

# Parabolrinnenkollektoren zur solarthermischen Wärmeversorgung im Gewerbe

Maximilian Pittermann<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing Wolfgang Woyke

FH Kufstein Tirol, Andreas Hofer-Straße 7 6330 Kufstein, m.pittermann@outlook.de

## Kurzfassung:

Die Anwendung von konzentrierender Solarthermie mittels Parabolrinnenkollektoren zur solaren Wärmeversorgung findet in Deutschland bisher kaum Anwendung. Zurückführen lässt sich dies auf die Annahme, dass die Direktstrahlung in Deutschland zu gering ist und die Technologie noch nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Zielsetzung dieser Arbeit ist es daher, die Eigenschaften von Parabolkollektoren bezogen auf Wärmeerträge aufzuzeigen sowie die Kostenstruktur einer ersten Pilotanlage zu analysieren. Methodisch wird dabei ein Vergleich zu den am Markt eingeführten Technologien der Solarthermie im Hinblick auf Erträge und Kosten angestellt. Für die Analyse der Kosten werden für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Investitions- und Betriebskosten ermittelt und auf ihre zukünftigen Kostensenkungspotenziale im Massenmarkt hin untersucht. Hierfür werden durch Interviews diejenigen Kostenpositionen identifiziert, die Potenziale versprechen, in ihrem Ausmaß eingeschätzt und ihr Einfluss auf die Wärmegegestehungskosten in einer Sensitivitätsanalyse in verschiedenen Szenarios quantifiziert. Für den Vergleich werden der neuen Parabolkollektoren zu den marktgängigen Flach- und CPC-Kollektoren werden die Betriebstemperaturen von 75°C und 100°C einer geplanten Anlage herangezogen. Neben dem Vergleich der Wärmeerträge selbst werden die Vollkosten der Wärmeherzeugung (Levelized Costs of Heat LCOH) bei einer Temperaturspanne zwischen 25°C und 100°C ausgewertet.

Die Analyse und Simulation der Kostenstruktur zeigt, dass das Kostensenkungspotential bei den Investitions- und Personalkosten der Wartungskosten beträchtlich ist. In beiden Fällen um ca. -1/3 der bisherigen Kosten. Derzeit erfordern die hohen Investitionskosten noch staatliche Förderung, Wartung und Betrieb ist dagegen auch ohne weitere Förderung wirtschaftlich. Beim Vergleich der Wärmeerträge zeigt sich der Vorteil der konzentrierenden Parabolkollektoren gegenüber den marktgängigen Systemen. Bereits bei Temperaturen ab 75°C liefern die Parabolkollektoren Mehrerträge im Vergleich zu CPC-Kollektoren. Bezogen auf Flachkollektoren ist die Temperaturgrenze sogar bei 50°C. Werden die Vollkosten der Wärmeherzeugung betrachtet, können ab ca. 72°C niedrigere Kosten im Vergleich zu CPC-Kollektoren erreicht werden.

Sollte sich die Einschätzung der Zuverlässigkeit und der Kostensenkungspotenziale in den Betriebserfahrungen der Pilotanlagen, die derzeit errichtet werden, bestätigen, so könnte konzentrierende Solarthermie mit Parabolrinnenkollektoren eine wichtige Rolle für die Temperaturbedarfe von Gewerbesektoren bei höheren Temperaturen einnehmen.

---

<sup>1</sup> Jungautor

**Keywords:** Concentrated Solar Thermal (CST), Parabolrinnenkollektoren, Wärmewende, konzentrierende Solarthermie in Deutschland, Wärmeversorgung

## 1 Ausgangslage

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmebereitstellung hat in den letzten Jahren wenig Fortschritte gezeigt und liegt deutlich abgeschlagen hinter der Entwicklung von elektrischem Strom. Mit Stand des Jahres 2020 sind 15,2% des Gesamtwärmebedarfs aus erneuerbaren Energien erzeugt worden. Das entspricht einem Drittel von dem, was der Stromsektor bereits erreicht hat. Dabei trägt der Wärmesektor deutlich mehr zum Endenergieverbrauch bei als der Stromsektor (siehe Abbildung 1). (Umweltbundesamt, 2021) Dies unterstreicht den Handlungsbedarf, den Wärmesektor umzustellen, um die klima- und umweltpolitischen Ziele zu erreichen. Hierzu können konzentrierende solarthermische Parabolrinnenanlagen (CST Concentrating Solar Thermal) einen Beitrag leisten. Im deutschen und mitteleuropäischen Wärmemarkt werden derzeit erste Pilot- und Demonstrationsanlagen konzipiert und errichtet. Begleitend zu einem Pilotprojekt wurde im Rahmen einer Masterarbeit im Studiengang „Europäische Energiewirtschaft“ an der Fachhochschule Kufstein-Tirol die Wirtschaftlichkeit und die energiewirtschaftlichen Perspektiven dieser Technologie untersucht und bewertet.

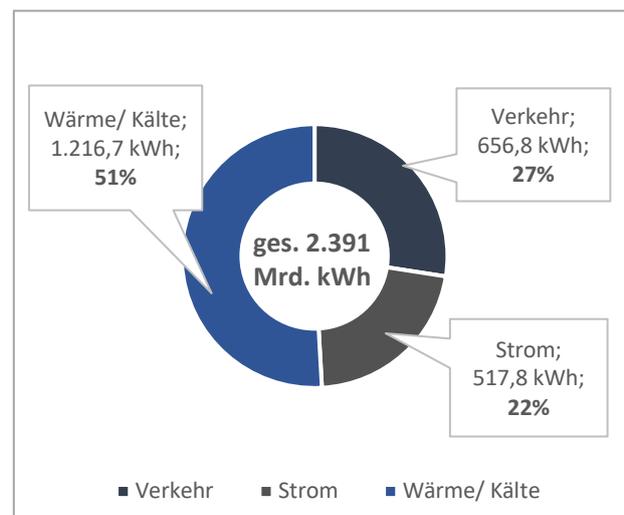


Abbildung 1 Endenergieverbrauch 2019 nach Sektoren (Agentur für Erneuerbare Energien, o.J.)

## 2 Methodisches Vorgehen

Im ersten Schritt werden durch Interviews mit Experten Einschätzungen über die Höhe der verschiedenen Kostenbestandteile insbesondere für den Betrieb derartiger Anlagen eingeholt. Neben der daraus abgeleiteten Kostenstruktur ergibt sich daraus auch eine Einschätzung der Kostensenkungspotenziale in einem späteren Massenmarkt.

In dieses Kostenmodell fließen zusätzlich erste Ergebnisse aus der Konzeption und der Beschaffung erster Komponenten für eine Pilotanlage in Deutschland ein, die dieses Jahr Baubeginn hat. Das Kostenmodell gliedert sich in Investitionskosten (Capex) und der Betriebskosten (Opex) und ist Basis für die Bewertung der Projektrentabilität ausgehend von den zu erwartenden Cash-Flows. Da diese Wärmeerzeugung direkt an den Verbraucher gebunden ist, ist die Preisbildung für die Wärmedienstleistung nicht exogen vorgegeben. Die energiewirtschaftliche Bewertung erfolgt daher in einer Opportunitätsbetrachtung gegenüber geeigneten Vergleichstechnologien. Dies sind konkurrierende Technologien, welche im Sektor

der Wärme- und Kälteversorgung die Flachkollektoren<sup>2</sup> und CPC Vakuum-Röhrenkollektoren<sup>3</sup> sind. Dafür werden öffentlich zugängliche Produktdatenblätter ausgewertet um spezifische Wärmeerträge bis Temperaturen von 75°C zu ermitteln. Da für die Anwendung Temperaturen bis 100°C von Relevanz sind, werden mittels des Simulationsprogramms ScenoCalc die Wärmeerträge dieser solarthermische Kollektoren auf dieses Temperaturniveau extrapoliert. Damit liegen spezifische Wärmeerträge für folgende Temperaturen vor: 25°C, 50°C, 75°C, 85°C, 95°C, 100°C. Erträge der dazwischenliegenden Temperaturen werden durch eine lineare Interpolation errechnet.

Diese Erträge bilden die Grundlage für den Vergleich der durchschnittlichen Wärmegestehungskosten, den Leveliced Cost of Heat (LCOH).

### 3 Die CST-Pilotanlage in Deutschland

Konzentrierende solarthermische Parabolrinnenanlagen finden bisher kaum Anwendung in Deutschland bzw. Mitteleuropa. Im asiatischen Raum gibt es dagegen erste Erfahrungen. Die im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern ansässige Firma Solarlite CSP Technology GmbH entwickelt, produziert und baut dezentrale solarthermische Parabolrinnen-Kraftwerke (Concentrated Solar Power) zur Erzeugung von Strom oder Prozesswärme für den industriellen Einsatz. Das Unternehmen setzt weltweit erstmalig die Direktverdampfung kommerziell in einem Kraftwerk ein. Aus dieser Erfahrung heraus und aus der Gewissheit, dass die Strahlungspotenziale zur Anwendung auch in Deutschland ausreichen, entstand die Idee, ein Pilotprojekt zu errichten.

Aus diesem Grund wird im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern eine erste Parabolrinnenanlage in Deutschland errichtet, um einen Wärmeabnehmer mit solarer Wärme und Kälte zu versorgen. Geplant wird mit einer installierten Leistung von 6,0 MW<sub>th</sub> gekoppelt an ein Saisonalwärmespeicher, der in den Sommermonaten in 45.000 m<sup>3</sup> ca. 2.500 MWh<sub>th</sub> speichert. Auf 4,0 ha Fläche, wird das Kollektorfeld mit über 13.900 m<sup>2</sup> errichtet, inklusive Speicher, Gaskessel (Redundanzsystem) sowie die Energieübergabestation.

Die Kosten für das Solarfeld belaufen sich auf ca. 330,00 €/m<sup>2</sup>. Um einen wirtschaftlichen Betrieb zu erreichen, profitiert die Anlage von noch hohen staatlichen Förderprogrammen, wodurch mit einer Förderquote der Investitionskosten von insgesamt 65,0% gerechnet wird. Zukünftig sollen Kosteneinsparungen der Investitionskosten von ca. 1/3 möglich sein, wodurch diese Anlagen auch in einem förderfreien Szenario wirtschaftlich Energie erzeugen sollen.

---

<sup>2</sup> Bei einem Flachkollektor handelt es sich um einen Solarkollektor, der die eintreffende Sonnenstrahlung in Wärmeenergie umwandelt. Unter einer transparenten Abdeckung befinden sich Bleche, die die Wärme auf eine Trägerflüssigkeit zur weiteren Nutzung abgeben. (Thermondo, 2021)

<sup>3</sup> CPC-Kollektoren (Compound Parabolic Conentrator) sind solarthermische Kollektoren mit parabolischen Spiegeln, die die Strahlung auf ein Absorberrohr bündeln. Dabei befinden sich die Spiegel hinter den Absorbern im inneren des Kollektors. (Solarthermie.net)

Betriebskostenseitig wird mit insgesamt 4,64 €/m<sup>2</sup>/a (ohne Pacht) gerechnet. Hier sind nicht im ähnlich hohen Ausmaß, wie bei den Capex, Kostensenkungen zu erwarten, da die Kosten bereits auf einem konkurrenzfähigen Niveau sind. Lediglich in den Personalkosten der O&M-Kosten können durch höhere Auslastungen der Unternehmen niedrigere Preise erzielt werden, wodurch Kosteneinsparungen erreicht werden.

Die nachstehende Abbildung 2 zeigt die Verteilung der nutzbaren Wärmeleistung am Anlagenstandort. Es ist zu sehen, dass die Sommermonate die Ertragsreichsten sind, in denen auch der Saisonspeicher aufgeladen wird.

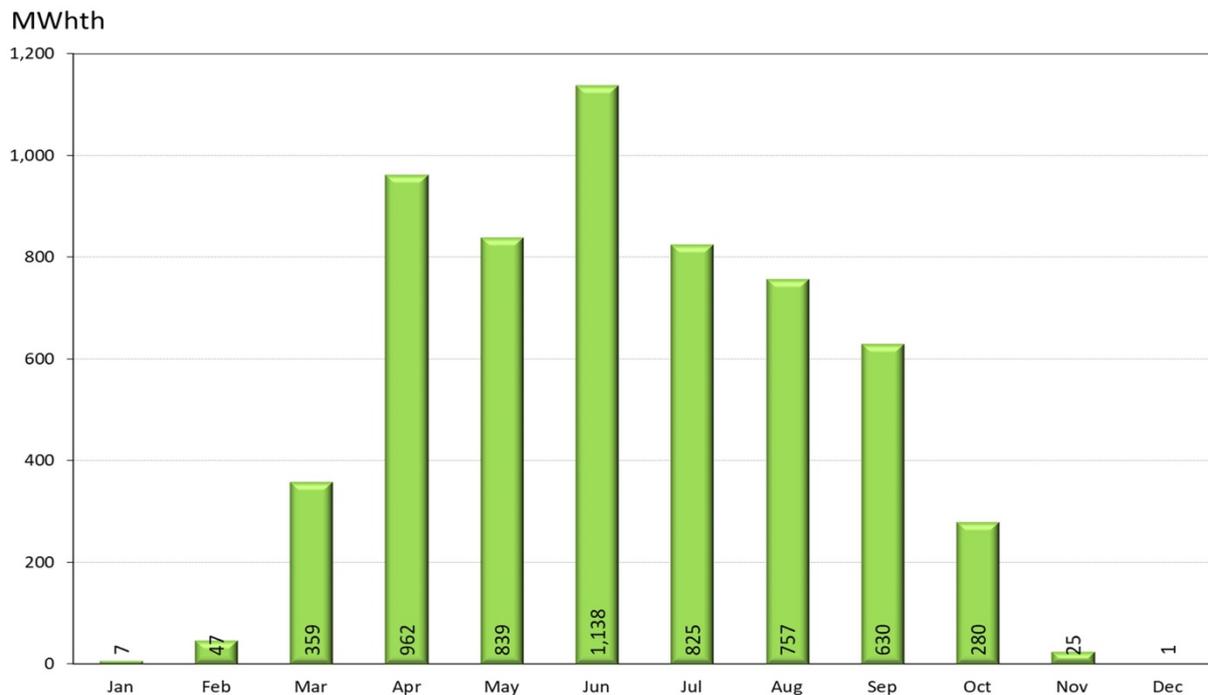


Abbildung 2 Monatlich nutzbare Wärmeleistung des Solarfeld (in MWhth) (Quelle: Solarlite CSP Technology)

#### 4 Qualitativer Vergleich von Flachkollektor und Parabolkollektor

Bei neuen Technologien stellt sich zunächst die Frage nach dem spezifischen Vorteil und worin Vorteile im Gegensatz zu bereits etablierten Technologien bestehen. So ist dies auch in Bezug auf Parabolrinnenkollektoren eine zentrale Fragestellung, wie und wie weit sich die Parabolrinnenkollektoren zu den verbreiteten Flach- und CPC-Kollektoren unterscheiden und Verbesserungen möglich sind.

Parabolrinnenkollektoren könnten prinzipiell bereits ab Temperaturen von 55°C vorteilhaft sein. Bei der Betrachtung der benötigten Temperaturen muss allerdings das Gesamtsystem berücksichtigt werden, das mit Wärme versorgt werden soll. Wird lediglich Warmwasser benötigt, reicht in den meisten Fällen ein Flach- oder CPC-Kollektor aus. Diese Technologien sind weniger aufwändig und daher bei diesen Temperaturniveaus kostengünstiger in Investition und Betrieb. Ist eine Kälteversorgung mit in Planung, werden höhere Temperaturen zum Betrieb der Kältemaschine benötigt. Einstufige Kältemaschinen benötigen Temperaturen bis 90°C für einen reibungslosen Betrieb. Bei Zweistufigen Kältemaschinen werden bereits 150-160°C benötigt.

In der Praxis werden Flachkollektoren für Temperaturen von 30-50°C eingesetzt und erreichen einem Wirkungsgrad von ungefähr 65%. Vakuumröhrenkollektoren erreichen demgegenüber bis zu 120°C, aber nur noch einen Wirkungsgrad von 30%. Aufgrund von thermischen Verlusten sinkt der Ertrag darüber hinaus deutlich weiter ab.

Bei Parabolrinnenkollektoren ist ein optischer Wirkungsgrad von 76% möglich. Dieser reduziert sich mit höher werdenden Temperaturen etwas, ebenso wie der jährliche Ertrag. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass mit höher werdenden Temperaturen in den Kollektoren auch die Wärmeverluste an die Umgebung steigen. Flachkollektoren haben vergleichsweise große Oberflächen über die viel Wärme abgegeben bzw. verloren wird. Parabolrinnenkollektoren haben hier gegenüber Flachkollektoren den entscheidenden Vorteil, dass der Absorber eine sehr geringe Oberfläche hat und dadurch deutlich weniger Wärme verloren gehen kann. Ein weiterer Vorteil ist der höhere Strahlungsertrag an Direktstrahlung durch die Ausrichtung und Nachführung von Parabolrinnenkollektoren.

Die Ausrichtung von Flachkollektoren ist häufig starr nach Süden gerichtet, wodurch mittags am meisten Sonneneinstrahlung eintreffen kann. Morgens und abends sinkt der Strahlungsertrag deutlich ab. Durch die feste Montage der Flachkollektoren wird bei vorhandener Einstrahlung immer Wärme produziert. Die Anlage kann durch die fehlende variable Nachführung die Kollektoren nicht aus der Sonne drehen. Dadurch wird unabhängig vom Bedarf Wärme produziert, was zu einem höheren Verschleiß der Komponenten führt. Ein konzentrierendes System hat den Vorteil, dass bei fehlendem Bedarf die Spiegelflächen gemäß dem Wärmebedarf gesteuert werden können und abhängig des Wärmebedarfs produziert werden kann. Die einachsige nachgeführten Parabolrinnenkollektoren haben über den Tagesgang eine besser verteilte Wärmeproduktion, da dem Sonnenstand im Tagesverlauf gefolgt wird. In der Mittagszeit trifft infolge der horizontalen Aufstellung allerdings die Sonne nicht optimal auf die Kollektoren, weshalb zu dieser Zeit geringere Erträge generiert werden als bei reinen südausgerichteten Systemen.

Durch die Nord-Süd- Ausrichtung weisen die Parabolkollektoren eine bessere bzw. gleichmäßigere Wärmeverteilung auch über das Jahr auf. Zu Zeiten in denen die Diffusstrahlung der Direktstrahlung überwiegt, ist der Flachkollektor von Vorteil. Über das Jahresband gesehen kann jedoch, abhängig der Betriebstemperatur, der Parabolkollektor vorteilhaft sein. Zwar sind in den Übergangszeiten der Jahre die Flachkollektoren besser, hingegen haben Parabolkollektoren ein ausgeprägteres Sommerpeak, was bei benötigten Temperaturen von beispielsweise 95°C zu einem besseren Gesamtjahresertrag führt. In niedrigen Temperaturbereichen sind Flachkollektoren besser. Diese liefern dabei im Vergleich zu Parabolkollektoren höhere Gesamtjahreserträge. Aber auch bei niedrigen Temperaturen liefern die Parabolrinnenkollektoren einen gleichmäßigeren Ertrag, der konstant auch in höheren Temperaturbereichen erreicht werden kann.

Wird der Sektor Fernwärme betrachtet liefert der Parabolrinnenkollektor Vorteile. Häufig werden dafür Temperaturen von 70-140°C benötigt und sogar je nach Jahreszeit bis zu 160°C. Dies sind Temperaturbereiche, für die sich Flachkollektoren nicht eignen und daher mit weiteren Wärmequellen ergänzt werden müssen. Fernwärme ist ein Sektor mit bestehender Infrastruktur, der über die letzten Jahre und Jahrzehnte aufgebaut wurde und oftmals nicht mit Niedertemperatur betrieben wird. Es würde mit erheblichen Kosten verbunden sein, diese bereits installierte Infrastruktur dahingehend umzubauen. Des Weiteren besteht diese

Problematik auch auf kundenseitiger Infrastruktur. Würde die Fernwärme auf Niedertemperatur umgestellt, wären auch die angebotenen Kunden von Umbaumaßnahmen ihres Heizungssystems betroffen. Neubaugebiete hingegen könnten direkt von Anfang an auf Niedertemperatur ausgerichtet werden.

Neben den technischen Aspekten, bieten Parabolkollektoren ebenso Vorteile gegenüber Flachkollektoren für Insekten und Vögel. Parabolrinnen werden nicht heiß, wodurch Insekten und Vögel ohne Gefahr auf den Anlagen landen können. Außerdem wird durch den Parabolrinnenkollektor nicht dauerhaft eine Fläche verschattet. Statisch aufgebaute Kollektoren wie PV- oder Flachkollektoren verschatten bei einer festen Aufständigung dauerhaft dieselbe Fläche. Die Parabolrinne hingegen bewegt sich über den Tagesverlauf, wodurch der Schatten nie immer nur eine Stelle trifft, sondern mitwandert. Dies ist ein ähnlich bewegter Schattenwurf wie von Bäumen oder Sträuchern. Unter den Parabolrinnen ist somit ein natürlicher Bewuchs möglich und es können sensible Pflanzen angebaut werden, die auf zeitweilige Verschattung angewiesen sind. Eine hohe Aufständigung der Parabolrinnenkollektoren ist ebenfalls kein Problem, um die darunterliegende Fläche für Viehhaltung etc. nutzbar machen zu können. Dabei muss jedoch die zulässige Windlast der Anlage berücksichtigt werden und gegebenenfalls Windzäune zur Reduktion der Windlast gebaut werden.

## 5 Kollektorerträge im Vergleich

Bei der Anwendung von solarthermischen Anlagen sind die erreichbaren Temperaturen mit zugehörigen Erträgen zentraler Betrachtungspunkt. Liefert eine Technologie nicht in einem gewissen Ausmaß die vorgesehenen Temperaturen, eignet sich deren Anwendung nicht. Häufig kann ein Großteil der erzeugten Wärme nicht für den vorgesehenen Zweck genutzt werden, weil die Temperaturen zu gering sind und die hohen benötigten Temperaturen an zu wenig Stunden bereitgestellt werden können.

Aus diesem Grund wird eine Analyse der verschiedenen Kollektortemperaturen mit dazugehörigem jährlichem Wärmeertrag durchgeführt. Dafür werden Datenblätter von Solar Keymark herangezogen. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden verschiedene Kollektortechnologien ausgewertet. Grundlegend beschränkt sich die Gegenüberstellung der Parabolrinnenkollektoren auf Flachkollektoren und CPC- Kollektoren. Da der Markt sehr diversifiziert ist und auch viele Anbieter mehrere Kollektortypen anbieten, werden die effizientesten Kollektortypen für den Vergleich heran gezogen. Der Blog „Paradigma“ hat eine Liste veröffentlicht, in der erstmalig sämtliche Kollektoren mit ihren Erträgen bei 75°C erfasst sind. (Ritter Energie- und Umwelttechnik, 2016) Für den Vergleich wird auf die zu erreichenden Temperaturen bzw. den jährlichen Ertrag geachtet. Die folgenden Kollektoren werden weiter betrachtet, wobei darauf hingewiesen wird, dass die Auswahl zunächst keinen ökonomischen Aspekten berücksichtigt wurde.

Tabelle 1 Ausgewählte Kollektoren für den Systemvergleich

Technologie		Hersteller	Typ
Flachkollektor	Hochvakuum	TVP Solar	MT-Power v4
	Antireflexglas	Wagner Solar	EURO L20 AR
	Hochtemperatur	Arcon Sunmark	HTHEATstore 35/08
	Hocheffizient	Savosolar	SF500-15SG-M
CPC-Kollektor	-	Kloben Industries	G 22-0
	Aqua-Solar System	Ritter Energie- und Umwelttechnik	XL 19/49
	Aqua-Solar System	Ritter Energie- und Umwelttechnik	XL 15/39
Parabolkollektor	-	Solarlite	SL 5770

Die Simulation in ScenoCalc wurde für jeden Kollektor mit Ausnahme des Solarlite Parabolrinnenkollektor durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die die spezifischen Wärmeerträge bezogen auf ein Kalenderjahr und die Kollektorfläche.

Tabelle 2 Spezifische Wärmeerträge in kWh/m<sup>2</sup>/a

	25°C	50°C	75 °C	85°C	95°C	100°C
<b>TVP Solar MT-Power v4</b>	843	769	683	646	608	588
<b>Wagner EURO L20 AR</b>	737	494	304	247	193	168
<b>Arcon HTHEATstore 35/08</b>	773	591	432	366	316	292
<b>Savosolar SF500-15SG-M</b>	839	600	406	329	272	245
<b>Kloben Aton G 22-0</b>	742	646	552	498	461	443
<b>Ritter XL 19/49</b>	773	669	580	542	500	478
<b>Ritter XL 15/39</b>	697	626	533	493	450	429
<b>Solarlite SL 5770</b>	600	600	600	600	600	600

In einer ersten näherungsweisen Betrachtung ist der spezifische Wärmeertrag von konzentrierenden Parabolrinnenkollektoren als unabhängig vom Temperaturniveau angesetzt.

Durch lineare Interpolation der spezifischen Wärmeerträge werden die Ertragswerte näherungsweise ermittelt. In Abbildung 3 sind die gesamten Ergebnisse graphisch dargestellt:

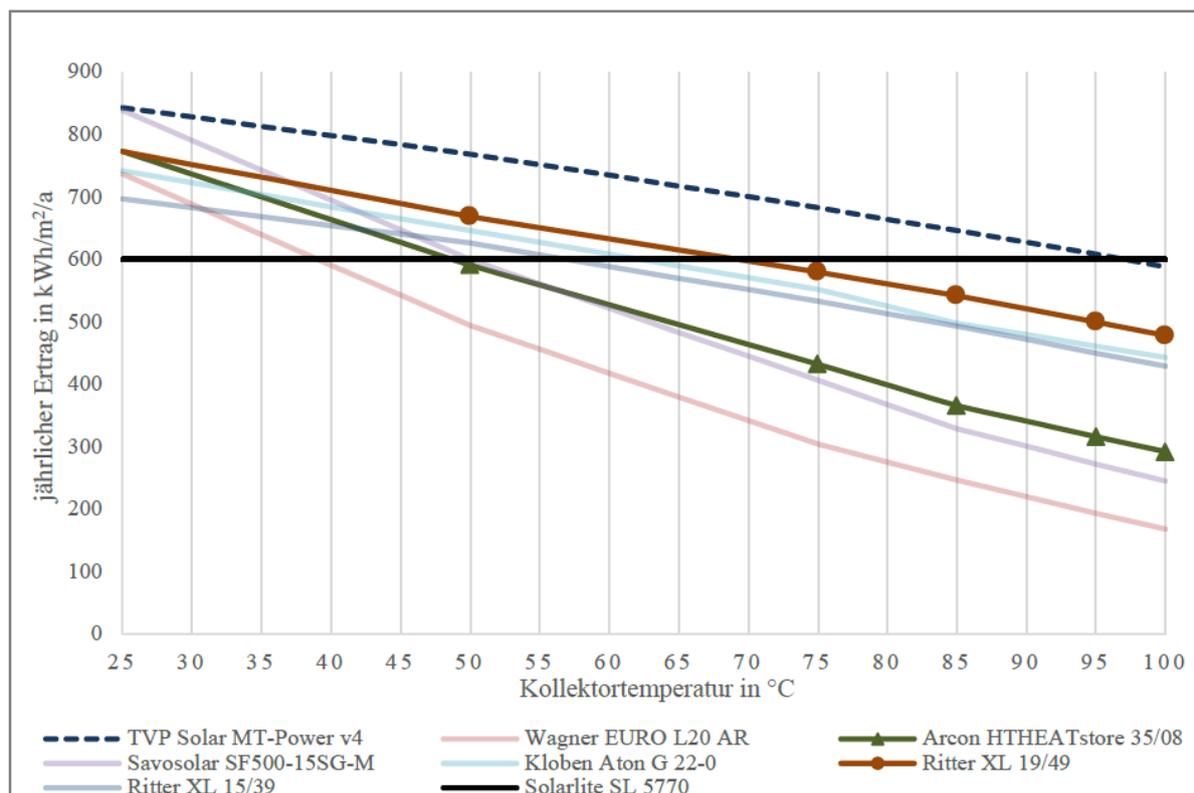


Abbildung 3 Vergleich verschiedener Kollektorerträge in kWh/m²/a

Der effizienteste Flachkollektor in diesem Vergleich ist der Hochvakuum- Kollektor von TVP Solar. Bei 25°C erreicht dieser den Bestwert im Vergleich und weist geringe Verluste bis zu einem Ertrag von 588 kWh/m²/a auf. Damit wird jeder CPC-Kollektor in diesem Vergleich übertroffen. Wird der Schnittpunkt zum Parabolkollektor betrachtet, zeigt sich, dass bis ca. 97°C mehr Wärme mit diesem Flachkollektor produziert werden kann. Bei Betriebstemperaturen von mehr als 97°C liefert laut den Berechnungsergebnissen der Parabolrinnenkollektor höhere Erträge. Generell lässt sich für Flachkollektoren feststellen, dass relativ hohe Erträge bei 25°C erreicht werden, aber der Abfall der Ertragskurve sich steiler abbildet als bei den CPC-Kollektoren. Die Ertragskurven der CPC-Kollektoren nähern sich hingegen der des Parabolrinnenkollektors an. Anfängliche Erträge bei 25°C sind zwar gleich oder niedriger verglichen mit den Flachkollektoren, der Ertragsabfall ist aber deutlich geringer als bei den betrachteten Flachkollektoren, ausgeschlossen den TVP Solar Hochvakuumkollektor. Dies wird deutlich, wenn in Abbildung 3 die Entwicklung der Erträge bis 100°C verglichen werden. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass CPC- Kollektoren ab 30-47°C Betriebstemperatur höhere Erträge als ein Flachkollektor bei gleicher Aperturfläche und Strahlungsverhältnissen liefern. Die Untersuchung der Erträge des Parabolrinnenkollektors zeigt, dass ab 50°C höhere Erträge erzeugt werden als der beste Flachkollektor (ausgeschlossen des TVP-Kollektors) im Vergleich. Abgeleitet werden kann dies durch den letzten Schnittpunkt der Ertragskurve der Parabolrinne mit den verglichenen Flachkollektoren. Bei ca. 38°C wird die Kurve des Wagner Solar Flachkollektor geschnitten, womit ab dieser Betriebstemperatur die Parabolrinne höhere Erträge liefert.

Wird der Vergleich zu den CPC-Kollektoren gezogen, wird ersichtlich, dass diese höhere Erträge generieren können als die verglichenen Flachkollektoren (in Abbildung 3 dargestellt,

ausgeschlossen der TVP-Kollektor). Somit wird die Kurve des Parabolrinnenkollektors bei höheren Betriebstemperaturen geschnitten als bei den Flachkollektoren. Der effizienteste Kollektor im aufgeführten Vergleich ist der Ritter Solar XL 19/49. Bis ca. 70°C Betriebstemperatur liefert dieser höhere Erträge als der verglichene Parabolrinnenkollektor. Die Schwankungsbreite der Spanne, ab der der Parabolrinnenkollektor höhere Erträge liefert, ist ähnlich zu den Flachkollektoren. Beginnend bei 57°C wird der Ritter XL 15/39 in Bezug auf die Jahreserträge vom Solarlite SL5770 übertroffen. Damit kann der Parabolkollektor ab 57°C höhere Jahreserträge liefern.

## 6 Kosten der Kolleorttechnologien

### 6.1 Investitionskosten für Parabolrinnenkollektoren:

Aus den Befragungen gingen verschiedene Aussagen bezüglich der Investitionskosten (Capex) für Parabolrinnenkollektoren hervor. Von den Experten wurden Capex in einer Spanne von 230-450 €/m<sup>2</sup> genannt. Verglichen mit den Capex des Parabolrinnenkollektors des Pilotprojektes i.H.v. 330 €/m<sup>2</sup>, liegen diese in der Mitte der genannten Preisspanne und bestätigen die Abschätzung der Experten. Im Allgemeinen sind die Capex auch von der Betriebstemperatur und dem Betriebsdruck abhängig. Höhere Drücke und Temperaturen führen zu teureren Komponenten im Bereich der Pumpen, Ausdehnungsgefäßen und Ventilen. Außerdem führen höhere Temperaturen zu teureren Anlagenkomponenten (Spiegel, Absorber, Beschichtungen, ...). Des Weiteren können Kostensteigerungen auftreten, wenn Anlagen eingekürzt oder umfangreichere Fundamente gebaut werden müssen. Eine Kürzung der Anlage kann auftreten, wenn das vorgesehene Grundstück nicht die entsprechende Länge bzw. Breite besitzt, um die volle Anlagenlänge zu errichten. So müssten unter Umständen weniger Anlagensegmente verbaut werden als geplant. Dies führt zu höheren Planungskosten und auf die Gesamtanlage gesehen müssen prozentual mehr Antriebe für die Nachführung installiert werden.

Parabolrinnenkollektoren haben bereits in den letzten Jahren deutliche Kostenreduktionen erfahren. In den letzten 10 Jahren sind die Kosten für Parabolrinnenkollektoren um ca. 50% zurückgegangen. In Zukunft sollen noch weitere Senkungspotentiale vorhanden sein. So können zukünftig noch schätzungsweise weitere 30% möglich sein. Ziel soll es sein, dass die Anlagen in Preisbereiche von Flachkollektoren kommen. Dies kann durch Skaleneffekte bzw. Massenproduktion möglich gemacht werden.

### 6.2 Kosten und Erträge für Flachkollektoren und CPC-Kollektoren:

Im Gegensatz zu Parabolrinnenkollektoren sind Flach- und CPC-Kollektoren bereits deutlich länger und etabliert am Markt. Es sind nicht nur Investitionskosten sondern auch Kosten für Betrieb und Unterhalt bekannt (OPEX). Mittlerweile hat sich die Anwendung von privaten Kleinanlagen zu Großflächenanlagen für die Nah- und Fernwärmeversorgung durchgesetzt. Ritter XL Solar, ein Hersteller und Projektentwickler von CPC-Kollektoren, hat in den letzten Jahren die meisten großflächigen CPC-Kollektorfelder realisiert und nutzt ihre CPC-Kollektoren zur Lieferung von Wärme in Nah- und Fernwärmenetze. (Ritter XL Solar, 2020)

Tabelle 3 listet die Investition- und Betriebskosten in Abhängigkeit der Anlagengröße für CPC-Kollektoren auf:

Tabelle 3 Capex und Opex von CPC-Kollektoren (Ritter XL Solar, 2020)

	m <sup>2</sup>	500	1.000	5.000	10.000	25.000
<b>Capex</b>	€/m <sup>2</sup>	650	450	375	350	325
<b>Opex</b>	€/m <sup>2</sup> /a	5,20	3,60	3,00	2,80	2,60
<b>Ertrag*</b>	MWh/a	237,5	475	2.375	4.750	11.875

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Kollektorfläche die spezifischen Investitionskosten erheblich sinken, ebenso die Betriebskosten.

Für Flachkollektoren ging aus den Befragungen eine Preisspanne von ca. 150-200 €/m<sup>2</sup> für Flachkollektoren ohne Peripherie hervor. Für schlüsselfertige Anlagen liegt die Preisspanne bei 200-500 €/m<sup>2</sup>. Jedes Jahr wird vom Baden-Württembergischen Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft ein Leitfaden veröffentlicht, der mit verschiedene Autorenbeiträge über verschiedene Punkte in Bezug auf Freiflächensolaranlagen informiert. Im letzten veröffentlichten Leitfaden wurden aktuelle Kosten für Hochtemperatur Flachkollektoren genannt. Bei einem Kollektorfeld von 10.000 m<sup>2</sup> fallen demnach für schlüsselfertige Anlagen Kosten von 221,40 €/m<sup>2</sup> an. Betriebskosten fallen bei einer Anlage in dieser Größe von 333.000 €/a bzw. 33,30 €/m<sup>2</sup> an und Planungskosten von 12,70 €/m<sup>2</sup>. (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2019, S. 27)

## 7 Vollkostenvergleich der Wärmediensleistung

### 7.1 Levelised Cost of Heat (LCOH)

Die Vollkosten der Wärmeerzeugung (engl. Levelised Cost of Heat) sind ein Berechnungsverfahren, um die Kosten für eine Kilowattstunde Wärme zu ermitteln. Dies wird über die gesamte Projektlaufzeit und unter Berücksichtigung aller Kosten ermittelt. Im IEA SHC Task 54 wurde die Formel der LCOH vereinfacht, da teilweise nicht alle Parameter bei jedem Projekt vorhanden sind, aber trotzdem eine einheitliche Berechnungslogik wesentlich ist. Daher wurden der Zinssatz, die Körperschaftssteuer, Abschreibung und Restwert auf null gesetzt. Die vereinfachte Formel sieht wie folgt aus und wurde auch für die Vergleichsberechnungen herangezogen (Fischer, 2017):

$$LCOH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T C_t}{\sum_{t=1}^T E_t} \quad \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Investitionskosten (€) →  $I_0$

Wartungs und Betriebskosten (€/a) →  $C_t$

Betrachtungszeitraum (Jahre) →  $T$

Wärme bzw. eingesparte Energie (kWh/a) →  $E_t$

Abbildung 4 Vereinfachte LCOH-Berechnung (Fischer, 2017)

Um eine Kostenpositionierung der Parabolrinnenkollektoren vollständig abzubilden, werden folgende Wärmeerzeuger gewählt: Hochtemperatur Flachkollektor, CPC-Kollektor, Biogas betriebener Gaskessel und Parabolrinnenkollektor. Für den Parabolrinnenkollektor werden die tatsächlich anfallenden Kosten des Pilotprojektes angewandt die komplett bei 344,00 €/m<sup>2</sup> liegen (330,00 €/m<sup>2</sup> Kollektorkosten mit 14,00 €/m<sup>2</sup> Planungskosten). Um ein zukünftiges Szenario mit gesunkenen Parabolkollektorkosten abzubilden, wurde ein Low-Case gebildet um Capex i.H.v. 230 €/m<sup>2</sup> total abzubilden. Damit die Betriebskosten der Parabolrinnenanlage realistisch abgebildet werden, werden die der Pilotanlage verwendet.

Für den Gasboiler wurde eine gesamt Investitionskostenposition von 400.000 € für ein 6 MWth Kessel angenommen, der eine vergleichbare Wärmemenge liefert wie eine vergleichbare Parabolrinnenanlage. Die O&M-Kosten fallen mit 15.000 €/a an, dazu die Kosten für die Gasbeschaffung. Für den Gaskessel wurde ein Wirkungsgrad von 85% zugrunde gelegt und ein Biogaspreis von 65 €/MWh. Hier jedoch der Hinweis, dass der Gaspreis der zentrale Treiber ist und die LCOH stark abhängig dessen sind.

In dem jährlich veröffentlichten Handlungsleitfaden für Freiflächensolaranlagen Baden-Württemberg werden gesamte Investitionskosten für ein 10.000 m<sup>2</sup> Hochtemperatur-Flachkollektorfeld mit 267,40 €/m<sup>2</sup> ausgewiesen. Diese setzen sich aus 221,40 €/m<sup>2</sup> für das Kollektorfeld, 33,00 €/m<sup>2</sup> für Gebäude und Anlagentechnik sowie 12,70 €/m<sup>2</sup> für Planungsleistungen zusammen. Für Flachkollektoren nennt der Baden-Württembergische Handlungsleitfaden jährliche Betriebskosten von 33,30 €/m<sup>2</sup>.

Für die CPC-Kollektoren werden die Investitions- und Betriebskosten aus obenstehender Tabelle 3 verwendet.

Für alle in der Betrachtung aufgeführten Alternativen sind weder Kosten für die Kapitalkosten, noch für Inflation und Speicherkosten mit eingerechnet. Aus dieser Berechnungsgrundlage mit Anwendung der vereinfachten LCOH-Formel ergeben sich die folgenden Wärmegestehungskosten:

Tabelle 4 LCOH verschiedener Technologien bei 100°C Kolleortemperatur

<b>Flachkollektor</b>					
Fläche	10.000 m <sup>2</sup>				
ct/kWh	4,18				
<b>CPC-Kollektor</b>					
Fläche	500 m <sup>2</sup>	1.000 m <sup>2</sup>	5.000 m <sup>2</sup>	10.000 m <sup>2</sup>	25.000 m <sup>2</sup>
ct/kWh	5,62	3,89	3,24	3,03	2,81
<b>Gaskessel</b>					
ct/kWh	7,9				
<b>Parabolrinnenkollektor</b>					
Szenario	Low-Case	Pilotprojekt			
Fläche	10.000 m <sup>2</sup>	10.000 m <sup>2</sup>			
ct/kWh	1,88	2,44			

Die berücksichtigten Erträge der Technologien werden bei 100°C erreicht. Errechnet wurden die LCOH mit den spezifischen Erträgen aus Tabelle 2 bei 100°C.

Die LCOH des Gasboilers sind hauptsächlich abhängig der herrschenden Gaspreise, wodurch die Konkurrenzfähigkeit davon abhängig ist. Langfristig werden vermutlich weiter die Gaspreise steigen, wodurch der Gaskessel sich weiter abschlägt. Jedoch als Redundanz und Sicherstellung der Versorgungssicherheit wird der Gaskessel weiterhin geeignet bleiben. Bei 100°C Kollektortemperatur ist der Flachkollektor deutlich hinter den CPC- und Parabolkollektoren. Durch zu geringe Erträge in diesem Temperaturbereich liegt dies unter anderem begründet. Demgegenüber sind die Wärmegestehungskosten des Parabolrinnenkollektors bereits jetzt vergleichbar mit CPC-Kollektoren. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass durch höhere erreichbare Erträge geringere Investitionskosten anfallen und dadurch auch Kosten im Bereich der Flächennutzung eingespart werden können. Dies wird im vorangegangenen Kapitel mit dem Fallbeispiel verdeutlicht. Im Low-Case mit Investitionskosten von 230 €/m<sup>2</sup>, sind über 20% geringere Wärmegestehungskosten möglich. Momentan sind diese zwar noch nicht erreichbar, jedoch kann dies zukünftig erreichbar sein. Damit kann die Konkurrenzfähigkeit erreicht werden. Es muss aber auch davon ausgegangen werden, dass ebenso Kosteneinsparungen bei den anderen Kollektorarten möglich sein werden. Jedoch bietet wie Tabelle 4 verdeutlicht, bereits jetzt schon die Parabolkollektoren bei 100°C finanzielle Vorteile, ungeachtet von Förderungen. Mit sinkenden Kollektortemperaturen, wird ebenso die Vorteilhaftigkeit analog zu den Simulationsergebnissen des vorangegangenen Kapitels geringer.

## 7.2 Sensitivität der LCOH

Die Entwicklung der vereinfachten Wärmegestehungskosten (ohne Pachtkosten und ohne Kosten einer separaten Betreibergesellschaft) mit geringer werdender Kollektortemperatur sind in nachstehender Abbildung dargestellt. Dabei werden für alle Kollektortypen eine Fläche von 10.000 m<sup>2</sup> zugrunde gelegt.

Die Analyse zeigt, dass der Parabolkollektor ab ca. 72°C niedrigere durchschnittliche Wärmegestehungskosten als ein CPC-Kollektor bietet. Ab ca. 63°C sind diese bereits niedriger als für einen Flachkollektor. Auffällig ist ebenfalls der starke Anstieg der Wärmegestehungskosten des Flachkollektor mit steigender Betriebstemperatur. Hauptsächlich kann dies auf die jeweiligen Erträge zurückgeführt werden. Der Parabolkollektor erreicht in der Simulation konstante hohe Erträge. Der Flach- und CPC-Kollektor steigern ihre Jahreserträge bei niedrigerer werdender Kollektortemperatur. Da diese Ausschlaggeben bei den Wärmegestehungskosten sind, sinken diese beim Absenken der Kollektortemperatur bzw. steigen, wenn die Betriebstemperatur angehoben wird

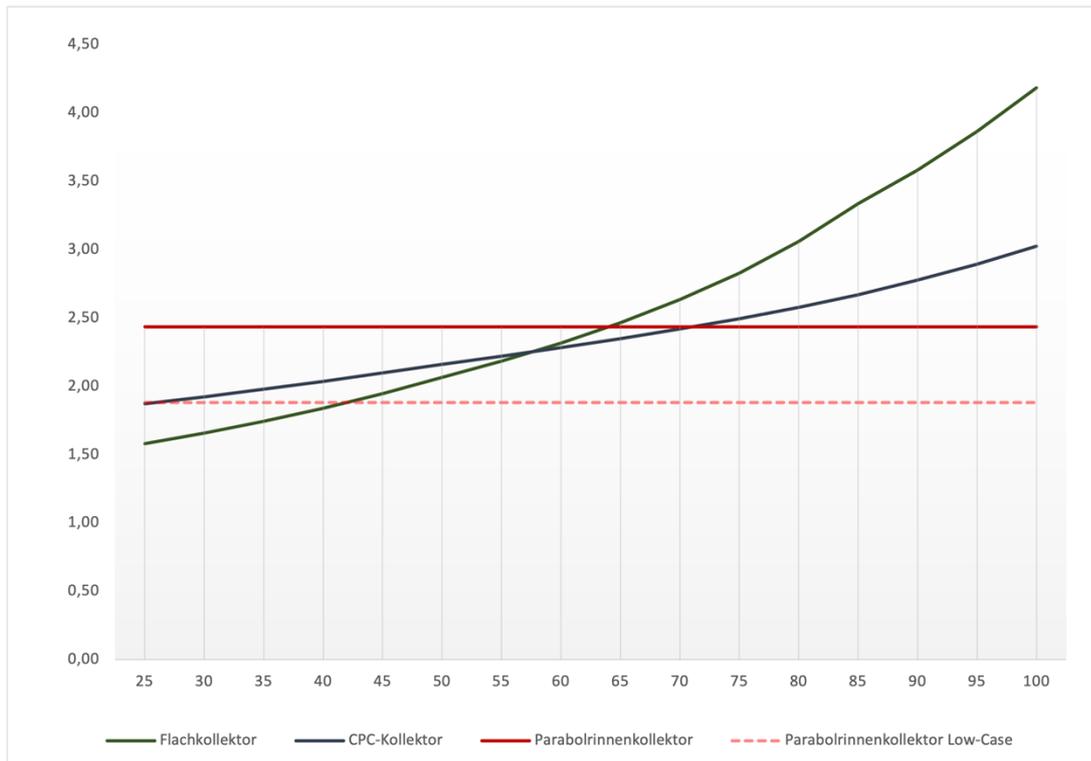


Abbildung 5 LCOH in Abhängigkeit der Kollektortemperatur (ohne Pachtkosten und ohne Betreiber-gesellschaft)

Wird der Low-Case der Parabolrinnenkollektoren angenommen, wirken sich die sinkenden Investitionskosten deutlich aus. Darin liegen die LCOH bei 100°C bei 1,88 ct/kWh für den Parabolrinnenkollektor. Damit erreicht bei gleichbleibender Kostenstruktur der Parabolkollektor bereits ab ca. 27°C bzw. 42°C niedrigere Wärme-gestehungskosten als ein Flach- bzw. CPC-Kollektor. Bei der Parabolrinnenanlage wurden keine Kosten für eine Betreiber-gesellschaft angewendet. Aus den gegebenen Kosten konnte nicht abgeleitet werden, ob die Opex des Flach- und CPC-Kollektors solche Kosten bereits beinhaltet. Daher folgt die Annahme, dass nicht solche Kosten beinhaltet sind. Würden jedoch Kosten einer separaten Betreiber-gesellschaft auf die Opex der Parabolrinnenanlage hinzugerechnet werden, verschieben sich die Schnittpunkte auf 72°C bzw. 86°C.

Fließen Pachtkosten mit in diese Betrachtung ein, verschieben sich die Schnittpunkte der Kostenkurven nach unten. Mit steigenden Pachtkosten sinken die Temperaturgrenzen aufgrund von auswirkenden Flächennutzungsunterschiede zugunsten der Parabolrinnen (höhere Erträge bei Nutzung gleicher Flächen). Etwaige zukünftige Effizienzgewinne der Parabolrinnenkollektoren wirken sich weiter vorteilhaft aus. In jedem Fall wird angenommen, dass auch zukünftig bei Parabolrinnenkollektoren deutliche Kostensenkungspotentiale vorhanden sind, da die Technologie in der breiten Anwendung hinter den im Vergleich aufgeführten Technologien liegt. Dies wurde auch durch getätigte Interviews bestätigt. Damit bleiben auch wirtschaftliche Vorteile erhalten oder verbessern sich.

## 8 Schlussfolgerungen

Die Analyse der Projektkosten zeigt, dass die Betriebskosten bereits auf einem konkurrenzfähigen Niveau sind, jedoch noch Einsparungen möglich sind. Ebenso gilt dies für die Investitionskosten (330,00 €/m<sup>2</sup>), denen mit zukünftig 1/3 Kosteneinsparungen ein höheres Senkungspotential vorhergesagt wird. Diese Kosteneinsparungen sind wichtig, um weniger Abhängig von den momentan hohen Förderquoten zu sein, um auch in einer förderfreien Zeit wirtschaftlich Energie bzw. Wärme bereitstellen zu können.

Werden Temperaturbereiche von ca. 100 °C angestrebt, zeigt die Analyse der Kolleortemperaturen, dass deutliche Mehrerträge durch eine Parabolrinnenanlage erreicht werden können. Ab 70°C Betriebstemperatur liefert die Parabolrinne höhere Erträge, verglichen mit einem CPC-Kollektor und ab 50°C verglichen mit einem Flachkollektor.

Im Vergleich der LCOH zeigt sich, dass die Parabolrinne bereits heute konkurrenzfähig zu Flach- und CPC-Kollektoren ist. Ab 72°C werden niedrigere Wärmegestehungskosten im Vergleich zu CPC-Kollektoren erreicht und ab 63°C niedrigere als ein Flachkollektor. Fließen Pachtkosten mit ein, verschieben sich die Temperaturschnittpunkte zugunsten der Parabolrinne, aufgrund der höheren flächenbezogenen Wärmeleistung. Damit macht die Untersuchung deutlich, dass zum einen Parabolrinnenanlagen Temperaturbedarfe über sämtliche Gewerbesektoren hinweg liefern können. Zum anderen sind diese dabei bereits ab 63°C bzw. 72°C bezogen auf Wärmegestehungskosten konkurrenzfähig zu Flach- oder CPC-Kollektoren.

### Literatur

- Fischer, S. (2017). *Die LCoH-Methode zur Berechnung von Wärmegestehungskosten*. 23.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.). (2019). *Handlungsleitfaden Freiflächensolaranlagen*.
- Ritter Energie- und Umwelttechnik. (2016, März 31). *Die erste Kollektorliste für hohe Kolleortemperaturen (75°)*. <https://blog.paradigma.de/die-besten-kollektoren-fuer-hohe-temperaturunterschiede-75/>
- Ritter XL Solar. (2020, März 10). *Solare Großanlagen für Wärmenetze*.
- Solarthermie.net. (o. J.). *CPC-Spiegel bei Vakuum-Röhrenkollektoren*. Abgerufen 30. August 2021, von <https://www.solarthermie.net/solarkollektor/cpc-spiegel>
- Thermondo. (2021, Mai 11). *Flachkollektoren: Beste Lösung für Ihr Dach*. <https://www.thermondo.de/info/rat/erneuerbare-energie/flachkollektoren/>
- Umweltbundesamt. (2021, März 16). *Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme>