

# Kombinierter Einsatz von solarer Wärme und Kraft-Wärme-Kopplung – eine Perspektive für die Nahwärme?

von Jörg Entress und Friedhelm Steinborn

Dipl. Phys. Jörg Entress ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart

Dipl. Ing. Friedhelm Steinborn ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Systemanalyse des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart

## Überblick

Der Einsatz von Blockheizkraftwerken (BHKW) kann zu einer deutlichen Reduzierung der klimagefährdenden CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Dabei kann die ausgekoppelte Wärme etwa zum gleichen Preis wie konventionell erzeugte Wärme abgegeben werden. Höhere CO<sub>2</sub>-Einsparungen lassen sich hingegen mit solarer Nahwärme erzielen, allerdings zu höheren Kosten. Eine Kombination dieser beiden Wärmetechniken verspricht Vorteile: Einerseits kann der Wärmespeicher des Solarsystems auch zum Ausgleich von Lastspitzen beim Betrieb des BHKW's genutzt werden. Andererseits kann die während der einstrahlungsarmen Wintermonate fehlende solare Wärme durch das BHKW erzeugt werden. Detaillierte Simulations- und Optimierungsrechnungen zeigen jedoch, daß eine Kombination dieser Wärmetechniken nicht immer empfehlenswert ist.

With Cogeneration of Heat and Power (CHP), climate-endangering CO<sub>2</sub>-emissions can be reduced significantly. The heat produced can be delivered at prices comparable to those of conventionally produced heat. With solar district heating, yet higher CO<sub>2</sub>-savings are possible but at higher cost. Promising is a combination of CHP and solar district heating: the heat storage of the solar system can be used to level out heat demand, leading to smooth CHP operation, while heat generated by CHP can be used to substitute for low irradiation during the winterperiod. However, calculations together with simulation and optimization indicate that combining CHP and solar district heating is not the optimal solution in all cases.

## 1. Einleitung

Die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung mit Blockheizkraftwerken (BHKW) ist wegen ihrer vergleichsweise günstigen Kosten heute für die Nahwärmeversorgung weitaus wichtiger als solare Wärme. Wenn deren Kosten in Zukunft geringer werden, etwa durch die Großserienfertigung von Kollektoren oder durch innovative Speicherkonzepte [1], so kann neben der Wärme aus Blockheizkraftwerken zunehmend auch solare Wärme eingesetzt werden. Beide Wärmetechniken ergänzen sich sinnvoll, wenn der Wärmebedarf bei hoher Einstrahlung im Sommer solar und im Winter überwiegend bei niedriger Einstrahlung durch

das BHKW gedeckt wird. Dem Wärmespeicher kommt hierbei eine zentrale Rolle zu. Er speichert die solare Wärme bei geeigneter Auslegung bis in den Winter hinein und ermöglicht einen stromgeführten BHKW-Betrieb, weitgehend unbeeinträchtigt von den Schwankungen des Wärmebedarfs. Ein stromgeführter BHKW-Betrieb lohnt sich für Anlagenbetreiber wie Stadtwerke, die mit den Blockheizkraftwerken ihren Strombezug reduzieren und dadurch Leistungsbezugs-kosten vermeiden können. Allerdings sollten bei dieser kombinierten Nahwärmeversorgung die solare Wärme nicht durch den BHKW-Betrieb verdrängt oder, insbesondere zu Stromhöchstlastzeiten, die BHKW-Betriebsbereitschaft verringert werden, da die CO<sub>2</sub>-Einsparungen bzw. Stromerlöse sonst geringer ausfallen würden.

Ein Nahwärmenetz, in dem BHKWs mit Solarenergie kombiniert sind, wurde bisher noch nicht realisiert. Deshalb wurden detaillierte Simulations- und Optimierungsrechnungen durchgeführt, um die technischen Eigenschaften und die Wirtschaftlichkeit dieser Kombination unter verschiedenen Rahmenbedingungen umfassend zu beurteilen. Gleichzeitig wurden auch Nahwärmeversorgungen untersucht, die, abgesehen von einer Heizkesselunterstützung, allein nur mit Kraft-Wärme-Kopplung oder nur mit Solarenergie arbeiten (projektbezogene Vorstudien wurden für Ulm [2] und Freiburg [3] durchgeführt).

## 2. Modell eines kombinierten Nahwärmesystems

Den Aufbau einer kombinierten Nahwärmeversorgung zeigt [Abbildung 1](#). Das BHKW wird nur dann in Betrieb genommen, wenn die BHKW-Zulauftemperatur unterhalb einer vorgegebenen Grenztemperatur (70 °C) liegt. Der BHKW-Zulauf ist dabei im wesentlichen mit dem Wärmelastrücklauf identisch. Wenn jedoch überschüssige BHKW-Wärme in den Speicher geladen wird, so ist zusätzlich noch ein Zufluß aus der untersten Speicherschicht im BHKW-Zulauf zu berücksichtigen. Eine Speicherbeladung mit BHKW-Wärme erfolgt nur dann, wenn die Wärmeabgabe des BHKW's höher ist als der aktuelle Wärmebedarf. Unnötige Beladungsvor-

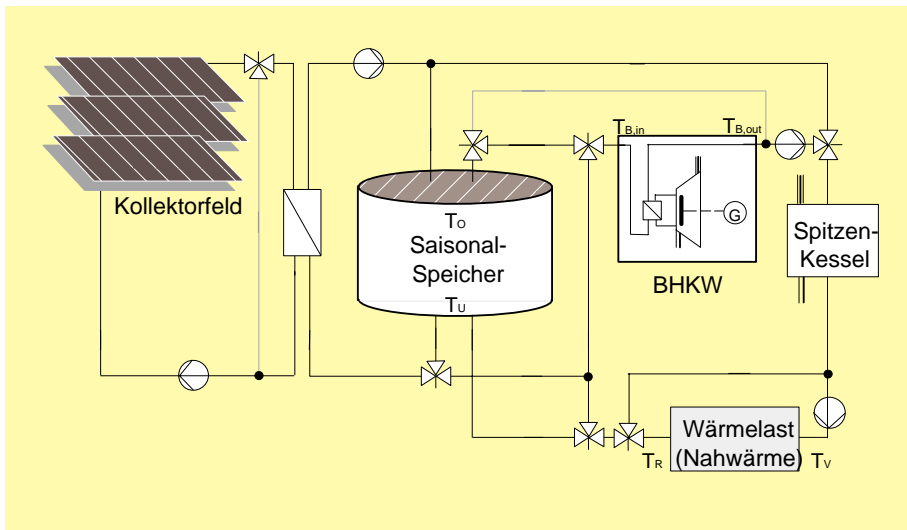
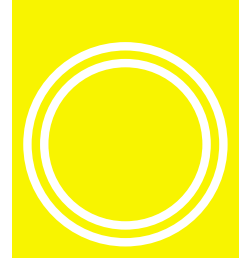


Abbildung 1: Modell der kombinierten Nahwärmeversorgung

Tabelle 1: Zusammenfassung der heutigen technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für Bockheizkraftwerke (BHKW), Kollektor, Speicher und Gebäude [1, 7, 8 und 9]

Wärmebedarf Klima BHKW-Daten	3 GWh/a; 250 NEH-Reihenhäuser [6] Trier gasgefeuert; $\eta_{ges} = 90\%$ ; $\eta_{el} = f(P_{BHKW})$ [29 – 40 %]
Referenzsysteme: – Wärmeerzeugung – Stromerzeugung	Gas-Brennwertkessel; $\eta = 90\%$ Kondensationskraftwerk (Steinkohle); $h = 42\%$
Investitionskosten Zinsrate Brennstoffkosten (Gas)	heutige Komponentenkosten 7 % 2,5 Dpf/kWh
Stromvergütung-Arbeit: – Winter Hoch-/Niedertarif – Sommer Hoch-/Niedertarif Stromvergütung-Leistung	11,7 Dpf/kWh <sub>el</sub> /8,6 Dpf/kWh <sub>el</sub> 10,5 Dpf/kWh <sub>el</sub> /6,7 Dpf/kWh <sub>el</sub> 213 DM/kWh <sub>el</sub>

gänge, die zur Vermischung der Temperaturschichten im Speicher führen, werden dadurch vermieden.

Wenn die Heizleistung des BHKW zusammen mit der Wärme aus dem Speicher (obere Entnahmestelle) nicht, für den Wärmebedarf bei vorgegebener Vorlauftemperatur ausreicht, dann wird der Heizkessel in Betrieb genommen. Er bezieht seinen Zulauf vom BHKW und vom Wärmespeicher. Der Betrieb des Heizkessels kann deshalb sehr einfach in Abhängigkeit der Zulauf-temperatur geregelt werden.

Die Pumpe im Kollektorkreis läuft, abhängig von Speicher- und Kollektor-zulauf-temperaturen. Voraussetzung für den Pumpenbetrieb ist, daß solare

Wärme in den Speicher geladen wird oder zumindest die Leitungen im Kollektorkreis vorgewärmt werden.

### 3. Methodik

Der Betrieb des oben beschriebenen Nahwärmesystems wird mit dem Programm TRNSYS [4] dynamisch simuliert. Es verwendet dabei stündliche Daten für das Klima (Einstrahlung und Temperatur) und den Wärmebedarf des Nahwärmegebietes. Der Wärmebedarf wurde mit dem Programm BHKW-PLAN [5] bestimmt. Die Simulation wurde für verschiedene Kollektorflächen, Speichervolumina, BHKW-Leistungen und -Betriebsvorgaben durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Datenkennfeldern gespeichert.

Ein weiteres Datenkennfeld mit Kosten und Einsparungsraten bei heutigen technisch/wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wurde mit Hilfe der in Tabelle 1 zusammengefaßten Daten erstellt. Die Wirtschaftlichkeitsrechnungen berücksichtigen vermiedene Strombezugskosten von Stadtwerken als Vergütung für den BHKW-Strom. Die kostenoptimalen Systemkonfigurationen zu vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Einsparungen wurden mit einem „Downhill-Simplex“ – Optimierungsalgorithmus bestimmt. Vorgegebene CO<sub>2</sub>-Einsparungsziele gehen dabei als Nebenbedingungen in die Optimierungsrechnungen ein.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Gegenseitige Beeinflussung der beiden Wärmeerzeuger

Abbildung 2 veranschaulicht qualitativ die Wechselwirkung zwischen solarer und BHKW-Wärme. Mit zunehmender Kollektorfläche nimmt der solare Wärmedeckungsanteil zu. Gleichzeitig wird aber der BHKW-Wärmedeckungsanteil reduziert, obwohl der Heizkessel noch einen Anteil an der Wärmeversorgung übernehmen muß. Bei konstanter BHKW-Leistung bedeutet dies eine verminderte BHKW-Betriebsbereitschaft.

### 4.2 BHKW-Betrieb

Die BHKW-Betriebsvorgaben sind so zu wählen, daß die Solaranlage optimal genutzt wird und das BHKW lediglich Wärme aus dem Heizkessel ersetzt. Ein stromgeführter BHKW-Betrieb sollte dabei gewährleistet sein.

Während der einstrahlungsarmen Wintermonate kann das BHKW die fehlende solare Wärme bereitstellen. Um den Bezug von elektrischer Leistung im Winter zu reduzieren, ist das BHKW bei stromgeführtem Betrieb daher möglichst während der gesamten Stromhöchstlastzeiten im Winterhalbjahr (täglich von 8–16 und 17–21 Uhr) in Betrieb.

Für die Rahmenbedingungen in Tabelle 1 wird der gesamte Wärmebedarf im Sommer durch solare Wärme gedeckt, wenn der solare Wärmedeckungsanteil über ca. 30 % liegt (Abbildung 3). Bei gleichzeitigem

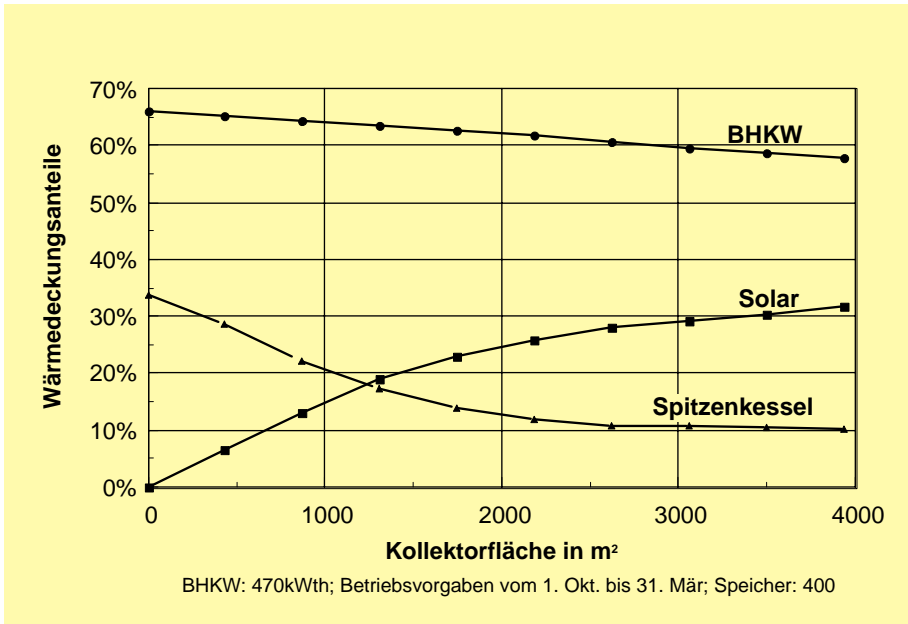
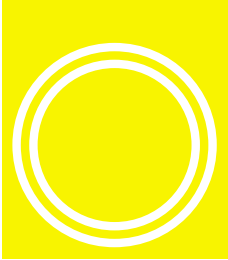


Abbildung 2: Wechselwirkung zwischen den Wärmeerzeugern bei variiertem Kollektorfläche

Abbildung 3: Jahreszeitlicher Verlauf des Wärmebedarfes und der solaren Gewinne bei unterschiedlichen solaren Wärmeanteilen

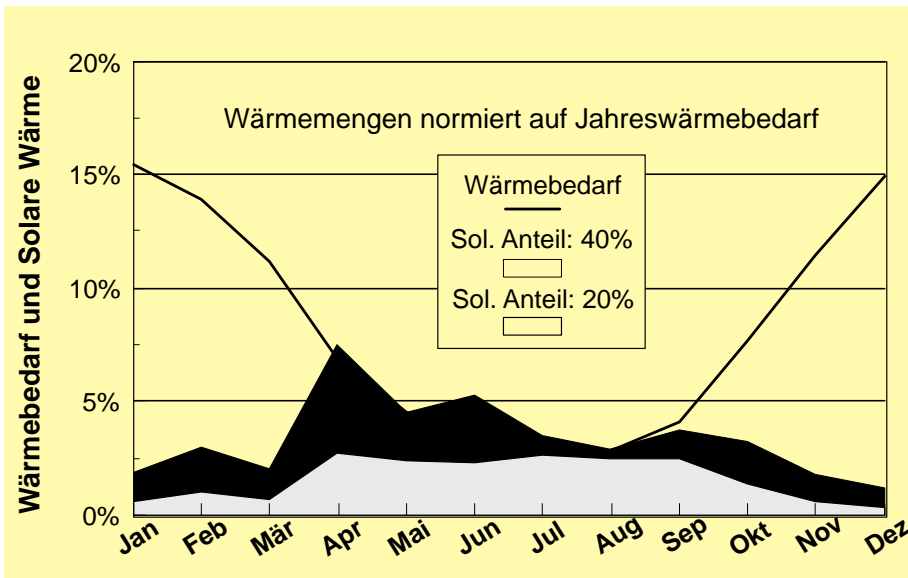


Tabelle 2: Daten zu heutigen kostenoptimalen Nahwärmesystemen bei vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Einsparungen

R <sub>CO2</sub> %	δ <sub>Sol</sub> %	δ <sub>KWK</sub> %	A <sub>Kol</sub> m <sup>2</sup>	P <sub>BHKW</sub> kW <sub>therm</sub>	V <sub>Sp</sub> m <sup>3</sup>
50	21	73	1498	990	5225
55	51	44	4076	610	15420
60	68	14	5720	200	16140
65	76	10	7278	141	17943

BHKW-Betrieb im Sommer müßte die BHKW-Wärme bis in das Winterhalbjahr hinein gespeichert werden, was einen entsprechend vergrößerten

Speicher erfordert. Tägliche BHKW-Betriebszeiten im Sommer von 2 bis 4 Stunden sind daher nur bei solaren Wärmedeckungsanteilen von unter

20 % kostenoptimal [6]. Bei den kombinierten Systemen mit höherem solaren Anteil werden deshalb die BHKW-Betriebszeiten auf das Winterhalbjahr (1. Oktober bis 31. März) begrenzt.

#### 4.3 Heutige Nahwärmesysteme

Um die unterschiedlichen Nahwärmevarianten zu bewerten, wurden die kostenoptimalen Nahwärmesysteme, die resultierenden Wärmedeckungsanteile und -kosten in Abhängigkeit einer vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Einsparung bestimmt. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Wärmeversorgung einer Niedrigenergie-Reihenhaussiedlung mit einem jährlichen Wärmebedarf von 3 GWh und den in Tabelle 1 zusammengefaßten Daten der technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Bei den BHKW-versorgten Nahwärmesystemen erfolgte die Systemauslegung so, daß das BHKW im Winterhalbjahr während der gesamten Stromhöchstlastzeiten in Betrieb ist. Dadurch können vermiedene Leistungsbezugskosten in Höhe der elektrischen BHKW-Leistung berücksichtigt werden. In Tabelle 2 sind die Auslegungen der kostenoptimalen Nahwärmesysteme zusammengefaßt.

#### Wärmedeckungsanteile bei vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Einsparungen

CO<sub>2</sub>-Einsparungen von bis zu 50 % lassen sich unter heutigen Kostenbedingungen am günstigsten mit einer reinen BHKW-Nahwärmeversorgung erreichen (Abbildung 4). Für höhere CO<sub>2</sub>-Einsparungen muß man zusätzlich solare Wärme einsetzen. So ist die kombinierte Nahwärmeversorgung für Brennstoffeinsparungen von ca. 50 – 65 % die kostengünstigste Versorgungsalternative. Bei höheren CO<sub>2</sub>-Einsparungen ist eine kombinierte Nahwärmeversorgung nicht mehr kostenoptimal. Hier ist die solare Nahwärmeversorgung ohne BHKW am günstigsten.

#### Monatliche Wärmebilanzen eines kombinierten Nahwärmesystems

Exemplarisch sind in Abbildung 5 die monatlichen Wärmebilanzen für das kostenoptimale Nahwärmesystem mit 55 %-iger CO<sub>2</sub>-Einsparung dargestellt. Der solare Wärmedeckungsanteil beträgt für dieses System 51 %

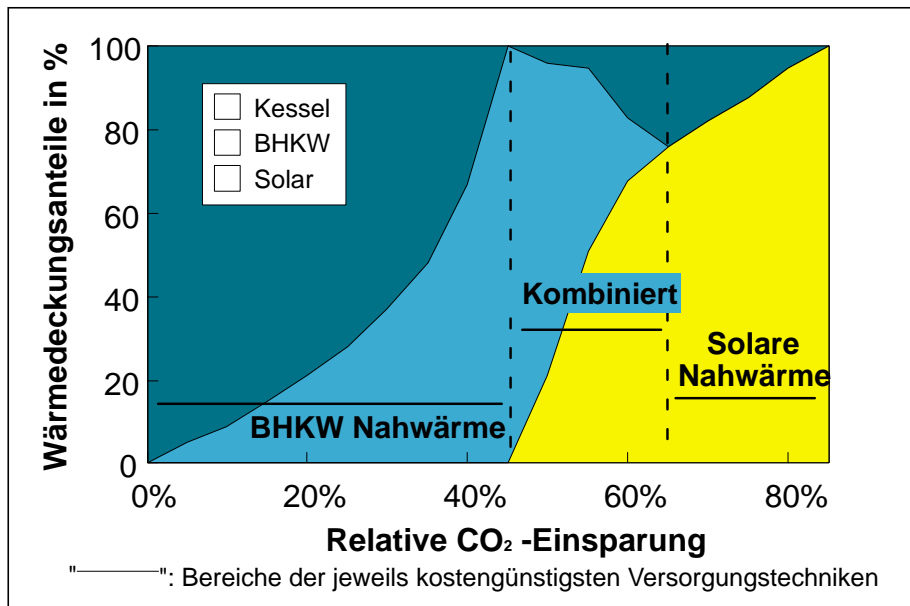
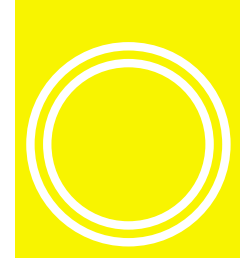
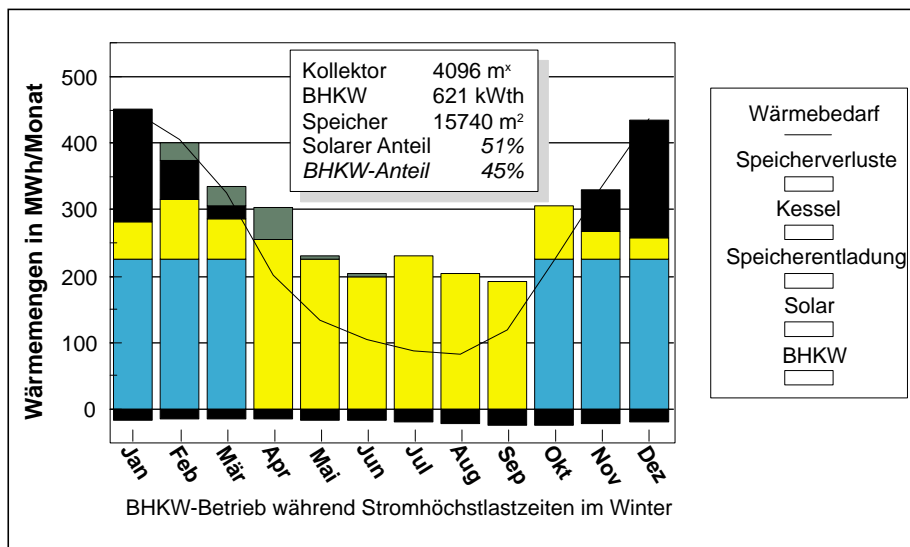


Abbildung 4: Wärmedeckungsanteile kostenoptimaler Nahwärmesysteme in Abhängigkeit vorgegebener CO<sub>2</sub>-Einsparungen unter heutigen Rahmenbedingungen

Abbildung 5: Wärmebilanzen für die kostenoptimale kombinierte Nahwärmeversorgung mit 55 %-tiger CO<sub>2</sub>-Einsparung unter heutigen Rahmenbedingungen



und der BHKW-Deckungsanteil 44 %. Das BHKW deckt die Wärmegrundlast im Winterhalbjahr mit konstanter Wärmeabgabe von Oktober bis März ab. Da die BHKW-Wärmeerzeugung im Monatsmittel den Wärmebedarf nicht überschreitet, ist keine längerfristige Speicherung der BHKW-Wärme erforderlich. Die ausgewiesene Speicherenladung (Nettospeicherenladung) entspricht im wesentlichen der im Sommer gespeicherten solaren Wärme. Sie wird im Zeitraum von November bis März zur teilweisen Deckung des Wärmebedarfes genutzt.

Durch die Wärmeabgabe des BHKW's im Winter und durch die Entnahme von solarer Wärme aus dem Speicher beschränkt sich der Bedarf an zusätzlicher Heizkesselwärme überwiegend auf den Zeitraum von Februar bis April und macht lediglich 4 % des jährlichen Wärmebedarfes aus.

Wärmekosten bei vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Einsparungen

Um die Wirtschaftlichkeit der Nahwärmevarianten zu veranschaulichen, sind in [Abbildung 6](#) die Wärmekosten der

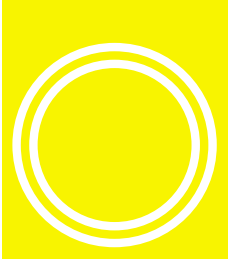
optimalen Nahwärmeversorgungen ([Abbildung 4](#)) in Abhängigkeit der vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Einsparungen aufgetragen. Das kostengünstigste Nahwärmesystem ist eine BHKW-Nahwärmeversorgung mit einem BHKW-Wärmedeckungsanteil von 80 % und CO<sub>2</sub>-Einsparungen von 43 %. Dahingegen verursachen zunehmende CO<sub>2</sub>-Einsparungen zusammen mit höheren solaren Wärmeanteilen bei den kombinierten Nahwärmesystemen deutlich höhere Wärmekosten (siehe [Abbildung 5](#)). Unter heutigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Tabelle 1) sind also die BHKW-Nahwärmesysteme am kostengünstigsten. Wirtschaftlich relevant sind kombinierte Nahwärmesysteme allein für CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Bereich von 50 % bis 60 %.

Gesamtkosten einer integrierten Nahwärmeversorgung

In [Abbildung 7](#) sind die Gesamtkosten für das kostenoptimale Nahwärmesystem mit 55 %-tiger CO<sub>2</sub>-Einsparung aufgegliedert. Die Kapital- und Wartungskosten für das Nahwärme-Verteilnetz, der Speicher und das Kollektorfeld haben den größten Anteil bei den Gesamtkosten. Dagegen sind die Kapital- und Wartungskosten für das BHKW deutlich geringer und können nahezu durch die vermiedenen Leistungsbezugskosten der Stadtwerke gedeckt werden. Die Stromerlöse für die erzeugte elektrische Arbeit liegen in der Größenordnung der Brennstoffkosten.

#### 4.4 Perspektiven der kombinierten Nahwärmesysteme in der Zukunft

Für kombinierte Nahwärmesysteme ergeben sich durch technische Weiterentwicklungen der Systemkomponenten sowie durch geringere Investitions- und Wartungskosten veränderte technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Einerseits werden Rationalisierungen bei Kollektoren und Speichern zu deutlichen Einsparungen führen [1]. Andererseits ist mit ansteigenden Brennstoffpreisen zu rechnen. Die Stromkosten werden dadurch ebenfalls erhöht, allerdings nicht in demselben Maße wie die Brennstoffpreise selber, da die Mehrkosten teilweise durch höhere Kraftwerkswirkungsgrade kompensiert werden können.



Zukünftige technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Bei der Bewertung zukünftiger Nahwärmesysteme wird von einer Steigerung der Brennstoffkosten um 25 % ausgegangen, jedoch von keiner wesentlichen Kostensteigerung bei der Stromerzeugung. Durch verbesserte Kollektorabsorber mit geringerem

Emissionsgrad kann eine Wirkungsgradsteigerung von ca. 20 % (bei 700 W/m<sup>2</sup> Einstrahlung und einer Temperatursteigerung im Kollektor von 50 K) für zukünftige Flachkollektoren erwartet werden. Beim Gasmotor-BHKW wird eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades um 15 % bei konstantem Gesamtnutzungsgrad vorausgesetzt. In Zukunft ersetzt das

BHKW nicht mehr Strom aus einem Kohlekraftwerk sondern konkurriert mit Gas- und Dampfturbinenkraftwerken mit einem Jahresnutzungsgrad von 55 %. Das BHKW ist während der Stromhöchstlastzeiten im Winter und bei geringen solaren Wärmeanteilen im Sommerhalbjahr bis zu 4 Stunden täglich in Betrieb.

#### Zukünftige Nahwärmesysteme

Durch den höheren Wirkungsgrad und den emissionsärmeren Brennstoff Gas zukünftiger Kraftwerke ist das CO<sub>2</sub>-Einsparpotential der BHKW-Nahwärmesysteme auf ca. 20 % begrenzt (Abbildung 8). Es liegt also deutlich unter dem heutiger BHKW-Nahwärmerversorgungen. Für CO<sub>2</sub>-Einsparungen von 20 % bis etwa 60 % ist in Zukunft die kombinierte Nahwärmerversorgung kostengünstiger als eine solare Nahwärmerversorgung ohne BHKW. Gegenüber heute sind kombinierte Nahwärmesysteme in Zukunft über einen weitaus größeren Bereich der relativen CO<sub>2</sub>-Einsparungen am kostengünstigsten. Zudem ist die Wärmeversorgung mit kombinierten Nahwärmesystemen teilweise auch günstiger als Wärme aus dem Gaskessel. Insgesamt sind aber auch bei den für die Zukunft angesetzten technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen BHKW-Nahwärmerversorgungen ohne solare Wärme am kostengünstigsten (Abbildung 9).

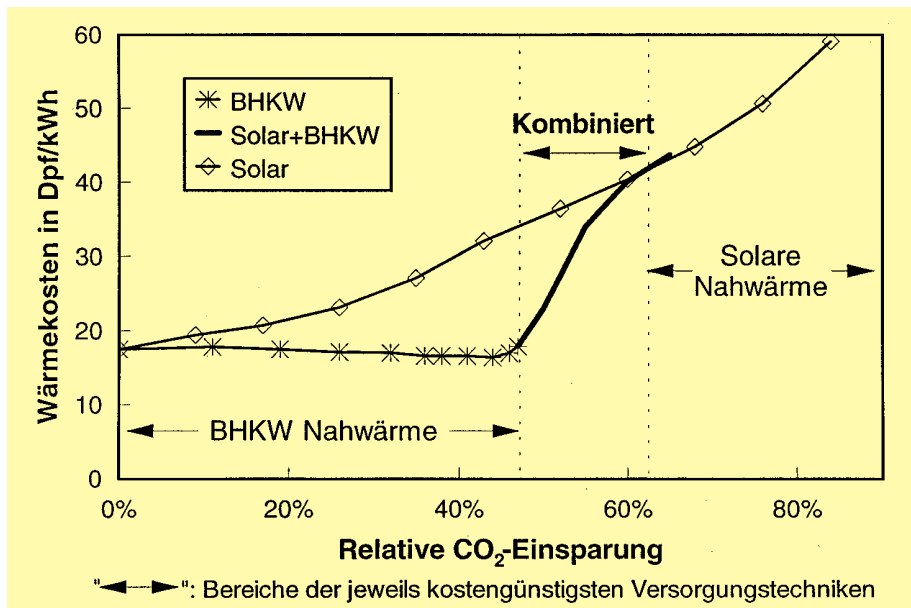
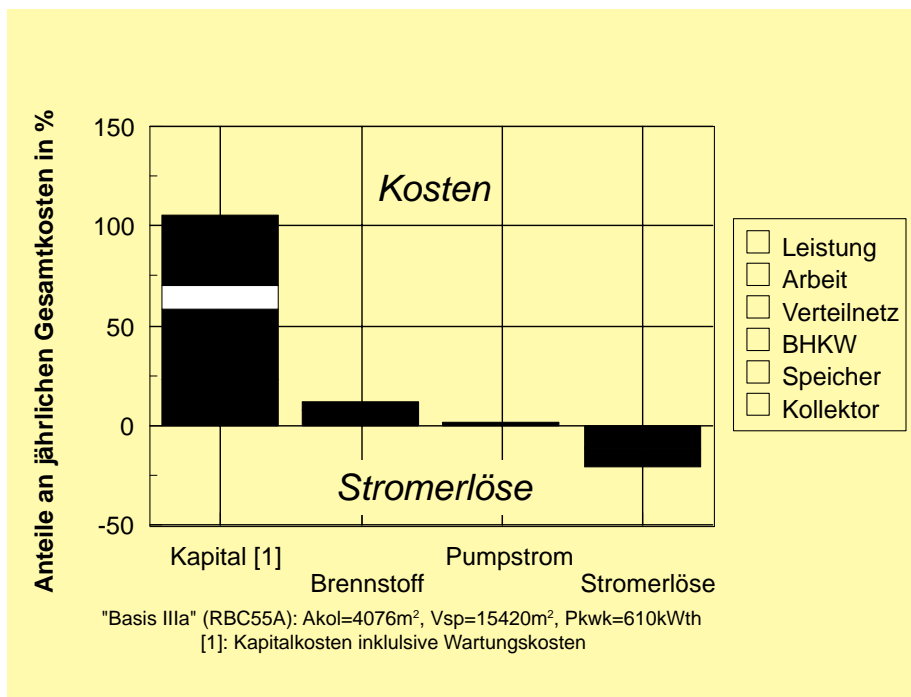


Abbildung 6: Wärmekosten kostenoptimaler Nahwärmesysteme in Abhängigkeit vorgegebener CO<sub>2</sub>-Einsparungen unter heutigen Rahmenbedingungen

Abbildung 7: Aufgliederung der Gesamtkosten für die kostenoptimale kombinierte Nahwärmerversorgung mit 55 %-tiger CO<sub>2</sub>-Einsparung unter heutigen Rahmenbedingungen



#### 4.5 Auswirkungen höherer Brennstoffpreise

Sowohl unter heutigen als auch für die Zukunft prognostizierten technisch/wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind BHKW-versorgte Nahwärmesysteme die kostengünstigste Versorgungsalternative. Kombinierte Nahwärmesysteme führen zu Mehrkosten gegenüber BHKW-Nahwärmerversorgungen ohne solare Wärme. Die solaren Kosten werden verursacht durch Investitionskosten für Kollektoren und Speicher, unabhängig von der Höhe der Brennstoffkosten. Da die BHKW-Wärmekosten mit steigenden Brennstoffpreisen zunehmen, begünstigen höhere Brennstoffkosten demnach die Konkurrenzfähigkeit der solaren Wärme. Mit zunehmenden Brennstoffkosten sollte also entweder die kombinierte Nahwärmerversorgung

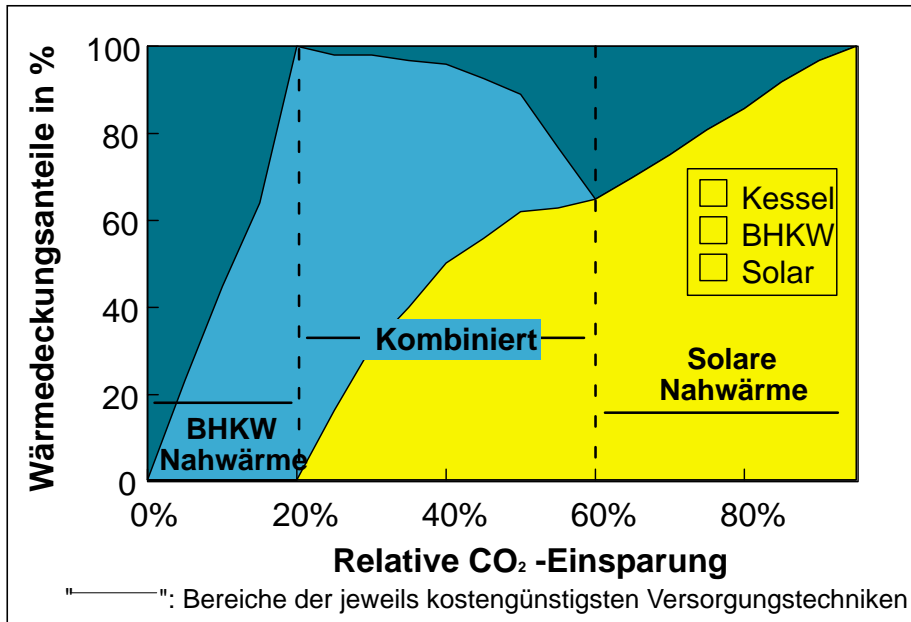
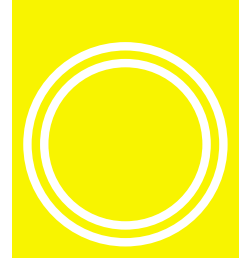


Abbildung 8 ▲

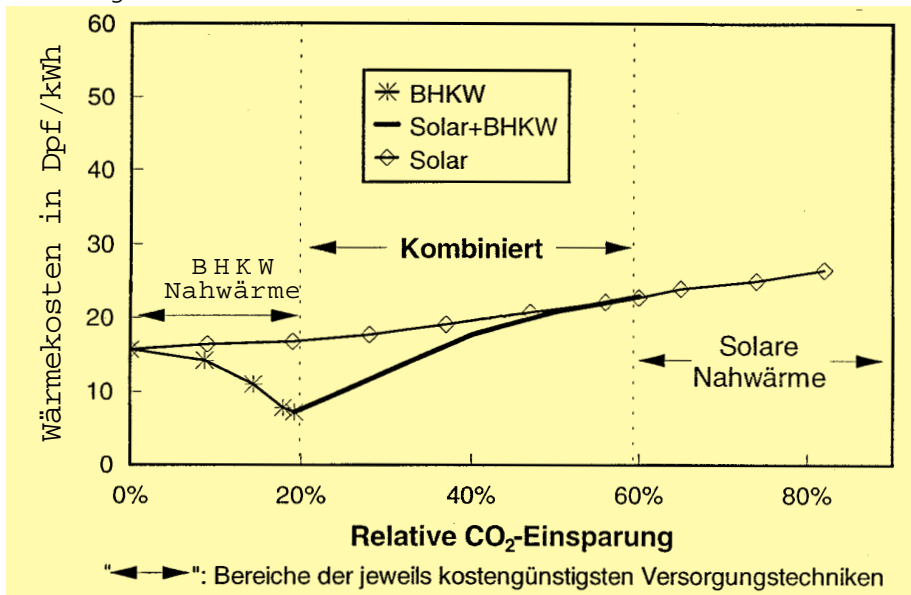


Abbildung 9 ▲

Abbildung 10 ▼

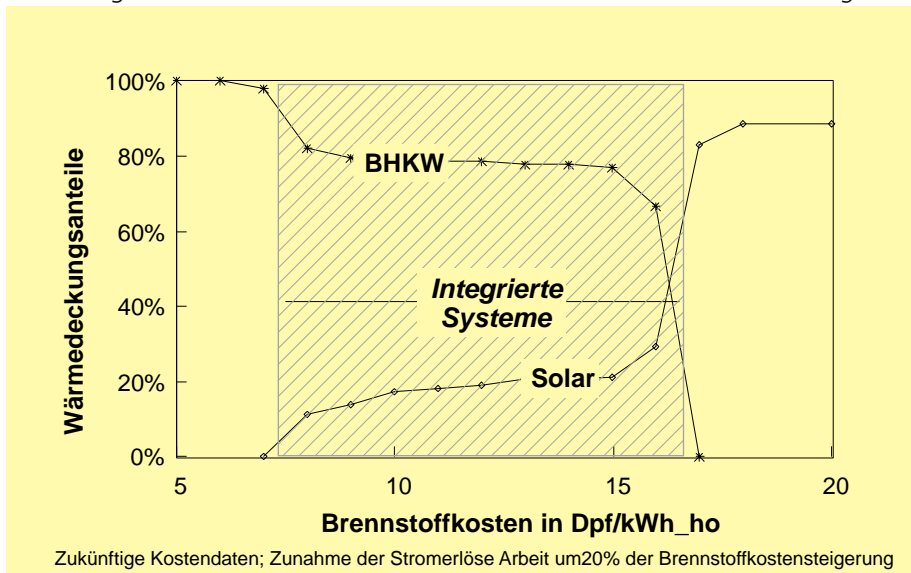


Abbildung 8: Wärmedeckungsanteile kostenoptimaler Nahwärmesysteme in Abhängigkeit vorgegebener CO<sub>2</sub>-Einsparungen unter zukünftigen Rahmenbedingungen

Abbildung 9: Wärmekosten kostenoptimaler Nahwärmesysteme in Abhängigkeit vorgegebener CO<sub>2</sub>-Einsparungen unter zukünftigen Rahmenbedingungen

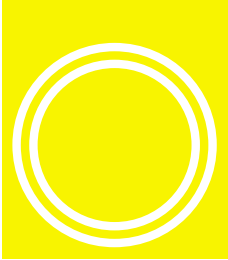
Abbildung 10: Wärmedeckungsanteile kostenoptimaler Nahwärmesysteme in Abhängigkeit der Brennstoffkosten unter zukünftigen Rahmenbedingungen

oder eine rein solare Wärmeversorgung günstiger werden als eine BHKW-Nahwärmeversorgung. Die zukünftigen Kosten für Kollektoren und Speicher machen Solarsysteme wesentlich wirtschaftlicher und werden in den nachfolgenden Betrachtungen berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung der zukünftigen technischen und wirtschaftlichen Daten sind in [Abbildung 10](#) die jeweils kostenoptimalen Wärmeanteile von BHKW und solarer Wärme in Abhängigkeit der Brennstoffpreise aufgetragen. Das BHKW ist im Winter während der Stromhöchstlastzeiten und im Sommer bis zu 2 Stunden täglich im Betrieb. Bei Brennstoffpreisen bis zu 7 Dpf pro Kilowattstunde sind BHKW-Nahwärmesysteme ohne Solar-system am kostengünstigsten. Liegen die Brennstoffpreise über diesem Wert, so sind kombinierte Nahwärmesysteme am günstigsten und die BHKW-Wärme im Sommer wird durch solare Wärme ersetzt. Auch bei weiter ansteigenden Brennstoffpreisen nimmt der solare Anteil nur relativ geringfügig zu bzw. der BHKW-Wärmeanteil nur unwesentlich ab. Der Wärmeanteil des Heizkessels liegt bei allen Systemen unter 10%. Erst bei Brennstoffpreisen über 16 Dpf pro Kilowattstunde ist die solare Nahwärmeversorgung ohne BHKW mit solaren Wärmeanteilen von ca. 90% am kostengünstigsten.

## 5. Schlußfolgerungen

Im Gegensatz zu BHKW-Nahwärmesystemen sind kombinierte Nahwärmesysteme unter den heutigen tech-



nisch/wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich. Die erwarteten Kostenreduktionen und technischen Weiterentwicklungen der Systemkomponenten werden jedoch zu deutlich geringeren Wärmekosten für kombinierte Nahwärmesysteme führen. Allerdings stellt die BHKW-Nahwärmeversorgung auch unter diesen Rahmenbedingungen die kostengünstigste Versorgungsvariante dar, sofern die Brennstoffpreise lediglich um ca. 25 % ansteigen. Dies ist jedoch nicht mehr der Fall, wenn die Brennstoffpreise über 7 Dpf pro Kilowattstunde liegen. Bei einer Verdopplung heutiger Brennstoffkosten kann also Solarenergie mittels kombinierter Nahwärmesysteme auf dem Energiemarkt Fuß fassen. Eine reine solare Nahwärmeversorgung eröffnet diese Möglichkeit dagegen erst bei Brennstoffpreisen von über 16 Dpf pro Kilowattstunde. Liegen die Brennstoffpreise in Zukunft deutlich über dem heutigen Niveau, etwa infolge von Verknappungsprozessen oder wegen gesetzgeberischer Maßnahmen, dann sind kombinierte Nahwärmesysteme also ein sinnvoller Bestandteil einer zukünftigen Energieversorgung.

### Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen einer Dissertation durchgeführt. Mein Dank gilt Herrn Prof. Fischer und Herrn Dr. Nitsch, beide DLR-Stuttgart, für die Bereitstellung der Doktoranden-Stelle.

### Literatur

- [1]: M. Nast  
„Solare Nahwärme“, IKARUS-Teilprojekt 3, ISSN 0946-0012, Forschungszentrum Jülich (1994)
- [2] H. J. Riechert, P. Obert  
„Rationelle Energieversorgung durch Kombination von Solaranlage und Blockheizkraftwerk mit einem saisonalen Großwärmespeicher“, Steinbeiß-Stiftung, Transferzentrum Energietechnik, Ulm (1991)
- [3] J. Kudlek, W. Orlik, C. Suchy  
„Thermische Solarenergienutzung im Geschosswohnungsbau am Beispiel des Neubaugebietes Rieselfeld“, Diplom-Arbeit am Öko-Institut e.V., Freiburg (1994)
- [4] S. A. Klein et al.  
„TRNSYS – a Transient System Simulation Program; Version 13.3“, University of Wisconsin-Madison, Madison (1990)
- [5] F. Steinborn et al.  
„BHKW-Plan – Programm zur wirtschaftlichen Auslegung und Planung von Blockheizkraftwerken, ZSW, Stuttgart (1996)
- [6]: J. Entress  
„Energiewirtschaftliche Bewertung integrierter Nahwärmesysteme auf der Basis von solarer Wärme und Kraft-Wärme-Kopplung“, Dissertation, DLR Stuttgart (1997)
- [7] J. Nitsch et. Al.  
„Wirtschaftliches und ausschöpfbares Potential der Kraft-Wärme-Kopplung in Baden-Württemberg“, DLR-Interner Bericht, Stuttgart (1994)
- [8] E. Hahne, M. Guigas  
„Bestimmung von Kennwerten hocheffizienter Flachkollektoren mit Hilfe von Daten aus nichtstationären Zuständen“, Tagungsbericht 8. Intl. Sonnenforum Berlin, DGS-Sonnenenergieverlag, München (1992)
- [9] H. Menje, T. Loga  
„Niedrigenergiesiedlung Distelweg in Niedernhausen - Projektdarstellung“, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt (1992)

*Der saisonale Speicher ist eine zentrale Komponente der kombinierten Nahwärmeversorgung. In der Abbildung ist ein Beispiel für einen kostengünstigen saisonalen Speicher zu sehen. (8000 m<sup>3</sup> Kies/Wasser-Wärmespeicher in Chemnitz, ZSW).*

