



Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule
Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale)
als Nullenergiehaus in Holzbauweise

Abschlussbericht

Teil 8: Solarthermie und Latentwärmespeicher

Prof. Dr.-Ing. K. Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) K. Gebhardt, M. Eng.

Die Verantwortung für den Inhalt
des Berichtes liegt bei den Verfassern.

Magdeburg, September 2018

unter dem Förderkennzeichen
FKZ 03274300
gefördert durch das:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Projektförderung:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
unter dem Förderkennzeichen FKZ 03274300
Im Förderprogramm Energieoptimiertes Bauen (EnOB) – EnEff: Schule

Projektträger:

Projektträger Jülich (PTJ)
Wilhelm-Johnen-Straße
52428 Jülich

Projektlaufzeit:

01.04.2013 - 31.03.2018

Fördermittelnehmer und Forschungskooperationspartner:



Edith-Stein-Schulstiftung des Bistums Magdeburg
Max-Josef-Metzger-Str. 1
39104 Magdeburg

Verantwortliche Berichtverfasser:



Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.
Fachbereich Wasser, Bau, Umwelt und Sicherheit
Hochschule Magdeburg/Stendal
Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

Projektbearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow
Dipl.-Ing. (FH) Katharina Gebhardt, M. Eng.
Sandra Jäger, M. Eng.
Florian Könnecke, B. Eng.
Heidrun Neumann, B. Eng.

Robert Schulze, M. Eng.
Florian Switala, M. Eng.
Xiaoya Wang, M. Eng.
Jana Wohlfahrt, B. Eng.
Cheng Zhang, M. Eng.

Datenstand:

Magdeburg, 30.09.2018

Inhalt

Impressum	3
1 Zusammenfassung	7
2 Funktionsschema und Kurzbeschreibung	13
3 Komponenten und Bauteile	15
3.1 Kollektoren	15
3.2 Pufferspeicher	18
3.3 Trinkwarmwasserspeicher	21
3.4 Salzhydratspeicher	22
3.5 Solarnetz und Verteiler	23
3.6 Pumpen	27
3.7 Regelmodul.....	29
4 Messergebnisse Energie	31
4.1 Messorte und Messtechnik	31
4.2 Gesamtbilanz.....	33
4.3 Kollektorkreisenertrag	36
4.4 Elektronachheizung	37
4.5 Speicher- und Zentralenwärmeverluste.....	38
4.6 Hilfsenergie.....	39
4.7 Wirtschaftliche Einordnung	40
4.8 Fazit	42
5 Warmwasserbedarf und Solarsimulation	43
5.1 Warmwasserbedarf	43
5.2 Nutzwärmeprofil auf Basis von Verbrauchsmessungen	51
5.3 Software und Randdaten.....	54
5.4 Abgleich mit der Messung	57
6 Regelung, Hydraulik und Anlagenfunktion	59
6.1 Hydraulikschema und Regelfunktionen der Fernwärme	59
6.2 Hydraulikschema und Regelfunktionen Solarthermie	62
6.3 Messorte und Messtechnik	64
6.4 Temperaturen im Kollektorfeld.....	64
6.5 Speicherschichtung.....	68
6.6 Elektrische Nachheizung.....	70
6.7 Kalt- und Warmwassertemperaturen	74
6.8 Pumpenbetrieb	76
6.9 Probleme und Verbesserungsansätze	79
7 Latentwärmespeicher	83
7.1 Anlagenbeschreibung	83
7.2 Funktionsbeschreibung	87
7.3 Messorte und Messtechnik	88
7.4 Messergebnisse	89
7.5 Verallgemeinerung und Fazit.....	91
8 Anhang	93
8.1 Literatur.....	93
8.2 Nomenklatur	94
8.3 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	95
8.4 Ergänzende Berechnungen	97
8.5 Planer, Ausführende, Projektbeteiligte	100
8.6 Überblick über separate Anhänge.....	100

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht erläutert im ersten Schritt die zur Trinkwarmwasserbereitung eingesetzte Solarthermieanlage mit den technischen Eigenschaften der wesentlichen Komponenten. Im Anschluss werden die Messergebnisse der Energiebilanz für die drei Betriebsjahre 2015 – 2017 vorgestellt und analysiert. Ein Abgleich mit der Solarsimulation wird hergestellt. Das System wird auch wirtschaftlich bewertet.

Der nächste große Abschnitt befasst sich mit der Regelung und Hydraulik der Anlage. Die Funktionsweise wird zunächst beschrieben. Im Anschluss wird anhand von Monitoring-Daten der reale Betrieb erläutert. Für zwei regelungstechnische nicht optimale Einstellungen werden Verbesserungen vorgeschlagen.

Der letzte Themenblock widmet sich dem Salzhydratspeicher. Er endet – wie die anderen Kapitel auch – mit einer Zusammenfassung der Erkenntnisse und Erfahrungen bei der Projektumsetzung sowie mit Empfehlungen für künftige Projekte.

Systembeschreibung Solarthermie

Für die Trinkwassererwärmung sind als Zentralgeräte eine Solarthermieanlage mit Pufferspeicher (Nutzer: Küche), einem Trinkwasserspeicher (Nutzer: Hausmeister) sowie mehrere Nachheizungen über Strom oder Fernwärme vorhanden. Abbildung 1-1 zeigt eine Prinzipskizze mit den wesentlichen Komponenten.

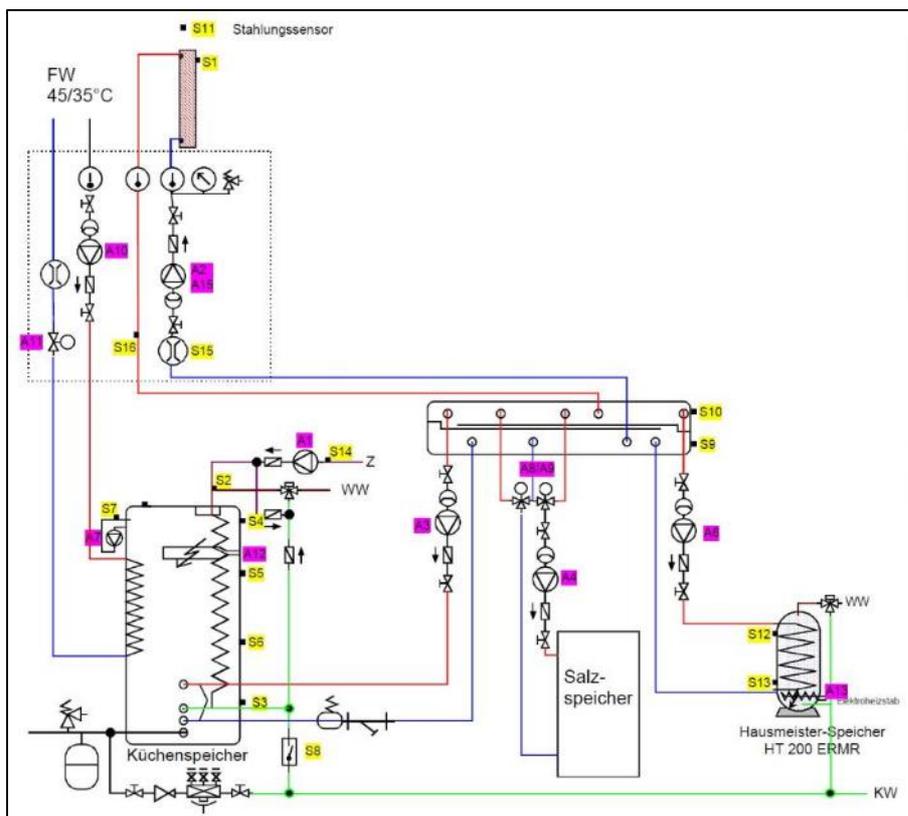


Abbildung 1-1: Hydraulikschema nach [1]

In der südlichen Fassade des Gebäudes sind senkrecht 36 m² (brutto) Solarthermiekollektoren angeordnet. Sie bilden drei Kollektorfelder links und rechts vom Eingang. In dem Kollektorfeld strömt eine Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel als Solarfluid.

Das System weist darüber hinaus einen zentralen Verteiler und Sammler auf, an dem drei Speicher angeschlossen sind.

Der größte Abnehmer ist der Küchenspeicher. Der Speicher hat ca. 2000 l Fassungsvermögen und ist als Pufferspeicher ausgebildet, der das Solarfluid bevorratet. Eine Trinkwassererwärmung erfolgt über einen innenliegenden Wärmeübertrager. Der zweite Abnehmer ist der Hausmeisterspeicher mit 200 l Volumen. Das Solarfluid erwärmt über einen innenliegenden Wärmeübertrager das im Speicher befindliche Trinkwasser. Der letzte Abnehmer ist ein Latentwärmespeicher – hier ein Salzhydratspeicher, in dem weitere Wärme eingelagert werden kann. Er hat eine latente Wärmespeicherkapazität von 128 kWh. Das entspricht etwa dem Küchenspeicher.

Die drei Kreise sind so geschaltet, dass bei Anfall von Solarwärme die Küche den Vorrang hat, dann der Hausmeisterspeicher geladen wird und nur bei weiterem Überschuss der Latentwärmespeicher benutzt wird.

Das vorgewärmte Trinkwarmwasser aus dem Hausmeisterspeicher (im Erdgeschoss) wird in der Hausmeisterwohnung (im 2. Obergeschoss) mit Durchlauferhitzern nacherwärmt. An der Zapfstelle wird jeweils 60°C erreicht, egal wie hoch die Solarthermieanlage das Wasser vorwärmen konnte. Einmal in der Woche erfolgt auch im Speicher eine elektrische Nachheizung zum Legionellenschutz.

Der Küchenpufferspeicher versorgt im Wesentlichen die Spülmaschine. Sollte die Solarthermieanlage keine Erwärmung auf 60°C möglich machen, erfolgt eine Nachheizung mit Fernwärme (nicht in Betrieb) oder Strom.

Energiebilanz nach Messung und Simulation

Der Ertrag des Kollektorfeldes liegt in den drei Untersuchungsjahren 2015 bis 2017 bei 6900 kWh/a, 7100 kWh/a und 6400 kWh/a. Die zugehörigen Globalstrahlungen gibt der Deutsche Wetterdienst mit 1130 kWh/a, 1050 kWh/a und 1050 kWh/a an [2]. Der Strahlungsdurchschnitt für Halle liegt bei 1050 kWh/a [2]. Damit sind die Jahre 2016 und 2017 durchschnittlich, was das Solarangebot angeht. Im Jahr 2015 war die Solarstrahlung 8 % höher. Der simulierte Solarertrag liegt bei knapp 6700 kWh/a und etwas unter den Messwerten.

Der Ertrag des ersten Betriebsjahres hätte daher etwas höher ausfallen können. Da aber insbesondere auch die Lage der Sommerferien von Relevanz ist, besteht keine erkennbare Korrelation zwischen Strahlungsangebot und Kollektorertrag. Wohl aber ist die sinkende Nutzwärmemenge im Jahr 2017 zu erkennen. Sie führte dazu, dass deutlich weniger Solarenergie nutzbar gemacht werden konnte. Trotz gleichen Strahlungsangebotes sank der Kollektorkreis-ertrag um etwa 10 %. Es ergab sich mehr ungenutztes Solarangebot.

Der Ertrag je Kollektorfläche liegt bei 214 kWh/(m²a) bezogen auf die Aperturfläche bzw. bei 163 kWh/(m²a) bezogen auf die Bruttokollektorfläche. Damit liegt er etwas über der Simulationsprognose.

Der elektrische Nachheizbedarf wird auf 3500 kWh/a in der Simulation beziffert und mit 3500 ... 3600 kWh/a gemessen.

Die Verluste werden in der Simulation mit knapp 800 kWh/a ausgewiesen. Die Messwerte liegen an dieser Stelle höher. Sie können anhand der Herstellerkennwerte der Speicher plausibilisiert werden. Eine Dauerverlustleistung von 169 W (beide Speicher unter angepassten Temperaturen) ergibt innerhalb eines Jahres eine Energiemenge von 1480 kWh/a. Die Verlustleistungen der Rohre könnten ähnlich bestimmt werden. Es wird darauf verzichtet, denn der Messwert für die Jahre 2015 bis 2017 belaufen sich auf im Mittel 1650 kWh/a und werden als plausibel eingeschätzt.

Die der Simulation zugrundeliegende Nutzenergiemenge entstammt der Messung, daher sind die Werte nahezu identisch. Allerdings ist der Wechsel des Küchenbetreibers ab Mitte 2017 in den Messwerten deutlich zu erkennen. Es wird weit weniger Warmwasser benötigt, da der neue Pächter zum großen Teil eine Aufwärmküche betreibt, während vorher alles frisch gekocht wurde. Abbildung 1-2 zeigt die Jahresbilanzen.

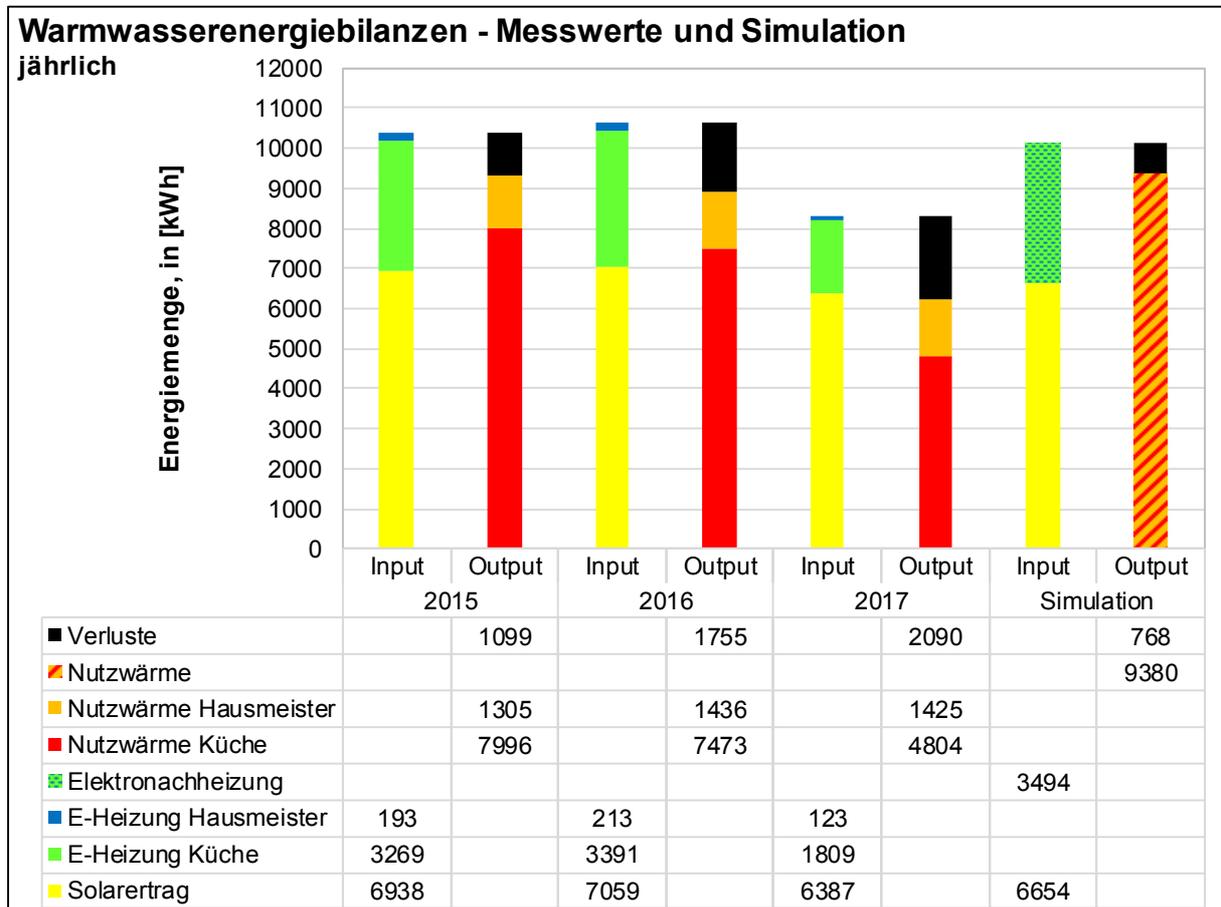


Abbildung 1-2: Jahresbilanzen – Messwerte und Simulation

Insgesamt kann daher festgehalten werden, dass die Simulation nachvollziehbare Ergebnisse liefert, solange die Nutzwärmemenge korrekt vorgegeben wird. Sogar die Tatsache, dass in der Realität eine 5-Tage-Woche gegeben ist (für die Küche), aber eine 7-Tage-Woche simuliert wurde, verfälscht das Ergebnis nicht nennenswert. Lediglich die technischen Verluste – insbesondere des Speichers – werden unterschätzt.

Latentwärmespeicher

Aus Sicht des Monitorings wurden während der Planungs- und Ausführungsphase mehrfach die Bedenken geäußert, dass der Latentwärmespeicher für das Ziel der Nullemission nicht maßgeblich notwendig sei. Zudem wurde das Kollektorfeld auf die Wassermenge der Küche hin bemessen, so dass keine nennenswerte solare Überschusswärme vorhanden sein werden. Dies haben die Messwerte bestätigt.

Die Beladung des Speichers hat 2016 nur einmal ausgelöst: am Freitag, 15.04. um 15:24. Allerdings nur für 12 Minuten. Es ist davon auszugehen, dass es nicht zu einer Vollladung kam, da dazu 3 Stunden notwendig sind. Entladungen sind im selben Jahr nicht zu erkennen. Im Jahr 2017 gab es keine Auslösung.

Der Salzhydratspeicher arbeitet vermutlich grundsätzlich korrekt, wie aus den Daten der Inbetriebnahme zu schließen ist. Auch das gewählte Konzept, alle 16 Zylinder einzeln starten zu können und so in Dosen von 8 kWh zu entleeren ist nachvollziehbar und sinnvoller als in der Planungsphase vermutet. Die Bedenken, zu viel Wärme auf einmal auszulösen, konnten damit ausgeräumt werden.

Anlagenhydraulik und Betriebsverbesserungen

Grundsätzlich ist der Solarbetrieb aus technischer Sicht als zufriedenstellend einzuschätzen. Die Zeitschaltprogramme sind nachvollziehbar, die Zeitprogramme auf den Bedarf optimiert, der Pufferspeicher geschichtet. Ein nennenswertes Problem ergibt sich lediglich aus der Nachheizung des Pufferspeichers mit Strom.

Die St. Franziskus-Grundschule ist über einen Wärmeübertrager im Rücklauf des Elisabeth-Gymnasiums eingebunden (Reihenschaltung, Regelbetrieb). Eine Umschaltung auf den Vorlauf (Parallelschaltung) ist möglich. Der Regelbetrieb ist gekennzeichnet von einer Auslegung auf 45/35°C auf der Abnehmerseite. Die Nachheizung des Solarpufferspeichers könnte grundsätzlich mit Fernwärme erfolgen. Allerdings ist unter den geschilderten Randdaten keine nennenswerte Erwärmung des Puffers zu erwarten, da die Temperaturen zu gering sind.

Anhand der Messwerte ist daher erkennbar, dass von 2015 bis 2017 keine Puffererwärmung mit Fernwärme stattfand. Es fehlt an einer – bedarfs- oder zeitgesteuert herbeigeführten – Umschaltung in den Parallelbetrieb mit hohen Fernwärmeparametern. Die technischen Gegebenheiten für eine Umschaltung auf Hochtemperaturbetrieb (z. B. 70/50°C) sind vorhanden.

Ein Vorschlag für ein Zeitschaltprogramm wurde im Rahmen einer Masterarbeit erarbeitet [3]. Zunächst wurden die Zeitfenster festgestellt, in denen besonders großer Nachheizbedarf besteht – erkennbar an der zeitlichen Verteilung der Elektroenergie. Anschließend wurde abgeschätzt, welche Leistungserhöhung sich ergibt, wenn die Fernwärme mit 70/50°C zur Verfügung steht. Das im Pufferspeicher vorhandene Nachheizregister wurde auf Systemtemperaturen von 45/35°C ausgelegt. Die Leistungserhöhung verkürzt die notwendige Ladezeit und damit das Zeitfenster für eine Umschaltung.

Folgende Zeitfenster ergeben sich als Empfehlung für die Umschaltung der Fernwärme auf Hochtemperaturbetrieb: 6:00-6:40 und 11:50-13:50 Uhr. Eine Totzeit von 10 Minuten zwischen Elisabeth-Gymnasium bis zum tatsächlichen Ladebeginn sind berücksichtigt.

Die geplante Umschaltung kollidiert zeitlich nicht mit den morgendlichen Wiederaufheizphasen für die beiden Schulen, die dann bereits abgeschlossen sind. Allerdings ist festzustellen, dass die erhöhten Vorlauftemperaturen in den Umschaltzeiten die Nachheizung der Luftheizregister beeinflussen werden. Da diese ebenfalls mit 45/35°C projektiert sind, ergibt eine Vorlauftemperaturerhöhung auf 70°C sehr geringe Volumenströme. Die Regelventile sind dann deutlich überdimensioniert und müssen stark schließen.

Es wird vorgeschlagen, die Verbesserung der Hydraulik in die Realität umzusetzen, wenn die Turnhalle errichtet wird. Da die Turnhalle hinsichtlich der Wärmeversorgung ebenfalls im Rücklauf des Elisabeth-Gymnasiums angeordnet ist, muss das Umschaltproblem spätestens dann ohnehin gelöst werden. Auch dort werden Speicher zum Einsatz kommen, die voraussichtlich zwischen 15 und 18 Uhr geladen werden müssen.

Wirtschaftliche Bewertung

Die Kosten des Solarsystems incl. Speicher und Kollektorfeld (jedoch ohne Salzhydratspeicher) belaufen sich auf 87.500 €. Ohne Berücksichtigung von Zinsen liegt die jährliche Rate für 20 Jahre Lebensdauer bei 4.375 €/a.

Die Energiemengen ergeben sich aus der gemessenen Bilanz. Zur wirtschaftlichen Einordnung des Systems müssen Energiepreise für Fernwärme, Stromeinkauf und Stromverkauf definiert werden. Der Küchenspeicher wird – aus den Messwerten abgeleitet – zu 35 % mit selbst erzeugtem PV-Strom und zu 65 % mit Netzstrom nachgeheizt. Dies ist kostenrelevant.

Die Ergebnisse des reinen Energiekostenvergleichs für die heutige Betriebsvariante sowie zwei Alternativen mit Fernwärme zeigt Tabelle 1-1.

Tabelle 1-1: Energiekostenvergleich mit reiner Fernwärmeversorgung

Version	Solar/Strom (Ist)	Solar/Fernwärme	Fernwärme	Preise
Bilanzposten	Menge in [kWh/a]	Menge in [kWh/a]	Menge in [kWh/a]	in [€/kWh]
Bedarfe				
Nutzen	+ 8.850	+ 8.850	+ 8.850	
Verluste	+ 1.650	+ 1.650	+ 650	
Summe	= 10.500	= 10.500	= 9.500	
Deckung				
Solarertrag	+ 7.000	+ 7.000	+ 0	0,00
Stromeinkauf	+ 3.500 · 0,65	+ 0	+ 0	0,27
Stromerzeugung	+ 3.500 · 0,35	+ 3.500 · 0,35	+ 3.500 · 0,35	0,00
Stromverkauf	- 0	- 3.500 · 0,35	- 3.500 · 0,35	0,12
Fernwärmeeinkauf	+ 0	+ 3.500	+ 9.500	0,06
Summe	= 10.500	= 10.500	= 9.500	
Kosten	614 €/a	63 €/a	423 €/a	

Allein auf Basis der Energiekosten schneidet die reine Fernwärmelösung (ohne Solarthermie) etwas besser ab als der heutige Betrieb mit elektrischer Nachheizung. Noch besser ist aus Sicht der Energiekosten der kombinierte Solar-/Fernwärmebetrieb.

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten, den bislang vernachlässigten Wartungskosten und der Hilfsenergien für Pumpen ist absehbar, dass die reine Fernwärmelösung am wirtschaftlichsten ist. Bei den beiden Solar-Lösungen sind die o.g. Kapitalkosten von 4.375 €/a zu addieren.

Fazit aus Sicht der St. Franziskus-Grundschule

Die Solarthermie liefert – in Anbetracht der Kollektorfeldgröße und Neigung – die erwarteten Erträge. In den ersten beiden Betriebsjahren wurden 7.000 kWh/a erreicht. Es sind keine technischen Probleme bekannt.

Die Wirtschaftlichkeit ließe sich jedoch verbessern, wenn anstelle des Stroms (anteilig oder vollständig) Fernwärme zur Nachheizung des Küchenpuffers verwendet würde. Da die Investition in die Anlage staatlich gefördert wurde, zählt für die St. Franziskus-Grundschule der laufende Betrieb – nicht der Kapitalkostenanteil.

Mit dem vorgeschlagenen Umschaltprogramm für die Fernwärme ergibt sich eine Nachheizung zu etwa $\frac{1}{3}$ aus Strom und $\frac{2}{3}$ aus Fernwärme. In Summe könnten so jährlich 300 ... 350 €/a Energiekosten gespart werden. Dazu muss die vorhandene Regelung lediglich so umprogrammiert werden, dass in dem genannten 4-Stunden-Zeitfenster eine Umschaltung auf den Fernwärmeverlauf besteht. Die Komponenten sind bauseits alle vorhanden.

Der Salzhydratspeicher kommt nicht zum Einsatz. Auch dies ist für die St. Franziskus-Grundschule zunächst kein wirtschaftlicher Verlust, da die Anlage gefördert wurde. Es können keine kurzfristigen Empfehlungen ausgesprochen werden, den Zustand ohne Speichernutzung abzustellen – das Kollektorfeld liefert keine Überschüsse. Der Speicher sollte im Zusammenhang mit dem Turnhallenneubau verwendet und in das dortige Versorgungskonzept eingebunden werden.

Bis dies soweit ist, wäre zu überlegen, das System komplett stromlos zu schalten, um die mehr als 500 kWh/a Hilfsstromverbrauch einzusparen.

Fazit aus Sicht anderer Schulen

Die jährlichen Kapitalkosten für die Solarthermieanlage (ohne Salzhydratspeicher) liegen bei 4.375 €/a über 20 Jahre. Mit diesem Geld werden 7000 kWh/a Solarertrag generiert. Das führt zu einem äquivalenten Energiepreis von 0,625 €/kWh und damit einer Unwirtschaftlichkeit gegenüber anderen Energieträgern. Unberücksichtigt sind bei der Betrachtung die Wartungskosten, die das Problem verschlechtern.

Sofern die Investitionen nicht zu wenigstens 80 % gefördert sind oder entsprechend von Vornherein niedriger liegen, muss aus wirtschaftlicher Sicht von dieser Technik abgeraten werden. Ähnliche Randdaten hinsichtlich der Nutzenergiemenge der Schulküche vorausgesetzt. Wenn auch das Gebäude natürlich dem Nullenergieniveau mit dieser Technologie nähergebracht wird.

Die Investitionskosten für den Salzhydratspeicher liegen bei 14.000 € (ohne Erdbauwerk). Geht man von einer Lebensdauer von 20 Jahren aus und setzt weder Wartung noch Hilfsenergie für die Pumpen und Regelung an, dann ergeben sich jährlich 700 €/a als Kapitalkostenanteil, der erwirtschaftet werden muss. Sofern knapp 12.000 kWh/a Wärmeenergie mit dem Speicher nutzbar gemacht werden könnte, die anderenfalls ungenutzt bliebe, wäre ein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber anderen Energieträgern erkennbar. Die eingespeicherte Energie kostet dann knapp 0,06 €/kWh. Diese Randdaten dürften in einer Schule i.A. nicht gegeben sein.

2 Funktionsschema und Kurzbeschreibung

Nachfolgend wird eine kurze herstellerneutrale Anlagenfunktionsbeschreibung gegeben. Auf die Angabe von Zahlenwerten (z. B. für die Regelung) wird dabei weitgehend verzichtet. Sämtliche Details folgen in den Kapiteln 3, 5 und 7.

Für die Trinkwassererwärmung sind als Zentralgeräte eine Solarthermieanlage mit einem großen Pufferspeicher (Küche), einem kleinen Trinkwasserspeicher (Hausmeister) sowie mehrere Nachheizungen über Strom oder Fernwärme vorhanden.

Der Schulbetrieb nutzt nur im Ausnahmefall – Putzfrau, Teeküche, Kunstraum – Warmwasser, welches nicht zentral erwärmt wird, sondern dezentral in elektrischen Durchlauferhitzern.

Abbildung 2-1 zeigt ein Übersichtsschema mit nummerierten Komponenten, die im weiteren Text erläutert werden.

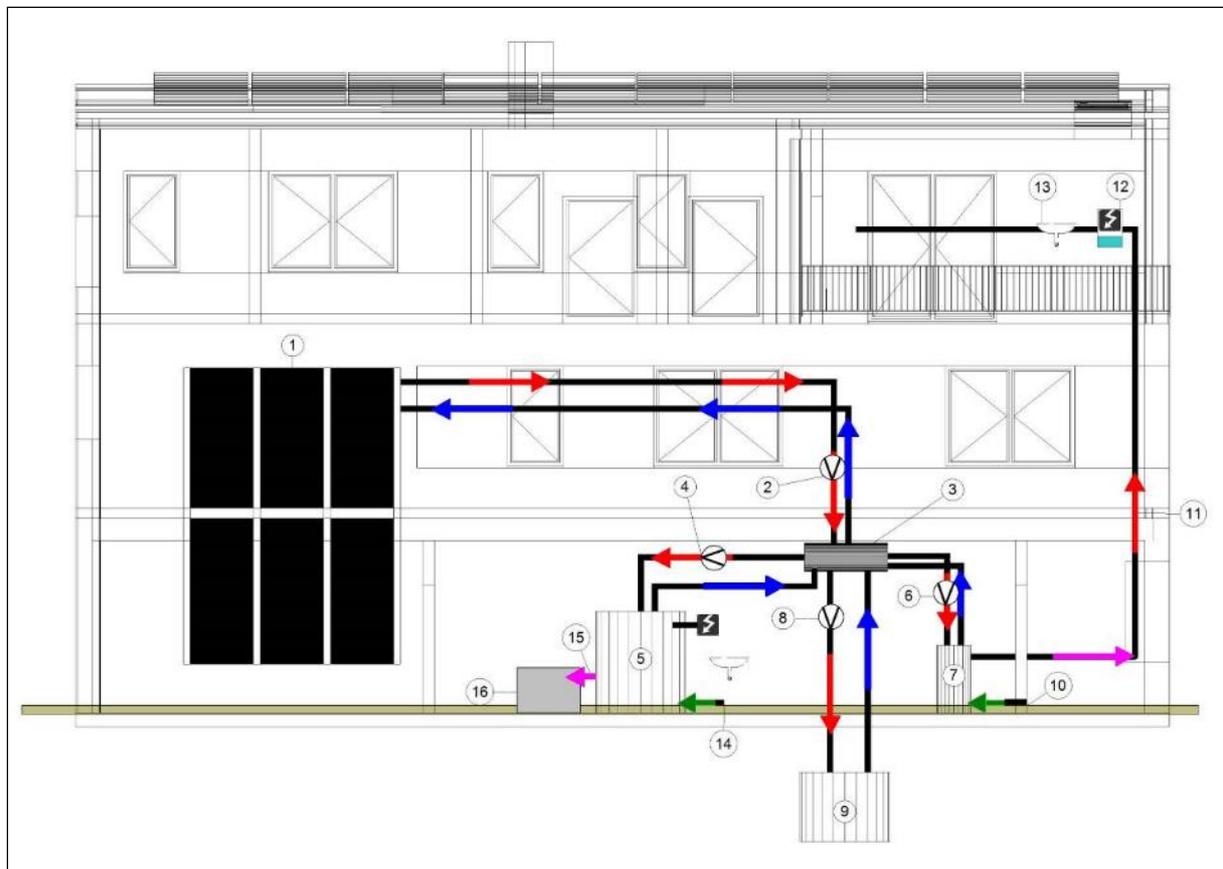


Abbildung 2-1: Konzept Trinkwarmwasser

In der Fassade des Gebäudes sind senkrecht 36 m^2 Solarthermiekollektoren angeordnet (1). Sie befinden sich auf der Südseite und grenzen rückseitig an die Garderoben bzw. den Raum der Stille (links vom Eingang) sowie die Aula (rechts vom Eingang).

Die senkrechte Anordnung ist eher unüblich, aber hier durchaus sinnvoll. Im Sommer hat die Schulküche deutlich weniger Warmwasserbedarf (Ferien, Hort), so dass die steil auf das Kollektorfeld treffende Sonne von Vorteil ist. Im Frühjahr und Herbst sind große Ausbeuten zu verzeichnen, weil die Sonne flacher steht und damit den Kollektor fast senkrecht trifft. Zudem ist – da keine längeren Ferien sind – in diesen Jahreszeiten auch Warmwasserbedarf zu verzeichnen.

In dem Kollektorfeld strömt eine Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel als Solarfluid. Es wird von einer Pumpe (2) zu einem zentralen Verteiler und Sammler (3) gepumpt. Diese Pumpe wird nur eingeschaltet, wenn ein Temperaturfühler registriert, dass das Kollektorfeld warm (wärmer als der Pufferspeicher) ist.

Im zentralen Verteiler und Sammler wird entschieden, in welche Richtung das Solarfluid geleitet wird. Es sind 3 Abnehmerkreise angeschlossen. Der Verteiler und Sammler sowie die beiden Speicher und die Regelung befinden sich in Raum 0.33b (Solarspeicherraum) in der Küche.

Der größte Abnehmer ist der Küchenspeicher (5). Soll das Solarfluid diesen erwärmen, wird die Pumpe (4) geschaltet. Der Küchenspeicher ist ein Pufferspeicher, d. h. er ist mit dem Solarfluid gefüllt. Wird warmes Trinkwasser benötigt, strömt es durch Heizschlangen im Pufferspeicher und erwärmt sich am Solarfluid (welches abkühlt). Der Speicher hat ca. 2000 l Fassungsvermögen.

Der zweite Abnehmer ist der Hausmeisterspeicher (7). Soll dieser erwärmt werden, wird der Strömungsweg mit Pumpe (6) verwendet. Dieser Speicher hat 200 l Volumen und ist ein Trinkwarmwasserspeicher. Das Solarfluid erwärmt beim Durchströmen durch eine Heizschlange das Trinkwasser, welches dann bevorratet wird.

Der letzte Abnehmer ist ein Latentwärmespeicher (9) – hier ein Salzhydratspeicher, in dem weitere Wärme eingelagert werden kann. Er hat eine Wärmespeicherkapazität von 128 kWh. Das entspricht etwa dem Küchenspeicher. Soll er geladen werden, wird Pumpe (8) benutzt. Das Speichermedium ist ein Salzhydrat, welches zwischen zwei Aggregatzuständen wechselt: flüssig und fest. Dieser Phasenübergang benötigt Energie (Verfestigen) oder gibt sie wieder frei (Verflüssigen).

Die drei Kreise sind so geschaltet, dass bei Anfall von Solarwärme die Küche den Vorrang hat, dann der Hausmeisterspeicher geladen wird und nur bei weiterem Überschuss der Latentwärmespeicher benutzt wird.

Das vorgewärmte Trinkwarmwasser aus dem Hausmeisterspeicher (7) fließt, sobald in der Wohnung ein Wasserhahn geöffnet wird, durch ein Leitungsnetz (11) vom Erdgeschoss (wo der Speicher steht) in die Wohnung im 2. Obergeschoss. Sollte das Wasser nicht warm genug sein, heizt ein Durchlauferhitzer (12) mit Strom nach. An der Zapfstelle (13) kommt in jedem Fall 60°C heißes Wasser aus der warmen Leitung, egal wie hoch die Solarthermieanlage das Wasser vorwärmen konnte. Diese hohe Trinkwarmwassertemperatur dient dem Schutz vor Trinkwasserkeimen (Legionellen). Aus diesem Grund hat auch der Hausmeisterspeicher (7) eine elektrische Nachheizung. Sie springt einmal die Woche an, falls die Solarwärme den Trinkwasserspeicher in dieser Woche nicht auf 60°C erwärmen konnte und dezimiert im Speicher evtl. vorhandene Trinkwasserkeime.

Wenn in der Hausmeisterwohnung Wasser aus der warmen Leitung gezapft wird, strömt kaltes Wasser (10) in den Speicher nach. Die gemischte zentral/dezentrale Versorgung für den Hausmeister ist eine Besonderheit des Systems, die nur selten angewendet wird. Sie hat den Vorteil, dass die Wärmeverluste des Speichers hauptsächlich aus der Solaranlage gedeckt werden und der bezahlte Energieträger (hier Strom) ganz nah am Endverbraucher eingesetzt wird.

Für den Küchenpufferspeicher (5) ist das Prinzip ähnlich. Wird Warmwasser benötigt, strömt Kaltwasser (14) in den Puffer ein. Es fließt durch die innenliegende Heizschlange und verlässt als Warmwasser mit etwa 60°C (15) den Behälter. Es wird in der Spülmaschine (16) oder an den Waschbecken in der Küche gebraucht. Sollte die Solarthermieanlage keine Erwärmung auf 60°C möglich machen, erfolgt eine Nachheizung mit Fernwärme oder Strom.

3 Komponenten und Bauteile

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die vorhandenen Komponenten der Solarthermieanlage: das Kollektorfeld, die Speicher und deren Nachheizung, Pumpen und Verteilnetz. Eine ausführliche Beschreibung der Regelungsfunktionen folgt erst in Kapitel 5.

Abbildung 3-1 zeigt einen schematischen Überblick über das Solarsystem mit Kollektorfeld, den drei Speichern sowie allen Pumpen.

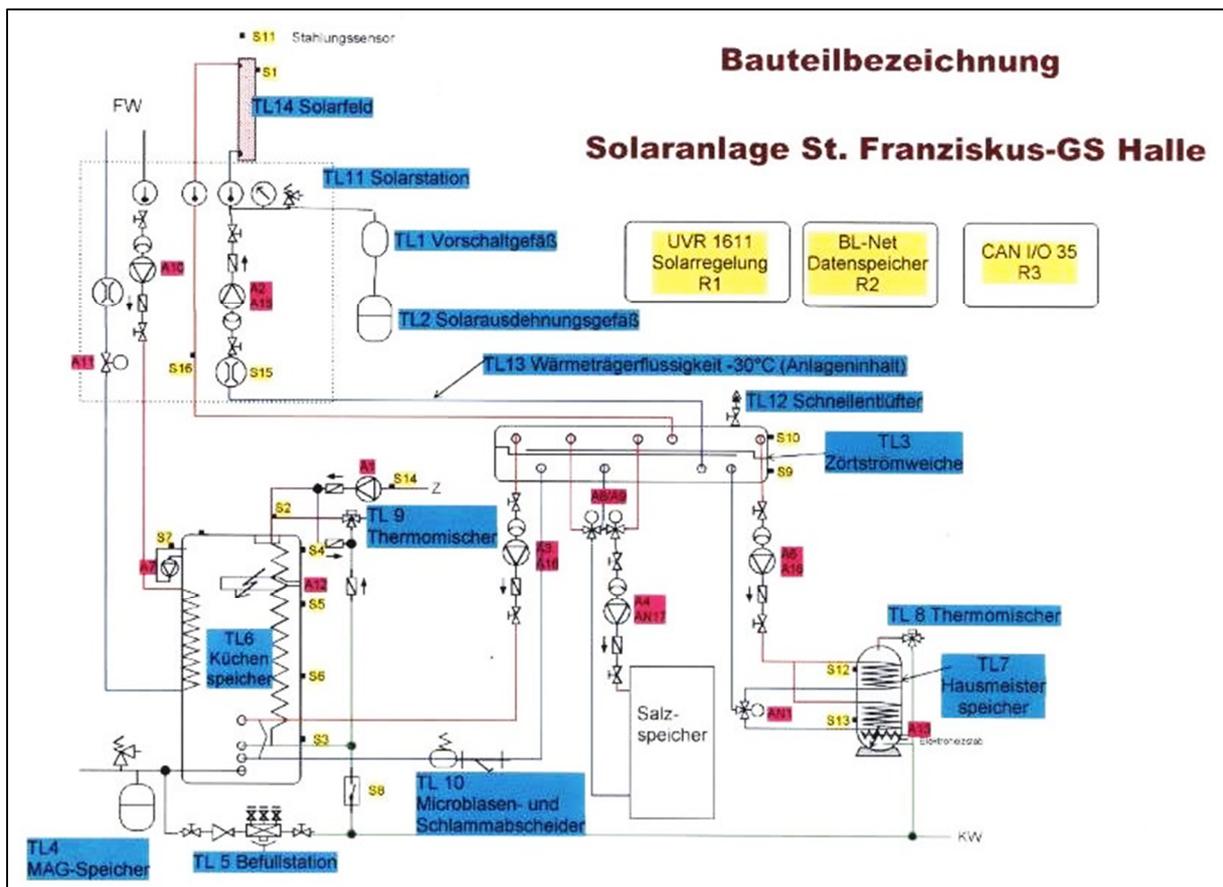


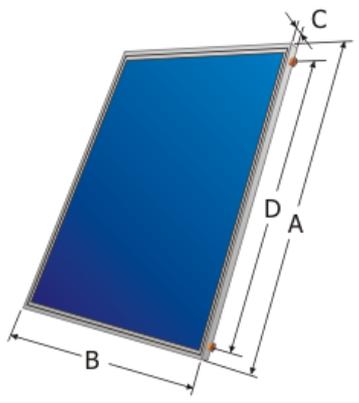
Abbildung 3-1: Schaltschema Solaranlage [1]

3.1 Kollektoren

Die Warmwasserbereitung erfolgt primär über die Solarthermiefassade, welche sich in der südorientierten Außenwand der Aula befindet. Es handelt sich um 18 Solarkollektoren à 1,82 m² Aperturfläche (gesamt 32,67 m², d. h. 36,36 m² Bruttofläche) vom Typ D2-202 der Firma SET Solar Energie Technik GmbH. Weitere technische Daten finden sich zusammengefasst in Abbildung 3-2 bzw. im separaten Anhang B.

Im Kollektorkreis kommt 1,2-Propylenglykol als Solarfluid zum Einsatz, das bis -30 °C frostsicher ist.

Allgemeine Daten	Abmessungen und Hydraulik	
Länge A (senkrecht zu Sammler/Vert.)	2212	mm
Breite B (parallel zu Sammler/Verteiler)	912	mm
Tiefe C	96	mm
<input checked="" type="checkbox"/> mit hydraulischen Daten	<input type="checkbox"/> hydraulische Daten sichtbar	



Allgemeine Daten	Abmessungen und Hydraulik	
Hersteller	SET Solar	Hersteller ...
Bezeichnung	D2-202	
Prüfnorm	EN 12975	Kollektor-Bild ...
Institut / Test	ISFH 82-10/KD 112-10/KD 113-10/KQ / 2010	
Zertifikat	Solar Keymark 011-7S1253 F	
<input checked="" type="radio"/> Flachkollektor	<input type="radio"/> Vakuumröhrenkollektor	
Bruttofläche	2,020	m ² (AG)
Aperturfläche (Lichteintrittsfläche)	1,820	m ² (Aa)
Spez. Werte bezogen auf	Aa	AG
Konversionsfaktor	0,750	0,676 -
Wärmedurchgangskoeffizient	3,790	3,415 W/m ² K
temperaturabh. Wärmedurchg.-Koeff.	0,0132	0,0119 W/m ² K ²
eff. Wärmekapazität	4,700	4,235 kJ/m ² K
Stagnationstemperatur	205	°C
IAM 50° longitudinal	0,940	-
IAM 20° transversal	0,000	-
IAM 40° transversal	0,000	-
IAM 50° transversal	0,000	-
IAM 60° transversal	0,000	-
Fluidinhalt	1,17	Liter
		<input type="checkbox"/> veralteter Datensatz



Abbildung 3-2: Kollektordaten [4] in der Darstellung der Simulationssoftware GETSOLAR

In der Vorplanungsphase wurde noch davon ausgegangen, dass ein selbst gebauter Kollektor (mit ISFH Prüfung) zum Einsatz kommt. Geplant war dieser mit 40 ... 55 m² Fläche und einem hohen Materialanteil aus Holz. Aufgrund der Insolvenz des Fachplaners N&S musste später aus Kostengründen davon Abstand genommen werden. Ein Fertigmodul des Herstellers SET kam stattdessen zum Einsatz.

Im oberen Bereich des Kollektorfeldes 2 (links der Eingangstür) ist ein Strahlungssensor integriert, dessen Werte im Monitoring mitgeschrieben werden – siehe Abbildung 3-5. Die Kollektorfelder 1 und 2 sind zusätzlich mit Temperaturmessungen ausgestattet.

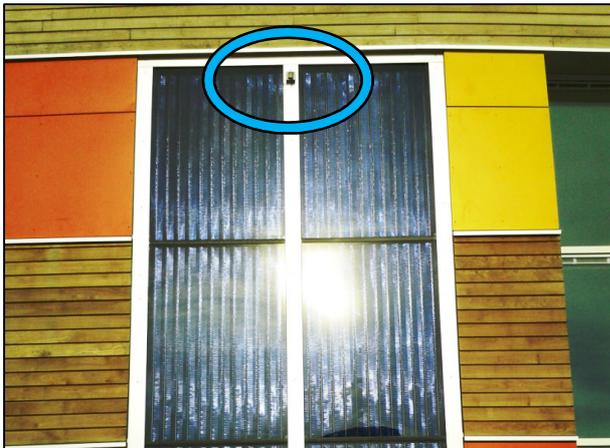


Abbildung 3-5: Kleines Kollektorfeld mit Strahlungssensor (Foto: HS MD)

3.2 Pufferspeicher

Um die solarthermischen Gewinne zu speichern, steht im Raum 033b u. a. ein Pufferspeicher der Firma ZEEH zur Verfügung. Dieser 2050 l fassende Multifunktionsspeicher mit Trinkwasserladesystem und Solarschichtsystem ist mit einem zusätzlichen Fernwärmetauscher MTLs-FW 2000 ausgestattet. Abbildung 3-6 zeigt eine Prinzipdarstellung.

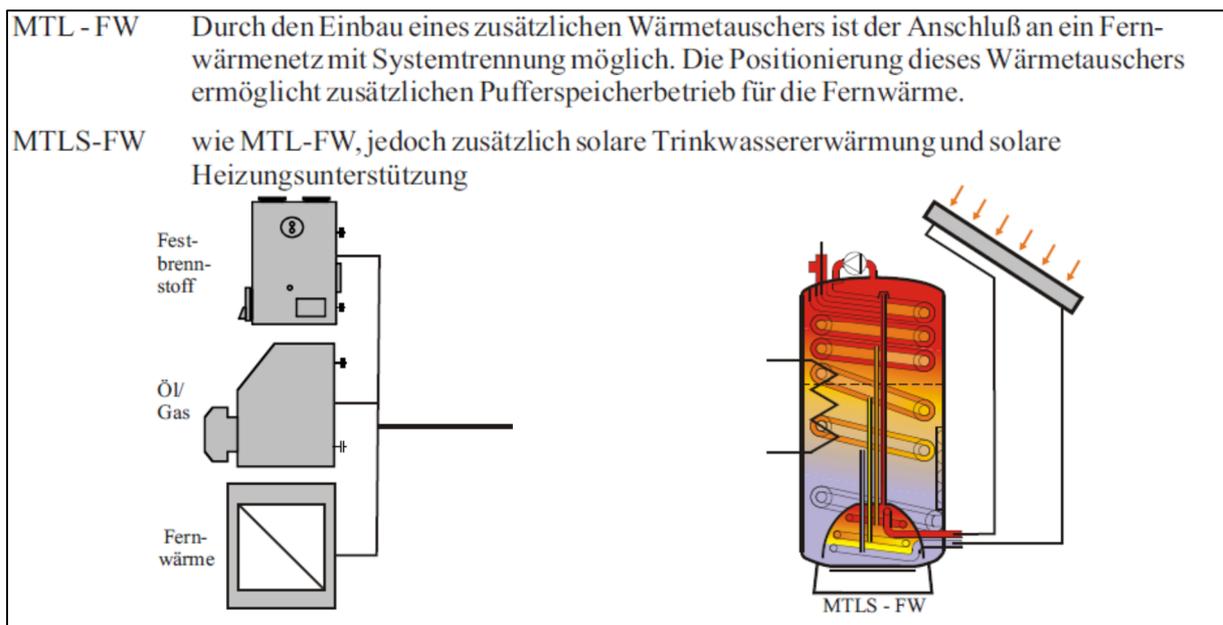


Abbildung 3-6: Prinzipdarstellung Solarpufferspeichers [6]

Im Behälter befindet sich das Solarfluid. Das Trinkwarmwasser wird durch einen Wärmeübertrager im Durchflussprinzip mittels eines weit gewellten Edelstahlrohrs mit großer Oberfläche, aber geringem Trinkwasserinhalt, erwärmt. Hierdurch wird es in jeder Betriebssituation als legionellenfrei angesehen [6].

Es gibt zwei Nachheizungsoptionen. Einerseits ist ein innenliegender Wärmeübertrager für Fernwärme vorgesehen (Leistung 25 kW), zum anderen ein in den Puffer eingeschraubter Elektroheizstab (Leistung 9 kW). Letzterer ist sinnvoll, da im Regelbetrieb aufgrund der Rücklaufauskühlung des Gymnasiums nur Fernwärmeheizwasser mit 45/35 °C zur Verfügung steht. Weitere Aspekte zum Thema siehe Bericht 9 zur Heizung und Hydraulik. Das Typenschild des Elektroheizstabes zeigt Abbildung 3-7.

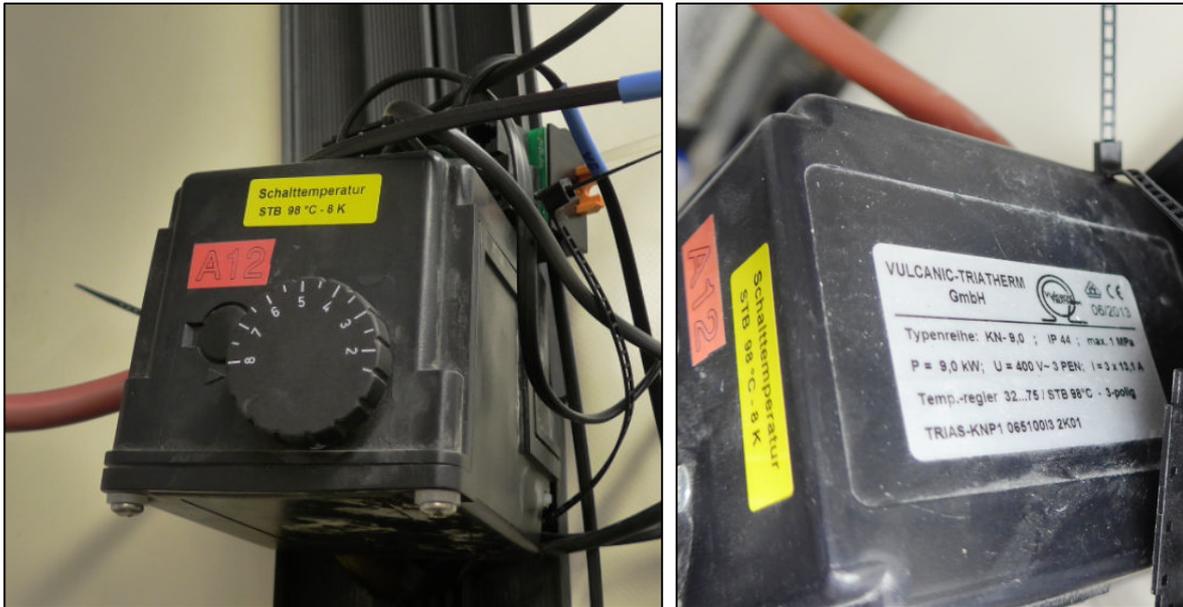


Abbildung 3-7: Elektroheizstab Pufferspeicher (Foto: HS MD)

Der Fernwärmeanschluss und das Kollektorfeld sind in einem Kompaktmodul zusammengefasst. Es enthält die Pumpen, Regelung sowie den Wärmemengenzähler. Abbildung 3-8 zeigt die Ansicht des geöffneten Moduls. Links ist der Fernwärmestrang, rechts der Kollektorkreisstrang zu sehen. Abbildung 3-8 rechts zeigt die Station.



Abbildung 3-8: Kompaktstation zur Fernwärmenachladung geöffnet (Foto: HS MD)

Der Pufferspeicher ist mit einer Dämmung aus Weichschaum versehen. Umgesetzt wurden 100 mm Dämmdicke im Mantel mit Verkleidung aus reißfesten Polyestergewebe und Hakenverschlussleiste sowie am Deckel 180 mm und am Boden 80 mm. Das Speichertypenschild zeigt Abbildung 3-9. Seit 2015 wird dieser Speicher mit der Effizienzklasse C gekennzeichnet. Er hat eine Dauerverlustleistung von 190 W [6]. Weitere Daten sind dem separaten Anhang C zu entnehmen.



Abbildung 3-9: Typenschild Pufferspeicher (Foto: HS MD)

Funktionsprinzip

Die Solarenergie wird unter einer Kunststoffglocke in den Speicher geleitet. Rohre mit verschiedenen Austrittshöhen leiten es in den Speicher weiter. Das in Abbildung 3-10 dargestellte Prinzip soll der Ausbildung eines geschichteten Speichers dienen.

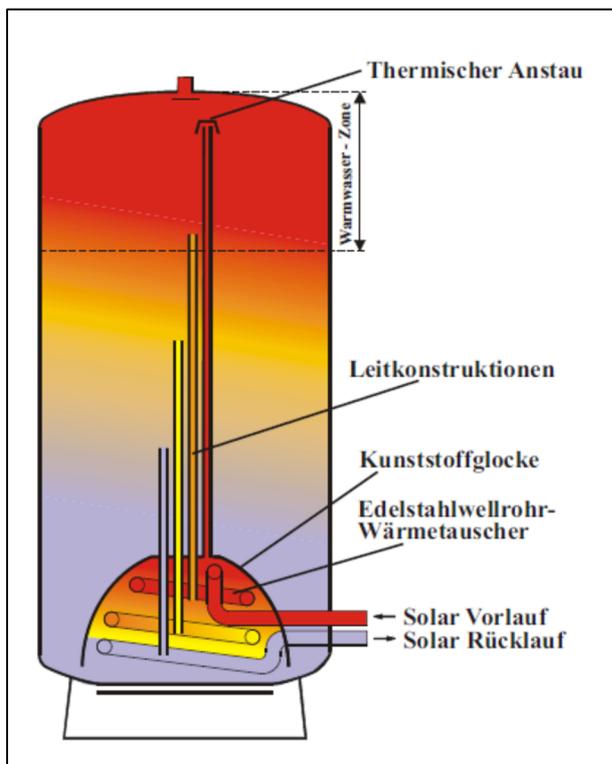


Abbildung 3-10: Funktionsprinzipien Pufferspeicher – Solarthermie [6]

Die Trinkwassererwärmung erfolgt in einem Doppelrohr, siehe Abbildung 3-11. Das Trinkwasser strömt dabei von unten nach oben, das Pufferwasser entgegengesetzt. Reicht die natürliche Umwälzung nicht aus, wird eine Ladepumpe geregelt zugeschaltet. Sie saugt das Solegemisch direkt im Speicher an und befördert es durch den äußeren Ringspalt des Doppelrohres nach unten, wo es wieder in den Puffer austritt.

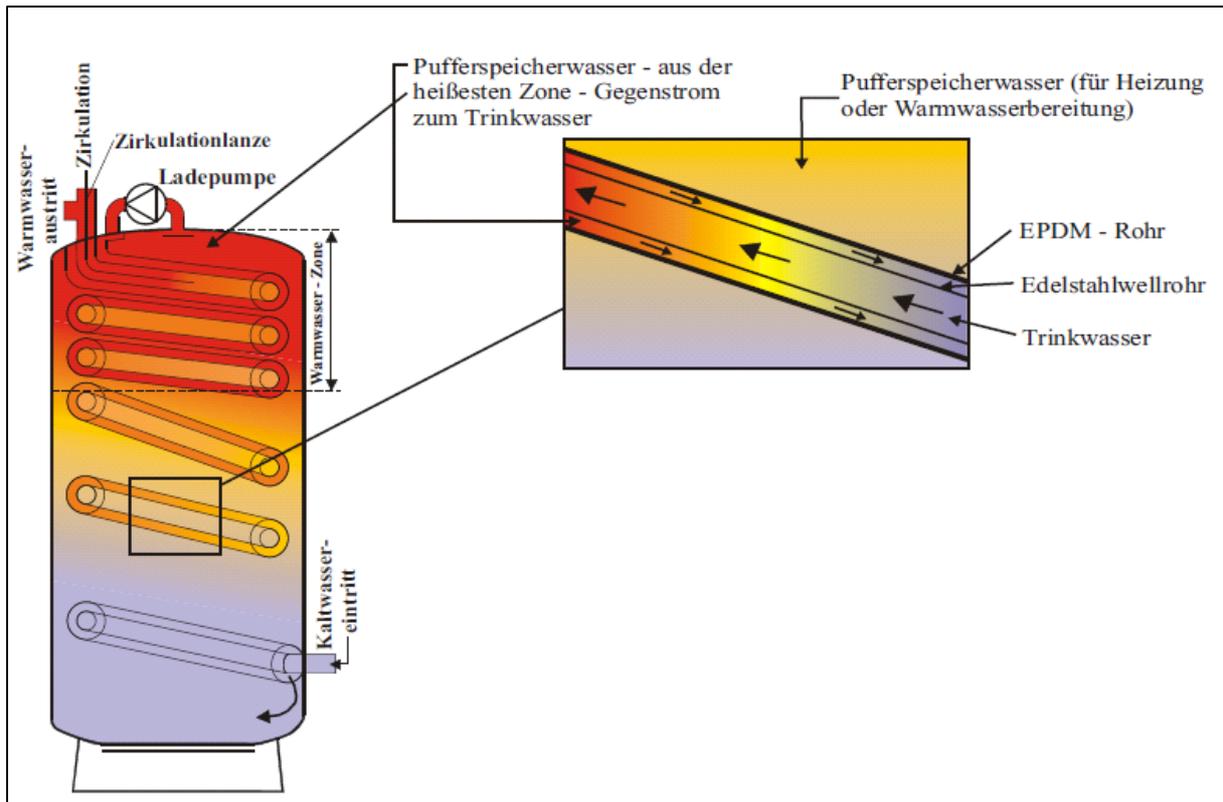


Abbildung 3-11: Funktionsprinzipien Pufferspeicher – Trinkwassererwärmung [6]

Ursprünglich war ebenso geplant, den Speicher an die Kondensationsseite der Kälteanlage der Kühlzellen in Raum 031 anzuschließen, um die Abwärme auszunutzen. Dies wurde nicht umgesetzt.

3.3 Trinkwarmwasserspeicher

Für die Hausmeisterwohnung steht ein 200 l fassender Speicher vom Typ HT 200 ERMR der Firma AUSTRIA EMAIL zur Verfügung, siehe Abbildung 3-12 bzw. Abbildung 3-13.

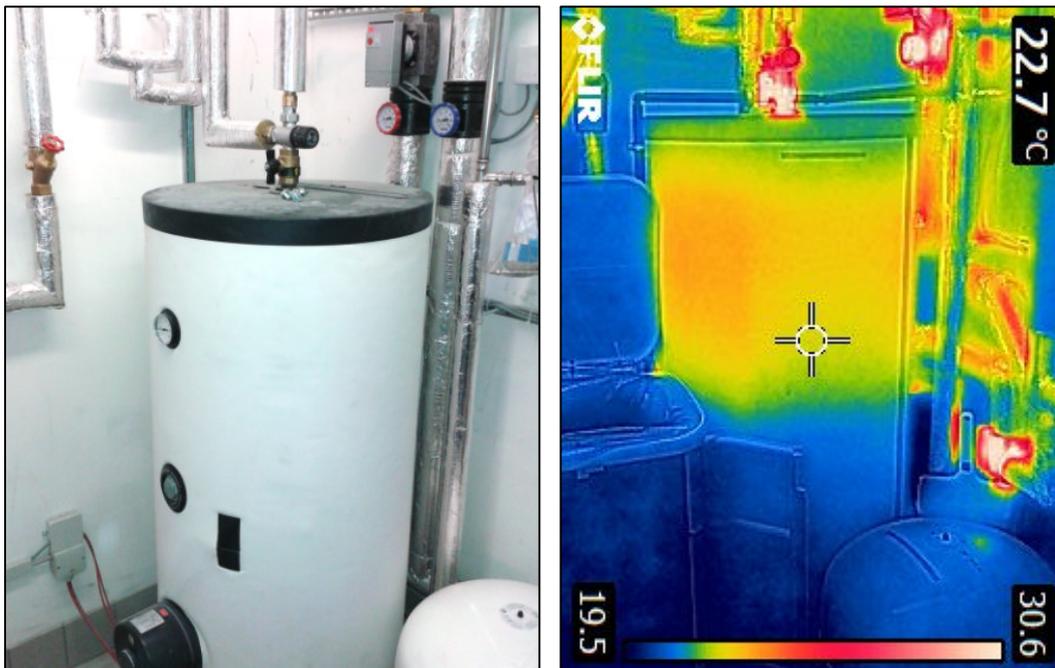


Abbildung 3-12: Trinkwarmwasserspeicher incl. Thermographie (Foto: HS MD)



Abbildung 3-13: Typenschild Trinkwarmwasserspeicher (Foto: HS MD)

Der Speicher wird primär über die Solarthermieanlage versorgt. Das Solarfluid erwärmt den Speicher über einen innenliegenden Wärmeübertrager mit einer maximalen Wärmeleistung von 75 kW. Mit einem eingeschraubten Elektroheizstab (Leistung 6 kW), siehe Abbildung 3-14, kann der Speicher nachgeheizt werden.



Abbildung 3-14: Elektroheizstab Hausmeisterspeicher (Foto: HS MD)

Der Hersteller deklariert die Effizienzklasse C und gibt eine Dauerverlustleistung unter Prüfbedingungen von 70 W an [7]. Weitere Daten siehe separater [Anhang D](#).

3.4 Salzhydratspeicher

Der Salzhydratspeicher (Latentwärmespeicher) hat eine Speicherkapazität von 128 kWh. Er kommt jedoch praktisch nicht zum Einsatz, da kaum Überschusswärme nach der Beladung der beiden anderen Speicher vorhanden ist. Daher sind alle weiteren Beschreibungen ebenso wie die Auswertung der Messwerte im Kapitel 7 zusammengefasst.

3.5 Solarnetz und Verteiler

Die Trinkwasserversorgung wird komplett im Bericht 12 behandelt. Dort finden sich u. a. vollständige Strangschemen für alle warm- und kaltwasserführenden Netze. Der Fernwärmeversorgung widmet sich der Bericht 9. Um Dopplungen zu vermeiden, werden die entsprechenden Netze an dieser Stelle nicht vertieft erläutert (Rohrlängen, Strangschemen usw.). Die nachfolgenden Ausführungen widmen sich primär dem mit Solarfluid gefüllten Verteilnetz zwischen dem Kollektor und den Speichern.

Kollektorkreis

Der Kollektorkreis besteht aus etwa 180 m flexibler Kupferleitung in DN 20 (18 m) und DN 25 (162 m). Die Leitungen sind entlang der Außenwand in der Wandkonstruktion der Aula geführt. In Höhe der Galerie werden sie nach innen geführt. In der Küche liegen die Leitungen dann in der abgehängten Decke, siehe Abbildung 3-15 und enden im Raum 0.33b.



Abbildung 3-15: Kollektorkreis Gebäudeeinführung und Querung der Küche

Im Solarspeicherraum sind die Rohre mit Mineralwolle gedämmt und mit Aluminium kaschiert (Abbildung 3-16). Im restlichen Gebäude ist eine Aerogel-Dämmung vorhanden (Abbildung 3-15), die dem Niveau EnEV-100% entspricht (5 mm mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,014 W/mK).



Abbildung 3-16: Dämmung mit alukaschierter Mineralwolle (Foto: HS MD)

Thermographie

Parallel zu einer Gebäudedichtheitsmessung erfolgte am 6.1.2016 eine Thermographie diverser Details in der Schule, z.B. der Solarthermieanlage. An dem klaren, sehr kalten Tag war die Solarthermieanlage in Betrieb. Die Wärmeabgabe der Kollektorleitungen an den Raum der Stille sowie die Aula wurde in der Thermographie sichtbar. Die Wandoberflächentemperaturen liegen etwa 2 K oberhalb der Raumtemperatur, siehe Abbildung 3-17 und Abbildung 3-18.

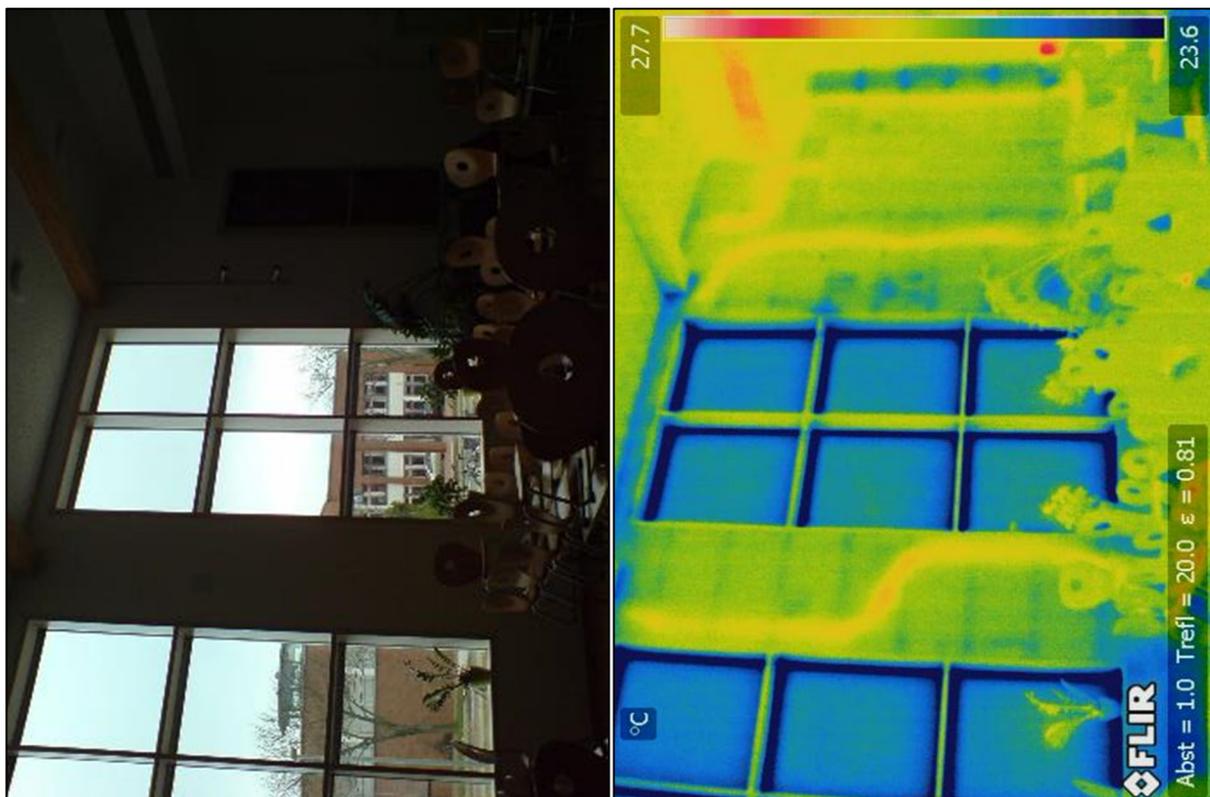


Abbildung 3-17: Thermographie Solarleitungen in der Aula am 6.1.2016 (Foto: HS MD)

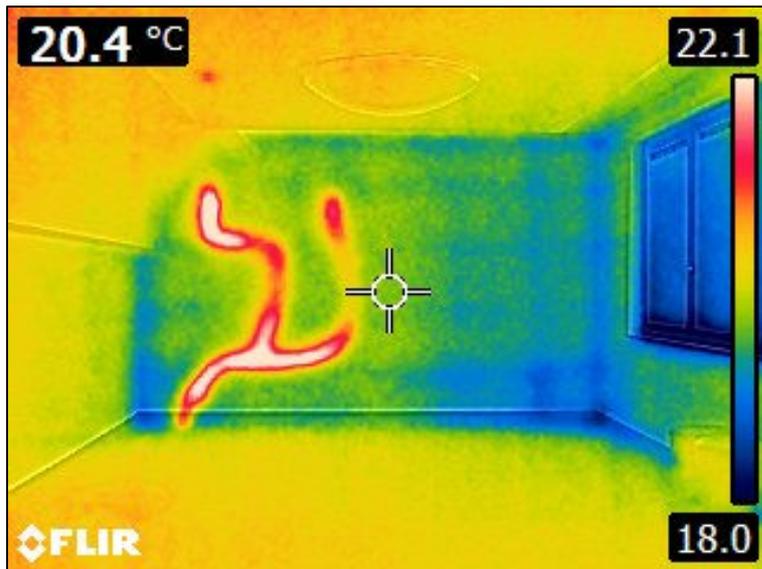


Abbildung 3-18: Thermographie Solarleitungen im Raum der Stille am 6.1.2016 (Foto: HS MD)

Zentraler Verteiler

Im gesamten Solarkreis strömt eine Mischung aus Wasser und 1,2-Propylenglykol als Solarfluid zum Einsatz, welche bis -30 °C frostsicher ist. Das zentrale Element des Solarnetzes ist ein Verteiler der Fa. ZORTSTRÖM, siehe Abbildung 3-19.

Der Verteiler weist ein Paar Anschlussstutzen an den Kollektorkreis auf. Darüber hinaus sind weitere Anschlussstutzenpaare für die 3 Speicher vorgesehen. Weitere Daten siehe separater Anhang F.

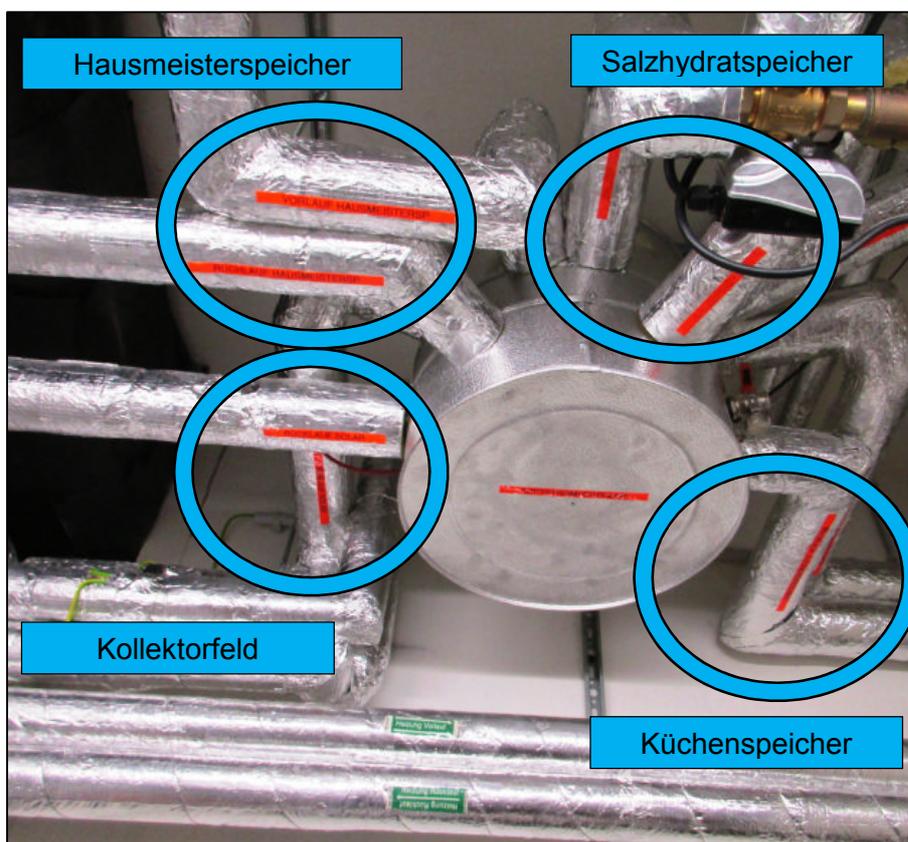


Abbildung 3-19: Zentraler Verteiler und Sammler mit 8 Anschlüssen (Foto: HS MD)

Salzhydratspeicher

Der Salzhydratspeicher ist analog dem Kollektorkreis an den ZORTSTRÖM-Verteiler angeschlossen. Bis zum Solarspeicherraum 0.33b wurde flexibles Kupferrohr mit Aerogel-Dämmung verwendet. Im Raum 0.33b selbst erfolgte die Installation aus Hartkupfer mit alukaschierter Mineralwolledämmung (100 % EnEV).

Ladekreise Pufferspeicher und Trinkwarmwasserspeicher

Die soleführenden Leitungsteile zur Speicherladung sind in Hartkupfer ausgeführt. Die Leitungen sind mit alukaschierter Mineralwolledämmung 100 % nach EnEV gedämmt.

Warmwassernetz Hausmeisterwohnung

Die Warmwasserversorgung für die Hausmeisterwohnung erfolgt mit Edelstahlrohr mit 100 % Dämmdicke nach EnEV (Mineralwolle, alukaschiert). Es gibt keine Zirkulation ins 2. OG. Die Nacherwärmung in der Wohnung erfolgt in der Wohnung mit zwei Durchlauferhitzern (24 kW im Bad Raum 2.23 bzw. 11 kW in der Küche Raum 2.29), die für solar vorgewärmtes Wasser zugelassen sind.

Warmwasser und Zirkulation in der Küche

Folgende Räume verfügen über einen Anschluss an die zentrale Warmwasserbereitung: Küche Raum 0.33, Spülküche Raum 0.33b, Personal-WC Raum 0.35. Die Ausführung erfolgt in Edelstahl. Die Dämmung für den gemeinsamen Anschluss der Küche 0.33 und des Personal-WCs 0.35 entspricht nicht der EnEV-Vorgabe. Hier ist nur eine dünne Vlies-Ummantelung der Rohre vorhanden, siehe Abbildung 3-20.



Abbildung 3-20: Nicht ausreichende Dämmung (Foto: HS MD)

Im Solarspeicherraum 0.33b sind auch die Absperrarmaturen und Pumpen nach EnEV gedämmt, siehe Abbildung 3-21.



Abbildung 3-21: Armaturen während der Ausführung und danach (Foto: HS MD)

3.6 Pumpen

Alle Kreisläufe sind mit Pumpen ausgestattet. Der Kollektorkreis ist mit der leistungsstärkeren Hocheffizienzpumpe WILO Stratos PARA 25/1-11 bestückt. Sie hat eine Leistungsaufnahme von 8 ... 140 W, siehe Abbildung 3-22.



Abbildung 3-22: Kollektorkreispumpe bis zum Solarverteiler (Foto: HS MD)

Alle vier Speicherladepumpen sind vom Typ WILO Stratos PARA 25/1-7. Es handelt sich um Hocheffizienzpumpen mit 5 ... 70 W Leistungsaufnahme, siehe Abbildung 3-24 bis Abbildung 3-26.



Abbildung 3-23: Ladepumpe Solarverteiler zum Pufferspeicher (Foto: HS MD)



Abbildung 3-24: Ladepumpe Solarverteiler zum Salzhydratspeicher (Foto: HS MD)



Abbildung 3-25: Ladepumpe Solarverteiler zum Hausmeisterspeicher (Foto: HS MD)

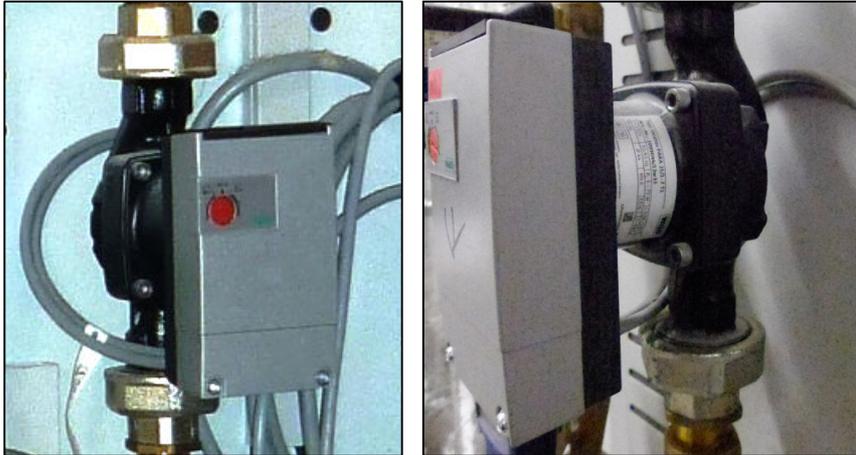


Abbildung 3-26: Pumpe zur Fernwärmenachheizung im Puffer (Foto: HS MD)

Die Trinkwarmwasserzirkulation erfolgt mit einer WILO Z Nova A mit 4,5 W Leistungsaufnahme, siehe Abbildung 3-27.

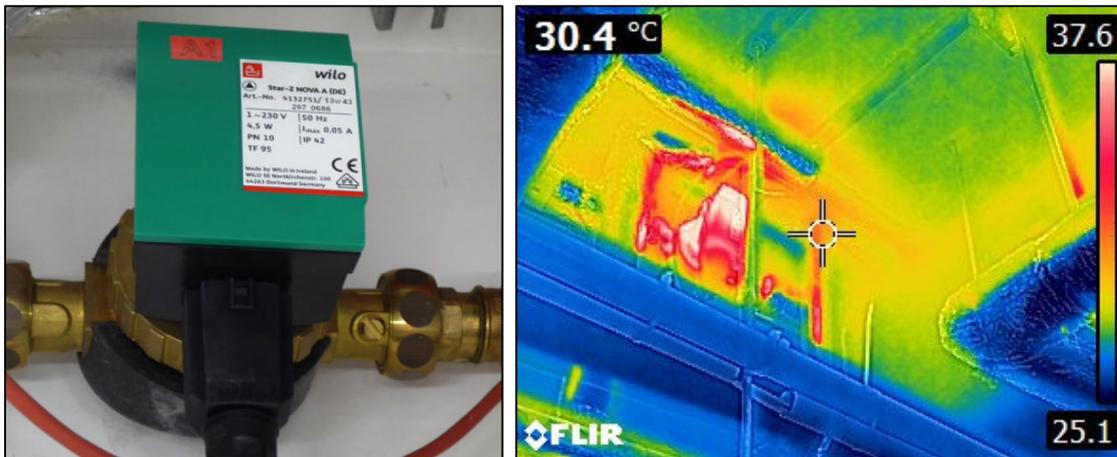


Abbildung 3-27: Zirkulationspumpe Küche incl. Thermographie (Foto: HS MD)

3.7 Regelmodul

Die zentrale Regelung des Solarmoduls sowie aller Pumpen erfolgt mit einem zentralen Regelmodul der Firma SET. Es ist im Solarspeicherraum 0.33b angeordnet, siehe Abbildung 3-28 und verfügt über einen Netzanschluss zum Monitoring.



Abbildung 3-28: Zentrale Regelung und Netzwerkanschluss SETSOLAR (Foto: HS MD)

Die Regelstrategie wird in Kapitel 5 beschrieben.

4 Messergebnisse Energie

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die vorhandene Messtechnik zur Beurteilung der Solarthermieanlage hinsichtlich ihres Energieverbrauchs sowie ihrer Betriebsweise und der korrekten regelungstechnischen Funktionen. Anschließend wird im Überblick die Jahresenergiebilanz vorgestellt und Einzelgrößen ausgewertet und interpretiert.

4.1 Messorte und Messtechnik

Tabelle 4-1 zeigt die Summe aller mit der Solarthermie verbundenen Messfühler. Sie sind einerseits extra für das Monitoringprojekt installiert worden (GEDES) oder waren bauseits im Solarmodul bereits vorhanden (SETSOLAR). Grundlegendes zu dieser Projektarchitektur wird in Bericht 4 erläutert.

Tabelle 4-1: Messpunkte bezüglich Solarthermie

Kürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
GEDES				
Kollektorfeld				
DF0220-161C-0	°C	SOL	KOL	Kollektortemperatur 1 Mitte
DF0220-166C-0	°C	SOL	KOL	Kollektortemperatur 1 oben
DF0220-162C-0	°C	SOL	KOL	Kollektortemperatur 1 unten
DF0220-164C-0	°C	SOL	KOL	Kollektortemperatur 2 Mitte
DF0220-163C-0	°C	SOL	KOL	Kollektortemperatur 2 oben
DF0220-165C-0	°C	SOL	KOL	Kollektortemperatur 2 unten
DF0384-7001-0	W/m ²	WET	WET	Globalstrahlung der Wetterstation
Pufferspeicher				
DF0220-6194-0	°C	SOL	PUF	Solespeicher Wärme Speicherausgang
DF0220-6198-0	°C	SOL	PUF	Solespeicher Wärme Speicherausgang
DF0220-6190-0	°C	SOL	PUF	Solespeicher Wärme Speichereingang
DF0220-6192-0	°C	SOL	PUF	Temperatur im Pufferspeicher Mitte
DF0220-619E-0	°C	SOL	PUF	Temperatur im Pufferspeicher oben
DF0321-614E-0	°C	SOL	PUF	Temperatur im Pufferspeicher oben
DF0220-619C-0	°C	SOL	PUF	Temperatur im Pufferspeicher unten
Hausmeisterspeicher				
DF0220-619A-0	°C	SOL	NTZ	Temperatur Kaltwasserzufuhr vom Versorger
DF0220-6196-0	°C	SOL	NTZ	Temperatur Trinkwarmwasser nach Hausmeisterspeicher
Hilfsenergie				
DF0118-61C6-0	A	SOL	HES	Strom Hilfsenergie der Solarthermie
DF0118-61C6-5	kW	SOL	HES	Leistung Hilfsenergie der Solarthermie
Nachheizung				
DF001A-61E8-0	kWh	SOL	PUF	Elektrische Nachheizung für Pufferspeicher
DF001A-61E6-0	kWh	SOL	HMS	Elektrische Nachheizung für Hausmeisterspeicher
SETSOLAR				
Kollektorfeld				
S1	°C	SOL	KOL	Kollektortemperatur Solarthermie
S11	W/m ²	WET	WET	Strahlungssensor der Solarthermie
S15	l/h	SOL	KOL	Durchfluss Sole im Kollektorkreis
S16	°C	SOL	KOL	Solar Vorlauftemperatur nach Erwärmung im Kollektor
kW1	kW	SOL	KOL	Momentanleistung Kollektor
kWh2	kWh	SOL	KOL	Gesamtertrag Kollektor
Pufferspeicher				
S8	0/1	SOL	NTZ	Strömungssensor Kaltwasserzufuhr in die Erwärmung
S4	°C	SOL	PUF	Temperatur Küchenspeicher ganz oben 20 Prozent
S5	°C	SOL	PUF	Temperatur Küchenspeicher Mitte oben 35 Prozent
S6	°C	SOL	PUF	Temperatur Küchenspeicher Mitte unten 65 Prozent
S3	°C	SOL	PUF	Temperatur Küchenspeicher ganz unten
S7	°C	SOL	NTZ	Temperatur Vorlauf Warmwasserbereitung in Umwälzstrecke
S2	°C	SOL	NTZ	Warmwasser Temperatur am Speicherausgang
S14	°C	SOL	NTZ	Zirkulation Rücklauftemperatur kurz vor Speicher

Kürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
Hausmeisterspeicher				
S12	°C	SOL	HMS	Temperatur Hausmeisterspeicher oben
S13	°C	SOL	HMS	Temperatur Hausmeisterspeicher unten
Verteiler				
S10	°C	SOL	NTZ	Temperatur Zortströmverteiler Vorlauf
S9	°C	SOL	NTZ	Temperatur Zortströmverteiler Rücklauf
Hilfsenergie				
A1	0/1	SOL	HES	Zustand Zirkulationspumpe für Trinkwarmwasser
A2	0/1	SOL	HES	Zustand Solarkreispumpe
A3	0/1	SOL	HES	Zustand Ladepumpe zwischen Zortström und Küchenpuffer
A4	0/1	SOL	HES	Zustand Ladepumpe zwischen Zortström und Salzspeicher
A5	0/1	SOL	HES	Zustand 12V CAN-Bus
A6	0/1	SOL	HES	Zustand Ladepumpe zw. Zortström und Hausmeisterspeicher
A7	0/1	SOL	HES	Zustand Umwälzpumpe im oberen Teil des Pufferspeichers
A10	0/1	SOL	HES	Zustand Ladepumpe Küchenspeicher Fernwärme
A11	0/1	SOL	HES	Zustand Magnetventil Fernwärme
Drz7	-	SOL	HES	Pumpenansteuerung für interne Speicherumwälzung; dimensionsloser Wert zwischen 0 und 30 (Stufen), mit dem die Pumpe A7 angesteuert wird zwischen Null- und Maximalwert
Nachheizung				
A12	0/1	SOL	PUF	Elektroheizung Patrone Küche 9 kW
A13	0/1	SOL	HMS	Elektroheizung Patrone Hausmeisterspeicher 6 kW

Anhand der Messdaten kann die gelieferte Solarenergie bilanziert werden sowie die Soleerwärmung im Kollektor nachvollzogen werden (Untergruppe KOL). Für den Pufferspeicher der Küche sind mehrere Temperaturen verfügbar, anhand derer die Temperaturschichtung nachvollzogen werden kann (Untergruppe PUF). Analoges gilt für den Hausmeisterspeicher (Untergruppe HMS), wobei hier zusätzlich die Kaltwassereintritts- und Warmwasseraustrittstemperaturen erfasst werden (Untergruppe NTZ). Dies dient der Berechnung der Energiemenge der solaren Vorwärmung.

Anhand der Zustandsdaten der einzelnen Hilfsenergieverbraucher kann eine überschlägige Strombilanz erfolgen sowie die Regelprogramme geprüft werden (Untergruppe HES). Darüber hinaus wird die summierte Hilfsenergieleistung an der Unterverteilung erfasst. Zudem wird die elektrische Nachheizung beider Speicher gemessen.

Es gilt für die thermische Energiebilanz der Solarzentrale:

$$Q_{input} = Q_{output}$$

$$Q_{Kollektor} + Q_{elektrisch} = Q_{Nutzen} + Q_{Verluste}$$

Der Ertrag aus dem Kollektorfeld $Q_{Kollektor}$ wird der Speicherzentrale zugeführt – Auswertung siehe Kapitel 4.3. Damit wird der Pufferspeicher für die Küche sowie der Trinkwarmwasserspeicher für den Hausmeister geladen.

Sofern die Solarwärme nicht ausreicht, wird der Küchenpuffer mit Strom nachgeheizt, bis der Sollwert erreicht ist. Während der Hausmeisterspeicher nur maximal einmal die Woche elektrisch nachgeheizt wird, um den Legionellenschutz sicherzustellen. Auswertung der elektrischen Energie $Q_{elektrisch}$ siehe Kapitel 4.4.

Auf der anderen Seite wird im Pufferspeicher das Trinkwasser für die Küche auf eine feste Endtemperatur erwärmt, während im Hausmeisterspeicher nicht nachgeheizt wird, so dass die Warmwasseraustrittstemperatur variabel ist. Beide gezapften Energiemengen Q_{Nutzen} werden detailliert in Kapitel 5.2 ausgewertet.

Die nicht nutzbar gemachten Energiemengen sind den Verlusten der Verrohrung sowie der Speicher Q_{Verluste} zuzuordnen, siehe 4.5.

Entfallen konnte die Bilanzierung der Nachheizung des Pufferspeichers per Fernwärme, da diese nicht stattfindet. Weitere Erläuterungen liefert das Kapitel 5 zur Regelung und Hydraulik. Auch der Latentwärmespeicher musste nicht bei der Wärmebilanz berücksichtigt werden, da kein nennenswerter Betrieb zu verzeichnen ist, siehe Kapitel 7.

4.2 Gesamtbilanz

Abbildung 4-1 zeigt die Jahresergebnisse der thermischen Energiebilanzen für das Solarsystem. Die beiden Betriebsjahre 2015 und 2016 sehen sich sehr ähnlich und können auch mit einer Solarsimulation nachvollzogen werden, siehe Kapitel 5. Das Betriebsjahr 2017 fällt aus der Reihe. Hier ist nach dem Wechsel des Küchenbetreibers ein sehr viel geringerer Bedarf an Warmwasser (Nutzwärme) feststellbar, was entsprechend Rückwirkungen auf die Bilanz hat.

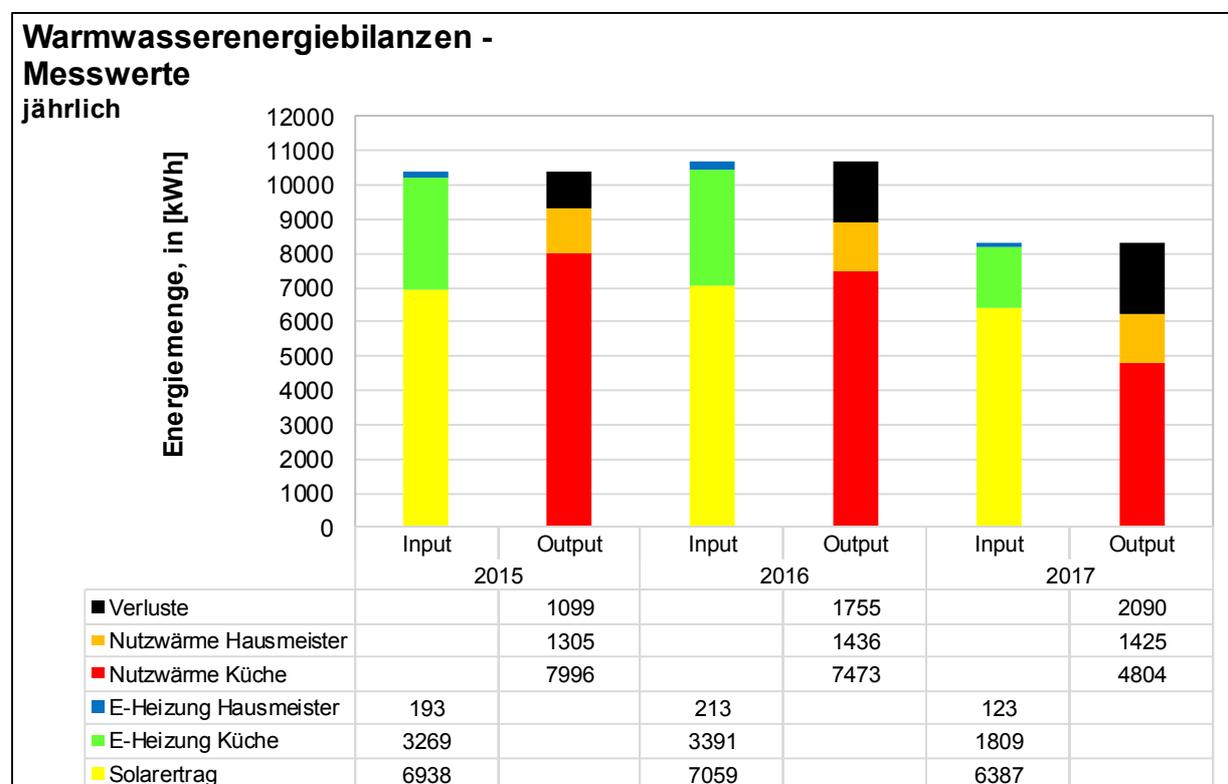


Abbildung 4-1: Zusammenfassung der Jahreswerte der Messungen 2015 – 2017

Insgesamt ergibt sich ein solarer Deckungsanteil von 66 ... 67 % bzw. im letzten Jahr von 77 %. Der zu 100 % fehlende Anteil entfällt auf die elektrische Nachheizung.

Die Nutzwärme macht 89% bzw. 84 % sowie im letzten Jahr 75 % der Energiezufuhr aus. Der verbleibende Rest sind entsprechend Systemverluste von 11 %, 16 % bzw. 25 %. Hier ist die Messgenauigkeit insbesondere bis Mitte 2016 sehr hoch.

Monatsbilanzen

Tabelle 4-2 schlüsselt die Werte monatlich auf. Die farbig hinterlegten Zellen der Tabelle zeigen gesicherte Messwerte für den betreffenden Monat aus dem Monitoring. Die nicht farbig hinterlegten Zellen sind per rechnerischer Näherung ermittelt worden und somit unsicherer. Die Näherungsverfahren werden unter der Tabelle erläutert.

Rechnerisch negative Verluste ergeben sich aufgrund von Mess- oder Rechenunsicherheiten. Bereits relativ kleine relative Fehler bei der Bestimmung der großen absoluten Bilanzanteile – also des Solarertrags und der Nutzwärme – sind dafür maßgeblich.

Die Jahressummen sind jeweils mit den geringsten Fehlern behaftet, da es für alle Hauptzähler eine manuelle Stichtagsablesung zu Jahresbeginn gab.

Tabelle 4-2: Zusammenfassung der Monatswerte der Messungen 2015 - 2017

	Solarertrag	E-Heizung Küche	E-Heizung Hausmeis- ter	Input = Output	Nutzwärme Küche	Nutzwärme Hausmeis- ter	Verluste
Januar	500	623	23	1147	944	93	110
Februar	449	440	21	910	741	94	75
März	638	395	18	1051	1008	107	-64
April	673	208	15	896	550	119	228
Mai	739	190	13	943	465	138	340
Juni	678	53	6	737	309	134	295
Juli	465	35	0	500	62	135	303
August	773	60	6	838	605	126	107
September	761	35	1	797	868	109	-180
Oktober	444	322	25	790	611	83	97
November	410	572	38	1020	1234	84	-298
Dezember	409	335	25	770	600	83	87
2015	6938	3269	193	10400	7996	1305	1099
Januar	412	657	32	1101	949	94	59
Februar	382	464	29	875	755	94	26
März	375	417	25	817	1047	131	-361
April	655	220	20	895	543	148	205
Mai	739	201	18	958	192	169	597
Juni	696	56	9	760	271	133	356
Juli	487	29	0	515	91	75	349
August	899	61	5	965	693	131	141
September	1025	36	1	1062	887	149	27
Oktober	324	327	21	672	512	90	70
November	512	582	32	1127	999	107	20
Dezember	554	341	22	917	534	116	266
2016	7059	3391	213	10663	7473	1436	1755
Januar	464	513	21	998	917	101	-21
Februar	486	362	19	867	690	90	88
März	843	325	17	1185	980	149	56
April	655	171	14	840	573	158	109
Mai	703	157	12	871	653	159	59
Juni	628	43	6	677	406	117	155
Juli	422	22	0	444	57	74	313
August	620	0	0	620	95	134	391
September	483	6	0	489	106	115	267
Oktober	530	12	0	542	68	114	361
November	297	80	7	384	152	116	116
Dezember	258	117	26	401	106	98	197
2017	6387	1809	123	8319	4804	1425	2090
farbig hinterlegte Zellen: Monatswerte aus Messwerten nicht farbig hinterlegte Zellen: rechnerische Aufteilung von Jahreswerten							

Der Solarertrag wird ab Anfang 2016 im Monitoring erfasst. In der Zeit davor ist nur die Jahressumme bekannt. Die monatliche Aufteilung erfolgt anhand des Jahresganges der Erträge aus den Jahren 2016 und 2017. Es erfolgt keine Berücksichtigung der abweichenden Solarstrahlung, da insbesondere die Feriensituation deutlich maßgeblicher ist.

Die elektrische Nachheizung für die beiden Speicher ist ab Mitte 2016 im Monitoring enthalten. Vorher liegen im Abstand von durchschnittlich 2 Monaten manuelle Zählerablesungen vor. Jahreswerte sind daher bekannt. Die monatlichen Zwischenwerte wurden aus den bekannten Jahresenergiemengen generiert, wobei der Jahresgang der Messperiode Sommer 2016 bis Sommer 2017 zugrunde gelegt wurde.

Die Nutzwärmemengen für das Warmwasser sind ebenfalls seit Mitte 2016 regelmäßig erfasst – das betrifft hier vor allem die Wassermengen. Vorher erfolgten etwa alle 2 Monate manuelle Ablesungen der Wasserzähler. Die monatlichen Wassermengen wurden anhand der Messperiode Sommer 2016 bis Sommer 2017 aus den bekannten Jahressummen näherungsweise bestimmt. Die Umrechnung der Wasser- in Wärmemengen erfolgte unter Berücksichtigung der Solarstrahlung. Je nach Strahlungsintensität wird eine andere Temperaturerhöhung des Wassers erreicht. Die gewählten Näherungen sind Anhang 8.4 zu entnehmen.

Detailanalyse 2017

Abbildung 4-2 stellt die Wärmezufuhr in das Solarsystem für das Jahr 2017 monatlich vor. Es handelt sich vollständig um reale Messwerte (die nicht rechnerisch aus Jahreswerten entstanden sind). Erkennbar ist, dass zwischen Juli und Oktober keine elektrische Nachheizung des Hausmeisterspeichers erfolgte, da in jeder Betriebswoche mindestens einmal allein aufgrund der Solarthermie eine thermische Desinfektion des Speichers (Vollerwärmung auf 60°C) erfolgte.

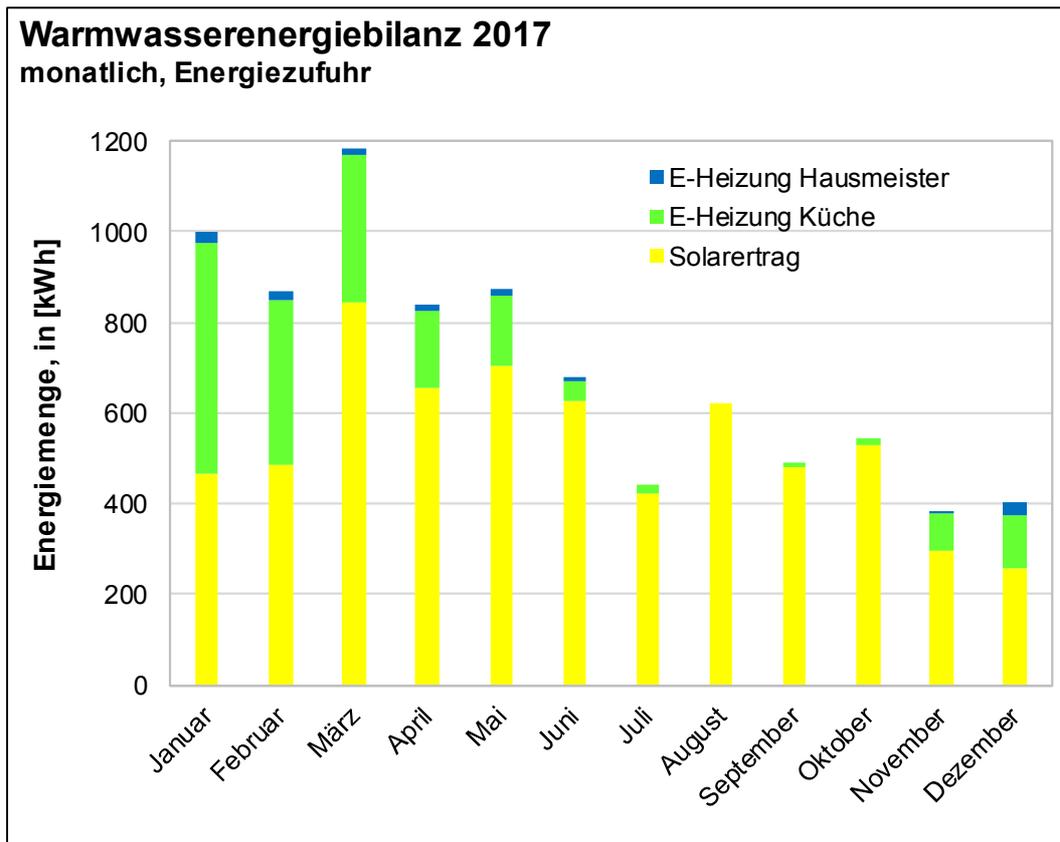


Abbildung 4-2: Monatliche Detailanalyse der Trinkwassererwärmung 2017 – Energiezufuhr

Abbildung 4-3 zeigt detailliert die monatlichen Nutz- und Verlustwärmemengen für das Betriebsjahr 2017. Die Nutzwärmemengen der Küche schwanken mit dem Anteil von Schul- und Ferienhortbetrieb. Andererseits hat ab August die Küche einen neuen Betreiber. Dies führt zu einer radikal verminderten Nutzwärmemenge. Der neue Pächter betreibt die Küche zum großen Teil als Aufwärmküche, während der vorherige Pächter alles frisch vor Ort gekocht hatte.

Das vermindert das Spülen von Kochgeschirr. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass das Vorspülen des Essgeschirrs vor der Reinigung in der Spülmaschine unter dem neuen Betreiber mit Kaltwasser (oder kälterem Wasser als früher) erfolgt.

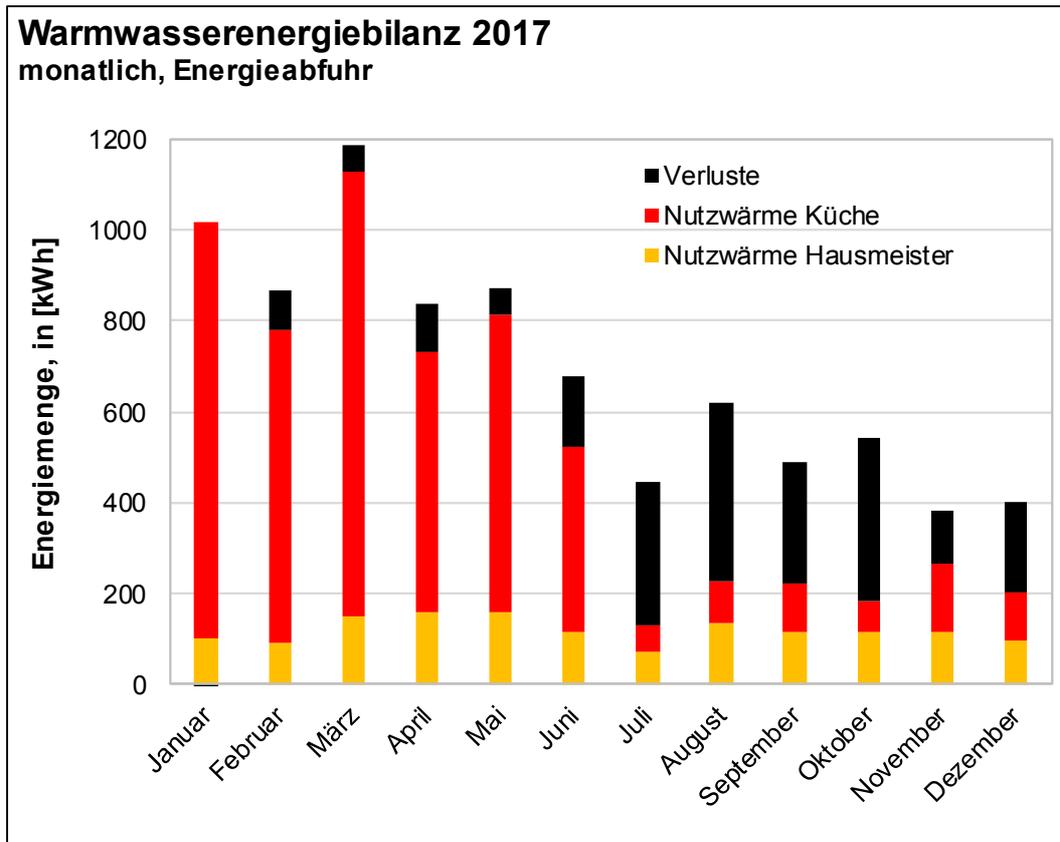


Abbildung 4-3: Monatliche Detailanalyse der Trinkwassererwärmung 2017 – Energieabfuhr

Ebenfalls ist unklar, ob die rechnerisch bestimmten Verluste (Input minus Nutzen) tatsächlich gestiegen sind oder ob ein Messfehler vorhanden ist. Der Warmwasserzähler liefert nur alle 100 Liter ein Impulssignal, so dass die Messung bei fallendem Durchsatz ungenauer wird. Andererseits ist es auch plausibel, dass es zu größeren Verlusten kommt, wenn das Wasser nicht aus dem Speicher gezapft wird und dieser entsprechend einfach auskühlt.

4.3 Kollektorkreisertrag

Der Ertrag des Kollektorfeldes liegt in den drei Untersuchungsjahren 2015 bis 2017 bei 6900 kWh/a, 7100 kWh/a und 6400 kWh/a. Die zugehörigen Globalstrahlungen gibt der Deutsche Wetterdienst mit 1130 kWh/a, 1050 kWh/a und 1050 kWh/a an [2].

Der Strahlungsdurchschnitt für Halle liegt bei 1050 kWh/a [2]. Damit sind die Jahre 2016 und 2017 durchschnittlich, was das Solarangebot angeht. Im Jahr 2015 war die Solarstrahlung 8 % höher.

Der Ertrag des ersten Betriebsjahres hätte daher etwas höher ausfallen können. Da aber insbesondere auch die Lage der Sommerferien von Relevanz ist, besteht keine erkennbare Korrelation zwischen Strahlungsangebot und Kollektorertrag. Wohl aber ist die sinkende Nutzwärmemenge im Jahr 2017 zu erkennen.

Sie führte dazu, dass deutlich weniger Solarenergie nutzbar gemacht werden konnte. Trotz gleichen Strahlungsangebotes, sank der Kollektorkreisertrag um etwa 10 %. Es ergab sich mehr ungenutztes Solarangebot.

Der Ertrag je Kollektorfläche der im Schnitt der Jahre 2015/2016 gemessene Kollektorertrag liegt bei 214 kWh/(m²a) bezogen auf die Aperturfläche bzw. bei 163 kWh/(m²a) bezogen auf die Bruttokollektorfläche. Damit liegt er etwas über der Simulationsprognose, siehe Kapitel 5.4.

Aus den Messwerten des Betriebsjahres 2016 kann im Rahmen des Monitorings eine Jahresdauerlinie erstellt werden, siehe Abbildung 4-4. Es zeigt sich, dass es etwa 1900 Stunden pro Jahr (gut 1/5 des Jahres) eine Kollektorkreisleistung zu verzeichnen ist, die nutzbar gemacht werden kann. Die auf Basis von Stundenwerten erzielte Maximalleistung des Kollektorkreises liegt bei etwa 13,5 kW.

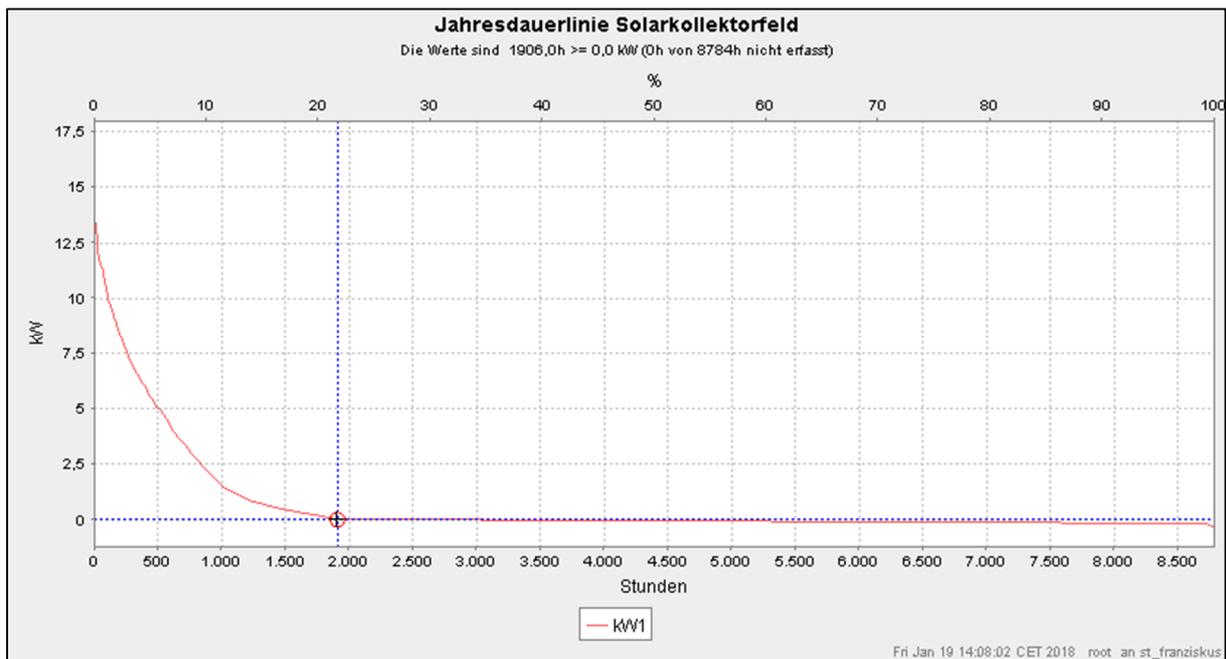


Abbildung 4-4: Jahresdauerlinie der Solarthermie aus Messwerten 2016

4.4 Elektronachheizung

Die monatliche Elektronachheizung für die Küche zeigt Abbildung 4-5. Ausgewertet ist das Betriebsjahr Juli 2016 bis Juli 2017. Dies ist der Zeitraum nach finaler Inbetriebnahme des Monitorings bis zum Zeitpunkt der Übernahme durch den neuen Küchenbetreiber. Die monatliche Verteilung des Nachheizbedarfs ist geprägt durch den Solarertrag sowie die Verteilung der Ferienzeiten.

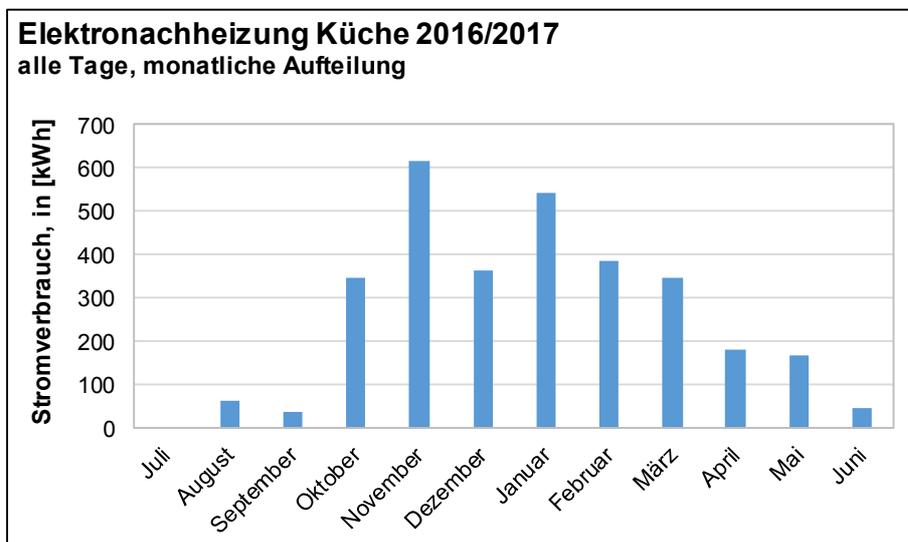


Abbildung 4-5: Monatliche Elektronachheizung des Küchenpuffers 2016/17

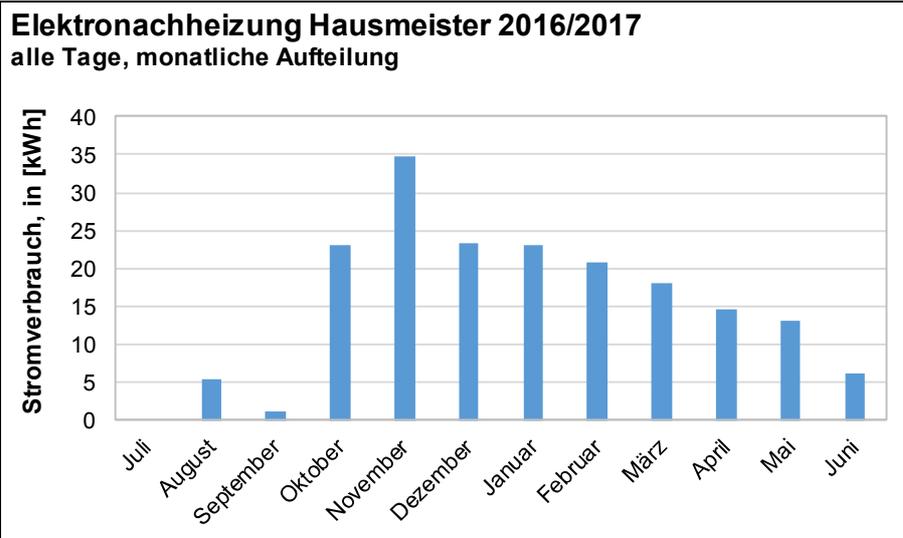


Abbildung 4-6: Monatliche Elektronachheizung des Hausmeisterspeichers 2016/17

Abbildung 4-6 zeigt die Ergebnisse für den Hausmeisterspeicher. In den Monaten mit hohen Solarerträgen sinkt der Stromverbrauch. Falls in jeder Betriebswoche einmal eine vollständige Speichererwärmung allein aufgrund der Solarerträge verzeichnet wird, ergibt sich kein Nachheizbedarf. Ansonsten erfolgt einmal je Woche eine Aufheizung zum Legionellenschutz.

4.5 Speicher- und Zentralenwärmeverluste

Maßgeblich für die Systemverluste sind die Speicher. Der Pufferspeicher der Fa. Zeeh hat laut Energieverbrauchskennzeichnungsrichtlinie eine Dauerverlustleistung von 190 W [6]. Der Hausmeisterspeicher wird mit 70 W deklariert [7]. Für beide Ecodesign-Messwerte gilt eine Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Aufstellraum von 45 K.

Im realen Betrieb sind die Temperaturdifferenzen weit kleiner. Die Temperatur im Solarspeicherraum 0.33b wird nicht separat erfasst. Allerdings gibt es die Anlegefühler für das Kalt- und Warmwasser am Hausmeisterspeicher, welche – wenn keine Zapfung erfolgt – etwa Raumtemperatur annehmen. Eine Auswertung dieser Messwerte zeigt nachfolgende Tabelle.

Tabelle 4-3: Temperaturdifferenzen Speicher zum Aufstellraum

	Temperatur Hausmeisterspeicher	Temperatur im Pufferspeicher	Raumtemperatur	$\Delta\vartheta_{HM}$, in [K]	$\Delta\vartheta_{Puffer}$, in [K]
Messwert	SETSOLAR S12, S13	SETSOLAR S3, S4, S5, S6	GEDES DF0220-6196-0 DF0220-619A-0		
Juli 2016	56	67	26	30	41
August 2016	55	65	27	28	38
September 2016	58	71	26	31	44
Oktober 2016	40	48	25	15	23
November 2016	33	40	23	10	16
Dezember 2016	38	52	23	15	29
Mittelwert	47	57	25	22	32

Als Temperaturen in den Speichern werden die Mittelwerte der vier bzw. zwei Messstellen der Fa. SETSOLAR verwendet. Danach belaufen sich die Temperaturdifferenzen zwischen Speicher und Aufstellraum nur auf 22 K bzw. 32 K. Es kann eine Umrechnung der Prüfstandsverlustleistung in eine reale Verlustleistung erfolgen:

$$\dot{Q}_{real} = \frac{\Delta\vartheta_{real}}{\Delta\vartheta_{prüf}} \cdot \dot{Q}_{prüf}$$

$$\dot{Q}_{real} = \frac{22K}{45K} \cdot 70W + \frac{32K}{45K} \cdot 190W = 169W$$

Eine Dauerverlustleistung von 169 W ergibt innerhalb eines Jahres eine Energiemenge von 1480 kWh/a. Die Verlustleistungen der Rohre könnten ähnlich bestimmt werden. Es wird darauf verzichtet, denn die Messwerte für die Jahre 2015 bis 2017 belaufen sich auf im Mittel 1650 kWh/a und werden als plausibel eingeschätzt.

4.6 Hilfsenergie

Die Hilfsaggregate der Solarthermie sollten ursprünglich komplett über eine Summenmessung in der Unterverteilung erfasst werden. Tatsächlich erfasst der Stromflusssensor von GEDES einen Verbraucher mit etwa 8 W Dauerleistung. Daher ist davon auszugehen, dass es sich nicht um die Summe aller Pumpen, Stellmotoren usw. handelt, sondern lediglich um das Regelmodul selbst.

Abbildung 4-7 zeigt eine Schätzung des Hilfsenergieverbrauchs für alle Verbraucher des Solarmoduls im Jahr 2016. Die Laufzeit der Komponenten kann dem Monitoring entnommen werden. Die Leistung ist nicht bekannt. Es wird davon ausgegangen, dass alle Ladepumpen im Schnitt mit halber Leistung (der auf dem Typenschild angegebenen Spannbreite) laufen. Die Zirkulationspumpe läuft mit Nennleistung.

Die Gesamtenergiemenge beläuft sich auf 238 kWh/a. Abbildung 4-8 zeigt die Verteilung auf die einzelnen Verbraucher.

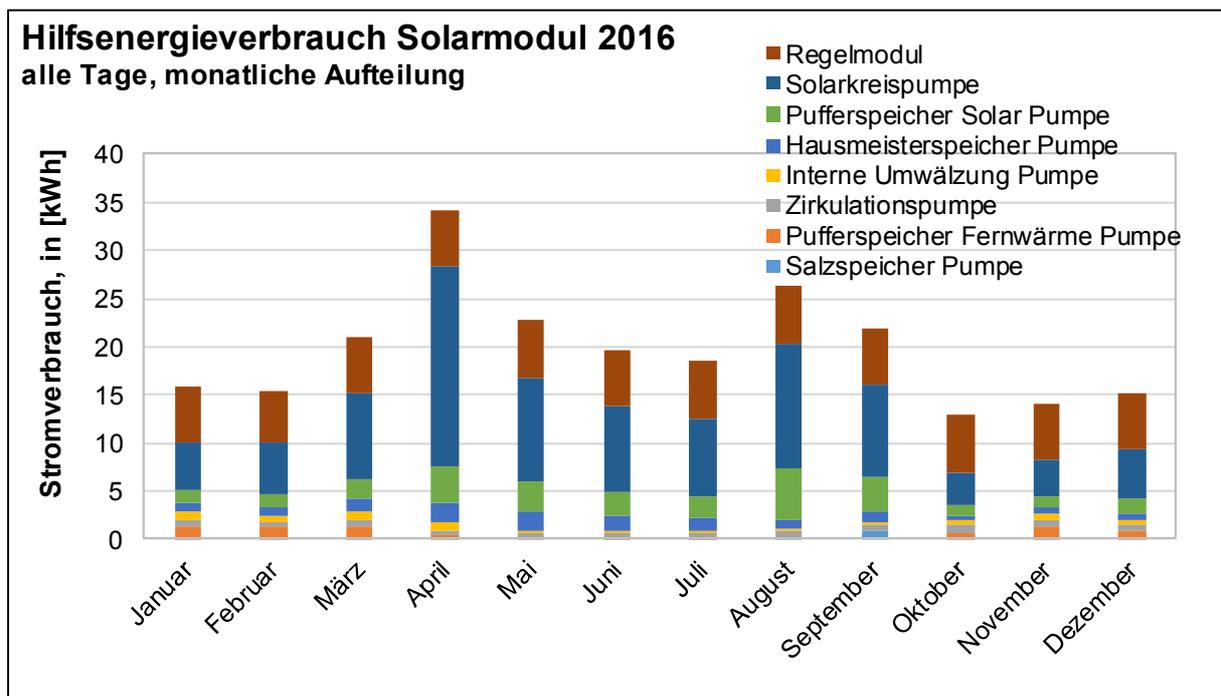


Abbildung 4-7: Monatliche Hilfsenergie des Solarmoduls 2016

Hilfsenergieverbrauch Solarmodul 2016 alle Tage, Aufteilung nach Verbrauchern

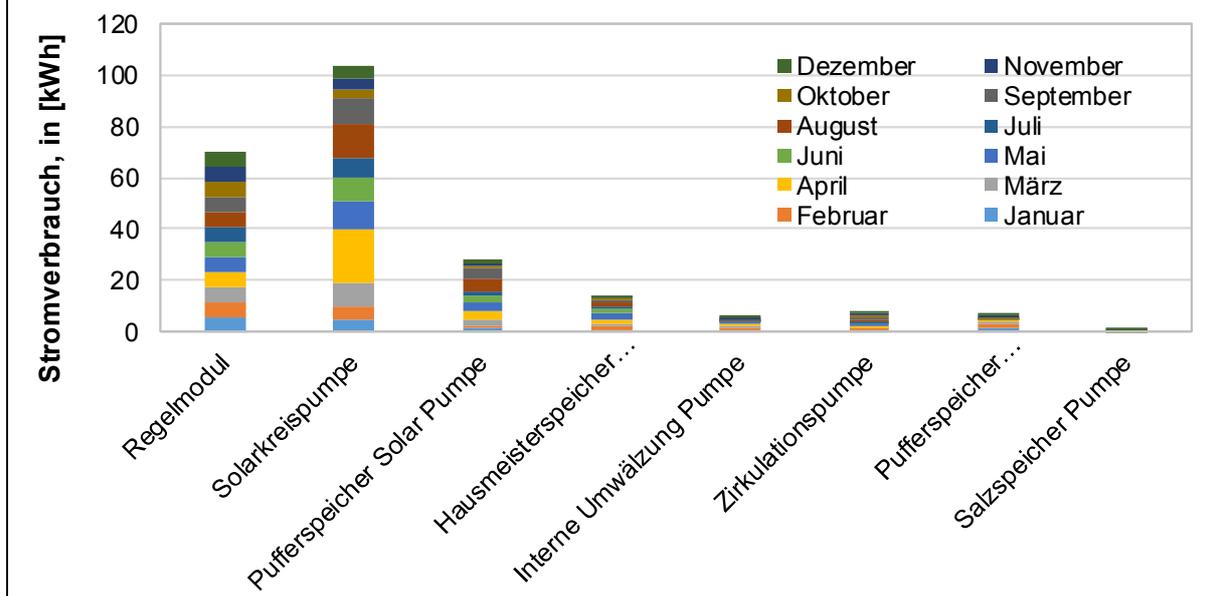


Abbildung 4-8: Hilfsenergie des Solarmoduls nach Verbrauchern 2016

Der Hilfsenergieverbrauch ist als gering einzuschätzen. Selbst unter der Annahme, alle Verbraucher liefen auf Maximalleistung, wären nur knapp 400 kWh/a zu verzeichnen.

4.7 Wirtschaftliche Einordnung

Zur wirtschaftlichen Einordnung des Systems gelten folgende Energiepreise:

- Fernwärme, nur Arbeitspreis: 0,06 €/kWh (auf Basis der Versorgerabrechnung von 2015 aufgerundet)
- Strom, Einkauf, Gesamtpreis: 0,27 €/kWh (auf Basis der Versorgerabrechnung von 2017 gerundet)
- Strom, Verkauf PV: 0,12 €/kWh (aufgrund des Installationsdatums sowie der geltenden vertraglichen Einspeisevergütungen)

Während der Phasen, in denen der Küchenpufferspeicher nachgeladen wird, kann entweder selbst erzeugter PV-Strom verwendet werden oder Netzstrom. Die im Anhang 8.4 hinterlegte Auswertung führt zu folgendem Ergebnis:

- Anteil Netzstrombezug in den Phasen der Speicherladung 65 %, Eigenerzeugung 35 %

Als relevante Energiemengen sind zu nennen:

- Solarertrag: 7000 kWh/a (Mittelwert 2015, 2016)
- Elektrische Nachheizung: 3500 kWh/a (Mittelwert 2015, 2016)
- technische Verluste des Speichers: 1650 kWh/a (Mittelwert 2015 – 2017)

Die Kosten des Solarsystems incl. Speicher und Kollektorfeld (jedoch ohne Salzhydratspeicher) belaufen sich auf:

- Investition: 87.500 €
- Jährliche Rate für 20 Jahre Lebensdauer: 4.375 €/a

Zur Vereinfachung wird zunächst ohne Annahmen von Zinsen und Energiepreissteigerungen sowie ohne Wartungskosten gerechnet. Da die Hilfsenergie gegenüber den anderen energetischen Größen so gering ist, entfällt sie ebenfalls zunächst.

Vergleich mit reiner Fernwärmeversorgung

Anstelle der Solarthermieanlage mit elektrischer Nachheizung wird ein Fernwärmeanschluss verwendet.

Der geplante Nutzen an Warmwasser ist für beide Fälle identisch. Es wird davon ausgegangen, dass die technischen Verluste geringer wären, weil andere/kleinere Speicher zum Einsatz kämen, geschätzt entfielen etwa 1000 kWh/a der Verluste.

Der Solarertrag sowie der Einkauf von Strom aus dem Netz für die elektrische Nachheizung entfallen bei der Version mit Fernwärme. Der Stromanteil, der sonst selbst erzeugt und genutzt wurde, wird nun ins Netz zurückgespeist.

Werden die jeweiligen Energiemengen mit den Preisen ausmultipliziert, ergeben sich 614 €/a für die Version mit der Solarthermieanlage bzw. 423 €/a für die reine Fernwärmeversorgung. Allein auf Basis der Energiekosten schneidet die Fernwärmelösung besser ab, siehe Tabelle 4-4.

Tabelle 4-4: Energiekostenvergleich mit reiner Fernwärmeversorgung

Version	Solar/Strom (Ist)	Fernwärme	Preise
Bilanzposten	Menge in [kWh/a]	Menge in [kWh/a]	in [€/kWh]
Bedarfe			
Nutzen	+ 8.850	+ 8.850	
Verluste	+ 1.650	+ 650	
Summe	= 10.500	= 9.500	
Deckung			
Solarertrag	+ 7.000	+ 0	0,00
Stromeinkauf	+ 3.500 · 0,65	+ 0	0,27
Stromerzeugung	+ 3.500 · 0,35	+ 3.500 · 0,35	0,00
Stromverkauf	- 0	- 3.500 · 0,35	0,12
Fernwärmeeinkauf	+ 0	+ 9.500	0,06
Summe	= 10.500	= 9.500	
Kosten	614 €/a	423 €/a	

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten, vernachlässigten Wartungskosten und der Hilfsenergien für Pumpen ist absehbar, dass die reine Fernwärmelösung deutlich günstiger gewesen wäre.

Das gilt nicht für das Projekt St. Franziskus, da Fördermittel für die Solarthermiefassade gewährt wurden. Ohne die Förderung ergibt sich unter den Bedingungen in Halle eine Unwirtschaftlichkeit.

Vergleich mit kombinierter Fernwärmeversorgung

Anstelle der Nachheizung mit Strom könnte auch Fernwärme zum Einsatz kommen. Im besten Falle wird dabei der Strom komplett ersetzt. Die Solarthermie bleibt wie vorhanden. Der Stromanteil, der sonst selbst erzeugt und genutzt wurde, wird nun ins Netz zurückgespeist.

Tabelle 4-5: Energiekostenvergleich mit kombinierter Solar/Fernwärmeversorgung

Version	Solar/Strom (Ist)	Solar/Fernwärme	Preise
Bilanzposten	Menge in [kWh/a]	Menge in [kWh/a]	in [€/kWh]
Bedarfe			
Nutzen	+ 8.850	+ 8.850	
Verluste	+ 1.650	+ 1.650	
Summe	= 10.500	= 10.500	
Deckung			
Solarertrag	+ 7.000	+ 7.000	0,00
Stromeinkauf	+ 3.500 · 0,65	+ 0	0,27
Stromerzeugung	+ 3.500 · 0,35	+ 3.500 · 0,35	0,00
Stromverkauf	- 0	- 3.500 · 0,35	0,12
Fernwärmeeinkauf	+ 0	+ 3.500	0,06
Summe	= 10.500	= 10.500	
Kosten	614 €/a	63 €/a	

Es ist aus energetischer Sicht ein deutlicher Vorteil der Solar/Fernwärmelösung erkennbar. Für die Schule St. Franziskus ist dieser Betrieb (oder eine anteilige Fernwärmenutzung zur Nachheizung, siehe Kapitel 6.9) empfehlenswerter.

Gesamtwirtschaftlich und unter Beachtung der Investitionskosten sowie Wartungskosten für die Solarthermie gelten die oben zur "reinen Fernwärmeversorgung" getroffenen Aussagen.

4.8 Fazit

Die Solarthermie liefert – in Anbetracht der Kollektorfeldgröße und Neigung – die erwarteten Erträge. In den ersten beiden Betriebsjahren wurden 7.000 kWh/a erreicht. Der Kollektorkreis-ertrag liegt bei 214 kWh/(m²a) bezogen auf die Aperturfläche bzw. bei 163 kWh/(m²a) bezogen auf die Bruttokollektorfläche.

Fazit aus Sicht der St. Franziskus-Grundschule

Da die Investition in die Anlage staatlich gefördert wurde, zählt letztlich vor allem der laufende Betrieb – nicht der Kapitalkostenanteil. Die Wirtschaftlichkeit ließe sich verbessern, wenn an-stelle des Stroms (anteilig oder vollständig) Fernwärme zur Nachheizung des Küchenpuffers verwendet würde.

Fazit aus Sicht anderer Schulen

Die jährlichen Kapitalkosten (ohne Zinsen) liegen bei 4.375 €/a über 20 Jahre. Sofern im all-gemeinen keine Fördermittel zu erwarten wären, werden mit diesem Geld 7000 kWh/a Solar-ertrag generiert. Das führt zu einem äquivalenten Energiepreis von 0,625 €/kWh und damit einer Unwirtschaftlichkeit. Unberücksichtigt sind bei der Betrachtung die Wartungskosten, die das Problem verschlechtern.

Sofern die Investitionen nicht zu wenigstens 80 % gefördert sind oder entsprechend von Vorn-herin niedriger liegen, muss aus wirtschaftlicher Sicht von dieser Technik abgeraten werden. Wenn auch sie das Gebäude natürlich dem Nullenergieniveau näher bringt.

5 Warmwasserbedarf und Solarsimulation

Das nachfolgende Kapitel erläutert die Ergebnisse der Solarsimulation für die Küche bzw. Hausmeisterwohnung.

Basis der Simulation ist der Warmwasserbedarf samt einer Aussage zur Verteilung über die einzelnen Monate des Jahres, die Woche und den Tag. Es werden daher zunächst die Bedarfsprognosen von 2014 (vor Inbetriebnahme) sowie 2016 (nach 2 Betriebsjahren) sowie die Verbrauchsmessergebnisse des Monitorings vorgestellt.

Auf der Basis werden zwei Simulationen ausgewertet: die Prognose von 2014 sowie die angepasste Simulation von 2018. Ein Abgleich zur tatsächlichen Ertragsmessung wird gezogen.

5.1 Warmwasserbedarf

In der Planungsphase wurde für die Küche ein Warmwasserbedarf von ca. 1000 Litern pro Tag veranschlagt. Auf dieser Basis erfolgt die Bemessung der beiden Speicher sowie des Kollektorfeldes. Eine Solarsimulation lag in der Planungsphase nicht vor.

5.1.1 Bedarfsprognose 2014

Die erste detaillierte Bedarfsprognose für das Warmwasser stammt aus dem Jahr 2014. Sie wurde im Zusammenhang mit einer Bachelorarbeit erstellt [8]. Der Küchenbetrieb wurde zeitgleich aufgenommen, so dass Ansprechpartner verfügbar waren, jedoch noch keine Messergebnisse bekannt waren.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein monatlicher Warmwasserbedarf allein für die Küche abgeschätzt. Das Zapfprofil im Tagesgang wurde nicht untersucht. Basis waren folgende Annahmen:

- Anzahl der täglichen Essen: 400 Stück zu Schulzeiten, 60 Stück zu Ferienzeiten
- Anschluss an das Warmwassernetz haben
 - 1 Geschirrspülmaschine Profi AMX-16 der Firma Hobart
 - 1 Cookingcenter Multificiency 211 der Firma Vario
 - 2 Kombidämpfer Multimax B 10-11 der Firma Eloma
 - 2 Vorbereitungs- und Handwaschbecken
 - Kochkessel (auf dem Herd)
- Verbrauchsmengen für morgendliche Erstbefüllung mit Wasser, laufenden Betrieb sowie tägliche Endreinigung lt. Küchenplaner [9]

Der Warmwasserbedarf der Küche lässt sich über die Anzahl der Essen, die Anzahl der Durchläufe und den Warmwasserbedarf der Geräte hochrechnen. Die folgenden Tabellen und Abbildungen geben die 2014 getroffenen Anhaltswerte für Schultage, Ferientage und die Anteile einzelner Geräte wieder.

Tabelle 5-1: Anzahl der Betriebsdurchgänge [9]

Verbraucher	Anzahl der Essen		Anzahl der Durchläufe	
	pro Schultag	pro Ferientag	pro Schultag	pro Ferientag
Spülmaschine	400	60	50	8
Variocookingcenter	400	60	2	1
Kombidämpfer	400	60	3	1
Handwaschbecken	400	60	10	2
Kochkessel	400	60	2	1

Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 zeigen die Abschätzung des Warmwasserbedarfs der Küche sowohl für einen Schultag mit 400 Essen als auch für einen Ferientag mit 60 Essen.

Tabelle 5-2: Warmwasserbedarf Küche - Schultag [9]

Gerät	Anzahl bzw. Fläche	Erstbefüllung [l]	Wasserbedarf je Arbeitsgang [l]	Durchläufe [1/d]	Tägliche Reinigung [l]	Wasserbedarf [l/d]
Spülmaschine	1	25	3,5	50	150	350
Kochkessel	1		100	2	20	220
Kombidämpfer	2	10	3	3	50	138
Variocookingcenter	1		80	2	20	180
Herd	1	20				20
Speiseausgabe	1	30			5	35
Vorbereitungsbecken	2	20				40
Handwaschbecken	2		1,5	10	1	32
Fußbodenreinigung	68		0,5			34
Summe:						1049

Tabelle 5-3: Warmwasserbedarf Küche – Ferientag [9]

Gerät	Anzahl bzw. Fläche	Erstbefüllung [l]	Wasserbedarf je Arbeitsgang [l]	Durchläufe [1/d]	Tägliche Reinigung [l]	Wasserbedarf [l/d]
Spülmaschine	1	25	3,5	8	150	203
Kochkessel	1		100	1	20	120
Kombidämpfer	2	10	3	1	50	126
Variocookingcenter	1		80	1	20	100
Herd	1	20				20
Speiseausgabe	1	30			5	35
Vorbereitungsbecken	2	20				40
Handwaschbecken	2		1,5	2	1	8
Fußbodenreinigung	68		0,5			34
Summe:						686

Auf Basis der gerätespezifischen Bedarfe, der vermuteten Anzahl der Durchläufe und der Abzählung der Schul- und Ferientage lassen sich die in Tabelle 5-4 am Beispiel der ersten drei Betriebsjahre dargestellten Warmwasserbedarfe prognostizieren. Es ergibt sich ein jährlicher Warmwasserbedarf von ca. 240 m³.

Tabelle 5-4: Jährlicher Warmwasserbedarf [9]

Jahr	Ferienhorttage	Schultage	Warmwasserbedarf [m ³ /a]
2015	63	188	240,430
2016	68	184	239,664
2017	58	191	240,147

Anhand der Verteilung der Schul- und Ferienhorttage erfolgte zudem eine monatliche Aufteilung des Gesamtbedarfs.

5.1.2 Bedarfsprognose 2016

Im Jahr 2016 lagen bereits manuell vom Zähler abgelesene Verbrauchswerte für das warme Wasser vor. Das Monitoring lieferte allerdings noch nicht lange genug Messwerte für eine hochaufgelöste Analyse. Im Rahmen einer Masterarbeit [10] wurden daher die Messwerte der Zähler plausibilisiert und die Prognosen von 2014 aktualisiert. Ziel war einerseits eine erneute Aussage zur monatlichen Verteilung des Bedarfs, aber auch zur Verteilung über den Arbeitstag.

Basis waren folgende Annahmen:

- Anzahl der täglichen Essen: 300 Stück zu Schulzeiten, 65 Stück in kleinen Ferien und 100 Stück in den großen Ferien
- Anschluss an das Warmwassernetz haben
 - 1 Geschirrspülmaschine Profi AMX-16 der Firma Hobart
 - 2 Vorbereitungs- und Handwaschbecken
 - 2 Spültische
 - Bodenreinigungsarmatur (Zweilocharmatur)
 - Waschbecken im Personal-WC
- Verbrauchsmengen für morgendliche Erstbefüllung mit Wasser, laufenden Betrieb sowie tägliche Endreinigung lt. Küchenplaner [9]

Entgegen der Annahmen von 2014 sind etliche Geräte nicht an das Warmwasser angeschlossen. Außerdem wurden die Annahmen zu den produzierten Essen nach unten korrigiert.

Der Kochbetrieb findet täglich von 08.00 Uhr bis 11.00 Uhr sowie von 13.00 Uhr bis 15.00 Uhr statt. Am Nachmittag wird zum Teil das Essen für den nächsten Tag vorbereitet. Der Spülbetrieb ist von 10.00 Uhr bis 15.00 Uhr. Somit betragen die Kochzeiten und Spülzeiten jeweils 5 Stunden am Tag. In den anderen Stunden der Nutzung werden Arbeiten vorbereitet oder die Küche gereinigt. In der Regel arbeiten täglich drei Leute in der Küche. Zusätzlich wird für das Personal-WC die Annahme getroffen, dass drei Mitarbeiter während der Arbeitszeit drei Mal auf die Toilette gehen und sich dann auch stets die Hände am Handwaschbecken waschen.

Abbildung 5-1 zeigt den Hauptverbraucher für das Warmwasser: die Spülmaschine. Es wird angenommen, dass sich beim Spülen doppelt so viele Spülgänge ergeben als im Minimum notwendig.



Abbildung 5-1: Spülmaschine Hobart AMX-16 (Foto: HS MD)

Für die Handwasch-Abflusskombination, die ebenfalls zwei Mal vorzufinden ist, wird als individueller Verbrauch angenommen, dass 10 Liter Warmwasser täglich verbraucht werden. Dazu kommt eine Endreinigung mit 2 Litern täglich.

Bei der Zweiloch-Wandarmatur – siehe Abbildung 5-2 – wird ein individueller Verbrauch von 100 Litern angenommen. Dieser wird zur Reinigung des Bodens benutzt.



Abbildung 5-2: Bodenreinigungsanschluss Küche (Foto: HS MD)

Ansonsten gelten die schon 2014 bekannten Annahmen des Küchenplaners für die Erstbefüllung und Endreinigung der Geräte [9]. Dies führt zu den täglichen Wasserbedarfen nach Tabelle 5-5.

Tabelle 5-5: Gerätebezogener Trinkwarmwasser pro Tag [10]

Geschirrspülmaschine								
Szenario	Essen	Durchgänge für Essgeschirr	Durchgänge für Töpfe	Durchgänge gesamt	Verbrauch pro Durchgang	Verbrauch Erstbefüllung	Verbrauch Reinigung	Verbrauch pro Tag
[-]	[n]	[D]	[D]	[D]	[l/D]	[l/d]	[l/d]	[l/d]
Schultag	300	64	11	75	3,5	25	150	437,5
Ferien kl.	65	16		27				269,5
Ferien gr.	100	22		33				290,5
andere Geräte								
Gerät	Anzahl	Verbrauch (individuell)	Verbrauch Erstbefüllung	Verbrauch Reinigung	Verbrauch pro Tag			
[-]	[n]	[l/d]	[l/d]	[l/d]	[l/d]			
Spültisch (Vorbereitungsbecken)	2	0	30	10	80			
Handwasch-Abflusskombination	2	10	0	1	22			
Zweiloch-Wandarmatur	1	100	0	0	100			
Handwaschbecken WC	1	2,25	0	0	2,25			

In der folgenden Tabelle 5-6 wird der resultierende tägliche Verbrauch für die einzelnen Szenarien aufgezeigt.

Tabelle 5-6: Gesamtbedarf Trinkwarmwasser pro Tag [10]

Szenario	Verbrauch pro Tag [l/d]
Schultag	641,75
Kleine Ferien	473,75
Große Ferien	494,75

Zum Vergleich mit dem tatsächlich gemessenen Verbrauch dient das Jahr 2015. In der folgenden Tabelle 5-7 sind die Bedarfswerte erfasst. Die angepasste Prognose liegt nur 1 % neben den gemessenen Verbrauchswerten.

Tabelle 5-7: Gesamtbedarf Küche pro Jahr [10]

Abnehmer	Trinkwarmwasser [m³/a]
Schultag	120,65
Ferientag klein	19,90
Ferientag groß	6,43
Jahresverbrauch	146,98

Der Wert liegt mit knapp 150 m³/a deutlich unter der Erstprognose 2014 von 240 m³/a. Dies liegt nicht nur an der verminderten Anzahl von Essen, die zubereitet werden. Auch der Warmwasserbedarf je Essen wurde 2014 überschätzt.

Zu den Bedarfswerten liegt auch eine monatliche sowie tägliche Verteilung vor. Auf die Wiedergabe wird hier aus Platzgründen verzichtet.

5.1.3 Verbrauchsmessungen in der Küche

Die Messdaten vom 1.7.2016 bis 30.06.2017 werden herangezogen, um eine messtechnische Aufteilung des Verbrauchs (auf die Monate eines Jahres sowie innerhalb eines Werktages) vorzunehmen. Das Zeitintervall wurde bewusst gewählt: ein früherer Beginn war nicht möglich, da vorher noch keine Messwerte verfügbar sind; ein späteres Ende ist nicht möglich, da ab August 2017 ein anderer Betreiber die Küche übernahm.

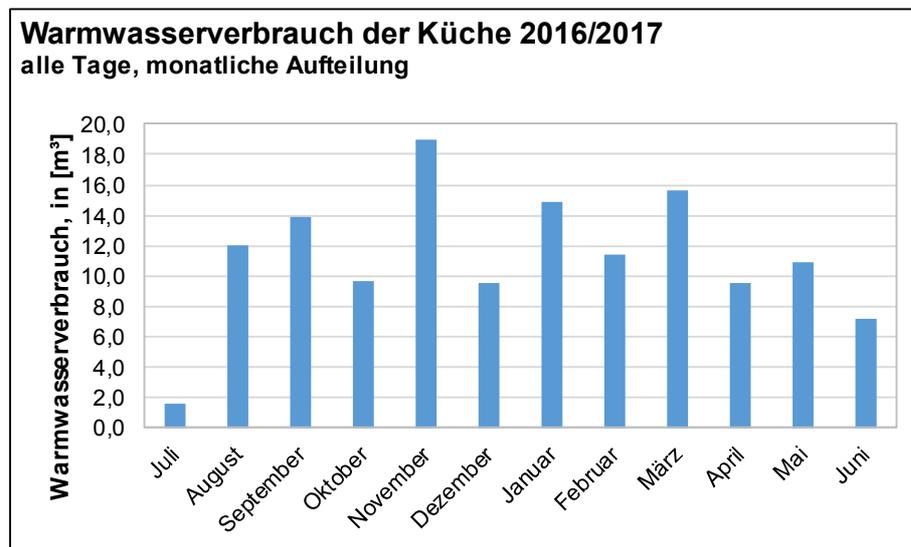


Abbildung 5-3: Monatlicher Warmwasserverbrauch der Küche 2016/17

Abbildung 5-3 zeigt die monatliche Verteilung der Verbrauchswerte. Insgesamt wurde ein Verbrauch von 135 m³ Warmwasser im genannten Zeitraum registriert. Ferienbedingt ist im Juli nur ein Bruchteil des sonstigen Verbrauchs festzustellen. In den Monaten mit wenigen Feiertagen (September, November, Januar, März) sind die Maxima festzustellen.

In den vorher aufgestellten Bedarfsprognosen wurde der Unterschied zwischen Schul- und Ferienhorttagen nicht so groß eingeschätzt.

Abbildung 5-4 zeigt nur für die Schultage eine Verteilung des Verbrauchs über den Tag. Es handelt sich um eine Summation der Verbrauchswerte aller Schultage. Das Flächenintegral liegt bei insgesamt knapp 127 m³ (der insgesamt erfassten Menge von 135 m³; 94 % des Jahresverbrauchs) Warmwasser. Die Spitzenzapfungen können von 12:30 – 14:30 Uhr festgestellt werden.

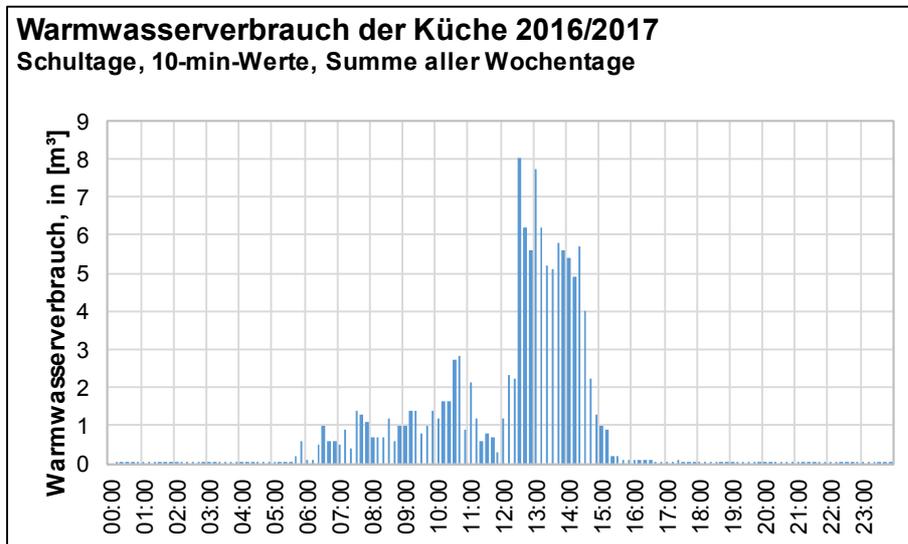


Abbildung 5-4: 10-Minuten-Warmwasserverbrauch an Schultagen der Küche 2016/17

Abbildung 5-5 zeigt nach demselben Schema die Werte für die Summe aller Horttage. Das Flächenintegral aller 10-Minuten-Werte liegt bei 6 m³ (4 % des Jahresverbrauchs). Die fehlenden 2 % des Jahresverbrauchs entfallen auf die Wochenenden und werden nicht grafisch dargestellt.

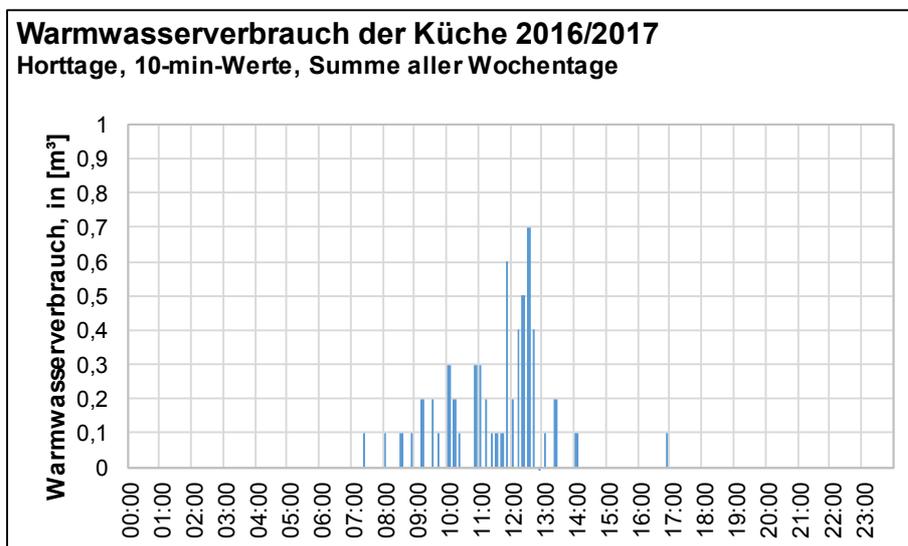


Abbildung 5-5: 10-Minuten-Warmwasserverbrauch an Horttagen der Küche 2016/17

Abbildung 5-6 fasst die 10-Minutenwerte für den Schulbetrieb aus Abbildung 5-4 zu Stundenwerten zusammen. Diese bilden die Basis für die spätere Solarsimulation. Abbildung 5-7 zeigt das Summenergebnis für die Ferienhorttage.

Warmwasserverbrauch der Küche 2016/2017

Schultage, stündlich, Summe aller Wochentage

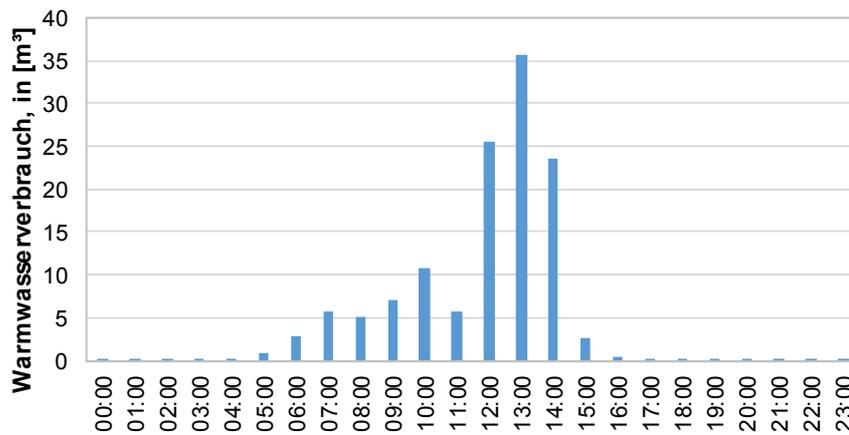


Abbildung 5-6: Stündlicher Warmwasserverbrauch an Schultagen der Küche 2016/17

Warmwasserverbrauch der Küche 2016/2017

Horttage, stündlich, Summe aller Wochentage

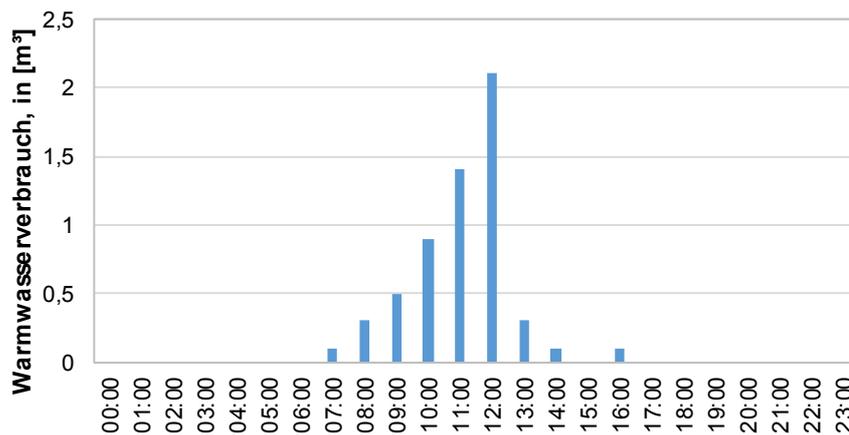


Abbildung 5-7: Stündlicher Warmwasserverbrauch an Horttagen der Küche 2016/17

Eine weitere Aufschlüsselung nach Wochentagen ist erfolgt, ergibt aber keine weiteren Erkenntnisse, so dass auf einen Abdruck der Grafiken verzichtet wird.

5.1.4 Verbrauchsmessungen in der Hausmeisterwohnung

Eine detaillierte Bedarfsprognose für die Hausmeisterwohnung erfolgt im Vorfeld der Solarsimulationen 2014 und 2016 nicht. Man beschränkte sich auf den Großverbraucher, d. h. die Küche. Die Messwerte lassen jedoch eine Analyse zu.

Die Messdaten vom 1.7.2016 bis 30.06.2017 werden herangezogen. Das Intervall ist identisch wie bei der Küche, um eine gemeinsame Basis für die Simulation zu schaffen.

Abbildung 5-8 zeigt die Monatssummen. Der Jahresgesamtverbrauch liegt bei knapp 32 m³ Warmwasser. Das entspricht – ohne Berücksichtigung von Urlaubszeiten – einen Pro-Kopf-Tagesverbrauch von etwa 22 Litern. Dieser Wert ist als vergleichsweise gering einzustufen. Typische Durchschnittswerte liegen bei 25 ... 30 l/(P · d). Der Jahresurlaub im Juli ist im Verbrauch deutlich zu erkennen.

Warmwasserverbrauch Hausmeister 2016/2017
alle Tage, monatliche Aufteilung

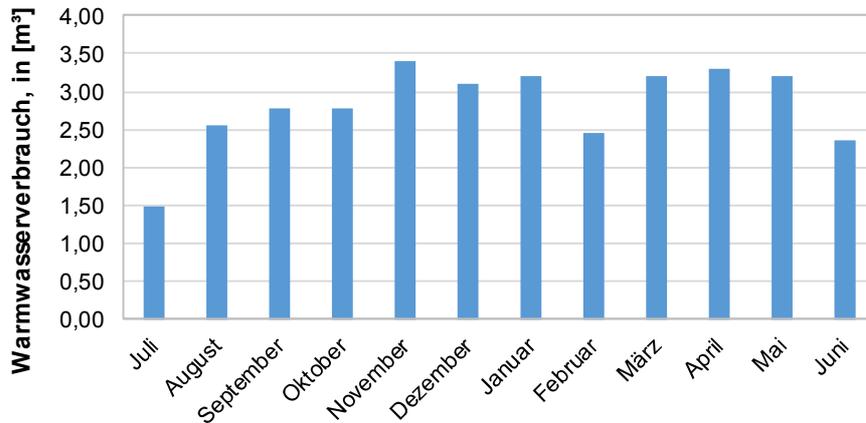


Abbildung 5-8: Monatlicher Warmwasserverbrauch der Hausmeisterwohnung 2016/17

Warmwasserverbrauch Hausmeister 2016/2017
10-min-Werte, Summe aller Wochentage

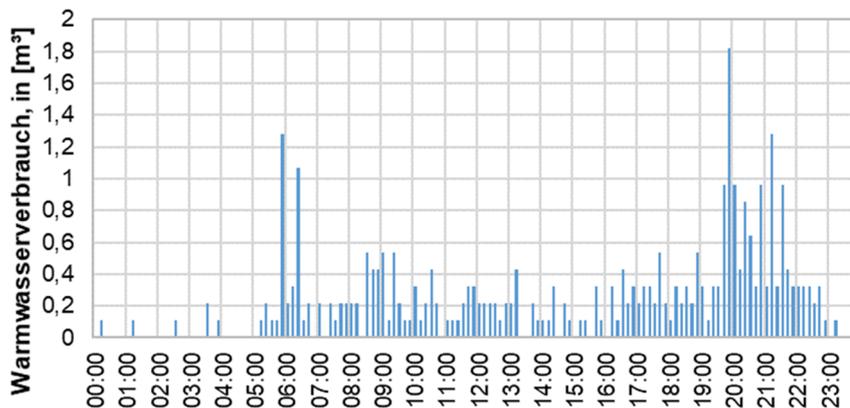


Abbildung 5-9: 10-Minuten-Warmwasserverbrauch der Hausmeisterwohnung 2016/17

Warmwasserverbrauch Hausmeister 2016/2017
stündlich, Summe aller Wochentage

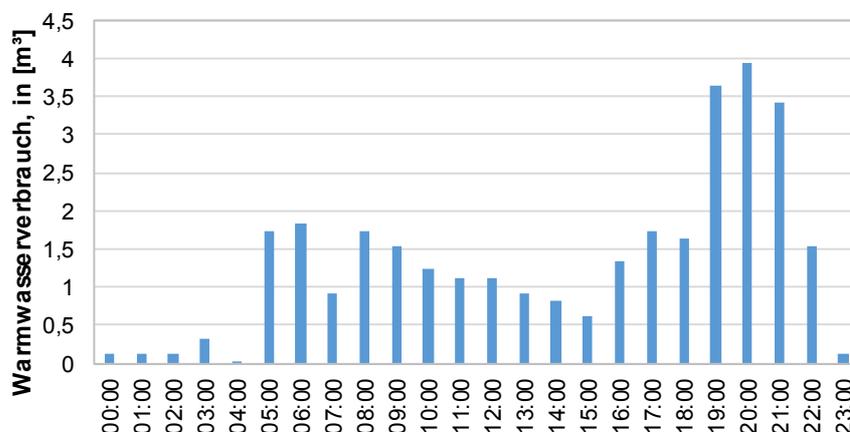


Abbildung 5-10: Stündlicher Warmwasserverbrauch der Hausmeisterwohnung 2016/17

Abbildung 5-9 zeigt eine Verteilung des Verbrauchs über den Tag. Es handelt sich um eine Summation der Verbrauchswerte aller Tages des Jahres. Eine kleinere morgendliche Spitze gegen 6 Uhr sowie eine größere Spitze am Abend um 20 Uhr ist festzustellen. Die komprimierten Stundenwerte in Abbildung 5-10 zeigen das Ergebnis noch deutlicher.

Eine Ungleichverteilung des Verbrauchs über die Wochentage ist gegeben. Am Sonntag werden 27 % des Verbrauchs registriert. An den restlichen Wochentagen liegt der Wert zwischen 12 und 13 %. Auf eine grafische Darstellung wird verzichtet.

Die stündlichen und monatlichen Zapfprofile sind Basis der Solarsimulation.

5.2 Nutzwärmeprofil auf Basis von Verbrauchsmessungen

Die gezapften Warmwassermengen für Küche (Kapitel 5.1.3) und Hausmeisterwohnung (Kapitel 5.1.4) können in Wärmemengen umgerechnet werden. Dies ist hilfreich, um im weiteren Verlauf der Auswertungen der Messwerte die Solarerträge und Nachheizenergiemengen besser einschätzen zu können. Das erstellte Profil ist gültig für eine Küche mit eigenem Koch- und Spülbetrieb (keine Aufwärmküche).

5.2.1 Nutzwärmeprofil der Küche

Die Nutzwärmemenge für die Küche ergibt sich aus einer Integralbildung aller Teilenergiemengen im 10-Minuten-Takt. Basis sind:

- der gemessene Wasserverbrauch (Wasserzählerwert, Messfühler "DF001A-61E2-0"),
- die zugehörige Kaltwassertemperatur ("DF0220-619A-0") bzw. die Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe ("DF0220-519C-0"); beide Werte führen bei der Bilanz zu einer fast identischen Energiemenge, jedoch ist der Messwert aus dem Erdreich stabiler, da es sich bei dem Kaltwasserfühler um einen Anlegefühler am Rohr handelt, welcher bei Stagnation die Raumtemperatur misst
- die Warmwassertemperatur bzw. ersatzweise die Temperatur im obersten Bereich des Pufferspeichers (Messfühler "S2" im Monitoring)

Abbildung 5-11 zeigt die monatlichen Ergebnisse. Es lässt sich für das Untersuchungsjahr feststellen, dass bei der erwärmten Wassermenge von 135,2 m³/a eine Energiemenge von 7900 kWh/a resultiert. Die mittlere Kaltwassereintrittstemperatur liegt bei 12°C. Es ergibt sich eine Erwärmung auf etwa 62°C.

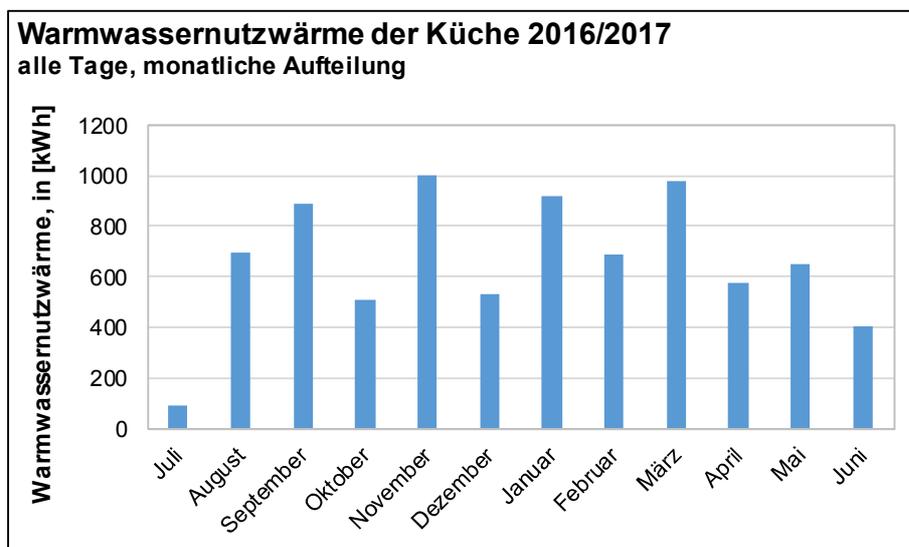


Abbildung 5-11: Monatliche Warmwassernutzwärme der Küche 2016/17

Abbildung 5-12 stellt die Ergebnisse im Tagesverlauf als 10-Minuten-Werte dar. Alle Schul- und Hort- und Wochenendtage sind dabei summiert. Das Flächenintegral liegt ebenfalls bei 7900 kWh/a. Abbildung 5-13 komprimiert die Messung zu Stundenwerten.

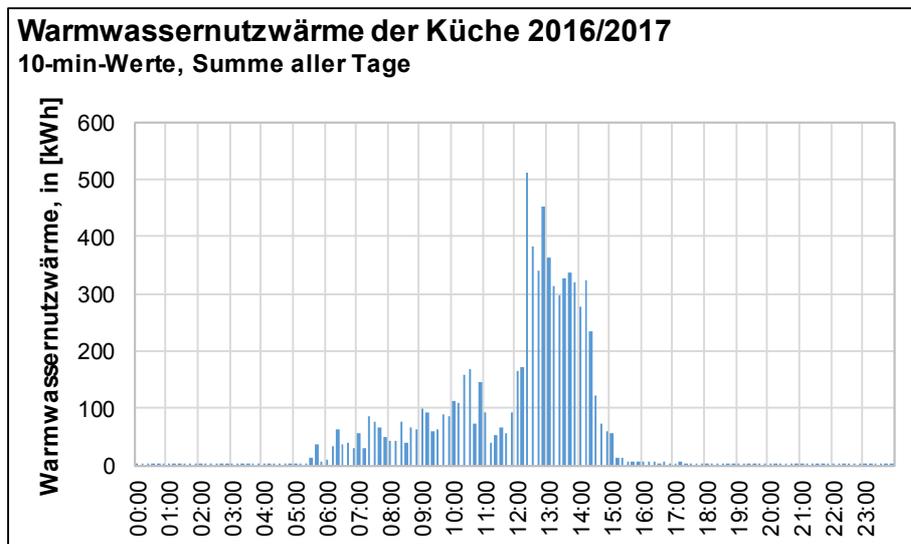


Abbildung 5-12: 10-Minuten-Warmwassernutzwärme der Küche 2016/17

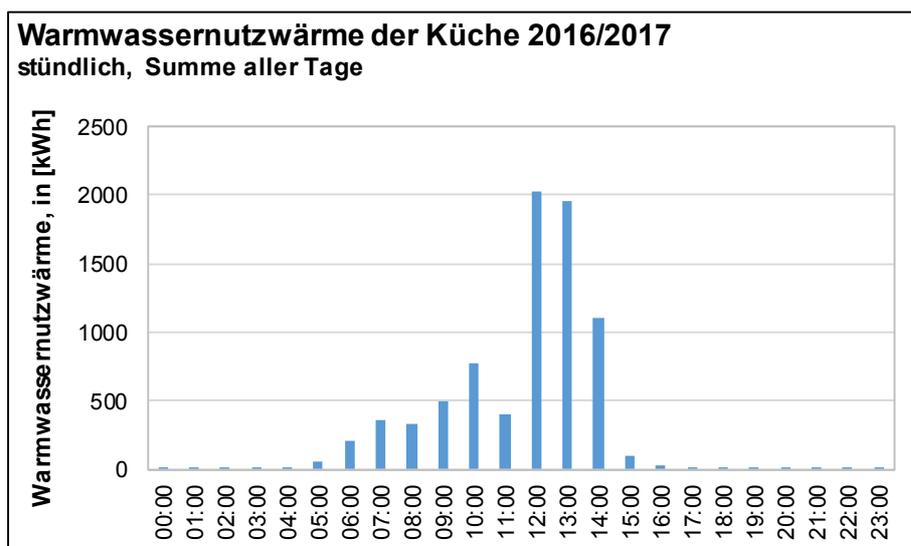


Abbildung 5-13: Stündliche Warmwassernutzwärme der Küche 2016/17

Sofern eine Aufschlüsselung nach Schulwoche, Ferienhortwoche und Wochenende benötigt wird, kann dies anhand der Wassermengen nach Kapitel 5.1 erfolgen.

5.2.2 Nutzwärmeprofil der Hausmeisterwohnung

Die Nutzwärmemenge für die Hausmeisterwohnung ergibt sich aus einer Integralbildung aller Teilenergiemengen im 10-Minuten-Takt. Es wird folgende grundsätzliche Abgrenzung getroffen: als Nutzwärme wird an dieser Stelle die aus dem Speicher gezapfte Wärmemenge verstanden. Das Wasser wird im Trinkwasserspeicher nur solar vorgewärmt und ggf. einmal je Woche elektrisch erwärmt (Legionellenschutz). Die Nacherwärmung auf Endtemperatur erfolgt in der Hausmeisterwohnung mit Durchlauferhitzern. Dieser andere Teil der Nutzwärme wird an dieser Stelle nicht betrachtet, weil er zur Bewertung der zentralen Solarthermieanlage nicht relevant ist. Eine Auswertung folgt separat im [Bericht 10](#).

Basis sind:

- der gemessene Wasserverbrauch (Wassermesswert, Messfühler "DF001A-61E4-0"),
- die Erdreichtemperatur in 1 m Tiefe ("DF0220-519C-0"); der Messwert aus dem Erdreich ist plausibler, da es sich bei dem ebenfalls vorhandenen Kaltwasserfühler ("DF0220-619A-0") um einen Anlegefühler am Rohr handelt, welcher bei Stagnation die Raumtemperatur misst und innerhalb der sehr kurzen Zapfphasen keine stabile Temperatur erreicht
- die Temperatur im obersten Bereich des Hausmeisterspeichers (Messfühler "S12" im Monitoring); der Anlegefühler für die Warmwassertemperatur ("DF0220-6196-0") führt auch hier zu unsinnigen Ergebnissen, weshalb auf den Messwert im Speicher zurückgegriffen wird

Abbildung 5-14 zeigt die monatlichen Ergebnisse. Es lässt sich für das Untersuchungsjahr feststellen, dass bei der erwärmten Wassermenge von 31,7 m³/a eine Energiemenge von 1350 kWh/a resultiert. Die mittlere Kaltwassereintrittstemperatur liegt bei 11,9°C (der Anlegefühler hätte 14,4°C ergeben). Es ergibt sich eine Erwärmung auf etwa 49°C, gemessen oben im Speicher (der Anlegefühler hätte 35,6°C ergeben).

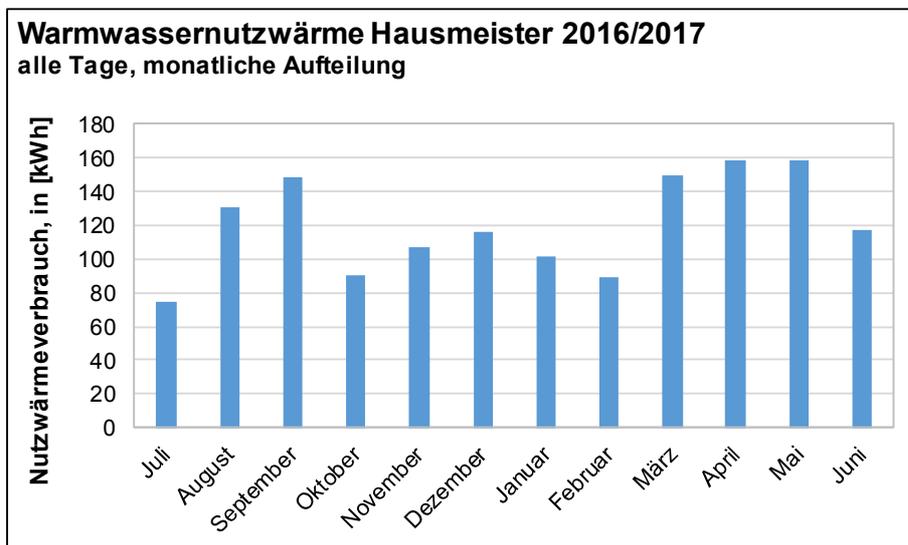


Abbildung 5-14: Monatliche Warmwassernutzwärme der Hausmeisterwohnung 2016/17

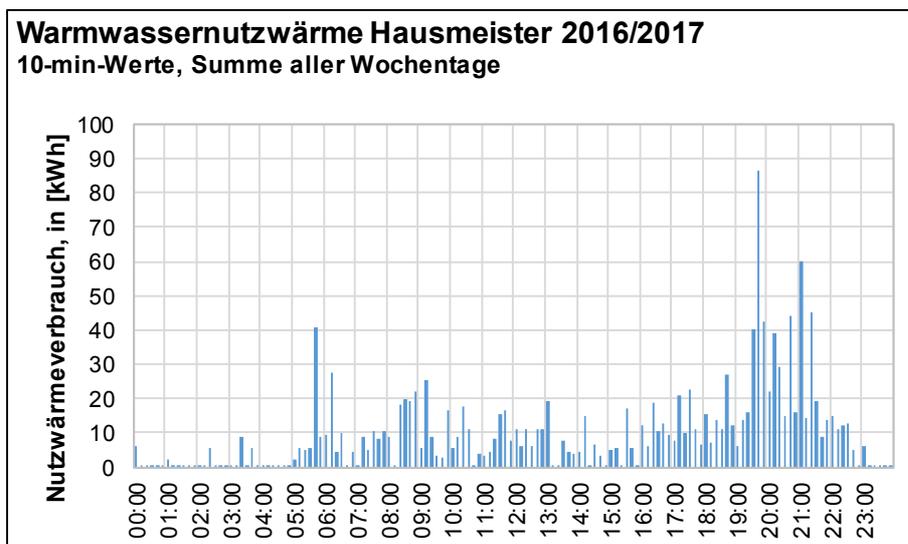


Abbildung 5-15: 10-Minuten-Warmwassernutzwärme der Hausmeisterwohnung 2016/17

Abbildung 5-15 stellt die Ergebnisse im Tagesverlauf als 10-Minuten-Werte dar. Alle Wochentage sind dabei summiert. Das Flächenintegral liegt ebenfalls bei 1350 kWh/a. Abbildung 5-16 komprimiert die Messung zu Stundenwerten.

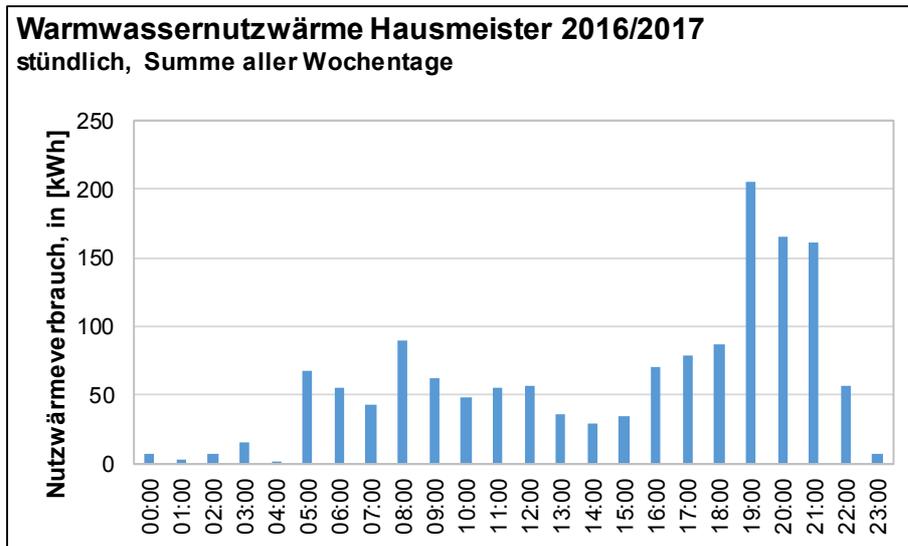


Abbildung 5-16: Stündliche Warmwassernutzwärme der Hausmeisterwohnung 2016/17

Weitere Auswertungen zu den Kalt- und Warmwassertemperaturen im Jahresverlauf sind Kapitel 6.5 zu entnehmen.

5.3 Software und Randdaten

Der solare Deckungsanteil an der Trinkwarmwasserbereitung wurde durch den ehemaligen Fachplaner N&S auf ca. 50% geschätzt [11]. Eine Solarsimulation lag nicht vor.

Im Rahmen des Monitorings wurde die Solarthermie mehrfach simuliert – jeweils mit dem dann aktuellen Datenstand. Zum Einsatz kam die Software GETSOLAR der Firma ETU/HOTTGENROTH. Mit dieser Software lässt sich das kombinierte Speicherkonzept (Pufferspeicher für die Küche sowie paralleler Trinkwarmwasserspeicher für den Hausmeister) sowie auch die lokale Nacherwärmung (Hausmeisterwohnung) nicht korrekt abbilden.

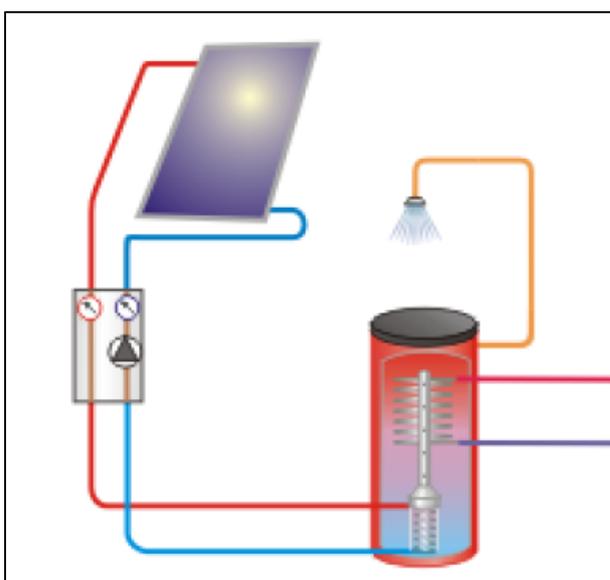


Abbildung 5-17: Schema des simulierten Solarsystems aus GETSOLAR

Abbildung 5-17 zeigt das gewählte Ersatzmodell. Bilanziert wird ein Ein-Speicher-Modell. Der Speicher ist ein Trinkwasserspeicher, eine Nacherwärmung auf Endtemperatur erfolgt direkt im Speicher.

5.3.1 Bedarfsprognose auf Basis des gemessenen Verbrauchs

Grundlage sind die in Kapitel 5.1.3 und 5.1.4 für Küche und Hausmeister gemessenen Verbrauchsverläufe des Warmwassers. Beide Teilmengen werden zunächst addiert. Es ergibt sich ein Gesamtverbrauch von 169 l/d. Es handelt sich um einen Mittelwert aller 365 Tage des Jahres. Es sind Kalt- und Warmwassertemperaturen zu hinterlegen. Für das konkrete Projekt wurden die Messwerte: 12°C Kaltwassertemperatur sowie 60°C Warmwassertemperatur (gewichteter Wert aus Küche und Hausmeisterspeicher) hinterlegt. Die tägliche Nutzwärmemenge ergibt sich daraus zu 25,7 kWh/d.

Die Software benötigt anschließend eine Information, wie sich der Verbrauch über die Monate verteilt. Hinterlegt werden prozentuale monatliche Abweichungen bezogen auf den Mittelwert. Abbildung 5-18 zeigt das Ergebnis.

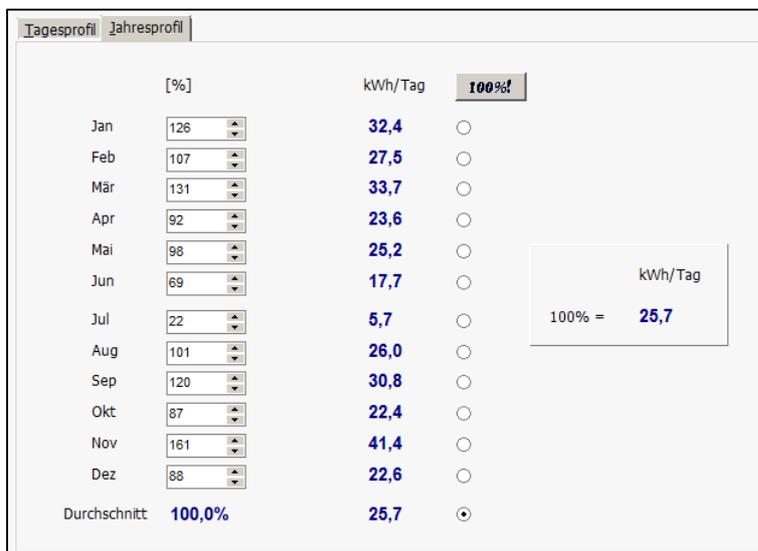


Abbildung 5-18: Vorgabe eines Monatsprofils 2018 für die Simulation mit GETSOLAR

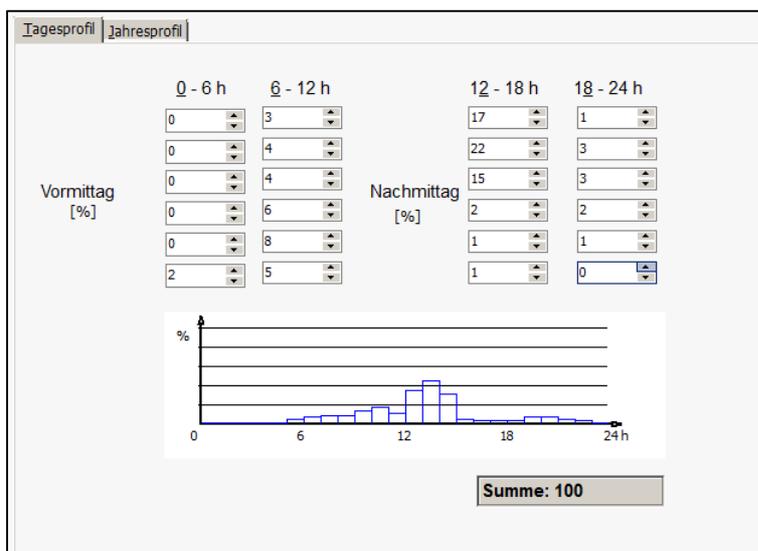


Abbildung 5-19: Vorgabe eines Tagesprofils für die Simulation mit GETSOLAR

Das Tagesprofil kann nur einmalig und identisch für alle Wochentage hinterlegt werden, siehe Abbildung 5-19.

Es erfolgt keine weitere Unterscheidung in Woche oder Wochenende, Schultag oder Ferien. Die hinterlegte Verteilung ergibt sich aus der Addition des Hausmeisterverbrauchs sowie des Küchenverbrauchs an allen Schul- und Horttagen (ohne Wochenende).

Das Volumen der beiden Speicher wurde für die Simulation zusammenaddiert (2250 Liter), das Kollektorfeld konnte korrekt abgebildet werden. Für den Standort Halle liefert die Simulation die Ergebnisse in Abbildung 5-20.

Monat	Solar- ertrag [kWh]	Ein- strahlung [kWh]	Nach- heizung [kWh]	Warm- wasser [kWh]	Deckungs- rate [%]	Wirkungs- grad [%]
Januar	418	1536	611	1016	41	27
Februar	515	2146	355	830	62	24
März	701	2789	389	1081	65	25
April	628	2997	169	773	81	21
Mai	690	3271	164	847	82	21
Juni	545	3140	79	609	90	17
Juli	338	3301	1	317	106	10
August	788	3396	78	888	89	23
September	793	2928	206	984	81	27
Oktober	584	2443	165	757	77	24
November	384	1287	837	1246	31	30
Dezember	270	1095	440	691	39	25
Summe	6656	30328	3493	10039	66	22

Abbildung 5-20: Ergebnisse 2018 der Simulation mit GETSOLAR

Die solare Deckungsrate liegt bei 66 %. Der Solarertrag bei 6656 kWh/a. Dies deckt sich sehr gut mit den Messwerten. Eine weitere Analyse folgt in Kapitel 5.4.

5.3.2 Bedarfsprognosen 2014

Die zu erwartenden Nutzwärmemengen wurden 2014 überschätzt, siehe Kapitel 5.1.1. Allein für die Küche wurde eine mittlere tägliche Nutzwärmemenge von 31,1 kWh/d in der Simulation angenommen – siehe Abbildung 5-21 (die Messwerte führen real zu 25,7 kWh/d für beide Abnehmer Küche und Hausmeister, siehe Kapitel 5.3.1).

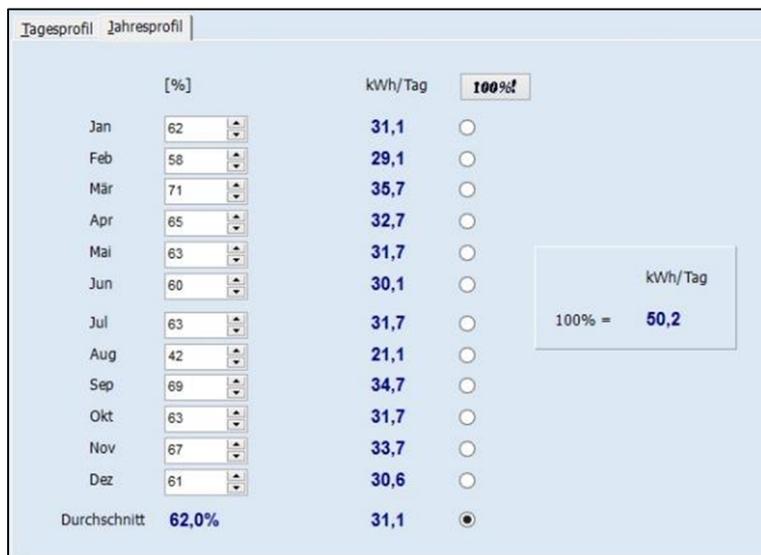


Abbildung 5-21: Vorgabe eines Monatsprofils für die Simulation 2014 mit GETSOLAR

Auch die monatliche Verteilung wurde sehr viel homogener vermutet, als sie tatsächlich ist. In Ermangelung weiterer Informationen wurde 2014 davon ausgegangen, dass sich der Verbrauch nach einem Wohnbauprofil über den Tag verteilt.

Simuliert wurde die geplante Kollektorfläche von 50 m² und der 2050-Liter-Speicher (ohne Hausmeisterspeicher) [8]. Abbildung 5-22 zeigt das Ergebnis.

Der berechnete Nutzwärmebedarf lag 20 % über den heute als realistisch angesehenen Zahlen. Der Solarertrag wurde aufgrund der zu hoch angesetzten Kollektorfläche um mehr als 50 % überschätzt. Der Deckungsanteil lag bei 85 %.

Monat	Solarertrag [kWh]	Einstrahlung [kWh]	Nachheizung [kWh]	Warmw.-bedarf [kWh]	Deckungsrate [%]	Wirkungsgrad [%]
Januar:	579	2128	419	1002	58	27
Februar:	756	2989	196	903	84	25
März:	1040	4195	155	1187	88	25
April:	1028	4507	36	1070	96	23
Mai:	1067	5079	31	1086	98	21
Juni:	1076	5293	6	1016	105	20
Juli:	1140	5446	4	1107	103	21
August:	751	5039	0	798	94	15
September:	1158	4414	11	1139	101	26
Oktober:	962	3565	85	1068	90	27
November:	569	1857	463	1042	55	31
Dezember:	411	1476	532	944	44	28
Summe:	10538	45988	1938	12363	85	23

Abbildung 5-22: Ergebnisse 2014 der Simulation mit GETSOLAR

5.4 Abgleich mit der Messung

Tabelle 5-8 zeigt die monatlichen Simulationsergebnisse. Neben dem Solarertrag sind die Nachheizenergiebedarfe aufgestellt. Die dem Speicher zugeführten Energiemengen werden als Nutzwärmemengen gezapft bzw. müssen als technische Verluste verbucht werden.

Tabelle 5-8: Zusammenfassung der Monatswerte der Simulation

Monat	Solarertrag [kWh]	Nachheizung [kWh]	Input = Output [kWh]	Nutzwärme [kWh]	Speicher-/Netzverlust [kWh]
Januar	418	611	1029	1004	25
Februar	515	355	870	770	100
März	701	389	1090	1044	46
April	628	169	797	709	88
Mai	690	164	854	781	73
Juni	545	79	624	532	92
Juli	338	1	339	175	164
August	788	78	866	805	61
September	793	206	999	925	74
Oktober	584	165	749	693	56
November	384	837	1221	1241	-20
Dezember	270	440	710	701	9
Summe	6654	3494	10148	9380	768

Eine grafische Aufbereitung der Jahresbilanz zeigt Abbildung 5-23. Der simulierte Solarertrag liegt bei knapp 6700 kWh/a und damit im Bereich der Messwerte 6400 ... 7100 kWh/a. Der Nachheizbedarf wird auf 3500 kWh/a in der Simulation beziffert und mit 3500 ... 3600 kWh/a gemessen. Die Verluste werden in der Simulation mit knapp 800 kWh/a ausgewiesen. Die Messwerte liegen an dieser Stelle höher, nämlich bei 1100 bis 1700 kWh/a. Dafür ist die berechnete Nutzenergiemenge mit 9400 kWh/a im Bereich der gemessenen Werte von 8900 ... 9300 kWh/a.

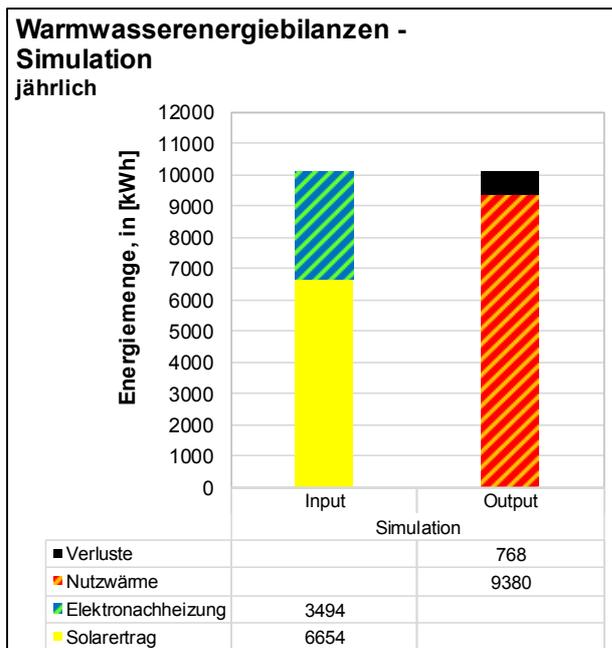


Abbildung 5-23: Zusammenfassung der Jahreswerte der Simulation

Insgesamt kann daher festgehalten werden, dass die Simulation nachvollziehbare Ergebnisse liefert, solange die Nutzwärmemenge korrekt vorgegeben wird. Sogar die Tatsache, dass in der Realität eine 5-Tage-Woche gegeben ist (für die Küche), aber eine 7-Tage-Woche simuliert wurde, verfälscht das Ergebnis nicht nennenswert. Lediglich die technischen Verluste – insbesondere des Speichers – werden unterschätzt.

Der simulierte Kollektorsertrag liegt bei 204 kWh/(m²a) bezogen auf die Aperturfläche bzw. bei 183 kWh/(m²a) bezogen auf die Bruttokollektorfläche. Vergleichskennwerte für Solarthermie in Küchen liegen nicht vor. Eine detaillierte Auswertung der Zahlen ist in Kapitel 4.2 zu finden.

Abbildung 6-2 sowie Abbildung 6-3 lösen wichtige Details näher auf: zum einen den Anschluss im Rücklauf des benachbarten Gymnasiums, zum anderen die Speichernachladung mit Fernwärme.

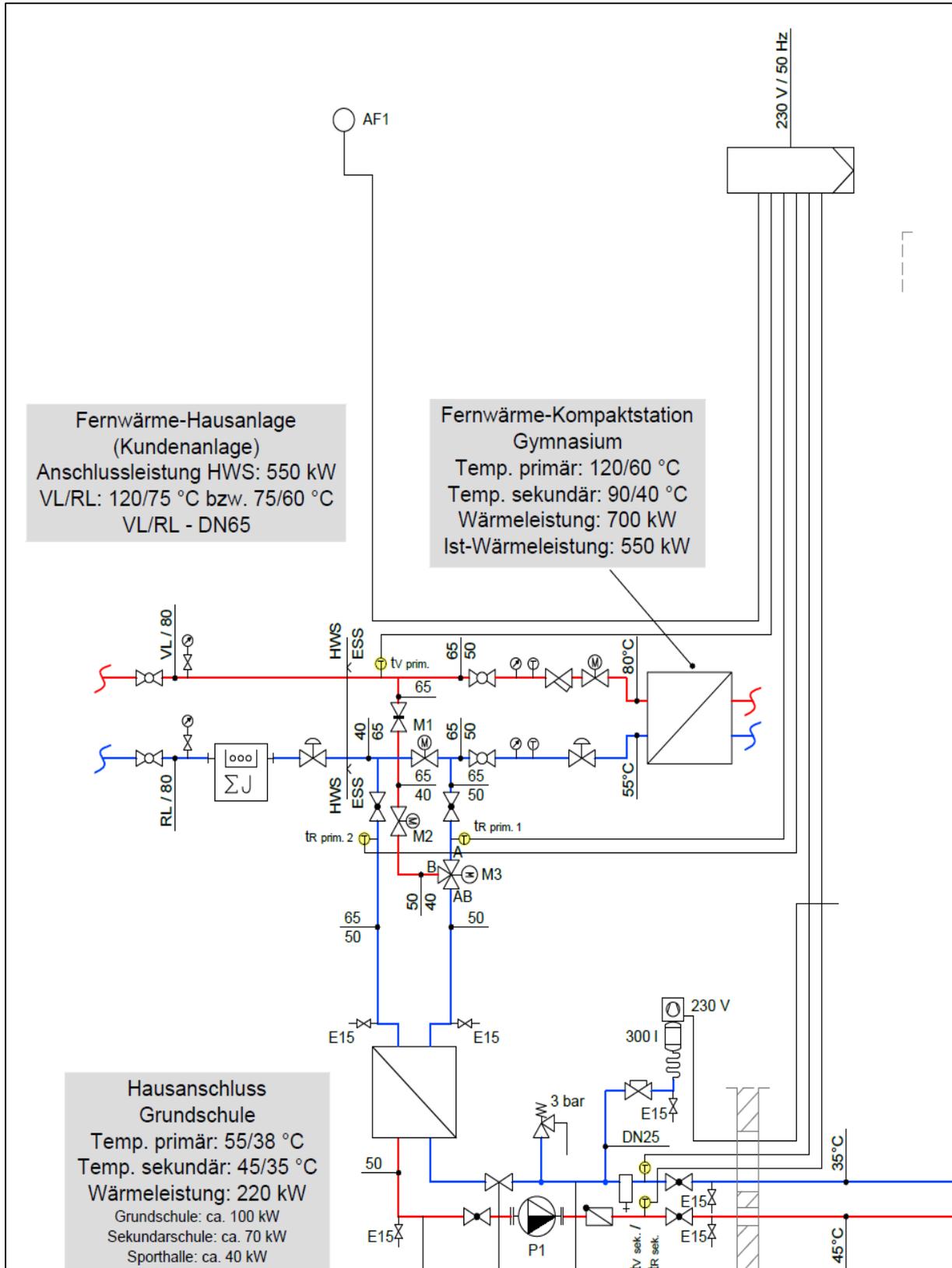


Abbildung 6-2: Detailhydraulik Fernwärmeanschluss [12]

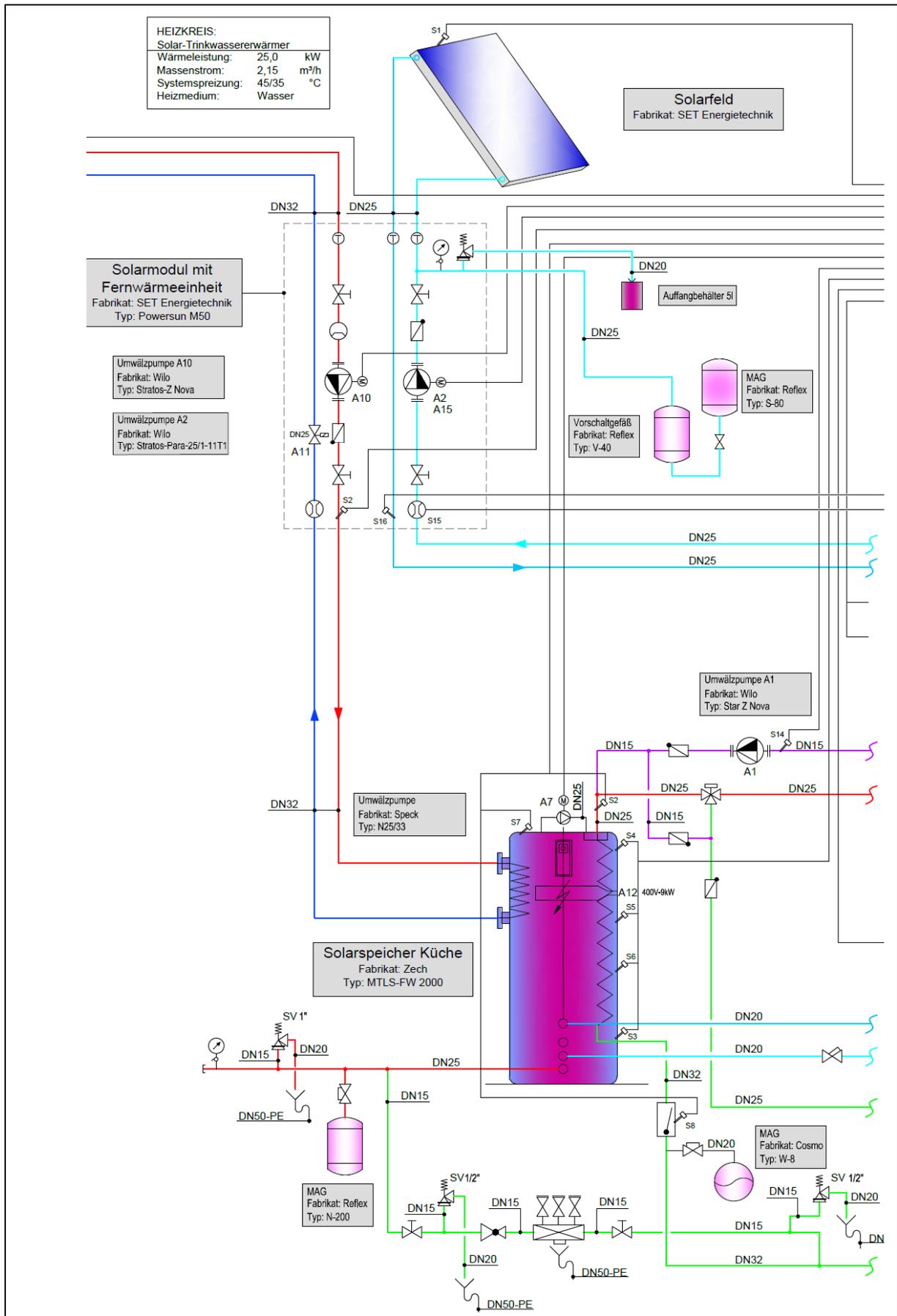


Abbildung 6-3: Detailhydraulik Solarmodulanschluss [12]

Der Anlagenhydraulik widmet sich Bericht 9. An dieser Stelle sei kurz erläutert, dass die St. Franziskus-Grundschule über einen Wärmeübertrager im Rücklauf des Elisabeth-Gymnasiums eingebunden ist (Reihenschaltung). Eine Umschaltung auf den Vorlauf (Parallelschaltung) ist möglich. Dazu werden die Motorventile M1 bis M3 benötigt – siehe Abbildung 6-2.

Der Regelbetrieb ist gekennzeichnet von einer Auslegung auf 45/35°C auf der Abnehmerseite. Die Messwerte lassen vermuten, dass es keine witterungsgeführte Regelung gibt. Oberhalb einer Außentemperatur von etwa 14°C steht das Fernwärmevorlaufwasser mit ca. 37°C zur Verfügung, darunter mit 40 ... 45°C.

Die Nachheizung des Solarpufferspeichers könnte grundsätzlich mit Fernwärme erfolgen. Allerdings ist unter den geschilderten Randdaten im Normalbetrieb keine nennenswerte Erwärmung des Puffers zu erwarten. Anhand der Messwerte ist erwartungsgemäß erkennbar, dass keine Puffererwärmung mit Fernwärme stattfindet.

Die Fernwärmeversorgung wird am Wochenende unterbrochen (Pumpe aus). Sie startet täglich mit dem Aufheizbetrieb der Lüftungsanlagen um 4 bzw. 5 Uhr und endet um 17 Uhr – auch im Sommer.

Es kann durch Übersteuern der Regelung (Handbetrieb) eine Umschaltung auf Vorlauftemperatur der Fernwärme erfolgen. Erreichbare Vorlauftemperaturen liegen dann bei 75°C.

6.2 Hydraulikschema und Regelfunktionen Solarthermie

Abbildung 6-4 zeigt das Hydraulikschema der Solarthermie mit allen Speichern sowie wichtigen Komponenten für die Regelung, z. B. Temperaturen und Schaltsignale.

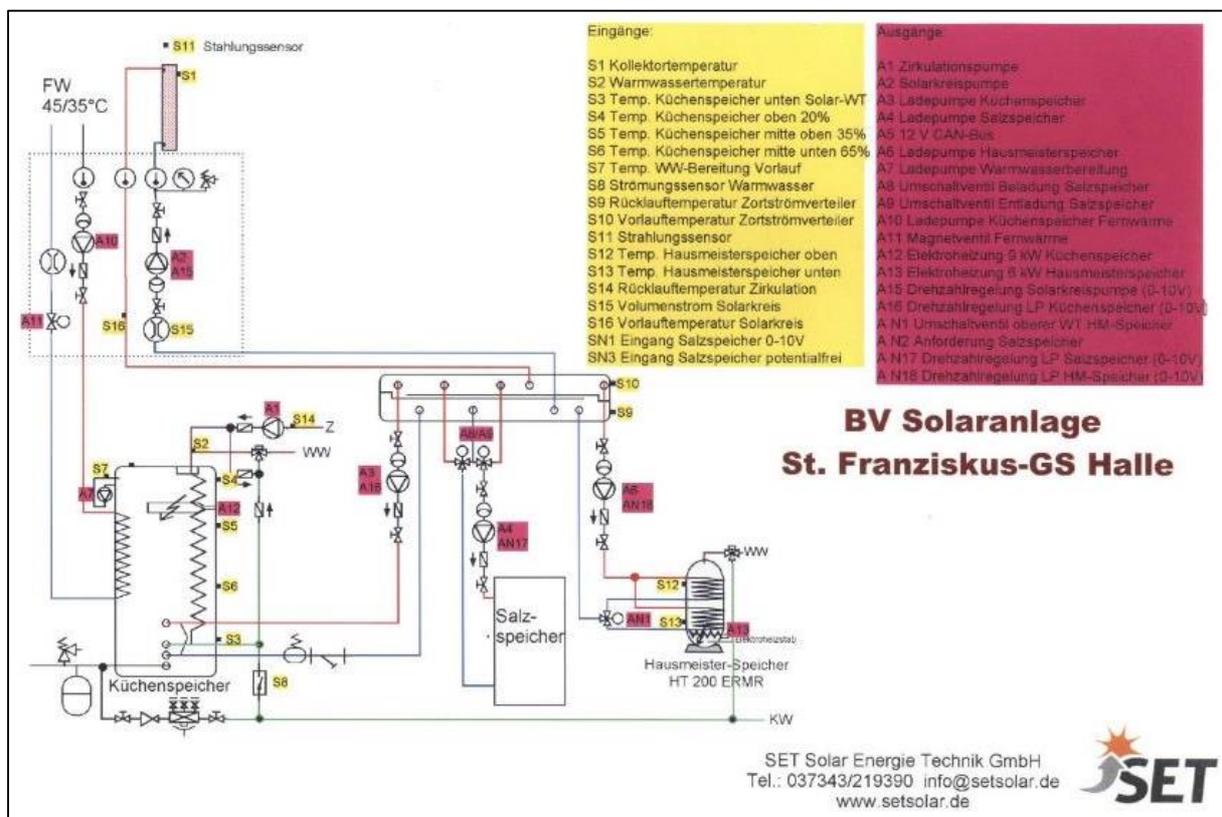


Abbildung 6-4: Schaltschema Solaranlage [1]

Das im oberen Viertel des Speichers vorhandene Sole-Wasser-Gemisch (d. h. die oberen 25 % bis Höhe Temperatursensor S5) wird wochentags von 6:00 bis 17:00 Uhr oben S4 auf 62 °C gehalten, um 60-gradiges Wasser zapfen zu können. Wenn S4 unter 60°C sinkt, erfolgt die Nachheizung – laut Regelungskonzept zuerst die Erwärmung durch Fernwärme und danach erst durch den elektrischen Heizstab.

Der Speicher wird im oberen Bereich auf maximal 90 °C beladen, ab 130 °C kommt es im Solarkreis zum Stillstand.

Die Verbraucherpumpen A3, A4 und A6 am ZORTSTRÖM-Verteiler sind gegeneinander verriegelt, d. h. es läuft immer nur eine von ihnen. Sie laufen auch nur, solange die Solarkreis-pumpe A2 läuft. Die Solarkreis-pumpe A2 schaltet ein, wenn die Kollektortemperatur S1 mindestens 7 K oberhalb der Pufferspeicher bzw. der Hausmeisterspeichertemperatur liegt.

Um die Solarwärme effizient zu nutzen, wird der ganze Ladungsprozess nach Vorrang in folgenden Phasen aufgeteilt:

- Vorrang 1: Der obere Teil des Küchenspeichers wird beladen.
- Vorrang 2: Der obere Teil des Hausmeisterspeichers wird beladen.
- Vorrang 3: Der untere Teil des Küchenspeichers wird beladen.
- Vorrang 4: Der untere Teil des Hausmeisterspeichers wird beladen.
- Phase 5: Der Salzspeicher wird beladen.

Vorrang 1: Der obere Teil (20%) des Küchenspeichers wird bis 65°C beheizt. Wenn die Kollektortemperatur S1 wenigstens 5 K höher als die Temperatur im oberen Küchenspeicher S4 ist, schaltet sich die Ladung ein. Ist sie nur noch 3 K höher (oder weniger) erfolgt die Abschaltung.

Vorrang 2: Der obere Teil des Hausmeisterspeichers wird bis 60°C beheizt. Wenn die Kollektortemperatur S1 wenigstens 7 K höher als die Temperatur im oberen Hausmeisterspeicher S12 ist, schaltet sich die Ladung ein. Ist sie nur noch 4 K höher (oder weniger) erfolgt die Abschaltung.

Vorrang 3: Der untere Teil des Küchenspeichers wird bis 85°C beheizt. Wenn die Kollektortemperatur S1 wenigstens 7 K höher als die Temperatur im unteren Küchenspeicher S3 ist, schaltet sich die Ladung ein. Ist sie nur noch 4 K höher (oder weniger) erfolgt die Abschaltung.

Vorrang 4: Der untere Teil des Hausmeisterspeichers wird bis 80°C beheizt. Wenn die Kollektortemperatur S1 wenigstens 7 K höher als die Temperatur im unteren Hausmeisterspeicher S13 ist, schaltet sich die Ladung ein. Ist sie nur noch 4 K höher (oder weniger) erfolgt die Abschaltung.

Phase 5: Nach den Vollladungen des Küchenspeichers und Hausmeisterspeichers wird der Salzhydratspeicher beladen.

Die Fernwärmepumpe A10 geht an, wenn in der Mitte des Speichers bei S6 keine 40°C erreicht werden, obwohl der Elektroheizstab A12 in Betrieb ist. Die Abschaltung erfolgt, wenn S6 einen Wert von 40°C erreicht. Diese Programmierung setzt den Elektroheizstab in der Reihenfolge vor die Fernwärme. Sie wurde gewählt, da die zur Verfügung stehende Fernwärmetemperatur zu keiner Erwärmung führt (was bei den oben genannten Fernwärmemperaturen ständig der Fall ist).

Ursprünglich war vorgesehen: die Nachladung mit Fernwärmepumpe A10 erfolgt, wenn die Puffermittentemperatur unter 40°C liegt. Nur wenn dann bei S6 keine 40 °C erreicht werden, schaltet die Fernwärmepumpe wieder ab und der Heizstab A12 an.

Die Elektroheizung des Puffers A12 ist nur zwischen 6 und 17 Uhr montags bis freitags freigeschaltet. Gleiches gilt für die Zirkulationspumpe A1.

Die Umladepumpe A7 schickt Pufferwasser durch ein Doppelrohr (äußerer Ringspalt). Sie saugt es oben an und drückt es innerhalb des Behälters im Kreis nach unten. Dies erfolgt, wenn Trinkwarmwasser gezapft wird. Es strömt im Innenrohr von unten nach oben und erwärmt sich dabei.

Der Sollwert für den Hausmeisterspeicher liegt bei 60°C für die Phase der thermischen Desinfektion, sonst gibt es keinen Sollwert. Die Maximaltemperatur beträgt 80°C. Der Elektroheizstab A13 wird einmal je Woche (freitags) geschaltet. Allerdings nicht, wenn in der Zeit seit Freitag zuvor ohnehin 60°C erreicht wurden. Der Heizstab geht darüber hinaus nicht an, er dient ausschließlich der thermischen Desinfektion. Es gibt keine Zirkulation in die Hausmeisterwohnung.

6.3 Messorte und Messtechnik

Es gilt die Messpunktliste siehe Kapitel 4.1, Tabelle 4-1.

6.4 Temperaturen im Kollektorfeld

Abbildung 6-5 zeigt für den Zweijahreszeitraum 2016/17 die Temperaturen im Kollektorfeld in Stundenauflösung. Es werden Maxima bis 125°C erreicht. Im Winterhalbjahr sinkt die Kollektortemperatur auf fast -10°C ab. Abbildung 6-6 komprimiert die Werte zu Tagesmitteltemperaturen, so dass die Extremwerte durch Mittelwertbildung geringer werden.

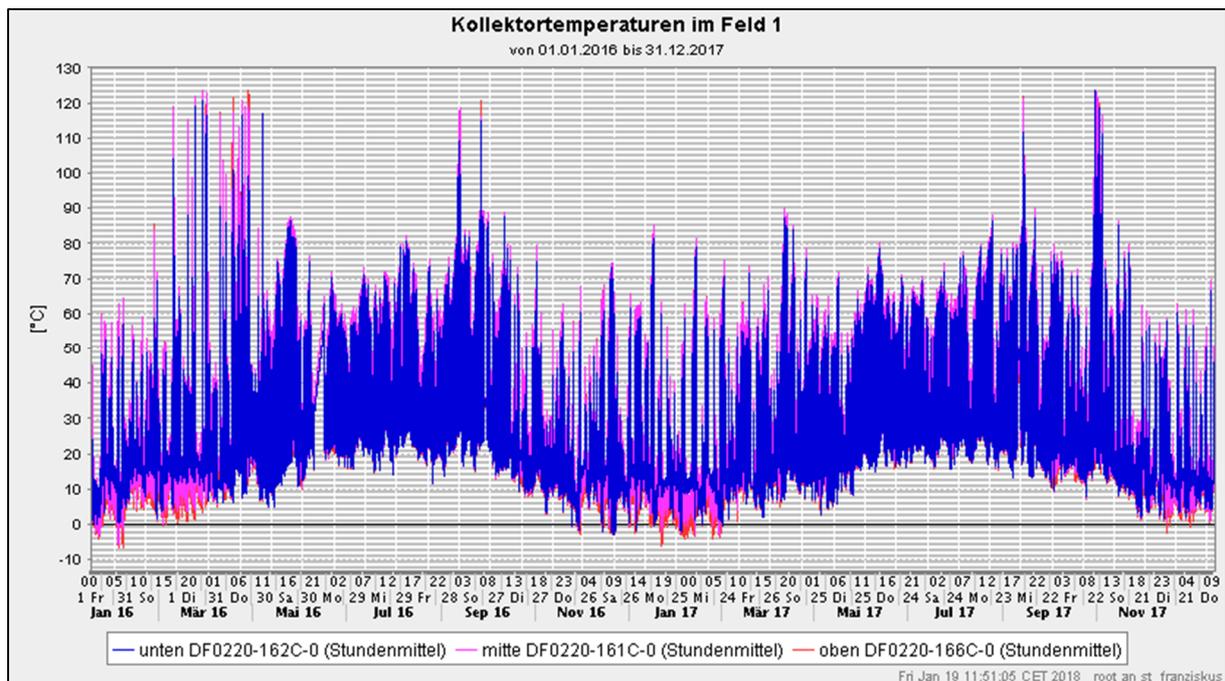


Abbildung 6-5: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen 2016/17

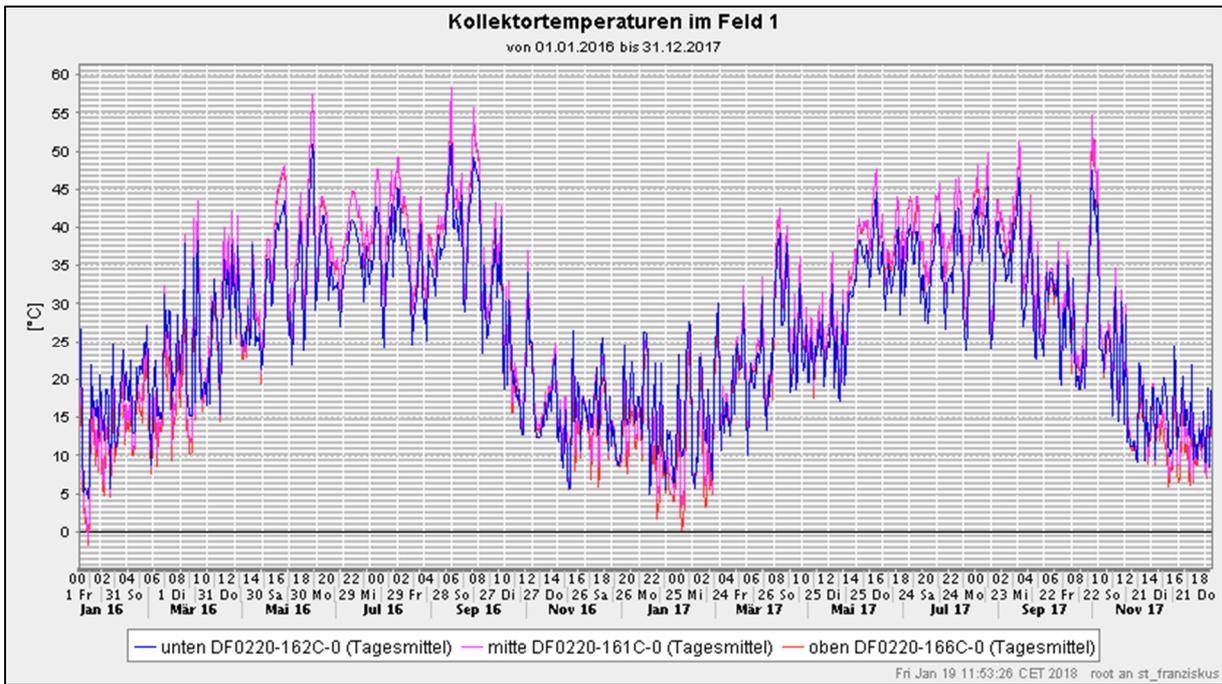


Abbildung 6-6: Tägliche Kollektorfeldtemperaturen 2016/17

In Abbildung 6-7 wird exemplarisch eine Januarwoche betrachtet, in der mehrfach eine Speicherladung ausgelöst wird – auch am Wochenende. In den Phasen, in denen die Kollektorkreispumpe läuft (farbig hinterlegt), stellt sich i. A. im oberen Bereich des Kollektors eine höhere Temperatur ein als unten. In den anderen Zeiten ist es umgekehrt. Vermutlich ist dies durch den Abstand zum Erdboden erklärbar.

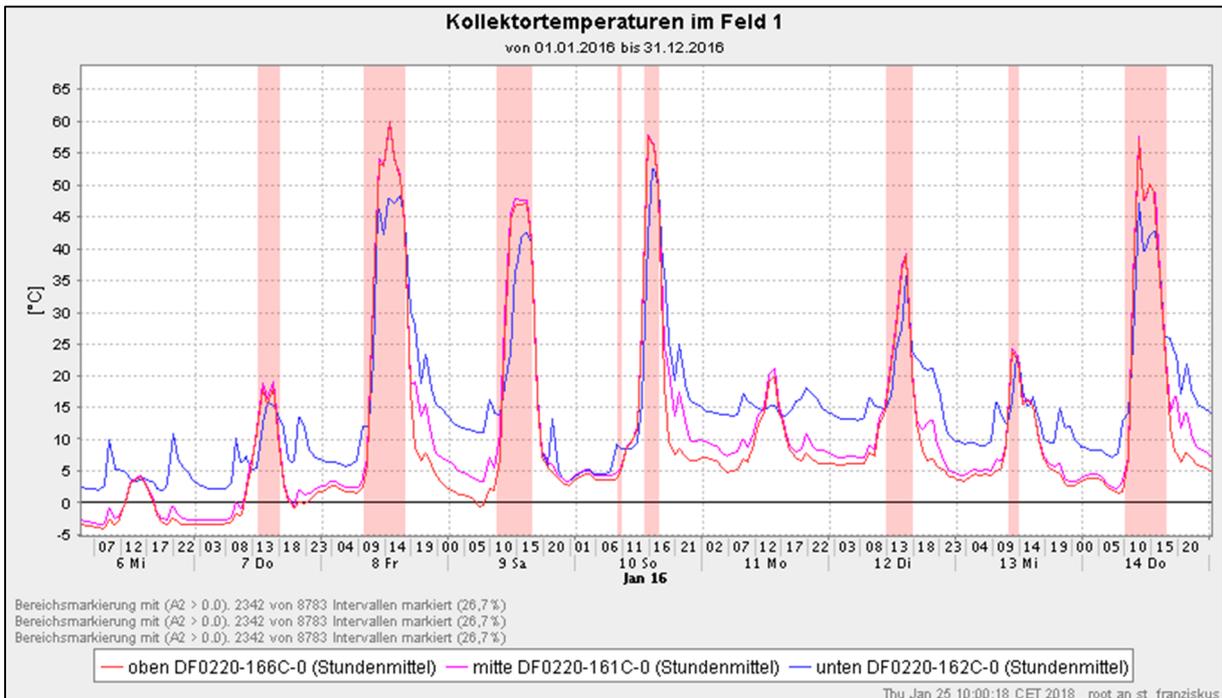


Abbildung 6-7: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen Januarwoche 2016

Abbildung 6-8 zeigt eine Woche mit sehr hohen Erträgen im Mai. Der Trend der Januarwoche ist auch hier erkennbar: läuft die Kollektorkreispumpe ist der Kollektor oben wärmer als unten, steht die Pumpe, ist es umgekehrt.

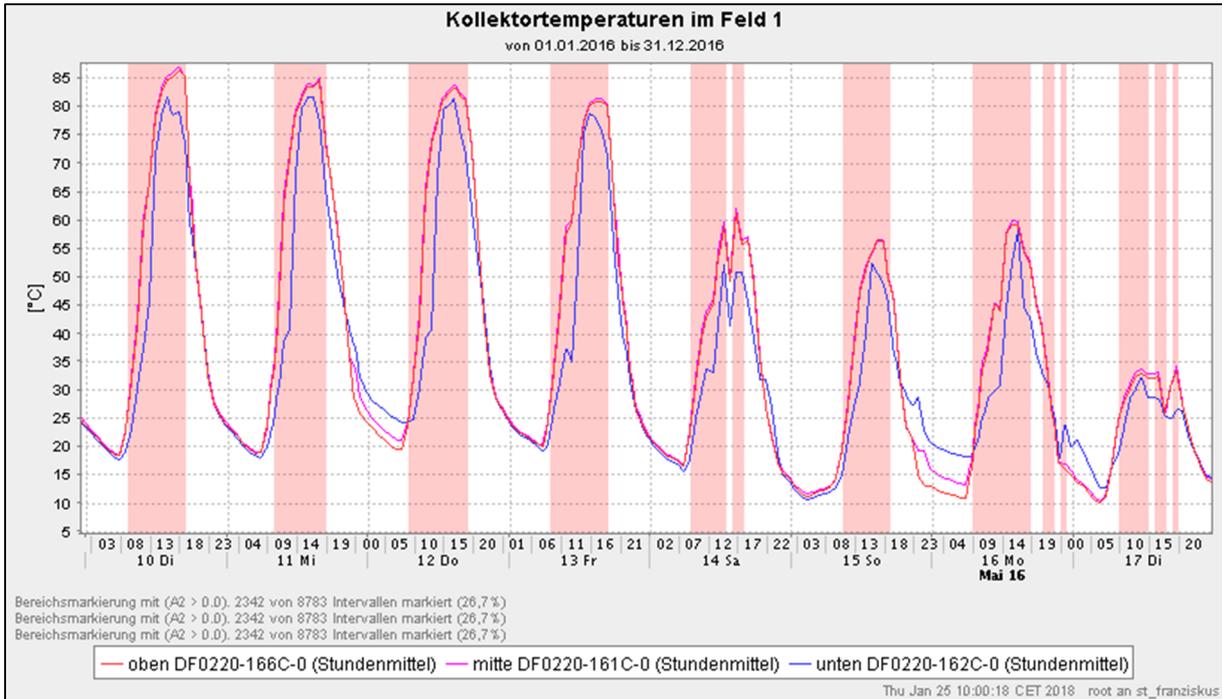


Abbildung 6-8: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen Maiwoche 2016

Im August sind während der Zeiten, in denen die Kollektorkreispumpe nicht in Betrieb ist, kaum Unterschiede zwischen den drei Temperaturen erkennbar, siehe Abbildung 6-9.

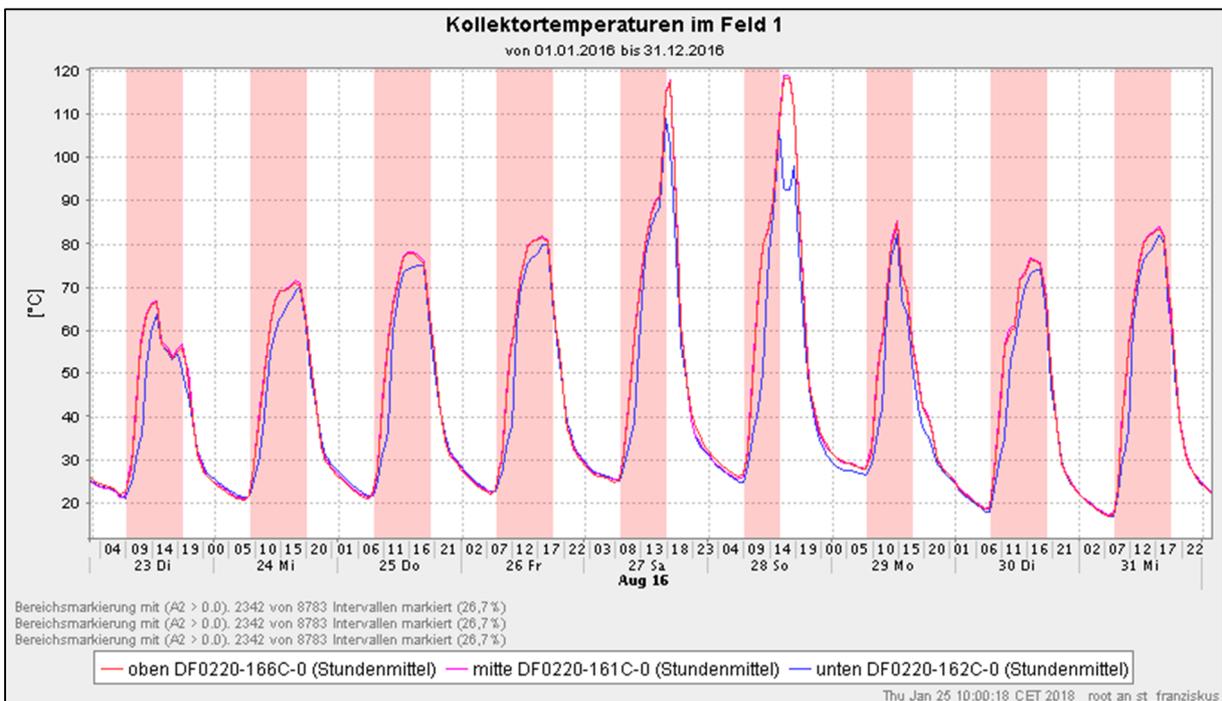


Abbildung 6-9: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen Augustwoche 2016

Im November wird erwartungsgemäß die Kollektorkreispumpe nur noch selten ausgelöst. Allerdings reichen – je nach Entleerungsgrad des Speichers – bereits sehr niedrige Temperaturen von unter 20°C, um den Ladebeginn auszulösen, siehe Abbildung 6-10.

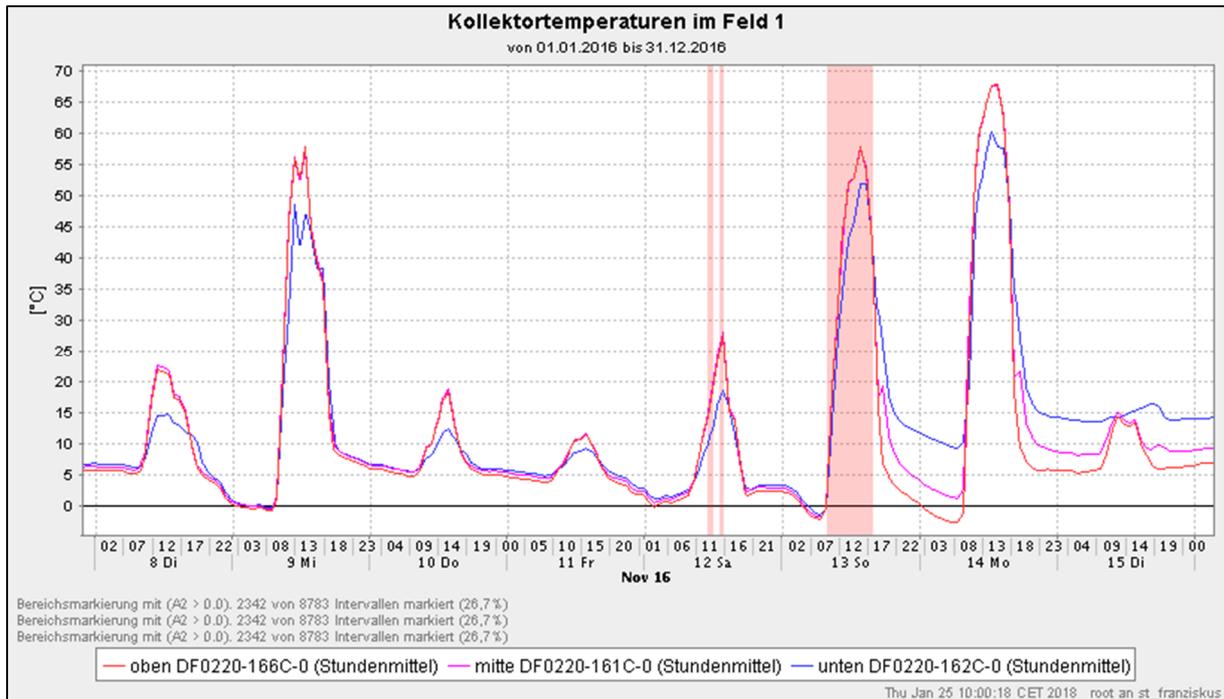


Abbildung 6-10: Stündliche Kollektorfelddtemperaturen Novemberwoche 2016

Die Auswertung für das Kollektorfeld 2 entfallen. Der obere Fühler liefert keine Messwerte, der untere ähnelt in der Aussage dem Wert im Feld 1 (mittleres der drei Felder, rechts von der Eingangstür).

Abbildung 6-11 korreliert die erreichten Kollektorfelddtemperaturen (Feld 1) mit der erfassten Globalstrahlung, dargestellt sind Stundenwerte für das Jahr 2017.

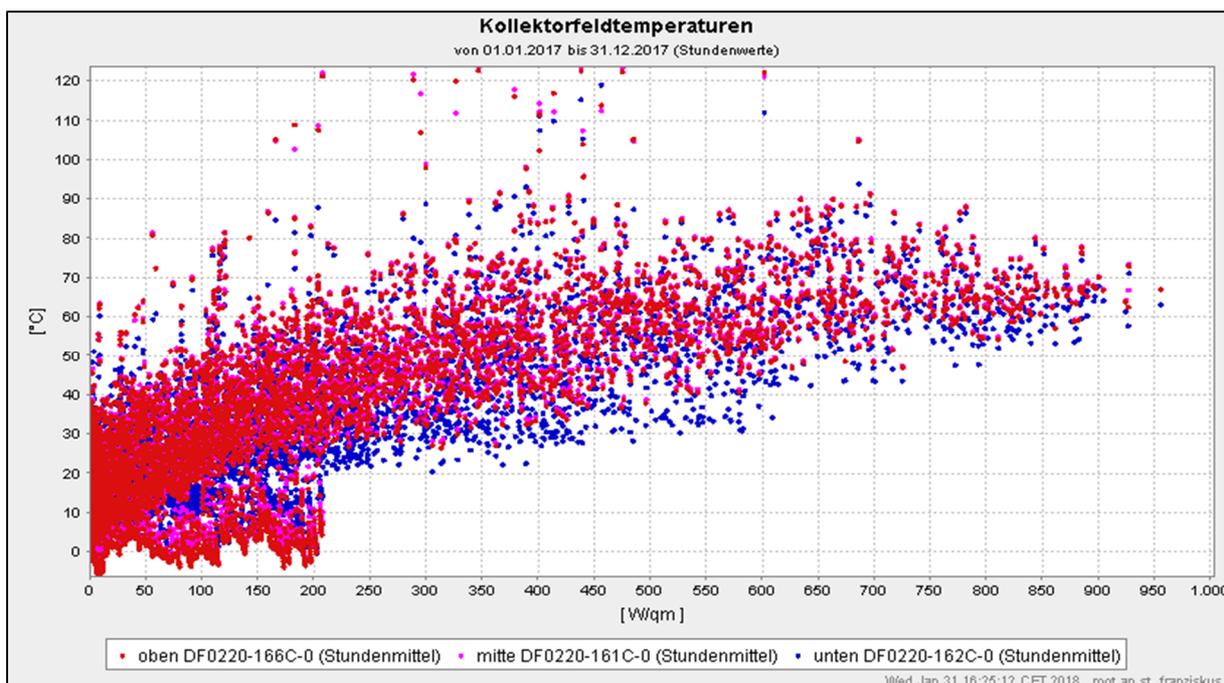


Abbildung 6-11: Stündliche Kollektorfelddtemperaturen abhängig von der Globalstrahlung 2017

Es werden alle Stundenwerte ausgewertet, auch bei Stillstand der Kollektorkreispumpe. Maximalwerte von über 120°C werden im Hochsommer nicht erreicht, da das Kollektorfeld 90°-Neigung hat. Wegen der senkrechten Anordnung erfolgt die größte Überhitzung in den Übergangsjahreszeiten.

6.5 Speicherschichtung

Die Speicherschichtung wird anhand der Messwerte von 2016 ausgewertet, obwohl im Juni eine Datenlücke zu verzeichnen ist. Da die Messwerte von SETSOLAR ab 2017 in einer Auflösung von 10 Sekunden geliefert werden, ergeben sich für die Auswertesoftware MONISOFT zu große Datenmengen. Eine grafische Auswertung ist nicht mehr möglich.

Temperaturen im Küchenpufferspeicher

Abbildung 6-12 zeigt die Temperaturen für den Pufferspeicher der Küche in stündlicher Auflösung, Abbildung 6-13 als mittlere Tageswerte.

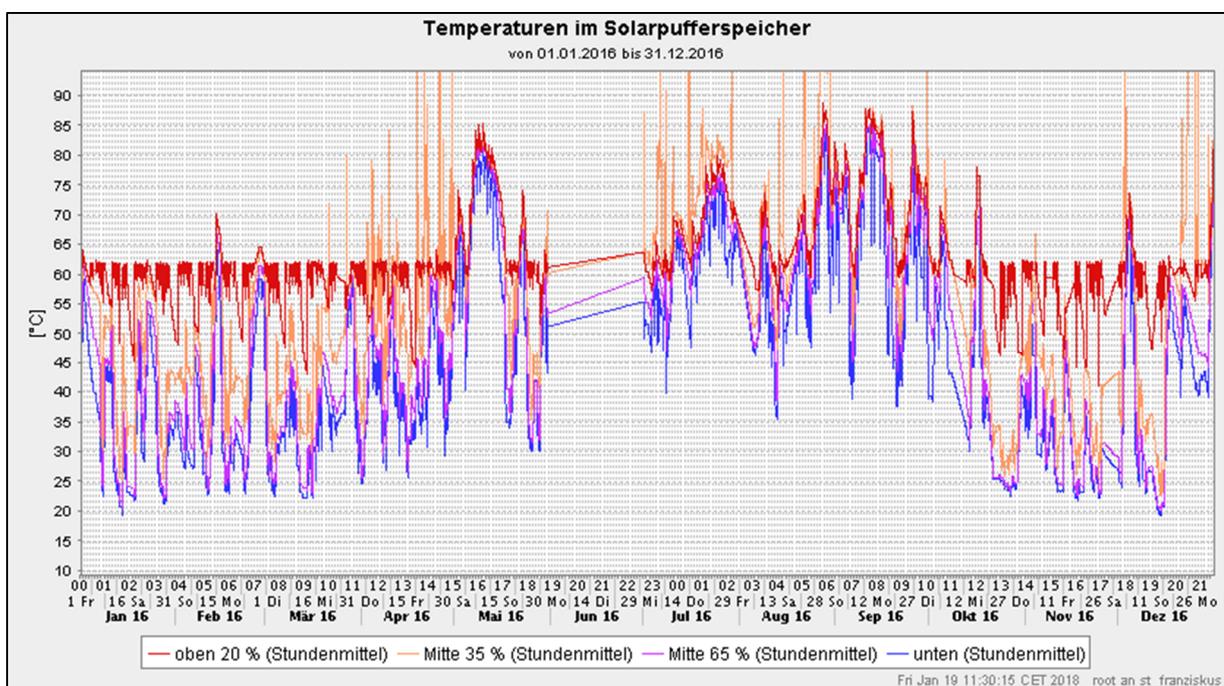


Abbildung 6-12: Stundenmittelwerte Temperaturschichtung im Pufferspeicher 2016

Solange die Solarthermie keine Vollbeheizung erreicht, wird mit elektrischer Nachheizung im oberen Speicherbereich etwa 62°C eingestellt, z. B. im Februar. Die mittleren Speichertemperaturen liegen jeweils deutlich darunter, die untere Speichertemperatur beträgt oft nur 20 ... 30°C.

In den Phasen mit nennenswertem Solarertrag übersteigt häufig die Speichermitteltemperatur den oberen Wert, da das Solarfluid nicht ganz oben in der Nachheizzone eingelagert wird.

In der Ferienzeit im Juli, in der über einen längeren Zeitraum keine Abnahme erfolgt, wird der Speicher bis unten auf über 70°C erwärmt.

Es kann festgehalten werden, dass die Speicherschichtung technisch funktioniert.

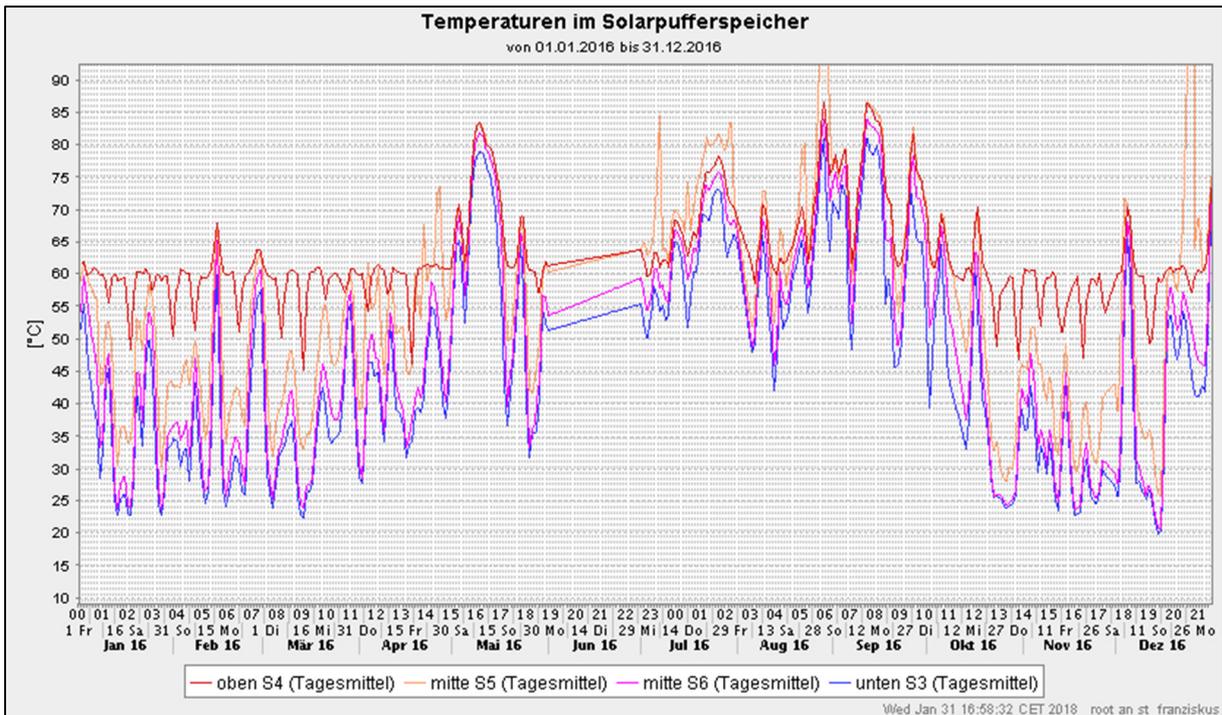


Abbildung 6-13: Tagesmittelwerte Temperaturschichtung im Pufferspeicher 2016

Temperaturen im Hausmeisterspeicher

Der Hausmeisterspeicher hat nur zwei Temperaturmessstellen: oben und unten im Speicher. Abbildung 6-14 zeigt die Messwerte im Trinkwarmwasserspeicher in stündlicher Auflösung, Abbildung 6-15 als mittlere Tageswerte.

In den solarärmeren Phasen des Jahres ist – wie geplant – einmal wöchentlich eine Erwärmung auf über 60°C zu erkennen. Abgesehen von der Legionellenschaltung erreicht die untere Speichertemperatur in diesen Jahreszeiten oft nicht einmal 20°C. Es liegt also Kaltwassertemperatur vor. Im Sommer erfolgt teilweise eine Erwärmung bis 80°C, in sehr sonnenreichen Zeiten werden auch 55°C im unteren Speicherabschnitt erreicht.

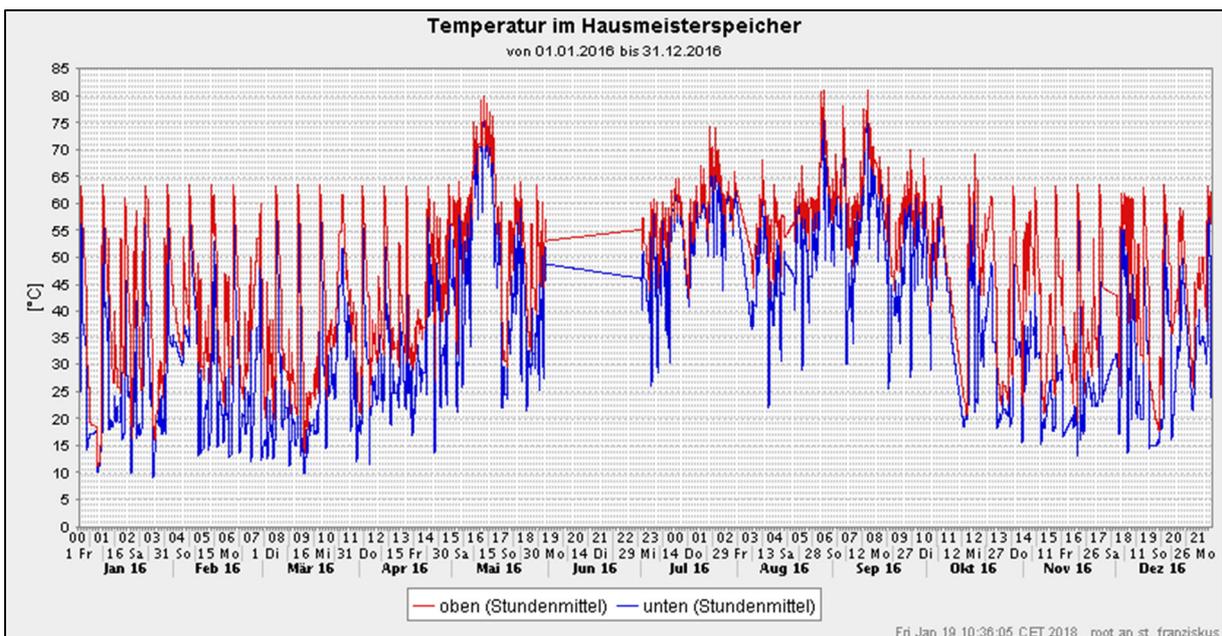


Abbildung 6-14: Stundenmittelwerte Temperaturschichtung im Hausmeisterspeicher 2016

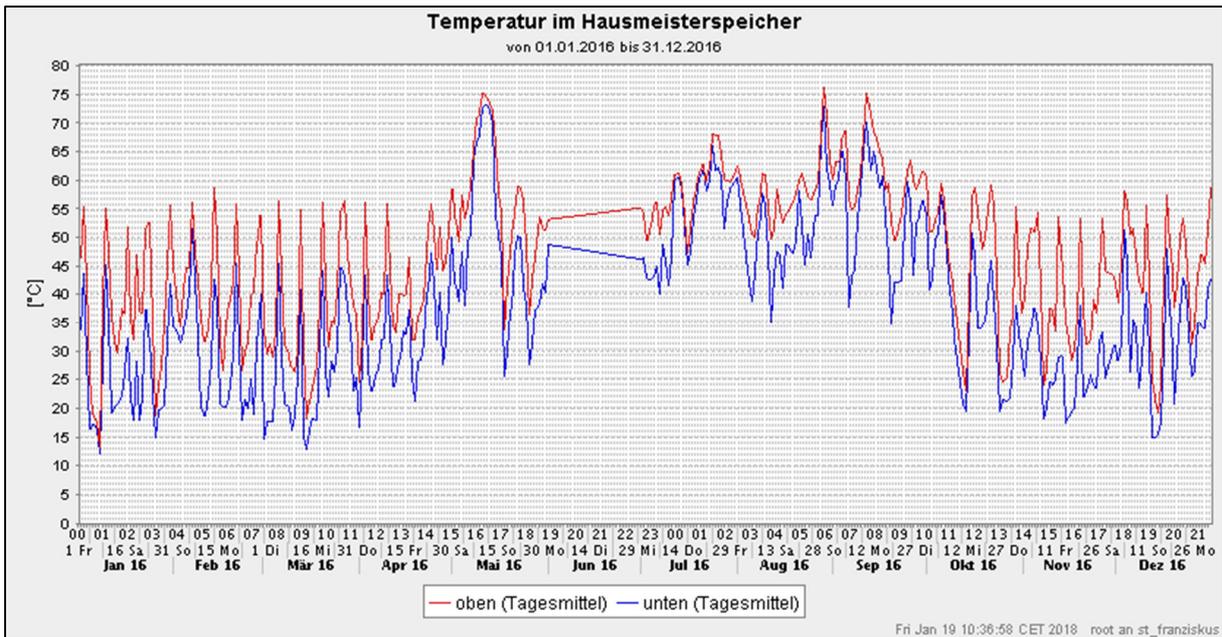


Abbildung 6-15: Tagesmittelwerte Temperaturschichtung im Hausmeisterspeicher 2016

6.6 Elektrische Nachheizung

Nachheizung für den Küchenpufferspeicher

Für die Nachheizung des Küchenspeichers lässt sich aus den Messwerten des Jahres 2016 ein Carpetplot erstellen. Basis ist der analoge Ausgang A12, der anhand einer Zahl zwischen 0 und 1 registriert, zu wieviel Prozent der Elektroheizstab angesprochen wird. Für jedes Messintervall – hier 10 Minuten – wird eine Auslastung angezeigt. Um die Aussagekraft zu erhöhen, werden Werte unter 5 % Auslastung ausgeblendet, siehe Abbildung 6-16.

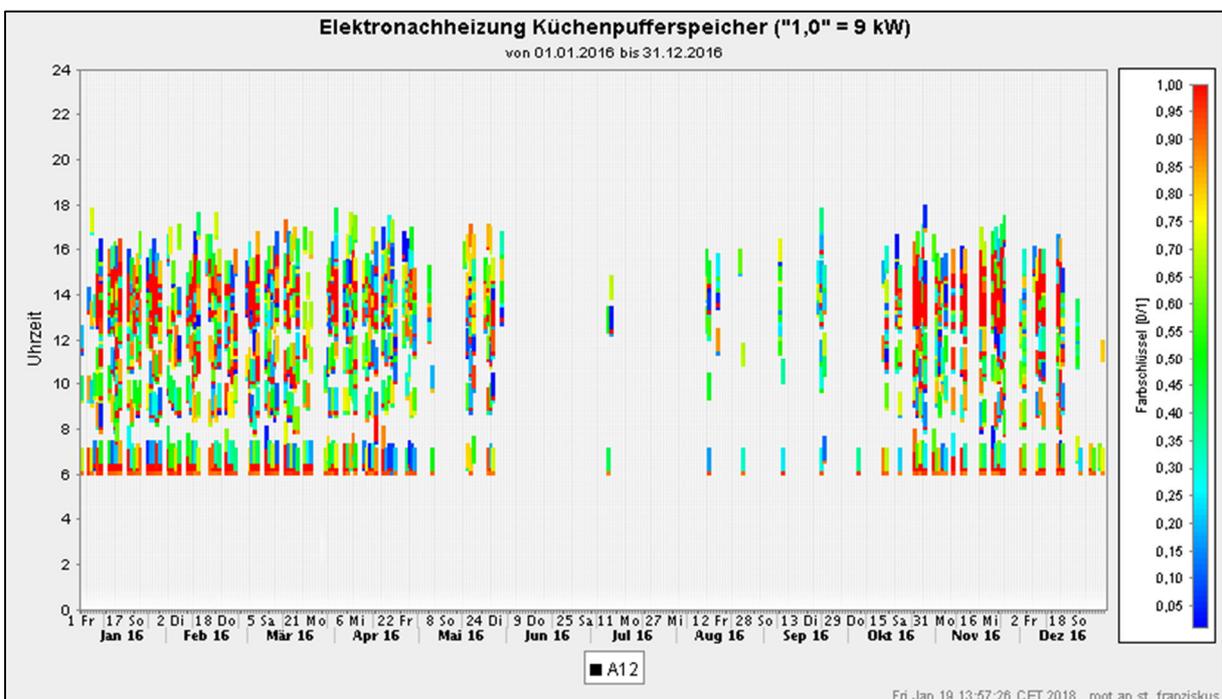


Abbildung 6-16: Carpetplot Funktion des Heizstabes im Pufferspeicher 2016

Es ist gut erkennbar, dass an Wochenenden keine Elektroheizung stattfindet. Außerdem ist das eingegrenzte Zeitfenster 6 bis 18 Uhr sichtbar. Morgens beginnt der Betrieb mit voller Leistung, jedoch ist gegen 8 Uhr ein Minimum an Nachheizung erkennbar. Im Juni ist ein Datenausfall zu verzeichnen.

Abbildung 6-17 gibt für den Zeitraum 1.7.2016 bis 30.06.2017 – ohne nennenswerte Datenausfälle – die zeitliche Verteilung des Nachheizbedarfs an allen Schultagen wieder. In Abbildung 6-18 sind die Ferienhorttage zusammengefasst. Auf Basis dieser zeitlichen Verteilung kann ermittelt werden, wie hoch die Eigendeckung mit PV-Strom für die Küche tatsächlich ist, siehe Anhang 8.4.

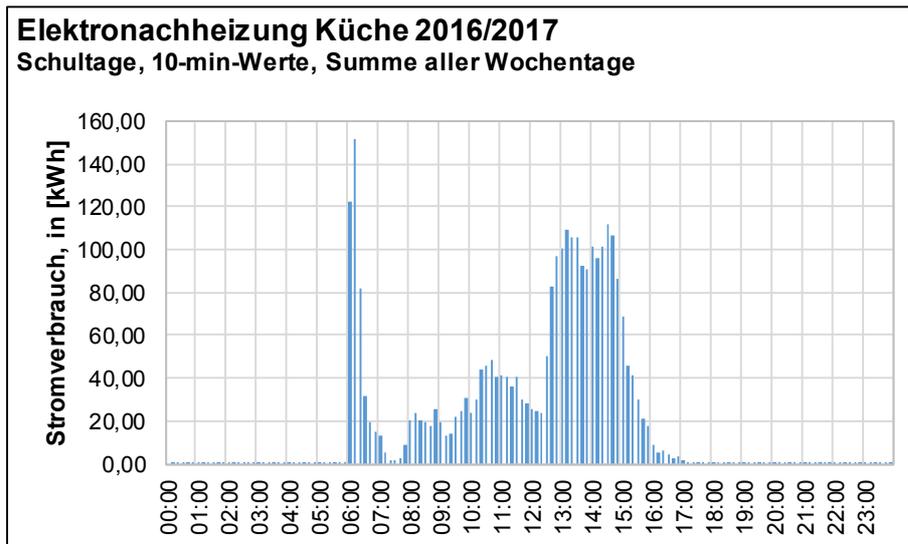


Abbildung 6-17: 10-Minuten-Werte der Elektronachheizung des Puffers an Schultagen 2016/17

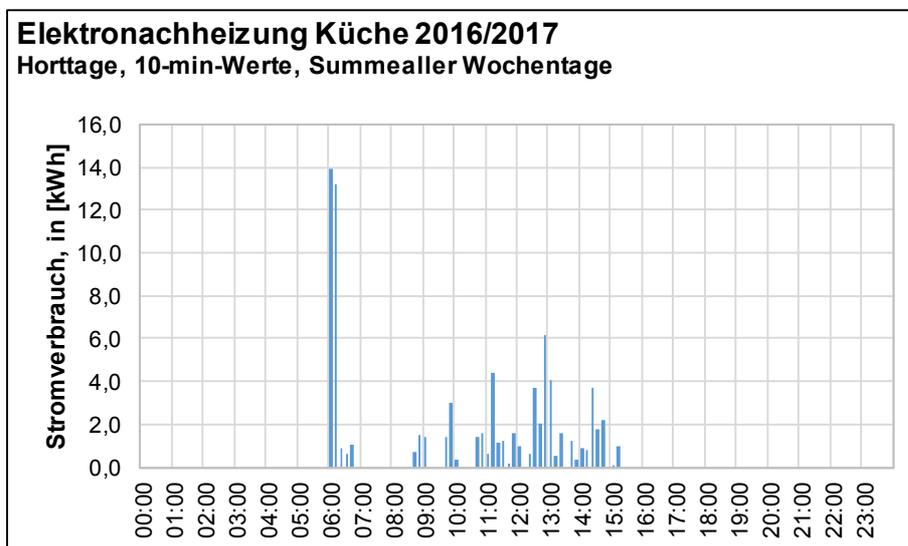


Abbildung 6-18: 10-Minuten-Werte der Elektronachheizung des Puffers an Horttagen 2016/17

Abbildung 6-19 zeigt eine Auflösung des Nachheizbedarfs an Schultagen nach Wochentagen, allerdings im Stundentakt. Nennenswert ist nur die Erkenntnis, dass der morgendliche Aufheizbedarf montags größer ist.

Abbildung 6-20 gibt die Wochensumme für alle Schultage wieder, Abbildung 6-21 die Wochensumme der Elektronachheizung aller Horttage.

Elektronachheizung Küche 2016/2017

Schultage, stündlich, einzelne Wochentage

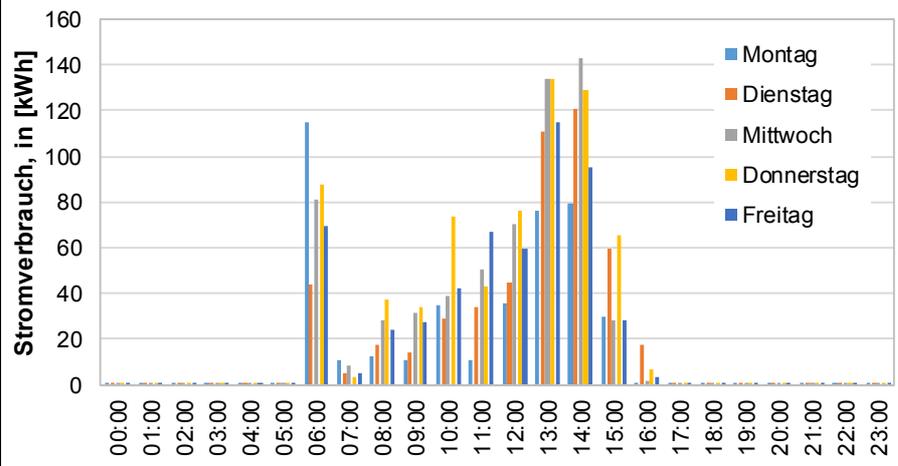


Abbildung 6-19: Stündliche tageweise Elektronachheizung des Puffers an Schultagen 2016/17

Elektronachheizung Küche 2016/2017

Schultage, stündlich, Summe aller Wochentage

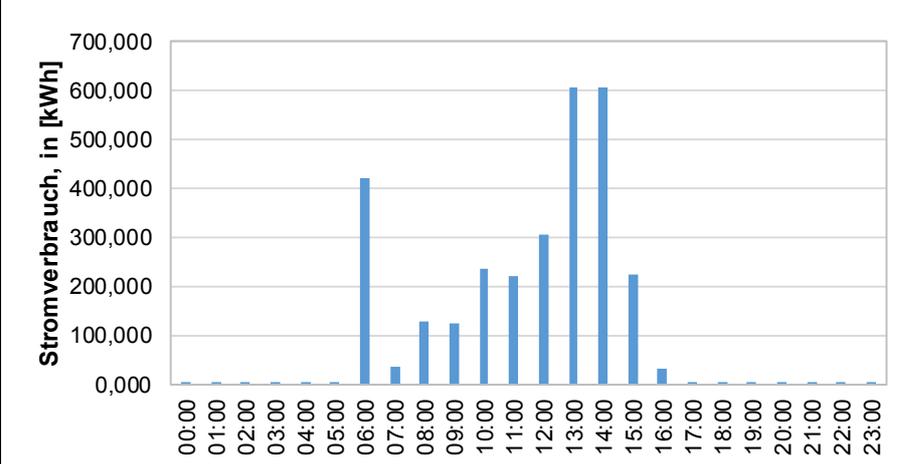


Abbildung 6-20: Stündliche Elektronachheizung des Puffers an Schultagen 2016/17

Elektronachheizung Küche 2016/2017

Horttage, stündlich, Summe aller Wochentage

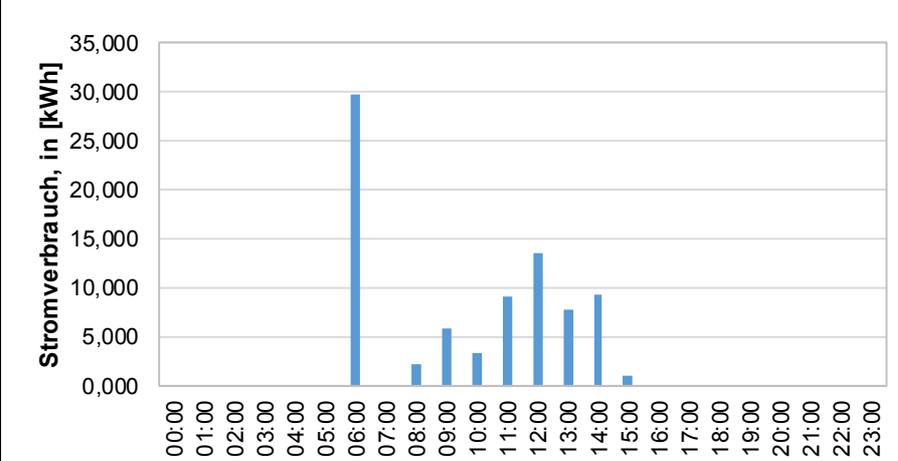


Abbildung 6-21: Stündliche wochenweise Elektronachheizung des Puffers an Horttagen 2016/17

Nachheizung für den Hausmeisterspeicher

Der Carpetplot für den Hausmeisterspeicher zeigt, dass die Nachheizung wie in der Regelung vorgesehen jeweils freitags ab 18 Uhr erfolgt, siehe Abbildung 6-22. Nicht in jeder Woche wird eine Legionellenschaltung ausgelöst. Die Zeitdauer hängt zudem davon ab, ob zeitgleich Wasser gezapft wird und ob noch Restsolarwärme im Speicher vorhanden ist.

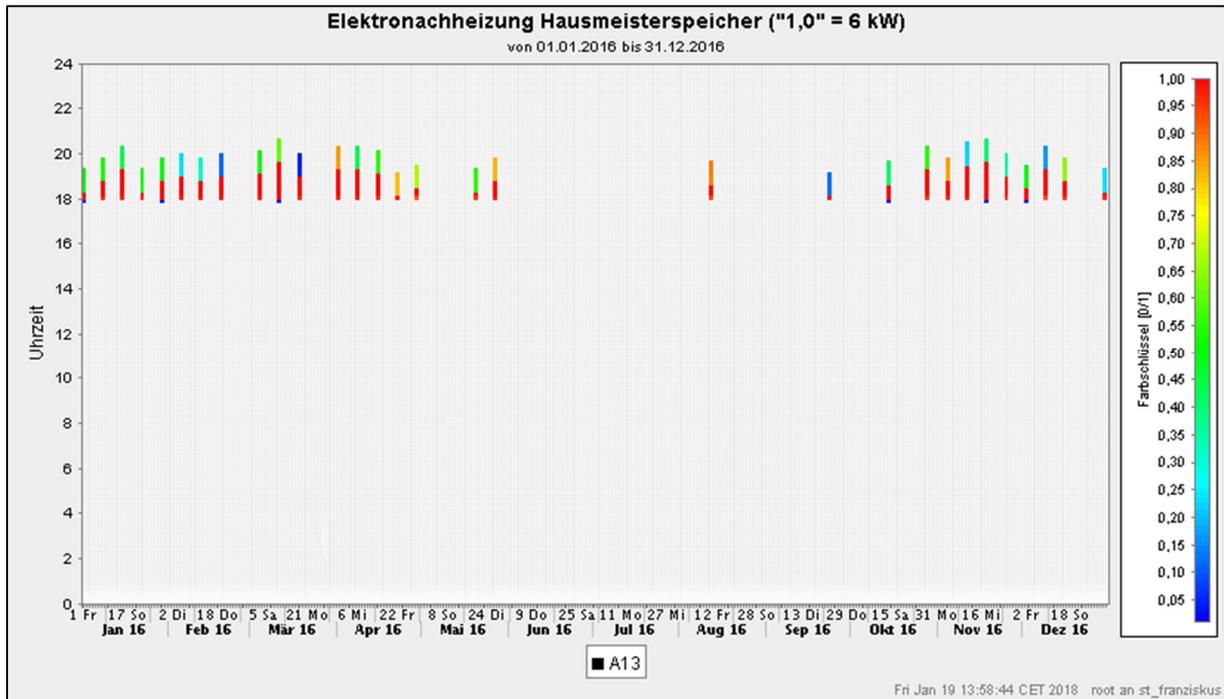


Abbildung 6-22: Carpetplot Funktion des Heizstabes im Hausmeisterspeicher 2016

Abbildung 6-23 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Stromverbrauchs in 10-Minuten-Intervallen. Abbildung 6-24 fasst die Werte zu Stundenwerten zusammen.

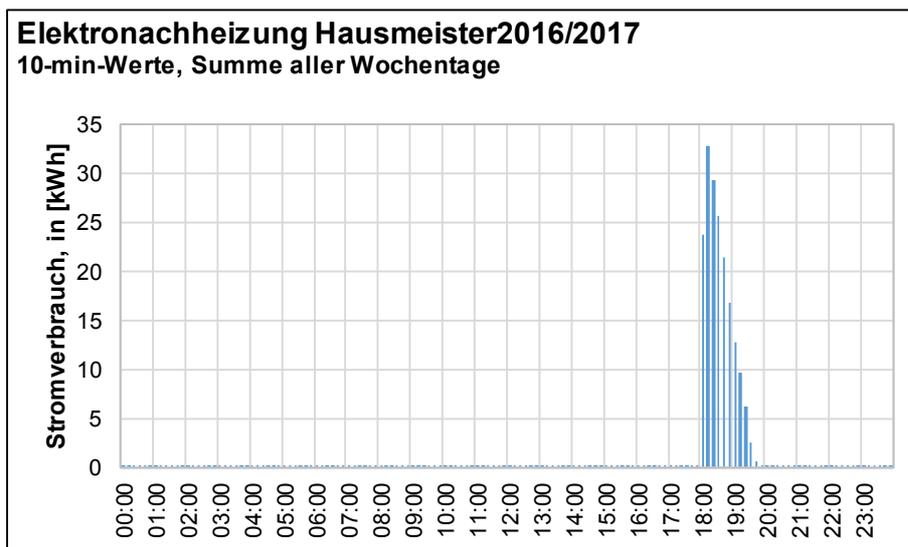


Abbildung 6-23: 10-Minuten-Werte der Elektronachheizung des Hausmeisterspeichers 2016/17

Elektronachheizung Hausmeister 2016/2017 stündlich, Summe aller Wochentage

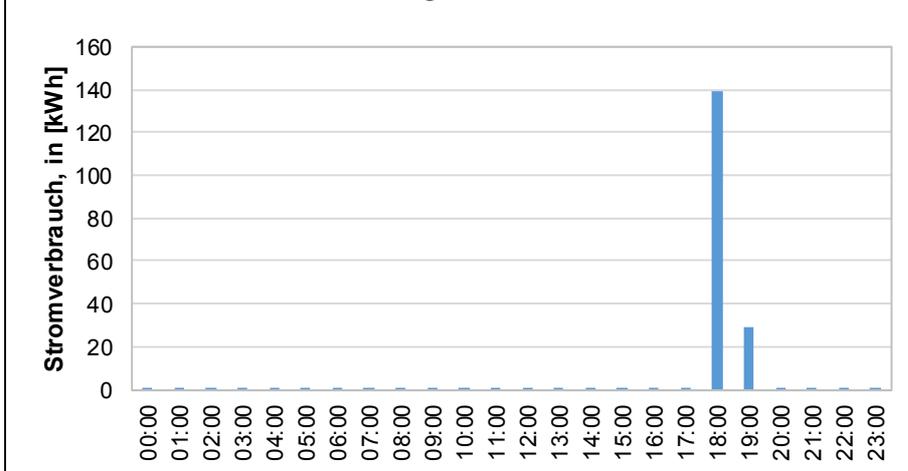


Abbildung 6-24: Stündliche wochenweise Elektronachheizung Hausmeisterspeichers 2016/17

Für beide Speicher lässt sich feststellen, dass die Funktion wie geplant erfolgt.

6.7 Kalt- und Warmwassertemperaturen

Die Messwerte des Jahres 2016 für die Kaltwasser- und Warmwassertemperaturen zeigt Abbildung 6-25. Der Messfühler für das Warmwasser im Küchenspeicher ist ein Tauchfühler, so dass von einer realistischen Temperatur auszugehen ist. Die beiden anderen Fühler sind Anlegefühler, die – sobald kein Medium fließt – einen Wert nahe der Raumtemperatur messen. Daher sind in der Auflösung der 10-Minuten-Werte große Schwankungen erkennbar.

Bei der Kaltwassertemperatur ist zusätzlich davon auszugehen, dass Messfehler vorliegen. Werte von 0°C sind nicht realistisch. Daher wurde für alle weiteren Auswertungen die Erdreichtemperatur von 1 m Tiefe als Ersatzwert angenommen.

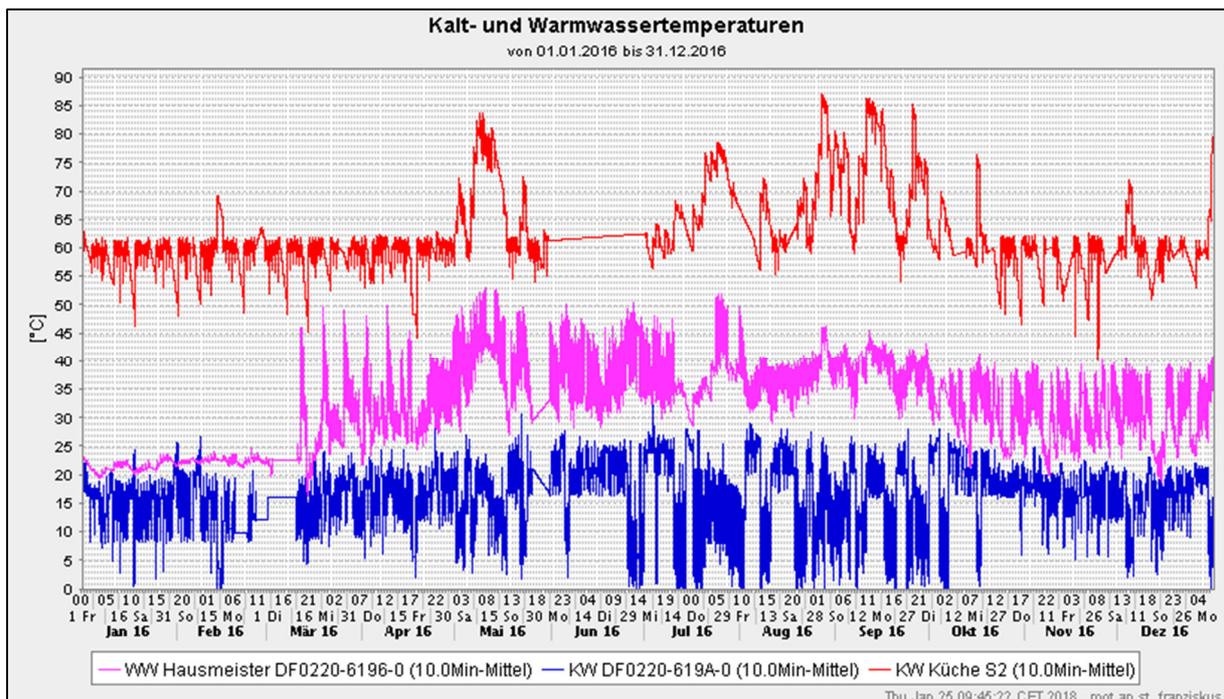


Abbildung 6-25: 10-Minuten-Werte für Kalt- und Warmwassertemperaturen 2016

Abbildung 6-26 komprimiert die Werte auf Tagesmittel, die jeweils realistischere Werte annehmen. Die periodischen Temperatureinbrüche der Warmwassertemperatur in der Küche ergeben sich an Wochenenden, wenn die Elektronachheizung deaktiviert ist. Für die Hausmeisterwohnung sind die Unterschiede zwischen Sommer und Winter erkennbar.

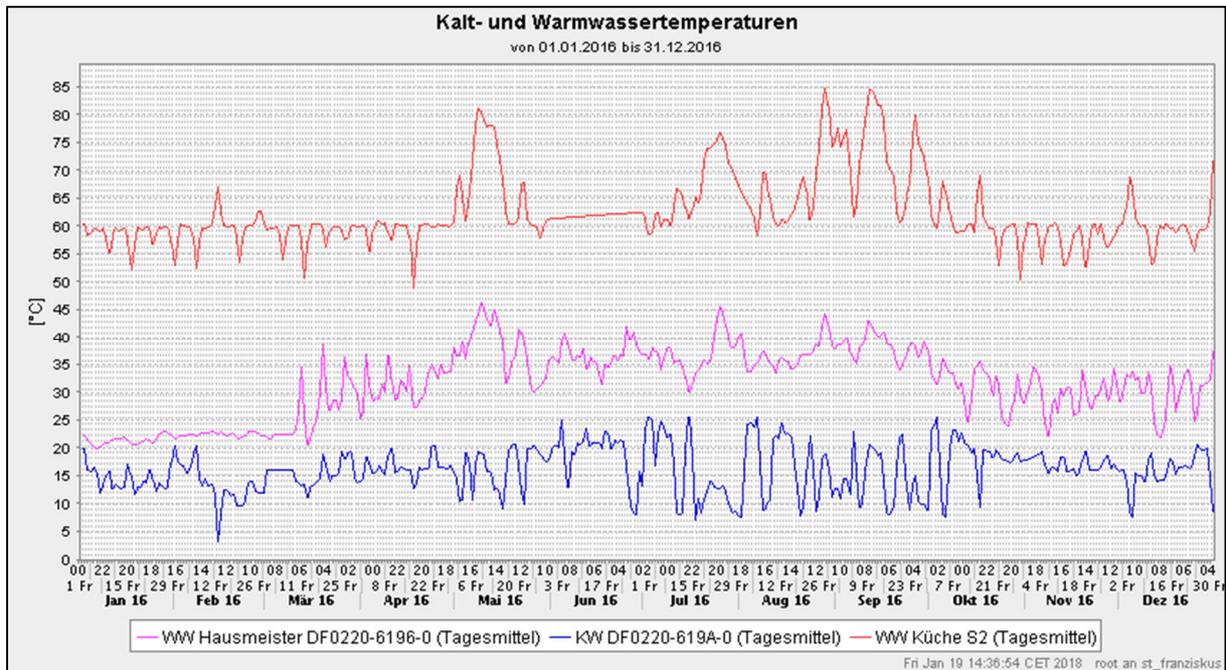


Abbildung 6-26: Tageswerte für Kalt- und Warmwassertemperaturen 2016

Aufgrund der Messungenauigkeiten der Anlegefühler wurde die Temperaturkurve in Abbildung 6-27 wie folgt erstellt:

- als Kaltwassertemperatur dient die Erdreichtemperatur in 1 Meter Tiefe
- als Warmwassertemperatur die Temperatur im oberen Teil des Speichers
- ausgewertet werden nur Messphasen mit Wasserdurchfluss
- die Mittelwertbildung erfolgt gewichtet anhand der Zapfmengen

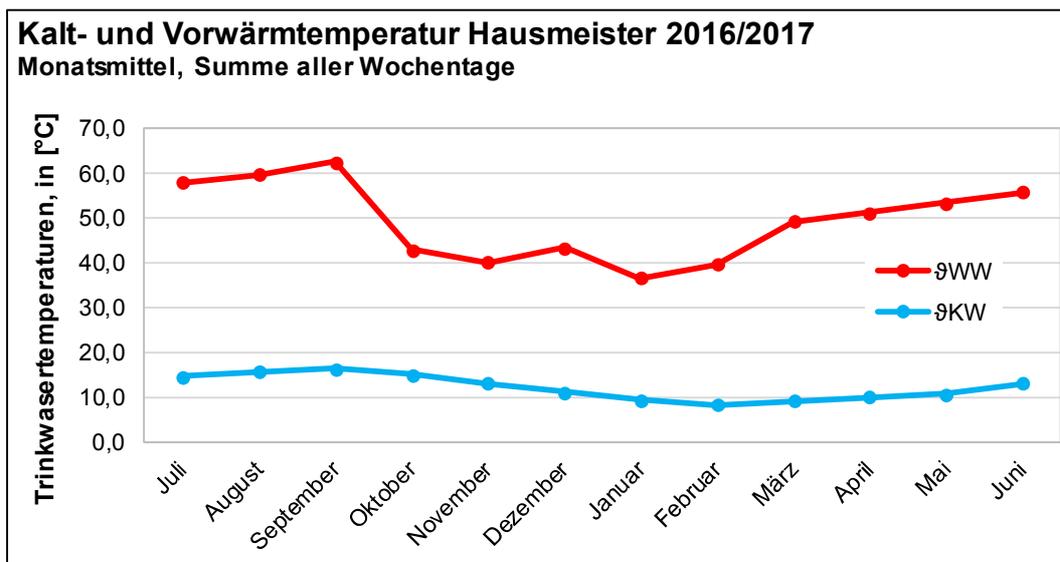


Abbildung 6-27: Monatliche Kalt- und Warmwassertemperaturen Hausmeisterspeicher 2016/17

Anhand der Zahlen kann näherungsweise abgeschätzt werden, welcher lokale Nachheizbedarf sich an den Durchlauferhitzern (die in jedem Fall 60°C erreichen müssen) in der Hausmeisterwohnung zusätzlich ergibt.

6.8 Pumpenbetrieb

Die nachfolgenden Carpetplots in Abbildung 6-28 bis Abbildung 6-33 zeigen die Funktionen der einzelnen Pumpen in der Solarzentrale. Die Umladepumpe hat vor allem ab 12:30 Uhr erkennbare Lastspitzen. In der Zeit werden die größten Wassermengen gezapft und eine Unterstützung des Wärmeübergangs im Doppelrohr ist erforderlich.

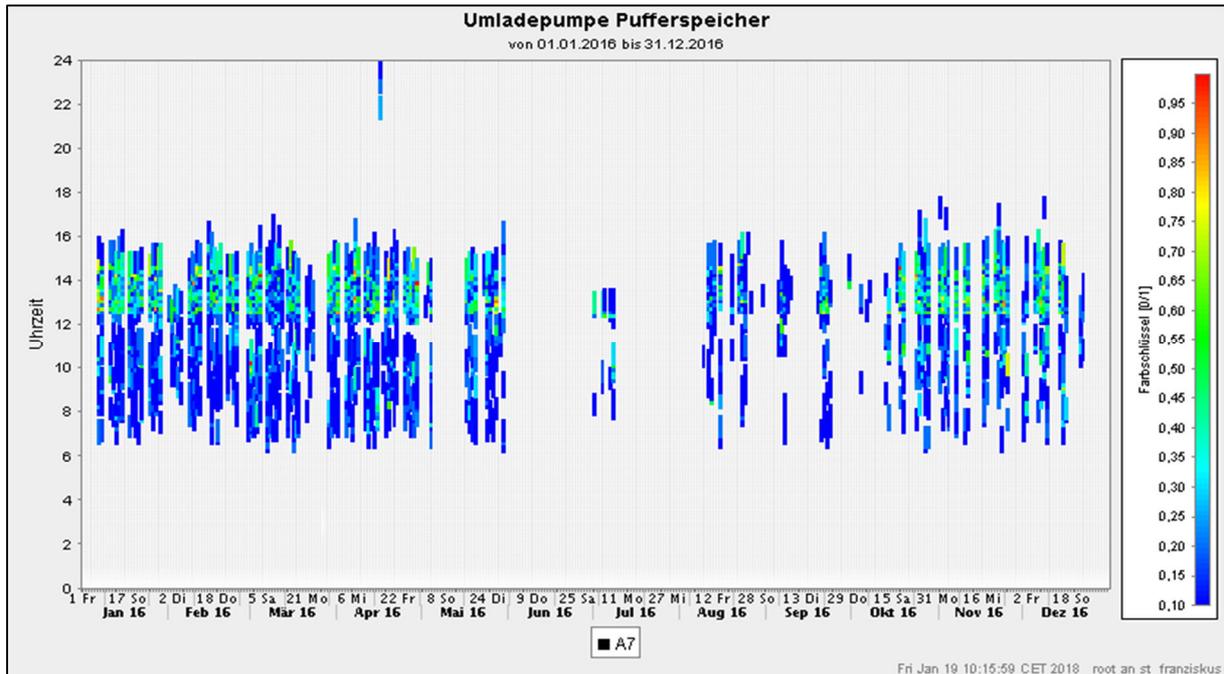


Abbildung 6-28: Carpetplot Funktion der pufferinternen Umladepumpe 2016

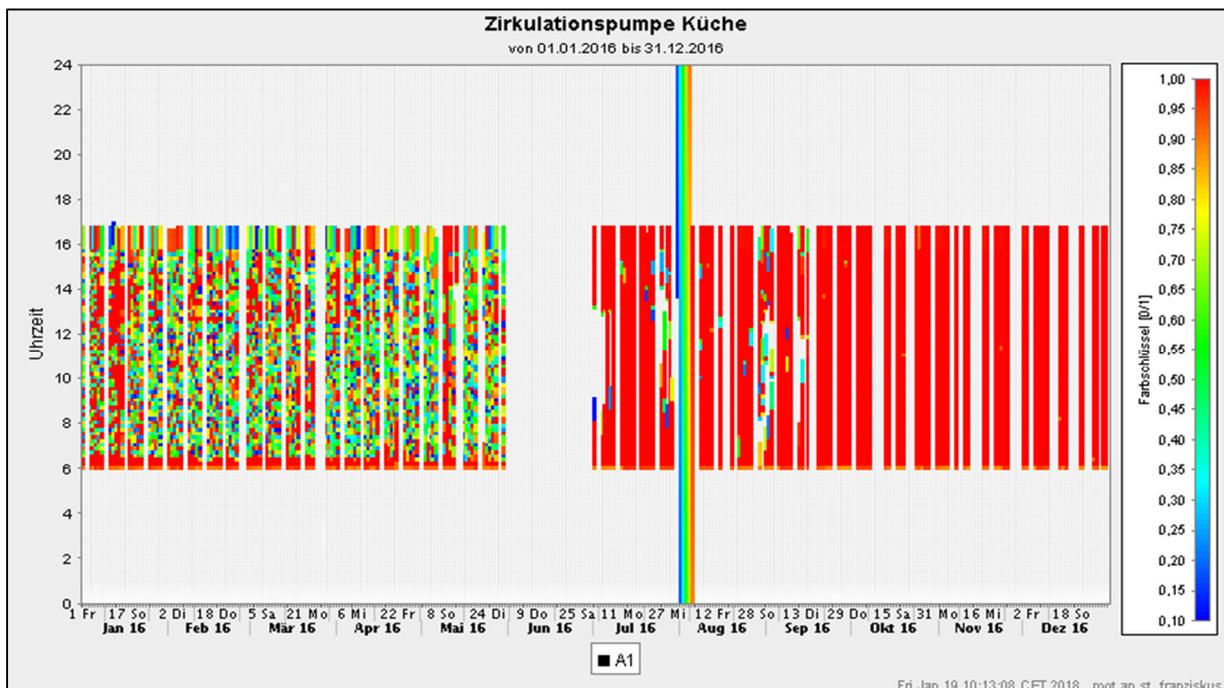


Abbildung 6-29: Carpetplot Funktion der Zirkulationspumpe 2016

Die Zirkulationspumpe wurde bis zum Sommer getaktet betrieben, nach dem Datenausfall im Juni gibt es praktisch nur Volllastphasen. Der Hintergrund konnte nicht geklärt werden. Im Juni ist ein Datenausfall zu verzeichnen, die Messwerte Ende Juli sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Messfehler.

Die Solarkreiselpumpe läuft – wie erwartet – verstärkt in den Sommermonaten – außer den Ferien. Im Juni ist ein Datenausfall zu verzeichnen, die Messwerte im April und Ende Juli sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Messfehler.

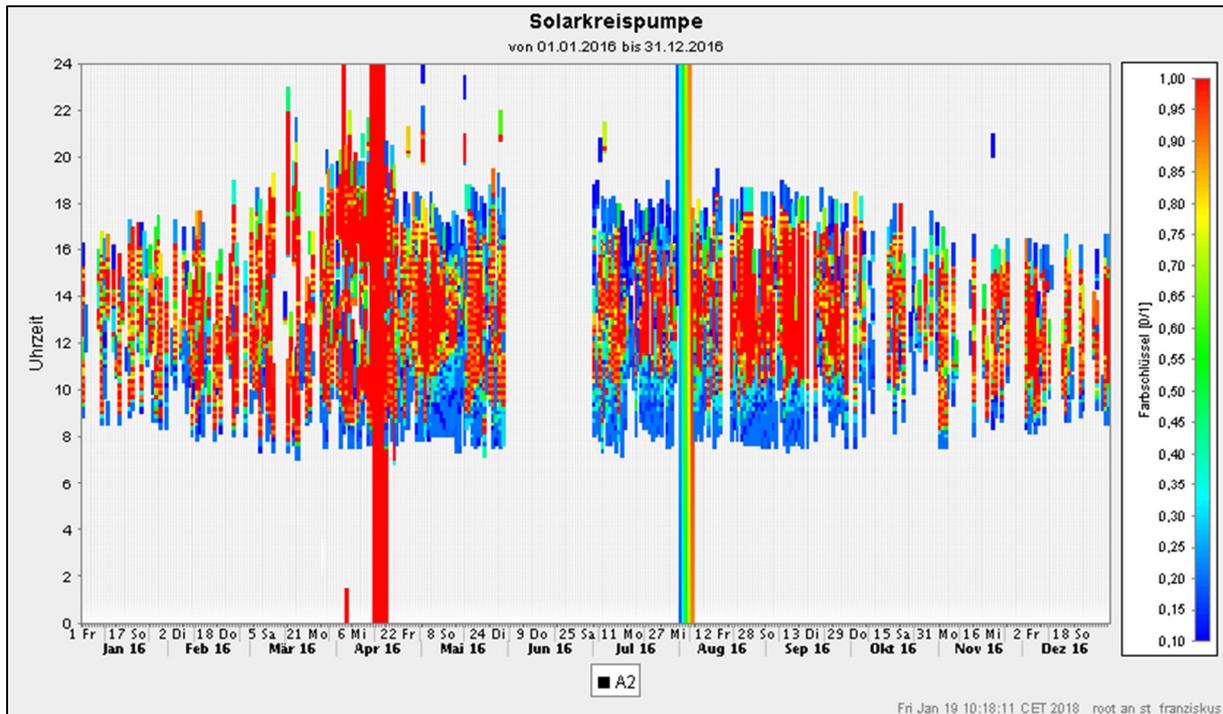


Abbildung 6-30: Carpetplot Funktion der Kollektorkreiselpumpe 2016

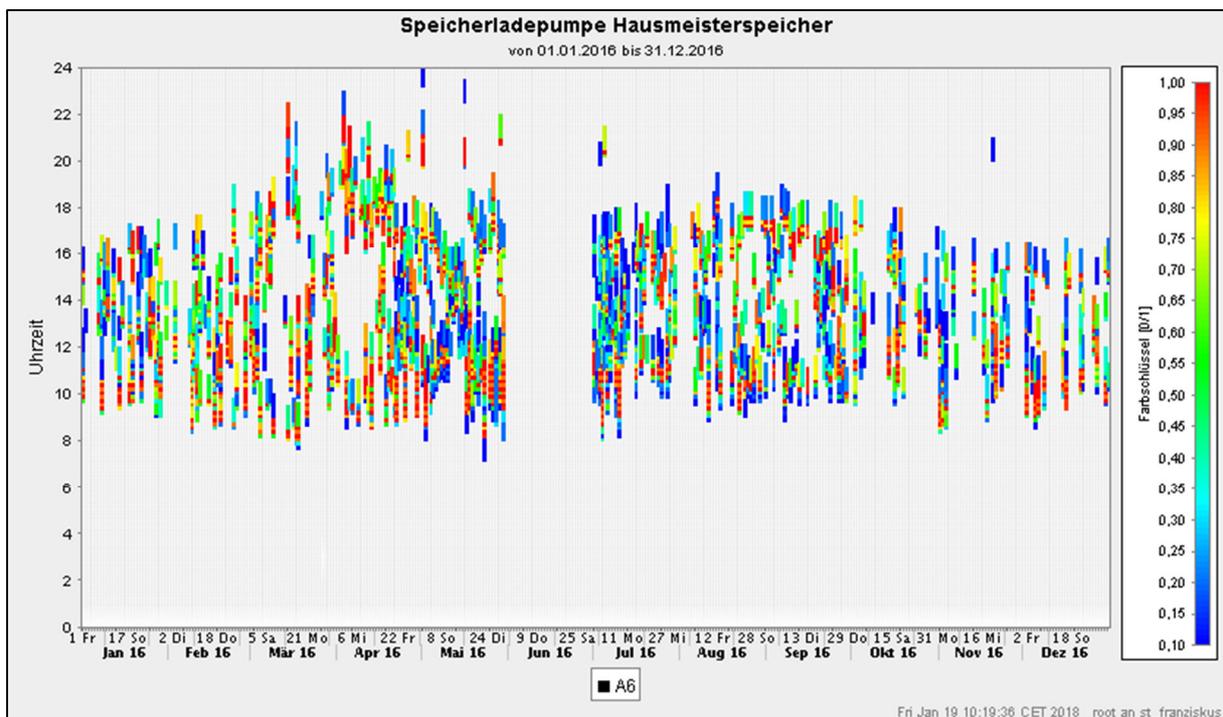


Abbildung 6-31: Carpetplot Funktion der Ladepumpe für den Hausmeisterspeicher 2016

Die Ladepumpe im Hausmeisterspeicher wird entsprechend des Bedarfs im Frühsommer auch später am Abend noch einmal geschaltet, sofern das Kollektorfeld Wärme liefern kann. Vor allem ist erkennbar, dass häufig zwischen 8 und 10 Uhr eine Beheizung erfolgt.

Die Ladepumpe in der Küche springt seltener vor 10 Uhr an. Nach der morgendlichen elektrischen Aufladung um 6 Uhr ergibt sich zwischen 8 und 10 Uhr keine Notwendigkeit der solaren Ladung. Im Juni ist ein Datenausfall zu verzeichnen, die Messwerte Anfang August sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Messfehler.

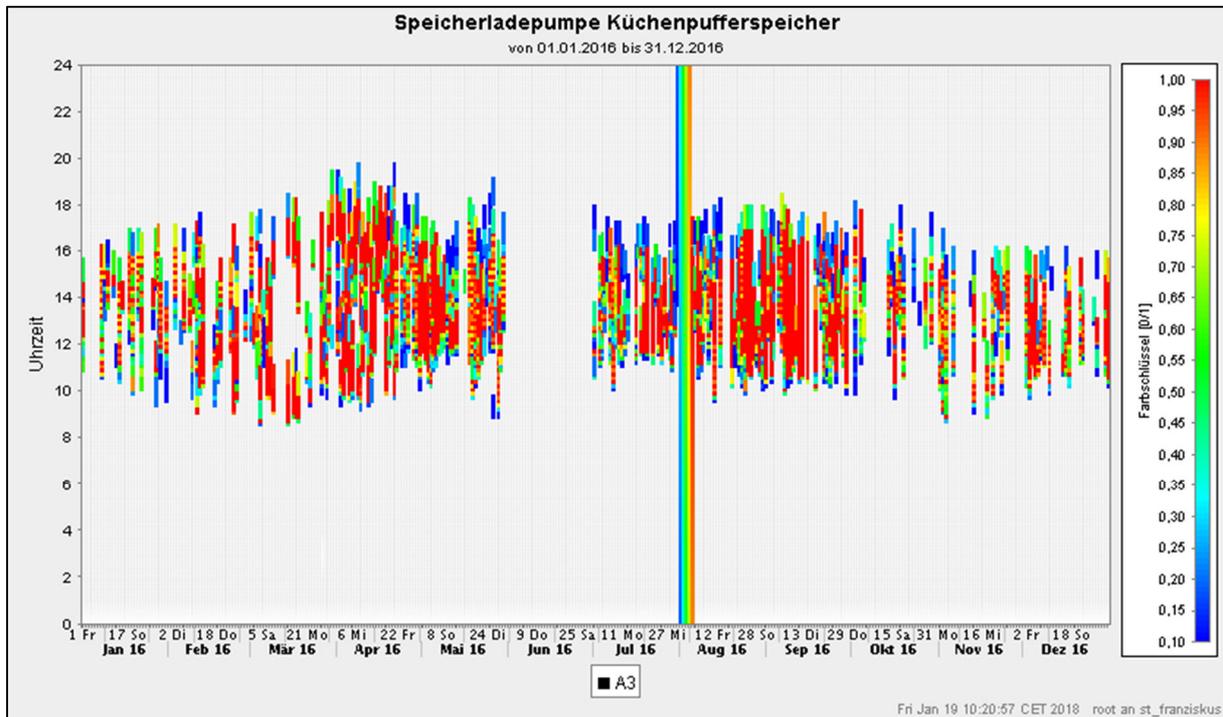


Abbildung 6-32: Carpetplot Funktion der Ladepumpe für den Pufferspeicher 2016

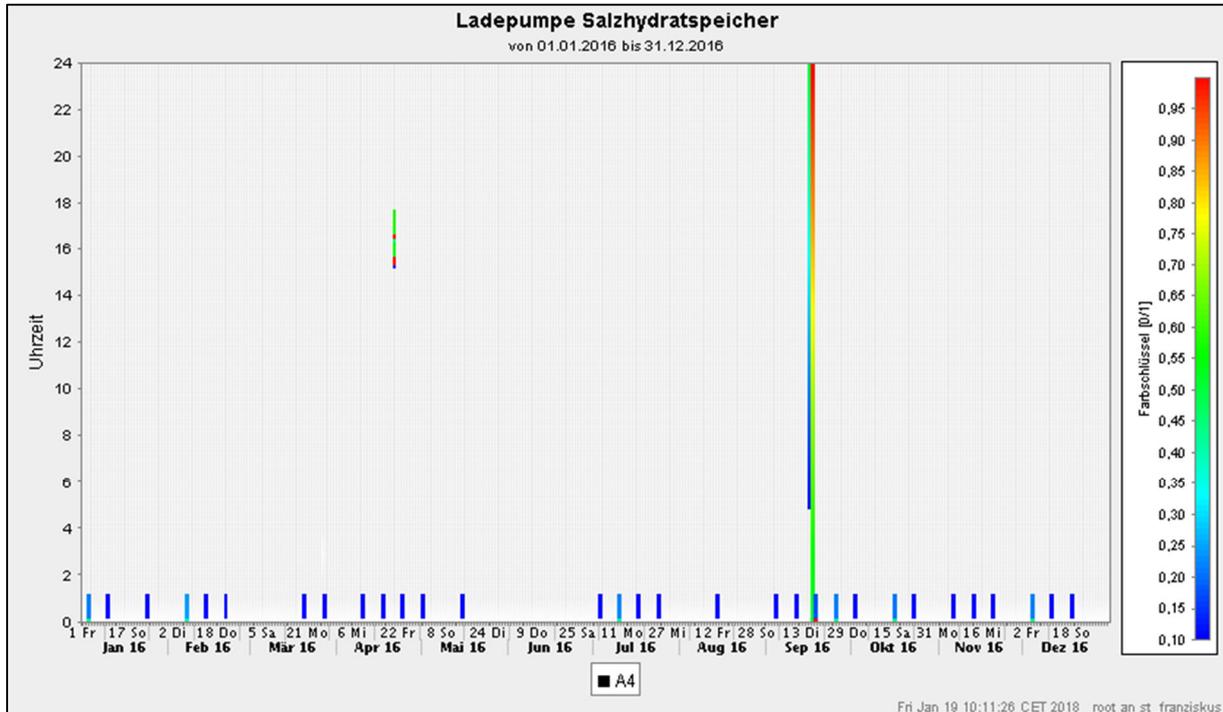


Abbildung 6-33: Carpetplot Funktion der Ladepumpe für den Salzhydratspeicher 2016

Die Pumpe für den Salzhydratspeicher wird in jeder Woche einmal kurz nachts in Betrieb genommen, um eine korrekte Funktion zu testen. Bis auf einen abgebrochenen Ladevorgang im April sind keine Aktivitäten zu erkennen. Im Juni ist ein Datenausfall zu verzeichnen, die Messwerte im September sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Messfehler.

6.9 Probleme und Verbesserungsansätze

Grundsätzlich ist der Solarbetrieb aus technischer Sicht als zufriedenstellend einzuschätzen. Die Zeitschaltprogramme sind nachvollziehbar, die Zeitprogramme auf den Bedarf optimiert, der Pufferspeicher geschichtet. Dennoch gibt es zwei Betriebsempfehlungen.

Trinkwarmwasserzirkulation

Vor Ort kann festgestellt werden, dass sich in der Zirkulationsstrecke für die Küche keine Warmwasserzirkulation ergibt. Wäre dies der Fall, müsste der Warmwasserzähler ständig Durchfluss registrieren, da er sich in der Hauptvorlaufstrecke befindet, siehe Abbildung 6-34. Es werden jedoch seit Sommer 2014 plausible Warmwasserverbräuche gemessen.

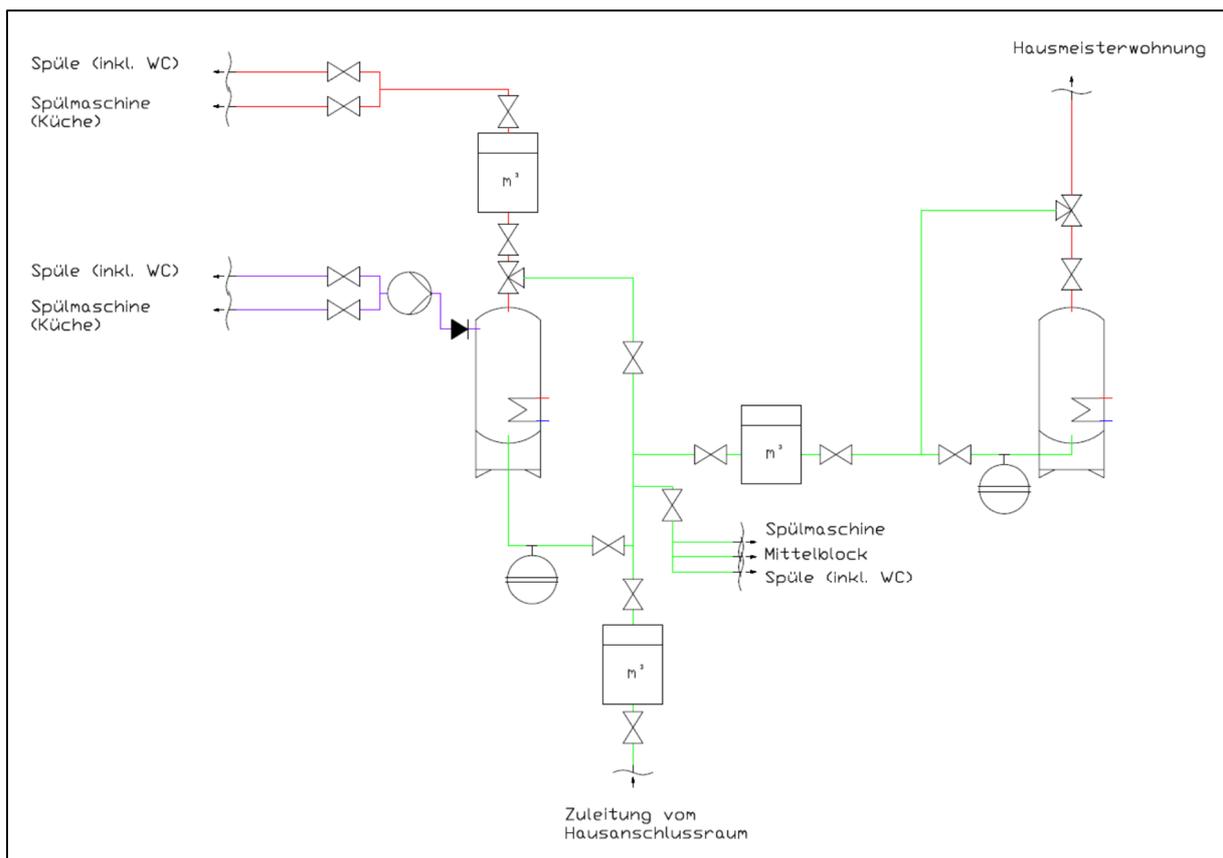


Abbildung 6-34: Schema Verteilung im Solarspeicherraum 033b [13]

Das Problem wurde erkannt, als das Netz in einer Planungssoftware modelliert wurde (Rekonstruktion der nicht mehr verfügbaren Planungsunterlagen). Das Softwareprogramm meldete einen Fehler in der Zählerplatzierung in einer Strecke mit ständigem Durchfluss. Daraufhin wurde in der nächsten Vor-Ort-Begehung die Netztemperatur untersucht. Die Prüfung der Rohroberflächentemperatur zeigte, dass in der Nähe der Pumpe eine Erwärmung festzustellen ist. Es handelt sich vermutlich um die Abwärme der Pumpe selbst, da bereits 30 cm links und rechts neben der Pumpe keine Erwärmung registriert wurde.

Es ist davon auszugehen, dass der Fühler, welcher die Wiedereintrittstemperatur des warmen Wassers in den Speicher misst – siehe Abbildung – ebenfalls nur Wärmeleitung aus dem Speicher erfährt. Bis Sommer 2016 wurden morgens jeweils ca. 47°C erreicht, nach der Messdatenlücke im Juli ändert sich das Verhalten. Der Grund dafür ist unbekannt. Jedenfalls kann bei den aufgezeichneten Temperaturen davon ausgegangen werden, dass keine Zirkulation stattfindet.

Die Zirkulationspumpe wird dennoch angesteuert. Sie versucht trotz geschlossener Fließwege, die Netztemperatur aufrecht zu erhalten. In der ersten Hälfte des Jahres 2016 lief sie oft in Teillast, ab Sommer 2016 dann nur noch in Volllast (siehe auch Abbildung 6-29).

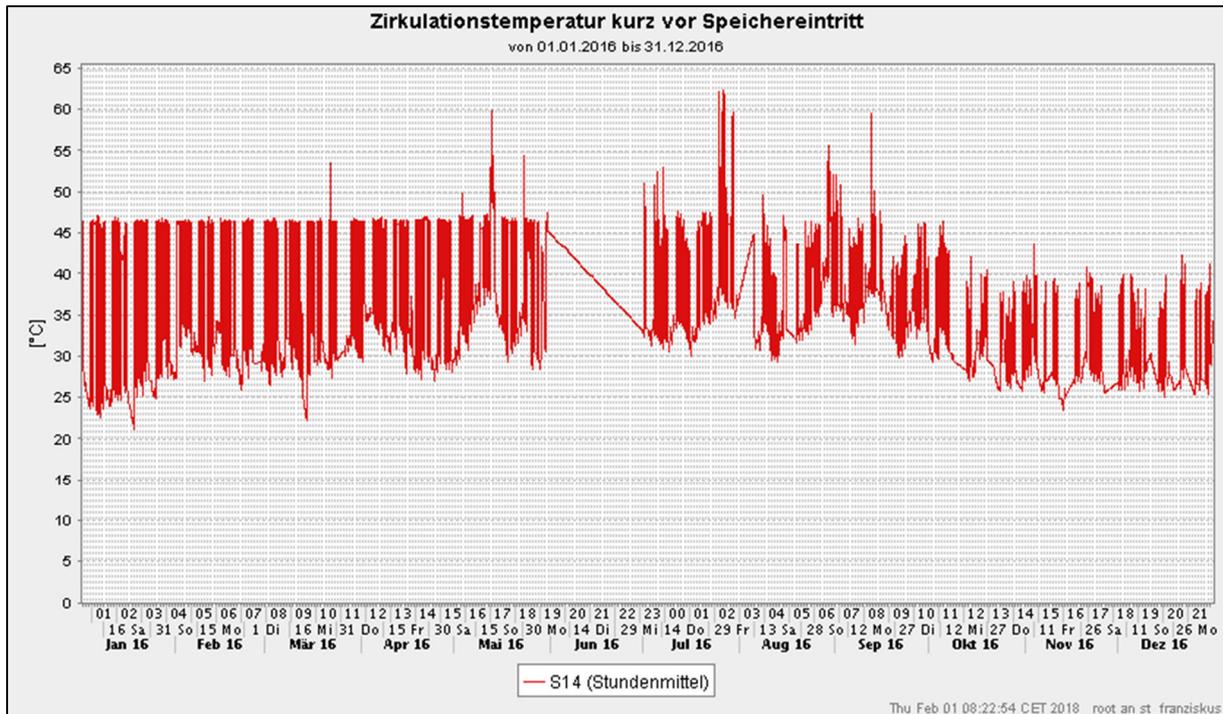


Abbildung 6-35: Zirkulationsrücklauftemperatur 2016

Aufgrund der extrem kurzen Leitungswege ist keine Zirkulation erforderlich. Es gibt weder Beschwerden über lange Wartezeiten auf das Warmwasser, noch Probleme mit Legionellen. Daher kann die Pumpe aus der Regelung entfernt und stillgelegt werden.

Alternativ wird der Absperrhahn o. ä. lokalisiert, welcher das Problem auslöst und geöffnet. Dann ist sinnvollerweise der Warmwasserzähler an einer anderen Stelle zu platzieren – vermutlich bleibt nur die Kaltwasserzufuhr als Messort, da dann die komplette Warmwasserleitung innerhalb des Solarspeicherraumes 0.33b ständig durchflossen wird.

Nachheizung mit Fernwärme

Wie in Kapitel 4.7 bereits ausgeführt, erfolgt die Nachladung des Pufferspeichers derzeit ausschließlich mit Strom. Fernwärme steht derzeit nicht mit ausreichender Temperatur zur Verfügung (45/35°C). Die technischen Gegebenheiten für eine Umschaltung auf Hochtemperaturbetrieb (z. B. 70/50°C) sind jedoch vorhanden, siehe Kapitel 6.1.

Dem Problem der Umschaltung und deren zeitlicher Optimierung widmete sich eine Masterarbeit [3]. Zunächst wurden die Zeitfenster festgestellt, in denen besonders großer Nachheizbedarf besteht – erkennbar an der zeitlichen Verteilung der Elektroenergie, siehe Kapitel 6.6. Es zeigt sich, dass folgende Mengen anfallen:

- zwischen 6:00 und 6:30 Uhr (30 min): 12 % des Tagesbedarfs
- zwischen 6:30 und 12:30 Uhr (360 min): 32 % des Tagesbedarfs
- zwischen 12:30 und 15:00 Uhr (150 min): 51 % des Tagesbedarfs
- zwischen 15:00 und 17:00 Uhr (120 min): 5 % des Tagesbedarfs

Anschließend wurde abgeschätzt, welche Leistungserhöhung sich ergibt, wenn die Fernwärme mit 70/50°C zur Verfügung steht. Das im Pufferspeicher vorhandene Nachheizregister wurde auf Systemtemperaturen von 45/35°C ausgelegt. Die Leistungserhöhung verkürzt die notwendige Ladezeit [3] und damit das Zeitfenster für eine Umschaltung.

Folgende Zeitfenster ergeben sich als Empfehlung für die Umschaltung der Fernwärme auf Hochtemperaturbetrieb:

- 6:00-6:40 und 11:50-13:50 Uhr

Eine Totzeit von 10 Minuten zwischen Elisabeth-Gymnasium bis zum tatsächlichen Ladebeginn sind berücksichtigt.

Aufgrund der geänderten Temperaturen der Fernwärme, sind die Schaltbedingungen für die Nachladung des Pufferspeichers anzupassen. Der Fernwärmeübertrager liegt in der Mitte im Speicher. Zur Verfügung stehen für die Regelung die Temperaturen im Speicher S4, S5, S6 und S3 (von oben nach unten).

Als Grundsatz bleibt die bevorzugte Nutzung der Solarenergie. Deshalb wird die Regelung an dieser Stelle nicht verändert und 6:00-6:40 sowie 11:50-13:50 Uhr mit der Fernwärmenutzung kombiniert. Wenn die Temperatur S5 (Mitte oben 35 %) kleiner als 60°C ist, schaltet sich die Fernwärme an, bis die Temperatur S6 (Mitte unten 65 %) auf 55°C steigt. Da der morgendliche Wärmebedarf vor allem von den Speicherverlusten verursacht wird, wird die Elektroheizung zu dieser Zeit ausgeschlossen. In der Mittagsspitze 11:50-13:50 Uhr kommt ggf. zusätzlich die Elektroheizung zum Einsatz.

Tabelle 6-1 zeigt das geänderte Regelungsprogramm für die optimierte Nachladung mit Fernwärme.

Tabelle 6-1: Empfehlung zu einer angepassten Regelung der Pufferspeichernachheizung [3]

6:00-6:40 Uhr	6:40-11:50 Uhr
•Solarthermie	•Solarthermie
└ wenn S1>S4+5K, A3 ein	└ wenn S1>S4+5K, A3 ein
└ wenn S1<S4+3K, A3 aus	└ wenn S1<S4+3K, A3 aus
└ wenn S4 >65°C, A3 aus	└ wenn S4 >65°C, A3 aus
•Fernwärme	•Elektroheizung & Fernwärme
└ wenn S5<60°C, A10 ein	└ wenn S4<60°C, A12 ein
└ wenn S6>55°C, A10 aus	└ wenn S5<45°C, A10 ein
•keine Elektroheizung	└ wenn S6>40°C, A10 aus
	└ wenn S4>65°C, A12 aus
11:50-13:50 Uhr	13:50-17:00 Uhr
•Solarthermie	•Solarthermie
└ wenn S1>S4+5K, A3 ein	└ wenn S1>S4+5K, A3 ein
└ wenn S1<S4+3K, A3 aus	└ wenn S1<S4+3K, A3 aus
└ wenn S4 >65°C, A3 aus	└ wenn S4 >65°C, A3 aus
•Fernwärme	•Elektroheizung & Fernwärme
└ wenn S5<60°C, A10 ein	└ wenn S4<60°C, A12 ein
└ wenn S6>55°C, A10 aus	└ wenn S5<45°C, A10 ein
•Elektroheizung	└ wenn S6>40°C, A10 aus
└ wenn S4<60°C, A12 ein	└ wenn S4>65°C, A12 aus
└ wenn S4>65°C, A12 aus	
Legende:	
S1: Kollektortemperatur	S4: Temperatur Küchenspeicher oben 20%
S5: Temperatur Küchenspeicher Mitte oben 35%	S6: Temperatur Küchenspeicher Mitte unten 65%
A3: Ladepumpe Küchenspeicher Solarthermie	A10: Ladepumpe Küchenspeicher Fernwärme
A12: Elektroheizung Küchenspeicher	

Die geplante Umschaltung kollidiert zeitlich nicht mit den morgendlichen Wiederaufheizphasen für die beiden Schulen, die dann bereits abgeschlossen sind. Allerdings ist festzustellen, dass die erhöhten Vorlauftemperaturen in den Umschaltzeiten die Nachheizung der Luftheizregister beeinflussen werden. Da diese ebenfalls mit 45/35°C projektiert sind, ergibt eine Vorlaufterperaturerhöhung auf 70°C sehr geringe Volumenströme. Die Regelventile sind dann deutlich überdimensioniert und müssen stark schließen.

Es wird vorgeschlagen, die Verbesserung der Hydraulik in die Realität umzusetzen, wenn die Turnhalle errichtet wird. Da die Turnhalle hinsichtlich der Wärmeversorgung ebenfalls im Rücklauf des Elisabeth-Gymnasiums angeordnet ist, muss das Umschaltproblem spätestens dann ohnehin gelöst werden. Auch dort werden Speicher zum Einsatz kommen, die voraussichtlich zwischen 15 und 18 Uhr geladen werden müssen.

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Bewertung liegt die kombinierte Versorgung zwischen den beiden Lösungen "Solar/Strom (Ist)" und "Solar/Fernwärme" aus Tabelle 4-5 in Kapitel 4.7. Etwa $\frac{1}{3}$ des Strombedarfs wird bleiben und $\frac{2}{3}$ werden durch Fernwärme ersetzt. In Summe könnten so jährlich 300 ... 350 €/a Energiekosten gespart werden. Dazu muss die vorhandene Regelung lediglich so umprogrammiert werden, dass in dem genannten 4-Stunden-Zeitraum eine Umschaltung auf den Fernwärmeverlauf besteht. Die Komponenten sind bauseits alle vorhanden.

7 Latentwärmespeicher

Der letzte Abschnitt des Berichtes stellt den Latentwärmespeicher in seinem technischen Aufbau sowie seiner Funktion vor. Der Abschnitt mit Messwerten muss kurz ausfallen, da – unter den gegebenen Randdaten der St. Franziskus-Grundschule – kein Regelbetrieb eintritt.

7.1 Anlagenbeschreibung

Bei dem Salzhydratspeicher handelt es sich um eine Entwicklung der Firma H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG aus Dingelstädt. Er befindet sich in einem unterirdischen Bauwerk vor der Schule in Höhe der Aula bzw. Küche. Abbildung 7-1 zeigt ein Schaltschema mit den wichtigsten Komponenten. Diese werden nachfolgend erläutert.

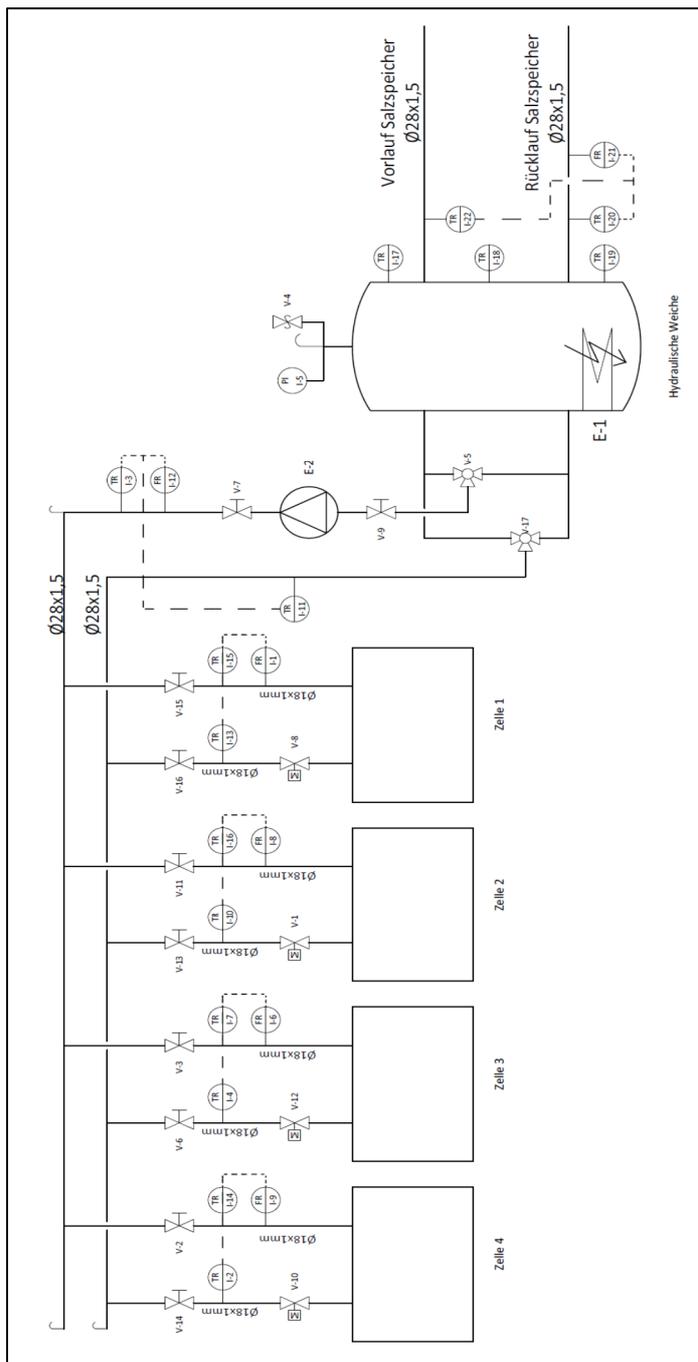


Abbildung 7-1: Hydraulikschema der Salzhydratspeicheranlage [14]

Der Speicherraum ist vollständig unterirdisch angeordnet und über eine verschlossene Stahl-
luke und Leiter zu betreten, siehe Abbildung 7-2.



Abbildung 7-2: Eingangsluke zum unterirdischen Speicherraum

Der eigentliche Speicher besteht im Falle der St. Franziskus-Grundschule aus 4 Zellen (andere
Größen sind möglich), die ihrerseits aus jeweils 4 baugleichen Zylindern bestehen, siehe Ab-
bildung 7-3. Die Zylinder sind über einen Drehschieber miteinander verbunden. Die Zellen sind
untereinander parallel verschaltet.



Abbildung 7-3: Vier Speicherzellen mit je 4 Zylindern

Die Ladung und Entladung der Zellen erfolgt über eine Regelpumpe (Grundfos UPN 2 25-70
mit 3 ... 70 W Leistungsaufnahme), siehe Abbildung 7-4.

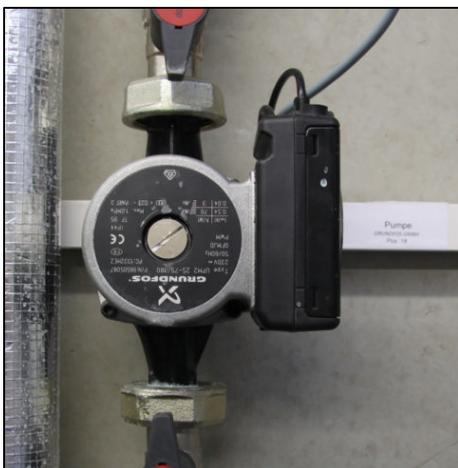


Abbildung 7-4: Modulinterne Pumpe

Die Verbindung der Zellen untereinander und die Anbindung an das restliche Netz erfolgt über eine hydraulische Weiche mit 120 l Volumen (laut Hersteller "Thermoweiche"). In Richtung Gebäude sind von dort aus Erdleitungen verlegt, die am ZORTSTRÖM-Verteiler im Solarspeicherraum 0.33b enden. Das Latentspeichersystem hat eine eigene Stromversorgung und Regelung, siehe Abbildung 7-5.



Abbildung 7-5: Hydraulische Weiche, Regelmodul und Erdleitung

Im Stuhllager Raum 0.30 der Küche steht zudem ein netzwerkfähiger Rechner, über den die Daten eingesehen werden können – Abbildung 7-6. Das gesamte System wurde vom Hersteller H.M. HEIZKÖRPER konzipiert.



Abbildung 7-6: Monitoringrechner für den Latentwärmespeicher in Raum 0.30

Da aufgrund des fehlenden tatsächlichen Betriebs keine nennenswerten Daten zur Auswertung zur Verfügung stehen, wurde auf eine Aufschaltung auf das zentrale Monitoring verzichtet.

Ein Teilschnittmodell eines Speicherzylinders zeigt Abbildung 7-7. Im inneren ist eine Wabenstruktur vorhanden, die in den Hohlräumen das Salzhydrat (hier: Natriumacetat-Trihydrat) enthält. Der Speicher hat eine 2-schalige Polypropylen-Dämmung mit einem U-Wert von 0,21 W/(m²K). Der Wärmeverlust beträgt laut Hersteller 7 K/d. Weitere technische Daten des Herstellers zu der Thermobatterie sind Abbildung 7-8 oder dem separaten **Anhang E** zu entnehmen.

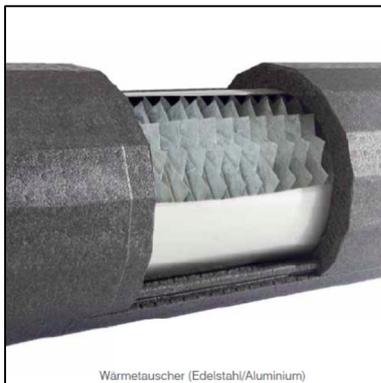


Abbildung 7-7: Schnittmodell eines Speicherzylinders [14]

Technische Daten Thermobatterie	
Produktbeschreibung	modular aufgebauter Latentwärmespeicher *
Funktionsbeschreibung	Mehrere Einzelspeicher (Zylinder) werden unter Ausnutzung des Phasenumwandlungseffektes zur langfristigen und (in wesentlichen Teilen) verlustfreien Speicherung von Wärme eingesetzt.
Speichermedium	Natriumacetat-Trihydrat
Wärmeeinbringung/Aufladung (unter Nutzung von Überschusswärme)	ca. 3 h bei 80 – 100 °C
Aufladekapazität (Zelle)	ca. 50 kWh (sensibel + latent)
Speicherkapazität „sensibel“	kurzfristig (ca. 1/3 der eingebrachten Wärme)
Speicherkapazität „latent“	langfristig verlustfrei (ca. 2/3 der eingebrachten Wärme)
Temperaturen nach Auslösung/Kristallisation	ca. 55 °C
Auslösung	elektromagnetisch
Abmessungen (Zelle)	0,76 m x 0,76 m x 1,95 m
Gewicht (Zelle)	500 kg (spezifische Belastung/m ² : 480 kg)
Abmessung und Gewicht eines Zylinders (ohne Dämmung)	Durchmesser 0,30 m; Höhe 1,60 m Gewicht ca. 142 kg (beladen)
Größenordnung Anlage	Bei einem gut gedämmten 140 m ² -Einfamilienhaus in Mitteldeutschland kann man von ca. 6 bis 10 Zellen ausgehen (bei Auslegung auf eine Abdeckung zwischen 85 % und 95 %). Wichtig: eine konkrete Projektierung unter Einbindung aller Parameter ist unumgänglich!
Projektierung (zu berücksichtigende Parameter)	→ Wärmebedarf → Brauchwasserversorgung → gewünschter Autarkiegrad → Anzahl Jahreszyklen - Nachladung → Smart-Grid-Integration
Materialeinsatz	Wärmetauscher: → Edelstahlrohre mit Aluminium-Lamellen Zylinder/Deckel/Sammler: → Edelstahl
Einbau	Grundelement ist in der Regel die vorverrohrte und befüllte, ca. 1 m ² große Zelle; ggfls. können die Speicher aber auch einzeln vor Ort zusammengesetzt werden, abweichende Konfigurationen sind ebenfalls möglich.
Hersteller	H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG

Abbildung 7-8: Technische Daten der Speicherpatrone [14]

7.2 Funktionsbeschreibung

Als Speichermedium kommt Natriumacetat-Trihydrat zum Einsatz. Insgesamt sind in jedem der 16 Zylinder 110 kg dieses Materials vorhanden.

Es werden 16 Zylinder mit einer Kapazität von je 12,5 kWh eingesetzt. Davon entfallen $\frac{1}{3}$ auf die sensible Wärme und $\frac{2}{3}$ auf die latente Wärme, sodass effektiv ca. 8 kWh latent genutzt werden können. Bei 16 Zylindern ergibt dies eine latente Speicherkapazität von 128 kWh (bei einer Gesamtspeicherkapazität von 200 kWh).

Der Umschlagpunkt für die latente Wärme liegt bei 58°C. Es ist eine Auslösung durch Peltier-Elemente vorhanden. Die 16 Zylinder können einzeln oder je zwei parallel ausgelöst werden. Der Salzhydratspeicher braucht mindestens 85°C für die vollständige Schmelze des Salzhydrats. Ein Ladevorgang dauert ca. 3 Stunden. Die theoretische Schmelztemperatur von 58°C wird in der Praxis nicht verwendet, weil damit nicht sichergestellt ist, dass an allen Stellen des Speichers eine gleichmäßige Änderung des Aggregatzustandes erreicht wird.

Die sensible Wärme wird mit bis zu 80°C überhitzt gelagert und kann auch unterkühlt werden, ohne dass die Kristallisation ausgelöst wird.

Ladevorgang im Detail

Die Freigabe für das Laden kommt von der Solarregelung SET. Zunächst muss sichergestellt sein, dass die beiden anderen Speicher (Küche, Hausmeister) voll beladen sind. Das Laden beginnt, wenn eine solare Vorlauftemperatur von mindestens 80°C vorliegt. Die Pumpe am ZORTSTRÖM-Verteiler in Richtung Latentwärmespeicher wird freigeschaltet.

Die Sole wird zuerst in die hydraulische Weiche gelassen. Wenn in der Weiche mindestens 60°C registriert werden und einer der 16 Zylinder eine Temperatur unter 60°C aufweist, beginnt die eigentliche Ladung. Die Ladung erfolgt Zylinder für Zylinder. Eine Umschaltung erfolgt mit einem Drehschieber.

Die Ladung ist zu Ende, wenn die Innentemperatur aller 16 Zylinder mindestens 80°C erreicht hat. Der SET-Regelung wird gemeldet, wenn alle Innentemperaturen 80°C erreicht haben, so dass die Pumpe am ZORTSTRÖM-Verteiler abgeschaltet werden kann.

Die vollständige Ladung führt zu komplett geschmolzenem Natriumacetat-Trihydrat in überhitztem Zustand.

Entladevorgang im Detail

Es gibt 2 Arten der Entladung. Eine sensible mit Entnahme von Wärme zwischen 80°C und Erdreichtemperatur (ohne Kristallisation) sowie eine Latentwärmeentnahme (mit Kristallisation).

Die sensible Entladung hat Vorrang. Die 4 Zellen sind parallel bzw. alternativ ansteuerbar. Entladen wird bis auf ca. 50 ... 45°C Innentemperatur der Zylinder. Diese Entladung belässt das flüssige Natriumacetat-Trihydrat in diesem Zustand und unterkühlt es.

Die latente Entladung erfolgt, sobald in der hydraulischen Weiche eine Temperatur unter 40°C registriert wird sowie die Pumpen laufen (Indiz für Bedarf). Ein Zylinder nach dem anderen wird ausgelöst und entleert. Für das Auslösen muss die Innentemperatur des jeweiligen Zylinders unter 40°C liegen. Das Auslösen selbst erfolgt mit einem Peltier-Element, welches punktuell -20°C Temperatur erzeugt und damit die Kristallisation startet.

Abbildung 7-9 zeigt schematisch die Vorgänge und zugehörigen Temperaturen.

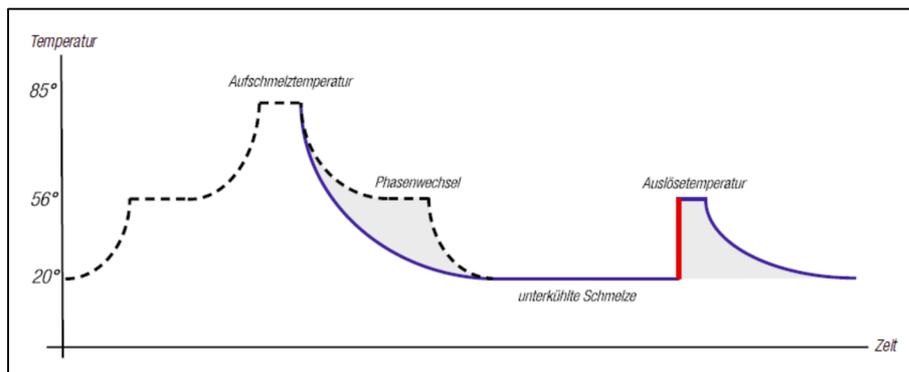


Abbildung 7-9: Schematischer Lade- und Entladezyklus des Speichers [14]

Der korrekte Ablauf der geschilderten Lade- und Entladevorgänge kann anhand laufender Messergebnisse nicht geprüft werden, da er in kompletter Folge nicht innerhalb der drei Monitoringjahre erfolgt ist.

7.3 Messorte und Messtechnik

Tabelle 7-1 zeigt mit der Latenwärmespeicherung verbundenen Messfühler. Sie sind einerseits extra für das Monitoringprojekt installiert worden (GEDES) oder waren bauseits im Solarmodul bereits vorhanden (SETSOLAR). Grundlegendes zu dieser Projektarchitektur wird in Bericht 1 erläutert. Die von H.M. installierten Messfühler werden nicht erfasst.

Tabelle 7-1: Messpunkte bezüglich Salzhydratspeicher

Kürzel	Einheit	Gruppe	Untergruppe	Beschreibung
GEDES				
Hilfsenergie				
DF0118-61C0-0	A	SOL	LAT	Strom für Salzhydratspeicher
DF0118-61C0-5	kW	SOL	LAT	Leistung Salzhydratspeicher Phase L1
DF0118-61C2-0	A	SOL	LAT	Strom für Salzhydratspeicher
DF0118-61C2-5	kW	SOL	LAT	Leistung Salzhydratspeicher Phase L2
DF0118-61C4-0	A	SOL	LAT	Strom für Salzhydratspeicher
DF0118-61C4-5	kW	SOL	LAT	Leistung Salzhydratspeicher Phase L3
SETSOLAR				
Verteiler				
S10	°C	SOL	NTZ	Temperatur Zortströmverteiler Vorlauf
S9	°C	SOL	NTZ	Temperatur Zortströmverteiler Rücklauf
Pumpen und Zustandsgrößen				
A8	0/1	SOL	LAT	Zustand Umschaltventil Salzspeicher Beladung
A9	0/1	SOL	LAT	Zustand Umschaltventil Salzspeicher Entladung
A4	0/1	SOL	HES	Zustand Ladepumpe zwischen Zortström und Salzspeicher

Die Ausstattung mit Messtechnik erlaubt es nicht, die Wärmemenge zu erfassen, die dem Salzhydratspeicher zugeführt wird oder diesem entnommen wird. Diese Messung war im ursprünglichen Konzept vorgesehen. Nachdem nach der Installation des Latentwärmespeichers klar wurde, dass sich ein nur sehr eingeschränkter Betrieb ergeben würde, wurde die Messtechnikausstattung – aus Kostengründen – reduziert.

Mit dem Hersteller H.M. wurde die Vereinbarung getroffen, dass evtl. notwendige Messdaten (werden im Schaltschrank mitgeschrieben) später offline zur Verfügung gestellt werden.

Lediglich der Hilfsenergieverbrauch für das Gesamtmodul (Schaltschrank usw.) wird dauerhaft im Monitoring von GEDES erfasst.

7.4 Messergebnisse

Inbetriebnahme

Mit einiger Verzögerung nach dem Bezug der Schule wurde im November 2014 der Latentwärmespeicher in Betrieb genommen. Temperaturen und Durchflüsse wurden protokolliert, um die korrekte Funktion zu testen.

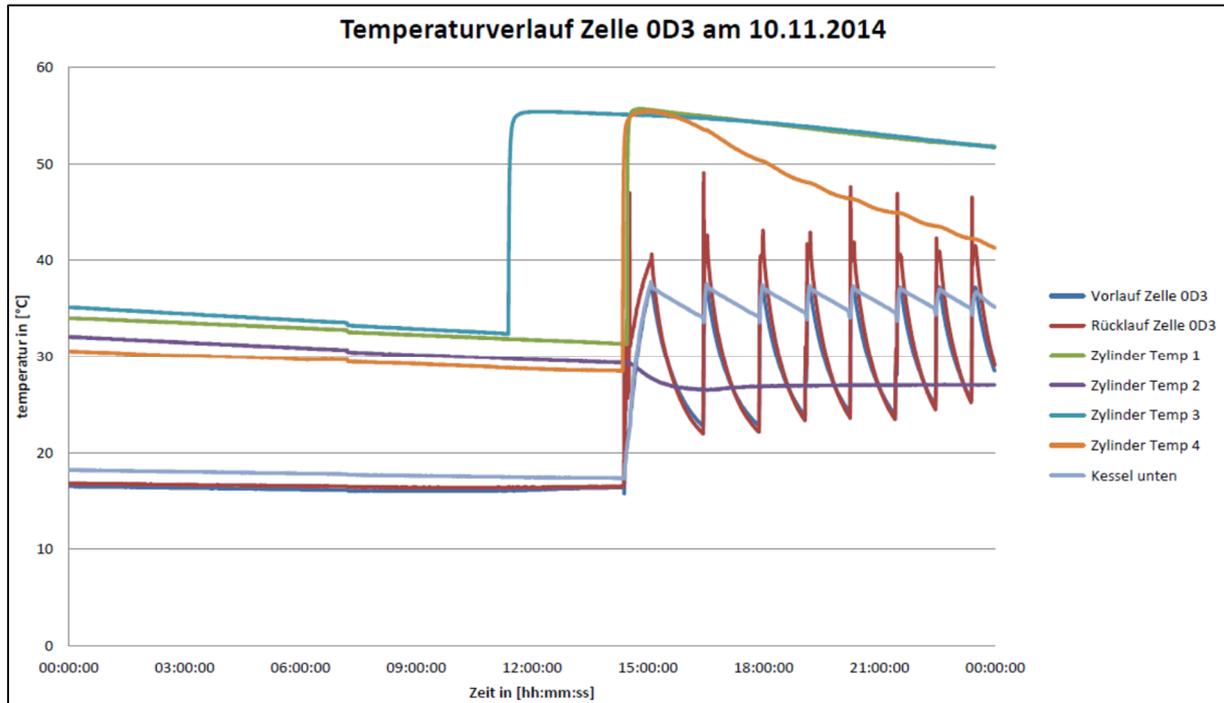


Abbildung 7-10: Temperaturen bei der Initialisierungsmessung des Speichers [15]

Abbildung 7-10 zeigt gemessene Temperaturen an der Zelle 3. Gemessen werden 4 Zylindertemperaturen. Die Zylinder starten alle unterkühlt mit 30 ... 35°C. Die Zylinder 3, dann 1 und 4 sind flüssig und werden ausgelöst, was zu einer sprunghaften Temperaturerhöhung auf etwa 55°C führt. Der Zylinder 2 wird entweder nicht ausgelöst oder er war nicht geladen, seine Temperatur sinkt auf ca. 27°C weiter ab.

Die hydraulische Weiche (im Bild mit "Kessel" beschriftet) erreicht im unteren Bereich etwa 35 ... 38 °C. Die Solltemperatur in der hydraulischen Weiche ist auf 37°C eingestellt. Der Vor- und Rücklauf der Zelle 3 schwanken sägezahnartig zwischen 25 und 45°C. Diese Schwankungen ergeben sich, weil der Durchfluss intervallartig erfolgt, um den Sollwert zu halten.

Abbildung 7-11 zeigt den Durchfluss durch die Zelle 3.

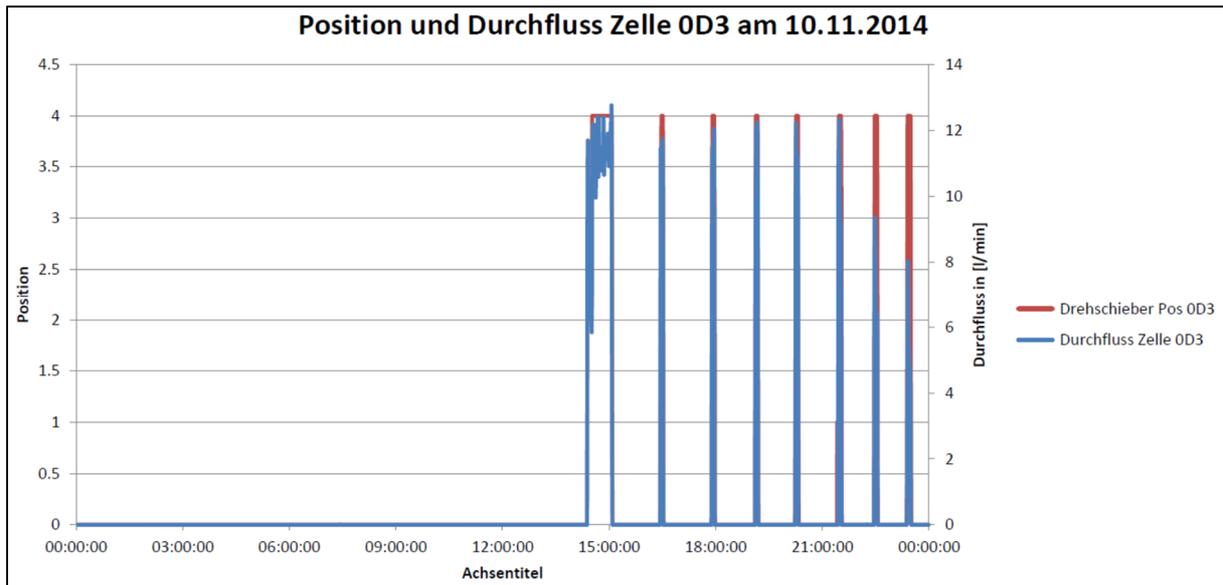


Abbildung 7-11: Durchflüsse bei der Initialisierungsmessung des Speichers [15]

Laden und Entladen im Regelbetrieb

Die Beladung des Speichers hat 2016 nur einmal ausgelöst: am Freitag, 15.04. um 15:24. Allerdings nur für 12 Minuten. Es ist davon auszugehen, dass es nicht zu einer Vollladung kam, da dazu 3 Stunden notwendig sind. Entladungen sind im selben Jahr nicht zu erkennen.

Im Jahr 2017 gab es keine Auslösung.

Zum Jahr 2015 sind keine detaillierten Erkenntnisse verfügbar. Mit einem nennenswert anderen Bild ist nicht zu rechnen.

Hilfsenergie

Die erfasste Hilfsenergie für das Jahr 2016 zeigt Abbildung 7-12. Für die anderen Jahre ist keine detaillierte Auswertung erstellt worden, da mit ähnlichen Ergebnissen zu rechnen ist. Sehr homogen über das Jahr verteilt fallen 528 kWh für Strom an.

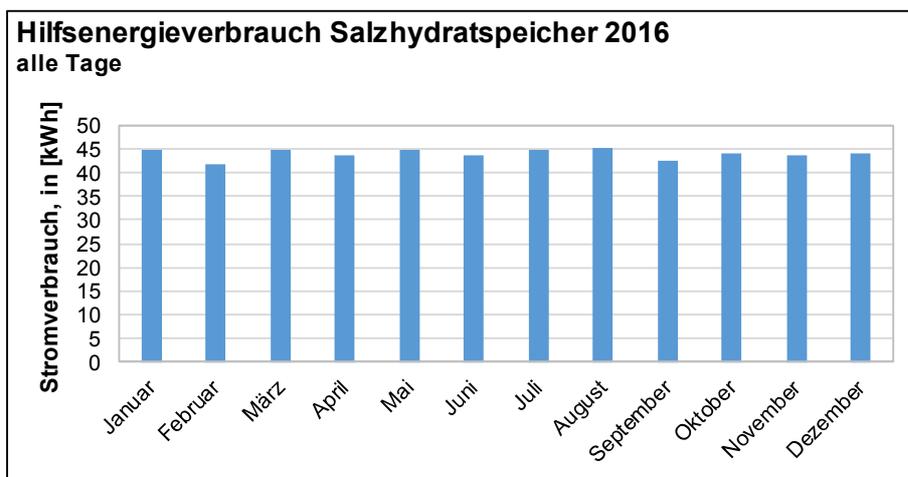


Abbildung 7-12: Hilfsenergieverbrauch des Salzhydratspeichers 2016

7.5 Verallgemeinerung und Fazit

Die Lieferung des Latentwärmespeichers verzögerte sich zunächst aufgrund von Konstruktions- u. Steuerungsproblemen beim Hersteller immer wieder. Auch entstand zwischenzeitlich der Eindruck, die Schule solle einen Prototyp testen.

Aus Sicht des Monitorings wurden mehrfach die Bedenken geäußert, dass der Latentwärmespeicher für das Ziel der Nullemission nicht maßgeblich notwendig sei. Zudem wurde das Kollektorfeld auf die Wassermenge der Küche hin bemessen, so dass keine nennenswerte solare Überschusswärme vorhanden ist.

Der Salzhydratspeicher arbeitet vermutlich grundsätzlich korrekt. Auch das gewählte Konzept, alle 16 Zylinder einzeln starten zu können und so in Dosen von 8 kWh zu entleeren ist nachvollziehbar und sinnvoller als in der Planungsphase vermutet. Die Bedenken, zu viel Wärme auf einmal auszulösen, konnten damit ausgeräumt werden.

Fazit aus Sicht der St. Franziskus-Grundschule

Es können keine kurzfristigen Empfehlungen ausgesprochen werden, den Zustand ohne Speichernutzung abzustellen. Der Speicher sollte im Zusammenhang mit dem Turnhallenneubau verwendet und in das dortige Versorgungskonzept eingebunden werden.

Bis dies soweit ist, wäre zu überlegen, das System komplett stromlos zu schalten, um die mehr als 500 kWh/a Hilfsstromverbrauch (100 ... 150 €/a) einzusparen. Anhand der Einbaulage im Erdreich ist davon auszugehen, dass es nicht zu Frostschäden kommen wird. Zudem sind alle Leitungsteile mit Sole (frostsicher bis -30°C) gefüllt.

Auf eine Wirtschaftlichkeitsbewertung als solches wird verzichtet. Einerseits handelt es sich für die Schule St. Franziskus um ein gefördertes Projekt, andererseits sind (noch) keine Einsparungen oder Erträge zu erkennen.

Fazit aus Sicht anderer Schulen

Die Investitionskosten belaufen sich auf etwa 25.000 ... 30.000 € für die Erdbauarbeiten (die in anderen Bauprojekten nicht unbedingt notwendig wären, wenn der Platz im Gebäude zur Verfügung steht) sowie etwa 14.000 € für die eigentliche Speichertechnik.

Geht man von einer Lebensdauer von 20 Jahren aus und setzt weder Wartung noch Hilfsenergie für die Pumpen und Regelung an, dann braucht es folgende Randdaten, um in die Gewinnzone zu kommen:

- Investitionskosten nur für den Speicher (ohne Erdarbeiten!): 14.000 €
- Jährlicher Kapitalkostenanteil über 20 Jahre (zinsfrei): 700 €/a
- marktfähiger Preis für eine Kilowattstunde Wärme (Zielwert): 0,06 €/kWh
- notwendige eingespeicherte Wärme: 700 €/a : 0,06 €/kWh = 11.667 kWh/a

Sofern also knapp 12.000 kWh/a Wärmeenergie mit dem Speicher nutzbar gemacht werden könnte, die anderenfalls ungenutzt bliebe, wäre ein wirtschaftlicher Vorteil erkennbar. Zum Vergleich: das Solarkollektorfeld in Halle macht etwa 7000 kWh/a mit Hilfe des konventionellen Speichers nutzbar. Es kann abgeschätzt werden, wieviel größer das Feld sein müsste, um weitere 12.000 kWh/a Überschusswärme zu generieren.

8 Anhang

8.1 Literatur

- [1] SET Solar Energie Technik GmbH, *Schaltschema Solaranlage St. Franziskus-Grundschule Halle*, Schmalzgrube, 2016.
- [2] Deutscher Wetterdienst, „Solarstrahlungskarten Deutschland,“ Deutscher Wetterdienst, [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_mi.html. [Zugriff am 23 Januar 2018].
- [3] C. Zhang, „Masterarbeit "Optimierung der Solarwärmenutzung für eine Schulküche auf Basis von Messdaten",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [4] SET Solar Energie Technik GmbH, *SET Longlife Sonnenkollektor D2-202 Planungsunterlagen*, Schmalzgrube, 2012.
- [5] Steinblock Architekten, *Planungsunterlagen*, Magdeburg: Steinblock Architekten, 2013.
- [6] Zeeh Heiztechnik und Behälterbau GmbH, „www.zeeh-speicher.de,“ Zeeh Heiztechnik und Behälterbau GmbH, 2018. [Online]. Available: <http://www.zeeh-speicher.de/speicher.htm>. [Zugriff am 31 Januar 2018].
- [7] Austria Email AG, „Folienmantel-Solarspeicher HT ERMR,“ 2018. [Online]. Available: <http://www.austria-email.at/produkte/standspeicher/folienmantel-solarspeicher-ht-ermr/>. [Zugriff am 31 Januar 2018].
- [8] F. Könnecke, „Bachelorarbeit "Simulation einer Solarthermieanlage für den Küchenbetrieb in einer Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [9] Lungwitz GmbH, *Planungsunterlagen und Pläne zur Küchentechnik*, Magdeburg: Lungwitz GmbH, 2014.
- [10] S. Jäger und F. Switala, „Masterarbeit "Vergleich von Energiebedarfsbilanzen und Verbrauchsdaten für eine Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [11] Ingenieurbüro Naumann & Stahr, „Konzeptpapier,“ Ingenieurbüro Naumann & Stahr, Leipzig, 2010.
- [12] Theurich+Klose GmbH, *Planungsunterlagen und Pläne St. Franziskus Grundschule*, Hannover: Theurich+Klose GmbH, 2013.
- [13] L. Hoffmann, „Bachelorarbeit "Überprüfung der Trinkwasserplanung für die Sankt Franziskus Grundschule in Halle",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [14] H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG, *Planungsunterlagen Thermobatterie*, Dingelstädt / Thüringen: H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG, 2015.
- [15] H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG, *Inbetriebnahme Pilotanlage Franziskus-Schule*, Dingelstädt: H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG, 2014.
- [16] Hottgenroth, „Energieberater 18599 3D PLUS Version 8.0.5,“ Köln, 2014.
- [17] R. Mank, „Bachelorarbeit "Stromanalyse der Großküche einer Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2014.
- [18] H. Neumann und J. Wohlfahrt, „Bachelorarbeit "Ökologische Bewertung einer Passivhausschule mit Schwerpunkt technische Gebäudeausrüstung (TGA)",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [19] X. Wang, „Masterarbeit "Ökobilanz für die technische Gebäudeausrüstung einer Passivhausschule",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2017.

- [20] R. Schulze, „Masterarbeit "Aufbereitung, Plausibilitätsprüfung und anschließende Auswertung von Messwerten des Monitorings mit Abgleich der geplanten Effizienzen, Bedarfswerte und Komfortkriterien",“ Hochschule Magdeburg-Stendal, Magdeburg, 2016.
- [21] Ingenieurbüro Naumann & Stahr, „Erläuterungsbericht HLS-Technik,“ Ingenieurbüro Naumann & Stahr, Leipzig, 2011.
- [22] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, „Energieeffiziente Kantinen und Gewerbeküchen,“ in *Protokollband 47*, Darmstadt, 2012.

8.2 Nomenklatur

Tabelle 8-1: Abkürzungen

Kürzel	Erläuterung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung; deutsche Norm
DIN V	Deutsches Institut für Normung; deutsche Vornorm
EG	Erdgeschoss
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnOB	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen
EnSan	(Forschung für) Energieoptimiertes Bauen in der Sanierung
i. H. v.	in Höhe von
ISO	International Standardisation Organisation; internationale Norm
k. A.	keine Angabe
OG	Obergeschoss
TGA	Technische Gebäudeausrüstung

Tabelle 8-2: Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
A	Fläche	m ²
Q	Energiemenge	kWh
\dot{Q}	Wärmestrom, Leistung	W

Tabelle 8-3: Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
Δ	Differenz	verschieden
ϑ	Temperatur	°C, K
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)

Tabelle 8-4: Indices

Index	Erläuterung
elektrisch	elektrisch(e) Energie
input	Input, Zufuhr in ein System
Kollektor	Kollektor(ertrag, -fläche)
Nutzen	Nutz(energie)
output	Output, abfuhr aus einem System
prüf	geprüfter Zustand
real	real, tatsächlicher Zustand
Verluste	Verlust(energie)

8.3 **Abbildungs- und Tabellenverzeichnis**

Abbildung 1-1: Hydraulikschema nach [1].....	7
Abbildung 1-2: Jahresbilanzen – Messwerte und Simulation.....	9
Abbildung 2-1: Konzept Trinkwarmwasser.....	13
Abbildung 3-1: Schaltschema Solaranlage [1]	15
Abbildung 3-2: Kollektordaten [4] in der Darstellung der Simulationssoftware GETSOLAR	16
Abbildung 3-3: Ansicht Solarwand mit den 3 Kollektorfeldern (Foto: HS MD).....	17
Abbildung 3-4: Pfosten-Riegel-Fassade und Solarwand [5]	17
Abbildung 3-5: Kleines Kollektorfeld mit Strahlungssensor (Foto: HS MD)	18
Abbildung 3-6: Prinzipdarstellung Solarpufferspeichers [6]	18
Abbildung 3-7: Elektroheizstab Pufferspeicher (Foto: HS MD).....	19
Abbildung 3-8: Kompaktstation zur Fernwärmenachladung geöffnet (Foto: HS MD).....	19
Abbildung 3-9: Typenschild Pufferspeicher (Foto: HS MD)	20
Abbildung 3-10: Funktionsprinzipien Pufferspeicher – Solarthermie [6]	20
Abbildung 3-11: Funktionsprinzipien Pufferspeicher – Trinkwassererwärmung [6]	21
Abbildung 3-12: Trinkwarmwasserspeicher incl. Thermographie (Foto: HS MD).....	21
Abbildung 3-13: Typenschild Trinkwarmwasserspeicher (Foto: HS MD).....	22
Abbildung 3-14: Elektroheizstab Hausmeisterspeicher (Foto: HS MD)	22
Abbildung 3-15: Kollektorkreis Gebäudeeinführung und Querung der Küche	23
Abbildung 3-16: Dämmung mit alukaschierter Mineralwolle (Foto: HS MD).....	24
Abbildung 3-17: Thermographie Solarleitungen in der Aula am 6.1.2016 (Foto: HS MD).....	24
Abbildung 3-18: Thermographie Solarleitungen im Raum der Stille am 6.1.2016 (Foto: HS MD).....	25
Abbildung 3-19: Zentraler Verteiler und Sammler mit 8 Anschlüssen (Foto: HS MD)	25
Abbildung 3-20: Nicht ausreichende Dämmung (Foto: HS MD)	26
Abbildung 3-21: Armaturen während der Ausführung und danach (Foto: HS MD).....	27
Abbildung 3-22: Kollektorkreispumpe bis zum Solarverteiler (Foto: HS MD)	27
Abbildung 3-23: Ladepumpe Solarverteiler zum Pufferspeicher (Foto: HS MD)	28
Abbildung 3-24: Ladepumpe Solarverteiler zum Salzhydratspeicher (Foto: HS MD).....	28
Abbildung 3-25: Ladepumpe Solarverteiler zum Hausmeisterspeicher (Foto: HS MD).....	28
Abbildung 3-26: Pumpe zur Fernwärmenachheizung im Puffer (Foto: HS MD)	29
Abbildung 3-27: Zirkulationspumpe Küche incl. Thermographie (Foto: HS MD)	29
Abbildung 3-28: Zentrale Regelung und Netzwerkanschluss SETSOLAR (Foto: HS MD).....	29
Abbildung 4-1: Zusammenfassung der Jahreswerte der Messungen 2015 – 2017.....	33
Abbildung 4-2: Monatliche Detailanalyse der Trinkwassererwärmung 2017 – Energiezufuhr.....	35
Abbildung 4-3: Monatliche Detailanalyse der Trinkwassererwärmung 2017 – Energieabfuhr	36
Abbildung 4-4: Jahresdauerlinie der Solarthermie aus Messwerten 2016.....	37
Abbildung 4-5: Monatliche Elektronachheizung des Küchenpuffers 2016/17.....	37
Abbildung 4-6: Monatliche Elektronachheizung des Hausmeisterspeichers 2016/17	38
Abbildung 4-7: Monatliche Hilfsenergie des Solarmoduls 2016.....	39
Abbildung 4-8: Hilfsenergie des Solarmoduls nach Verbrauchern 2016	40
Abbildung 5-1: Spülmaschine Hobart AMX-16 (Foto: HS MD)	45
Abbildung 5-2: Bodenreinigungsanschluss Küche (Foto: HS MD).....	46
Abbildung 5-3: Monatlicher Warmwasserverbrauch der Küche 2016/17.....	47
Abbildung 5-4: 10-Minuten-Warmwasserverbrauch an Schultagen der Küche 2016/17	48
Abbildung 5-5: 10-Minuten-Warmwasserverbrauch an Horttagen der Küche 2016/17	48
Abbildung 5-6: Stündlicher Warmwasserverbrauch an Schultagen der Küche 2016/17	49
Abbildung 5-7: Stündlicher Warmwasserverbrauch an Horttagen der Küche 2016/17	49
Abbildung 5-8: Monatlicher Warmwasserverbrauch der Hausmeisterwohnung 2016/17	50
Abbildung 5-9: 10-Minuten-Warmwasserverbrauch der Hausmeisterwohnung 2016/17.....	50
Abbildung 5-10: Stündlicher Warmwasserverbrauch der Hausmeisterwohnung 2016/17.....	50
Abbildung 5-11: Monatliche Warmwassernutzwärme der Küche 2016/17	51
Abbildung 5-12: 10-Minuten-Warmwassernutzwärme der Küche 2016/17.....	52
Abbildung 5-13: Stündliche Warmwassernutzwärme der Küche 2016/17	52
Abbildung 5-14: Monatliche Warmwassernutzwärme der Hausmeisterwohnung 2016/17.....	53
Abbildung 5-15: 10-Minuten-Warmwassernutzwärme der Hausmeisterwohnung 2016/17.....	53
Abbildung 5-16: Stündliche Warmwassernutzwärme der Hausmeisterwohnung 2016/17	54
Abbildung 5-17: Schema des simulierten Solarsystems aus GETSOLAR	54
Abbildung 5-18: Vorgabe eines Monatsprofils 2018 für die Simulation mit GETSOLAR.....	55
Abbildung 5-19: Vorgabe eines Tagesprofils für die Simulation mit GETSOLAR.....	55
Abbildung 5-20: Ergebnisse 2018 der Simulation mit GETSOLAR	56
Abbildung 5-21: Vorgabe eines Monatsprofils für die Simulation 2014 mit GETSOLAR.....	56

Abbildung 5-22: Ergebnisse 2014 der Simulation mit GETSOLAR	57
Abbildung 5-23: Zusammenfassung der Jahreswerte der Simulation	58
Abbildung 6-1: Gesamthydraulikschema der Fernwärme- und Solarversorgung [12]	59
Abbildung 6-2: Detailhydraulik Fernwärmeanschluss [12]	60
Abbildung 6-3: Detailhydraulik Solarmodulanschluss [12]	61
Abbildung 6-4: Schaltschema Solaranlage [1]	62
Abbildung 6-5: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen 2016/17	64
Abbildung 6-6: Tägliche Kollektorfeldtemperaturen 2016/17	65
Abbildung 6-7: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen Januarwoche 2016	65
Abbildung 6-8: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen Maiwoche 2016	66
Abbildung 6-9: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen Augustwoche 2016	66
Abbildung 6-10: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen Novemberwoche 2016	67
Abbildung 6-11: Stündliche Kollektorfeldtemperaturen abhängig von der Globalstrahlung 2017	67
Abbildung 6-12: Stundenmittelwerte Temperaturschichtung im Pufferspeicher 2016	68
Abbildung 6-13: Tagesmittelwerte Temperaturschichtung im Pufferspeicher 2016	69
Abbildung 6-14: Stundenmittelwerte Temperaturschichtung im Hausmeisterspeicher 2016	69
Abbildung 6-15: Tagesmittelwerte Temperaturschichtung im Hausmeisterspeicher 2016	70
Abbildung 6-16: Carpetplot Funktion des Heizstabes im Pufferspeicher 2016	70
Abbildung 6-17: 10-Minuten-Werte der Elektronachheizung des Puffers an Schultagen 2016/17	71
Abbildung 6-18: 10-Minuten-Werte der Elektronachheizung des Puffers an Horttagen 2016/17	71
Abbildung 6-19: Stündliche tageweise Elektronachheizung des Puffers an Schultagen 2016/17	72
Abbildung 6-20: Stündliche Elektronachheizung des Puffers an Schultagen 2016/17	72
Abbildung 6-21: Stündliche wochenweise Elektronachheizung des Puffers an Horttagen 2016/17	72
Abbildung 6-22: Carpetplot Funktion des Heizstabes im Hausmeisterspeicher 2016	73
Abbildung 6-23: 10-Minuten-Werte der Elektronachheizung des Hausmeisterspeichers 2016/17	73
Abbildung 6-24: Stündliche wochenweise Elektronachheizung Hausmeisterspeichers 2016/17	74
Abbildung 6-25: 10-Minuten-Werte für Kalt- und Warmwassertemperaturen 2016	74
Abbildung 6-26: Tageswerte für Kalt- und Warmwassertemperaturen 2016	75
Abbildung 6-27: Monatliche Kalt- und Warmwassertemperaturen Hausmeisterspeicher 2016/17	75
Abbildung 6-28: Carpetplot Funktion der pufferinternen Umladepumpe 2016	76
Abbildung 6-29: Carpetplot Funktion der Zirkulationspumpe 2016	76
Abbildung 6-30: Carpetplot Funktion der Kollektorkreispumpe 2016	77
Abbildung 6-31: Carpetplot Funktion der Ladepumpe für den Hausmeisterspeicher 2016	77
Abbildung 6-32: Carpetplot Funktion der Ladepumpe für den Pufferspeicher 2016	78
Abbildung 6-33: Carpetplot Funktion der Ladepumpe für den Salzhydratspeicher 2016	78
Abbildung 6-34: Schema Verteilung im Solarspeicherraum 033b [13]	79
Abbildung 6-35: Zirkulationsrücklauftemperatur 2016	80
Abbildung 7-1: Hydraulikschema der Salzhydratspeicheranlage [14]	83
Abbildung 7-2: Eingangsluke zum unterirdischen Speicherraum	84
Abbildung 7-3: Vier Speicherzellen mit je 4 Zylindern	84
Abbildung 7-4: Modulinterne Pumpe	84
Abbildung 7-5: Hydraulische Weiche, Regelmodul und Erdleitung	85
Abbildung 7-6: Monitoringrechner für den Latentwärmespeicher in Raum 0.30	85
Abbildung 7-7: Schnittmodell eines Speicherzylinders [14]	86
Abbildung 7-8: Technische Daten der Speicherpatrone [14]	86
Abbildung 7-9: Schematischer Lade- und Entladezyklus des Speichers [14]	88
Abbildung 7-10: Temperaturen bei der Initialisierungsmessung des Speichers [15]	89
Abbildung 7-11: Durchflüsse bei der Initialisierungsmessung des Speichers [15]	90
Abbildung 7-12: Hilfsenergieverbrauch des Salzhydratspeichers 2016	90
Abbildung 8-1: Korrelation von Solarstrahlung und Wassererwärmung – Küche	97
Abbildung 8-2: Korrelation von Solarstrahlung und Wassererwärmung – Hausmeister	98
Abbildung 8-3: Netzbezugsanteil für Elektroheizung des Küchenpufferspeichers	99
Tabelle 1-1: Energiekostenvergleich mit reiner Fernwärmeversorgung	11
Tabelle 4-1: Messpunkte bezüglich Solarthermie	31
Tabelle 4-2: Zusammenfassung der Monatswerte der Messungen 2015 - 2017	34
Tabelle 4-3: Temperaturdifferenzen Speicher zum Aufstellraum	38
Tabelle 4-4: Energiekostenvergleich mit reiner Fernwärmeversorgung	41
Tabelle 4-5: Energiekostenvergleich mit kombinierter Solar/Fernwärmeversorgung	42
Tabelle 5-1: Anzahl der Betriebsdurchgänge [9]	43
Tabelle 5-2: Warmwasserbedarf Küche - Schultag [9]	44
Tabelle 5-3: Warmwasserbedarf Küche – Ferientag [9]	44

Tabelle 5-4: Jährlicher Warmwasserbedarf [9].....	44
Tabelle 5-5: Gerätebezogener Trinkwarmwasser pro Tag [10].....	46
Tabelle 5-6: Gesamtbedarf Trinkwarmwasser pro Tag [10].....	47
Tabelle 5-7: Gesamtbedarf Küche pro Jahr [10]	47
Tabelle 5-8: Zusammenfassung der Monatswerte der Simulation.....	57
Tabelle 6-1: Empfehlung zu einer angepassten Regelung der Pufferspeichernachheizung [3].....	81
Tabelle 7-1: Messpunkte bezüglich Salzhydratspeicher	88
Tabelle 8-1: Abkürzungen	94
Tabelle 8-2: Lateinische Formelzeichen.....	94
Tabelle 8-3: Griechische Formelzeichen.....	94
Tabelle 8-4: Indices	94
Tabelle 8-5: Planer, Ausführende Projektbeteiligte.....	100

8.4 Ergänzende Berechnungen

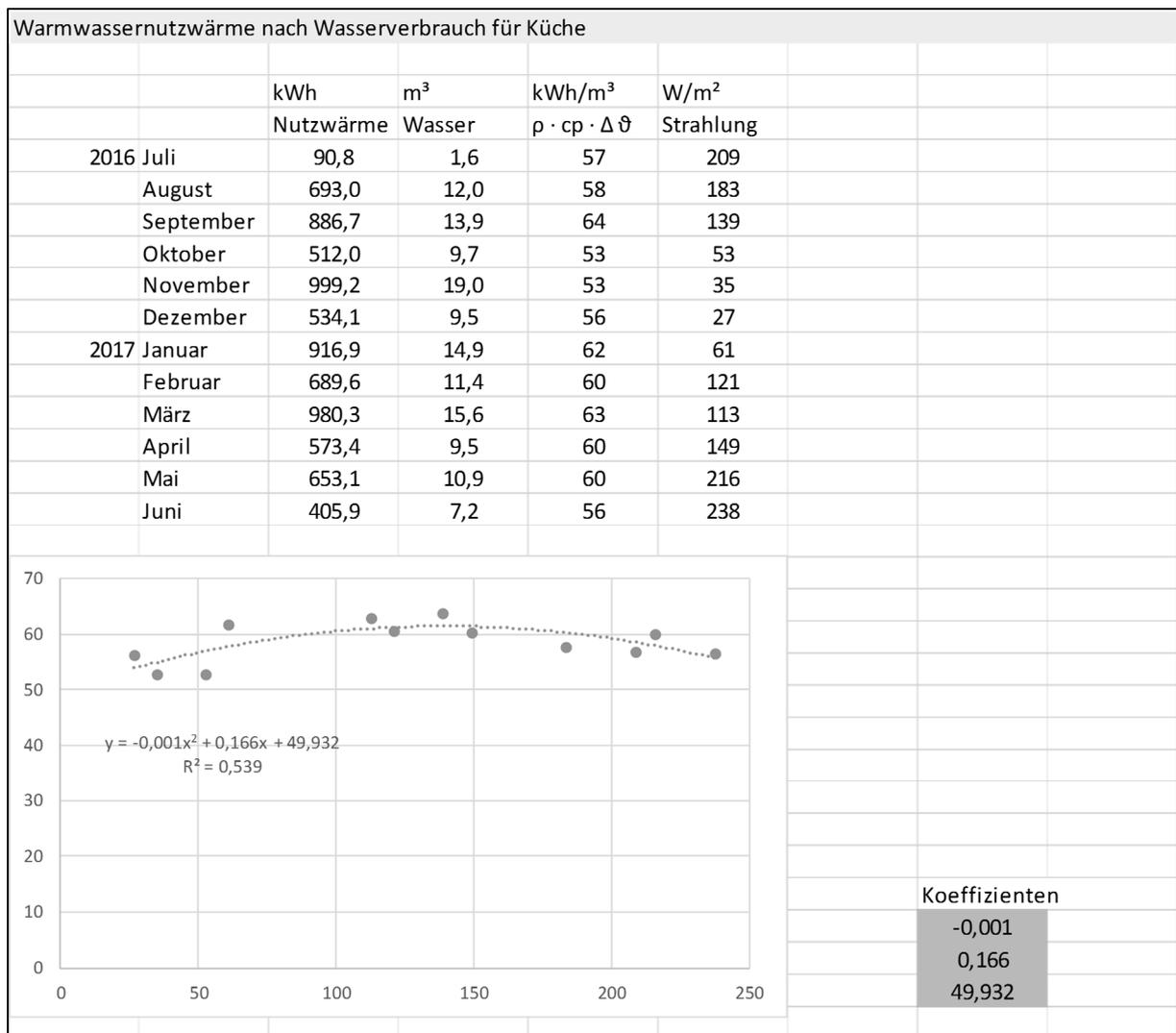


Abbildung 8-1: Korrelation von Solarstrahlung und Wassererwärmung – Küche

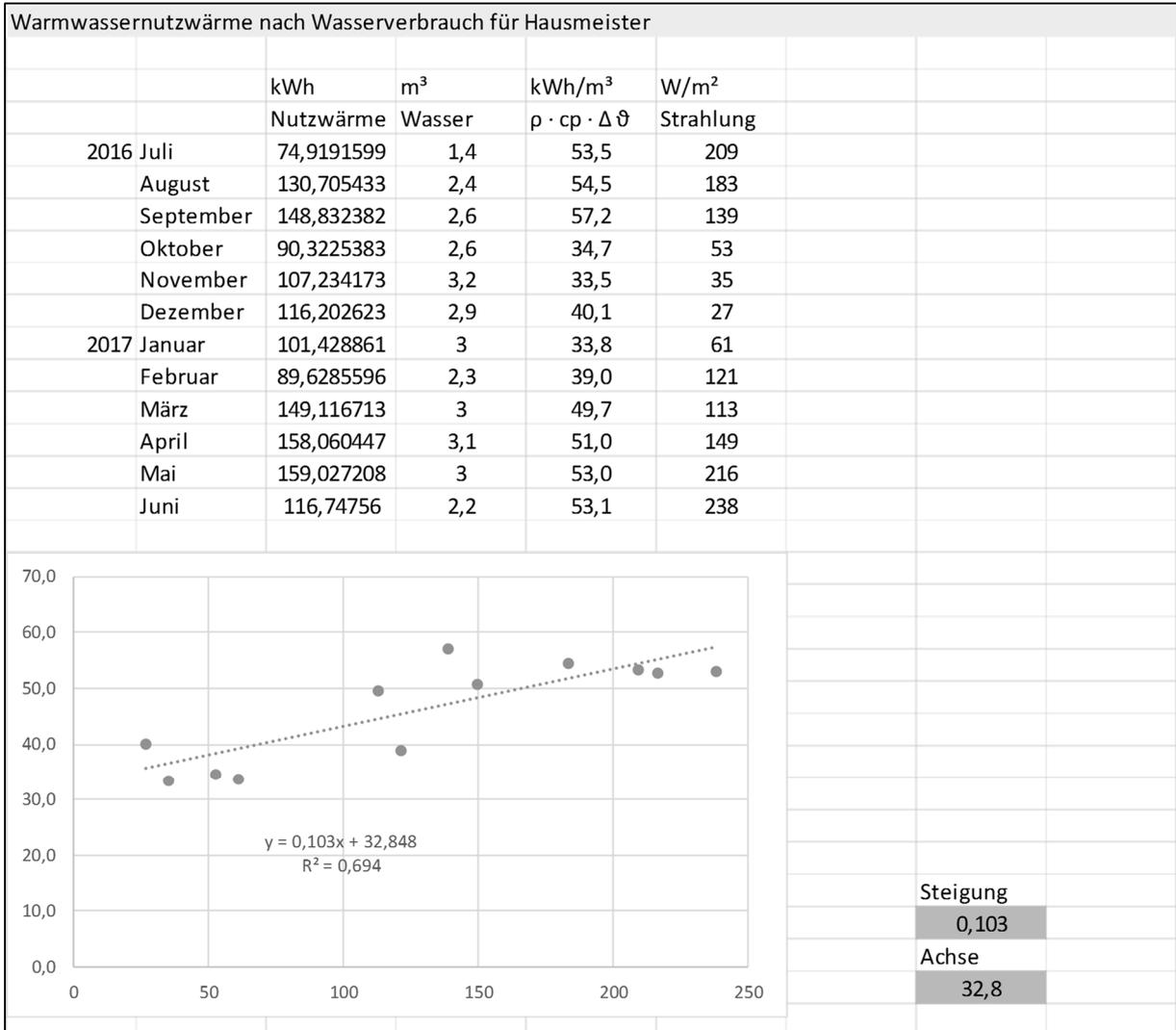


Abbildung 8-2: Korrelation von Solarstrahlung und Wassererwärmung – Hausmeister

8.5 Planer, Ausführende, Projektbeteiligte

Tabelle 8-5: Planer, Ausführende Projektbeteiligte

Kurz	ausführliche Angabe	Gewerk/ Verantwortlichkeit
APW	APW Heizung und Sanitärbaubau GmbH Herr Petersohn Hauptstraße 9 04288 Leipzig	TGA, Ausführung
GEDES	Gedes e.V. Herr Döring Promenadenring 8 02708 Löbau	Messtechnik, Ausführung
H.M.	H.M. Heizkörper GmbH & Co. KG Wachstedter Str. 13 37351 Dingelstädt	Salzhydratspeicher, Hersteller
HOLLENBACH	Sachverständigenbüro Herr Hollenbach Karlstraße 14 39261 Zerbst	Projektsteuerer
LUNGWITZ	Lungwitz GmbH Herr Lungwitz Matthiasstr. 23 39122 Magdeburg	Küchenplanung
N&S	Ing.-Büro Naumann u. Stahr GbR Herr Naumann, Herr Reichel, Herr Stahr Sommerfelder Straße 11 04299 Leipzig	TGA, Planung (zu Beginn)
SETSOLAR	SET Solar Energie Technik GmbH Herr Dietel Hauptstraße 29 09477 Schmalzgrube	Solarthermie, Hersteller und Ausführung
TUK	Theurich+Klose Ingenieurgesellschaft mbH Herr Gierlich, Herr Adolf, Herr v. Goldammer Vahrenwalder Str. 117 30165 Hannover	TGA, Planung (zum Schluss)

8.6 Überblick über separate Anhänge

Als separate Anhänge liegen vor:

- A Pläne und Schaltschemata
- B Technische Daten der Kollektoren
- C Technische Daten des Pufferspeichers
- D Technische Daten des Hausmeisterspeichers
- E Technische Daten des Salzhydratspeichers
- F Technische Daten weiterer Komponenten
- G Solarsimulation