

# KONZEPT, AUFBAU UND MESSERGEBNISSE EINER DEZENTRALEN NETZEINSPEISESTATION

**Martin Heymann, Toni Rosemann, Karin Rühling**

Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung,  
Technische Universität Dresden, Dresden, 01062, Deutschland, +49-351 / 463-34709,  
[toni.rosemann@tu-dresden.de](mailto:toni.rosemann@tu-dresden.de)

**Bernd Hafner**

Viessmann Werke GmbH & Co. KG,  
+49-6452-701583; drhf@viessmann.com

**Abstrakt** – In diesem Beitrag werden Konzept und Messergebnisse einer Pilotanlage zur dezentralen Einspeisung von Solarthermieerträgen in ein Fernwärmenetz der 2. Generation vorgestellt. Ambitionierte Bedingungen sowohl für das Zieltemperaturniveau als auch für die Druckdifferenz werden an die RL/VL-Einspeisung gestellt. Die Nutzung von Wasser als Solarfluid erfordert einen aktiven Frostschutz aus dem Fernwärmenetz. Die Messergebnisse umfassen zwei Frostschutzperioden und eine Einspeisesaison.

## 1. EINLEITUNG

Die dezentrale Einspeisung von Solarerträgen kann zur Dekarbonisierung und Flexibilisierung der modernen Fernwärmenetze beitragen (e.g. Heymann, et al., 2017). Die Entwicklung von Standardisierungskonzepten für Netzeinspeisestationen (NEST) und deren Regelung sind die Forschungsziele des laufenden Projekts "Kosten-Reduktions-Potential beim Ausbau der Solarisierung von Fernwärmenetzen durch Standardisierung"<sup>1</sup>. Diese Standards werden von den praktischen Erfahrungen bestehend aus der Konzeption, der Umsetzung und dem Betrieb der Feldanlagen – bestehend aus der Solarthermieanlage und der Netzeinspeisestation – sowie Simulationsstudien abgeleitet.

Dieser Beitrag stellt das Stations- und Steuerungskonzept einer Pilotanlage vor, die seit November 2016 im Zentrum für Energietechnik (ZET) in Dresden in Betrieb ist (siehe Abbildung 1). Die Netzeinspeisestation ist an ein Netz der zweiten Generation angeschlossen (gemäß IEA DHC Annex X-Klassifizierung) und wurde in Zusammenarbeit mit dem lokalen Netzbetreiber im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für größere Kollektorfelder entwickelt. Die Pilotanlage ist für die RL/SL-Einspeisung in das Fernwärmenetz konzipiert - die häufigste und variabelste Art der dezentralen Netzintegration.

Detaillierte Messergebnisse berücksichtigen zwei von drei Hauptbetriebsarten der Netzeinspeisestation:

- *Einspeisung* solarer Erträge,
- *Stagnation* (siehe Rosemann, et.al. 2017b) und
- Aktiver *Frostschutz* des wasserbasierten Solarkreises.

## 2. KONZEPTION DER DEZENTRALEN NETZEINSPEISESTATION

Die Pilotanlage ist an das primäre Fernwärmenetz der Stadt mit einer Nenndruckstufe von PN25 und einer nominalen Zieleinspeisetemperatur von 110°C angeschlossen. Deshalb werden im Kollektorfeld (CF) Solar-Vakuumröhrenkollektoren eingesetzt, die nach dem Heat-Pipe-Prinzip arbeiten. Das Kollektorfeld, bestehend aus sechs in Reihe geschalteten Teilfeldern C1..C6, hat eine Bruttokollektorfläche von 84 m<sup>2</sup> (Gesamtaperturfläche 48 m<sup>2</sup>) und eine Neigung von etwa 31° nach Süden. Der Auslegungswärmestrom beträgt 30 kW, basierend auf einer Globalstrahlung in Kollektorebene von  $\dot{G}_{t,i} = 1000$  W/m<sup>2</sup> und Kollektorfeldtemperaturen von 115/70 °C.

Die Umwälzpumpe im Solarkreis  $P_{USTS}$  ist eine drehzahlgeregelte Pumpengruppe, bei der jeweils nur eine Pumpe im Hauptbetrieb eingesetzt wird und die andere Pumpe als Reservekomponente dient. Die Redundanz ist wichtig, um die Funktionsfähigkeit des Frostschutzes für große Kollektorfelder zu gewährleisten. Die kompressorbasierte Druckhaltung ist in der Zuleitung des Kollektorfeldes mit einem integrierten Stagnationskühler an das System angeschlossen. Dieser Kühler ist als Rippenrohrkühler ausgeführt, der im Falle einer Stagnation die maximale Dampfreichweite begrenzt, das Volumen des üblichen Vorschaltgefäßes und damit das Auslegungsvolumen des Ausdehnungsgefäßes der Druckhaltung reduziert.

Die drehzahlgeregelte Einspeisepumpe  $P_{UDHF}$  ist notwendig, um die Druckdifferenz  $\Delta p_{DH}$  im Fernwärmenetz zu überwinden und den Einspeisevolumenstrom zu erzeugen. Die richtige

<sup>1</sup> Founded by Federal Ministry for Economic Affairs and Energy FKZ 0325553A.

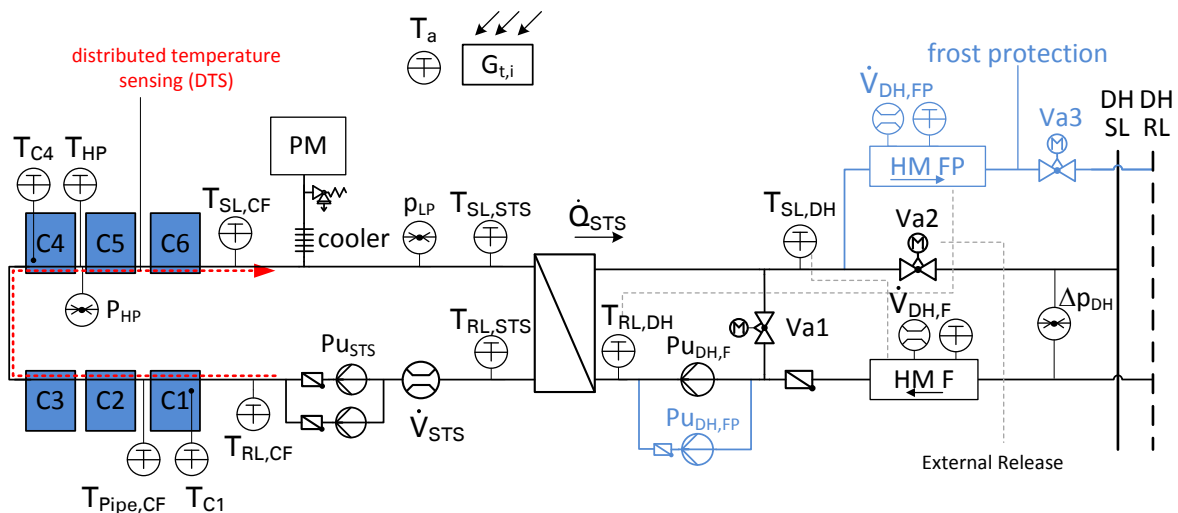


Abbildung 1: Schema der NEST ( $T_a$  – Umgebungstemperatur, C – Kollektor, CF – Kollektorfeld, DH – Fernwärmenetz, HM – Wärmemengenzähler, F – Einspeisung, FP – Frostschutz, HP – Hochpunkt, LP – Tiefpunkt, PM – Druckhaltung, Pu – Pumpe, Va – Ventil, STS – Solarthermieanlage)

Auswahl dieser Komponente ist wesentlich, um die Einspeisung der Solarerträge in das Netz sicherzustellen. Dies ist oft kompliziert aufgrund der fehlenden Informationen über  $\Delta p_{DH}$ ,  $T_{SL,DH}$  und  $T_{RL,DH}$  am Einspeisepunkt für den Jahresverlauf und die zukünftige Entwicklung dieser Werte.

Das Bypassventil Va1 wird vor der Einspeisung geöffnet, um das Medium auf der Fernwärmeseite der Unterstation zu erwärmen, um kalte Pfropfen im Fernwärmenetz zu verhindern, wird aber während der Einspeisung geschlossen. Das Ventil Va2 wird verwendet, um eine externe Freigabe zu realisieren. Bei Bedarf können die Netzbetreiber das Freigabesignal zurückziehen und die Einspeisung durch Schließen des Ventils und Abschalten der Pumpen verhindern/stoppen. Die Ventile Va2 und Va3 dienen zum Umschalten der Strömungsrichtung zwischen RL/VL des Fernwärmenetzes im Zustand *Einspeisung* (Va2 offen, Va3 geschlossen) und RL/RL zum Heizen der Solarthermieanlage im Zustand *Frostschutz* (Va2 geschlossen, Va3 offen). Eine separate Frostschutzpumpe  $Pu_{DH,FP}$  wird aufgrund unterschiedlicher Auslegungsparameter für den RL/RL Wärmebezug (niedriger Strömungsdruckverlust) und aus Gründen der Redundanz eingesetzt.

Für den Anlagenbetrieb ist eine minimale Sensorausstattung erforderlich. Diese besteht aus fünf Temperatursensoren ( $T_{SL,CF}$ ,  $T_{SL,STS}$ ,  $T_{RL,CF}$ ,  $T_{SL,DH}$  und  $T_a$ ),

dem Strahlungssensor  $G_{t,i}$  sowie zwei Wärmemengenzählern (WMZ bzw. HM). Der Wärmemengenzähler WMZ F misst die in das Fernwärmenetz eingespeiste Wärme. Das Volumenströmsignal  $\dot{V}_{DH,F}$  des Einspeisewärmemengenzählers wird mittels eines Analogmoduls für einen Regelkreis verwendet. Es gibt einen zweiten Wärmemengenzähler WMZ FP, der die für den Frostschutz erforderliche Wärmemenge misst. Diese beiden separaten Wärmemengenzähler sind notwendig, solange kein bidirektionaler Wärmemengenzähler auf dem Markt verfügbar ist, der für die Abrechnung zertifiziert ist.

Die Monitoringsensorik besteht aus zusätzlichen Temperatursensoren, drei Drucksensoren ( $p_{HP}$ ,  $p_{LP}$ ,  $\Delta p_{DH}$ ), einem Durchflussmesser  $\dot{V}_{STS}$  sowie einer faseroptischen Temperaturmessung (distributed temperature sensing system, DTS siehe Herwig, Rühling, 2014). Das DTS verwendet ein optisches Sensorkabel, das am Kollektorrohr des Systems angebracht ist, um die Temperaturverteilung mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu messen. Dies ist hilfreich für eine detaillierte Analyse der Zustände *Frostschutz* und *Stagnation*.

Tabelle 1: PI-Regelkreise des Zustands *Feed-in*

Name	Regelgröße	Sollwert	Ausgangssignal
C1	$T_{SL,CF}$	115..120°C	Drehzahl $Pu_{STS}$
C21	$T_{SL,DH}$	110°C	Sollwert C22
C22	$\dot{V}_{DH,F}$	results from control signal of	Drehzahl $Pu_{DH,F}$

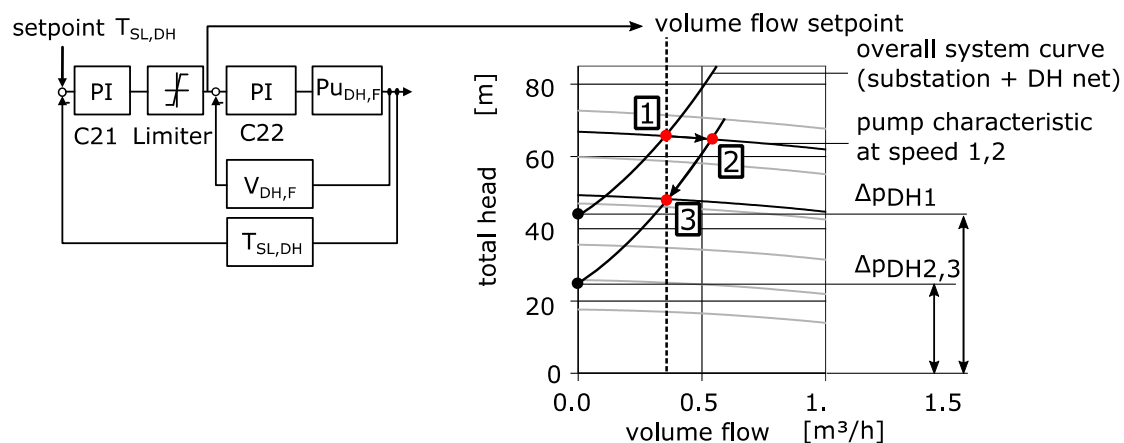


Abbildung 2: Links: Kaskadierter Regler der Einspeisetemperatur  $T_{SL,DH}$ , Rechts: Pumpenkennlinienfeld der  $P_{u,DH,F}$  und die Arbeitspunkte 1..3 während der Regleraktivität von C22 um einen Sprung von  $\Delta p_{DH}$  auszuregeln (1 – Start, 2 – Nach Sprung von  $\Delta p_{DH}$  ohne Regelungsaktivität von C22, 3 – Neuer stationärer Arbeitspunkt bei geänderten Differenzdruck  $\Delta p_{DH}$ )

### 3. ZUSTAND EINSPEISUNG

#### 3.1 Regler

Um die Netzeinspeisestation im Zustand *Einspeisung* zu betreiben, wird ein Satz von drei Reglern verwendet (siehe Tabelle 1). Die Steuerung C1 wird für die Anpassung der Kollektorfeld-Ausgangstemperatur  $T_{SL,CF}$  durch Anpassen der Pumpengeschwindigkeit von  $P_{u,STS}$  verwendet. Dieser Regler kompensiert hauptsächlich Änderungen der Strahlung  $\dot{G}_{t,i}$  und der Rücklaufstemperatur  $T_{RL,STS}$ . Ziel ist es, die Wärmeübertragereingangstemperatur  $T_{SL,STS}$  höher als den Sollwert der Vorlaufstemperatur  $T_{SL,DH}$  zu halten - um die Wärmeübertragung zu gewährleisten - und die mittlere Temperatur der Solaranlage gering zu halten, um Verluste zu minimieren.

Die zwei Hauptaufgaben der Steuerung der Einspeisepumpe  $P_{u,DH,F}$  sind:

- einen stabilen Volumenstrom  $\dot{V}_{DH}$  zu garantieren der trotz der stark schwankenden Druckdifferenz des Netzes  $\Delta p_{DH}$  den aktuellen Solarerträgen entspricht
- mit minimalem Stromverbrauch zu arbeiten.

Um beide Aufgaben zu erfüllen, wird ein kaskadierter Regler verwendet (siehe Abbildung 2 links). Der Temperaturregler C21 findet eine Lösung für die Gleichung (1), indem er den Volumenstrom-Sollwert  $\dot{V}_{SP}$  des Reglers C22 und damit den Volumenstrom  $\dot{V}_{DH}$  einstellt. Der innere Regler kompensiert jede Änderung der Druckdifferenz des Netzes  $\Delta p_{DH}$ . Dies ist energetisch effizient, da die Pumpendrehzahl geändert wird, um  $\dot{V}_{DH}$  direkt zu manipulieren, anstatt ein Drossel- oder Bypassventil zu verwenden. Das Volumenstromsignal des Wärmemengenzählers WMZ F kann direkt genutzt werden

z.B. durch ein zusätzliches Analogmodul. Diese Mehrfachnutzung des WMZ F ist abhängig von der Art des Wärmemengenzählers und dem erreichbaren Aktualisierungsintervall des Volumenstromsignals. Die getestete Unterstation funktioniert gut, wenn die Regler alle vier Sekunden aktualisiert werden.

$$T_{SP} = T_{SL,DH} = \frac{\dot{V}_{SP} \cdot \rho \cdot c_p}{\dot{Q}_{STS}} + T_{RL,DH} \quad (1)$$

mit  $T_{SP}$  .. Sollwert für  $T_{SL,DH}$ ,  $\dot{V}_{SP}$  .. Sollwert für  $\dot{V}_{DH}$

Die Kompensation der variablen Druckdifferenz  $\Delta p_{DH}$  unter Nutzung des Volumenstromreglers C22 (siehe Bild 2 rechts) erfolgt in drei Schritten:

1. Der Sollvolumenstrom wird bei der aktuellen Druckdifferenz  $\Delta p_{DH,1}$  (stationärer Zustand) erreicht.
2. Der Volumenstrom  $\dot{V}_{DH}$  unterscheidet sich aufgrund der Stördruckdifferenz  $\Delta p_{DH,2,3}$  vom Sollwert. Die Einspeisetemperatur  $T_{SL,DH}$  wird ebenfalls von ihrem Sollwert abweichen (instationär).
3. Die Steuerung C22 kompensiert die Druckdifferenzabweichung und die Einspeisetemperatur wird nicht beeinflusst (stationär).

Mit dem Volumenstromsignal  $\dot{V}_{DH}$  des WMZ F kann auch die richtige Pumpendrehzahl zur Überwindung der Druckdifferenz  $\Delta p_{DH}$  beim Start der Einspeisung ermittelt werden (Rosemann, et al., 2017a). Die oben beschriebene Integration dieses Signals in die Anlagensteuerung wird aufgrund der geringen zusätzlichen Kosten für das Auslesen dieses Signals und der signifikanten Vorteile zur Lösung der üblichen Probleme (siehe Lennermo und Lauenburg, 2015) der Druckdifferenz in Fernwärmenetzen  $\Delta p_{DH}$  empfohlen.

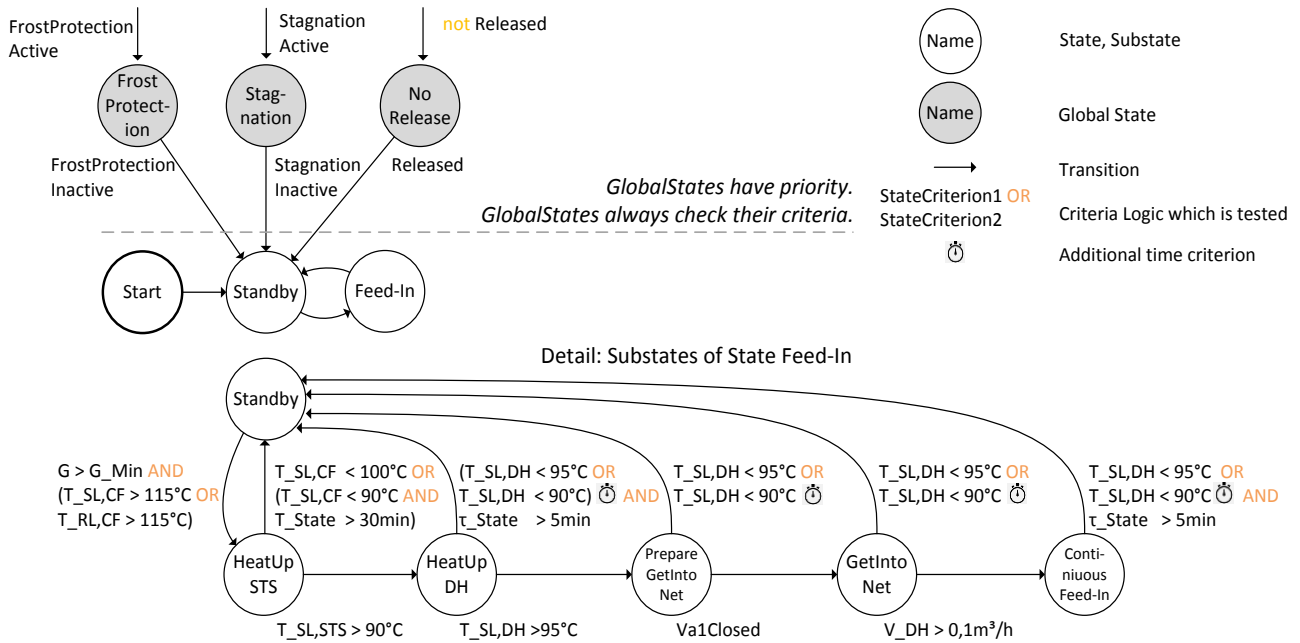


Abbildung 3: Zustandsdiagramm der NEST mit detailliertem Unterzuständen des Zustands *Einspeisung* (hier *Feed-In*)  
Released – Externes Freigabesignal ist TRUE und die Einspeisung erlaubt  
 $G\_Min$  – Grenzstrahlung berechnet auf Basis der Kollektorkennlinie  
Die Kriterien der *Stagnation* und *Frostschutz* (hier *Frost Protection*) werden in den dazugehörigen Abschnitten diskutiert.

### 3.2 Zustandsautomat

Für den korrekten Betrieb einer Fernwärmenetz-Einspeise-Unterstation müssen Regler und Aktoren der Anlage de-/aktiviert und im richtigen Moment auf entsprechende Werte gesetzt werden. Diese Aufgabe wird mit einem Zustandsautomaten gelöst (siehe Abbildung 3). Ein Zustand ist eine Menge von Aktor- und Reglereinstellungen, die den Betrieb der Anlage in sequentielle Schritte strukturiert. Der Einstiegspunkt der Zustandsmaschine ist "Start". Es gibt immer nur einen aktiven Zustand. Der aktive Zustand prüft die Kriterien, die auf die folgenden Zustände zeigen, und startet den Übergang, wenn der logische Ausdruck aller Kriterien TRUE ist. Globale Zustände, welche z. B. für Sicherheitstechnik verwendet werden, sind spezielle Zustände, die aufgrund ihrer hohen Priorität ihre Eingangskriterien immer prüfen.

Zustände können aus Unterzuständen bestehen. Diese werden verwendet, um Zustände in Untereinheiten zu strukturieren und ihre Zusammengehörigkeit zu visualisieren (z. B. ist die *Erwärmung* der Solarthermieanlage bzw. *HeatUpSTS* immer ein Unterzustand von *Einspeisung* bzw. *Continuous Feed-In*).

Ein Kriterium basiert auf Messungen von physikalischen Größen und einer Zeitdauer. Eine Zeitdauer kann sich auf ein physikalisches Kriterium (zusätzliches Zeitkriterium, "Wie lange ist eine physikalische Bedingung erfüllt") oder auf der aktiven Zeit eines Zustands ( $\tau_{Zustand}$ , "Wie lange ist ein Zustand aktiv") beziehen. Die Parameter der Kriterien hängen von der konkreten Anlage und ihren Randbedingungen ab.

Tabelle 2: Beschreibung der Unterzustände und Aktivität der Regler im Zustand *Einspeisung* (○ – inaktiv, ● – aktiv)

Zustand	Beschreibung	C1	C21	C22
<i>Standby</i>	In diesem Zustand zeigt die Anlage keine Aktivität. (Nacht im Sommer, bewölkter Tag).	○	○	○
<i>HeatUpSTS</i>	Wenn im Kollektorfeld hohe Temperaturen gemessen werden, wird $Pu_{STS}$ aktiviert und das heiße Fluid in die Netzeinspeisestation gefördert.	●	○	○
<i>HeatUpDH</i>	Wenn der heiße Pfropfen den Wärmeübertrager erreicht, wird die Fernwärmeseite der Netzeinspeisestation durch Öffnen des Bypassventils $Va1$ und Starten der Einspeisepumpe $Pu_{DH,F}$ aufgeheizt.	●	○	○
<i>PrepareGetIntoNet</i>	Das Bypassventil $Va1$ wird geschlossen.	●	○	○
<i>GetIntoNet</i>	Die Pumpendrehzahl $Pu_{DH,F}$ steigt an bis ein Volumenstrom $\dot{V}_{DH}$ erkannt wird.	●	○	●
<i>ContinuousFeed-In</i>	Der Wärmestrom aus dem Kollektorfeld wird kontinuierlich in das Fernwärmenetz eingespeist.	●	●	●

### 3.3 Messergebnisse

Die beispielhaften Messergebnisse des Zustands *Einspeisung* (siehe Abbildung 4) beginnen um 8:00 am 22. Juni und enden um 18:00 mit einer durchschnittlichen Strahlung von  $\dot{G}_{t,i} = 530 \frac{W}{m^2}$  und einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur von  $T_a = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Die Anlage wird gemäß des oben beschriebenen Zustandsautomaten mit den Unterzuständen aus Tabelle 2 betrieben. Am Morgen beginnt das System im *Standby*, bis  $T_{CF,SL}$  oder  $T_{CF,RL}$   $115 \text{ }^\circ\text{C}$  übersteigt. Die Rücklauftemperatur des Kollektorfelds  $T_{RL,CF}$  ist beträchtlich höher als die Vorlauftemperatur des Kollektorfelds, hauptsächlich aufgrund der Schattierung von C6. Von 9:20 bis 10:00 Uhr fällt der aktive Zustand zurück in *Standby*. Dieser Rückfall wird durch das niedrige Solarthermie Vorlauftemperaturkriterium von  $T_{SL,CF} < 90 \text{ }^\circ\text{C}$  ausgelöst. Dieses unerwünschte Verhalten tritt manchmal aufgrund der erwähnten Temperaturschwankungen der Kollektoren während des Aufheizens auf und ist eine Spezialität des Kollektorfeldes der Pilotanlage. Nach Erreichen des Zustands *HeatUpSTS* wird das heiße Medium wieder zum Wärmeübertrager transportiert und die Fernwärmeseite wird aufgeheizt. Während der kontinuierlichen Einspeisung von 11:20 bis 17:10 treten drei verschiedene Störungen auf, die gut kompensiert werden.  $T_{SL,DH}$  erreicht sehr genau seinen dynamischen Sollwert:

- 12:00, 15:50 - Spitzen der Druckdifferenz  $\Delta p_{DH}$  werden durch die Anpassung der Pumpendrehzahl des Reglers C22 kompensiert.
- 13:30 - Der Anstieg der Rücklauftemperatur  $T_{RL,DH}$  um 10 K wird vom Regler C21 mit einem höheren Volumenstrom  $\dot{V}_{DH}$  kompensiert.
- 14:30 - Die Strahlungsintensität beginnt durch steigende Bewölkung zu sinken. Der Solarvolumenstrom  $\dot{V}_{STS}$  wird vom Regler C1 reduziert. Die hohe Wärmekapazität des Kollektors und des Mediums reduziert ebenfalls die Empfindlichkeit gegenüber Strahlungsstörungen.

Die kontinuierliche Schwankung der Rücklauftemperatur in der Fernwärmeleitung  $T_{RL,DH}$  wird durch das periodische Öffnen und Schließen des Regelventils einer anderen Hausanschlussstation in der langen Stichleitung zum Fernwärmenetz verursacht.

Am Abend fällt die Einspeisetemperatur  $T_{SL,DH}$  unter  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Einspeisung wird durch Zurückfallen in den Zustand *Standby* gestoppt. Während des Tages wurden 82 kWh solare Wärme in das Fernwärmenetz eingespeist, hauptsächlich bei der gewünschten Einspeisetemperatur von  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die aktuelle Wärmemenge, die von Januar bis September 2017 in das Netz eingespeist wird - ohne endgültige Optimierung der Zustandsmaschine und Steuerung - beträgt 8.556 kWh.

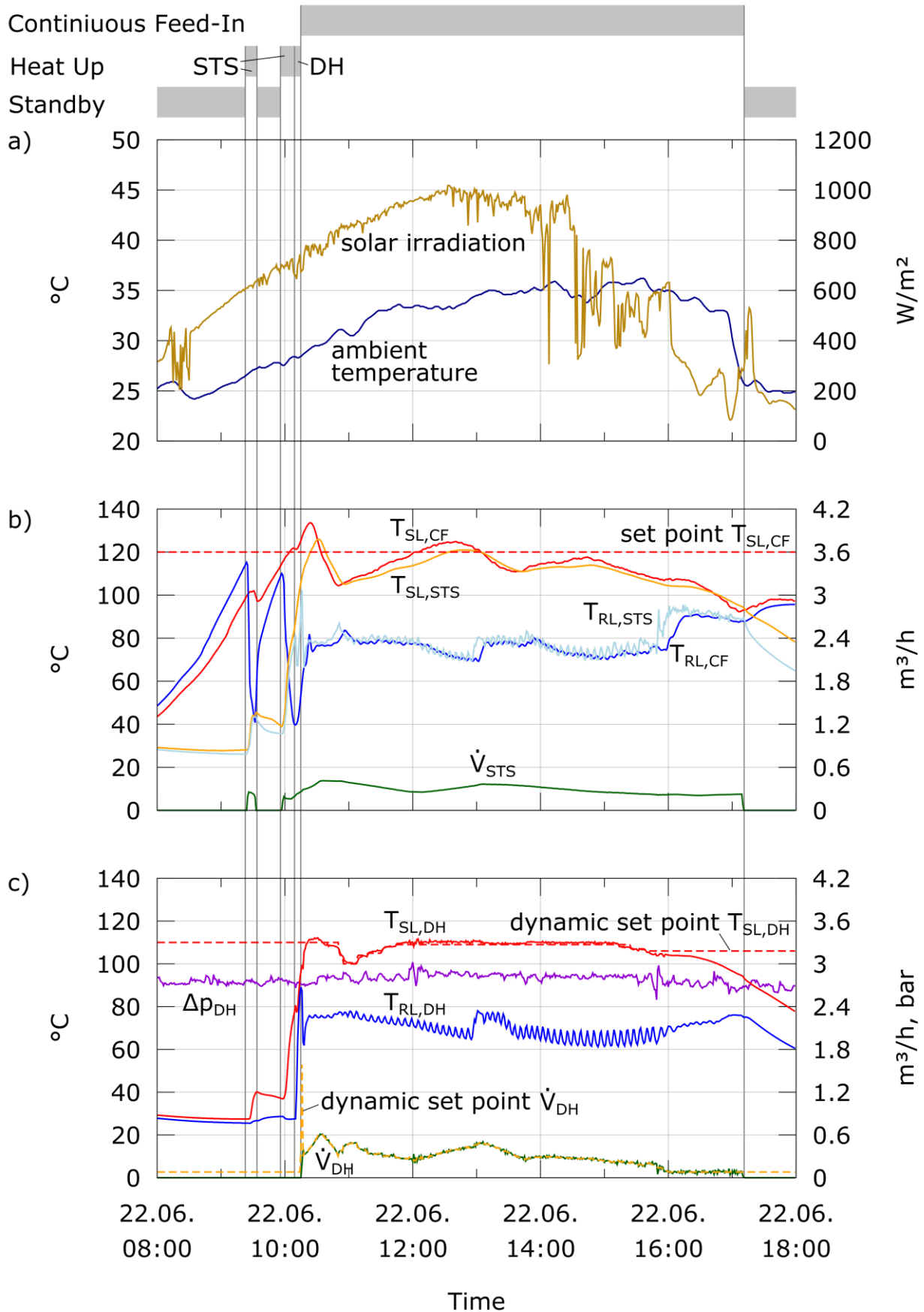


Abbildung 4: Messwerte im Zustand *Einspeisung*,  
a) Umgebung, b) Solarthermieanlage, c) Fernwärme-Seite



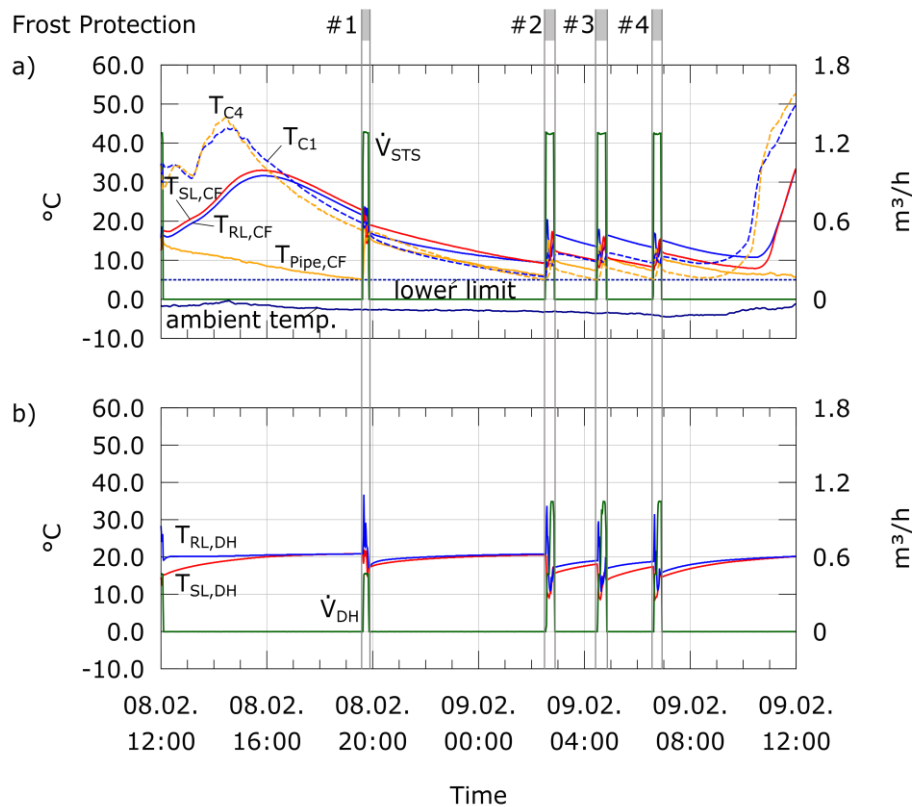


Abbildung 5: Messwerte im Zustand *Frostschutz* a) Solarthermieanlage, b) Fernwärme-Seite

#### 4. ZUSTAND FROSTSCHUTZ

##### *Regler und Zustandsautomat*

Der Frostschutz muss verhindern, dass alle Teile der Anlage auf eine Temperatur in der Nähe des Schmelzpunktes der Solarflüssigkeit abkühlen. Um dies zu erreichen, wird eine untere Grenze für die Mediumtemperatur in der Solaranlage von 5 °C definiert. Wenn eines der Temperaturkriterien diesen Schwellwert unterschreitet, wird der Zustand *Frostschutz* aktiviert. Dieser Status ist als global definiert und wird in jeder Iteration überprüft.

Bei Aktivierung fließt Warmwasser aus dem Rücklauf der Fernwärmeleitung über die Fernwärmeseite der Station und über den Frostschutzweig mit dem Wärmezähler zurück in den Rücklauf. Dazu wird die separate Pumpe  $P_{u_{DH,FP}}$  (siehe Abbildung 1) verwendet, die parallel zur Einspeisepumpe  $P_{u_{DH,F}}$  installiert ist. Der Frostschutz stoppt und kehrt in den Zustand *Standby* zurück, wenn alle überwachten Sensoren den oberen Grenzwert von 10 °C überschreiten und eine minimale Laufzeit erreicht ist.

Die in den Wintersaisons 2016/2017 und 2017/18 geprüften Varianten zum Zustand *Frostschutz* sind in Tabelle 3 dargestellt. Erste Versuche wurden mit der Aktivierung der Pumpen durchgeführt, wenn eine der

Kollektorfeldtemperaturen die untere Grenze unterschreitet. Diese Temperaturen werden durch Sensoren in den Rohrleitungen der Vor- und Rücklaufleitungen ( $T_{SL,CF}$ ,  $T_{RL,CF}$ ) und Sensoren in den Anschlussleitungen des Kollektorfeldes ( $T_{HP}$ ,  $T_{Pipe,CF}$ ) gemeldet. Die Pumpen werden gestoppt, wenn alle gemessenen Temperaturen die obere Schwelle überschreiten. Es hat sich gezeigt, dass eine Mindestlaufzeit von 13 min erforderlich ist, um mindestens einen Umlauf der Flüssigkeit durch die Solaranlage sicherzustellen. Des Weiteren zeigten detaillierte Auswertungen der Messergebnisse des DTS, dass die Kollektoren dieser konkreten Anlage schneller abkühlen als die Verrohrung des Kollektorfeldes (siehe Rosemann, et al., 2017b). Daher wurden zwei Kollektorsensoren CS ( $T_{C1}$ ,  $T_{C4}$ ) in die Abtastroutine aufgenommen, um eine niedrige Medientemperatur innerhalb der Kollektoren zu detektieren.

##### *4.2 Messergebnisse*

In Abbildung 5 sind die Messdaten für den Betrieb des Frostschutzes mit dem aktuellen Regelkonzept dargestellt (5 °C, 13min, CS). Die Messperiode beginnt am 8. Februar um 12:00 Uhr und endet am folgenden Tag um 12:00 Uhr. Die durchschnittliche Umgebungstemperatur betrug -2,7 °C, die Minimaltemperatur betrug -4,7 °C und der Himmel war bewölkt. Die obere Grafik zeigt

Temperaturprofile, die von den Sensoren der Solaranlage und dem Kollektorfeld gewonnen wurden. Das untere Diagramm enthält die Temperaturwerte auf der Fernwärmeseite.

Die Temperaturen im Kollektorfeld steigen am Nachmittag aufgrund steigender Globalstrahlung an und fallen danach ständig ab. Die Solarstrahlung wirkt sich nur auf die Sensoren aus, die sich direkt neben den Kollektoren befinden. Die Temperatur  $T_{\text{pipe,CF}}$  in der 25 m langen Verbindungsleitung zwischen C1 und C2 ( $T_{\text{pipe,CF}}$ ) wird nicht erhöht. Um 19:50 löst der Temperatursensor die erste Frostschutzperiode aus (#1). Alle anderen Frostschutzzeiten (#2 bis #4) werden vom Kollektorsensor  $T_{C4}$  ausgelöst.

Die Solarpumpe arbeitet mit ihrer maximalen Drehzahl ( $\dot{V}_{\text{STS}}$ ), wenn der Frostschutz aktiv ist. Der Volumenstrom auf der Fernwärmeseite  $\dot{V}_{\text{DH}}$  wird so geregelt, dass im Solarkreis eine Vorlauftemperatur von 20 °C erreicht wird. Die Temperaturen auf der Fernwärmeseite  $T_{\text{RL,DH}}$  und  $T_{\text{SL,DH}}$  sind fast auf Raumtemperaturniveau und damit sehr niedrig.

Die Solarthermieanlage ist über eine lange Stichleitung mit dem Fernwärmenetz verbunden. Im dargestellten Zeitraum haben die angeschlossenen Verbraucher keinen Wärmebedarf und die Rücklaufleitung kühlt ab. Der Frostschutz kann trotzdem garantiert werden, da dieser einen geringen Wärmebedarf aufweist und die Fläche des Wärmeübertragers groß ist. Insgesamt wurde an diesem Tag ein Wärmebedarf für den Frostschutz von 4 kWh gemessen.

Abbildung 6 zeigt den täglichen Wärmebedarf für den Frostschutz über die tägliche Umgebungstemperatur für zwei Winterperioden. Tage mit einer relativ hohen Einstrahlung ( $> 1,2 \text{ kWh} / \text{m}^2$  in Kollektorebene) sind rot, andere blau dargestellt. Wie erwartet steigt der Wärmebedarf für den Frostschutz mit sinkenden

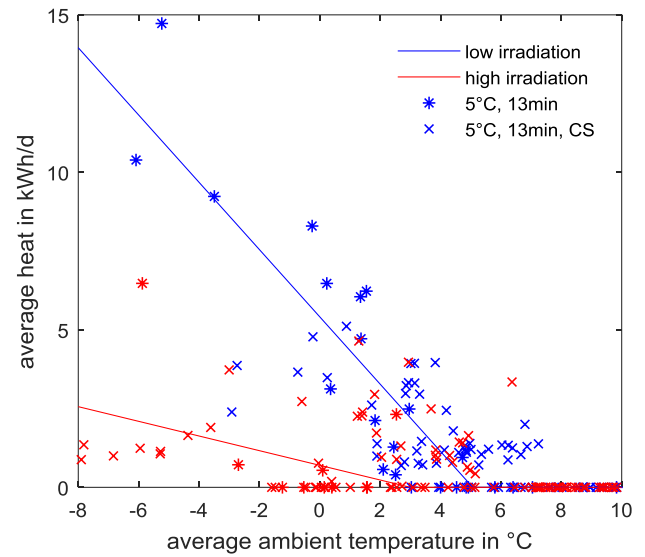


Abbildung 6: Statistische Auswertung der Frostschutzperiode im Winter 2016/17 und 2017/18, Tagesmittelwerte, niedrige Einstrahlung (low irradiation)  $< 1,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$  in Kollektorebene  $\leq$  hohe Einstrahlung (high irradiation)

Umgebungstemperaturen. Diese Nachfrage ist bei Tagen mit hoher solarer Einstrahlung deutlich reduziert. Der Frostschutz beginnt bei durchschnittlichen Tages-Umgebungstemperaturen von ca. 3 bis 5 °C. Der Wärmebedarf kann auf bis zu 14 kWh pro Tag an sehr kalten und bewölkten Tagen mit täglichen durchschnittlichen Umgebungstemperaturen unter -5 °C steigen.

Der Wärmebedarf belief sich für die gesamte Wintersaison auf 380 kWh, das sind etwa 2 - 3% der jährlichen Wärmemenge, die in das Fernwärmesystem eingespeist wird. Dies liegt im Bereich bekannter Anlagen mit aktivem Frostschutz.

Tabelle 3: Getestete Kriterien für das Ein-/Ausschalten des Frostschutzes (○ – AN, ● - AUS, | - logisch “ODER”, & - logisch “UND”)

Name	Frostschutz	Kriterium	Pumpenaktivität	
			$P_{\text{USTS}}$	$P_{\text{UDH,FP}}$
5 °C, 13min	Aktivieren	$(T_{\text{SL,CF}}   T_{\text{RL,CF}}   T_{\text{Pipe,CF}}   T_{\text{HP}}) < 5 \text{ °C}$	●	●
	Deaktivieren	$(T_{\text{SL,CF}} \& T_{\text{RL,CF}} \& T_{\text{Pipe,CF}} \& T_{\text{HP}}) > 10 \text{ °C}$ AND RUNTIME $P_{\text{USTS}} > 13 \text{ min}$	○	○
5 °C, 13min, CS	Aktivieren	$(T_{\text{SL,CF}}   T_{\text{RL,CF}}   T_{\text{Pipe,CF}}   T_{\text{HP}}   T_{\text{C1}}   T_{\text{C4}}) < 5 \text{ °C}$	●	●
	Deaktivieren	$(T_{\text{SL,CF}} \& T_{\text{RL,CF}} \& T_{\text{Pipe,CF}} \& T_{\text{HP}} \& T_{\text{C1}} \& T_{\text{C4}}) > 10 \text{ °C}$ AND RUNTIME $P_{\text{USTS}} > 13 \text{ min}$	○	○



## 5. SCHLUSSFOLGERUNGEN/AUSBLICK

Die Planung der Pilotanlage, die Umsetzung und die Betriebserfahrung von anderthalb Jahren haben bereits wertvolle Informationen geliefert, die für die Standardisierung dezentraler Einspeisestationen genutzt werden können. Mit den Fernwärmeunternehmen besteht Klärungsbedarf hinsichtlich der Regelgenauigkeit der Einspeisetemperaturen. Eine hohe Regelgenauigkeit der Vorlauftemperatur wird immer auf Kosten einer höheren Variation des Vorlaufvolumenstroms und umgekehrt erreicht. Bei solarthermischen Anlagen würde eine höhere Temperaturtoleranz, insbesondere am Morgen während des Aufheizvorgangs, in Wolkenphasen oder bei maximaler Einstrahlung, den allgemeinen Betrieb erleichtern bzw. die kleinere Dimensionierung der Komponenten erlauben. Vor allem bei Fernwärmesystemen mit einem entscheidenden Solaranteil kann eine hohe Variation des Einspeisevolumenstroms zu hydraulischen Problemen und Störungen führen.

Die Verwendung von Wasser als Solarflüssigkeit ist mit einem aktiven Frostschutz in der Wintersaison möglich. Es ist notwendig, das unterschiedliche Kühlverhalten der Kollektoren und der Rohrleitung zu berücksichtigen. Ein gut gestalteter, separater Stagnationskühler kombiniert mit einem kleinen zusätzlichen Vorschaltgefäß kann die Dampfreichweite sicher begrenzen und die Membran des Ausdehnungsgefäßes schützen. Diese Kombination kann das Konstruktionsvolumen des Ausdehnungsgefäßes reduzieren und somit die Investitionskosten reduzieren.

Solarthermische Ertragsprognosen werden nach der Validierung eines Simulationsmodells für die dezentralen solarthermischen Einspeisestationen möglich sein. Es sollen Simulationen zur Verallgemeinerung des aktuellen Steuerungskonzepts (Zustandsautomat) durchgeführt werden. Die Inbetriebnahme einer kombinierten Hausanschluss- und Netzeinspeisestation (HANEST), die an ein Niedertemperatur-Fernwärmenetz in Berlin Adlershof angeschlossen ist, wird derzeit vollzogen. Diese wird das Monitoring-Portfolio des Forschungsprojekts erweitern.

### LITERATURVERZEICHNIS

Lennermo, G., Lauenburg, P., 2015. Variation in Differential Pressure at a District Heating Prosumer Substation, 3rd International Solar District Heating Conference, Toulouse

Herwig, A., Rühling, K., 2014. Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing Of Large Hot Water Storage Tanks. 15th International Symposium on District Heating and Cooling, Stockholm

Heymann, M., Rühling, K., Felsmann, C., 2017. Integration of Solar Thermal Systems into District Heating – DH System Simulation, Energy Procedia, 116, Seoul doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.086

Rosa, A. D., Li, H., Svendsen, S., Werner, S., Persson, U., Rühling, K., Felsmann, C., Crane, M., Burzynski, R. and Bevilacqua, C. 2014. Annex X Final Report: Toward 4th Generation District Heating, Tech. rep., IEA DHC|CHP

Rosemann, T., Löser, J., Rühling, K., 2017a. A New DH Control Algorithm for a Combined Supply and Feed-In Substation and Testing Through Hardware-In-The-Loop, Energy Procedia, 116, 416-425. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.089

Rosemann, T., Heymann, M., Rühling, K., Hafner, B., 2017b. DH Networks - Concept, Construction and Measurement Results of a Decentralized Feed-In Substation, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry

### ANHANG: EINHEITEN UND SYMBOLE

Tabelle 4: Symbole

Parameter	Symbol	Unit
Fläche	A	m <sup>2</sup>
Globalstrahlung	G	W m <sup>-2</sup>
Masse	m	kg
Massestrom	$\dot{m}$	kg s <sup>-1</sup>
Druck (absolut)	p	bar
Druckdifferenz	$\Delta p$	bar
Wärme	Q	kWh
Wärmestrom	$\dot{Q}$	kW
Temperatur	T	°C
Wirkungsgrad	$\eta$	
Zeit	$\tau$	s

Tabelle 5: Abkürzungen und Indizes

Parameter	Symbol
Umgebung	a
Kollektor	Col
Kollektorfeld	CF
Kollektorsensor	CS
Fernwärme	DH
Faseroptische Temperaturmessung	DTS
Einspeisung	F
Frostschutz	FP
Wärmemengenzähler	WMZ, HM
Hochpunkt (hydraulisch)	HP
Tiefpunkt (hydraulisch)	LP
Netzeinspeisestation	NEST
Druckhaltung	PM
Pumpe	Pu
Rücklauf	RL
Ventil	Va
Solarthermieanlage	STS
Vorlauf	VL, SL