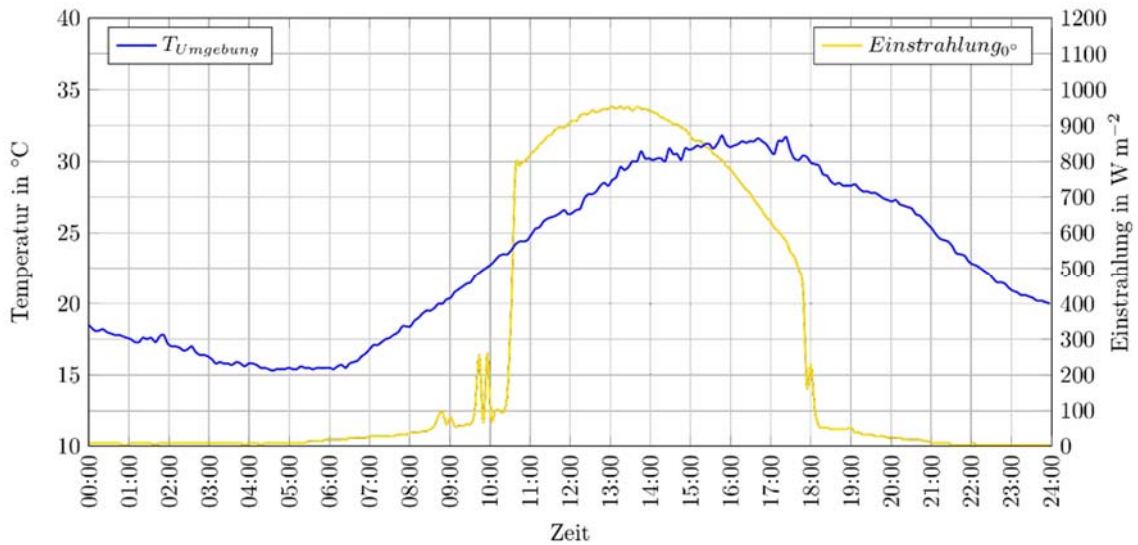
**Abbildung 65:** Gegenüberstellung des harmonisierten Lastprofils entsprechend VDI 4655 (blaue Kurve) und des während des Tests verwendeten Lastprofil (gelbe Kurve)

## 5.4 Ergebnisse der Systemmessungen

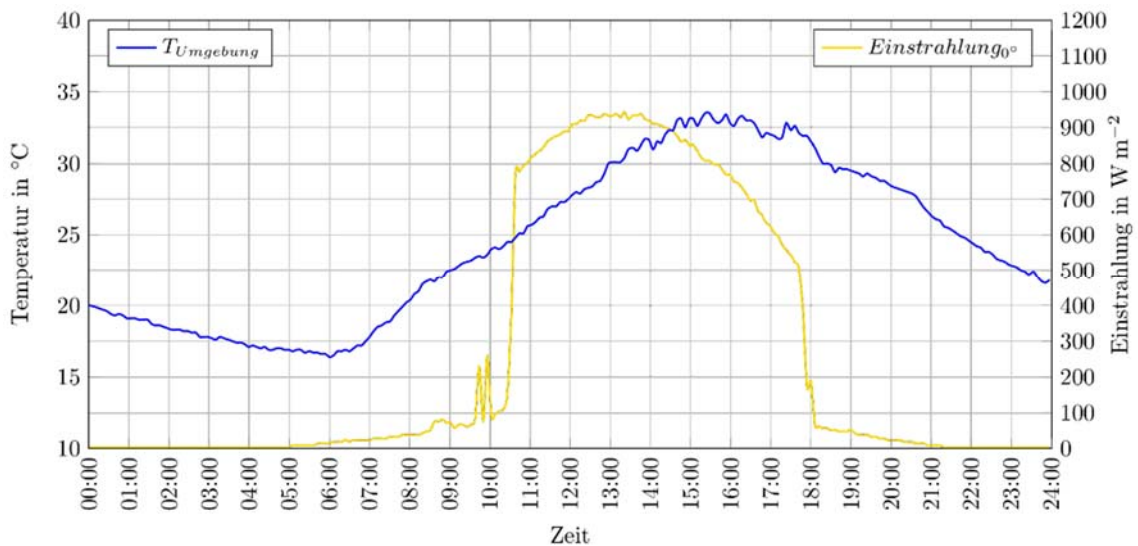
Für den Betrieb des Systemtests wurden zwei unterschiedliche Lastfälle definiert, die auch in einem realen System auftreten können. Im Lastfall „Normalbetrieb“ arbeiten alle Komponenten (WW-Zapfung, Backup-Heizung sowie das Solarsystem) wie vorgesehen. Im Lastfall „Defekte Pumpe“ wurde die Solarpumpe bewusst deaktiviert, um die auf den Kollektor eintreffenden Maximaltemperaturen zu ermitteln („trockene Stagnation“).

### 5.4.1 Lastfall „Normalbetrieb“

Als repräsentative Tage wurden im Lastfall „Normalbetrieb“ der 23. und der 24. Juni 2016 ausgewählt. Bei beiden Tagen handelt es sich um wolkenlose Sommertage mit ähnlich hohen Einstrahlungswerten (max. 952 W/m<sup>2</sup> am 23.06.2016 und max. 942 W/m<sup>2</sup> am 24.06.2016) und vergleichbaren Umgebungstemperaturen (31,9 °C am 23.06.2016 und 33,8 °C am 24.06.2016). Die Umgebungsbedingungen sind in Abbildung 66 (23.06.2016) und Abbildung 67 (24.06.2016) dargestellt.

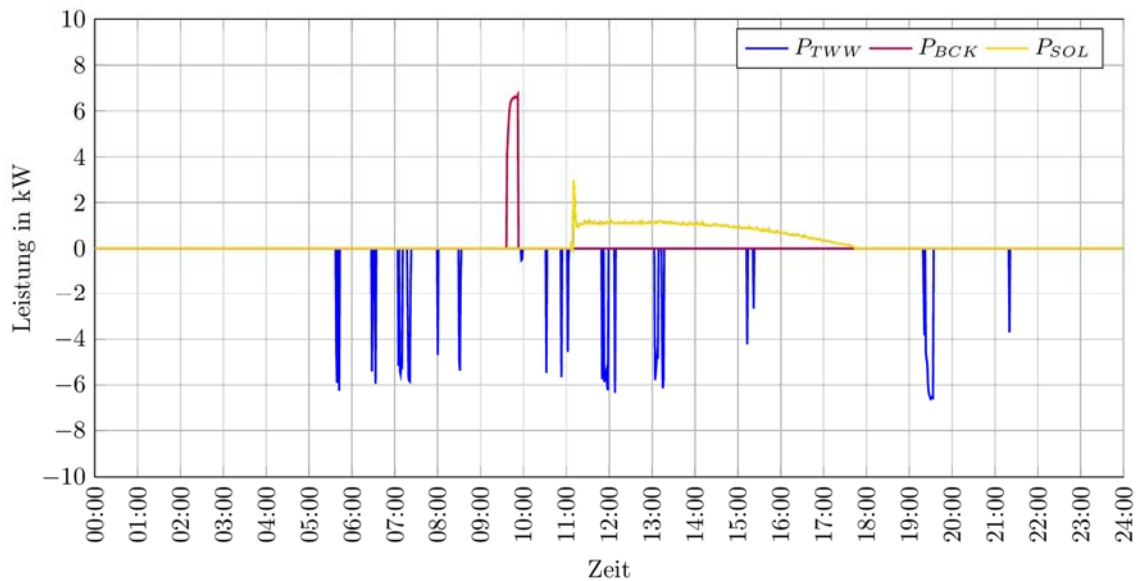


**Abbildung 66:** Wetterdaten am 23. Juni 2016



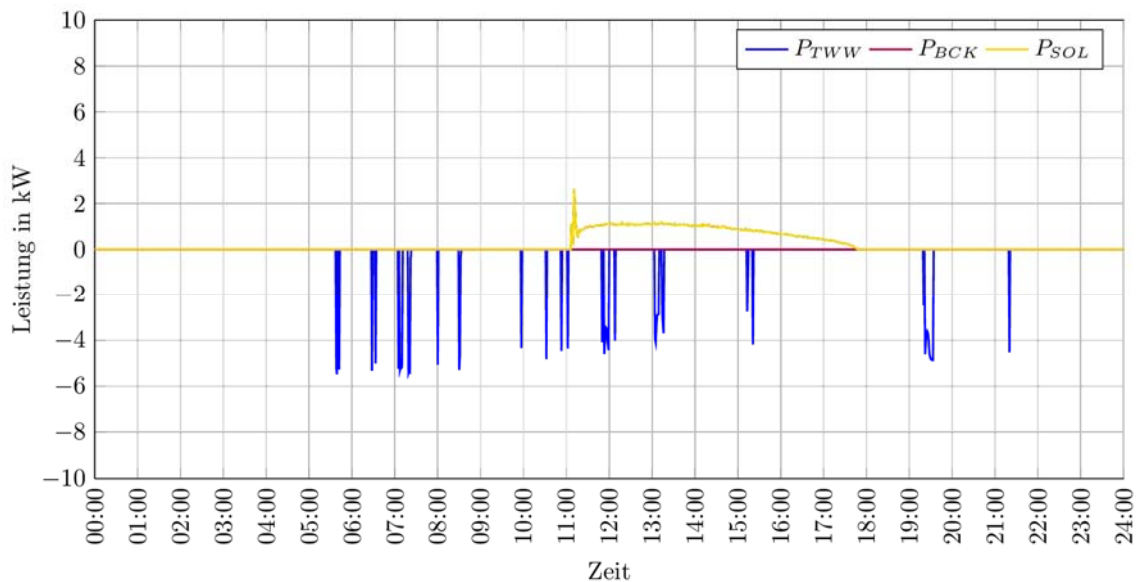
**Abbildung 67:** Wetterdaten am 24. Juni 2016

An beiden Messtagen steigt die Einstrahlung gegen 10:30 Uhr sprunghaft an. Zwischen 17:30 Uhr und 18:00 Uhr fällt die Einstrahlung sprunghaft ab. Beide Phänomene sind dem Standort des Prüfstands auf dem Gelände der THI geschuldet, bei dem das Kollektorfeld in den Morgen- und späten Nachmittagsstunden durch ein benachbartes Waldstück bzw. Gebäude verschattet wird. Der Verlauf der Wärmeerzeugung bzw. des Wärmeverbrauchs ist in Abbildung 68 (23.06.2016) und Abbildung 69 (24.06.2016) dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Entnahme von Warmwasser in den Morgenstunden des 23.06.2016 den Wärmespeicher abkühlt, so dass die Backup-Heizung zwischen 09:00 Uhr und 10:00 Uhr aktiviert wird, um eine ausreichende Temperatur im Speicher sicherzustellen.



**Abbildung 68:** Wärmeerzeugung / -verbrauch am 23. Juni 2016

Gegen 11:00 Uhr wurde die Solarpumpe durch den Regler aktiviert und gegen ca. 17:30 Uhr wieder deaktiviert. Während dieses Zeitraums wurden weitere TWW-Zapfungen durchgeführt, ein Abkühlen des Speichers wurde in diesem Zeitraum jedoch durch die solarthermischen Erträge des Kollektorfelds kompensiert. Die während des 23.06.2016 erwirtschafteten solaren Erträge führen am Folgetag dazu, dass ein Einschalten der Backup-Heizung vermieden werden kann (s. Abbildung 69). An diesem Tag konnte der TWW-Bedarf somit komplett durch das Kollektorfeld gedeckt werden.



**Abbildung 69:** Wärmeerzeugung / -verbrauch am 24. Juni 2016

Durch numerische Integration der Wärmeerzeugung bzw. des Wärmeverbrauchs konnte der Gesamtenergiebedarf für die beiden Testtage ermittelt werden (s. Tabelle 6). Aufgrund der ähnlichen Randbedingungen sind die solaren Erträge an beiden Tagen mit 5,7 kWh solarthermischem Ertrag gleich hoch.



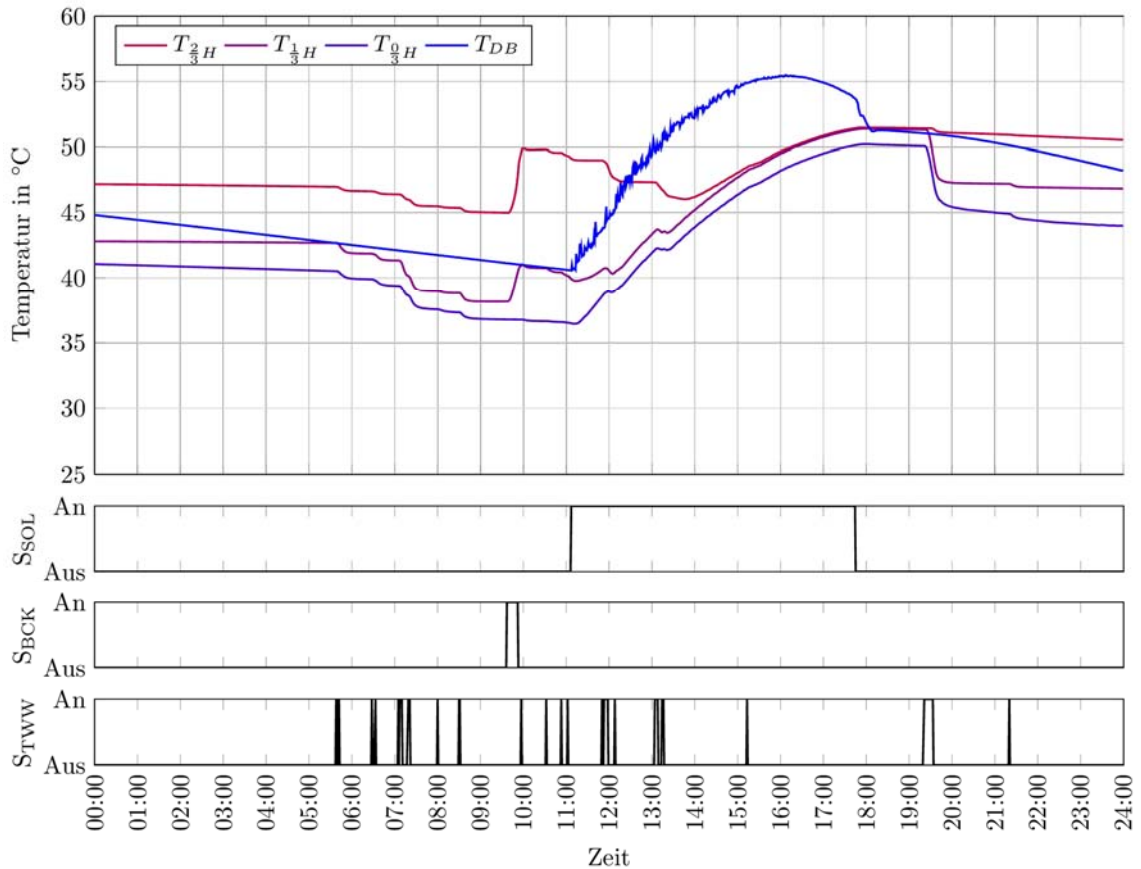
**Tabelle 6:** Energiemengen im Lastfall „Normalbetrieb“

	Trinkwarmwasser	Backup	Solar
23. Juni 2016	$E_{TWW} = 4,9 \text{ kWh}$	$E_{BCK} = 1,7 \text{ kWh}$	$E_{SOL} = 5,7 \text{ kWh}$
24. Juni 2016	$E_{TWW} = 3,9 \text{ kWh}$	$E_{BCK} = 0,00 \text{ kWh}$	$E_{SOL} = 5,7 \text{ kWh}$

Weiterhin kann festgestellt werden, dass der TWW-Wärmebedarf am 23.06.2016 mit 4,9kWh deutlich über dem des darauffolgenden Tages lag (3,9kWh). Dies kann wiederum mit dem Standort des Prüfstands erklärt werden: Da dieser über keinen eigenen Kaltwasseranschluss verfügt, wurde eine Schlauchleitung von einem Nebengebäude der *THI* bis zum Prüfstand in der Erde verlegt. Durch die hohe solare Einstrahlung am 23.06.2016 hat sich das Erdreich entsprechend stark aufgewärmt, sodass das in den Prüfstand eintretende Kaltwasser am darauffolgenden Messtag (24.06.2016) entsprechend wärmer war. Da die TWW-Zapfungen zeitgesteuert entnommen werden, ist die Gesamtenergiemenge am 24.06.2016 geringer als am 23.06.2016.

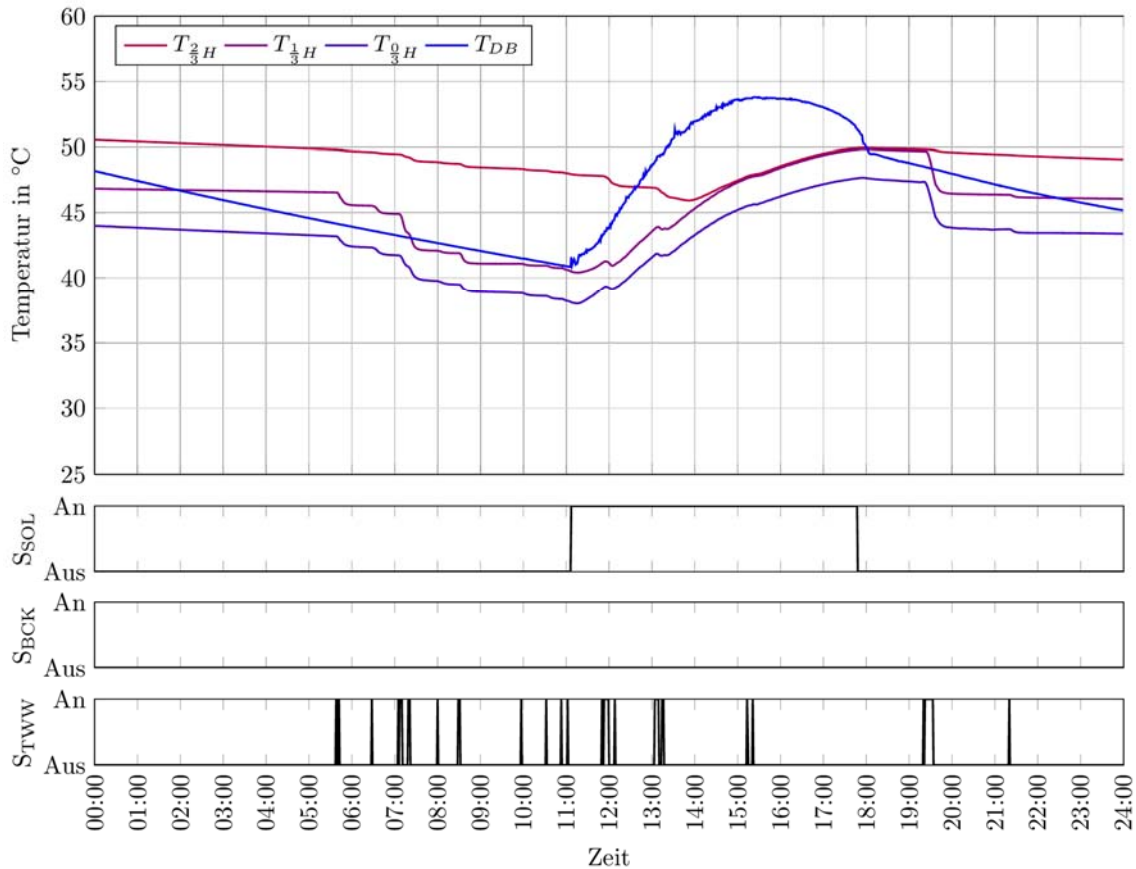
Die Temperaturverteilung des Speichers ist in Abbildung 70 (23.06.2016) bzw. Abbildung 71 (24.06.2016) dargestellt. Jeweils im unteren Teil des entsprechenden Diagramms sind die Signale der Wärmeerzeuger bzw. des Wärmeverbrauchers dargestellt, die den jeweiligen Zustand („An“ oder „Aus“) angeben. Dargestellt ist der Temperaturverlauf der drei Speicherfühler ( $0/3$ ,  $1/3$ ,  $2/3$  der Speicherhöhe) und der Temperaturfühler des Drain-Back-Gefäßes. Das Abfallen der Temperatur zu Beginn des jeweiligen Messtages (00:00 Uhr – ca. 05:30 Uhr) kann durch die Stillstandsverluste des Speichers begründet werden, da in diesem Zeitraum dem Speicher keine externe Wärme zu- oder abgeführt wird. Anhand der unterschiedlichen Wärmeverlustraten zwischen Speicher und Drain-Back-Gefäß kann festgehalten werden, dass der Speicher besser isoliert ist als das Drain-Back-Gefäß.

Am 23.06.2016 gegen 09:37 Uhr fällt die Temperatur bei  $2/3$  der Speicherhöhe unter  $45^\circ\text{C}$  (s. Abbildung 70). Dies ist das Signal für den Regler der Backup-Heizung, den Durchlauferhitzer und die Heizungspumpe zu aktivieren. Um 09:53 Uhr wird die Abschalttemperatur in Höhe von  $48^\circ\text{C}$  erreicht, in der Folge wird die Backup-Heizung abgeschaltet. Da das Wasser im TWW-Wärmetauscher zum Zeitpunkt der Abschaltung  $56,7^\circ\text{C}$  beträgt, steigt die Temperatur bei  $2/3$  der Speicherhöhe in der Folge auf mehr als  $50^\circ\text{C}$  an. Das Einschaltkriterium für das Kollektorfeld wird am gleichen Tag um 11:07 Uhr erreicht. Die Solarpumpe bleibt in der Folge bis 17:44 Uhr aktiviert. Direkt nach Aktivierung der Solarpumpe steigt die Temperatur im Drain-Back-Gefäß an.



**Abbildung 70:** Speichertemperaturen am 23. Juni 2016

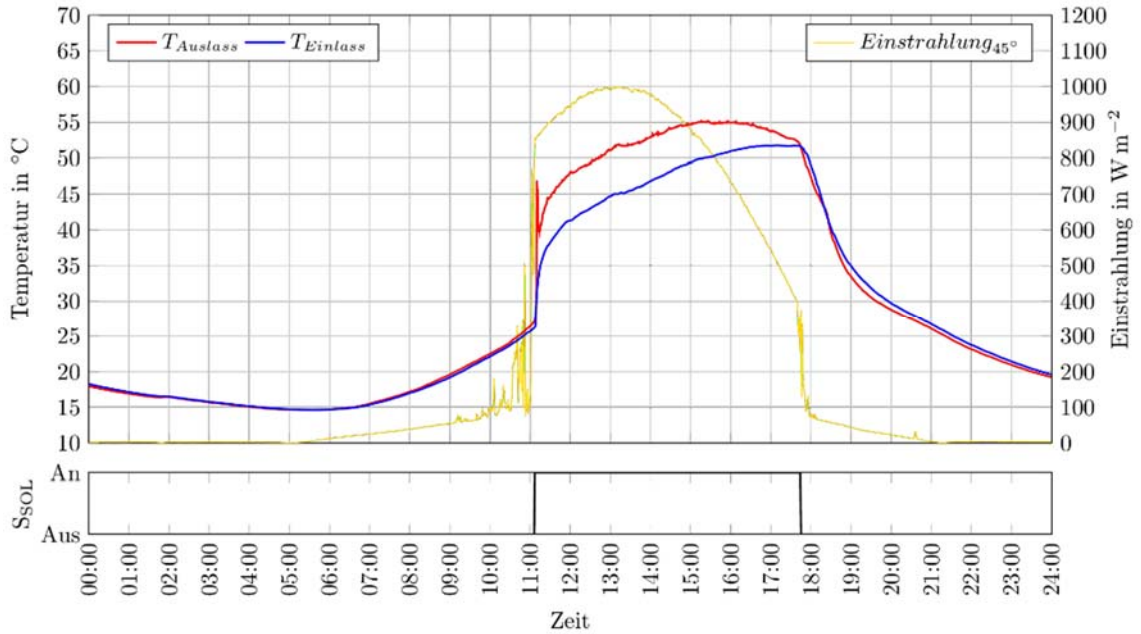
Dabei ist festzustellen, dass das Temperatursignal im Vergleich zu den Temperatursignalen des Speichers wesentlich verrauschter ist. Da der Wärmeträger des Kollektorkreises direkt in das *Drain-Back*-Gefäß fließt, wird das sich darin befindliche Volumen laufend durchmischt, in der Folge ändert sich auch die Temperatur im Zentrum des Drain-Back-Gefäßes fortlaufend.



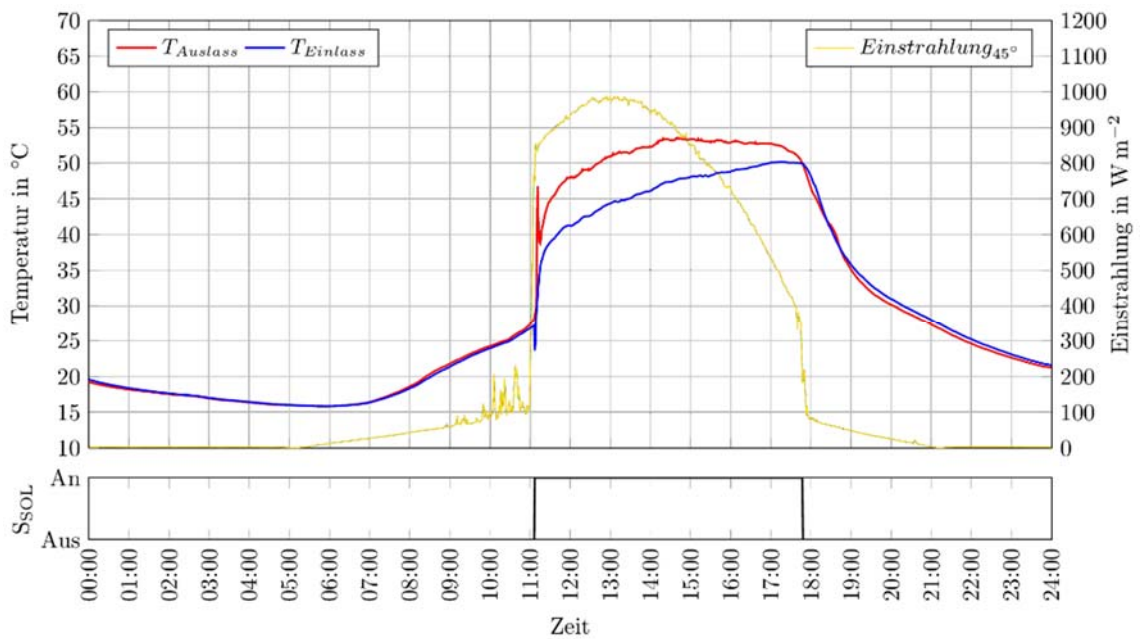
**Abbildung 71:** Speichertemperaturen am 24. Juni 2016

Durch die Kollektorvorlauftemperatur steigt die Temperatur im Speicher über den Tag hinweg stetig an. Die maximale Temperatur in Höhe von 55,5°C im Drain-Back-Gefäß wird gegen 16:08 Uhr erreicht. Am 24.06.2016 sind grundsätzlich die gleichen Vorgänge zu beobachten, allerdings liegen die Maximaltemperaturen im Speicher unter denen des Vortags, da die Backup-Heizung an diesem Tag nicht aktiviert wurde. In der Folge sinken die Temperaturen bis zum Einschalten des Kollektorfelds um 11:07 Uhr (wie am Vortag) am 24.06.2016 stärker ab als am Vortag.

Die maximale Kollektorvorlauftemperatur betrug 55,2°C am 23.06.2016 um 15:25 Uhr bzw. 53,6°C am 24.06.2016 um 14:33 Uhr. Die maximale Kollektorrücklauftemperatur betrug 51,7°C am 23.06.2016 bzw. 50,2°C am 24.06.2016 (s. Abbildung 72 und Abbildung 73). Die höchste während der System-Messungen aufgezeichnete Kollektorvorlauf-temperatur betrug 55,5°C.

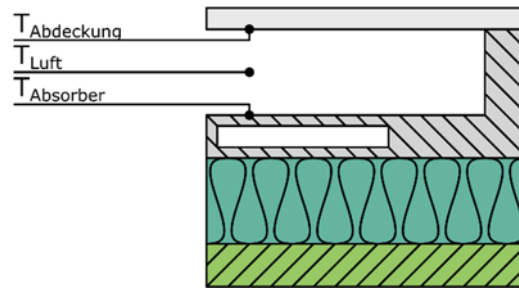


**Abbildung 72:** Kollektorvor- und Kollektorrücklauftemperatur am 23. Juni 2016



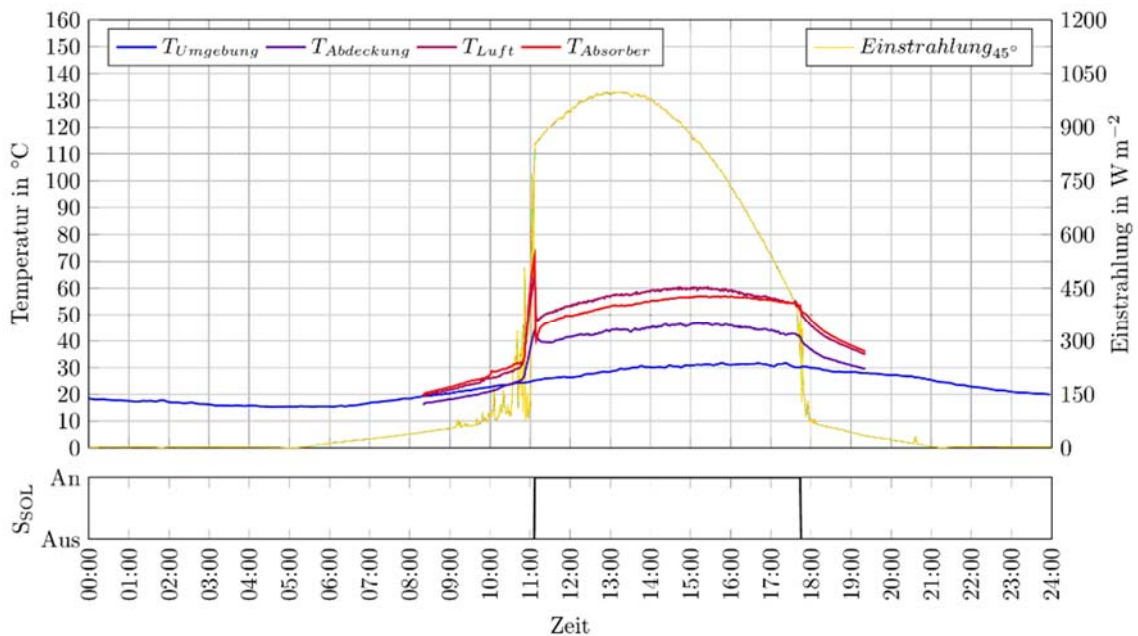
**Abbildung 73:** Kollektorvor- und Kollektorrücklauftemperatur am 24. Juni 2016

In Abbildung 75 und Abbildung 76 sind die gemessenen Temperaturen am 23.06.2016 und am 24.06.2016 dargestellt. Die Position der Temperaturfühler kann Abbildung 74 entnommen werden.



**Abbildung 74:** Position der Temperaturfühler am Kollektor

Der Temperaturfühler  $T_{\text{Absorber}}$  gibt dabei die Temperatur auf der Oberseite des Absorbers, der Temperaturfühler  $T_{\text{Luft}}$  die Temperatur der Luft im Scheibenzwischenraum zwischen Absorber und Abdeckung und der Temperaturfühler  $T_{\text{Abdeckung}}$  die Temperatur an der Innenseite der vorderseitigen Abdeckung an.



**Abbildung 75:** Temperaturen des Kollektors am 23. Juni 2016

Durch den sprunghaften Anstieg der Einstrahlung (Verschattung) gegen 10:30 Uhr steigt die Temperatur des Absorbers kurzfristig auf  $73\text{ }^{\circ}\text{C}$  an. Nach dem Ablauf der Einschaltverzögerung von  $300\text{ s}$  (s. Abschnitt 5.3.1) wird die Pumpe im Kollektorkreis aktiviert, in der Folge kühlt das Kollektorfluid den Absorber wieder ab. Während des Betriebs wurden am 23.06.2016 maximale Temperaturen in Höhe von  $57\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Absorber),  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Scheibenzwischenraum) und  $47\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Abdeckung) gemessen.

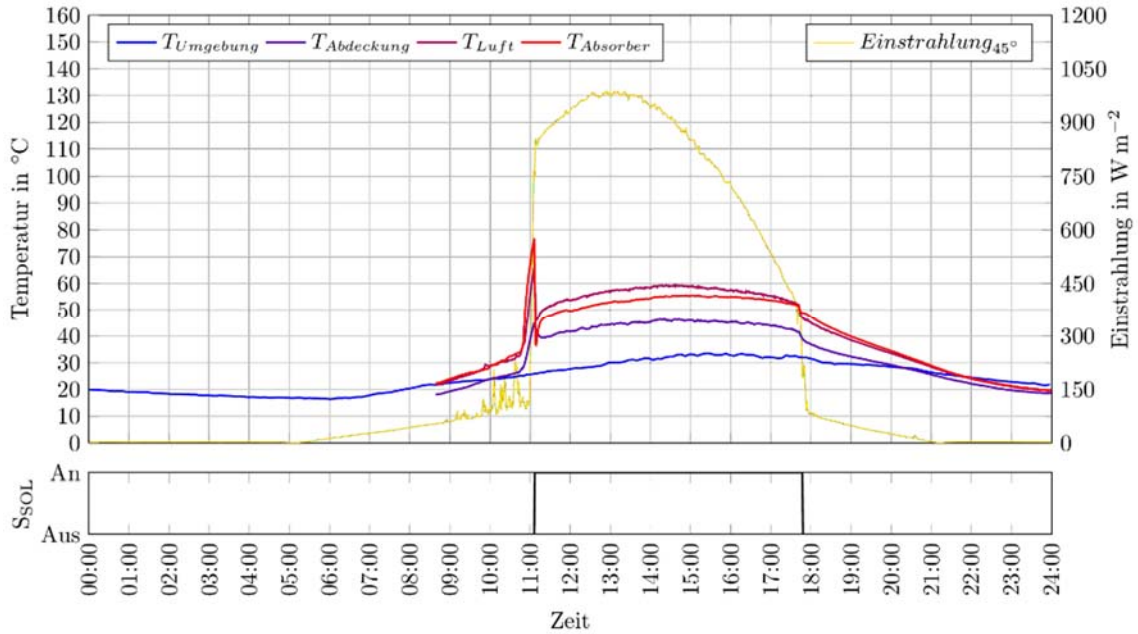


Abbildung 76: Temperaturen des Kollektors am 24. Juni 2016

Es ist festzustellen, dass die Temperatur des Scheibenzwischenraums während des Betriebs über der Absorbentemperatur liegt. Dies kann auf die fehlende selektive Beschichtung des Kunststoffabsorbers zurückgeführt werden.

#### 5.4.2 Lastfall „Defekte Pumpe“

Als repräsentativer Tag wurden im Lastfall „defekte Pumpe“ der 08. Juli 2016 ausgewählt. Die Umgebungsbedingungen für diesen Tag sind in Abbildung 77 dargestellt. Die maximale Umgebungstemperatur lag an diesem Tag bei 31°C, die maximale Einstrahlung bei 961 W/m<sup>2</sup>. In den Nachmittagsstunden dieses Tages wurde die Einstrahlung durch aufkommende Bewölkung reduziert.

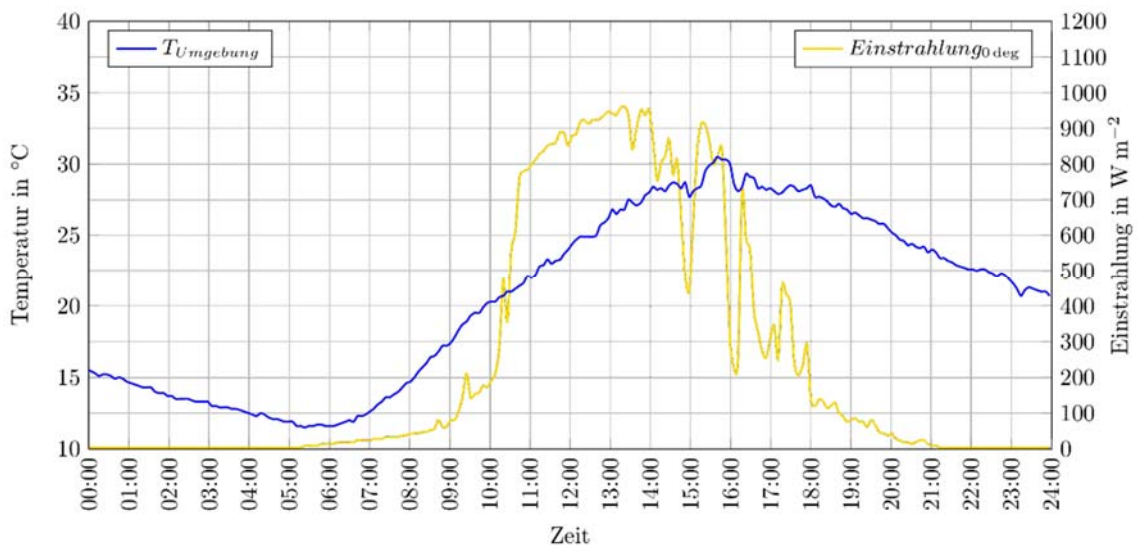
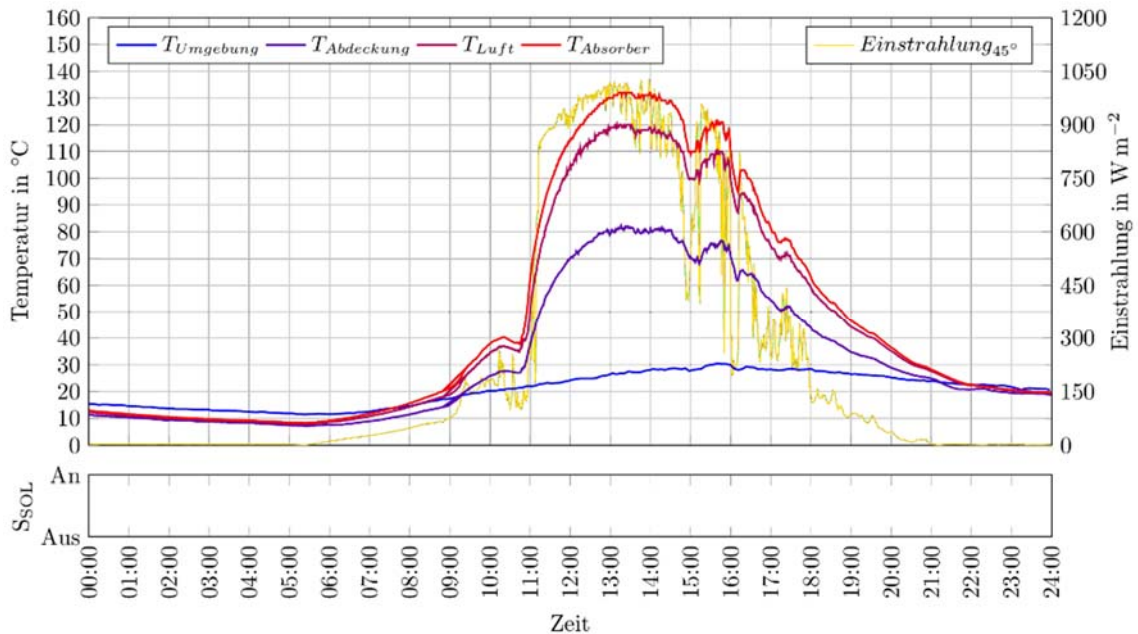


Abbildung 77: Wetterdaten am 08. Juli 2016

Die maximale Temperatur auf der Oberfläche des Absorbers betrug  $132\text{ }^{\circ}\text{C}$ , die maximale Temperatur der Luft im Scheibenzwischenraum betrug  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Auf der Innenseite der Abdeckung wurde eine maximale Temperatur in Höhe von  $83\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessen. Das Abfallen der Einstrahlung gegen 15:00 Uhr, 16:00 Uhr und 17:30 Uhr hat dabei einen großen Einfluss auf gemessenen Temperaturen (s. Abbildung 78). Die höchsten während der Messungen aufgezeichnete Temperaturen betrug  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Absorber),  $123\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Luft im Scheibenzwischenraum) sowie  $112\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Innenseite der Abdeckung).



**Abbildung 78:** Temperatursensoren am Kollektor am 08. Juli 2016

### 5.4.3 Fazit Systemmessung

Die Ergebnisse der Outdoor-Systemmessungen zeigen, dass sich die Kunststoffkollektoren gut in ein offenes *Drain-Back-System* integrieren lassen. Die Funktionsfähigkeit der entwickelten Prototypen konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Die während des Tests auf der Oberseite des Absorbers gemessenen Maximaltemperaturen in Höhe von  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Kollektor) überschreiten hierbei zwar die Dauergebrauchstemperaturen des verwendeten Polypropylens in Höhe von  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  (s. Datenblatt in 12.1), dennoch konnte während der viermonatigen Messperiode keine Schädigung des Materials beobachtet werden.

## 5.5 Durchströmungsverhalten

Zur Untersuchung des Durchströmungsverhaltens wurde eine thermographische Untersuchung des Kollektorfelds auf dem Dach des Outdoor-Prüfstands durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die transparenten, vorderseitigen Abdeckungen der vier Kollektoren entfernt, um so die Temperaturverteilung in den Absorbern zu ermitteln (s. Abbildung 79). Die Kollektoren wurden seriell miteinander verschaltet und anschließend mit warmem Wasser ( $T \approx 35\text{ }^{\circ}\text{C} - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aus dem Speicher durchströmt.



**Abbildung 79:** Unabgedeckte Kollektoren zu Beginn der Thermographie-Messung

Die Ergebnisse der Thermographie-Messung sind in Abbildung 80 abgebildet. Zu sehen ist, wie das warme Wasser zu Beginn der Messung (s. Abbildung 80, oben links) in den ersten Kollektor am rechten unteren Rand strömt. Nach ca. 5 Minuten (s. Abbildung 80, oben rechts) hat sich der erste Kollektor auf  $28,5^{\circ}\text{C}$ , der zweite Kollektor auf  $25,5^{\circ}\text{C}$  erwärmt. Nach einer ca. 10-minütiger-Messung (s. Abbildung 80, unten links) haben sich alle Kollektoren aufgewärmt, der vierte Kollektor hatte zu diesem Zeitpunkt eine Temperatur von  $27,5^{\circ}\text{C}$  aufgewiesen. Gegen Ende der Messung nach ca. 20 Minuten (s. Abbildung 80, unten rechts) hat sich das Kollektorfeld gleichmäßig auf ca.  $30^{\circ}\text{C} - 33^{\circ}\text{C}$  aufgewärmt. Während der Messung wurde das Kollektorfeld mit einem Massenstrom von knapp  $150\text{ kg/h}$  durchströmt. Die Ergebnisse zeigen eine gleichmäßige Durchströmung sowohl der einzelnen Kollektoren als auch des gesamten Kollektorfeldes, weshalb diese Konfiguration für die nachfolgenden Outdoor-Systemmessungen verwendet wurde.



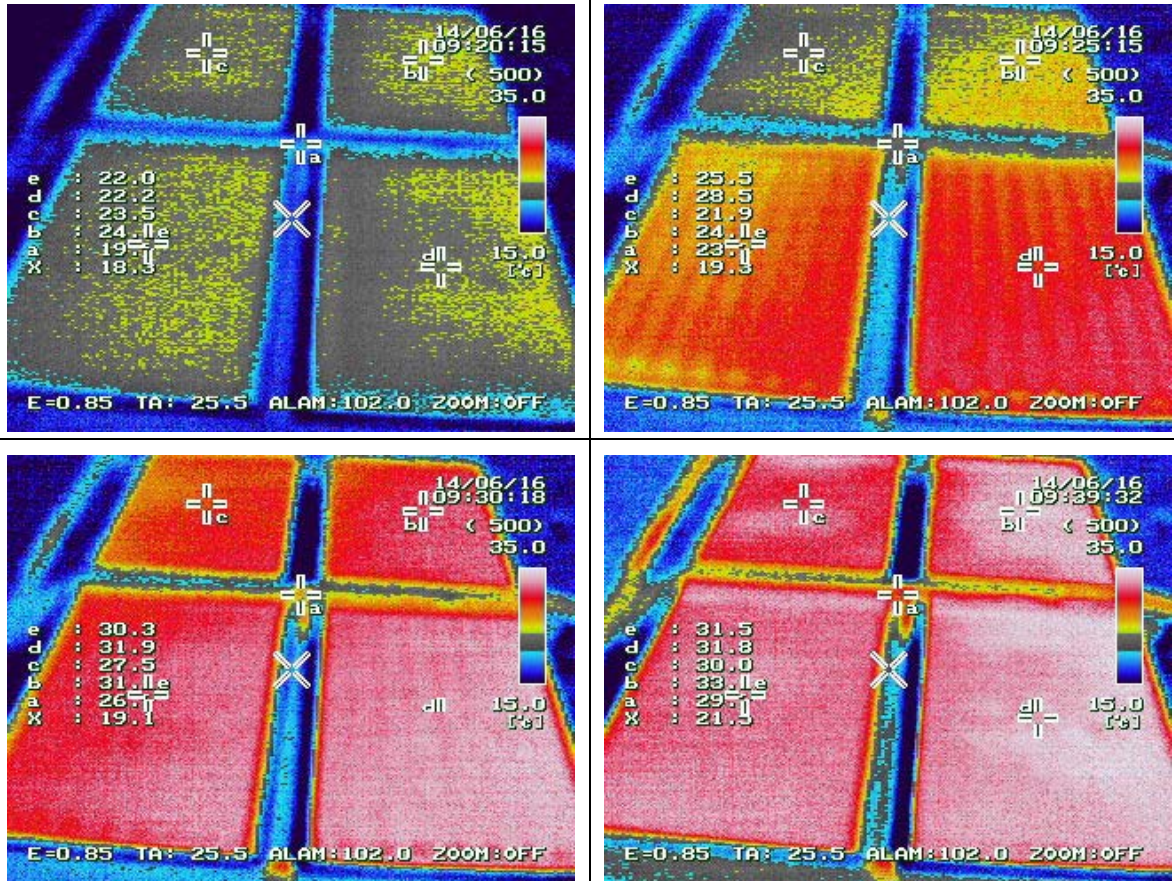


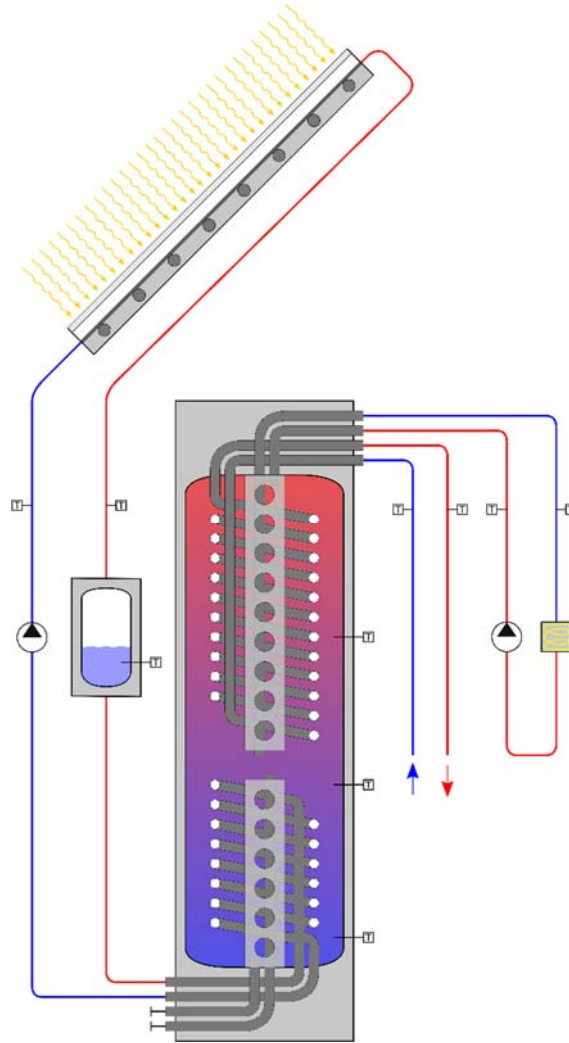
Abbildung 80: Thermographische Untersuchung des Kollektorfelds

## 6 Untersuchungen auf Simulationsebene

Die detaillierte Analyse und Bewertung der maximal auftretenden Kollektortemperaturen sowie deren Einfluss auf die Systemeffizienz erfordern geeignete Simulationsmodelle. So wird einerseits ein mathematisches Modell eines solarthermischen Kollektors mit Kunststoffabsorber benötigt, das die auftretenden Temperaturen prognostizieren kann (s. Abschnitt 3.1). Andererseits wird ein Systemmodell benötigt, welches den (Jahres-)energiebedarf eines typischen Einfamilienhauses realistisch abbilden kann. Im Rahmen des Projekts wurde zu der Umsetzung der o.g. Anforderungen die Simulationsumgebung MATLAB / Simulink [25] verwendet. Simulink ist ein Simulationswerkzeug auf Basis von MATLAB, mit dessen Hilfe komplexe mathematische Systeme mittels einzelner Blöcke aufgebaut werden können. Das Spektrum der zur Verfügung stehenden Blöcke reicht dabei von grundlegenden mathematischen Funktionen über Elemente der Booleschen Algebra bis hin zu Schnittstellen für den Input und Output von Daten. Darüber hinaus ist es möglich, eigene MATLAB-Funktionen zu programmieren und in die Systemumgebung von Simulink zu integrieren. Darüber hinaus bietet die separate CARNOT Blockbibliothek [27] Modelle für die Simulation verschiedener Wärmequellen, Wärmeverbraucher, Speicher, Steuerungen, Rohre und Pumpen an. Darüber hinaus stehen Modelle zur Bereitstellung von Wetterdaten, Fluideigenschaften und Benutzerfunktionen zur Verfügung. Der Aufbau des Simulationsmodells wird nachfolgend beschrieben.

### 6.1 Abgleich des Simulationsmodells mit den Messdaten

Da die Outdoor-Systemmessungen nur für einen begrenzten Zeitraum durchgeführt werden konnten, ist die Aussagekraft über die Effizienz des untersuchten Systems auf den Messzeitraum begrenzt. Für eine Bewertung des Systemertrags auf Jahresebene wurde deshalb ein Simulationsmodell entwickelt, welches den jährlichen Energieverbrauch bzw. die jährliche Energieerzeugung mit Hilfe einer solarthermischen Anlage zuverlässig prognostizieren kann. Für eine korrekte Prognose der solaren Erträge auf Jahresbasis ist eine Validierung des Simulationsmodells notwendig. Für diese Validierung wurden die Messdaten des Outdoor-Systemtests mit den berechneten Verbräuchen und Erträgen des Simulationsmodells auf Tagesbasis miteinander verglichen. Der Aufbau des Simulationsmodells entspricht dabei dem realen Aufbau des Outdoor-Systemtest (s. Abbildung 81). Im Zentrum des Modells befindet sich ein mathematisches Modell des 500l-Tanks vom Typ Quadroline der Fa. Roth Werke GmbH. Die Temperaturverteilung über die Höhe kann mittels 3 (virtueller) Temperatursensoren an der gleichen Position ausgewertet werden wie in der realen Messung ( $0/3$ ,  $1/3$ ,  $2/3$  der Speicherhöhe). Gleiches gilt für das *Drain-Back*-Gefäß, bei dem die Temperatur im Zentrum des Speichervolumens aufgezeichnet wird und mit den realen Messwerten verglichen werden kann.



**Abbildung 81:** Aufbau des Simulationsmodell (Validierung)

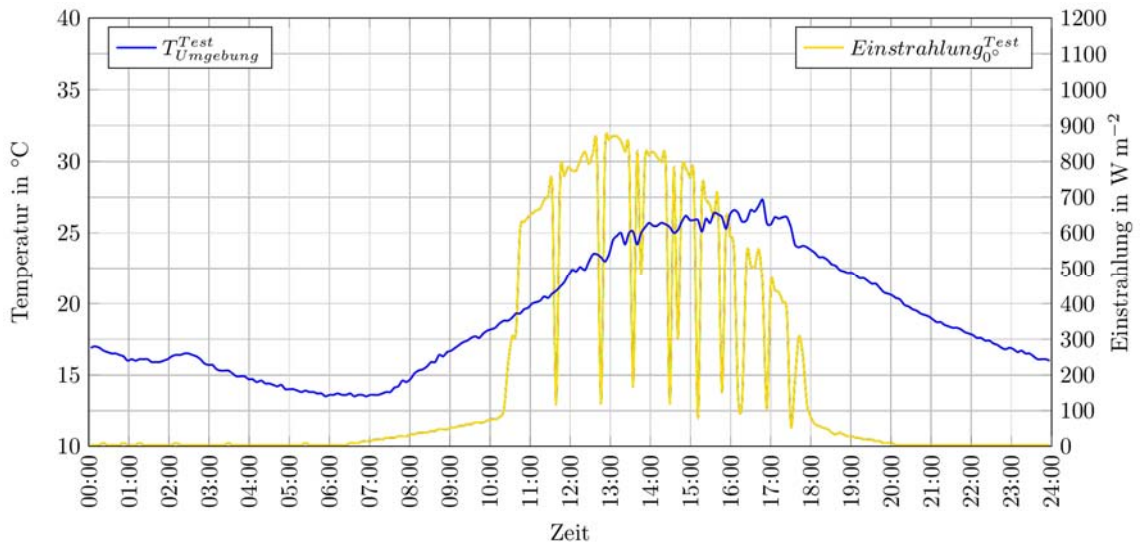
Wärme kann dem Speicher sowohl mittels des Kollektorfelds als auch mit Hilfe eines elektrischen Durchlauferhitzers zugeführt werden. Die für die mathematische Beschreibung des Kollektors notwendigen Parameter  $\eta_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  entsprechen hierbei den experimentell ermittelten Werten, die bei Leistungsmessungen am Indoor-Sonnensimulator aufgezeichnet wurden (s. Abschnitt 4.1.3). Für die korrekte Abbildung des Durchlauferhitzers in der Simulation wurde die elektrische Leistungsaufnahme mit einer Strommesszange vom Typ U1191A der *Fa. Keysight* zu insgesamt 8 kW ermittelt. Durch einen Vergleich der elektrischen Leistungsaufnahme und der thermischen Leistungsabgabe konnte der thermische Wirkungsgrad des Durchlauferhitzers  $\eta_{DLE}$  ermittelt werden. Diese Daten wurden in dem Simulationsmodell hinterlegt, um so die thermische Leistung des Durchlauferhitzers realistisch abzubilden. Der Volumenstrom und die elektrische Leistungsaufnahme der im Kollektor- und Backup-Kreis verwendeten Pumpen wurden ebenfalls messtechnisch erfasst und anschließend im Simulationsmodell hinterlegt. Die für die Simulation maßgeblichen Parameter können Tabelle 7 entnommen werden.

**Tabelle 7:** Simulationsparameter (Validierung)

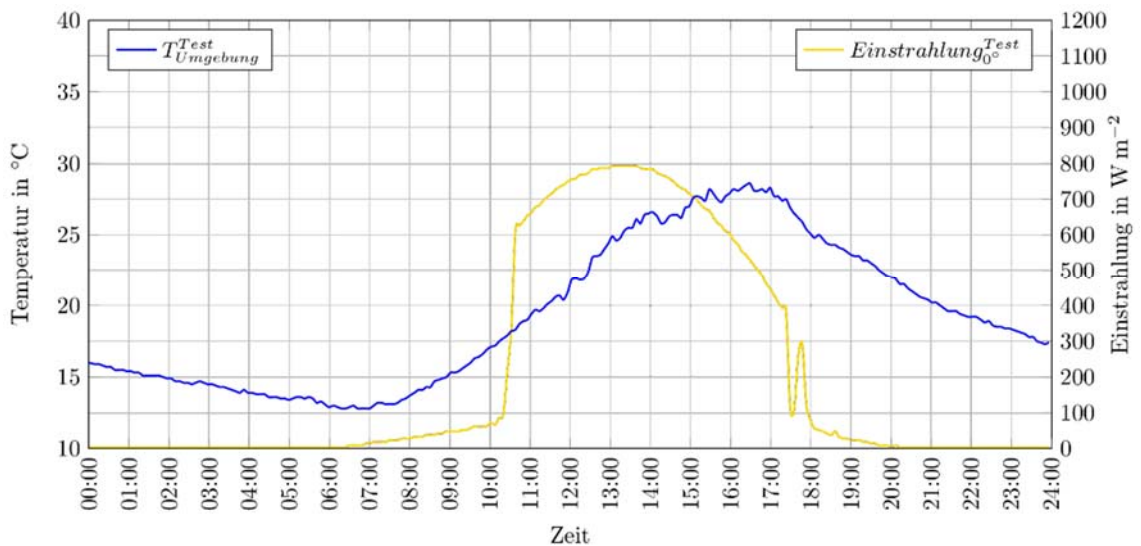
Solar	Optischer Wirkungsgrad $\eta_0$	0,696
	Linearer Wärmeverlustkoeffizient $a_1$ in $W/m^2K$	8,111
	Quadratischer Wärmeverlustkoeffizient $a_2$ in $W/m^2K^2$	0,034
	Gesamtfläche des Kollektorfelds $A_K$ in $m^2$	2,332
	Volumenstrom der Solar-Pumpe $\dot{V}_{SOL}$ in l/h	150
	Elektrische Leistungsaufnahme der Solar-Pumpe $P_{P,SOL}$ in W	92
Backup	Elektrische Leistungsaufnahme des Durchlauferhitzers $P_{DLE}$ in kW	8,0
	Wirkungsgrad Durchlauferhitzer $\eta_{DLE}$ in %	81,3
	Volumenstrom der Backup-Pumpe $\dot{V}_{BCK}$ in l/h	450
	Elektrische Leistungsaufnahme der Backup-Pumpe $P_{P,BCK}$ in W	46

Die TWW-Zapfungen erfolgen über ein definiertes Zapfprofil, das sich an die VDI 4655 anlehnt (s. Abschnitt 5.3.3). Die Regelstrategien des Solar- und Backupkreises sind in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 beschrieben und wurden entsprechend im Simulationsmodell umgesetzt.

Für die Validierung der Daten wurden zwei repräsentative, aufeinanderfolgende Tage ausgewählt. An beiden Tagen wurde Wärme sowohl mittels des Kollektorfelds als auch durch die Backup-Heizung in das System eingespeist. Die so erzeugte Wärme wurde dem System durch über den Tag verteilte TWW-Zapfungen entzogen. Die während der Messung aufgezeichneten Umgebungsbedingungen können Abbildung 68 bzw. Abbildung 69 entnommen werden. Die maximale Außentemperatur an den untersuchten Tagen lag bei  $27^\circ C$  (30.08.2016) bzw.  $29^\circ C$  (31.08.2016), die maximale Einstrahlung auf die Horizontale bei  $899 W/m^2$  (30.08.2016) bzw.  $793 W/m^2$  (31.08.2016). Am ersten Testtag (30.08.2016) wurde die Einstrahlung durch mehrere vorbeiziehende Wolkenfelder auf Werte von  $<300 W/m^2$  reduziert (s. Abbildung 82). Bei dem zweiten Testtag (31.08.2016) handelt es sich um einen wolkenlosen Tag (s. Abbildung 83).



**Abbildung 82:** Wetterdaten am 30. August 2016



**Abbildung 83:** Wetterdaten am 31. August 2016

Zur Bewertung der Abweichung zwischen realen Messdaten und Simulationsdaten wurde das folgende Bewertungskriterium definiert (s. Formel 4).

**Formel 4:** Definition der relativen Abweichung

$$f := \sqrt{\left(\frac{E^{Test} - E^{Sim}}{E^{Test}}\right)^2}$$

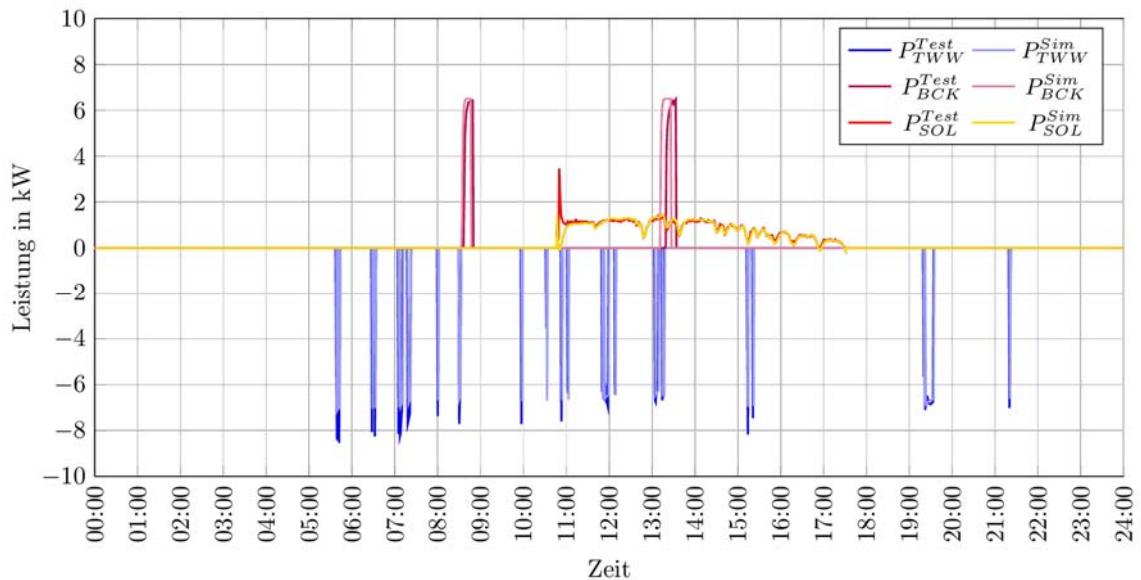
mit:

$f$  Relative Abweichung der Daten

$E^{Test}$  Tagesenergieverbrauch / -ertrag in kWh (auf Basis von Messdaten)

$E^{Sim}$  Tagesenergieverbrauch / -ertrag in kWh (auf Basis von Simulationsdaten)

In Abbildung 84 ist der Verlauf der Leistung der Wärmeerzeuger und des Wärmeverbraucher dargestellt. Beginnend ab ca. 05:00 Uhr finden über den Tag verteilte Warmwasser-Zapfungen statt, die gegen 21:30 Uhr enden (blaue bzw. hellblaue Kurven). Gegen 08:30 Uhr und kurz nach 13:00 Uhr ist die Speichertemperatur unter die Mindesttemperatur gefallen, worauf sich die Backup-Heizung einschaltet und den Speicher wieder auf die vorgegebene Temperatur aufheizt.



**Abbildung 84:** Wärmeerzeugung / -verbrauch am 30. August 2016

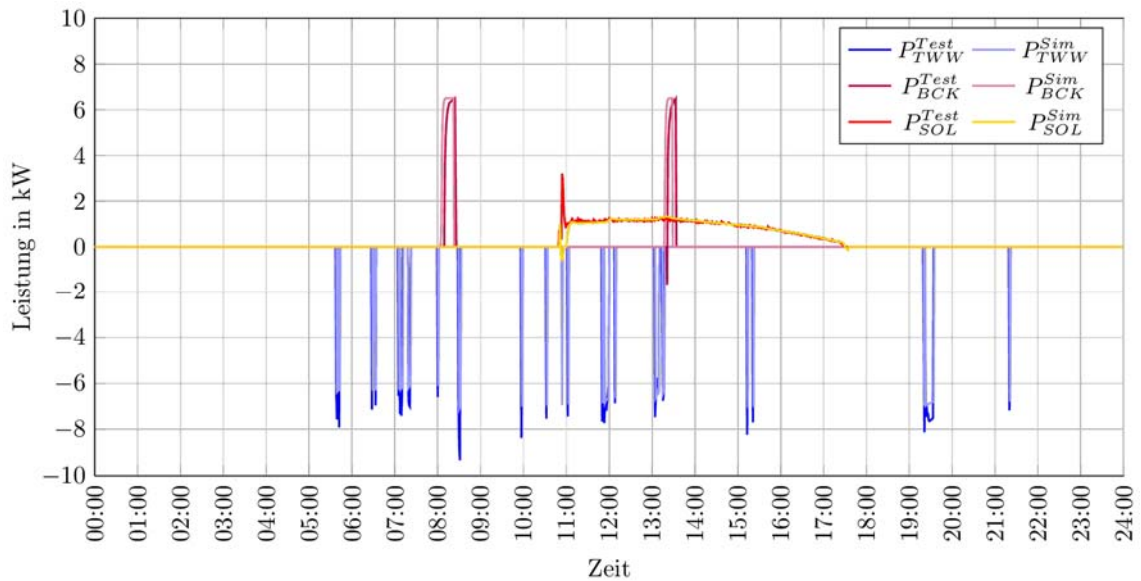
Im Zeitraum von ca. 10:30 Uhr bis 17:30 Uhr war das Kollektorfeld in Betrieb. Der Zusammenhang zwischen den vorbeiziehenden Wolkenfeldern und der solarthermischen Leistung ist hierbei deutlich zu erkennen. Die über den Tag integrierten Leistungen (d.h. die Tagesenergiemengen) der beiden Wärmeerzeuger und des Wärmeverbraucher sind in Tabelle 8 dargestellt.

**Tabelle 8:** Energiemengen am 30. August 2016

	Trinkwarmwasser	Backup	Solar
Messung	$E_{TWWW}^{Test} = 6,3 \text{ kWh}$	$E_{BCK}^{Test} = 2,6 \text{ kWh}$	$E_{SOL}^{Test} = 5,9 \text{ kWh}$
Simulation	$E_{TWWW}^{Sim} = 6,0 \text{ kWh}$	$E_{BCK}^{Sim} = 2,7 \text{ kWh}$	$E_{SOL}^{Sim} = 5,6 \text{ kWh}$
Abweichung	$f_{TWWW} = 4,3\%$	$f_{BCK} = 5,0\%$	$f_{SOL} = 5,1\%$

Die Abweichungen der einzelnen hydraulischen Kreise liegen dabei zwischen 4,3% und 5,1%. Die gute Übereinstimmung der Messdaten mit den Simulationsdaten kann auch am

darauffolgenden Tag (31.08.2016) beobachtet werden (s. Abbildung 85). Da dieser Testtag keinerlei Bewölkung aufgewiesen hat, ist die Leistungskurve des Kollektorfelds deutlich gleichmäßiger als am Vortag.



**Abbildung 85:** Wärmeerzeugung / -verbrauch am 31. August 2016

Die entsprechenden Energiemengen für diesen Testtag sind in Tabelle 9 aufgelistet. Die Abweichungen der jeweiligen hydraulischen Systeme liegen dabei zwischen 3,3% und 7,5%.

**Tabelle 9:** Energiemengen am 31. August 2016

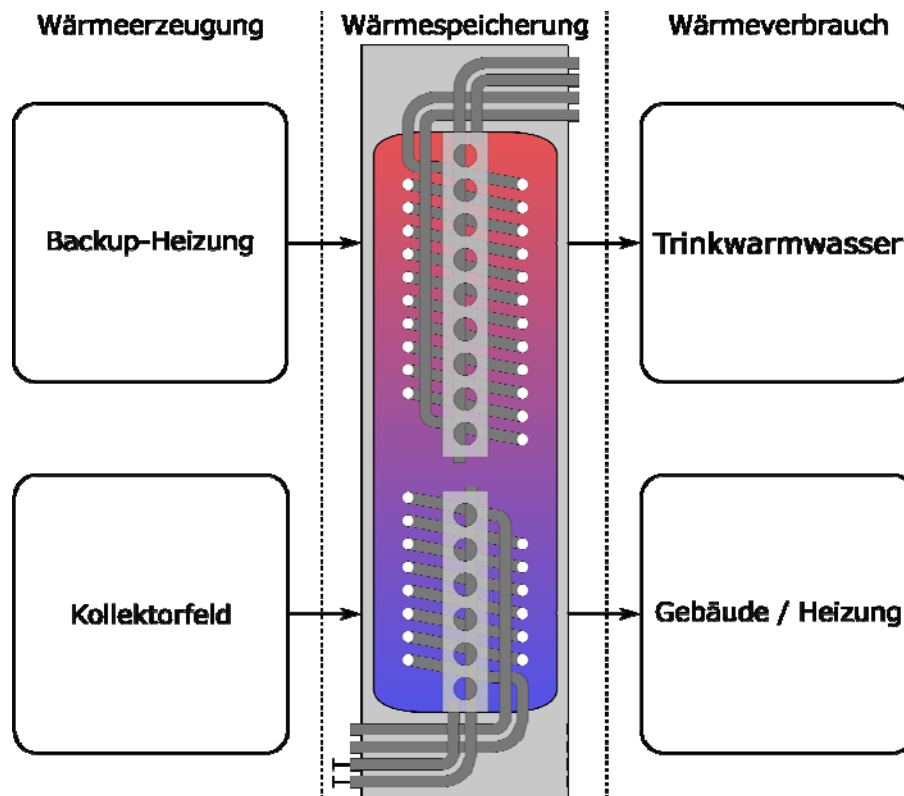
	Trinkwarmwasser	Backup	Solar
Messung	$E_{TW}^{Test} = 6,5 \text{ kWh}$	$E_{BCK}^{Test} = 2,7 \text{ kWh}$	$E_{SOL}^{Test} = 6,2 \text{ kWh}$
Simulation	$E_{TW}^{Sim} = 6,0 \text{ kWh}$	$E_{BCK}^{Sim} = 2,9 \text{ kWh}$	$E_{SOL}^{Sim} = 6,0 \text{ kWh}$
Abweichung	$f_{TW} = 7,5\%$	$f_{BCK} = 4,0\%$	$f_{SOL} = 3,3\%$

Zusammenfassend kann eine gute Übereinstimmung der Messdaten mit den Simulationsdaten festgestellt werden kann. Hervorzuheben ist hierbei vor allem die hohe Korrelation der real gemessenen und der simulierten solaren Erträge. Die relativen Unterschiede beim Trinkwarmwasser-Kreis lassen sich wie folgt begründen: Bei den Outdoor-Systemtests wurde das Kaltwasser über eine erdverlegte Schlauchleitung an den Prüfstand angeschlossen. Das Wasser, welches sich im Inneren dieser Leitung befindet, heizt sich an Tagen mit hohen Umgebungstemperaturen und / oder hohen Einstrahlungswerten durch die damit einhergehende Erwärmung des Erdreichs auf. Dies bedeutet, dass die Temperatur des einströmenden Wassers nicht konstant ist (wie in der Simulation angenommen). Die Unterschiede beim Backup-Kreis sind u.a. durch das Anlaufverhalten der Backup-Pumpe begründet: Während das Simulationsmodell von einem konstanten Volumenstrom

bei Aktivierung der Pumpe ausgeht, wird der maximale Volumenstrom in der Realität erst nach einiger Zeit erreicht.

## 6.2 Beschreibung des Simulationsmodells

Auf Basis der Outdoor-Systemmessungen wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, das in der Lage ist, den jährlichen Energieverbrauch bzw. die jährliche Energieerzeugung mit Hilfe einer solarthermischen Anlage zu prognostizieren. Im Zentrum des Modells befindet sich ein mathematisches Modell des 500l-Tank vom Typ Quadroline der Fa. Roth Werke GmbH, der auch bei den Outdoor-Systemtests verwendet wurde (Abmessungen s. Datenblatt in 12.3). Wärme kann dem Systemspeicher sowohl mit einer Backup-Heizung als auch mittels eines Kollektorfelds zugeführt werden (s. Abbildung 86, linke Seite). Die so erzeugte Wärme wird dem Speicher zugeführt und dort zwischengespeichert (s. Abbildung 86, Mitte), bevor sie für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser bzw. die Beheizung des Wohngebäudes verbraucht wird (s. Abbildung 86, rechte Seite).



**Abbildung 86:** Prinzipskizze des Simulationsmodells (Jahressimulation)

Als Backupheizung wurde ein 15kW-Gaskessel verwendet. Dieser Gaskessel ist Bestandteil aller Systemsimulationen und stellt die notwendige Wärme für den Fall bereit, dass das Kollektorfeld keine oder nicht ausreichende solarthermischen Erträge liefert. Das Kollektorfeld hat eine Gesamtgröße von 10 m<sup>2</sup> und ist unter 45° in Richtung Süden ausgerichtet. Bei der Simulation wurden drei unterschiedliche Kollektortypen berücksichtigt. Als Referenzkollektor wurde ein metallischer, konventioneller Flachkollektor vom Typ *Heliostar* verwendet. Darüber hinaus wurde der am Sonnensimulator getestete



und im Outdoor-Systemtest verwendete Prototyp in der Simulation berücksichtigt (Kunststoffkollektor (Prototyp), s. Tabelle 10). Bei dem dritten untersuchten Kollektortyp handelt es sich um den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Kunststoffkollektor mit einer rückseitigen Isolierung in Höhe von 20 mm und einem zusätzlichen Luftspalt von 20 mm hinter dem Absorber (Kunststoffkollektor (Konzept), s. Tabelle 10). Diese Variante stellt dabei exemplarisch einen serienreifen Kunststoffkollektor dar.

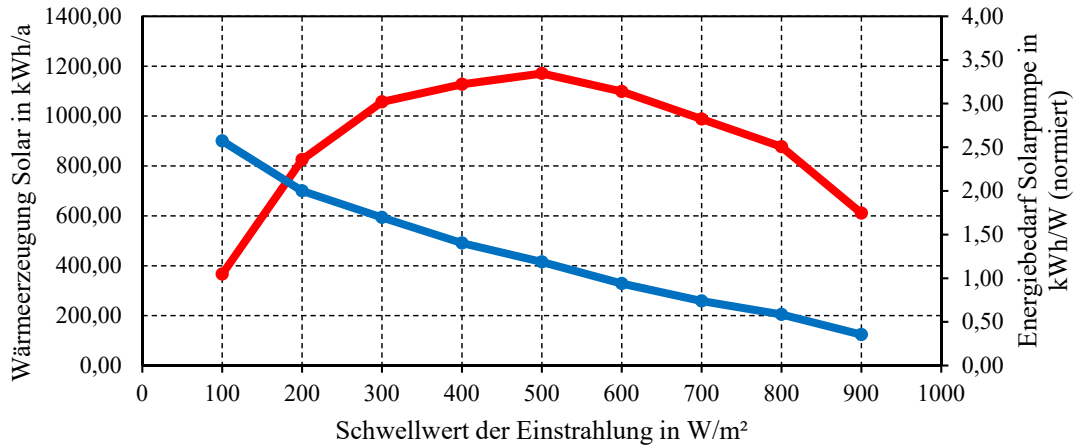
**Tabelle 10:** Leistungsdaten der verwendeten Kollektoren [39]

	Heliostar	Kunststoffkollektor (Prototyp)	Kunststoffkollektor (Konzept)
Optischer Wirkungsgrad $\eta_0$	0,770	0,696	0,822
Linearer Wärmeverlustkoeffizient $a_1$ in $W/m^2K$	3,650	8,111	6,129
Quadratischer Wärmeverlustkoeffizient $a_2$ in $W/m^2K^2$	0,013	0,034	0,027

Bei Verwendung der konventionellen, metallischen Heliostar-Kollektoren wurde in der Simulation eine 40 %-Wasser-Glykol-Mischung angenommen, bei den Kunststoffkollektoren wurde reines Wasser als Wärmeträger verwendet. Die TWW-Zapfungen wurden entsprechend der VDI 4655 [38] in der Simulation hinterlegt.

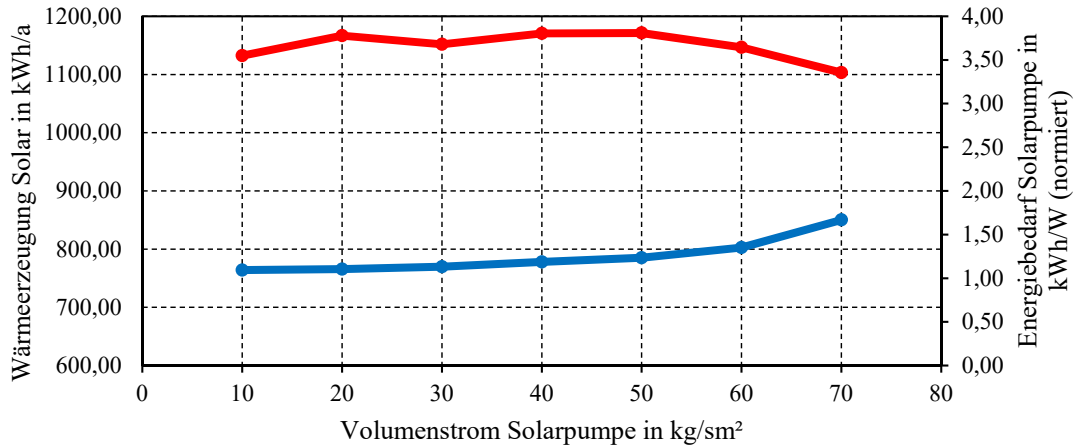
Im Rahmen der Untersuchung wurden zwei unterschiedliche Gebäudestrukturen berücksichtigt. Das SFH15-Gebäude repräsentiert eine aktuelle Gebäudehülle mit sehr hoher energetischer Qualität und entspricht den deutschen Passivhaus-Anforderungen. Das SFH45-Gebäude beinhaltet bautechnische Komponenten die sich an den aktuellen gesetzlichen Anforderungen orientieren. Somit repräsentiert dieses Gebäude einen typischen Neubau mit guten thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle. Die jährlich benötigte Energiemenge zur Beheizung der beiden Gebäude liegt bei  $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (SFH15) bzw.  $45 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (SFH45), wobei sich diese Angaben auf den Teststandort Straßburg beziehen. Beide Gebäude haben eine Wohnfläche von  $140 \text{ m}^2$  und werden von vier Personen bewohnt. Die Gebäude wurden als Ein-Zonen-Modell in Simulationsmodell berücksichtigt und für den Referenzstandort Würzburg bewertet.

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss des Solarreglers auf den jährlichen Energieverbrauch und den solarthermischen Ertrag untersucht. Grundlage für diese Simulation war ein SFH45-Gebäude am Standort Würzburg, ausgestattet mit  $10 \text{ m}^2$  solarthermischer Kunststoffkollektoren (Variante Prototyp). Die Ergebnisse der Parameteruntersuchung sind in Abbildung 87 dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass bei Verwendung eines Schwellwerts von  $500 \text{ W/m}^2$  der höchste solarthermische Ertrag von ca.  $1170 \text{ kWh/a}$  erzielt werden kann.



**Abbildung 87:** Zusammenhang zwischen Schwellwert der Einstrahlung (Regelung) und solarthermischen Ertrag (Blaue Kurve: Volumenstrom der Solarpumpe in kg/(sm<sup>2</sup>)/ Rote Kurve: Ertrag des Kollektorfelds in kWh/a)

Im nächsten Schritt wurde der Einfluss des Volumenstroms bzw. der Einfluss der Betriebsarten Low-Flow und High-Flow auf den jährlichen Energieverbrauch und den solarthermischen Ertrag untersucht. Low-Flow-Systeme arbeiten mit Volumenströmen von weniger als 10l/h bis 30h/h pro Quadratmeter Kollektorfläche. Die Vorteile dieser Betriebsart liegen u.a. im niedrigeren Bedarf an elektrischer Energie für den Betrieb der Solarpumpe. Außerdem sind die Kollektor-Austrittstemperaturen im Vergleich zum High-Flow-Betrieb höher, sodass der Speicher schneller auf Nutzttemperaturen erwärmt werden kann. High-Flow-Systeme arbeiten mit Volumenströmen von 30l/h bis 80l/h pro Quadratmeter Kollektorfläche. Durch die höheren Strömungsgeschwindigkeiten ist die Kollektor-Vorlaufstemperatur geringer, hierdurch sinken die thermischen Verluste des Kollektors ([40] S. 105–106). Für die Untersuchung wurde wiederum das SFH45-Gebäude am Standort Würzburg mit den experimentell untersuchten Kollektoren verwendet. Basierend auf den Erkenntnissen der oben beschriebenen Parameteruntersuchung bzgl. eines optimalen Schwellwerts für die Einstrahlung wurde hier ein Wert von 500 W/m<sup>2</sup> verwendet. Die Ergebnisse der Parameteruntersuchungen sind in Abbildung 88 dargestellt. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass der Einfluss des Volumenstroms eine untergeordnete Rolle auf den jährlichen Solarertrag hat. Für die nachfolgenden Simulationen wurde deshalb ein Volumenstrom in Höhe von 40l/hm<sup>2</sup> verwendet.



**Abbildung 88:** Zusammenhang zwischen gewähltem Volumenstrom und solarthermischen Ertrag (Blaue Kurve: Volumenstrom der Solarpumpe in kg/(sm²) / Rote Kurve: Ertrag des Kollektorfelds in kWh/a)

### 6.3 Ergebnisse der Systemsimulation

Die Ergebnisse der Systemsimulationen (Standort Würzburg, 140m²-Einfamilienhaus) sind in Tabelle 11 aufgelistet. Aufgrund des niedrigeren Wärmebedarfs des SFH15-Gebäudes im Vergleich zum SFH45-Gebäude ist die seitens des Backup-Systems bereitgestellte Wärme im SFH15-Gebäude wesentlich niedriger als im SFH45-Haus. Bezogen auf die Wohnfläche (140m²) ergibt sich ein spezifischer Wärmebedarf von knapp 41 kWh/m²a (SFH15) bzw. knapp 76 kWh/m²a (SFH45). Die durch das Backup-System bereitgestellte Wärmemenge sinkt in Kombination mit solarthermischen Kollektoren entsprechend.

**Tabelle 11:** Ergebnisse der Systemsimulation

Gebäude	System	Wärmeerzeugung Backup in kWh/a	Wärmeerzeugung Solar in kWh/a
SFH15	Fossil	5719	
	Heliostar	4011	2140
	Kunststoffkollektor (Prototyp)	4694	971
	Kunststoffkollektor (Konzept)	4249	1669
SFH45	Fossil	10630	
	Heliostar	8665	2329
	Kunststoffkollektor (Prototyp)	9433	1146
	Kunststoffkollektor (Konzept)	8919	1879

Die Effizienz jedes Systems wurde anschließend im Rahmen einer Jahressimulation ermittelt und entsprechend der anteiligen Energieeinsparung  $f_{sav}$  nach DIN EN 12977-2 (2012) [41] bewertet. Die anteilige Energieeinsparung beschreibt dabei, welcher Anteil des Gesamtenergieverbrauchs eines Systems durch die Verwendung solarthermischer

Kollektoren kompensiert werden kann. Die Bewertungsgrundlage hierfür ist eine Aussage über den Energiebedarf dieses Systems ohne solarthermische Kollektoren (d.h. ein System, bei dem der Wärmebedarf aus fossilen Energieträgern gedeckt wird).

**Formel 5:** Definition der anteiligen Energieeinsparung nach DIN EN 12977-2 [41]

$$f_{sav} = \frac{Q_{Conv} - Q_{aux}}{Q_{Conv}} = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_{Conv}}$$

mit:

$f_{sav}$  Anteilige Energieeinsparung

$Q_{Conv}$  Wärmebedarf des Systems des konventionellen Systems ohne solarthermische Kollektoren in kWh

$Q_{aux}$  Wärmebedarf des Systems mit solarthermischen Kollektoren in kWh

Die jeweilige anteilige Energieeinsparung, die durch die Verwendung eines solarthermischen Systems erreicht werden kann, ist in Tabelle 12 dargestellt. Die Bewertungsgrundlage für die relative Änderung stellt dabei das druckbehaftete System mit den konventionellen, metallischen Heliostar-Kollektoren dar.

**Tabelle 12:** Ergebnisse der Systemsimulation: Anteilige Energieeinsparung

Gebäude	System	Anteilige Energieeinsparung $f_{sav}$ in %	Relative Änderung in %
SFH15	Fossil		
	Heliostar	29,9%	---
	Kunststoffkollektor (Prototyp)	17,9%	-40,0%
	Kunststoffkollektor (Konzept)	25,7%	-14,0%
SFH45	Fossil		
	Heliostar	18,5%	---
	Kunststoffkollektor (Prototyp)	11,3%	-39,1%
	Kunststoffkollektor (Konzept)	16,1%	-13,0%

Zu erkennen ist, dass die anteilige Energieeinsparung bei Verwendung von Kunststoffkollektoren in einem offenen, drucklosen *Drain-Back-System* geringer ausfällt als bei Verwendung des Referenzsystems. Dies kann auf die geringere Effizienz der Kunststoffkollektoren im Vergleich zu den konventionellen Kollektoren zurückgeführt werden. Die relativen Unterschiede betragen dabei ca. 40% im Falle des Systems mit den messtechnisch untersuchten Prototypen und ca. 14% im Falle des Systems mit simulierten Kunststoffkollektoren.

Der für den Betrieb des jeweiligen Kollektorfelds notwendige Energiebedarf der Solarpumpe ist in Tabelle 13 dargestellt. Dabei kann festgestellt werden, dass der relative Energiebedarf der Solarpumpe im Falle des SFH45-Gebäudes höher ist als im SFH15-Gebäude. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass der solarthermische Ertrag aufgrund des höheren Energiebedarfs des SFH45-Gebäudes über dem des SFH15-Gebäudes liegt, somit ist die Solarpumpe länger und öfter aktiviert.

**Tabelle 13:** Ergebnisse der Systemsimulation: Energiebedarf der Solarpumpe

Gebäude	System	Energiebedarf Solarpumpe in (kWh/a)/W (normiert)
SFH15	Fossil	
	Heliostar	1,06
	Kunststoffkollektor (Prototyp)	1,08
	Kunststoffkollektor (Konzept)	1,17
SFH45	Fossil	
	Heliostar	1,18
	Kunststoffkollektor (Prototyp)	1,13
	Kunststoffkollektor (Konzept)	1,23

## 7 Wirtschaftlichkeit

Um die entwickelten Kollektoren und das zugehörige System umfassend bewerten zu können wurde im Rahmen des Vorhabens eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchgeführt, die unter Anderem in [42] beschrieben ist.

### 7.1 Methoden der betriebswirtschaftlichen Bewertung von Investitionen

Die klassischen Investitionsrechenverfahren unterteilen sich in die statische und die dynamische Investitionsrechnung (s. Tabelle 14). Der entscheidende Unterschied zwischen den beiden Verfahren liegt in der unterschiedlichen Berücksichtigung der Zahlungsströme und des Zeitfaktors. Zu den statistischen Verfahren zählen die Kostenvergleichsrechnung, die Gewinnvergleichsrechnung, die Rentabilitätsrechnung und die statische Amortisationsrechnung. Die kurzfristige Betrachtung aller Verfahren unterstellt für einen längeren Zeitraum konstante Verhältnisse (Rohstoffpreise, Löhne, Erlöse etc.), die in der Realität teils hohen Schwankungen unterliegen. Da Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bewertet werden, ist die Aussagekraft statischer Verfahren demnach geringer, je stärker Ein- und Auszahlungen der Investitionsalternativen differieren und je weniger man von konstanten Zukunftsverhältnissen ausgehen kann ([43] S. 830). Somit ist die Beurteilung von langfristigen Investitionsobjekten schwierig und nicht ausreichend. Die Anwendung statischer Verfahren kann zu realitätsfernen Ergebnissen, zu Fehlern und tendenziell zu Fehlentscheidungen führen. Bei Investitionen mit langfristigem Betrachtungszeiträumen, wie etwa bei der Anschaffung eines solarthermischen Systems mit Kunststoffkollektoren, empfiehlt sich daher die Nutzung dynamischer Investitionsrechnungsverfahren.

**Tabelle 14:** Die monetären Verfahren der Investitionsrechnung

Statische Verfahren	Dynamische Verfahren
Kostenvergleichsrechnung	Kapitalwertermittlung
Gewinnvergleichsrechnung	Annuitätenmethode (nach VDI 2067)
Rentabilitätsrechnung	Ermittlung des Internen Zinsfußes
Amortisationsrechnung	Dynamische Amortisation

Wie die statischen Verfahren verfolgt auch die dynamische Investitionsrechnung das Ziel der Wirtschaftlichkeitsberechnung einer geplanten Investition oder Investitionsalternative. Allerdings werden die finanziellen Auswirkungen über den gesamten Zeitraum der Investition erfasst. Da die Ein- und Auszahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, werden sie mit einem Zinsfaktor  $q$  ( $q = 1 + i$ ), auf denselben Zeitpunkt auf- oder abgezinst. Zahlungsströme sind alle kapitalbindenden Auszahlungen und kapitalfreisetzende Einzahlungen. Allgemein lassen sich vier Hauptansätze zur dynamischen Bewertung unterscheiden: die Methode des internen Zinsfußes, die dynamische Amortisation (*Break Even*), die Kapitalwertmethode und die daraus abgeleitete Annuitätenmethode.

Die letztgenannte Annuitätenmethode ist dabei besonders vorteilhaft bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung von solarthermischen Systemen und findet deshalb auch in der VDI 2067 Anwendung [44]. Die VDI 2067 bewertet ganz allgemein die Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen und wird für die nachfolgende Berechnung herangezogen. Die Variation der Einstellparameter hat einen hohen Einfluss auf das Ergebnis und damit auf die Investitionsentscheidung. Neben den relevanten Zahlungsströmen zählen der Kalkulationszins, verschiedene Preissteigerungsraten und unterschiedliche Betrachtungszeiträume zu den Haupteinstellparametern.

## **7.2 Definition der Berechnungsgrundlagen**

In diesem Abschnitt werden die maßgeblichen Einflussgrößen definiert und bewertet. Im Gegensatz zu anderen Investitionsobjekten erwirtschaften solarthermische Anlagen keine Erlöse durch den Verkauf von Wärme. Vielmehr kann durch die Verwendung von solarthermischen Anlagen die Menge an fossilen Brennstoffen reduziert werden. Nachfolgend werden deshalb drei verschiedene Anlagen miteinander verglichen, um so die relative Wirtschaftlichkeit eines solarthermischen Systems mit Kunststoffkollektoren gegenüber einem Referenzsystem mit Standardkollektoren bewerten zu können. Bei den untersuchten Systemen handelt es sich um die in Kapitel 6 simulierte Systemen. Bei den verwendeten Kollektoren im Falle des Drain-Back-Systems handelt es sich einerseits um die während des Projekts entwickelten Kunststoffkollektoren (s. Abschnitt 4.1), andererseits um einen serienreifen Kunststoffkollektor (s. Abschnitt 3.1). Beide Systeme gehen von einem Einfamilienhaus mit 140m<sup>2</sup> Wohnfläche am Standort Würzburg aus. Die Berechnung erfolgt auf Teilkostenbasis. Es wurden lediglich Zahlungsströme berücksichtigt die durch den zusätzlichen Betrieb einer solarthermischen Anlage entstehen.

### **7.2.1 Festlegung des Kalkulationszinssatzes**

Die Kosten, die mit der Finanzierung der Investition verbunden sind, setzen sich grundsätzlich aus zwei Komponenten zusammen:

- Die Verzinsung, die der Investor erhält, da er für eine bestimmte Dauer Kapital bereitstellt und somit auf eine alternative Nutzung verzichtet sowie
- ein Risikoaufschlag, der mit einem wirtschaftlichen Risiko mit der Überlassung verbunden ist ([45] S. 370)

Für die folgende Berechnung wird der Kalkulationszinssatz nach dem Opportunitätskostenansatz festgelegt. Ein Verbraucher könnte am Finanzmarkt, bei alternativer Geldanlage, aktuell ca. 1,5 % Zinsen für Festgeld erhalten. Bei einem Risikoaufschlag von 2 % (z. B. durch verminderte Sonneneinstrahlung, Unwetter etc.) liegt der Kalkulationszinssatz für die nachfolgende Berechnung bei 3,5 %. Ausgegangen wurde dabei von einer vollständigen Eigenkapitalfinanzierung.

## 7.2.2 Festlegung der Preissteigerungsraten und Ermittlung der Basiswerte

Während des Betrachtungszeitraums wurden unterschiedliche Preissteigerungen (z.B. Strom, Gas, Reparaturkosten, Ersatzinvestitionen etc.) angesetzt. Die Rückflüsse wurden anhand der eingesparten Kilowattstunden pro Jahr des fossilen Energieträgers Gas angegeben. Da die Gaspreissteigerung nur schwer prognostiziert werden kann, wurde die Durchschnittspreissteigerung der letzten 15 Jahre mit 3 % als wahrscheinlich weitergeführt. Da es in der Realität aber zu einer erheblichen Abweichung kommen kann, wurde eine pessimistische (anhaltender Preisrückgang von -2 %) und optimistische (Preissteigerung von +6 %) Vergleichsanalyse durchgeführt. Als Ausgangswerte für die Berechnung der Energieeinsparung in kWh/€ sind die fossilen durchschnittlichen Brennstoffkosten der letzten 12 Monate sinnvoll, da die Preisanpassungen gegenüber dem Leitpreis (Öl) mit einer Zeitverzögerung von 3 Monaten wirken ([46] S. 41). Daher wurde der Basiswert für Gas zu Beginn in  $t_1$  mit 6,52 Cent/kWh angesetzt. Für die Strompreissteigerung wurde angenommen, dass sich der Trend der letzten Jahre mit 5 % fortsetzt. Der Basiswert ( $t_1$ ) bildet 28,68 Cent/kWh<sub>elekt.</sub> (Durchschnittswert 2015). Die Preissteigerungen für sonstige Kosten liegen auf dem aktuellen Inflationsniveau von 1 %.

## 7.2.3 Festlegung der Betrachtungszeiträume

Die VDI-Richtlinie 2067 [44] definiert die Nutzungsdauer für solarthermische Kollektoren und Speicher mit 20 Jahren. Da in der Realität aber von einer höheren Lebensdauer dieser Komponenten auszugehen ist, wurden zwei unterschiedliche Betrachtungszeiträume (20 und 30 Jahre) angenommen. Die Nutzungsdauern der sonstigen Komponenten (Unterkonstruktion, Solarstation etc.) wurden anhand der Erfahrungswerte aus der VDI-Richtlinie 2067 bewertet und bleiben bei beiden Betrachtungszeiträume gleich, mit Ausnahme des Drain-Back-Gefäßes. Da das Drain-Back-Gefäß dem Alterungsverhalten des Speichers ähnelt, variiert die Nutzungsdauer auch hier zwischen 20 und 30 Jahren. Tabelle 15 fasst die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume zusammen. Die rotmarkierten Komponenten zeigen die Variationen der Betrachtungszeiträume „20 Jahre“ und „30 Jahre“. Die höchste Nutzungsdauer von jeweils 40 Jahren weisen die Unterkonstruktion, das 3-Wege-Ventil und die Rohre auf. Das MAG wird alle 15 Jahre, die Solarstation und der Regler durchschnittlich alle 10 Jahre ausgetauscht.



**Tabelle 15:** Vergleich der Nutzungsdauern einzelner Komponenten

Bezeichnung des Bauteils	Nutzungsdauer in Jahren
Flachkollektor	20/30
Unterkonstruktion	40
Speicher	20/30
Solarstation	10
Regler	10
3-Wege-Ventil	40
Rohre	40
MAG	15
Drain-Back-Gefäß	20/30

### 7.2.4 Bestimmung der Aufwendungen

Um die verschiedenartigen Aufwendungen zu systematisieren, hat sich in der Praxis eine Aufteilung der Kosten in kapitalgebundene, betriebsgebundene, sonstige und bedarfsgebundene Kosten etabliert ([45] S. 368) (s. Tabelle 16)

**Tabelle 16:** Systematisierung verschiedener Kostenarten bei Investitionsprojekten

Kapitalgebundene Kosten	= <b>Fixe Kosten</b>
Betriebsgebundene Kosten	
Sonstige Kosten	
Bedarfsgebundene Kosten	= <b>Variable Kosten</b>

#### 7.2.4.1 Kapitalgebundene Kosten

Zu den kapitalgebundenen Kosten zählen die Anschaffungskosten, die Instandsetzungskosten, Montagekosten, evtl. Planungskosten, evtl. Entsorgungskosten und Finanzierungskosten für Eigen- oder Fremdkapital abzüglich der evtl. Zuschüsse, beispielsweise in Form von Fördergeldern ([47] S. 28). Nach einer mindestens zweijährigen Nutzung bereits installierter Heizungssysteme ergibt sich die Möglichkeit einer staatlichen Förderung. Diese wird ab einer Solarkollektorfläche (Flachkollektoren) von 9 m<sup>2</sup> und mindestens 40 Liter Wärmespeichervolumen mit 140 € je angefangenem Quadratmeter Bruttokollektorfläche vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) unterstützt [48]. Bei einer Kollektorfläche von 10 m<sup>2</sup> würden somit 2000 € bezuschusst. Wird die Anlage durch eine Installationsfirma montiert, liegen die Montagekosten bei durchschnittlich ca. 190 €/m<sup>2</sup> Kollektorfläche ([49] S. 179). Bei der Installation sind die Kollektormontage, die Leitungsverlegung, der Anschluss an den Solarspeicher, die Installation der Mess- und Regeleinrichtungen und der Pumpe, der Anschluss an die Nachheizung sowie die Befüllung und Inbetriebnahme einzuplanen. Die Installation der Rohre nimmt dabei den größten Anteil der Arbeiten ein. Die Aufwendungen für die Montage

der Kollektoren liegen bei ca. 24 % der Investitionskosten ([49] S. 179) bzw. bei ca. 194 €/m<sup>2</sup> ([50] S. 6–11). Bei 10 m<sup>2</sup> Kollektorfläche liegen die Montagekosten somit bei ca. 2000 €. Durch das geringere Gewicht der Kunststoffkollektoren wurde von einer schnelleren Installation ausgegangen. Gleichzeitig wurde ein erhöhter Aufwand bei der Installation des *Drain-Back-Systems* angenommen, da hier auf ein striktes Gefälle der Leitungen zwischen Kollektor und Speicher bzw. Drain-Back-Gefäß geachtet werden muss. In Summe wurde von gleich hohen Montageaufwänden bei beiden System ausgegangen.

#### 7.2.4.2 Anschaffungskosten des konventionellen Systems

Zur Abschätzung der mit der solarthermischen Wärmenutzung verbundenen Aufwendungen werden zunächst die Anschaffungskosten geschlossener solarthermischer Anlagen zur Warmwasser und Heizungsunterstützung dargestellt. Da die Investitionskosten für solarthermische Systeme unterschiedlich sein können, werden im folgenden Abschnitt Durchschnittswerte angegeben. Die Datengrundlage bildet eine Recherche der am Markt erhältlichen Systeme und Einzelkomponenten. Die Untersuchung der Marktpreise beschränkt sich dabei auf erhältliche Systeme in Deutschland. Diese werden mit den in der Literatur angegebenen Durchschnittskosten verglichen.

##### **Solkollektor und Unterkonstruktion (10 m<sup>2</sup> Fläche)**

Diese spezifischen Kollektorpreise liegen zwischen 200 €/m<sup>2</sup> bis 350 €/m<sup>2</sup> ([40] S. 396). Die Endkundenpreise des Referenzkollektors liegen mit knapp 329 €/m<sup>2</sup> im oberen Bereich dieser Preisspanne. Für die Unterkonstruktion kommen pro m<sup>2</sup> Kollektorfläche ca. 55 € hinzu ([42] S. 48).

##### **Speicher**

Die Investitionskosten für den Wärmespeicher hängen im Wesentlichen vom Speichervolumen ab. Die Kosten variieren hier zwischen 1,50 €/l – 7,00 €/l ([49] S. 236). Für den verwendeten 500 l-Quadroline-Speicher ergibt sich so ein Preis von ca. 2500 €.

##### **Rohre**

Die Kosten für 20 – 30 m Rohrleitungen Leitung inkl. Wärmedämmung liegen zwischen 40 €/m<sup>2</sup> und 70 €/m<sup>2</sup> Kollektorfläche ([49] S. 236). Für das verwendete Kollektorfeld mit 10 m<sup>2</sup> Kollektorfläche wird deshalb von Kosten in Höhe von 500 € für die Verrohrung ausgegangen ([49] S. 3).

##### **Sonstige Systemkomponenten**

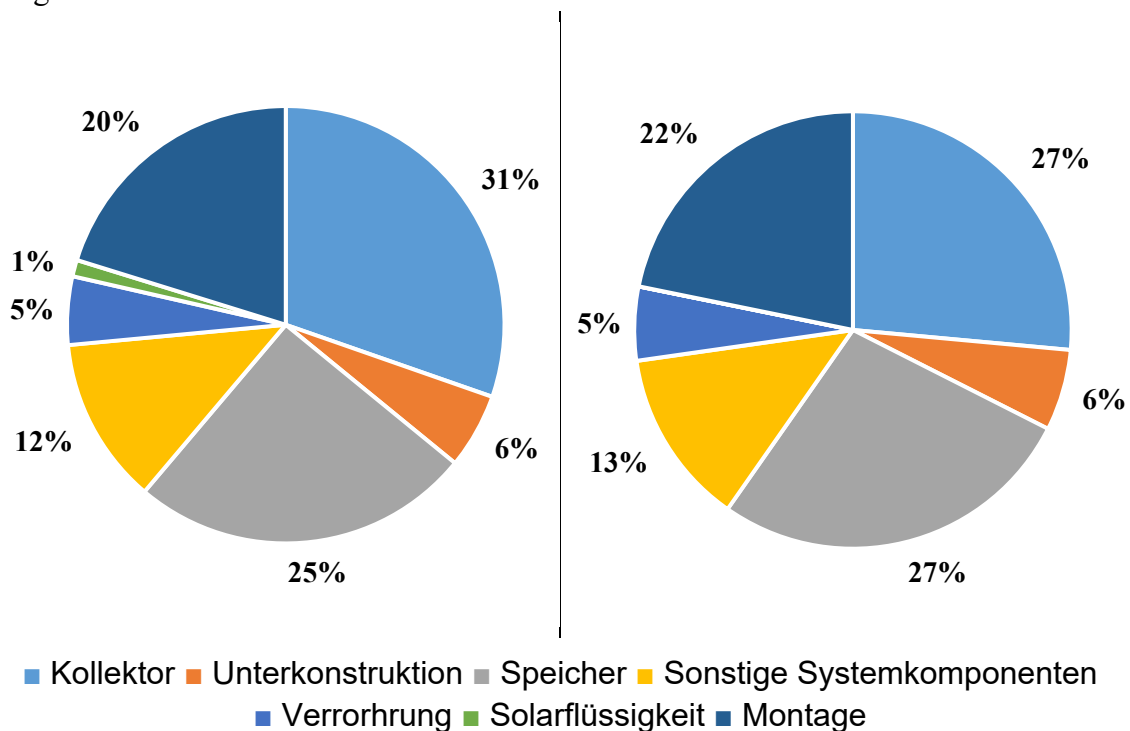
Die Kosten für sonstige Komponenten liegen bei 90 bis 160 €/m<sup>2</sup> ([49] S. 236). Unter sonstige Komponenten fallen Solarstation (350 €), Regler (500 €), 3-Wege-Ventil (270 €) und Membranausdehnungsgefäß (100 €).

#### 7.2.4.3 Anschaffungskosten von *Drain-Back-Systemen*

Bei der Berechnung der Herstellkosten wurde von einer jährlichen Produktionsmenge in Höhe von 5000 Kollektoren ausgegangen. Unter Berücksichtigung der Material-, Fertigungs- und Personalkosten ergeben sich Herstellkosten in Höhe von 134 €. Bezogen auf

die Brutto-Kollektorfläche in Höhe von 2,3 m<sup>2</sup> ergeben sich spezifische Herstellkosten in Höhe von 58,26 €/m<sup>2</sup>. Es wurde von einem Anteil der Herstellungskosten in Höhe von ca. 24 % am Nettomarktpreises des Kunststoffkollektors ausgegangen ([51] S. 46), somit betragen die Gesamtkosten des Kunststoffkollektors 242,75 €/m<sup>2</sup> (inkl. Skonto 2 %, Handelsspanne 45 %, Gewinn 6 %, techn. Unterstützung 9 %, sonstige Selbstkosten 13 %).

Die Anschaffungskosten für die Unterkonstruktion, den Speicher, den Regler, dem 3-Wege-Ventil sowie der Rohre bleiben bei der Annahme gleich. Ein MAG wird nicht benötigt, allerdings wird ein zusätzliches Drain-Back-Gefäß benötigt. Hierfür werden spezifische Kosten in Höhe von 1,00 €/l – 1,50 €/l angesetzt, die sich an der Kostenspanne zwischen 2,00 €/l – 3,50 €/l für einfache Pufferspeicher orientieren ([49] S. 236). Da das Drain-Back-Gefäß jedoch weder druckstabil sein noch hygienische Auflagen erfüllen muss, wurden für ein Drain-Back-Gefäß mit einem Fassungsvermögen von 50 l Kosten in Höhe von 75 € angesetzt. Die Aufteilung der Investitionskosten ist in **Abbildung 89** dargestellt.



**Abbildung 89:** Aufteilung der Investitionskosten (Links: Konventionelles System / Rechts: Drain-Back-System)

### 7.2.5 Betriebsgebundene Kosten

Betriebsgebundenen Kosten wie Inspektions-, Wartungs- und Instandsetzungskosten fallen unabhängig von der erbrachten Leistung an. Wird die Wartung vom Eigentümer selbst durchgeführt, ist ein kalkulatorischer Stundenlohn in Höhe von 20 € für die Arbeitsstunden anzusetzen oder alternativ Kosten für Wartungsverträge ([45] S. 373). Die Instandhaltungskosten wurden nach VDI 2067 Blatt 1 prozentual zu den Anschaffungskosten festgelegt (s. Tabelle 17) [44]. Der Instandhaltungsfaktor für Kollektor und Speicher beträgt 1,5 % und 2 % der Anschaffungskosten. Da das Drain-Back-Gefäß ebenfalls als Speicher interpretiert wird, wurde hierfür der gleiche Instandhaltungsfaktor angesetzt.

Für den Kollektor ist zusätzlich ein jährlicher Bedienungsaufwand in Höhe von 5 h/a zu berücksichtigen. Bei einer jährlichen Inspektion kleinerer Arbeiten wie das Entlüften, die Prüfung von Druck, Durchfluss, der Reglereinstellungen sowie die Messung des Glykolgehalts fallen für Regler und Solarstation jeweils 4 h/a für Bedienung an. Der Instandhaltungsfaktor beträgt jeweils 15 % der Anschaffungskosten. Für die Unterkonstruktion, das 3-Wege-Ventil und die Rohre wurde jeweils ein Instandhaltungsfaktor in Höhe von 1 % angesetzt. Für das MAG ist der Instandhaltungsfaktor mit 2 % doppelt so hoch. Die betriebsbedingten Kosten des Drain-Back-Systems liegen bei 337 €/a ( $t_1$ ), die des konventionellen Vergleichssystems bei 350 €/a ( $t_1$ ).

**Tabelle 17:** Aufwände für Inspektion, Wartung und Instandsetzung in Anlehnung an VDI 2067 Blatt 1 [44]

	Instandsetzungsaufwand in %	Inspektions- / Wartungsaufwand in %	Instandhaltungsfaktor in %	Bedienungsaufwand in h/a	Bedienungskosten in €/a <sup>2</sup>
Flachkollektor	0,5	1	1,5	5	100
Unterkonstruktion	1	0	1	0	
Speicher / Drain-Back-Gefäß	1	1	2	0	
Solarstation	10	5	15	0,2	4
Regler	10	5	15	0,2	4
3-Wege-Ventil	1	0	1	0	
MAG	1	1	2	0	
Rohre	1	0	1	0	

### 7.2.6 Sonstige Kosten

Zu den sonstigen Kosten zählen Steuern, Abgaben und Versicherungsbeiträge. Beispielsweise: Gebäudeversicherungen, Betriebsunterbrechungsversicherungen und Haftpflichtversicherungen. Die Kosten variieren je nach Art der Anlage, sowie den abzudeckenden Risiken ([45] S. 374). Sonstige Kosten wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese meist nicht von Verbrauchern abgeschlossen werden ([52] S. 123).

### 7.2.7 Bedarfsgebundene Kosten

Die variablen bedarfsgebundenen Kosten stehen im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Kostenarten im direkten Zusammenhang mit der Nutzungsintensität der Anlage. Hier spielen je nach Art der Investition, Roh-, Betriebs- und Hilfsstoffe eine Rolle. Im Falle einer solarthermischen Anlage ist dies der Strombedarf der Solarpumpe. Der Strompreis lag 2015 für private Haushalte durchschnittlich bei 28,68 Cent/kWh<sub>elektr.</sub> Unter Annahme einer elektrischen Leistung der Solarpumpe in Höhe von 100 W ergeben sich auf Basis

<sup>2</sup> Bei 20 €/h

der in Abschnitt 6.3 beschriebenen Systemsimulationen jährliche Stromkosten von knapp 35 € (s. Tabelle 18).

**Tabelle 18:** Elektrischer Strombedarf der Solarpumpe (auf Basis von Simulationsergebnissen)

Gebäude	System	Wärmeerzeugung Solar in kWh/a	Stromkosten Solarpumpe in €/a (Simulation)	Stromkosten Solarpumpe in €/a (Faktor)
SFH15	Fossil			
	Heliostar	2140	30	31
	Kunststoffkollektor (Prototyp)	971	31	14
	Kunststoffkollektor (Konzept)	1669	34	24
SFH45	Fossil			
	Heliostar	2329	34	33
	Kunststoffkollektor (Prototyp)	1146	32	16
	Kunststoffkollektor (Konzept)	1879	35	27

In der Literatur werden die Stromkosten mit einem Faktor von 3% – 5% der solarthermischen Gewinne angesetzt ([52] S. 123). Auf Basis dieser Berechnung ergeben sich geringfügig andere Kosten (s. Tabelle 18). Aufgrund der niedrigeren solaren Endenergieeinsparung und der gleichzeitig in der Realität prognostizierten höheren notwendigen Pumpenleistung der Drain-Back-Systemen wurde von einem gleich hohen Strombedarf aller untersuchten solarthermischen Systeme in Höhe von 35 €/a ausgegangen. Neben den Stromkosten sind beim konventionellen System auch die Kosten der Solarflüssigkeit in Höhe von 120 € als bedarfsgebundene Kosten zu berücksichtigen. Diese sollte alle 10 – 12 Jahre erneuert werden ([53] S. 54). Für Strom und Solarflüssigkeit wurden verschiedene Preissteigerungsraten angesetzt (Stroms: 5%, Solarflüssigkeit: 1%).

### 7.3 Bestimmung der Rückflüsse

Die Rückflüsse der Anlage (in kWh/a) sind von den Parametern des Kollektorfelds (Wirkungsgrade der Kollektoren, Ausrichtung, Verschattung etc.) abhängig. Die sich dadurch ergebenden, jährlichen Rückflüsse sind in Tabelle 19 aufgelistet. Für das Referenzsystem mit Flachkollektoren vom Typ *Heliostar* beträgt die Endenergieeinsparung im Falle des SFH15-Gebäude 29,9%, insgesamt können 1708 kWh/a an Endenergie eingespart werden. In der Gebäudekategorie SFH45 können entsprechend einer Energieeinsparung von 18,5% jährlich 1966 kWh/a an Endenergie eingespart werden. Unter Berücksichtigung eines Erdgas-Preises in Höhe 6,52 Cent/kWh (dies entspricht dem durchschnittlichen Preis im Jahr 2015) können jährlich 107 € (SFH15) bzw. 123 € (SFH45) eingespart werden.

**Tabelle 19:** Jährliche Rückflüsse der Vergleichssysteme in Abhängigkeit unterschiedlicher Gebäudetypen

		SFH 15	SFH 45
Referenzsystem mit metallischen Kollektoren (Heliostar)	$f_{sav}$ in %	29,9%	18,5%
	Jährliche Endenergieeinsparung in kWh/a	1708	1966
	Jährliche Endenergieeinsparung €/a	<b>107</b>	<b>123</b>
<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Prototyp)	$f_{sav}$ in %	17,9%	11,3%
	Jährliche Endenergieeinsparung in kWh/a	1025	1198
	Jährliche Endenergieeinsparung €/a	<b>64</b>	<b>75</b>
<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Konzept)	$f_{sav}$ in %	25,7%	16,1%
	Jährliche Endenergieeinsparung in kWh/a	1470	1711
	Jährliche Endenergieeinsparung €/a	<b>92</b>	<b>107</b>

Aufgrund der niedrigeren Kollektoreffizienz von Kunststoffkollektoren gegenüber den Referenzkollektoren vom Typ *Heliostar* können die untersuchten *Drain-Back-Systeme* mit den jeweiligen Kunststoffkollektoren weniger Endenergie einsparen. Bei Verwendung der Prototypen-Kollektoren beträgt die jährliche Einsparung beim SFH15-Gebäude 64€ und beim SFH45-Gebäude entsprechend 75€. Bei Berücksichtigung der Kunststoffkollektoren mit einem geeigneten Wannenkonzent liegt die jährliche Einsparung bei 92€ (SFH15) bzw. 107€ (SFH45).

## 7.4 Berechnungsergebnisse

Als Referenzsystem wurde ein System mit Kollektoren vom Typ *Heliostar* herangezogen. Mit Investitionskosten in Höhe von 9.891 € (inkl. Montage, ohne MwSt.) ist dieses Referenzsystem vergleichbar mit anderen, marktverfügbaren solarthermischen Systemen und ist daher als repräsentatives Vergleichssystem anzusehen. Rabatte wurden nicht berücksichtigt. Durch die niedrigeren Kosten der Kunststoffkollektoren liegen die Investitionskosten im Falle des *Drain-Back-Systems* bei 9.173 € (inkl. Montage, ohne MwSt.) und somit 720 € unter denen des konventionellen Systems. Das konventionelle solarthermische System sowie die beiden *Drain-Back-Systeme* mit Kunststoffkollektoren wurden anhand der Gebäudetypen SFH15 und SFH45, verschiedener Betrachtungszeiträume und unterschiedlicher Preissteigerungsraten für Gas (3%, -2%, 6%) verglichen. Für die Auswertung werden der Kapitalwert und die daraus abgeleitete Annuität diskutiert. Die Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung sind in Tabelle 20 bis Tabelle 23 zusammengefasst.

**Tabelle 20:** Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung (SFH15, Betrachtungszeitraum 20 Jahre)

SFH15			
	Referenzsystem mit metallischen Kollektoren (Heliostar)	<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Prototyp)	<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Konzept)
<b>Szenario "Most likely" (<math>p_G = +3\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-12610	-12422	-11887
Annuität in €/a	-887	-874	-836
<b>Szenario "Worst case" (<math>p_G = -2\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-13320	-12849	-12498
Annuität in €/a	-937	-904	-879
<b>Szenario "Best case" (<math>p_G = +6\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-11940	-12021	-11311
Annuität in €/a	-840	-846	-796

**Tabelle 21:** Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung (SFH45, Betrachtungszeitraum 20 Jahre)

SFH45			
	Referenzsystem mit metallischen Kollektoren (Heliostar)	<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Prototyp)	<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Konzept)
<b>Szenario "Most likely" (<math>p_G = +3\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-12299	-12214	-11597
Annuität in €/a	-865	-859	-816
<b>Szenario "Worst case" (<math>p_G = -2\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-13117	-12712	-12308
Annuität in €/a	-923	-894	-866
<b>Szenario "Best case" (<math>p_G = +6\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-11529	-11745	-10926
Annuität in €/a	-811	-826	-769

**Tabelle 22:** Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung (SFH15, Betrachtungszeitraum 30 Jahre)

SFH15			
	Referenzsystem mit metallischen Kollektoren (Heliostar)	<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Prototyp)	<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Konzept)
<b>Szenario "Most likely" (<math>p_G = +3\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-14946	-15145	-14360
Annuität in €/a	-813	-823	-781
<b>Szenario "Worst case" (<math>p_G = -2\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-16327	-15973	-15548
Annuität in €/a	-888	-868	-845
<b>Szenario "Best case" (<math>p_G = +6\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-13297	-14155	-12941
Annuität in €/a	-723	-770	-704

**Tabelle 23:** Ergebnisse der dynamischen Investitionsrechnung (SFH45, Betrachtungszeitraum 30 Jahre)

SFH45			
	Referenzsystem mit metallischen Kollektoren (Heliostar)	<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Prototyp)	<i>Drain-Back-System</i> mit Kunststoffkollektoren (Konzept)
<b>Szenario "Most likely" (<math>p_G = +3\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-14492	-14840	-13935
Annuität in €/a	-788	-807	-758
<b>Szenario "Worst case" (<math>p_G = -2\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-16080	-15808	-15318
Annuität in €/a	-874	-860	-833
<b>Szenario "Best case" (<math>p_G = +6\%/a</math>)</b>			
Kapitalwert in €	-12593	-13683	-12283
Annuität in €/a	-685	-744	-668

Bei einem Vergleich der unterschiedlichen Betrachtungszeiträume fällt auf, dass die höhere Nutzdauer mit 30 Jahren generell zu einer niedrigeren Annuität führt, da die Investitionskosten hier auf einen längeren Zeitraum verteilt werden. Ein stärkerer Anstieg der Gaspreise ist für die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Systeme positiv, eine Abnahme der Gaspreise als negativ zu beurteilen. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass die eingesparte Energie bei höheren Gaspreissteigerungsraten einen höheren Geldwert be-



sitzt. Bei der vergleichenden Analyse der drei unterschiedlichen Systeme konnte festgestellt werden, dass das untersuchte *Drain-Back-System* mit Kunststoffkollektoren (Prototyp) in den betrachteten „Most likely“- und „Worst case“- Szenarien bei einem Zeitraum von 20 Jahren wirtschaftlicher als das Referenzsystem ist. Bei einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren verschiebt sich die Wirtschaftlichkeit zugunsten des konventionellen Systems, da bei diesem Szenario die höhere Effizienz der Referenzkollektoren die geringeren Investitionskosten des *Drain-Back-Systems* kompensiert. Das *Drain-Back-System* mit Konzept-Kunststoffkollektoren ist in allen untersuchten Szenarien wirtschaftlicher als das Referenzsystem.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Forschungsprojektes war die Entwicklung eines solarthermischen Kollektors aus Massenkunststoffen unter Verwendung von modernen Kunststoff-Fertigungsverfahren. Die Projektergebnisse zeigen, dass eine Fertigung mit Hilfe des *Twin-Sheet-Thermforming* grundsätzlich möglich ist. Kostenvorteile entstehen hierbei durch den hohen Automatisierungsgrad, der mit Verwendung dieses Fertigungsverfahrens einhergeht. Das maßgebliche Projektziel, die Senkung der Herstellkosten eines Flachkollektors in Kunststoffbauweise um mehr als 30 % gegenüber einem konventionellen, metallischen Kollektor, wurde nahezu erreicht. So liegen die spezifischen Herstellkosten der entwickelten Kunststoffkollektoren mit 58,26€/m<sup>2</sup> um ca. 27% unter zu erwartenden Herstellkosten konventioneller, marktverfügbarer Flachkollektoren.

Im Rahmen des Projekts wurden basierend auf PP-Absorbern Kollektorprototypen mit unterschiedlichen vorder- und rückseitigen Isolierungen aufgebaut. Es konnte gezeigt werden, dass die gemessene Effizienz der Kollektoren vergleichbar mit marktverfügbaren Kunststoffkollektoren ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Effizienz bei Verwendung einer angepassten Kollektorrückseite weiter gesteigert werden kann. Weitere Effizienzgewinne können sich durch die Verwendung von Solarglas als vorderseitige Abdeckung ergeben. Die im Rahmen der Outdoor-Systemtests gemessenen Maximaltemperaturen am PP-Absorber betragen 140 °C im Stagnationsfall und liegen über der geforderten Dauergebrauchstemperatur in Höhe von 120 °C für Polypropylen. Mittels einer Simulationsstudie (s. Abschnitt 6.3) konnte gezeigt werden, dass die maximale Absorberrücktemperatur auf 106 °C – 120 °C gesenkt werden kann. Die maximal gemessene Kollektorstromtemperatur betrug im Betrieb 56 °C, die definierten Projektziele zur maximalen Absorberrücktemperatur ( $T_{\max}$  bis 80 °C im Betrieb und 120 °C im Stagnationsfall) konnten daher erreicht werden. Die Entwicklung eines Kunststoffkollektors mit einem angepassten Gehäusekonzept bis hin zur Serienreife sollte im Rahmen eines Nachfolgeprojekts weiter wissenschaftlich untersucht werden. Hierbei sollten u.a. die Anbindung an das Hausdach und Untersuchungen hinsichtlich der Langzeitstabilität im Vordergrund stehen.

Die im Projekt verwendete Kombination aus Kunststoffkollektoren und einem offenen, drucklosen *Drain-Back-System* hat sich als vorteilhaft für den Betrieb der Kollektoren erwiesen. Da der für den Betrieb zusätzlich benötigte Drain-Back-Speicher sowohl die Investitions- als auch die Installationskosten beeinflusst, kann ein weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf kunststoffbasierte *Drain-Back-Systeme* festgestellt werden. Insbesondere sollte hierbei die Position des Drain-Back-Gefäßes innerhalb des Systems und die sich daraus resultierende Änderung auf den Systemertrag und den Pumpenstrom eingehend untersucht werden.

Neben den messtechnischen Untersuchungen wurde im Rahmen des Projekts ein Simulationsmodell entwickelt, mit dessen Hilfe die Effizienz der jeweiligen Kollektorkonzepte in Abhängigkeit verschiedener Parameter (z.B. Dicke der rückseitigen Isolierung, Art der vorderseitigen Abdeckung etc.) bestimmt werden kann. Die Ergebnisse der Systemsimulation auf Jahresbasis zeigen, dass der Jahrestag der realisierten Prototypen 40% unter

dem Ertrag der konventionellen Kollektoren liegt. Bei Anwendung einer serienreifen Absorberstruktur mit geeigneter Abdeckung ist hier noch erhebliches Potenzial vorhanden, der Jahresertrag liegt in diesem Fall ca. 13% unterhalb des Ertrags des Referenzsystems.

Die entwickelten Kollektorkonzepte wurden im Rahmen des Projekts ebenfalls hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht. Durch zuletzt stark schwankende Preise für fossile Energieträger kann die zukünftige Entwicklung der Preissteigerungsrate nicht zuverlässig prognostiziert werden. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Szenarien untersucht. Trotz eines verringerten Systemertrages führen die geringeren Investitionskosten der Kunststoffkollektoren zu einem wirtschaftlichen Vorteil von 2,5% - 6,2% (abhängig von der Gaspreissteigerungsrate und dem Betrachtungszeitraum) gegenüber dem Referenzsystem mit konventionellen Kollektoren. Zukünftig können sich durch die Verwendung von Kunststoffen weitere Kostensenkungen auf Systemebene ergeben. So können die Investitionskosten durch die Verwendung von Kunststoffen in anderen Bereichen des Solarsystems (Rohrleitungen, Bestandteile der Pumpe, Speicher, etc.) weiter gesenkt werden. Darüber hinaus können Installations- und Inbetriebnahmekosten durch die Implementierung von sog. *Plug-and-Flow*-Lösungen weiter gesenkt werden. Die Verwendung von Kunststoffen auf Systemebene sollte daher im Rahmen weiterer Forschungsprojekte eingehend untersucht werden.

Für den Kauf einer solarthermischen Anlage gibt es neben den monetären Anreizen weitere, nicht-monetäre Motivationsgründe privater Verbraucher (Technikaffinität, ökologisches Bewusstsein, etc.). Die jeweiligen Motive sind dabei vielfältig und bei den verschiedenen Zielgruppen unterschiedlich. Für eine weitere Verbreitung solarthermischer Systeme scheint eine nähere Untersuchungen dieser Motive und der konkreten Verbraucheranforderungen vielversprechend, wobei speziell auch die Akzeptanz von Kunststoffen in solarthermischen Systemen beim Endkunden und dem Handwerk untersucht werden sollte.

## 9 Veröffentlichungen

Im Rahmen dieses Projekts sind folgende Veröffentlichungen entstanden:

### 2012

- Reiter, Christoph; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried; (2012): *Analysis of Production Processes and Collector Design of Polymeric Collectors*. In: IEA SHC Task39. Gran Canaria, 15.–17.10.2012

### 2013

- Reiter, Christoph; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2013): *Kunststoffe in solarthermischen Kollektoren – ein Weg zur Kostensenkung*. In: erneuerbare energie (2013-1), S. 24–26.
- Reiter, Christoph; Brandmayr, Sebastian; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried; Hanby, Vic I. (2013): *Performance Optimisation of Polymeric Collectors by Means of Dynamic Simulation and Sensitivity Analysis*. In: SHC 2013, 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Proceedings. Freiburg, 23.-25.09.2013.
- Reiter, Christoph; Ehrenwirth, Mathias; Brandmayr, Sebastian; Reiter, Christoph; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2013): *Performance Optimisation of Polymeric Collectors by Means of Dynamic Simulation and Sensitivity Analysis*. In: IEA SHC Task39. Bad Blumau (Österreich), 17.10.2013

### 2014

- Reiter, Christoph; Brandmayr, Sebastian; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried; Hanby, Vic I. (2014): *Performance Optimisation of Polymeric Collectors by Means of Dynamic Simulation and Sensitivity Analysis*. Energy Procedia 48, pp. 181–191.
- Reiter, Christoph; Brandmayr, Sebastian; Ehrenwirth, Mathias; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2014): *Simulationsgestützte Leistungsanpassung von Kunststoffkollektoren*. In: 24. Symposium Thermische Solarenergie. Kloster Banz, Bad Staffelstein, 07.-09.05.2014. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI).
- Ehrenwirth, Mathias; Brandmayr, Sebastian; Reiter, Christoph; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2014): *Analysis of Polymeric Solar-thermal Collectors in Drain Back Systems by Simulation*. In: Proceedings of the EuroSun 2014. Aix-les-Bains (F), 16.-19.09.2014. DOI: 10.18086/eurosun.2014.16.05.

- Reiter, Christoph; (2014): *Economic Benefit from Polymeric Collector Concepts*. In: IEA SHC Task39. Oslo (Norwegen), 29.09.2014
- Ehrenwirth, Mathias; Reiter, Christoph; Brandmayr, Sebastian; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2014): *Vom Vollkunststoffkollektor zum Vollkunststoffsystem – Systemansätze und Betriebsweise*. In: Solarkollektor-Forum Ingolstadt. Ingolstadt, 23.10.2014
- Reiter, Christoph; Brandmayr, Sebastian; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2014): *Kunststoffkollektoren – Herausforderungen & Potentiale*. In: Solarkollektorforum Ingolstadt. Ingolstadt, 23.20.2014.

## 2015

- Ehrenwirth, Mathias; Klärner, Michael; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2015): *Drain-Back-Systeme – Stand der Technik und Potenzial für Kunststoffkollektoren*. In: 25. Symposium Thermische Solarenergie. Kloster Banz, Bad Staffelstein, 06.-08.05.2015. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI).
- Reiter, Christoph; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried; Hanby, Vic I. (2015): *A Dynamic Multinode Model for Component-Oriented Thermal Analysis of Flat-Plate Solar Collectors*. In: Journal of Solar Energy 2015, S. 1–16. DOI: 10.1155/2015/280694.

## 2016

- Ehrenwirth, Mathias; Klärner, Michael; Conti, Fosca; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2016): *Messtechnische Untersuchung solarthermischer Kunststoffkollektoren*. In: 26. Symposium Thermische Solarenergie. Kloster Banz, Bad Staffelstein, 20.-22.04.2016. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI).
- Ehrenwirth, Mathias; Christoph; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2016): *Processing and Testing of Polymer-Based Solar Thermal Collectors*. In: IEA SHC Task54. Florenz (Italien), 03.05.2016.
- Ehrenwirth, Mathias; Klärner, Michael; Conti, Fosca; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2016): *Messtechnische Untersuchung solarthermischer Kunststoffkollektoren*. In: 12. Internationale Konferenz für solares Heizen und Kühlen. Gleisdorf (Österreich), 08.-10.06.2016. Gleisdorf: AEE INTEC.
- Ehrenwirth, Mathias; Klärner, Michael; Christoph; Trinkl, Christoph; Zörner, Wilfried (2016): *System test with polymeric solar thermal collectors*. In: IEA SHC Task54. Stuttgart, 06.10.2016

## 10 Fortschreibung des Verwertungsplans

Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.

→ Keine Anmeldungen

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt):

- Die während des Projekts erarbeiteten Erkenntnisse zeigen, dass eine Fertigung solarthermischer Kunststoffkollektoren auf Basis des *Twin-Sheet-Thermoformings* (s. Abschnitt 3.3.5) zu Kostenvorteilen gegenüber Konkurrenzlösungen führt. Da derzeitige Ansätze zur Fertigung solarthermischer Kunststoffkollektoren überwiegend auf eine Weiterverarbeitung von Halbzeugen (Rohre, Platten, etc.) abzielen, ist eine hoch-automatisierte, skalierbare Fertigung mit diesen Verfahren kaum darstellbar.
- Eine Fertigung solarthermischer Kunststoffkollektoren auf Basis des *Twin-Sheet-Thermoforming* bedingt hohe Initialkosten für die erforderliche Anlagentechnik und das notwendige Werkzeug, die während der Nutzungsdauer auf die einzelnen Kollektoren umgelegt werden müssen. Somit kommen die mit diesem Verfahren verbundenen Kostenvorteile erst bei entsprechend hohen Stückzahlen zum Tragen. Die jährliche installierte Fläche solarthermischer Kollektoren ist derzeit rückläufig, damit verbunden sind niedrige Stückzahlen in der Solarthermie-Branche. Sollte sich eine Trendwende bei der jährlich neu installierten Kollektorfläche abzeichnen, sind mittelfristig die erforderlichen Investitionen der Fa. Roth Werke GmbH in notwendige Werkzeuge und Maschinen neu zu bewerten (geplant).
- Bei steigenden Stückzahlen könnte die Fa. Roth Werke GmbH somit kurzfristig einen Kunststoffkollektor am Markt positionieren, wodurch sich deutliche Wettbewerbsvorteile (*Unique Selling Point*) ggü. deutschen und ausländischen Mitbewerbern ergeben. Durch die Erweiterung des Produktportfolios kann somit ein Ausbau des Unternehmens erfolgen.
- Mit dem Projekt wurde die Kompetenz des *Instituts für neue Energie-Systeme* der *Technischen Hochschule Ingolstadt* für die Entwicklung innovativer Kollektorkonzepte deutlich ausgebaut. Hierdurch ist es möglich, kurz-, mittel- und langfristige weitere öffentlich geförderte Fördermittel und industrielle Drittmittel einzuwerben.

- Im Rahmen des Projekts wurde ein Prüfstand für die Untersuchung von Drain-Back-Systemen und Systemtest mit neuartigen Kollektoren aufgebaut. Mit diesem Prüfstand stehen dem *Institut für neue Energie-Systeme* mittel- und langfristig erweiterbare Testeinrichtung für weitere Forschungsaktivitäten zur Verfügung.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen:

- Die Fa. Roth Werke GmbH konnten umfassende theoretische und praktische Erfahrungen bei der Fertigung von Bauteilen mit Hilfe des *Twin-Sheet-Thermofforming*-Verfahrens erlangen. Dieses Wissen kann neben der Herstellung von Kunststoffkollektoren mittel- und langfristig auch für andere Produktgruppen eingesetzt werden.
- Im Projekt wurde ein umfassendes Knowhow mit der Planung und Umsetzung von Drain-Back-Systemen aufgebaut. Diese können bei der Fa. Roth Werke GmbH mittelfristig auch für Solarsysteme mit metallischen Absorber (Kollektoren) zum Einsatz kommen.
- Das Projekt ermöglichte insbesondere in den Bereichen Modellierung, Simulation, Validierung und Wirtschaftlichkeitsberechnung einen verstärkten Wissenstransfer zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen. Dies nutzt das *Institut für neue Energie-Systeme* kurz- und mittelfristig für weitere Forschungs- und Netzwerkprojekte im Umfeld der Gebäudeenergietechnik.
- Die während des Projekts gewonnenen Erkenntnisse wurden in Form von 16 Veröffentlichungen im Rahmen nationaler und internationaler wissenschaftlicher Tagungen und Veröffentlichungen der Fachöffentlichkeit durch das *Institut für neue Energie-Systeme* vorgestellt (s. Abschnitt 9). Das Forschungsprojekt war weiterhin die Grundlage zweier Promotionsvorhaben und mehrerer Abschlussarbeiten.
- Darüber hinaus war das Forschungsprojekt in die Aktivitäten der Task 39 (*Polymeric Materials for Solar Thermal Applications*) sowie Task 54 (*Price Reduction of Solar Thermal Systems*) des *Solar Heating & Cooling Programme (SHC)* der *International Energy Agency (IEA)* integriert.
- Die Projektergebnisse wurden im Rahmen eines Abschlussworkshops durch das Projektkonsortium am 31.01.2017 ca. 30 Teilnehmern aus Wissenschaft, Industrie und anderen Bereichen an der *Technischen Hochschule Ingolstadt* präsentiert.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse:

- Die Roth Werke sind bestrebt, das erworbene Wissen in der Fertigungstechnologie *Twin-Sheet-Thermoforming* mittel- und langfristig für weitere Produkte des Unternehmens einzusetzen.
- Bei Verbesserung der Marktlage sollen die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt mittelfristig genutzt werden, um einen marktfähigen Serienkollektor zu entwickeln.
- Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit für die *Technische Hochschule Ingolstadt* liegt beim vorliegenden Projekt in erster Linie in der Schaffung eines Forschungs- und Entwicklungsumfelds, das neben der Durchführung öffentlich geförderter Vorhaben auch verstärkt die Bearbeitung von Drittmittelprojekten in Form von industriellen Entwicklungsaufträgen ermöglicht. So kann durch den Aufbau von weiteren Spezialkompetenzen in den Bereichen Solarkollektor sowie Kunststoffverarbeitung und -bearbeitung mittel- und langfristig die Möglichkeit genutzt werden, für die Solar- und Kunststoffindustrie wissenschaftlich fundierte Entwicklungen und Untersuchungen durchzuführen.
- Die im Rahmen dieses Projekts konzipierte Infrastruktur zur Durchführung langfristiger Outdoor-Systemmessungen (s. Abschnitt 5) steht auch für weitere Forschungsvorhaben aus dem Bereich solarthermischer Vollkunststoffkollektoren bzw. solarthermischer Drain-Back-Systeme zur Verfügung. Darüber hinaus fließen die durchgeführten Arbeiten, erzielten Ergebnisse (z.B. Wissensaufbau im Bereich der Fertigung solarthermischer Kunststoffabsorber mit Hilfe des *Twin-Sheet-Thermoformings*, (s. Abschnitt 3.3.5), erreichten wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse sowie auch die erarbeiteten Werkzeuge (z.B. Simulationsmodelle) mittelfristig in weitere Vorhaben in Kooperation mit einschlägigen Industrieunternehmen ein.
- Das *Institut für neue Energie-Systeme* strebt an, sich über das Projekt hinaus an nationalen und internationalen Netzwerken, insbesondere der Task 54 (*Price Reduction of Solar Thermal Systems*) des *Solar Heating & Cooling Programme (SHC)* der *International Energy Agency (IEA)*, zu beteiligen.



## 11 Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT E.V. (BSW-Solar) (Hrsg.): *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. 2016
- [2] EICKER, Ursula: *Solare Technologien für Gebäude : Grundlagen und Praxisbeispiele*. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2012 (Studium)
- [3] KÖHL, Michael (Hrsg.); MEIR, Michaela Georgine (Hrsg.); PAPILLON, Philippe (Hrsg.): *Polymeric materials for solar thermal applications*. [Elektronische Resource]. Weinheim : Wiley, 2013 (Solar Heating and Cooling)
- [4] MANGOLD, Dirk: *Kostenanalyse der Herstellung von Solarkollektoren und mögliche Kostenreduktion durch Massenfertigung*. 2001
- [5] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) nach dem Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken, Ausgabe 2009 (GP 2009) : Lange Reihen der Fachserie 17, Reihe 2 von Januar 2000 bis August 2016*. Wiesbaden, 20.09.2016
- [6] BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT E.V.: *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)* (03.2016) – Überprüfungsdatum 2016-10-19
- [7] DEUTSCHE SOLARTHERMIE-TECHNOLOGIE PLATTFORM: *Forschungsstrategie Forschungsstrategie Niedertemperatur-Solarthermie 2030 : für eine nachhaltige Wärme- und Kälteversorgung Deutschlands*
- [8] ROTH WERKE GMBH: *Technische Information und Montageanleitung*. 12.07.2016
- [9] HOLLANDS, K.G.T.: *Honeycomb devices in flat-plate solar collectors*. In: *Solar Energy* 9 (1965), Nr. 3, S. 159–164
- [10] OKU OBERMAIER GMBH: *OKU®-Absorber mit integriertem Sammelrohr*. URL [http://www.okuonline.com/index.php?eID=tx\\_cms\\_showpic&file=72&md5=96113983fa435602aab1fe3bbef223912703cce&parameters%5B0%5D=YTo0OntzOjU6Ind-pZHRoIjtzOjQ6IjgwMG0iO3M6NjoiaGVpZ2h0IjtzOjQ6IjYw&parameters%5B1%5D=MG0iO3M6NzoiYm9keVRhZyI7czo0MToi-PGJvZkZkZ3R5bGU9Im1hcndpbjowOyBi&parameters%5B2%5D=YWNrZ3JvdW5kOiNmZmY7Ij4iO3M6NDoid3JhcCI7czoZnzoj-PGEgaHJlZj0iamF2&parameters%5B3%5D=YXNjcmlwdDpjbG9zZSgpOyI%2BIHwgPC9hPiI7fQ%3D%3D](http://www.okuonline.com/index.php?eID=tx_cms_showpic&file=72&md5=96113983fa435602aab1fe3bbef223912703cce&parameters%5B0%5D=YTo0OntzOjU6Ind-pZHRoIjtzOjQ6IjgwMG0iO3M6NjoiaGVpZ2h0IjtzOjQ6IjYw&parameters%5B1%5D=MG0iO3M6NzoiYm9keVRhZyI7czo0MToi-PGJvZkZkZ3R5bGU9Im1hcndpbjowOyBi&parameters%5B2%5D=YWNrZ3JvdW5kOiNmZmY7Ij4iO3M6NDoid3JhcCI7czoZnzoj-PGEgaHJlZj0iamF2&parameters%5B3%5D=YXNjcmlwdDpjbG9zZSgpOyI%2BIHwgPC9hPiI7fQ%3D%3D). – Aktualisierungsdatum: 2016-10-20 – Überprüfungsdatum 2016-10-20

- [11] SUNSTAR: *Solar Pool Heating*. URL <http://www.umasolar.com/wp-content/uploads/2015/12/STR-30-Angled.png>. – Aktualisierungsdatum: 2016-04-27 – Überprüfungsdatum 2016-10-20
- [12] ROTH WERKE GMBH: *Schwimmbadabsorber HelioPool®*. URL [http://www.rothwerke.de/de/img/Product%20Images/748px\\_SOL\\_Heliopool.jpg](http://www.rothwerke.de/de/img/Product%20Images/748px_SOL_Heliopool.jpg). – Aktualisierungsdatum: 2015-12-22 – Überprüfungsdatum 2016-10-20
- [13] BUCHINGER, Robert ; BAREK, Markus: *Thermischer Solarkollektor*. 17.09.2015. Veröffentlichungsnr. WO2015135557A1
- [14] SUNLUMO TECHNOLOGY GMBH: *Eine-Welt-Solar-Kollektor*. URL <https://www.bundespreis-ecodesign.de/img/big2404.jpg>. – Aktualisierungsdatum: 2016-01-18 – Überprüfungsdatum 2016-10-20
- [15] ONE SUN ONE WORLD GMBH: *Summary of EN ISO 9806 Test Results, annex to Solar Keymark Certificate : Licence Number: 011-7S2586F*. 08.10.2015
- [16] SESSLER, Michael ; WAISMAN, Alon ; PLASCHKES, Michael: *Solar Collector*. 01.12.2011. Veröffentlichungsnr. WO2011148367A3
- [17] MAGEN ECO ENERGY: *Summary of EN ISO 9806 Test Results, annex to Solar Keymark Certificate : Licence Number: 011-7S1599F*. 06.05.2011
- [18] REKSTAD, John: *Arrangement for a solar collector plate, solar collector plate, solar collector module, and solar collector system*. 24.05.2012. Veröffentlichungsnr. WO2012067515A1
- [19] AVENTA AS: *Summary of EN ISO 9806 Test Results, annex to Solar Keymark Certificate : Licence Number: 011-7S2409F*. 24.11.2014
- [20] AVENTA AS. URL [http://www.aventa.no/var/aventa/storage/images/media/images/soelv\\_img\\_88492/35206-1-eng-GB/soelv\\_IMG\\_8849.jpg](http://www.aventa.no/var/aventa/storage/images/media/images/soelv_img_88492/35206-1-eng-GB/soelv_IMG_8849.jpg)
- [21] DIN EN 12975-1. 2006. *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 12975-1:2006*
- [22] MÜLLER, Holger ; ZÖRNER, Wilfried: *Kurzstudie Produktionsprozesse*. 2008
- [23] ROTH, Manfred ; DREIER, Jürgen: *Solar collector*. 22.07.1980. US. Veröffentlichungsnr. 88903278
- [24] REITER, Christoph ; TRINKL, Christoph ; ZÖRNER, Wilfried: *Abschlussbericht : im Forschungsvorhaben Solarthermie2000plus: Kunststoffe in solarthermischen Kollektoren - Anforderungsdefinition, Konzeptentwicklung und Machbarkeitsbewertung*. 30.04.2011
- [25] MATLAB: *R2015b*. Natick, Massachusetts, 2015

- [26] REITER, Christoph N. ; TRINKL, Christoph ; ZÖRNER, Wilfried ; HANBY, Vic I.: *A Dynamic Multinode Model for Component-Oriented Thermal Analysis of Flat-Plate Solar Collectors*. In: *Journal of Solar Energy* 2015 (2015), Nr. 1, S. 1–16
- [27] WEMHÖNER, Carsten ; HAFNER, Bernd ; SCHWARZER, Klemens: *Simulation of solar thermal systems with CARNOT blockset in the environment of Matlab Simulink*. 19.08.2013
- [28] REITER, Christoph ; BRANDMAYR, Sebastian ; EHRENWIRTH, Mathias ; TRINKL, Christoph ; ZÖRNER, Wilfried: *Simulationsgestützte Leistungsanpassung von Kunststoffkollektoren*. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) (Hrsg.): *24. Symposium Thermische Solarenergie*. Regensburg : Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2014
- [29] DOMININGHAUS, Hans (Hrsg.); ELSNER, Peter (Hrsg.); EYERER, Peter (Hrsg.); HIRTH, Thomas (Hrsg.): *Kunststoffe : Eigenschaften und Anwendungen*. 8., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2012 (VDI-Buch)
- [30] BONNET, Martin: *Kunststofftechnik : Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele*. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 (Lehrbuch)
- [31] HOPMANN, Christian ; MICHAELI, Walter: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. 7., aktualisierte Auflage. München : Hanser, 2015
- [32] VERBAND FÜR ARBEITSGESTALTUNG, BETRIEBSORGANISATION UND UNTERNEHMENSENTWICKLUNG: *Industrial Engineering : Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung*. 1. Aufl. München : Hanser, 2011 (REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung)
- [33] EHRENWIRTH, Mathias ; KLÄRNER, Michael ; CONTI, Fosca ; TRINKL, Christoph ; ZÖRNER, Wilfried: *Messtechnische Untersuchung solarthermischer Kunststoffkollektoren*. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) (Hrsg.): *26. Symposium Thermische Solarenergie*. Regensburg : Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2016
- [34] ASHRAE 93-2003. *Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors*
- [35] EN ISO 9806. 2013. *Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2013)*; *Deutsche Fassung EN ISO 9806:2013*
- [36] BOHL, Willi ; ELMENDORF, Wolfgang: *Technische Strömungslehre : Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, inkompressible Strömungen, kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik*. 13., überarb. und erw. Aufl. Würzburg : Vogel, 2005 (Vogel-Fachbuch Kamprath-Reihe)

- [37] REKSTAD, J. ; HENDEN, L. ; IMENES, A. G. ; INGEBRETSEN, F. ; MEIR, M. ; BJERKE, B. ; PETER, M.: Effective Solar Energy Utilisation — More Dependent on System Design Than Solar Collector Efficiency. In: GROSSMAN, G. (Hrsg.): *1999 ISES Solar World Congress*. 1. Aufl. s.l. : Elsevier professional, 2000, S. 265–270
- [38] VDI 4655. 2008. *Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilien-häusern für den Einsatz von KWK-Anlagen*
- [39] ROTH WERKE GMBH: *Summary of EN ISO 9806 Test Results, annex to Solar Keymark Certificate : Licence Number: 011-7S 819 F*. 15.01.2014
- [40] QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme : Technologie ; Berechnung ; Simulation ; mit 119 Tabellen*. 9., aktualisierte und erw. Aufl. München : Hanser, 2015
- [41] DIN EN 12977-2. 2016. *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 2: Prüfverfahren für solar betriebene Warmwasserbereiter und solare Kombianlagen;*
- [42] PLOHMANN, Sarah: *Die Wirtschaftlichkeit von erneuerbaren Energien am Beispiel solarthermischer Anlagen zur Warmwasser- und Heizungsunterstützung aus der Sicht privater Haushalte*. Ingolstadt, Technische Hochschule Ingolstadt (THI). Bachelorarbeit. 2016-09-28
- [43] JUNG, Hans: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 12. aktualisierte Aufl. München : Oldenbourg, 2010 (BWL 10-2012)
- [44] VDI 2067 - Blatt 1. 2012. *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen*
- [45] RATKA, Andreas (Hrsg.): *Technik Erneuerbarer Energien*. Stuttgart : Ulmer, 2015
- [46] KONSTANTIN, Panos: *Praxisbuch Energiewirtschaft : Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. 3., aktual. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg, s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 2013 (VDI-Buch)
- [47] THEIß, Eric: *Regenerative Energietechnologien : Anlagenkonzepte, Anwendungen, Praxistipps*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verl., 2008
- [48] BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE: *BAFA: Basis- und Zusatzförderung*. URL [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare\\_energien/solarthermie/basis\\_und\\_zusatzfoerderung/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/solarthermie/basis_und_zusatzfoerderung/index.html). – Aktualisierungsdatum: 2015-03-31 – Überprüfungsdatum 2016-11-28
- [49] KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.): *Erneuerbare Energien : Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte ; mit 83 Tabellen*. 4., aktualisierte, korr. u. erg. Aufl. Berlin u.a. : Springer, 2006

- 
- [50] KASPER, B.-R. (Hrsg.); HEIDLER, K. (Hrsg.): *Solarthermische Anlagen : [Leitfaden für das SHK-, Elektro- und Dachdeckerhandwerk, für Fachplaner, Architekten, Bauherren und Weiterbildungsinstitutionen]*. 8. Aufl., überarb. Neuaufl. Berlin, Frankfurt, Main : DGS Landesverband Berlin Brandenburg; VWEW Energieverl., 2008
- [51] FRICK, Steffen[u.a.]: *Kostenanalyse und Fertigungsoptimierung von Polymerkollektoren für den globalen Markt*. Freiburg, 2014
- [52] WEYRES-BORCHERT, Bernhard ; KASPER, Bernd-Rainer ; DRÜCK, Harald: *Solare Wärme : Technik - Planung - Hausanlage*. Stuttgart : Fraunhofer IRB-Verl., 2015 (BINE-Fachbuch)
- [53] CORRADINI, Roger (Hrsg.): *Solarthermie : Technik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz für solarthermische Systeme in Einfamilienhäuser*. Ludwigsburg : Wüstenrot Stiftung, 2014

## 12 Anhang

### 12.1 Datenblatt Polypropylen



# METZO<sup>®</sup> PLAST PP/CT2-W

#### Kurzcharakteristik:

Polypropylen-Copolymer mit durch 20 % Talkumfüllung verbesserter Wärmeformbeständigkeit in schwarzer Ausführung. Rezeptur mit erhöhter Steifigkeit bei guter Schlagzähigkeit und hervorragendem Tiefziehverhalten. Die Bezeichnung W steht für erhöhte Witterungsbeständigkeit.

#### Mechanische Eigenschaften

Streckspannung	ISO 527	MPa	21
Dehnung bei Streckspannung	ISO 527	%	5
Reißfestigkeit	ISO 527	MPa	18
Reißdehnung	ISO 527	%	200
E-Modul	ISO 527	MPa	2000
Schlagzähigkeit bei 23°C (Charpy)	EN ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	o.Br.
Schlagzähigkeit bei -30°C (Charpy)	EN ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	18
Kerbschlagzähigkeit bei 23°C	EN ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	18
Kerbschlagzähigkeit bei -30°C	EN ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	3

#### Thermische Eigenschaften

Vicat Erweichungstemperatur VST A120	ISO 306	°C	145
ISO/R75 Verf. A	ISO 75	°C	63
Dauergebrauchstemperatur (1)		°C	95
Linearer Wärmeausdehnungskoeff.	ISO 7991	10 <sup>-5</sup> /K	12
Wärmeleitfähigkeit	ISO 8302	W/Km	0,35
spez. Wärme		kJ/kgK	1,4

#### Elektrische Eigenschaften

Durchgangswiderstand	DIN EN 61340-5-1	Ω cm	> 10 <sup>14</sup>
Oberflächenwiderstand	DIN EN 61340-5-1	Ω	> 10 <sup>14</sup>

#### Sonstige Eigenschaften

Brennbarkeitsklasse (2)	DIN 4102		B2
Wasseraufnahme	ISO 62	%	< 0,03
Dichte (natur)	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,06

(1) Die angegebene Dauergebrauchstemperatur dieser Rezeptur hängt von der Art und Größe der mechanischen Belastungen sowie den Verformungstemperaturen beim Tiefziehprozess ab. Die angegebenen Werte können somit nur als Orientierung dienen.

(2) Die angegebene Brennbarkeitsklasse ist eine Selbsteinschätzung für die keinZertifikat vorliegt

Sep-13-BK/F&E

Unsere anwendungstechnische Beratung, Auskünfte oder Empfehlungen erfolgen nach bestem Wissen. Da die tatsächlich erfolgende Anwendung außerhalb unseres Einflusses liegt und ihre Gegebenheiten nicht sämtlich vorhersehbar sind, können schriftliche und mündliche Hinweise, Ratschläge und die in diesem Merkblatt enthaltenen Angaben nur unverbindlich erteilt werden. Sie haben somit nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften der Produkte oder deren Eignung für einen konkreten Einsatzzweck zuzusichern. Insbesondere befreien sie den Käufer nicht von der Prüfung unserer Produkte auf ihre Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke. Etwas bestehende gewerbliche Schutzrechte Dritter sind zu berücksichtigen. Eine einwandfreie Qualität gewährleisten wir im Rahmen unserer Verkaufs- und Lieferbedingungen.

Die Angaben dieses technischen Merkblattes sind mit größter Sorgfalt erstellt. Eine Gewähr kann jedoch aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten nicht übernommen werden.



METZELER PLASTICS GMBH – Im Reinfeld 2 – D-52428 Jülich-Kirchberg



## 12.2 Datenblatt Polypropylen mit Glasfaserfüllung



# METZO<sup>®</sup> PLAST PP/GF2

Versuchsprodukt – vorläufiges Datenblatt

### Kurzcharakteristik:

Polypropylen Copolymer gefüllt mit langen Glasfasern.  
Die Glasfasern bewirken eine hohe Steifigkeit und einen erhöhten Widerstand gegen Weiterreißen.

### Mechanische Eigenschaften

Streckspannung	ISO 527-3	MPa	25
Dehnung bei Streckspannung	ISO 527-3	%	2,5
Reißfestigkeit	ISO 527-3	N/mm <sup>2</sup>	18,1
Reißdehnung	ISO 527-3	%	19,3
E-Modul (aus Zugversuch)	ISO 527-3	MPa	4000
Schlagzähigkeit bei 23°C (2 Joule-Pendel)	EN ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	30,6
Schlagzähigkeit bei -30°C	EN ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	
Kerbschlagzähigkeit bei 23°C (2 Joule-Pendel)	EN ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	11,3
Kerbschlagzähigkeit bei -30°C	EN ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	
Kugeldruckhärte (H 358/30)	EN ISO 2039-1	N/mm <sup>2</sup>	

### Thermische Eigenschaften

Vicat Erweichungstemperatur VST B 50	ISO 306	°C	122
HDT/ Verf. A	ISO/R75	°C	
HDT/ Verf. B	ISO/R75	°C	157
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	ISO 7991	10 <sup>-4</sup> /K	
Wärmeleitfähigkeit	ISO 8302	W/Km	
spez. Wärme		kJ/kgK	

### Elektrische Eigenschaften

Dielektrizitätszahl (1 MHz)	IEC 250		
Dielektrischer Verlustfaktor (1 MHz)	IEC 250	10 <sup>-4</sup>	
Durchgangswiderstand	DIN EN 61340-5-1	Ω cm	10 <sup>15</sup>
Oberflächenwiderstand	DIN EN 61340-5-1	Ω	10 <sup>15</sup>
Durchschlagfestigkeit	VDE 0303	kV/mm	

### Sonstige Eigenschaften

Glanzgrad		85°	
Verarbeitungsschwindigkeit		%	
Wasseraufnahme	ISO 62	%	
Dichte (natur)	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,06

Juni 2014-BK/F&E

Es handelt sich hierbei um charakteristische Eigenschaften, die nicht als Werkstoffspezifikation aufzufassen sind.  
Die in diesem technischen Merkblatt aufgeführten mechanischen Eigenschaften wurden an extrudierten Plattenkörpern von 2 mm Dicke ermittelt.  
Die Angaben dieses technischen Merkblattes sind mit größter Sorgfalt erstellt. Eine Gewähr kann jedoch aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten nicht übernommen werden.



METZELER PLASTICS GMBH – Im Reinfeld 2 – D-52428 Jülich-Kirchberg







## 12.4 Coriolis-Massendurchflussmesser (CMD)

### 2 TECHNISCHE DATEN

OPTIMASS 6000

#### 2.1 Technische Daten

- Die nachfolgenden Daten berücksichtigen allgemeingültige Applikationen. Wenn Sie Daten benötigen, die Ihre spezifische Anwendung betreffen, wenden Sie sich bitte an uns oder Ihren lokalen Vertreter.
- Zusätzliche Informationen (Zertifikate, Arbeitsmittel, Software,...) und die komplette Dokumentation zum Produkt können Sie kostenlos von der Internetseite (Download Center) herunterladen.

#### Messsystem

Messprinzip	Massedurchfluss
Anwendungsbereich	Massedurchfluss- und Dichtemessung von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen
Gemessener Wert	Masse, Dichte, Temperatur
Berechneter Wert	Volumen, Bezugsdichte, Konzentration, Geschwindigkeit
<b>Baureihe der Messwertaufnehmer</b>	
Edelstahl 316L 08...250	Kompakte / getrennte Ausführung - 100 barg bei 20°C / 1450 psig bei 68°F, Temperaturbereich -70°C...+230°C / -94°F...+446°F Nur getrennte Ausführung - 100 barg bei 20°C / 1450 psig bei 68°F, Temperaturbereich -50°C...+400°C / -58°F...+752°F Nur getrennte Ausführung - 100 barg bei 20°C / 1450 psig bei 68°F, Temperaturbereich -200°C...+40°C / -364°F...+104°F
Hastelloy® 08...80	Kompakte / getrennte Ausführung - 200 barg bei 20°C / 2900 psig bei 68°F, Temperaturbereich -70°C...+230°C / -58°F...+446°F
Duplex Edelstahl 100...200	Kompakte / getrennte Ausführung - 200 barg bei 20°C / 2900 psig bei 68°F, Temperaturbereich -50°C...+230°C / -58°F...+446°F

#### Design

Allgemein	Das System besteht aus einem Messwertaufnehmer und einem Messumformer für die Verarbeitung des Ausgangssignals.
Produkteigenschaften	Vollverschweißter, wartungsfreier Messwertaufnehmer mit einem V-förmigen Doppel-Messrohr
<b>Varianten</b>	
Kompakt-Ausführung	Integrierter Messumformer
Getrennte Ausführung	Messumformer in Feld- oder Wand-Ausführung verfügbar
Modbus-Ausführung	Messwertaufnehmer mit integrierter Elektronik. Modbus-Ausgang für Anschluss an SPS

#### Messgenauigkeit

<b>Masse (Standard)</b>	
Flüssigkeit ( $\geq 20:1$ des Nenndurchflusses):	$\pm 0,1\%$ des gemessenen Durchflusses
Flüssigkeit ( $< 20:1$ des Nenndurchflusses):	$\pm$ Nullpunktstabilität [siehe Nullpunktstabilität unten]
Gas	$\pm 0,35\%$ des gemessenen Durchflusses + Nullpunktstabilität
<b>Masse (optional)</b>	
Flüssigkeit ( $> 10:1$ des Nenndurchflusses)	$\pm 0,05\%$ des gemessenen Durchflusses
Flüssigkeit ( $< 10:1$ des Nenndurchflusses)	$\pm$ Nullpunktstabilität [siehe Nullpunktstabilität unten]
<b>Wiederholbarkeit</b>	
Flüssigkeit	Besser als 0,05% plus Nullpunktstabilität (umfasst die Einflüsse von Reproduzierbarkeit, Linearität und Hysterese)
Gas	Besser als 0,2% plus Nullpunktstabilität (umfasst die Einflüsse von Reproduzierbarkeit, Linearität und Hysterese)



## 12.6 Magnetventil

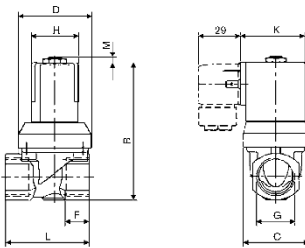
### Typ 1 2/2-Wege-Magnetventil stromlos geschlossen (NC) für Flüssigkeiten

Technische Daten Typ 1 / Baureihe 6213	
Nennweite	DN 10 - 40 mm
Gehäusewerkstoff	Messing nach DIN EN 50930-6
Spulenwerkstoff	Epoxid, Polyamid
Ventilinnenteile	Messing, Edelstahl, Kunststoff (PPS)
Dichtwerkstoffe	EPDM
Medien - EPDM	Öl- und fettfreie Flüssigkeiten
Umgebungstemperatur	Max. +55 °C
Medientemperaturen - EPDM	-30 bis +100 °C
Spannung	024/DC, 024/50 Hz, 230/50 Hz
Spannungstoleranz	±10%
Nennbetriebsart	Dauerbetrieb 100% ED <sup>3)</sup>
Elektrischer Anschluss	Steckerfahnen nach DIN EN 175301-803 Form A (bisher DIN 43650) für Gerätesteckdose Typ 2508
Schutzart	IP 65 mit Gerätesteckdose
Einbaulage	Beliebig, vorzugsweise Antrieb nach oben
Zulassung	DIN EN 60730
Schaltzeiten	0,1 - 4 Sekunden (je nach Nennweite und Differenzdruck)

Nennweite DN	Anschluss Gewinde (Zoll)	Druck bar <sup>1)</sup>	KV-Wert Wasser m <sup>3</sup> /h <sup>2)</sup>	Elektrische Leistungsaufnahme			Schaltzeiten (je nach Nennweite und Differenzdruck)	Gewicht KG
				AC [VA] Anzug	AC [VA/W] Betrieb	DC [W] (warme Spule)		
10	G 3/8 G 1/2	0,1-10	1,9	34	14/8	10 (11)	0,1 - 4 Sekunden	0,4
13	G 1/2 G 3/4	0,1-10	3,6	36	14/8	10 (11)		0,55
20	G 1	0,1-10	8,3	150	37/16	16(17)		1
25	G 1 1/4	0,1-10	11,00	150	37/16	28(29)		1,7
40	G 1 1/2	0,1-10	30,00	190	37/16	28(29)		3,5
40	G 2	0,1-10	30,00	190	37/16	28(29)	3,5	

<sup>1)</sup> Druckangaben [bar]: Überdruck zum Atmosphärendruck  
<sup>2)</sup> Messung bei +20 °C, 1 bar Druck am Ventilzugang und freiem Auslauf.  
<sup>3)</sup> bei nicht stehendem Medium

#### Abmessungen [mm]



G Gewinde	DN	G	F	AC Spule			DC Spule			DC und AC Spule		M
				B	H	K	B	H	K	C	L (MS/VA)	
G 3/8	10	12	78,4	32	45	78,8	40	51	36	50	3,7	
												82,9
G 1/2	13	14	92,4	32	45	92,8	40	51	45,0	58/65	3,7	
												96,9
G 3/4	16	96,9							65			
G 1	18	156,8	42	45	156,8	42	51	78	80		7	
G 1 1/4	20	166,3	42	55,5	166,3	65	55,5	78	95		7	
G 1 1/2	22	182,3	42	55,5	182,3	65	55,5	104,5	126		7	
G 2	24	193,3	42	55,5	193,3	65	55,5	104,5	132		7	

**BENDER**  
A R M A T U R E N

// VIELFALT AUS EINEM GUSS



Typ 1

Vorgesteuert, federgekoppeltes Membransystem

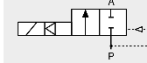
- Hoher Durchfluss bei kompakter Bauform
- Schließerschlagdämpfend und geräuscharm
- Dichtungen EPDM mit KTW und W270 Zertifikat
- Betriebsdruck 0,1-10 bar
- Max. Medientemperatur 100 °C
- Schutzart IP65

Typ 1 ist ein vorgesteuertes 2/2 Wege-Magnetventil, das schon bei einem Differenzdruck von 0,1 bar schaltet. Zum vollständigen Öffnen ist eine Mindestdruckdifferenz von 0,5 Bar erforderlich

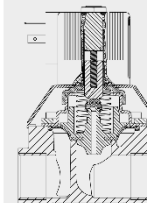
Das Magnetventil Typ 1 ist schließschlaggedämpft und speziell auf die Bedürfnisse im Sanitärbereich optimiert. So ist dieses Ventil standardmäßig mit einer EPDM-Membrane ausgerüstet, für die ein Zertifikat nach KTW und W270 vorliegt. Diese Zertifizierung ist für den Einsatz in Trinkwasserleitungen zwingend erforderlich.

Somit ist dieses Produkt bestens für nahezu alle Standardanwendungen im Bereich von Warm- und Kaltwasser in der Sanitärtechnik geeignet.

Wirkungsweise A | 2/2-Wege-Ventil, NC



#### Schnittzeichnung



# 12.7 Pumpe Wilo Star-ST 15/11

Vertrieb OEM Dortmund  Telefon 0172/2888214 Telefax	<b>Star-ST 15/11</b> Anlage: Solarthermiepumpe									
Kunde Kunden Nr. Ansprechpartner Bearbeiter Herr Axel Junge	Projekt Projekt Nr. Positions-Nr. Einbauort	Seite 2 / 2  Datum 12.08.2016								
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> </div> <div style="flex: 1; padding-left: 10px;"> <p><b>Betriebsdatenvorgabe</b></p> <p>Förderstrom 0 m<sup>3</sup>/h                      Förderhöhe 0 m                      Fördergut Wasser                      Fluidtemperatur 20 °C                      Dichte 0,9983 kg/dm<sup>3</sup>                      Kinematische Viskosität 1,005 mm<sup>2</sup>/s                      Dampfdruck 0,02337 bar</p> </div> </div>		<p><b>Pumpendaten</b></p> <p>Fabrikat WILO                  Typ Star-ST 15/11                  Anlagenart Einzelpumpe                  Nenndruckstufe PN10                  Min. Fluidtemperatur -10 °C                  Max. Fluidtemperatur 110 °C</p>								
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> </div> <div style="flex: 1; padding-left: 10px;"> <p><b>Hydraulische Daten (Betriebspunkt)</b></p> <p>Förderstrom                      Förderhöhe                      Leistungsaufnahme P1 W                      Drehzahl 2500 1/min</p> </div> </div>		<p><b>Mindestzulaufhöhe</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Temperatur</td> <td></td> <td></td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Mindestzulaufhöhe</td> <td></td> <td></td> <td>m</td> </tr> </table>	Temperatur			°C	Mindestzulaufhöhe			m
Temperatur			°C							
Mindestzulaufhöhe			m							
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> </div> <div style="flex: 1; text-align: center;"> <p>Von Profis. Für Qualität.</p> </div> </div>		<p><b>Werkstoffe / Dichtung</b></p> <p>Gehäuse EN-GJL-200 - kataphorese-Beschicht                  Laufrad Polypropylen                  Welle Edelstahl (X 40 Cr 13)                  Lager Graphit</p>								
<p><b>Abmessungen pro Pumpe</b> mm</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>L1</td> <td>141,5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>L2</td> <td>91</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		L1	141,5			L2	91			<p>Saugseite Rp 1/2/G 1 / PN 10                  Druckseite Rp 1/2/G 1 / PN 10                  Gewicht 2,4 kg</p>
L1	141,5									
L2	91									
<p><b>Motordaten pro Motor/Pumpe</b></p> <p>Nennleistung P2 61 W                  Leistungsaufnahme P1 203 W                  Nenndrehzahl 2500 1/min                  Nennspannung 1~230 V, 50 Hz                  Max. Stromaufnahme 0,72 A                  Schutzart IP 44                  Zulässige Spannungstoleranz +/- 10%</p>		Artikelnr. der Standardversion								

Technische Änderungen vorbehalten.

Softwareversion 3.1.13 - 13.11.2013 (Build 56)

Benutzergruppe HISTORIC

Datenstatus

## 12.8 Motorstellventil Typ 3222

Tabelle 1: Technische Daten

Durchgangsventil Typ 3222								
Nennweite	Durchgangsventil mit Außengewinde oder als Flanschgehäuse	DN	15	20	25	32	40	50
Anschlussgröße	Durchgangsventil mit Innengewinde	G	½	¾	1	–	–	–
Nenndruck		PN	25					
Sitz-Kegel-Dichtung			metallisch dichtend für $K_{VS} \leq 2,5$ · weich dichtend für $K_{VS} \geq 3,6$					
Nennhub		mm	6			12		
Stellverhältnis			50 : 1					
Leckage-Klasse nach DIN EN 60534-4			Kl. I ( $\leq 0,05$ % vom $K_{VS}$ -Wert)					
Konformität			<b>CE EAC</b>					
Ausführung für Wasser, Öl und andere Flüssigkeiten								
Max. zulässige Temperatur			150 °C <sup>1)</sup>					
Max. zulässiger Differenzdruck $\Delta p$								
	Typ 5824/5825, TROVIS 5724-3/5724-8/5725-3/5725-7/5725-8, Typ 2780	bar	20	20	20	12/16 <sup>4)</sup>	12	12
	Typ 5857, TROVIS 5757-3/5757-7	bar	20	20	20	–	–	–
Ausführung für Wasser über 150 °C und Dampf								
Max. zulässige Temperatur			200 °C					
Max. zulässiger Differenzdruck $\Delta p$								
	Typ 5824/5825, TROVIS 5724-3/5724-8/5725-3/5725-7/5725-8, Typ 2780	bar	20 · 10 bei $3,6 \leq K_{VS} \leq 8$			8	8	8
	Typ 5857, TROVIS 5757-3/5757-7	bar	20 <sup>2)</sup> · 5 <sup>3)</sup>	5	5	–	–	–

- <sup>1)</sup> Isolierzwischenstück (1990-1712) verwenden  
– bei Mediumtemperaturen –15 (Rotguss) bzw. –10 (EN-GJS-400-18-LT) bis +5 °C (Antriebe nach Tabelle 4)  
– in Netzen mit konstanter Mediumtemperatur >135 °C (Antriebe TROVIS 5724-3/TROVIS 5724-8/TROVIS 5725-3/TROVIS 5725-7/TROVIS 5725-8/Typ 5824/Typ 5825)  
– für Flüssigkeiten >120 °C (Antriebe TROVIS 5757-3/TROVIS 5757-7/Typ 5857)
- <sup>2)</sup> Differenzdruck bei  $K_{VS} = 1$  und 1,6  
<sup>3)</sup> Differenzdruck bei  $K_{VS} = 2,5$  und 4  
<sup>4)</sup> Gilt für  $K_{VS} = 10$

Tabelle 2: Werkstoffe (Werkstoff-Nr. nach DIN EN)

Durchgangsventil Typ 3222		
Ventilgehäuse	Ausführung mit Außen-/Innengewinde	CC499K (CuSn5Zn5Pb2-C)
	Ausführung als Flanschgehäuse	EN-GJS-400-18-LT (GGG-40.3)
Sitz		korrosionsfester Stahl 1.4305
Kegel		1.4305/CW602N mit Weichdichtung · 1.4305 bei $0,1 \leq K_{VS} \leq 2,5$
Ventilfeder		korrosionsfester Stahl 1.4310 K
Stopfbuchse		EPDM/FPM (FKM) · ölbeständige Ausführung: FPM
Anschweißenden		St 37
Anschraubenden		CC491K (Rotguss)
Anschraubflansche		St 37.2

## 12.9 Motorstellantrieb Typ 5824

### Aufbau und Wirkungsweise

### 2.4 Technische Daten · Typ 5824

Typ			5824		
			-10	-20	-30
Sicherheitsfunktion			ohne		
Nennhub	mm		6 <sup>1)</sup>	12	15
Stellgeschwindigkeit <sup>2), 3)</sup>	langsam	mm/s	0,13	0,13	0,13
	<b>normal</b>	mm/s	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
	schnell	mm/s	0,36	0,36	0,36
Stellzeit bei Nennhub (abhängig von der Stellgeschwindigkeit)	langsam	s	45	89	111
	<b>normal</b>	s	<b>31</b>	<b>61</b>	<b>76</b>
	schnell	s	17	33	41
Antriebskraft	ausfahrend	N	700	700	700
	einziehend	N	–	–	700
Anbau	kraftschlüssig		•	•	–
	formschlüssig		–	–	•
Handverstellung			ja		
<b>Versorgungsspannung</b>					
24 V DC (–10 %, + 20 %), 24 V, 50 und 60 Hz			•	•	•
85 bis 264 V, 50 und 60 Hz			•	•	•
Eingangssignal			0 bis 10 V, R <sub>i</sub> = 20 kΩ · 0 bis 20 mA, R <sub>i</sub> = 50 Ω		
Ausgangssignal			0 bis 10 V, R <sub>b</sub> = 1 kΩ		
<b>Leistungsaufnahme <sup>6)</sup></b>					
24 V DC (–10 %, + 20 %)		W	5		
24 V, 50 und 60 Hz		VA	5		
85 bis 264 V, 50 und 60 Hz <sup>4)</sup>		VA	8		
<b>Zulässige Temperaturen <sup>7)</sup></b>					
Umgebung			0 bis 50 °C		
Lagerung			–20 bis +70 °C		

# 12.10 Magnetisch-Induktiver-Durchflussmesser Typ IFM 1080K DN10

## Part D Technical data, measuring principle, block diagramm

### 10. Technical Data

#### 10.1 Full-scale range $Q_{100\%}$

Responsibility as to suitability and intended use of our instruments rests solely with the purchaser.

**Full-scale range** adjustable  
 Flowrate for  $Q = 100\%$  6 liters/hr to 12215 m<sup>3</sup>/hr or 0.02 to 53700 US G/min  
 corresponding to flow velocity  $v = 0.3$  to 12 m/s or 1 to 40 ft/s (see table below)  
**Unit** m<sup>3</sup>/hr, liters/sec or US gallons/min,  
 and 1 user-defined unit e.g. hectoliters per hour or US million gallons per day

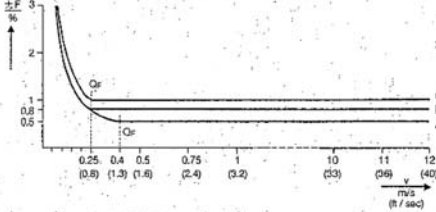
Flow table for  $Q$  in m<sup>3</sup>/hr and l/hr

Flow table for  $Q$  in US G/min

Meter size		Full-scale range $Q_{100\%}$		$Q_F$		Meter size		Full-scale range $Q_{100\%}$		$Q_F$	
DN mm	inches	minimum ( $v = 0.3$ m/s)	maximum ( $v = 12$ m/s)	for error limit at $v_F = 0.25$ m/s	for error limit at $v_F = 0.4$ m/s	DN mm	inches	minimum ( $v = 1$ ft/s) in US G/min	maximum ( $v = 40$ ft/s) in US G/min	for error limit at $v = 0.8$ ft/s in US G/min	for error limit at $v = 1.3$ ft/s in US G/min
2.5	1/8	5.301 l/hr	212.1 l/hr	4.418 l/hr	7.069 l/hr	2.5	1/8	0.02334	0.9339	0.01945	0.03112
4	1/4	13.56 l/hr	542.9 l/hr	11.31 l/hr	18.10 l/hr	4	1/4	0.05970	2.390	0.04980	0.07967
6	1/4	30.54 l/hr	1.221 m <sup>3</sup> /hr	25.45 l/hr	40.72 l/hr	6	1/4	0.1345	5.376	0.1121	0.1793
10	3/8	84.83 l/hr	3.392 m <sup>3</sup> /hr	70.89 l/hr	113.1 l/hr	10	3/8	0.3735	14.93	0.3112	0.4990
15	1/2	190.9 l/hr	7.634 m <sup>3</sup> /hr	159.0 l/hr	254.4 l/hr	15	1/2	0.8405	33.61	0.7001	1.120
20	3/4	339.3 l/hr	13.57 m <sup>3</sup> /hr	282.8 l/hr	452.5 l/hr	20	3/4	1.494	59.75	1.245	1.992
25	1	530.2 l/hr	21.20 m <sup>3</sup> /hr	441.8 l/hr	706.9 l/hr	25	1	2.334	93.34	1.945	3.112
32	1 1/4	868.6 l/hr	34.74 m <sup>3</sup> /hr	723.8 l/hr	1.158 m <sup>3</sup> /hr	32	1 1/4	3.824	153.0	3.187	5.099
40	1 1/2	1.358 m <sup>3</sup> /hr	54.28 m <sup>3</sup> /hr	1.131 m <sup>3</sup> /hr	1.810 m <sup>3</sup> /hr	40	1 1/2	5.979	239.0	4.980	7.967
50	2	2.121 m <sup>3</sup> /hr	84.82 m <sup>3</sup> /hr	1.767 m <sup>3</sup> /hr	2.827 m <sup>3</sup> /hr	50	2	9.339	373.5	7.780	12.45
65	2 1/2	3.584 m <sup>3</sup> /hr	143.3 m <sup>3</sup> /hr	2.987 m <sup>3</sup> /hr	4.779 m <sup>3</sup> /hr	65	2 1/2	15.78	630.9	13.15	21.04
80	3	5.429 m <sup>3</sup> /hr	217.1 m <sup>3</sup> /hr	4.524 m <sup>3</sup> /hr	7.238 m <sup>3</sup> /hr	80	3	23.90	955.9	19.92	31.87
100	4	8.483 m <sup>3</sup> /hr	339.2 m <sup>3</sup> /hr	7.069 m <sup>3</sup> /hr	11.31 m <sup>3</sup> /hr	100	4	37.35	1493	31.12	49.80
125	5	13.26 m <sup>3</sup> /hr	530.1 m <sup>3</sup> /hr	11.04 m <sup>3</sup> /hr	17.66 m <sup>3</sup> /hr	125	5	58.38	2334	48.61	77.77
150	6	19.09 m <sup>3</sup> /hr	763.4 m <sup>3</sup> /hr	15.83 m <sup>3</sup> /hr	25.33 m <sup>3</sup> /hr	150	6	84.05	3361	69.70	111.5
200	8	33.93 m <sup>3</sup> /hr	1357 m <sup>3</sup> /hr	28.28 m <sup>3</sup> /hr	45.25 m <sup>3</sup> /hr	200	8	149.4	5975	124.5	199.2
250	10	53.02 m <sup>3</sup> /hr	2120 m <sup>3</sup> /hr	44.18 m <sup>3</sup> /hr	70.69 m <sup>3</sup> /hr	250	10	233.4	9334	194.5	311.2
300	12	76.35 m <sup>3</sup> /hr	3053 m <sup>3</sup> /hr	63.62 m <sup>3</sup> /hr	101.8 m <sup>3</sup> /hr	300	12	356.2	13442	260.1	448.2
400	16	135.8 m <sup>3</sup> /hr	5428 m <sup>3</sup> /hr	112.1 m <sup>3</sup> /hr	179.4 m <sup>3</sup> /hr	400	16	597.9	23899	493.6	789.7
500	20	212.1 m <sup>3</sup> /hr	8482 m <sup>3</sup> /hr	176.7 m <sup>3</sup> /hr	282.7 m <sup>3</sup> /hr	500	20	933.9	37345	778.0	1245
600	24	305.4 m <sup>3</sup> /hr	12215 m <sup>3</sup> /hr	254.5 m <sup>3</sup> /hr	407.2 m <sup>3</sup> /hr	600	24	1345	53761	1121	1793

#### 10.2 Error limits for complete system at reference conditions

**Pulse output**  
 $\pm F$  Error in % of flowrate (actual value)  
 $Q$  Actual flowrate  
 $Q_F$  Flow for error limit  $v_F = 0.25$  and  $0.4$  m/s or  $v_F = 0.8$  and  $1.3$  ft/s (see Flow tables)  
 $v$  Flow velocity in m/s and ft/s  
 $v_F$  Flow velocity in m/s and ft/s at  $Q_F$  (see Flow tables)



**Reference conditions**  
 Product Water, 10 to 30°C/50 to 86°F  
 Electrical conductivity > 300  $\mu$ S/cm ( $\mu$ mho/cm)  
 Power supply (line voltage)  $U_N (\pm 2\%)$   
 Ambient temperature 20 to 22°C/68 to 71.6°F  
 Warm-up time > 30 minutes  
 Straight inlet run > 10 DN | DN =  
 Straight outlet run > 3 DN | meter size

Curve	Primary head (System)	Meter size		Error limits as % of measured value		
		DN mm	inches	$Q \geq Q_F$	$Q < Q_F$	$v_F$
A	IFS 5000 IFS 4000, K 480 S (Option)	10 - 100	3/8 - 4	$F = \pm 0.5\%$	$F = \pm 0.5\% \times \frac{Q_F}{Q}$	0.4 m/s or 1.3 ft/s
		10 - 600	3/8 - 24			
B	IFS 5000 IFS 4000, K 480 S (Standard) M 900	2.5 - 6	1/10 - 1/4	$F = \pm 0.8\%$	$F = \pm 0.8\% \times \frac{Q_F}{Q}$	0.25 m/s or 0.8 ft/s
		10 - 600	3/8 - 24			
		10 - 300	3/8 - 12			
C	IFM 1080	15 - 80	1/2 - 3	$F = \pm 1.0\%$	$F = \pm 1.0\% \times \frac{Q_F}{Q}$	0.25 m/s or 0.8 ft/s

**Current output** same as above error limit for pulse output plus...  
 0 to 20 mA:  $\pm 0.05\%$   
 4 to 20 mA:  $\pm 0.062\%$  generally:  $\pm 0.05\% \times \frac{20 \text{ mA}}{100\% - I_{0\%}}$   
 of full-scale range in each case