

# **Elektrizität und Wärme**

Grundlagen und  
Zusammenhänge

RAVEL im Wärmesektor  
Heft 1



RAVEL

Impulsprogramm RAVEL  
Bundesamt für Konjunkturfragen

### «RAVEL im Wärmesektor» in 5 Heften

Gesamtleitung: Hans Rudolf Gabathuler

Energieeffiziente Techniken werden in nächster Zukunft stark an Bedeutung gewinnen. Über dieses Thema ist heute erst wenig in Lehrbüchern zu finden. In drei RAVEL-Kursen – «Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung», «Wärmepumpen» sowie «Wärmekraftkopplung» – können sich deshalb Planerinnen und Planer auf diesem zukunftssträchtigen Gebiet weiterbilden. Die dazu erscheinende Publikationsreihe «RAVEL im Wärmesektor» besteht aus fünf Heften. Diese können bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern, bezogen werden.

Heft 1: Elektrizität und Wärme – Grundlagen und Zusammenhänge (Best.-Nr. 724.357d)

Heft 2: Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung (Best.-Nr. 724.355d)

Heft 3: Wärmepumpen (Best.-Nr. 724.356d)

Heft 4: Wärmekraftkopplung (Best.-Nr. 724.358d)

Heft 5: Standardschaltungen (Best.-Nr. 724.359d)

### Autor, Redaktion und Gestaltung

Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler AG,  
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen

### Grafik

Monika Ehrat, 8240 Thayngen

### Druckkoordination

APUI, Hochfeldstrasse 113, 3000 Bern 26

### Trägerorganisationen

INFEL Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung, Lagerstrasse 1, 8021 Zürich (Kurs «Wärmepumpen»)

SSIV Schweizerischer Spenglermeister- und Installateur-Verband, Auf der Mauer 11, 8023 Zürich (Kurs «Wärmepumpen»)

SBHI Schweizerische Beratende Haustechnik- und Energie-Ingenieure, Schermenwaldstrasse 10, 3063 Ittigen (Kurs «Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung»)

WKK Schweizerischer Fachverband für Wärmekraftkopplung, Bodenackerstrasse 19, 4410 Liestal (Kurs «Wärmekraftkopplung»)



*Wichtige Merkmale*



*Hinweise innerhalb der Reihe «RAVEL im Wärmesektor» (siehe oben)*



*Weiterführende Literatur*



*Softwarehinweise*



*Berechnungsbeispiele*



*Benennungen, Formelzeichen und Abkürzungen auf Seite 57/58*

## INDEX

*Index auf Seite 59/60*

Copyright © Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, Januar 1994. Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe erlaubt. Zu beziehen bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern. (Best.-Nr. 724.357d)

Form. 724.357d 1.94 2000 U11758

# Vorwort

Das Aktionsprogramm «Bau und Energie» ist auf 6 Jahre befristet (1990-1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen (IP) zusammen:

- BAU - Erhaltung und Erneuerung
- RAVEL - Rationelle Verwendung von Elektrizität
- PACER - Erneuerbare Energien

Mit den Impulsprogrammen, die in enger Kooperation von Wirtschaft, Schulen und Bund durchgeführt werden, soll der qualitative Wertschöpfungsprozess unterstützt werden. Dieser ist gekennzeichnet durch geringeren Aufwand an nicht erneuerbaren Rohstoffen und Energie sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz von Fähigkeitskapital.

Im Zentrum der Aktivität von RAVEL steht die Verbesserung der fachlichen Kompetenz, Strom rationell zu verwenden. Neben den bisher im Vordergrund stehenden Produktions- und Sicherheitsaspekten soll verstärkt die wirkungsgradorientierte Sicht treten. Aufgrund einer Verbrauchsmatrix hat RAVEL die zu behandelnden Themen breit abgesteckt. Neben den Stromanwendungen in Gebäuden kommen auch Prozesse in der Industrie, im Gewerbe und im Dienstleistungsbereich zum Zuge. Entsprechend vielfältig sind die angesprochenen Zielgruppen: Sie umfassen Fachleute auf allen Ausbildungsstufen wie auch Entscheidungsträger, die über stromrelevante Abläufe und Investitionen zu befinden haben.

## **Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, Videos**

Umgesetzt werden sollen die Ziele von RAVEL durch Untersuchungsprojekte zur Verbreiterung der Wissensbasis und - darauf aufbauend - Aus- und Weiterbildung sowie Informationen. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausgerichtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Es ist vorgesehen, jährlich eine RAVEL-Tagung durchzuführen, an der jeweils - zu einem Leitthema - umfassend über neue Ergebnisse, Entwicklungen und Tendenzen in der jungen faszinierenden Disziplin der rationellen Verwendung von Elektrizität informiert und diskutiert wird. Interessenten können sich über das breitgefächerte,

zielgruppenorientierte Weiterbildungsangebot in der Zeitschrift IMPULS informieren. Sie erscheint drei- bis viermal jährlich und ist (im Abonnement) beim Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, gratis erhältlich. Jedem Kurs- oder Veranstaltungsteilnehmer wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache aus der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Die Publikationen können auch unabhängig von Kursbesuchen bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden.

## **Zuständigkeiten**

Um das ambitionöse Bildungsprogramm bewältigen zu können, wurde ein Organisations- und Bearbeitungskonzept gewählt, das neben der kompetenten Bearbeitung durch Spezialisten auch die Beachtung der Schnittstellen im Bereich der Stromanwendung sowie die erforderliche Abstützung bei Verbänden und Schulen der beteiligten Branchen sicherstellt. Eine aus Vertretern der interessierten Verbände, Schulen und Organisationen bestehende Kommission legt die Inhalte des Programmes fest und stellt die Koordination mit den übrigen Aktivitäten, die den rationellen Einsatz der Elektrizität anstreben, sicher. Branchenorganisationen übernehmen die Durchführung der Weiterbildungs- und Informationsangebote. Für deren Vorbereitung ist das Programmleitungsteam (Dr. Roland Walthert, Werner Böhi, Dr. Eric Bush, Jean-Marc Chuard, Hans Rudolf Gabathuler, Ruedi Messmer, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, Dr. Daniel Spreng, Felix Walter, Dr. Charles Weinmann, Georg Züblin sowie Eric Mosimann, BfK) verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Ressorts durch Projektgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben (Untersuchungs- und Umsetzungsprojekte) zu lösen haben.

## **Dokumentation**

Nach einer Vernehmlassung und dem Anwendungstest in einem Pilotkurs ist die vorliegende Dokumentation sorgfältig überarbeitet worden. Dennoch hatte der Autor

freie Hand, unterschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berücksichtigen. Er trägt denn auch die Verantwortung für die Texte. Unzulänglichkeiten, die sich bei der praktischen Anwendung ergeben, können bei einer allfälligen Überarbeitung behoben werden. Anregungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfragen und der Autor (siehe Seite 2) entgegen. Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen der vorliegenden Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

Januar 1994

Dr. H. Kneubühler  
Stv. Direktor des Bundesamtes  
für Konjunkturfragen

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. RAVEL im Wärmesektor</b> .....	<b>5</b>
1.1 Elektrizität – eine hochwertige Energieform .....	5
1.2 Energieformen ihrer Wertigkeit entsprechend einsetzen! .....	6
1.3 Blockheizkraftwerke und Elektro-Thermo- Verstärker .....	6
1.4 Publikationen des Ressorts «Wärme» .....	8
<b>2. Energieumwandlung</b> .....	<b>9</b>
2.1 Kreisprozesse .....	9
Carnotscher Kreisprozess .....	9
Kreisprozess der Wärmepumpe bzw. Kältemaschine .....	9
2.2 Wertigkeit verschiedener Energieformen .....	11
2.3 Physikalisch exakte Berechnung der Wertigkeit .....	12
Exergie, Anergie .....	12
Exergetischer Wirkungsgrad .....	13
2.4 Faustregeln in Form von Bewertungsfaktoren .....	13
Probleme mit der Verwendung des Exergiebegriffs in der Praxis .....	13
Stand der Technik .....	14
Bewertungsfaktoren .....	14
2.5 Elektro-Thermo-Verstärker .....	15
<b>3. Energieeffiziente Techniken</b> .....	<b>17</b>
3.1 Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung .....	17
Funktionsweise .....	17
Bauarten und Anwendungsgebiete .....	17
Wichtige Kennzahlen .....	19
3.2 Wärmepumpen .....	19
Funktionsweise .....	19
Bauarten und Anwendungsgebiete .....	20
Wichtige Kennzahlen .....	21
3.3 Wärmekraftkopplung .....	22
Funktionsweise .....	22
Bauarten und Anwendungsgebiete .....	23
Wichtige Kennzahlen .....	24
3.4 Auswirkungen auf Energieverbrauch und Kohlendioxid ausstoß .....	25
Strategien .....	25
Lenkungs- und Fördermassnahmen .....	27
<b>4. Planungsgrundlagen</b> .....	<b>29</b>
4.1 Hydraulische Grundlagen .....	29
Was hat Hydraulik mit Stromsparen zu tun? .....	29
Drei wichtige Formeln .....	29
Die vier hydraulischen Grundsicherungen .....	29
Regelventile .....	29
Ventilautorität .....	30
Ventilkennlinie .....	32
Pumpenkennlinie .....	32
Netzkennlinie .....	33
Verbraucherautorität .....	33

Das Ziel: eine stabile Anlage ohne  
Lärm! .....

34

4.2	Umwälzpumpen.....	35
	Stromverbrauch .....	35
	Umwälzpumpen mit steilen Kennlinien.....	37
	Umwälzpumpen mit flachen Kennlinien ....	37
	Drehzahlgesteuerte Umwälzpumpen mit einstellbarer flacher Kennlinie.....	38
	Drehzahlgesteuerte Umwälzpumpen mit «negativer» Kennlinie.....	38
	Drehzahlsteuergeräte.....	38
	Druckdifferenzregelung in Anlagen mit Thermostatventilen .....	39
	Druckdifferenzregelung in Fernleitungen .....	40
	Pumpenbetrieb bei Nulldurchfluss.....	40
4.3	Energiemessung .....	41
	Elektrizität.....	41
	Erdgas.....	42
	Heizöl .....	42
	Wärme und Kälte.....	43
	Impulsausgänge .....	44
<b>5.</b>	<b>Schaltungstechnik.....</b>	<b>45</b>
5.1	Einbindungsprobleme.....	45
5.2	RAVEL-Standardschaltungen .....	46
5.3	Örtlich getrennte Wärmeerzeugung, Speicher und Verteiler .....	46
5.4	Hydraulischer Abgleich.....	47
	Ist ein hydraulischer Abgleich überhaupt notwendig?.....	47
	Strangweiser Abgleich .....	48
	Abgleich an den Verbrauchern .....	48
5.5	Auslegungsrichtlinien .....	49
<b>6.</b>	<b>Qualitätssicherung im Planungsablauf .....</b>	<b>51</b>
6.1	Qualitätssicherung .....	51
6.2	SIA-Honorarordnung 108.....	53
6.3	Der Bauherr muss entscheiden . . . . .	54
<b>7.</b>	<b>Wirtschaftlichkeit .....</b>	<b>55</b>
7.1	Verständigungsprobleme.....	55
7.2	Wirtschaftliche Zumutbarkeit.....	55
7.3	Vorgehen.....	56
	<b>Benennungen, Formelzeichen, Abkürzungen .....</b>	<b>57</b>
	<b>Index .....</b>	<b>59</b>



# 1. RAVEL im Wärmesektor

## 1.1 Elektrizität – eine hochwertige Energieform

In der Schweiz wird von der gesamten **Primärenergie** (1019,4 PJ) ein Anteil von 39% (398,6 PJ) zur Stromproduktion gebraucht (Bild 1 oben). Dieser Anteil kann aber nur zu 43% (172,9 PJ) in Elektrizität umgewandelt werden (Bild 1 Mitte bzw. unten). Aus physikalischen und technischen Gründen ist mit den gegebenen Primärenergieträgern kein besserer Umwandlungswirkungsgrad möglich. Elektrizität ist also eine mit hohem Primärenergieaufwand produzierte Energieform, die man nur dort einsetzen sollte, wo die hohe Wertigkeit tatsächlich notwendig ist.

Neben der energetischen Betrachtung (Einheiten: kWh, MJ, PJ) muss auch eine **leistungsmässige Beurteilung** (Einheiten: kW, GW) erfolgen. Strom muss dann produziert werden, wenn er gebraucht wird – eine Speicherung ist nur sehr beschränkt möglich. Insbesondere jahreszeitliche Unterschiede (im Winter ist der Leistungsbedarf grösser als im Sommer) und tageszeitliche Unterschiede (während gewisser Spitzenzeiten ist der Leistungsbedarf grösser als in der übrigen Zeit) spielen hier eine Rolle.

Die **Elektrowiderstandsheizung** nutzt die hohe Wertigkeit der Elektrizität sehr schlecht – eine Elektrowärmepumpe ist beispielsweise dreimal besser. Deshalb sieht der Energienutzungsbeschluss für neue, ortsfeste Elektrowiderstandsheizungen eine Bewilligungspflicht vor. Aus Bild 1 unten ist ersichtlich, dass der mit Elektrizität gedeckte Bedarf für Raumheizung (inklusive Wärmepumpen) heute 7,4% (12,1 PJ) des Stromendverbrauchs (163,8 PJ) ausmacht.

Etwa gleich viel Strom wird zur **elektrischen Wassererwärmung** gebraucht (12,0 PJ). Diese darf aber etwas günstiger beurteilt werden als die Elektrowiderstandsheizung, weil sich gegenüber der sonst üblichen zentralen Wassererwärmung (z.B. Kombikessel) einige Vorteile ergeben: keine Zirkulationsverluste, keine Kessel-Bereitschaftsverluste im Sommer, individuelle Abrechnung.

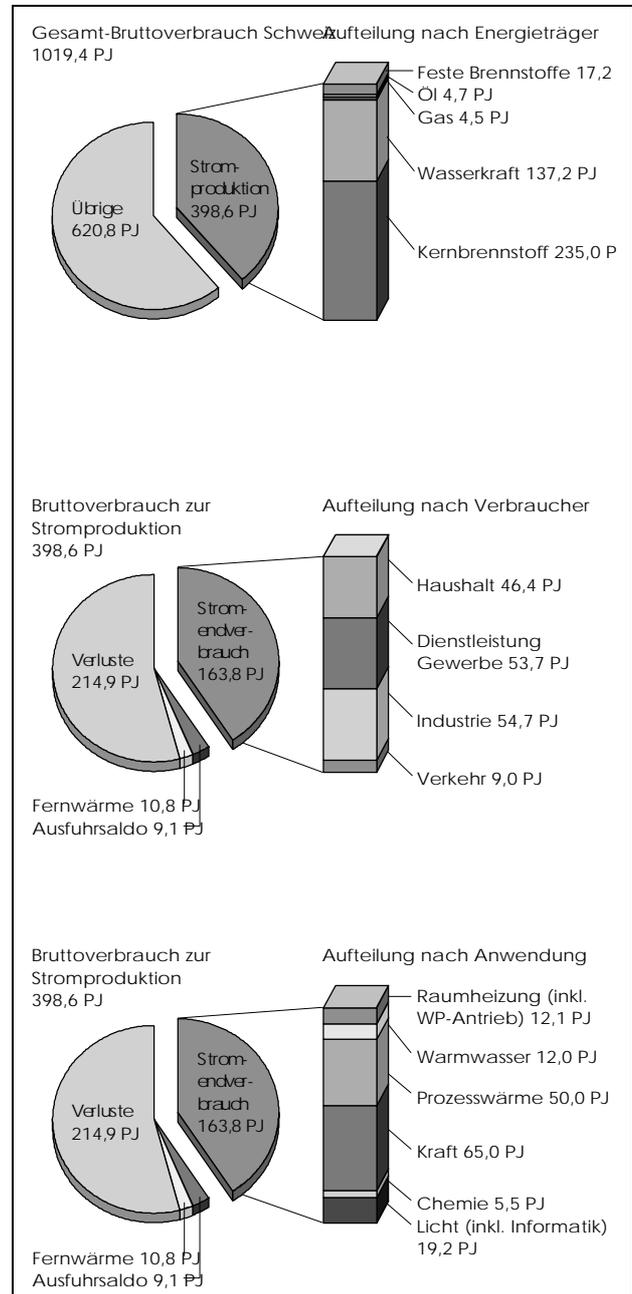


Bild 1: Energiebilanz der Schweiz für das Jahr 1989 (Basis: Gesamtenergiestatistik; 1 PJ = 278'000'000 kWh). Der nicht für die Stromproduktion eingesetzte Anteil «Übrige» von 620,8 PJ setzt sich wie folgt zusammen: 521,7 PJ Öl, 66,4 PJ Gas und 32,7 PJ feste Brennstoffe.

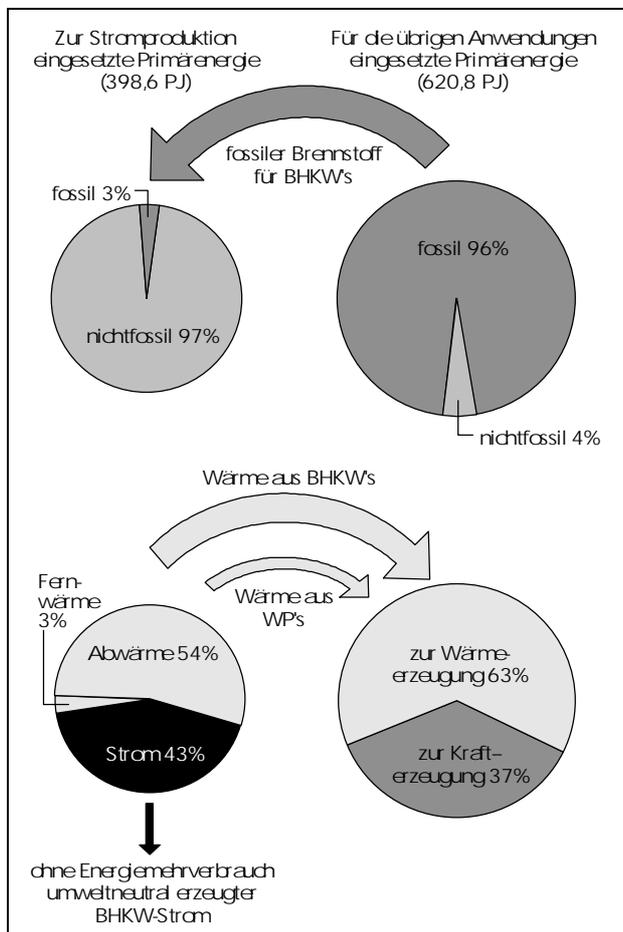


Bild 2: Die «Kuchen» auf der linken Seite zeigen, dass die heute zur Stromproduktion eingesetzte Primärenergie fast ausschliesslich nichtfossil ist und die bei der Stromerzeugung zwangsläufig entstehende Abwärme nur zu einem kleinen Teil genutzt werden kann. Auf der rechten Seite ist die Primärenergie für die übrigen Anwendungen dargestellt. Diese ist im Gegensatz zur linken Seite fast ausschliesslich fossil. Sie wird zu 63% zur Wärmeerzeugung verbrannt. Wenn vermehrt fossiler Brennstoff von der rechten Seite auf der linken Seite in Blockheizkraftwerken eingesetzt und dafür deren Abwärme sowie Wärme aus Wärmepumpen auf die rechte Seite geliefert würde, dann könnte – ohne Energiemehrverbrauch! – eine beträchtliche zusätzliche Menge Strom umweltneutral produziert werden.

Hinweis: Die «Kuchen» zeigen den heutigen Stand und die Pfeile deuten lediglich einen möglichen

Den grössten Strombedarf zur Wärmeerzeugung hat die **Prozesswärme** mit 31% (50,0 PJ) des Stromendverbrauchs (163,8 PJ). Da hier die Temperaturniveaus wesentlich höher liegen als bei der Elektrowiderstandsheizung, ist natürlich der Wertigkeitsverlust entsprechend geringer. Ausserdem werden hier auch anspruchsvollere Arten der Wärmeerzeugung angewandt (Lichtbogen, Hochfrequenz, Infrarot, Induktion).

## 1.2 Energieformen ihrer Wertigkeit entsprechend einsetzen!

Immer mehr und immer neue Anwendungen benötigen hochwertige Energie in Form von Elektrizität. Auch die neuen energieeffizienten Techniken brauchen Strom, beispielsweise zum Antrieb von Wärmepumpen oder als Hilfsenergie in Wärmerückgewinnungs- und Abwärmenutzungsanlagen. Dagegen ist nichts einzuwenden, solange dafür ein Mehrfaches bei anderen Energieformen eingespart werden kann. Entscheidend ist letztendlich nicht der Stromverbrauch allein, sondern der Energieverbrauch als Ganzes.

➔ Das Ziel muss es deshalb sein, den Gesamtenergieverbrauch zu senken. Dies bedeutet natürlich in erster Linie unnötigen Energieverbrauch verhindern und Verluste vermindern. Ein entscheidender Fortschritt kann aber nur erreicht werden, wenn es gelingt, die hochwertigen Energieformen Elektrizität, Gas und Öl in Zukunft ihrer tatsächlichen Wertigkeit entsprechend einzusetzen.

## 1.3 Blockheizkraftwerke und Elektro-Thermo-Verstärker

In der Schweiz ist heute der Anteil an fossiler Primärenergie (Öl, Gas, Kohle) bei der Stromproduktion sehr klein und bei den übrigen Anwendungen sehr gross (Bild 2 oben). Dabei wird die auf der Stromproduktionsseite entstehende Abwärme nur zu einem kleinen Teil genutzt, während auf der anderen Seite

eine riesige Menge fossiler Energieträger verbrannt werden muss, um die notwendige Wärme bereitzustellen (Bild 2 unten).

Eine Verbesserung wäre möglich, wenn mehr Kraftwerk-Abwärme in **Fernwärmenetzen** genutzt werden könnte. Heute ist dies, einschliesslich der in reinen Heizwerken produzierten Wärme, nur ein verschwindend kleiner Anteil von 3 % des Primärenergieaufwandes (Bild 2 unten). Es ist kaum zu erwarten, dass diese grosstechnologische Abwärmenutzung in naher Zukunft Fortschritte macht, da der Transport der Wärme vom Kraftwerk zum Verbraucher sehr aufwendig und damit nicht wirtschaftlich ist. Darüber hinaus fehlt auch die politische Akzeptanz.

Die Bilder 2 und 3 zeigen aber noch einen anderen, besonders interessanten, eher kleintechnologischen Lösungsansatz – die **Wärme-Kraftkopplung (WKK)**: Warum nicht einen Teil der fossilen Energie, die heute noch in Heizkesseln verbrannt wird, in **Blockheizkraftwerken (BHKW)** zur Stromproduktion einsetzen und die Wärme dezentral nutzen? Damit ergibt sich keine zusätzliche Umweltbelastung, wenn eine Bedingung eingehalten wird: Mindestens ein Drittel des produzierten Stromes muss in Elektro-Thermo-Verstärkern (siehe unten) eingesetzt 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 dafür verwendet wird, kann sogar – trotz fossiler Stromerzeugung! – eine wesentliche Umweltentlastung erreicht werden.

**Elektro-Thermo-Verstärker (ETV)** sind beispielsweise Wärmepumpen und Abwärmenutzungsanlagen: Sie machen aus einem Teil Strom ein Mehrfaches an Heizwärme. Bild 3 wurde eine Elektro-Thermo-Verstärkung von 3,0 zugrunde gelegt, was in der Praxis, über alle Anlagen gesehen, etwa als Durchschnittswert erreicht werden sollte.

Die in den Bildern 2 und 3 beschriebene Strategie hat den grossen Vorteil, dass sich Blockheizkraftwerke und Elektro-Thermo-Verstärker (z.B. Wärmepumpen) nicht am gleichen Ort befinden müssen: Blockheiz-

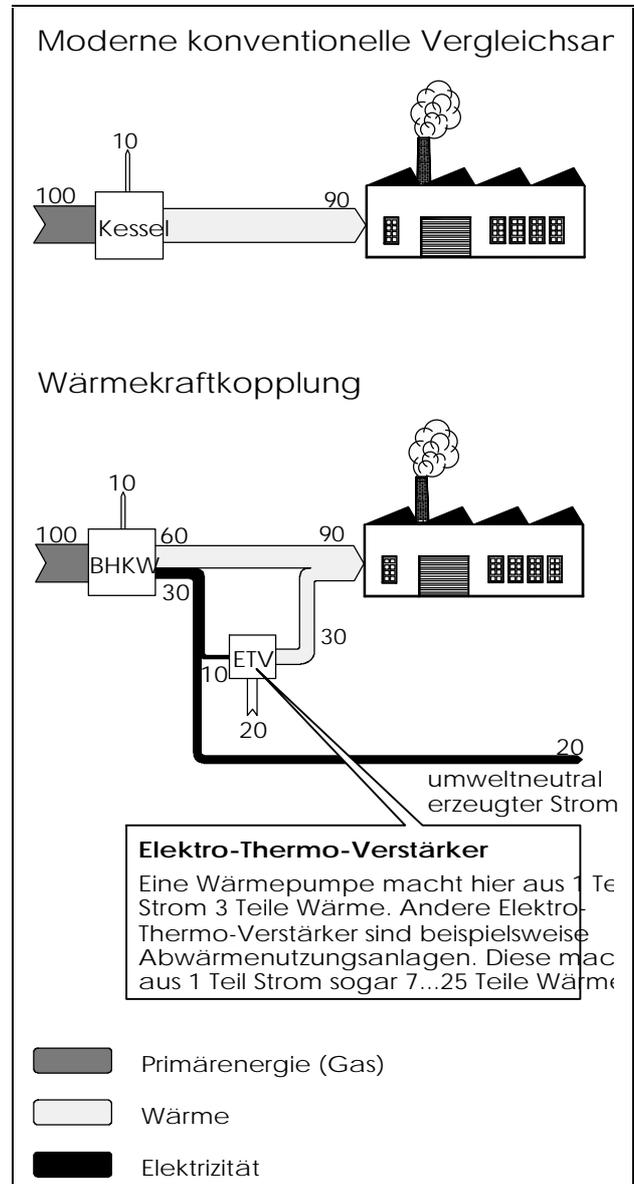


Bild 3: Wärme-Kraftkopplung in Kombination mit Elektro-Thermo-Verstärkern ermöglicht eine Stromerzeugung ohne Umweltbelastung: Im Vergleich zu einer modernen konventionellen Anlage können aus 100 Einheiten Gas praktisch völlig umweltneutral 20 Einheiten Strom erzeugt werden! Hier wurde eine Elektro-Thermo-Verstärkung von 3 angenommen, wie sie etwa in guten Wärmepumpenanlagen erreicht wird. Andere Elektro-Thermo-Verstärker, wie beispielsweise Abwärmenutzungsanlagen, erreichen noch we-

*kraftwerke sollen dort gebaut werden, wo genügend geeignete Wärmeabnehmer vorhanden sind und Wärmepumpen dort, wo Wärmequelle und Wärmeabgabesystem optimal sind.*

 Ausführliche Übersicht und Beschreibung energieeffizienter Techniken und Strategien in Kapitel 3

## 1.4 Publikationen des Ressorts «Wärme»

Energieeffiziente Techniken werden in nächster Zukunft stark an Bedeutung gewinnen. Über dieses Thema ist aber heute nur wenig in Lehrbüchern zu finden. In drei RAVEL-Kursen – «Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung», «Wärmepumpen» sowie «Wärme kraftkopplung» – können sich deshalb Planerinnen und Planer auf diesem zukunftssträchtigen Gebiet weiterbilden. Die dazu erscheinende **Schriftenreihe «RAVEL im Wärmesektor»** besteht aus fünf Heften (Bild 4):

- Das vorliegende Heft 1 «Elektrizität und Wärme» liefert die gemeinsamen Grundlagen, und es zeigt die Zusammenhänge zwischen den drei genannten Bereichen auf
- Heft 2 «Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung», Heft 3 «Wärmepumpen» und Heft 4 «Wärme kraftkopplung» behandeln die Planung, den Bau und den Betrieb solcher Anlagen aus der Sicht der Praxis
- Heft 5 «Standardschaltungen» gibt schliesslich eine Übersicht von praxisbewährten Lösungen für alle drei Bereiche

Während sich die 5 Hefte der Schriftenreihe ausschliesslich an Planerinnen und Planer wenden, ist die **Informationsbroschüre «Elektrizität im Wärmesektor»** (Bild 4 unten) nicht nur für Fachleute, sondern auch für potentielle Betreiber solcher Anlagen gedacht. Sie gibt einen guten Überblick über das Gesamtgebiet.

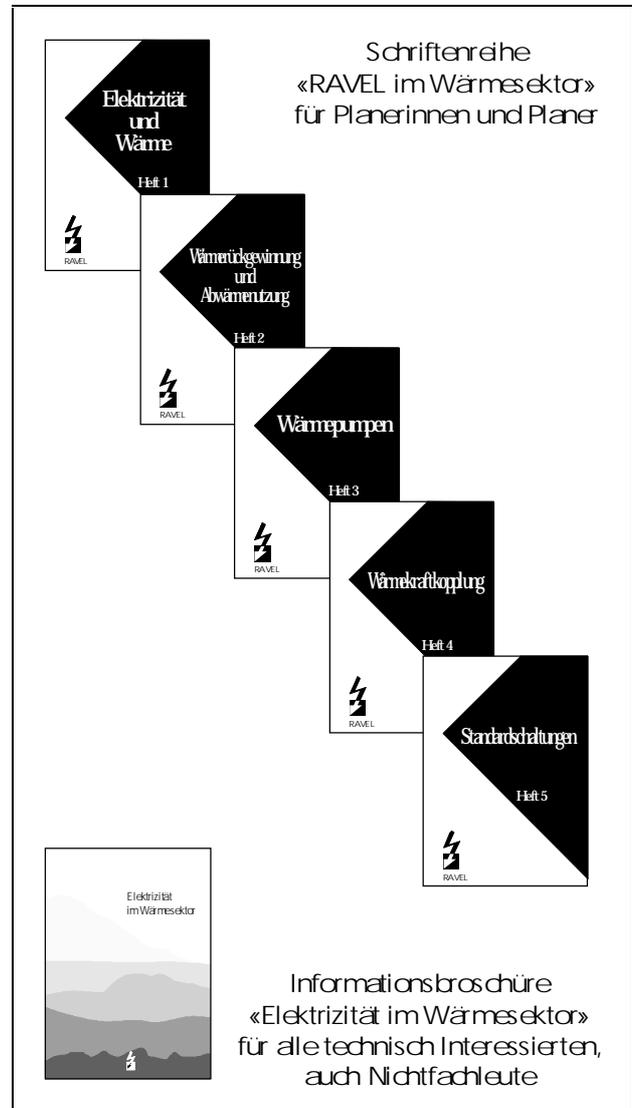


Bild 4: Publikationen des Ressorts «Wärme». Sie können bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden. Die Bestell-Nummern der fünf Hefte der Schriftenreihe sind auf Seite 2 zu finden. Die Bestell-Nummer für die Informationsbroschüre lautet 724.354d.

## 2. Energieumwandlung

### 2.1 Kreisprozesse

#### Carnotscher Kreisprozess

Prozesse, bei denen nach mehreren hintereinander erfolgten Zustandsänderungen wieder der ursprüngliche Ausgangszustand erreicht wird, werden als Kreisprozesse bezeichnet. Alle periodisch arbeitenden Wärmekraftmaschinen führen solche Kreisprozesse aus. Dabei findet eine Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit statt. Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen durchlaufen den Kreisprozess in umgekehrter Richtung; unter Aufnahme von mechanischer Arbeit wird Wärme bzw. Kälte produziert. Der Physiker Nicolas L. Sadi Carnot (1796-1832) fand heraus, dass der Wirkungsgrad dann maximal ist, wenn ein ganz bestimmter Kreisprozess – eben der Carnotsche Kreisprozess – durchlaufen wird. Den maximal möglichen Wirkungsgrad (Wärmekraftmaschine) respektive die maximal mögliche Leistungszahl (Wärmepumpe bzw. Kältemaschine) des Carnotschen Kreisprozesses beschreibt Kasten 5.

#### Kreisprozess der Wärmepumpe bzw. Kältemaschine

Mit Hilfe eines Wärmetauschers kann Wärme von einem wärmeren auf ein kälteres Medium übertragen werden. Dieser Vorgang ist leicht verständlich. Der umgekehrte Fall, Wärme von einem kälteren auf ein wärmeres Medium zu übertragen – unter Zuführung von mechanischer Arbeit –, ist bedeutend schwieriger zu verstehen. Dieser Vorgang läuft als Kreisprozess gleichermassen in Wärmepumpen und Kältemaschinen ab. Im Falle der Wärmepumpe steht die Wärmeproduktion im Vordergrund und bei der Kältemaschine eben die Kälte.

Der Kreisprozess kann am einfachsten im **Druck-Enthalpie-Diagramm** veranschaulicht werden (Bild 6 oben). Darin wird der Druck logarithmisch dargestellt, und die im Arbeitsmittel enthaltene Wärmemenge wird als Enthalpie bezeichnet. Da nur Enthalpie-Differenzen interessieren, kann der Nullpunkt der Skala beliebig festgelegt werden.

#### Carnotscher Kreisprozess

Der maximale thermische Wirkungsgrad des Carnotschen Kreisprozesses einer Wärmekraftmaschine ist durch die beiden Grenztemperaturen bestimmt, zwischen denen der Prozess abläuft:

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$\eta_c$  = Carnotscher Wirkungsgrad [-]

$T_1$  = höhere Temperatur [K]

$T_2$  = tiefere Temperatur [K]

Beim umgekehrt durchlaufenen Kreisprozess der Wärmepumpe bzw. Kältemaschine ergibt sich die Carnotsche Leistungszahl aus dem Kehrwert der letztgenannten Formel, wobei bei der Kältemaschine noch zu berücksichtigen ist, dass hier die Kälte Nutzenergie ist:

$$\epsilon_{C,WP} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$\epsilon_{C,KM} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

$\epsilon_{C,WP}$  = Carnotsche Leistungszahl Wärmepumpe [-]

$\epsilon_{C,KM}$  = Carnotsche Leistungszahl Kältemaschine [-]

$T_1$  = Kondensationstemperatur [K]

$T_2$  = Verdampfungstemperatur [K]

Als **Arbeitsmittel** (auch «Kältemittel» genannt) werden leichtflüchtige Stoffe verwendet, deren Verdampfungstemperatur (Siedepunkt) bei Normaldruck verhältnismässig tief liegt. Das Arbeitsmittel R22 siedet beispielsweise bei  $-41^{\circ}\text{C}$ .

Entlang der Linie A–B findet die **Verdampfung** des Arbeitsmittels bei konstantem Druck statt. Dabei geht, unter Abkühlung des Wärmeträgers im Verdampfer, Wärme in latenter Form ins Arbeitsmittel über; die Verdampfungstemperatur des Arbeitsmittels ist deshalb konstant.

Nun wird mittels **Verdichtung** (Kompression) der Arbeitsmitteldampf entlang der Linie B–C überhitzt, und so auf ein höheres Temperaturniveau «hochgepumpt». Die dazu notwendige Energie muss in Form von mechanischer Arbeit (z.B. mittels Elektromotor) dem Kompressor zugeführt werden.

Bei der nachfolgenden **Verflüssigung** (Kondensation) wird die latente Wärme des überhitzten Arbeitsmitteldampfes entlang der Linie C–D auf den Wärmeträger des Verflüssigers übertragen. Dabei entsteht zuerst einmal gesättigter Dampf und anschliessend wird das Arbeitsmittel kontinuierlich bei konstanter Temperatur verflüssigt.

Beim Punkt D ist das Arbeitsmittel zwar wieder flüssig, aber Druck und Temperatur sind noch zu hoch. Um wieder auf den Ausgangspunkt des Kreisprozesses zurückzukommen, findet deshalb entlang der Linie D–A eine **Expansion** (Entspannung) des Arbeitsmittels statt.

Der im oberen Teil von Bild 6 dargestellte Kreislauf ist idealisiert. Aus technischen Gründen wird nämlich beim Punkt B eine Überhitzung und beim Punkt D eine Unterkühlung des Arbeitsmittels angestrebt. Ausserdem entstehen Druckverluste, Wärmeverluste und mechanische Reibungsverluste. Der **tatsächliche Verlauf** (Bild 6 unten) weicht deshalb vom idealisierten ab.

Da bei der Wärmepumpe die Verflüssiger-Wärmeleistung und bei der Kältemaschine die Verdampfer-Kälteleistung genutzt wird, ergeben sich auch unterschiedliche Definitionen für die **Leistungszahl** (siehe Bild 6).

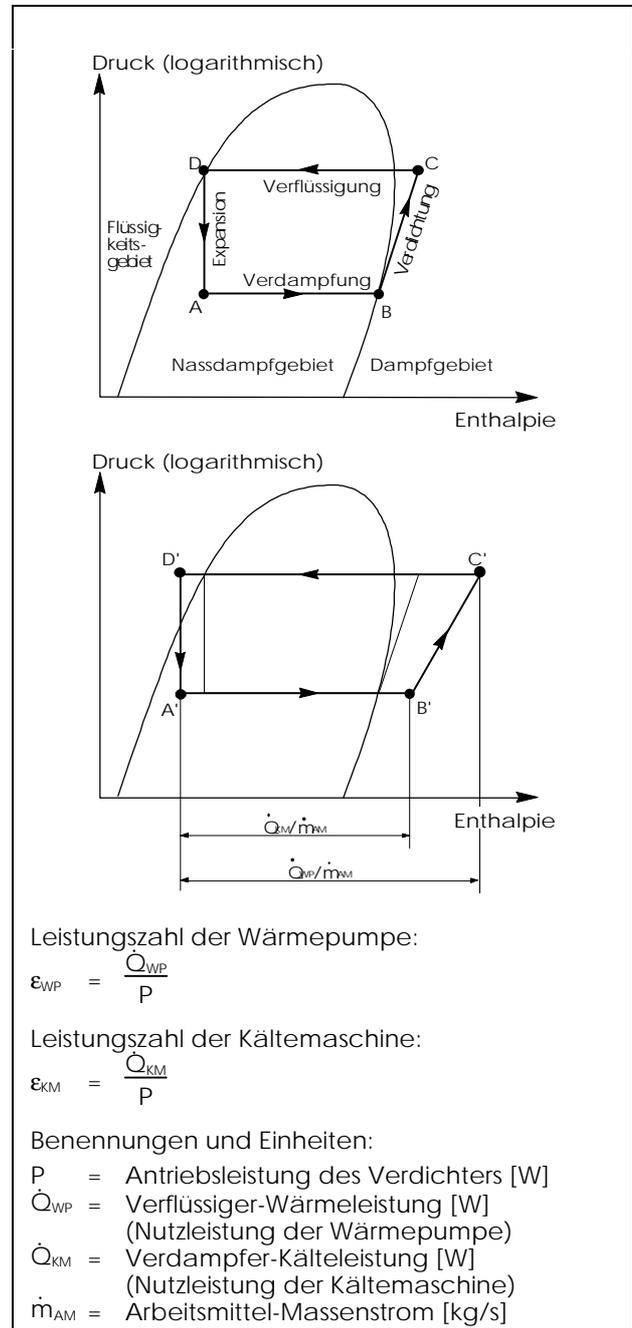


Bild 6: Kreisprozess, dargestellt im Druck-Enthalpie-Diagramm. Als Enthalpie wird die im Arbeitsmittel enthaltene Wärmemenge bezeichnet. Je nach Lage eines Punktes im Diagramm, ist das Arbeitsmittel eine Flüssigkeit, Nassdampf oder Dampf. Oben ist der idealisierte und unten der tatsächliche Kreisprozess dargestellt.

### Erster Hauptsatz der Wärmelehre

Die Erfahrung zeigt, dass es nicht möglich ist, eine Maschine zu bauen, die mehr Energie liefert als ihr zugeführt wird: Unmöglichkeit eines Perpetuum mobiles erster Art. Damit kann der erste Hauptsatz der Wärmelehre formuliert werden:

*Die Summe der einem System von aussen zugeführten Wärme und von aussen zugeführten mechanischen Arbeit ist gleich der Zunahme der inneren Energie.*

Kasten 7

### Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre

Neben der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobiles erster Art kann noch die Unmöglichkeit eines Perpetuum mobiles zweiter Art formuliert werden:

*Es gibt keine Maschine, die fortgesetzt mechanische Arbeit erzeugt und nur mit einem Wärmespeicher in Verbindung steht.*

Oder anders ausgedrückt: Es ist unmöglich Wärme restlos in mechanische Arbeit zu wandeln, was in umgekehrter Richtung problemlos möglich ist.

Ebenso wie beim Perpetuum mobile erster Art handelt es sich auch beim Perpetuum mobile der zweiten Art um eine Erfahrungstatsache. Sie ergibt sich beispielsweise aus den Gesetzmässigkeiten der Kreisprozesse. Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre kann deshalb sowohl in Bezug auf die Wärmekraftmaschine als auch in Bezug auf die Wärmepumpe bzw. Kältemaschine formuliert werden:

*Wärmekraftmaschine: Wärme kann nur dann in mechanische Arbeit umgewandelt werden, wenn zugleich ein Teil der Wärme von einem wärmeren auf ein kälteres Medium übergeht.*

*Wärmepumpe bzw. Kältemaschine: Wärme kann von einem kälteren auf ein wärmeres Medium nur unter Aufwand mechanischer Arbeit übertragen werden.*

Kasten 8

## 2.2 Wertigkeit verschiedener Energieformen

Der **erste Hauptsatz der Wärmelehre** (Kasten 7) wird oft auch als Energieerhaltungssatz bezeichnet, weil er ja nichts anderes besagt, als dass die Summe aller Energieformen konstant sei. Energie kann also 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). Diese Aussage ist relativ leicht verständlich.

Schwerer zu verstehen ist dagegen der **zweite Hauptsatz der Wärmelehre** (Kasten 8), der letztendlich besagt, dass verschiedene Energieformen nicht beliebig ineinander umgewandelt werden können.

In der Praxis bedeutet dies beispielsweise, dass bei einer **Dampfturbine** nur etwa ein Drittel der zugeführten Energie in hochwertige mechanische Arbeit umgewandelt werden kann, während rund zwei Drittel «minderwertiger» Abwärme über Kühltürme an die Umgebung abgegeben werden muss (sofern nicht Abwärmenutzung als wirtschaftlich erachtet wird).

Im umgekehrten Fall kann mittels einer **Elektrowärmepumpe** Umgebungswärme auf ein zu Heizzwecken genügend hohes Temperaturniveau um 40...50 K angehoben werden. Dazu wird typischerweise ein Drittel hochwertige Elektrizität gebraucht, um zusammen mit zwei Dritteln «minderwertiger» – dafür aber kostenloser – Umgebungswärme drei Drittel «mittelwertiger» Heizwärme zu erzeugen.

Die Umwandelbarkeit einer bestimmten Energieform ist offensichtlich ein sehr wichtiges Qualitätskriterium. Ganz allgemein kann man deshalb von einer unterschiedlichen **Wertigkeit** der verschiedenen Energieformen sprechen: Elektrizität hat beispielsweise eine viel höhere Wertigkeit als Heizwärme.

Wenn aber heute Verbrauchszahlen verschiedener Energieformen miteinander verglichen werden, geschieht dies in der Regel

durch einen simplen Kilowattstundenvergleich: Eine Kilowattstunde Elektrizität wird beispielsweise einer Kilowattstunde Heizwärme gleichgesetzt. Diese einfache Betrachtungsweise ist absolut ungenügend und muss in Zukunft durch eine die Wertigkeit angemessen berücksichtigende Methode abgelöst werden. Prinzipiell gibt es dazu zwei Möglichkeiten:

- Die physikalisch exakte Berechnung (wird in Abschnitt 2.3 behandelt)
- Durch Faustregeln in Form von Bewertungsfaktoren entsprechend dem technischen Stand der heute zur Verfügung stehenden Umwandlungstechnik (wird in Abschnitt 2.4 behandelt)

## 2.3 Physikalisch exakte Berechnung der Wertigkeit

### Exergie, Anergie

Die Umwandelbarkeit einer bestimmten Energieform kann physikalisch exakt durch die Aufteilung in Exergie und Anergie beschrieben werden (Kasten 9):

- Exergie ist derjenige Anteil der Energie, der in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann
- Anergie ist derjenige Anteil der Energie, der nicht in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann

**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.

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

**Umgebungswärme** enthält ausschliesslich Anergie.

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



Mit den in Kasten 9 angegebenen Formeln kann beispielsweise berechnet

### Exergie und Anergie

Aus dem Carnotschen Kreisprozess (vgl. Kasten 5) ist bekannt, dass der maximale Wirkungsgrad durch die beiden Grenztemperaturen bestimmt wird, zwischen denen der Prozess abläuft:

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_E}$$

Dieses Verhältnis beschreibt genau denjenigen Anteil des Wärmestromes, der vollständig in mechanische Energie umgewandelt werden kann und als **Exergiestrom** bezeichnet wird:

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

Derjenige Anteil, der nicht in mechanische Energie umgewandelt werden kann, wird als **Anergiestrom** bezeichnet:

$$\dot{Q}_A = T_2/T_1 \cdot \dot{Q}$$

Der **Wärmestrom** ist also die Summe aus Exergiestrom und Anergiestrom:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_E + \dot{Q}_A$$

Benennungen und Einheiten:

$\eta_C$  = Carnotscher Wirkungsgrad [-]

$\dot{Q}$  = Wärmestrom [W]

$\dot{Q}_E$  = Exergiestrom [W]

$\dot{Q}_A$  = Anergiestrom [W]

$T_1$  = höhere Temperatur [K]

$T_2$  = tiefere Temperatur = Umgebungstemperatur [K]

Kasten 9

### Exergetischer Wirkungsgrad

Die Güte einer Energieumwandlung ist davon abhängig, wieviel der maximal möglichen Energie tatsächlich umgewandelt werden kann. Sie wird durch den exergetischen Wirkungsgrad definiert (oft auch Gütegrad genannt):

$$\xi = \frac{\eta}{\eta_c}$$

$\xi$  = exergetischer Wirkungsgrad  
 $\eta$  = Wirkungsgrad  
 $\eta_c$  = Carnotscher Wirkungsgrad

$$\xi = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$$

$\xi$  = exergetischer Wirkungsgrad  
 $\varepsilon$  = Leistungszahl  
 $\varepsilon_c$  = Carnotsche Leistungszahl

Kasten 10

werden, dass bei 0°C Umgebungstemperatur (273 K) nur gerade 15% Exergie notwendig wäre, um Heizwasser von 50°C (323 K) zu erzeugen:

$$\dot{Q}_E = (1 - 273 \text{ K} / 323 \text{ K}) \cdot \dot{Q} = 0,15 \cdot \dot{Q}$$

Elektrizität (100% Exergie) ist demnach exergetisch 6,5mal wertvoller als Heizwärme von 50°C (15% Exergie).

### Exergetischer Wirkungsgrad

Das Berechnungsbeispiel kann man auch anders interpretieren: Eine ideale Elektrowärmepumpe könnte aus Umgebungswärme von 0°C mit einer Leistungszahl von 6,5 Heizwärme von 50°C erzeugen. Dies ist nichts anderes als die Carnotsche Leistungszahl gemäss Kasten 5:

$$\varepsilon_{C,WP} = \frac{323}{323 - 273} = 6,5$$

Aus der Praxis wissen wir jedoch, dass eine Wärmepumpe beim vorliegenden Temperaturhub von 50 K vielleicht eine Leistungszahl von 3,0 erreichen würde. Und die «Leistungszahl» einer Elektrowiderstandsheizung würde gerade noch etwa 0,9 betragen. Um die Güte einer Energieumwandlung zu charakterisieren wird deshalb ein exergetischer Wirkungsgrad definiert (oft auch Gütegrad genannt, siehe Kasten 10).

 Im vorliegenden Beispiel ergäbe sich für die Wärmepumpe ein exergetischer Wirkungsgrad von

$$\xi_{WP} = 3,0 / 6,5 = 0,46$$

und für die Elektrowiderstandsheizung (Zentral-speicher mit 50°C Vorlauftemperatur) ein solcher von

$$\xi_{\text{Elektroheizung}} = 0,9 / 6,5 = 0,14.$$

## 2.4 Faustregeln in Form von Bewertungsfaktoren

### Probleme mit der Verwendung des Exergiebegriffs in der Praxis

Exergiebetrachtungen sind zwar sehr interessant, aber leider stellen sich in der praktischen Anwendung einige Hindernisse in den Weg:

- Bei Haustechnikfachleuten sind die Begriffe «Exergie» und «Anergie» so gut wie unbekannt
- Die praktisch realisierbaren exergetischen Wirkungsgrade sind sehr unterschiedlich und weichen stark vom theoretisch Machbaren ab
- In der Praxis wichtige örtliche und zeitliche Aspekte werden durch den Exergiebegriff nicht berücksichtigt

Somit stellt sich die Frage, ob nicht mit einfachen Faustregeln für die Wertigkeit der wichtigsten Energieformen dem Praktiker und der Praktikerin mehr gedient wäre als mit komplizierten Formeln.

### Stand der Technik

Wenn man die heute zur Verfügung stehenden Wärmeenergieerzeugungstechniken betrachtet (Bild 11), 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.

Bild 11 zeigt aber auch, welches die zum heutigen Zeitpunkt besten, im grösseren Umfang anwendbaren Umwandlungstechniken sind:

- Die Elektromotorwärmepumpe macht aus Elektrizität das 3fache an Heizwärme
- Die Gasmotorwärmepumpe liefert aus Gas das 1,5fache an Heizwärme (dasselbe würde für eine Dieselmotorwärmepumpe gelten)
- Ein Blockheizkraftwerk kombiniert mit einer Elektromotorwärmepumpe kommt etwa auf den gleichen Faktor von 1,5 (anstelle der mechanischen Kopplung der Gasmotorwärmepumpe tritt hier die elektrische Kopplung)

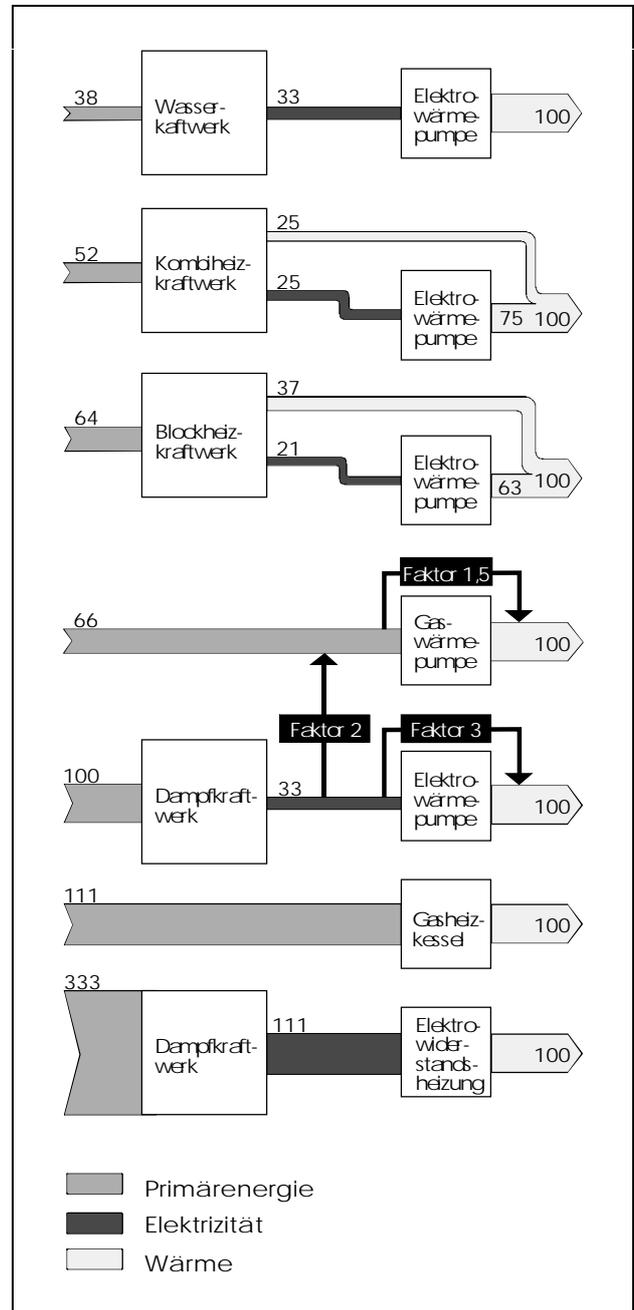


Bild 11: Die verschiedenen Energieformen und deren Wertigkeit werden von den heute angewandten Wärmeenergieerzeugungstechniken sehr unterschiedlich genutzt

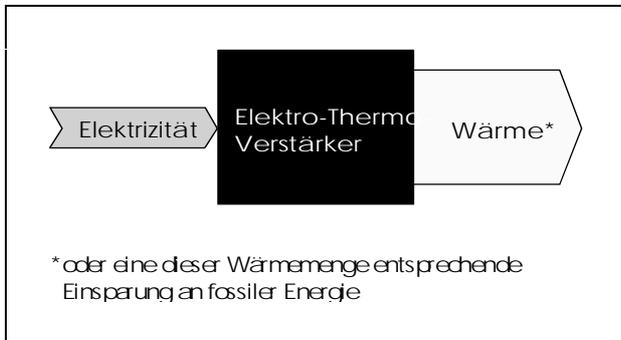


Bild 12: Elektro-Thermo-Verstärker

- Aus den bisher gemachten Aussagen ergibt sich somit auch, dass Elektrizität etwa 2mal so «wertvoll» ist wie fossiler Brennstoff Gas bzw. Öl (der gleiche Wert, in reziproker Form, lässt sich übrigens auch beim Kombi-Heizkraftwerk herauslesen)

### Bewertungsfaktoren

Mit Hilfe von Bild 11 können somit praxisnahe und anschauliche Bewertungsfaktoren abgeleitet werden, welche die heutige Technologie und Wirtschaftlichkeit widerspiegeln.



*Elektrizität ist etwa dreimal so hoch zu bewerten wie Heizwärme.*



*Öl oder Gas ist etwa anderthalbmal so hoch zu bewerten wie Heizwärme.*



*Elektrizität ist etwa doppelt so hoch zu bewerten wie Öl oder Gas.*

## 2.5 Elektro-Thermo-Verstärker

Im Wärmesektor taucht immer wieder die gleiche Fragestellung auf: Wieviel Wärme kann ich aus einer bestimmten Menge Elektrizität erzeugen? Ob dabei noch weitere Energieformen beteiligt sind (Umgebungswärme, Abwärme usw.), spielt solange keine Rolle, als diese kostenfrei sind und ohne zusätzliche Umweltbelastung gewonnen werden können. Es scheint deshalb zweckmässig, eine Black Box mit der Eingangsgrösse Elektrizität und der Ausgangsgrösse Heizwärme zu definieren und diese ganz allgemein als Elektro-Thermo-Verstärker zu bezeichnen (siehe Bild 12). Charakterisiert wird der Elektro-Thermo-Verstärker durch die Kennzahl **Elektro-Thermo-Verstärkung ETV**, die wie folgt definiert ist:

$$ETV = \frac{\text{Substitution fossil erzeugter Wärme}}{\text{Elektrizitäts-Mehraufwand für diese Substitution}}$$

Eine **Elektromotor-Wärmepumpe** kann somit verallgemeinernd als Elektro-Thermo-Verstärker mit

$$ETV_{WP} = 3$$

bezeichnet werden (aus Strom wird das 3fache an Heizwärme produziert).

Dabei ist es letztendlich nicht einmal notwendig, dass das Endprodukt tatsächlich Heizwärme ist, es kann auch eine dieser Wärmemenge entsprechende Einsparung an fossiler Energie sein. 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 Abwärmenutzung erzielt man Elektro-Thermo-Verstärkungen von 7...25.
- Moderne Ersatzluftanlagen erzielen Elektro-Thermo-Verstärkungen von 5...10.
- Elektro-Leichtfahrzeuge brauchen für die gleiche Strecke 5- bis 10mal weniger Energie als ein konventionelles Auto. Die dabei eingesparte fossile Energie entspricht also einer Elektro-Thermo-Verstärkung von mindestens 5...10 (der Vergleich mit einem Verbrennungsmotor-Leichtfahrzeug ergäbe allerdings tiefere Werte).
- Die besten Elektro-Thermo-Verstärker sind Solaranlagen. Eine Sonnenkollektoranlage zur Wassererwärmung mit Umwälzpumpe hat beispielsweise eine Elektro-Thermo-Verstärkung von etwa 100 und eine Thermosyphonanlage sogar eine solche von unendlich!

## 3. Energieeffiziente Techniken

 Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Techniken erfolgt in den themenspezifischen Heften 2...4. Hier werden die Techniken nur soweit beschrieben, wie dies für das Erkennen der Zusammenhänge unbedingt notwendig ist.

### 3.1 Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung

#### Funktionsweise

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 13) gesprochen, während im zweiten Fall Abwärmenutzung (Bild 14) vorliegt.

#### Bauarten und Anwendungsgebiete

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. Der Wärmetausch kann direkt (Rekuperator) oder durch Zwischenspeicherung in einem Medium erfolgen (Regenerator). Bild 15 zeigt typische Vertreter.

Der **Plattenwärmetauscher** (Rekuperator) besteht aus Trennflächen, die wärme- aber nicht stoffdurchlässig sind. Die

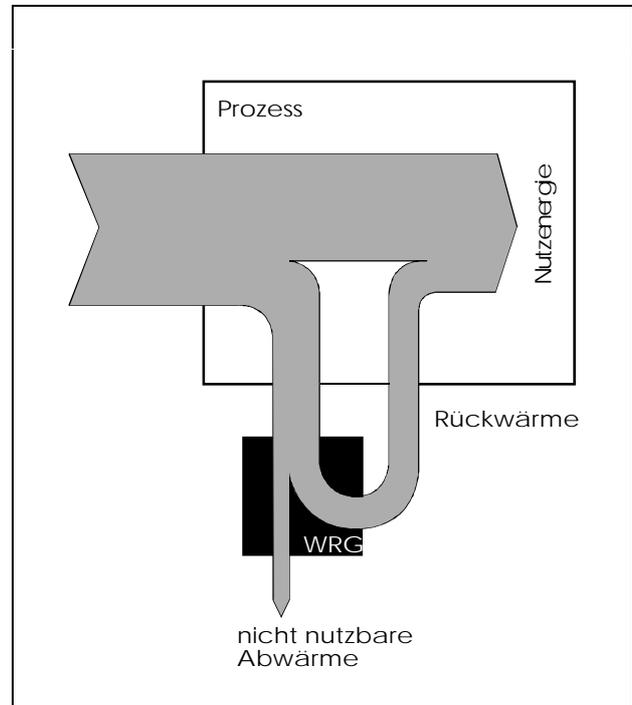


Bild 13: Bei der Wärmerückgewinnung (Abkürzung: WRG) wird die bei einem Prozess oder von einer Anlage anfallende überschüssige nutzbare Wärme vom selben Prozess oder der gleichen Anlage ohne besondere Zeitverschiebung wieder als Nutzwärme zugeführt. Mit dieser Massnahme wird ein höherer Anlagenutzungsgrad erzielt. Ideal bei dieser Anwendung ist, dass der zeitliche und mengenmässige Anfall der Abwärme mit dem entsprechenden Wärmebedarf weitgehend übereinstimmt.

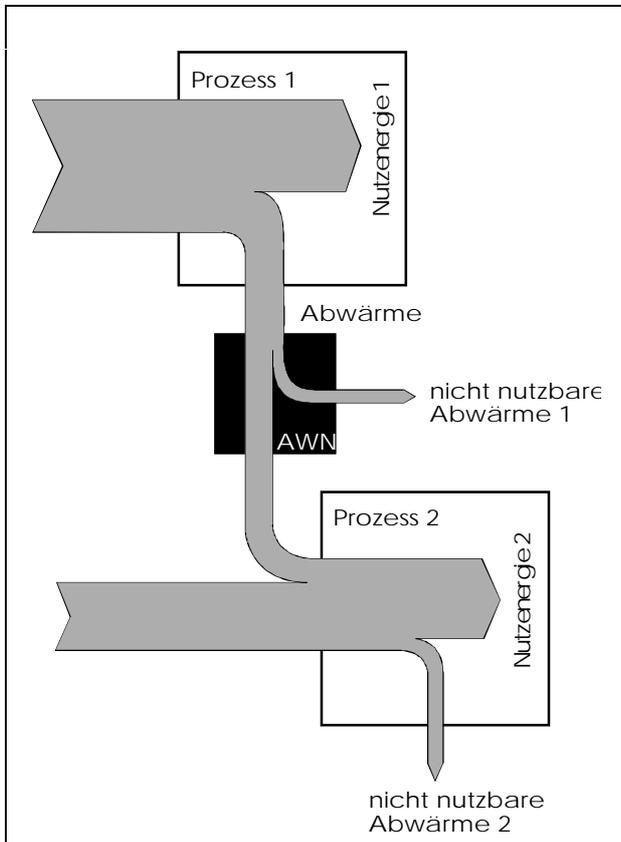


Bild 14: Abwärmenutzung (Abkürzung: AWN) liegt dann vor, wenn die bei einem Prozess oder einer Anlage anfallende nutzbare Überschusswärme bei anderen Prozessen oder Anlagen gleichzeitig oder auch mit nennenswerten Zeitverschiebungen wieder genutzt wird. Damit wird keine Verbesserung eines Einzel-Anlagenutzungsgrades 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

Wärmeübertragung erfolgt direkt über die Trennflächen. Man unterscheidet verschiedene Bauformen, wie Platten-, Doppelmantel-, Rohrbündel-, Röhrenwärmetauscher usw. 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.

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

Bei der **Wärmepumpe** erfolgt der Wärmeaustausch mit Zusatzenergie unter Temperaturerhöhung (siehe auch Abschnitt 3.2). 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.

Speziell im Hinblick auf RAVEL – also die rationelle Verwendung von Elektrizität – lassen sich die nachstehenden **vier Hauptanwendungsgebiete** unterscheiden:

- **«Verstromung» von Hochtemperatur-Abwärme:** In der Industrie ist die Abwärmtemperatur oft so hoch, dass zuerst mittels Dampfturbinen Strom produziert und darauf erst noch eine Abwärmenutzung auf tieferem Temperaturniveau erfolgen kann.
- **Nutzung der Abwärme aus elektrischen Prozessen:** Nutzbare Abwärme tritt in grösseren elektrisch betriebenen Maschinen und Geräten mit genügend grosser Energiedichte auf (z.B. Grosscomputer, Trafos), so dass sich eine weitere Nutzung lohnt. Der Sammelaufwand für die Abwärmenutzung bei vielen verteilten Kleingeräten kann allerdings erheblich sein, sodass eine Nutzung leider oft unrentabel ist.
- **Substitution elektrothermischer Anwendungen durch Abwärmenutzung:** Elektrothermische Anwendungen im Niedertemperaturbereich

(Komfortanwendungen, Vorwärmung usw.) lassen sich oft ebenso gut mit Abwärme betreiben. So kann beispielsweise die Elektrizität bei der elektrischen Wassererwärmung oftmals durch Abwärme substituiert werden.

- **Rationeller Einsatz der Elektrizität als Hilfsenergie in WRG/AWN-Anlagen:** Zusätzliche Komponenten für Wärmeübertragung und -transport (Pumpen, Ventilatoren usw.) führen zu einem höheren Elektrizitätsbedarf, und das Einbringen von zusätzlichen Wärmetauschern erhöht den Druckverlust und damit die elektrische Leistungsaufnahme der bestehenden Fördermittel. Damit die Elektro-Thermo-Verstärkung möglichst gut wird, müssen Motoren, Pumpen und Ventilatoren mit optimalem Wirkungsgrad eingesetzt werden.

Die beschriebenen 4 Hauptanwendungsgebiete sollten jedoch nicht allzu eng – allein im Hinblick auf reine Elektrizitätsanwendungen – gesehen werden: Auch die **Einsparung von thermischer Energie** – insbesondere von fossil erzeugter – wird von RAVEL nachdrücklich gefordert.

### Wichtige Kennzahlen

In raumlufttechnischen Neuanlagen gehört die Wärmerückgewinnung heute zum Stand der Technik, und sie ist in einigen Kantonen sogar gesetzlich vorgeschrieben. In diesem Zusammenhang ist vor allem der **Temperaturwirkungsgrad** (auch «Rückwärmzahl» genannt) von Bedeutung, der das Verhältnis der rückgewonnenen Energie (Rückwärme) zur maximal rückgewinnbaren Energie angibt. Typische Werte sind etwa (vgl. mit Bild 15):

- Plattenwärmetauscher 0,40...0,60
- Kreislaufverbund 0,40...0,70
- Rotationswärmetauscher 0,50...0,75

Eine andere Kenngröße – die hier im Zusammenhang mit RAVEL besonders interessiert – ist die **Elektro-Thermo-Verstärkung**. Der zusätzliche Energiebedarf für den Antrieb und die Überwindung des zusätzlichen Druckverlustes bewegt sich typischerweise um

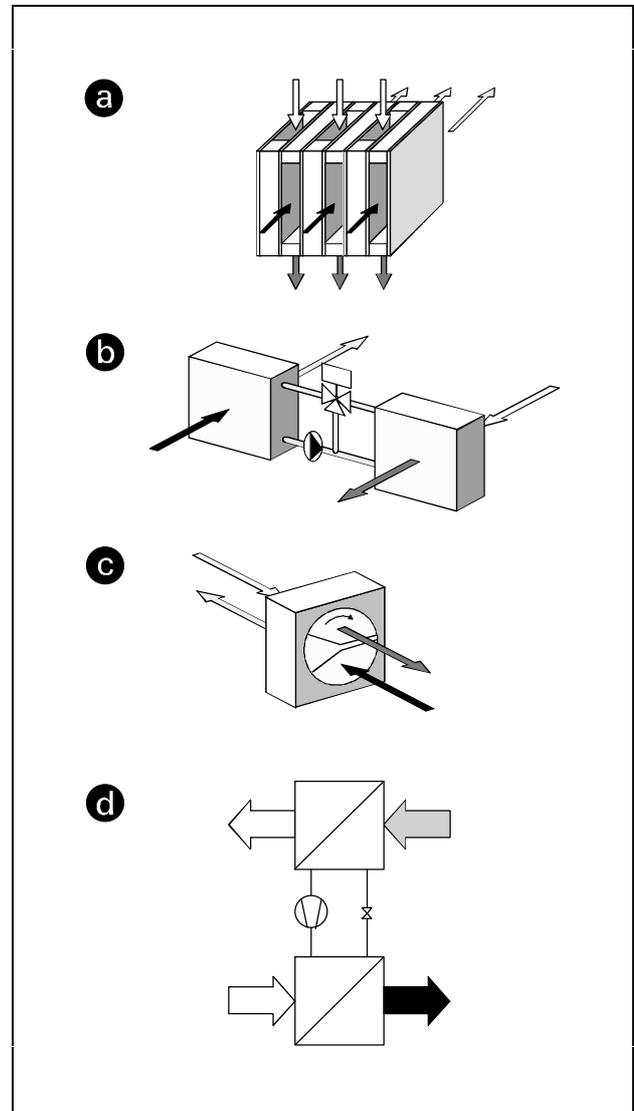


Bild 15: Bauarten

- a) Plattenwärmetauscher
- b) Kreislaufverbund
- c) Rotationswärmetauscher
- d) Wärmepumpe

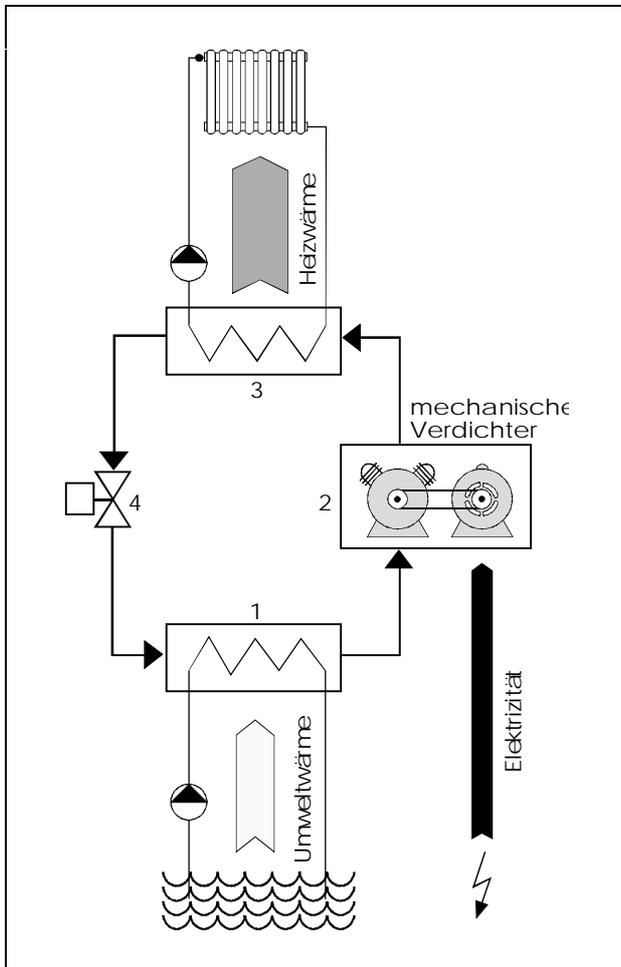


Bild 16: Thermodynamischer Kreisprozess einer Kompressionswärmepumpe. Die Wärmequelle bringt das flüssige Arbeitsmittel (Kältemittel) im Verdampfer (1) bei niedriger Temperatur zum Sieden. Der entstehende Dampf wird im Verdichter (2) komprimiert. Dabei steigt die Temperatur stark an und die Wärme kann 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

4...15% der Rückwärme. Dies entspricht einer Elektro-Thermo-Verstärkung von 7...25.

## 3.2 Wärmepumpen

### Funktionsweise

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. Mit Hilfe einer höherwertigen Energieform (z.B. Elektrizität) ist es nämlich möglich – unter Ausnutzung des Carnotschen Kreisprozesses (vgl. Abschnitt 2.1) –, Wärme niedriger Temperatur auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben.

### Bauarten und Anwendungsgebiete

Weitaus am häufigsten wird heute die **Kompressionswärmepumpe** eingesetzt, deren Funktionsweise vereinfachend in Bild 16 beschrieben ist. Als Antrieb werden vorwiegend Elektromotoren eingesetzt; bei grösseren Wärmepumpen kommen auch Gas- und Dieselmotoren in Frage. Als mechanische Verdichter kommen vor allem Hubkolbenverdichter zum Einsatz; bei grösseren 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.

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 17). Als höherwertige Energie wird Wärme höherer Temperatur zugeführt (z.B. Abwärme). Elektrische Energie wird nur sehr wenig zum Antrieb der Lösungsmittelpumpe gebraucht.

Wärmepumpen mit dem heute vorwiegend eingesetzten Arbeitsmittel «R22» können nur mit Heizvorlauftemperaturen von maximal 50°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°C ein zweiter Wärmeerzeuger für höhere Temperaturen 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:

- **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

Die **Betriebsart** von Wärmepumpenanlagen mit mehr oder weniger konstanter Wärmequellenleistung und Niedertemperaturwärmeabgabe ist meist monovalent, d.h. ohne zweiten Wärmeerzeuger. Bei stark aussentemperaturabhängiger Wärmequellenleistung (z.B. Aussenluft) und bei Wärmeabgabesystemen mit höheren Vorlauftemperaturen als 50°C ist ein bivalenter

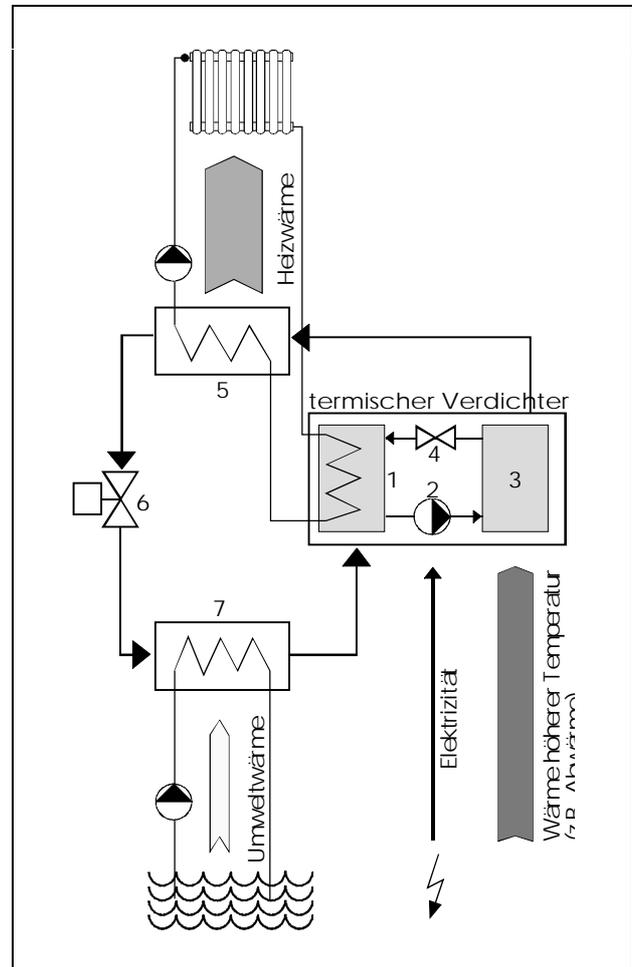


Bild 17: Thermodynamischer Kreisprozess einer Absorptionswärmepumpe. Im Absorber (1) wird das Arbeitsmittel vom Absorptionsmittel absorbiert. Dabei wird ein erstes Mal Wärme an die Heizung abgegeben. Die Lösungsmittelpumpe (2) fördert nun das Gemisch unter Druck zum Austreiber (3), wo – unter Wärmezufuhr – das Arbeitsmittel wieder ausgetrieben wird. Das Absorptionsmittel hat damit seine Schuldigkeit als «thermischer Verdichter» 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 16): Wärmeabgabe an die Heizung im Verflüssiger (5), Entspannung im Expansionsventil (6) und Aufnahme von niederwertiger Wärme im Verdampfer (7).

Betrieb mit einem zweiten Wärmeerzeuger erforderlich.

Heizungs-Wärmepumpen können auch zur Wassererwärmung eingesetzt werden. Speziell zur alleinigen Wassererwärmung gibt es sogenannte **Wärmepumpenboiler** (korrekter wäre der etwas umständliche Begriff «Wassererwärmer-Wärmepumpe»). Diese entziehen einem unbeheizten Raum Wärme und brauchen so 2- bis 3mal weniger Strom als ein konventioneller Elektro-Wassererwärmer. 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!

#### Wichtige Kennzahlen

Die Elektrowärmepumpe ist der klassische Elektro-Thermo-Verstärker. Dabei ist das Verhältnis von aufgewendeter Elektrizität zu nutzbarer Wärme von mindestens drei Bedingungen abhängig:

- Bilanzgrenze
- Beobachtungszeitraum
- Temperaturhub zwischen Wärmequelle (Verdampfeintrittstemperatur) und Heizung (Verflüssigeraustrittstemperatur)

Die **Leistungszahl** (bzw. COP) stellt einen über kurze Zeitdauer und unter bestimmten Randbedingungen gemessenen Momentanwert dar, der sich auf das Wärmepumpenaggregat beschränkt. Sie ermöglicht den Vergleich verschiedener Wärmepumpenaggregate untereinander, sie sagt aber nur wenig über die Wärmepumpenanlage als Ganzes aus.

Die wichtigste Kenngrösse zur Beurteilung einer Wärmepumpenanlage ist die **Jahresarbeitszahl**. Sie gibt das Verhältnis der abgegebenen Heizwärme zum zugeführten Strom an. Der Beobachtungszeitraum ist dabei ein Jahr, und die Bilanzgrenze umfasst Wärmequellenförderung, Verflüssigerpumpe, Steuerung/Regelung, Abtaueinrichtung, Carterheizung und Speicher. Tabelle 18 zeigt, welche Werte beim heutigen Stand der Technik für Elektromotorwärmepumpen etwa möglich sind. (Für Gasmotorwärmepumpen sind heute

Jahresarbeitszahlen von etwa 1,5 und für Absorptionswärmepumpen solche von 1,3 realistisch.)

Als Wert für die **Elektro-Thermo-Verstärkung** kann in der Praxis mit genügender Genauigkeit die Jahresarbeitszahl verwendet werden. Aus Tabelle 18 ergibt sich damit, dass heute eine durchschnittliche Elektro-Thermo-Verstärkung von knapp 3,0 für Elektromotor-Wärmepumpen möglich ist. Wenn man weiter berücksichtigt, dass noch technische Verbesserungen möglich sind und andere Elektro-Thermo-Verstärker Werte von weit über 3,0 aufweisen, dann ist es sicher nicht übertrieben, wenn RAVEL von einer durchschnittlichen Elektro-Thermo-Verstärkung – über alle Anlagen gesehen – von 3,0 ausgeht.

### 3.3 Wärmekraftkopplung

#### Funktionsweise

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 Wärmekraftkopplung (Abkürzung: WKK). Im Vordergrund stehen dabei sogenannte Blockheizkraftwerke (Abkürzung: BHKW). Verbrennungsmotor oder Gasturbine, Generator und Wärmetauscher sind in einem «Block» zusammengebaut. Damit kann gleichzeitig – neben der Wärme – auch noch energetisch viel hochwertigere Elektrizität produziert werden.

#### Bauarten und Anwendungsgebiete

Wärmekraftkopplungsanlagen können Heizkraftwerke in städtischen Gebieten sein, die Heizwärme über Fernleitungsnetze an die zu

Wärmequelle, Betriebsart, Nutzung	Jahresarbeitszahl
Grundwasser, monovalent – Direktnutzung – Indirektnutzung	3,0...3,5 2,8...3,3
Oberflächengewässer, monovalent, Indirektnutzung	2,6...3,1
Abwasser, monovalent, Indirektnutzung	2,9...3,4
Erdreich, monovalent – Erdregister – Erdsonden	2,6...2,9 2,8...3,1
Aussenluft – EFH, monovalent – bivalent-parallel – bivalent-alternativ	2,0...2,5 2,3...2,7 2,5...2,9

Tabelle 18: Zielwerte für Jahresarbeitszahlen von Elektromotorwärmepumpen, gültig für übliche Wärmequellen im schweizerischen Mittelland und Niedertemperaturwärmeabgabe bei den monovalenten Anlagen. Bei Direktnutzung wird die Wärmequelle direkt durch den Verdampfer geführt, bei Indirektnutzung besteht ein Zwischenkreis.



Bild 19: Kombi-Heizkraftwerk «Merwedekanaal» bei Utrecht in Holland mit 225 MW elektrischer Leistung

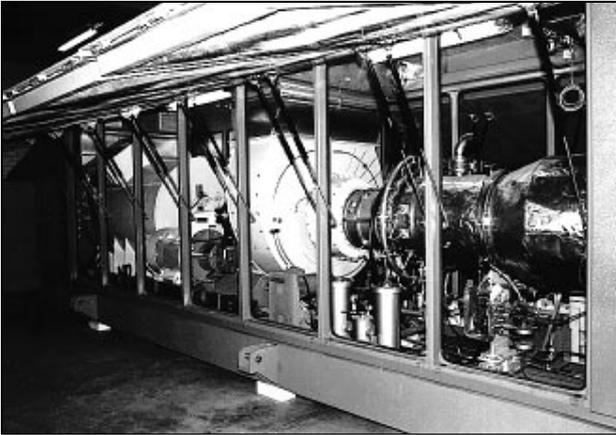


Bild 20: Gasturbinen-Blockheizkraftwerk; Gasturbine (rechts) und Generator (links) sind als «Block» zusammengebaut

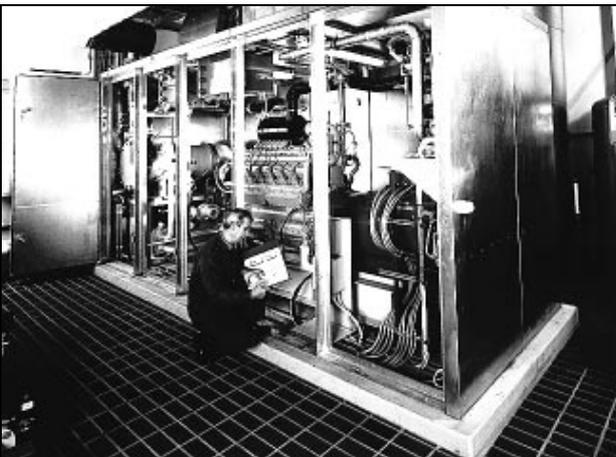


Bild 21: Gasmotor-Blockheizkraftwerk mit 170 kW elektrischer Leistung; Gasmotor (Mitte), Generator (rechts) und Wärmetauscher (links) sind unter einer gemeinsamen Schalldämmhaube untergebracht

beheizenden Häuser abgeben und die Elektrizität ins öffentliche Netz einspeisen. Hier sind sogenannte **Kombi-Heizkraftwerke** (Bild 19) speziell interessant: Mittels Kombination von Gas- und Dampfturbinen kann ein besonders hoher Stromanteil von etwa 50% erreicht werden. Auch in grossen Industriebetrieben werden Kombi-Heizkraftwerke eingesetzt.

Die Industrie ist für die Wärmekraftkopplung 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** (Bild 20) zur Prozesswärmeerzeugung (Heisswasser, Dampf) im Vordergrund.

Im Haushalt- und Dienstleistungssektor werden heute noch vorwiegend Gas- und Ölheizkessel zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Hier stellen **Gasmotor-Blockheizkraftwerke** (Bild 21) eine interessante Alternative dar, wenn die Randbedingungen für Wärmekraftkopplung günstig sind (Wärmeabgabe 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<sub>x</sub>-Gaskessel.

Für den unteren elektrischen Leistungsbereich von etwa 5...15 kW gibt es **Klein-Blockheizkraftwerke** (Bild 22) mit Auto-Gasmotoren, die relativ einfach zu installieren sind. Sie sind mit einem Dreiwegkatalysator ausgerüstet, und für grössere Leistungen können mehrere Module zusammengeschaltet werden. Die Wartung ist allerdings verhältnismässig aufwendig, da der Automotor etwa alle 5 Jahre totalrevidiert werden muss (Austauschmotor).

Grundsätzlich kann eine Wärmekraftkopplungsanlage mit **Wärmeführung** oder mit **Stromführung** be-

trieben werden. Energetisch sinnvoll ist aber nur die Wärmeführung, das heisst, die Anlage wird entsprechend dem momentanen Wärmebedarf gefahren, es muss also keine Wärme «vernichtet» werden. Deshalb sollte der Planung in der Regel die Wärmeführung zugrunde gelegt werden.

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 (Lebensdauer, 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 (über 4000 h/a). 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...35% ausgelegt. Damit können 60...75% des Jahreswärmebedarfs abgedeckt werden.

### Wichtige Kennzahlen

Allgemein wird die Güte einer Energieumwandlung als Nutzungsgrad ausgedrückt und zwar als das Verhältnis der nutzbaren Energie zur zugeführten Energie. **Typische Jahresnutzungsgrade** verschiedener Wärmeerzeugungsanlagen zeigt Tabelle 23. Da der Nutzungsgrad in der Schweiz normalerweise auf den unteren Heizwert bezogen wird, sind Werte über 1 möglich (theoretischer Grenzwert für Erdgas: 1,11). Der Nutzungsgrad



Bild 22: Vier Klein-Blockheizkraftwerke mit 4 x 15 kW elektrischer Leistung geben zusammen eine Heizleistung von 156 kW ab

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

Tabelle 23: Jahresnutzungsgrade verschiedener Wärmeenergieerzeugungsanlagen

einer Wärmekraftkopplungsanlage ist kaum besser als derjenige einer konventionellen Wärmeenergieerzeugungsanlage. Der entscheidende Unterschied liegt darin, dass die bereitgestellte Energie – wegen des Stromanteils – 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 23 ein **gewichteter Jahresnutzungsgrad** angegeben. Dieser Wert würde einer Anlage entsprechen, bei der der produzierte Strom in einem Elektro-Thermo-Verstärker mit einer Verstärkung von 3,0 in Wärme umgewandelt würde (z.B. Elektrowärmepumpe). Erst mit dieser Kennzahl 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. 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!)

### 3.4 Auswirkungen auf Energieverbrauch und Kohlendioxid-ausstoss

#### Strategien

Durch Wärmekraftkopplung in Kombination mit Elektro-Thermo-Verstärkern kann – durch Ausnutzung der unterschiedlichen Wertigkeit der Energieformen – Energie gespart und die Umwelt geschont werden. Die Energiebilanzen in Bild 24 zeigen drei typische Grenzfälle im Vergleich zu einer konventionellen Anlage A. Als Elektro-Thermo-Verstärker werden – der Anschaulichkeit halber – Wärmepumpen mit Jahresarbeitszahlen von 3,0 angenommen.

**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.

Selbstverständlich wird wohl kaum – über alle Anlagen gesehen – einer der drei genannten Fälle exakt verwirklicht werden. Vielmehr wird sich eine Mischung aus zwei der drei Fälle ergeben. Bild 25 zeigt nun, dass somit zwei grundsätzlich verschiedene Strategieziele möglich sind:

- Wenn mehr als ein Drittel des WKK-Stromes in Elektro-Thermo-Verstärkern eingesetzt wird (z.B. zum Antrieb von Wärmepumpen), dann ergibt sich eine **Umweltstrategie**. Dabei muss die gewünschte Umweltschonung und die

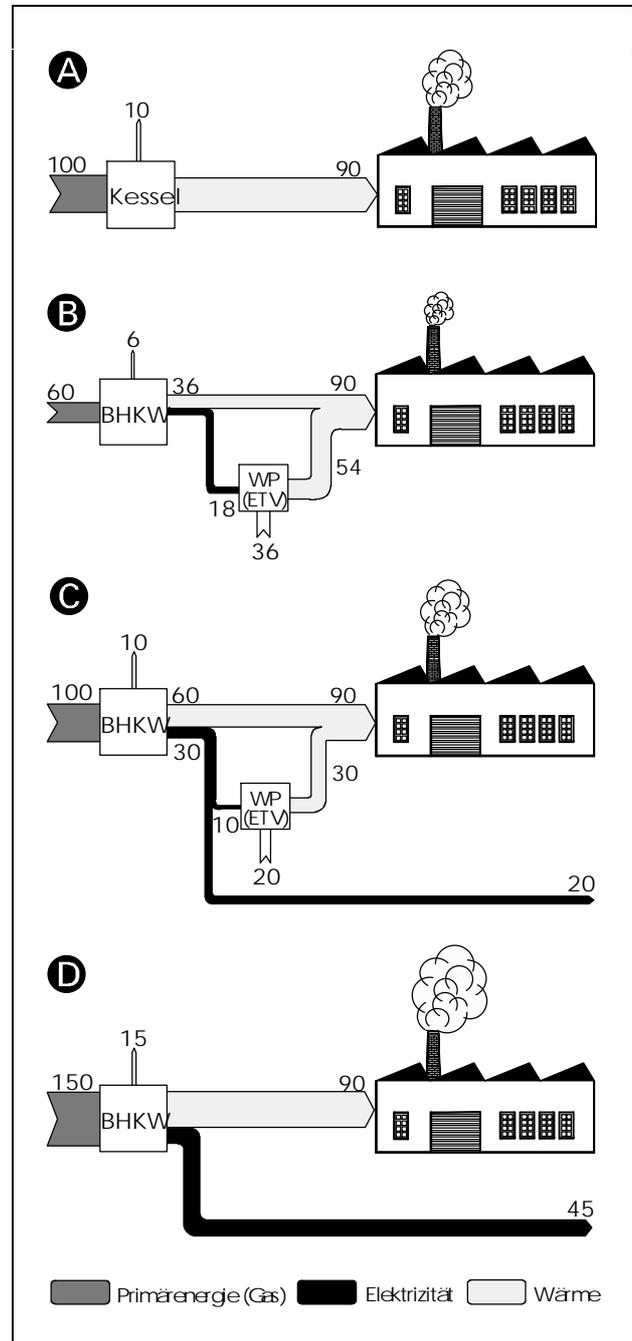


Bild 24: Energiebilanzen (vgl. mit Bild 25)  
 A) Moderne konventionelle Vergleichsanlage  
 B) Maximale Umweltschonung  
 C) Maximale umweltneutrale Stromproduktion  
 D) Maximale Stromproduktion

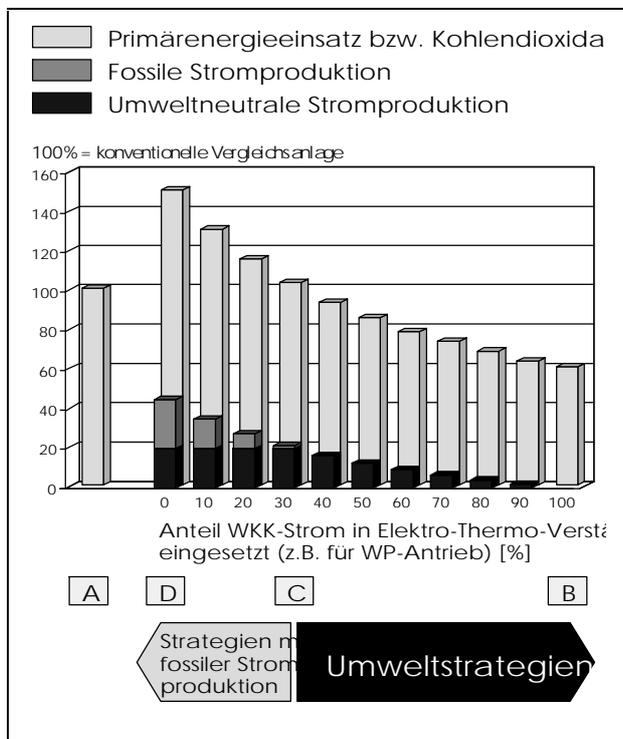


Bild 25: Je nach dem, wieviel Strom in Elektro-Thermo-Verstärkern eingesetzt wird (z.B. für den Wärmepumpen-Antrieb), ergeben sich unterschiedliche Strategien. Die konventionelle Vergleichsanlage A und die Grenzfälle B, C und D entsprechen den Energiebilanzen in Bild 24; es wurde also mit einer Elektro-Thermo-Verstärkung von 3,0 gerechnet.

Menge des umweltneutral erzeugten Stromes gegeneinander abgewogen werden.

- Wenn weniger als ein Drittel des WKK-Stromes in Elektro-Thermo-Verstärkern 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 25 wird eine konventionelle Anlage mit Gaskessel mit Gasmotor-BHKW's 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 Wärmeinheit etwa ein Viertel weniger Kohlendioxid produziert als Heizöl.

### Lenkungs- und Förderungsmassnahmen

Im letzten Abschnitt wurde 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 Elektro-Thermo-Verstärkern eingesetzten Strom spielt dabei eine wichtige Rolle. Falls die Umweltbelastung durch Luftschadstoffe und Kohlendioxid reduziert werden soll, muss eine **Umweltstrategie** verfolgt werden. 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 **Energienutzungsbeschluss** 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 26 zusammengestellt. Dabei ist es sicher zweckmässig, den örtlichen Rahmen nicht allzu weit zu ziehen. Beispielsweise könnten Wärmekraftkopplungsanlagen und Elektro-Thermo-Verstärker innerhalb einer Gemeinde, einer Stadt oder eines Kantons zueinander in Beziehung gesetzt werden.

In erster Linie sollten zuerst einmal Anlagen gefördert werden, bei denen besonders günstige Voraussetzungen vorliegen (Kasten 27). 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 zur Qualitätssicherung durch einen unabhängigen Energieplaner übernommen und finanziert werden soll (vgl. Kapitel 6).

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

**Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung:** günstige örtliche, zeitliche und temperaturniveaumässige Verhältnisse zwischen Wärmequelle und Wärmebedarf; möglichst konzentrierte Wärmequellen, d.h. vor allem Wasser

**Wärmepumpen:** geeignete Wärmequelle mit genügend grosser Verfügbarkeit, möglichst kleiner Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmeabgabe (Niedertemperaturheizung)

**Wärmekraftkopplung:** gesicherte Wärmeabnahme für mindestens 4'000 Betriebsstunden pro Jahr, günstige Voraussetzungen für eine Nahwärmeverteilung, günstige elektrische Anschlussbedingungen

Kasten 27

#### Lenkungs- und Förderungsmassnahmen

- Volkswirtschaftlich optimale Stromtarife (WKK-Rücklieferatarife, WP-Tarife)
- Finanzielle Beiträge oder zinslose Darlehen für Pilot- und Demonstrationsanlagen
- Realisierung von WRG/AWN-, WP- und WKK-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 Wärmeverbraucher
- Information und Weiterbildung

Kasten 26

## 4. Planungsgrundlagen

### 4.1 Hydraulische Grundlagen

Was hat Hydraulik mit Stromsparen zu tun?

Sehr viel! Es geht ja darum, den hochwertigen Strom, der heute noch zur Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung gebraucht wird, möglichst intelligent einzusetzen. Und dies ist oft – gerade wegen der Hydraulik – schwierig zu bewerkstelligen.



Die rationelle Verwendung von Elektrizität im Wärmesektor bedingt eine einwandfreie Hydraulik zur Wärmeverteilung.

Drei wichtige Formeln

In der Hydraulik interessieren immer wieder die gleichen drei Fragen: «Wie gross muss der Durchfluss sein?», «Wie gross ist die Druckdifferenz bei diesem Durchfluss?» und schliesslich, «Wie gross ist der Leistungsbedarf, um diesen Durchfluss zu bewerkstelligen?». Die drei vereinfachten Formeln in Kasten 29 beantworten diese Fragen mit genügender Genauigkeit.

Die vier hydraulischen Grundsaltungen

Praktisch alle Schaltungen, die in der Haustechnik vorkommen, beruhen auf den vier hydraulischen Grundsaltungen gemäss Tabelle 30:

- Beimischschaltung
- Umlenkschaltung
- Einspritzschaltung mit Dreiwegventil
- Drosselschaltung (meist ausgeführt als Einspritzschaltung mit Durchgangsventil)

Regelventile

In allen vier Grundsaltungen werden Regelventile in unterschiedlichen Bauformen eingesetzt:

- Durchgangsventile mit einem Eingang und einem Ausgang
- Dreiwegventile mit zwei Eingängen und einem Ausgang (Mischventile, hier dargestellt) oder einem Eingang und zwei Ausgängen (Verteilventile, hier nicht dargestellt, da eher selten eingesetzt)

Das hydraulische Verhalten der Regelventile wird unter der Einheitsbedingung von 1 bar Druckdifferenz durch die sogenannte Grundkennlinie beschrieben. Sowohl Durchgangs- wie Dreiwegventile werden üblicherweise mit zwei unterschiedlichen Grundkennlinien angeboten:

- Lineare Grundkennlinie: gleiche Hubänderungen haben gleiche Durchflussänderungen zur Folge

#### Weiterführende Literatur



Umwälzpumpen. Auslegung und Betriebsoptimierung. Bern: Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1991. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 724.330d)

Je ein ganzes Kapitel ist den Kleinanlagen, den Anlagen mit Verteilern, den Grossanlagen und den Spezialanlagen (Kälte, Wärmerückgewinnung, Warmwasser) gewidmet. Neben dem Grundlagenwissen enthält das Buch zahlreiche durchgerechnete Fallbeispiele.



Hydraulischer Abgleich von Heizungsanlagen. Bern: Impulsprogramm Haustechnik, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1988. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 724.620d)

Das Buch stellt Planungsgrundsätze im Hinblick auf einen problemlosen hydraulischen Abgleich als Grundlage für einen einwandfreien Betrieb auf. Dazu wird ein Fallbeispiel vollständig durchgerechnet. Neben dem ersten, vor allem für den Praktiker gedachten Teil, vermittelt der zweite Teil die theoretischen Grundlagen.



Steuern und Regeln in der Heizungs- und Lüftungstechnik. Bern: Impulsprogramm Haustechnik, Bundesamt für Konjunkturfragen, 2. Aufl., 1987. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 724.606d)

Dieses Buch vermittelt die Grundlagen der Steuer- und Regeltechnik sowie der Hydraulik, speziell zugeschnitten für die in der Schweiz übliche Haustechnik. Obwohl bereits vor 8 Jahren geschrieben, ist nur das Kapitel «Gerätetechnik» nicht mehr unbedingt aktuell.

Kasten 28

Durchfluss

$$\dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]} = 0,86 \frac{\dot{Q} \text{ [kW]}}{\Delta\vartheta \text{ [K]}}$$

Druckdifferenz

$$\Delta p \text{ [kPa]} = 100 \cdot \left( \frac{\dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]}}{k_v \text{ [m}^3\text{/h]}} \right)^2$$

oder umgestellt:

$$\dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]} = 0,1 \cdot k_v \text{ [m}^3\text{/h]} \cdot \sqrt{\Delta p \text{ [kPa]}}$$

Pumpenleistung

$$P_{\text{hydraul.}} \text{ [kW]} = \frac{\Delta p \text{ [kPa]} \cdot \dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]}}{3600}$$

oder mit  $\eta_{\text{Pumpe}} = P_{\text{hydraul.}} / P_{\text{Pumpe}}$ :

$$P_{\text{Pumpe}} \text{ [kW]} = \frac{\Delta p \text{ [kPa]} \cdot \dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]}}{3600 \cdot \eta_{\text{Pumpe}} \text{ [-]}}$$

Formelzeichen und Benennungen

$\dot{V}$  = Durchfluss [m<sup>3</sup>/h]  
 $Q$  = Wärmeleistung [kW]  
 $\Delta\vartheta$  = Temperaturdifferenz [K]  
 $\Delta p$  = Druckdifferenz [kPa]  
 $k_v$  =  $k_v$ -Wert [m<sup>3</sup>/h]  
 $P_{\text{hydraul.}}$  = hydraulische Leistung der Pumpe [kW]  
 $P_{\text{Pumpe}}$  = Leistungsaufnahme der Pumpe [kW]  
 $\eta_{\text{Pumpe}}$  = Pumpenwirkungsgrad [-]

Wichtiger Hinweis: Diese Formeln gelten für Wasser von 5...95°C. Es handelt sich um Zahlenwertgleichungen, deren Einheiten mathematisch nur aufgehen, wenn auch die Faktoren mit allen Einheiten eingesetzt werden, was in der Praxis aber kaum je gemacht wird.

Der Faktor «0,86» berücksichtigt die spezifische Wärmekapazität und die Dichte von Wasser:

$$0,86 \text{ [m}^3\text{K/kWh]} = \frac{3600 \text{ [s/h]} \cdot 1000 \text{ [W/kW]}}{4190 \text{ [Ws/kgK]} \cdot 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}}$$

Die beiden Faktoren «100» bzw. «0,1» berücksichtigen den Referenzdruck von 1 bar, bei dem die  $k_v$ -Werte messtechnisch bestimmt werden:

$$100 \text{ [kPa]} = 1 \text{ [bar]}$$

$$0,1 \text{ [1/\sqrt{kPa}]} = \sqrt{1/100} \text{ [kPa]}$$

Und schliesslich rechnet der Faktor «3600» noch Stunden in Sekunden um:

$$3600 \text{ [s/h]} = 3600 \text{ [s]} / 1 \text{ [h]}$$

- Gleichprozentige Grundkennlinie: gleiche Hubänderungen ergeben eine prozentual gleich grosse Änderung des aktuellen Durchflusses

Wenn nun ein Ventil in eine hydraulische Schaltung eingebaut wird, verhält es sich nicht mehr entsprechend der Grundkennlinie, weil die Druckdifferenz über dem Ventil zu einem variablen Teil des Gesamtdruckgefälles der Anlage wird. Dies hat zur Folge, dass die Grundkennlinie mehr oder weniger deformiert wird. Mit zunehmender Deformation wird die Genauigkeit und die Geschwindigkeit der Regelung immer mehr beeinträchtigt, und im Extremfall wird der Regelkreis instabil und beginnt zu schwingen.

#### Ventilautorität

Als Mass für die Deformation der Grundkennlinie wird die Ventilautorität herangezogen. Sie wird als Verhältnis zwischen der Druckdifferenz über dem Regelquerschnitt des geöffneten Ventils bei Nenndurchfluss und der maximal auftretenden Druckdifferenz über dem Regelquerschnitt des geschlossenen Ventils definiert. In Tabelle 30 sind die Formeln zur Berechnung der Ventilautorität VA für alle vier Grundschaltungen angegeben. Dabei spielt der Druckabfall über demjenigen Teil der Schaltung eine wichtige Rolle, dessen variabler Durchfluss durch das Ventil beeinflusst wird (in Tabelle 30 fett hervorgehoben). Im allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass keine Probleme auftreten, solange gilt:

$$VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{\text{var},100}} \geq 0,5$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta p_{V,100} \geq \Delta p_{\text{var},100}$$



Der Druckverlust über dem offenen Regelventil ( $\Delta p_{V,100}$ ) muss gleich gross oder grösser sein als der Druckverlust über der Strecke mit variablem Durchfluss ( $\Delta p_{\text{var},100}$ ).

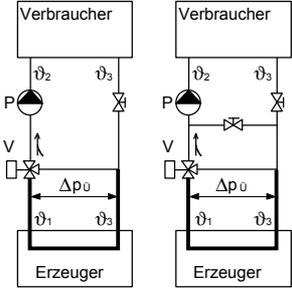
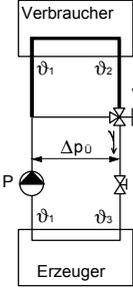
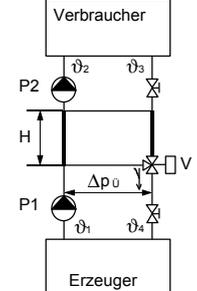
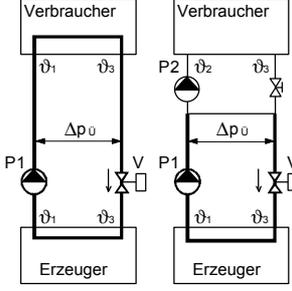
	<p><b>Beimischschaltung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Übergabe-Druckdifferenz möglichst klein → <math>\Delta p_0 \leq 3 \text{ kPa}</math></li> <li>• Variabler Durchfluss im Primärkreis</li> <li>• Konstanter Durchfluss im Sekundärkreis → Temperaturregelung</li> <li>• Falls im Auslegepunkt <math>\vartheta_1 &gt; \vartheta_2</math> Schaltung rechts einsetzen</li> <li>• Anwendung: Verteiler ohne Hauptpumpe, druckdifferenzloser Verteiler</li> </ul>	<p>Ventildurchfluss</p> $\dot{V}_V [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_1 - \vartheta_3 [\text{K}]}$ <p>Pumpendurchfluss</p> $\dot{V}_P [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_2 - \vartheta_3 [\text{K}]}$ <p>Ventilautorität</p> $VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}}$
	<p><b>Umlenkschaltung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Übergabe-Druckdifferenz <math>\Delta p_0</math> konstant → Druckabfall über Verbraucher durch Primärpumpe überwunden</li> <li>• Konstanter Durchfluss im Primärkreis</li> <li>• Variabler Durchfluss im Sekundärkreis → Mengenregelung</li> <li>• Bei Teillast Temperaturschichtung im Verbraucher → Anwendung im Komfortbereich eingeschränkt</li> <li>• Anwendung: Speicherladeregulung, Kühler mit Entfeuchtung</li> </ul>	<p>Ventildurchfluss</p> $\dot{V}_V [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_1 - \vartheta_2 [\text{K}]}$ <p>Pumpendurchfluss</p> $\dot{V}_P [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_1 - \vartheta_3 [\text{K}]}$ <p>Ventilautorität</p> $VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}}$
	<p><b>Einspritzschaltung mit Dreiwegventil</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Übergabe-Druckdifferenz <math>\Delta p_0</math> konstant → Druckabfall über Ventil durch Primärpumpe überwunden</li> <li>• Konstanter Durchfluss im Primärkreis</li> <li>• Konstanter Durchfluss im Sekundärkreis → Temperaturregelung</li> <li>• Gefahr der Einrohrzirkulation → <math>H \geq 10</math> Rohrdurchmesser</li> <li>• Nachteil: Rücklauftemperatur <math>\vartheta_4</math> wird hochgemischt</li> <li>• Anwendung: Lufterhitzer u. Einspritzverteiler mit hoher Rücklauftemperatur</li> </ul>	<p>Ventildurchfluss</p> $\dot{V}_V [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_1 - \vartheta_3 [\text{K}]}$ <p>Pumpendurchflüsse</p> $\dot{V}_{P1} [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_1 - \vartheta_4 [\text{K}]}$ $\dot{V}_{P2} [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_2 - \vartheta_3 [\text{K}]}$ <p>Ventilautorität</p> $VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}}$
	<p><b>Drosselschaltung (Einspritzschaltung mit Durchgangsventil)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Übergabe-Druckdifferenz <math>\Delta p_0</math> konstant → weil Durchfluss variabel, Druckdifferenzregelung sinnvoll</li> <li>• Variabler Durchfluss → Mengenregelung</li> <li>• Für konstanten Durchfluss im Sekundärkreis Schaltung rechts einsetzen</li> <li>• Vorteil: Rücklauftemperatur wird nicht hochgemischt</li> <li>• Anwendung: Lufterhitzer u. Einspritzverteiler mit tiefer Rücklauftemperatur</li> </ul>	<p>Ventildurchfluss</p> $\dot{V}_V [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_1 - \vartheta_3 [\text{K}]}$ <p>Pumpendurchflüsse</p> $\dot{V}_{P1} [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_1 - \vartheta_3 [\text{K}]}$ $\dot{V}_{P2} [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \frac{\dot{Q} [\text{kW}]}{\vartheta_2 - \vartheta_3 [\text{K}]}$ <p>Ventilautorität</p> $VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,0}}$

Tabelle 30: Die vier hydraulischen Grundschaltungen.  $\Delta p_{V,100}$  ist der Druckabfall über dem Ventil bei 100% Durchfluss,  $\Delta p_{V,0}$  derjenige bei 0%.  $\Delta p_{var,100}$  ist der Druckabfall über der fett eingezeichneten Strecke mit variablem Durchfluss.

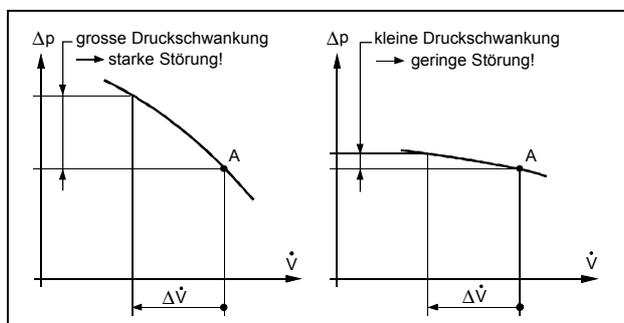


Bild 31: Steile (links) und flache Pumpenkennlinie (rechts)

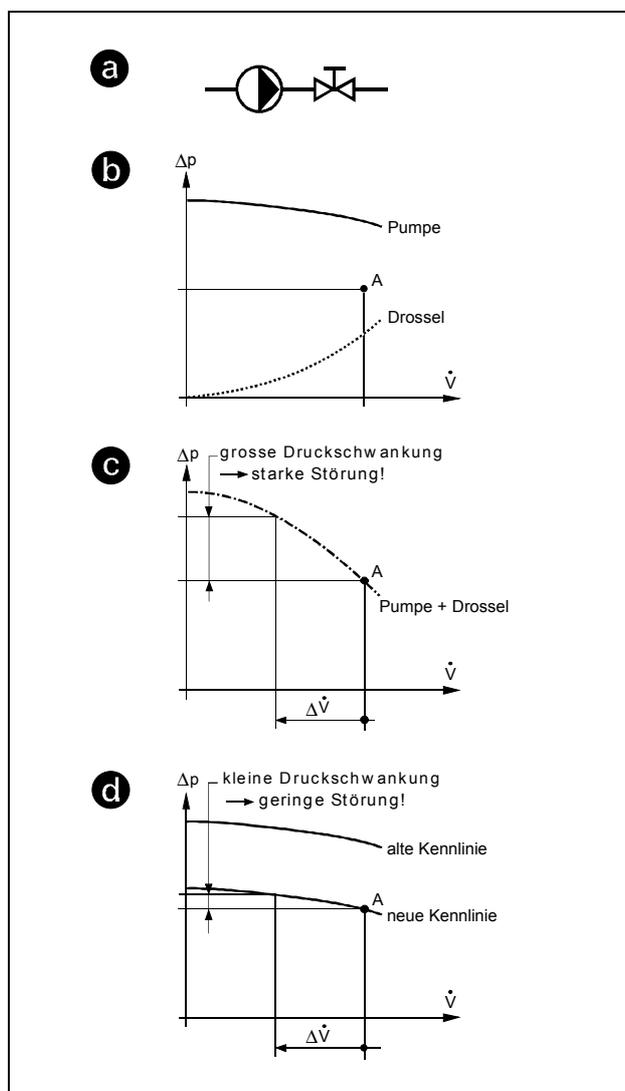


Bild 32: Zum Beispiel im Text: Was passiert beim Drosseln einer Umwälzpumpe?

### Ventilkennlinie

Neben der Ventilautorität spielt auch noch das Übertragungsverhalten allfälliger Wärmetauscher (Lufterhitzer, Luftkühler usw.) eine Rolle, welches durch den sogenannten a-Wert ausgedrückt wird (vgl. «Steuern und Regeln in der Heizungs- und Lüftungstechnik», Kasten 28). Da die Berechnung des a-Wertes relativ aufwendig ist, wird diesem üblicherweise durch die geeignete Wahl der Grundkennlinie Rechnung getragen. Diese Vereinfachung ist in der Regel zulässig, solange gleichzeitig eine Ventilautorität von 0,5 eingehalten wird. Damit können vereinfachte Richtlinien zur Wahl der Grundkennlinie aufgestellt werden.



Regelkreis ohne Wärmetauscher: Regelventil mit linearer Grundkennlinie. Regelkreis mit Lufterhitzer oder Luftkühler: Regelventil mit gleichprozentiger Grundkennlinie oder Tellerventil mit stetigem Magnetantrieb (lineare Grundkennlinie mit konkavem Verlauf im Schliessbereich).

### Pumpenkennlinie

Die Pumpenkennlinie zeigt die Förderhöhe (Druckdifferenz) in Funktion des Förderstromes (Durchfluss). Es kann zwischen flachen Kennlinien von niedertourigen Pumpen und steilen Kennlinien von mittel- und hohtourigen Pumpen unterschieden werden (Bild 31). Da in Heizungsanlagen der Durchfluss oft variabel ist (z.B. Anlagen mit Thermostatventilen) und Druckschwankungen unerwünscht sind – weil die Gefahr von Lärmentwicklung besteht –, sollten in Netzen mit variablem Durchfluss keine Umwälzpumpen mit steilen Kennlinien eingesetzt werden. Letztere sind nur für Netze mit konstantem Durchfluss geeignet, also z.B. für Anlagen ohne Thermostatventile oder für Wassererwärmer- und Lufterhitzerpumpen.



Oft muss man feststellen, dass eine bereits installierte Umwälzpumpe zu gross ist (Bild 32a). Die Frage ist dann: Hat eine gedrosselte Pumpe hydraulische Nachteile? Bild 32b zeigt die flache Kennlinie einer solchen zu gross dimensionierten niedertourigen Pumpe. Der Durchfluss soll nun mit Hilfe einer Drossel auf den gewünschten Arbeitspunkt A abgeglichen werden. Das Ergebnis zeigt Bild 32c: Aus der flachen Kennlinie einer (teuren) niedertourigen Pumpe wurde eine steile Kennlinie, wie sie eine hohtourige (Billig-)Pumpe aufgewiesen hätte – eine Drosselung der Pumpe hat also gewichtige hydraulische Nachteile! Die richtige Lösung zeigt Bild 32d: Durch Umschaltung auf eine kleinere Drehzahl oder Austausch des Laufrades oder

Auswechseln der Pumpe wurde die Kennlinie etwa parallel nach unten in den Arbeitspunkt verschoben.

#### Netzkennlinie

Ähnlich der Pumpenkennlinie kann auch für das Rohrnetz und die Verbraucher der Druckabfall in Abhängigkeit des Durchflusses entsprechend der Druckdifferenz-Gleichung von Kasten 29 dargestellt werden. Diese Darstellung nennt man Netzkennlinie.

Bild 33 zeigt die Netzkennlinien eines eher grosszügig (N1) und eines eng bemessenen Netzes (N2) mit den dazugehörigen Pumpenkennlinien (P1, P2). Die Netz- und die Pumpenkennlinien schneiden sich in den Arbeitspunkten A1 bzw. A2 bei Nenndurchfluss.

#### Verbraucherautorität

Es hat sich als zweckmässig erwiesen, alle Elemente zwischen den Anschlusspunkten der Verteilung, also Heizkörper- bzw. Fussbodenheizungsventil (Handventil oder Thermostatventil), Heizkörper bzw. Fussbodenheizungskreis und Rücklaufverschraubung (mit oder ohne Voreinstellung) generell als Verbraucher zu bezeichnen (Bild 34). Damit kann dann nämlich eine Verbraucherautorität definiert werden, die für die Beurteilung des hydraulischen Gleichgewichts einer Anlage sehr praktisch ist. Sie ist ein Kriterium dafür, wie stark ein Verbraucher bei Durchflussänderungen in der Anlage gestört wird. Die Verbraucherautorität wird als Verhältnis zwischen der Druckdifferenz über dem Verbraucher (z.B. Thermostatventil + Heizkörper + Rücklaufverschraubung) bei Nenndurchfluss und der maximal über dem Verbraucher auftretenden Druckdifferenz definiert.



Das Gesagte soll nun noch anhand eines Beispiels illustriert werden. In den Druckschaubildern 35a und 35b sind die Druckverhältnisse so dargestellt, dass die gezeichnete Höhe der Druckdifferenz über dem entsprechenden Bauteil entspricht:

- Die ausgezogenen Linien zeigen die Druckverhältnisse bei Nenndurchfluss: In Bild 35a sind die Druckabfälle im Rohrnetz geringer als in Bild 35b (erkennbar am kleineren Winkel a).
- Die gestrichelten Linien zeigen die Druckverhältnisse bei Nulldurchfluss: In Bild 35a handelt es sich um eine Pumpe mit flacher und in Bild 35b mit steiler Kennlinie (erkennbar am grösseren Unterschied des Pumpendrucks zwischen Nenn- und Nulldurchfluss).

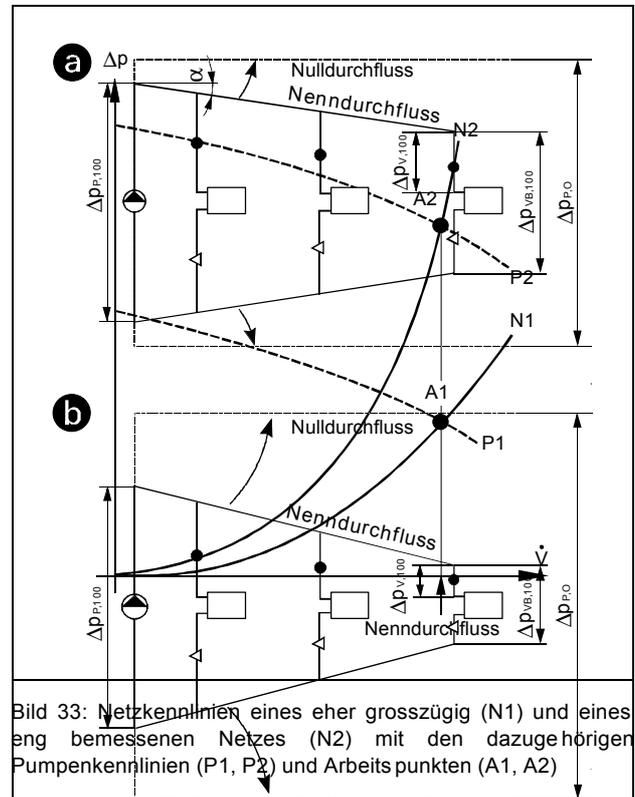


Bild 33: Netzkennlinien eines eher grosszügig (N1) und eines eng bemessenen Netzes (N2) mit den dazugehörigen Pumpenkennlinien (P1, P2) und Arbeitspunkten (A1, A2) bei Nenndurchfluss.

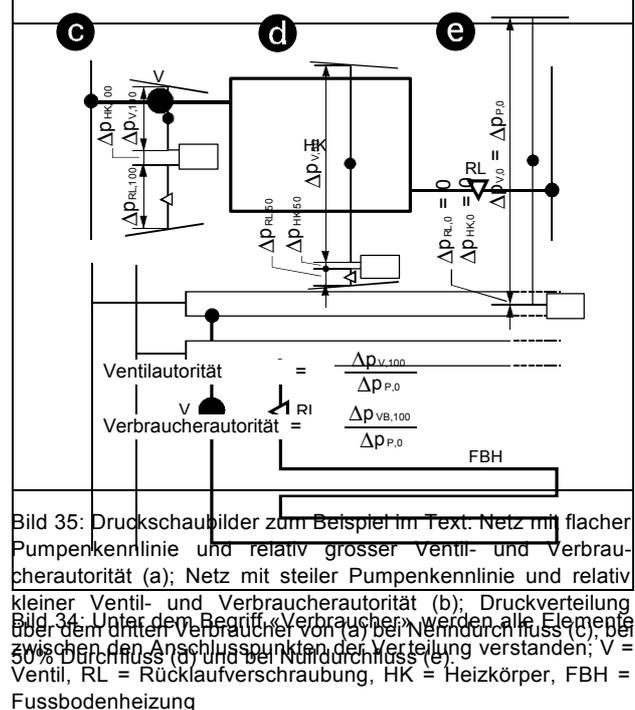


Bild 35: Druckschaubilder zum Beispiel im Text. Netz mit flacher Pumpenkennlinie und relativ grosser Ventil- und Verbraucherautorität (a); Netz mit steiler Pumpenkennlinie und relativ kleiner Ventil- und Verbraucherautorität (b); Druckverteilung über dem unteren Verbraucher von (a) bei Nenndurchfluss (c); bei 50% über dem Fluss (d); bei Nulldurchfluss (e).

Auslegungs-Kenngrösse	Zielwert	Grenzwert
Verbraucherautorität	0,5	0,3
Ventilautorität		
– Regelventile	0,5	0,3
– Thermostatventile	0,3	0,1
Maximale Druckdifferenz über den Strecken mit variablem Durchfluss bei Verteiler ohne Hauptpumpe	20% der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe	
Maximale Druckdifferenz über Thermostatventilen		
– Wohnbauten	20 kPa	
– Nichtwohnbauten	30 kPa	

● stabile Anlageverhältnisse  
 ● kleiner Pumpenstromverbrauch  
 ● keine Fehlzirkulationen  
 ● keine Lärmprobleme

Tabelle 36: Empfehlungen für die Auslegungs-Kenngrössen. Das Ziel der Auslegung ist eine stabile Anlage ohne Lärmprobleme, die erst noch möglichst energiesparend arbeitet.

Die Ventilautorität und die Verbraucherautorität sind ein Mass dafür, wie gross die Druckdifferenzschwankung im Extremfall über dem Ventil (Ventilautorität) und über dem Verbraucher (Verbraucherautorität) sein kann. Man sieht sofort, dass sowohl die Ventilautorität wie auch die Verbraucherautorität in Bild 35a wesentlich besser ist als in Bild 35b.

Wie das Verhalten zwischen Nenn- und Nulldurchfluss aussieht, zeigen die Bilder 35c bis 35e anhand des dritten Verbrauchers in Bild 35a (der Einfachheit halber wurde angenommen, dass alle Thermostatventile gleichmässig schliessen):

- Bild 35c: Alle Thermostatventile stehen auf Nenn-durchfluss (=100%).
- Bild 35d: Alle Thermostatventile stehen auf 50% Durchfluss. Der Pumpendruck ist entsprechend der Pumpenkennlinie angestiegen. Die Druckabfälle über Heizkörper und Rücklaufverschraubung sind auf einen Viertel zurückgegangen.
- Bild 35e: Alle Thermostatventile geschlossen. Der Pumpendruck ist entsprechend der Pumpenkennlinie auf den maximalen Wert bei Nulldurchfluss angestiegen. Die Druckabfälle über Heizkörper und Rücklaufverschraubung sind auf null zurückgegangen und die volle maximale Druckdifferenz liegt nun über den Regelquerschnitten der Thermostatventile.

Das Ziel: eine stabile Anlage ohne Lärm!

Wenn die Frage lautet: «Wie ist die gegenseitige Beeinflussung der Verbraucher bei Druckschwankungen im Verteilnetz?», dann ist es sinnvoll, die Schwankungsbreite über dem Verbraucher, also die Verbraucherautorität zu betrachten. Die Verbraucherautorität ist ein Kriterium für die Netzstabilität.

Wenn dagegen die Frage lautet: «Wie verhält sich die Leistungsabgabe, wenn das Regelventil korrigierend eingreift, und wie wirken Störungen der Anlage auf das Regelverhalten zurück?», dann ist einzig und allein die Schwankungsbreite der Druckdifferenz über dem Regelquerschnitt des Ventils, also die Ventilautorität, massgebend. Bei zu kleiner Ventilautorität bewirkt bereits ein Ventilhub von wenigen Hundertstel Millimeter, dass praktisch die volle Heizleistung abgegeben wird und deshalb der Regler praktisch nur im Auf-Zu-Betrieb regeln kann. (Diesem Effekt kann teilweise durch eine entsprechende nichtlineare Ventilkennlinie entgegengewirkt werden.)

In der Praxis taucht aber noch häufig eine weitere Frage auf: «Wie gross darf die maximale Druckdifferenz über der

Strecke mit variablem Durchfluss bei einem Verteiler ohne Hauptpumpe sein?» Wenn nämlich diese Druckdifferenz allzu gross wird, beeinflussen sich die einzelnen Gruppen gegenseitig. Um dies zu verhindern gilt es – noch zusätzlich zur Regel über die Ventilautorität! – die nachfolgende Regel einzuhalten.



Bei einem Verteiler ohne Hauptpumpe darf die maximale Druckdifferenz über der Strecke mit variablem Durchfluss nicht grösser sein als 20% der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe im Auslegepunkt.

Aber auch Lärmprobleme müssen beachtet werden, insbesondere pfeifende Thermostatventile. Wenn die nachfolgende Regel eingehalten wird, ergeben sich im allgemeinen keine Probleme.



Die Druckdifferenz über den Thermostaventilen darf in Wohnhäusern in keinem Betriebsfall über 20 kPa steigen (Nichtwohnbauten: 30 kPa).

Die wichtigsten Auslegebedingungen, die zu stabilen Anlageverhältnissen führen, sind in Tabelle 36 zusammengefasst.

## 4.2 Umwälzpumpen

### Stromverbrauch

Die Auswahl und Dimensionierung von Umwälzpumpen ist vor allem ein hydraulisches Problem. Aber auch auf den Stromverbrauch muss von Anfang an Rücksicht genommen werden: Der Stromverbrauch der Umwälzpumpen sollte weniger als 1% des Wärme-Endenergieverbrauchs betragen. Umgesetzt auf die Zielwerte gemäss SIA 380/1 ergibt dies die Werte gemäss Tabelle 37.

In erster Linie ist eine exakte Auslegung ohne unnötige Reserven Voraussetzung für einen geringen Stromverbrauch. Drehzahl, Durchfluss, Druckdifferenz und Antriebsleistung hängen nämlich wie folgt zusammen:

- Der Durchfluss ändert sich proportional zur Drehzahl. Eine Halbierung der Drehzahl ergibt demnach eine Halbierung des Durchflusses. (Anschauliches Beispiel: Ein Wasserrad, das mit halber Drehzahl läuft, fördert nur halb so viele Schaufeln voll Wasser.)
- Die Druckdifferenz ändert sich wie das Quadrat der Drehzahl bzw. des Durchflusses. Eine Halbierung der Drehzahl bzw. des Durchflusses ergibt also eine Viertelung der Druckdifferenz.

Gebäude	SIA 380/1 $E_{\text{Wärme}}$ [MJ/m <sup>2</sup> a]	RAVEL $E_{\text{Pumpenstrom}}$ [MJ/m <sup>2</sup> a]
Einfamilienhaus	310	3,1
Mehrfamilienhaus	280	2,8
Verwaltungsgebäude	240	2,4
Schulen	240	2,4

Tabelle 37: Zielwerte für den Wärme-Endenergieverbrauch gemäss SIA 380/1 und daraus abgeleitete Zielwerte für den Umwälzpumpen-Stromverbrauch

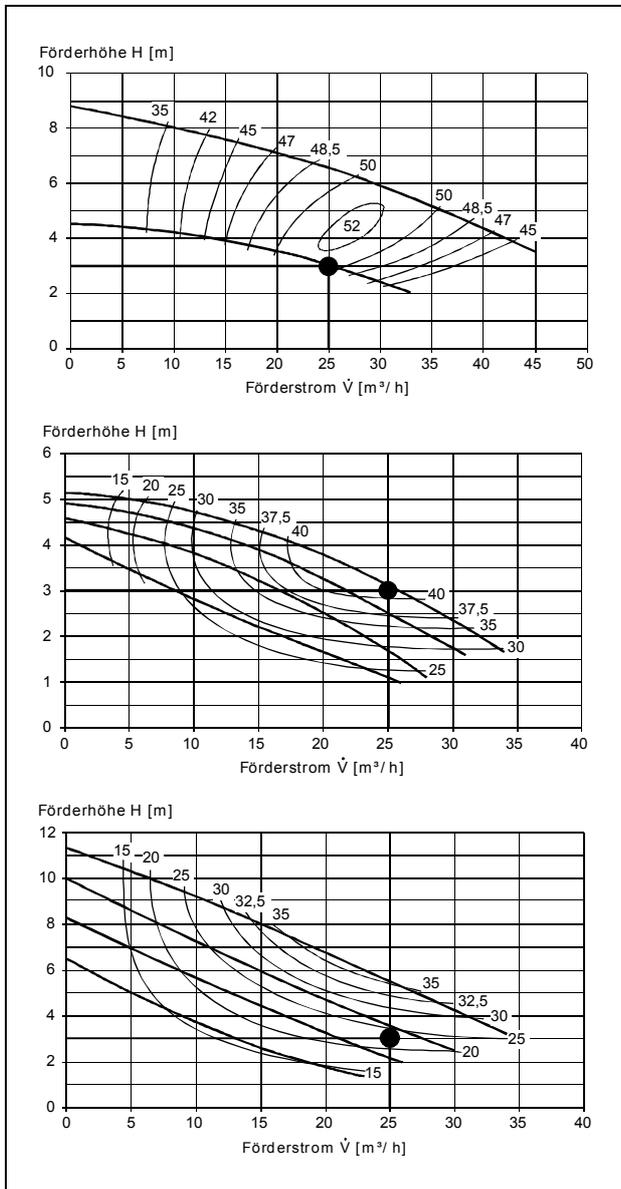


Bild 38: Beispiel für die Auslegung einer Hauptpumpe mit 3 mWS und 25 m³/h: Je nach Bauart und nach der Lage des Arbeitspunktes ergeben sich sehr unterschiedliche Wirkungsgrade!

- Die notwendige Antriebsleistung ändert sich wie die 3. Potenz der Drehzahl bzw. des Durchflusses. Eine Halbierung der Drehzahl bzw. des Durchflusses ergibt also – theoretisch – eine Achtelung der notwendigen Antriebsleistung.

Wichtig ist aber auch, dass Pumpen mit möglichst gutem Wirkungsgrad eingesetzt werden. Zwischen verschiedenen Bauarten, Typen und Fabrikaten bestehen nämlich grosse Unterschiede. Ein einfacher Vergleich wäre möglich, wenn im Pumpendiagramm, neben den Pumpenkennlinien, auch die Wirkungsgradkurven eingezeichnet würden (Muscheldiagramm). Leider ist dies heute nur bei grossen Sockelpumpen der Fall. Im Normalfall muss deshalb der Pumpenwirkungsgrad – mindestens im Arbeitspunkt! – mit Hilfe der Pumpenleistungs-Formel aus Kasten 29 berechnet werden. In Bild 38 sind die Muscheldiagramme eingezeichnet, und im folgenden Beispiel wird gezeigt, wie die Wirkungsgrade im Arbeitspunkt berechnet werden können, wenn das Muscheldiagramm fehlt.



Wie gross sind die Pumpenwirkungsgrade der drei Pumpen von Bild 38 im Arbeitspunkt bei 3 mWS Förderhöhe und 25 m³/h Förderstrom? Die Datenblätter geben in den Arbeitspunkten Leistungsaufnahmen von 415 W (Inline-Pumpe), 520 W (Nassläufer, niedertourig) und 900 W (Nassläufer, hochtourig) an. Die hydraulische Leistung ist selbstverständlich bei allen drei Pumpen gleich, nämlich (vgl. Kasten 29):

$$P_{\text{hydraul.}} = \frac{30 \text{ kPa} \cdot 25 \text{ m}^3/\text{h}}{3600} = 0,208 \text{ kW} = 208 \text{ W}$$

Somit ergeben sich folgende Wirkungsgrade:

$$h = \frac{208 \text{ W}}{415 \text{ W}} = 0,50 \quad (\text{Inline-Pumpe})$$

$$h = \frac{208 \text{ W}}{520 \text{ W}} = 0,40 \quad (\text{Nassläufer, niedertourig})$$

$$h = \frac{208 \text{ W}}{900 \text{ W}} = 0,23 \quad (\text{Nassläufer, hochtourig})$$

Es lohnt sich also, Pumpen miteinander zu vergleichen: Je nach Bauart und Lage des Arbeitspunktes ergeben sich sehr unterschiedliche Wirkungsgrade – im Beispiel zwischen 23 und 50%. Kleinpumpen kommen auch im besten Betriebspunkt kaum über 15% (Bilder 39 und 40). Zusammenfassend kann folgendes gesagt werden:

- Kleinere Pumpen haben tendenziell schlechtere Wirkungsgrade als grössere

- Trockenläufer mit Normmotor (Inline- und Sockelpumpen) sind besser als Nassläufer mit integriertem Spaltrahmotor
- Zwischen niedertourigen und hoctourigen Nassläuferpumpen besteht bezüglich Wirkungsgrad kein signifikanter Unterschied; es bestehen aber beträchtliche Unterschiede zwischen vergleichbaren Typen
- Die Lage des Arbeitspunktes im Pumpendiagramm beeinflusst den Wirkungsgrad entscheidend; das Wirkungsgrad-Optimum liegt oft im mittleren Drittel der Kennlinie für die höchste Drehzahlstufe; es gibt aber auch Ausnahmen

#### Umwälzpumpen mit steilen Kennlinien

Umwälzpumpen mit einer Drehzahl von 1900...2400 Umdrehungen pro Minute sind heute bei den Kleinpumpen (Nassläufer) wegen ihrer Preisgünstigkeit weit verbreitet. Durch die steilen Kennlinien (Bild 39) ergeben sich aber bei variablem Durchfluss grosse Druckdifferenzschwankungen mit entsprechenden Lärm- und Regelproblemen. Mittel- und hoctourige Umwälzpumpen (ohne Drehzahlsteuerung) sollten deshalb nur bei konstantem Durchfluss eingesetzt werden, wie z.B. in Anlagen ohne Thermostatventilen oder als Wassererwärmer- und Luftherizerpumpen.

#### Umwälzpumpen mit flachen Kennlinien

Mit einer Drehzahl von 1300...1400 Umdrehungen pro Minute haben niedertourige Umwälzpumpen wesentlich flachere Kennlinien (Bild 40) als vergleichbare hoctourige Modelle (Bild 39). Sie sind deshalb auch für Anlagen mit variablem Durchfluss geeignet: In Anlagen mit Thermostatventilen sind in der Regel bis zu einer Auslege-Förderhöhe von etwa 1,5 mWS keine Massnahmen zur Druckdifferenzbegrenzung nötig. Dieser Vorteil muss allerdings durch einen höheren Preis erkauft werden.

#### Drehzahlgesteuerte Umwälzpumpen mit einstellbarer flacher Kennlinie

Nassläuferpumpen mit eingebauter Drehzahlsteuerung gewinnen zunehmend an Bedeutung. Diese Bauart kann exakt auf die gewünschte Förderhöhe eingestellt werden, und dieser Wert wird über den gesamten Förderstrombereich konstant gehalten (Bild 41). Es ergibt sich also eine vollkommen flache Kennlinie, die erst noch – in bestimmten Grenzen – beliebig wählbar ist.

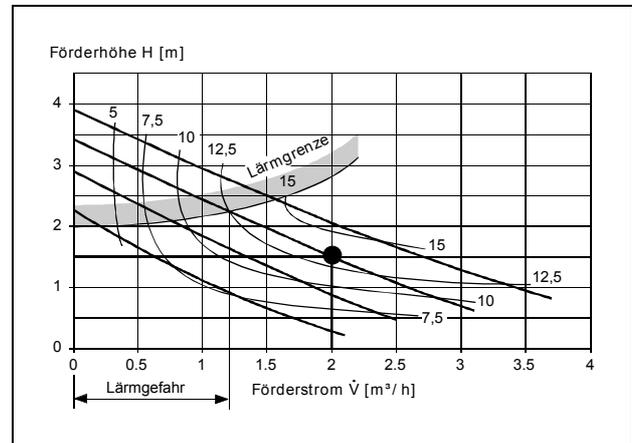


Bild 39: Beispiel für die Auslegung einer Heizgruppenpumpe mit steiler Kennlinie für 1,5 mWS und 2,0 m³/h: Wenn der Durchfluss unter 1,2 m³/h fällt (Schliessen der Thermostatventile), wird die Lärmgrenze überschritten und es besteht die Gefahr von Geräuschbelastigungen durch die Thermostatventile; ausserdem wird die Ventilautorität der Thermostatventile zwangsläufig schlecht sein.

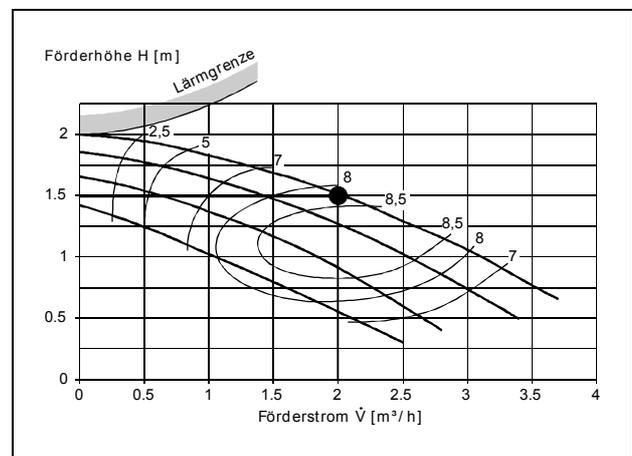


Bild 40: Das gleiche Auslegungsbeispiel wie Bild 39 ergibt mit einer Umwälzpumpe mit flacher Kennlinie sicher keine Probleme: Die Lärmgrenze wird auch bei Nulldurchfluss nicht überschritten und auch eine genügende Thermostatventilautorität sollte möglich sein! (Weniger gut ist der schlechte Wirkungsgrad, dies ist aber keine Frage von hoch- und niedertourig, sondern ein Problem dieses einen Pumpenmodells.)

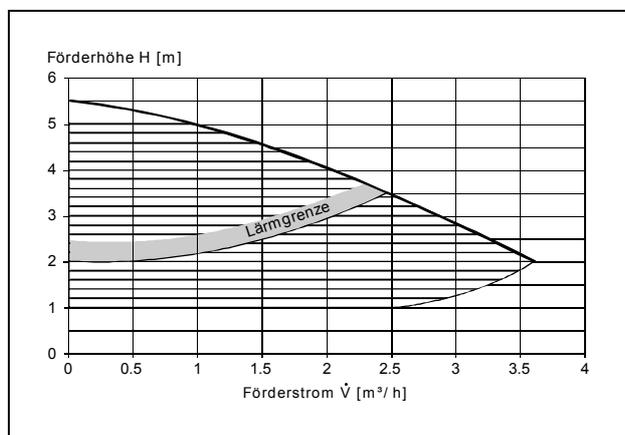


Bild 41: Beispiel des Kennlinienfeldes einer drehzahlgesteuerten Umwälzpumpe mit einstellbarer flacher Kennlinie

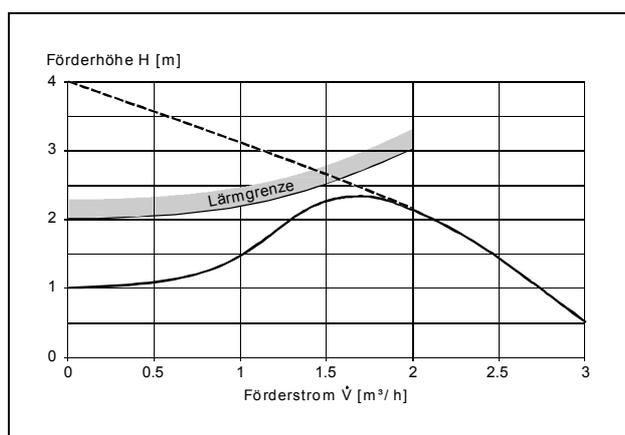


Bild 42: Beispiel einer drehzahlgesteuerten Umwälzpumpe mit «negativer» Kennlinie: In jedem Betriebspunkt besteht ein grosser Abstand von der Lärmgrenze!

Drehzahlgesteuerte Umwälzpumpen können also tatsächlich auf 2 mWS Förderhöhe ausgelegt werden, ohne dass mit Lärmproblemen gerechnet werden muss.

Drehzahlgesteuerte Umwälzpumpen mit «negativer» Kennlinie

Noch grössere Auslege-Förderhöhen bei gleichzeitig grösserem Abstand von der Lärmgrenze sind mit drehzahlgesteuerten Umwälzpumpen mit sogenannten «negativen» Kennlinien möglich: Gegen kleine Durchflüsse hin steigt die Förderhöhe nicht an, sondern sie fällt ab (Bild42).

Drehzahlsteuergeräte

Prinzipiell gibt es zwei Arten der Drehzahlsteuerung:

- Phasenanschnittgeräte, nur für Nassläuferpumpen mit Spaltrohrmotor geeignet (in Bezug auf elektrische Netzstörungen problematisch; über 1 kW Anschlussleistung bei den meisten Elektrizitätswerken bewilligungspflichtig)
- Frequenzumformer, für alle Pumpen mit Asynchronmotor geeignet; wesentlich verlustärmerer Betrieb als Phasenanschnitt

Da Pumpen mit eingebauter Drehzahlsteuerung heute relativ preisgünstig sind, dürften separat zu installierende Drehzahlsteuergeräte in Zukunft nur noch bei grösseren Pumpen Anwendung finden. Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass separat installierte Drehzahlsteuergeräte einige wesentlich Vorteile aufweisen:

- Keine Einschränkungen bei der Pumpenwahl
- Beliebige Regelgrösse (Druckdifferenz, Temperaturdifferenz usw.)
- Beliebiger Messort für die Regelgrösse

Druckdifferenzregelung in Anlagen mit Thermostatventilen

Zu Diskussionen führt immer wieder die Frage, wo die Druckdifferenzmessung einer drehzahlgesteuerten Pumpe bei einer Heizgruppe mit Thermostatventilen erfolgen soll. Prinzipiell gibt es die Möglichkeiten, gemäss Bild 43.

Fall A: Ohne drehzahlgesteuerte Pumpe kann die Anlage bei der gegebenen (relativ steilen) Pumpenkennlinie auf eine Förderhöhe von  $\Delta p_{\max} = 12 \text{ kPa}$  ausgelegt werden. Damit wird bei Nulldurchfluss gerade die Lärmgrenze von 20 kPa (= 2 mWS) erreicht.

Fall B: Die Druckdifferenzmessung über der Pumpe ergibt zwar eine sehr flache Pumpenkennlinie. Entscheidend ist jedoch die Ersatzkennlinie bezüglich Punkt H, die durch den Druckverlust über der Strecke Z1 beeinflusst wird. Damit kann auf eine etwas höhere Auslege-Förderhöhe dimensioniert werden

( $\Delta p_{\max} = 15 \text{ kPa}$ ). Wenn der Druckabfall über der Strecke Z1 sehr klein ist (z.B. Einspritzschaltung), ergibt sich eine wesentlich bessere Ersatzkennlinie entsprechend Fall C. Fall C: Nur mit einer Druckdifferenzmessung im Vor- und Rücklauf kann die Pumpe tatsächlich auf die Höhe der Lärmgrenze ausgelegt werden ( $\Delta p_{\max} = 20 \text{ kPa}$ ), weil damit die Druckverluste über der Strecke Z2 kompensiert werden.

Fall D: Eine noch höhere Auslege-Förderhöhe ( $\Delta p_{\max} = 27 \text{ kPa}$ ) ergibt sich, wenn die Druckdifferenzmessung im Netz an der Stelle X erfolgt.

Fall B entspricht weitgehend einer Umwälzpumpe mit eingebauter Drehzahlsteuerung mit einstellbarer flacher Kennlinie (Bild 41). Und Fall D gleicht im Verhalten einer drehzahlgesteuerten Umwälzpumpe mit «negativer» Kennlinie (Bild 42). Letztere hat allerdings den Vorteil, dass keine aufwendige Druckdifferenzmessung im Netz draussen erfolgen muss.

Im vorliegenden Beispiel kann also mit einer drehzahlgesteuerten Pumpe im Teillastfall Strom gespart werden, und zudem kann ein wesentlich grösseres Netz ohne Lärmprobleme realisiert werden: Das Netz in Fall D kann rund doppelt so gross sein wie dasjenige in Fall A.

#### Druckdifferenzregelung in Fernleitungen

Ähnliche Probleme ergeben sich mit Fernleitungen auf Einspritzverteiler mit Durchgangsventilen. Bild 44 zeigt als Beispiel eine Fernleitung mit einem Druckabfall von 20 kPa bei Nenndurchfluss.

Fall E: Ohne drehzahlgesteuerte Pumpe muss der Druckabfall über dem Ventil 30 kPa sein, damit eine Ventilautorität von

$$VA = 30 \text{ kPa} / 60 \text{ kPa} = 0,5$$

eingehalten werden kann. Entsprechend gross muss auch die Pumpe gewählt werden.

Fall F: Bei Druckdifferenzmessung über der Pumpe oder bei einer Pumpe mit eingebauter Drehzahlsteuerung kann der Einfluss der Pumpenteilheit eliminiert werden. Damit muss der Druckabfall über dem Ventil nur noch 20 kPa für eine Ventilautorität von

$$VA = 20 \text{ kPa} / 40 \text{ kPa} = 0,5$$

sein. Es kann eine kleinere Pumpe eingesetzt werden.

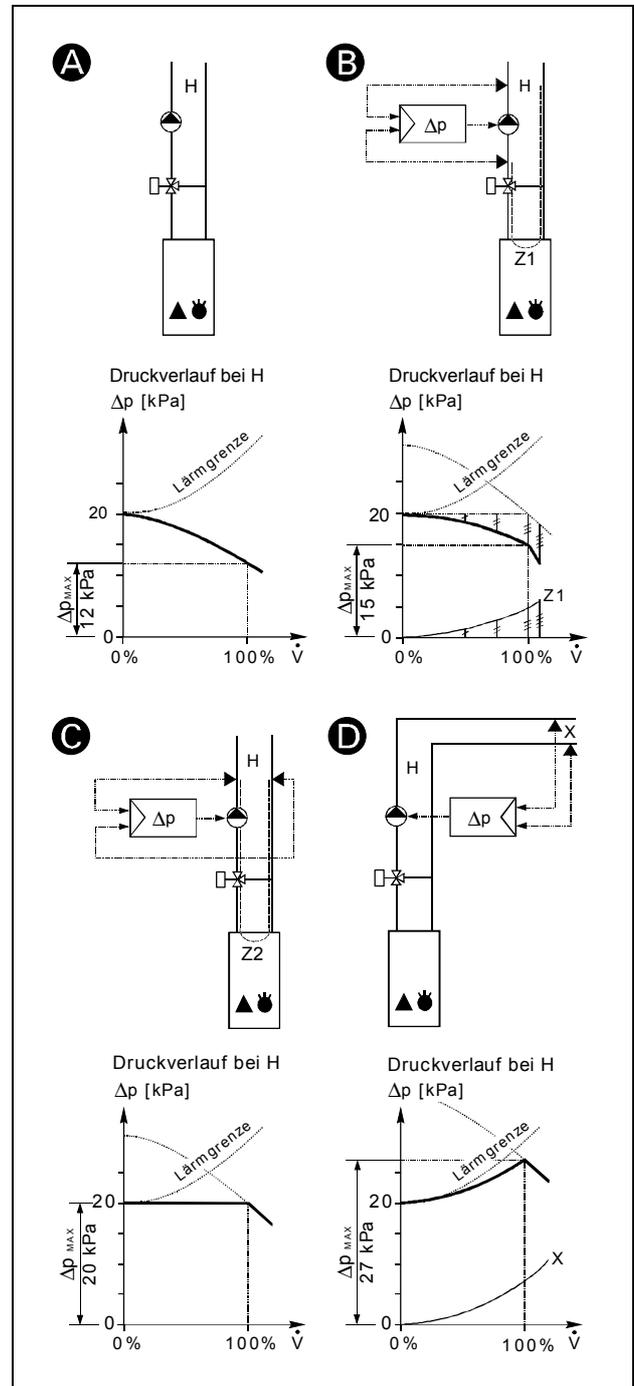


Bild 43: Druckdifferenzregelung in einer Anlage mit Thermostatventilen

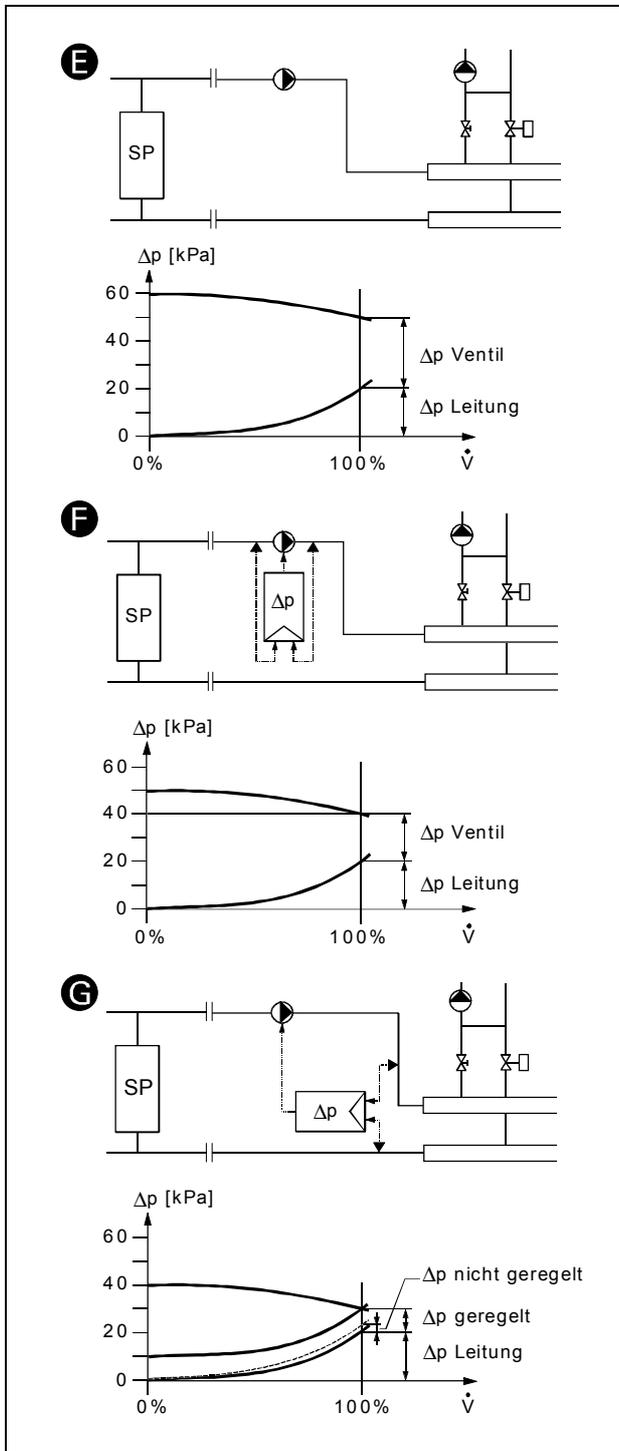


Bild 44: Druckdifferenzregelung einer Fernleitungspumpe für einen Einspritzverteiler mit Durchgangventilen

Fall G: Optimal werden die Verhältnisse aber nur bei einer Druckdifferenzmessung direkt über dem Verteiler. Ideal wäre es, wenn auf eine Druckdifferenz von null geregelt werden könnte (speziell bei einem bestehenden drucklosen Verteiler). Der technische Aufwand dazu ist aber viel zu gross, weshalb auf eine minimale Druckdifferenz von etwa 10 kPa geregelt werden muss. Wenn angenommen wird, dass der verbleibende nicht geregelte Druckabfall noch 2 kPa beträgt, ergibt sich eine Ventilautorität von

$$VA = (10 - 2) \text{ kPa} / 10 \text{ kPa} = 0,8$$

und die Pumpe wird nochmals kleiner!

Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass eine Druckdifferenzregelung nicht nur Strom im Teillastbereich spart, sondern dass die Pumpe infolge hydraulischer Vorteile wesentlich kleiner ausgelegt werden kann.

#### Pumpenbetrieb bei Nulldurchfluss

Immer wieder taucht die Frage auf, ob Umwälzpumpen auch bei Nulldurchfluss – gewissermassen gegen geschlossene Schieber – betrieben werden dürfen. Sicherheitshalber sollte dazu immer der Pumpenhersteller gefragt werden. Im allgemeinen kann aber folgende Antwort gegeben werden:

- Nassläuferpumpen unter 1 kW Wellenleistung erleiden auch bei längerem Betrieb mit Nulldurchfluss keinen Schaden, wenn die Betriebstemperatur mindestens 10 K unter der maximal zulässigen Temperatur liegt und keine Rückzirkulation eintreten kann
- Nassläuferpumpen über 1 kW Wellenleistung und alle Trockenläuferpumpen erleiden bei kurzzeitigem Nulldurchfluss (einige Minuten) keinen Schaden; im Dauerbetrieb muss aber ein Mindestförderstrom von etwa 10% gewährleistet sein

Netze mit Thermostatventilen und einwandfrei eingestellter Vorlauftemperaturregelung sollten also keine Probleme ergeben. Hingegen ist bei Fernleitungspumpen für Einspritzverteiler mit Durchgangventilen Vorsicht geboten. Hier sollte immer eine automatische Pumpenabschaltung vorgesehen werden (z.B. über Endschalter in den Regelventilen). Dies ist auch aus Stromspargründen sinnvoll!

## 4.3 Energiemessung

Beginnend mit der Inbetriebsetzung, über Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle, bis zum eigentlichen Betrieb spielt die Überwachung der Energieströme eine

wichtige Rolle. Und trotzdem wird hier schwer gesündigt: Es werden nur diejenigen Zähler eingebaut, die für die Kostenabrechnung unbedingt nötig sind, und Auswahl, Auslegung und Einbau sind oft derart mangelhaft, dass keine brauchbare Auswertung möglich ist. Hier deshalb einige Hinweise zu den wichtigsten Energiemessmethoden.

#### Elektrizität

Die Erfassung der elektrischen Energie erfolgt überall dort sehr zuverlässig, wo ein Interesse für die Kostenabrechnung besteht, also bei den vom Elektrizitätswerk eingebauten Elektrozählern. Auf Zähler, welche nur von technischem Interesse sind, wird meist aus Kostengründen verzichtet (typisches Beispiel: ein eigener Zähler für die Wärmepumpe). Dabei wären viele Elektrizitätswerke bereit, sogenannte «Privatzähler» für geringe Mietgebühren oder sogar gratis zur Verfügung zu stellen. Aber auch der Kauf eines Zählers ist keine allzu grosse Ausgabe: für ca. Fr. 600.– sind bestens geeignete Dreiphasenzähler erhältlich.

Übliche Elektrozähler können nur «von Auge» abgelesen werden, sie haben also keinen Impulsausgang. Da immer öfter eine automatische Aufzeichnung gewünscht wird, sollten neue Zähler immer mit Impulsausgang bestellt werden, da der Mehrpreis unbedeutend ist. Bei bestehenden Zählern ist auch eine optische Abtastung möglich.

Für temporäre Messungen müssen Spannung und Strom abgegriffen und auf ein Leistungs- oder Energiemessgerät geführt werden (Bild 45). Damit für die Strommessung die Leitungen nicht unterbrochen werden müssen, werden Strommesszangen eingesetzt. Allerdings müssen dazu die oft recht dicken Leitungen über eine genügende Länge freiliegen, damit sie mit den Stromzangen einzeln umfasst werden können.

#### Erdgas

Gaszähler werden zur Kostenabrechnung – ebenso wie Elektrozähler – durch den Energielieferanten eingebaut. In Zukunft sollte noch vermehrt darauf geachtet werden, dass die Zähler auch mit einem Impulsausgang ausgerüstet sind. In der Regel genügt der Hauptzähler, und weitere Aufteilungen können über Betriebsstundenzähler erfolgen. Wichtig ist dabei, dass die Betriebsstunden für jede Stufe exakt erfasst werden, d. h. ohne Vorspülzeit und ohne Weiterzählen bei Störung.

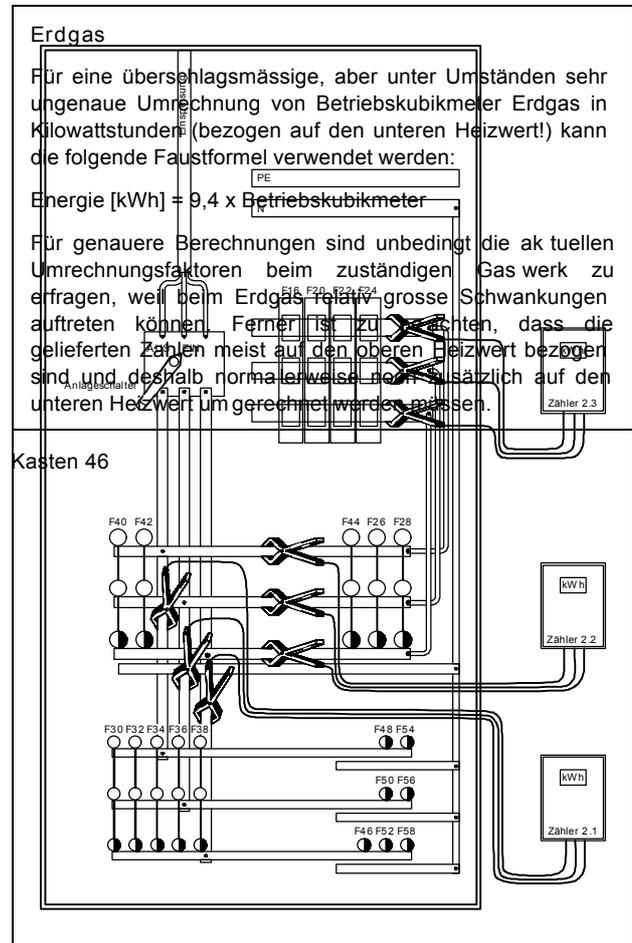


Bild 45: Beispiel einer temporären Messung in einer Unterverteilung mit Hilfe von Stromzangen und Elektrozählern

Zu Beachten ist ferner, dass der Gaszähler sogenannte «Betriebskubikmeter» unter den am Verwendungsort herrschenden Zuständen misst (Temperatur, Luftdruck, Feuchte). Eine überschlagsmässige Umrechnung kann gemäss Kasten 46 erfolgen; genaue Umrechnungsfaktoren sind aber unbedingt vom Gaswerk zu erfragen.

#### Heizöl

Die Erfassung des Jahres-Heizölverbrauchs (z.B. für die Heizkostenabrechnung) geschieht üblicherweise mittels Messstab im Öltank. Für häufigere Ablesungen, insbesondere für die Bestimmung der Energiekennlinie, ist der Einbau eines Ölzählers mit Impulsausgang unbedingt zu empfehlen. Die Messung der Brennerbetriebszeit und «Auslitern» ist zwar praktikabel, aber relativ aufwendig. Die Umrechnung der verbrannten Kilogramm bzw. Liter Heizöl EL in Kilowattstunden kann gemäss Kasten 47 erfolgen.

#### Heizöl EL

Die Umrechnung von Liter bzw. Kilogramm Heizöl EL in Kilowattstunden kann nach folgender Faustformel erfolgen:

$$\text{Energie [kWh]} = 11,9 \times \text{Masse [kg]}$$

$$\text{Energie [kWh]} = 10,0 \times \text{Volumen [l]}$$

Da Heizwert und Dichte von Heizöl EL relativ konstant sind, ist die angegebene Formel in der Regel genügend genau.

#### Kasten 47

Modell	A	B	C	D
Nennweite [mm]	15	20	25	32
Minimaldurchfluss [l/h]	30	30	70	70
Übergangsdurchfluss [l/h]	120	120	280	280
Nenndurchfluss [m³/h]	1,5	2,5	3,5	5,0
Maximaldurchfluss [m³/h]	3,0	5,0	7,0	10,0
k <sub>v</sub> -Wert [m³/h]	3,3	5,0	10,0	12,0

Tabelle 48: Datenblatt einer handelsüblichen Baureihe von Wärmezählern (Flügelrad)

### Wärme und Kälte

Die Messung von Wärme und Kälte führt immer wieder zu unliebsamen Überraschungen. «Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser» gilt hier deshalb ganz besonders. Geeignete Kontrollmöglichkeiten sind:

- Summenzähler als Kontrolle für mehrere untergeordnete Zähler
- Vergleich mit Strom-, Öl-, Gasverbrauch

Eine sorgfältige Planung und später eine periodische Wartung und Kontrolle sind Voraussetzung für zufriedenstellende Resultate. Alle drei Teile – Temperaturfühler, Durchflussmesser und Rechenwerk – müssen optimal aufeinander abgestimmt sein.

Die Messung ist umso genauer, je grösser die Temperaturdifferenz ist. Schaltungen mit zwangsläufig grosser Temperaturdifferenz sind deshalb vorzuziehen. Durch einen sorgfältigen hydraulischen Abgleich muss aber sichergestellt werden, dass sich die berechnete Temperaturdifferenz auch tatsächlich einstellt. Bei Auswahl und Einbau der Temperaturfühler ist folgendes zu beachten:

- Gute Umströmung des Fühlers sicherstellen
- Gleichmässige Temperaturverteilung über dem Rohrquerschnitt (Fühler nicht an Mischpunkten plazieren)
- Angepasste Fühlerzeitkonstante (Zeitkonstante umso kleiner, je schneller eine Temperaturänderung erkannt werden muss, z.B bei Warmwasser von Bedeutung)



Tabelle 48 zeigt die technischen Daten einer handelsüblichen Baureihe von Wärmehzählern. Welche Druckabfälle ergeben sich bei Nenndurchfluss? Die Druckdifferenz-Formel aus Kasten 29 ergibt folgende Werte:

$$\begin{aligned} \Delta p_A &= 100 \times (1,5 \text{ m}^3/\text{h} / 3,3 \text{ m}^3/\text{h})^2 &&= 21 \text{ kPa} \\ \Delta p_B &= 100 \times (2,5 \text{ m}^3/\text{h} / 5,0 \text{ m}^3/\text{h})^2 &&= 25 \text{ kPa} \\ \Delta p_C &= 100 \times (3,5 \text{ m}^3/\text{h} / 10,0 \text{ m}^3/\text{h})^2 &&= 12 \text{ kPa} \\ \Delta p_D &= 100 \times (5,0 \text{ m}^3/\text{h} / 12,0 \text{ m}^3/\text{h})^2 &&= 17 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Diese grossen Druckabfälle bei der irreführenden Bezeichnung «Nenndurchfluss» führen immer wieder zu Fehlauslegungen: Der Durchflusszähler wird nämlich oft in einer Strecke mit variablem Durchfluss eingebaut (Bild 49), damit die dazugehörige Temperaturdifferenz möglichst gross wird (beste Messgenauigkeit). Dies hat aber zur Folge – und das wird von vielen Planerinnen und Planern vergessen –, dass dadurch die Ventilautorität des Regelventils verschlechtert wird! Dies führt zu einem

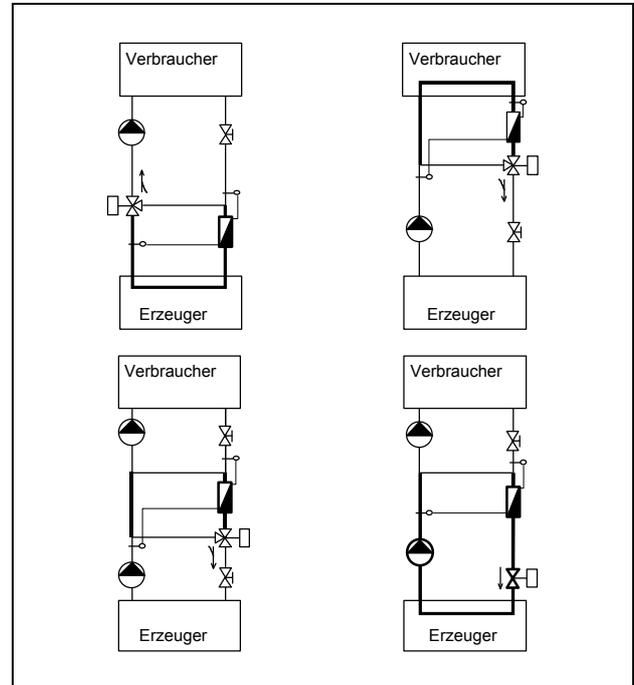


Bild 49: Die Wärmehzähler-Firmen empfehlen, den Durchflusszähler immer in der Strecke mit variablem Durchfluss einzubauen. Dabei muss aber beachtet werden, dass dies die Ventilautorität beeinträchtigt!

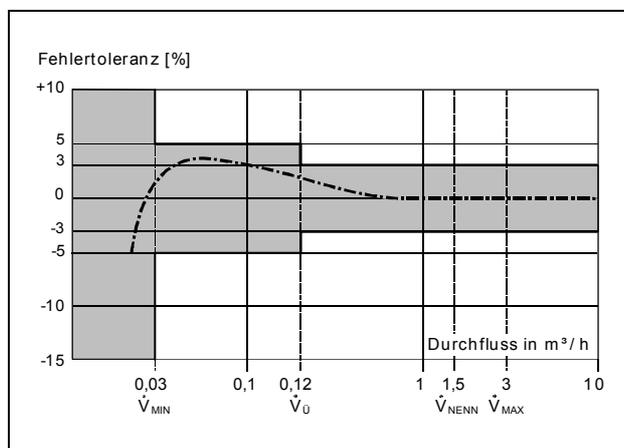


Bild 50: Beispiel einer Messfehlerkurve eines Wärmezählers für einen Nenndurchfluss von 1500 l/h: Bei 30 l/h ist der Zähler soweit angelaufen, dass eine Messtoleranz von  $\pm 5\%$  angegeben werden kann, welche in einem Übergangsbereich bis 120 l/h gilt; danach beträgt die Messtoleranz  $\pm 3\%$ ; ein Maximaldurchfluss von 3'000 l/h ist nur für kurze Zeit zulässig (einige Minuten). Strichpunktiert: typische Fehlerkurve.

Zielkonflikt: Einerseits soll der Druckabfall über dem Zähler für eine gute Ventilautorität möglichst klein sein, andererseits bedeutet ein kleiner Druckabfall auch eine geringere Genauigkeit im unteren Durchflussbereich (Bild 50). Mit den heute angebotenen unterschiedlichen Bauarten lassen sich aber immer geeignete Lösungen finden.

Die maximal zulässige Länge der Verbindungsleitungen zwischen Temperaturfühlern und Rechenwerk ist häufig sehr kurz (Leitungswiderstand). Das Rechenwerk muss darum oft relativ ungeschützt beim Verteiler montiert werden. Hier ist deshalb besonders auf Verschmutzung und Einhaltung der zulässigen Umgebungstemperatur zu achten. Bei der Auswahl des Rechenwerks ist folgendes zu beachten:

- Angemessene Auflösung der Anzeige
- Impulsausgänge für Durchfluss und Energie mit genügend hoher Auflösung

#### Impulsausgänge

Es wurde bereits mehrfach erwähnt, dass Energiemessgeräte prinzipiell mit einem Impulsausgang ausgestattet sein sollten – egal, ob dieser sofort gebraucht wird oder vorsorglich für später vorgesehen ist.

In der Praxis haben sich Reedrelais- und Optokopplerausgänge bewährt. Beide sind potentialfrei. Eher abzuraten ist von potentialbehafteten Transistorausgängen, da deren Erfassung mit einem Datalogger wesentlich kritischer ist.

Weiter ist auf eine gute Auflösung zu achten. Bewährt haben sich Ausgangsfrequenzen bei Auslegebedingungen von 0,1...1 Hz, oder anders herum gesagt, ein Impuls alle 1...10 Sekunden. Aber Achtung: zu hohe Ausgangsfrequenzen sind bei Relaiskontakten nicht möglich.

## 5. Schaltungstechnik

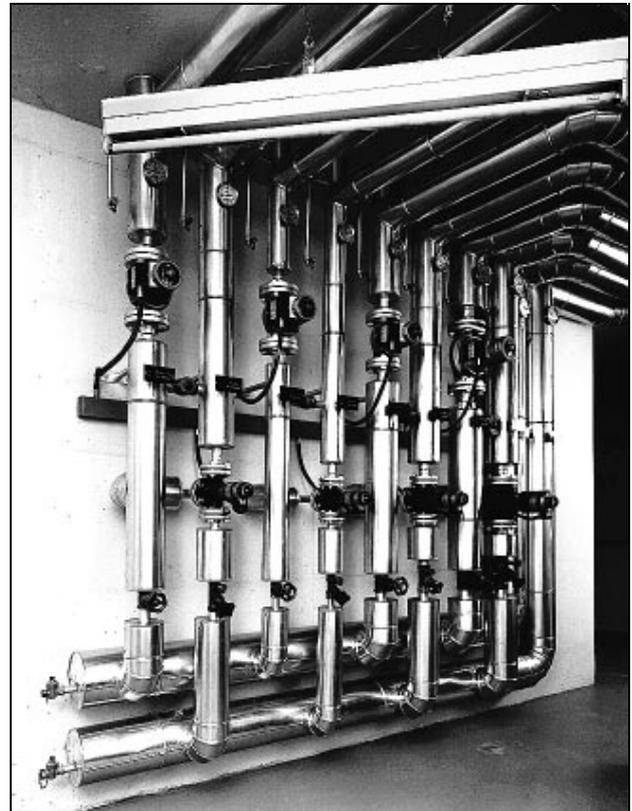
### 5.1 Einbindungsprobleme

Untersuchungen im Zusammenhang mit Forschungsprojekten, Pilot- und Demonstrationsanlagen, Betriebsoptimierungen, Expertisen usw. kommen immer wieder zur gleichen Schlussfolgerung: Selbst «Musteranlagen» arbeiten oft so mangelhaft, dass der geplante Nutzungsgrad bei weitem nicht erreicht wird. Häufigste Ursache sind Probleme mit Steuerung, Regelung und Hydraulik.

Je komplexer eine Anlage ist, desto grösser sind die Anforderungen an den Planer oder die Planerin und desto grösser natürlich auch die Gefahr, dass später Mängel auftreten. Die Situation hat sich in den letzten Jahren deshalb verschärft, weil immer mehr Anlagen mit variablem Durchfluss gefordert werden, was die Anlage-Komplexität entscheidend vergrössert hat. Die grössten Probleme treten dann auf, wenn neue, energieeffiziente Wärmeerzeugungsanlagen in bestehende Anlagen mit hoher Rücklaufemperatur eingebunden werden müssen – und gerade dieser Fall tritt heute wesentlich häufiger auf als die reine Neuanlage (Bild 51).

An fertigen Planungsgrundlagen stehen heute nur wenige firmenneutrale Unterlagen zur Verfügung. Die Auswahl an Firmenunterlagen ist dagegen wesentlich grösser. Firmenunterlagen sind zwar eher einfacher zu handhaben als firmenneutrale, weil z.B. einem bestimmten Regelproblem ein extra zu diesem Zweck konstruierter Regler zugeordnet werden kann, eine neutrale Planung und Ausschreibung ist damit jedoch nicht möglich. Vor allem von Firmen werden Schaltungen im Bausteinprinzip angeboten (sogenannte Streifenplaner): aus 5...10 «Bausteinen» wird die fertige Schaltung zusammengesetzt und dann fotokopiert. Die praktisch «unendliche» Zahl von Varianten führte aber leider zu einer wahren Inflation unterschiedlicher Anlagen, die kaum mehr jemand versteht.

In Zukunft sollte die Entwicklung deshalb viel mehr in Richtung firmeneutraler Standardschaltungen gehen. Dies hat auch den grossen Vorteil, dass die Regelgerätfirmen für die am häufigsten vorkommenden



*Bild 51: Die Einbindung energieeffizienter Anlagen in bestehende Systeme ist schwierig. Oft sind beispielsweise Einspritzverteiler mit Dreiwegventilen vorhanden, welche die Rücklaufemperatur in unzulässiger Weise hochmischen. Hier gibt es in der Regel nur eine Lösung: Umbau auf Durchgangsventile!*

### Literatur zum Thema «Schaltungstechnik»

In Heft 5 «Standardschaltungen» der vorliegenden Schriftenreihe «RAVEL im Wärmesektor» werden drei Arten von Standardschaltungen beschrieben, die untereinander problemlos zusammenschaltet werden können:

- Wärmeerzeugungsanlagen
- Wärmenutzungsanlagen
- Wassererwärmungsanlagen



Zum Thema «Wärmepumpen» ist zusätzlich die Schaltungssammlung des Schweizerischen Vereines von Wärme- und Klimaingenieuren (SWKI) empfehlenswert. Darin werden insbesondere Schaltungen von Wärmequellenanlagen ausführlich behandelt.



*SWKI Richtlinie 92-1: Hydraulische Schaltungen von Wärmepumpen-Heizungsanlagen. Bern: Schweizerischer Verein von Wärme- und Klima-Ingenieuren (SWKI), 1992. (Bezugsquelle: SWKI, Postfach, 3001 Bern)*

Kasten 52

Standardschaltungen fertige Regelgerätepakete mit Standard-Elektrischeschema anbieten können (für einfachere Fälle ist dies bereits heute der Fall).

## 5.2 RAVEL-Standardschaltungen

Aufgrund der geschilderten Probleme wurden von RAVEL bewährte Schaltungen eruiert und in der vorliegenden Schriftenreihe als Heft 5 unter dem Titel «Standardschaltungen» zusammengestellt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass es dabei nicht um die Standardisierung von Komponenten geht (z.B. «Standard-BHKW»), sondern um Standardisierung auf Anlageebene.

 *Heft 5 «Standardschaltungen»  
siehe auch Kasten 52!*

## 5.3 Örtlich getrennte Wärme-erzeugung, Speicher und Verteiler

Ein Problem, welches immer wieder auftaucht, ist die hydraulische Schaltung bei örtlich weit entferntem Speicher bzw. Verteiler. Zur Erläuterung sind in Bild 53 die wichtigsten Schaltungsvarianten mit einer Wärmepumpe als Wärmeerzeuger dargestellt:

**Schaltung A:** Diese Schaltung ist problemlos, weil der Druckabfall über dem Speicher gering ist.

**Schaltung B:** Der Speicher ist weit von Wärmepumpe und Verteiler entfernt aufgestellt. Der Druckabfall  $\Delta p$  über Fernleitung und Speicher bewirkt bei zu langer Fernleitung eine unzulässig hohe Schwankung der Anschluss-Druckdifferenz des «drucklosen» Verteilers von  $+\Delta p$  bei der Ladung und  $-\Delta p$  bei der Entladung. Bei sorgfältiger Auslegung der Regelventile kann erfahrungsgemäss eine maximale Druckdifferenzschwankung von etwa  $\pm 3$  kPa verkräftet werden.

**Schaltung C:** Ein weit entfernter Verteiler bietet Schwierigkeiten, weil hier der «drucklose» Verteiler entsprechend dem Druckabfall über

Fernleitung und Speicher druckbehaftet ist. Immerhin tritt hier, im Gegensatz zu Schaltung B, die Schwankung der Anschluss-Druckdifferenz nur in einer Richtung auf. Welche maximale Anschluss-Druckdifferenz verkraftet werden kann, ist wie folgt zu beantworten:

- Sicher muss der Druckabfall über jedem Regelventil des Verteilers grösser sein als die Anschluss-Druckdifferenz (Ventilautorität  $\geq 0,5$ ); bei bestehenden Verteilern ist der Druckabfall über den Regelventilen erfahrungsgemäss selten grösser als 3...5 kPa, also darf auch die Anschluss-Druckdifferenz sicher nicht grösser sein.
- Ferner darf der Druckabfall über der Fernleitung nicht grösser sein als 20% der Förderhöhe der kleinsten Gruppenpumpe.

**Schaltung D:** Eine Fernleitungspumpe und ein Bypass im Verteiler sind leider keine Lösung, weil dadurch ein unzulässiges Hochmischen der Rücklauftemperatur erfolgt.

**Schaltung E:** Vielleicht geht aber diese Lösung: Wenn der Speicher beim Verteiler aufgestellt wird, ist die Anschluss-Druckdifferenz des Verteilers genügend klein. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass

- das Ladeventil möglichst nahe bei der Wärmepumpe installiert wird (kleine Totzeit) und
- der Druckabfall über dem Ladeventil mindestens gleich gross ist wie der Druckabfall über Fernleitung und Speicher (Ventilautorität  $\geq 0,5$ ).

**Schaltung F:** Eine Lösung, die immer geht, ist ein Einspritzverteiler mit Durchgangsventilen und Druckdifferenzregelung mittels Drehzahlsteuerung der Fernleitungspumpe.

## 5.4 Hydraulischer Abgleich

Unter dem Begriff «hydraulischer Abgleich» wird hier ein (zusätzlicher) messtechnischer Abgleich verstanden. Der rechnerische Abgleich (Berechnung der Voreinstellungen) muss heute eine Selbstverständlichkeit sein, die nicht weiter diskutiert werden muss.

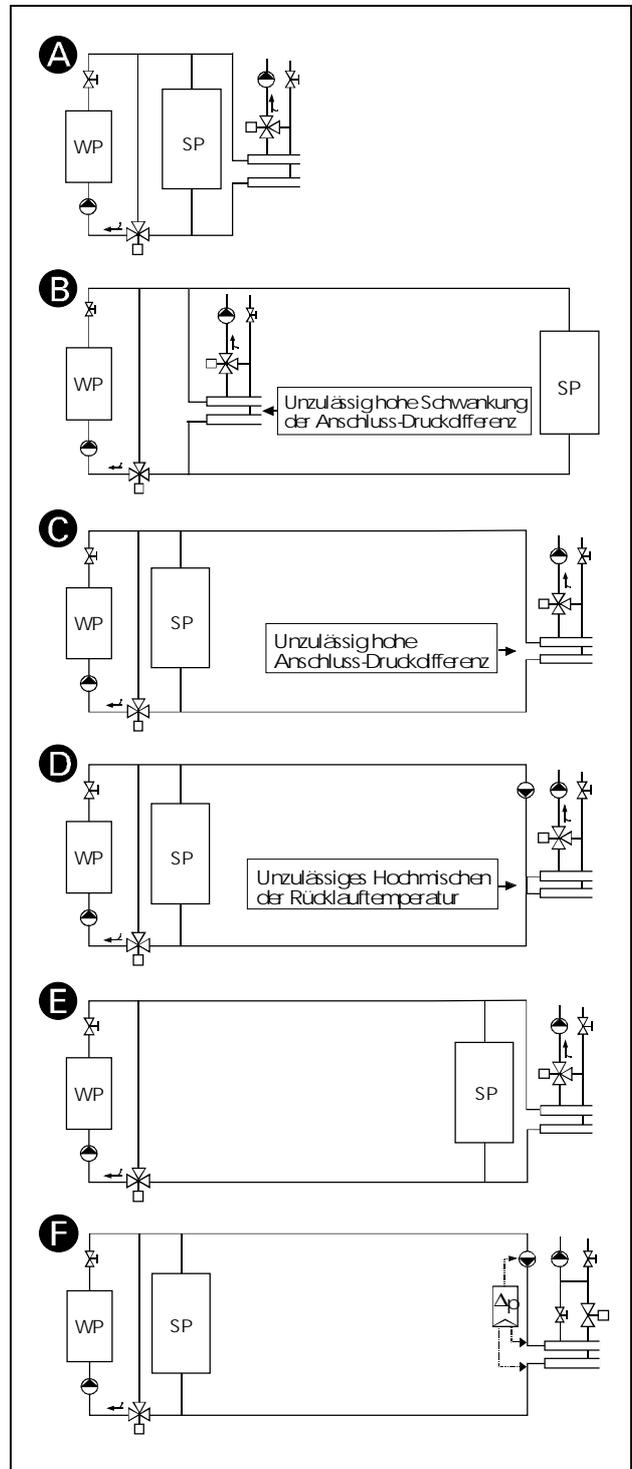


Bild 53: Örtliche Platzierung von Wärmeerzeuger, Speicher und Verteiler.

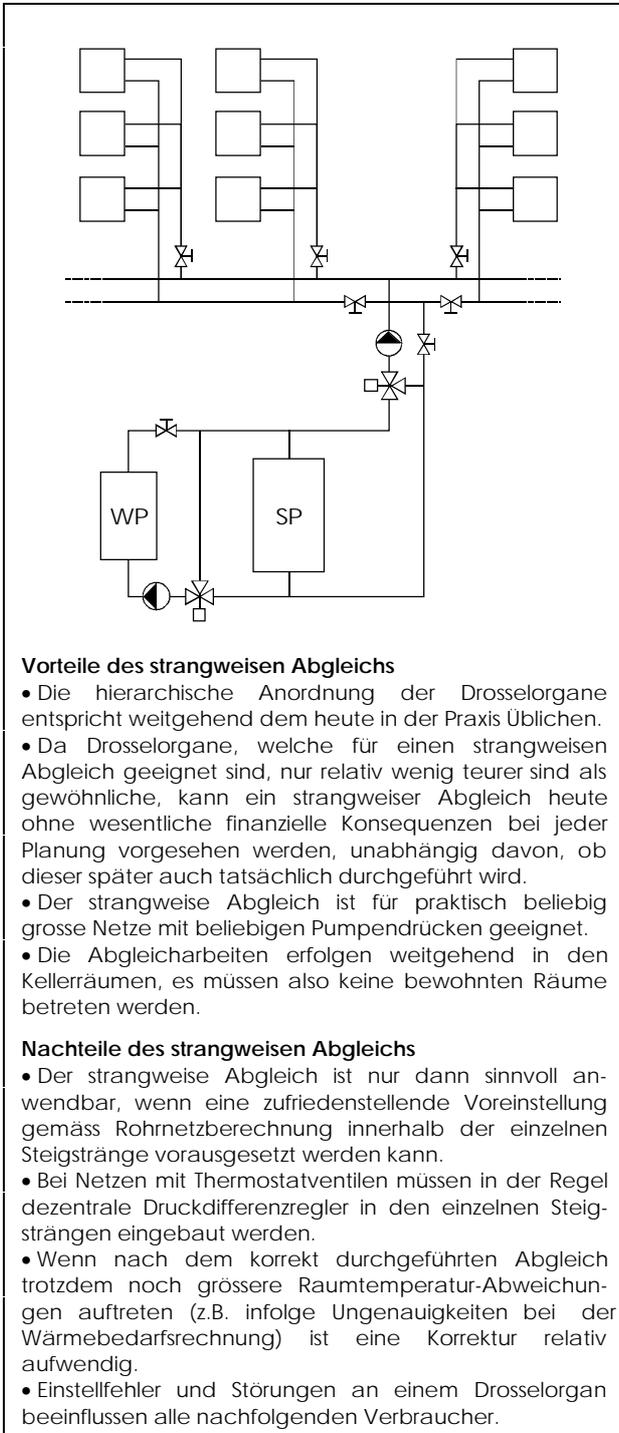


Bild 54: Strangweiser Abgleich

☞ Für weiterführende Literatur siehe Kasten 28

### Ist ein hydraulischer Abgleich überhaupt notwendig?

An bestehenden Haustechnikanlagen werden immer wieder die gleichen Mängel beobachtet:

- Ungleichmässige Wärmeabgabe in den einzelnen Räumen
- Geräuschprobleme mit Thermostatventilen
- Anlagen mit zwingend grosser Temperaturdifferenz (Speicheranwendungen, Kondensationskessel, Fernheizungsanschlüsse usw.) erreichen die geforderte Temperaturdifferenz nicht
- Mess- und regelungstechnische Probleme wegen zu grossen Durchflusses

Diese Mängel sind zwar ein generelles Problem der Haustechnik, aber bei WKK-, WP- und WRG/AWN-Anlagen sind die negativen Auswirkungen oft besonders gravierend. Deshalb ist bei diesen energieeffizienten Techniken ein hydraulischer Abgleich unbedingt empfehlenswert.

### Strangweiser Abgleich

Für den strangweisen Abgleich müssen alle Stränge mit Drosselorganen und – falls ein Abgleich mit Durchflussmessung erfolgen soll – mit entsprechenden Messstrecken ausgerüstet sein. Der Abgleich der Stränge erfolgt hierarchisch: erst die Steigstränge, dann die Nebenstränge und schliesslich der Hauptstrang. Innerhalb der einzelnen Steigstränge erfolgt der Abgleich rein rechnerisch über die berechneten Voreinstellungen der Heizkörperventile oder Rücklaufverschraubungen. Bild 54 zeigt die Anordnung der Drosselorgane für einen strangweisen Abgleich am Beispiel einer Wärmepumpenanlage mit Schichtladung.

### Abgleich an den Verbrauchern

Bei dieser zweiten Abgleichstrategie wird der Druck erst bei den Verbrauchern reduziert. Es muss also jeder Verbraucher mit einer entsprechenden Drosselmöglichkeit und – falls

ein Abgleich mit Durchflussmessung erfolgen soll – mit entsprechenden Messstrecken ausgerüstet sein. Bild 55 zeigt die Anordnung der Drosselorgane für einen Abgleich an den Verbrauchern.

Es ist zu berücksichtigen, dass bei jeder Einregulierung eines Heizkörpers auch die Durchflüsse der bereits eingestellten Heizkörper – aufgrund der wechselnden Druckverhältnisse in den Rohren – verändert werden. Deshalb ist es bei dieser Abgleichstrategie wichtig, dass Pumpe und Netz möglichst weitgehend einer Druckquelle entsprechen, die nur wenig auf Veränderungen des Durchflusses reagiert.

Durch konsequente Anwendung der Strategie «Abgleich an den Verbrauchern» können mit einer 20-kPa-Pumpe recht grosse Netze realisiert werden. Dies insbesondere dann, wenn die Anlage mit durchschnittlichen R-Werten (Druckabfall im geraden Rohr) von weniger als 70 Pa/m ausgelegt wird.

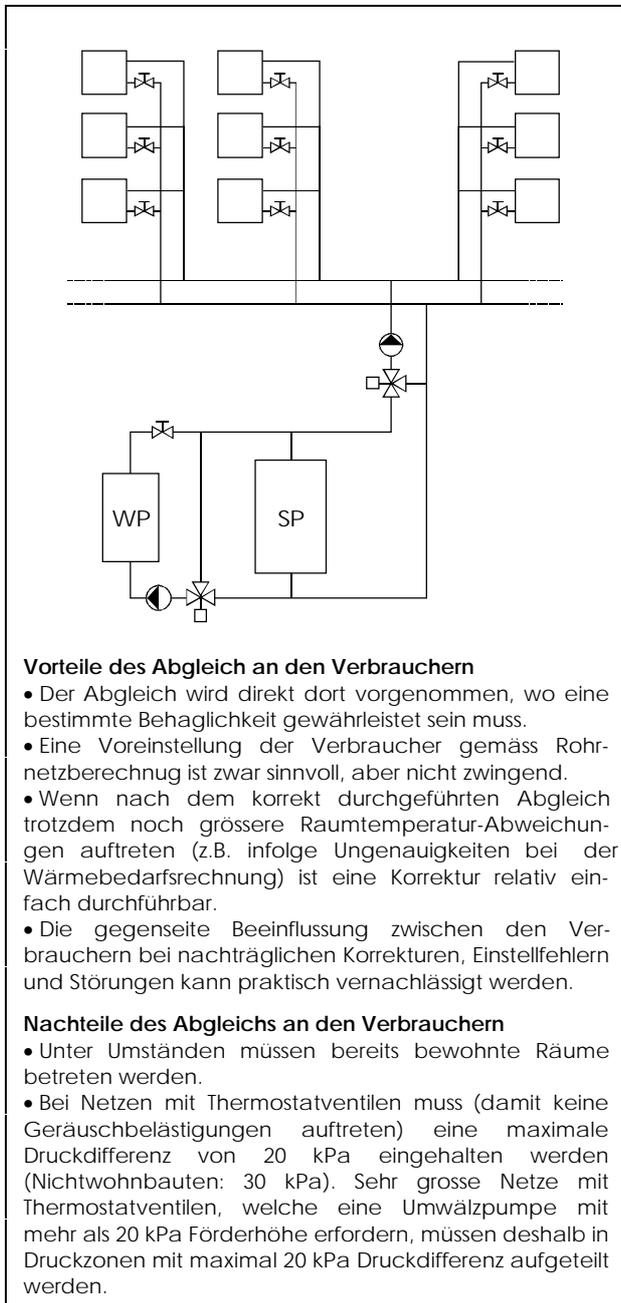


Bild 55: Abgleich an den Verbrauchern

## 5.5 Auslegungsrichtlinien

In den letzten Jahren konnten zahlreiche Erfahrungen mit Netzen mit variablen Durchflüssen gesammelt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass sich dann keine nennenswerten Probleme ergeben, wenn die Auslegungsrichtlinien gemäss Kasten 56 eingehalten werden.

Da sich einige der geforderten Zielwerte in der Praxis oft nur schwer erreichen lassen, wurden teilweise auch Grenzwerte festgelegt. Letztere sollten aber nur in Ausnahmefällen zur Anwendung kommen!

### Auslegungsrichtlinien

- Nur Schaltungen verwenden, die sich eindeutig auf die vier hydraulischen Grundsaltungen zurückführen lassen.
- Nie mehr als eine Pumpe auf einen hydraulischen Kreis wirken lassen.
- Auf einwandfreie Entkoppelung der hydraulischen Kreise achten, d.h. Bypässe und Speicherzuleitungen grosszügig dimensionieren. Insbesondere «drucklose» Gruppen- und Verteileranschlüsse müssen wenigstens druckdifferenzarm erfolgen.
- Wärmeerzeuger, Speicher und Verteiler sollten möglichst nahe beisammen liegen, dies erspart viele hydraulische Probleme.
- Speicher müssen auf der Sekundärseite immer mit variablem Durchfluss betrieben werden.
- Druckdifferenzschwankungen über den Verbrauchern von 1:2 bis maximal 1:3 führen in der Regel zu keinen nennenswerten Störungen. Daraus ergibt sich für die Verbraucherautorität:
  - Zielwert = 0,5
  - Grenzwert = 0,3
- Bei Regelventilen ist eine Ventilautorität von 0,5 anzustreben. Die Praxis zeigt jedoch, dass Werte bis zu 0,3 hinunter meist noch tolerierbar sind. Diese Werte gelten im Prinzip auch für Thermostatventile. Da aber ein nur im Auf-Zu-Betrieb arbeitendes Thermostatventil kein allzu grosses Unglück darstellt, können für Thermostatventile etwas tiefere Werte festgelegt werden:
  - Regelventile Zielwert = 0,5  
Grenzwert = 0,3
  - Thermostatventile Zielwert = 0,3  
Grenzwert = 0,1
- Um Geräuschbelästigungen in Thermostatventilen zu vermeiden, muss eine maximal zulässige Druckdifferenz über den Thermostatventilen eingehalten werden:
  - Wohnhäuser 20 kPa
  - Nichtwohnbauten 30 kPa
- Netze mit Thermostatventilen sollen – wenn immer möglich – so ausgelegt werden, dass eine Umwälzpumpe mit flacher Kennlinie oder eine drehzahlgesteuerte Pumpe eingesetzt werden kann, deren Förderhöhe bei Nulldurchfluss maximal 20 kPa (Nichtwohnbauten: maximal 30 kPa) beträgt. Unter dieser Voraussetzung treten in der Regel keine störenden Geräuschbelästigungen auf.
- Wenn eine 20-kPa-Pumpe (Nichtwohnbauten: 30-kPa-Pumpe) nicht ausreicht, sind dezentrale Druckdifferenzregler einzubauen (z.B. Überströmventile in den Steigsträngen).
- Nie eine Pumpe drosseln, sondern Drehzahl zurückschalten, Laufrad wechseln oder die Pumpe austauschen.
- In der Fachliteratur werden durchschnittliche Druckabfälle im geraden Rohr (R-Werte) von 100...200 Pa/m für übliche Verteilungen und 200...400 Pa/m für Einrohrsysteme, teure Fernleitungen usw. empfohlen. Diese Werte sollten nur bei konventionellen Netzen mit konstantem Durchfluss verwendet werden. Bei Netzen mit variablem Durchfluss werden folgende maximalen R-Werte (inkl. Einzelwiderständen) empfohlen:
  - Zielwert 70 Pa/m
  - Grenzwert 100 Pa/m
- In der Praxis werden heute kaum höhere Temperaturdifferenzen zwischen Vorlauf und Rücklauf als 5 K angetroffen. Wenn ein sorgfältiger hydraulischer Abgleich durchgeführt wird, können aber problemlos die üblichen Planungswerte von 10...20 K erreicht werden. Höher als 30 K zu gehen ist nicht empfehlenswert, da hier neue Probleme auftreten, die zum Teil nur schwer zu lösen sind. So lassen sich unter Umständen die geforderten kleinen  $k_v$ -Werte gar nicht einstellen oder das Risiko einer Verschmutzung ist bei extrem kleinen Durchflüssen sehr hoch (Schmutzpartikel werden nicht weggeschwemmt). Es werden deshalb folgende Auslegungstemperaturdifferenzen empfohlen:
  - 10...15 K für Vorlauftemperaturen bis 50°C
  - 15...30 K für Vorlauftemperaturen 50...90°C

Kasten 56

## 6. Qualitätssicherung im Planungsablauf

### 6.1 Qualitätssicherung

Es ist eine Erfahrungstatsache – oft sehr heiss diskutiert! –, dass viele Haustechnikanlagen nicht so arbeiten, wie sich das die Planerin oder der Planer eigentlich vorgestellt hatte (siehe Begriffe Kasten 57). In zwei RAVEL-Publikationen (Kasten 58 unten) wird dieses Thema untersucht und es werden Möglichkeiten eines verbesserten Planungsablaufs aufgezeigt, mit dem Ziel einer Qualitätssicherung, die ihren Namen auch tatsächlich verdient.

In der Haustechnik ist praktisch jede Anlage ein «Prototyp». Das Hauptproblem der Qualitätssicherung liegt deshalb viel weniger auf der Komponentenebene (z.B. Typenprüfung), als auf der Anlageebene. Hinzu kommt noch erschwerend, dass sich die Beteiligten weitgehend selbst kontrollieren, und es gibt keinen eindeutigen Hauptverantwortlichen. Deshalb wird in den genannten Publikationen zur Qualitätssicherung ein qualifizierter unabhängiger **Energieplaner** (oder Energieplanerin) sowie die Notwendigkeit einer Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle gefordert (Kasten 58).

Gewisse Grundregeln zur rationellen Verwendung der Energie müssen eingehalten werden. Dies ist aber nur möglich, wenn die Sache zuerst einmal als Ganzes betrachtet wird. Da zu diesem frühen Zeitpunkt bereits alle wichtigen Weichen gestellt werden, wirken sich die hier gemachten Fehler besonders gravierend auf Energieverbrauch und Umwelt aus. Insbesondere die energetisch sinnvolle Reihenfolge der Massnahmen gemäss Bild 59 wird oft sträflich vernachlässigt. Die Energieplanerin oder der Energieplaner muss deshalb als erstes ein **Gesamtkonzept** erstellen, welches als Grundlage für ein detailliertes **Pflichtenheft** dient. Darin werden – in Zusammenarbeit mit den Planungsfachleuten – Zielwerte (als Planungsgrundlage) und Grenzwerte (als Garantiewerte) festgelegt, die bei der Erfolgskontrolle kontrolliert werden.

Mit der Inbetriebsetzung und Abnahme geht die Verantwortlichkeit für die Anlage auf den Bauherrn über. Es ist aber ein schwerwiegender

#### Verwendete Begriffe

**Planer(in)**: generell für Heizungs-, Lüftungs-, KLI-Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle

**Energieplaner(in)**: verantwortlich für die Qualitätssicherung im Energiebereich

**Energieberater(in)**: berät den Bauherrn in notwendigen Messinstrumente, eingeplant werden. In den RAVEL-Standardschaltungen sind die notwendigen Messinstrumente, Tauchhülsen usw. eingezeichnet.

Kasten 57  
Heft 5 «Standardschaltungen»

- Die Aufzeichnung der notwendigen Betriebsdaten erfolgt am besten wöchentlich (evtl. für eine gewisse Zeit auch täglich) durch den Betreiber auf vorbereiteten Formularen. Dieser sendet die Unterlagen dann monatlich an die Planerin bzw. den Planer, die/der die Daten sofort auswertet und entsprechende Optimierungsschritte veranlasst.
- Bei grösseren und komplexeren Anlagen – und immer wenn Probleme auftreten – ist eine automatische Aufzeichnung mittels Datalogger sinnvoll. Wenn die dafür notwendigen Signale von Anfang an auf eine gut zugängliche Klemmleiste im Schaltschrank geführt werden, hält sich der Aufwand durchaus in vernünftigen Grenzen.
- Rechnergesteuerte Anlagen (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 abschliessender Erfolgskontrolle anzustreben.
- Die Grenzwerte (Garantiewerte) und Zielwerte (Planungswerte) für die Erfolgskontrolle müssen zuvor in einem Pflichtenheft festgehalten worden sein.



R. Bühler und H. Mayer: *Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle von Wärmepumpen- und Wärmekraftkopplungsanlagen*. Bern: Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1993. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 724.397.31.57d)

U. Steinemann et al.: *Die Bedeutung organisatorischer Fragen für die Planung energetisch guter Gebäude und Haustechnikanlagen*. Bern: Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1993. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 724.397.41.57d)

Kasten 58

Irrtum, wenn angenommen wird, dass die Anlage zu diesem Zeitpunkt bereits optimal arbeitet und keine weiteren Einregulierungen mehr notwendig sind: Eine angepasste **Betriebsoptimierung** der Anlage durch die Planerin oder den Planer ist notwendig!

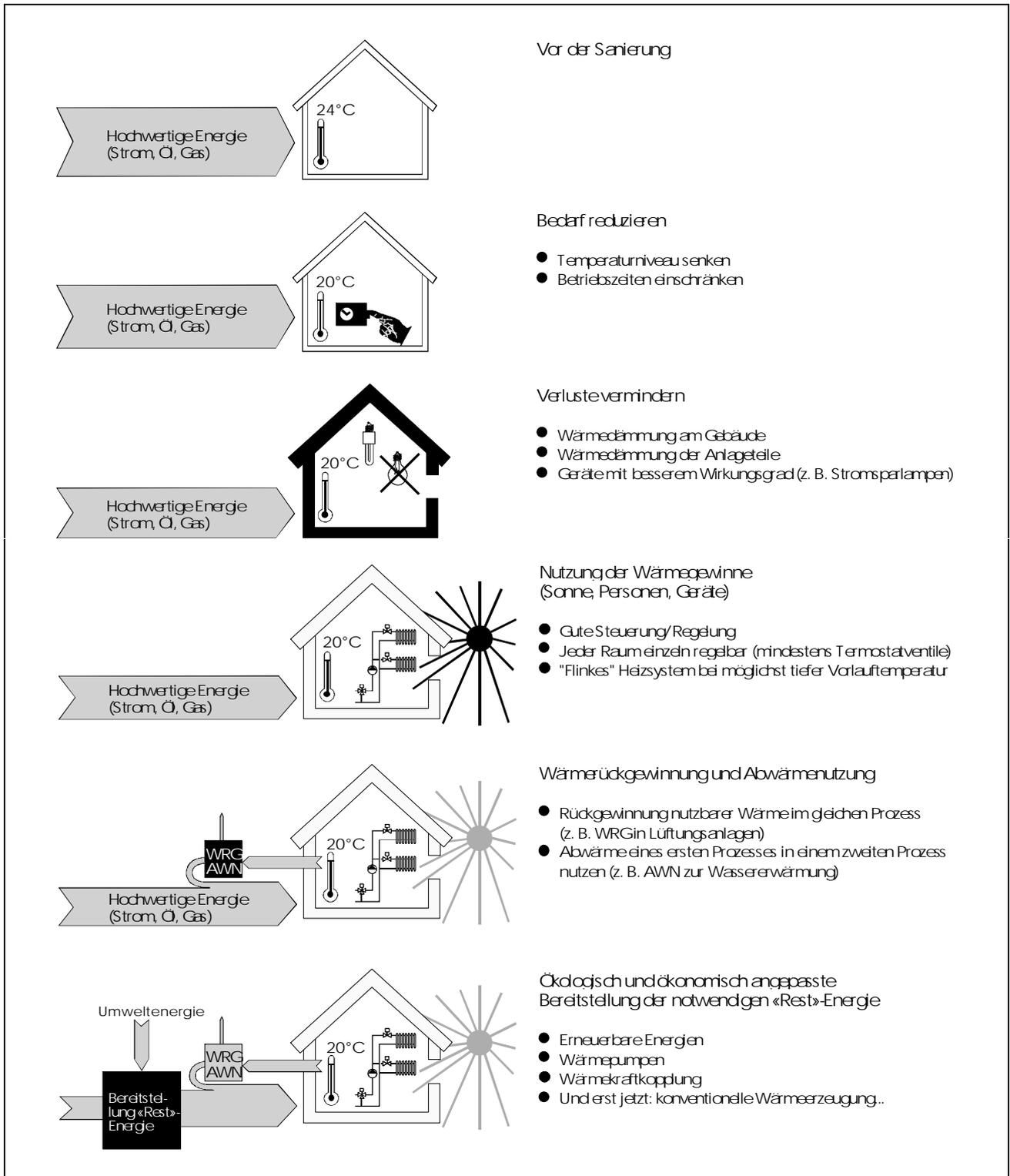


Bild 59: Energetisch sinnvolle Reihenfolge der Massnahmen

Phase	Teilleistung	Beschreibung
0		<b>Vorstudienphase</b> Keine Teilleistungen definiert
1	1 2	<b>Vorprojektphase</b> Vorprojekt Schätzung der Kosten und Termine
2	3 4 5	<b>Projektphase</b> Bauprojekt Kostenvoranschlag Bewilligungsverfahren
3	6 7 8 9	<b>Vorbereitungsphase Ausführung</b> Ausschreibungspläne Ausschreibungen Offertanalyse und Vergebungsanträge Terminplan
4	10 11 12	<b>Ausführungsphase</b> Unternehmer- und Lierantenverträge Ausführungsunterlagen Fachbauleitung
5	13 14 15	<b>Abschlussphase</b> Schlussabrechnung Betriebsunterlagen Garantearbeiten



SIA-Ordnung 108: Ordnung für Leistungen und Honorare der Maschinen- und Elektroingenieure sowie der Fachingenieure für Gebäudeinstallationen. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), 1984. (Bezugsquelle: SIA, Postfach, 8039 Zürich)

Tabelle 60: Phasen und Teilleistungen der SIA-Ordnung 108

**Qualitätssicherung bei kleineren Anlagen**

Bei kleineren Anlagen gelten grundsätzlich die gleichen Regeln der Qualitätssicherung wie bei grösseren Anlagen. Weil Kleinanlagen weniger komplex sind, ist die Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle zwar nicht allzu aufwendig, aber eine Kontrolle ist umso notwendiger, als der Ausführende hier oft gleichzeitig der Planende ist. Folgende einfacheren Lösungen sind möglich:

- Beizug einer Energieberaterin oder eines Energieberaters für die Aufstellung eines einfachen Pflichtenhefts (Ziel- und Grenzwerte sowie Instrumentierung zu deren Erfassung) und Hilfe bei der Erfolgskontrolle nach 1...2 Jahren (Pauschalhonorare vereinbaren!)
- Technisch einigermaßen versierte Bauherren können sich auch entsprechend beraten lassen (kantonale Energiefachstellen, Infoenergie, EW's usw.) und «in eigener Regie» ein Pflichtenheft aufstellen und die Erfolgskontrolle selbst durchführen

Die Betriebsoptimierung wird durch eine **Erfolgskontrolle** abgeschlossen. Dazu muss aber zu Beginn in einem Pflichtenheft festgelegt worden sein, was kontrolliert wird und welche Garantiewerte einzuhalten sind, und die Kontrollierten dürfen sich nicht selbst kontrollieren.

## 6.2 SIA-Honorarordnung 108

Grundlage für Haustechnikplanungen bildet die SIA-Honorarordnung 108. Diese unterscheidet Phasen und Teilleistungen, die in Tabelle 60 zusammengestellt sind. Hier geht es vor allem um die Frage, welche Phasen bzw. Teilleistungen durch die Qualitätssicherung tangiert werden, wie sie zu honorieren sind und wer dafür verantwortlich ist.



**Gesamtkonzept und Pflichtenheft** sind der Phase 0 «Vorstudienphase» zuzuordnen. Da keine Teilleistungen definiert sind, muss die Honorierung im Zeittarif oder als Pauschale erfolgen. Im Sinne einer echten Qualitätssicherung sollten diese Arbeiten durch eine unabhängige Energieplanerin oder einen unabhängigen Energieplaner durchgeführt werden, die/der später auch die Erfolgskontrolle durchführt.

Wie weit allenfalls das **Vorprojekt** (Phase 1) noch zum Gesamtkonzept und Pflichtenheft gehört, muss von Fall zu Fall abgemacht werden. Jedenfalls sind **Projekt** (Phase 2) und **Ausschreibung** (Phase 3) Sache der Planerin bzw. des Planers.

Nach dem Abschluss der Werkverträge geht es an die Detailplanung und **Ausführung** (Phase 4). Wenn das Konzept von allem Anfang an stimmt, sollten hier nicht mehr Probleme auftauchen als beim Bau einer konventionellen Anlage. Besonders sorgfältig muss die Einregulierung und Inbetriebsetzung durchgeführt werden. Da es sich meist um Anlagen mit variablen Durchflüssen handelt, ist ein hydraulischer Abgleich unabdingbar notwendig.

Etwas schwieriger wird die Sache in der **Abschlussphase** 5: So etwas wie eine

Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle sucht man unter den Teilleistungsbeschrieben vergebens. Allenfalls könnte die Erfolgskontrolle Teilleistung 15 «Garantearbeiten» zugeordnet werden, falls diese durch die Planerin oder den Planer selbst durchgeführt wird.

➔ Die **Betriebsoptimierung** ist Sache der Planerin bzw. des Planers. Sie ist nicht als Teilleistung definiert, und man kann demzufolge fordern, dass sie im Zeittarif oder als Pauschale zu honorieren ist. Hier muss aber auch bedacht werden, dass die juristische Forderung nach einer voll funktionstüchtigen Anlage besteht, und ob dies ohne Betriebsoptimierung zu gewährleisten ist, ist äusserst fragwürdig!

➔ Falls die **Erfolgskontrolle** – im Sinne einer Qualitätssicherung – durch eine unabhängige Energieplanerin oder einen unabhängigen Energieplaner durchgeführt wird, steht sie ausserhalb der definierten Teilleistungen und muss deshalb nach Zeittarif oder als Pauschale abgegolten werden. Falls aufgrund von Mängeln Wiederholungen nötig sind, gehen diese aber voll zu Lasten des Verursachers.

Es ist zu hoffen, dass die SIA-Honorarordnung baldmöglichst angepasst wird. In Bild 62 ist der Planungsablauf graphisch dargestellt, und Kasten 61 gibt noch zusätzliche Hinweise für kleinere Anlagen.

### 6.3 Der Bauherr muss entscheiden . . .

- Letztendlich muss der Bauherr entscheiden
- ob er bereit ist, eine angepasste Instrumentierung zu finanzieren, damit eine Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle überhaupt möglich ist,
  - ob er einen unabhängigen Energieplaner (oder Energieplanerin) zur Qualitätssicherung beauftragen will (Bild 62 Mitte)
  - oder ob er vollstes Vertrauen in «seinen» Planer (oder Planerin) hat, dass dieser alles zur Qualitätssicherung Notwendige veranlasst und bei allfälligen Fehlern auch dafür gerade steht (Bild 62 unten).

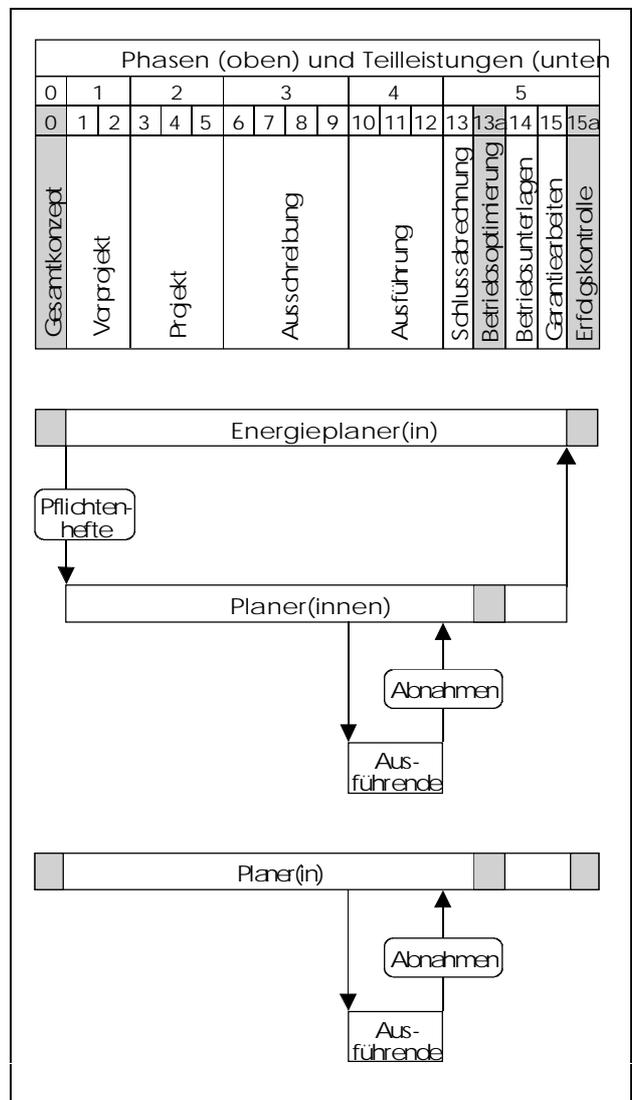


Bild 62: Oben ist der Planungsablauf gemäss Honorarordnung 108 dargestellt, wobei die heute (noch) nicht geregelten Teilleistungen 0, 13a und 15a speziell hervorgehoben sind. Mit einem unabhängigen Energieplaner (oder Energieplanerin) kann man von einer echten Qualitätssicherung sprechen (Mitte). Wenn hingegen der Planer (oder die Planerin) sein eigenes Pflichtenheft schreibt und dieses am Schluss auch noch selbst kontrolliert, dann muss letztendlich der Bauherr entscheiden, ob er dem Planer soviel Vertrauen entgegenbringen will (unten).

So oder so ist Qualitätssicherung vordergründig einmal mit Mehrkosten verbunden. Dafür ergeben sich aber viele Vorteile, die diese zusätzlichen Investitionen mit Sicherheit mehr als wettmachen:

- Bessere Koordination der Beteiligten bedeutet weniger «Leerläufe»
- Klar definierte Schnittstellen verringern Unsicherheiten und Risiken
- Anstelle der Investitionskosten werden die Jahreskosten minimiert, was volkswirtschaftlich wesentlich sinnvoller ist

# 7. Wirtschaftlichkeit

## 7.1 Verständigungsprobleme

Haustechnikplanerinnen und -planer sind keine Wirtschaftsfachleute und umgekehrt. Dies führt immer wieder zu Verständigungsproblemen:

- Haustechnikfachleute verstehen zuwenig von den Zusammenhängen und Berechnungsmethoden der Wirtschaftlichkeit
- Wirtschaftsfachleute stellen eine Energieeinsparung einfach der dafür notwendigen Mehrinvestition gegenüber, sie interessieren sich aber kaum dafür, wie diese Zahlen zustande kamen und welche Vorteile sich für die Umwelt ergeben

Der Leitfaden für Wirtschaftlichkeitsberechnungen «RAVEL zahlt sich aus» (Kasten 63) soll hier etwas zum gegenseitigen Verständnis beitragen: Durch eine einheitliche Berechnungsmethode soll für beide Teile Transparenz erzielt werden.

Von Seiten der Haustechnikfachleute ist vor allem darauf zu achten, dass das Zustandekommen der Grössen «Energieeinsparung» und «Mehrinvestition» nachvollziehbar bleibt. Am ehesten ist dies dann möglich, wenn zwei vollständig durchgerechnete Fälle miteinander verglichen werden, wie beispielsweise:

- Zustand vorher - Zustand nachher (Sanierung)
- Geplante Anlage - fiktive Vergleichsanlage (Neubau)

Ausserdem muss - speziell bei den hier behandelten energieeffizienten Techniken - der Umweltnutzen möglichst gut «verkauft» werden!

## 7.2 Wirtschaftliche Zumutbarkeit

Die Forderung der Wirtschaftlichkeit wird in der Regel bereits bei der Systemwahl erhoben. Dabei haben energieeffiziente Wärmeerzeugungstechniken nur eine Chance realisiert zu werden, wenn sie wirtschaftlich sind. Und «wirtschaftlich» wird dabei so definiert, dass die Mehrinvestitionen im Laufe der Lebensdauer der Anlage durch

### Einheitliche Wirtschaftlichkeitsberechnung im Impulsprogramm RAVEL



Müller, André und Felix Walter: RAVEL zahlt sich aus. Praktischer Leitfaden für Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Bern: Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1992. Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Best.-Nr. 724.397.42.01d

In dieser Publikation wird ein dynamisches Vorgehen beschrieben, das möglichst einfach anzuwenden ist und zu unverzerrten Resultaten führt (Annuitätenmethode). Dabei können auch steuerliche Aspekte berücksichtigt werden, und auch ein Weg zur Berücksichtigung der Umweltkosten wird vorgeschlagen. Für die Berechnung «von Hand» ist umfangreiches Tabellenmaterial vorhanden. Aber auch die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms ist möglich; die notwendigen Formeln für die gängigsten Programme sind angegeben.

Kasten 63

### Vorarbeiten und Vorabklärungen

#### Neuanlage:

- Gesamtkonzept für Baukörper und Haustechnik
- Berechnung von Wärmeleistungsbedarf und Elektrizitätsbedarf
- Katalog der Wärmequellen und Wärmesenken (Wärmeabnehmer) im Gebäude und in der Umgebung nach Ort, Zeit, Menge und Temperatur erstellen
- Konzept für Wärmeverteilung und Wärmeabgabe
  - Steuerung, Regelung
  - Wärmeabgabesystem
- Abklärung der verfügbaren Energieträger
  - Elektrizität
  - Gas (Erdgas, Flüssiggas, Biogas)
  - Heizöl
  - Energieholz (Stückholz, Schnitzel, Späne)

#### Sanierung:

- Massnahmen Betrieb, Gebäude, Geräte
  - Bedarf reduzieren
  - Verluste vermindern
- Betriebsdatenerfassung (manuell/Datalogger)
  - Wärmeleistungsbedarf (Energiekennlinie)
  - Wärmeabgabe-Temperaturen (Heizkurven)
  - Elektrizitätsbedarf (Lastkurven)
- Katalog der Wärmequellen und Wärmesenken (Wärmeabnehmer) im Gebäude und in der Umgebung nach Ort, Zeit, Menge und Temperatur erstellen
- Sanierungskonzept für Wärmeverteilung und Wärmeabgabe
  - Einzelraumregelung, Thermostatventile
  - Optimierung Pumpen und Ventilatoren
  - Evtl. Vergrösserung der Heizflächen
- Abklärung der verfügbaren Energieträger
  - Elektrizität
  - Gas (Erdgas, Flüssiggas, Biogas)
  - Heizöl
  - Energieholz (Stückholz, Schnitzel, Späne)

Kasten 64

eingesparte oder zusätzlich produzierte Energie mindestens wettgemacht werden müssen. Hinzu kommt noch das Problem der Reihenfolge der Massnahmen. Beispielsweise kann eine Wärmekraftkopplungsanlage bei ungehemmtem Energieverbrauch durchaus wirtschaftlich sein, während sie nach der Ausführung anderer energiesparender Massnahmen scheinbar unwirtschaftlich wird, weil bei der gegebenen Anlagegrösse plötzlich nicht mehr genügend Wärme und Strom gebraucht wird.

Für energieeffiziente Techniken sollte in Zukunft vermehrt das Kriterium der «wirtschaftlichen Zumutbarkeit» berücksichtigt werden. Es ist nämlich so, dass manche Projekte mit günstigen Voraussetzungen für eine energiesparende Wärmeerzeugung durchaus als «wirtschaftlich zumutbar» bezeichnet werden könnten, wenn auch der Umweltnutzen – im Sinne einer «globalen Wirtschaftlichkeit» – einigermassen gerecht berücksichtigt würde.

### 7.3 Vorgehen

Wie erkennt man Anlagen mit günstigen Voraussetzungen für einen wirtschaftlich zumutbaren Einsatz energieeffizienter Techniken? Ganz einfach – durch Umkehr der Beweislast! Nicht die Wirtschaftlichkeit im engen Sinne soll bewiesen werden, sondern die Systemwahl soll beweisen, welche energieeffizienten Techniken wirtschaftlich nicht zumutbar sind.

Dazu sind verschiedene Vorarbeiten und Vorabklärungen notwendig, welche in Kasten 64 zusammengestellt sind. Aufgrund dieser Grundlagen ist es dann möglich, jene Wärmeerzeugungstechniken zu eruieren, die unter den gegebenen Umständen günstige Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen – oder doch wirtschaftlich zumutbaren – Betrieb aufweisen. Jene Wärmeerzeugungstechniken, die nicht eindeutig aufgrund ungünstiger Voraussetzungen ausgeschlossen werden können, sind nun einer möglichst objektiven Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu unterziehen

und in die Systemwahl – unter gebührender Berücksichtigung des Umweltnutzens – mit einzuschliessen.

 *Zahlreiche Beispiele von Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind in den themenspezifischen Heften 2 bis 4 zu finden*

# Benennungen, Formelzeichen, Abkürzungen

## Benennungen und Formelzeichen

Anergiestrom [W, kW].....	$\dot{Q}_A$	Kälteleistung Kältemaschine [kW].....	$\dot{Q}_{KM}$
Anlaufstrom [A].....	$I_{ANLAUF}$	Korrekturfaktor, allg. [-].....	f
Aufnahmeleistung bei Normdaten [kW].....	$P_{NT}$	Kosinus Phi, Leistungsfaktor [-].....	$\cos \varphi$
Auslastungsfaktor [-].....	$f_A$	k-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) [W/m <sup>2</sup> K]k	
Ausschalttemperatur [°C].....	$\vartheta_{AUS}$	k <sub>v</sub> -Wert (Durchflusskoeffizient) [m <sup>3</sup> /h].....	$k_V$
Betriebsdauer [h].....	$t_B$	k <sub>vs</sub> -Wert (Katalogwert für offenes Ventil) [m <sup>3</sup> /h]k <sub>vs</sub>	
Betriebsstrom, maximal [A].....	$I_{MAX}$	Ladetemperatur [°C].....	$\vartheta_{Ladung}$
Blindleistung [var, kvar].....	$P_q$	Leistung, allg. [W, kW].....	P
Blockierstrom [A].....	LRA	Leistung, Wärme [W, kW].....	$\dot{Q}$
Brennstoffverbrauch der Kesselanlage [kWh]W <sub>KEA</sub>		Leistungsanteil Verdampferdruckabfall [kW]...P <sub>V</sub>	
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ].....	$\rho$	Leistungsanteil Verflüssigerdruckabfall [kW].....	P <sub>K</sub>
Druck [Pa, kPa].....	p	Leistungsaufnahme Abtaueinrichtung, mittl. [kW].....	P <sub>A</sub>
Druckdifferenz [Pa, kPa].....	$\Delta p$	Leistungsaufnahme Pumpe [kW].....	P <sub>Pumpe</sub>
Druckdiff. über geschlossenem Ventil [Pa, kPa] $\Delta p_{V,0}$		Leistungsaufnahme Steuerung/Regelung [kW]P <sub>SR</sub>	
Druckdiff. über offenem Ventil [Pa, kPa]... $\Delta p_{V,100}$		Leistungsaufnahme Verdichter [kW].....	P <sub>WP</sub>
Druckdiff. durchflussvariable Strecke [Pa, kPa] $\Delta p_{Var,100}$		Leistungsfaktor, Kosinus Phi [-].....	$\cos \varphi$
Durchfluss, Massenstrom [kg/s, kg/h].....	$\dot{m}$	Leistungszahl [-].....	$\epsilon$
Durchfluss, Volumenstrom [l/s, l/h, m <sup>3</sup> /h].....	$\dot{V}$	Leistungszahl, Carnotsche [-].....	$\epsilon_C$
Einschalttemperatur [°C].....	$\vartheta_{EIN}$	Leistungszahl Wärmepumpe [-].....	$\epsilon_{WP}$
Elektro-Thermo-Verstärkung [-].....	ETV	Leistungszahl Kältemaschine [-].....	$\epsilon_{KM}$
Energie, allg. [J, MJ, Ws, kWh].....	W	Luftwechsel [-].....	LW
Energiekennzahl [MJ/m <sup>2</sup> a].....	E	Masse [kg].....	m
Energierückgewinn [MJ, kWh].....	ERG	Massenstrom [kg/s, kg/h].....	$\dot{m}$
Energieverbrauch Abtaueinrichtung [kWh]... W <sub>A</sub>		Massenstrom Arbeitsmittel [kg/s, kg/h].....	$\dot{m}_{AM}$
Energieverbrauch Carterheizung [kWh].....	W <sub>C</sub>	Netto-Energierückgewinn [MJ, kWh].....	ERG <sub>N</sub>
Energieverbrauch Steuerung/Regelung [kWh]W <sub>SR</sub>		Nutzungsgrad [-].....	$\eta$
Energieverbrauch Verdampferpumpe [kWh]W <sub>P,V</sub>		Pumpenwirkungsgrad [-].....	$\eta_{Pumpe}$
Energieverbrauch Verdichter [kWh].....	W <sub>WP</sub>	Rücklauftemperatur [°C].....	$\vartheta_{RL}$
Energieverbrauch Verflüssigerpumpe [kWh]. W <sub>P,K</sub>		Schaltheufigkeit, maximale [1/h].....	n <sub>MAX</sub>
Enthalpie [J/kg, kJ/kg, kWh/kg].....	h	Scheinleistung [VA, kVA].....	P <sub>S</sub>
Enthalpiewirkungsgrad [-].....	$\eta_h$	Spannung [V].....	U
Exergetischer Wirkungsgrad [-].....	$\xi$	Speicherinhalt [m <sup>3</sup> ].....	V <sub>SP</sub>
Exergiestrom [W, kW].....	$\dot{Q}_E$	Speicherkapazität [kWh].....	Q <sub>SP</sub>
Feuchte, absolut [g/kg].....	X	Spez. Wärmekapazität [J/kgK, kWh/kgK].....	c
Feuchte, relativ [%].....	$\varphi$	Spez. Wärmemenge [MJ/m <sup>3</sup> , kWh/m <sup>3</sup> ].....	q
Feuchtwirkungsgrad [-].....	$\eta_x$	Strom [A].....	I
Fläche [m <sup>2</sup> ].....	A	Stromkennzahl [-].....	S
Förderhöhe [mWS, Pa, kPa].....	H	Temperatur [°C].....	$\vartheta$
Förderstrom [l/s, l/h, m <sup>3</sup> /h].....	$\dot{V}$	Temperatur, absolut [K].....	T
Geschwindigkeit [m/s].....	v	Temperaturdiff. VL-RL im Auslegepunkt [K] $\Delta\vartheta_{Auslegung}$	
Heizleistung Verflüssiger [kW].....	$\dot{Q}_{WP}, \dot{Q}_K$	Temperaturdiff. VL-RL im Bivalenzpunkt [K] $\Delta\vartheta_{Bivalenz}$	
Heizwert, oberer [kWh/kg, kWh/m <sup>3</sup> ].....	H <sub>o</sub>	Temperaturdifferenz [K].....	$\Delta\vartheta, \Delta T$
Heizwert, unterer [kWh/kg, kWh/m <sup>3</sup> ].....	H <sub>u</sub>	Temperaturdifferenz über Verflüssiger [K].....	$\Delta\vartheta_K$
Hilfsenergie [MJ, kWh].....	W <sub>H</sub>	Temperaturdifferenz, mittlere logarithmische [K] $\Delta\vartheta_m$	
Hilfsenergieverbrauch der Kesselanlage [kWh]W <sub>KEA,H</sub>		Temperaturwirkungsgrad [-].....	$\eta_\vartheta$
hydraulische Leistung [W, kW].....	P <sub>hydraul.</sub>	Ventilautorität [-].....	VA
Jahresarbeitszahl [-].....	JAZ	Verbraucherautortät [-].....	VBA
Jahresnutzungsgrad Kessel [-].....	$\eta_{KE,J}$	Verdampferaustrittstemperatur, minimal [°C] $\vartheta_{V,MIN}$	
		Verdampfungstemperatur [°C].....	$\vartheta_{Verdampfung}$

Verdampfungstemperatur, minimal [°C] $\vartheta_{\text{Verdampfung, MIN}}$	Istwert .....	IST
Verflüssigeraustrittstemperatur [°C] .....	Kältemaschine .....	KM
Verflüssigeraustrittstemperatur, maximal [°C] $\vartheta_{K,MAX}$	Kessel .....	KE
Verflüssigerdurchfluss [m <sup>3</sup> /h] .....	Kesselanlage .....	KEA
Verflüssigungstemperatur [°C] .....	Maximalwert .....	MAX
Verflüssigungstemperatur, maximal [°C] $\vartheta_{\text{Verflüssigung, MAX}}$	Minimalwert .....	MIN
Volumen [l, m <sup>3</sup> ] .....	Nennwert .....	N
Volumenstrom [l/s, l/h, m <sup>3</sup> /h] .....	Pumpe .....	P
Vorlauftemperatur [°C] .....	Quelle .....	Q
Wärmeleistung, allg. [W, kW] .....	Rücklauf .....	RL
Wärmeleistung Wärmepumpe [kW] .....	Senke .....	S
Wärmemenge Wärmeerzeugungsanlage [kWh] $Q_{WEA}$	Speicher .....	SP
Wärmemenge Wärmepumpe [kWh] .....	Speicheranlage .....	SPA
Wärmemenge, allg. [J, MJ, Ws, kWh] .....	Sollwert .....	SOLL
Wärmestrom [W, kW] .....	Steuerung/Regelung .....	SR
Wärmeverluste der Speicheranlage [kWh] ..	thermisch .....	th
Widerstand [Ω] .....	Thermostatventil .....	TRV
Wirkleistung [W, kW] .....	Total .....	TOT
Wirkungsgrad, Carnotscher [-] .....	Übergabe .....	Ü
Wirkungsgrad [-] .....	Umluft .....	UML
Zeit [s, h] .....	variabel .....	var
Zeitkonstante [s, h] .....	Ventil .....	V
	Verbraucher .....	VB
	Verdampfer .....	V
	Verflüssiger («Kondensator») .....	K
	Vorlauf .....	VL
	Wärmeabgabe .....	WA
	Wärmeerzeugungsanlage .....	WEA
	Wärmeleistung .....	WKK
	Wärmenutzungsanlage .....	WNA
	Wärmepumpe .....	WP
	Wärmepumpenheizungsanlage .....	WPHA
	Wärmepumpenanlage .....	WPA
	Wärmequelle .....	WQ
	Wärmequellenanlage .....	WQA
	Wärmerückgewinnung .....	WRG
	Wärmeverteilung .....	WV
	Warmwasser .....	WW
	Zuluft .....	ZUL

<b>Indizes</b>	
Wärmeabgebendes Medium .....	1 <sub>-</sub>
Wärmeaufnehmendes Medium .....	2 <sub>-</sub>
Eintritt .....	-1
Austritt .....	-2
geschlossen (0%) .....	0
offen (100%) .....	100

<b>Abkürzungen (auch als Indizes verwendet)</b>	
Abluft .....	ABL
Abwärmennutzung .....	AWN
Arbeitsmittel .....	AM
aussen .....	a
Aussenluft .....	AUL
Austritt .....	A
Blockheizkraftwerk .....	BHKW
Brennstoff .....	BR
Drossel .....	D
Eintritt .....	E
elektrisch .....	el
Energiebezugsfläche .....	EBF
Fortluft .....	FOL
Fussbodenheizung .....	FBH
Heizkörper .....	HK
Heizungsanlage .....	HA
innen .....	i

# Index

- Abgleich an den Verbrauchern, 48  
Abkürzungen, 57  
Absorptionswärmepumpe, 20  
Abwärmenutzung, 6; 15; 17  
Anergie, 12  
Antriebsleistung, 36  
Arbeitsmittel, 9  
Auslegungsrichtlinien, 49; 50  
Bauherr, 54  
Beimischschaltung, 29  
Benennungen, 57  
Betriebsoptimierung, 51; 54  
Bewertungsfaktoren, 13; 14  
Blockheizkraftwerk, 7; 14; 22  
Carnot, Nicolas L. Sadi (1796-1832), 9  
Carnotsche Leistungszahl, 9; 13  
Carnotscher Kreisprozess, 9; 12  
Carnotscher Wirkungsgrad, 9; 13  
chemisch gebundene Energie, 12  
COP, 21  
Dampfturbine, 11  
drehzahlgesteuerte Umwälzpumpe, 38  
Drehzahlsteuergeräte, 38  
Dreiwegventil, 29  
Drosselschaltung, 29  
Druck-Enthalpie-Diagramm, 9  
Druckdifferenz, 30; 36  
Druckdifferenzregelung, 39; 40; 50  
Durchfluss, 30; 36  
Durchgangsventil, 29  
Einbindungsprobleme, 45  
Einheiten, 57  
Einspritzschaltung mit Dreiwegventil, 29  
Einspritzschaltung mit Durchgangsventil, 29  
Einspritzverteiler mit Dreiwegventilen, 45  
elektrische Energie, 12  
elektrische Wassererwärmung, 5  
Elektro-Leichtfahrzeug, 15  
Elektro-Thermo-Verstärkung, 7; 15; 19; 22  
Elektrowiderstandsheizung, 5; 13; 14  
Elektrozähler, 41  
Energieberater(in), 51  
Energiebilanz der Schweiz, 5  
Energiegesetze, kantonale, 27  
Energiesmessung, 41  
Energienutzungsbeschluss, 27  
Energieplaner(in), 51  
Energieumwandlung, 9; 14  
Energieverbrauch, 25  
Enthalpie, 9  
Erdgas, 42  
Erfolgskontrolle, 51; 53; 54  
Ersatzluftanlage, 15  
erster Hauptsatz der Wärmelehre, 11  
Exergetischer Wirkungsgrad, 13  
Exergie, 12; 13  
Expansion, 10  
Faustregeln für Bewertungsfaktoren, 13  
Feinanalyse, 27  
Fernleitung, 40  
Fernwärme, 6  
flache Pumpenkennlinie, 37  
Förderhöhe, 32  
Förderstrom, 32  
Formelzeichen, 57  
Frequenzumformer, 38  
Gasmotor-Blockheizkraftwerk, 23  
Gasmotorwärmepumpe, 14  
Gasturbinen-Blockheizkraftwerk, 23  
Gaszähler, 42  
Gesamtkonzept, 51; 53  
gewichteter Jahresnutzungsgrad, 25  
gleichprozentige Grundkennlinie, 30  
Grobanalyse, 27  
Grundkennlinie eines Regelventils, 30  
Grundsaltungen, hydraulische, 29; 31  
Gütegrad, 13  
Hauptsätze der Wärmelehre, 11  
Heizöl, 42  
Heizwärme, 12  
Heizwert von Erdgas, 42  
Heizwert von Heizöl, 42  
Honorarordnung, 53  
Hydraulik, 29  
hydraulische Grundsaltungen, 29; 31  
hydraulischer Abgleich, 47  
Impulsausgang, 44  
Indizes, 57  
Jahresarbeitszahl, 22  
Jahresnutzungsgrad, 24  
Jahreswärmebedarf, 24  
Kältemaschine, 9; 11  
Kältezähler, 43  
kantonale Energiegesetze, 27  
Klein-Blockheizkraftwerk, 23  
Kohlendioxid ausstoss, 25  
Kombi-Heizkraftwerk, 14; 23  
Kompressionswärmepumpe, 20  
Kreislaufverbundsystem, 17  
Kreisprozess, 9  
Lärmprobleme, 35  
Leistungszahl, 13; 21  
Leistungszahl der Kältemaschine, 10  
Leistungszahl der Wärmepumpe, 10  
Lenkungs- und Fördermassnahmen, 27  
lineare Grundkennlinie, 30  
Literaturhinweise, 8; 29; 46; 51; 53; 55  
Luft-Wasser-Wärmepumpe, 21  
mechanische Energie, 12  
Messfehler eines Wärmezählers, 44  
negative Pumpenkennlinie, 38  
Netzkennlinie, 33  
Niedertemperatur-Wärmeabgabesystem, 20  
Notstromanlage, 24  
Nulldurchfluss, 40  
Nutzungsgrad, 24  
Pflichtenheft, 51; 53  
Phasenanschnittgerät, 38

- Planer(in), 51  
Planungsablauf, 51  
Plattenwärmetauscher, 17  
Primärenergie, 5  
Prozesswärme, 5  
Publikationen des Ressorts «Wärme», 8  
Pumpe, 35; 50  
Pumpenbetrieb bei Nulldurchfluss, 40  
Pumpenkennlinie, 32  
Pumpenleistung, 30  
Pumpenstromverbrauch, 35  
Pumpenwirkungsgrad, 36  
Qualitätssicherung, 51  
R-Wert, 50  
Regelventil, 29  
Reihenfolge der Massnahmen, 52  
Rotationswärmetauscher, 18  
Schaltungstechnik, 45  
Schriftenreihe «RAVEL im Wärmesektor», 8  
SIA-Honorarordnung, 53  
Solaranlage, 15  
Sole-Wasser-Wärmepumpe, 21  
Speicher, 46  
Spitzenkessel, 24  
Stand der Technik, 14  
Standardschaltungen, 46  
steile Pumpenkennlinie, 37  
strangweiser Abgleich, 48  
Strategie mit fossiler Stromproduktion, 26  
Strategien, 25  
Stromführung, 23  
Stromkennzahl, 25  
Stromverbrauch von Pumpen, 35  
Temperaturdifferenz Vorlauf/Rücklauf, 50  
Temperaturwirkungsgrad, 19  
Thermostatventil, 34; 39; 50  
Umgebungswärme, 12  
Umlenkschaltung, 29  
Umwälzpumpe, 35; 50  
umweltneutrale Stromproduktion, 25  
Umweltstrategie, 26; 27  
Ventil, 29  
Ventilautorität, 30; 34; 43; 50  
Ventilkennlinie, 32  
Verbraucher, 33  
Verbraucherautorität, 33; 34; 50  
Verdampfung, 10  
Verdichtung, 10  
Verflüssigung, 10  
Verteiler, 46  
Verteiler ohne Hauptpumpe, 35  
Wärmeerzeugungstechniken, 14  
Wärmeführung, 23  
Wärmeleistung, 7; 22  
Wärmeleistungsmaschine, 9; 11  
Wärmeleistungsbedarf, 24  
Wärmepumpe, 6; 9; 11; 12; 14; 15; 18; 19  
Wärmepumpenboiler, 21  
Wärmerückgewinnung, 6; 15; 17  
Wärmespeicher, 24  
Wärmetauscher, 32  
Wärmezähler, 43  
Wasser-Wasser-Wärmepumpe, 20  
Wassererwärmung, elektrische, 5  
Wertigkeit, 6; 11; 12  
wichtige Formeln, 29  
Wirkungsgrad, 13; 36  
Wirtschaftlichkeit, 55  
zweiter Hauptsatz der Wärmelehre, 11