Stirling Mikro-KWK für Öl

Experimentelle Untersuchung mit Jahresnutzungsmodell

PROF. DR.-ING. LUTZ MARDORF,
DIPL.-ING. PETER MENGER,
VIKTOR KÖTTERS B.SC.*

In dieser experimentellen Untersuchung werden der Nutzungsgrad der Heizungsanlage mit einer Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung als Wärmeerzeuger und das Verhalten des Kombispeichers untersucht. Dazu wird ein vom LAT der Hochschule Osnabrück entwickeltes Jahresnutzungsmodell angewendet.

* Labor für Angewandte Thermodynamik (LAT), Hochschule Osnabrück, Deutschland

Das Jahresnutzungsmodell ist die experimentelle Umsetzung eines statistischen Modells, welches in nur ca. 20 Versuchstagen für jeweils Volllast und den zwei Teillast-Fällen Jahresnutzungsgrade aus experimentellen Daten in unterschiedlichen Bilanzkreisen ermittelt und ein Speicherbetriebsverhalten beschreibt. Das Jahresnutzungsmodell bildet ein gesamtes Heizsystem bestehend aus Wärmeerzeuger, Kombispeicher, Solareintrag und Trinkwassererwärmung mit allen Wärmemengen ab. Damit kann sowohl das Gesamtsystem als auch die Mikro-KWK als Wärmeerzeuger und der Kombispeicher primärenergetisch beurteilt werden.

1 Einleitung

Neben der Solaranlage zur reinen Trinkwassererwärmung werden vermehrt Solarsysteme mit Heizungsunterstützung installiert. Diese so genannten Kombianlagen mit Heizungsunterstützung sind technisch so realisiert, dass der Wärmeerzeuger und die Solarkollektoren sowohl den Kombispeicher für den Heizkreis als auch den in einem Kombispeicher integrierten Trinkwasserspeicher erwärmen. Für die Mikro-KWK als Wärmeerzeuger wirkt der Ladezustand des Kombispeichers als Führungsgröße. Bei dem in diesem Projekt vorliegenden Konzept arbeitet der Wärmeerzeuger ausschließlich auf den Kombispeicher. Dies hat den Vorteil, dass ein häufiges Aus- und Einschalten (Takten) des Wärmeerzeugers und die daraus resultierenden höheren Emissionen vermieden werden. Es wirkt sich insbesondere dann positiv aus, wenn nur ein relativ geringer Leistungsbedarf für die Gebäudeheizung, wie in einem Niedrigenergiehaus (EnEV), benötigt wird. Der Heizkreis entzieht dem Speicher im oberen Bereich Heizungswasser und speist den abgekühlten Heizungsrücklauf unten in den Speicher ein. Innerhalb des Kombispeichers ist ein kleinerer Trinkwasserspeicher fest eingebaut. Der Solarkreis wird über einen internen Wärmetauscher geführt, die Nachheizung durch den Wärmeerzeuger lädt direkt in den oberen Bereich. Bei der Auslegung der thermischen Solarkollektoren für eine Trinkwassererwärmung und Heizkreisunterstützung wird der Gebäudetyp und die Personenzahl der Nutzer berücksichtigt.

2 Jahresnutzungsmodell und Gebäudedefinition

Das Jahresnutzungsmodell ist die experimentelle Umsetzung eines statistischen Modells. Es soll dazu angewendet werden in nur ca. 20 Versuchstagen einen Jahresnutzungsgrad aus experimentellen Daten in unterschiedlichen Bilanzkreisen zu ermitteln und ein Speicherbetriebsverhalten zu beschreiben. Das Jahresnutzungsmodell bildet ein gesamtes Heizsystem mit Wärmemenge, Kombispeicher mit Solareintrag und Trinkwassererwärmung ab und lässt es zu, sowohl das Gesamtsystem als auch den Wärmeerzeuger und den Kombispeicher für eine Jahresnutzung zu beurteilen. Dagegen ist der Normnutzungsgrad nach DIN 4702 nur ein standardisiertes Prüfverfahren für einen Wärmeerzeuger [1]. Das Jahresnutzungsmodell baut auf die bekannte Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperaturen auf, wie sie auch in DIN 4702 angewendet wird. Dabei wird der Wärmebedarf bei bestimmten Außentemperaturen mit der Stundenhäufigkeit gewichtet [2], [3]. Die Tagesmitteltemperaturen sind darin in sechs Bereiche gruppiert. Mit der aus Monatsmittelwerten abgeleiteten Solarstrahlung werden Referenzprofile ermittelt und der Jahreszeit zugeordnet. In dem Jahresnutzungsmodell werden diese vier Jahreszeitprofile den sechs Bereichen der Tagesmitteltemperatur zugeordnet. Jedem Bereich einer Tagesmitteltemperatur steht ein Wärmebedarfsgrad eines Hauses gegenüber. Dabei wird festgelegt, dass bei einer minimalen Tagesmitteltemperatur von -15°C der maximale Wärmebedarf entsteht und bei einer maximalen Tagesmitteltemperatur von +20°C der Wärmebedarf gleich null ist. Die Funktion des Wärmebedarfsgrades wird üblicherweise als eine Gerade zwischen der minimalen und der maximalem Tagesmitteltemperatur dargestellt. Der Wärmebedarf für die Trinkwasser-

erwärmung ist mit einem Zapfprogramm umgesetzt, welches in Anlehnung an den Tapping Cycle TC 164 WG10 für den täglichen Zeitraum von 7.00 Uhr bis 22.00 Uhr erstellt wurde. Dieses Zapfprogramm wird für alle sechs Tagesmitteltemperaturbereiche gleichermaßen angewendet und hat über 15 Stunden insgesamt 22 Zapfvorgänge. Die maximale Wärmemenge einer Zapfung im 15-Minuten-Abschnitt beträgt 1,82 kWh.

Der Heizwärmeleistungsbedarf ist während der Heizzeit von 6.00 Uhr bis 22.00 Uhr nicht konstant. Angelehnt an verschiedene Messdaten wird ein Tagesgang des Wärmeleistungsbedarfs in sieben Zeitabschnitte nachgebildet und stellt sowohl das Nutzerverhalten als auch den externen und internen Wärmeeintrag (z.B. durch elektrische Haushaltsgeräte und evtl. durch Kaminöfen) dar. Diese sieben Zeitbereiche bleiben prozentual für alle Tagesmitteltemperaturen konstant, die jeweiligen Leistungen in diesen Bereichen werden dann durch die Zuordnung zur Tagesmitteltemperatur bestimmt. Mit der Festlegung der Kollektorfläche von 10 m² zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung mit dem üblichen Wirkungsgrad sowie Berücksichtigung der Sonnenscheindauer wird der verfügbare Solareintrag für den Prüfstand profiliert. So steht für einen Sommertag beispielsweise ein Wärmeeintrag von maximal 24 kWh je Tag zur Verfügung.

3 Prüfstandsaufbau mit Mikro-KWK

Für die Untersuchung soll ein Einfamilienhaus mit einem maximalen Wärmeleistungsbedarf von 10 kW und einem Heizkreis mit 55/40°C bei einer tiefsten Außentemperatur von -15°C simuliert werden. Die Wärmeerzeugung erfolgt dabei in diesem Testlauf mit einem ölbeheizten Mikro-KWK von WhisperTech (WhisperGen) mit einer Nennwärmeleistung Q_{nenn} von 7,5 kW und einer elektrischen Leistungsabgabe P_{el} von 1 kW. Zusätzlich wird ein thermischer Solarkollektor entsprechend des gewählten Haustyps und der Personenzahl mit einer Fläche von 10 m² zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung mit einem hydraulischen Kreislauf thermisch integriert. Der Heizkreis ist mit einem Kombispeicher (Volumen: 600 l) ausgestattet, in dem sich ein integrierter Trinkwasserspeicher von 160 l befindet. Der Wärmeeintrag in den Speicher erfolgt ohne hydraulische Weiche, wie bei Heizkesseln üblich verwendet, da es für den WhisperGen von Vorteil ist, möglichst stationär auf konstantem Temperaturniveau zu arbeiten. Somit ist unabhängig von der Art der Wärmeanforderung die Vorlauftemperatur t_{KV} immer konstant bei 65°C und wird nur im oberen Bereich des Kombispeichers eingeleitet. Dieses wird auch dadurch begründet, dass der quasi stationäre thermodynamische Wirkungsgrad beim Stirling bei höheren Heizwassertemperaturen besser ist. Zur Simulation des Heizwärmeverbrauchers (Heizkörper) werden an einem Wärmetauscher die Vor- und Rücklauftemperatur (t_{HKV}, t_{HKR}) sowie der Durchfluss $\dot{V}_{HK}$ unabhängig voneinander geregelt, um eine gegenseitige Beeinflussung der Regler zu vermeiden und die jeweilige Sollleistung durch das Wärmebedarfsprofil sicher zu stellen. Das Zapfprogramm wird durch diverse Einzelzapfungen mit unterschiedlichen Zeiten entsprechend der erforderlichen Wärmemenge Q_{BW} über Magnetventile im Trinkwasserkreislauf realisiert.

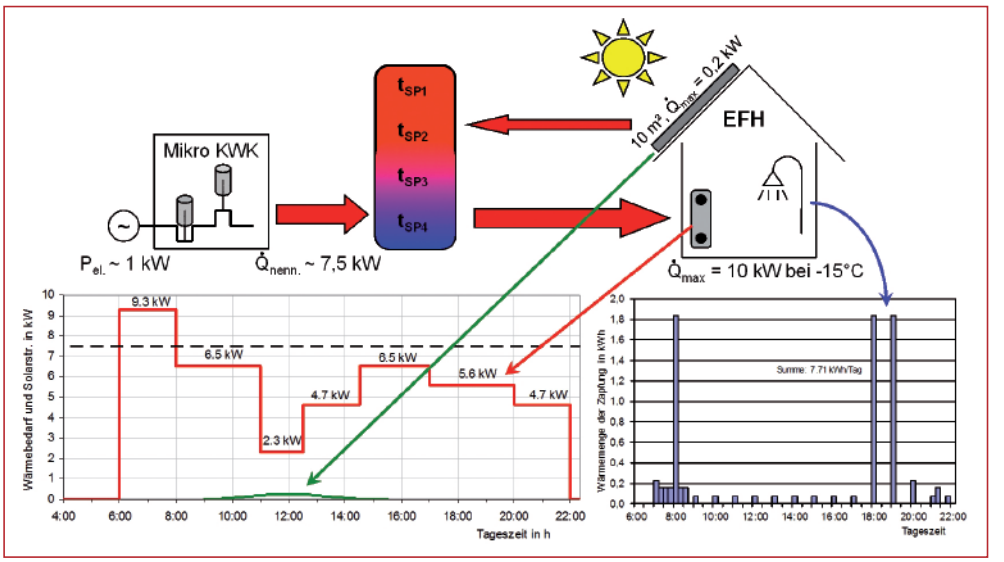


Bild 1 • Beispielhafte Systembetrachtung für eine Tagesmitteltemperatur von -12,5°C

4 Betriebsverhalten des WhisperGen mit Kombispeicher

Die Mikro-KWK hat eine andere Arbeitsweise als ein Heizkessel. Während bei einem Heizkessel nach erfolgter Anforderung durch den Verbraucher oder durch den Speicher relativ schnell die maximale thermische Leistung zu Verfügung steht, benötigt der WhisperGen eine Anlaufphase und steigert nach dem Ankurbeln des Stirlingprozesses nur langsam die abgegebene thermische Leistung. Um dieses zu berücksichtigen, ist ein spezielles Verhalten der Speicherladepumpe notwendig, mit der die Wärme vom WhisperGen dem Kombispeicher zugeführt wird. Die benötigte Anlauf- und Abschaltphase des WhisperGen benötigt weitere Berücksichtigung für das Gesamtsystem. Während der Anlaufphase mit Vorheizen und Zünden wird sowohl kein Strom in das Netz als auch keine Wärme in den Speicher ab-

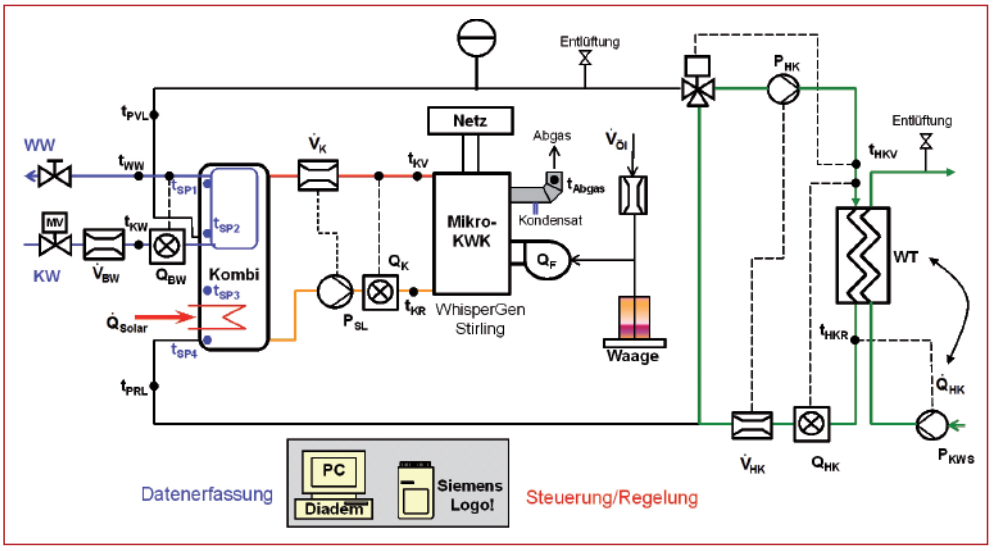
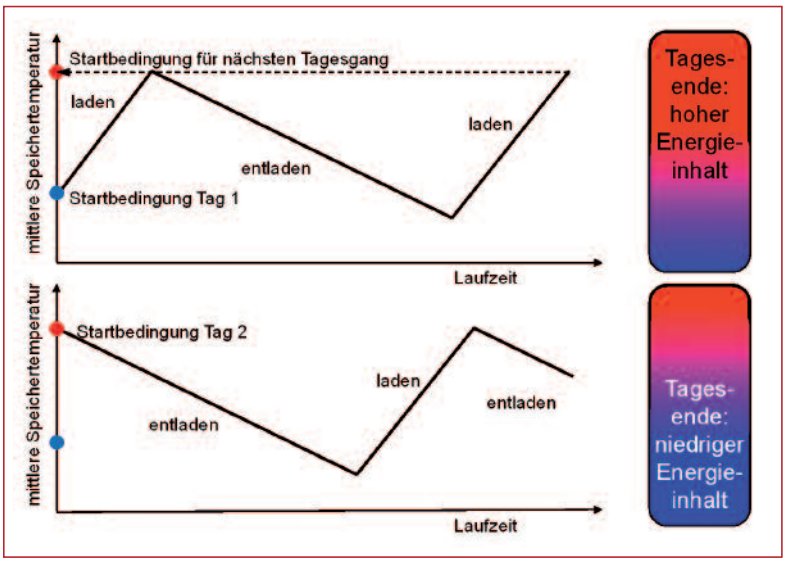
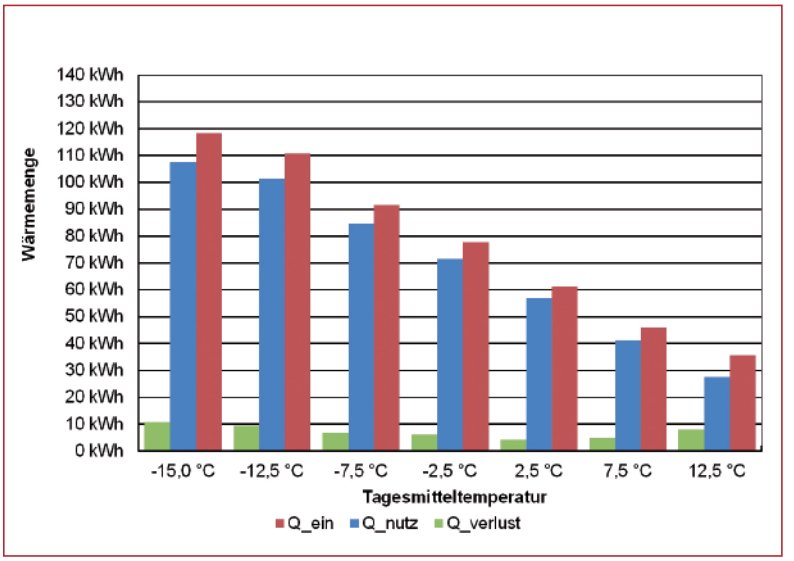


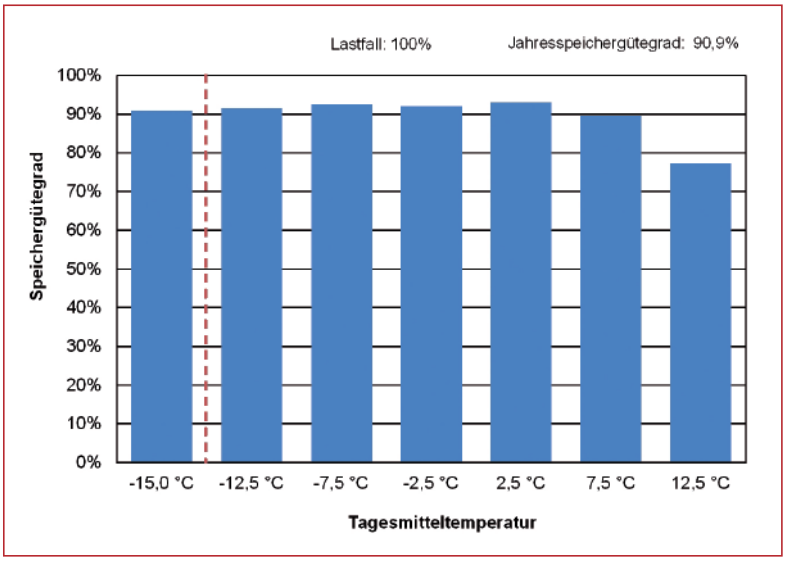
Bild 2 • Prüfstandschema für Mikro-KWK mit Kombispeicher



◀ Bild 3 • Einfluss des Speicherzustandes auf den Tagesgang



▶ Bild 4 • Wärmemengen des Kombispeichers in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur



▶ Bild 5 • Speichergütegrad im Tagesheizbetrieb

geführt. Für den stationären Betrieb ist zu beachten, dass der WhisperGen eine Mindestbetriebszeit von einer Stunde hat. Zudem kann der WhisperGen im extern gesteuerten Betrieb nur mit maximaler Brennerleistung betrieben werden [4], [5]. Während der Abschaltphase sinken sowohl die Stromerzeugung als auch die Wärmeerzeugung kontinuierlich ab. Besondere Bedeutung hat der Speicherladezustand zu Beginn und am Ende eines Versuchstages. Durch die Mindestlaufzeit des WhisperGen und der daraus resultierenden größeren Hysterese zwischen Ein- und Ausschalttemperatur kann es am Ende eines Versuchstages zu unterschiedlichen Speicherladezuständen kommen. Dieses Phänomen beeinflusst sowohl diesen als auch den folgenden Versuchstag, daher ist es unerlässlich, die Veränderung des Speicherladezustandes zwischen Tagesbeginn und Tagesende mit in die Bilanzierung aufzunehmen.

5 Beurteilung mit Jahresnutzungsmodell

Zur Bestimmung eines Speichergütegrades wird das zuvor beschriebene Jahresnutzungsmodell herangezogen. Dazu wird ein Bilanzkreis um den Speicher zur Ermittlung eines Speichergütegrades gezogen. Während der Wärmeeintrag durch die Mikro-KWK und die eingetragene Solarwärme den Aufwand darstellen, bilden die Heizwärme und die Wärme für den Trinkwasserverbrauch den Nutzen. Die Differenz des Energieinhaltes im Speicher zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende durch die unterschiedliche Speicherladung wird ebenfalls berücksichtigt. Damit werden die einzelnen Speichergütegrade ermittelt. Entsprechend dem Jahresnutzungsmodell werden die Tagesmitteltemperaturen mit ihrer gewichteten Häufigkeit zu einem Jahresspeichergütegrad bestimmt, der jedoch nur die Heizperiode umfasst. [6] Zur Beurteilung des Speicherverhaltens werden zunächst die zu- und abgeführten Wärmemengen sowie seine Verluste an die Umgebung dargestellt. Die aufgezeigten Verluste im Kombispeicher entstehen insbesondere aus konstruktiven Gegebenheiten. Die Wärmemengen nehmen mit steigender Tagesmitteltemperatur entsprechend des geringeren Heizbedarfs bei konstanter Trinkwassererwärmung kontinuierlich ab. Die Speicherverluste weisen im mittleren Tagesmitteltemperaturbereich die geringsten Werte auf. Bei den tiefen Tagesmitteltemperaturen ist der Speicher bedingt durch die höheren Heizwasservor- und Rücklauftemperaturen stärker aufgeheizt und hat ein höheren Verlust. Bei einer Tagesmitteltemperatur von +12,5°C ist der Solareintrag zeitweise höher als der zu deckende Wärmebedarf durch den Speicher, so dass dieser sich aufheizt und wiederum höhere Verluste aufweist.

Der Speichergütegrad hat bei einer Tagesmitteltemperatur von +2,5°C seinen höchsten Wert von ca. 92%. Zu tieferen Tagesmitteltemperaturen fällt dieser wegen der höheren Speichertemperaturen und den damit verbundenen steigenden Verlusten. Bei den höheren Tagesmitteltemperaturen nimmt der Speichergütegrad ebenfalls ab, was sich insbesondere bei der Tagesmitteltemperatur von +12,5°C zeigt. Hier nehmen die absoluten Speicherverluste mit höheren Speichertemperaturen bedingt durch den großen Solareintrag wieder zu. Gleichzeitig sinkt der Wärmebedarf, was zu einer relativen Verschlechterung des Speichergütegrades führt.

Betrachtet man diese Mikro-KWK mit den Daten des Jahresnutzungsmodells in einer getrennten Bilanz, sinken die Wirkungsgrade mit steigender Tagesmitteltemperatur. Hier wird dieses durch eine höhere Anzahl an Schaltzyklen mit abnehmenden Laufzeiten begründet. Dabei wird dem Aufwand der verbrauchten Heizölmenge als Nutzen die abgegebene Wärme für einen thermischen Wirkungsgrad und mit Berücksichtigung der produzierten elektrischen Energie ein Gesamtwirkungsgrad gegenübergestellt.

6 Primärenergiefaktor und primärenergetischer Nutzungsgrad

Zur Berücksichtigung der Primärenergie wird mit der Ermittlung eines primärenergetischen Nutzungsgrades ein abweichender Ansatz in Anlehnung an DIN V 4701-10 gewählt [7]. Dabei erhalten KWK – Anlagen einen Primärenergiefaktor zur Erzeugung der Wärme. Der gesamte Aufwand zum Betreiben eines KWK's wird primärenergetisch berücksichtigt [8], [9]. Sowohl das verwendete Heizöl als auch der verwendete Strom während der Anlaufphase von ca. 15 Minuten des WhisperGen werden mit Primärenergiefaktoren belegt. Dagegen wird danach die erzeugte elektrische Energie mit einem Primärenergiefaktor erhöht und vom primärenergetischen Aufwand abgezogen, was dazu führt, dass KWK – Anlagen unter primärenergetischer Betrachtung relativ niedrige Primärenergiefaktoren aufweisen, die teilweise je nach Stromzahl sogar kleiner als eins sein können. [10]

Die Stromzahl der eingesetzten Mikro-KWK liegt bei einer Tagesmitteltemperatur von -12,5°C bei 0,116 und fällt mit zunehmender Tagesmitteltemperatur bis auf 0,103 ab, während der Primärenergiefaktor Werte von 1,0 bis 1,1 mit steigender Tagesmitteltemperatur erreicht (Abb. 7). Da diese Mikro-KWK während der Anlaufphase keine elektrische Energie abgibt, hat das Verhältnis zwischen der Anzahl der Starts zur Gesamtlaufzeit entscheidenden Einfluss auf den Primärenergiefaktor. Dieses Verhältnis wird in dieser Untersuchung mit steigender Tagesmitteltemperatur ungünstiger, da der WhisperGen hier häufiger für kürzere Zeiten betrieben wird.

Bei der Bestimmung des primärenergetischen Nutzungsgrades wird das Gesamtsystem bestehend aus Solaranlage, Mikro-KWK, Speicher und Peripherie zur Wärmeerzeugung und –Transport betrachtet. Die Bilanz wird um das gesamte System gezogen, bei dem der Stromverbrauch der Peripherie (Solarpumpe, Mikro-KWK in der Anlaufphase, Speicherladepumpe, Regelung), die benötigte Heizölmenge zum Betreiben der KWK und der Solareintrag als Aufwand eingehen. Der Solareintrag hat jedoch einen Primärenergiefaktor von Null, und beeinflusst die Bilanz somit nicht. Als Nutzen werden die abgegebene Heizwärme, die Wärmemenge des Trinkwassers und die ins Netz einge-

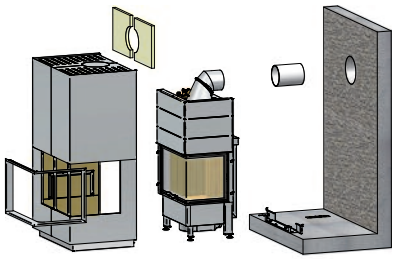
Wassergeführte Kaminöfen und Modulsysteme

Das Modulsystem

Vorteile

- Modulsystem zur wandbündigen Aufstellung im zeitlosen Design
- Massive Bauweise durch konsequenten Ausguss aller Verkleidungsteile mit Wärmespeichermasse
- Leichter und schneller Aufbau durch aufeinander abgestimmte Systembauteile

Einfache Montage! Das Modulsystem am Beispiel ***RG3***.



Schematische Aufbaudarstellung des RG3-Modulsysteme

Elegant und außergewöhnlich.

Die klare Sprache des zeitlosen Designs dieser Kaminöfen verleiht jedem Raum ein unverwechselbares Ambiente. Man spart Energiekosten und verbessert die Energiebilanz.

Das Modulsystem bietet Ihnen zahlreiche Möglichkeiten die Geräte RG1, RG2 und RG3 nach Ihren Bedürfnissen zusammenzustellen.

Besuchen Sie uns auf der ISH vom 12.-16. März

Halle 9.0 Stand F41

ROKOSSA energy

... innovationen für das morgen

ROKOSSA Energietechnik GmbH · Maschweg 43 · D-49324 Melle
Tel. +49 (0) 5422-910 174-0 · Fax +49 (0) 5422-910 174-99 · info@rokossa-energy.com · www.rokossa-energy.com

speiste elektrische Energie in der Bilanz berücksichtigt. Der primärenergetische Nutzungsgrad steigt mit zunehmender Tagesmitteltemperatur, da der Solareintrag ebenfalls zunimmt. Die gleichzeitig sinkende Stromzahl der KWK wird dabei überkompensiert. Bei der niedrigsten Tagesmitteltemperatur von -12,5°C bleibt ein primärenergetischer Nutzungsgrad von über 90%.

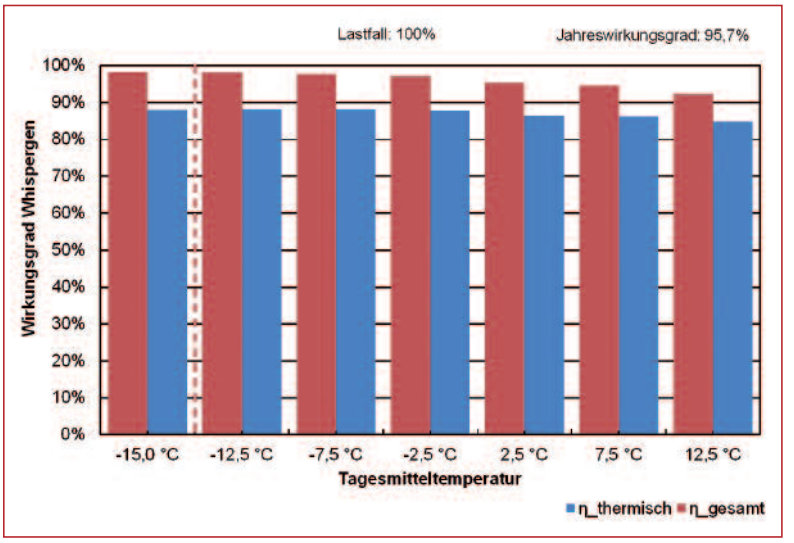
7 Einfluss der Solarfläche und Speichergröße

Mit den Messdaten aus den Versuchsreihen wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, mit dem sowohl der thermische Solareintrag durch Variation der Solarfläche als auch die Speichergröße mit größenabhängigen Verlusten dargestellt werden kann. Auch die Stromzahl der Mikro-KWK wird durch die Solarfläche beeinflusst. Bei steigenden Tagesmitteltemperaturen nimmt der Solareintrag entsprechend der Jahreszeit zu, wodurch die Gesamtlaufzeit der Mikro-KWK abnimmt. Da diese Mikro-KWK eine Mindestlaufzeit von einer Stunde hat, wird das Verhältnis von Anzahl der Starts zur Gesamtlaufzeit höher. Da bei jeder Anlaufphase kein Strom in das Netz eingespeist wird, sinkt somit die Stromzahl dieser Mikro-KWK zu höheren Tagesmitteltemperaturen. Bei einer Tagesmitteltemperatur von +12,5°C wird die Mikro-KWK bei einer Vergrößerung der Solarfläche ab 12 m² nicht mehr benötigt und entsprechend kann auch keine Stromzahl ermittelt werden.

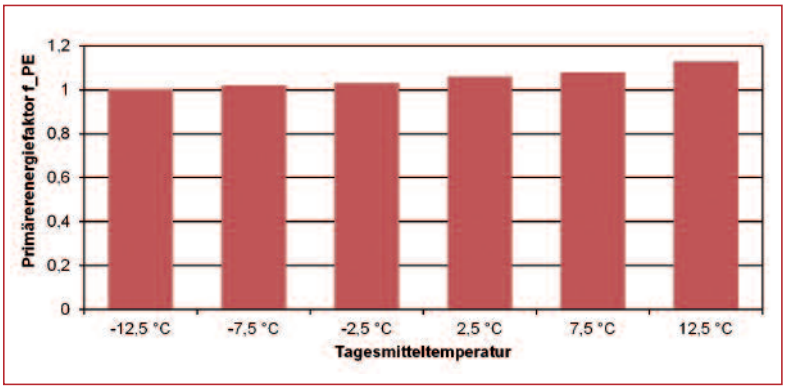
Der primärenergetische Nutzungsgrad des Gesamtsystems wird erwartungsgemäß bei den tiefen Tagesmitteltemperaturen nicht von der Größe der Solarfläche beeinflusst, da in diesen Bereichen der Solarertrag im Verhältnis zum Wärmebedarf zu vernachlässigen ist. Mit zunehmender Tagesmitteltemperatur steigt der primärenergetische Nutzungsgrad mit Vergrößerung der Solarfläche an, da der Solareintrag proportional zur Fläche zunimmt und mit einem Primärenergiefaktor von Null gewichtet wird. Bei der Tagesmitteltemperatur von +12,5°C geht der primärenergetische Nutzungsgrad mit Vergrößerung der Solarfläche ab 12 m² gegen unendlich, da nahezu kein primärenergetischer Aufwand vorhanden ist, weil die Mikro-KWK ausgeschaltet bleibt. Bei der Parametervariation des Speichervolumens mit dem Simulationsprogramm zeigte sich kein nennenswerter Einfluss auf den primärenergetischen Nutzungsgrad für das Gesamtsystem. Dieser steigt aufgrund des „kostenlosen" Solareintrags zu höheren Tagesmitteltemperaturen, aber die potentiell größere Wärmeaufnahme bei größeren Speichern mit längeren Laufzeiten des Mikro-KWK's und besserer Ausnutzung der Solarwärme wird durch die steigenden Speicherverluste ausgeglichen. Lediglich bei niedrigen Tagesmitteltemperaturen spiegeln sich die längeren Laufzeiten dieser Mikro-KWK und der daraus steigenden Stromzahl bei größeren Speichern in etwas besseren primärenergetischen Nutzungsgraden wider.

8 Zusammenfassung

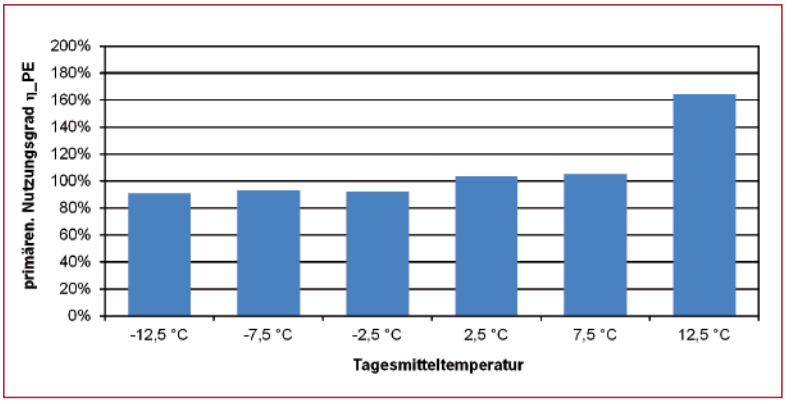
Die Auswertungen ergaben, dass trotz der kleineren Wärmeerzeugerleistung des Mikro-KWK's im Vergleich zum maximalen Wärmebedarf des Gebäudes sowohl das definierte Gebäude beheizt als auch die definierte Trinkwassererwärmung mit Hilfe des Kombispeichers mit einem festgelegten Volumen vorgenommen werden kann. Der Speichergütegrad hat seine höchsten Werte bei den mittleren Tagesmitteltemperaturbereichen. Bei den höheren Tagesmitteltemperaturen nehmen die Verluste durch die starke solare Speicherbeladung zu, was bei gleichzeitig verringertem Wärmebedarf zu einem deutlich niedrigeren Speichergütegrad führt. Der Primärenergiefaktor dieses Mikro-KWK's nimmt mit steigender Tagesmitteltemperatur zu, was durch seine längeren Laufzeiten hervorgerufen



▶ Bild 6 • Wirkungsgrad Mikro-KWK für unterschiedliche Tagesmitteltemperaturen



▶ Bild 7 • Primärenergiefaktor der Mikro-KWK zur Wärmeerzeugung



▶ Bild 8 • Primärenergetischer Nutzungsgrad des Gesamtsystems

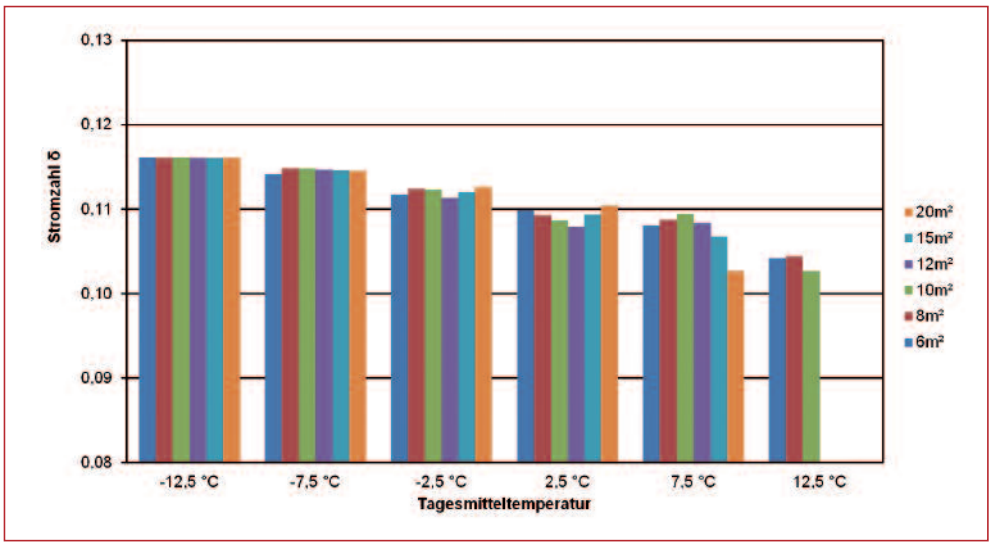


Bild 9 • Stromzahl der KWK bei verschiedenen Solarflächen, Speichervolumen 600 l

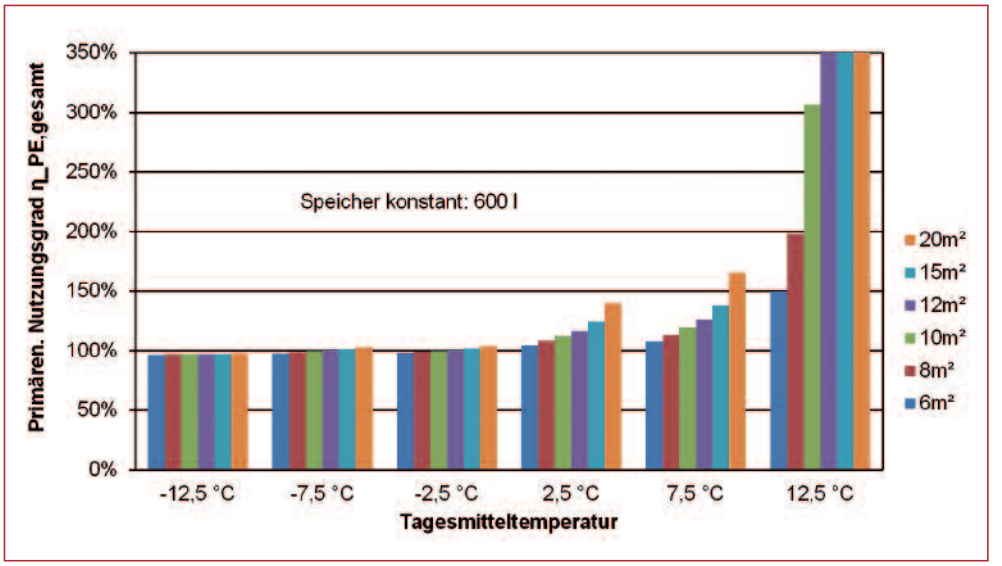


Bild 10 • Primärenergetischer Nutzungsgrad des Gesamtsystems bei verschiedenen Solarflächen, Speichervolumen 600 l

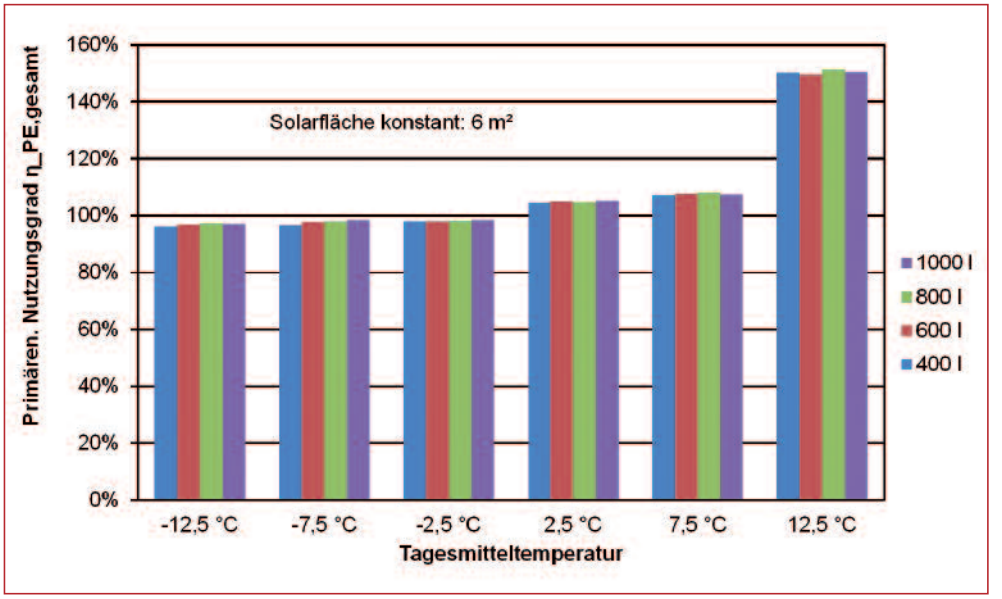


Bild 11 • Primärenergetischer Nutzungsgrad des Gesamtsystems bei verschiedenen Speichervolumina, Solarfläche 6 m²

wird. Auch der primärenergetische Nutzungsgrad des bilanzierten Gesamtsystems nimmt mit zunehmender Tagesmitteltemperatur zu, da gleichzeitig der Solareintrag ansteigt. Dabei bewirkt die Vergrößerung der Solarkollektorfläche mit steigender Tagesmitteltemperatur ab +2,5°C immer einen steigenden primärenergetischen Nutzungsgrad. Dagegen hat das Speichervolumen keinen nennenswerten Einfluss auf den primärenergetischen Nutzungsgrad.

Literatur

[1] N.N.: Ermittlung des Norm-Nutzungsgrades und des Norm-Emissionsfaktors. DIN 4702 Teil 8, März 1990, Beuth Verlag Berlin

[2] Böhm, G.: Auswahl und Einsatz von Heizkesseln und Warmwasserspeichern. Karl Krämer Verlag Stuttgart, 1997

[3] Recknagel; Sprenger; Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. Oldenbourg Industrieverlag 2009. Abschnitt 1.1.2-3

[4] Edenhofer, R.; Stark, A.: Untersuchung des dieselbefeuerten WhisperGen KWK-Aggregates. OWI Herzogenrath 2010

[5] Schutte, E.; Madden, L.: Technische Information von WhisperTech, September 2010

[6] Mardorf, L.; Menger, P.: Untersuchung einer Öl-Mikro Kraft-Wärme-Kopplung für Heizwärme und Trinkwassererwärmung im Heizkreis mit Kombispeicher und Solarwärmeeintrag unter Anwendung eines Jahresnutzungsmodells. hier: WhisperGen Stirling KWK. Osnabrück Mai 2011

[7] N.N.: Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen. DIN V 4701 Teil 10, 2007, Beuth Verlag Berlin

[8] N.N.: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, DIN V 18559 Teil 1, 2011, Beuth Verlag Berlin

[9] Pfeifroth, P.; Beer, M.: Primärenergetische Bewertung von Fernwärme aus KWK, Endbericht FfE (AGFW -0001), Juni 2009

[10] Mardorf, L.; Menger, P.; Kötters, V.: Bestimmung des primärenergetischen Nutzungsgrades für ein Kombispeicher basiertes Heizsystem. Osnabrück Mai 2012