

Elektrizität im Wärmesektor

Wärme-Kraftkopplung
Wärmepumpen
Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung



Autorenkollektiv

Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler AG, Diessenhofen (Leitung)
Thomas Baumgartner, Ingenieurbüro für Haustechnik, Dübendorf
Robert Brunner, Dr. Brunner & Partner AG, Neuenhof
Hanspeter Eicher, Dr. Eicher & Paul AG, Liestal
Werner Lüdin, Elektra Birseck, Münchenstein
Pierre Renaud, Planair, La Sagne

Graphische Gestaltung

Digvision, AG für visuelle Kommunikation, Zürich

Trägerorganisation

SHBI Schweizerische Beratende Haustechnik- und Energie-Ingenieure

Patronatsorganisationen

AWP Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen
INFEL Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung
SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein
SSIV Schweizerischer Spenglermeister- und Installateur-Verband
STV Schweizerischer Technischer Verband
SWKI Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren
VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
VSEI Verband Schweizerischer Elektro-Installationsfirmen
VSHL Verein Schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmen

Ein Vorentwurf der vorliegenden Publikation wurde im Sommer 1991 einem breit angelegten Vernehmlassungsverfahren unterzogen. Dabei gingen viele wertvolle Hinweise ein, die möglichst weitgehend berücksichtigt wurden. Das Autorenkollektiv hatte jedoch freie Hand, unterschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berücksichtigen.

Umschlagbild Copyright © The Image Bank

Copyright © Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, November 1991
Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe gestattet. Zu beziehen bei der Edgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern. Bestellnummer 724.354.d

Zuerst sechs provokative Fragen . . .

Die Produktion und Nutzung der Energie ist ein heiss diskutiertes Thema. Speziell die hier vorzustellenden Techniken – Wärmekraftkopplung, Wärmepumpen, Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung – werden entweder flammend befürwortet oder als unbedeutende Randerscheinungen abgetan, Einermassen objektive und fachlich fundierte Beschreibungen sind selten.

Zum Einstieg werden deshalb – anstelle eines langen Vorwortes – einige provokative Fragen gestellt. Können diese Fragen wirklich alle mit «ja» beantwortet werden? Wir meinen, dass dies möglich ist, wenn solche Anlagen konsequent dort gebaut werden, wo wirklich günstige Voraussetzungen vorliegen, und wenn es weiter gelingt, Planung, Bau und Betrieb optimal zu verwirklichen. Dazu müssen allerdings einige Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Es muss eine breiter Konsens darüber erzielt werden, dass diese neuen Techniken tatsächlich einen wesentlichen Schritt in Richtung einer rationellen Verwendung der Energie darstellen und auch tatsächlich eine Entlastung der Umwelt bringen.
2. Der Bauherr muss auf diese Möglichkeiten aufmerksam gemacht werden, und er muss bereit sein, die erhöhten Anforderungen an die Planung entsprechend zu honorieren.
3. Der Planer muss für diese Fragen offen sein, und er muss bereit sein, entsprechende Zeit in die Weiterbildung zu investieren, um mit der fortschreitenden Technik Schritt zu halten.

Mit der vorliegenden Publikation soll vor allem den ersten beiden Punkten Rechnung getragen werden. Deshalb wurde versucht, den Text so abzufassen, dass er auch ohne umfassende Fachkenntnisse lesbar sein sollte. Fachwörter können im Glossar am Schluss der Broschüre nachgeschlagen werden.

Das erklärte Hauptziel von RAVEL – die Hebung der fachlichen Kompetenz - betrifft jedoch hauptsächlich den dritten Punkt. Dafür werden zu jedem der drei Themen spezielle Kurse für Planer vorbereitet, die ab Ende 1992 angeboten werden.

Das Autorenkollektiv

- **Gibt es Wärmekraftkopplungsanlagen, die konkurrenzfähig Strom produzieren?**
- **Sind Wärmepumpen, die tatsächlich mit Jahres-, arbeitszahlen von 3,0 und mehr arbeiten, kein Wunschtraum?**
- **Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung – kann das wirtschaftlich sein?**
- **Werden durch Wärmekraftkopplung in Kombination mit «Elektro-Thermo-Verstärkern» (z.B. Wärmepumpen) Energieverbrauch und CO₂-Ausstoss reduziert?**
- **Fossile Stromerzeugung zum «ökologischen Nulltarif» – ist das kein Widerspruch?**
- **... und sind diese «neuen» Techniken letztendlich auch betriebssicher?**

Inhalt

Energie im Wärmesektor	Seite 3
Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung	Seite 6
Wärmepumpen	Seite 12
Wärmeerkopplung	Seite 18
Hinweise zu Planung, Bau und Betrieb	Seite 25
Glossar	Seite 30

Energie im Wärmesektor

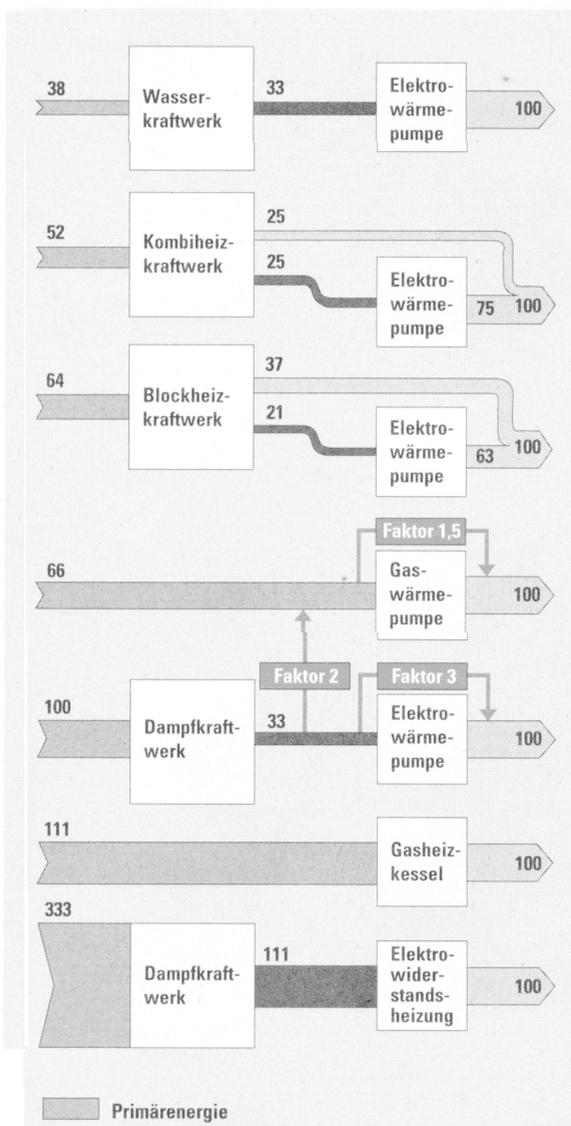
Energie ist nicht nur eine Frage der Quantität sondern auch der Qualität

Wenn man die heute zur Verfügung stehenden Wärme-erzeugungstechniken betrachtet (Bild 1), fällt auf, dass die Güte der Energieumwandlung sehr unterschiedlich ist. Um 100 Einheiten Wärme zu erzeugen, kann der Primärenergieaufwand – je nach Umwandlungstechnik – zwischen 38 und 333 Einheiten schwanken. Der Grund für diese grossen Differenzen liegt, darin, dass die verschiedenen Energieformen und deren Wertigkeit durch die angewandten Umwandlungstechniken unterschiedlich gut genutzt werden. Eine Umwandlungstechnik ist umso besser, je geringer der Wertigkeitsverlust ist. Eine Elektrowärmepumpe nutzt die hohe Wertigkeit der Elektrizität beispielsweise etwa dreimal besser als eine Elektrowiderstandsheizung.

Wenn heute Verbrauchszahlen verschiedener Energieformen miteinander verglichen werden, geschieht dies in der Regel durch einen einfachen Kilowattstundenvergleich. Diese einfache Betrachtungsweise muss in Zukunft durch eine bessere Methode abgelöst werden, welche auch die Wertigkeit berücksichtigt. Doch wie kann die Wertigkeit einer bestimmten Energieform beschrieben werden?

Eine Möglichkeit ist die physikalisch exakte Definition durch die Begriffe «Exergie» und «Anergie» (Kasten 2). Mit den angegebenen Formeln kann beispielsweise berechnet werden, dass bei 0°C Umgebungstemperatur nur gerade 15% Exergie notwendig waren, um Heizwasser von 50°C zu erzeugen. Elektrizität (100% Exergie) ist demnach exergetisch 6,5mal wertvoller als Heizwärme von 50°C (15% Exergie),

Dieser Bewertungsfaktor von 6,5 ist aber für die Praxis nicht realistisch, wenn man bedenkt, dass mit einer Elektromotor-Wärmepumpe heute im günstigsten Fall eine Jahresarbeitszahl von etwa 3 realisiert werden kann. Deshalb ist es praxisnaher und anschaulicher, Bewertungsfaktoren in Form von Faustregeln anzugeben, die etwa den heutigen technischen Möglichkeiten entsprechen. In Bild 1 sind die wichtigsten drei Faktoren eingezeichnet und die daraus abgeleiteten Faustregeln angegeben.



Faustregeln

- Die Wertigkeit von Winter-Elektrizität ist etwa dreimal so hoch wie diejenige von Heizwärme
- Die Wertigkeit von Öl oder Gas ist etwa anderthalbmal so hoch wie diejenige von Heizwärme
- Die Wertigkeit von Winter-Elektrizität ist etwa doppelt so hoch wie diejenige von Öl oder Gas

Bild 1 Die verschiedenen Energieformen und deren Wertigkeit werden von den heute angewandten Wärmeereueugungstechniken sehr unterschiedlich gut genutzt. Die untenstehenden Faustregeln erlauben eine einfache Beurteilung der Wertigkeit, welche sich an den heute zur Verfügung stehenden praktischen Möglichkeiten orientiert.

Energie

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Es sind nur Umwandlungsprozesse von einer Energieform in eine andere möglich (der technisch übliche Begriff «Energieerzeugung» müsste also physikalisch korrekt «Energieumwandlung» heissen). Da Energie nicht beliebig umgewandelt werden kann, findet eine weitere Unterscheidung statt:

Exergie	Anergie
Anteil, der in andere Energieformen umgewandelt werden kann	Anteil, der nicht in andere Energieformen umgewandelt werden kann

Beispiele

Mechanische, elektrische und chemisch gebundene Energie (z.B. Heizöl, Erdgas) stellen praktisch reine Exergie dar. Sie können also in praktisch beliebige andere Energieformen umgewandelt werden.

Haizwärme enthält umso mehr Exergie, je grösser die Temperaturdifferenz zwischen dem Wärmeträger und der Umgebung ist.

Umgebungswärme enthält praktisch nur Anergie.

Mit Hilfe einer **Wärmepumpe** kann der Umgebungswärme (= Anergie) durch eine höherwertige Energie (z.B. Elektrizität) Exergie zugeführt und damit auf ein höheres Temperaturniveau «hochgepumpt» werden.

Formeln

$$\dot{Q}_E = (1 - T_2/T_1) \cdot \dot{Q} \quad \dot{Q}_A = T_2/T_1 \cdot \dot{Q}$$

$$\dot{Q}_E = \text{Exergiestrom [W]} \quad \dot{Q}_A = \text{Anergiestrom [W]}$$

$$\dot{Q} = \text{Wärmestrom [W]}$$

$$T_1 = \text{Absoluttemperatur des Wärmeträgers [K]}$$

$$T_2 = \text{Absoluttemperatur der Umgebung [K]}$$

Kasten 2**Elektrizität ist eine sehr hochwertige Energieform**

Dies zeigt sich beispielsweise darin, dass die in schweizerischen Kraftwerken eingesetzte Energie lediglich zu 43% in Elektrizität umgewandelt werden kann (172,9 PJ von 398,6 PJ, vgl. Bild 3), da die gegebenen Primärenergieträger aus physikalischen und technischen Gründen keinen besseren Umwandlungswirkungsgrad zulassen.

Elektrizität ist also eine mit hohem Primärenergieaufwand produzierte Energieform, die man nur dort einsetzen sollte, wo der Exergieverlust gering ist. Diese Forderung erfüllt die Elektrowiderstandsheizung in der Regel nicht. Deshalb sieht der Energienutzungsbeschluss für neue, ortsfeste Elektrowiderstandsheizungen eine Bewilligungspflicht vor. Aus Bild 3 ist ersichtlich, dass der mit Elektrizität gedeckte Bedarf für Raumheizung (inklusive Wärmepumpen) heute 7,4% des Gesamtstrombedarfs ausmacht (12,1 PJ von 163,8 PJ),

Bei der Elektrizität müssen - neben der Wertigkeit - allerdings auch noch weitere Kriterien berücksichtigt werden:

- Jahreszeitliche Unterschiede: im Winter wird mehr Strom gebraucht als im Sommer
- Tageszeitliche Unterschiede: während gewisser Spitzenzeiten wird mehr Strom gebraucht als in der übrigen Zeit

Der Energieverbrauch steigt ständig . . .

Trotz alter Sparappelle nimmt beispielsweise der Stromverbrauch jährlich um 2...3% zu. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass unsere Gesellschaft immer mehr und neue Bedürfnisse hat, die nur mit hochwertiger Energie in Form von Elektrizität befriedigt werden können. Aber auch die neuen Techniken zur Abwärmenutzung und zur rationellen Wärmeerzeugung brauchen zusätzlichen Strom (Hilfsenergie, Wärmepumpen). Dagegen ist natürlich nichts einzuwenden, wenn dafür ein Mehrfaches bei anderen Energieformen eingespart werden kann.

Entscheidend ist deshalb letztendlich nicht der Stromverbrauch allein, sondern der Energieverbrauch als Ganzes. Aber auch hier ist bis heute keine deutliche Trendwende festzustellen! Wen wundert's bei den tiefen Energiepreisen . . . ?

. und die Umweltbelastung nimmt laufend zu

Die Luftverschmutzung, Probleme mit der Beseitigung von radioaktiven Abfällen und begrenzte Brennstoffreserven stellen ernsthafte Probleme dar. Neuerdings kommt noch die Möglichkeit einer weltweiten Klimaveränderung hinzu, verursacht

durch den ständig zunehmenden Kohlendioxid-Ausstoss, Deshalb wurde zum Beispiel an der Weltklimakonferenz in Toronto (1988) eine Verminderung der Kohlendioxid-Emissionen um 20% bis zum Jahr 2005 und um 50% bis zum Jahr 2050 gefordert. Dies sind weltweite Probleme, und wir können dazu nicht einfach «den Kopf in den Sand stecken».

Was ist zu tun?

Es geht vor allem darum, den Gesamtenergiebedarf wesentlich zu senken. Dies bedeutet natürlich in erster Linie unnötigen Energieverbrauch verhindern und Verluste vermindern. Ein beachtliches Potential steckt auch in der vermehrten Abwärmenutzung und Warmerückgewinnung. Ein entscheidender Fortschritt kann aber nur erreicht werden, wenn es gelingt, die hochwertigen Energieformen Elektrizität, Gas und Öl in Zukunft auch ihrer tatsächlichen Wertigkeit entsprechend einzusetzen.

Eine wesentliche Verbesserung der Gesamtenergiebilanz könnte erreicht werden, wenn mehr Abwärme – die zwangsläufig bei der Stromerzeugung entsteht - nutzbar gemacht werden könnte. Heute ist dies, einschliesslich der in reinen Heizwerken produzierten Wärme, erst ein verschwindend kleiner Anteil von 5% (10,8 PJ von 398,6-172,9 PJ, vgl. Bild 3). Der Grund liegt hauptsächlich darin, dass der Transport der Wärme vom Kraftwerk zum Verbraucher oft sehr aufwendig und damit nicht wirtschaftlich ist. Darüber hinaus fehlt auch die politische Akzeptanz.

Ein interessanter Lösungsansatz ist die dezentrale fossile Stromerzeugung, und zwar dort, wo die Wärme gleich an Ort und Stelle gebraucht werden kann – die Wärmekraftkopplung mit Gasmotor-Blockheizkraftwerken. Da dazu der heute noch in Heizkesseln verbrannte fossile Brennstoff verwendet werden kann, ergibt sich bei dieser Art der Stromerzeugung keine zusätzliche Umweltbelastung. Einzige Bedingung: Rund ein Drittel des produzierten Stromes muss zum Antrieb von Elektrowärmepumpen verwendet werden, zur Kompensation der zur Stromerzeugung gebrauchten fossilen Energie, die nun nicht mehr zur Wärmeerzeugung zur Verfügung steht. Falls mehr als dieses Drittel des produzierten Stromes für Wärmepumpen verwendet wird, kann sogar – trotz fossiler Stromerzeugung! - eine wesentliche Umweltentlastung erreicht werden.

Die zuletzt gemachte Aussage ist einigermassen paradox und wird leider – selbst von Fachleuten - oft nicht richtig verstanden. Deshalb soll in den folgenden Kapiteln gezeigt werden, dass dies beim heutigen Stand der Technik nicht nur möglich ist, sondern auch wirtschaftlich interessant sein kann,

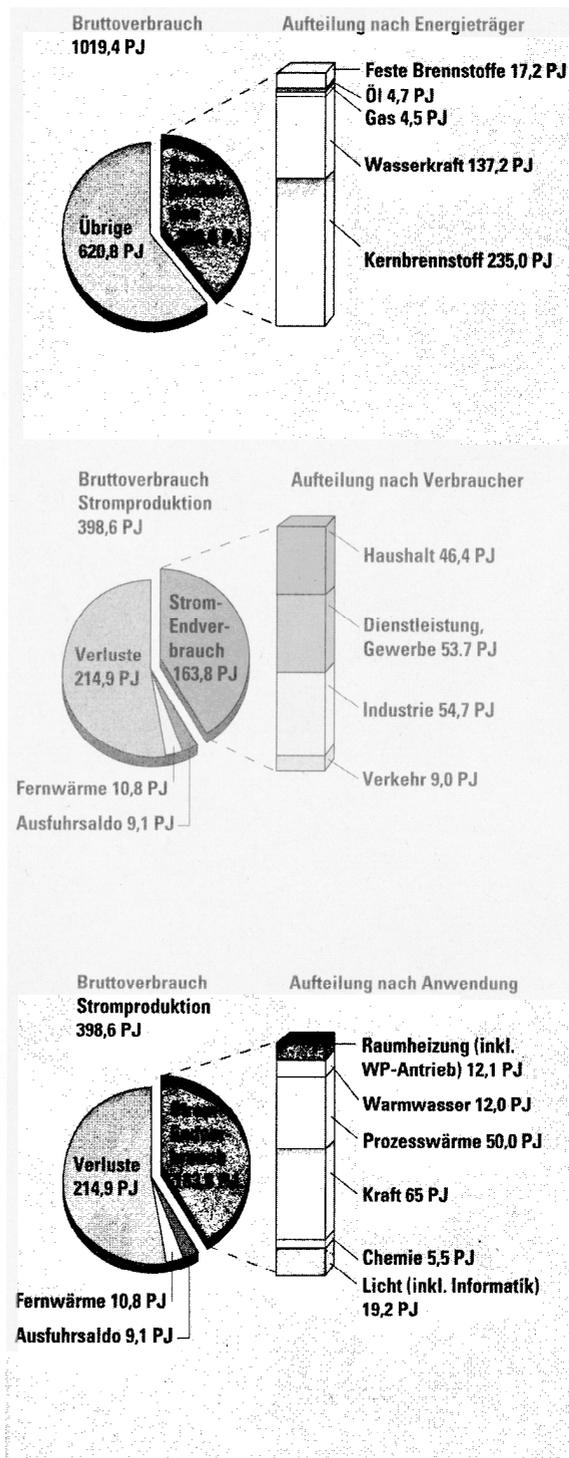


Bild 3

Energiebilanz der Schweiz für das Jahr 1989 (Basis: Gesamtenergiestatistik; 1 PJ = 278'000'000 kWh).

Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung

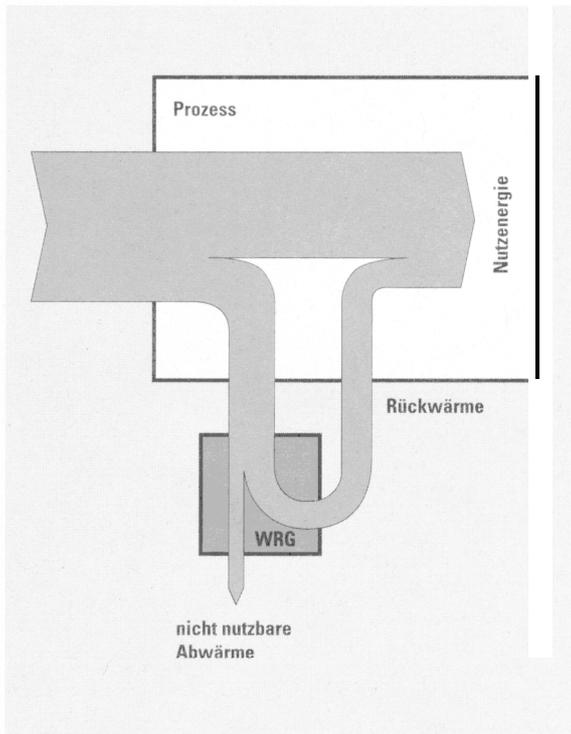


Bild 4

Bei der Wärmerückgewinnung (Abkürzung: WRG) wird die bei einem Prozess oder von einer Anlage anfallende überschüssige nutzbare Wärme vom selben Prozess oder von der gleichen Anlage ohne besondere Zeitschiebung wieder als Nutzwärme zugeführt. Mit dieser Massnahme wird ein höherer Anlagenutzungsgrad erzielt. Ideal bei dieser Anwendung ist, dass der zeitliche und mengenmässige Anfall der Abwärme mit dem entsprechenden Wärmebedarf weitgehend übereinstimmt

Was bedeutet «Wärmerückgewinnung» und «Abwärmenutzung»?

In einem Massnahmenkatalog zur rationellen Energieverwendung erscheint die Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung schon weit vorne. In den meisten Prozessen in Industrie, Dienstleistung, Gewerbe und Haustechnik fällt nämlich sehr oft Abwärme an, die noch für weitere Zwecke genutzt werden kann.

Technisch erfolgt die Bewertung der Abwärme aufgrund ihrer energetischen Wertigkeit. Frankenmässig ergibt sich der Wert der Abwärme aus der Differenz zwischen dem Aufwand, der nötig ist, um die Abwärme zu nutzen, und dem Ertrag, der aus der Nutzung der Abwärme erzielt wird.

Die Wahl des richtigen Wärmenutzungssystems ist eine technisch anspruchsvolle Aufgabe. Zur Mehrfachnutzung der Wärme ist es notwendig, die Wärmeströme systematisch zu analysieren, die Wirtschaftlichkeit von einzelnen Massnahmen und des Gesamtkonzepts abzuschätzen sowie kreative Lösungsfindungen zu erarbeiten, da Standardlösungen selten sind.

Aufgrund der Führung der Wärmeströme bezüglich eines betrachteten Systems werden grundsätzlich zwei Nutzungsformen der Abwärme unterschieden. Die Abwärme kann innerhalb eines Systems oder die Systemgrenzen überschreitend genutzt werden. Im ersten Fall wird von Wärmerückgewinnung (Bild 4) gesprochen, während im zweiten Fall Abwärmenutzung (Bild 5) vorliegt,

Komponentenbauarten und Einsatzgebiete

Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung bedienen sich prinzipiell der gleichen Komponenten. Liegt die Temperatur der Wärmequelle über der Temperatur des Verbrauchers, so werden Wärmetauscher oder Wärmetauschersysteme eingesetzt. Liegen die Temperaturverhältnisse umgekehrt, so kommen Wärmepumpen zum Einsatz,

Die Wärmetauscher werden von Wärmeträgern (gasförmig) oder flüssig) durchströmt. Dabei sind die physikalischen Vorgänge «Wärmeübertragung durch Leitung» und «Wärmeübertragung durch Konvektion» beteiligt. Treten Phasenänderungen auf, so wird latente Wärme frei, bzw. sensible Wärme gebunden.

Es sind verschiedene Bauformen für Wärmetauscher möglich. In Bild 6 sind typische Vertreter aufgezeigt, der Wärmetausch kann direkt (Rekuperator) oder durch Zwischenspeicherung in einem Medium erfolgen (Regenerator).

Der **Wärmetauschar (Rekuperator)** besteht aus Trennflächen, die wärme- aber nicht stoffdurchlässig sind. Die Wärmeübertragung erfolgt direkt über die Trennflächen. Es gibt verschiedene Wärmetauscher-Bauformen (Platten-, Doppelmantel-, Rohrbündel-, Rohrenwärmetauscher). Die Wärmetauscher müssen dem jeweiligen Anwendungszweck angepasst sein (Bauform, Materialwahl, Wärmeträgermedien). Der Wärmetauscher kann als Einzelkomponente oder als Teil der Anlage vorliegen,

Das **Kreislaufverbundsystem (Regenerator)** besteht aus Wärmetauschern und einem Zwischenkreislauf mit Wärmeträgerflüssigkeit für Wärmetransport und -speicherung. Der Umlauf kann mittels Pumpe erzwungen, schwerkraftbedingt oder mit Kapillarkraft (Wärmerohr, siehe Glossar) erfolgen.

Wird der Zwischenkreislauf in Form eines rotierenden Speicherrades ausgeführt, so erhält man den **Regenerator mit Kontaktflächen**. Die periodische Be- und Entladung der festen Speichermasse mit Wärme und Stoff (Feuchtigkeit) erfolgt räumlich getrennt über die Kontaktflächen,

Bei der **Wärmepumpe** erfolgt der Wärmeaustausch mit Zusatzenergie unter Temperaturerhöhung (siehe Kapitel «Wärmepumpen»). Die Qualität der Wärmequelle bestimmt dabei massgebend Auswahl und Einsatzbedingungen der Wärmepumpe. Der Wärmepumpenprozess kann in einer in sich abgeschlossenen Maschine oder integriert in einem industriellen Verfahren ablaufen.

Hinweis: Weitere, oft zitierte Schlagworte, wie Brüdenkompression, Hochtemperatur-Wärmepumpe, Pinch Design Method, Wärmerohr, Wärmetransformator usw., sind im Glossar beschrieben.

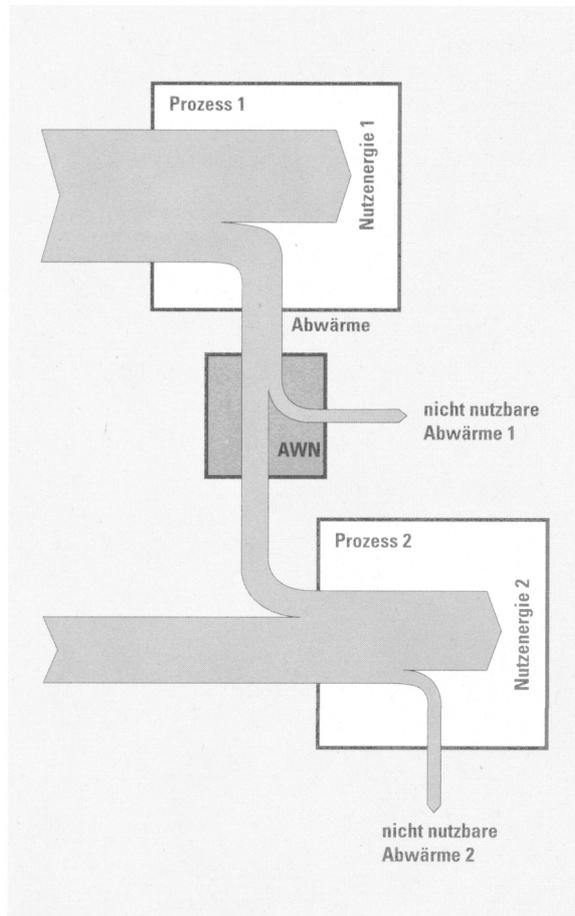


Bild 5

Abwärmenutzung (Abkürzung: AWN) liegt dann vor, wenn die bei einem Prozess oder einer Anlage anfallende nutzbare Überschusswärme bei anderen Prozessen oder Anlagen gleichzeitig oder auch mit nennenswerten Zeitverschiebungen wieder genutzt wird. Damit wird keine Verbesserung eines Einzel-Anlagennutzungsgrades erreicht, hingegen wird die Energienutzung innerhalb mehrerer Anlagen durch die Verbundbildung verbessert. Bei der Abwärmenutzung muss sichergestellt werden, dass sich das Wärmeangebot und der externe Bedarf zeitlich decken oder durch Wärmespeicherung in Übereinstimmung gebracht werden können. Auch muss die Wärmequelle während der gesamten Dauer der Wärmeabnahme zur Verfügung stehen, damit die Investitionen amortisiert werden können.

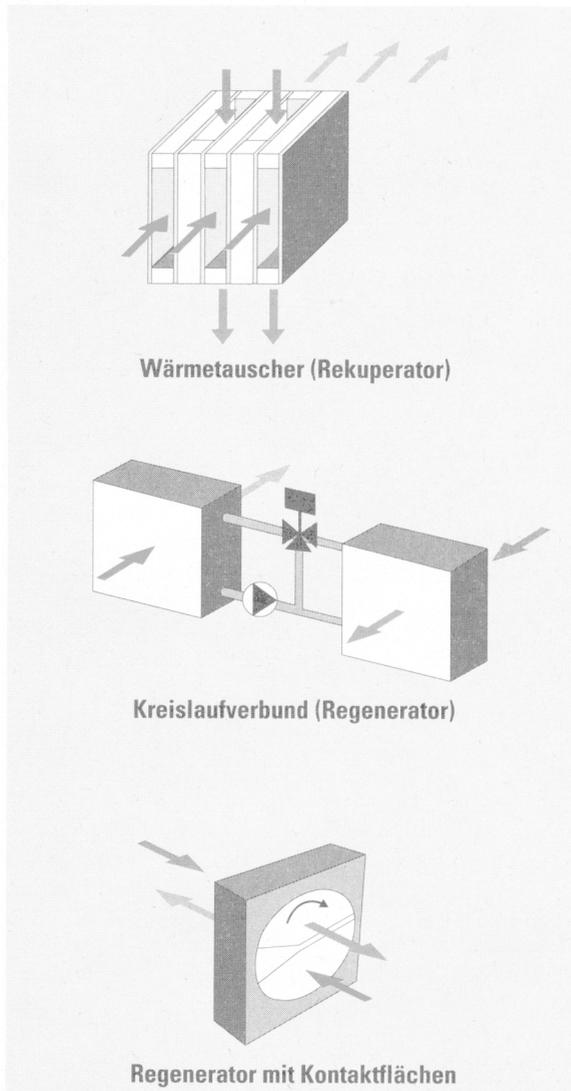


Bild 6 Wärmetauscherbauarten

Wärmetauscher	Temperatur-wirkungsgrad
Recuperator (Platten-Wärmetauscher)	0,5...0,6
Kreislaufverbund	0,5...0,7
Wärmerohr(siehe Glossar)	0,3...0,6
Regenerator mit Kontaktflächen	0,5...0,8

$$\eta = \frac{\vartheta_{AL,A} \cdot \vartheta_{AL,E}}{\vartheta_{FOL,E} - \vartheta_{AL,E}}$$

η = Temperatur- Wirkungsgrad
 ϑ = Temperatur

Indizes:
 AL = Aussenluft
 FOL = Fortluft
 E = Eintritt
 A = Austritt

Tabelle 7 Typische Temperatur-Wirkungsgrade für trockene Fortluft und gleiche Massenströme auf beiden Seiten der Wärmetauscher,

Kennzahlen

Sowohl Wärmetauscherkomponenten als auch Wärmetauschersysteme lassen sich durch die Betriebscharakteristik, die eine Übertragungskenngrosse darstellt, beschreiben. Die Betriebscharakteristik in WRG-Systemen gibt das Verhältnis der rückgewonnenen Energie zur maximal rückgewinnbaren Energie an, In WRG-Systemen wird diese Betriebscharakteristik durch den sogenannten **Temperatur-Wirkungsgrad** (oft auch Rückwärmzahl genannt) beschrieben, Typische Temperatur-Wirkungsgrade und deren Definition zeigt für verschiedene Wärmetauscher in raumlufttechnischen Anwendungen . Tabelle 7,

Zum Vergleich und zur Beurteilung von WRG- und AWN-Systemen muss auch der zusätzliche Energiebedarf für den Antrieb und die Überwindung des Druckverlustes berücksichtigt werden, Es existieren Vorschläge zur Definition von entsprechenden Faktoren.

Energiekonzept

Allgemeines Ziel jedes Energiekonzepts für ein Gebäude oder einen Betrieb ist die Verminderung des Energieverbrauchs und die rationelle, umweltverträgliche und zuverlässige Deckung des verbleibenden Energiebedarfs (siehe letztes Kapitel, Bild 38), Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung müssen im Konzept eingeschlossen sein. Dabei muss das Gesamtsystem im Auge behalten werden, denn zuwenig durchdachte Teiloptimierungen können sich letztlich negativ auf ein Gesamtoptimum auswirken,

In Wohnbauten und Dienstleistungsbetrieben steht der optimale Betrieb bei definierter Verbrauchsstruktur der verschiedenen energietechnischen Haustechnikanlagen im Vordergrund.

Im Produktionsbetrieb tritt als erschwerende Randbedingung die Kopplung von Energie und Produktionsprozess auf, Nur bei einem völligen Verständnis für die thermodynamischen Zusammenhänge können die produktionsbedingten Eigeninteressen des Betriebs in ein Konzept zur Wärmenutzung sinnvoll und sicher eingebracht werden, Die Durchführung der Massnahmen wird erleichtert, wenn neben dem rationellen Energieeinsatz auch noch fertigungstechnische Vorteile auftreten.

Energieeinsparung

Wirtschaftliche Nutzung und eine mögliche Energieeinsparung hängen von der Qualität der Abwärmequelle ab (Temperatur, Energiedichte, Energiemenge, Wärmeträgermedium, zeitlicher Verlauf). Die Abwärmequelle muss immer im Zusammenhang mit dem jeweiligen Verbraucher beurteilt werden.

Mit Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung kann einerseits Energie eingespart werden, indem durch einen höheren Gesamtsystemnutzungsgrad weniger Energie zugeführt werden muss. Andererseits ergibt sich aber ein höherer apparativer Aufwand und ein zusätzlicher Einsatz von Elektrizität für Regelung, Antrieb und Wärmetransport. Der Nutzen muss deshalb den zusätzlichen Aufwand deutlich überwiegen.

Im Impulsprogramm RAVEL steht die rationelle Verwendung von Elektrizität im Vordergrund. In diesem Zusammenhang lassen sich die nachstehenden drei Anwendungsgebiete unterscheiden.

Nutzung der Abwärme aus elektrischen Prozessen: Elektrizität ist eine universelle Energieform, da sie sich praktisch in jede Nutzform umwandeln lässt. Die Abwärme tritt in Maschinen und Geräten mit praktikabler Energiedichte auf. Der Sammelaufwand für die Abwärmenutzung bei vielen verteilten Kleingeräten kann allerdings erheblich werden, sodass eine Nutzung leider oft unrentabel werden kann.

Substitution elektrothermischer Anwendungen durch Abwärmenutzung: Elektrothermische Anwendungen im Niedertemperaturbereich (Komfortanwendungen, Vorwärmung usw.) lassen sich oft ebenso gut mit Abwärme betreiben. So kann die Wassererwärmung, die häufig mit Elektrizität betrieben wird, oftmals mit Abwärme erfolgen,

Rationeller Einsatz der Elektrizität als Hilfsenergie in Wärmenutzungsanlagen: Zusätzliche Komponenten für Wärmeübertragung und -transport (Pumpen, Ventilatoren usw.) in Wärmenutzungsanlagen führen zu einem höheren Elektrizitätsbedarf. Das Einbringen von zusätzlichen Wärmetauschern in Leitungen und Kanäle erhöht den Druckverlust und damit die elektrische Leistungsaufnahme der bestehenden Fördermittel. Damit das Verhältnis der zusätzlich aufzuwendenden elektrischen Energie zur genutzten bzw. rückgewonnenen Abwärme möglichst klein wird, müssen Motoren, Pumpen und Ventilatoren mit optimalem Wirkungsgrad eingesetzt werden.

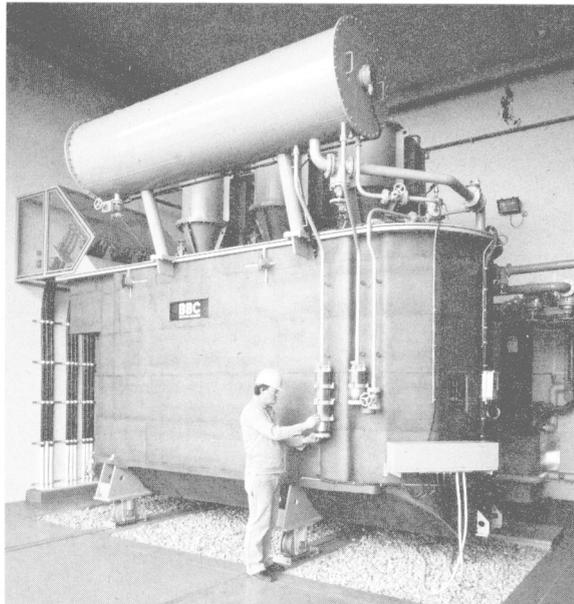
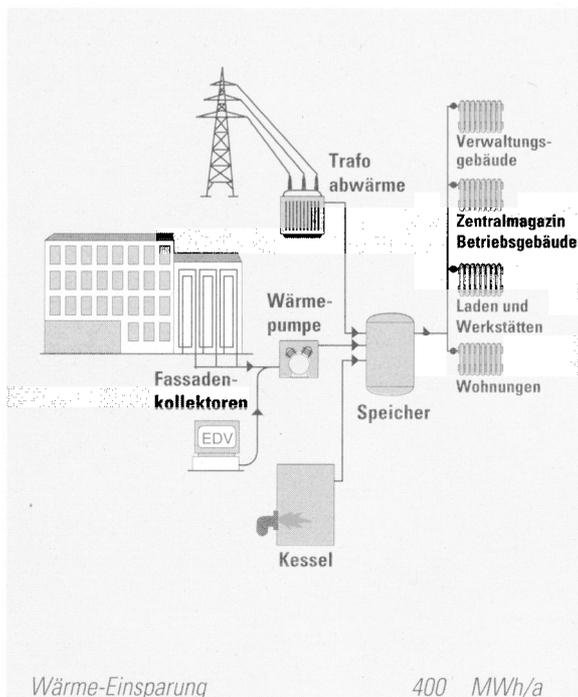


Bild 8

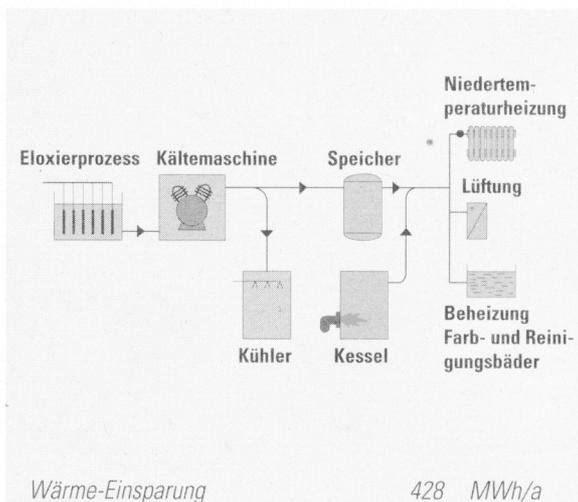
In der Elektra Birseck Münchenstein wird Trafo-Abwärme zur Raumheizung genutzt. Der Trafo ist rundum wärmegeklämt. Dies ist ein Beispiel für die Nutzung der Abwärme aus einem elektrischen Prozess.



Wärme-Einsparung	400 MWh/a
Mehrinvestitionskosten	500'000 Fr.
Kapitalkosten	55'000 Fr./a
Kostensparnis	18'700 Fr./a

Basis: Ölpreis 0,5 Fr./kg, Zins 7%, Nutzungsdauer 15 Jahre

Bild 9 Wärmeverbund in der Elektra Birseck Münchenstein, Die Zahlen beziehen sich nur auf die Trafo-Abwärmenutzung!



Wärme-Einsparung	428 MWh/a
Mehrinvestitionskosten	50'000 Fr.
Kapitalkosten	5'500 Fr./a
Kostensparnis	20'000 Fr./a

Basis: Ölpreis 0,5 Fr./kg, Zins 7%, Nutzungsdauer 15 Jahre

Bild 10 Abwärmenutzung im Eloxalwerk Anox AG in Affoltern a. A. (Quelle Infoenergie, Brugg).

Wirtschaftlichkeit, Beispiele

Die Senkung des Energieverbrauchs durch den Einsatz von Energienutzungstechniken muss in ihrem Nutzen über eine Wirtschaftlichkeitsberechnung quantifiziert werden, Die Höhe des Energiegewinns muss dem Mehraufwand des jeweiligen Anwendungsfalles gegenübergestellt werden.

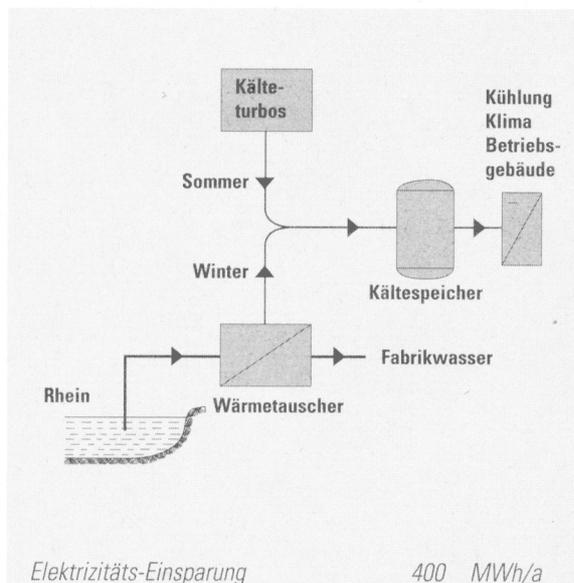
Neben den Investitionskosten einer Anlage zur Abwärmenutzung oder Wärmerückgewinnung gehen in erster Linie die einsparbaren Energiekosten in eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ein. Da diese mit den Betriebszeiten einer Anlage ansteigen, ist bei der Dimensionierung besonders auf lange Laufzeiten zu achten.

In raumluftechnischen Neuanlagen gehört die Wärmerückgewinnung heute zum Stand der Technik, und sie ist in einigen Kantonen sogar gesetzlich vorgeschrieben, Mit der Wärmerückgewinnung werden typischerweise gut zwei Drittel der Nutzenergie rückgeführt. Die elektrische Energie für die zusätzlichen Antriebe zur Wärmerückgewinnung bewegt sich um 10.,15% der Rückwärme.

Bei kleinen geometrischen Abmessungen werden in Gross-transformatoren hohe Leistungen umgesetzt, Die relativen Verluste bewegen sich dabei im Bereich von 1.,3% der übertragenen Leistung, sodass die Abwärme mit interessanter Energiedichte anfällt. Vorteilhaft ist dabei die schon bestehende Bindung der Wärme an das Trafokühlmedium. Das Temperaturniveau der Abwärmequelle von 60°C ist für Raumheizungszwecke geeignet. In der **Elektra Birseck Münchenstein** wird Transformatorabwärme in einem Wärmeverbund genutzt (Bilder 8 und 9). Bei jährlichen Kapitalkosten von Fr. 55'000,- und einer jährlichen Kostensparnis von Fr. 18'700.- ist die Massnahme zwar nicht wirtschaftlich, aber aus energetischer Sicht unbedingt nachahmenswert,

Bild 10 zeigt die Abwärmenutzung in der **Anox AG** in Affoltern a. A., einem Metallveredelungsbetrieb. Die Überschusswärme wird dem Eloxierprozess mittels Kühlanlage entzogen. Die Kältemaschinen-Abwärme wird via Speicher der Raumheizung, der Luftvorwärmung und den Niedertemperatur-Prozessanwendungen zugeführt, Bei vollem Speicher wird die Wärme über den Verdunstungskühler ungenutzt abgeführt. Mit einer jährlichen Kostensparnis von Fr. 20'000,- und jährlichen Kapitalkosten von bloss Fr. 5'500.- ist diese Massnahme nicht nur aus energetischer, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht sehr interessant!

Abwärmenutzung, weit gefasst, beinhaltet auch die Nutzung von Wärmesenken (z. B. Freecooling). In Bild 11 ist eine Klima-Kälteanlage mit Kältespeicher in der **Hoffmann-LaRoche** dargestellt. Ursprünglich arbeiteten die Kältemaschinen das ganze Jahr. Seit der Sanierung wird die Kühlung in der Schwachlastzeit im Winter über das Rheinwasser bewerkstelligt, und die Kältemaschinen werden nur noch in der Spitzenlastzeit im Sommer gebraucht. Neben der eigentlichen Strom-einsparung ergibt sich auch noch eine Reduktion der Leistungsspitzen. Dieses Beispiel zeigt, dass sehr einfache Massnahmen oft zu wirtschaftlich und energetisch sehr interessanten Ergebnissen führen können.



Elektrizitäts-Einsparung	400 MWh/a
Mehrinvestitionskosten	125'000 Fr.
Kapitalkosten	13'750 Fr./a
Kostensparnis	40'000Fr./a

Basis: Strompreis 10 Rp./kWh, Zins 7%, Nutzungsdauer 15 Jahre

Bild 11 Nutzung einer Wärmesenke in einer Klima-Kälteanlage der Hoffmann-LaRoche.

Zukunfts-Tendenzen

Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung werden immer mehr an Bedeutung gewinnen, Steigende Energiepreise und verschärfte Umweltauflagen lassen verschiedene Konzepte wirtschaftlich werden. Die Komponentenentwicklung ist von weniger spektakulären Schritten {neue Materialien, kompaktere Apparate geprägt, Die vielfältigen Möglichkeiten hingegen, die in Prozess- und Gebäude-Leitsystemen liegen, werden das Einsatzfeld wesentlich ausweiten. Mit den Mitteln der Mikroelektronik kann das Gesamtsystem nach der Inbetriebnahme laufend optimiert und der Gesamterfolg des Energiekonzepts kontrolliert werden.

Kasten 12

Wärmepumpen

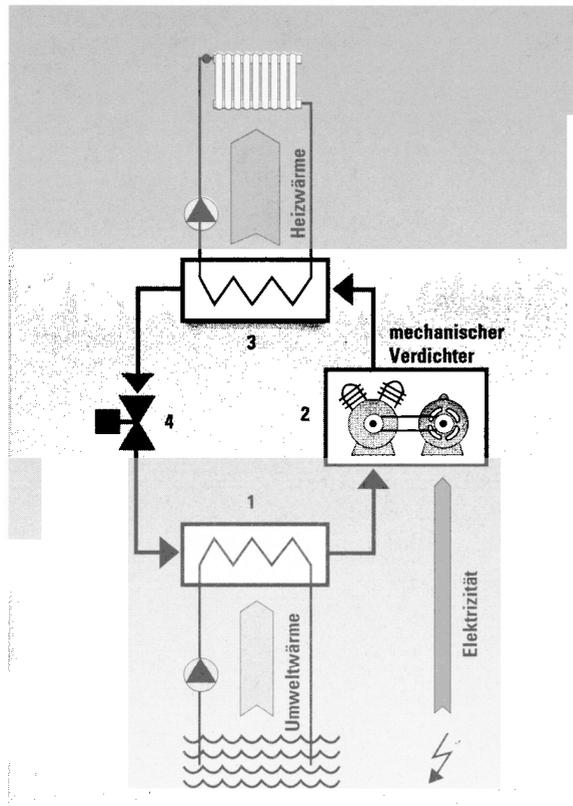


Bild 13

Thermodynamischer Kreisprozess einer Kompressionswärmepumpe. Die Wärmequelle bringt das flüssige Arbeitsmittel (Kältemittel) im Verdampfer (1) bei niedriger Temperatur zum Sieden. Der entstehende Dampf wird im Verdichter (2) komprimiert. Dabei steigt die Temperatur stark an und die Wärme kann nun – auf höherem Temperaturniveau – im Verflüssiger (Kondensator) (3) an das Heizungswasser abgegeben werden. Dabei geht das Arbeitsmittel wieder in den flüssigen Zustand über. Im Expansionsventil (4) wird das Arbeitsmittel auf den Ausgangsdruck entspannt und der thermodynamische Kreisprozess kann von vorne beginnen ...

Wie funktioniert eine Wärmepumpe?

Eine Wärmeübertragung allein mit einem Wärmetauscher ist nur dann möglich, wenn die Temperatur der Wärmequelle höher ist als diejenige der Wärmeabgabe. Aber auch die Energie einer niederwertigen Wärmequelle kann genutzt werden, indem diese – mit Hilfe einer Wärmepumpe (Abkürzung: WP) – auf ein höheres Temperaturniveau «hochgepumpt» wird. Wie ist das möglich?

Die Antwort lautet: durch den **thermodynamischen Kreisprozess nach Carnot**. Mit Hilfe einer hochwertigen Energieform (z.B. Elektrizität) ist es nämlich möglich, Wärme niedriger Temperatur auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben. Dies geschieht heute meist mit einer Kompressionswärmepumpe, deren Funktionsweise vereinfachend in Bild 13 beschrieben ist.

Bauarten und Einsatzgebiete

Zum **Antrieb** von Kompressionswärmepumpen werden heute vorwiegend Elektromotoren eingesetzt. Bei grosseren Wärmepumpen kommen auch Gas- und Dieselmotoren in Frage,

Als mechanische **Verdichter** kommen vor allem Hubkolbenverdichter zum Einsatz; bei grosseren Anlagen auch Schrauben- und Turboverdichter. Als neue Bauart ist heute vor allem der Scroll-Verdichter im Gespräch, da dieser gut mit einem drehzahlgesteuerten Elektromotor betrieben werden kann (siehe auch Kasten 21).

Neben der mechanischen Verdichtung gibt es auch die Möglichkeit der thermischen Verdichtung, wie sie in **Absorptionswärmepumpen** angewendet wird. Diese arbeiten mit einem Stoffpaar: dem eigentlichen Arbeitsmittel und dem sogenannten Absorptionsmittel (Bild 14). Als höherwertige Energie wird Wärme hoher Temperatur zugeführt (z.B. Abwärme hoher Temperatur), Elektrische Energie wird nur sehr wenig zum Antrieb der Lösungsmittelpumpe gebraucht.

Weitere Bauarten werden in der Industrie in sogenannten «offenen» Wärmepumpenprozessen verwendet (Brüdenkompression, siehe Glossar).

Wärmepumpen mit umweltverträglichen Arbeitsmitteln (siehe nächster Abschnitt) können bis heute nur mit Heizungsvorlauf-temperaturen von maximal 50...55°C betrieben werden. Diese Bedingung erfüllen über die ganze Heizperiode nur **Niedertemperatur-Wärmeabgabesysteme**. Dies sind, in erster Linie Fussboden- und Deckenheizungen, aber auch neue Heizkörperheizungen können als Niedertemperatursystem ausgelegt werden, Bestehende Heizkörperheizungen erfüllen diese Forderung leider nur in seltenen Fällen (auch alte, stark überdimensionierte Anlagen liegen leider meist knapp darüber bei etwa 55...65°C). Aber auch hier ist eine Wärmepumpenheizung während des grössten Teiles des Jahres möglich, wenn für die wenigen Tage mit Vorlauftemperaturen über 50...55°C ein zweiter Wärmeerzeuger für einen anderen Energieträger vorhanden ist (bivalenter Betrieb).

Der Wärmeträger des Wärmeabgabesystems ist in der Regel Wasser, Dagegen werden auf der Wärmequellenseite unterschiedliche Wärmeträger verwendet. Deshalb ergeben sich auch unterschiedliche Bauarten (Bild 15):

- **Wasser-Wasser-Wärmepumpen** für Wärmequellen über 0°C (z.B. Grundwasser, Oberflächenwasser, Abwasser)
- **Sole-Wasser-Wärmepumpen** für Wärmequellen auch unter 0°C (z.B. Erdsonden, Erdregister, evtl. mit Dachkollektor); als Sole wird heute meist ein Glykol-Wasser-Gemisch verwendet ,
- **Luft-Wasser-Wärmepumpen** für Aussenluft als Wärmequelle; da sich bei Aussenlufttemperaturen nahe dem Nullpunkt am Verdampfer Reif bildet, muss periodisch abgetaut werden, was einen zusätzlichen Energieaufwand bedeutet

Wasser-Wasser- und Sole-Wasser-Wärmepumpen unter etwa 50 kW Heizleistung werden zusammen mit einer Niedertemperaturwärmeabgabe meist **monovalent**, d.h. ohne zweiten Wärmeerzeuger betrieben. Bei Aussenluft als Wärmequelle ist in der Regel ein **bivalenter** Betrieb mit einem zweiten Wärmeerzeuger erforderlich (Ausnahme: z.B. Anlage mit Kieselstein).

Heizungs-Wärmepumpen können auch zur Wassererwärmung eingesetzt werden. Speziell zur alleinigen Wassererwärmung gibt es sogenannte **Wärmepumpenboiler** (korrekter wäre der Begriff «Wassererwarmer-Wärmepumpe»). Diese entziehen einem unbeheizten Raum Wärme und brauchen so 2- bis 3 mal weniger Strom als ein konventioneller Elektroboiler. Hier muss aber besonders beachtet werden, dass der Wärmeentzug auch tatsächlich gewollt ist und nicht etwa die entzogene Wärme ungewollt wieder durch die Heizung zugeführt wird !

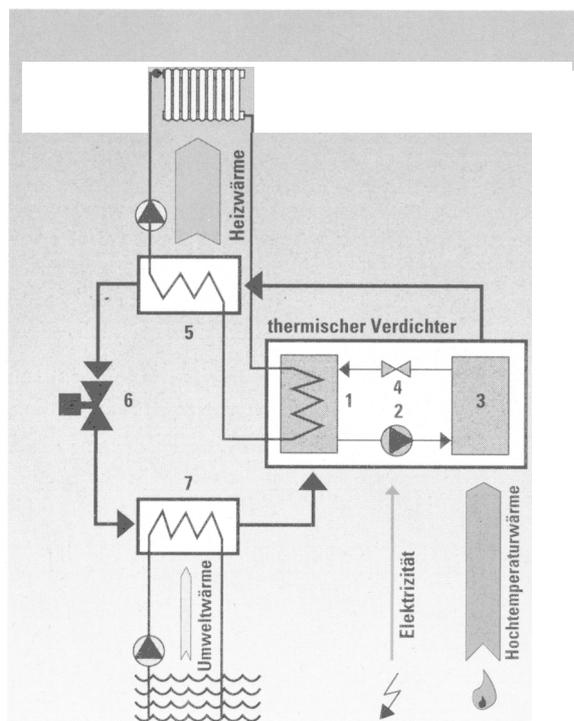


Bild 14

Thermodynamischer Kreisprozess einer Absorptionswärmepumpe. Im Absorber (1) wird das Arbeitsmittel vom Absorptionsmittel absorbiert. Dabei wird ein erstes Mal Wärme an die Heizung abgegeben. Die Lösungsmittelpumpe (2) fördert nun das Gemisch unter Druck zum Austreiber (3), wo – unter Hitzezufuhr – das Arbeitsmittel wieder ausgetrieben wird. Das Absorptionsmittel hat damit seine Schuldigkeit als «thermischer Kompressor» getan und fließt wieder über eine Drossel (4) zurück in den Absorber (1). Der weitere Kreislauf des Arbeitsmittels entspricht nun weitgehend demjenigen der Kompressionswärmepumpe (Bild 13) Wärmeabgabe an die Heizung im Verflüssiger (5), Entspannung im Expansionsventil (6) und Aufnahme von niederwertiger Wärme im Verdampfer (7)...



Im ersten Kapitel wurde gezeigt, dass **Elektrowiderstandsheizungen** die hohe Wertigkeit der Elektrizität sehr schlecht nutzen. Deshalb sollten bestehende Zentralspeicherheizungen mit günstigen Randbedingungen für den Wärmepumpeneinsatz (Wärmequelle vorhanden, Niedertemperatur-Wärmeabgabe usw.) nach und nach durch Wärmepumpen ersetzt werden. Und bestehen bleibende Elektrowiderstandsheizungen sollten soweit saniert werden, dass sie – unter den gegebenen Umständen - wenigstens optimal arbeiten. Hier geht es vor allem um die Kontrolle und Optimierung der Steuerung und Regelung,

Wärmeerkopplung in Verbindung mit Elektromotor-Wärmepumpen ist eine der effizientesten und flexibelsten Arten der Erzeugung von Heizwärme: Bei günstigen Randbedingungen kann 40% Energie gespart und die Umweltbelastung durch Schadstoffe und Kohlendioxid ebenfalls entsprechend reduziert werden, Wie das möglich ist, wird im Kapitel «Wärmeerkopplung» gezeigt.

Bild 15 Wärmepumpen-Bauarten

	<i>Leistungsziffer</i>	<i>Jahresarbeitszahl</i>	<i>Systemnutzungsgrad</i>
Definition	$\frac{\text{Leistungsabgabe [kW]}}{\text{Leistungsaufnahme [kW]}}$	$\frac{\text{abgegebene Heizwärme [kWh]}}{\text{zugeführte kostenpflichtige Energie [kWh]}}$	
Bilanzgrenze	<p>Wärmepumpe (1) (= Verdichter, Verdampfer, Verflüssiger)</p>	<p>Wärmepumpe (1) Carterheizung (2) Wärmequellenförderung (3) ggf. Abtauvorrichtung (4) Speicherladepumpe (5)</p>	<p>Je nach Problemstellung auch Speicher (6) und Kessel (7)</p>
Beobachtungszeitraum	Momentanwert	Jahr	Jahr
Temperaturen (als Randbedingung anzugeben)	Momentanwerte, Verdampfeintritt Verflüssigeraustritt	Jahreswerte: Verdampfeintritt Verflüssigeraustritt	Jahreswerte; Verdampfeintritt Verflüssigeraustritt
Kennzahl durch wen garantiert?	WP-Hersteller	Anlage-Planer	Anlage-Planer

Tabelle 16 Kennzahlen

Arbeitsmittel und Umweltbelastung

R12 und einige andere Arbeitsmittel (oft auch «Kältemittel» genannt) wirken ozonzerstörend («Ozonloch») und sind deshalb ab 1994 in Neuanlagen verboten. Als Übergangslösung tritt hauptsächlich R22 in den Vordergrund, welches einerseits als relativ unschädlich gilt, andererseits aber nur mit Vorlauftemperaturen von maximal 50...55°C gefahren werden kann, Ersatzprodukte mit günstigeren physikalischen Eigenschaften dürften kaum wesentlich vor 1994 in genügend grossen Mengen auf den Markt kommen. Diese werden zudem nur für Neuanlagen geeignet sein, ein R12-Ersatzprodukt für bestehende Anlagen - ohne grössere Umbauten - ist kaum denkbar.

Kennzahlen

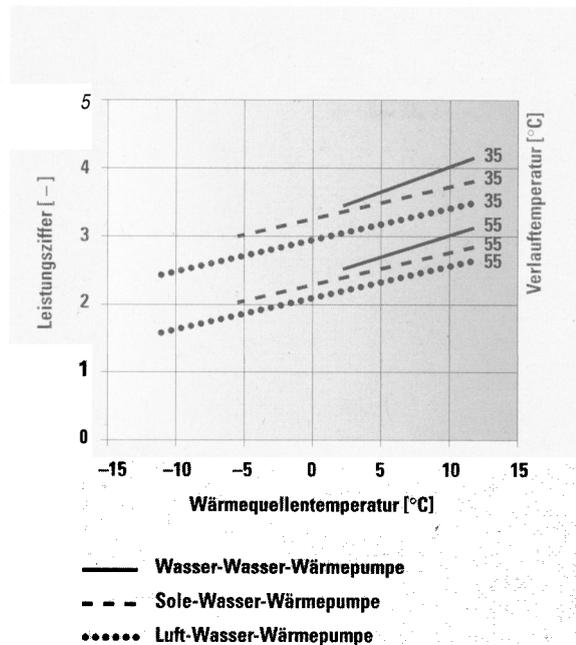
Wer sich zum Bau einer Wärmepumpe entschliesst, interessiert sich natürlich vor allem dafür, wieviele Kilowattstunden Heizwärme er bekommt, wenn er eine Kilowattstunde hochwertige und damit teure Energie aufwendet, Dieses Verhältnis wird durch verschiedene Kennzahlen angegeben, die von mindestens drei Bedingungen abhängig sind, welche immer auch angegeben werden müssen:

- Bilanzgrenze
- Beobachtungszeitraum
- Temperaturhub zwischen Wärmequelle (Verdampfeintrittstemperatur) und Heizung (Verflüssigeraustrittstemperatur), siehe Bild 17

Tabelle 16 zeigt, welche Kennzahlen wie definiert sind und durch wen sie garantiert werden müssen, Welche Werte beim heutigen Stand der Technik für Elektromotor-Wärmepumpen etwa möglich sind, ist in Tabelle 18 zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich; dass – über alle Anlagen gesehen – heute eine **durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 3,0** für Elektromotor-Wärmepumpen möglich ist, (Für Gasmotor-Wärmepumpen sind heute Werte von etwa 1,5 und für Absorptionswärmepumpen solche von 1,3 realistisch.)

Worauf muss besonders geachtet werden?

Hauptsächlich zwei Punkte sind es, die in der Vergangenheit Sorge bereitet haben: Einerseits wurden die technisch machbaren Kennzahlen nicht erreicht, und andererseits führten technische Probleme mit Steuerung, Regelung und Hydraulik zu unliebsamen Überraschungen. Diese «Kinderkrankheiten» sollten heute eigentlich überwunden sein. Einem Bauherrn können folgende Ratschläge gegeben werden:



Die Leistungsziffer ist umso grösser

- je höher die Wärmequellentemperatur ,
- je tiefer die Heizungsvorlaufemperatur

Während die Wärmequellentemperatur kaum beeinflusst werden kann, wird die Heizungsvorlaufemperatur durch die Auslegung des Planers bestimmt!

Bild 17

Leistungsziffer in Abhängigkeit der Wärmequellen- und Vorlaufemperatur, Beispiele von Kennlinien für verschiedene Wärmepumpenbauarten

Bauart	Leistungsziffer*	Jahresarbeitszahl	Systemnutzungsgrad
Wasser-Wasser (monovalent)	3,5...4,0	3,0...3,5	2,8...3,3
Sole-Wasser (monovalent)	3,0...3,5	2,5...3,0	2,3...2,8
Luft-Wasser (bivalent)	2,9...3,4	2,4...2,9	1,5...2,5**

* Bezogen auf eine Vorlaufemperatur von 35°C und Wärmequellentemperaturen von etwa 2.. 10°C (Wasser), -5...5° C (Sole), 0 10°C (Luft)

** Kessel im Systemnutzungsgrad enthalten; je nach Deckungsgrad ergeben sich sehr unterschiedliche Werte

Tabelle 18

Zielwerte für die Kennzahlen von Elektromotor-Wärmepumpen gemäss Tabelle 16 Diese Werte sollten mit der heutigen Wärmepumpentechnik möglich sein.

Faustregeln

Wenn eine Offerte wesentliche Abweichungen zu einer der nachfolgenden Faustregeln aufweist, sollten dem Planer kritische Fragen gestellt werden und - wenn nötig - ein unabhängiger Fachmann beigezogen werden:

- Erdsonden- Wärmepumpe: Pro Kilowatt Heizleistung 15 m Sondenlänge. (Beispiel: Für ein Einfamilienhaus mit 10 kW Heizleistung ergibt das 2 Sonden à 75 m.)
- Erdregister-Wärmepumpe (wegen des grossen Platzbedarfs heute nur noch selten gebaut): Pro Kilowatt Heizleistung 42 m² Registerfläche (Beispiel: Für ein Einfamilienhaus mit 10 kW Heizleistung ergibt das 420 m² Registerfläche.)
- Grundwasser- Wärmepumpe: Es muss pro Kilowatt Heizleistung mindestens eine Grundwassermenge von 150 Liter pro Stunde zur Verfügung stehen, dies ergibt eine Abkühlung um etwa 4...5 Grad, (Beispiel: Für ein Einfamilienhaus mit 10 kW Heizleistung benötigt man eine Grundwassermenge von 1'500 l/h.)
- Oberflächenwasser- Wärmepumpe: Es muss pro Kilowatt Heizleistung mindestens eine Wassermenge von 310 Liter pro Stunde zur Verfügung stehen, dies ergibt eine Abkühlung um etwa 2 Grad. (Beispiel: Für ein Einfamilienhaus mit 10 kW Heizleistung benötigt man eine Oberflächenwassermenge von 3'100 l/h.)
- Luft-Wasser-Wärmepumpe: In der Regel ist ein zweiter Wärmeerzeuger erforderlich (bivalenter Betrieb).
- Freiwillig schon jetzt nur solche Arbeitsmittel einsetzen, die ab 1994 weiterhin für Neuenlagen zugelassen sein werden (vorläufig R22).
- Anlagen mit Heizwasser-Speicher bauen. Die Fussbodenheizung (eigentlich Unterlagsboden) als Speicher zu verwenden ist in der Regel nicht sinnvoll (Ausnahme: z.B. Niedrigstenergiehaus mit Wärmepumpe im Rücklauf).

Kasten 19

- Bei sehr kaltem Wetter Vorlauf- und Rücklauftemperaturen ablesen und notieren (wichtige Grundlage für die Planung).
- Wärmepumpenfabrikat und Planer sorgfältig aussuchen (Referenzen verlangen).
- Offerte aufgrund des Kastens 19 Überprüfen und bei Unklarheiten einen unabhängigen Fachmann beiziehen.
- Kennzahlen schriftlich garantieren lassen und nur akzeptieren, wenn sich diese im Bereich der Werte von Tabelle 18 bewegen.
- Mindestens eine der Kennzahlen sollte Überprüfbar sein (in der Regel die Jahresarbeitszahl). Dazu ist jedoch für die Wärmepumpenanlage ein separater Elektrozähler und auf der Heizungsseite ein Wärmezähler erforderlich.

Wirtschaftlichkeit, Beispiele

Ein wirtschaftlich vertretbarer Aufwand für eine Wärmepumpenanlage ergibt sich, wenn folgende Faktoren erfüllt sind:

- Günstige Randbedingungen, d.h. möglichst uneingeschränkte Verfügbarkeit der Wärmequelle mit möglichst hoher, konstanter Temperatur sowie ein Niedertemperatur- Wärmeabgabesystem.
- Investitionskosten möglichst tief. Aber Achtung - allzu billige Anlagen können kontraproduktiv sein: Einfamilienhaus-Wärmepumpen mit nur einer zu kurzen Erdsonde, und/oder ohne Speicher haben sich beispielsweise häufig nicht bewährt,
- Geringer Hilfsenergiebedarf, d.h. sorgfältig dimensionierte Pumpen, Ventilatoren usw.
- Günstiger Elektrizitätstarif (z.B. spezieller «WP-Tarif») und günstiges Verhältnis von Hoch- und Niedertarifverbrauch (z.B. Ausdehnung der Niedertarifzeit),

Zu Beginn wurde die Frage gestellt, ob Jahresarbeitszahlen von 3,0 und mehr wirklich ein Wunschtraum sind. Hier das Beispiel einer Anlage mit einer messtechnisch nachgewiesenen Jahresarbeitszahl von 3,0 (Bild 20).

Es ist eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe, welche drei Gebäude des **Bahnhofs Rorschach** beheizt. Als Wärmequelle dient der nahe gelegene Bodensee. Die Anlage wurde bivalent geplant. Da aber der tatsächliche Wärmebedarf um 47% überschätzt wurde, arbeitet die Anlage heute nahezu monovalent. Damit ergibt sich folgende Beurteilung:

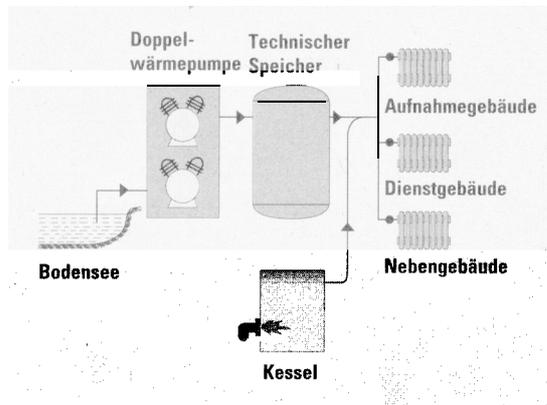
- Die Anlage stellt ein gutes Beispiel bezüglich Jahresarbeitszahl und Reduktion von Kohlendioxid und Luftschadstoffen dar. Es konnten 36 Tonnen Heizöl substituiert werden.

- Die jährlichen Energiekosten liegen zwar um Fr. 5000,- unter denjenigen einer konventionellen Vergleichsanlage, dem stehen aber Kapitalkosten für die Mehrinvestitionen von Fr. 26'800.- pro Jahr gegenüber,
- Der Fehler der Wärmebedarfsrechnung wirkt sich bei der realisierten Wärmepumpenanlage zwangsläufig gravierender auf die Investitionskosten aus, als dies bei einer konventionellen Anlage der Fall gewesen wäre. Der Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung sollte aber nicht überbewertet werden.

Gerade der letztgenannte Punkt, die Überschätzung des Wärmebedarfs, konnte bei zahlreichen nachträglich analysierten Anlagen beobachtet werden. Hier gibt es nur zwei Ratschläge:

- Bei Neuanlagen: besonders sorgfältige Wärmebedarfsrechnung gemäss SIA-Empfehlung 384/2 und Verzicht auf Sicherheitszuschläge.
- Bei Sanierungen: messtechnische Bestimmung des Wärmebedarfs an der bestehenden Anlage.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Wärmepumpenanlagen gegenüber konventionellen Anlagen vor allem im Zusammenhang mit der Luftreinhaltung und dem Kohlendioxidausstoss ganz entscheidende Vorteile aufweisen. Mit der Energiekostensparnis lassen sich die Mehrinvestitionskosten – bei der heutigen Energiepreissituation – aber kaum amortisieren,



Wärmeleistungsbedarf gerechnet	184 kW
Wärmeleistungsbedarf tatsächlich	125 kW
Wärmeleistung Wärmepumpe	110 kW
Stromverbrauch Wärmepumpe	130 MWh/a
Ölverbrauch Kessel	10 MWh/a
Produzierte Nutzenergie	397 MWh/a
Substitution von Heizöl	36'000 kg/a
Jahresarbeitszahl	3,0
Systemnutzungsgrad (inkl. Kessel)	2,8
Mehrinvestitionen	243'600 Fr.
Kapitalkosten	26'800 Fr./a
Energiekosten	13'500 Fr./a

Zum Vergleich: Energiekosten einer konventionellen Ölheizung 18'500 Fr./a

Basis: Ölpreis 0,5 Fr./kg; Strompreis 10 Rp./kWh; Zins 7%; Nutzungsdauer 15 Jahre

Bild 20

Seewasserwärmepumpe im Bahnhof Rorschach (Quelle: Infoenergie, Brugg).

Zukunfts-Tendenzen

- Es werden vermehrt drehzahlgesteuerte Wärmepumpen eingesetzt werden (Frequenzumformer, Scroll-Verdichter), Gegenüber dem Hubkolbenverdichter ergeben sich damit einige Vorteile: niedriger Anlaufstrom, «sanftes» Hochlaufen, stufenlose Leistungsanpassung, geringere Schalldämpfung usw.
- Durch neue Arbeitsmittel (nichtazeotrope binäre Gemische) können möglicherweise bessere Leistungsziffern als heute erreicht werden, besonders bei grosser Temperaturdifferenz von Quelle und Senke.
- Verbesserte Wärmetauscher werden höhere Wärmestromdichten erlauben,

Kasten 21

Wärmeerkraftkopplung

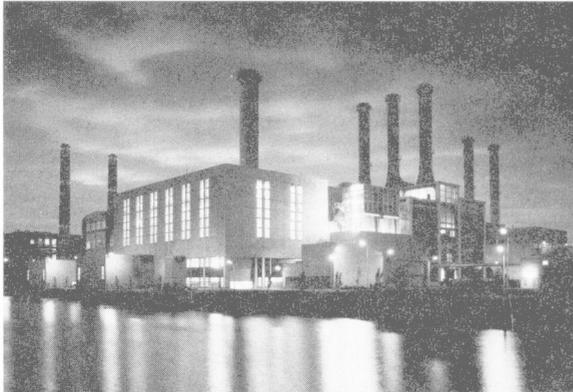


Bild 22 Kombi-Heizkraftwerk «Merwedekanaal» bei Utrecht in Holland mit 225 MW elektrischer Leistung.

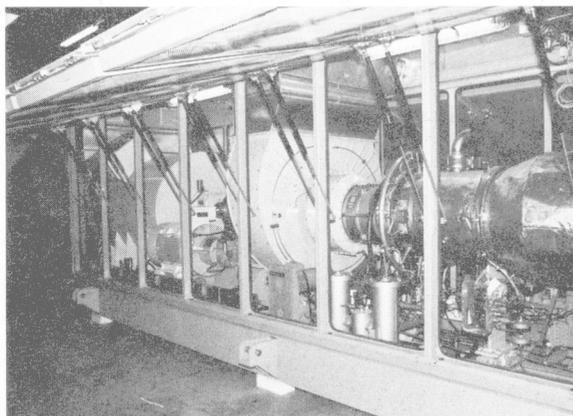


Bild 23 Gasturbinen-Blockheizkraftwerk; Gasturbine (rechts) und Generator (links) sind als «Block» zusammengebaut

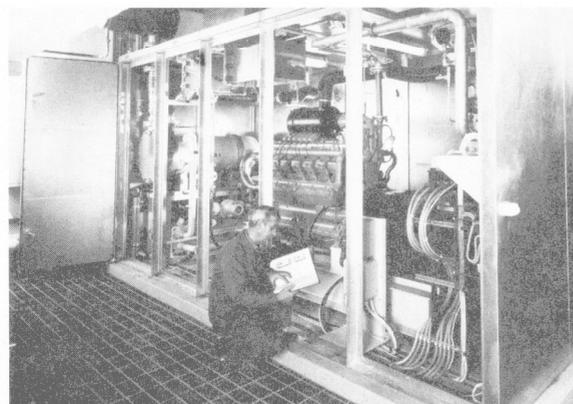


Bild 24 Gasmotor-Blockheizkraftwerk in Dietikon. Betreiber: Elektrizitätswerke des Kantons Zürich. Sogenanntes «Standard-BHKW» mit ca. 170 kW elektrischer Leistung. Gasmotor (mitte), Generator (rechts) und Wärmetauscher (links) sind unter einer gemeinsamen Schalldämmhaube untergebracht.

Abwärmenutzung bei der Stromerzeugung – ein Transportproblem

Da der Transport von Wärme sehr viel aufwendiger ist als der Transport elektrischer Energie, wird heute die bei der thermischen Elektrizitätserzeugung in Grosskraftwerken anfallende Abwärme meist ungenutzt an die Umwelt abgegeben. Eine wirtschaftliche Nutzung der Abwärme ist nur möglich, wenn sich genügend Wärmeabnehmer in der näheren Umgebung finden lassen. Es muss deshalb die Frage gestellt werden, ob nicht ein Teil der Elektrizitätserzeugung dezentralisiert werden kann, an Orte, wo genügend Wärmeabnehmer vorhanden sind. Die Lösung heisst Wärmeerkraftkopplung (Abkürzung: WKK). Im Vordergrund stehen dabei sogenannte Blockheizkraftwerke (Abkürzung: BHKW). Verbrennungsmotor oder Gasturbine, Generator und Wärmetauscher sind in einem «Block» zusammengebaut.

Bauarten und Einsatzgebiete

Wärmeerkraftkopplungsanlagen können Heizkraftwerke in städtischen Gebieten sein, die Heizwärme über Fernleitungsnetze an die zu beheizenden Häuser abgeben und die Elektrizität ins öffentliche Netz einspeisen. Hier sind sogenannte **Kombi-Heizkraftwerke** speziell interessant (Bild 22): Mittels Kombination von Gas- und Dampfturbinen kann ein besonders hoher Stromanteil von etwa 50% erreicht werden. Auch in Kehrriechverbrennungsanlagen und in grossen Industriebetrieben werden Kombi-Heizkraftwerke eingesetzt.

Die Industrie ist für die Wärmeerkraftkopplung von besonderer Bedeutung, weil hier sowohl Elektrizität wie Wärme oft gleich an Ort und Stelle gebraucht werden können. Infolge der stark verschärften Emissionsgrenzwerte müssen in naher Zukunft auch zahlreiche Industrieanlagen saniert werden. Bei entsprechend günstigen Randbedingungen steht hier der Einsatz von **Gasturbinen-Blockheizkraftwerken** zur Prozesswärmeerzeugung (Heisswasser, Dampf) im Vordergrund (Bild 23).

Im Haushalt- und Dienstleistungssektor werden heute noch vorwiegend Gas- und Ölheizkessel zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Hier stellen **Gasmotor-Blockheizkraftwerke** (Bild 24) eine interessante Alternative dar, wenn die Randbedingungen für Wärmeerkraftkopplung günstig sind (Wärmeab-

gabe an einen grösseren Gebäudekomplex oder über ein Nahwärmenetz an eine Siedlung). Als Brennstoff steht Erdgas im Vordergrund; aber auch Biogas (Kläranlagen) und Flüssiggas sind möglich. Gasmotor-Blockheizkraftwerke sind heute durchwegs mit Dreiwegkatalysatoren ausgerüstet und damit bezüglich Emissionen etwa gleich gut wie moderne Low-NO_x-Gaskessel (Bild 26). Da der elektrische Leistungsbereich von 150...200 kW bezüglich Wirtschaftlichkeit und Einsatzbereich besonders interessant ist, wurden solche Anlagen bis heute als Standard-Blockheizkraftwerke bezeichnet. Für die Zukunft wird aber vor allem eine Vereinfachung der Anlagen durch einbaufertige Module angestrebt werden müssen.

Für den unteren elektrischen Leistungsbereich von etwa 7..15 kW gibt es **Klein-Blockheizkraftwerke** mit Auto-Gasmotoren, die relativ einfach zu installieren sind (Bild 25). Sie sind mit einem Dreiwegkatalysator ausgerüstet, und für grössere Leistungen können mehrere Module zusammenschaltet werden. Die Wartung ist allerdings verhältnismässig aufwendig, da der Automotor etwa alle 5 Jahre totalrevidiert werden muss (Austauschmotor).

Prinzipiell kann eine WärmeKraftKopplungsanlage mit **Wärmeführung** oder mit **Stromführung** betrieben werden. Meistens wird die Wärmeführung angewandt, das heisst, die Anlage wird entsprechend dem momentanen Wärmebedarf gefahren.

Die Elektrizität wird normalerweise mit konstanter Leistung im Netzparallelbetrieb abgegeben. Mit einer zusätzlichen elektrischen Ausrüstung kann eine WKK-Anlage bei Netzausfall auch **als Notstromanlage** im Inselbetrieb arbeiten und damit eine konventionelle Notstromgruppe ersetzen. Voraussetzung dazu ist allerdings, dass die Wärme jederzeit abgeführt werden kann. Da Gas ein leitungsgebundener Energieträger ist, ist die Verfügbarkeit gegenüber einem üblichen Diesel-Notstromaggregat etwas eingeschränkt,

Um die Zahl der Anfahrvorgänge klein zu halten (Schadstoffausstoss), wird in der Regel ein **Wärmespeicher zwischen** das Blockheizkraftwerk und das Wärmeabgabesystem geschaltet.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist eine möglichst lange jährliche Laufzeit des Blockheizkraftwerks anzustreben. Deshalb wird dieses nicht auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf ausgelegt. Stattdessen sorgt ein **Spitzenkessel** für die Abdeckung der Leistungsspitzen bei kaltem Wetter. Bezogen auf einen maximalen Wärmeleistungsbedarf gemäss SIA 384/2 von 100% wird das Blockheizkraftwerk lediglich auf eine Heizleistung von 25...40% ausgelegt. Damit können 60..75% des Jahreswärmebedarfs abgedeckt werden.



Bild 25 Vier Klein-Blockheizkraftwerke mit 4 x 15 kW elektrischer Leistung geben zusammen eine Heizleistung von 156 kW ab

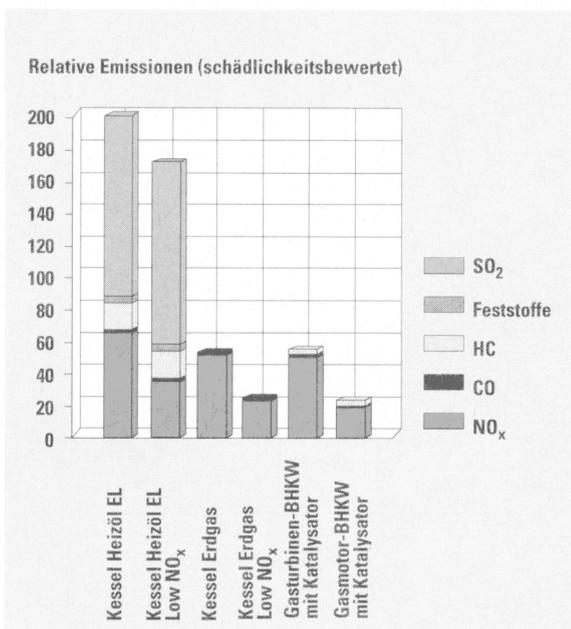


Bild 26 Relative Emissionen verschiedener Wärmeerzeugungstechniken. Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Wärmeabgabe, und die Schädlichkeitsbewertung erfolgte aufgrund der Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalteverordnung (Ausgangseinheit war kg/TJ).

Anlage	Jahresnutzungsgrad	
	nicht gewichtet	gewichtet
Konventioneller Gaskessel ohne Abgaskondensation	0,85...0,92	0,9
Konventioneller Gaskessel mit Abgaskondensation	0,92...1,02	1,0
Gasturbinen-BHKW - thermisch 0,50...0,60 - elektrisch 0,20...0,30	0,75...0,85	1,3
Gasmotor-BHKW - thermisch 0,54...0,58 - elektrisch 0,30...0,34	0,85...0,92	1,5
Gasmotor-BHKW mit WP zur Rückgewinnung der Strahlungsverluste sowie Abgaskondensation - thermisch 0,68...0,73 - elektrisch 0,25...0,30	0,95...1,00	1,5
Kombi-Heizkraftwerk - thermisch 0,35...0,45 - elektrisch 0,40...0,50	0,80...0,85	1,75

Tabelle 27 Jahresnutzungsgrade verschiedener Wärmeerzeugungsanlagen. Die Gewichtung der rechten Spalte ist im Text beschrieben.

Kennzahlen

Allgemein wird die Güte der Energieumwandlung als Nutzungsgrad ausgedrückt und zwar als das Verhältnis der nutzbaren Energie zur zugeführten Energie. **Typische Jahresnutzungsgrade** verschiedener Wärmeerzeugungsanlagen zeigt Tabelle 27. Da der Nutzungsgrad in der Schweiz normalerweise auf den unteren Heizwert bezogen wird, sind Werte über 1 möglich (theoretischer Grenzwert für Erdgas: 1,11). In diesem Zusammenhang muss zuerst einmal ein häufiger Irrtum geklärt werden: Der Nutzungsgrad einer Wärmeerkraftkopplungsanlage ist kaum besser als derjenige einer konventionellen Wärmeerzeugungsanlage – wie sehr oft behauptet wird! Der entscheidende Unterschied liegt vielmehr darin, dass die bereitgestellte Energie - wegen des Stromanteils - eben viel hochwertiger ist. Deshalb wird oft ein thermischer und ein elektrischer Jahresnutzungsgrad angegeben. Die Summe dieser beiden Nutzungsgrade ergibt dann den Jahresnutzungsgrad «über alles».

Für einen anschaulichen Vergleich muss eine einzige Kennzahl verglichen werden können. Dazu ist in Tabelle 27 ein **gewichteter Jahresnutzungsgrad** angegeben. Dieser Wert würde einer Anlage entsprechen, bei der der produzierte Strom vollständig zum Antrieb einer Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3,0 eingesetzt wurde. Erst mit dieser Kennzahl

	Heizkraftwerke (HKW)		Blockheizkraftwerke (BHKW)		
	Heizkraftwerk mit Dampfturbine(n)	Kombi-Heizkraftwerk	Blockheizkraftwerk mit Gasturbine	Blockheizkraftwerk mit Industriemotor	Klein-BHKW mit Automotor
Antriebssystem	Dampfturbine(n)	Gasturbine(n) und Dampfturbine(n) kombiniert	Gasturbine	Industrie-Gasmotor mit Dreiwegkatalysator, Magermotor mit additiver Entstickung, Dieselmotor mit SCR-Katalysator 4)	Auto-Gasmotor mit Dreiwegkatalysator
Brennstoff	Kohle, Schweröl (Wirbelschichtfeuerung); Erdgas, Heizöl (konv. Dampfkessel)	Erdgas/Flüssiggas, Heizöl EL, vergaste Kohle (in Zukunft)		Erdgas/Flüssiggas, Biotreibstoff, Biogas (z.B. in Kläranlagen), Heizöl EL 4)	
Hauptsächlicher Einsatzbereich (Beispiele)	Fernwärmeverbund (z.B. mit Kehrichtverbrennung)	Fernwärmeverbund	Prozesswärme für Industrie, Spitäler (Dampf, Heisswasser)	Nahwärmeverbund, grössere Einzelgebäude	EFH-Siedlung, Einzelgebäude (z.B. Schulhaus, Hotel, Gewerbebau)
Leistungsbereich	5...1000 MW _e	20...100 MW _e	1...10 MW _e	20...1000 kW _e Standard-BHKW: 150...200 kW _e 2)3)	7...15 kW _e 3)
Stromkennzahl 1)	0,3...0,6	0,8...1,2	0,4...0,6	0,55...0,65	0,35...0,45

1) Stromkennzahl = Elektrizitätsproduktion / Wärmeproduktion
 2) Günstiger Leistungsbereich in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Einsatzpotential
 3) Zusammenschaltung mehrerer Einheiten für grössere Leistungen möglich
 4) SCR-Entstickung mit Ammoniak teuer; billigere Verfahren mit Harnstoff sind in der Erprobung

Tabelle 28

wird deutlich, dass beispielsweise ein Gasmotor-BHKW die eingesetzte Energie etwa anderthalbmal so gut nutzt wie die modernste Kesselanlage!

Als weitere Grösse muss noch die **Stromkennzahl** erwähnt werden (siehe Tabelle 28). Sie stellt das Verhältnis der produzierten Elektrizität zur produzierten Heizwärme dar. (Aber Achtung: Massnahmen zur Nutzungsgradverbesserung, wie z.B. Abgaskondensation, verschlechtern die Stromkennzahl scheinbar, weil der Anteil Wärme steigt!)

WKK-WP-Strategien und deren Auswirkungen auf Energieverbrauch und Kohlendioxidausstoss

Durch Wärme­kraft­kopplung in Kombination mit Elektromotor-Wärmepumpen kann – durch Ausnutzung der unterschiedlichen Wertigkeit der Energieformen - Energie gespart und die Umwelt geschont werden. Die Energiebilanzen in Bild 29 zeigen drei typische Grenzfälle im Vergleich zu einer konventionellen Anlage A:

- **Grenzfall B:** Eine **maximale Umweltschonung** ergibt sich, wenn der gesamte WKK-Strom zum Antrieb von Wärmepumpen verwendet wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob dies eine Wärmepumpe in der gleichen Anlage ist, oder ob es sich um Wärmepumpen in anderen Anlagen handelt. Ergebnis: 40% weniger Primärenergieverbrauch und entsprechend weniger Schadstoffe und Kohlendioxid.
- **Grenzfall C** Eine **maximale umweltneutrale Stromproduktion** ist möglich, wenn etwa ein Drittel des WKK-Stromes zum Wärmepumpen-Antrieb verwendet wird. Ergebnis: Bei gleichem Primärenergieverbrauch und ohne zusätzliche Umweltbelastung durch Schadstoffe und Kohlendioxid stehen zwei Drittel des WKK-Stromes zur Allgemeinversorgung zur Verfügung (entsprechend etwa 20% des Primärenergieeinsatzes). Das Paradoxe dabei ist, dass damit eine Stromerzeugung gewissermassen «zum ökologischen Nulltarif» möglich ist – und dies trotz fossiler Primärenergie!
- **Grenzfall D:** Wenn möglichst viel Elektrizität erzeugt werden soll, kann der Energieeinsatz, ohne dass Heizwärme vernichtet werden muss, auf maximal 150% gesteigert werden. Ergebnis: **Maximale Stromproduktion** von 45%, dies allerdings bei 50% Energiemehrverbrauch und entsprechend höherer Umweltbelastung durch Schadstoffe und Kohlendioxid, Diese Strategie hat nur zur Substitution von fossil erzeugter Elektrizität aus thermischen Kraftwerken ohne Wärmeauskopplung einen Sinn, da letztere zur Produktion der gleichen Elektrizitätsmenge 2- bis 3mal mehr Energie verbrauchen als eine Wärme­kraft­kopplungsanlage und damit natürlich auch eine viel grössere Umweltbelastung darstellen.

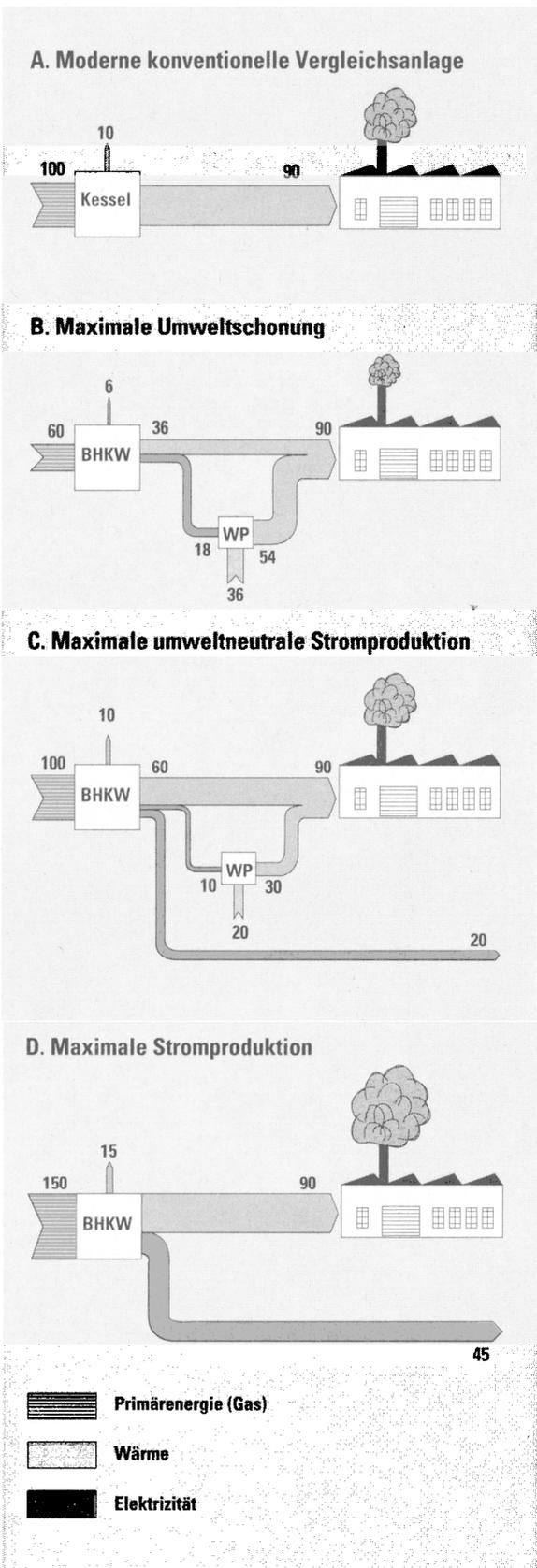


Bild 29 Energiebilanzen einer konventionellen Vergleichsanlage A und der Grenzfälle B, C, und D gemäss Bild 30.

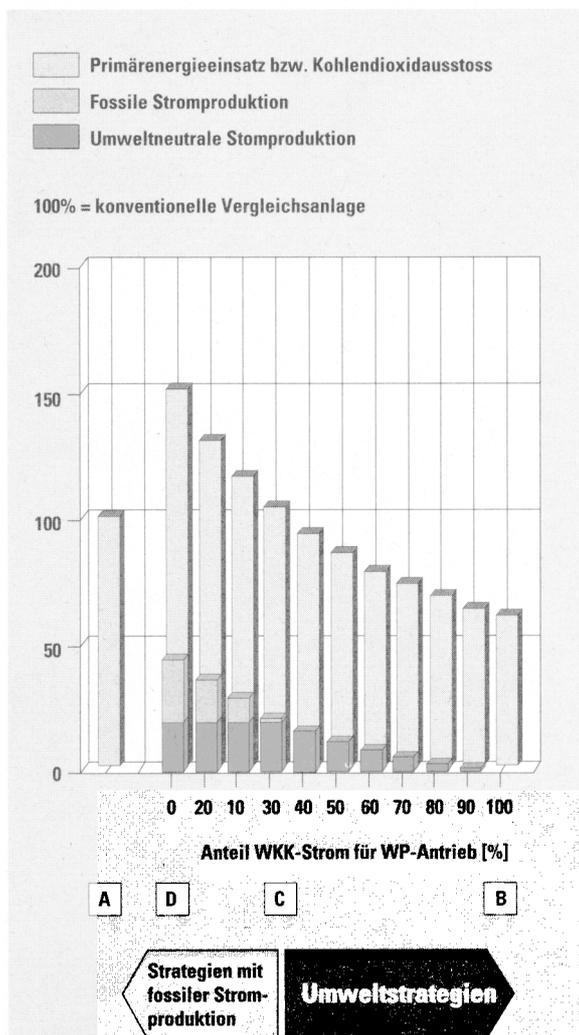


Bild 30

Je nach dem, wieviel Strom für den Wärmepumpen-Antrieb verwendet wird, ergeben sich unterschiedliche Strategien. Die konventionelle Vergleichsanlage A und die Grenzfälle B, C und D entsprechen den Energiebilanzen in Bild 29.



*oder entsprechende Einsparung an fossiler Energie

Bild 31

Elektro-Thermo-Verstärker.

Selbstverständlich wird wohl kaum - über alle Anlagen gesehen - einer der drei genannten Fälle exakt verwirklicht werden. Vielmehr wird sich eine Mischung aus zweien der drei Fälle ergeben. Bild 30 zeigt nun, dass somit zwei grundsätzlich verschiedene Strategieziele möglich sind:

- Wenn mehr als ein Drittel des WKK-Stromes zum Antrieb von Wärmepumpen verwendet wird, ergibt sich eine **Umweltstrategie**. Dabei muss die gewünschte Umweltschonung und die Menge des umweltneutral erzeugten Stromes gegeneinander abgewogen werden.
- Wenn weniger als ein Drittel des WKK-Stromes zum Antrieb von Wärmepumpen eingesetzt wird, resultiert eine **Strategie mit fossiler Stromproduktion** und entsprechender zusätzlicher Umweltbelastung.

Da die Stromerzeugung heute in der Schweiz praktisch kohlendioxidfrei erfolgt, ist für unsere Verhältnisse eine Strategie mit fossiler Stromproduktion aus Umweltschutzgründen eher abzulehnen, da ja keine fossil erzeugte Elektrizität aus thermischen Kraftwerken ohne Wärmeauskopplung substituiert werden kann, wie dies beispielsweise in Deutschland der Fall wäre.

In Bild 30 wird eine konventionelle Anlage mit Gaskessel mit Gasmotor-BHKWs verglichen. Damit entspricht die Reduktion bzw. Erhöhung des Kohlendioxidausstosses derjenigen des Energieverbrauchs. Falls auch Öl durch Gas ersetzt wird, wird der Kohlendioxidausstoss sogar noch zusätzlich reduziert, da Erdgas pro Wärmeeinheit etwa ein Viertel weniger Kohlendioxid produziert als Heizöl.

Elektro-Thermo-Verstärker

Bei den bisher gemachten Betrachtungen zu den WKK-WP-Strategien wurde immer von Elektromotor-Wärmepumpen ausgegangen. Man konnte aber auch verallgemeinernd sagen, dass eine Elektromotor-Wärmepumpe ein Elektro-Thermo-Verstärker (Bild 31) mit einer Verstärkung von 3 ist (aus Strom wird das 3fache an Heizwärme produziert).

Dabei ist es letztendlich nicht notwendig, dass das Endprodukt tatsächlich Wärme ist, entscheidend ist vielmehr, dass fossile Energie eingespart wird, damit der zusätzlich zur WKK-Stromerzeugung gebrauchte fossile Brennstoff kompensiert werden kann. Mit dieser Erweiterung des Begriffs lassen sich zahlreiche weitere Elektro-Thermo-Verstärker finden, die sogar noch höhere Elektro-Thermo-Verstärkungen aufweisen als Wärmepumpen:

- Mit als Hilfsenergie eingesetzter Elektrizität zur Wärmerückgewinnung oder Abwarmennutzung erzielt man problemlos Elektro-Thermo-Verstärkungen von 7...10.

- Moderne Ersatzluftanlagen (siehe Glossar) erzielen Elektro-Thermo-Verstärkungen von 5...10 (im Vergleich zu konventionellen Anlagen).
- Elektro-Leichtfahrzeuge brauchen für die gleiche Strecke 5- bis 10mal weniger Energie als ein konventionelles Auto, Die dabei eingesparte fossile Energie entspricht einer Elektro-Thermo-Verstärkung von 7,5...15 (fossiler Kraftstoff ist etwa 1,5mal so wertvoll wie Heizwärme).

Dieselmotor-Blockheizkraftwerke

Bisher wurde praktisch ausschliesslich von Gasmotor-Blockheizkraftwerken ausgegangen, weil für solche Anlagen genügend Betriebserfahrung vorliegt und die Abgasreinigung technisch gelöst ist. Im Gegensatz dazu bietet die Einhaltung der Emissionsvorschriften bei den Dieselmotoren noch Probleme. Bisher werden Entstickungsverfahren mit Ammoniak als Reduktionsmittel angewendet. Dadurch entstehen aber zusätzliche Risiken, und das Verfahren ist teuer und deshalb nur bei sehr grossen Anlagen wirtschaftlich. Entstickungsverfahren mit Harnstoff anstelle von Ammoniak befinden sind in der Erprobungsphase. Es ist zu erwarten, dass Dieselmotoren vor allem im Zusammenhang mit Notstromgruppen als BHKW'S Bedeutung erlangen werden.

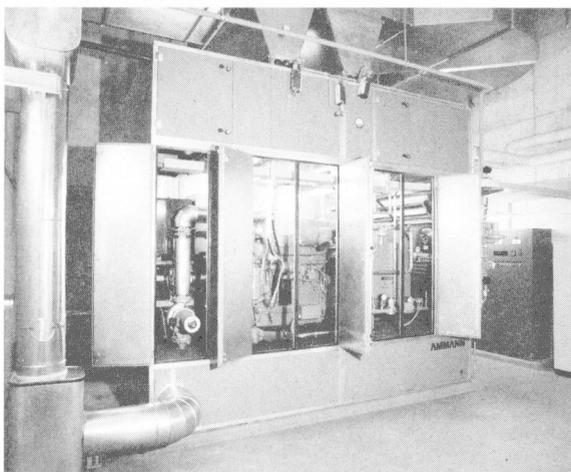
Gasmotor-Wärmepumpen

Auch mit Gasmotor-Wärmepumpen kann ein vergleichbarer Umweltnutzen erzielt werden wie mit einer WKK-WP-Strategie. Eine häufig gestellte Frage lautet deshalb: Warum nicht auch Gasmotor-Wärmepumpen fördern? Eine Antwort kann in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Starke Einschränkung des Potentials, weil genügend grosser Wärmebedarf (ab 1000 kW Auslege-Wärmebedarf) und entsprechend ergiebige Wärmequelle am gleichen Ort vorhanden sein müssen und die überall verfügbare Wärmequelle «Luft» für so grosse Anlagen schlecht geeignet ist.
- Bei der heutigen Preissituation kaum wirtschaftlich interessant.
- Wegen des geringen Potentials sind keine Standardanlagen möglich,
- Die Temperatur des Wärmeabgabesystems muss unter 65°C liegen (keine Prozesswärmeerzeugung),
- Die Jahresarbeitszahl ist durch die Wärmepumpe fest vorgegeben, mit einer WKK-WP-Strategie sind auch bessere Werte möglich (siehe Abschnitt, «Elektro-Thermo-Verstärker»).

Anlagentyp	Mehrinvestitionen Zentrale	Mehrinvestitionen dezentrale	Wartung, Unterhalt
	[Fr./kW _e]	[Fr./kW _e]	[Rp./kWh _e]
Klein-BHKW Erdgas, Einzelgebäude, EFH-Siedlung – 15 kW _e	4'000	0...2'500	6,0
Gasmotor-BHKW Erdgas, Überbauung, Nahwärme – 100 kW _e – 200 kW _e – 1000 kW _e	3'600 3'200 2'800	0...1'500 0...1'500 0...1'500	3,0...3,5 2,3...2,8 1,7...2,2
Gasturbinen-BHKW Erdgas / Heizöl EL, Industrie, Prozesswärme – 1 MW _e – 5 MW _e – 10 MW _e	3'000 1'600 1'300	0...500 0...500 0...500	1,5...2,5 1,5...2,5 1,5...2,5

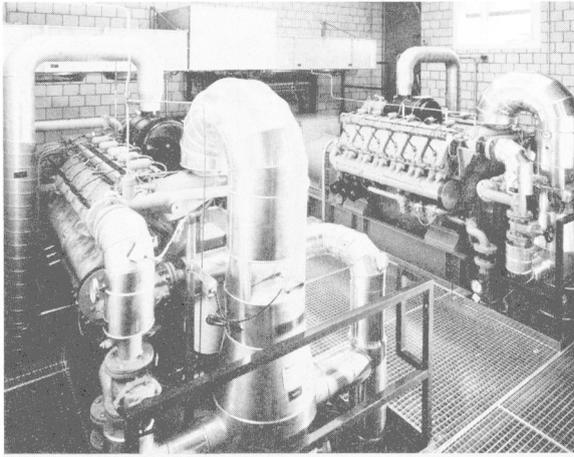
Tabelle 32 Spezifische Kosten für die Mehrinvestitionen (im Vergleich zu konventionellen, dezentralen Anlagen) und für Wartung und Unterhalt (Stand 1991).



Wärmeleistungsbedarf	900 kW
Jahresenergiebedarf (Wärme)	3'000 MWh/a
Elektrische Leistung BHKW	1.25 kW
Laufzeit BHKW	7'000 h/a
Mehrinvestitionen	400'000 Fr,
Stromgestehungskosten	11,5 Rp/kWh

Basis: Gastarife der industriellen Betriebe der Stadt Burgdorf Stromtarife der Elektra Fraubrunnen, Servicekosten 3 Rp./kWh_e, Wärme-gestehungskosten entsprechend einer konventionellen Kesselanlage, Annuität 10%

Bild 33 Käsezentrum in Kirchberg (Quelle: Dr. Eicherr & Pauli AG, Liestal).



Wärmeleistungsbedarf	7'000 kW
Jahresenergiebedarf (Wärme)	14'000 MWh/a
Elektrische Leistung BHKW	2 x 450 kW
Laufzeit BHKW	6'000 h/a
Jahresnutzungsgrad BHKW	93%
Irrvestitionen	2'600'000 Fr.
Stromgestehungskosten	10 Rp./kWh
Rückliefer-Hochtarif (Winter)	15 Rp./kWh

Basis: Gas- und Stromtarife der Stadt Zürich, Servicekosten 1,8 Rp/kWh, Wärme-gestehungskosten 3,2 Rp./kWh, Zins 55%, Nutzungsdauer 18 Jahre

Bild 34

Zentrale mit zwei Blockheizkraftwerken in der Überbauung «Hardau» in Zürich (Quelle: Dr. Eicher & Pauli AG, Liestal),

Zukunfts-Tendenzen

- Dieselmotoren werden die Emissionsvorschriften einhalten und so auch nicht leitungsgebundene BHKWS ermöglichen (heute nur mit Flüssig- oder Biogas möglich).
- Magermotoren (siehe Glossar) werden Abgaswerte erreichen, die der Luftreinhalteverordnung genügen, und dies mit weniger aufwendigen Abgasreinigungsmassnahmen als heute.
- Stirlingmotoren (siehe Glossar) werden den Bau von kleinen BHKWS mit elektrischen Leistungen erlauben, die beispielsweise auch für den Einfamilienhausbereich interessant sind.
- Weitere technische Verbesserungen werden höhere Stromkennzahlen ermöglichen.
- Es wird eine direkte Umwandlung von chemischer Energie in Elektrizität mittels Brennstoffzellen (siehe Glossar) möglich sein.

Kasten 35

Fazit Gasmotorwärmepumpen sind zwar energetisch ebenso sinnvoll und förderungswürdig, aber eine WKK-WP-Strategie ist sehr viel flexibler!

Wirtschaftlichkeit, Beispiele

Die bei der Realisierung einer WKK-Anlage zu erwartenden spezifischen Kosten sind in Tabelle 32 zusammengestellt. Dass solche Anlagen auch tatsächlich wirtschaftlich betrieben werden können – wie zu Beginn behauptet –, sollen die folgenden zwei Beispiele zeigen.

Die Coop Schweiz betreibt in Kirchberg (Kanton Bern) ein **Käsezentrum**, welches mit einem Gasmotor-BHKW ausgerüstet ist (Bild 33). Die Wärme wird für Heizung, Lüftung, Warmwasser und Gebindereinigung verwendet. Bei Stromausfall dient das BHKW als Notstromaggregat. Für die Spitzenlastdeckung sorgt ein Kessel mit Zweistoffbrenner. Die Anlage ist seit Herbst 1989 in Betrieb und arbeitet zufriedenstellend. Dank der sehr hohen jährlichen Laufzeit und der Tatsache, dass der produzierte Strom vollständig zur Eigenbedarfsdeckung verwendet werden kann, ist eine Stromproduktion möglich, die auch wirtschaftlich interessant ist.

Die beiden Blockheizkraftwerke in der Heizzentrale «**Hardau**» (Bild 34) versorgen ungefähr 1'000 Wohnungen, benachbarte Schulhäuser, ein Hallenbad und ein Altersheim mit Wärme. Die Anlage, die der Stadt Zürich gehört, wurde im Januar 1990 in Betrieb genommen. Da die Strahlungsabwärme der BHKWS mittels elektrischer Wärmepumpen zurückgewonnen wird, ergibt sich ein sehr guter Jahresnutzungsgrad, Etwa 8% der Stromproduktion wird zum Antrieb dieser Wärmepumpen gebraucht, der Rest wird ins städtische Netz zurückgeliefert. Mit den Rückliefer-tarifen der Stadt Zürich kann die Anlage wirtschaftlich betrieben werden.

Hinweise zu Planung, Bau und Betrieb

Lenkungs- und Förderungsmassnahmen

Das letzte Kapitel hat gezeigt, dass die alleinige Betrachtung einer einzelnen Anlage nicht genügt. Vielmehr ist es notwendig, die Entwicklung in einem grösseren Rahmen im Auge zu behalten. Insbesondere das Verhältnis des produzierten WKK-Stromes zum in Wärmepumpen eingesetzten Strom spielt dabei eine wichtige Rolle. Falls die Umweltbelastung durch Luftschadstoffe und Kohlendioxid reduziert werden soll, muss eine **Umweltstrategie** verfolgt werden. Das heisst, es muss wenigstens ein Drittel des WKK-Stromes zum Antrieb von Wärmepumpen eingesetzt werden.

Weiter wurde gezeigt, dass es neben dem Bau von Elektromotor-Wärmepumpen auch andere Massnahmen gibt (z.B. Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung), die bei relativ geringem Stromeinsatz eine wesentlich grössere Einsparung an fossiler Energie bringen. Elektromotor-Wärmepumpen und die zuletzt genannten Massnahmen wurden allgemein als **Elektro-Thermo-Verstärker** bezeichnet. Wichtig ist dabei die Erkenntnis, dass zwischen den Wärmekraftkopplungsanlagen und den Elektro-Thermo-Verstärkern weder örtlich noch von den Besitzverhältnissen her ein Zusammenhang bestehen muss. Auch die zeitliche Realisierung spielt im Rahmen einiger Jahre kaum eine Rolle.

Wenn also der **Energienutzungsbeschrss** des Bundes und verschiedene **kantonale Energiegesetze** die Lenkung und Förderung einer sparsamen, rationellen und umweltschonenden Energienutzung bezwecken, so muss gleichzeitig mit der Wärmekraftkopplung auch die Lenkung bzw. Förderung von Elektro-Thermo-Verstärkern geprüft werden. Beispiele solcher Lenkungs- und Förderungsmassnahmen sind in Kasten 36 zusammengestellt. Dabei ist es sicher zweckmässig, den örtlichen Rahmen nicht allzu weit zu ziehen. Beispielsweise konnten Wärmekraftkopplungsanlagen und Elektro-Thermo-Verstärker innerhalb einer Gemeinde, einer Stadt oder eines Kantons zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Energieversorgungskonzepte für eine grossere Region mit wesentlichem WKK-Stromanteil gibt es bis heute in der Schweiz noch nicht. Deshalb zeigt Kasten 37 ein interessantes Beispiel aus Deutschland.

Lenkungs- und Förderungsmassnahmen

- *Volkswirtschaftlich optimale Stromtarife (WKK-Rückliefertarife, WP-Tarife).*
- *Finanzielle Beiträge oder zinslose Darlehen für Pilot- und Demonstrationsanlagen,*
- *Realisierung von WKK-, WP- und WRG-Anlagen in öffentlichen Gebäuden (mit gutem Beispiel vorangehen).*
- *Förderung von Trägergesellschaften, welche die Realisierung übernehmen und die Wärme zu festgelegten Konditionen verkaufen.*
- *Raumplanerische Massnahmen für Nahwärmezonen in zusammenhängenden Siedlungsgebieten.*
- *WKK-Obligatorium für grosse Warmeverbraucher.*
- *Information und Weiterbildung.*

Kasten 36

Energieversorgungskonzept der Stadtwerke Rottweil (Deutschland)

Die Stadtwerke Rottweil beliefern ihre Kunden statt mit Gas direkt mit der Nutzenergie «Wärme». Dazu bauen und betreiben sie kleine dezentrale «Nahwärmeinseln» mit Gasmotor-BHKW's. Durch diese Energieumwandlung «aus einer Hand» wird nicht nur ein sparsamer Energieeinsatz erreicht, sondern auch ein Gewinn erwirtschaftet. Die heute bereits installierte elektrische Leistung von über 40 BHKW's beträgt 3,6 MW, entsprechend 18% der gesamten Spitzenleistung der Stadtwerke von 20 MW. Wirtschaftlich besonders interessant ist eine prozessgesteuerte Lastspitzenoptimierung, welche wesentliche Einsparungen beim Leistungspreis ermöglicht. Die spezifischen Investitionskosten für die BHKW's liegen bei 2'300 DM/kW, und die Auslastung beträgt 5'000 h/a. Trotz des hohen BHKW-Anteils von 18% haben sich keinerlei Netzprobleme ergeben.

Kasten 37



Bild 38

Grundregeln zur rationellen Verwendung von Energie: Erst wenn alle aufgeführten Massnahmen, die einigermassen wirtschaftlich vertretbar sind, ausgeschöpft sind, soll eine neue Wärmeerzeugungsanlage gebaut werden.

In erster Linie sollten zuerst einmal Anlagen gefördert werden, bei denen besonders günstige Voraussetzungen vorliegen (Kasten 39). Welche Anlagen das sind, findet man am besten aufgrund von **Grobanalysen** aller in Frage kommenden Gebäude heraus. Die lohnendsten Objekte werden anschliessend einer **Feinanalyse** unterzogen. Dieses Verfahren hat sich mittlerweile seit einigen Jahren bei der wärmetechnischen Gebäudesanierung bewährt, und es kann ohne weiteres auch auf die hier gestellten Forderungen übertragen werden.

Schliesslich muss unbedingt beachtet werden, dass Wärmekraftkopplungs-, Wärmepumpen- und Wärmerückgewinnungsanlagen, im Vergleich zu konventionellen Anlagen, relativ komplex sind. Dem ganzen Planungsablauf muss deshalb besondere Beachtung geschenkt werden, wenn unangenehme Überraschungen vermieden werden sollen. Deshalb empfiehlt es sich, Förderungsmassnahmen immer mit **Auflagen** bezüglich Planung, Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle zu verbinden. Ja es sollte sogar überlegt werden, ob nicht eine Projektbegleitung übernommen und finanziert werden soll.

Phase 1: Gesamtkonzept, Pflichtenheft, Projekt und Ausschreibung

Gewisse Grundregeln zur rationellen Verwendung der Energie müssen eingehalten werden (Bild 38). Dies ist nur möglich, wenn die Probleme zuerst einmal als Ganzes betrachtet werden und ein **Gesamtkonzept mit Pflichtenheft** erstellt wird. Da in dieser ersten Phase bereits alle wichtigen Weichen gestellt werden, wirken sich die hier gemachten Fehler besonders gravierend auf Energieverbrauch und Umwelt aus. Insbesondere die zwingend vorgegebene Reihenfolge der Massnahmen gemäss Bild 38 wird oft sträflich vernachlässigt!

Früher oder später wird das definitive **Projekt** vorliegen, welches die Grundlage für die **Ausschreibung** bildet. Insbesondere auf zwei Punkte muss hier besonders geachtet werden:

- Steuerung, Regelung, hydraulische Einbindung (Kasten 40).
- Lärmprobleme (in komplizierteren Fällen ist der Beizug eines Akustikers unbedingt zu empfehlen),

Phase 2: Detailplanung, Ausführung, Einregulierung, inbetriebsetzung und erste Abnahme

Nach dem Abschluss der Werkverträge geht es an die **Detailplanung und Ausführung**. Wenn das Konzept von allem Anfang an stimmt, sollten hier nicht mehr Probleme auftauchen als beim Bau einer konventionellen Anlage,

WKK-, WP- und WRG/AWN-Anlagen zuerst dort bauen, wo die Voraussetzungen günstig sind

- *Wärmekraftkopplung: gesicherte Wärmeabgabe für mindestens 4'000 Betriebsstunden pro Jahr, günstige Voraussetzungen für eine Nahwärmeverteilung, günstige elektrische Anschlussbedingungen.*
- *Wärmepumpen: geeignete Wärmequelle mit genügend grosser Verfügbarkeit, möglichst kleiner Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmeabgabe (Niedertemperaturheizung).*
- *Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung: günstige örtliche, zeitliche und temperaturniveaumässige Verhältnisse zwischen Wärmequelle und Wärmebedarf.*

Kasten 39

Hinweise zu Steuerung, Regelung und Hydraulik

- *Das gleiche Fabrikat für die Steuerung/Regelung von Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär und Elektro entschärft die Schnittstellenprobleme*
- *Wärmeerzeuger (Kessel, Wärmepumpe, BHKW), Speicher und Verteiler sollten möglichst nahe beisammen liegen, dies erspart viele hydraulische Probleme.*
- *Der hydraulische Abgleich wird durch Drosselorgane mit Messmöglichkeit wesentlich erleichtert.*
- *Nie mehr als eine Pumpe auf einen hydraulischen Kreis wirken lassen (hydraulische Entkoppelung),*
- *Pumpen in Anlagen mit Thermostatventilen sollten eine flache Kennlinie und nicht mehr als 2 m Förderhöhe haben (Lärmprobleme), sonst müssen Druckdifferenzregler eingebaut werden.*
- *Drucklose Gruppen- und Verteileranschlüsse sowie Speicheranschlüsse müssen tatsächlich druckdifferenzlos oder doch wenigstens druckdifferenzarm erfolgen.*
- *Pufferspeicher müssen mindestens auf der Sekundarseite und Schichtspeicher auf beiden Seiten mit variablem Durchfluss betrieben werden.*

Kasten 40

Hinweise zu Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle

- *Bereits in der Konzeptphase müssen die für die Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle notwendigen Messinstrumente eingeplant werden.*
- *Die Aufzeichnung der notwendigen Betriebsdaten erfolgt am besten wöchentlich {evtl. für eine gewisse Zeit auch täglich} durch den Hauswart auf vorbereiteten Formularen. Dieser sendet die Unterlagen dann monatlich an den verantwortlichen Planer, der die Daten sofort auswertet und entsprechende Optimierungsschritte veranlasst.*
- *Bei grösseren und komplexeren Anlagen ist oft auch eine automatische Aufzeichnung mittels Datalogger erforderlich.*
- *Rechnergesteuerte Anlagen (grössere Speicherprogrammierbare Steuerungen, zentrale Leittechnik) sollten die Speicherung und den Abruf der wichtigsten Daten (z.B. als ASCII-Datenfile) erlauben.*
- *In der ersten Heizperiode läuft die Anlage oft noch nicht wirklich regulär (unvollständige Nutzung, Bauaustrocknung usw.), wenn möglich ist deshalb eine zweijährige Betriebsoptimierungsphase mit Erfolgskontrolle anzustreben.*
- *Die Garantiewerte für die Erfolgskontrolle müssen im Werkvertrag definiert sein.*

Kasten 41

Besonders sorgfältig muss die **Einregulierung und Inbetriebsetzung** durchgeführt werden. Da es sich bei Wärmerückgewinnungs-, Wärmepumpen- und Wärmekraftkopplungsanlagen in der Regel um Anlagen mit variablen Durchflüssen handelt, ist ein hydraulischer Abgleich unabdingbar notwendig,

Mit der **ersten Abnahme** geht die Verantwortlichkeit für die Anlage vom Unternehmer auf den Bauherrn über. Es wäre aber ein schwerwiegender Irrtum, wenn angenommen würde, dass die Anlage zu diesem Zeitpunkt bereits optimal arbeitet und keine weitere Einregulierung mehr notwendig wäre . . .

Phase 3: Betriebsoptimierung, Erfolgskontrolle und zweite Abnahme

Zahlreiche Untersuchungen der jüngeren Zeit haben gezeigt, dass sehr viele Anlagen überhaupt nicht so arbeiten, wie sich das der Planer eigentlich vorgestellt hatte, – und dies gilt übrigens auch für ganz konventionelle Anlagen !

Die Zeit zwischen der eigentlichen Abnahme (hier: erste Abnahme) und der Garantieabnahme (hier: zweite Abnahme) sollte deshalb viel besser genutzt werden. In diesem Zeitraum von 2 Jahren ist es nämlich problemlos möglich, eine befriedigende **Betriebsoptimierung** durchzuführen. Diese Arbeiten werden dann mit einer **Erfolgskontrolle** abgeschlossen, und der Bauherr hat damit die Gewissheit, dass er auch tatsächlich eine Anlage hat, die einwandfrei arbeitet. (Siehe Kasten 41.)

Wer ist wofür verantwortlich und wie werden die Leistungen honoriert?

Mancher wird jetzt sagen: «Das ist ja alles schon und gut, aber die Praxis sieht völlig anders aus. Ein Gesamtkonzept, welches diesen Namen verdient, wird nur selten gemacht. Eine Betriebsoptimierung mit Erfolgskontrolle ist deshalb völlig illusorisch, weil dann alle Beteiligten längst mit einer anderen Anlage beschäftigt sind. Und überhaupt – all diese schönen Absichtserklärungen sind in der SIA-Honorarordnung ohnehin nicht enthalten ! »

In der Industrie wurde längst erkannt, dass die **Qualitätssicherung** nicht der Entwicklung oder Fertigung untergeordnet werden darf, da sich sonst die Kontrollierten selber kontrollieren. Im übertragenen Sinn ist aber genau dies heute in der Haustechnik der Fall: Planer («Entwicklung») und Installateur («Fertigung») kontrollieren sich weitgehend selber. Wie kann dieses Problem gelöst werden?

Ein bereits zum heutigen Zeitpunkt durchaus praktikabler **Vorschlag** zeigt Bild 42. Dem Bauherrn bzw. dessen Vertreter (Architekt) steht ein beratender Ingenieur zur Seite, der aufgrund einer gründlichen Analyse ein Gesamtkonzept mit Pflichtenheft erstellt. Dann tritt der beratende Ingenieur vorübergehend in den Hintergrund und überlässt das weitere Vorgehen einem hauptverantwortlichen Planer, der die ausführenden Unternehmer und allenfalls weitere Planer koordiniert; dieser ist schliesslich auch für die Betriebsoptimierung verantwortlich. Nach Abschluss der Betriebsoptimierung tritt wieder der begleitende Ingenieur zur Erfolgskontrolle und zweiten Abnahme in Funktion.

Auch bezüglich **SIA-Honorarordnung 108** lässt sich, durchaus ein Weg finden. Unten in Bild 42 sind deren Phasen und Teilleistungen eingezeichnet. Nur bezüglich zwei Punkten ergeben sich Fragezeichen:

- **Gesamtkonzept:** Da für die Vorstudienphase «0» vom SIA keine Teilleistungen definiert werden, muss deren Honorierung mit dem Bauherrn speziell vereinbart werden. Wie weit Teilleistung 1 «Vorprojekt» und Teilleistung 2 «Schätzung der Kosten und Termine» noch zum Gesamtkonzept oder bereits zum Projekt gehören, muss von Fall zu Fall abgemacht werden.
- **Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle:** Diese Leistungen werden nur teilweise durch die Teilleistung 15 «Garantiarbeiten» abgedeckt, Hier muss noch ein wesentlicher Teil der Honorierung mit dem Bauherrn separat vereinbart werden.

Wesentlich schwieriger dürfte das Problem sein, genügend gute Fachleute mit breiter Erfahrung auf dem Gebiet der Wärmekraftkopplung, Wärmepumpe und Warmerückgewinnung zu finden. Es ist aber zu hoffen, dass dieser Kreis durch die verstärkten Anstrengungen in der Aus- und Weiterbildung stetig wächst. RAVEL will dazu einen wesentlichen Beitrag leisten.

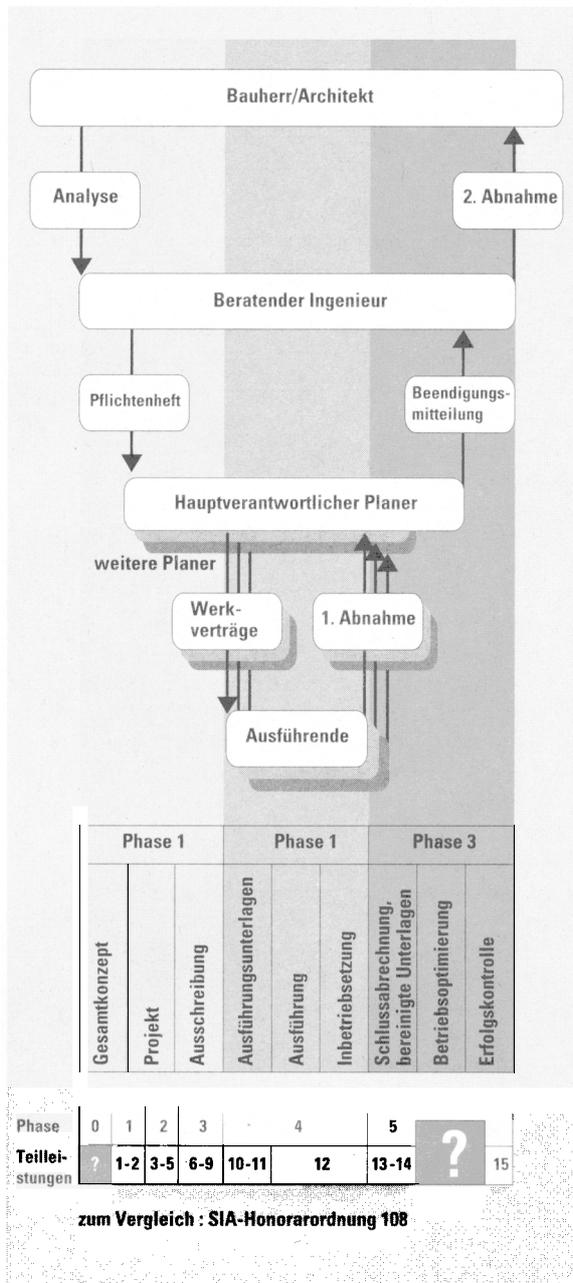


Bild 42 Vorschlag zum Planungsablauf und zur Honorierung.

Glossar

Absorptionswärmepumpe: Wärmepumpenbauart mit thermischer Verdichtung (im Gegensatz zur mechanischen Verdichtung der Kompressionswärmepumpe). Funktionsweise siehe Bild 14.

Abwärmenutzung (AWN): Die bei einem ersten Prozess anfallende Überschusswärme wird in einem zweiten Prozess genutzt. Im Gegensatz dazu findet bei der Wärmerückgewinnung eine Nutzung im gleichen Prozess statt. Genauere Beschreibung siehe Bild 5.

Anergie: Siehe Energie.

Arbeitsmittel: Wärmeträger in Kältemaschinen und Wärmepumpen, Wegen der umweltschädigenden Wirkung sind zahlreiche A, ab 1994 in Neuanlagen verboten. Andere Bezeichnungen: Kältemittel, FCKW, Freon, Frigen usw.

AWN: Abkürzung für Abwärmenutzung,

Betrieboptimierung, Erfolgskontrolle: Die Zeitspanne von etwa 2 Jahren zwischen der eigentlichen Abnahme (Übergabe der Anlage an den Bauherrn) und der Garantieabnahme sollte zur B. und E. genutzt werden. Die E. vor Ablauf der Garantiefrist garantiert dem Betreiber eine einwandfrei arbeitende Anlage. Da B. und E. heute noch nicht verbindlich geregelt sind, müssen diese vom Bauherrn ausdrücklich verlangt und entsprechend honoriert werden.

BHKW: Abkürzung für Blockheizkraftwerk.

Biogas hauptsächlich Methan, welches bei der Zersetzung von organischen Stoffen entsteht (z.B. aus Gülle, Kläranlagen, Deponien).

bivalenter Wärmepumpenbetrieb: Neben der Wärmepumpe ist noch eine zweiter Wärmeerzeuger zur Spitzenlastabdeckung bei tiefen Aussentemperaturen vorhanden (meist einkonventioneller Kessel),

Blockheizkraftwerk (BHKW): Wärmekraftkopplungsanlage in kompakter Form (Block) mit entsprechend geringem Platzbedarf.

Brennstoffzelle: Brennstoffzellen sind elektrochemische Spannungsquellen, denen die reagierenden Stoffe während der Stromlieferung dauernd von aussen zugeführt werden. Abgesehen von der natürlichen Alterung ändern sich die Zellen dabei nicht. Durch die Entkopplung von Energievorrat und Elektrizitätserzeuger wird in vielen Fällen die gewichts- oder volumenspezifische Energiedichte höher als bei klassischen elektrochemischen Spannungsquellen, die als stofflich geschlossene Systeme ausgeführt sind. Vorteilhaft ist, dass die Brennstoffzellen bei relativ hohem Wirkungsgrad wartungsarm, langlebig, umweltfreundlich und abgasfrei sind. Nachteilig sind die komplizierte Prozessführung, Probleme beim Elektrolytwechsel und die hohen Investitionskosten.

Brüdenkompression: Bei der Brüdenkompression wird Abdampf (Brüden), wie er z.B. bei einem Eindampfprozess entsteht, durch Verdichter auf höheren Druck und höhere Temperatur gebracht. Der Brüden kann damit wieder zum Beheizen des gleichen Prozesses verwendet werden. Die erforderliche Temperaturanhebung beträgt oft nur einige Kelvin, entsprechend näherungsweise der Temperaturdifferenz zwischen Wärmeaustauscher und zu verdampfendem Medium. Ausführungsformen sind Dampfstrahl-Brüdenkompression und mechanische Brüdenkompression.

Dampfturbine: Klassischer Antrieb für Generatoren. Spielen in Kohle- und Kernkraftwerken sowie in Kombiheizkraftwerken eine bedeutende Rolle. Für kurze Anfahrzeiten (z.B. Spitzenlast-Kraftwerk) eignen sich für Erdgas und Heizöl Gasturbinen besser.

Dieselmotor: Ebenso wie ein Gasmotor kann auch ein mit Heizöl betriebener D. zum Antrieb einer Wärmepumpe bzw. eines Blockheizkraftwerkes verwendet werden, Da aber ein D. nicht ohne Luftüberschuss betrieben werden kann, ist der Einsatz eines Dreiwegkatalysators nicht möglich. Es ist eine aufwendigere Abgasreinigungstechnik er-

forderlich, SCR-Entstickung mittels Ammoniak ist teuer; billigere Verfahren mit Harnstoff sind in der Erprobung.

Dreiwegkatalysator: Gasmotor-BHKWs werden heute meist mit einem D. betrieben. Dabei muss der Luftüberschuss praktisch auf null geregelt werden, was nur bei Gasmotoren möglich ist. Mit D werden Abgaswerte realisiert, die etwa mit denjenigen einer modernen Low-NOx-Kesselanlage vergleichbar sind.

Elektro-Thermo-Verstärker: Allgemeine Bezeichnung für eine «Black Box», die mit Hilfe von Elektrizität ein Mehrfaches an Wärme ergibt (oder eine entsprechende Einsparung an fossiler Energie). Ein typisches Beispiel ist die Wärmepumpe mit einer **Elektro-Thermo-Verstärkung** von etwa 3,0.

Elektromotorwärmepumpe: Siehe Wärmepumpe.

Elektrowiderstandsheizung: Die E arbeitet nach dem Prinzip, dass sich ein Widerstandsdraht erhitzt, wenn er von elektrischem Strom durchflossen wird. Für die Raumheizung werden zwei Bauarten unterschieden: 1. Zentralspeicher mit Wasser oder Keramik als Speichermasse; 2. dezentrale Einzelspeicher oder Direktheizgeräte für die einzelnen Räume. Gemäss Energienutzungsbeschluss sind ortsfeste Neuanlagen ab 1.5.91 bewilligungspflichtig.

Endenergie: Siehe Energieträger

Energie: Physikalisch gesehen, die Fähigkeit Arbeit zu leisten, Einheit z.B. Joule [J], Kilowattstunde [kWh] E. kann streng genommen weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur umgewandelt werden. Da aber die Umwandlung von einer Energieform in eine andere nicht beliebig ist, muss weiter eine **Wertigkeit** definiert werden. Physikalisch geschieht dies durch den Begriff **Exergie:** je grösser der Exergiegehalt, desto höher die Wertigkeit. Die Exergie ist derjenige Anteil der Energie, der bei der gegebenen Umgebungstemperatur in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Im Gegensatz dazu wird derjenige Anteil, der bei der gegebenen Umgebungstemperatur nicht mehr in andere Energieformen umgewandelt werden kann, als **Anergie** bezeichnet. Eine detailliertere Beschreibung gibt Kasten 2.

Energieträger: Stoffliche Erscheinungsform der Energie. Es wird unterschieden nach: 1. **Primärenergieträger** sind solche, die in der Natur vorkommen und noch keiner Umwandlung unterzogen worden sind (z.B. Holz, Kohle, Rohöl, Erdgas, Wasser, Uran). 2. **Sekundärenergieträger** erhält man durch Umwandlung aus Primärenergieträgern unter Entstehung von Umwandlungsverlusten (z.B. Heizöl, Benzin, Elektrizität). Diejenige Energie, die dem Verbraucher unmittelbar zur Verfügung steht, wird als **Endenergie** bezeichnet. Dies sind einerseits Primärenergieträger, die keine Umwandlung benötigen (z.B. Holz, Kohle, Erdgas), und andererseits Sekundärenergieträger. Unter **Nutzenergie** versteht man schliesslich die vom Verbraucher, nach abermaliger Umwandlung, tatsächlich genutzte Energie (z.B. Wärme, Kraft, Licht).

Erfolgskontrolle: Siehe Betriebsoptimierung.

Erneuerbare Energien: Energieträger, die durch die Natur immer wieder erneuert werden (z.B. Wasser, Sonnenenergie) oder aus der Biomasse stammen (z.B. Holz, Biogas, Biotreibstoff).

Ersatzluftanlage: Mechanische Lüftung zur Zuführung der hygienisch notwendigen Luftrate. Im Vergleich zu einer konventionellen Anlage ist der Energieverbrauch um ein Mehrfaches kleiner.

Exergie: Siehe Energie.

Feinanalyse: Siehe Grobanalyse, Feinanalyse,

Flüssiggas: Propan, Butan und deren Gemische, die unter relativ geringem Druck verflüssigt und in Flaschen oder Tanks gelagert werden können.

Fossile Energieträger: Kohle, Erdöl, Erdgas.

- Gasmotor:** Generatoren von Blockheizkraftwerken werden heute zum grössten Teil durch einen G. angetrieben, eine relativ kostengünstige Abgasreinigung mittels Dreiwegkatalysator möglich ist. Als Brennstoff ist Erdgas, Flüssiggas und Biogas geeignet.
- Gasmotorwärmepumpe:** Siehe Wärmepumpe,
- Gasturbine:** Grössere Blockheizkraftwerke (ab 1...2 MW) und Heizkraftwerke werden heute vorwiegend mit G. angetrieben, deren Abgase in einem Abhitzeessel zur Dampferzeugung genutzt werden. Die Abgasreinigungstechnik ist relativ aufwendig, Als Brennstoff kann Erdgas oder Heizöl verwendet werden,
- Graue Energie:** Energie, die zur Herstellung eines Produktes notwendig ist, Diese erscheint normalerweise nicht in Energiestatistiken.
- Grobanalyse, Feinanalyse:** Seit Anfang der 80er Jahre angewandte Methode zur wärmetechnischen Gebäudesanierung. Wird zunehmend auch für elektrotechnische Sanierungen angewandt. Mit der G. werden aufgrund von wenigen Kennwerten (z.B. Energiekennzahl) die lohnendsten Sanierungsobjekte erhoben. Letztere werden dann einer F. unterzogen und daraus kurzfristige, mittelfristige und gebundene Massnahmen abgeleitet,
- Heizkraftwerk:** Grosse Wärmekraftkopplungsanlage mit Fernwärmenetz.
- Hochtemperatur-Wärmepumpe:** Unter diesem Begriff wird eine Wärmepumpe mit einer Kondensationstemperatur über 300°C verstanden. Bei der Mitteltemperatur-Wärmepumpe beträgt diese 150°C und mehr. Diese Einteilungen sind nicht standardisiert,
- Inselbetrieb:** Betriebsart einer Wärmekraftkopplungsanlage, die unabhängig vom öffentlichen Elektrizitätsnetz arbeitet (z.B. Notstrom-Betrieb).
- Jahresarbeitszahl:** Siehe Nutzungsgrad,
- Kältemittel:** Siehe Arbeitsmittel.
- Katalysator** Siehe Dreiwegkatalysator,
- Klein-Blockheizkraftwerk:** Für einen elektrischen Leistungsbereich von etwa 7...15 kW werden K.-B. angeboten, die durch einem Auto-Gasmotor angetrieben werden. In Zukunft stellen auch, Stirlingmotoren eine interessante Antriebsart dar.
- Kohlendioxid:** Chemisch CO₂. Entsteht bei jeder Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen. Das an und für sich ungiftige Gas gilt heute als Hauptverursacher des Treibhauseffektes,
- Kombi-Heizkraftwerk:** Mit den Abgasen der Gasturbine wird in einem Abhitzeessel Dampf erzeugt, mit welchem mittels Dampfturbine zusätzlich Strom produziert werden kann. Durch die Kombination von Gas- und Dampfturbinen wird in K.-H. ein besonders hoher Stromanteil von etwa 50% erreicht,
- Kompressionswärmepumpe:** Heute am meisten verbreitete Wärmepumpenbauart mit mechanischer Verdichtung (im Gegensatz zur thermischen Verdichtung der Absorptionswärmepumpe), Funktionsweise siehe Bild 13.
- latente/sensible Wärme:** I. W wird diejenige Energie genannt, die beim Übergang eines Stoffes vom gasförmigen in den flüssigen bzw. vom flüssigen in den festen Zustand bei gleichbleibender Temperatur freigesetzt wird. Die s. W bewirkt dagegen eine «spürbare» Temperaturänderung.
- Leistung:** Energiemenge pro Zeiteinheit: Einheit: z.B. Watt [W], Kilowatt [kW].
- Leistungsziffer:** Siehe Nutzungsgrad.
- Luft-Wasser-Wärmepumpe:** Wärmepumpenbauart mit Luft als Wärmequelle (meist Aussenluft) und Wasser als Wärmeträger des Wärmeabgabesystems.
- Luftschadstoffe:** Die wichtigsten L. sind: 1. **Stickoxide (NO_x)**, die bei Verbrennungsvorgängen entstehen (Automotor, Heizkessel); 2. **Schwefeldioxid (SO₂)**, welches bei der Verbrennung schwefelhaltiger Brennstoffe entsteht (Kohle, Heizöl).
- Magermotor** Durch hohen Luftüberschuss sinkt die Verbrennungstemperatur und damit entstehen wenig Stickoxide. Zur weiteren Reduktion der Stickoxide wird Harnstoff oder Ammoniak in den Abgasstrom eingedüst (SCR-Verfahren).
- monovalenter Wärmepumpenbetrieb:** Mit der Wärmepumpe wird der gesamte Wärmebedarf gedeckt (kein zweiter Wärmeerzeuger notwendig),
- Netzparallelbetrieb:** Betriebsart einer Wärmekraftkopplungsanlage, die mit elektrischer Leistungsabgabe parallel zum Netz arbeitet.
- Niedertemperaturheizung:** Siehe Wärmeabgabe,
- Nutzenergie:** Siehe Energieträger,
- Nutzungsgrad:** Ganz allgemein das Verhältnis von Energie-Output zu Energie-input. Zu jedem N. muss immer eine Bilanzgrenze und ein Beobachtungszeitraum angegeben werden. Synonym dazu wird der Begriff **Wirkungsgrad** verwendet, speziell zum Vergleich von Momentanwerten (Leistungen). Bei Wärmepumpen haben sich die Begriffe **Leistungsziffer, Jahresarbeitszahl und Systemnutzungsgrad** eingebürgert (genaue Definition siehe Tabelle 16).
- Ozonloch:** Loch im Schutzschild der Erde gegen ultraviolette Strahlung. Als Hauptverursacher gelten Fluorchlorkohlenwasserstoff-Verbindungen, wie z.B. Treibgase in Spraydosen, Arbeitsmittel, Kunststoffschäume zur Wärmedämmung.
- Pinch Design Method:** Die Darstellung aller Wärmeübertragungs-Verbindungen zwischen Stoffströmen einer Anlage heisst Wärmeübertrager-Netz. Es gibt verschiedene Methoden zur Unterstützung des Entwurfs solcher Netze für gegebene, stationäre Betriebsbedingungen. Sie beruhen darauf, dass für einen Satz aufzuheizender und abzukühlender Stoffströme mit gegebenen Anfangs- und Endtemperaturen das theoretische Minimum der von aussen zuzuführenden Energie bestimmt werden kann. Eine einfache Methode ist die P. D. M. (auch "Pinch Based Design", "Pinch Point Method"), Sie wird ergänzt durch Optimierungsmethoden des Netzes für ein ganzes Spektrum sich ändernder Betriebsbedingungen. Die P. D. M. verdankt ihre Bezeichnung der typischen Einschnürung (engl.: Pinch) der zwei Verbundkurven (heiss, kalt) im „Enthalpie-Temperatur-Diagramm, die je aus der Summe der Enthalpien in den betrachteten Temperaturintervallen aller wärmeabgebenden (heissen) und wärmeaufnehmenden (kalten) Stoffströme gebildet werden. Diese minimale Temperaturdifferenz beim Pinch tritt bei einer bestimmten Enthalpie auf. Der Bereich der Kurvenüberlappung parallel zur Enthalpieachse ergibt den maximal möglichen Wärmegewinn, Mit der Methode kann die Güte verschiedener Wärmeübertrager-Netzwerke global bestimmt werden. Über die Ermittlung der minimalen Temperaturdifferenz kann der maximale Wärmegewinn berechnet, die Netzwerkgrösse und die Kosten abgeschätzt werden. Zur Auffindung der Pinch Points existieren verschiedene Methoden. Die P. D. M. ist ein Werkzeug zur Beurteilung einer Wärmeübertrager-Netzwerk-Optimierung,
- Primärenergieträger:** Siehe Energieträger.
- Rückwärmzahl:** Siehe Temperatur-Wirkungsgrad.
- Scroll-Verdichter:** Verdichterbauart, die speziell für kleine Wärmepumpen mit gesteuerter Drehzahl geeignet ist,
- Sekundärenergieträger:** Siehe Energieträger.
- sensible Wärme:** Siehe latente/sensible Wärme.
- Sole-Wasser-Wärmepumpe:** Wärmepumpenbauart mit «Sole» (meist ein Glykol-Wasser-Gemisch) als Wärmeträger für die Wärmequelle (z.B. Erdsonden, Erdregister) und Wasser als Wärmeträger des Wärmeabgabesystems.
- Spitzenkessel:** Für einen wirtschaftlichen Betrieb müssen lange Laufzeiten angestrebt werden. Deshalb werden Blockheizkraftwerke nicht auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf ausgelegt, sondern es wird ein S. zur Spitzenlastdeckung eingesetzt,
- Standard-Blockheizkraftwerk:** Gasmotor-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 150...200 kW.
- Stickoxid:** Siehe Luftschadstoffe.
- Stirlingmotor:** Bereits 1818 erfundene Wärmekraftmaschine, die mit einer konstanten, in sich geschlossenen Gasmasse arbeitet. Im Prinzip besteht die Maschine aus einem Zylinder mit zwei Kolben, einer Wärmequelle (Öl, Gas, Holz, Sonne usw.), einer Wärmesenke (Luft, Wasser usw.) und einem Regenerator (Wärme- und Kältespeicher).

- Das Gas wird alternativ isotherm (Temperatur konstant) und isochor (Volumen konstant) umgewandelt. Die kontinuierlich wirkende, externe Wärmezufuhr erlaubt die Nutzung verschiedenster Energieträger, und die Abgasqualität kann sehr gut beherrscht werden.
- Stromführung:** Die Wärmekraftkopplungsanlage wird entsprechend dem momentanen Strombedarf betrieben.
- Stromkennzahl:** Kennzahl für Wärmekraftkopplungsanlagen; gibt das Verhältnis der produzierten Elektrizität zur produzierten Heizwärme an.
- Systemnutzungsgrad:** Siehe Nutzungsgrad.
- TEA:** Abkürzung für Totalenergieanlage.
- Temperatur-wirkungsgrad:** Kennzahl für Systeme zur Wärmerückgewinnung, die das Verhältnis der tatsächlich rückgewonnenen Energie zur maximal rückgewinnbaren Energie angibt.
- Totalenergieanlage: (TEA):** Ein um eine Wärmepumpe erweitertes Blockheizkraftwerk mit Gasmotor, Generator und Wärmepumpe auf einer Welle. Damit ist, neben dem normalen WKK-Betrieb, auch ein Betrieb als Gasmotor-Wärmepumpe und als Elektromotor-Wärmepumpe (Generator als Motor) möglich. Auch eine Ausführung als **Zwillingsanlage:** ist möglich, mit Gasmotor und Generator sowie Elektromotor und Wärmepumpe als getrennte Einheiten.
- TOTEM:** Abkürzung für Total-Energie-Modul. Wird hier als Klein-Blockheizkraftwerk bezeichnet.
- Treibhauseffekt:** Die kurzweilige Sonnenstrahlung dringt praktisch ungehindert in die Erdatmosphäre ein und wird beim Auftreffen auf die Erdoberfläche in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt. Letztere wird dann zu einem wesentlichen Teil von der Erdatmosphäre absorbiert, was zur Erwärmung der Erdoberfläche führt, etwa analog den Vorgängen in einem Treibhaus. Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe wurde in den letzten 100 Jahren der Anteil an Kohlendioxid in der Erdatmosphäre stark erhöht, was zu einer Verstärkung des T. und damit zu einer Erhöhung der Erdoberflächentemperatur geführt hat. Man befürchtet nun, dass eine weitere Verstärkung des T. zum Abschmelzen des Polareises und damit zu einem Ansteigen des Meeresspiegels führt.
- Wärmeabgabe:** Abgabe der Wärme an den beheizten Raum durch Heizkörper, Fussbodenheizung usw. Je grösser die Wärmeabgabefläche, desto tiefer die notwendige Heizsystemtemperatur. Für effiziente Anlagen ist eine möglichst tiefe Heizsystemtemperatur (Niedertemperaturheizung) bei möglichst geringer Trägheit anzustreben.
- Wärmeerzeugung:** Erzeugung von Heizwärme in einem Heizkessel, einer Wärmepumpe, einem Blockheizkraftwerk usw.
- Wärmeführung:** Die Wärmekraftkopplungsanlage wird entsprechend dem momentanen Wärmebedarf betrieben.
- Wärmekraftkopplung (WKK):** Kombinierte Erzeugung von Wärme (Heiz- oder Prozesswärme) und Kraft (zur Stromproduktion). Damit wird die Wertigkeit der Energie wesentlich besser ausgenutzt als bei der konventionellen Wärmeerzeugung.
- Wärmepumpe (WP):** Mit Hilfe einer hochwertigen Energie (z.B. Elektrizität) wird Wärme niedriger Temperatur auf ein höheres Temperaturniveau «hochgepumpt» und so beispielsweise zur Raumheizung nutzbar gemacht. Weitaus am häufigsten werden Kompressionswärmepumpen mit einem Elektromotor als Antrieb eingesetzt. Auch Gasmotoren kommen vereinzelt zum Einsatz. Absorptionswärmepumpen sind bisher in der Schweiz kaum eingebaut worden.
- Wärmepumpenboiler:** (fachlich korrekte Bezeichnung: **Wassererwärmer-Wärmepumpe**) Einheit aus Wärmepumpe und Wassererwärmer («Boiler») zur Erwärmung von Trinkwasser. Im Vergleich zu einem konventionellen Elektro-Wassererwärmer wird nur etwa ein Drittel bis die Hälfte an Elektrizität verbraucht.
- Wärmerohr:** Das Wärmerohr (engl. Heatpipe) ist gekennzeichnet durch einen selbsttätig zirkulierenden Wärmeträger (Arbeitsmittel). Im Wärmerohr wird Wärme nach dem Verdampfungs- und Kondensationsprinzip von der warmen zur kalten Seite transportiert. Bei senkrechter Anordnung lässt die Wärmezufuhr in der unteren Rohrhälfte das Arbeitsmittel verdampfen, während es in der oberen Rohrhälfte durch den Wärmeentzug kondensiert und infolge der Schwerkraft wieder nach unten fällt. Bei waagrechtter Ausführung sind die Rohre zum Rücktransport des Arbeitsmittels auf der Innenseite mit einer porösen, durch Kapillarkraft wirkenden Auskleidung versehen. Die Leistung ist dabei geringer.
- Wärmerückgewinnung:** Die in einem Prozess anfallende überschüssige nutzbare Wärme wird im gleichen Prozess wieder genutzt. Im Gegensatz dazu findet bei der Abwärmennutzung eine Nutzung in einem anderen Prozess statt. Genauere Beschreibung siehe Bild 4.
- Wärmetauscher:** Dienen zur Übertragung der Wärme von einem Wärmeträger auf einen anderen. Unterschiedliche Bauarten sind in Bild 6 beschrieben.
- Wärmeträger:** Medium zum Wärmetransport, wie Wasser, Wasser-Glykol-Mischung oder Luft.
- Wärmetransformator:** Unter Wärmetransformation versteht man einen thermodynamischen Prozess, der Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein höheres Temperaturniveau ohne Zuhilfenahme mechanischer Energie allein durch Verwendung von Wärme als Antriebsenergie anhebt. Notwendig dabei ist das Vorhandensein mindestens dreier unterschiedlicher Temperaturniveaus, bei denen dem Prozess die entsprechenden Wärmemengen zugeführt oder entnommen werden. W. ermöglichen somit eine teilweise Umformung von Wärme mittlerer Temperatur, z.B. Abwärme, in Nutzwärme höherer Temperatur ohne nennenswerten Einsatz hochwertiger Energie. Technische Realisationen liegen in der Absorptionswärmepumpe und im eigentlichen W. vor. Im Fall des W. wird ein Teil der bei mittlerer Temperatur zugeführten Wärme auf ein höheres Temperaturniveau angehoben unter Zuhilfenahme der exergetischen Abwertung des restlichen Teils der zugeführten Wärme (tiefes Temperaturniveau). Der Wärmetransformationsprozess kann technisch mit Absorptions- und Resorptionsanlagen realisiert werden.
- Warmwasser:** Korrekter Fachausdruck für erwärmtes Trinkwasser.
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe:** Wärmepumpenbauart mit Wasser als Wärmequelle (z.B. Oberflächenwasser, Grundwasser) und Wasser als Wärmeträger des Wärmeabgabesystems.
- Wassererwärmer-Wärmepumpe:** Siehe Wärmepumpenboiler.
- Wassererwärmer:** Korrekter Fachausdruck für einen Apparat zur Trinkwassererwärmung (früher: «Boiler»),
- Wertigkeit:** Siehe Energie.
- Wirkungsgrad:** Siehe Nutzungsgrad.
- WKK:** Abkürzung für Wärmekraftkopplung.
- WP:** Abkürzung für Wärmepumpe.
- WRG:** Abkürzung für Wärmerückgewinnung.
- Zwillingsanlage:** Siehe Totalenergieanlage.