

| | |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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: | 81 (1990) |
| Heft: | 23 |
| Artikel: | Erhöhtes Heizpotential von Gas und Öl beim Einsatz thermodynamischer Heizmethoden |
| Autor: | Frutschi, Hans Ulrich |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-903188 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.02.2026

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

Erhöhtes Heizpotential von Gas und Öl beim Einsatz thermodynamischer Heizmethoden

Hans Ulrich Frutschi

Der gekoppelte Einsatz von Heizkraftwerken und Wärmepumpen verspricht – im Vergleich zu herkömmlichen Heizmethoden – eine Einsparung an fossilen Brennstoffen von mindestens 50%. Als Heizkraftwerke weisen dabei kombinierte Gas- und Dampfturbinenanlagen besonders günstige Eigenschaften auf, indem sie nicht nur eine sehr gute Brennstoffausnutzung ermöglichen, sondern auch einen besonders grossen Anteil der Nutzenergie in Form von elektrischem Strom liefern.

Comparativement aux méthodes de chauffage traditionnelles, la combinaison de centrales chaleur-force et de pompes à chaleur promet une économie de combustibles fossiles d'au moins 50%. Les centrales combinées de turbines à gaz et de turbines à vapeur présentent des propriétés particulièrement favorables du fait qu'outre une très bonne utilisation du combustible elles fournissent une grande part d'énergie utile sous forme de courant électrique.

Adresse des Autors

Hans Ulrich Frutschi, Ing. SIA, ABB Kraftwerke AG, Abt. KWGD, Entwicklung Gasturbinen und Kombianlagen, 5401 Baden

Durch das Zusammenwirken von Heizkraftwerken und Wärmepumpenheizungen lässt sich aus einer gegebenen Brennstoffmenge ein Maximum an Heizwärme realisieren. Diese kann dabei den mehrfachen Betrag des Heizwertes des eingesetzten Brennstoffes ausmachen. Demgegenüber bedeuten herkömmliche Heizmethoden, das heisst die einfache Umsetzung von Brennstoffenergie in Heizwärme durch Verbrennen, im Grunde genommen eine vermeidbare Energieverschwend und, im Hinblick auf den Kohlendioxidausstoss, eine unnötig hohe Umweltbelastung.

Besonders gute Resultate sind erzielbar, wenn als Heizkraftwerke Kaskadenschaltungen von Gas- und Dampfturbinen, d.h. sogenannte Kombianlagen, zum Einsatz kommen. Diese produzieren nämlich bei sehr gutem Brennstoffnutzungsgrad neben der Heizwärme vor allem einen besonders grossen Anteil an elektrischer Energie, welche für den Betrieb der Wärmepumpen eingesetzt werden kann.

Man kann dieses Verfahren, das Zusammenschalten von Heizkraftwerken mit Wärmepumpen, als die *thermodynamische Heizmethode* und die so erzielbare Brennstoffausbeute als das *thermodynamische Heizpotential* der Brennstoffe bezeichnen. – Die nachfolgenden Ausführungen zeigen auf, welche Brennstoffausnutzung mit dem heutigen Stand der Technik auf diese Weise erreichbar ist.

Die herkömmliche Heizmethode

Mit einer guten Heizanlage herkömmlicher Art mit Gas- oder Ölheizkessel können unter günstigen Verhältnissen im Vollastbetrieb etwa 90% der Brennstoffenergie Q in nutzbare Heizwärme H umgewandelt werden.

Der Brennstoffnutzungsgrad v beträgt in diesem Fall

$$v = H/Q \approx 0,9 \quad (1)$$

Bei Erdgas lässt sich durch den kleinen Unterschied von ungefähr 10% zwischen Brennwert und Heizwert sogar noch etwas mehr erreichen. Die dazu erforderliche Kondensation des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes ist jedoch problematisch und daher unüblich. Man ist geneigt, einen Brennstoffnutzungsgrad von $v = 0,90$ als höchst zufriedenstellend einzustufen – aber der Schein trügt.

Die Wärme-Kraft-Kopplung

Die Brennstoffenergie Q lässt sich in modernen kombinierten Gas-Dampfturbinenheizkraftwerken, kurz Kombianlagen genannt, zu etwa 44% in elektrische Energie E und zu weiteren etwa 44% in Heizwärme H zur Speisung eines Fernwärmennetzes umwandeln. Die restlichen 12% gehen als Abwärme an die Umgebung verloren. Der thermische Wirkungsgrad der Stromerzeugung, η , ist hierbei offenbar

$$\eta = E/Q \approx 44/100 = 0,44 \quad (2)$$

und der Brennstoffnutzungsgrad v

$$v = (E + H)/Q \approx (44 + 44)/100 = 0,88 \quad (3)$$

Die Heizwärme ihrerseits ist dann

$$H = Q(v - \eta) \approx Q(0,88 - 0,44) = 0,44 \cdot Q \quad (4)$$

und die Stromkennzahl der Wärme-Kraft-Kopplung, ϑ ,

$$\vartheta = E/H \approx 1 \quad (5)$$

Dieses ausserordentlich gute Resultat kommt dadurch zustande, dass die Heizwärme vom Niederdruckteil der Dampfturbine ausgetrennt wird, wie dies Bild 1 zeigt. Dadurch wird nämlich nur der Niederdruckteil der

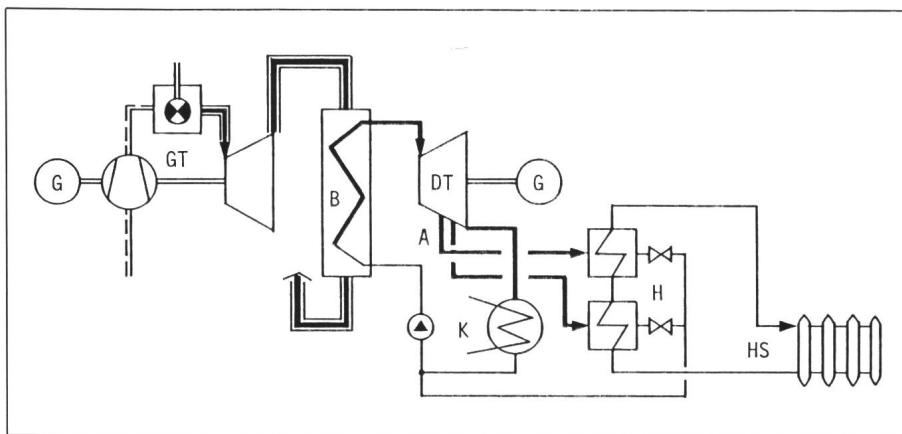


Bild 1 Schema der Wärme-Kraft-Kopplung mit einer Kombianlage

- GT Gasturbine
- DT Dampfturbine
- G Generatoren
- A Dampfentnahme
- HS Heizsystem
- H Heizwärme
- B Abhitzekessel
- K Kondensator

Dampfturbine leistungsmässig beschnitten, während der Hochdruckteil und die vorgeschaltete Gasturbine unvermindert weiter Strom produzieren können.

Als Heiznetzvorlauftemperatur ist für dieses durchschnittliche Beispiel ein Wert von 120 °C in Rechnung gesetzt worden. Auch wenn nur ein Teil des Dampfes entnommen wird, ergeben sich für die so beheizten Objekte die oben gezeigten günstigen Ergebnisse. Der andere Teil des Dampfes, welcher nicht an der Wärme-Kraft-Kopplung beteiligt ist, erzeugt dann einfach elektrische Energie mit einem Wirkungsgrad von ungefähr 50% im Kondensationsbetrieb wie dies die Energiebilanzen in Bild 2 zeigen.

Eine andere, sehr aufschlussreiche Betrachtungsweise ist der Vergleich der durch Wärme-Kraft-Kopplung (Dampfentnahme aus der Dampfturbine) gewonnenen Heizwärme H mit der Minderproduktion an elektrischer Energie ΔE , wohlverstanden, bei gleichbleibender Brennstoffzufuhr. Daraus lässt sich die Heizleistungsziffer ε , wie sie auch bei Wärmepumpen für deren Bewertung verwendet wird, errechnen:

$$\varepsilon = H/\Delta E \quad (6)$$

Da die beispielhafte Kombianlage im reinen Stromerzeugungsbetrieb einen thermischen Wirkungsgrad η von 50% (A in Bild 2) aufweist, welcher durch die Dampfentnahme auf 44% abfällt (B...D in Bild 2), wenn die Anlage

schnitt) kommt klar zum Ausdruck, dass die Wärme-Kraft-Kopplung eine weitaus grössere Leistungsziffer aufweist als Wärmepumpen, ganz abgesehen von den wesentlich höheren erzielbaren Heizwassertemperaturen. Der einfache Grund dafür ist der, dass sich bei der Wärme-Kraft-Kopplung alle thermodynamischen, mechanischen und elektrischen Irreversibilitäten zugunsten, bei der Wärmepumpe jedoch zuungunsten der Leistungsziffer auswirken.

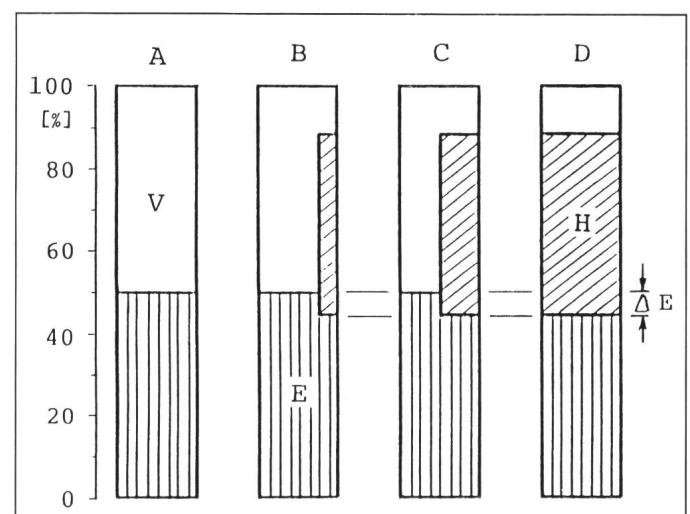
Bild 3 zeigt die 225-MW-Kombianlage Pegasus 12 in Holland, welche den weltweit höchsten Wirkungsgrad der Stromerzeugung aus Erdgas von ungefähr 52% erreicht. Aber auch im Heizkraftbetrieb erzielt sie das bis heute konkurrenzlose Ergebnis von ungefähr 47% Strom plus rund 40% Heizwärme aus 100% Brennstoffenergie. Das entspricht einer Stromkennzahl von sogar $\vartheta = 47/40 = 1,175$. Diese grosse Stromkennzahl sagt aus, dass ein sehr grosser Anteil der Nutzenergie von höchster Qualität, d.h. elektrische Energie ist. Die Anlage Pegasus 12 basiert auf einer 150-MW-ABB-Gasturbine Typ 13E und einer nachgeschalteten ABB-Zweidruck-Dampfturbine mit 75 MW Leistung. Die Maschine ist darüber hinaus mit einer sogenannten Low-NO_x-Brennkammer ausgerüstet,

Heizwärme im Betrage von 0,44 Q (Q : Brennstoffenergie) liefert, ergibt sich als Heizleistungsziffer

$$\varepsilon = H/\Delta E \quad \cong 0,44 Q/(0,50 - 0,44) Q = 7,33 \quad (7)$$

Beim Vergleich mit der Güte einer Wärmepumpe (siehe nächster Ab-

Bild 2
Wirkung der
Wärme-Kraft-Kopplung



- A Keine Heizdampfentnahme (Kondensationsbetrieb)
- B 25% Heizdampfentnahme
- C 50% Heizdampfentnahme
- D 100% Heizdampfentnahme (Gegendruckbetrieb)
- E Elektrische Energie
- H Heizwärme
- V Verluste

Die durch Dampfentnahme gewonnene Heizwärme H kostet nur die Elektrizitätsmenge ΔE . Alle Werte sind bezogen auf die Brennstoffenergie (=100%)

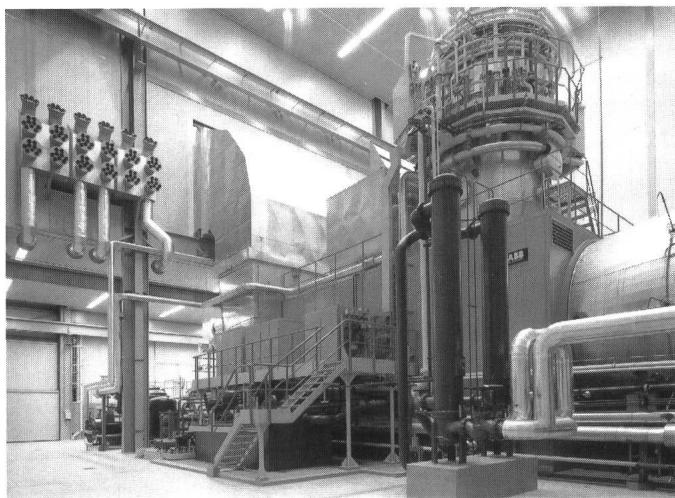


Bild 3
Kombiheizkraftwerk
Pegasus 12 in Holland

60 °C auf, dessen Massenstrom weitgehend konstant gehalten wird. Bei Teillast, d.h. bei milderem Wetter, werden dann von oben her Einheiten abgeschaltet, was die Vorlauftemperatur senkt und so die Leistungsziffer verbessert. Letzteres ist um so mehr der Fall, als auch die Temperatur der Wärmequelle (Fluss, See) ansteigen wird. Unter diesem Aspekt kann man annehmen, dass sogar unter Einbezug eines gewissen Leistungsanteils von Kleinwärmepumpen mit Leistungsziffern von 2 ... 2,5 ein ε von 3,5 als gewogener Mittelwert aller zum betrachteten System gehörenden Wärmepumpenheizungen gehalten wird.

Eine raffinierte Anordnung zur Erlangung einer besonders guten Lei-

so dass sich sehr geringe Stickoxidemissionen von nur etwa 40 ppm, bezogen auf 15% Sauerstoff, im Abgas ergeben.

Die Wärmepumpe

Arbeit, beziehungsweise in unserem Beispiel elektrische Energie, lässt sich zum Hochpumpen einer grossen Menge von Umgebungswärme einsetzen. Durch den Exergiestrom¹⁾ Elektrizität wird diese eingefangene Umgebungswärme qualitativ soweit aufgewertet, dass sie als Heizwärme eingesetzt werden kann. Das Mittel zur Durchführung dieses Prozesses heisst Wärmepumpe. Ihre Leistungsziffer ε gibt an, wievielmal mehr Heizwärme H gewonnen werden kann, als elektrische Energie E dafür aufgewendet werden muss. Es ist also, wie bei der Wärme-Kraft-Kopplung,

$$\varepsilon = H/E \quad (8)$$

Die zur Verfügung stehende Heizwärme H setzt sich zusammen aus

$$H = E + U \quad (9)$$

wobei U ihrerseits die hochgepumpte Umgebungswärme ist:

$$U = E(\varepsilon - 1) \quad (10)$$

Das Arbeitsprinzip der Wärmepumpe wird als bekannt vorausgesetzt. Für die hier gedachte Anwendung kommen Wärmepumpenheiznetze in Siedlungen, kleineren Städten und Quartieren grösserer Städte an dafür geeigneten Standorten in Frage. Als Vor- und Rücklauftemperaturen sollen 60 und 40 °C im Vollastpunkt (kältester Tag, monovalent) in Rechnung gesetzt

werden. See-, Fluss- oder Grundwasser, aber auch Abwasser von Kläranlagen seien als Wärmequellen angenommen, so dass sich im Verdampfer der Wärmepumpen eine Temperatur von mindestens 0 °C einstellt.

Die mit Wärmepumpen heute erzielten Leistungsziffern sind in Bild 4 dargestellt. Den Stand der Technik stellen aber wahrscheinlich immer noch die in [1] genannten Grosswärmepumpen mit ihren Leistungsziffern von 4,4 beziehungsweise 5,2 [2,3] dar.

Bei einer günstigen Anordnung gemäss Bild 5 heizen die Wärmepumpen I ... IV das Heizwasser von 40 auf

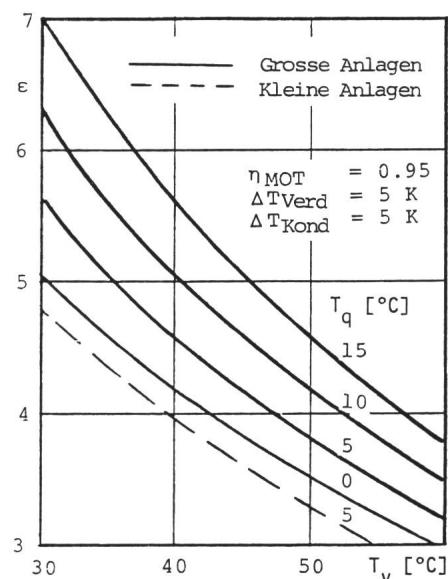


Bild 4 Leistungsziffern einstufiger Wärmepumpen

ε Leistungsziffer der Wärmepumpe (Verhältnis erzeugter Nutzwärme zu Antriebsenergie der Wärmepumpe)

T_v Vorlauftemperatur der Heizung

T_q Temperatur der Wärmequelle

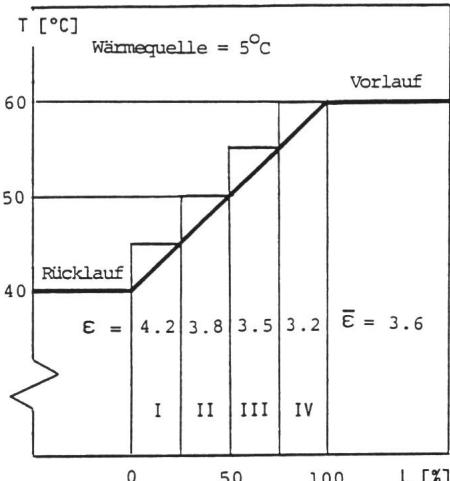


Bild 5 Leistungsziffer einer mehrstufigen Wärmepumpenanordnung

I ... IV thermisch in Reihe geschaltete Wärmepumpen

T Temperaturen im Wärmekreis und notwendige Vorlauftemperatur in Abhängigkeit vom Nutzwärmebedarf

L Nutzwärmebedarf

ε Leistungsziffern der Wärmepumpen I ... IV

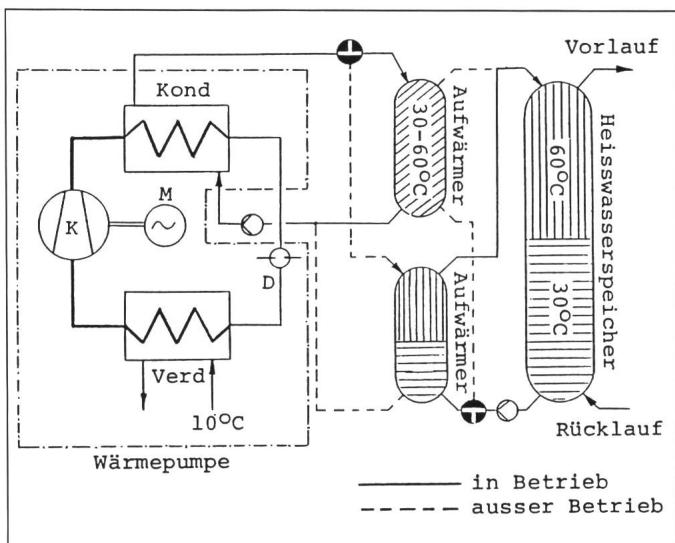
stungsziffer zeigt Bild 6. Hier heizt die Wärmepumpe das Wasser kontinuierlich vom Rücklauf zum Vorlauf auf, so dass für die erzielbare Leistungsziffer seine mittlere Temperatur relevant ist. Während einer der Aufwärmer geheizt wird, wird der Inhalt des anderen in den Speicher umgepumpt.

Die thermodynamische Heizung

Wird die von einer Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage produzierte elektrische Energie dazu verwendet, mit Hilfe von Wärmepumpen zusätzliche

¹⁾ Exergie ist das Arbeitsvermögen

Thermodynamische Heizmethode



Prinzip: keine Vermischung von Vorlauf- und Rücklaufwasser; abgeschlossene Mengen des Wassers werden kontinuierlich von der Rücklauftemperatur auf die Vorlauftemperatur aufgewärmt; für die Leistungsziffer der Wärme pumpe ist damit eine mittlere Temperatur zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur massgebend und nicht die höhere Vorlauftemperatur.

K Kompressor
M Motor
D Drossel

Heizwärme zu erzeugen, so wird die Gesamtanlage zu einer sogenannten thermodynamischen Heizanlage. Man versteht darunter eine Anlage, welche, basierend auf dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, aus Brennstoff ein Maximum an Heizenergie erzeugt. Bedingung ist dabei, dass alle Komponenten der Gesamtanlage nach diesem Prinzip funktionieren. So ist Voraussetzung, dass es sich bei der ersten Komponente um eine echte Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage handelt und nicht um eine Anlage mit einer sim-

plen Abwärmenutzung eines sogenannten thermodynamisch unfertigen Kraftprozesses wie z.B. eines Verbrennungsmotors. Die Wärmepumpen, d.h. die zweite Komponente der thermodynamischen Heizanlage, können dabei dezentral an geeigneten Orten installiert und mit dem Strom der Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage betrieben werden. Beide Komponenten zusammen liefern dann in der Summe die totale Heizwärme H_{tot} :

$$H_{tot} = Q(v - \eta) + \varepsilon \cdot E \quad (11)$$

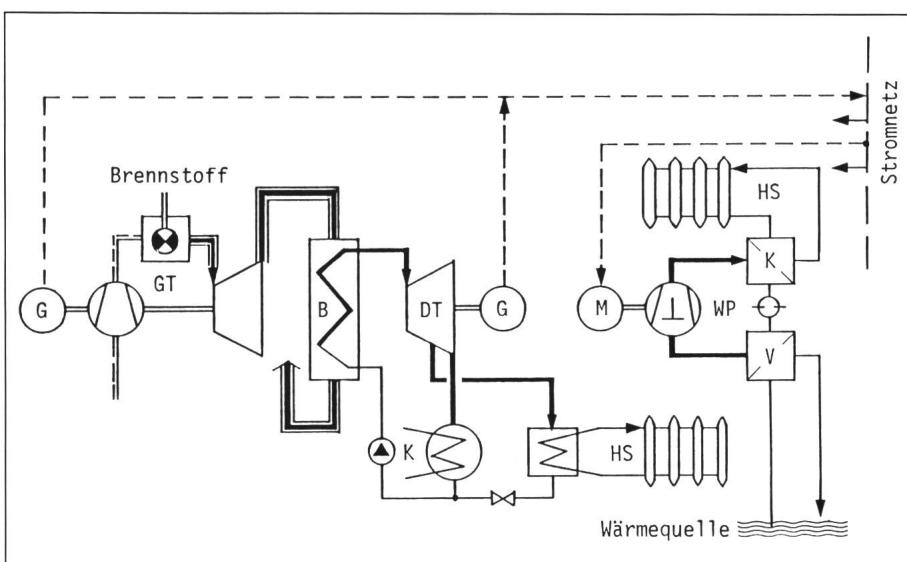


Bild 8 Schema einer Kombianlage nach dem thermodynamischen Heizprinzip (Heizwärmeauskopplung und Stromlieferung an Wärmepumpen)

Bild 6 Wärmepumpen- anordnung nach Ostertag

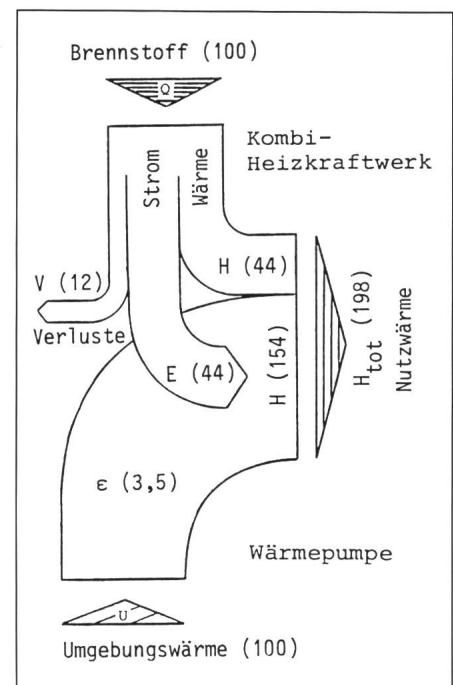


Bild 7 Energieflussdiagramm für das thermodynamische Heizprinzip

Q Brennstoffenergie
 E erzeugte (verbrauchte) elektrische Energie
 H Heizwärme
 V Verluste
 U Umgebungswärme
 H_{tot} total erzeugte Nutzwärme

In Klammer: Mengenangaben für E , H , V , U und H_{tot} , bezogen auf eingesetzte Brennstoffenergie $Q (= 100)$, für das im Text diskutierte Beispiel.

ε Leistungsziffer der Wärmepumpe: $\varepsilon = H/U$ (in Klammern: Wert für diskutiertes System)

und mit $E = \eta \cdot O$ wird

$$H_{tot} = \mathcal{O}[(v - \eta) + \varepsilon \cdot \eta] \quad (12)$$

Mit den Zahlen des Beispiels wird

$$H_{tot} \cong Q[(0,88 - 0,44) + 3,5 \cdot 0,44] \\ \cong 1,98 \cdot Q \quad (13)$$

Das entspricht gerade einer Verdopplung der für Heizzwecke zur Verfügung stehenden Brennstoffenergie gegenüber herkömmlichen Heizmethoden (Heizkessel). Mit der im vorangehenden Abschnitt genannten Anlage Pegasus 12 ergäbe sich ein noch besseres

| | |
|-----------|---------------|
| <i>GT</i> | Gasturbine |
| <i>DT</i> | Dampfturbine |
| <i>B</i> | Abhitzekessel |
| <i>WP</i> | Wärmepumpen |
| <i>HS</i> | Heizsysteme |
| <i>V</i> | Verdampfer |
| <i>K</i> | Kondensatoren |
| <i>G</i> | Generatoren |
| <i>M</i> | Motoren |

Ergebnis. Bezogen auf 1 Kilogramm Brennstoff, also auf dessen Heizwert $Q = H_u$, ergibt sich

$$H_{tot} = H_u[(v - \eta) + \varepsilon \cdot \eta] \quad (14)$$

Man kann nun diesen Ausdruck als das thermodynamische Heizpotential oder das eigentliche Heizvermögen der Brennstoffe bezeichnen.

Dieses Zusammenwirken von Heizkraftwerk und Wärmepumpen ist in Bild 7 als Energieflussdiagramm dargestellt. Man sieht, wie ein konzentrierter Exergiestrahl E eine viel grössere Menge an Umgebungsenergie U auf das für Heizzwecke benötigte Temperatur-(Exergie-)niveau anhebt, also in der Qualität soweit wie erforderlich aufwertet. Bei der Betrachtung von Bild 7 ist man versucht, die Wärmepumpe bildlich als «thermodynamischen Injektor» zu bezeichnen!

Bild 8 zeigt das Schema, und die Bil-

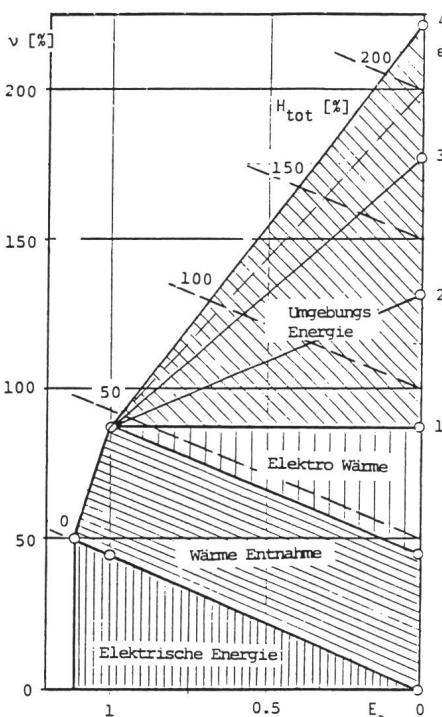


Bild 9 Energiebilanz eines Systems mit Kombikraftwerk und Wärmepumpen

Darstellung der verfügbaren Heizwärme H_{tot} und des Brennstoffnutzungsgrades v in Abhängigkeit vom Stromanteil E_a , welcher anderweitig verfügbar sein soll.

H_{tot} verfügbare Heizwärmemenge, bezogen auf die eingesetzte Brennstoffenergie (=100%)

v Brennstoffnutzungsgrad: Summe von verfügbarer Heizwärme und anderweitig verfügbarer elektrische Energie, bezogen auf die eingesetzte Brennstoffenergie (=100%)

E_a anderweitig verfügbare elektrische Energie, bezogen auf die im Kombibetrieb maximal produzierte elektrische Energie (=1)

ε Leistungsziffer der Wärmepumpen

Bild 10
Zahlenbeispiele zu
Bild 8 für $\varepsilon = 3,6$

| E_a | $E [\%]$ | $H_{tot} [\%]$ | $v [\%]$ |
|-------|----------|----------------|----------|
| 1,16 | 50 | 0 | 50 |
| 1,0 | 44 | 44 | 88 |
| 0,5 | 22 | 123 | 144 |
| 0 | 0 | 200 | 200 |

E anderweitig verfügbare elektrische Energie, bezogen auf die eingesetzte Brennstoffenergie (=100 %), übrige Grössen siehe Legende zu Bild 9.

der 9 und 10 zeigen die Zusammensetzung der verschiedenen Energieflüsse. In das Diagramm von Bild 9 mit dem Brennstoffnutzungsgrad als Ordinate und dem frei verfügbaren, also übrig bleibenden Strom als Abszisse sind Linien konstanter Heizwärmeerzeugung eingezeichnet. Die Nutzenergie ist von unten nach oben unterteilt in elektrische Energie, Wärmeentnahme, Elektrowärme und hochgepumpte Umgebungswärme ($\varepsilon > 1$). Das Bild macht deutlich, dass bereits eine reine Elektroheizung mit Strom ab Heizkraftwerk einen ebensoguten Brennstoffnutzungsgrad ergibt wie die übliche, direkte Heizung mittels eines Heizkessels! Es ist aber trotzdem unsinnig, Elektrizität direkt zu verheizen, wie dies natürlich auch für die Brennstoffe gilt.

In diesen prinzipiellen Diagrammen sind noch keine Verluste für Strom-

und Wärmeübertragung berücksichtigt. Aber selbst wenn je 9% Übertragsverluste für die elektrische Energie und die Heizwärme ab Heizkraftwerk (Fernwärme) in Rechnung gesetzt werden, so steht noch eine Nutzwärme von 180% der eingesetzten Brennstoffenergie zur Verfügung. Bild 11 veranschaulicht dies, indem die im Spiele stehenden Energiemengen als Säulen dargestellt sind. Dabei sind die unterschiedlichen Energiequalitäten durch entsprechende Schraffuren gekennzeichnet. Man sieht, dass das Heizwärmeangebot gerade doppelt so gross ist wie im Falle eines sehr guten Heizkessels mit 90% Wirkungsgrad. Die thermodynamische Heizung ist also ein Mittel, um die CO₂-Belastung effizient zu bekämpfen.

Es mag vielleicht befremden, dass hier eine vermehrte Erzeugung von elektrischer Energie für Heizzwecke

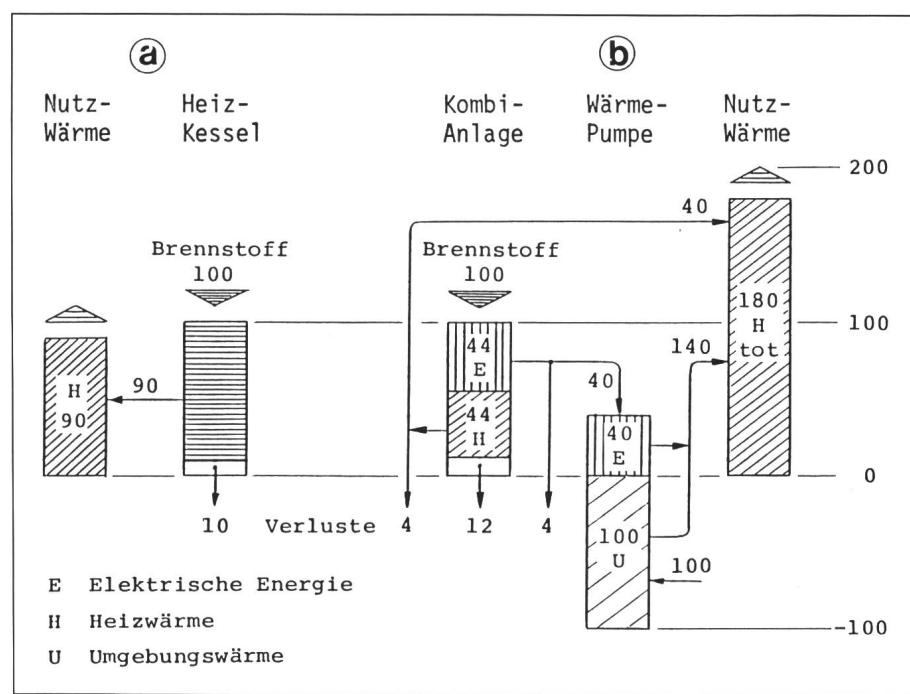


Bild 11 Energiebilanz einer thermodynamischen Heizung im Vergleich mit einer Kesselheizung

a Kesselheizung

b thermodynamische Heizung unter Berücksichtigung der Übertragsverluste für Strom und Fernwärme

Thermodynamische Heizmethode

propagiert wird. Es ist aber eine unumstössbare Tatsache, dass Elektrizität das einzige Vehikel für den verlustarmen Transport von Arbeitsfähigkeit ist, welche der Verbraucher fast verlustlos in die von ihm gebrauchte Energieform umsetzen kann. Die zentrale Stromerzeugung drängt sich deshalb auf, weil eine dezentrale Erzeugung, auch rein netto gesehen, einen wesentlich schlechteren Wirkungsgrad und in den meisten Fällen untragbare Kosten sowie eine grössere Umweltbelastung bringt.

Für das oben angeführte Beispiel wurden bezüglich der Leistungsziffer der Wärmepumpen pessimistische Annahmen gemacht. Ein Wert von $\varepsilon = 3,5$ entspricht gemäss Bild 4 etwa 50 °C Vorlauftemperatur bei einer Wärmequelle von 0 °C. Bezogen auf einen gewogenen Jahresmittelwert und auf Heizungen mit tieferen Heizwassertemperaturen (z.B. Fußbodenheizungen) dürfte sich eher ein höherer Mittelwert erreichen lassen.

Mit den Zahlen der im Beispiel verwendeten Kombianlage wurden für Verdampfungstemperaturen der Wärmepumpen von -10 ... +20 °C und für Kondensationstemperaturen von

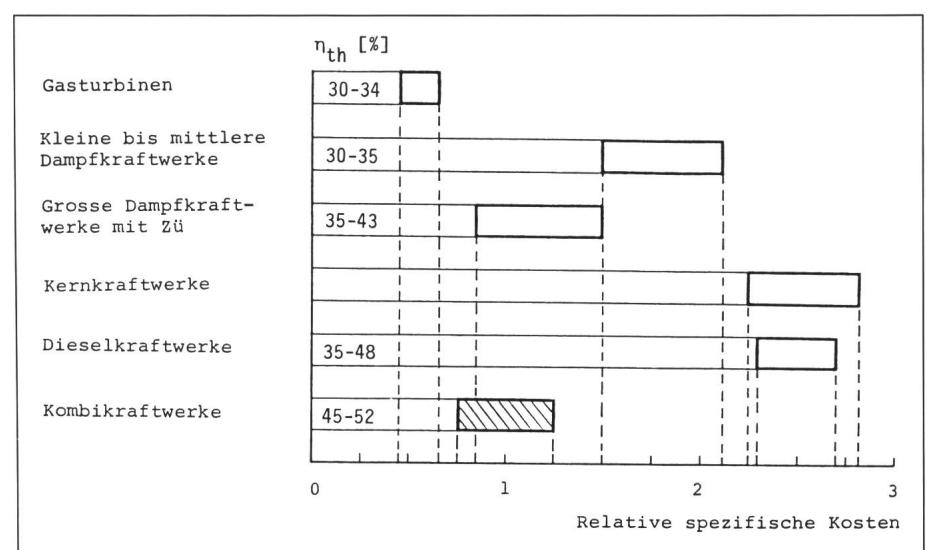


Bild 13 Anlagekosten verschiedener schlüsselfertiger Kraftwerkstanlagen im Vergleich
 η_{th} thermischer Wirkungsgrad der Stromerzeugung

+35 ... +65 °C die Heizpotentiale berechnet und in Bild 12 dargestellt. Daraus geht hervor, dass Werte von deutlich mehr als 2 für das auf den unteren Heizwert bezogene Heizpotential machbar sind, sofern die Wärmepumpenanlagen an dafür geeigneten Stellen, d.h. an Seen, Flüssen, Kläranlagen und benutzbaren Grundwasservorkommen errichtet werden.

Die Kombianlage weist für den hier postulierten Einsatz, und überhaupt als Heizkraftwerk, einen weiteren sehr grossen Vorteil auf. Ihre Leistungsfähigkeit ist nämlich bei tiefen Außentemperaturen, also wenn entsprechend stärker geheizt werden muss, markant grösser als bei hohen. Dabei ändert sich ihr Wirkungsgrad kaum. Darüber hinaus erlauben moderne Regelmetho-

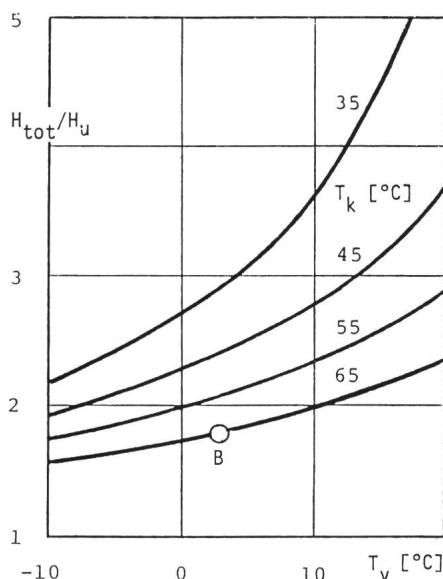
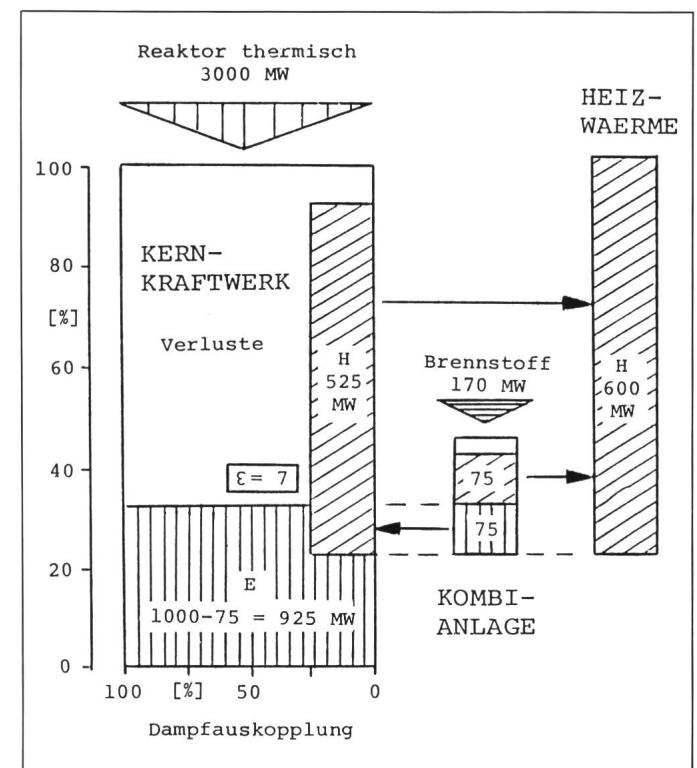


Bild 12 Thermodynamisches Heizpotential von Brennstoffen in Abhängigkeit von den Arbeitstemperaturen

H_{tot}/H_u thermodynamisches Heizpotential, bezogen auf den unteren Heizwert H_u
 T_v Verdampfertemperatur
 T_k Kondensatortemperatur
 B entspricht dem im Text diskutierten Beispiel mit folgenden Berechnungsannahmen: $\eta = 0,44$; $\nu = 0,88$ (Brennstoffnutzungsgrad in normalem Kombiprozess); $\varepsilon = 0,65 \varepsilon_{Car}$; Verluste: 9%; Stromverteilung, 9% Wärmeverteilung.



Energiebilanz beim Ersatz des bei Heizwärmeauskopplung aus Kernkraftwerken entfallenen Stromes durch Kombiheizkraftwerke
 E Elektrischer Energiestrom
 H Heizenergiestrom

den die Hochhaltung des Wirkungsgrades auch bei Teillast [6]. Wenn jetzt noch berücksichtigt wird, dass Kombianlagen im Vergleich zu möglichen Alternativen sehr günstige spezifische Erstellungskosten aufzuweisen haben (siehe Bild 13), so erklärt sich ihr bevorzugter Einsatz auch aus ökonomischer Sicht.

Fernwärme aus Kernkraftwerken

Gerade im Hinblick auf den Kohlendioxidausstoss bringt, wie oben schon gesagt, die thermodynamische Heizung grosse Vorteile. Das beste diesbezügliche Resultat bietet dabei natürlich die nukleare Fernwärme an, weil hier überhaupt kein CO₂ entsteht. Dabei wird, genau wie bei fossil befeuerten Heizkraftwerken, der Dampfturbine Dampf entnommen (siehe Bilder 1 und 2) und damit das Wasser des Fernwärmennetzes aufgeheizt. Dies wird z.B. im KKW Beznau für das seit einigen Jahren funktionierende Fernwärmennetz Refuna praktiziert. Die dort angezapfte Heizleistung liegt im Bereich von 50 MW. Technisch gesehen könnte dies jedoch, nach einer entsprechenden Anpassung der Dampfturbinen, etwa 25mal mehr sein!

Bild 14 zeigt weitere Möglichkeiten am Beispiel eines Kernkraftwerkes mit 1000 MW elektrischer Leistung. Sein Wirkungsgrad betrage 33,3%, bei einer thermischen Reaktorleistung von 3000 MW. Durch eine Teilauskopplung von Fernwärme im Ausmass von 525 MW würde die elektrische Leistung bei einer eher konservativ angenommenen Heizleistungsziffer von $\varepsilon = 7$ lediglich um 75 MW vermindert. Es würde sich also bei der ausgetrennten Heizwärme, wie bei Refuna, lediglich um einen kleinen Teil des auskoppelbaren Potentials von gut 2000 MW handeln.

Diese entfallene elektrische Leistung von 75 MW könnte man jetzt natürlich mit einem Kombiheizkraftwerk – dem CO₂-Ausstoss zuliebe wenn möglich auf Erdgasbasis – wieder ersetzen. Dabei würden weitere 75 MW an Heizwärmeleistung verfügbar, wie die rechte Hälfte von Bild 14 zeigt. Bei

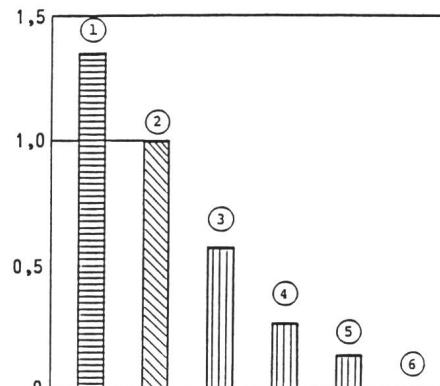


Bild 15 Relativer CO₂-Ausstoss verschiedener Heizsysteme

Die Werte sind bezogen auf den CO₂-Ausstoss bei Ölfeuerung für die gleiche Heizleistung

- 1 Kohlefeuerung
- 2 Ölfeuerung
- 3 Erdgasfeuerung
- 4 Thermodynamische Heizung mit Erdgas
- 5 Nukleare Fernwärme und Ersatz der Minderproduktion an Strom durch Kombi-Heizkraftwerke mit Erdgasfeuerung
- 6 Nukleare Fernwärme und Ersatz der Minderproduktion an Strom durch Kernenergie

einem realistisch angesetzten Brennstoffnutzungsgrad von 87% wären 170 MW durch Brennstoff aufzubringen. Die totale Heizleistung würde so auf 600 MW anwachsen. Demnach müssten im vorliegenden Beispiel also für eine Heizleistung von 600 MW nur 170 MW an Brennstoffenergie eingesetzt werden, was einem vergleichsweise sehr kleinen Kohlendioxidausstoss von nur ungefähr einem Viertel desjenigen einer sehr guten Gasfeuerung entsprechen würde (siehe Bild 15). Solche fossil befeuerten Heizkraftwerke könnten dann in grösseren Städten oder Agglomerationen errichtet werden, welche von der nuklearen Fernwärme nicht erreicht werden können und wo die Voraussetzungen für einen effizienten Wärmepumpeneinsatz nicht gegeben sind. Das beste Ergebnis bezüglich CO₂-Reduktion brächte natürlich trotz allem der Ersatz des durch Wärmeauskopplung entfallenen Stromes auch wieder durch Nuklearenergie.

Fazit

Die herkömmlichen Heizmethoden mit Heizkesseln, d.h. die Degradierung

der Qualität der Energie der eingesetzten Brennstoffe auf das Niveau der benötigten Heizwärme bedeutet eine Brennstoffvergeudung und dementsprechend eine unnötig hohe Umweltbelastung, insbesondere durch Kohlendioxid. Überall dort, wo es möglich und wirtschaftlich vertretbar ist, sollte daher die thermodynamische Heizmethode *Brennstoff – Arbeit – Heizwärme* zur Anwendung kommen. Werden dafür Kombiheizkraftwerke verwendet, so können mehr als 50% der Brennstoffe für die so beheizten Objekte eingespart werden. Mindestens um denselben Betrag reduzieren sich natürlich auch die Schadstoffemissionen, wobei speziell CO₂ von grosser Bedeutung ist. Der potentielle Versorgungskreis von Kernkraftwerken sollte von diesen durch Fernwärme beliefert werden. Auch wenn nur ein Teil der möglichen Heizwärme ausgetrennt wird und nur ein Teil des so erzeugten Stromes für Wärmepumpen verwendet wird, ergibt sich für die so beheizten Objekte dennoch eine Brennstoffersparnis von mehr als 50%.

Bibliothek

- [1] Fortschritt durch Forschung. Escher Wyss Mitteilungen 17/18(1944/45) Sonderband.
- [2] Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. 14. Auflage. Berlin u.a., Springer, 1981. Kapitel M6.1. S. 634...697.
- [3] Studie über Wärmepumpen. Zwischenbericht (vertraulich). EIR-TM-ST 369. Würenlingen, Paul Scherrer Institut, 1975.
- [4] H.-U. Frutschi: Wärme-Kraft-Kopplung als alternative Heizmethode. Brown Boveri Mitt. 65(1978)11, S. 700...706.
- [5] H.-U. Frutschi: Combined power and heat production with gas turbines and their control methods. ASME-Paper 82-GT-111. New York, American Society of Mechanical Engineers, 1982.
- [6] H.-U. Frutschi: Control methods for cogeneration with gas turbines and combined cycles. 1987 ASME Cogen-Turbo. International Symposium on Turbomachinery, Combined Cycle Technologies and Cogeneration; Montreux/Switzerland, September 2...4, 1987; p. 263...268.
- [7] H.-U. Frutschi: Combined-cycle plants for thermodynamic heating systems. Joint ASME-IEEE Power Generation Conference; Boston/Massachusetts; October 21...25, 1990; paper 90-JPGC/GT-2.

MENOR-Gehäusetechnik – unser Zeichen garantiert für höchste Leistungen in allen Anwendungsbereichen

MENOR-Gehäusetechnik: Der Partner mit Know-how, wenn es um den Schutz Ihrer Apparate, Installationen und Maschinen geht.

Vom Normkasten bis zu speziell gestalteten, schwaden-dichten, explosionsgeschützten, erdbebensicheren, HF-

geschützten und schocksiche- ren Spezialgehäusen bieten wir eine breite Produktpalette in Stahl oder Chromstahl.

Wir sind flexibel. Nennen Sie uns Ihre Anforderungen – wir werden diese umsetzen in das zweckmässige, rationell gefertiigte und Ihren individuellen

Bedürfnissen entsprechende Gehäuse. Wir erfüllen täglich mit hoher Lieferbereitschaft, Zuverlässigkeit und konkurrenz-fähigen Preisen die Anforde- rungen unserer Kunden.

**MENOR-Gehäusetechnik –
Problemlösungen in Stahl.**

Meto-Bau

Meto-Bau AG
CH-5303 Würenlingen
Tel.: 056 98 26 61
Fax: 056 98 10 23
Telex: 827 420 meto ch

