

# Solare Wärme und Kälte

Der Beitrag präsentiert den aktuellen Stand sowie die Perspektive der Wärme- und Kälteerzeugung mit Hilfe solarthermischer Anlagen im Temperaturbereich bis zu ca. 150 °C. Anders als im vorherigen FVEE-Statusbericht von 2015 [1] wird hier die Nutzung der Photovoltaik zu diesem Zweck nicht behandelt, da diese Technologie separat analysiert und bewertet wurde. Die Kurzanalyse fasst die Ergebnisse der umfangreichen Studie im Rahmen des BMWi-Projektes „TF-Energiewende“ zusammen [2] und stellt zudem repräsentative Forschungsaktivitäten der FVEE-Mitglieder auf dem Gebiet vor.

## 1. Bestandsaufnahme

Die Solarthermie ist eine etablierte Technologie, die auf eine Tradition von über 40 Jahren zurückblickt. Ende 2016 waren in Deutschland 2,2 Mio. solarthermische Anlagen mit einer Fläche von 20 Mio. m<sup>2</sup> und einer installierten thermischen Leistung von 13,9 GWth in Betrieb. Damit wurden im gleichen Jahr insgesamt 7,5 TWh Solarwärme produziert und ca. 2 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden [3]. Eingesetzt werden diese Anlagen vor allem für die Wärmeversorgung von Ein- bis Zweifamilienhäusern, wo sie den Verbrauch fossiler Brennstoffe üblicherweise um 20–30% (Raumheizung und Trinkwarmwasser) bzw. 50–60% (nur Trinkwarmwasser) reduzieren.

Mit einem Anteil an der gesamten Wärmeerzeugung von ca. 0,6% bleibt die Solarthermie aber noch weit entfernt von ihrem großen Potenzial, das von den im erwähnten Projekt „TF-Energiewende“ analysierten Zukunftsszenarien bis auf fast 100 TWh für das Jahr 2050 geschätzt wird. Damit könnten solarthermische Anlagen ca. 12% des gesamten Wärmebedarfs abdecken und einen bedeutenden Beitrag zum Erfolg der Energiewende leisten. Eine solche Entwicklung würde nicht nur zu ökologischen Vorteilen sondern auch zu Kosteneinsparungen im Vergleich zu den „Business-As-Usual“-Projektionen führen.

Dass die dabei angenommene Kostendegression realistisch ist, zeigt eine aktuelle Studie der Universität Kassel [4]. Hier wurden die Kosten solarthermischer Anlagen im Verhältnis zur kumulierten Produktionsmenge analysiert und ihre bisher nicht wahrgenommene „Lernfähigkeit“ bewiesen (► *Abbildung 1*).

Für eine prominente Positionierung der Solarthermie als Wärmetechnologie in einem zukünftigen Energieversorgungssystem mit ausgeprägter Sektorenkopplung spricht auch ihre hohe Integrationsfähigkeit und Kompatibilität.

Auf dem Weg zur vollständigen Dekarbonisierung kann sie als verbrauchssenkende Effizienzmaßnahme die Treibhausgasemissionen noch vorhandener fossiler



**ISFH**  
Dr. Federico Giovannetti  
f.giovannetti@isfh.de

Prof. Dr. Oliver Kastner  
oliver.kastner@isfh.de

**HZB**  
Prof. Dr. Rutger Schlatmann  
rutger.schlatmann@helmholtz-berlin.de

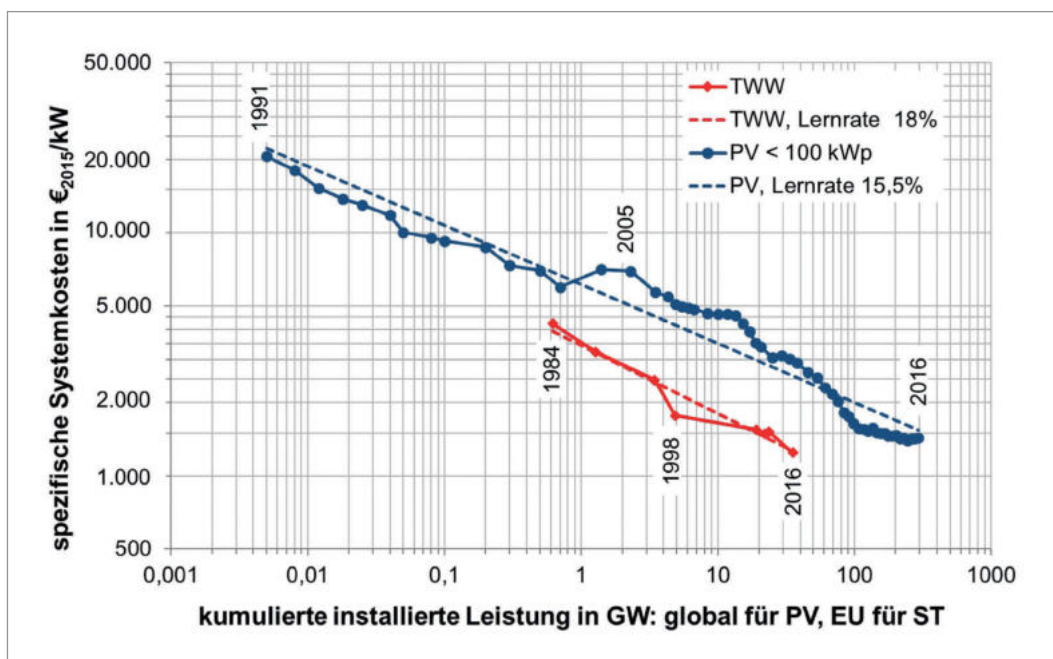
Tom Cordes  
tom.cordes@helmholtz-berlin.de

**Fraunhofer ISE**  
Dr. Wolfgang Kramer  
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

**ZAE Bayern**  
Manuel Riepl  
manuel.riepl@zae-bayern.de

Markus Pröll  
markus.proell@zae-bayern.de

Lars Staudacher  
lars.staudacher@zae-bayern.de



*Abbildung 1*  
**Kostendegressionen** von solarthermischen Trinkwarmwasseranlagen und photovoltaischen Systemen im Vergleich.  
Quelle: Universität Kassel [3]

Wärmeerzeuger deutlich reduzieren, ohne dass besondere Anforderungen an Versorgungsinfrastrukturen oder Gebäudestandards zu stellen sind.

In Kombination mit regenerativen Erzeugern erhöht sie die Gesamteffizienz der resultierenden Systeme. Besonders zu erwähnen ist die vorteilhafte Kopplung mit der Wärmepumpe. Hier ist die Leistungssteigerung der kombinierten Lösung und die entsprechende Entlastung des Stromnetzes zu nennen sowie die Gewährleistung eines nachhaltigen Betriebs der hocheffizienten Sole-Wasser-Wärmepumpen durch eine sehr effektive Regeneration des Erdreiches.

Ein weiteres Beispiel für Kompatibilität und Integrationstauglichkeit ist die Nutzung von Solaranlagen in Systemen mit multifunktionalen Langzeitspeichern.

Damit diese Szenarien Realität werden, sind aber neue, nicht nur technologische Impulse dringend erforderlich. Unter den aktuellen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen lässt sich die sehr schwache Marktentwicklung der letzten Jahre nur durch besser geeignete politische Instrumente umkehren. Diese Problematik betrifft nicht nur die Solarthermie, sondern allgemein die Umsetzung der Energiewende im Wärmebereich. Notwendige Maßnahmen sind:

- eine wirksame CO<sub>2</sub>-Bepreisung fossiler Brennstoffe
- ambitioniertere ordnungsrechtliche Vorgaben für den Einsatz erneuerbarer Wärmeerzeuger im Gebäudebereich

Die übergeordnete Aufgabe der Forschung besteht unter diesen Voraussetzungen darin, die am besten passende Einsatzbereiche zu identifizieren und entsprechende Lösungen dafür zu entwickeln bzw. zu optimieren. Ein interdisziplinärer Ansatz, der sowohl im technischen Bereich unterschiedliche Branchen und Technologien (Wärme und Strom, erneuerbare und nicht erneuerbare Bereiche) einbezieht, als auch weitere nicht technische Aspekte mitberücksichtigt, wird in einem so komplexen Transformationsprozess immer wichtiger.

Für die Niedertemperatur-Solarthermie bleibt die Senkung der Wärmegestehungskosten ein zentrales Ziel. Dieses Ziel kann durch die Entwicklung neuer Komponenten und Systeme, die eine einfachere Herstellung und Installation sowie einen wartungsarmen Betrieb ermöglichen, aber auch durch die Erarbeitung alternativer Vertriebsmodelle erreicht werden. Neue Lösungen sind ebenso erforderlich um den Substitutionsgrad fossiler Brennstoffe durch Solarwärme deutlich zu erhöhen: Damit gemeint sind sowohl die Steigerung des solaren Deckungsanteils (>50%) als auch die effiziente Integration der Solarthermie in CO<sub>2</sub>-neutrale Wärme- und Energieversor-

gungssysteme. Mit Bezug auf die Anwendungen soll schließlich die bisherige starke Beschränkung auf die dezentrale Wärmeversorgung von Ein- und Zweifamilienhäusern überwunden und die komplexeren Marktsegmente Mehrfamilienhäuser, netzgebundene Wärmegestehung, industrielle Prozesswärme und Kälteerzeugung erschlossen werden.

## 2. Laufende FVEE-Forschungsaktivitäten

### 2.1 Kostenreduktion

Für die Senkung der Wärmegestehungskosten werden im Forschungsverbund Erneuerbare Energien unterschiedliche Ansätze verfolgt, die die Vielseitigkeit der Thematik widerspiegeln.

Am Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) wird in verschiedenen Bereichen eine systemorientierte Komponentenentwicklung betrieben, die auf die Reduzierung des Aufwandes sowohl für Investitionen als auch für den Betrieb der Anlagen zielt.

In den letzten Jahren sind z. B. neuartige Gravitationswärmerohre (heatpipes) für den Einsatz in stagnationssicheren thermischen Kollektoren untersucht worden (BMW, FKZ 0325550). Nach grundlegenden Arbeiten zur Optimierung des zweiphasigen Wärmetransportes in den Wärmerohren und der Anbindung zwischen Wärmerohren und Sammler ist es dieses Jahr in Kooperation mit den Industriepartnern KBB Kollektorbau, Narva Lichtquellen und AkoTec gelungen, sowohl Vakuumröhrenkollektoren als auch Flachkollektoren zu realisieren, die bei vergleichbarer Systemleistung die maximalen Temperaturen im Solarkreis auf 125 °C – üblicherweise sonst über 200 °C – begrenzen (► *Abbildung 2*). Damit lässt sich die Verdampfung des Wärmeträgers, die unter typischen Drückbedingungen bei 130 bis 140 °C stattfindet, komplett unterbinden und es können einfachere und wartungsarme Systeme mit kostengünstigeren Komponenten (Rohrleitungen aus Kunststoff, kleineren Kompensationsgefäßen) umgesetzt werden. Basierend auf bisherigen Ergebnissen sowie Herstellerangaben wird dadurch eine Senkung der Wärmegestehungskosten bis zu 30% erwartet. Aktuelle Aktivitäten zielen jetzt auf die Entwicklung, die Erprobung im Feld und die Bewertung dieser neuartigen Solaranlagen.

Das Fraunhofer ISE untersucht dagegen im Verbundprojekt TEWISol (BMW, FKZ 0325558) einen innovativen, ganzheitlichen Ansatz zur Optimierung des Preis-/Leistungsverhältnisses von solarthermischen Anlagen. Dabei werden wirtschaftswissenschaftliche Methoden der Wertanalyse, des Komplexitätsmanagements und der Prozesskostenanalyse mit modernen, technischen Methoden der Anlagensimulation und

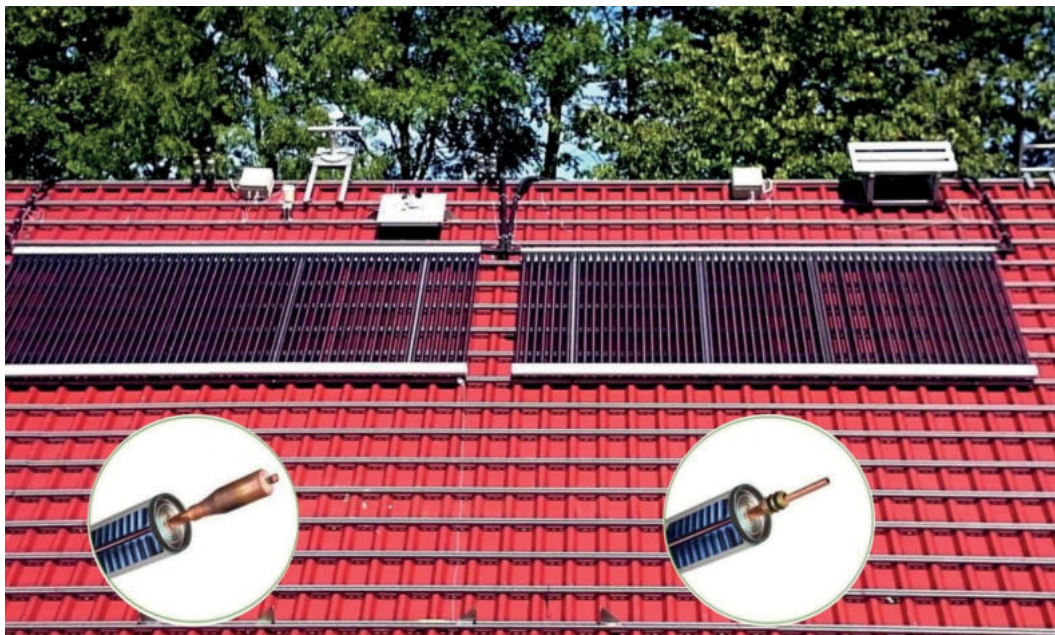
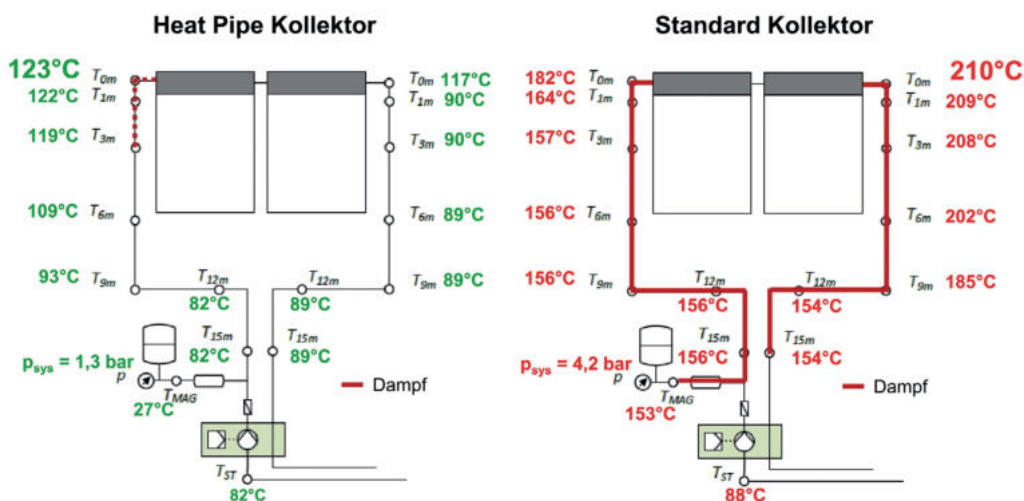


Abbildung 2  
**Heatpipes für stagnationssichere thermische Kollektoren**

Vergleichende Untersuchung:  
Links: schaltende Heatpipe Vakuumröhrenkollektoren  
Rechts: Standard-Kollektoren

Die Abbildung zeigt jeweils die Testanlage und gemessene Temperaturen im Solarkreis während einer typischen Stagnationsphase.  
Quelle: ISFH



der Messtechnik kombiniert (► [Abbildung 3](#)). Im Fokus stehen dabei vor allem die indirekten Kosten, welche heute bei vielen Unternehmen höher als die direkten Fertigungskosten sind. Diese integrierte Vorgehensweise erlaubt unter anderem Kosten zu quantifizieren, welche durch die Komplexität von Produkten und die Vielfalt im Produktportfolio entstehen. Berücksichtigt wird hierbei die komplette Prozesskette von Komponentenlieferanten über Systemhersteller bis zur Installation durch den Handwerker. Optimierungskriterium ist die Minimierung der Vollkosten für den Kunden im Verhältnis zum Wärmeertrag des Systems. Als Ergebnis dieser Optimierung soll sich eine Kostensenkung für den Endkunden von mehr als 20% ergeben. Projektpartner sind das Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen, die Firma Meibes System-Technik GmbH sowie der Installationsbetrieb SWB Herten.

## 2.2 Hocheffiziente dezentrale Wärmeversorgung im Wohnungsbau

Im Wohnungsbau liegt ein Forschungsschwerpunkt bei der Entwicklung und Erprobung von hocheffizienten, solarbasierten, dezentralen Wärmeversorgungs-konzepten.

Am ISFH wird beispielsweise schon lange die Kombination von Sole/Wasser-Wärmepumpen und Solarthermie untersucht. Im laufenden Projekt „Terra-Solar-Quelle“ (BMW, FKZ 03ET1275) wurde das Potenzial der solaren Regeneration von Erdwärmekollektoren mit nicht abgedeckten thermischen sowie photovoltaisch-thermischen Kollektoren gezeigt. Basierend auf Simulationen sowie experimentellen Untersuchungen an realen Systemen hat das Projekt bewiesen, dass dadurch die erforderliche Fläche für die Erdwärmekollektoren um mehr als 50% reduziert



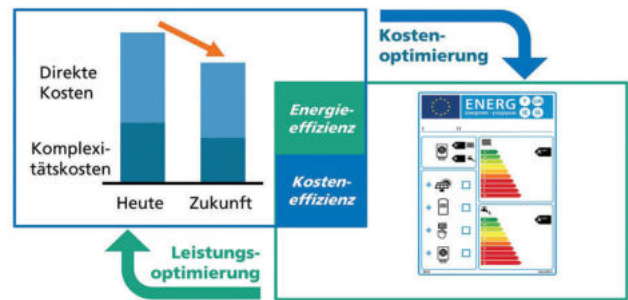
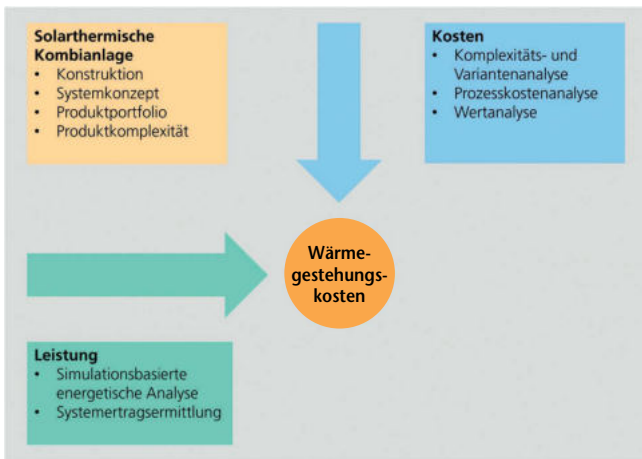


Abbildung 3

**Methodischer Ansatz zur Minimierung der Wärmegestehungskosten von solarthermischen Kombianlagen im Projekt TEWISOL.**

Quelle und Copyright: Fraunhofer ISE

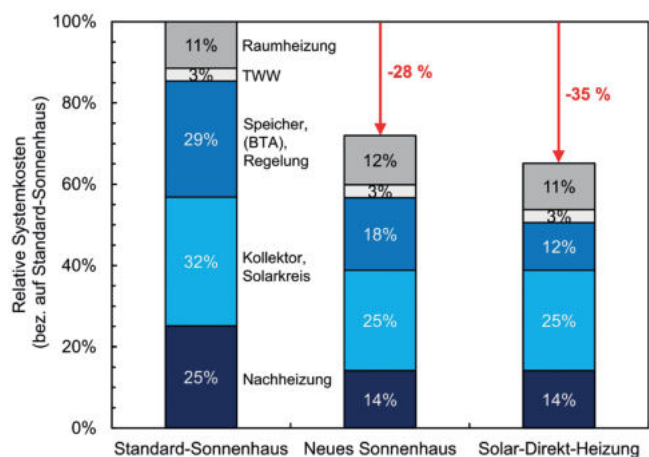
werden kann, bei vergleichbarer Leistung und Wirtschaftlichkeit. Somit steigen die Attraktivität und die Wettbewerbsfähigkeit dieser Wärmepumpensysteme, die oft aufgrund ihres hohen Platzbedarfes nicht eingesetzt werden.

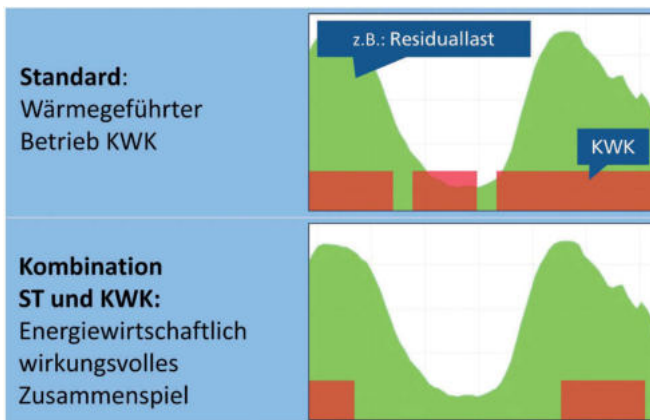
Bei den sogenannten Sonnenhäusern (Gebäude die überwiegend mit Solarwärme beheizt werden) wurden dagegen neue optimierte Konzepte entwickelt und untersucht. Als Beispiel wird hier das Projekt „SH-T-OPT“ (BMW, FKZ 0325981 und 0325559) erwähnt, das vom ISFH in Kooperation mit dem Massivhaus-Anbieter Helma bearbeitet wurde. Der grundlegende Ansatz besteht darin, das Speichervolumen der typischen Sonnenhäuser von 7–8 m<sup>3</sup> auf ca. 1 m<sup>3</sup> zu reduzieren und die fehlende Speicherkapazität durch die thermische Aktivierung der Gebäudemasse zu kompensieren. Anhand eines realen und über zwei Jahre untersuchten Gebäudeprototyps konnte nicht nur ein vergleichbarer solarer Deckungsanteil (51 %), sondern auch eine signifikante Senkung der Kosten bis zu 30 % gegenüber konventionellen Sonnenhäusern erreicht werden (► *Abbildung 3*).

Abbildung 4

**Realisiertes neues Konzept von Sonnenhaus und ermittelte Kosteneinsparungen.**

Quelle: ISFH





nomische, ökologische, soziologische sowie energiesystemtechnische Bewertungsmuster erarbeitet und angewendet. Ziel ist insbesondere eine zeitlich hoch aufgelöste energetische Bewertung von Solarthermie mit Wärmepumpensystemen, die mit am Gebäude erzeugtem PV-Strom betrieben werden.

### 2.3 Nicht etablierte Anwendungsbereiche: Wärmenetze, Prozesswärme und Kälteerzeugung

Parallel zur dezentralen Wärmeversorgung von Gebäuden bieten auch Wärmenetze eine vielversprechende Plattform für die Integration und Kombination verschiedener regenerativer Quellen. Solarthermisch unterstützte Anlagen werden seit über 20 Jahren in Deutschland realisiert, wobei die Aktivitäten in der letzten Zeit deutlich intensiviert wurden. Mitte 2017 waren ca. 50.000 m<sup>2</sup> Solaranlagen im Betrieb, über 60.000 m<sup>2</sup> befanden sich aber in der Realisierungs- oder in der Planungsphase.

Hauptaufgabe der Forschung ist hier, wettbewerbsfähige Konzepte zu erarbeiten und in der Praxis zu demonstrieren.

Im Rahmen des Vorhabens „EnWiSol“ (BMW, FZK 0325544) untersucht beispielsweise das Fraunhofer ISE die dezentrale Einbindung von solarthermischen Anlagen in ein auf einem Blockheizkraftwerk (BHKW) basierendes Wärmeversorgungskonzept für das Neubaugebiet Gutleutmatten in Freiburg im Breisgau. Der Anlagebetrieb wird dabei hinsichtlich bestmöglicher Interaktion des BHKW mit dem Stromnetz und Minimierung der Verteilverluste des Nahwärmenetzes optimiert (► *Abbildung 5*). Es wird dabei das Ziel verfolgt, das Wärmenetz im Sommer über längere Zeiträume stillzulegen. Neben der konkreten Demonstration eines innovativen Integrationsansatzes, soll im Projekt die Rolle der Solarthermie in der Versorgung urbaner Quartiere unter aktuellen und zukünftigen energiewirtschaftlichen Randbedingungen und mit einer integralen Betrachtung der

Sektoren Strom und Wärme bewertet werden. Die städtebauliche Entwicklung läuft seit 2013, wobei das Fernwärmenetz sowie die sich auf den jeweiligen Gebäuden befindlichen Kollektoranlagen zur Versorgung der ersten fertiggestellten Wohngebäude im Sommer 2016 in Betrieb genommen wurden.

Ein weiteres noch nicht etabliertes Einsatzgebiet, das in den letzten Jahren in der Forschung intensiv untersucht wurde, ist die Bereitstellung industrieller Prozesswärme. Die langsame Marktentwicklung trotz steigenden Interesses und sehr günstiger Förderbedingungen (BAFA Marktanreizprogramm) lässt sich neben der noch mangelnden Bekanntheit beim Endnutzer vor allem auf die sehr hohen wirtschaftlichen Anforderungen der Branche zurückführen. Bei der Verwendung der Amortisationszeit als Entscheidungskriterium für die Investitionen werden hier Investitionen für die Integration solarer Wärme in der Regel durch produktionsbezogene Investitionen abgefangen. Um die Marktpenetration zu beschleunigen, ist es somit erforderlich, neben der Entwicklung und Demonstration von technischen Lösungen, alternative Finanzierungsansätze zu erarbeiten und zu erproben.

Ein aktuelles Beispiel in diese Richtung stellt das Projekt TrustEE (EU, FZK 696140) dar, das vom Fraunhofer ISE in Kooperation mit weiteren europäischen Partnern bearbeitet wird. Das Projekt zielt auf die Einrichtung technischer Unterstützungsinstrumente und vertraglicher Rahmenbedingungen, die den Aufbau eines speziellen Investitionsvehikels für Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbare Energie in verschiedenen Industriesektoren ermöglichen. Im Rahmen des Projekts wird eine Online-Plattform für die Einreichung von Investitionen entwickelt, die eine automatische technisch-wirtschaftliche Machbarkeit von Investitionsvorschlägen ermöglicht. Die Online-Plattform wird 2018 öffentlich zugänglich sein, so dass ein Projektportfolio zusammengestellt werden kann, das für die Anziehung potenzieller Drittanleger geeignet ist.

Abbildung 5  
**Kombination von KWK und Solarthermie für die netzgebundene Wärmeversorgung des Neubaugebietes Gutleutmatten in Freiburg im Breisgau – Konzept und Realisierung.**  
Quelle und Copyright: Fraunhofer ISE (li.), Stadt Freiburg (re.)

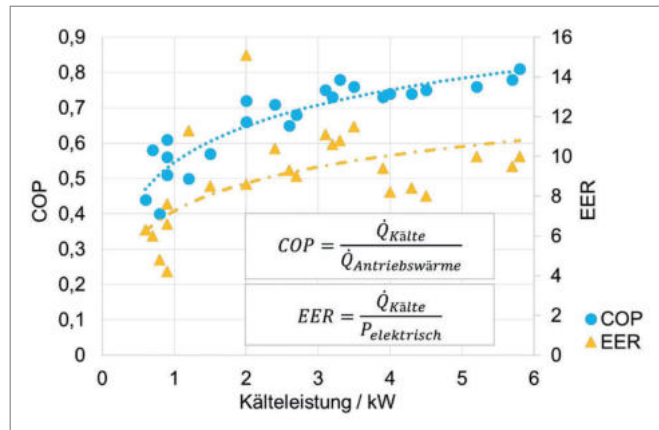


Abbildung 6

**Multivariable Absorptionskältemaschine/-wärmepumpe mit integriertem Hydraulikmodul und Speicher sowie experimentelle Ergebnisse im Kühlbetrieb.**  
Quelle: ZAE Bayern

Als letztes Marktsegment wird schließlich die solare Kälteerzeugung betrachtet. Dieser Bereich ist heute in Deutschland für nur 2% des gesamten Endenergieverbrauches verantwortlich und spielt damit eine untergeordnete Rolle für die nationale Wärmewende. Entwicklungen auf dem Gebiet adressieren vor allem die Märkte in Asien und im Nahen Osten, wobei bei steigendem Kältebedarf sowohl im Nicht-Wohnungsbau als auch im Komfortwohnungsbau selbst in Mitteleuropa mit einer zunehmenden Bedeutung zu rechnen ist.

Perspektivisch zukunftssträchtige Anwendungsbeispiele zeigen zwei FVEE-Projekte mit sehr unterschiedlichen Ansätzen:

In einem Verbundvorhaben aus GFZ, HZB, TU Berlin und HTW Berlin sowie dem omanischen Institute of Advanced Technology wird das Potenzial der solarthermischen Klimatisierung zur Entlastung des öffentlichen Stromnetzes in sonnenreichen Ländern mit hohem Kühlbedarf am Beispiel eines Freizeitgebäudes im Maskat (Oman) untersucht. Bisherige Simulationsergebnisse zeigen, dass durch die starke Korrelation zwischen Kühllast und Strahlungsangebot sowie die sehr hohen Kollektorerträge (bis zu 1000 kWh/m<sup>2</sup>) eine vollständig autarke Kälteversorgung mit einer einfachen und kostengünstigen Lösung ohne saisonale Speicherung unter diesen extremen Klimabedingungen erzielbar ist. Das System besteht aus 1400 m<sup>2</sup> doppelt abgedeckten Flachkollektoren, 250 m<sup>3</sup> Wasserspeicher und einer Absorptionskältemaschine (Li-Br) mit einer Nennleistung von 320 kW. Die häufig verwendete feuchte Rückkühlung soll hier mit einer wassersparenden Kombination aus trockener Rückkühlung und Einbindung des Erdreiches ersetzt werden. Das Konzept soll bis 2020 umgesetzt und experimentell verifiziert werden.

Im Rahmen eines deutsch-finnischen Forschungsprojektes wurde dagegen von den Partnern VTT, Savo Solar und dem ZAE Bayern ein solarthermisches Heiz- und Kühlsystem entwickelt, das die Wärme- und Kälteversorgung eines Bürogebäudes in Mikkeli (Finnland) übernimmt. Das Herzstück der Anlage bildet eine multivariable Absorptionskältemaschine (AKM) mit einer Nennleistung von 10 kW sowie zusätzlicher Wärmepumpenfunktion und integriertem Hydraulikmodul mit intelligenter Regel- und Steuereinheit (► *Abbildung 6*, links). 18 Flachkollektoren, von denen die Hälfte mit am ZAE Bayern neu entwickelten Glas-Folien-Verbundelementen ausgestattet ist, erzeugen im Sommer die Antriebswärme für die AKM bei Temperaturen zwischen 65 und 100 °C. Der überschüssige Solarertrag wird von einem integrierten, 2 m<sup>3</sup> Pufferspeicher mit einer am ZAE Bayern entwickelten optimierten Schichtladeeinheit gespeichert. Als Backupwärmequelle kommt Fernwärme zum Einsatz. Zudem besteht die Möglichkeit den trockenen Rückkühler zur „Freien Kühlung“, vor allem in den Morgenstunden, zu verwenden. Die Ergebnisse der im Jahr 2017 abgeschlossenen wissenschaftlichen Begleitung beweisen die sehr gute Teillastfähigkeit des Systems: Bei Kälteleistungen von 3 kW (30% der Nennleistung) wird schon ein COP<sub>Kälte</sub> von über 0,7 erreicht. Ab 2 kW wird bereits ein Energy Efficient Ratio (EER<sub>Kälte</sub>) des Gesamtsystems zwischen 8 bis 15 erreicht (► *Abbildung 6*, rechts). In der Übergangszeit dienen die Flachkollektoren parallel zur Fernwärme als Niedertemperatur-Wärmequelle für die Absorptionswärmepumpe. Da der optimierte Pufferspeicher über die Wärmepumpe bis auf eine Temperatur von etwa 5 °C ausgekühlt werden kann, ist es möglich, trotz geringerer Einstrahlung und niedriger Umgebungstemperaturen, einen signifikanten Solarertrag zu erwirtschaften. Während der Heizperiode liegt der COP<sub>Wärme</sub> der Wärmebereitstellung zwischen 1,4 bis 1,6 und der entsprechende EER<sub>Wärme</sub> zwischen 15 bis 20. Die Kosten der multivariablen AKM, inklusive des Hydraulikmoduls, liegen bei ca. 1000 € pro kW<sub>Kälte</sub>.

## Literatur

- [1] Giovannetti F.; Kramer W.; Kramer K.; Wiemken E.; Binder J.; Reuß M.; Beikircher T.; Jäger H.; Hafner B. (2015): Solare Wärme: Bedeutung, Potenzial, Forschungsaufgaben. FVEE-Themen 2015.
- [2] Giovannetti F.; Kastner O.; Lampe C.; Reineke-Koch R.; Park S.; Steinweg J. (2018): Technologiebericht 1.4 Solare Wärme und Kälte. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken (im Druck).
- [3] Bundesverband Solarwirtschaft e. V. (2017): Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (<https://www.solarwirtschaft.de>)
- [4] Orozaliev J.; Werner F.; Vajen K. (2018): Learning Curve of Solar Thermal Heating Systems. In: Proceedings Solar World Congress / IEA SHC Conference 2017, Abu Dhabi (im Druck).