

Solare Kraft-Wärme-Kopplung: Baustein für ein nachhaltiges Strom-Wärme-System?



DLR
Klaus Hennecke
klaus.hennecke@dlr.de

Fraunhofer ISE
Anton Neuhäuser
anton.neuhaeuser@ise.fraunhofer.de

Solare Wärmebereitstellung erfolgt technologiebedingt meist auf einem Temperaturniveau unter 100 °C und steht damit im Wettbewerb zu Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung wie Wärmerückgewinnung und Kraft-Wärme-Kopplung.

Konzentrierende Kollektoren können Wärme auf hohem Temperaturniveau mit gutem Wirkungsgrad bereitstellen, und eröffnen damit die Möglichkeit auch solare Kraft-Wärme-Kopplung zu realisieren.

KWK

Unter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) versteht man die gleichzeitige Erzeugung von mechanischer Energie und nutzbarer Wärme. Dabei wird die mechanische Energie meist unmittelbar über einen Generator in elektrischen Strom umgewandelt. Die Wärme wird in der Regel als Fernwärme oder Nahwärme zu Heizzwecken, oder als Prozesswärme in industriellen Produktionsprozessen eingesetzt.

Als Energiewandler kommen je nach Anlagengröße, Betriebsweise, benötigter Temperatur der Nutzwärme und verfügbarem Primärenergieträger unterschiedliche Maschinen zum Einsatz: Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, Dampfturbinen oder Dampfmaschinen.

Bei den Dampfprozessen werden entweder Wasserdampf oder organische Medien wie Kohlenwasserstoffe oder Silikonöle eingesetzt. Organische Dampfkreisläufe (englisch: Organic Rankine Cycle = ORC) haben ihre Vorteile insbesondere dort, wo das Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und Abwärme bzw. Nutzwärme verhältnismäßig gering ist. Durch Auswahl des geeignetsten Mediums lässt sich der Wirkungsgrad gegenüber dem Einsatz von Wasserdampf deutlich verbessern. Wegen des vergleichsweise niedrigen Druckniveaus dieser Prozesse reduzieren sich außerdem die Personalanforderungen und damit verbundene Kosten für den Betrieb der Anlagen.

Der wesentliche Vorteil der KWK gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme liegt darin, dass die in thermodynamischen Prozessen zur Umwandlung von Wärme in mechanische Energie unvermeidlich entstehende Abwärme nicht verloren geht, sondern zum größten Teil nutzbar gemacht wird. Selbst wenn durch die Auskopplung von Nutz-

wärme der Umwandlungswirkungsgrad für die Stromerzeugung leicht beeinträchtigt wird, reduziert sich insgesamt der erforderliche Primärenergieeinsatz erheblich (*Abbildung 1*). Wegen der dadurch vermiedenen Emissionen ist ein starker Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung im Sinne von Klimaschutz und Ressourcenschonung wünschenswert. Allerdings kann sich dabei auch ein Zielkonflikt mit dem ebenfalls gewünschten Ausbau der Nutzung von Sonnenenergie ergeben.

Auslegung und Betrieb von konventionellen KWK-Anlagen ohne Solaranteil orientieren sich sinnvollerweise am Wärmebedarf. Aus ökonomischen Gründen wird dabei eine hohe Jahresvolllaststundenanzahl angestrebt, als Richtwert gelten 4500–6000 Stunden pro Jahr. Als Grundlage für die Dimensionierung dient die geordnete Jahresdauerlinie des Wärmeverbrauchers. Dazu wird für jede Stunde des Jahres der Wärmebedarf ermittelt und die Ergebnisse der Höhe nach sortiert aufgetragen (*Abbildung 2*). An der Kurve lässt sich unmittelbar ablesen, an wie vielen Stunden pro Jahr eine bestimmte Leistung benötigt wird. Die Fläche unter der Kurve entspricht der Jahresarbeit, die in Grundlast und Spitzenlast aufgeteilt wird. Die Grundlast wird so festgelegt, dass die KWK-Anlage die gewünschte hohe Betriebsstundenanzahl erreicht, und der Spitzenlastkessel möglichst wenig zur Jahresarbeit beitragen muss. Dabei kann der Teillastbereich der Grundlast entweder durch den Spitzenlastkessel, durch modulierenden Betrieb der KWK-Anlage, oder durch getakteten Betrieb der Anlage in Kombination mit entsprechend dimensionierten Pufferspeichern abgedeckt werden.

Die Integration eines Wärmespeichers eröffnet darüber hinaus die wirtschaftlich attraktive Möglichkeit, die Anlage zeitweise stromgeführt zu betreiben und damit Spitzen im Strombezug zu reduzieren. In einem zukünftigen Stromversorgungssystem mit einem hohen Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien werden solche Anlagen durch bedarfsgerechte Einspeisung auch zur Netzstabilisierung beitragen können.

Zur Auslegung des Speichers ist die Kenntnis der täglichen oder wöchentlichen Bedarfsstruktur erforderlich. Diese wird von Produktionsabläufen und Nutzerverhalten beeinflusst und kann auch jahreszeitlich variieren. Bild 3 zeigt beispielhaft den Tagesgang des

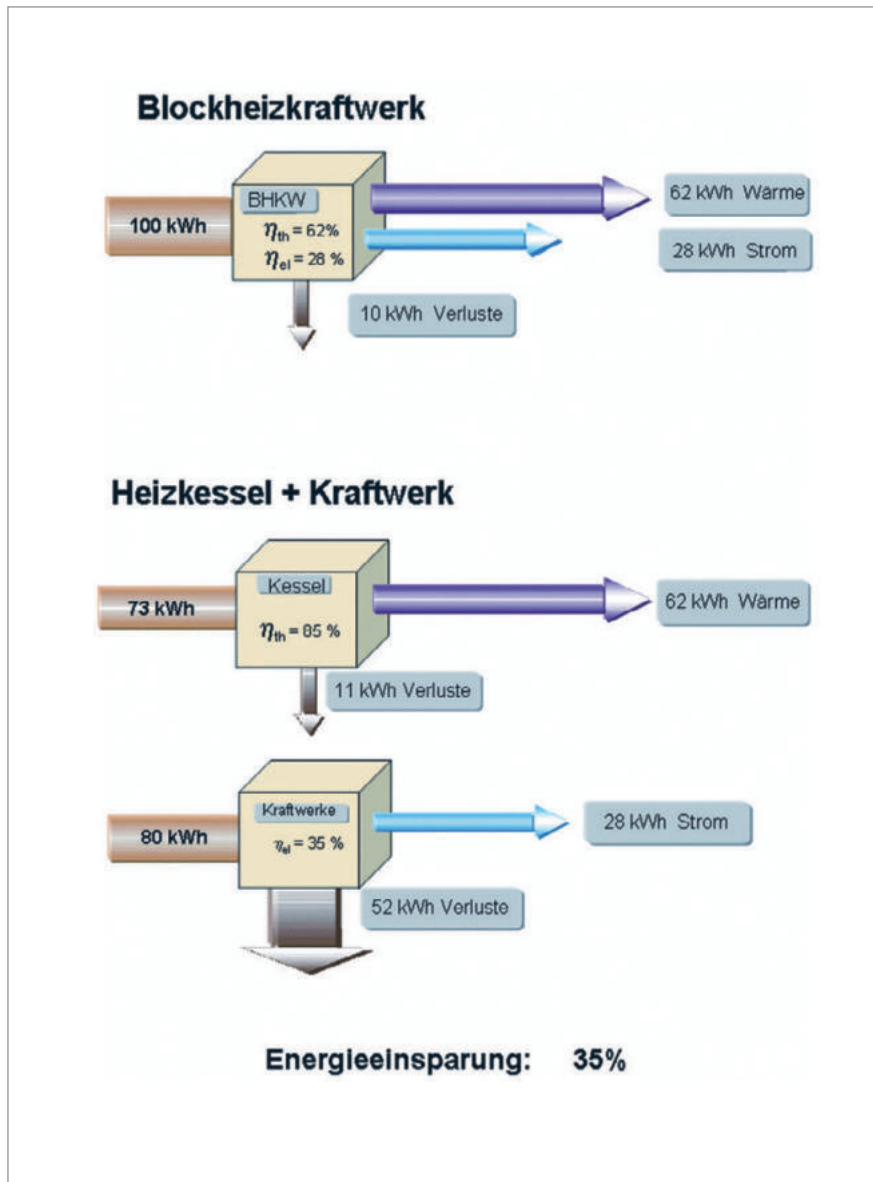


Abbildung 1
Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung
(Quelle: BINE2006)

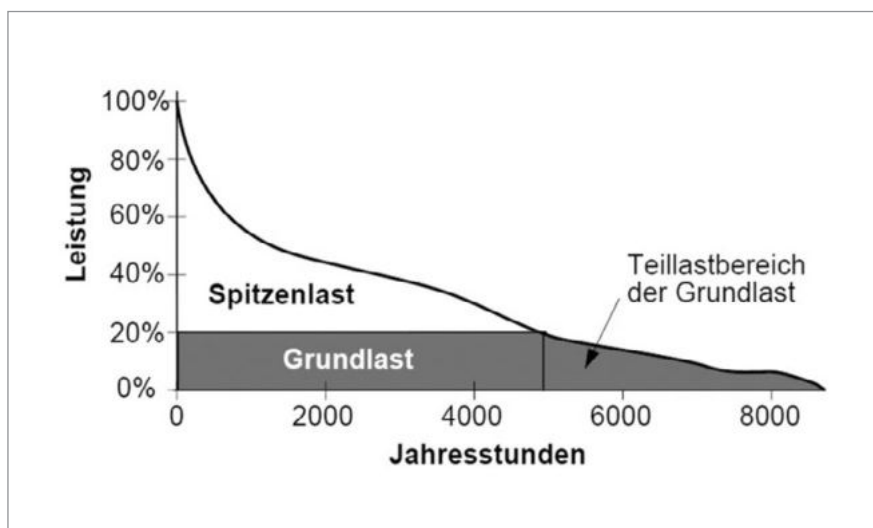


Abbildung 2
Beispiel einer geordneten Jahresdauerlinie
(Quelle: Dötsch1998)

Abbildung 3
Beispiel für den jahreszeitabhängigen Tageslastgang eines Krankenhauses
(Quelle: Dötsch 1998)

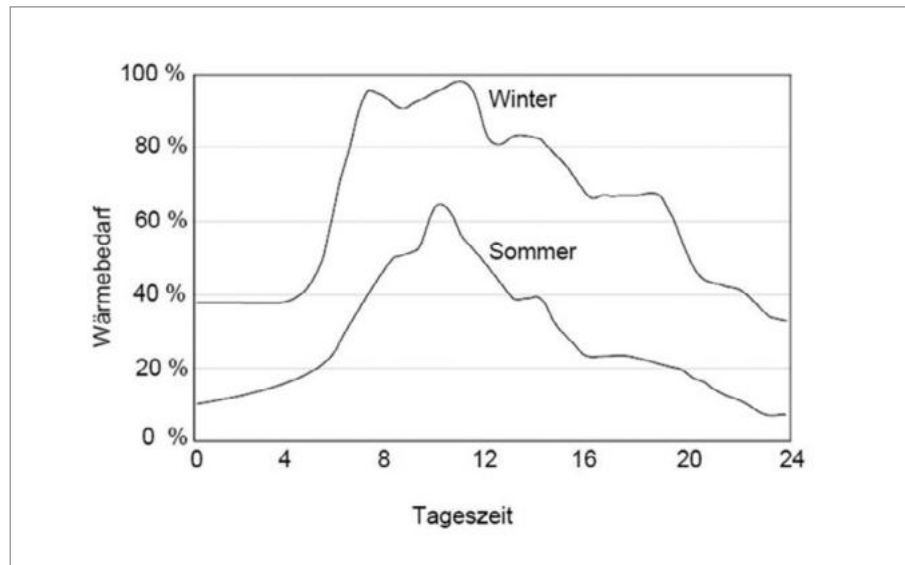
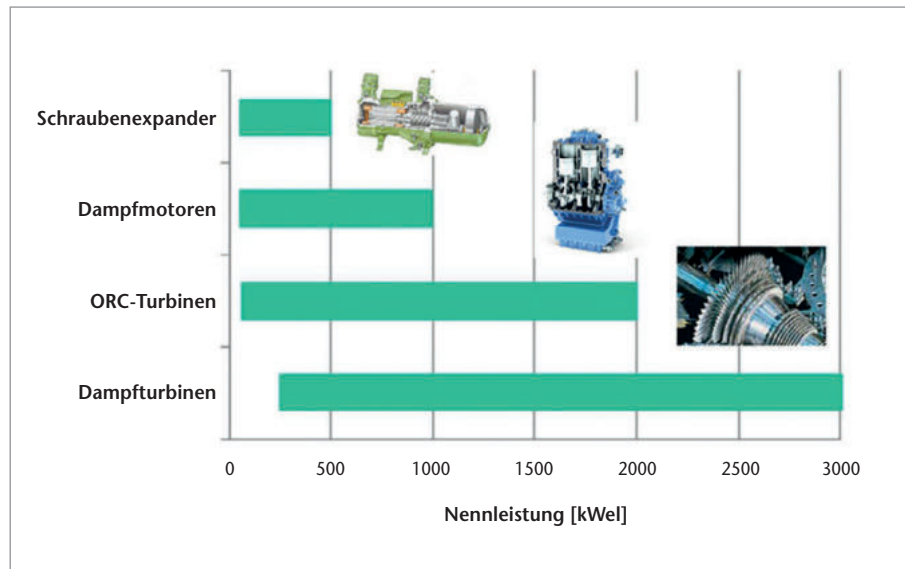


Abbildung 4
Stand der Technik: Expansionsmaschinen



Wärmebedarfs eines Krankenhauses im Sommer und im Winter. Es wird deutlich, dass bei entsprechender Auslegung des Speichers eine häufige Taktung der Grundlastanlage auch im Sommer vermieden werden kann und sowohl die Teillast der Grundlast als auch Teile der sommerlichen Spitzenlast aus dem Speicher gedeckt werden können.

Dieses Beispiel zeigt auch, dass in einem solchen System nur geringe Beiträge einer solarthermischen Anlage genutzt werden könnten, da die Bereitstellung von Solarwärme im Grundlastbereich die Laufzeit und damit die Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlage beeinträchtigen würde. Wünschenswert wäre also, Solarenergie nicht nur zur Bereitstellung von Nutzwärme, sondern ebenfalls zur kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme einsetzen zu können.

Dabei sollte derselbe Energiewandler fossile Brennstoffe oder Biomasse und Solarenergie nutzen können. Dies erfordert allerdings die Bereitstellung der Wärme auf hohem Temperaturniveau, und schränkt die Auswahl der KWK-Technologieoptionen ein.

Technologien für solare KWK

Besonders geeignet sind Dampfprozesse, entweder mit Wasser/Dampf oder organischen Arbeitsmedien. Für Leistungen bis ca. 500 kWel werden Schraubenexpander und Dampfmotoren angeboten, letztere auch bis in den MW-Bereich. Für höhere Leistungen kommen Dampfturbinen in Frage. ORC-Turbinen können ein breites Leistungsspektrum von wenigen 10 kWel bis mehrere MWe abdecken. (Abbildung 4)



Abbildung 5
Parabolrinnen- und
lineare Fresnel-
Kollektoren



Konzentrierende Kollektoren, insbesondere mit Vakuumreceivern, können Wärme bei Temperaturen bis 400 °C mit gutem Wirkungsgrad bereitstellen.

Parabolrinnenkollektoren werden einachsiger der Sonne nachgeführt und konzentrieren die Strahlung auf das in der Fokallinie verlegte Absorberrohr. Bei linearen Fresnel-Kollektoren ist das Absorberrohr stationär. Der Konzentrador ist aus langgestreckten, einzeln nachgeführten Spiegelfacetten aufgebaut. Dieses System ist wegen der resultierenden geringen Windlasten besonders für die Aufstellung auf Industriedächern geeignet. Mittlerweile gibt es in Deutschland und Europa eine ganze Reihe von Anbietern von Kollektoren allerdings auf unterschiedlichem Entwicklungsstand. Selbst marktreife Produkte werden mangels Nachfrage nicht in Serie produziert und haben deshalb noch vergleichsweise hohe Kosten. Die Wirtschaftlichkeit wird darüber hinaus stark von den jeweiligen Einstrahlungsbedingungen beeinflusst. Je nach Standort können maximal 2000–3000 Betriebsstunden solar gedeckt werden. Deshalb ist eine Kombination mit konventionellen Anlagen zur Erreichung der geforderten Versorgungssicherheit meist unerlässlich. Wesentliche Komponenten für derartige solar unterstützte KWK-Systeme sind bereits verfügbar und erste Pilotanwendungen werden vorbereitet. Nachfolgend stellen wir beispielhaft ausgewählte Konzepte vor.

Aktuelle Beispiele für solar unterstützte KWK

Solar unterstützte Nahwärme mit Biomasse-Heizkraftwerk/Projekt BIOconSOLAR [Sterrer2013]

Mehr als 100 Biomasse-Heizkraftwerke mit ORC-Turbinen sind in der Alpenregion im Betrieb. Die zunehmende Nachfrage nach den als Brennstoff eingesetzten Holzhackschnitzeln, und damit verbundene Kostensteigerungen führte zu der Überlegung, im Sommerbetrieb weitgehend Wärme aus konzentrierenden Kollektoren zu nutzen. Die FH Technikum Wien führte zu diesem Zweck eine Machbarkeitsstudie durch am Beispiel eines 1,5 MWe Heizkraftwerks in Salzburg mit bis zu 7,28 MW Heizleistung.

Der Biomassekessel heizt Thermoöl auf 305 °C, welches die Wärme über Dampferzeuger und Vorwärmer an den ORC-Prozess abgibt. Nach Expansion und Arbeitsleistung in der Turbine wird der Arbeitsmitteldampf in einem Rekuperator weiter abgekühlt und schließlich im Kondensator verflüssigt. Die im Kondensator abgeführte Wärme wird als Heizwärme ins Netz eingespeist. Das aus dem Vorwärmer zurückgeführte Thermoöl wird vor dem Eintritt in den Kessel in einem Abgaswärmetauscher auf 260 °C vorgewärmt. An dieser Stelle ist die Einkopplung der Wärme aus dem Solarfeldkreislauf mittels eines weiteren Wärmetauschers vorgesehen (Abbildung 6, Einspeisepunkt 1).

Abbildung 6
Solar unterstütztes
Biomasse-
Heizkraftwerk
(Quelle: Sterrer)

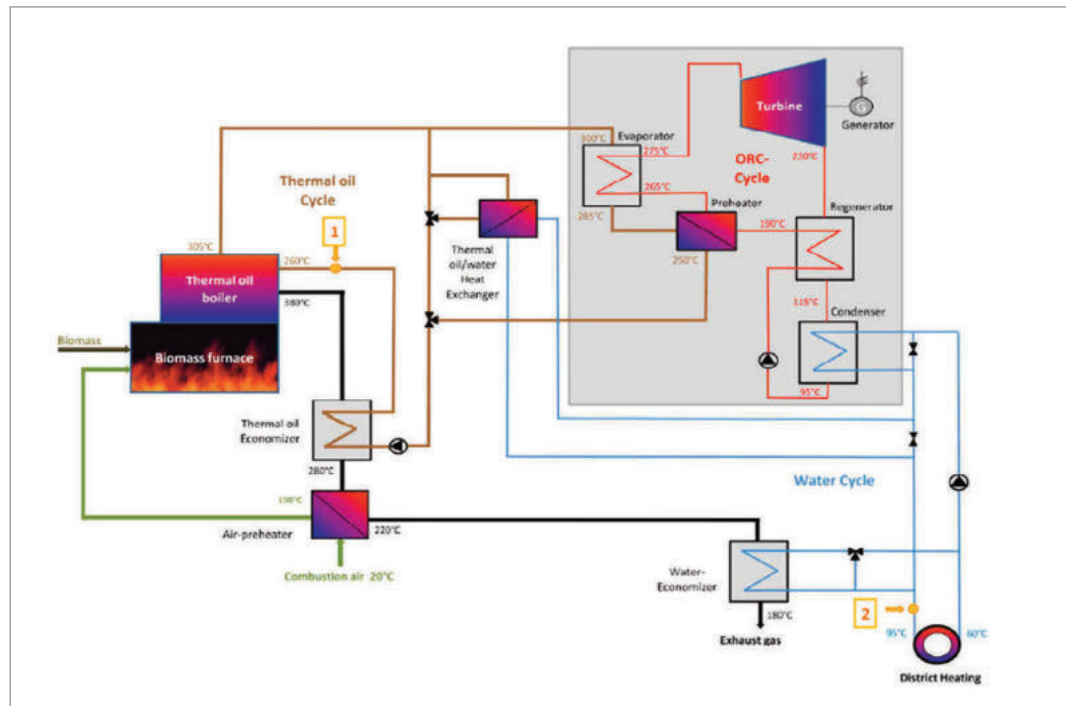
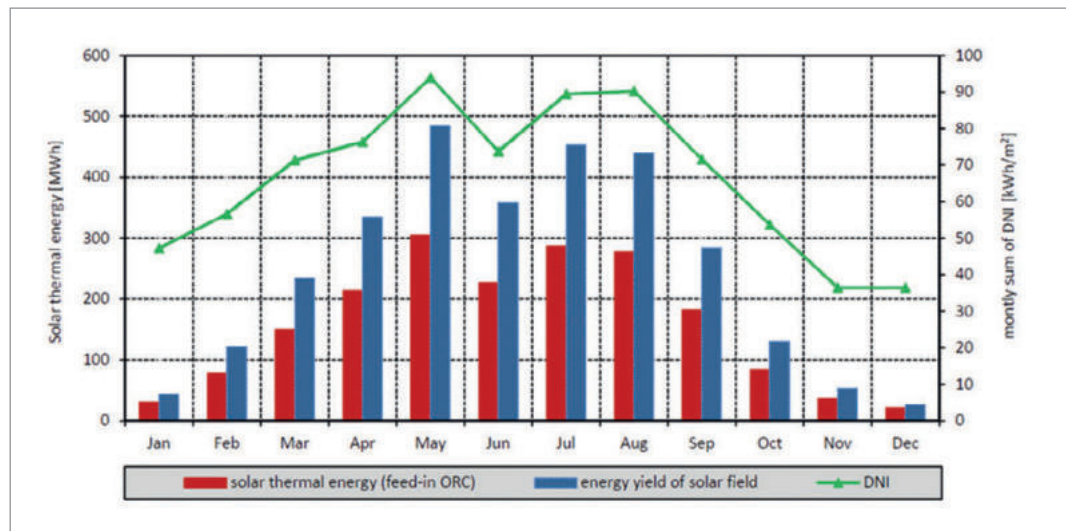


Abbildung 7
Ertragssimulation
(Quelle: Sterrer)



Erreicht das Solarfeld nicht die erforderliche Temperatur von 270 °C, kann die Wärme direkt in das Heiznetz eingespeist werden (Abbildung 6, Einspeisepunkt 2). Das Solarfeld besteht aus 150 Kollektoren, die über einen separaten Thermoölkreislauf angebunden sind.

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass trotz der bescheidenen Einstrahlungsverhältnisse die Einkopplung von Solarenergie thermodynamisch möglich ist und signifikante Beiträge zum Betrieb des ORC-Kreislaufs geleistet werden können (Abbildung 7). Dennoch ist ein wirtschaftlicher Betrieb ohne spezielle Einspeiservergütung erwartungsgemäß unter den gegebenen Randbedingungen nicht möglich.

EU-Projekt REELCOOP [OLIVERA2013]

Ein ganz ähnliches Konzept soll im Rahmen eines EU-Projektes als Lehr- und Demonstrationsanlage für konzentrierende Solarsysteme in Tunesien realisiert werden. Dabei soll ein zusätzlicher Solarspeicher den Solaranteil erhöhen und eine noch flexiblere Betriebsweise ermöglichen (Abbildung 8). Darüber hinaus werden in parallelen Teilprojekten zwei weitere Technologien für kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung für gebäudebezogene Anwendungen entwickelt. Ein Konzept basiert auf Photovoltaik, die in eine belüftete Fassade integriert ist. Das andere Konzept kombiniert stationäre, evakuierte CPC-Kollektoren (Compound Parabolic Concentrator) mit Biomassekesseln und einem Niedertemperatur-ORC.

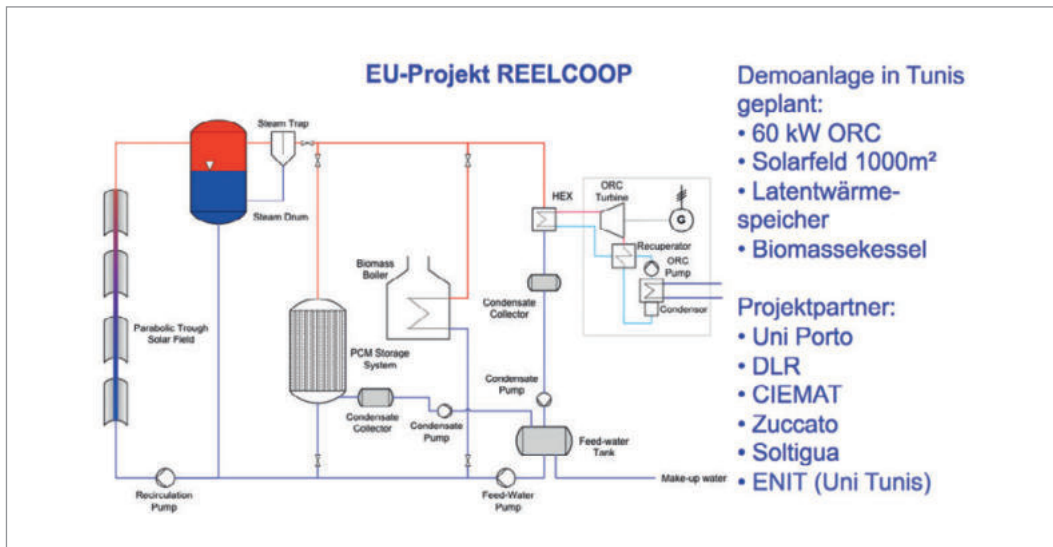


Abbildung 8
REELCOOP
Anlagenschema

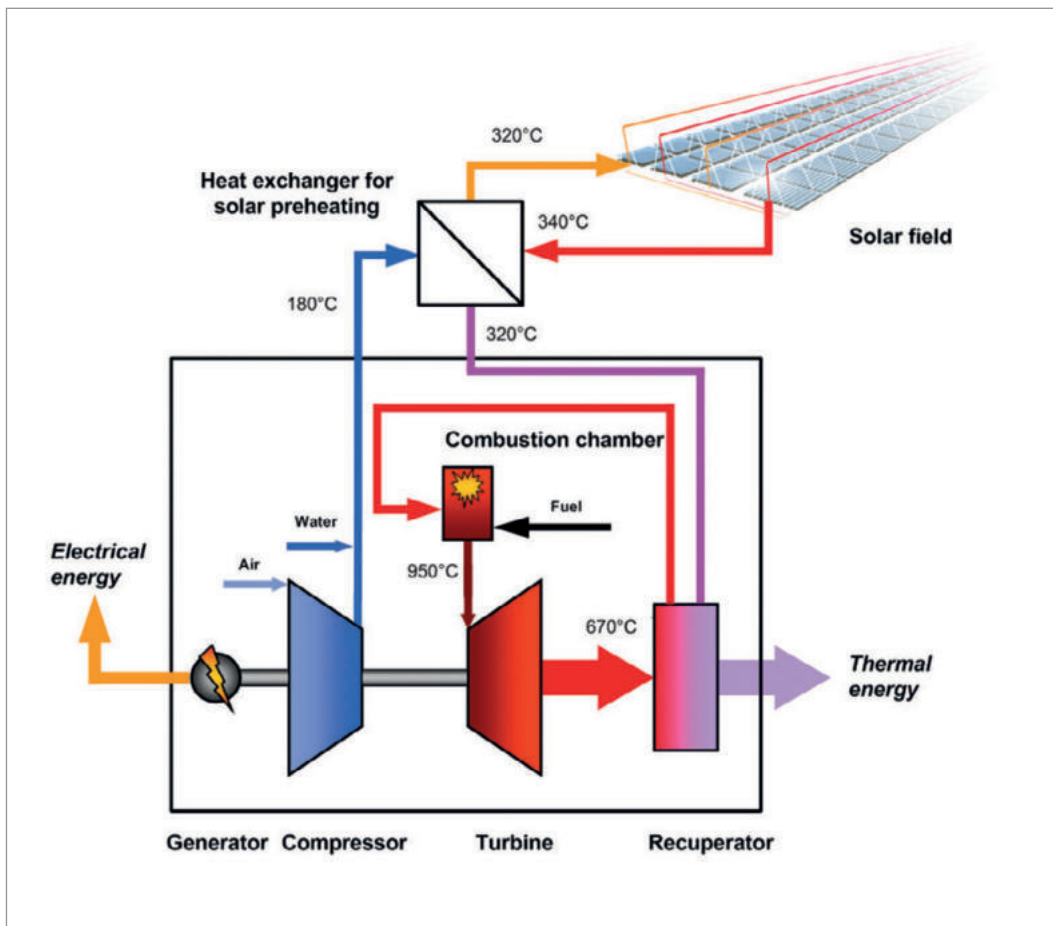


Abbildung 9
Anlagenschema
Mikrogasturbine
mit solarer
Luftvorwärmung

Beide Systeme werden für eine elektrische Nennleistung von 6 kW ausgelegt.

Mikrogasturbine mit solarer Luftvorwärmung – Industrial Solar/Dürr [Iglauer2013]

Aufbauend auf der erfolgreichen Demonstration einer solaren Wärmebereitstellung für Lackrocknungsprozesse in der Automobilindustrie [Zah-

ler2012] haben der Kollektorhersteller Industrial Solar und die Dürr Systems GmbH ein Konzept zur Einkopplung solarer Wärme in eine KWK-Anlage auf Basis einer Mikrogasturbine entwickelt. Gasturbinen werden häufig eingesetzt, um die bei der thermischen Nachbehandlung von belasteter Abluft frei werdende Energie in Form von Strom und Wärme nutzbar zu machen.

Dieser bewährte Prozess wurde nun wie folgt modifiziert: Die komprimierte Luft aus dem Verdichter wird nicht direkt über den Rekuperator der Brennkammer zugeführt, sondern zunächst durch Einspritzung von Wasser abgekühlt und anschließend über einen Wärmetauscher wieder vorgewärmt.

Dieses Verfahren bietet mehrere Vorteile: Die solare Wärmeeinkopplung erfolgt auf einem moderaten Temperaturniveau, der Solarbeitrag kann gegenüber reiner Prozesswärmebereitstellung gesteigert werden. Durch die Wassereindüsung steigt die Leistungsabgabe der Turbine, gleichzeitig werden Stickoxid-Emissionen reduziert.

Als nächste Schritte der Entwicklung sind ausführliche Tests einer Mikrogasturbine mit Wassereinspritzung vorgesehen, anschließend wird zeitnah eine erste Pilotanlage bei einem geeigneten Kunden angestrebt.

Zusammenfassung und Ausblick

Solare Kraft-Wärme-Kopplung sollte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Versorgungssicherheit grundsätzlich als Hybridsystem mit fossilen oder erneuerbaren Brennstoffen realisiert werden. Basistechnologien hierfür sind – in unterschiedlichem Reifegrad – verfügbar. Die wesentlichen Herausforderungen liegen in der Systemintegration, Kostensenkung der Komponenten, und der Realisierung von Referenzanlagen.

Solar unterstützte KWK bietet die Chance, die Solaranteile an einem künftigen Strom-Wärme-System zu erhöhen. Gleichzeitig kann durch die Entkopplung von Strom- und Wärmeproduktion mittels integrierter Wärmespeicher ein Beitrag zur Netzstabilisierung bei steigenden Anteilen fluktuierender Energiequellen in der Stromerzeugung geleistet werden.

Literatur

[BINE2006:] Milles, U.: BINE basisEnergie 21, Hrsg. FIZ Karlsruhe GmbH, ISSN 1438-3802

[Dötsch1998]: Dötsch, C., Taschenberger, J., und Schönberg, I.: Leitfaden Nahwärme ,UMSICHT-Schriftenreihe, Band 6, Hrsg.: Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen; 1998, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-5186-1

[HENNECKE2011] Hennecke, K.: Solar Heat for industrial processes – the Challenge of System Integration, 2nd European Conference on Polygeneration, Tarragona, 30. März – 1. April 2011

[IGLAUER2013] Iglauer, O. und Zahler, C.: A new solar combined heat and power system for sustainable automobile manufacturing, SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Freiburg, 23.–25. September 2013

[NEUHÄUSER2011] Neuhäuser, A.: Trends in Medium Temperature Collector Technology and Solar Polygeneration, Fraunhofer ISE SolarSummit 2011, Freiburg, 14.–15. November 2011

[OLIVERA2013] Oliveira, A.I. und Coelho, B.: REEL-COOP project: Developing renewable energy technologies for electricity generation, 12th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET-2013), Hongkong, 26.–29. August 2013

[PLATZER2009] Platzer, W., Morin, G., Neuhäuser, A. und Sauerborn, A.: Solarthermische Kraftwerke für den mittleren Leistungsbereich – Machbarkeitsstudie unter Einbeziehung neuer Kraftwerkskomponenten und Versorgungsstrategien, Abschlussbericht zum Vorhaben MEDIFRES, Förderkennzeichen 03UM0085, Freiburg, Oktober 2009

[STERRER2013] Sterrer, R., Schidler, S., Schwandt, P., Franz, P. und Hammerschmid, A.: Theoretical analysis of the combination of CSP with a Biomass CHP-Plant using ORC Technology in Central Europe, SolarPACES 2013, Las Vegas, 17.–20. September 2013

[Zahler2012] Zahler, C., Iglauer, O.: Solar process heat for sustainable automobile manufacturing, SHC 2012, San Francisco, Juli 2012. Energy Procedia 30 (2012), S. 775–782