

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 79 (1988)

Heft: 10

Artikel: Kenndaten von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen

Autor: Mutzner, J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904030>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 31.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Kenndaten von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen

J. Mutzner

Beim Anschluss eines Sechstels aller schweizerischen Wohnungen an erdgasgefeuerte Blockheizkraftwerke könnte in diesen WKK-Anlagen im Winter rund die Hälfte der Stromproduktion eines grossen Kernkraftwerkes erzeugt werden, wobei soviel Gas verbraucht würde, wie heute insgesamt im Sektor Haushalt eingesetzt wird. Diese und ähnliche Schlussfolgerungen kann man aus den in diesem Beitrag zusammengestellten Kenndaten von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen ableiten.

Dans l'hypothèse où un sixième de tous les logements suisses serait raccordé à des installations de couplage chaleur-force fonctionnant au gaz, ces centrales permettraient de produire en hiver la moitié environ de la production d'électricité d'une grande centrale nucléaire. La quantité de gaz nécessaire serait la même que celle consommée de nos jours par le secteur des ménages. C'est, entre autres, une des conclusions qui peuvent être tirées des données sur les installations de couplage chaleur-force réunies dans cet article.

Adresse des Autors

Jürg Mutzner, VSE, Bahnhofplatz 3, 8023 Zürich.

Der Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke hat die Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG mit der Erarbeitung von allgemeinen Kennzahlen und Grundlagen bezüglich der Möglichkeiten des Einsatzes von erdgasbetriebenen Blockheizkraftwerken im Wohn- und Dienstleistungssektor beauftragt. Nachfolgend sind einige der wichtigsten Ergebnisse dieser Studie in geraffter Form zusammengestellt, wobei im Sinne einer Vereinheitlichung des Aufbaus vom Autor einige Vereinfachungen sowie inhaltliche Anpassungen und Ergänzungen vorgenommen wurden.

1. Grundsätzliches

Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen umfassen viele unterschiedliche technische Systeme und werden mit verschiedenartigen Brennstoffen wie Erdgas, Öl, Kohle, Uran, Kehrlicht, Deponie- und Biogas betrieben. Beim Einsatz fossiler Brennstoffe zur Stromproduktion entstehen neben dem sich bei der Verbrennung zwangsläufig bildenden Kohlendioxid zusätzliche Schadstoffemissionen gegenüber der Stromerzeugung aus Kern- oder Wasserkraft.

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf Blockheizkraftwerke (BHKW)¹ mit Erdgas als Brennstoff. Diese Eingrenzung wurde deshalb gewählt, weil bezüglich der Stickoxid-Emissionen der Gasmotor mit 3-Weg-Katalysatoren allen anderen Wärmeerzeugern deutlich überlegen ist und deshalb mit diesem System die

¹ Ein Blockheizkraftwerk ist eine kleine bis mittelgrosse Wärme-Kraft-Kopplungsanlage zur dezentralen Wärme- und Stromerzeugung mit einem oder mehreren Verbrennungsmotoren (kein Turbinenantrieb). Letztere werden als (Fern-)Heizkraftwerke bezeichnet.

Emissionslimiten der eidg. Luftreinhalteverordnung mit vertretbarem Aufwand eingehalten bzw. unterschritten werden können. Die Situation der Schadstoffemissionen aus dem Betrieb von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen wurde aus diesem Grund in der Studie nicht näher untersucht. Allerdings ist nicht zu vernachlässigen, dass jede Verfeuerung von fossilen Brennstoffen, also auch von Erdgas, erhebliche Mengen an Kohlendioxid freisetzt.

2. Auslegung einer Wärme-Kraft-Kopplungsanlage (WKK) für eine Wohnsiedlung

Als Grundlage für die Auslegung einer WKK-Anlage dienen primär Tageslastdiagramme und die Jahresdauerlinie des Wärmebedarfes. Die Dauerlinie gemäss Figur 1a bezieht sich auf den Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser für eine Modellwohnsiedlung aus 350 Wohneinheiten (150 Wohneinheiten in Einfamilien- und Reihenhäusern, 200 Wohneinheiten in Mehrfamilienhäusern). Die Wärmehöchstlast dieser Wohnüberbauung beträgt 2,7 MW.

Diese Modellsiedlung hat eine Ausnutzungsdauer der Wärmehöchstlast von 2400 Stunden (entspricht dem Wärmeinhalt der gesamten Fläche unterhalb der Dauerlinie oder dem Inhalt des Rechtecks ABCD in Fig. 1a).

Ein hoher Nutzungsgrad der Wärme-Kraft-Kopplungsanlage lässt sich nur bei wärmegeführtem Betrieb erzielen. Damit die relativ teure WKK-Anlage eine hohe Jahresbetriebsdauer erreicht, kann sie nicht auf die Wärmehöchstlast ausgelegt werden. Unter Berücksichtigung der Kostenstruktur liegen typische Werte bei einem Anteil der WKK-Anlage an der Wärmehöchstlast zwischen 20% und 50%. Aufgrund einer Analyse bestehender

Anlagen in der BRD (Fig. 2) wird im folgenden mit einem Mittelwert von 30% Leistungsanteil an der Wärmehöchstlast gerechnet (s. Darstellung in Fig. 1b). Damit lässt sich theoretisch eine Jahresbenutzungsdauer der Wärmehöchstlast der WKK-Anlage von rund 5200 Stunden erreichen. Der Spitzenlastanteil wird im allgemeinen über spezielle Spitzenlastheizkessel (mit Ölfeuerung) abgedeckt.

Im wärmegeführten Betrieb gehen Wärme- und Stromproduktion parallel, d.h. die Jahresdauerlinien weisen dieselbe Form auf. Das Verhältnis von Wärme- zu Stromproduktion liegt im allgemeinen bei 1,7 Teilen Wärme zu 1 Teil elektrische Energie. Im Flussdiagramm (Fig. 7) entspricht dies 52 Prozenten Nutzwärme zu 31 Teilen Elektrizität).

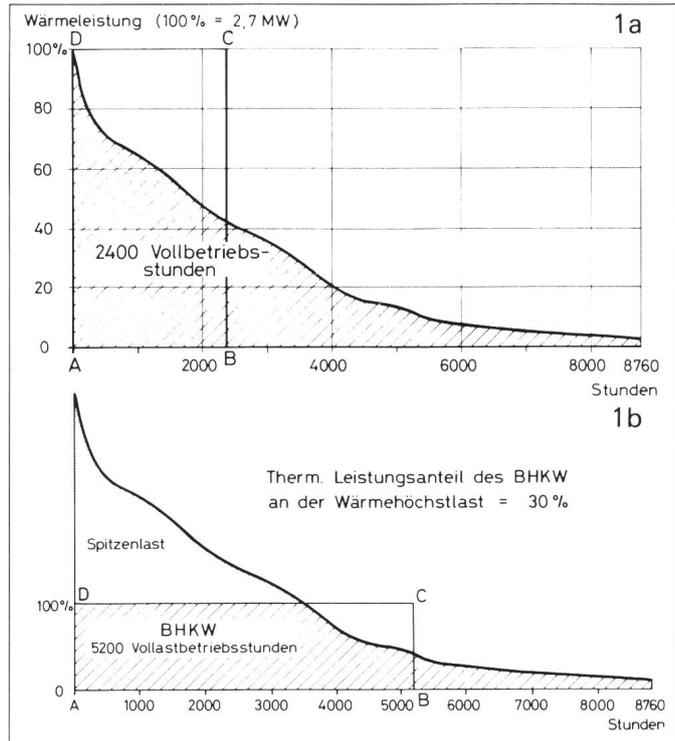
Figur 3 zeigt den stark unterschiedlichen tageszeitlichen Verlauf des Wärme- bzw. Strombedarfs einer Wohnsiedlung. Bei wärmegeführtem Betrieb des BHKW entstehen daher zwangsläufig Perioden mit Überschusslieferungen von elektrischer Energie ins öffentliche Netz bzw. mit Bedarf für Strombezüge aus dem Netz.

3. Vollastbetriebsstunden und Wirtschaftlichkeit

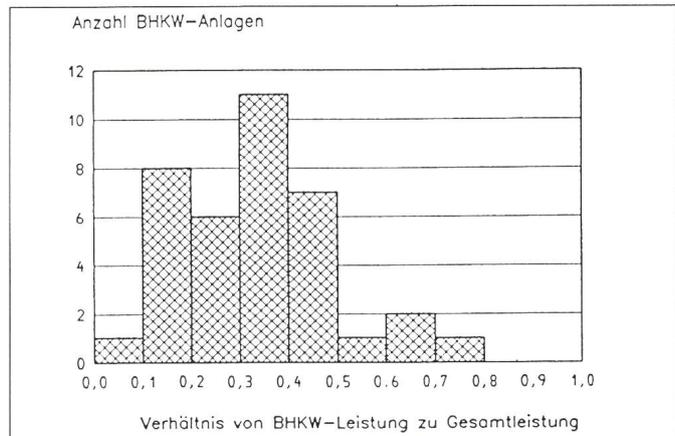
Die erreichbaren Vollastbetriebsstunden (Ausnutzungsdauer der Höchstlast der WKK-Anlage) spielen eine zentrale Rolle in bezug auf einen wirtschaftlichen Betrieb. Die aufgrund der Jahresdauerlinie (Fig. 1) ermittelte Abhängigkeit der theoretisch möglichen Vollastbetriebsstunden vom thermischen Leistungsanteil an der Wärmehöchstlast ist in der Figur 4 dargestellt.

Neben dem thermischen Leistungsanteil sind jedoch auch die Speicherauslegung sowie die gewählte Betriebsstrategie von Bedeutung. Es ist nämlich davon auszugehen, dass die WKK-Anlagen aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht im Teillastgebiet (z.B. im Sommer bei reiner Warmwasserproduktion oder bei tiefen Wärmelasten in der Nacht) gefahren werden. Die praktisch erreichbaren Vollastbetriebsstunden liegen erfahrungsgemäss rund 15% unter den theoretischen Höchstwerten. Die entsprechenden Kurven sind in der Figur 4 eingetragen. Daraus ist auch ersichtlich, dass bei einem thermischen Leistungsanteil von 30% an der Wärmehöchstlast im

Figur 1
Jahresdauerlinie einer Modellwohnsiedlung (inkl. Warmwasser)

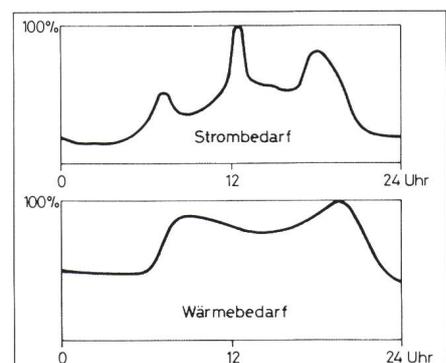


Figur 2
Häufigkeitsverteilung des thermischen Leistungsanteils von Blockheizkraftwerken an der Wärmehöchstlast anhand bestehender Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland

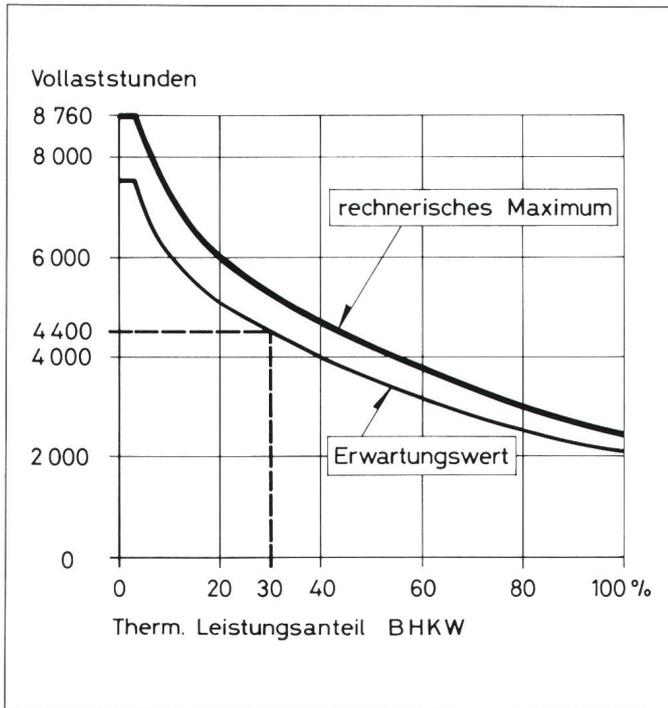


praktischen Betrieb etwa 4400 Vollastbetriebsstunden erreicht werden (beim vorgegebenen Belastungsverlauf gemäss Figur 1 wären theoretisch maximal 5200 Stunden pro Jahr erreichbar).

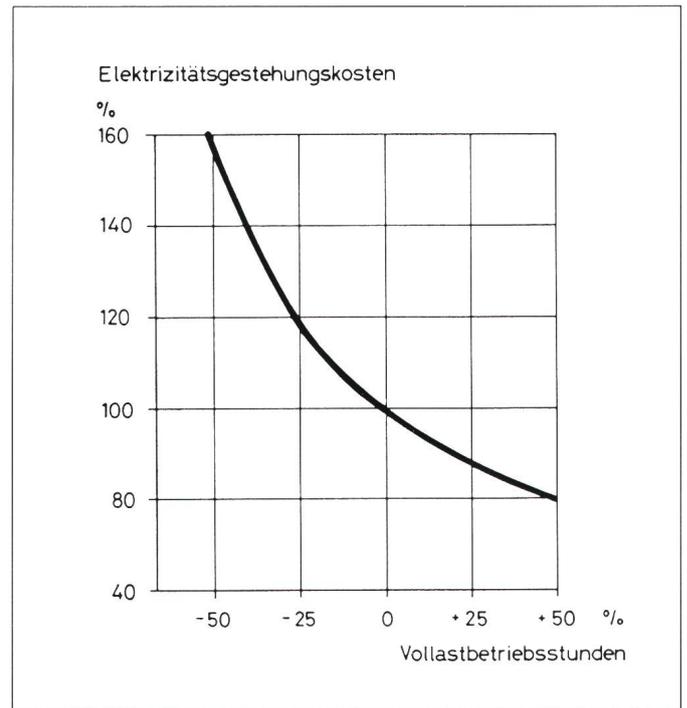
Dienstleistungsbetriebe weisen im Vergleich zu Wohnüberbauungen im allgemeinen sehr unterschiedliche Wärmebedarfsprofile auf. Die Auslegung der WKK-Anlage ist daher diesen Anforderungen anzupassen. Im Gegensatz zu Wohnsiedlungen lassen sich keine generell gültigen Mittelwerte in bezug auf die jährlichen Vollastbetriebsstunden, den thermischen Lei-



Figur 3 Tageszeitlicher Verlauf des Strom- und Wärmebedarfs einer Wohnsiedlung (schematisiert)



Figur 4 Volllast-Betriebsstunden in Abhängigkeit des BHKW-Leistungsanteils



Figur 5 Sensitivität der Stromgestehungskosten einer typischen 300 kW-BHKW-Anlage in Abhängigkeit der Volllast-Betriebsstunden

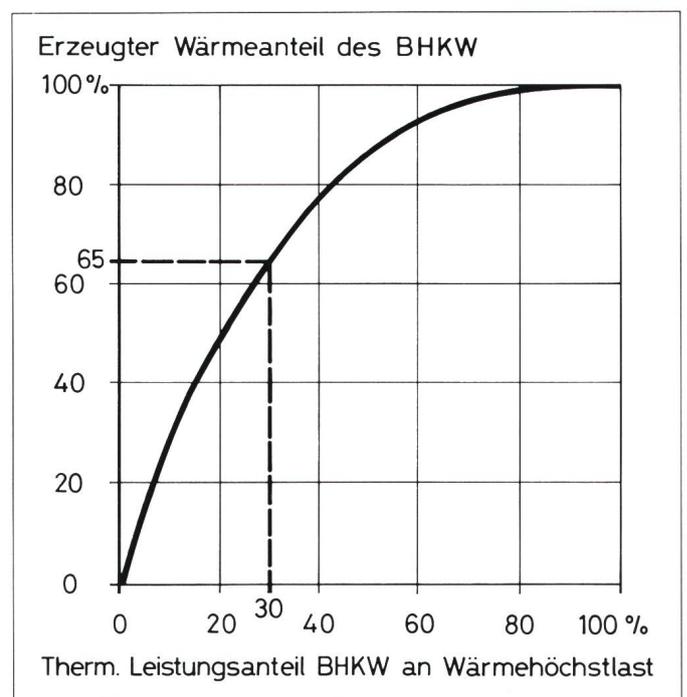
stungsanteil usw. bestimmen. Wegen der oft praktizierten Reduktion der Beheizung während arbeitsfreien Perioden ist in der Regel eine tiefere Jahresbenutzungsdauer als im Wohnsektor zu erwarten.

Der starke Einfluss der Volllastbetriebsstunden, d.h. der Auslastung der WKK-Anlage, auf die Wirtschaftlichkeit geht aus Figur 5 hervor, die die Abhängigkeit der Stromgestehungskosten von den Volllastbetriebsstunden zeigt.

Um eine wirtschaftlich vertretbare, möglichst hohe Volllastbetriebsstundenzahl des WKK-Aggregates zu erreichen, wird nur ein Teil des Wärmebedarfs über die WKK-Anlage abgedeckt. Beim angenommenen thermischen Leistungsanteil von 30% an der Wärmehöchstlast sind dies rund 65% des gesamten Wärmebedarfes. Der Zusammenhang zwischen dem Energieanteil eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) und dem thermischen Leistungsanteil ist allgemein in Figur 6 dargestellt.

Der restliche Wärmebedarf ist über Spitzenlastheizkessel, meist mit Heizöl extraleicht betrieben, zu erzeugen. Netzenergien, wie Erdgas, kommen infolge fehlender Transport- und Lagerkapazitäten für die Deckung des Heizbedarfs in Spitzenlastzeiten weniger in Frage. Der gesamte Brennstoff-

Figur 6 Energieanteil eines BHKW in Abhängigkeit seines Leistungsanteils an der Wärmehöchstlast



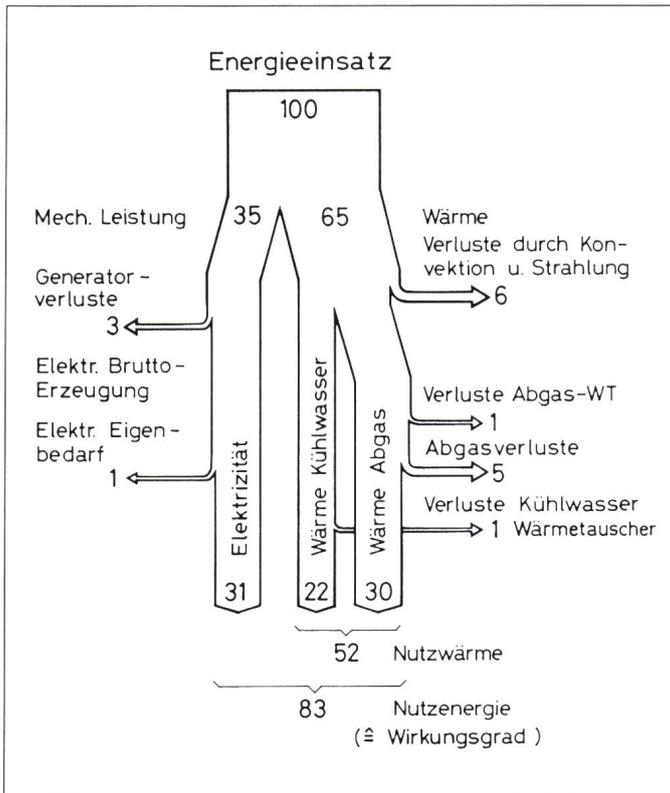
bedarf der WKK-Anlage ist Figur 11 zu entnehmen.

4. Wirkungsgrad von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen

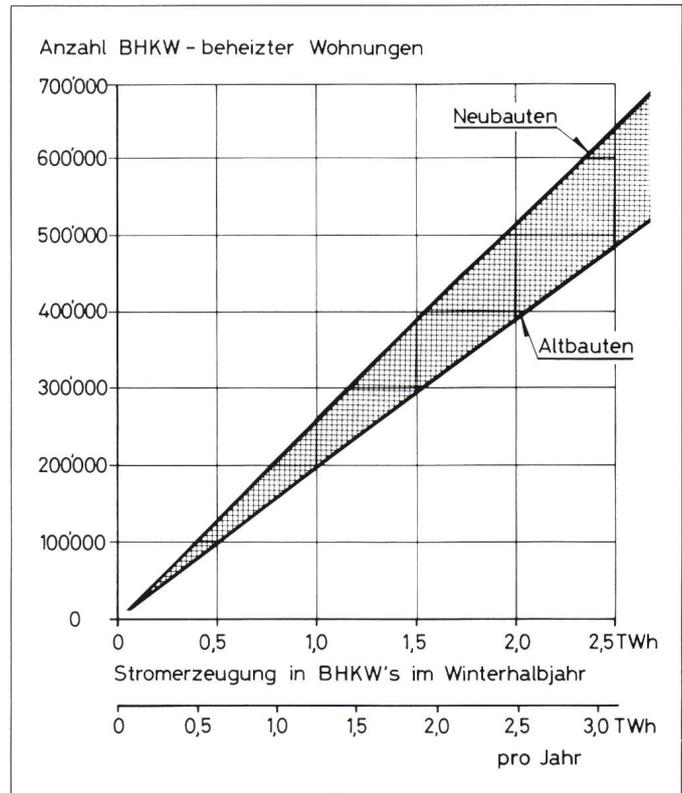
Durch die kombinierte Erzeugung von Wärme und Elektrizität lassen

sich bei optimalen Verhältnissen Gesamtwirkungsgrade von 80–90 Prozent erreichen.

Figur 7 zeigt ein Prinzipschema für den Energiefluss eines erdgasbetriebenen Blockheizkraftwerkes. Mit einem Einsatz von 100 Energieeinheiten (Erdgas) lassen sich 31 Energieeinheiten Strom und insgesamt 52 Energie-



Figur 7 Typisches Energieflussbild eines Gas-Ottomotors



Figur 8 Zusammenhang zwischen der Zahl der Wohnungsanschlüsse und der BHKW-Stromerzeugung (thermischer Leistungsanteil der BHKW = 30%)

einheiten Wärme (Kühlwasser- und Abgaswärme) als Nutzenergie gewinnen. Damit ergibt sich in diesem Beispiel ein Gesamtwirkungsgrad von 83%.

Würde mit derselben Erdgasmenge ausschliesslich Wärme erzeugt, wäre ein Wirkungsgrad von rund 85-90% erreichbar; würde ausschliesslich elektrische Energie produziert, so ergäbe sich ein Wirkungsgrad von rund 30%.

5. Wärmebedarf von Wohnbauten

Der mittlere spezifische Wärmeleistungsbedarf von Wohngebäuden beträgt für Einfamilienhäuser etwa 30 W/m³ bzw. für Mehrfamilienhäuser etwa 25 W/m³. Bezogen auf die beheizte Bruttogeschossfläche entspricht dies rund 70 W/m². Insgesamt kann unter Annahme eines 30prozentigen Wärmeleistungsanteil des BHKW an der Wärmehöchstlast bei einer mittleren Wohnungsgrösse mit einer jährlichen Stromerzeugung von rund 4750 kWh pro Wohnung gerechnet werden (Tab. 1). Demgegenüber beträgt der mittlere Jahresstromverbrauch eines schweizerischen Haushaltes rund 4500

kWh (davon etwa 2500 kWh im Winterhalbjahr).

Figur 8 zeigt auf, wie viele BHKW-beheizte Wohnungen unter diesen Voraussetzungen nötig sind, um eine bestimmte Menge elektrischer Energie zu erzeugen. Unter der Annahme, dass nur gut isolierte Wohnsiedlungen an dezentrale Wärmekraftanlagen angeschlossen werden, bringt der Anschluss von rund der Hälfte aller schweizerischen Wohnungen an BHKW's, d.h. rund 1,4 Millionen Wohneinheiten, etwa dieselbe Stromproduktion wie ein Kernkraftwerk der 1000-MW-Klasse während eines Jahres.

6. Kosten von BHKW-Anlagen

Zur Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen ist die Kenntnis der Mehrkosten gegenüber konventionellen Heizanlagen wesentlich. Aus der Figur 9 sind die spezifischen Mehrinvestitionen von BHKW-Kleinanlagen gegenüber der konventionellen Wärmeversorgung ersichtlich.

Dabei sind die Investitionskosten für die BHKW-Module allein sowie die zusätzlichen Aufwendungen (inkl. baulicher Anteil, Wärmespeicher, Abgasleitungen, Kaminzüge, Schall-

Wärmeleistungsbedarf	
insgesamt	6,0 kW _{th} /Wohnung
davon BHKW	1,8 kW _{th} /Wohnung
Spitzenlastkessel	4,2 kW _{th} /Wohnung
Installierte elektr. Leistung im BHKW	
	1,08 kW _{el} /Wohnung
Jährliche Vollastbetriebsstunden des BHKW	
	4400 h
Jährliche Stromerzeugung im BHKW	
davon im Winterhalbjahr	4750 kWh/Wohnung 3800 kWh/Wohnung

Tabelle 1 Wärmebedarf von Neubauten

dämpfung, Leittechnik) separat ausgewiesen.

Aus dieser Darstellung geht hervor, dass die Investitionskosten sehr stark von der Grösse der Anlage abhängig sind. Als Vergleich kann folgende approximative Umrechnung dienen²:

- eine Anlage mit 1×100 kW_{el} beliefert rund 70 bis 100 Wohnungen
- eine Anlage mit 2×150 kW_{el} beliefert rund 200 bis 300 Wohnungen
- eine Anlage mit 3×300 kW_{el} beliefert rund 700 bis 900 Wohnungen

Für eine durchschnittliche Wohnung ist deshalb mit Mehrinvestitionen von rund Fr. 2000.- bis Fr. 4000.- pro Wohnung (je nach Grösse der Wohnsiedlung und dem Wärmedämmgrad der Liegenschaft) für die Installation einer BHKW-Anlage zu rechnen.

7. Stromgestehungskosten

Für die Wartungs-, Unterhalts- und Personalkosten für BHKW-Anlagen stehen Erfahrungswerte vieler Anlagen aus der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung.

Die in Tabelle II angegebenen unteren Werte beziehen sich auf eine niedrige Ausnutzungsdauer der installierten BHKW-Leistung und grosse Anlagen, der obere Wert auf hohe Ausnutzungsdauer (>4000 h/a) und kleine Anlagen (<300 kW_{el}).

Für die jährlichen Personal- und Verwaltungskosten kann mit den Ansätzen gemäss Tabelle III gerechnet werden.

Bei der Bestimmung der Stromgestehungskosten wurde die Differenzkostenmethode (Zusatzkosten gegenüber

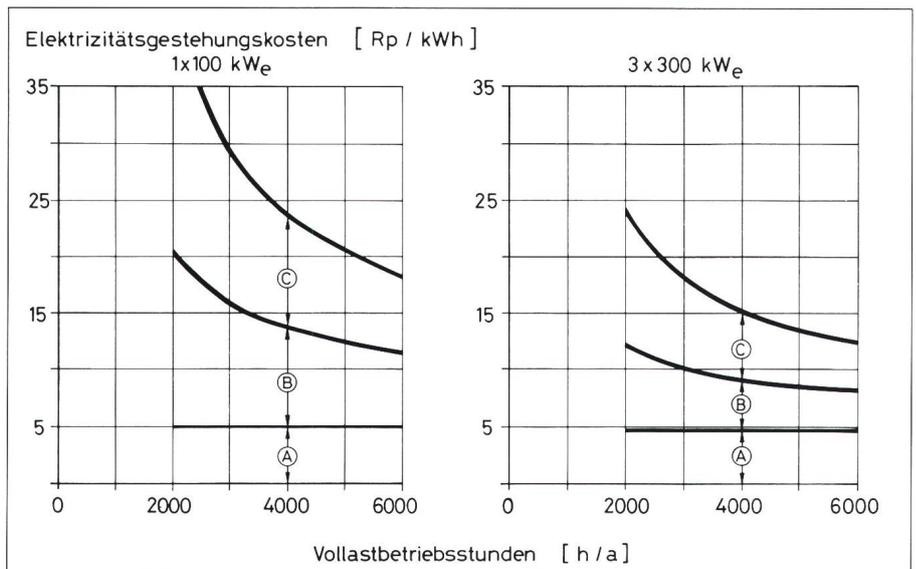
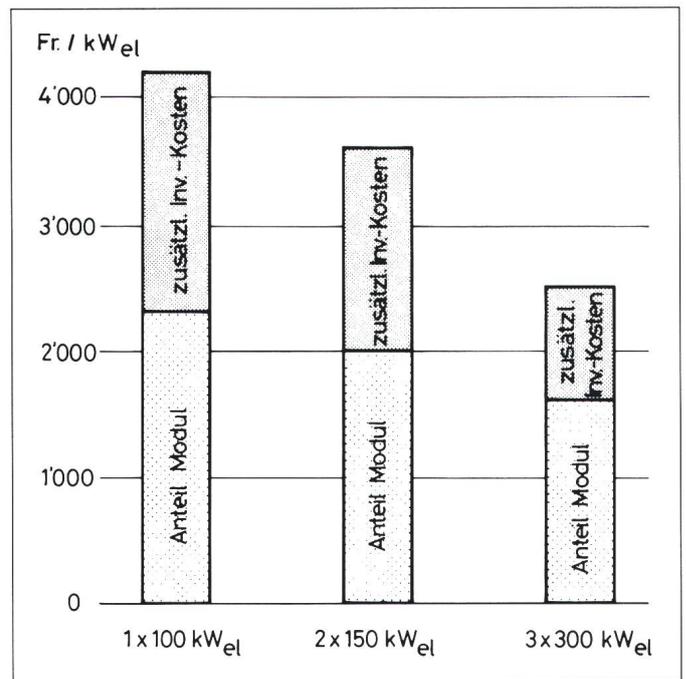
Anlagekomponenten	Instandhaltungskosten in % der Investitionen
BHKW-Module	3,0-9,0%/Jahr
Kesselanlagen	1,5-2,5%/Jahr
Wärmezentrale	1,8-2,2%/Jahr
Stromeinspeisung	1,8-2,2%/Jahr
Bauliche Anlagen	1,0-1,5%/Jahr

Tabelle II Unterhaltskosten von BHKW-Anlagen

Anlagegrösse	Personalkosten in % der Investitionskosten	Verwaltungskosten in % der Investitionskosten
Anlagen > 2 MW _{th}	1-2%/Jahr	0,8-1,2%/Jahr
Anlagen < 2 MW _{th}	3-4%/Jahr	1,0-2,0%/Jahr

Tabelle III Personal- und Verwaltungskosten von BHKW-Anlagen

Figur 9 Spezifische Mehrinvestitionskosten von BHKW-Anlagen



Figur 10 Aufschlüsselung der Komponenten der Elektrizitätsgestehungskosten

- A anteilige Brennstoffkosten
- B anteilige Betriebs- und Unterhaltskosten
- C anteilige Kapitalkosten

BHKW-Anlage:	1×100 kW _e	BHKW-Anlage:	3×300 kW _e
Brennstoffpreis:	4 Rp./kWh _{HU}	Brennstoffpreis:	4 Rp./kWh _{HU}
Spezifische Mehrinvestitionen:	4200 Fr./kW _e	Spezifische Mehrinvestitionen:	2500 Fr./kW _e

²unter der Annahme, dass das BHKW ausschliesslich Wärme an Wohnbauten liefert.

	Erdgasverbrauch im Blockheizkraftwerk Nm ³ /Wohnung/Jahr	Heizölverbrauch im Spitzenlastkessel kg/Wohnung/Jahr
Neubauten	1500	420
Altbauten	1950	550

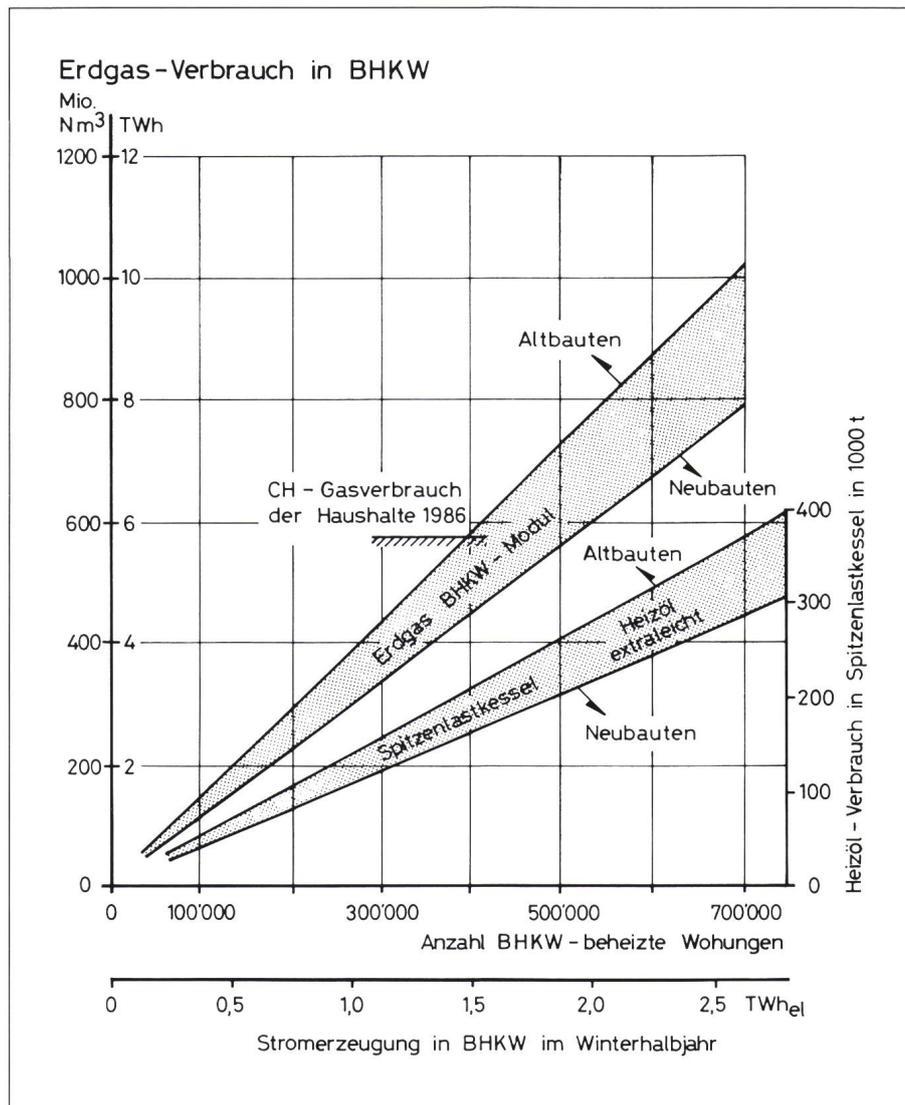
Tabelle IV Mittlerer Brennstoffverbrauch pro Wohnung bei BHKW-Beheizung

konventioneller Wärmeerzeugung) verwendet. Die resultierenden Jahreskosten werden der Elektrizitätsproduktion angelastet und dienen der Ermittlung der spezifischen Stromgestehungskosten. In Figur 10 sind die Ergebnisse für die beiden Auslegungsvarianten 1 × 100 kW_{el} sowie 3 × 300 kW_{el} aufgeführt.

Grössere WKK-Anlagen für die Beheizung von Siedlungen (sog. «externe WKK») benötigen zusätzlich noch ein Wärmeverteilnetz (Fernheizleitungen und Hausstationen). Diese Netzkosten bzw. die daraus resultierenden Wärmeverteilungskosten sind in den Angaben der Figur 10 nicht enthalten; ihr Einbezug erhöht die Stromgestehungskosten.

8. Brennstoffbedarf von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen

Aus Figur 11 geht, unter den angenommenen Auslegungsdaten der BHKW-Anlagen, der ungefähre Brennstoffbedarf hervor. Da der thermische Leistungsanteil des BHKW gemäss Annahme nur 30% der Wärmehöchstlast beträgt, wird neben dem für die Grundlast eingesetzten Erdgas auch noch Heizöl extraleicht für die Deckung des Spitzenlastbedarfs sowie für die Warmwasserbereitung im Sommer benötigt (selbstverständlich könnte die Warmwassererzeugung z.B. auch in elektrischen Warmwasserspeichern



Figur 11 Brennstoffbedarf von BHKW-Anlagen

oder mit Erdgasfeuerung im Heizkessel erfolgen).

Figur 11 zeigt die benötigten Erdgas- resp. Heizölmengen in Funktion der Stromerzeugung in der Wärme-Kraft-Kopplungsanlage. Bereits bei einer Wärmeversorgung von rund 400 000 Wohneinheiten über BHKW-Anlagen würden Erdgasmengen im Ausmass des gesamten heutigen Gas-

absatzes im Sektor Haushalt in der Schweiz benötigt. Die Stromproduktion dieser BHKW-Anlagen betrüge knapp 1,5 TWh im Winterhalbjahr (oder 1,8 TWh im Jahr).

Aufgrund der getroffenen Basisannahmen bezüglich Benutzungsdauer, installierter Leistung pro Wohnung und therm. Leistungsanteil des BHKW ergibt sich ein Brennstoffverbrauch pro Wohnung gemäss Tabelle IV.