Projektbericht

Bachelor Maschinenbau

Markus Dörfler

Energieversorgung der Stadt Roth
Schwerpunkt Wärmeversorgung
mit Speicherauslegung und Bewirtschaftung

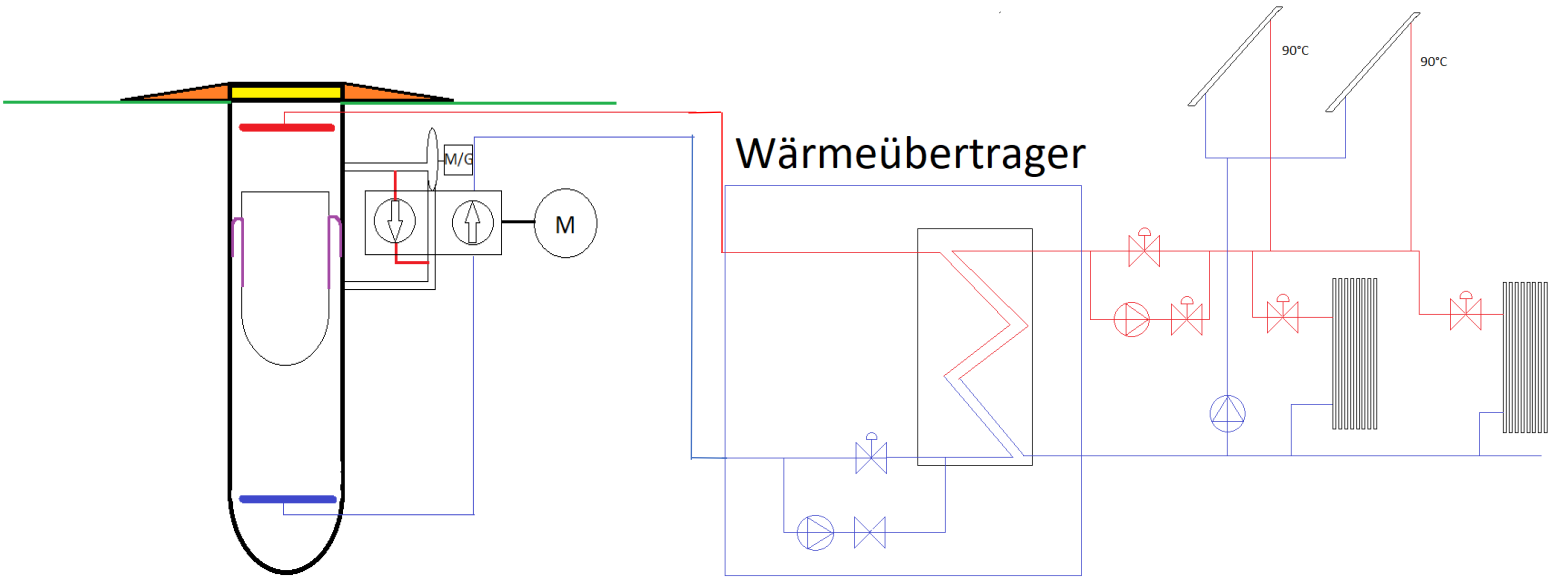


Abbildung 1: Aufbau Stülpmembranspeicher

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Stand: 22.09.2022

Inhalt

Abbildungsverzeichnis II
Formelverzeichnis III
1. Einführung ..... - 1 -
1.1 Ziel des Projekts ..... - 1 -
1.2 Forschungsfragen ..... - 1 -
2. Verbrauchsdatenanalyse ..... - 2 -
3. Bestimmung der Wärmeverluste im Wärmenetz ..... - 3 -
4. Speichergrößenauslegung und Verlustrechnung ..... - 3 -
5. Auswahl des Kollektortyps ..... - 8 -
5.1 Aufbau Vakuumröhrenkollektor ..... - 8 -
5.2 Aufbau Flachkollektor ..... - 11 -
6. Auswertung der Globalstrahlungsdaten ..... - 13 -
7. Berechnung der Strahlungsleistung ..... - 14 -
8. Bestimmung des Umwandlungsvermögens und Speicherbewirtschaftung ..... - 17 -
9. Berechnung der benötigten Kollektoranzahl ..... - 20 -
10. Kostenabschätzung ..... - 21 -
10.1 Kostenbetrachtung Solarkollektoren ..... - 21 -
10.2 Kostenbetrachtung Wärmenetz ..... - 22 -
10.3 Kostenbetrachtung Speicher ..... - 23 -
10.4 Wärmegestehungskosten ..... - 23 -
11. Fazit ..... - 24 -
12. Literaturverzeichnis ..... - 25 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau Stülpmembranspeicher II
Abbildung 2: Wärmemengenverbrauch im Jahr 2021 ..... - 2 -
Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Stülpmembranspeichers ..... - 3 -
Abbildung 4:Aufbau und Funktionsprinzip des Vakuumröhrenkollektors ..... - 8 -
Abbildung 5: Technisches Datenblatt Vakuumröhrenkollektor ..... - 9 -
Abbildung 6: Prüfbericht Röhrenkollektor ..... - 10 -
Abbildung 7: Vorgänge in einem Flachkollektor ..... - 11 -
Abbildung 8: Datenblatt Flachkollektor ..... - 12 -
Abbildung 9:Grobabschätzung Häuseranteile ..... - 13 -
Abbildung 10:Gegenüberstellung Flachkollektor und Vakuumröhrenkollektor ..... - 16 -
Abbildung 11: Bestimmung des Umwandlungsvermögens ..... - 17 -
Abbildung 12: mittlerer Jahresverbrauch ..... - 18 -
Abbildung 13:Speicherbewirtschaftung ..... - 19 -
Abbildung 14: Stadtfläche von Roth ..... - 20 -

Formelverzeichnis

$A_{Aperatur}$	Fläche eines Wärmekollektors
A_{Boden}	Bodenberührende Fläche des Speichers
$A_{Gesamt,Speicher}$	Gesamte Fläche des Stülpmembranspeichers
$A_{Gesamt,Stadt}$	Gesamte Stadtfläche von Roth
$A_{Halbkugel}$	Halbkugelflächenanteil des Stülpmembranspeichers
$A_{Kollektor}$	Bruttokollektorfläche eines Wärmekollektors
A_{Luft}	Fläche des Stülpmembranspeichers, der mit der Luft Kontakt hat
$A_{Zylinder}$	Zylindrischer Flächenanteil des Stülpmembranspeichers
$Annuität_{Kollektor}$	Annuität Kosten für die Wärmekollektoren
$Annuität_{Netz}$	Annuität Kosten für das Wärmenetz
c_{Wasser}	Wärmespeicherkapazität von Wasser
$d_{Außen}$	Außendurchmesser
$d_{Dämmung}$	Dämmungsdurchmesser der Styrodur Dämmung
d_{Innen}	Innendurchmesser des Stülpmembranspeicher
$Gesamtkosten_{Kollektor}$	Gesamtkosten der Kollektoren
$Gesamtkosten_{Netz}$	Gesamtkosten des Wärmenetzes
$Gesamtverbrauch_{Wärme}$	Gesamtwärmeverbrauch der Stadt Roth
$h_{Zylinder}$	Höhe des Zylinderanteils beim Stülpmembranspeicher
η_0	Optischer Wirkungsgrad eines Wärmekollektors
$Invest_{Kollektor}$	Investitionskosten der Wärmekollektoren
$Invest_{Wärmenetz}$	Investitionskosten des Wärmenetzes
$Kosten_{Instandhaltung,Netz}$	Instandhaltungskosten des Wärmenetzes
$Kosten_{Regelung/Steuerung}$	Kosten für Steuerungs- und Regelungseinheiten
$Kosten_{Wartung/Instandhaltung}$	Wartung und Instandhaltungskosten
$Leitungskosten_{mittel/ha}$	Mittlere Leitungskosten für einen Hektar
$\lambda_{Dämmung}$	Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht
λ_{Boden}	Wärmeleitfähigkeit vom Erdboden
$n_{Kollektoren}$	Anzahl der Kollektoren
$P_{Durchschnitt}$	Durchschnittsleistung
$P_{Durchschnitt,Kollektor}$	Durchschnittsleistung von einem Wärmekollektor

$P_{Mittel,Verbrauch}$	Mittlerer Verbrauch der Stadt Roth
$\dot{Q}_{Gesamt}$	Gesamter Wärmeverlust des Speichers
$\dot{Q}_{Gesamt,Jahr}$	Gesamter Wärmeverlust des Speichers im Jahr
$\dot{Q}_{Gesamt,Jahr,Prozentual}$	Prozentualer Anteil des Wärmeverlustes im Jahr
$\dot{q}_{Luft}$	Spezifischer Wärmestrom an die Umgebung der Luft
$\dot{Q}_{Luft}$	Wärmestrom an die Umgebung der Luft
$Q_{Speicher}$	Gesamte Speicherkapazität des Speichers
$\Delta T_{Speicher}$	Temperaturgefälle zwischen Speicher und Umgebung
u_{Luft}	Mittlere Temperatur der Umgebung
u_{Mittel}	Mittlere Temperatur des Kollektors
V_{Wasser}	Wasservolumen im Speich

1. Einführung

In der Einführung wird das Projekt beschrieben. Anschließend werden die Projektziele und die daraus ergebenen Forschungsfragen vorgestellt.

1.1 Ziel des Projekts

Um die von der Regierung auferlegten Klimaziele erreichen zu können, ist ein Umdenken bei der Energiegewinnung notwendig. Der Ausbau an regenerativen Erzeugungsanlagen ist zwar in den letzten Jahren gut vorangegangen, es reicht aber nicht aus, um in Deutschland im Jahr 2045 klimaneutral leben zu können. Im vorliegenden Projekt wird eine Gesamtlösung vorgestellt, mit der eine Kleinstadt regenerativ betrieben werden kann. Dabei werden die Erzeugung, sowie die Speicherung und Bewirtschaftungsstrategie in den Ausarbeitungen beleuchtet. Der Strom wird dabei mit Hilfe von Solar, Wind, Wasserkraft und Biomasse bereitgestellt. Die Warmwasserversorgung wird mittels Solarkollektoren ermöglicht.

Das Ziel des Projekts ist es die Energieversorgung einer Kleinstadt sicherzustellen. Dazu werden die verschiedenen Energieträger anhand ihres Ertrages analysiert. Mit Hilfe dieser Parameter wird dann ein Stülpmembranspeicher berechnet, der die Speicherkapazität für die benötigte Energie sicherstellen kann. Dazu werden teilweise überschlägige Werte angenommen, da eine genaue Datenanalyse aufgrund fehlender Informationen nicht möglich ist.

Beim Stülpmembranspeicher handelt es sich um einen mechanischen Energiespeicher bestehend aus einem im Untergrund freigelegten Bodenmassekolben, der von Wasser umhüllt ist. Bei Überschussstrom wird mittels einer Pumpe das Wasser unter den Bodenmassekolben gepresst und dieser damit angehoben. Dadurch entsteht ein Energiepotential, hervorgerufen durch die hohe Masse des Kolbens. Damit der Kolben in seiner Einfassung gleiten kann, wird er gegenüber seiner Einfassung mit einer Stülpmembran abgedichtet. [1]

In diesem Projektbericht wird die solare Wärmeversorgung der Stadt Roth näher beleuchtet. Dabei wird auf verschiedene Kollektorarten, sowie die Speicherauslegung und Bewirtschaftung eingegangen.

1.2 Forschungsfragen

Die vorrangigen Forschungsfragen für diese Projektarbeit sind:

- Welchen jahresdurchschnittlichen Wärmeverbrauch besitzt die Stadt Roth?
- Welche Kollektorart ist für die Untersuchung am besten geeignet?
- Mit welchen Qualitätskriterien lässt sich eine sichere Wärmeversorgung definieren?
- Abschätzung der Wärmenetzkosten für die Versorgung der Stadt Roth
- Abschätzung der Speicherbetriebskosten für das Wärmenetz sowie den Speicher
- Wie viele Verluste fallen in Netz und Speicher an?
- Ermittlung des mindestens erforderlichen Wärmeumwandlungsvermögens, das durch Kollektoren zur regenerativen Vollversorgung bereitgestellt werden müsste.

[1] Vgl. Matthias Popp Ingenieurbüro (2014): Online verfügbar unter: http://www.poppware.de/Stuelpmembranspeicher/index.htm, zuletzt geprüft am 22.08.2022.

2. Verbrauchsdatenanalyse

Um die Stadt Roth wärmetechnisch versorgen zu können, wird eine Verbrauchsdatenanalyse vom Wärmemengenverbrauch gemacht. Für die Analyse wurden in diesem Fall die stündlich anfallenden Gasverbräuche herangezogen. Die Datenreihen wurden vom Werksleiter der Stadtwerke Roth, Herrn Dr. Gerhard Brunner in Form von Exceltabellen zur Verfügung gestellt. Der Betrachtungszeitraum umfasst die Jahre 2018-2021. Die Analyse hat ergeben, dass in den letzten 4 Jahren 688 GWh Wärme verbraucht wurden. Das macht einen durchschnittlichen Wärmemengenverbrauch von 172 GWh pro Jahr. In Abbildung 2 ist beispielhaft das Verbrauchsjahr 2021 aufgeführt.

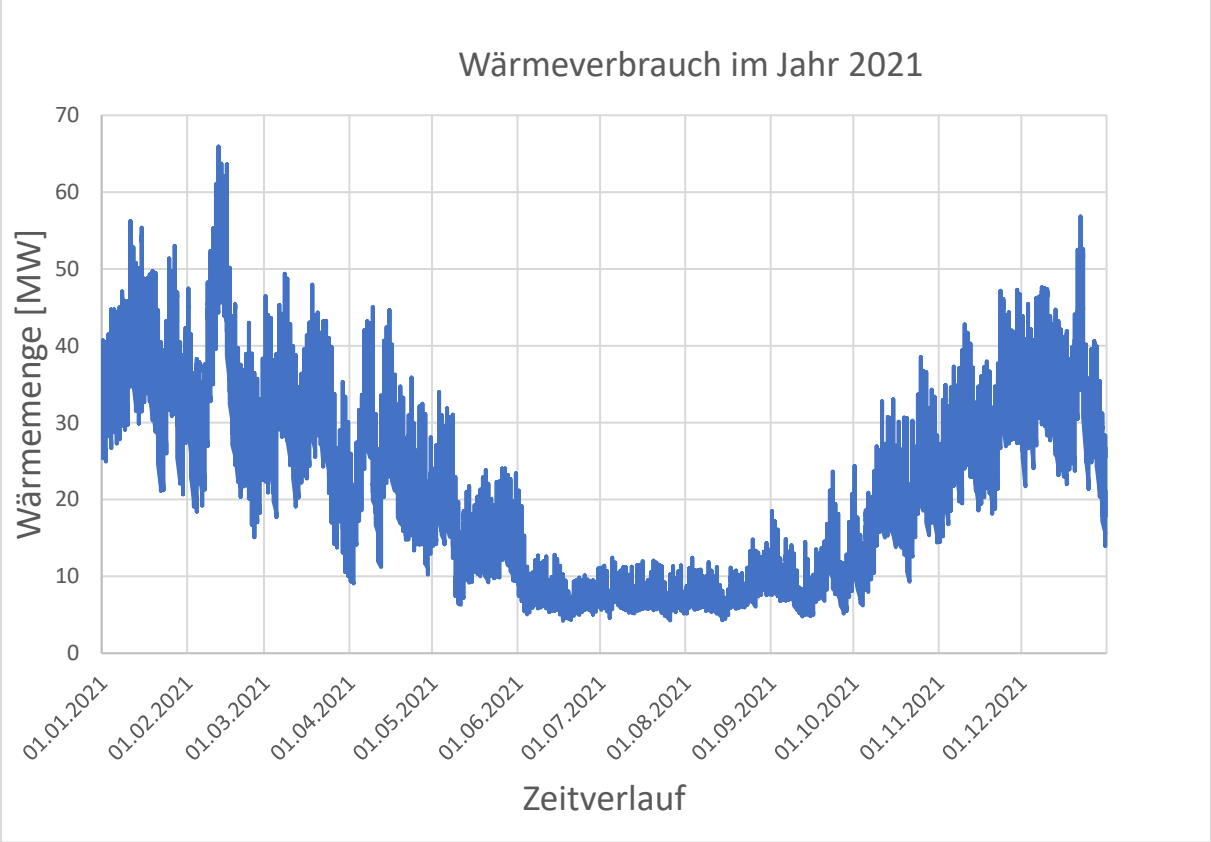


Abbildung 2: Wärmemengenverbrauch im Jahr 2021

Während im Sommer die Sonne am stärksten scheint, ist der Wärmemengenverbrauch im Jahresverlauf am geringsten. Im Winter ist der Fall genau andersherum. Es soll nun ein Speicherkonzept ausgelegt werden, mit dem die hohen Überschussmengen an Wärme, die von der Sonne im Sommer produziert werden, abgegriffen und im Winter genutzt werden können. Das dazu benötigte Wasser übernimmt dabei zwei Funktionen. Zum einen sorgt es dafür, den im Stülpmembranspeicher befindlichen Kolben zur Stromspeicherung zu heben und zu senken. Mit dieser Methode wird die potenzielle Energie der Lage in mechanische Energie umgewandelt. Zum anderen fungiert das Wasser als Wärmespeichermedium um die Wärme für den Winter zu speichern.

Die Auswertung der Verbrauchsdaten der letzten 4 Jahre hat ergeben, dass die Stadt Roth einen durchschnittlichen Verbrauch von ca. 20 MW hat. Im Winter stellt sich eine maximal benötigte Wärmeleistung von rund 66 MW ein. Im Sommer entsteht ein Verbrauchsminimum von 2,2 MW.

3. Bestimmung der Wärmeverluste im Wärmenetz

Für die Bestimmung der Wärmenetzverluste sind Annahmen zu treffen, wie ein Wärmenetz bei einer Stadt in Roth realisiert werden könnte. Dazu gehört eine Übersicht, welche Rohrquerschnitte für die einzelnen Bereiche der Stadt notwendig sind und wie lang die Rohre sein müssen. Je nach Leitungsquerschnitt der Versorgungsleitungen im Wärmenetz entstehen die Wärmeverluste. Die Art der Dämmung spielt dabei eine zentrale Rolle. Im Rahmen des Projekts wurden keine Informationen ermittelt, ob ein Wärmenetz bereits vorhanden ist und wie dieses aufgebaut ist. Einschlägige Literatur hat hier auch keinen Ansatz liefern können, der für ein ähnliches Szenario wie in Roth Werte zu den Verlustleistungen liefern könnte.

Für das Projekt wurden deswegen aus bereits vorhandenen Wärmeverlustrechnungen die überschlägigen Werte übernommen. Diese Werte wurden bei einer Analyse einer Kleinstadt mit der ungefähr selben Einwohnerzahl und Fläche der Stadt Roth herangezogen. Die Verluste des Wärmenetzes belaufen sich demnach auf 15% des gemittelten Verbrauchs in der Stunde. Da ein mittlerer Verbrauch von 20 MW ermittelt wurde, wird überschlägig mit einem Wärmeverlust von 3 MW gerechnet.

4. Speichergrößenauslegung und Verlustrechnung

Der Stülpmembranspeicher besitzt keine Wärmedämmung und ist deshalb verlustbehaftet. Für das Projekt wird mit einer Vorlauftemperatur von 80°C und einer Rücklauftemperatur von 60°C gerechnet.

In Abbildung 3 ist der schematische Aufbau des Stülpmembranspeichers zu sehen.

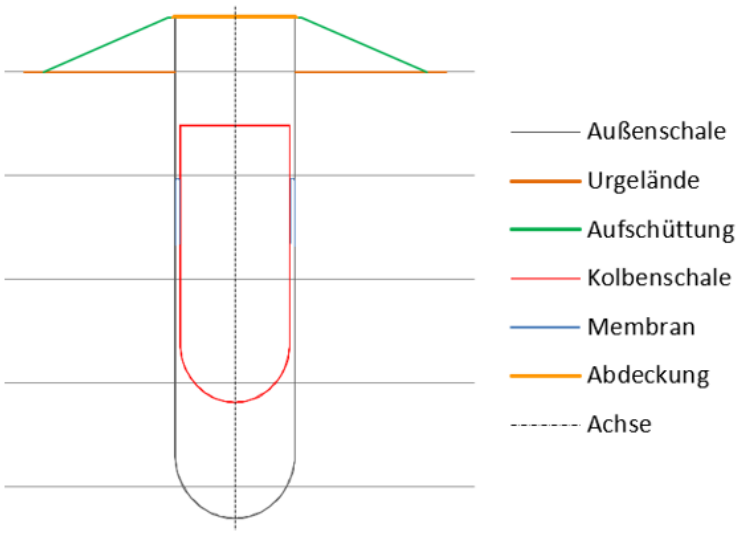


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Stülpmembranspeichers

Durch die fehlende Dämmung und den permanenten Temperaturunterschied zwischen dem Boden und dem Speicher, leitet der Speicher einen Teil seiner Wärmeenergie in seine Umgebung ab. Bei der Berechnung wurde mit einer konstanten mittleren Bodentemperatur von 10°C gerechnet. Wenn am Ende des Sommers der Speicher voll ist, hat er auch seine höchsten Verluste, da der Speicher über seine gesamte bodenberührende Fläche die Wärme abgibt. Das Wärmegefälle was sich zwischen dem Speicher und seiner Umgebung einstellt, lässt die mittlere Temperatur des Bodens ansteigen. Über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren würde die mittlere Temperatur um den Speicher herum

langsam steigen. Durch die Minimierung des Wärmegefälles werden Speicherverluste über die Zeit hinweg ebenfalls sinken. Bei einem leeren Speicher, bei dem viel frisches kaltes Wasser vorhanden ist, kann der aufgeheizte Untergrund um den Speicher das Wasser wieder zu einem geringen Anteil aufwärmen.

Für die Berechnung der Speicherverluste werden zwei verschiedene Verlustbetrachtungen gemacht. Zum einen wird der Verlust zwischen dem Boden und dem Speicher ermittelt und zum anderen die Verluste, die an der Aufschüttung und der Abdeckung in die Umgebung abgegeben werden.

Aus der Speichergrößenauslegung für den Stromsektor wird für die regenerative Versorgung der Stadt Roth ein Speicher benötigt, der einen Außenschalendurchmesser von 102 m besitzt und ca. 420 m in den Boden hineinragt. Damit besitzt der Speicher ein Fassungsvolumen von ca. 2,1 Mio. Kubikmeter Wasser. Durch die 80 °C Vorlauf- und die 60 °C Rücklauftemperatur stellt sich eine Temperaturdifferenz von 20 K im Speicher ein. Außerdem besitzt das Wasser eine spezifische Wärmespeicherkapazität von 1,163 $\frac{kWh}{m^3K}$. Mit Hilfe des Wasservolumens, der spezifischen Wärmekapazität und dem Temperaturgefälle lässt sich die Wärmespeicherkapazität berechnen.

$$Q_{Speicher} = c_{Wasser} * V_{Wasser} * \Delta T_{Speicher}$$

$$Q_{Speicher} = 1{,}163 \frac{kWh}{m^3K} * 2{,}1 * 10^6 m^3 * 20K = 48{,}51 GWh$$

Der auftretende Wärmeverlust, der in den Boden abfließt, wird mit folgender Formel berechnet.

$$\dot{Q} = \dot{q} * A_{Boden}$$

Bei $\dot{q}$ handelt es sich um die spezifische Wärmestromdichte und mit A_{Boden} wird die Außenfläche des Speichers bezeichnet, die im direkten Wärmeaustausch mit dem umliegenden Untergrund steht.

Da der Stülpmembranspeicher aus einer Zylinderfläche und einer Halbkugelfläche besteht, berechnet sich die Fläche $A_{Gesamt,Speicher}$ wie folgt:

$$A_{Gesamt,Speicher} = A_{Zylinder} + A_{Halbkugel}$$

$$A_{Gesamt,Speicher} = d_{Außen} * \pi * h_{Zylinder} + \frac{d^2{}_{außen} * \pi}{2}$$

$$A_{Gesamt,Speicher} = 102m * \pi * 420m + \frac{102^2 m * \pi}{2} = 150.928 m^2 (\approx 151.000 m^2)$$

Die spezifische Wärmestromdichte $\dot{q}$ errechnet sich mit folgender Formel:

$$\dot{q} = k * \Delta T$$

Da der Speicher eine mittlere Temperatur von 70 °C hat und für den Boden eine mittlere Temperatur von 10 °C festgelegt ist, ergibt sich in diesem Fall eine Temperaturdifferenz ΔT von 60 K.

Für die Wärmedurchgangszahl k wird die folgende Formel herangezogen:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{Außen}}{2 * \lambda_{Boden}} * \ln\left(\frac{d_{Außen}}{d_{Innen}}\right)}$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine stoffspezifische Kenngröße und liegt im Untergrund bei ca. 2 $\frac{W}{m*K}$. Der Außendurchmesser wird für die Berechnung nur als ein überschlagener Wert angenommen, da die Bodenschicht um den Membranspeicher unendlich dick ist. Für den überschlagenen Ansatz wurde mit einem fiktiven Radius von 25 m um den Speicher gerechnet, die der Membranspeicher aufheizt. Daraus ergibt sich die Rechnung:

$$k = \frac{1}{\frac{150m}{2 * 2\frac{W}{m * K}} * \ln\left(\frac{150m}{100m}\right)} = 0{,}0658\frac{W}{m^2K}$$

Damit lässt sich nun eine spezifische Wärmestromdichte $\dot{q}$ ermitteln:

$$\dot{q} = k * \Delta T$$

$$\dot{q} = 0{,}0658\frac{W}{m^2K} * 60K = 3{,}946\frac{W}{m^2}$$

Der daraus resultierende gesamte Wärmestrom $\dot{Q}$, der in die Umgebung des Bodens abfließt, wird damit berechnet:

$$\dot{Q} = \dot{q} * A_{Gesamt,Speicher}$$

$$\dot{Q} = 3{,}946\frac{W}{m^2} * 147.655m^2 = 582.647W(\approx 0{,}6MW)$$

Anschließend wird der Wärmeverlust der Abdeckung, die mit der Luft im Kontakt steht, berechnet.

Der Wärmeverlust in diesem Bereich wird über die Luft übertragen. Außerdem besteht die Abdeckung aus einer ein Meter dicken Styrodur Wärmedämmung. Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung $\lambda_{Dämmung}$ beträgt dabei 0,035 $\frac{W}{m*K}$. Wie bei der Verlustrechnung vom Speicher in die Umgebung wird der Wärmestrom an die Luft wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{Luft} = \dot{q}_{Luft} * A_{Luft}$$

Die Fläche A_{Luft} besteht nur aus der Styrodur Abdeckung auf der Oberseite des Stülpmembranspeichers.

$$A_{Luft} = \frac{\pi}{4} * d^2{}_{außen}$$

$$A_{Luft} = \frac{\pi}{4} * 102m^2 = 8.171m^2$$

Die spezifische Wärmestromdichte $\dot{q}_{Luft}$ ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit der Styrodur Dämmung, sowie der Oberflächentemperatur des Speichers und der mittleren Temperatur seiner Umgebungsluft. Die dazugehörige Durchgangszahl k geht mit der Dämmschichtdicke mit ein.

Daraus folgt die Berechnung:

$$\dot{q}_{Luft} = k * \Delta T$$

$$k = \frac{\lambda_{Dämmung}}{d_{Dämmung}}$$

$$k = \frac{0{,}035\frac{W}{mK}}{1m} = 0{,}035\frac{W}{m^2K}$$

$$\dot{q}_{Luft} = 0{,}035\frac{W}{m^2K} * 70K = 2{,}45\frac{W}{m^2}$$

Die Temperaturdifferenz ΔT ist bei dieser Betrachtung 70 K. Die Differenztemperatur entsteht aus der Annahme, dass die umliegende Temperatur der Luft im Jahresverlauf einen gemittelten Wert von 10 °C hat. Mit den 80 °C des Speichers entsteht die Temperaturdifferenz von 70 K.

Mit der spezifischen Wärmestromdichte der Luft $\dot{q}_{Luft}$ kann man den gesamten Wärmestrom über die Fläche der Abdeckung berechnen:

$$\dot{Q}_{Luft} = \dot{q}_{Luft} * A_{Luft}$$

$$\dot{Q}_{Luft} = 2{,}45\frac{W}{m^2} * 8.171m^2 = 20.018W(\approx\ 20kW)$$

Der gesamte Wärmeverlust ergibt sich aus den beiden Teilverlusten:

$$\dot{Q}_{Gesamt} = \dot{Q}_{Luft} + \dot{Q}_{Boden}$$

$$\dot{Q}_{Gesamt} = 20kW + 583kW = 603kW$$

Der Jahresverlust errechnet sich mit folgender Formel:

$$\dot{Q}_{Gesamt,Jahr} = 8760 * \frac{\dot{Q}_{Gesamt}}{1000}$$

$$\dot{Q}_{Gesamt,Jahr} = 8760\ h * \frac{603kW}{1000\ \frac{kWh}{MWh}} = 5.282{,}3MWh (\approx 5GWh)$$

Bezogen auf seine Speicherkapazität ergibt sich folgende Berechnung:

$$\dot{Q}_{Gesamt,Jahr,Prozentual} = \frac{\dot{Q}_{Gesamt,Jahr}}{Q_{Speicher}} * 100\%$$

$$\dot{Q}_{Gesamt,Jahr,Prozentual} = \frac{5{,}28GWh}{48{,}51GWh} * 100\% = 11\%$$

Die überschlägige Berechnung hat ergeben, dass jährliche Wärmeverluste von etwas über 10% der Speicherkapazität erwartet werden können. Diese Speicherverluste und die Wärmenetzverluste sind zusätzlich zum Nutzwärmebedarf über die Wärmekollektoren bereitzustellen.

5. Auswahl des Kollektortyps

Die Wärmebereitstellung auf regenerativer Basis soll mittels Wärmekollektoren erfolgen. Für das Projekt werden verschiedene Kollektoren-Konzepte gegenübergestellt. Für die Speichertemperaturen im Stülpmembranspeicher soll das aufgeheizte Wasser eine Vorlauftemperatur von 80 °C haben. Das bedeutet, dass die gelieferte Wärmemenge des Wassers im Hausnetz mindestens eine Temperatur von 90 °C erreichen soll. Um diese Temperaturen erreichen zu können gibt es nur zwei Kollektortypen, die diese hohen Temperaturen erreichen können. Zum einen den Vakuumröhrenkollektor und zum anderen den Flachkollektor. Im folgenden Vergleich werden die beiden Konzepte in Ihrem Aufbau gegenübergestellt.

5.1 Aufbau Vakuumröhrenkollektor

Der Vakuumröhrenkollektor basiert auf einer Technik, bei der in einem vollständig abgeschlossenen Glaskörper ein Vakuum erzeugt wird. Dabei können Vakuumröhrenkollektoren durch die runde Bauform ein viel höheres Hochvakuum als der Vakuumflachkollektor erzeugen. Die Kollektortypen werden unterschieden in Heatpipe und einem durchgehendem Wärmerohr. Bei der Heatpipe befindet sich in einem Glasrohr ein Fahnenabsorber. In diesem befindet sich ein temperaturempfindliches Medium. Bei Erwärmung des Rohres verdampft das Medium und der Dampf steigt in einen Kondensator. Das Wasser kondensiert und übergibt über seinen Wärmetauscher seine Wärmeenergie an das vorbeiströmende Wasser.[2] Den genaueren Aufbau einer Heatpipe zeigt Abbildung 4.

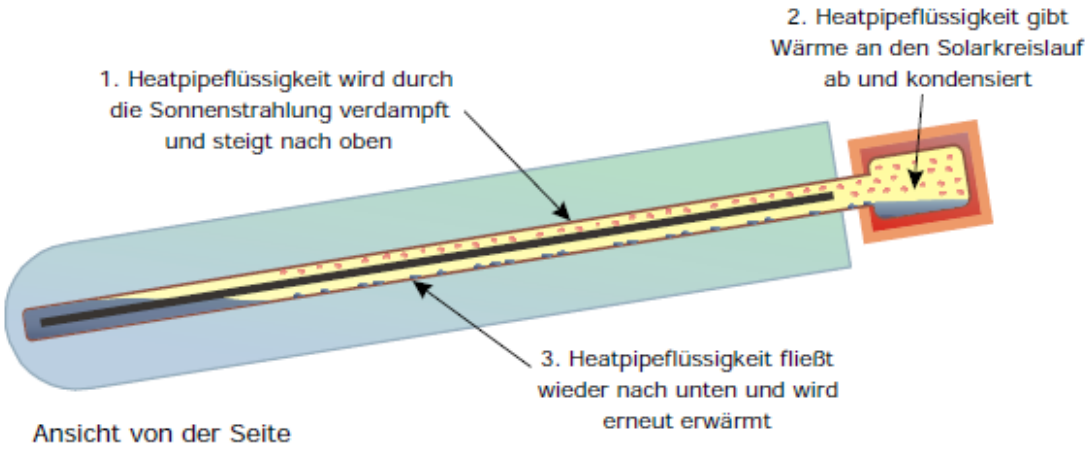


Abbildung 4:Aufbau und Funktionsprinzip des Vakuumröhrenkollektors

Darin ist zu erkennen, dass das Rohr mit einer gewissen Neigung montiert werden muss, damit das Wasser in den Kondensator steigen kann. In der Abbildung ist ebenfalls gut dargestellt, wie sich ein Kreislauf aus verdampfen und Kondensieren in der Heatpipe einstellt. Der Vorteil von Vakuumröhrenkollektoren liegt in ihrem hohen Energieertrag, vor allem in kühlen Jahreszeiten. Der Nachteil sind die hohen Anschaffungskosten. Für die Leistungsbestimmung des Vakuumröhrenkollektors werden die in Abbildung 6 dargestellten Parameter herangezogen. Dabei handelt es sich um einen 12 röhrigen Vakuumröhrenkollektor der Marke MEA Power. In Abbildung 5 sind die Maße der Gesamtfläche pro Panel zu erkennen. Die Parameter für die Gesamtfläche wird bei der Betrachtung der gesamt benötigten Kollektoranzahl relevant.

[2] Quasching, Volker (2019): Regenerative Energiesysteme. 10., aktualisierte und erweiterte Aufl. Regensburg, Hanser, S.127

MEA POWER
VAKUUM-RÖHRENKOLLEKTOR

Der MEA POWER Vakuum-Röhrenkollektor besteht aus einer Serie von Borosilikat – Doppelwandröhren mit evakuierten Hohlraum, am Ende verschmolzen, in dem ein Vakuum eingeschlossen ist.

Die innere Glasseite hat eine hoch selektive „CERMET" Beschichtung auf elektromagnetisch gestrahlte Mehrschichtmetallisierung angebracht. Hergestellt aus völlig rezyklierbare Materialien.

Der Absorber besteht aus einem Kupferröhrchen U-förmig gebogen, positioniert in einer perfekten Verbindung mittels Aluminiumwärmeleitblech. Alle Röhren sowie der Sammelkasten sind auf einem stabilen Rahmen zusammengebaut.

Der CPC Reflektor (compound parabolic concentrator) reflektiert und konzentriert die Sonnenstrahlen und ermöglicht höchster Wirkungsgrad während des ganzen Tages.

KONSTRUKTIONSDATEN:	
Vakuumrohr:	Röhre aus Borosilikatglas mit Luftspalt, Außendurchmesser 58 mm mit eine Wandstärke von 1,7 mm, Innendurchmesser 47 mm
Vakuum:	Hochvakuum <10-3 mbar
Absorber:	hochselektive „CERMET" Beschichtung auf Mehrschichtmetallisierung Absorption 94 %; Emission 6 %
CPC Reflektor:	Reflektierende Spiegelschicht mit mehr als 90% der gesamten Sonneneinstrahlung; Reflektion, durch den Vorteil von CPC (Compound Parabolic Concentrator) System.
Sammelkasten:	Aluminium eloxiert, innen vollständig isoliert mit nicht brennbarer Steinwolle der Klasse 0 (ISO - DIS 1182.2).
Anschlüsse:	2 x Verschraubung IG 24 x 1,5 mm komplett mit vormontiertem Ü-Mutter, Schneidring und Stützhülse. Für den Anschluss des Kollektorfeldes ist nur noch ein Anschlussset notwendig

TECHNISCHE DATEN:

Anzahl Röhre	8	12	18	21
Bruttofläche (m²)	1,46	2,16	3,22	3,75
Aperturfläche (m²)	1,27	1,89	2,84	3,31
Absorberfläche (m²)	0,54	0,81	1,22	1,42
Leergewicht (kg)	29	43	65	76
Inhalt (lt)	1,17	1,74	2,6	2,68
Breite (mm):	920	1358	2018	2348
Höhe (mm):	1630			
Dicke (mm):	140			
Maximaler Betriebsdruck (bar)	6			
Testdruck (bar)	9			

Abbildung 5: Technisches Datenblatt Vakuumröhrenkollektor

MEA POWER Leistungsdaten

LEISTUNGSDATEN NACH EN 12975-2:				
Testbericht:	07COL623/1 ITW Stuttgart			
Wirkungsgradangaben nach:	Aperturfläche			
Konversionsfaktor $\eta_0$0:	0,718			
Wärmedurchgangskoeffizient a_1:	0,974 W/m²K			
Wärmedurchgangskoeffizient a_2	0,005 W/m²K²			
***)Stagnationstemperatur**	249 °C			
****) Spitzenleistung Wpeak**	MEA POWER 8	MEA POWER 12	MEA POWER 18	MEA POWER 21
	912 W	1357 W	2039 W	2377 W
Artikel-Nr.	**M-POWER 8**	**M-POWER 12**	**M-POWER 18**	**M-POWER 21**

*) Sonneneinstrahlung 1000 W/m² und einer Außentemperatur von 30°C
**) G= 1000 W/m², ϑk - ϑa=0 pro Kollektormodul

Kollektorleistung MEA POWER 8 in Watt pro Modul nach EN 12975-2

	Sonneneinstrahlung W/m²		
*) ϑk - ϑa	400 W/m²	700 W/m²	1000 W/m²
0	365	638	912
20	337	611	885
40	305	579	852
60	268	541	815
80	225	499	772
100	178	451	725

Kollektorleistung MEA POWER 12 in Watt pro Modul nach EN 12975-2

	Sonneneinstrahlung W/m²		
*) ϑk - ϑa	400 W/m²	700 W/m²	1000 W/m²
0	543	950	1357
20	502	909	1316
40	454	861	1268
60	398	805	1213
80	335	742	1149
100	264	671	1078

Kollektorleistung MEA POWER 18 in Watt pro Modul nach EN 12975-2

	Sonneneinstrahlung W/m²		
*) ϑk - ϑa	400 W/m²	700 W/m²	1000 W/m²
0	816	1427	2039
20	755	1366	1978
40	682	1294	1906
60	599	1210	1822
80	503	1115	1727
100	397	1009	1621

Kollektorleistung MEA POWER 21 in Watt pro Modul nach EN 12975-2

	Sonneneinstrahlung W/m²		
*) ϑk - ϑa	400 W/m²	700 W/m²	1000 W/m²
0	951	1664	2377
20	880	1593	2305
40	795	1508	2221
60	698	1411	2124
80	587	1300	2013
100	463	1176	1889

Abbildung 6: Prüfbericht Röhrenkollektor

5.2 Aufbau Flachkollektor

Bei den Flachkollektoren handelt es sich um die meistverbreitete Kollektorart. Ihr Aufbau besteht im Grunde aus drei Bauteilen. Einer transparenten Abdeckung, einem Kollektorgehäuse und dem Absorber. In Abbildung 7 ist das Funktionsprinzip von Flachkollektoren zu erkennen.

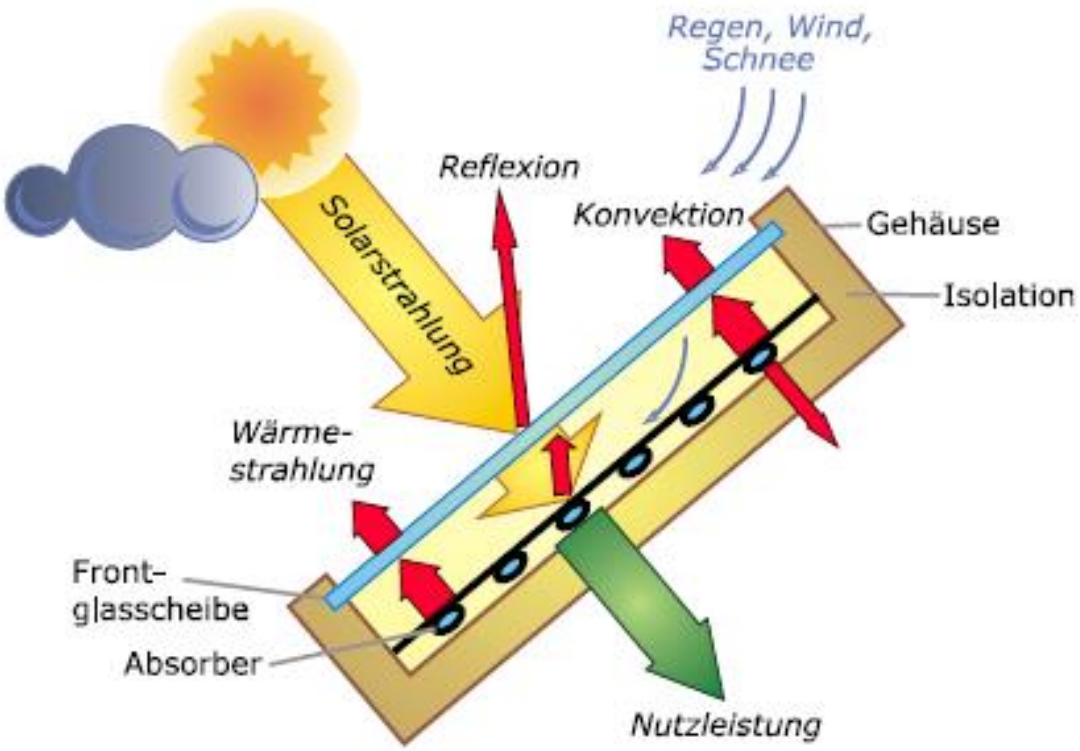


Abbildung 7: Vorgänge in einem Flachkollektor

Der Absorber des Kollektors wandelt das Sonnenlicht in Wärme um. In den Rohren des Absorbers fließt das Wasser vorbei und wird dabei erwärmt. Der Flachkollektor hat auf seiner Rückseite eine Dämmung, um Wärmeverluste zu reduzieren, die an seine Umgebung abgegeben werden. [3]

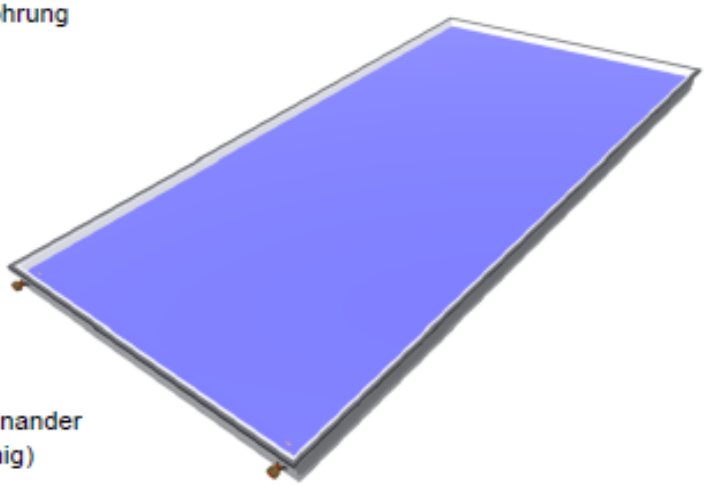
Trotz Dämmung treten hohe Verluste zwischen Absorber und Umgebung auf, die sehr stark von der Umgebungstemperatur abhängig sind. Für die nachfolgende Leistungsbestimmung des Kollektors wurden die in Abbildung 8 aufgeführten Parameter herangezogen. Hierfür wurde als Beispiel für einen Flachkollektor ein Produkt der Firma Citrin Solar genommen.

[3] Quasching, Volker (2019): Regenerative Energiesysteme. 10., aktualisierte und erweiterte Aufl. Regensburg, Hanser, S.124

Technisches Datenblatt CS 300

Universal-Flachkollektor CS 300

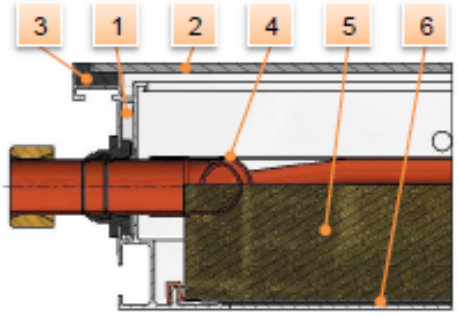
- ✓ vollflächiger Aluminiumabsorber mit Cu-Harfenverrohrung
- ✓ hochselektive Absorber-Beschichtung
- ✓ stabiler Aluminium-Hohlkammerrahmen
- ✓ 10 Jahre Garantie
- ✓ Solar KEYMARK zertifiziert
- ✓ Kollektorertragsnachweis
- ✓ erfüllt die Förderbedingungen des BAFA
  (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle)



Anwendungsbereiche:

- ✓ Trinkwasserbereitung
- ✓ Heizungsunterstützung
- ✓ Aufdach-Montage hochkant neben- und quer übereinander
- ✓ Indach-Montage hochkant nebeneinander (mehrreihig)
- ✓ möglicher Neigungswinkel von 20° bis 60°
- ✓ Reihenschaltung von maximal 7 Kollektoren

Technische Daten (entsprechend der EU-Verordnung Nr. 811- und 812/2013 (Ergänzung der Richtlinie 2010/30EU))			
Bruttofläche	A_G	[m²]	2,02
Aperturfläche	A_{Sol}	[m²]	1,87
Absorberfläche	A_A	[m²]	1,85
Breite	B_G	[m]	1,026
Länge	L_G	[m]	1,965
Höhe	H_G	[m]	0,08
optischer Wirkungsgrad*)	η_0	[-]	0,793
Kollektorwirkungsgrad)**	η_{col}	[%]	61,50
Linearer Wärmedurchgangskoeffizient *)	a_1	[W/(m²K)]	4,030
quadratischer Wärmedurchgangskoeffizient*)	a_2	[W/(m²K²)]	0,010
Winkelkorrekturfaktor	IAM (50)	[-]	0,95
effektive Wärmekapazität des Kollektors	C_{Koll}	[kJ/K]	9,7
Stagnationstemperatur	T_{stg}	[°C]	195
Leergewicht	m_{Koll}	[kg]	31
Flüssigkeitsvolumen pro Kollektor	V_{Koll}	[Liter]	1,2
Zulässiger Betriebsüberdruck	p_{max}	[bar]	10
Absorber - Typ	Doppel-Harfe		
Anschluss	[-]	[Ø in mm]	18 (2x)
Anschlussart	Konusverschraubung metallischdichtend		
Solarer Absorptionskoeffizient	α	[-]	0,95
Thermischer Emissionskoeffizient	ε	[-]	0,04
Solarsicherheitsglas (ESG) Dicke	t_{SG}	[mm]	3,2
Transmissionskoeffizient	τ	[-]	0,916
Wärmedämmung Rückwand (WdR) Dicke	t_{WdR}	[mm]	38
Wärmeleitfähigkeit WdR	λ_{WdR}	[W/(mK)]	0,037



1	Gehäuse
2	Abdeckung (Solarglas)
3	Dichtung
4	Absorber
5	Wärmedämmung
6	Rückwand

Prüfbericht SPF Nr. IC1355QPEN /-LPEN

*) Parameter der Wirkungsgradkurve sind bezogen auf die Aperturfläche
**) Wirkungsgrad bei Einstrahlung 1000 W/m², ΔT 40 K → Tred 0,04 m²K/W
***) siehe: Annex to Solar Keymark Certificate 011-7S425 F
****) Das Kollektorertragslabel ist eine freiwillige Produktkennzeichnung teilnehmender Hersteller der Solarbranche für transparente Aussagen über Leistung und Ertrag von Kollektoren.

Stand 2016_05_30

Abbildung 8: Datenblatt Flachkollektor

6. Auswertung der Globalstrahlungsdaten

Bei der Energieerwirtschaftung mit Wärmekollektoren spielt die Globalstrahlung eine zentrale Rolle. Je mehr Strahlung auf den Kollektor fällt, desto mehr Energie erwirtschaftet dieser. Für das Projekt wurde dafür eine Analyse der Bestrahlungsstärke erstellt.

Die Einstrahlstärke von der diffusen und direkten Strahlung hängt direkt mit der Ausrichtung, sowie dem Neigungswinkel der Kollektoren am Dach ab. Dazu wurden die Häuserausrichtungen der Stadt Roth analysiert und es wurde eine grobe Abschätzung über die Dachneigungen gemacht.

In Abbildung 9 ist die Grobabschätzung für die Häuserausrichtung zu erkennen. Dabei sind die rot markierten Stellen die Anteile der Häuser mit Süd-Ausrichtung. Dieser Anteil nimmt dabei ca. 50 % ein. Die grüne Markierung sind die Häuser mit einer Süd-West-Ausrichtung. Diese haben einen prozentualen Anteil von ca. 30 %. Die blauen Markierungen zeigen den Häuseranteil mit einer Süd-Ost-Ausrichtung und nehmen einen Gesamtanteil von ca. 20 % ein.

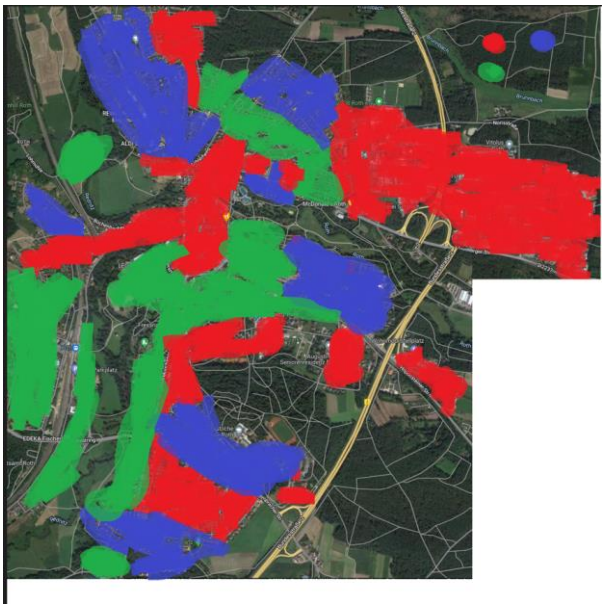


Abbildung 9:Grobabschätzung Häuseranteile

Aus diesen drei Einzelanteilen lässt sich dann ein gesamter Globalstrahlungsanteil ermitteln, der stündlich auf die Fläche der Stadt Roth scheint. Die Werte für die Globalstrahlungsanteile werden von den MERRA-Daten abgerufen.[4] MERRA steht für „Modern Era Retrospective analysis for Research and Application“ und wird von der NASA zur Verfügung gestellt.[5] Dabei wird die Erde in mehrere kleine Quadranten aufgeteilt und Werte für die gemittelte Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeiten oder auch Globalstrahlungsanteile der jeweiligen Quadranten stündlich bereitgestellt. Diese Werte kann man dann für einen beliebigen Quadranten ausgeben lassen. Die Ortslage der Stadt Roth liegt dabei in der Breite bei 49° und in der Länge bei 11,25°. Für die Neigung der Kollektoren wurde zur Vereinfachung ein mittlerer Neigungswinkel von 35° angenommen.

Die Auswertung hat ergeben, dass auf die Dächer der Stadt Roth eine mittlere Globalstrahlungsstärke von 157 $\frac{W}{m^2}$ scheint. An heißen Sommertagen kann die Strahlung auf bis 898 $\frac{W}{m^2}$ ansteigen.

[4] Vgl. National Aeronautics and Space Administration (2019): Online verfügbar unter: https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/, zuletzt geprüft am 22.08.2022

[5] Vgl. Wind Lexikon (2022): Online verfügbar unter: https://www.wind-lexikon.de/cms/lexikon/97-lexikon-m/1340-merra.html, zuletzt geprüft am 29.06.2022.

7. Berechnung der Strahlungsleistung

Die stündlich vorhandene Globalstrahlung auf eine Fläche, die um 35° geneigt ist, ergibt mit der gegebenen mittleren Außentemperatur einen Kollektorwirkungsgrad. Die Leistung wird dabei wie folgt berechnet[6]:

$$\eta = \eta_0 - a_1 * \frac{(u_{Mittel} - u_{Luft})}{G} - a_2 * G * (\frac{(u_{Mittel} - u_{Luft})}{G})^2$$

η_0 wird als der optische Wirkungsgrad eines Kollektors bezeichnet. Das ist die Höhe des Wirkungsgrades, wenn sich zwischen der mittleren Temperatur des Absorbers (u_{Mittel}) und der mittleren Temperatur der Umgebungsluft (u_{Luft}) 0 Kelvin einstellt. a_1 ist der Wärmedurchgangskoeffizient des Panels. a_2 wird der temperaturabhängige Temperaturkoeffizient genannt. Beide Koeffizienten sind systemabhängige Parameter und variieren je nach Kollektormodulart und Aufbau. G ist die Globalstrahlung, die auf das Kollektormodul trifft und setzt sich zusammen aus der direkten Strahlung der Sonne und der diffusen Strahlung der Atmosphäre.

Die Gesamtleistung Q_{Gesamt} eines Panels berechnet sich dann wie folgt:

$$Q_{Gesamt} = \eta * G * A_{Aperatur}$$

$A_{Aperatur}$ ist die Gesamtfläche eines Moduls und wird auch Bruttofläche bezeichnet.

<u>Beispielrechnung Julitag 2021 für einen Vakuumröhrenkollektor:</u>

Daten aus den oben gegebenen Datenblatt:

η_0=0,718 G=663,75 $\frac{W}{m^2}$
u_{Luft}=21,77°C $A_{Aperatur}$= 1,89 m²
u_{Mittel}=75°C
a_1=0,974 $\frac{W}{m^2}$
a_2=0,005 $\frac{W}{m^2}$

Dabei handelt es sich bei u_{Mittel} um die mittlere Temperatur der Kollektorröhren im Jahresverlauf. Dieser Wert wurde aus den Empfehlungen der Hersteller aus den Kollektordatenblättern entnommen.

<u>Einsetzen in η:</u>

$$\eta = \eta_0 - a_1 * \frac{(u_{Mittel} - u_{Luft})}{G} - a_2 * G * (\frac{(u_{Mittel} - u_{Luft})}{G})^2$$

[6] Vgl. Solarbayer GmbH (2022): Die Kollektorgleichung. Online verfügbar unter: https://www.kollektorleistung.de/Kollektorgleichung.html, zuletzt geprüft am 29.06.2022.

$$\eta = 0{,}781 - 0{,}974\frac{W}{m^2} * \frac{(75°C - 21{,}77°C)}{663{,}75\frac{W}{m^2}} - 0{,}005\frac{W}{m^2} * 663{,}75\frac{W}{m^2} * (\frac{(75°C - 21{,}77°C)}{663{,}75\frac{W}{m^2}})^2$$

$$\eta = 0{,}6185 * 100\% = 61{,}85\%$$

Berechnung der Gesamtleistung:

$$Q_{Gesamt} = \eta * G * A_{Aperatur}$$

$$Q_{Gesamt} = 61{,}85\% * 663{,}75\frac{W}{m^2} * 1{,}89\text{m}^2 = 776\text{W}$$

Ein Vakuumröhrenkollektorpanel hat am 23.06.2021 bei gegeben Umwelteinflüssen eine Spitzenleistung von 776W produziert. Diese Werte wurden anschließend für alle Stundenwerte der letzten 4 Jahre ermittelt und in einer Tabelle ausgegeben.

Um einen direkten Vergleich herstellen zu können wird das gleiche für einen Flachkollektor durchgerechnet.

Beispielrechnung Julitag 2021 für einen Flachkollektor:

Daten aus den oben gegebenen Datenblatt:

η_0=0,870 G=663,75$\frac{W}{m^2}$
u_{Luft}=21,77°C $A_{Aperatur}$= 1,87m²
u_{Mittel}=75°C
a_1=0,950$\frac{W}{m^2}$
a_2=0,010$\frac{W}{m^2}$

Einsetzen in η:

$$\eta = \eta_0 - a_1 * \frac{(u_{Mittel} - u_{Luft})}{G} - a_2 * G * (\frac{(u_{Mittel} - u_{Luft})}{G})^2$$

$$\eta = 0{,}870 - 0{,}950\frac{W}{m^2} * \frac{(75°C - 21{,}77°C)}{663{,}75\frac{W}{m^2}} - 0{,}010\frac{W}{m^2} * 663{,}75\frac{W}{m^2} * (\frac{(75°C - 21{,}77°C)}{663{,}75\frac{W}{m^2}})^2$$

$$\eta = 0{,}5043 * 100\% = 50{,}43\%$$

Berechnung der Gesamtleistung:

$$Q_{Gesamt} = \eta * G * A_{Aperatur}$$

$$Q_{Gesamt} = 50{,}43\% * 663{,}75 \frac{W}{m^2} * 1{,}87\mathrm{m}^2 = 626\mathrm{W}$$

Der Flachkollektor hat in derselben Stunde nur eine Spitzenleistung von 626 W eingebracht. Auch für den Flachkollektor wurden für alle Stundenwerte die einzelnen Leistungen berechnet und dem Vakuumröhrenkollektor gegenübergestellt. In Abbildung 10 ist nun der Tagesverlauf vom 23.06.2021 aufgeführt.

Gegenüberstellung des Vakuumröhrenkollektors und des Flachkollektors

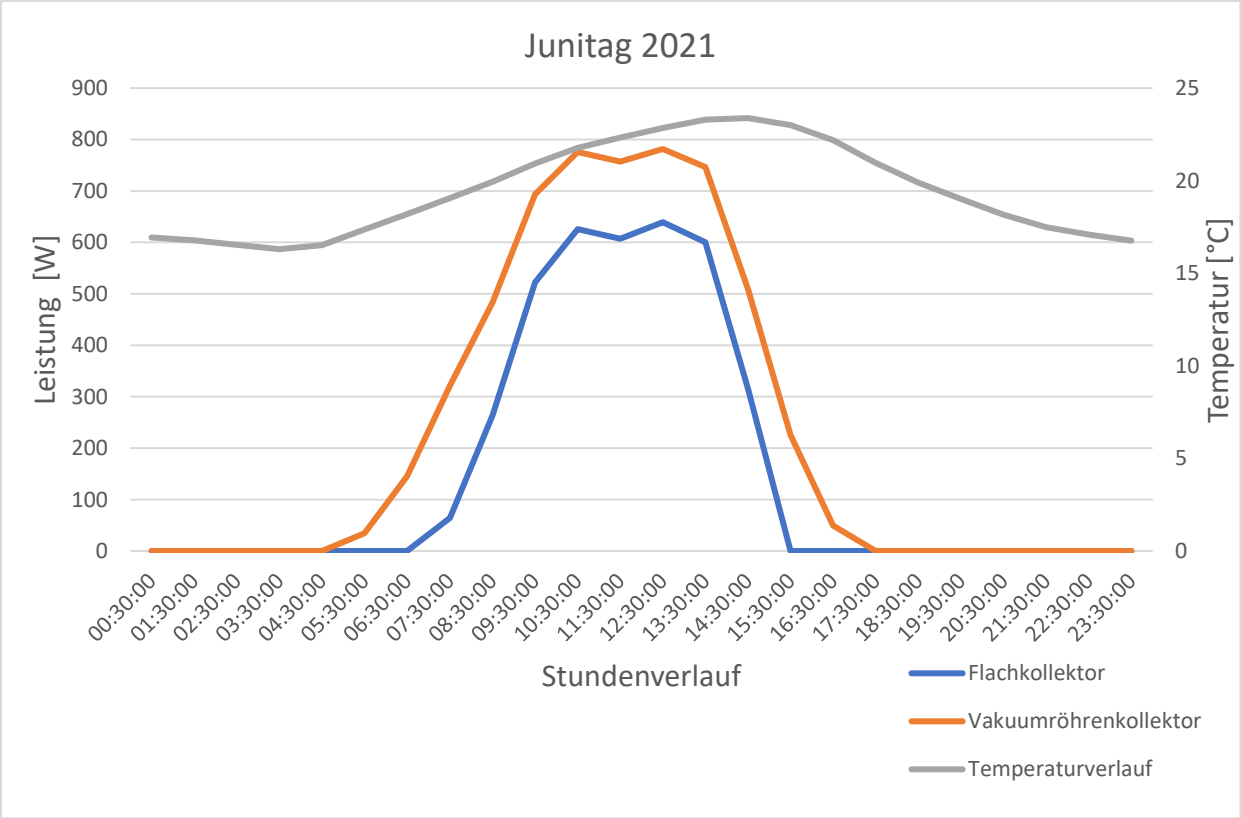


Abbildung 10:Gegenüberstellung Flachkollektor und Vakuumröhrenkollektor

Dabei sieht man den Leistungsverlauf des Vakuumröhrenkollektors, der in orange aufgeführt ist, gegenüber dem Flachkollektor, der in blau gehalten ist. Man erkennt, dass der Vakuumröhrenkollektor bei exakt denselben Umgebungsbedingungen aus Globalstrahlung und Umgebungstemperatur, mehr Leistung einbringt als der Flachkollektor. Der Vakuumröhrenkollektor arbeitet zusätzlich effizienter, da er im Gegensatz zum Flachkollektor bereits früher Leistung liefert.

Die Auswertung über alle Stundenwerte hat ergeben, dass der Vakuumröhrenkollektor in den letzten vier Jahren eine maximale Stundenleistung von 1069 W hat. Beim Flachkollektor lag die Leistung lediglich bei 1014 W. Für die mittlere Leistung hat der Vakuumröhrenkollektor 150 W erzeugt, während der Flachkollektor nur 86 W erzeugen konnte.

Alle diese Argumente haben dazu geführt, Vakuumröhrenkollektoren für die Warmwasserversorgung zu verwenden.

8. Bestimmung des Umwandlungsvermögens und Speicherbewirtschaftung

Das Umwandlungsvermögen ist ein Maß dafür, wie hoch die im Langzeitdurchschnitt von den Kollektoren bereitgestellte nutzbare Wärme im Vergleich zum Wärmebedarf ausfällt.

Um das Umwandlungsvermögen bestimmen zu können, wird eine Mittelwertanalyse über die letzten vier Jahre erstellt. Die Mittelwertanalyse gibt einen Einblick darüber, welches der vier Jahre das schlechteste Jahr für die Verwendung der Solarkollektoren war. In Abbildung 11 sind die einzelnen Betrachtungspunkte aufgeführt.

Jahresmittelwerte:	Strahlung zum Mittelwert	Wärmeerzeugung zum Mittelwert	Stündlicher Verbrauch inkl. Speicher- und Netzverluste	Residual-leistung zum Verbrauchs-mittelwert	Verfügbares Wärme-umwandlungs-vermögen
2018	101%	102%	93%	26%	119%
2019	101%	101%	99%	18%	117%
2020	101%	102%	98%	20%	118%
2021	97%	95%	110%	0,00%	110%
Summe	100%	100%	100%	16%	116%

Abbildung 11: Bestimmung des Umwandlungsvermögens

Die Werte in der Spalte Strahlung zum Mittelwert ermittelt den gesamten Strahlungseingang des jeweiligen Jahres und bezieht diesen auf den Mittelwert der letzten vier Jahre. Dabei ist zu erkennen, dass im Jahr 2021, 3% weniger Strahlung auf die Landschaftsfläche der Stadt Roth aufgetroffen ist als in den Jahren zuvor. Wegen dem geringeren Strahlungseingang konnte weniger Wärme durch die Kollektoren erzeugt werden. Das ist in der Spalte Wärmeerzeugung zum Mittelwert veranschaulicht. Im Durchschnitt hat das Jahr 2021 5% weniger Wärme erzeugen können als in den Jahren vorher.

In der Spalte stündlicher Verbrauch wird der Gesamtverbrauch dargestellt. Dabei werden die statisch anfallenden Verluste des Speichers und des Netzes mit einbezogen und durch den Mittelwert des gesamten Betrachtungszeitraums geteilt.

In der nachfolgenden Abbildung 12 ist der stündliche Gesamtverbrauch inklusive der Verluste veranschaulicht.

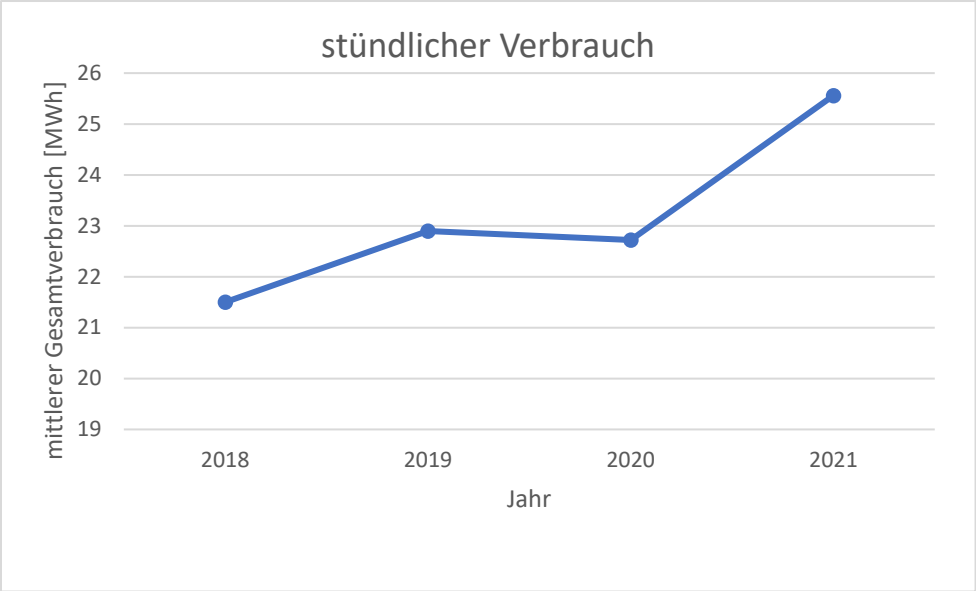


Abbildung 12: mittlerer Jahresverbrauch

Der stündliche Wärmeverbrauch stieg von, ca. 21 MWh im Jahr 2018, auf ca. 26 MWh im Jahr 2021 an. Durch Effekte, die mit der Corona-Pandemie und dem Arbeiten im Home-Office zusammenhängen, ist der Verbrauch an Wärmeenergie um 10% gestiegen.

Die in Abbildung 11 aufgetragene Residualleistung zum Verbrauchsmittelwert wird auch Restleistung zum Mittelwert genannt. Sie ist ein Maß dafür, wie viel Wärmeenergie als Überkapazität erzeugt wird. Da im Jahr 2021 die schlechtesten Verhältnisse für den Betrieb von Wärmekollektoren war, wird eine Ziel-Wert-Analyse für die Residualleistung des Jahres 2021 durchgeführt. Dabei lässt sich in der Summe ein Umwandlungsvermögen ermitteln, um im Strahlungsschwächsten Jahr 2021 den Speicher einmal vollständig zu füllen. Das Ergebnis der Analyse hat ergeben, dass im Schnitt eine Residualleistung von 16%, bezogen auf den Verbrauchsmittelwert, erzeugt werden muss, damit die Füllung des Speichers stattfinden kann. Das Umwandlungsvermögen beträgt demnach im Durchschnitt der letzten vier Jahre 116%.

Mit dem Residualleistungswert berechnet sich die letzte Spalte des verfügbaren Wärmeumwandlungsvermögen. Der Bezugspunkt liegt dabei wieder auf dem Strahlungsschwächsten Jahr 2021. Um den Speicher am Ende des Jahres trotz geringer Strahlung einmal vollständig füllen zu können, waren 110% an Umwandlungsvermögen notwendig. Dieses Vermögen ist aber gestützt durch ein Speichervermögen, dass die drei Jahre vorher bereitgestellt hat. Wenn diese Bewirtschaftungsstrategie für das Jahr 2021 aufgehen soll, muss in den Jahren zuvor ein höheres Wärmeumwandlungsvermögen aufgebracht werden. Dazu ist es dann notwendig, am Beispiel des Jahres 2020, 118% an Wärmespeichervermögen bereitzustellen. Dadurch ist der Speicher im Jahresverlauf länger gefüllt und die Entnahme aus dem Speicher beginnt später. Die vollständige Speicherbewirtschaftung ist in Abbildung 13 veranschaulicht.

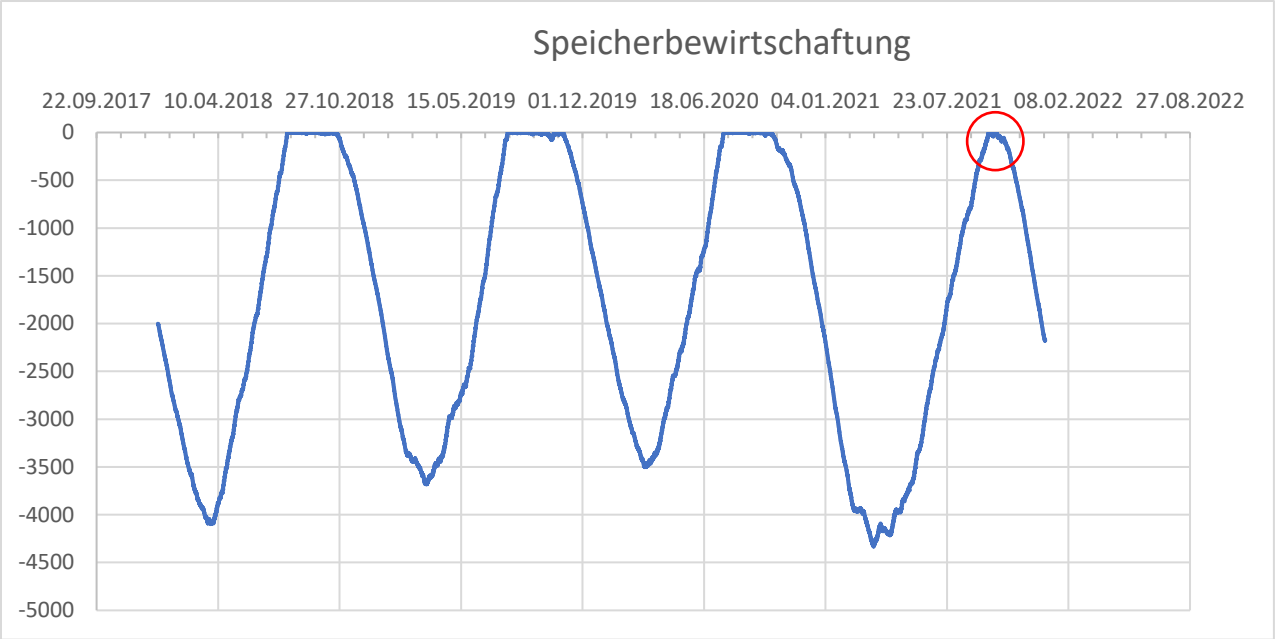


Abbildung 13:Speicherbewirtschaftung

Für die Speicherbewirtschaftung wird eine gewisse Speichervorleerung angenommen, da der Speicher sich erst über mehrere Wochen hinweg auflädt bzw. entleert. Für die in Abbildung 13 veranschaulichte Beispieldarstellung wird von einer Speichervorleerung von -2000 Stunden ausgegangen. Dabei handelt es sich um Stundenladungen, wie viele Stunden der Speicher bei Durchschnittswärmeleistungsbedarf liefern kann.

Der rot umrandete Bereich zeigt die Bereitstellung von 110% Wärmeumwandlungsvermögen aus dem Jahr 2021. Im Vergleich zu den Jahren zuvor fällt die vollständige Speicherfüllung sehr kurz aus. Das geringe Wärmeumwandlungsvermögen von 110% für das Jahr 2021 kann den Speicher nur für einen kurzen Moment vollständig füllen, bis die Wärmeentnahme am Anfang des Winters beginnt. Durch ein höheres Wärmeumwandlungsvermögen hat der Speicher eine längere Periode der vollständigen Füllung.

Anhand der Analyse des Entleerungsverlaufs ist zu erkennen, dass die maximale Speicherleerung im Bereich von -4330 Stunden liegt. Das bedeutet, dass dem Speicher eine maximale Wärme entnommen wurde, die über 4330 Stunden den Durchschnittsverbrauch abgedeckt hätte. Da ein Jahr 8760 Stunden hat, bräuchte ein Speicher für die Stadt Roth eine Kapazität für etwa den halben Jahreswärmebedarf. Der andere Teil der Wärme kann im Winter über die Kollektoren direkt abgedeckt werden.

9. Berechnung der benötigten Kollektoranzahl

Mit dem Umwandlungsvermögen von 116% wird die Anzahl der benötigten Kollektoren ermitteln. Dazu wird zuerst die Durchschnittsleistung wie folgt ermittelt.

$$P_{Durchschnitt} = P_{Mittel,Verbrauch} * Umwandlungsfaktor$$

$$P_{Durchschnitt} = 23{,}2MW * 116\% = 26{,}9MW$$

$P_{Mittel,Verbrauch}$ ist der Gesamtverbrauch, der im Durchschnitt bei der Produktion von Wärme generiert werden muss. Der mittlere Verbrauch von rund 20 MW auf Seite 2, wird mit den Netzverlusten von rund 15% und den Speicherverlusten von 11% addiert. Dabei entsteht ein mittlerer Verbrauch von rund 23,2 MW

Betrachtet man die Leistung eines Vakuumröhrenkollektors über den Gesamtzeitraum der letzten vier Jahre, ergibt sich eine Durchschnittsleistung von 150 Wh pro Kollektor. In Kombination mit dem Durchschnittsverbrauch lässt sich so auf die benötigte Modulfläche schließen:

$$n_{Kollektoren} = \frac{P_{Durchschnitt}}{P_{Durchschnitt,Kollektor}} * 1000$$

$$n_{Kollektoren} = \frac{26{,}9MW}{150W} * 1000 = 179.174$$

Bei einer Kollektorfläche von 3,64 m² pro Kollektormodul ergibt sich folgende benötigte Gesamtfläche:

$$A_{Gesamt,Stadt} = n * A_{Kollektor}$$

$$A_{Gesamt,Stadt} = 179.174 * 3{,}64m^2 = 652.192m^2$$

Um sich die Relationen für die benötigte Fläche vorstellen zu können, wurde die benötigte Kollektorfläche auf die gesamte Stadtfläche der Stadt Roth bezogen. Mit Hilfe des Bayernatlas konnte die Fläche der Stadt Roth grob überschlagen werden, wie in Abbildung 14 zu sehen ist.

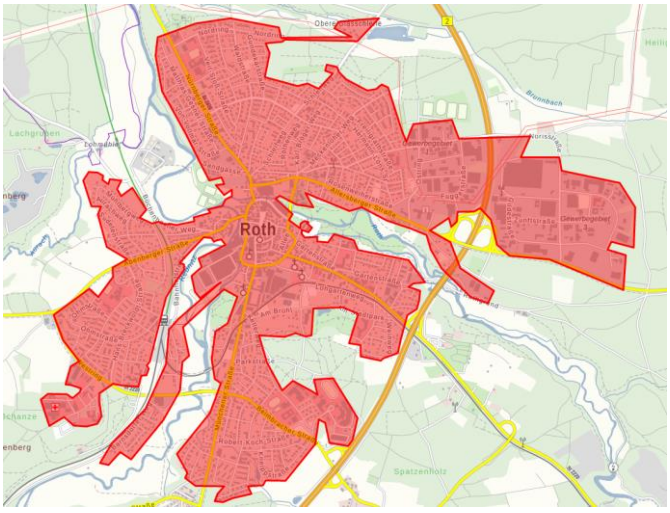


Abbildung 14: Stadtfläche von Roth

Die Fläche der Stadt Roth beträgt ca. 4,95 km². Der Kollektorflächenanteil würde demnach einen Anteil von ca. 13% der gesamten Stadtfläche benötigen.

10. Kostenabschätzung

Abschließend wird eine Kostenabschätzung für den gesamten Betrieb der Anlagen und des Wärmenetzes gemacht. Dazu wird die Kostenabschätzung in drei verschiedene Teilbereiche eingeteilt. In die Kostenbetrachtung der Kollektormodule, des Wärmenetzes und des Speichers. Für jeden dieser Teilbereiche werden die Investitionskosten, Kosten für Wartung, Instandhaltung und Annuitätskosten betrachtet.

10.1 Kostenbetrachtung Solarkollektoren

Für die Solarkollektoren wird ein durchschnittlicher Investitionspreis von 1.150€ pro Panel angenommen[7].

Berechnung der Gesamtinvestitionskosten:

$$Invest_{Kollektor} = n_{Kollektor} * 1150€$$

$$Invest_{Kollektor} = 179.174 * 1150€ = 206{,}4\ Mio\ €$$

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten sind kollektorartunabhängig und beträgt ca. 1% der Gesamtinvestitionskosten.[8] Daraus ergeben sich die folgenden Kosten:

$$Kosten_{Wartung/Instandhaltung} = Invest_{Kollektor} * 1\frac{\%}{a}$$

$$Kosten_{Wartung/Instandhaltung} = 206{,}4\ Mio\ € * 1\frac{\%}{a} = 2{,}1 Mio\ \frac{€}{a}$$

Außerdem sind Kosten für die Steuerung und Regelung der Anlagen mit einzubeziehen. Diese Kosten belaufen sich im Jahr auf 3% der gesamten Investitionskosten:

$$Kosten_{Regelung/Steuerung} = Invest_{Kollektor} * 3\frac{\%}{a}$$

$$Kosten_{Regelung/Steuerung} = 206{,}4\ Mio\ € * 3\frac{\%}{a} = 6{,}2\ Mio\ \frac{€}{a}$$

Für die Abschreibung und Finanzierung der Anlagen wurde mit einem festen Zinssatz von 5% gerechnet. Außerdem wurde die Abschreibe-Dauer auf 25 Jahre festgelegt. Es wurden die Annuitätenmethode als Abschreibungsmethode verwendet:

$$Annuität_{Kollektor} = \frac{(1+5\%)^{25} * 5\%}{(1+5\%)^{25} - 1} * Invest_{Kollektor}$$

$$Annuität_{Kollektor} = \frac{(1+5\%)^{25} * 5\frac{\%}{a}}{(1+5\%)^{25} - 1} * 206{,}4\ Mio\ € = 14{,}6\ Mio\ \frac{€}{a}$$

[7] Vgl. Heizungsdiscount 24 GmbH (2022): Röhrenkollektoren. Online verfügbar unter: https://www.heizungsdiscount24.de/solartechnik/viessmann-vakuum-roehrenkollektor-vitosol-300-tm-236-m-typ-sp3c.html?gclid=Cj0KCQjw8O-VBhCpARIsACMvVLODSj-O3aI489RrZh48x4PhqWhPJW5gMSeNDqYZh91TqsQpGJ6XqbIaAsvnEALw_wcB&cq_plt=gp&cq_net=u&cq_cmp=13242830342&cq_src=google_ads, zuletzt geprüft am 29.06.2022.

[8] Witte-Humperdinck, Nicolas Engelbert (2019): Untersuchung der Auswirkungen von Einspeisung erneurbarer Wärme auf KWK-Wärmenetze in urbanen Quartierstrukturen: S.74.

10.2 Kostenbetrachtung Wärmenetz

Die Investitionskosten für ein Wärmenetz können nur überschlagsmäßig ermittelt werden. Bei dieser Betrachtungsweise spielt der Siedlungstyp eine zentrale Rolle. Da für das Projekt keine genaue Aufschlüsselung der Häusergegebenheiten gemacht werden kann, wird überschlagsmäßig eine Gebäudedichte von 8,39 Gebäuden/ha angenommen. Das bedeutet, es handelt sich nach Wolff und Jagnow (2011), um einen Siedlungstyp II. Für diesen Fall werden die mittleren Leitungskosten auf 48.260€/ha geschätzt. [9]

Die Auswertung hat ergeben, dass die Stadt Roth eine Häuserfläche von 366 ha besitzt.

Die Investitionskosten ins Wärmenetz werden wie folgt berechnet:

$$Invest_{Wärmenetz} = A_{Stadtfläche} * Leitungskosten_{mittel/ha}$$

$$Invest_{Wärmenetz} = 366\ ha * 48.260 \frac{€}{ha} = 17{,}7\ Mio\ €$$

Die Kosten für die Instandhaltung werden auf 1% festgesetzt.[10]

$$Kosten_{Instandhaltung,Netz} = 1 \frac{\%}{a} * Invest_{Wärmenetz}$$

$$Kosten_{Instandhaltung,Netz} = 1 \frac{\%}{a} * 17{,}7\ Mio = 0{,}2\ Mio\ \frac{€}{a}$$

Bei der Abschreibung wurde genauso vorgegangen wie bei den Kollektoren. Die Abschreibe-Dauer belief sich auf 25 Jahre und es wurde ein fester Zinssatz von 5% angenommen.

$$Annuität_{Netz} = \frac{(1+5\%)^{25} * 5 \frac{\%}{a}}{(1+5\%)^{25} - 1} * Invest_{Wärmenetz}$$

$$Annuität_{Netz} = \frac{(1+5\%)^{25} * 5 \frac{\%}{a}}{(1+5\%)^{25} - 1} * 17{,}7\ Mio = 1{,}25\ Mio\ \frac{€}{a}$$

[9] Wolff, Dieter; Jagnow, Kati (2011): Untersuchung von Nah- und Fernwärmenetzen, S. 24.

[10] Witte-Humperdinck, Nicolas Engelbert (2019): Untersuchung der Auswirkungen von Einspeisung erneurbarer Wärme auf KWK-Wärmenetze in urbanen Quartierstrukturen: S.74.

10.3 Kostenbetrachtung Speicher

Die Baukosten, die für den Speicher anfallen, können für die Wärmebetrachtung vernachlässigt werden, da die Abschreibung der Investitionskosten schon von der Strombewirtschaftung geregelt wird.

10.4 Wärmegestehungskosten

Die gesamten Wärmegestehungskosten werden dann wie folgt berechnet:

$$Wärmegestehtungskosten = \frac{Gesamtkosten_{Kollektor} + Gesamtkosten_{Netz}}{Gesamtverbrauch_{Wärme}}$$

$$Wärmegestehtungskosten = \frac{22{,}9\ Mio\ € + 1{,}45\ Mio\ €}{172\ GWh} * 100\frac{ct}{€} = 14{,}4\frac{ct}{kWh}$$

$$Gesamtkosten_{Kollektor} = Kosten_{Wartung/Instandhaltung} + Kosten_{Regelung/Steuerung} + Annuität_{Kollektor}$$

$$Gesamtkosten_{Kollektor} = 2{,}1\ Mio\ € + 6{,}2\ Mio\ € + 14{,}6\ Mio\ € = 22{,}9\ Mio\ €$$

$$Gesamtkosten_{Netz} = Kosten_{Instandhaltung,Netz} + Annuität_{Netz}$$

$$Gesamtkosten_{Netz} = 0{,}2\ Mio\ € + 1{,}25\ Mio\ € = 1{,}45\ Mio\ €$$

Für das Gesamtsystem entstehen Wärmegestehungskosten von 14,2 $\frac{ct}{kWh}$.

11. Fazit

Die Grundidee die Wärmeversorgung einer Kleinstadt regenerativ mit Solarkollektoren zu versorgen, bietet eine umweltfreundliche Alternative zum herkömmlichen Fernwärmebezug. Die in Deutschland auftretenden Strahlungsleistungen sorgen für eine verlässliche Versorgungssicherheit in Kombination mit solarthermischen Anlagen. Auch wenn die im Winter auftretende Strahlungsleistung nicht ausreicht, den eigenen Haushalt vollständig mit Warmwasser zu versorgen, kann jeder Haushalt die hohen Versorgungsspitzen des eigenen Verbrauchs mit seiner Kollektoranlage abfedern und die persönlichen Kosten senken.

Mit lediglich 13% der Stadtfläche lässt sich die Mindestwärmeversorgung realisieren, bei Vergrößerung der Deckfläche würde sich der Speicher verkleinern. Damit sinken seine spezifischen Verluste, die an seine Außenfläche gebunden sind. Die Wärmegestehungskosten von 14,2 ct/kWh sind in der heutigen Marktlage nicht konkurrenzfähig, dennoch handelt es sich dabei um eine emissionsfreie Möglichkeit Wärme zu erzeugen, zu speichern und am Ende auch wieder zu nutzen. Wenn die Klimaneutralität bis 2045 hergestellt werden soll, braucht es Gesamtlösungen, die verlässlich die Energie liefern können, die benötigt wird.

Für die Wärmegestehungskosten ist anzumerken, dass bei der Betrachtung mehrere Faktoren nicht berücksichtigt worden sind. Zum Beispiel können durch Bauförderungen für Solarthermieanlagen und Wärmepumpen, bis zu 30% der Kosten gespart werden. Diese Förderbestimmungen wurden in diesem Projekt nicht berücksichtigt.[11]

[11] Witte-Humperdinck, Nicolas Engelbert (2019): Untersuchung der Auswirkungen von Einspeisung erneurbarer Wärme auf KWK-Wärmenetze in urbanen Quartierstrukturen: S.175.

12. Literaturverzeichnis

Heizungsdiscount 24 GmbH (2022): Röhrenkollektoren. Online verfügbar unter: https://www.heizungsdiscount24.de/solartechnik/viessmann-vakuum-roehrenkollektor-vitosol-300-tm-236-m-typ-sp3c.html?gclid=Cj0KCQjw8O-VBhCpARIsACMvVLODSj-O3aI489RrZh48x4PhqWhPJW5gMSeNDqYZh91TqsQpGJ6XqbIaAsvnEALw_wcB&cq_plt=gp&cq_net=u&cq_cmp=13242830342&cq_src=google_ads, zuletzt geprüft am 29.06.2022.

Matthias Popp Ingenieurbüro (2014): Online verfügbar unter: http://www.poppware.de/Stuelpmembranspeicher/index.htm, zuletzt geprüft am 22.08.2022.

Quasching, Volker (2019): Regenerative Energiesysteme. 10., aktualisierte und erweiterte Aufl. Regensburg, Hanser.

Solarbayer GmbH (2022): Die Kollektorgleichung. Online verfügbar unter: https://www.kollektorleistung.de/Kollektorgleichung.html, zuletzt geprüft am 29.06.2022.

Wind Lexikon (2022): Online verfügbar unter: https://www.wind-lexikon.de/cms/lexikon/97-lexikon-m/1340-merra.html, zuletzt geprüft am 29.06.2022.

Witte-Humperdinck, Nicolas Engelbert (2019): Untersuchung der Auswirkungen von Einspeisung erneurbarer Wärme auf KWK-Wärmenetze in urbanen Quartierstrukturen.

Wolff, Dieter; Jagnow, Kati (2011): Untersuchung von Nah- und Fernwärmenetzen.