

Vergleich von Nahwärmelösungen mit dem Annuitätenverfahren

Legende

- Heizzentrale
- 50kW Gebäudeheizlast
- Fernwärmetrasse



Bild 1

Zentrales Nahwärmenetz.

WÄRMEVERSORGUNG | Mit Hilfe von Nahwärmesystemen können städtische Quartiere mit hoher ökologischer Qualität und mit hoher Servicequalität mit Energie versorgt werden. Allerdings muss eine solche Versorgungslösung wirtschaftlich sein, damit sie sich gegenüber anderen Möglichkeiten der Energiebereitstellung behaupten kann. Zwar haben viele Mieter, Gebäude- und Wohnungseigentümer mittlerweile einen hohen ökologischen Anspruch, die Entscheidung für oder gegen ein bestimmtes System erfolgt aber nach wie vor in erster Linie über den effektiven Energiepreis. Daraus ergeben sich einerseits Anforderungen an die Gestaltung der Nahwärmesysteme, andererseits aber auch an die methodische Qualität der entsprechenden Wirtschaftlichkeitsbewertung. Im folgenden Beitrag werden für ein konkretes städtisches Nahwärmesystem verschiedene Versorgungsvarianten hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit analysiert. Die Untersuchungen werden mit Hilfe des Annuitätenverfahrens durchgeführt, wobei neben verschiedenen Verfahrensaspekten vor allem auch die Wahl der Eingangsparameter kritisch diskutiert wird.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. **Jörn Krimmling**, Jahrgang 1961, Studium an der TU Dresden. Mitinhaber eines Ingenieurbüros für Energie- und Gebäudetechnik in Dresden, seit 2001 Professor für Technisches Gebäudemanagement an der Hochschule Zittau/Görlitz.
j.krimmling@hszg.de

Dipl.-Ing. **Thomas Glieme**, Jahrgang 1965, Studium an der Technischen Hochschule Köthen. Seit 2002 Geschäftsführer der FWU Ingenieurbüro GmbH, Dresden.

Es handelt sich um ein städtisches Wohngebiet eines Wohnungsunternehmens, das 51 Geschosswohnbauten mit rund 880 Wohnungen umfasst. Für diesen Gebäudebestand war ein ökologisch hochwertiges Nahwärmesystem zu entwerfen. Gefordert waren darüber hinaus marktfähige Wärmepreise für die Mieter.

Bei der Variantenauswahl sind zwei Komplexe miteinander zu verbinden: Struktur des bzw. der Wärmenetze sowie Struktur der Wärmeerzeuger. Zur Entwicklung einer sinnvollen Variantenmatrix wurden zunächst die Netzvarianten analysiert. Dabei wurden drei Hauptvarianten verfolgt:

- NV1: Zentrales Nahwärmenetz zur Versorgung aller Gebäude (**Bild 1**).
 - NV2: Mehrere Nahwärmeinseln (diese Variante ist sehr vielfältig, sie reicht von jeweils drei bis vier größeren Nahwärmeinseln bis zur Zusammenfassung von immer drei bis vier nebeneinander liegenden Gebäuden (**Bild 2**)).
 - NV3: Zentralheizung pro Gebäude, das heißt, kein Nahwärmenetz.
- Die zentrale Netzvariante (NV1) erscheint von vornherein wirtschaftlich sinnvoller, da sich bei NV2 zwar die Netzinvestitionen in geringem Maße reduzieren werden, jedoch aufgrund der höheren Anzahl von Erzeugeranlagen mit dann jeweils spezifisch höheren In-

Legende

- Heizzentrale
- 50kW Gebäudeheizlast
- Fernwärmetrasse Insel 1
- Fernwärmetrasse Insel 2
- Fernwärmetrasse Insel 3
- Fernwärmetrasse Insel 4
- Fernwärmetrasse Insel 5

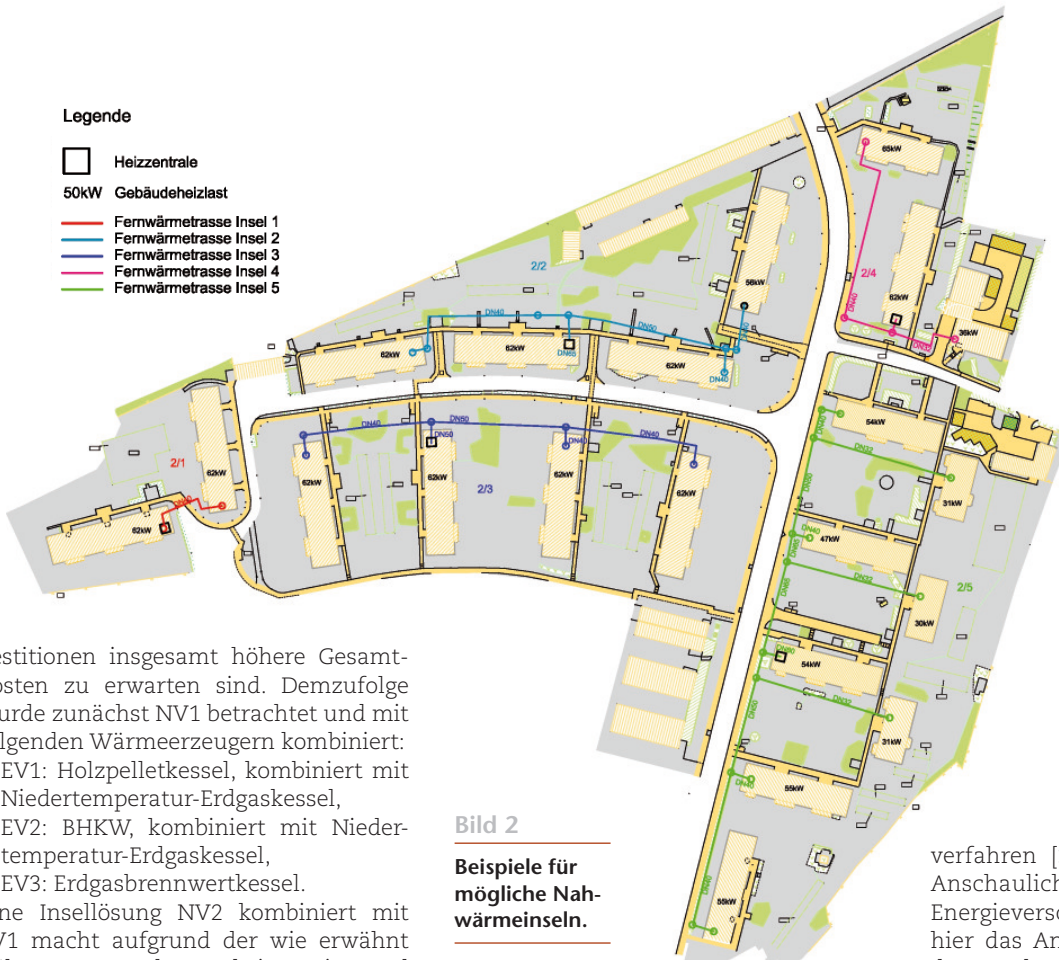


Bild 2

Beispiele für mögliche Nahwärmeinseln.

vestitionen insgesamt höhere Gesamtkosten zu erwarten sind. Demzufolge wurde zunächst NV1 betrachtet und mit folgenden Wärmeerzeugern kombiniert:

- EV1: Holzpelletkessel, kombiniert mit Niedertemperatur-Erdgaskessel,
- EV2: BHKW, kombiniert mit Niedertemperatur-Erdgaskessel,
- EV3: Erdgasbrennwertkessel.

Eine Insellösung NV2 kombiniert mit EV1 macht aufgrund der wie erwähnt höheren Gesamtkosten keinen Sinn und wurde nicht weiter betrachtet. Die Kombination NV2 mit EV2 ist dagegen interessant, wenn die Inseln so konzipiert werden, dass Mini-BHKW mit einer elektrischen Leistung von bis zu 50 kW zum Einsatz kommen können, da deren KWK-Zuschlag höher wäre als der von größeren BHKW. Die Netzvariante NV3 diene in erster Linie zu Vergleichszwecken. Hier wurde als Lösung ein Erdgasbrennwertkessel pro Gebäude betrachtet. Insgesamt ergab sich die in **Tabelle 1** abgebildete Variantenmatrix.

Weitere denkbare Erzeugervarianten, wie zum Beispiel elektrische Wärmepumpen oder Gasabsorptionswärmepumpen jeweils in Kombination mit Erdgaskesselanlagen, wurden nicht weiter betrachtet, da sie entweder nicht in ausreichender Dimension am Markt verfügbar sind oder das Konzept von vornherein als unwirtschaftlich anzusehen ist, wie man aus verschiedenen

Tabelle 1

Variantenmatrix.

Variante	Erzeuger	Netz	Beschreibung
V1	EV1	NV1	Holzpelletkessel, kombiniert mit Niedertemperatur-Erdgaskessel und zentrales Nahwärmenetz
V2	EV2	NV1	BHKW, kombiniert mit Niedertemperatur-Erdgaskessel und zentrales Nahwärmenetz
V3	EV2	NV2	BHKW, kombiniert mit Niedertemperatur-Erdgaskessel und Wärmeinseln
V4	EV3	NV3	Erdgasbrennwertkessel pro Gebäude

Heizkostenvergleichen in der Fachliteratur nachlesen kann [1; 2]. In den Heizkostenvergleichen schneiden Wärmepumpen immer deutlich schlechter ab als die Kesselvarianten, woran sich unter den Bedingungen einer Nahwärmeversorgung zunächst nichts ändern würde.

Die Netzvariante NV2 kann unabhängig von wirtschaftlichen Erwägungen generell durchaus sinnvoll sein, da sie eine sinnvolle, abschnittsweise Realisierung eines solchen Nahwärmeprojektes erlauben würde. Spielen diese Überlegungen eine Rolle, müsste NV2 in größerem Umfang in die Betrachtung einbezogen werden, als dies hier praktiziert wurde. Im Endeffekt würde das aber für die Wirtschaftlichkeitsanalyse bedeuten, dass NV1 nicht realisierbar wäre und demzufolge nur NV2 und NV3 zur Diskussion stünden.

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Das hier betrachtete Projekt lässt sich dem betriebswirtschaftlichen Fach-

gebiet der Investitionsbewertung zuordnen. Aufgrund des langfristigen Betrachtungshorizonts – das Projekt soll eine Laufzeit von 20 Jahren haben – ist ein finanzmathematisches Verfahren zu verwenden, bei dem Zins- und Zinseszinsaspekte adäquat abgebildet werden. Einfache statische Verfahren bzw. Amortisationsbetrachtungen kommen demzufolge nicht in Betracht. In Frage kommen das Kapitalwertverfahren oder das Annuitätenverfahren [3].

Aufgrund seiner hohen Anschaulichkeit im speziellen Fall der Energieversorgung von Objekten soll hier das Annuitätenverfahren verwendet werden. Zweckmäßig ist eine Formulierung in Anlehnung an die VDI 2067-1, September 2012. Nachfolgend wird der verwendete Berechnungsgang skizziert:

$$AN = AN_E - (AN_K + AN_V + AN_B + AN_S) \quad (1)$$

- AN Annuität in €/a
- AN_E Annuität der Einzahlungen
- AN_K Annuität der kapitalgebundenen Auszahlungen
- AN_V Annuität der verbrauchsgebundenen Auszahlungen
- AN_B Annuität der betriebsgebundenen Auszahlungen
- AN_S Annuität der sonstigen Auszahlungen

Die kapitalgebundenen Auszahlungen unter Beachtung von Ersatzbeschaffungen und etwaigen Restwerten ergeben sich folgendermaßen:

$$AN_K = \left(A_0 + \sum_{k=1}^n A_k - R \right) \cdot a \quad (2)$$

$$A_k = A_0 \cdot \frac{r^{k \cdot TN}}{q^{k \cdot TN}}$$

$$R = A_0 \cdot r^{n \cdot TN} \cdot \frac{(n+1) \cdot TN - T}{TN} \cdot \frac{1}{q^T}$$

- A_k Barwerte der Ersatzbeschaffungen
- R Barwert des Restwertes
- TN Lebensdauer der Ersatzinvestition
- q Zinsfaktor: q = 1 + i;
mit i prozentualer Kalkulationszins

Laufzeit t	Abzinsungsfaktor b_t	KWK-Zuschlag k_{KWK}	Barwert
1	0,9569	0,0511	0,04889952
2	0,9157	0,0511	0,0467938
3	0,8763	0,0511	0,04477876
4	0,8386	0,0511	0,04285048
5	0,8025	0,0511	0,04100525
6	0,7679	0,0511	0,03923947
7	0,7348	0,0511	0,03754973
8	0,7032	0,0511	0,03593276
9	0,6729	0,0511	0,03438542
10	0,6439	0,0511	0,0329047
11	0,6162	0	0
12	0,5897	0	0
13	0,5643	0	0
14	0,5400	0	0
15	0,5167	0	0
16	0,4945	0	0
17	0,4732	0	0
18	0,4528	0	0
19	0,4333	0	0
20	0,4146	0	0
€/kWh			0,0311 €/kWh

Laufzeit t	Abzinsungsfaktor b_t	KWK-Zuschlag k_{KWK}	Barwert
1	0,9569	0,02411	0,02307177
2	0,9157	0,02411	0,02207825
3	0,8763	0,02411	0,02112751
4	0,8386	0,02411	0,02021771
5	0,8025	0,02411	0,01934709
6	0,7679	0,02411	0,01851397
7	0,7348	0	0
8	0,7032	0	0
9	0,6729	0	0
10	0,6439	0	0
11	0,6162	0	0
12	0,5897	0	0
13	0,5643	0	0
14	0,5400	0	0
15	0,5167	0	0
16	0,4945	0	0
17	0,4732	0	0
18	0,4528	0	0
19	0,4333	0	0
20	0,4146	0	0
€/kWh			0,0096 €/kWh

Tabelle 2

Umwertung des KWK-Zuschlages für BHKW < 50 kW (Anmerkung: Zum Zeitpunkt der Untersuchungen betrug der KWK-Zuschlag in diesem Fall noch 0,0511 €/kWh. Mittlerweile beträgt er für diese BHKW-Größe 0,0541 €/kWh).

Der Annuitätsfaktor (synonym: Wiedergewinnungsfaktor) berechnet sich wie folgt:

$$a = \frac{(1+i)^T \cdot i}{(1+i)^T - 1} \quad (3)$$

i Kalkulationszins
T Laufzeit der Variante
(hier immer 20 a)

Die Annuität der Einzahlungen ist variantenspezifisch zu bestimmen. Bei den BHKW-Varianten sind die Erlöse aus dem Stromverkauf, dem KWK-Zuschlag, der Energiesteuererstattung und der vermiedenen Netznutzung zu berücksichtigen. Bei den anderen Varianten gibt es keine Einzahlungen. Beim KWK-Zuschlag ist eine Besonderheit zu beachten: Da dieser nicht über die gesamte Projektlaufzeit gezahlt wird (Mini-BHKW: zehn Jahre, andere BHKW: sechs Jahre), muss er entsprechend auf die Laufzeit von 20 Jahren umgewertet werden. Dabei sind alle Preise im jeweiligen Jahr abzuzinsen, dann aufzuaddieren und in Summe mit dem Annuitätsfaktor (Gleichung 3) zu multiplizieren. Die **Tabellen 2 und 3** verdeutlichen das für die beiden hier vorkommenden Fälle.

Für die Bestimmung von AN_V in Gleichung 1 werden folgende Ansätze benötigt:

$$K_{Kessel} = \frac{Q_{Nutz,Kessel}}{\eta_{a,Kessel} \cdot \eta_{a,Netz}} \cdot k_A \quad (4)$$

K_{Kessel} Brennstoffkosten Kessel
 $Q_{Nutz,Kessel}$ Nutzwärme, die durch den Kessel abgedeckt wird, an der Schnittstelle Gebäude
 $\eta_{a,Kessel}$ Jahresnutzungsgrad des Kessels
 $\eta_{a,Netz}$ Jahresnutzungsgrad des Netzes
 k_A Arbeitspreis des Brennstoffs

$$K_{BHKW} = \frac{Q_{Nutz,BHKW}}{\eta_{a,BHKW} \cdot \eta_{a,Netz}} \cdot k_A \quad (5)$$

K_{BHKW} Brennstoffkosten BHKW
 $Q_{Nutz,BHKW}$ Nutzwärme, die durch das BHKW abgedeckt wird, an der Schnittstelle Gebäude
 $\eta_{a,BHKW}$ Thermischer Jahresnutzungsgrad des BHKW
 $\eta_{a,Netz}$ Jahresnutzungsgrad des Netzes
 k_A Arbeitspreis des Brennstoffs

$$Q_{Nutz} = Q_{Nutz,BHKW} + Q_{Nutz,Kessel} \quad (6)$$

$$Q_{Nutz,BHKW} = \dot{Q}_{BHKW} \cdot \Delta\tau$$

Q_{Nutz} Gesamte Nutzwärme an der Schnittstelle Gebäude
 \dot{Q}_{BHKW} Thermische Leistung des BHKW
 $\Delta\tau$ Jährliche Laufzeit des BHKW

Tabelle 3

Umwertung des KWK-Zuschlages für BHKW > 50 kW.

Außerdem wird noch der erzeugte Strom benötigt:

$$E_{BHKW} = P_{BHKW} \cdot \Delta\tau \quad (7)$$

E_{BHKW} Durch das BHKW erzeugter Strom
 P_{BHKW} Elektrische Leistung des BHKW
 $\Delta\tau$ Jährliche Laufzeit des BHKW

AN_B setzt sich zusammen aus den Instandhaltungskosten (Wartung + Instandsetzung), den Leistungskosten für den Bezug leitungsgebundener Energie (Erdgas) und den Kosten für die Emissionsmessungen. Die Instandhaltungskosten wurden investitionsspezifisch

Literatur

- [1] Voss, A.: Dokumentation Heizkostenvergleich (Stand September 2011). Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung.
- [2] Oschatz, B.; Mailach, B.: BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2010. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung für die Altbauanierung. ITG Dresden, 2010.
- [3] Krimming, J.: Energieeffiziente Gebäude, 3. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010.
- [4] Bachor, A. u.a.: Abrechnungsvarianten. Stromerzeugung aus KWK-Anlagen in Mehrfamilienhäusern. BWK 62 (2010) Nr. 7/8. S. 47–51.
- [5] Krimming, J.: Die Bestimmung der Primärenergiefaktoren von Nah- und Fernwärmesystemen. BWK 64 (2012) Nr. 6, S. 48–51.

Tabelle 4

Ausgangswerte für alle Varianten.

mit Hilfe der Kennzahlen im Anhang der VDI 2067-1 bestimmt. AN_S wurde im vorliegenden Fall bei allen Varianten zu Null gesetzt. Es wurden die in **Tabelle 4** gelisteten Ausgangswerte verwendet.

Ergebnisse

Die Ergebnisse des Variantenvergleichs gehen aus **Tabelle 5** hervor. Um die Varianten vergleichbar zu machen, wurden der Betrag der Annuität (entspricht dem Saldo aus Einnahmen abzüglich Ausgaben, also den jährlichen Gesamtkosten) durch die Nutzwärme der Variante dividiert.

Die beiden BHKW-Varianten (V2 und V3) schneiden am günstigsten ab. Hier wurde allerdings unterstellt, dass der erzeugte Strom vollständig zu einem Preis von mindestens 15 Ct/kWh verkauft werden kann. Das Wohnungsunternehmen hat dazu zwei Möglichkeiten:

- Verkauf des Stroms an die Mieter auf der Basis abzuschließender Stromlieferverträge oder
- Lieferung des Stroms an die Mieter als Nebenleistung des Vermieters und Abrechnung über die Nebenkosten.

Beide Varianten erfordern die Übernahme der kompletten Stromversorgung an die jeweiligen Mieter. Das gelingt am besten über ein eigenes Versorgungsnetz, das im Zuge des Nahwärmenetzbaus mitverlegt werden kann. Über dieses Netz wäre dann auch der erforderliche Zusatzstrom als die Differenz zum Strombedarf zu beziehen, die nicht durch das BHKW gedeckt werden kann [4].

Der Verkauf des Stroms an die Mieter zieht zum einen einen höheren Verwaltungsaufwand für das Vertragsmanagement nach sich und birgt zum anderen das Risiko, dass nicht der gesamte Strom verkauft werden kann, da jeder Mieter sich seinen Energieversorger frei wählen kann.

Die Lieferung des Stroms als Nebenleistung des Vermieters ist heute eher ungewöhnlich und erfordert eine Änderung der Mietverträge und damit der Zustimmung jedes Mieters. Diese Variante wird demzufolge eher beim Neubezug bzw. Neubau von Mietobjekten in Frage kommen. Allerdings bleibt abzuwägen, inwieweit dadurch die Vermietbarkeit nicht beeinträchtigt wird.

Die Pelletversorgungsvariante hat zwar den geringsten Primärenergiebedarf (**Tabelle 6**, Berechnung siehe [5]), ist aber vergleichsweise teuer. Allerdings hängt dies sehr stark von der Entwicklung der Pelletpreise ab, die hier nicht eingeschätzt werden kann.

Energietechnische Ausgangswerte			
Erzeugerleistung	Q	kW	2978,00
Vollbenutzungsstundenzahl	b_V	h/a	1800,00
Nutzwärmebedarf	Q_{Nutz}	kWh/a	5360400,00
Jahresnutzungsgrad Nahwärmenetz	$\eta_{a, Netz}$	–	0,89
Jahresnutzungsgrad Gas-NT-Kessel	$\eta_{a, G-NT}$	–	0,92
Jahresnutzungsgrad Gas-BW-Kessel	$\eta_{a, G-BW}$	–	0,99
Jahresnutzungsgrad Pelletkessel	$\eta_{a, PE}$	–	0,80
Wirtschaftliche Ausgangswerte			
Kalkulationszins	i		4,50%
Laufzeit	T	a	20
Annuitätsfaktor	a		7,69%
Erdgas-Grundpreis	$k_{Gr,EG}$	€/kW	8,52
Erdgas-Arbeitspreis	$k_{A,EG}$	€/kWh _{Ho}	0,0488
Pelletpreis	k_{PE}	€/kWh _{Hu}	0,0367
Verhältnis Brennwert/Heizwert	H_o/H_u	–	1,1
KWK-Zuschlag < 50 kW	k_{KWK}	€/kWh	0,0511
KWK-Zuschlag 500 kW	k_{KWK}	€/kWh	0,0241
Einspeisevergütung/Verkaufspreis	k_{Ein}	€/kWh	0,1500
Energiesteuererstattung	k_{E-St}	€/kWh	0,0055
Vermiedene Netznutzung	k_{Netz}	€/kWh	0,0200
Instandhaltung			
Faktor Instandsetzung Netz	$f_{IS,Netz}$	$1/(A_0 a)$	1,0%
Faktor Wartung Netz	$f_{W, Netz}$	$1/(A_0 a)$	0,0%
Faktor Instandsetzung Bau	$f_{IS,Bau}$	$1/(A_0 a)$	1,0%
Faktor Wartung Bau	$f_{W,Bau}$	$1/(A_0 a)$	1,0%
Faktor Instandsetzung NT-Kessel > 120 kW	$f_{IS,G-NT}$	$1/(A_0 a)$	2,0%
Faktor Wartung NT-Kessel > 120 kW	$f_{W,G-NT}$	$1/(A_0 a)$	2,0%
Faktor Instandsetzung BW-Kessel < 200 kW	$f_{IS,G-BW}$	$1/(A_0 a)$	1,0%
Faktor Wartung BW-Kessel < 200 kW	$f_{W,G-BW}$	$1/(A_0 a)$	1,0%
Faktor Instandsetzung Pelletkessel	$f_{IS,Pe}$	$1/(A_0 a)$	3,0%
Faktor Wartung Pelletkessel	$f_{W,Pe}$	$1/(A_0 a)$	3,0%
Faktor Instandsetzung BHKW	$f_{IS,BHKW}$	$1/(A_0 a)$	6,0%
Faktor Wartung BHKW	$f_{W,BHKW}$	$1/(A_0 a)$	2,0%
Emissionsüberwachung 1 Messstelle	K_{am}	€/a	164,00
Emissionsüberwachung 2 Messstellen	K_{am}	€/a	328,00
Emissionsüberwachung 3 Messstellen	K_{am}	€/a	491,00

		V1	V2	V3	V4
Investition	T€	2233,80	2318,80	2475,90	21,00
Jahresnutzwärme	MWh	5360,40	5360,40	5360,40	77,16
AN_E (Einzahlungen)	T€/a	0,00	494,02	493,73	0,00
– AN_K (Kapitalgebundene Auszahlungen)	T€/a	175,42	182,88	215,71	1,61
– AN_V (Verbrauchsgebundene Auszahlungen)	T€/a	299,02	527,28	484,20	4,18
– AN_B (Betriebsgebundene Auszahlungen)	T€/a	61,97	88,66	140,38	1,01
– AN_S (Sonstige Auszahlungen)	T€/a	0,00	0,00	0,00	0,00
AN (Annuität)	T€/a	–536,41	–304,80	–346,56	–6,81
Wärmepreis	€/kWh	100,07	56,86	64,65	88,23

Tabelle 5

Ergebnis des Variantenvergleichs.

	V1	V2	V3	V4
Primärenergiefaktoren	0,60	0,79	0,76	1,11

Tabelle 6

Primärenergiefaktoren für die untersuchten Varianten.