



Umsetzungsprojekt: Integrale Planung und Steuerung der nachhaltigen Modernisierung des Gebäudebestands und der Energieversorgung der Evangelischen Stiftung Neuerkerode

## **Bericht Analyse der thermischen Solaranlagen und deren Alternativen**

Der Bericht wurde erstellt von /  
Das Projekt wurde bearbeitet von:

**Datenstand: 10.11.2013**

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

B. Eng. Marius Mieke, Wolfenbüttel  
B. Eng. David Tschiskale, Wolfenbüttel  
Dr.-Ing. Kati Jagnow, Braunschweig  
Prof. Dr.-Ing. Dieter Wolff, Wolfenbüttel

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>3</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	3
1.2	Herangehensweise .....	3
1.3	Ergebnisse im Überblick .....	3
1.4	Fazit und Ausblick .....	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1	Standorte .....	5
2.2	Messtechnik .....	5
2.3	Vorabmessung und Monitoring durch Prelogeinheit .....	7
2.4	Nutzung von Solarenergie .....	10
2.4.1	Solarthermie .....	10
2.4.2	Photovoltaik .....	13
2.4.3	Hybridmodule – Photothermie oder Thermovoltaik .....	14
<b>3</b>	<b>Auswertung</b> .....	<b>15</b>
3.1	<b>Solarthermieanlage Wabehaus</b> .....	<b>15</b>
3.1.1	Gebäude und Nutzung .....	15
3.1.2	Anlagentechnik .....	15
3.1.3	Messwerte und Prelogmessung .....	16
3.1.4	Energieanalyse aus dem Verbrauch .....	17
3.1.5	Jahresenergiebilanz und Energieflussbild .....	17
3.1.6	Einschätzung .....	20
3.2	<b>Solarthermieanlage Lindenplatz</b> .....	<b>20</b>
3.2.1	Gebäude und Nutzung .....	20
3.2.2	Anlagentechnik .....	20
3.2.3	Messwerte/Prelogmessung .....	21
3.2.4	Einschätzung .....	22
<b>4</b>	<b>Vergleich</b> .....	<b>23</b>
4.1	Investitionskosten .....	23
4.2	Energiekennwerte .....	24
4.3	Auslegungskennwerte .....	24
<b>5</b>	<b>Variantenbetrachtung Wabehaus</b> .....	<b>25</b>
5.1.1	Überblick zur Investition der thermischen Solaranlage .....	25
5.1.2	Überblick zur Investition der PV-Anlage .....	26
<b>6</b>	<b>Analyse der gesamten Liegenschaft</b> .....	<b>29</b>
6.1	Solarthermienutzung in Neuerkerode .....	29
6.2	Photovoltaik zur Warmwasserbereitung .....	31
6.2.1	Zentrale Lösungen .....	32
6.2.2	Elektrische Warmwasserbereitung als Energieeinsparmaßnahme .....	33
<b>7</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>36</b>
8.1	Quellen .....	36
8.2	Tabelle Solarthermienutzung Neuerkerode .....	36

# 1 Aufgabenstellung

Der erste Abschnitt wird erläutert, welches Ziel mit den Auswertungen der zwei Solarthermieanlagen (Wabehaus und Lindenplatz) und der Analyse der Dachflächen hinsichtlich Solarthermienutzung erreicht werden soll. Im Zuge dessen werden die Vorgehensweisen in den Abschnitten separat erklärt.

## 1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des DBU-Projektes "Neuerkerode" wurden zwei Solarthermieanlagen im Wabehaus und Lindenplatz messtechnisch erfasst und ausgewertet. Die Erkenntnisse sollen mit denen eines BMU-Projektes zu solaren Großanlagen und der allgemeinen Literatur verglichen werden und auf die übrigen Gebäude der Liegenschaft Neuerkerode angewendet werden.

Des Weiteren ist zu überprüfen, ob Alternativlösungen hinsichtlich der Nutzung von solarer Strahlungsenergie realisierbar sind, d.h. Photovoltaik. Dabei sollen nicht nur ökonomische, sondern auch ökologische Gesichtspunkte, wie die CO<sub>2</sub>-Emissionen, bewertet werden.

Ziel der Ausarbeitung ist eine Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise beim Ausbau der Sonnenenergienutzung in Neuerkerode.

## 1.2 Herangehensweise

Um die in Kapitel 1.1 genannten Aufgabenstellungen zu bearbeiten wird wie folgt vorgegangen:

- Erfassung der Energie- und Nutzungsdaten der Gebäude Wabehaus und Lindenplatz,
- Erstellung einer Energieanalyse aus dem Verbrauch (E-A-V), einer Jahresenergiebilanz und eines Anlagensteckbriefes (soweit Messwerte vorhanden) für die zwei Gebäude,
- Vergleich der Kennwerte und Erkenntnisse mit denen des BMU-Solarprojektes,
- Überprüfung und Bewertung aller Gebäude der Liegenschaft hinsichtlich sinnvoller Nutzung von Solarthermie mit Hilfe der Kennwerte der vorhandenen Solarthermieanlagen, der "Voranalyse Solarthermie und Photovoltaik" [1] und der Energiebilanzdaten aus dem Grundlagenprojekt [17].
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand des LEG-Verfahrens; die relevanten Parameter, wie Zinsen, Betrachtungszeiträume und Preissteigerungen, werden dabei variiert
- Betrachtung des Betriebes von elektrischen Durchlaufwassererhitzern mit Photovoltaikstrom als Alternative

Abschließend erfolgt eine Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse, aus der sich eine Handlungsempfehlung ableiten lässt.

## 1.3 Ergebnisse im Überblick

Die Erträge der Solaranlagen sind, soweit Messwerte vorliegen, als gut zu bezeichnen. Die kollektorflächenbezogene Energielieferung liegt bei ca. 400 kWh/(m<sup>2</sup>a). Aufgrund der vergleichsweise knappen Auslegung kann damit lediglich der Trinkwarmwasserbedarf im sonnenreichsten Monat im Jahr gedeckt werden. Die Speicher- und Zentralenverluste der Anlagen müssen weiterhin von der Nahwärme gedeckt werden. Es kann keine sommerliche Netzautarkie festgestellt werden.

Die Speicher- und Zentralenverluste sind mit 23,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) deutlich höher als bei vergleichbaren Anlagen – 4 kWh/(m<sup>2</sup>a). Sie können aufgrund eines zu großen Volumenstroms der Beladepumpe der Speicher erklärt werden. Durch verschiedene Maßnahmen wird versucht den Volumenstrom zu verringern und die Anlage zu optimieren.

Die hohen Solaranlagenkosten (ca. 950 €/m<sup>2</sup>) und die niedrigen Energiekosten in Neuerkerode (für den Alternativfall ohne Solarthermie) verhindern eine Amortisationszeit innerhalb der Lebensdauer der Komponenten.

Die Auslegungskennwerte für zukünftige Solarthermieanlagen (für reine Trinkwarmwasserbereitung) sehen wie folgt aus:

- Wärmebedarf TWW: 1000 kWh/P\*a
- flächenbezogener Kollektorkreisenertrag: 360 kWh/m<sup>2</sup>\*a
- Kollektorfläche je Person: 1,5 m<sup>2</sup>/P
- kollektorflächenbezogenes Speichervolumen: 70 l/m<sup>2</sup>

Bei Einhaltung dieser Kennwerte ist eine vollständige Sommerdeckung des Trinkwarmwasserbedarfs realistisch. Durch die Installation von Solarthermieanlagen auf allen geeigneten Dächern in Neuerkerode können ca. 726 MWh/a an Nahwärme und 167,6 t CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Die Alternativlösungen zur Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs mit Photovoltaik sind aufgrund der größeren Anforderung an die Kollektorfläche (8,3 m<sup>2</sup>/P) nur bei großen Dachflächen im Verhältnis zur Bewohnerzahl möglich. Die äquivalenten Energiepreise von Solarthermie (0,10...0,30 €/kWh) und Photovoltaik (ca. 0,15 €/kWh) und die damit verbundene Wirtschaftlichkeit beider Systeme sind unter bestimmten Gesichtspunkten schon heute vergleichbar.

Aufgrund der Biowärmeeinspeisung und den damit verbundenen Primärenergiefaktoren und den günstigen Nahwärmepreisen sind sowohl die zentrale (Solarthermie) als auch die dezentrale (Photovoltaik) Erzeugung von Trinkwarmwasser zum heutigen Zeitpunkt ökonomisch nicht sinnvoll.

#### **1.4 Fazit und Ausblick**

Es hat sich gezeigt, dass weder thermische Solaranlagen noch Photovoltaikanlagen zur Trinkwarmwasserbereitung mit heutigen Investitions- und Energiepreisen in der Liegenschaft Neuerkerode wirtschaftlich betrieben werden können.

Da Energiepreissteigerungen in den nächsten Jahren unausweichlich scheinen, kann eine derartige Investition höchstens als Versicherung gegen höhere Kosten betrachtet werden.

Anhand der äquivalenten Energiepreise von PV und Solarthermie konnte abgeschätzt werden, dass sich die beiden Systeme hinsichtlich ihrer Kosten auf ähnlichem Niveau bewegen. Primärenergetisch hat eine PV-gespeiste, dezentral elektrische Warmwasserbereitung einen Vorteil gegenüber einem System mit Nahwärme. Letztendlich entscheiden die Entwicklung der Photovoltaik-Anlagenkosten und die Energiepreissteigerung darüber, ob die Photovoltaik Einzug in den Wärmemarkt halten wird.

Solarthermie und Photovoltaikanlagen können, unter vertretbaren Mehrkosten, einen Beitrag zur Reduzierung der Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Bevor diese Maßnahmen in Betracht gezogen werden, sollten die bestehende Anlagentechnik überprüft und gegebenenfalls optimiert werden. Beispielhaft seien hier für Neuerkerode die Netzoptimierung der Nahwärme mit Erhöhung des Biowärmeanteils und die Reduzierung der Verluste bei der Trinkwarmwasserbereitung im Gebäude genannt.

## 2 Grundlagen

In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Berichtes dargelegt. Dabei wird ein kurzer Überblick über die Standorte der Anlagen, deren Anlagentechnik und die Ausstattung mit Messeinrichtungen gegeben. Zusätzlich werden die beiden Konkurrenztechnologien zur Gewinnung von Sonnenenergie näher erläutert.

### 2.1 Standorte

Die zwei betrachteten Solarthermieranlagen (im Weiteren: Solaranlagen) befinden sich auf den Dächern der Gebäude Wabehaus und Lindenplatz. Die Abbildung 1 zeigt die Lage der Gebäude auf dem Gelände der ESN.



Abbildung 1 geografische Lage der Anlagen in Neuerkerode

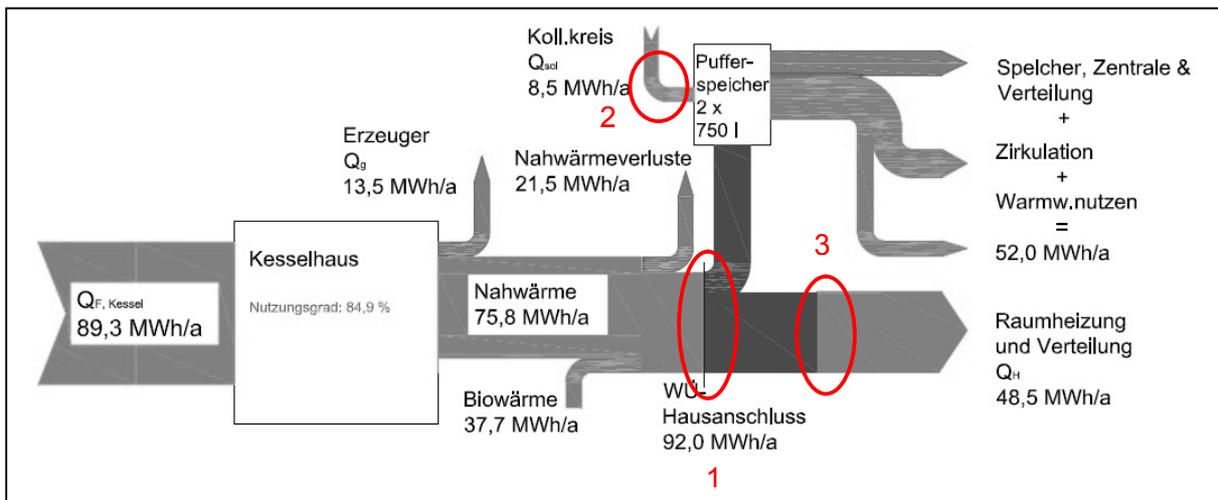
Die Beschreibung der Gebäude und Anlagentechnik erfolgt in dem jeweiligen Unterkapitel 3.1 und 3.2.

### 2.2 Messtechnik

Die Solaranlagen sind standardmäßig mit Wärmemengenzählern (WMZ) Allmess Echo II oder CF Echo II an folgenden Punkten ausgestattet:

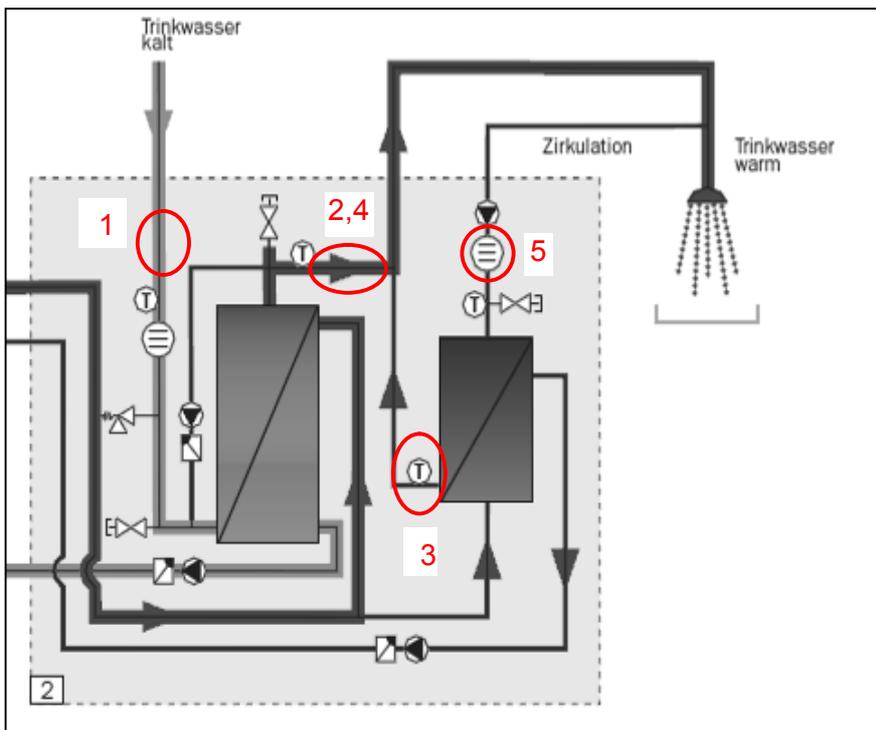
- hinter der Übergabe am Wärmeübertrager (1) (Endenergieeinsatz des Gebäudes)
- im Solarkreislauf vor dem Pufferspeicher (2)
- im Heizkreislauf (3) (lediglich im Wabehaus vorhanden)

Abbildung 2 zeigt die Einbauorte im Energieflussdiagramm des Wabehauses. Da die Anlagen Wabehaus und Lindenplatz nahezu baugleich ausgeführt wurden, sind die Einbauorte der Messeinrichtungen identisch und übertragbar.



**Abbildung 2: Einbauorte Messtechnik Wärmeverteilung**

Zusätzlich wurden die Anlagen mit einer Prelogeinheit der Fa. Solvis ausgestattet. Diese beinhaltet weitere Temperaturfühler und Volumenstromzähler, um den Trinkwarmwasserbedarf und die Zirkulationsverluste bestimmen zu können. Die Anordnung der Temperaturmessfühler (1, 2, 3) und Volumenstromzähler (4, 5) kann aus Abbildung 3 entnommen werden.

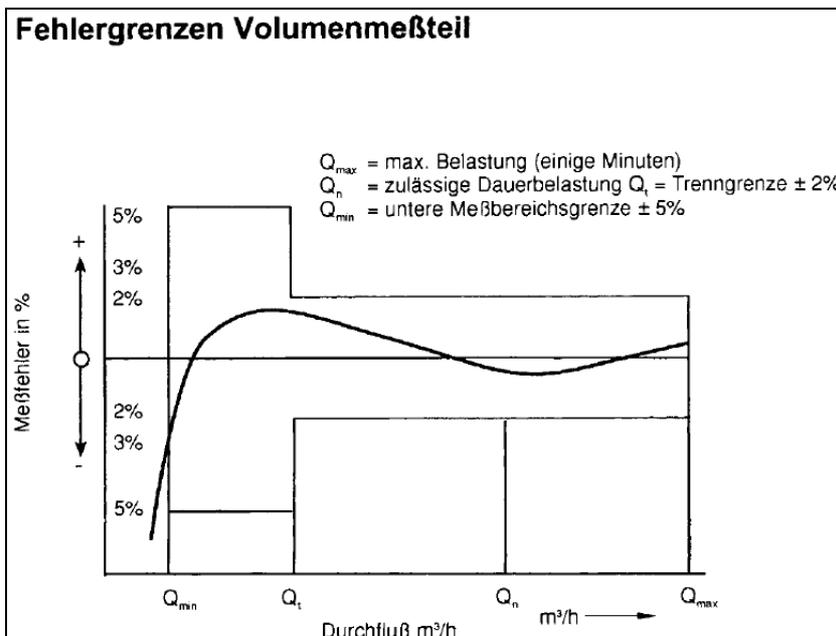


**Abbildung 3: Einbauorte Messtechnik/Prelog Frischwasserstation**

Aus den Werten der WMZ und der Prelogwerte können die Verluste der Heizzentrale berechnet werden. Die Vorgehensweise wird später separat erläutert.

### Messgenauigkeit der Wärmemengenzähler

Eine Messung von Verbrauchswerten enthält Ungenauigkeiten. Deshalb soll im Folgenden erläutert werden, welche Auswirkungen die Messung mit Wärmemengenzählern auf den eigentlichen Verbrauch hat. In Abbildung 4 sind die Fehlergrenzen des Volumenmessteils eines Wärmemengenzählers aufgeführt.



**Abbildung 4: Fehlergrenzen Volumenmessteil [18]**

Dargestellt ist der Messfehler in Prozent bezogen auf den Durchfluss in  $m^3/h$ . Wie für Wärmemengenzähler typisch, ist die Abszisse in die Abschnitte untere Messbereichsgrenze ( $Q_{min}/q_i$ ), Nennbelastung bei 0,1 bar ( $Q_n$ ), Übergangsbereich ( $Q_t$ ) und maximale Belastung ( $Q_{max}/q_s$ ) eingeteilt.

Die Auslegung eines Wärmemengenzählers erfolgt aufgrund des Druckabfalls im Auslegungszustand, der 0,1 bar nicht- oder nur kurzzeitig- übersteigen darf. Der Betrieb sollte hauptsächlich im Übergangsbereich erfolgen. Dieser Wert ist den Herstellerunterlagen zu entnehmen und produktspezifisch.

Welchen Einfluss die Messfehlerkurve auf die Verbrauchsdaten eines Heizkreises mit einem Wärmemengenzähler  $Q_n$  2,5 haben kann, zeigt folgende Tabelle 1, die für eine Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf­temperatur von 20 K sowie einer spezifischen Wärmekapazität von 4,2 kJ/(kgK) erstellt wurde.

	Durchfluss in $m^3/h$	Abweichung	reale Wärmemenge in kWh	angezeigte Wärmemenge in kWh
$Q_n$	2,5	-1%	58,33	57,75
$Q_{min}$	0,025	-3%	0,58	0,57
$Q_t$	0,25	+2%	5,83	5,95

**Tabelle 1: Messfehler von Wärmemengenzählern**

Im Betrieb (Übergangsbereich) zeigt der Wärmemengenzähler eine um 2% zu hohe Wärmemenge an. In den Bereichen der Auslegung und des Mindestdurchflusses sind die Wärmemengen um 1 bzw. 3% zu niedrig. Eine zu große Auslegung des Wärmemengenzählers hat demnach zur Folge, dass die Wärmemengen/Volumenströme durchgehend zu gering sind, oder nicht erfasst werden.

### 2.3 Vorabmessung und Monitoring durch Prelogeinheit

Die Prelogeinheit der Firma Solvis dient grundsätzlich zur Voruntersuchung eines Gebäudes vor der Auslegung einer Solarthermieanlage. Die Messeinheit mit Anlegefühlern und Volumenstromzähler wird dazu in bestehende Anlagen zur Analyse der Verbrauchsdaten eingebaut.

Neben dem täglichen Trinkwarmwasserenergiebedarf und der Zirkulationslast, werden Warmwasserzapfspitzen erfasst. Anhand dieser verbrauchsabhängigen Parameter werden die Kollektorfläche, die Speichergröße und die Größe der Frischwasserstation ausgelegt.

Eine beispielhafte Installation der Messfühler in einer Bestandanlage zeigt Abbildung 5.

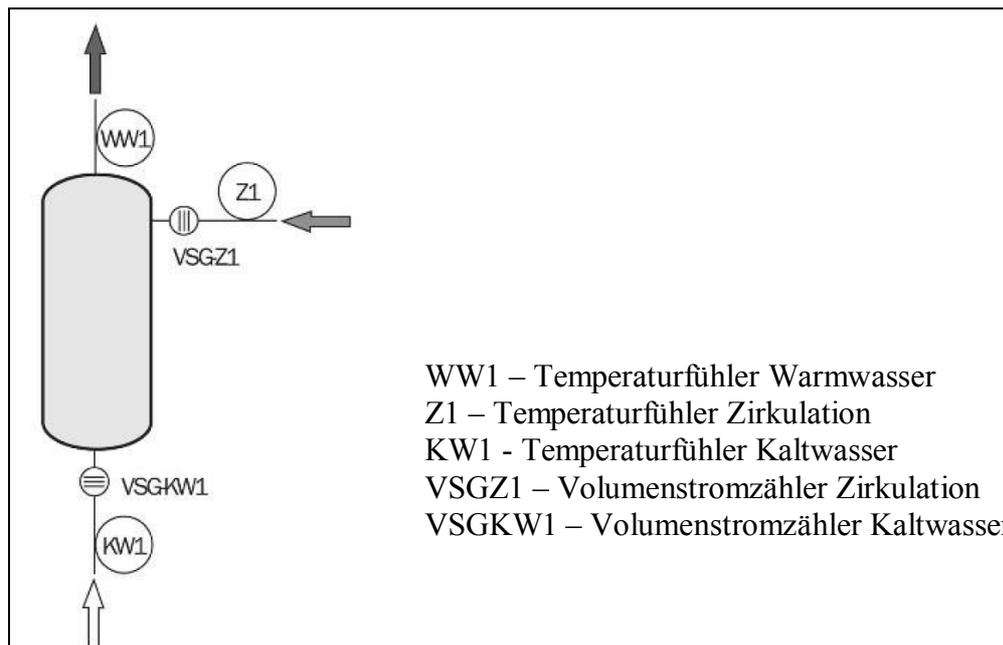


Abbildung 5: Einbauorte Prelogeinheit Bestandanlage (indirekter Trinkwasserspeicher) [4]

Grundsätzlich ist eine verbrauchsabhängige Auslegung einer Solarthermieanlage positiv zu bewerten, da das Nutzerverhalten bezüglich der Warmwassernutzung einen großen Einfluss auf das Volumen und die Leistung der Frischwasserstation hat.

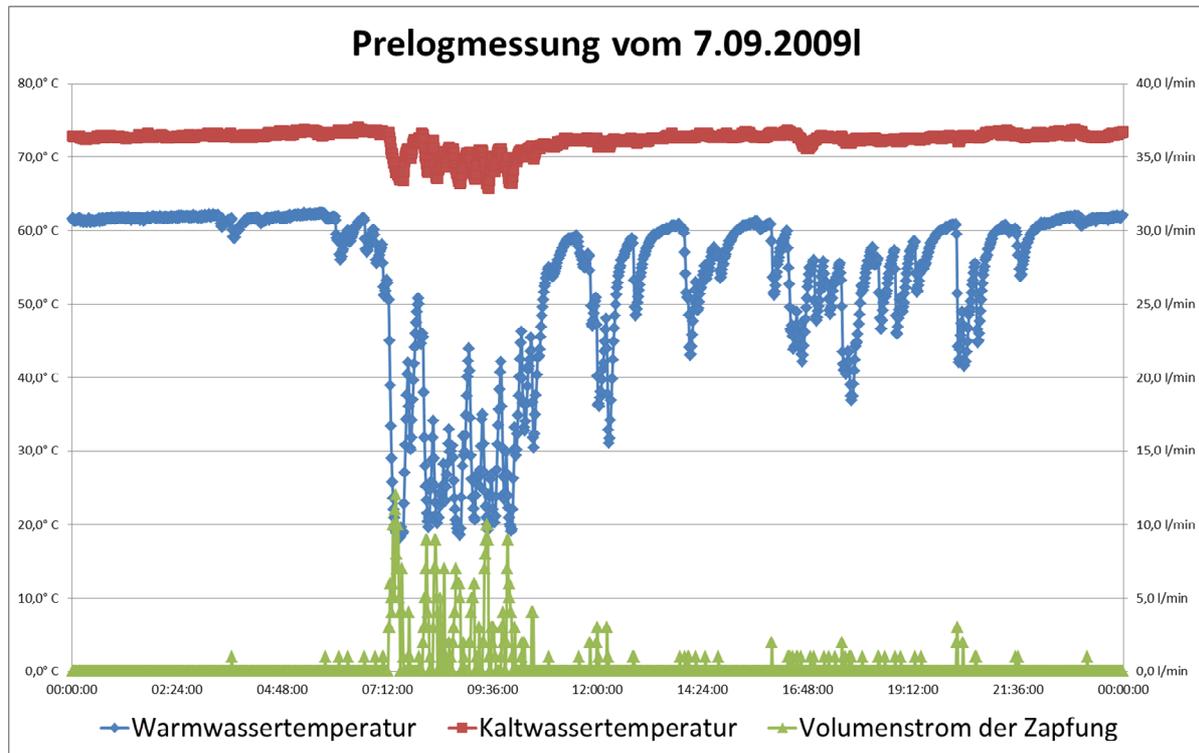
Zu Problemen führt diese Vorgehensweise, wenn sich die Nutzung oder der Gebäudestandard zwischen Messung und Einbau der Anlage ändern.

Im Jahr 2009 wurde zur Auslegung der Solarthermieanlage im Wabehaus eine Prelogmessung durchgeführt. Durch den Umbau und der damit verbundenen Modernisierung des Gebäudes haben sich die Verbrauchsdaten des Gebäudes deutlich verändert. Beispielsweise wurde das Zirkulationsnetz erweitert.

Darüber hinaus wurde der Kaltwassertemperaturfühler (Abbildung 5: KW1) zu dicht an den Speicher montiert. Aufgrund der Wärmeübertragung ausgehend vom Speicher erwärmt sich das Rohr während der Zapfpausen. Das führt bei kleineren Zapfungen dazu, dass die Oberflächentemperatur des Rohres annähernd der Speichertemperatur entspricht und nicht der üblichen Kaltwassertemperatur von 10-20° C. Durch die Verwendung von Anlegefühlern wird die Oberflächentemperatur des Rohres der gemessenen Kaltwassertemperatur gleichgesetzt. Dies führt zu großen Messfehlern.

Exemplarisch für dieses Problem sind Messwerte für den 7.09.2009 in Abbildung 6 dargestellt. In diesem Diagramm sind die Warm- und Kaltwassertemperatur und der Volumenstrom über die Zeit aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, dass bei großen, lang anhaltenden Volumenströmen die Kaltwassertemperatur deutlich absinkt.

Bei kleineren Zapfungen ist dieser Effekt deutlich geringer und somit die Kaltwassertemperatur als zu hoch angenommen. Da die übertragende Leistung/Energie an den Speicher maßgeblich von der Temperaturdifferenz zwischen Kalt- und Warmwasser abhängt, führt dieser Messfehler zu Abweichungen.



**Abbildung 6: Prelogmessung vom 7.09.2009**

Nach der Modernisierung des Wabehauses und des Lindenplatzes wurden beide Solarthermieanlagen ab Oktober 2012 mit Prelogeinheiten ausgestattet, um ein differenzierteres Bild der Verbrauchsdaten zu erlangen. Eine Vielzahl der Messwerte für den ersten Messzeitraum (Okt.-Dez.) ist für eine Auswertung unbrauchbar, da die Rücklauftemperatur der Zirkulation oberhalb der Vorlauftemperatur liegt.

Nach Betrachtung der schematischen Darstellung der Frischwasserstation (Abbildung 3) wird dieser Effekt durch den Wärmeübertrager (Zirkulationserweiterung) hervorgerufen.

Der Messpunkt wurde zunächst vor den Wärmeübertrager gesetzt, um so die realen Verluste im Gebäude beurteilen zu können. Eine Anbringung des Temperaturfühlers an Position 5 ist zur Bestimmung der Zirkulationsverluste jedoch ungeeignet. Daher wurde der Temperaturfühler am 22.01.2013 an Position 3 versetzt.

Zur genaueren Analyse der Zirkulationsverluste wurde die Taktung auf Sekundenwerte ausgedehnt. Zuvor wurden Messwerte erst ab einem Durchfluss von über 10 l/min erfasst. Durch die Verwendung von Anlegefühlern und der daraus resultierenden Trägheit kommt es erst bei dieser Auflösung zu hinnehmbaren Messgenauigkeiten.

## 2.4 Nutzung von Solarenergie

Die Strahlungsenergie der Sonne in Deutschland schwankt je nach Region von ca. 900...1.200 kWh/(m<sup>2</sup>a) und hat dabei eine durchschnittliche Leistung von 120 W/m<sup>2</sup>. Die Verteilung der anfallenden Solarenergie liegt dabei zu 75% im Sommer. Die restlichen 25% werden in den Wintermonaten bereitgestellt [2].

Zur Nutzung dieser Solarenergie gibt es zwei verschiedene gebräuchliche Methoden. Zum einen die Solarthermie und zum anderen die Photovoltaik. Diese beiden Varianten werden in den folgenden Unterkapiteln näher vorgestellt.

### 2.4.1 Solarthermie

Durch die thermische Nutzung von Solarenergie werden in Deutschland rund 3,1 TWh/a fossile Energie substituiert. Dabei wird die Solarthermie zur Trinkwarmwasserbereitung und Unterstützung bei der Raumheizung eingesetzt. Die solare Strahlungsenergie wird dazu direkt in Wärmeenergie umgewandelt.

In Wohnungsbauten werden vor allem Systemlösungen bevorzugt. Neben den Kollektoren (Absorber) werden dafür Speichertechnik, Leitungen, Regelung und ggf. eine Frischwasserstation eingebaut. Bei den Kollektoren für häusliche Solarthermienutzung wird zwischen zwei verschiedene Arten unterschieden.

#### Flachkollektor

Der Flachkollektor besteht aus einer selektiv beschichteten Metallplatte (Absorberfläche) in der Rohre integriert sind. Durch diese strömt eine Trägerflüssigkeit. Dabei handelt es sich meistens um ein Wasser-Glykol-Gemisch. In dem abgebildeten Bauteil kann die Wärmeträgerflüssigkeit sich auf bis zu 100° C erhitzen.

Die Rückseite ist zur Vermeidung von Wärmeverlusten gedämmt. Die Oberfläche wird durch eine ein- oder zweischichtige Glasplatte vor Witterungseinflüssen geschützt. Zusätzlich wird durch die Glasplatte der konvektive Wärmeverlust verringert.

Der Aufbau eines Flachkollektors ist in Abbildung 7 dargestellt. Diese Art von Kollektoren wurde im Wabehaus und Lindeplatz verwendet.

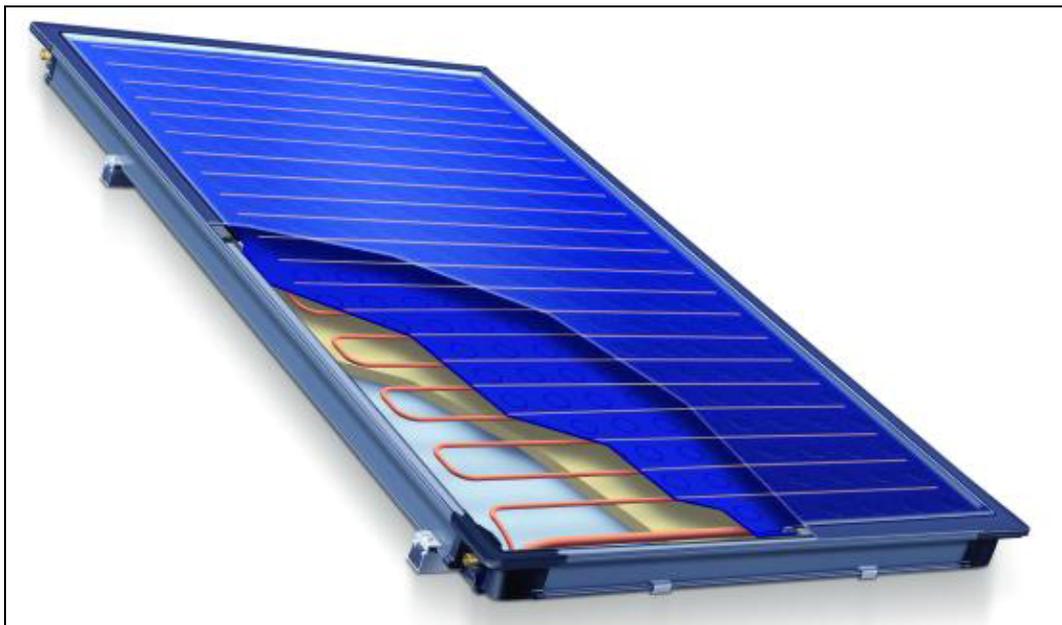


Abbildung 7: schematische Darstellung eines Flachkollektors [3]

Der Preis für diese Kollektoren liegt zwischen 350...600 €/m<sup>2</sup>. Hierbei handelt es sich nicht um die später ermittelten Systemkosten, sondern lediglich um die Kollektorkosten.

Durchschnittlich werden pro Jahr und Quadratmeter Kollektorfläche rund 350 ... 450 kWh Wärmeenergie bereitgestellt. Seitens der ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) wird eine Dimensionierung von 1,5 m<sup>2</sup>/Person und 70 l/Person Speichervolumen empfohlen.

## Vakuurröhrenkollektor

Die jährlichen Erträge können durch einen Vakuurröhrenkollektor verbessert werden. Hierzu wird die Absorberfläche in einem evakuierten Glasrohr eingebracht. Der Wärmetransport erfolgt entweder direkt oder indirekt. Bei der direkten Methode strömt die Wärmeträgerflüssigkeit direkt durch den Absorber. Bei der indirekten ist diese von einem Wärmerohr ummantelt.

In Abbildung 8 ist das Prinzip einer indirekten Vakuurröhre dargestellt.



Abbildung 8: Funktionsprinzip eines Vakuurröhrenkollektors [5]

Durch dieses Funktionsprinzip werden die Wärmeträgertemperaturen auf bis zu 250° C gesteigert. Der Ertrag am Kollektorausgang erhöht sich dadurch auf ca. 500 kWh/(m<sup>2</sup>a). Jedoch sind die Preise für Vakuurröhrenkollektoren deutlich höher und betragen 650...1.000 €/m<sup>2</sup>. Die Abbildung 9 zeigt einen Vakuurröhrenkollektor.



Abbildung 9: Darstellung eines Vakuurröhrenkollektors [6]

## Speicher und Frischwasserstation

Aufgrund der Schwankung der Intensität von Solarstrahlung wird die am Ausgang des Kollektors bereitgestellte Energie meist durch einen Wärmeübertrager in einen Pufferspeicher übertragen. Von dort aus kann die Wärmeenergie entweder zur Trinkwarmwasserbereitung oder zur Heizungsunterstützung entnommen werden.

Solarthermieanlagen werden meist als bivalentes System zusammen mit einem konventionellen Wärmeerzeuger, wie einem Erdgasbrennwertkessel oder Nahwärmeanschluss eingesetzt [2].

Darüber hinaus ist es aufgrund der verschärften Trinkwasserverordnung sinnvoll, das Trinkwarmwasser durch eine Frischwasserstation zu bereiten. Diese Methode bringt mehrere Vorteile mit sich. Zum einen werden in einer solchen Frischwasserstation nur kleinere Mengen an Trinkwarmwasser bevorratet. Größere Zapfmengen werden im Durchlaufprinzip über einen Wärmeübertrager, der von den Pufferspeichern gespeist wird, erzeugt. Zum anderen sinkt die Rücklauftemperatur des Systems (Siehe Abbildung 10), vor allem in Systemen ohne Zirkulation.

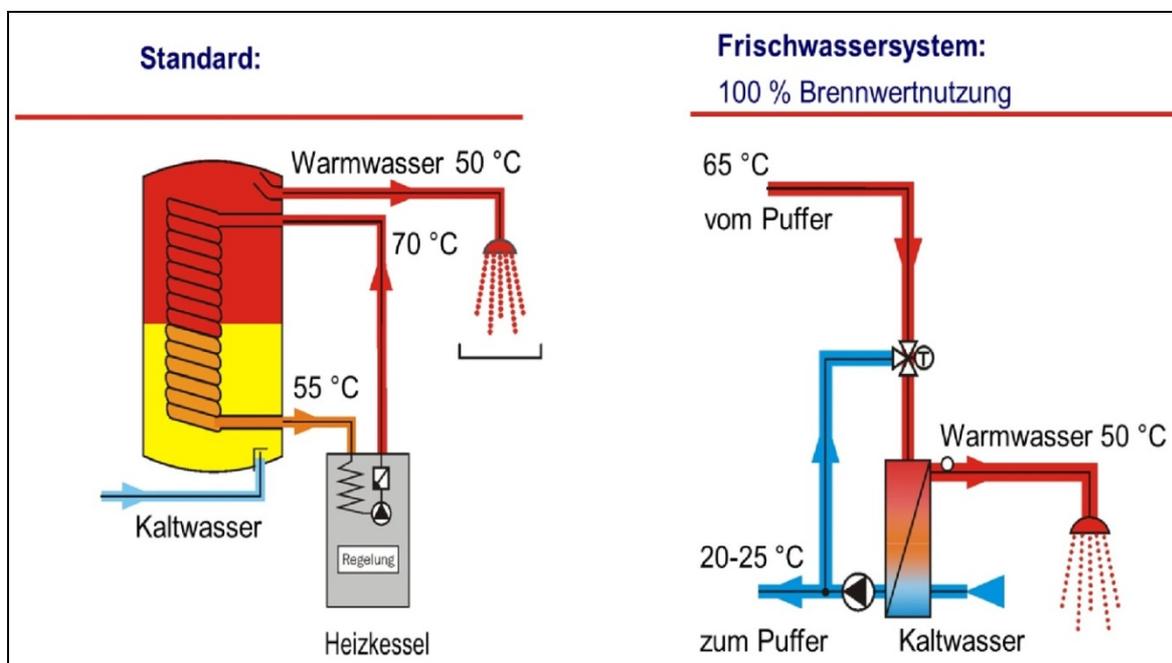


Abbildung 10: Trinkwasserspeicher contra Frischwasserstation [5]

Für die optimale Speicherung der Solarenergie sollte ein Schichtenpufferspeicher verwendet werden. Bei der Einlagerung der Solarenergie mit unterschiedlichen Temperaturen kommt es nicht zur Durchmischung des Speichers. So bleibt die Schichtung, wie in Abbildung 11 dargestellt, bestehen.

Das unten im Speicher befindliche Rücklaufwasser für die Solaranlage ist vom Temperaturniveau gering, dass eine Wärmeabgabe auch bei geringerer Solarstrahlung möglich ist. Zudem ist der obere Teil des Speichers mit hohen Temperaturen beladen, die zur Warmwasserbereitung genutzt werden können.

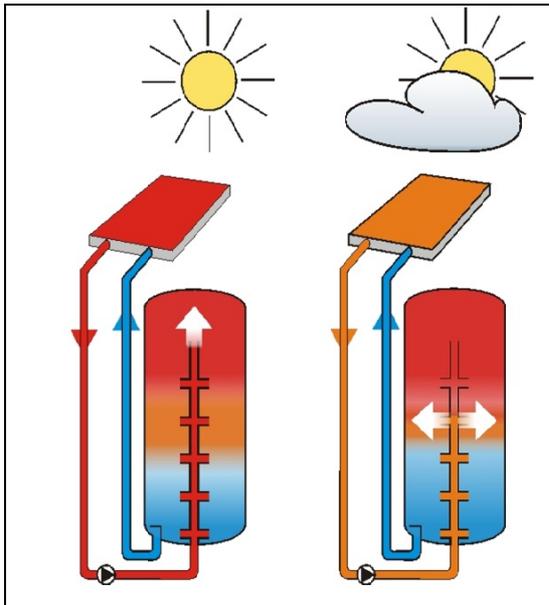


Abbildung 11: Schichtenspeicher für Solarsysteme [5]

### 2.4.2 Photovoltaik

Der Ausbau der Photovoltaikanlagen in Deutschland hat aufgrund der lukrativen Förderprogramme des EEG in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Die jährlich erzeugte Energiemenge durch Photovoltaikanlagen ist um das 200-fache höher als das der thermischen Solaranlagen in Deutschland.

Photovoltaikanlagen nutzen im Gegensatz zu thermischen Solaranlagen den photoelektrischen Effekt, um Sonnenstrahlung in elektrische Energie umzuwandeln. Dabei funktioniert die Zelle aus Halbleitermaterialien wie eine Diode, nur umgekehrt. Trifft elektromagnetische Strahlung auf die Zelle, erzeugt dies freie Ladungsträger. Es werden eine elektrische Spannung und als Nebenprodukt Wärme erzeugt.

Der erzeugte Photostrom kann gespeichert, direkt ins Stromverbundnetz eingespeist oder von Verbrauchern genutzt werden. Für die Einspeisung ins Netz und für die meisten Verbraucher ist der erzeugte Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln. Hierfür ist ein Wechselrichter erforderlich.

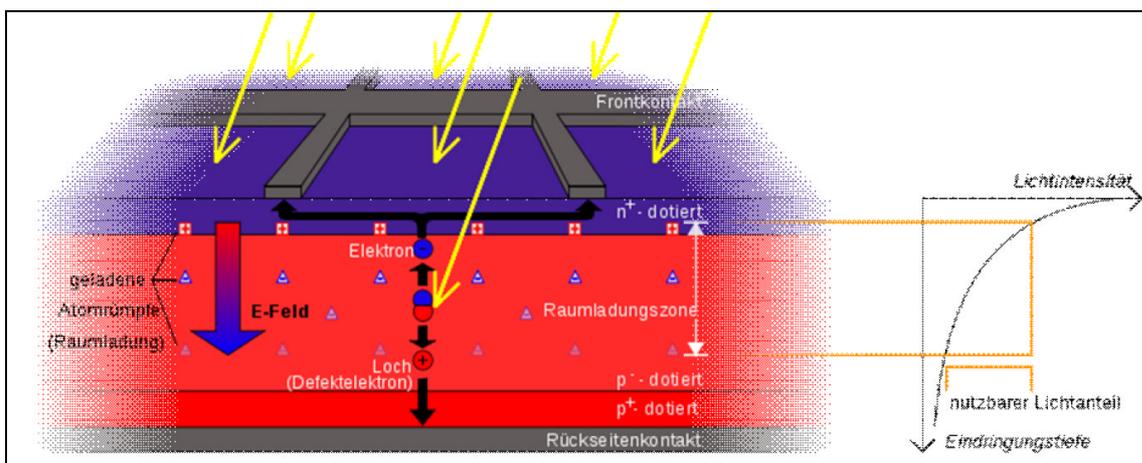


Abbildung 12: Funktionsprinzip Photovoltaikzelle [19]

Neben den Solarzellen, die in Reihe geschaltet ein Solarmodul ergeben, besteht eine Photovoltaikanlage aus folgenden Komponenten:

- Generatoranschlusskasten
- Wechselrichter
- Stromzähler für Bezug und Lieferung
- Hausanschlusskasten
- Stromleitungen
- Sicherheitseinrichtungen

Bei der Planung von Photovoltaikanlagen ist besonders darauf zu achten, dass die Module eine optimale Ausrichtung und Neigung (Südausrichtung; 30°) aufweisen und nicht verschattet werden. Durch die Reihenschaltung der einzelnen Solarzellen vermindert sich durch Verschattung einer einzelnen Zelle die Leistung des gesamten Strings.

Durch Verschmutzung von Pollen und Staub kann es ebenfalls zu Ertragsminderungen kommen. Das Waschen ist jedoch meist nicht wirtschaftlich und sollte anhand des Ertrages abgewogen werden. Zusätzlich zu den äußeren Einflüssen altern Solarzellen und verringern dadurch ihre Effizienz. Die Degradation der Solarzellen beträgt ca. -0,5...1%/a.

Durch Sonneneinstrahlung kann es zu Temperaturen von bis zu 80°C kommen. Da mit zunehmender Temperatur die Spannung um ca. 0,45 %/K abnimmt, verschlechtert sich ausgehend von 25°C der Wirkungsgrad der Module um 25 %. Deshalb sollten Module einen ausreichenden Abstand von der Dachhaut haben, um gut hinterlüftet zu sein.

Wie bereits erwähnt wird die erzeugte Energie der Solarmodule staatlich gefördert. Seit der Novellierung des EEG im April 2012 ist es in Deutschland jedoch meist sinnvoller, den erzeugten Strom selbst zu verwenden. Die eingesparte Kilowattstunde, die nicht vom Stromversorger gekauft werden muss, ist mehr wert als die Einspeisevergütung.

Dieser Effekt nimmt mit steigenden Strompreisen und der Degression der Einspeisevergütung weiter zu. Deshalb kann es sinnvoll sein, den Eigenverbrauchsanteil mit Speichertechnik zu erhöhen. Bei Inselanlagen, die keine Anbindung an das Stromnetz haben, ist dieses unumgänglich.

Installiert werden Photovoltaikanlagen größtenteils auf Dächern. Eine Montage an der Fassade von Gebäuden und auf Freiflächen ist ebenfalls möglich. Die Nachteile dabei sind der geringere Solarertrag durch schlechtere Neigungswinkel (Fassadenanlagen) und die geringere Vergütung durch das EEG (Freiflächenanlagen) [14].

### **2.4.3 Hybridmodule – Photothermie oder Thermovoltaik**

Die Tatsache, dass die Leistung von Photovoltaikmodulen mit zunehmender Temperatur an Effizienz verlieren, wirft die Frage auf, ob es sinnvoll ist, Photovoltaikanlagen mit Wasser zu kühlen und das Kühlwasser zur Beheizung des Gebäudes zu verwenden.

Das Problem liegt dabei an den unterschiedlichen Temperaturniveaus der beiden Systeme. Photovoltaikanlagen haben ihre Nennleistung bei 25° C, dem unteren Temperaturbereich von Solarthermieanlagen. So ist das Ertragsmaximum beider Systeme nicht mit einander kombinierbar. Der Mehraufwand bei Installation und Kosten ist zu hoch, um eine wirtschaftlichere Betriebsweise als bei reinen Solarthermie- und Photovoltaikanlagen zu erlangen.

Eine weitere Betrachtung kommt für dieses Projekt aufgrund der hohen Kosten nicht in Frage. Hybridmodule eignen sich eher für Inselanlagen mit geringer Dachfläche, da sowohl Trinkwarmwasser als auch Strom erzeugt werden können. Vor der Wahl von Hybridmodulen sollte eine Erzeugung von Trinkwarmwasser mittels Photovoltaikanlage überprüft werden.

## 3 Auswertung

Das Kapitel 3 befasst sich mit der Darstellung der Gebäude und deren Solaranlagen. Es wird jeweils zuerst das Gebäude und dessen Nutzung vorgestellt. Danach werden die Solaranlage und die Anlagentechnik beschrieben. Anhand der Messwerte wird eine E-A-V und Jahresenergiebilanz mit Energieflussdiagramm erstellt. Zum Abschluss werden Verbesserungsvorschläge gemacht und alle relevanten Daten zusammengefasst.

### 3.1 Solarthermieanlage Wabehaus

Das Wabehaus befindet sich innerhalb der Liegenschaft am westlichen Rand.

#### 3.1.1 Gebäude und Nutzung

Das Gebäude wurde im Jahr 1934 errichtet und 2010 umfangreich saniert und in diesem Zuge mit Wärmedämmung, neuen Fenstern, einer thermischen Solaranlage und einem neuen Nahwärmeanschluss versehen.

Im 729 m<sup>2</sup> großen Gebäude sind ca. 22 Personen untergebracht und werden von zwei weiteren Personen betreut. Die meisten Bewohner gehen einer geregelten Arbeit nach. Neben den Zimmern der Bewohner umfasst das Gebäude Gemeinschaftssanitärräume, zwei Küchen, und Flure mit Innentreppen.

Das Gebäude ist voll unterkellert. Es hat einen innenliegenden Treppenabgang zum weitgehend unbeheizten Keller. Der einzig beheizbare Kellerraum wird nur selten genutzt und wird daher in der energetischen Betrachtung vernachlässigt.

Das Gebäude hat winkelförmigen Grundriss und ein Satteldach mit Gauben. Es gibt Dachflächen in alle 4 Himmelsrichtungen. Die Süd- und Ostflächen bilden den Außenwinkel und weisen mehr Fläche auf.

#### 3.1.2 Anlagentechnik

Der Kollektor der Solaranlage ist auf der Gaube der südlichen Seite des Daches montiert (Abbildung 13).

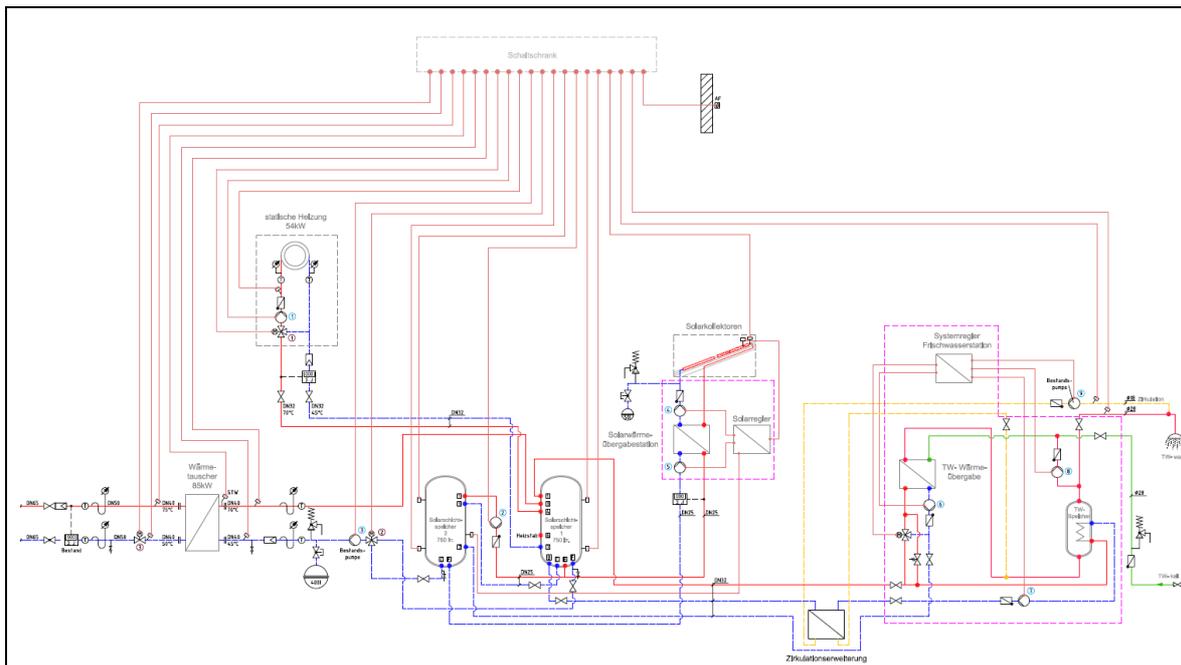


Abbildung 13: Solarthermieanlage Wabehaus und Technikzentrale

Alle Anlagenkomponenten der Solaranlage sind von der Fa. Solvis. Der Flachkollektor ist vom Typ F-552 und hat eine Gesamtkollektorfläche von 20,64 m<sup>2</sup>. Hindurch fließt ein Gesamtvolumenstrom von 412,8 l/h. Die Neigung der Kollektorfläche beträgt 25° in der Horizontalen und der Azimutwinkel beträgt 0°.

Der Kollektorkreislauf ist über einen Wärmeübertrager mit dem Speichersystem verbunden. Das Speicherkonzept beinhaltet zwei 750 l Schichtenpufferspeicher und eine 30 l Frischwasserstation. Die Schichtenpufferspeicher sind mit einem elektrischen Heizstab ausgerüstet, der bislang noch nicht angeschlossen ist.

Die Anlage wird mit einer übergeordneten Regelung betrieben. Durch die Systemtrennung der Frischwasserstation kann die Anlage heizungsunterstützend betrieben werden. Die Abbildung 14 zeigt das Regelschema der oben abgebildeten Solarthermieanlage des Wabehauses.



**Abbildung 14: Anlagenschema Wabehaus**

Neben den Komponenten der Solaranlage umfasst die Anlagentechnik des Technikraumes den Hausanschluss mit Wärmeübertrager der Nahwärmeleitung.

### 3.1.3 Messwerte und Prelogmessung

Seit Errichtung der Solaranlage erfolgt die Ablesung der drei WMZ monatlich. Dadurch können die Energieströme der Nahwärme, des Kollektorkreises und der Heizkreise benannt werden. Für das Messintervall von Oktober 2011 bis Juni 2013 ergaben sich folgende Jahresenergien.

	Energie in MWh
<b>Nahwärme</b>	113,4
<b>Kollektorkreis</b>	8,3
<b>Heizkreis</b>	61,2

**Tabelle 2: Messwerte WMZ Wabehaus**

Durch die Prelogmessung (Okt. 2012 – Juni 2013) konnten zusätzlich die Energiemengen für Trinkwarmwasser und Zirkulationsverluste ermittelt werden und für das ganze Jahr berechnet werden. Eine Auflistung der Ergebnisse folgt in Kapitel 3.1.5.

### 3.1.4 Energieanalyse aus dem Verbrauch

In der nachfolgenden Abbildung 15 ist die Wärmeabnahmeleistung über die mittlere Außentemperatur des Intervalls aufgetragen. Die Leistung wird gebildet, indem der Verbrauch durch den jeweiligen Zeitraum geteilt wird. Die mittlere Außentemperatur eines Intervalls wird aus Tagesmitteltemperaturen errechnet, die vom deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt werden.

Die Wärmeabnahme des Wabehauses ergibt sich aus der Summe der Energiemengen der WMZ Nahwärme und des Kollektorkreis und ist durch schwarze Punkte markiert. Zusätzlich ist der Solarertrag eingetragen. Eindeutig zu erkennen ist, dass selbst während der Sommermonate nur knapp ein Viertel der Grundlast gedeckt werden kann.

Daraus können folgende Werte ermittelt werden:

- Grundleistung Nahwärme + Solar: 5,6 kW
- Heizgrenztemperatur: 17,6°C
- Gebäudeheizlast: ca. 23 kW
- spez. Wärmeverlust: ca. 0,9 W/(m²K)

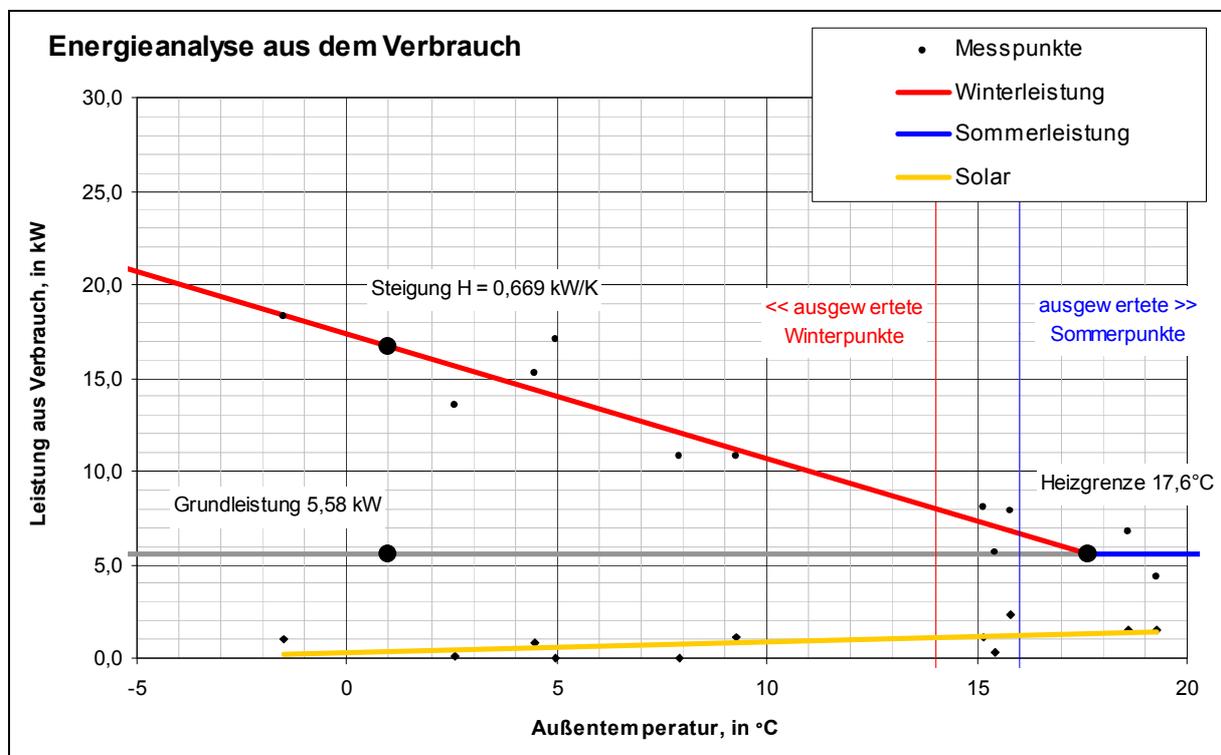


Abbildung 15: E-A-V Wabehaus

Dem Bild liegen die Messwerte von November 2011 bis November 2012 zugrunde.

### 3.1.5 Jahresenergiebilanz und Energieflussbild

Durch die Modernisierung des Gebäudes wurde der witterungskorrigierte Verbrauch (Endenergie) an Fernwärme von 171 MWh/a auf ca. 100 MWh/a (beide Werte witterungskorrigiert) gesenkt.

Die Grundleistung sank von vorher 7,1 kW auf 5,6 kW. Dieser Umstand ist durch die bessere Wärmedämmung der Rohrleitungen und herabsetzen der Vorlauftemperatur erreicht wurden. Durch die großen Schichtenpufferspeicher und den überdimensionierten Wärmeübertrager (85 kW) konnten die Verluste, welche sich auf die Grundleistung auswirken, nicht wie erwartet reduziert werden.

Zudem wurden durch eine unabhängige Untersuchung eines neutralen Planungsbüros verschiedene regelungstechnische Fehler erkannt, die unter anderem zur Durchmischung der Pufferspeicher führen. Dadurch werden sowohl der Solarertrag als auch die Speicherverluste negativ beeinflusst.

Insgesamt ergibt sich folgende Energiebilanz für den Zeitraum 1.10.2011 bis 01.06.2013. Die Daten des 21-Monatszeitraumes sind nicht witterungskorrigiert, jedoch anhand der Monatsanzahlen (12/21) auf ein Jahr heruntergerechnet.

		Energie in kWh	Energie in kWh
<b>Input</b>	FW (1)	113.400	121.686
	Kollektorkreis (2)	8.286	
<b>Output</b>	Heizkreis (3)	61.194	83.619
	Warmwasserbedarf (4)	22.426	
<b>Verluste</b>	Zirkulation (5) + Trinkwarmwasser (6)	14.962	38.067
	Heizzentrale (7)	23.105	

**Tabelle 3: Jahresenergiebilanz Wabehaus**

Die Werte 1-5 wurden durch Messwerte ermittelt. Wert 6 wurde durch eine IWU-Energiebilanz im Rahmen des DBU-Projekts Neuerkerode 2015 durch Berechnung anhand von Rohrlängen ermittelt. Wert 7 ergibt sich aus der Differenzbildung  $(1+2)-(3+4+5+6)=(7)$ .

Insgesamt wurden dem Gebäude im Messzeitraum von einem Jahr 121,7 MWh zugeführt. Der Nutzenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser beträgt 83,6 MWh. Die restlichen 38 MWh sind Verluste durch Zirkulation, Warmwasserverteilung und -speicherung.

Mit der Kollektorfläche von 20,64 m<sup>2</sup>, der Wohnfläche von 729 m<sup>2</sup> und der Personenzahl (22 Personen) lassen sich folgende Kennwerte ermitteln:

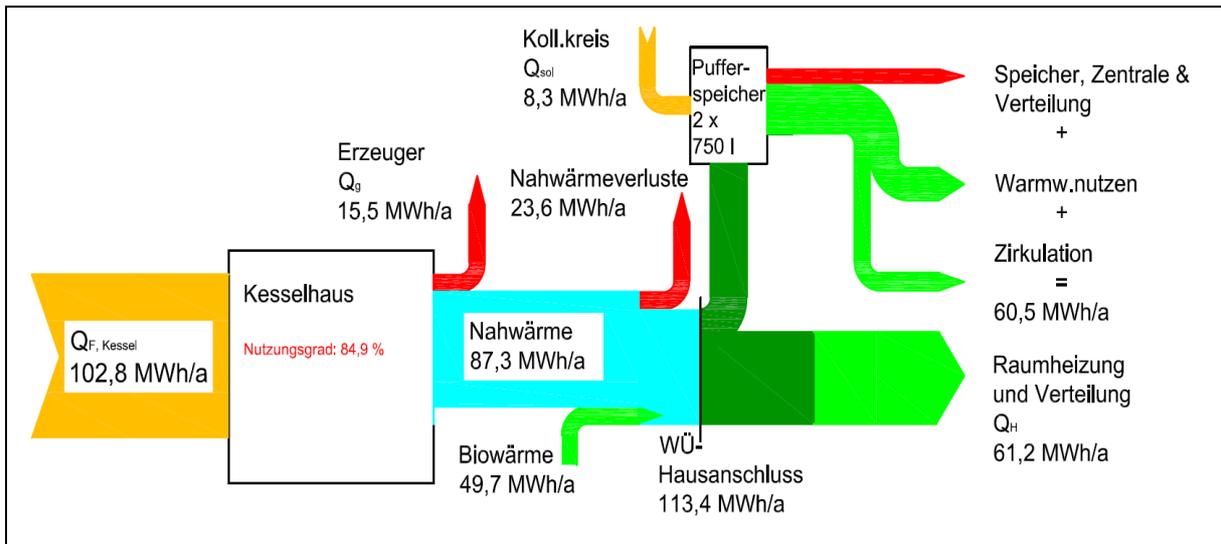
- Spez. Kollektorertrag: 402 kWh/(m<sup>2</sup>a)
- Spez. Kollektorfläche: 0,94 m<sup>2</sup>/P
- Spez. Zirkulationsverluste: 18 kWh/(m<sup>2</sup>a)
- Spez. Verluste der Zentrale: 23 kWh/(m<sup>2</sup>a)
- Spez. Warmwasserenergiebedarf: 1018 kWh/(Pa)
- Spez. Speichervolumen: 73 l/m<sup>2</sup>

Eine Einordnung der Kennwerte erfolgt in Kapitel 4.2/4.3.

Anhand der Messwerte der WMZ und der Prelogdaten kann ein Energieflussbild für das Wabehaus erstellt werden.

Die Energiemengen für die vorgelagerten Ketten, d.h.  $Q_{F,Kessel}$  (Endenergieeinsatz Kessel; brennwertbezogen),  $Q_g$  (Erzeugerverluste), Nahwärmeverluste und Energie der Biowärmeinspeisung können anhand der Daten des Mediengrunddatenberichts 2012 berechnet werden.

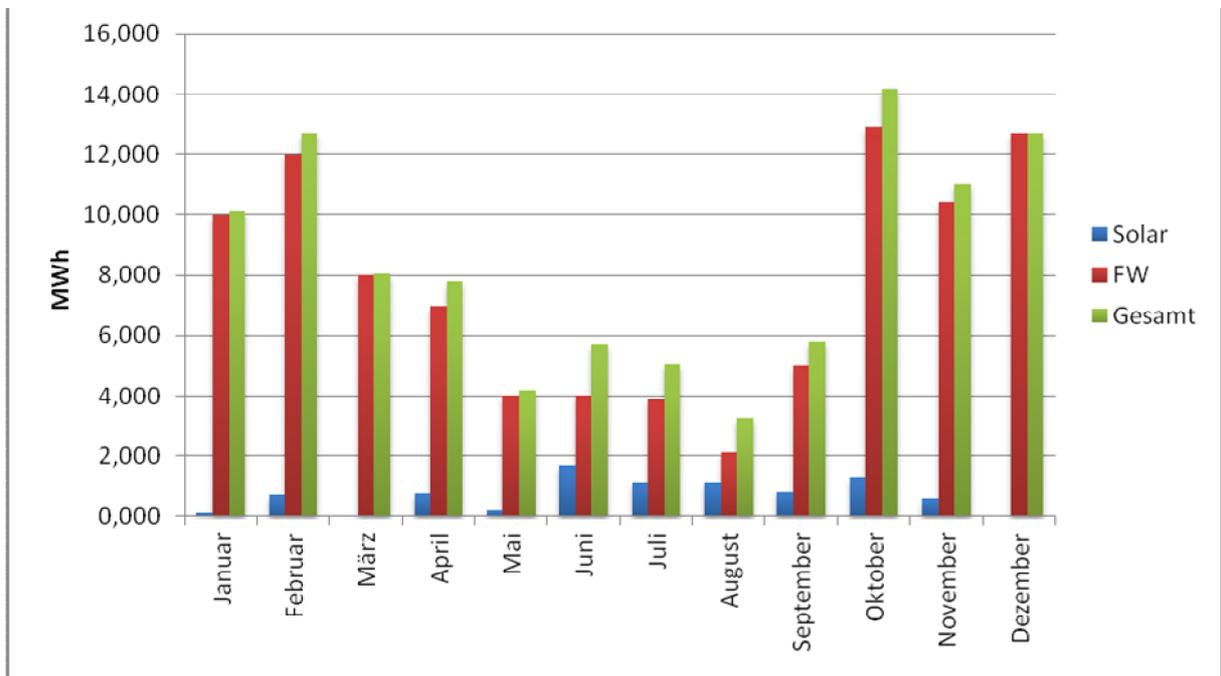
Der Kollektorkreisenertrag mit 8,3 MWh/a ist als gut anzusehen. Die rechnerisch ermittelten Speicher-, Zentralen- und Verteilverluste sind höher als die Erträge der Solaranlage. Nach Einsicht in das Datenlogging der Fa. Solvis, ist eine Durchmischung des Speichers festzustellen. Dadurch erhöht sich die mittlere Speichertemperatur und führt zu erhöhten Wärmeverlusten des Speichers.



**Abbildung 16: Energieflussbild Wabehaus, Oktober '11 bis Juni '12**

In Abbildung 17 ist der monatliche Verlauf der Messwerte der WMZ Nahwärme und Kollektorkreis für das Jahr 2012 dargestellt. Als dritte Säule ist der Gesamtenergieinput (Nahwärme + Solar) aufgetragen. Die entspricht der benötigten Endenergie für das Gebäude.

Deutlich zu sehen ist, dass die Solaranlage maximal ein Drittel des Endenergiebedarfs decken in den besten Sommermonaten kann. Eine sommerliche Trennung vom Netz ist so nicht möglich. Während des ertragreichsten Monats reicht die Solaranlage gerade aus, um den Warmwassernutzen zu decken. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Anlage einen großen Anteil zur Heizungsunterstützung beitragen kann.



**Abbildung 17: Grafische Auswertung Monatsmesswerte Wabehaus, 2012**

## Hinweis

Eine genauere Analyse der Jahresenergiebilanz mit witterungskorrigierten Jahreswerten enthält der separate Bericht.

### **3.1.6 Einschätzung**

Sowohl die Verluste der Zirkulation, der Verteilung und der Zentrale sind als sehr hoch anzusehen. Hier hätte bei der Modernisierung mehr darauf geachtet werden sollen, diese zu senken – z.B. durch erhöhte Dämmdicken der Leitungen und Längenoptimierung des Netzes.

Vor allem die Verluste der Zentrale sind um den Faktor vier größer als bei vergleichbaren Anlagen. Daher wurde innerhalb der Projektbearbeitung entschieden, die Solaranlage Wabehaus über einen Zeitraum von einem Jahr messtechnisch genauer zu untersuchen.

Zudem ist die Kollektorfläche für eine Abschaltung im Sommer zu klein. Das liegt an falschen Annahmen zum Verbrauch an Wärme bei der Messung des Gebäudes vor der Modernisierung (Messfehler, siehe Kapitel 2.3).

Zudem wurde anhand eines zweiten Datenloggings eine Durchmischung des Schichtenpufferspeichers festgestellt. Ursache dafür ist die fehlerhafte Ansteuerung der Beladepumpe. Diese fehlerhafte Programmierung wurde überarbeitet. Weitere Daten, ob die Maßnahmen zu einem zufrieden stellenden Ergebnis geführt haben, liegen noch nicht vor.

## **3.2 Solarthermieanlage Lindenplatz**

Das Gebäude Lindenplatz befindet sich am nord-östlichen Rand der Liegenschaft. Da der vollständige Umbau erst 2012 abgeschlossen wurde, liegen für eine komplette Jahresauswertung noch nicht genügend Werte vor.

### **3.2.1 Gebäude und Nutzung**

Das Gebäude wurde 1982 erbaut und hat eine Fläche von 2.238 m<sup>2</sup>. In den Jahren 2011 und 2012 wurde es modernisiert. Seit der Modernisierung werden 64 Personen darin untergebracht und betreut.

Der Großteil des Gebäudes ist eingeschossig und nicht unterkellert. Der Mittelteil des Gebäudes ist dreigeschossig. Zwei Geschosse sind beheizt. Das dritte Geschoss enthält seit dem Umbau die Technikzentrale, in der die Solaranlage mit den Schichtenpufferspeichern untergebracht ist. Abgesehen vom Pyramidendach des Mittelteils ist der Rest des Gebäudes mit einem Flachdach versehen. Die Seiten des Pyramidendachs sind zu den vier Himmelsrichtungen orientiert.

### **3.2.2 Anlagentechnik**

Durch die Modernisierung wurden die drei getrennten Hausanschlüsse zu einem Technikraum auf dem Dachboden des Mittelteils zusammengefasst. Dort sind neben dem Nahwärmeanschluss (300 kW) auch die Schichtenpufferspeicher und die zentrale Regelung untergebracht.

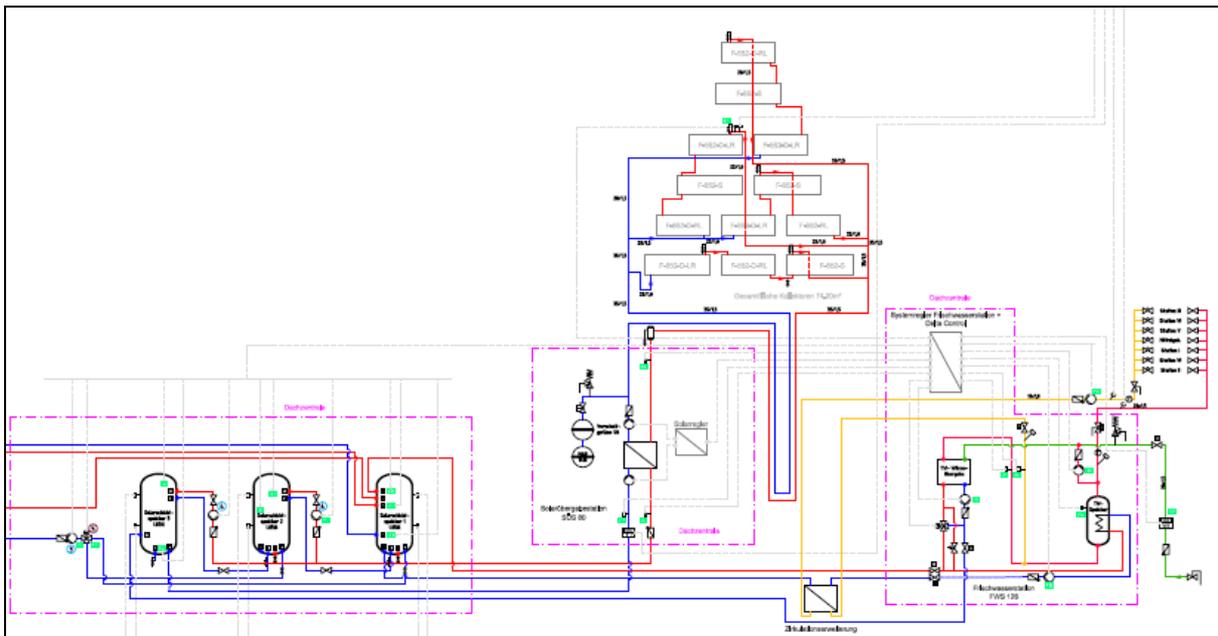
Durch die Einrichtung der Technikzentrale unter dem Dach sind die Wege zwischen Kollektor und Pufferspeicher gering. Die Kollektoren der Typen F-652 und F-552 sind auf dem südlichen Pyramidendach angebracht und haben eine Kollektorfläche von 68,37 m<sup>2</sup>. Der Azimutwinkel beträgt 0° und die Neigung ist mit 29° etwas steiler als beim Wabehaus.

In der Technikzentrale sind drei Schichtenpufferspeicher mit jeweils 1850 l und eine 77 l Frischwasserstation eingebaut. Auch hier erfolgt eine Systemtrennung zwischen Kollektorkreis und Pufferspeicher über einen Wärmeübertrager. Die Anlage der Fa. Solvis wird mit einer übergeordneten Regelung betrieben und ist mit Heizungsunterstützung ausgeführt.



**Abbildung 18: Solarthermieanlage Lindenplatz und Technikzentrale**

Die Abbildung 19 zeigt das Regelschema der oben abgebildeten Solarthermieanlage des Lindenplatzes.



**Abbildung 19: Anlagenschema Lindenplatz**

### 3.2.3 Messwerte/Prelogmessung

Die detaillierte Auswertung der Messdaten ist nicht möglich, da ein Defekt des WMZ des Solarkreises vorlag. Zudem erfolgt ein Ausbau der WMZ der einzelnen Heizkreise, so dass die Heizung nicht mehr separat erfasst wird.

Ersatzweise kann an dieser Stelle nur die Prelogmessung der Solaranlage dargestellt werden. Sie wurde vom 11. Februar 2013 bis zum 19. Juni 2013 durchgeführt. Dabei wurden folgende Kennwerte ermittelt:

- Warmwasserenergiebedarf: 52,3 MWh/a
- Spez. Zirkulationsverluste: 4,54 kWh/(m<sup>2</sup>a)
- Spez. Warmwasserenergiebedarf: 816 kWh/(Pa)
- Spez. Kollektorfläche: 1,07 m<sup>2</sup>/P
- Spez. Speichervolumen: 81 l/m<sup>2</sup>

Ein Vergleich der ermittelten Werte erfolgt in Kapitel 4.2/4.3.

### **3.2.4 Einschätzung**

Der spezifische Warmwasserenergiebedarf liegt über dem Bundesdurchschnitt, ist aber für die Gebäude in Neuerkerode nicht unüblich.

Durch den zentralen Technikraum und die große Ausdehnung des Gebäudes wäre ein höherer Zirkulationsverlust zu erwarten gewesen. In den im Vorfeld erstellten Simulationsergebnissen wird von einer deutlich höheren Zirkulationslast ausgegangen. Messfehler können derzeit nicht ausgeschlossen werden.

Zudem wurde im Zuge der Datenauswertung (Sommer 2013) beschlossen, die bei der Modernisierung entfernten WMZ für die Heizung wieder zu installieren, um eine detaillierte Auswertung des Lindenplatzes zu ermöglichen.

Zusätzlich muss überprüft werden, ob die Fehler des Wabehauses bezüglich der Regelung im Lindenplatz wiederholt wurden.

## 4 Vergleich

Das Kapitel 4 soll die bisherigen Auswertungen bezüglich der Solaranlagen Wabehaus und Lindenplatz mit denen in der Literatur veröffentlichten Kennwerten für Solarthermieanlagen und den Ergebnissen eines BMU-Projektes [13] vergleichen. Daraus resultierend sollen Kennwerte zur Auslegung und Kostenabschätzung weiterer Solarthermieanlagen in Neuerkerode gebildet werden. Diese werden dann in Kapitel 5 weiterverwendet.

### 4.1 Investitionskosten

Ein entscheidender Faktor für die wirtschaftliche Betriebsweise sind die Investitionskosten. Um diese untereinander vergleichen zu können, muss eine sinnvolle Bezugsgröße gefunden werden. Bei Solarthermieanlagen wird als Bezugsgröße die Kollektorfläche genutzt, da alle anderen Systemkomponenten in Abhängigkeit dazu ausgelegt werden.

Die Systemkosten der beiden Solaranlagen in Neuerkerode betragen ca. 950 €/m<sup>2</sup> (ohne MWSt). Im Rahmen des Projektes Solarthermie 2000 wurde Abbildung 20 veröffentlicht [7], in welche die Werte aus Neuerkerode vergleichend eingetragen wurden.

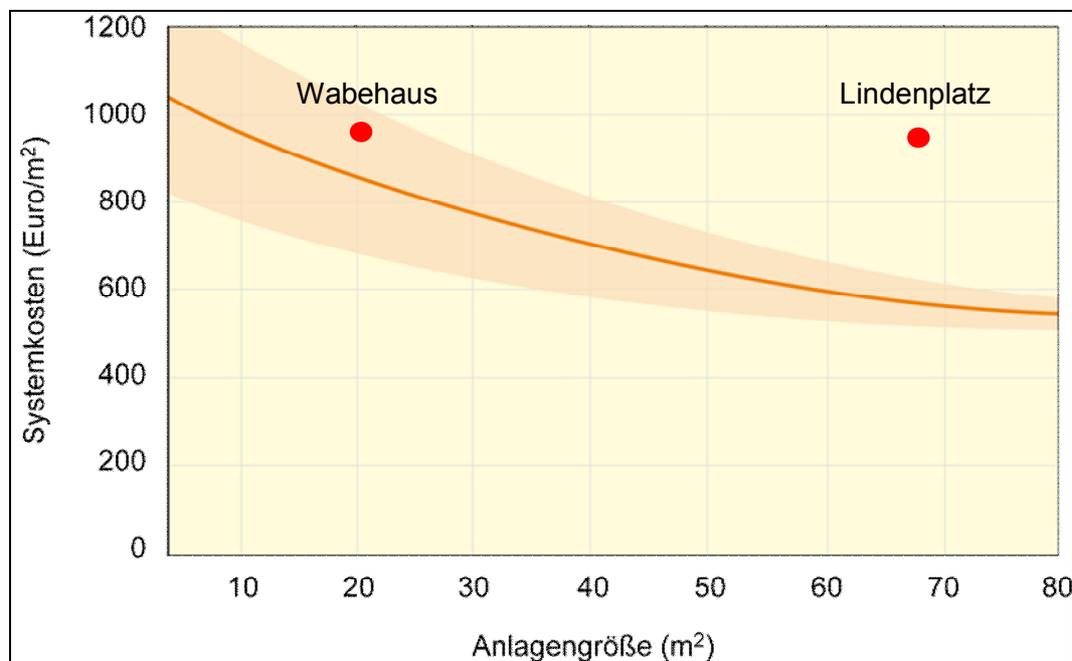


Abbildung 20: Systemkosten für Solarthermieanlagen (Solarthermie 2000) [7]

Abbildung 20 zeigt, dass Systemkosten bei kleinster Anlagengröße bei durchschnittlich 1000 €/m<sup>2</sup> liegen. Bei den Anlagengrößen, wie in Neuerkerode errichtet, sind Investitionskosten zwischen 600...850 €/m<sup>2</sup> typisch. Auch das Unternehmen Prognos AG geht in einer Studie von spezifischen Systemkosten von durchschnittlich 640...700 €/m<sup>2</sup> aus [8].

Die Systemkosten der beiden installierten Anlagen in Neuerkerode liegen damit höher als üblich. Besonders die Investitionskosten des Lindenplatzes sollten aufgrund der deutlich größeren Kollektorfläche, eigentlich geringere spezifische Kosten aufweisen. Um die Solaranlagen wirtschaftlicher zu betreiben, ist es sinnvoll die Investitionskosten für weitere Anlagen zu senken.

Die Funktion  $k = -206 \text{ €/m}^2 \cdot \ln(A_c/\text{m}^2) + 1455,7 \text{ €/m}^2$  lässt sich näherungsweise aus der Grafik ableiten. Die weiteren Berechnungen bezüglich der Investitionskosten für Solaranlagen werden mit dieser Funktion berechnet.

## 4.2 Energiekennwerte

Ein zweiter entscheidender Faktor für die richtige Auslegung und damit für die Wirtschaftlichkeit einer Solarthermieanlage sind auf den Nutzer angepasste Energiekennwerte. Sind der Warmwasserbedarf, Zirkulationsverluste und Verteilverluste unbekannt, ist es schwer eine Solarthermieanlage richtig auszulegen.

Deshalb werden die in den vorherigen Kapiteln ermittelten Werte mit denen des BMU-Solarprojekts und den Mediengrunddaten 2012 verglichen.

Der gemessene Warmwasserbedarf für das Wabehaus und Lindenplatz ist mit ca. 900 kWh/P\*a um etwa 6 % höher als der aus den Mediengrunddaten 2012 [16] berechnete Wert. Beide Werte liegen deutlich über dem Bundesdurchschnitt von 600...650 kWh/P\*a, sind für ein Pflegeheim jedoch nicht außergewöhnlich. Dieser Faktor sollte bei der Kollektorauslegung beachtet werden und führt in der Regel zu einer größeren Kollektorfläche pro Person als üblich.

In Kapitel 2.2 wurde bereits erörtert, dass der in der Zirkulationsleitung befindliche Temperaturfühler hinter einem zusätzlichen Wärmeübertrager angebracht ist. Dies ist bei der Auswertung der Messwerte zu beachten.

Die Zirkulationsverluste des Wabehauses (18,3 kWh/m<sup>2</sup>a) und des BMU-Solarprojekts (19,9 kWh/m<sup>2</sup>a) sind annähernd identisch. Die Verluste des Lindenplatzes sind mit lediglich 4,5 kWh/m<sup>2</sup>a deutlich unter diesen beiden Kennwerten. Diese enorme Abweichung ist nicht erklärbar mit dem tatsächlichen Netz. Die Messwerte sind kritisch zu bewerten. Es liegen vermutlich Messfehler vor.

Vergleicht man die Wärmeverluste von Zentrale und Speicher des Wabehaus mit denen des BMU-Solarprojektes, ist eine große Abweichung festzustellen (23,1 kWh/m<sup>2</sup>a; 4 kWh/m<sup>2</sup>a). Da der Wärmeverlust aus einer Differenzbildung resultiert, sind die Ungenauigkeiten höher als bei einem Messwert. Jedoch wurde der ermittelte Wert anhand einer Heizlastberechnung des Heizraums plausibilisiert. Aufgrund der Durchmischung der Schichtenpufferspeicher kommt es in der Zentrale zu erhöhten Verlusten. Durch die Installation einer Drehzahlregulierten Beladepumpe soll dieses Problem künftig behoben werden.

## 4.3 Auslegungskennwerte

Im folgenden Kapitel werden die Auslegungskennwerte der Solaranlagen in Neuerkerode und des BMU-Solarprojektes miteinander verglichen.

Mit ca. 400 kWh/(m<sup>2</sup>a) Kollektorertrag weist das Wabehaus einen überdurchschnittlich guten Wert auf. Im BMU-Solarprojekt ist dieser Kennwert im Durchschnitt mit 360 kWh/(m<sup>2</sup>a) ermittelt worden. Durch die gute Ausrichtung der Kollektoren des Wabehauses ist dieser höher als der Durchschnittswert des BMU-Solarprojekts.

Das auf die Kollektorfläche bezogene Speichervolumen (BMU-Solarprojekt 70 l/m<sup>2</sup>; Wabehaus 73 l/m<sup>2</sup>; Lindenplatz 81 l/m<sup>2</sup>) gleicht den Auslegungsempfehlungen der Literatur. Für die weiteren Auslegungen wird mit 70 l/m<sup>2</sup> gerechnet.

Die Werte für die Kollektorauslegung pro Person sind in Neuerkerode größer (Wabehaus 0,94 m<sup>2</sup>/P; Lindenplatz 1,07 m<sup>2</sup>/P) gewählt als im BMU-Solarprojekt. Allerdings wurden die dort festgestellten 0,84 m<sup>2</sup>/P als deutlich zu gering eingestuft.

Im nachfolgenden Kapitel 5 werden die zur Analyse und Auslegung weiterer Solarthermieanlagen in Neuerkerode verwendeten Kennzahlen nochmals zusammengefasst.

## 5 Variantenbetrachtung Wabehaus

Messtechnische Betrachtungen nach den Sanierungsmaßnahmen haben gezeigt, dass die Installation der thermischen Solaranlage eine unwirtschaftliche Entscheidung gewesen ist und keine Amortisation erzielt werden kann.

Auch der ökologische Vorteil durch Einsparung von Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen ist fragwürdig, da die aufwändige Anlagentechnik in der Heizzentrale zu sehr hohen Verlusten führt, die ca. das Doppelte der solaren Einspeisung ausmachen.

Ferner hat sich gezeigt, dass die Zirkulationsverluste für Trinkwarmwasser sehr hoch sind. Dies ist zunächst unabhängig von der thermischen Solaranlage, regt aber an, über Maßnahmen zu deren Reduzierung nachzudenken.

In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche alternativen Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Umweltschonung vorteilhafter gewesen wären. Dazu werden zwei Szenarien miteinander verglichen.

Szenario 1: Nahwärmeanschluss mit thermischer Solaranlage

Szenario 2: Photovoltaikanlage mit dezentraler Warmwasserbereitung durch elektrische Durchlaufwasserheizer

Die verwendeten Werte beziehen sich auf den Messzeitraum des Jahres 2012. Die Abbildungen und Tabellen in Kapitel 3.1 und folgende können aufgrund anderer Messzeiträume abweichen.

### 5.1.1 Überblick zur Investition der thermischen Solaranlage

Im Folgenden soll anhand eines äquivalenten Energiepreis der Solarthermie der wirtschaftliche Vor- bzw. Nachteil erklärt werden.

Die Investitionssumme wird über einen Zeitraum von 20 Jahren getilgt und zunächst mit einem Kalkulationszins von 6 %/a betrachtet. Daraus ergeben sich eine Annuität sowie Jahreskapitalkosten. Bezogen auf die jährlich eingespeiste Energiemenge lässt sich ein äquivalenter Energiepreis berechnen. Dieser entspricht hier den Kosten einer Kilowattstunde aus der Solaranlage.

$$k_{\text{äqu}} = \frac{K_{\text{Invest}} \cdot a}{\Delta Q_{\text{sol}}} = \frac{24.000 \text{ €} \cdot 0,08721/a}{8.300 \text{ kWh/a}} = 0,252 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Der äquivalente Energiepreis beträgt unter diesen Annahmen 0,246 €/kWh und liegt damit um den Faktor 3,7 höher als der Nahwärmepreis, der derzeit für das Wabehaus ab dem Hausanschluss abgerechnet wird.

Als Variante sollen die Randdaten der Berechnung verbessert werden: das Kapital steht zinslos zur Verfügung.

$$k_{\text{äqu}} = \frac{K_{\text{Invest}} \cdot a}{\Delta Q_{\text{sol}}} = \frac{24.000 \text{ €} \cdot 0,051/a}{8.300 \text{ kWh/a}} = 0,145 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Es ergibt sich immer noch ein Preis, der mehr als doppelt so hoch ist wie der derzeitige Nahwärmepreis. Innerhalb der Lebensdauer der Solaranlage ist selbst unter Berücksichtigung von Preissteigerungen für die Energie keine Wirtschaftlichkeit zu erwarten.

Dass die Solaranlage eine unwirtschaftliche Komponente ist, zeigt sich auch anhand der statischen Amortisationszeit.

$$n_{\text{stat}} = \frac{K_{\text{Invest}}}{\Delta Q \cdot k_{\text{NW}}} = \frac{24.000\text{€}}{8300\text{kWh/a} \cdot 0,068\text{€ / kWh}} = 43\text{a}$$

Die Amortisationszeit liegt mit 43 Jahren weit über der geplanten Nutzungsdauer von 20 Jahren. Aus diesen Gründen wäre die Nutzung eines hundertprozentigen Nahwärmeanteils mit Verzicht auf die Solaranlage die wirtschaftlichere Lösung gewesen.

### 5.1.2 Überblick zur Investition der PV-Anlage

Als weitere Möglichkeit zur Einsparung von Kosten bzw. Primärenergie soll die Nutzung einer Photovoltaikanlage in Verbindung mit einer dezentralen Warmwasserbereitung (Elektrodurchlaufwasserheizer) betrachtet werden.

Die PV-Anlage soll dabei möglichst die gesamte nach Süden ausgerichtete Dachfläche einnehmen. Der wirtschaftliche und ökologische Vorteil gegenüber der Nutzung von Nahwärme zur Warmwasserbereitung ergibt sich durch die Einsparung von Zirkulations- und Speicher-verlusten, die in der Anlage als sehr hoch anzusehen sind. Der annuitätische Gewinn durch die Maßnahme lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$G = E_{\text{TWV}} - K_{\alpha} - K_{\text{el}} + E_{\text{input}}$$

- $G$  : jährlicher Gewinn der Maßnahme, in €/a
- $E_{\text{TWV}}$  : jährlich vermeidbare Energiekosten zur Trinkwarmwasserbereitung, in €/a
- $K_{\alpha}$  : Jahreskapitalkosten der Investition, in €/a
- $K_{\text{el}}$  : jährliche Kosten elektrischer Energie, in €/a
- $E_{\text{input}}$  : Vergütung jährlich eingespeister elektrischer Energie, in €/a

Weil der Strompreis höher als die Vergütung von eingespeister elektrischer Energie liegt, soll ein möglichst hoher Teil des von der PV-Anlage erzeugten Stroms selbst genutzt werden. Dieser Anteil der Selbstnutzung wird im Folgenden mit dem Formelzeichen  $s$  abgekürzt.

$$Q_{\text{el}} + Q_{\text{Einsp.}} = Q_{\text{PV}}$$

$$Q_{\text{el}} = s \cdot Q_{\text{PV}}$$

Damit ergibt sich der jährliche Gewinn wie folgt.

$$G = Q_{\text{TWV}} \cdot p_{\text{FW}} \cdot m_{\text{e}} - K_{\text{I}} \cdot \alpha - (Q_{\text{TWV,N}} - s \cdot Q_{\text{PV}}) \cdot p_{\text{el}} \cdot m_{\text{e}} + (1 - s) \cdot Q_{\text{PV}} \cdot p_{\text{input}} \cdot m_{\text{e}}$$

- $Q_{\text{TWV}}$  : Jährliche Energiemenge zur Warmwasserbereitung, in kWh/a
- $p_{\text{FW}}$  : Nahwärmepreis am Hausanschluss, in €/kWh
- $m_{\text{e}}$  : Mittelwert der Verteuerung der Energie
- $K_{\text{I}}$  : Investitionssumme, in €
- $\alpha$  : Annuitätsfaktor, in 1/a
- $Q_{\text{TWV,N}}$  : Jährlicher Nutzen Trinkwarmwasser, in kWh/a
- $Q_{\text{PV}}$  : Jährliche Energiemenge aus Photovoltaik, in kWh/a
- $p_{\text{el}}$  : heutiger Strompreis, in €/kWh
- $p_{\text{input}}$  : Vergütung, in €/kWh

Da sowohl beim Nahwärme- als auch beim Strompreis mit Preissteigerungen zu rechnen ist, soll mit den Mittelwerten der Energiepreisverteuerung von  $m_p = 1,74$  (Kapitalzins 6%, Energiepreissteigerung 6%, Betrachtungszeitraum 20 Jahre) gearbeitet werden. Die effektive Preissteigerung beträgt dann 2,8 %/a.

Anhand der Zahlen des Energieflussbildes für das Wabehaus aus Abbildung 16 (S. 19) sollen die vermeidbaren Energiekosten zur Trinkwarmwasserbereitung veranschaulicht werden.

Dem Gebäude Wabehaus wurden im Auswertzeitraum am Hausanschluss 113,4 MWh/a Nahwärme und 8,3 MWh/a Solarthermie zugeführt, von denen 61,2 MWh/a für die Raumheizung benötigt werden und 22,4 MWh/a als Warmwassernutzen.

Die Differenz 38,1 MWh/a wird aufgewendet, um Zirkulation und Speicher-, Zentralen- und Verteilverluste zu decken. Diese Energiemenge kann eingespart werden, wenn der Nutzen dezentral durch eine elektrische Warmwasserbereitung bereitgestellt wird.

Die Photovoltaikanlage wird nach der maximalen südlich ausgerichteten Dachfläche ausgelegt. Diese beträgt ca. 100 m<sup>2</sup>. Eine derartige Anlage hat mit einem spezifischen Leistungsmaximum von 0,1 kWp/m<sup>2</sup> eine maximale Leistung von 10 kWp. Die Energieausbeute betrug 2011 laut Solarenergie-Förderverein Deutschland e.V. in Braunschweig annähernd 1.000 kWh/m<sup>2</sup> [9]. Letztendlich ließen sich also 10.000 kWh elektrischer Energie mit einer solchen Anlage erzeugen.

Die spezifischen Kosten für das System betragen nach einer Onlinebefragung des Panels Photovoltaikumfrage 1.760 €/kWp [10]. Die Gesamtkosten der Anlage belaufen sich damit auf 29.600€ incl. zusätzliche Kosten der elektrischen Durchlaufwasserheizer, die für 12 Zapfstellen mit je 1.000 € angesetzt werden.

Darüber hinaus werden die Energiepreise des Jahres 2012 [16] zugrunde gelegt und eine Einspeisevergütung von derzeit 0,12 €/a angenommen.

Damit ergibt sich der annuitätische Gewinn der Investition zu folgender Summe.

$$\begin{aligned}
 G &= 38.100 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,068 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 1,74 \\
 &\quad - 29.600\text{€} \cdot 0,0872 \frac{1}{\text{a}} \\
 &\quad - (22.400 - 0,5 \cdot 10.000) \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,167 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 1,74 \\
 &\quad + (1 - 0,5) \cdot 10.000 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,12 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 1,74 \\
 &= -2085\text{€} / \text{a}
 \end{aligned}$$

Gegenüber der Variante mit zentraler Warmwasserbereitung verliert man bei der dezentralen Warmwasserbereitung jährlich ca. 2000 €. Dies liegt zum einen an den hohen Stromkosten und zum anderen an dem vergleichsweise niedrigen Nahwärmepreis.

## Sensitivitätsanalyse des annuitätischen Gewinns

Da viele Variablen zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit Unsicherheiten verbunden sind, sollen unterschiedliche Randbedingungen auf ihre Auswirkung auf den jährlichen Gewinn untersucht werden.

	Variante 0	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Kapitalzins, in 1/a	0,06	0,06	0,06	0,02	0,02
Energiepreissteigerung, in 1/a	0,06	0,06	0,02	0,02	0,02
Selbstnutzungsanteil PV	50 %	10 %	50 %	50 %	100 %
annuitätischer Gewinn, in €/a	-2085	-2040	-2242	-1458	-1171

**Tabelle 4: Tabelle der Sensitivitätsanalyse**

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der annuitätische Gewinn in hohem Maße von der Energiepreisentwicklung und dem Anteil der Selbstnutzung abhängig ist.

Die Wirtschaftlichkeit der Investition wird besser, wenn Energiepreissteigerung und Kapitalzins auf einem niedrigen Niveau liegen und ein hoher Selbstnutzungsanteil erreicht werden kann. Jedoch wird auch im besten Fall ein Verlust berechnet.

## Betrachtungen hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Emissionen

Ein weiteres Entscheidungskriterium für ein Versorgungssystem sind dessen jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionen. Im Rahmen des DBU-Projektes "Neuerkerode 2015" spielt neben der energetischen Optimierung auch die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen eine wichtige Rolle. Daher werden in folgendem Absatz die CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Varianten ausgerechnet.

	Nahwärme	Photovoltaik + DWH
Nahwärmeaufwand in kWh/a	113.400	61.194
CO <sub>2</sub> -Äquivalent in g/kWh	210	210
Stromaufwand		12.426
CO <sub>2</sub> -Äquivalent in g/kWh		640
CO <sub>2</sub> -Emissionen in t/a	23,8	20,8

**Tabelle 5: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Unter der Annahme, dass 10.000 kWh/a Strom erzeugt werden, ergibt sich eine geringere CO<sub>2</sub>-Menge der Variante mit PV-Anlage.

## 6 Analyse der gesamten Liegenschaft

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit der Analyse und Anlagenauslegung weiterer Solarthermieanlagen. Zudem werden ökologische und ökonomische Gesichtspunkte beleuchtet. Die Wirtschaftlichkeit wird anhand des LEG-Verfahren berechnet. Zusätzlich werden weitere Varianten für das Wabehaus überprüft.

### 6.1 Solarthermienutzung in Neuerkerode

In Kapitel 6.1 werden auf Basis der Kennzahlen aus Kapitel 4 und des BMU-Solarprojekts weitere Solaranlagen ausgelegt. Unter folgenden Annahmen:

- spez. Wärmebedarf TWW: 1000 kWh/(Pa)
- spez. Kollektorkreisertrag: 360 kWh/(m<sup>2</sup>a)
- spez. Kollektorfläche: 1,5 m<sup>2</sup>/P
- spez. Speichervolumen: 70 l/m<sup>2</sup>
- spez. Zirkulationsverluste: 19,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)
- spez. Verluste der Zentrale: 4 kWh/(m<sup>2</sup>a)

Aufgrund der zu geringen Erträge der Solaranlage im Wabehaus, wurden die Auslegungskennwerte für den Wärmebedarf TWW pro Person sowie die Kollektorfläche pro Person erhöht. Diese Auslegung wird gewählt, um eine sommerliche Netztrennung zu erreichen. Ob tatsächlich in jedem Gebäude die genannten Kennwerte zutreffen sind, wäre individuell zu messen bzw. planen. Die Werte dienen hier der konzeptionellen Einschätzung des Systems "Solarthermie".

Des Weiteren wird aufgrund der Erkenntnisse des BMU-Solarprojekts von heizungsunterstützenden Anlagen abgesehen.

Grundlage der weiteren Betrachtung ist die Ausarbeitung "Voranalyse Solarthermie und Photovoltaik" [1]. Die weitere Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben:

- Geeignete Dächer für Solarenergienutzung lokalisieren, nicht geeignete Gebäude aussortieren; Gründe:
  - Dachfläche nicht geeignet (Orientierung/Ausrichtung, Größe, Verschattung, PV-Anlage/Solarthermieanlage vorhanden)
  - kein/zu geringer TWW-Bedarf
  - Betriebsunterbrechungen der Nutzung im Sommer (Ferien etc.)
  - Dachfläche wurde in den letzten 5-10 Jahren umfangreich saniert
  - Umnutzung/Abriss geplant
- Einteilung der verbliebenen Gebäude in "Pflegegebäude" und "allgemeine Einrichtungen" (Küche und Werkstätten usw.),
- Bestimmung des Energiebedarfs für TWW anhand Personenzahl (Pflegeeinrichtungen) und beheizten Fläche (allg. Einrichtungen) sowie der Wärmeverluste für Zirkulation und Zentrale anhand früherer Berichte und Messwerte [15] [16] [17],
- Aufteilung in zwei Varianten der Auslegung der Kollektorfläche:
  - 1. Variante: nach TWW-Bedarf
  - 2. Variante: nach TWW-Bedarf und Verlusten durch Zirkulation und Zentrale
- überschlägige Bemessung des Speichervolumen anhand berechneter Kollektorfläche
- Abschätzung der solar erzeugten Energie, der Investitionskosten und der eingesparte CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Überprüfung ob vorhandene Dachfläche ausreichend ist.

Von dieser Vorgehensweise wird beim Wirtschaftshof abgewichen. Dieser wird als Gesamtkomplex betrachtet und mit einer zentralen Solaranlage auf dem Dach der Küche ausgelegt. Die Zirkulationsverluste werden äquivalent zu den anderen Gebäuden nach der Ausdehnung des Gebäudes (Fläche) ausgelegt.

Die Verluste der Zentrale werden mittels Interpolation aus dem Verhältnis zwischen Kollektorfläche zu Speichervolumen aus den vorherigen Gebäuden berechnet, da diese Verluste maßgeblich durch die Speichergröße und nicht durch die Ausdehnung des Gebäudes beeinflusst werden. Im Vergleich zu den anderen Solaranlagen hat der Wirtschaftshof, auf die Kollektorfläche bezogen sehr hohe Zirkulationsverluste.

Die komplette Deckung des TWW-Bedarfs führt zu sehr großen Kollektorflächen. Zu berücksichtigen ist daher, dass eine Volldeckung des TWW-Bedarfs nicht gewünscht ist. Lediglich in den Sommermonaten soll die Solaranlage in der Lage sein den Bedarf zu decken. Circa zwei Drittel der erzeugten Energie werden in den sechs Sommermonaten erzeugt, das restliche Drittel in den sechs Wintermonaten.

Die Investitionskosten ergeben sich nach folgender Formel, die in Abschnitt 4.1 erläutert wurde:

- Kosten in €/m<sup>2</sup>:  $k = -206 \text{ €/m}^2 \cdot \ln(A_C/\text{m}^2) + 1455,7 \text{ €/m}^2$

Zur Bestimmung der eingesparten Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen werden anhand der Mediengrunddaten 2011 [15] und der EnEV nachfolgende Faktoren gebildet:

	Energieinput in MWh/a	Primärenergiefaktoren EnEV	CO <sub>2</sub> -Äquivalent in g/kWh
Endenergie Gebäude	8.642	0,961	222
Biowärme	3.537	0,000	0
Erdgaseinsatz Kesselhaus	7.553	1,100	254

**Tabelle 6: Primärenergiefaktoren und CO<sub>2</sub>-Äquivalente**

Durch den Einsatz von Biowärme werden der Primärenergiefaktor und das CO<sub>2</sub>-Äquivalent der Nahwärme auf 0,961 bzw. 222 g/kWh gesenkt. Dieser Wert gilt für die an der Gebäudegrenze übergebene Endenergie.

## Ergebnisse der Auslegung

Die Ergebnisse der Auslegung sind in folgender Tabelle 7 zusammengefasst:

	analysierte Gebäude (ohne Wirtschaftshof)	Wirt- schaftshof	Gesamt	Einheit
<b>1. Variante</b>				
Kollektorfläche	879	105	<b>984</b>	m <sup>2</sup>
Speichervolumen	61.536	7.374	<b>68.910</b>	l
Erzeugte Energiemenge	316.471	37.926	<b>354.396</b>	kWh/a
Investitionskosten	512.593	52.285	<b>564.878</b>	€
CO <sub>2</sub> -Emissionen (eingespart)	70,3	8,4	<b>78,7</b>	t
Primärenergie (eingespart)	304.251	36.461	<b>340.712</b>	kWh/a
<b>2. Variante</b>				
Kollektorfläche	1.809	288	<b>2.098</b>	m <sup>2</sup>
Speichervolumen	126.652	20.174	<b>146.826</b>	l
Erzeugte Energiemenge	651.355	103.751	<b>755.107</b>	kWh/a
Investitionskosten	792.614	83.286	<b>875.900</b>	€
CO <sub>2</sub> -Emissionen (eingespart)	144,6	23,0	<b>167,6</b>	t
Primärenergie (eingespart)	626.204	99.745	<b>725.949</b>	kWh/a

**Tabelle 7: Ergebnisse Solarthermieauslegung NE**

Die vollständige Tabelle, mit den Berechnungen zu den einzelnen Gebäuden kann in Anhang 8.2 eingesehen werden.

Anmerkung: In zwei Fällen reicht die vorhandene Dachfläche nicht aus, um die geplante Solaranlage zu installieren. Bei beiden Gebäuden sind Dachflächen mit guter Orientierung vorhanden, aber durch Bewuchs verschattet. Bei Realisierung von Anlagen auf dem Krankenhaus und Okalhaus wäre dieser Umstand zu beachten und zu überprüfen, ob der Bewuchs entfernt werden kann.

Durch Investitionen von insgesamt ca. 565.000 € können rund 78,7 t/a CO<sub>2</sub> und 340.000 kWh/a Primärenergie eingespart werden. Für die Auslegung der 2. Variante sind die Werte etwas mehr als doppelt so hoch.

$$k_{\text{äqu}} = \frac{K_{\text{Invest}} * a}{Q_{\text{a}}} = \frac{564.878 \text{ €} * 0,0872 \text{ a}}{a 354.396 \text{ kWh}} = 0,139 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Der äquivalente Energiepreis der Gesamtinvestition ist mit 0,139 €/kWh aber höher als der prognostizierte Durchschnittspreis der Nahwärme der nächsten 20 Jahre (ca. 11 ... 13 €/kWh). Demnach ist die Investition in thermische Solaranlagen nur ökologisch sinnvoll.

## 6.2 Photovoltaik zur Warmwasserbereitung

Abbildung 21 zeigt die Entwicklung der Photovoltaikanlagenpreise je kWp und die Einspeisevergütung von 2006 bis 2012. Der deutliche Korrelation der beiden Werte erscheint logisch: Je günstiger die Solaranlage, desto niedriger darf die Einspeisevergütung bei gleichem Ertrag liegen, um eine Amortisation zu erreichen.

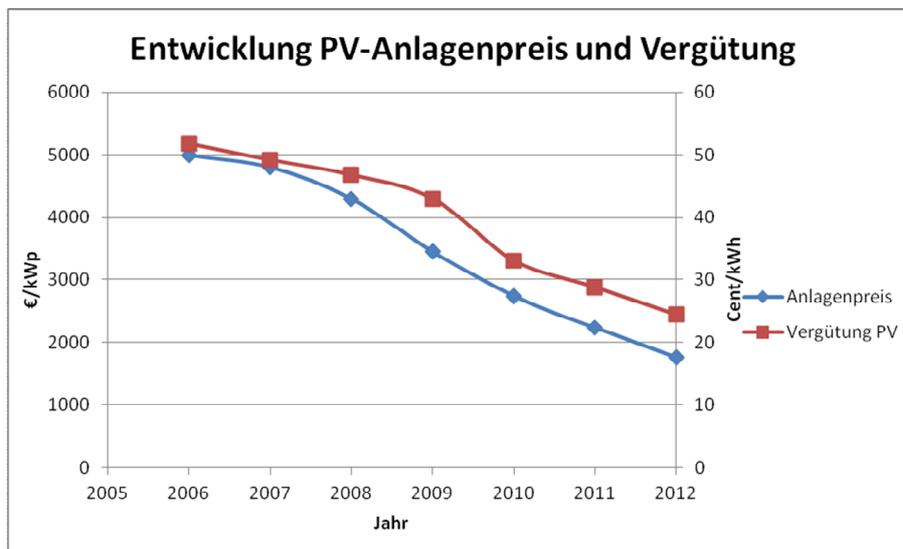


Abbildung 21: Preisentwicklung Photovoltaik

Durch die seit 2006 um 65 % gesunkenen Anlagenpreise ist die Verwendung des PV-Stroms zur Trinkwassererwärmung zu einer Alternative erwachsen, mit der sich die Fachwelt zunehmend auseinandersetzt. In diesem Abschnitt sollen grundsätzliche Betrachtungen hinsichtlich zweier Systeme zur Nutzung der Photovoltaik zur Warmwasserbereitung angestellt werden.

### 6.2.1 Zentrale Lösungen

Es ist davon auszugehen, dass der Strommarkt zukünftig noch stärker von regenerativen Quellen geprägt sein wird. Dies stellt die Netzbetreiber wegen des fluktuierenden Angebots der PV-Leistung im Netz vor große Herausforderungen. Zur Netzentlastung sind in der Vergangenheit seitens der Politik finanzielle Anreize geschaffen worden, um dafür zu sorgen, dass Strom dort verbraucht wird, wo er erzeugt wird.

Zwischen 2009 und April 2012 war es durch die Eigenverbrauchsvergütung immer wirtschaftlicher den erzeugten Strom selbst zu verbrauchen, statt ihn einzuspeisen und später wieder vom Energieversorger zu beziehen.

Heute liegt der Neuanlagenpreis pro kWp so niedrig, dass der äquivalente Energiepreis des PV-Stroms unter dem des Netzbezugsstroms liegt. Da somit die Netzparität erreicht ist, ist eine zusätzliche Förderung des selbstgenutzten PV-Stroms nicht mehr notwendig, weshalb die Selbstnutzungsförderung rückwirkend ab April 2012 aufgehoben wurde.

Sinken die PV-Anlagenpreise in Zukunft weiter, wird ab einem bestimmten Punkt die so genannte Ölparität unterschritten, bei der der Preis einer Kilowattstunde PV-Strom unter dem des Ölpreises liegt.

Wenn dann gleichzeitig in einem Stromnetz mit hohem regenerativen Anteil der Strompreis durch tageszeitabhängige Angebotsschwankungen unter dem Ölpreis liegt, ist bei gleichen Anlagenverlusten die Verwendung des PV-Stroms zum Betrieb eines Heizstabes wirtschaftlich. Besonders wenn z.B. zur Mittagszeit ein Überangebot an PV-Strom vorhanden ist und er quasi kostenlos zur Verfügung steht, kann das Laden eines Warmwasserspeichers sinnvoll sein. Abbildung 22 veranschaulicht ein solches System [11].

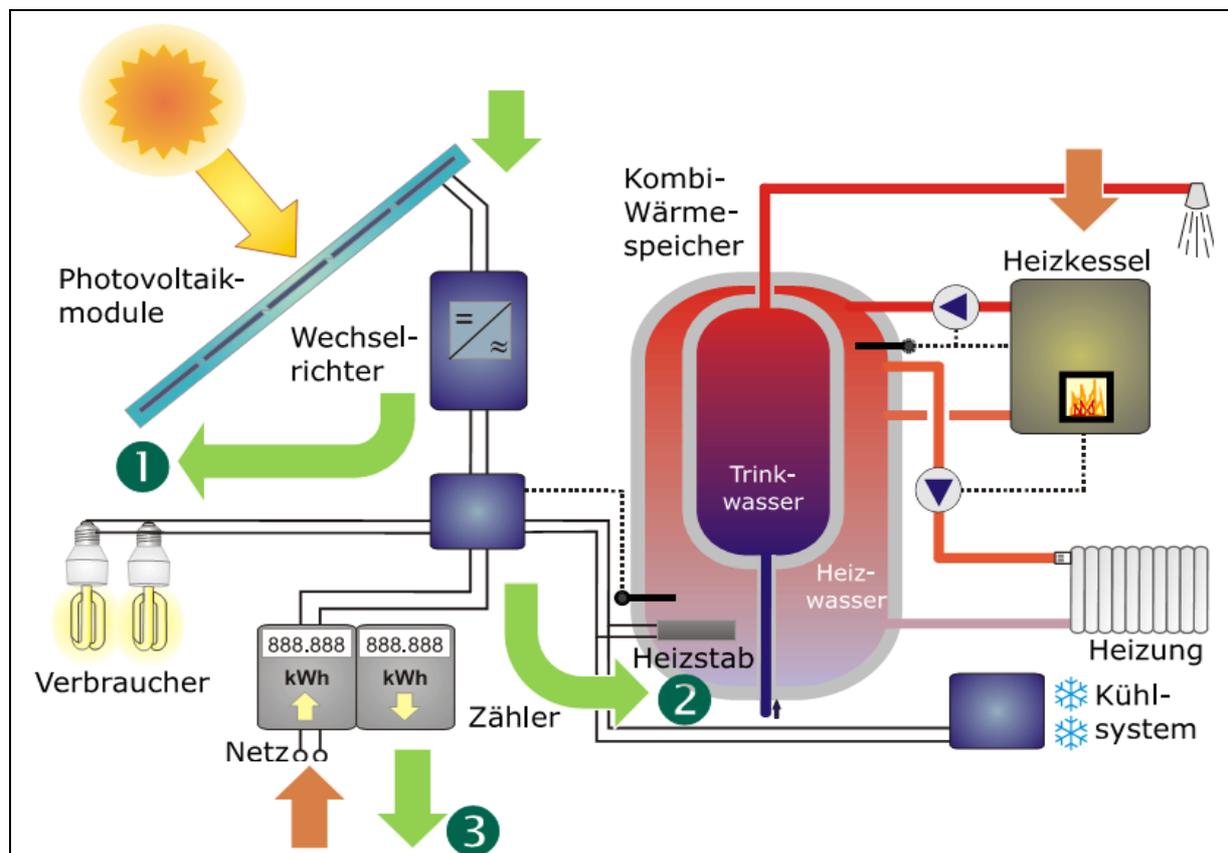


Abbildung 22: System zur elektrischen Warmwasserbereitung mit PV [11]

Liefert die PV-Anlage Leistung zu einem Zeitpunkt, an dem kein Warmwasserbedarf vorliegt, kann in das Netz eingespeist werden. Bei einer thermischen Solaranlage ist dies nicht möglich.

Betrachtet man die äquivalenten Energiepreise von PV und Solarthermie, so wird deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit der beiden Systeme bereits heute vergleichbar ist, würden sie ausschließlich zur Warmwasserbereitung verwendet.

$$k_{\text{eq. PV}} = \frac{1.760\text{€} * 0,087 \text{ kWh} * kWp * a}{kWp * a * 1.000 \text{ kWh}} = 0,15 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

$$k_{\text{eq. ST}} = 0,10 \dots 0,30 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Um die Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs mit PV zu realisieren, ist zu beachten, dass gegenüber einem thermischen Kollektor eine wesentlich größere Anlagen- und somit auch Dachfläche zur Verfügung stehen muss. Die nutzbare Energiemenge in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung lässt sich wie folgt ausdrücken.

$$Q_{ST} = q * A_{ST} * \eta_{ST} * \tau$$

$$Q_{PV} = q * A_{PV} * \eta_{PV} * \tau$$

Soll von beiden Systemen die gleiche Energiemenge zur Verfügung gestellt werden, so ergibt sich das Flächenverhältnis, das dem Verhältnis der Wirkungsgrade entspricht.

$$\frac{A_{PV}}{A_{ST}} = \frac{\eta_{ST}}{\eta_{PV}} = \frac{0,75}{0,09} = 8,3$$

Für Solarthermie wird mit einem überschlägigen Wert von 1 m<sup>2</sup>/P für die personenbezogene Kollektorfläche gerechnet [13]. Die äquivalente Fläche für Photovoltaik wäre demnach 8,3 m<sup>2</sup>/P. Während dieser Wert für Einfamilienhäuser unproblematisch erscheint, besteht bei mehrgeschossigen Gebäuden die Gefahr, dass die Dachfläche zur Deckung des TWW-Bedarfs nicht ausreicht.

## 6.2.2 Elektrische Warmwasserbereitung als Energieeinsparmaßnahme

Monitoring-Projekte haben jüngst ergeben, dass thermische Solaranlagen hohe Verluste während der Speicherung, Verteilung und Zirkulation aufweisen. Häufig können diese Verluste von den solarthermischen Gewinnen nicht gedeckt werden. Daher drängt sich die Frage nach alternativen Möglichkeiten zur regenerativen Trinkwarmwasserbereitung auf, die weniger verlustbehaftet sind [13].

Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieser Verluste ist eine dezentrale Warmwasserbereitung in elektrischen Durchlaufwasserheizern, die in folgender Betrachtung von einer PV-Anlage betrieben werden soll.

Der Vorteil eines solchen Systems ist gleichzeitig sein Nachteil, da weder der PV-Strom noch Warmwasser gespeichert werden kann. Daher kann die Optimierung des Eigenverbrauchsanteils nur durch das Verhalten des Nutzers beeinflusst werden, der genau dann Trinkwarmwasser zapfen sollte, wenn das PV-Modul beschienen wird. Alternativ wird eine elektrische Batterie benötigt.

Für den extremen Fall, dass keine Selbstnutzung erreicht werden kann, lässt sich ein Trinkwasserwirkungsgrad bestimmen, unter dem die Nutzung einer elektrischen, dezentralen Warmwasserbereitung wirtschaftlicher sein kann als eine zentrale Warmwasserbereitung mit z.B. Nahwärme als Endenergie. Bei dieser Rechnung werden nur die heutigen Energiepreise verglichen.

$$K_{\text{Strom}} = K_{\text{Zentral}}$$

$$p_{\text{el}} \cdot Q_{\text{TWW,Nutz}} = p_{\text{Zentral}} \cdot \frac{Q_{\text{TWW,Nutz}}}{\eta_{\text{TWW}}}$$

$$\eta_{\text{TWW}} = \frac{p_{\text{Zentral}}}{p_{\text{el}}} = \frac{0,068\text{€ / kWh}}{0,167\text{€ / kWh}} = 0,41$$

Je höher die Verteil- Zirkulations- und Speicherverluste, desto eher lohnt es sich über eine dezentrale Warmwasserbereitung nachzudenken. Als groben Anhaltswert für einen wirtschaftlichen Betrieb kann der Trinkwarmwasserwirkungsgrad von 41 % in Neuerkerode verwendet werden.

## 7 Fazit

Die Erkenntnisse dieses Projektes werden im letzten Abschnitt zusammenfassend dargestellt und eine Handlungsempfehlung für die weitere Vorgehensweise in der ESN gegeben.

Die Messergebnisse und Auswertungen haben gezeigt, dass die Solaranlagen in Neuerkerode noch nicht optimal betrieben werden können. Bereits bei der Auslegung der Solaranlage wurden entscheidende Fehler begangen, die dazu führen, dass eine Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs im Sommer nicht möglich ist. Zudem führen regelungstechnische und hydraulische Probleme zur Verringerung der Erträge der Solaranlage und zur Erhöhung der Verluste der Zentrale. Das hat wiederum Auswirkungen auf die Amortisationszeit der Anlagen. Auch nach der Behebung dieser Fehler ist ein wirtschaftlicher Betrieb der beiden Anlagen, aufgrund der hohen Kosten, nicht zu erwarten.

Unabhängig von diesem Umstand sind die Werte der Wärmemengenzähler korrekt. Die Messungen bezüglich des Wärmebedarfs für Trinkwarmwasser erscheinen schlüssig. So ist lediglich die Verteilung der Verluste auf die Bereiche Zirkulation, Verteilung und Speicherung nicht klar. Je geringer die Verluste in diesen Bereichen, desto kleiner kann die Auslegung einer thermischen Solaranlage ausfallen.

Es hat sich gezeigt, dass weder thermische Solaranlagen noch Photovoltaikanlagen zur Trinkwarmwasserbereitung mit heutigen Investitions- und Energiepreisen wirtschaftlich betrieben werden können. Da Energiepreissteigerungen in den nächsten Jahren unausweichlich scheinen, kann eine derartige Investition als Versicherung gegen höhere Kosten betrachtet werden. Anhand der äquivalenten Energiepreise von PV und Solarthermie konnte abgeschätzt werden, dass sich die beiden Systeme hinsichtlich ihrer Kosten auf ähnlichem Niveau bewegen. Primärenergetisch hat eine PV-gespeiste, dezentrale Warmwasserbereitung einen Vorteil gegenüber einem System mit Nahwärme. Letztendlich entscheidet die Entwicklung der PV-Anlagenkosten und die Energiepreissteigerung darüber, ob die PV Einzug in den Wärmemarkt halten wird.

Solarthermie und Photovoltaikanlagen können, unter vertretbaren Mehrkosten, einen Beitrag zur Reduzierung der Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Bevor diese Maßnahmen in Betracht gezogen werden, sollten bestehende Anlagenkomponenten überprüft und gegebenenfalls optimiert werden. Beispielhaft seien hier Netzoptimierung, Reduzierung der Verluste bei der Trinkwarmwasserbereitung und Optimierung/Erhöhung des Biowärmeanteils genannt.

Rückblickend sind die Investitionen in Solarthermieanlagen in Neuerkerode aus wirtschaftlicher Sicht nicht nachzuvollziehen. Zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs und des CO<sub>2</sub>-Austoßes sollte in eine Photovoltaikanlage mit elektrischen Heizstab und 100%-iger Selbstnutzung investiert werden, wenn der äquivalente Energiepreis der Photovoltaikinvestition niedriger liegt als der der thermischen Solaranlage.

## 8 Anhang

### 8.1 Quellen

- [1] Li, X. / Wolff, D. / Jagnow K.; "Voranalyse Solarthermie und Photovoltaik" Bericht im Rahmen des DBU-Projekts Neuerkerode 2015; Okt. 2009; unveröffentlicht
- [2] Recknagel, H. / Sprenger, E.; "Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik" Oldenburg Industrieverlag; 73. Auflage
- [3] Heizungsfinder; Internetseite: <http://cdn.heizungsfinder.de/images/solarthermie/flachkollektor-2.jpg>; Stand: 27.05.2013
- [4] Solvis; "Messen nicht Mutmaßen"; Stand: 23.01.2013; unveröffentlicht
- [5] ASUE; "Erdgas und Solar- umweltschonende Wärmeversorgung" Vortrag; Internetseite: [http://asue.de/themen/umwelt-klimaschutz/vortraege/erdgas\\_und\\_solar.html](http://asue.de/themen/umwelt-klimaschutz/vortraege/erdgas_und_solar.html); Stand 27.05.2013
- [6] TGA Fachplaner; Internetseite: [http://www.tga-fachplaner.de/Cache/GENTNER/TGA-0551-007\\_MjQ0NDI5XzI0NDQyOVo.JPG](http://www.tga-fachplaner.de/Cache/GENTNER/TGA-0551-007_MjQ0NDI5XzI0NDQyOVo.JPG); Stand: 27.05.2013
- [7] Solarthermie 2000 Studie; Grafik der Internetseite: [www.solarwaerme-info.de/rundums-geld/kosten/](http://www.solarwaerme-info.de/rundums-geld/kosten/); Stand: 08.01.2013
- [8] Hobom, J. / Mellahn, S.; "Investitionen durch den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland" Studie der Prognos AG im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie e.V.; Mai 2010
- [9] Solarenergie-Förderverein Deutschland e. V.; Internetseite: [www.pv-ertraege.de/pvdaten/](http://www.pv-ertraege.de/pvdaten/); Stand: 13.01.2013
- [10] Photovoltaikzentrum Michael Ziegler; Onlinebefragung des Panels Photovoltaikumfrage; Internetseite: [www.photovoltaikumfrage.de](http://www.photovoltaikumfrage.de); Stand: 13.01.2013
- [11] Quaschnig, V.; "Photovoltaik: Die neue Solarthermie?" Vortrag zum 13. Forum Solarpraxis; Internetseite: [www.volker-quaschnig.de/publis/vortraege/](http://www.volker-quaschnig.de/publis/vortraege/); Stand: 14.01.2013
- [12] Wolff, D.; "Masterstudiengang EST: Integrierte Gebäudetechnik WS 2012/13" Seite 45; unveröffentlicht
- [13] Wolff, D. / Jagnow K. / Deidert, J.; "Integration von Heizkesseln in Wärmeverbundsysteme mit großen Solaranlagen- Teil 1: Auswertung von Feldanlagen"; Abschlussbericht BMU-Forschungsprojekt; November 2012
- [14] Wolff, D. / Jagnow K. / Miehe M.; "PV-Anlage Neuerkerode Elm und Scheune" im Rahmen des DBU-Projekts Neuerkerode 2015; November 2011; unveröffentlicht
- [15] Wolff, D. / Jagnow K. / Miehe M.; "Mediengrunddaten 2011" im Rahmen des DBU-Projekts Neuerkerode 2015; Mai 2012; unveröffentlicht
- [16] Wolff, D. / Jagnow K. / Miehe M.; "Mediengrunddaten 2012" im Rahmen des DBU-Projekts Neuerkerode 2015; April 2013; unveröffentlicht
- [17] Wolff, D. / Jagnow, K. / Hübener, A. / Jüttner; Grundlagenprojekt im Rahmen der energetischen und ökologischen Modernisierung der Evangelischen Stiftung Neuerkerode: Bestandsaufnahme des Gebäude- und Anlagenbestandes; Wolfenbüttel; 2008
- [18] Allmess; Unterlagen für Wärmemengenzähler CFE Echo 2; 2012.
- [19] Internetquelle: [www.wikipedia.de](http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle) ; Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle>; Datum: 20.05.2011; Uhrzeit:17:10 Uhr

### 8.2 Tabelle Solarthermienutzung Neuerkerode



Hausname	Schwimmbad/									
	Okalhaus	Sarana	Schule	Turnhalle	Sommerschein	Wabeweg 3/3a	Weidenweg	Zoar		
beheizte Fläche	1665	124	2820	2703,6	528,6	2279,8	488	2460,6	2789	
Nutzer 1	45	7	63	20	8	59	17	66	68	
TWW-Bedarf	45.000	7.000	63.000	20.000	8.000	59.000	17.000	66.000	68.000	
TWW-Bedarf	23.976	1.786	40.608	38.932	7.612	32.829	7.027	35.433	40.162	
TWW-Bedarf	51.883	966	88.848	34.126	22.109	79.947	23.062	115.733	89.992	
1	1		1	1		1	1	1	1	
2										
3		1				1				
1. Variante										analysierte Gebäude (ohne Wirtschaftshof)
Kollektorfläche	67,8	1,5	95,0	30,2	33,3	89,0	25,6	99,5	102,5	879
ausreichende Dachfläche 1=ja; 0=nein	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Speichervolumen	4.749	102	6.649	2.111	2.333	6.227	1.794	6.966	7.177	61.536
Erzeugte Energiemenge	24.425	524	34.194	10.655	12.000	32.023	9.227	35.823	36.908	316.471
Investitionskosten	39.822	2.008	49.167	22.736	24.445	47.248	20.184	50.555	51.457	512.593
CO <sub>2</sub> -Emissionen (eingespart)	5,4	0,1	7,6	2,4	2,7	7,1	2,0	8,0	8,2	70,3
äquiv. TWW-Bedarf	45.000,0	966,2	63.000,0	20.000,0	22.108,8	59.000,0	17.000,0	66.000,0	68.000,0	
Zirkul. Verl.	33.133,5	2.467,6	56.118,0	53.801,6	10.519,1	45.368,0	9.711,2	48.965,9	55.501,1	
Zentr. Verl.	6.660,0	496,0	11.280,0	10.814,4	2.114,4	9.119,2	1.952,0	9.842,4	11.156,0	103.262,4
TWW+Zirkul.Zentr.	84.793,5	3.929,8	130.398,0	84.616,0	34.742,4	113.487,2	28.663,2	124.808,3	134.657,1	
Primärenergie (eingespart)										304.251
2. Variante										
Kollektorfläche	127,8	5,9	196,6	127,6	52,4	171,1	49,2	188,2	203,0	1.809
Speichervolumen	8.949	415	13.762	8.930	3.667	11.977	3.025	13.172	14.212	126.652
Erzeugte Energiemenge	46.023	2.133	70.776	45.927	18.857	61.597	15.558	67.742	73.088	651.355
Investitionskosten	58.352	6.453	72.305	58.285	33.536	67.824	29.381	70.904	73.323	792.614
CO <sub>2</sub> -Emissionen	10,2	0,5	15,7	10,2	4,2	13,7	3,5	15,0	16,2	144,6
Primärenergie (eingespart)										626.204

