

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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 83 (1992)

Heft: 18

Artikel: Ammoniak-Wärmepumpe im EWZ-Limmatwerk Wettingen

Autor: Sigrist, B. / Adam, C.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902866>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 15.05.2025

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

Ammoniak-Wärmepumpe im EWZ-Limmatwerk Wettingen

B. Sigrist und C. Adam

Wärmepumpen haben in der Energiepolitik der Schweiz eine hohe Priorität. Als Folge steigender Kapitalkosten und real sinkender Heizölpreise ist es aber notwendig, die Wirkungsgrade zu steigern. Gleichzeitig zwingt uns die Ozonloch-Problematik zu neuen Wegen in der Wärmepumpentechnik. Der Schritt zurück zum altbewährten Ammoniak als Kältemittel ist gleichzeitig ein Schritt in die Zukunft.

Les pompes à chaleur occupent une place importante dans la politique énergétique suisse. Leur rendement doit toutefois être augmenté, du fait de l'augmentation des frais de capital et de la diminution du prix du mazout de chauffage. Les problèmes relatifs à la couche d'ozone nous obligent en même temps à recourir à d'autres solutions dans la technique des pompes à chaleur. Le fait d'utiliser à nouveau l'ammoniaque comme produit de refroidissement représente à la fois un pas en arrière et un pas en avant.

Energiepolitische Situation

Die Stabilisierung des Energiebedarfs der Schweiz gemäss den Zielen von «Energie 2000» ist noch lange nicht erreicht. Es müssen noch grosse Anstrengungen unternommen werden, um sich diesen Zielen anzunähern. Dabei nimmt auch die Förderung von guten Wärmepumpenanlagen eine hohe Priorität ein.

Die Heizölpreise haben sich seit 1986 auf einem tiefen Niveau stabilisiert. Die Szenarien mit überproportional ansteigenden Preisen für fossile Energieträger haben sich bisher nicht bestätigt. Damit ist der Anreiz für kapitalintensive Energiesparmassnahmen zurückgegangen. Die überproportional angestiegenen Kapitalkosten wirken ebenfalls hemmend auf die energiepolitisch sinnvollen Wärmepumpenprojekte aus.

Um so mehr müssen Anstrengungen unternommen werden, Wärmepumpen mit hohem Wirkungsgrad zu realisie-

ren. Dies ist nur durch optimale Anpassung der Anlagen an die Randbedingungen möglich:

- Abwärmequellen, Umweltenergie
- Heizsystem (Temperaturen)
- Kältemittel
- Wärmepumpe (Auslegung der Komponenten).

Umweltproblematik

Die Wärmepumpentechnik hat einen weiteren Rückschlag erlitten, als bewiesen wurde, dass das oft für Wärmepumpen verwendete Kältemittel R 12 einen wesentlichen Einfluss auf den Abbau der schützenden Ozonschicht hat. Heute dürfen dementsprechend keine Anlagen mehr in Betrieb genommen werden, die dieses Kältemittel enthalten.

Mit dem noch zulässigen Kältemittel R 22 können Wärmepumpen mit tiefen Vorlauftemperaturen gebaut werden. Der Einfluss auf die Ozonschicht ist 18mal geringer als bei R 12 (Tabelle I).

	R 22	R 134 a	R 717	R 11	R 12
RODP *	0,055	0	0	1,0	1,0
RGWP **	0,34	0,28	< 0,01	1,0	3,0
Stabilität in der Atmosphäre	zersetzt sich erst beim Aufstieg in die Stratosphäre, Spaltprodukte werden ausgewaschen	zersetzt sich in der Troposphäre, Spaltprodukte werden ausgewaschen	wird durch Niederschläge sofort ausgewaschen	inerte Gase, kein Abbau in der Troposphäre; wirken in der Stratosphäre stark ozonschichtschädigend	
EAL ***	15	16	0	60	130

* Relatives Ozon-Verarmungspotential

** Relatives globales Erwärmungspotential (Zeithorizont 500 Jahre)

*** Estimate Atmospheric Lifetime in Jahren

(Quelle: AFEAS; Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing)

Tabelle I Umweltbelastung durch Kältemittel

Adressen der Autoren

B. Sigrist, Hochbauamt des Kantons Aargau,
5001 Aarau.

C. Adam, Colenco AG, Mellingerstrasse 207,
5405 Baden.

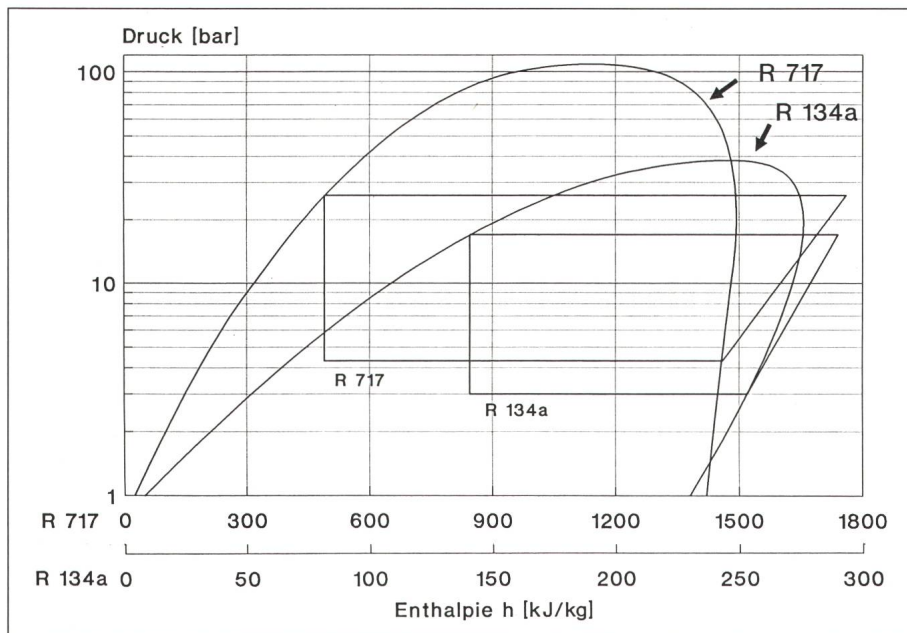


Bild 1 Thermodynamische Eigenschaften der Kältemittel R 134a und R 717 (Ammoniak)

Als Ersatzkältemittel für R 12 wurde ein chlorfreies unbrennbares Gas entwickelt: R 134a, Tetrafluorethan (CH_2FCF_3). Nach heutigen Erkenntnissen zersetzt sich dieses Gas in der Troposphäre und baut die schützende Ozonschicht nicht ab. Es eignet sich vor allem im tieferen Temperaturbereich; für Wärmepumpen sind die thermodynamischen Eigenschaften wesentlich schlechter als bei R 12.

Die Löslichkeit von R 22 und R 134a im Wasser ist gering und die Toxizität so klein, dass keine Gefährdung des Grundwassers entsteht (nur das Schmieröl ist problematisch).

Ammoniak ist ein seit über 100 Jahren bewährtes Kältemittel; es beeinflusst die Vorgänge in der Atmosphäre praktisch nicht. 99,9% des Ammoniaks in unserer Lufthülle ist natürlichen Ursprungs, es entsteht bei Gewittern und bei den Zersetzungs Vorgängen von Eiweiss. Das stark basische Ammoniak (NH_3 , Kältemittelbezeichnung R 717) wird bei Regenfällen ausgewaschen und wirkt neutralisierend auf den «saurer Regen». Lokal ist ein Austritt des leichten Ammoniakgases gefährlich, da es stark ätzend wirkt. Die Löslichkeit von Ammoniak in Wasser ist sehr hoch; eine direkte Kontamination von Grundwasser muss deshalb vermieden oder zumindest überwacht werden.

Die beiden Kältemittel R 22 und R 134a werden als schwer brennbar bzw. nicht brennbar eingestuft. Ammoniak dagegen ist in Konzentrationen von 15 bis 30 Volumenprozent brennbar. Die Produkte, die bei einer thermischen Zersetzung der beiden erstgenannten

Kältemittel entstehen können, sind aber kritischer als das effektive Brandrisiko.

Thermodynamische Eigenschaften

Um gute Wirkungsgrade von Wärmepumpen zu erzielen, sind primär die thermodynamischen Eigenschaften der Kältemittel massgebend. Erst in zweiter Linie ist die optimale Anpassung der Anlage an die Randbedingungen ausschlaggebend.

Anhand eines repräsentativen Beispiels wird nachfolgend versucht, einen

Vergleich der beiden Kältemittel R 134a und R 717 (Ammoniak) zu geben. Die beiden Zustandsdiagramme (Bild 1) wurden dazu übereinander gezeichnet und derselbe Wärmepumpenprozess eingezeichnet: 0 °C Verdampfung, 60 °C Kondensation. Da sich die Verdampfungswärme der beiden Kältemittel um den Faktor 6,5 (bei 1 bar) unterscheiden, musste der Enthalpiemassstab unterschiedlich gewählt werden (1:6).

Durch den flachen Verlauf der Siedelinie des Kältemittels R 134a expandiert es im Entspannungsventil auf einen Zustand mit bereits 40% Dampfgehalt. Es kann also nur noch 60% der Verdampfungsenthalpie zugeführt werden. Die wesentlich steilere Siedelinie des Ammoniaks erlaubt dagegen die Aufnahme von 80% der Verdampfungswärme. Damit wird das Verhältnis zwischen Verdampfungswärme (= Umweltenergie) und zugeführter Verdichtungsenergie besser. Durch die günstigeren thermodynamischen Eigenschaften von Ammoniak können deshalb etwa 30% der Antriebsenergie gespart werden.

Weitere Vorteile entstehen durch die wesentlich höhere spezifische Verdampfungswärme; sie führt dazu, dass der Kompressor kleiner gebaut werden kann (Ansaugvolumen 45% bei NH_3). Das Verdichtungsverhältnis ist jedoch bei Ammoniak etwas höher (6,1 gegenüber 5,7).

Kritisch ist zurzeit, dass nur wenige Verdichter für Drücke über 25 bar gebaut werden. Kleine (hermetische) Verdichter können bisher nicht eingesetzt

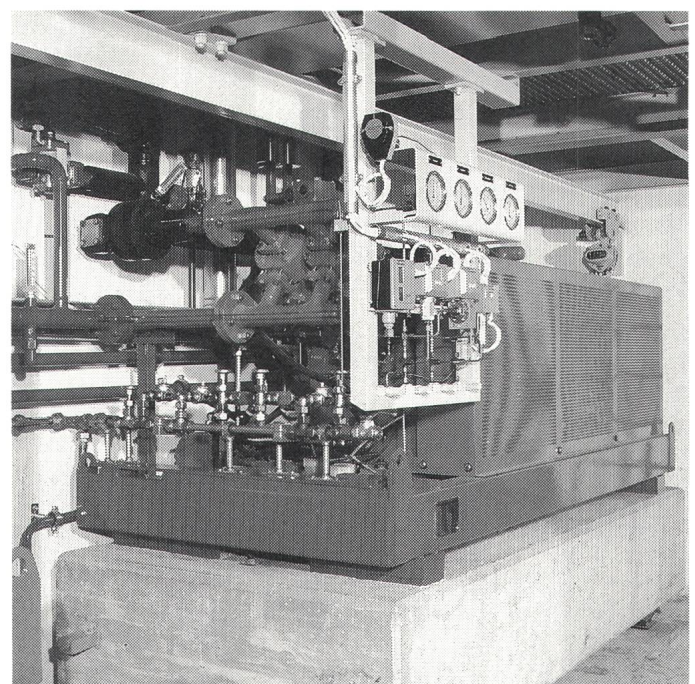


Bild 2 Ölfreier Hochdruckkompressor

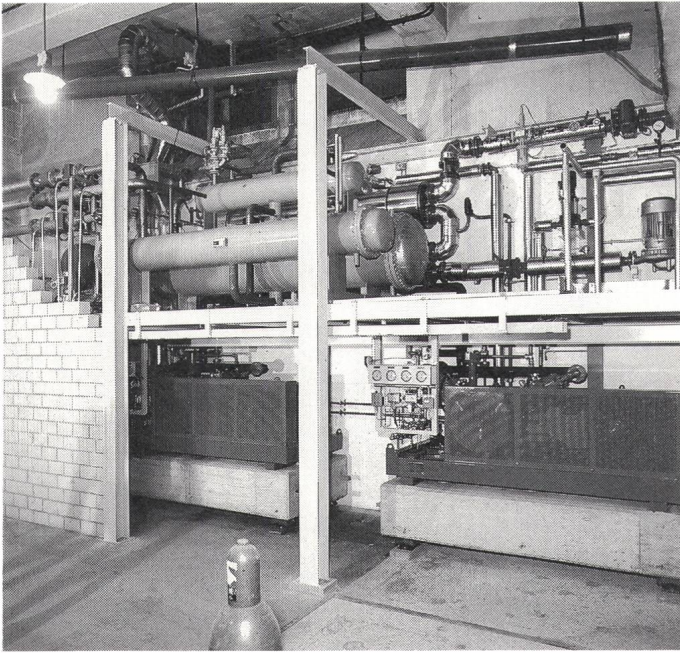


Bild 3
Wärmepumpenanlage

werden, da das Ammoniak die Motorwicklungen korrodieren würde (kupferfreie, mit Aluminiumdrähten gewickelte hermetische Verdichter sind zurzeit nicht auf dem Markt).

Auslegung der Wärmepumpe im Limmatwerk Wettingen

Ausgangslage

Die bei der Elektrizitätserzeugung entstehende Abwärme im Limmatwerk des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich (EWZ) wird zum Teil für die Beheizung der Wohnkolonien des EWZ sowie der Kantonsschule Wettingen genutzt. Zu diesem Zweck wurde bereits 1945 im EW Wettingen eine Wärmepumpe installiert. Die Wärme wurde der Generatorkühlluft und dem Transformatorenkühlwasser entzogen. Die bereits damals für Ammoniak ausgelegte Anlage musste nach 42 Jahren durch eine Wärmepumpe mit höherer Leistung und höherer Vorlauftemperatur ersetzt werden. Die neue Wärmepumpenanlage wurde durch den Kanton Aargau, vertreten durch das Baudepartement, Abteilung Hochbau, finanziert und begleitet, die Erneuerung des Kühlwassersystems und die Bereitstellung der Abwärme durch das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich.

Randbedingungen

An den drei Wasserturbinen des EWZ-Limmatwerkes fällt je an drei verschiedenen Stellen Abwärme an, wenn sie in Betrieb sind:

- Spurlager (40 kW, konstant)
- Generatorkühlluft (< 130 kW, lastabhängig)
- Transformator (10–60 kW, lastabhängig)

Die Wasserführung der Limmat ist abhängig von den Niederschlägen und von der Nutzung des Sihl-Stausees. Der Zürichsee trägt wenig zur Vergleichsmässigung des Abflusses bei, da er nicht als Stausee dient. Das Kraftwerk in Wettingen hat deshalb mindestens eine, aber meistens zwei Turbinen in Betrieb. Die dritte Turbine ist nur ein Drittel des Jahres in Betrieb. Aus den statistischen Daten der Wasserführung mehrerer Jahre konnte die Wahrscheinlichkeit der Verfügbarkeit von Abwärme errechnet werden.

Die Abwärme der Generatoren wird im Winter primär genutzt, um die Maschinenhalle zu heizen. Dieser Anteil fehlt genau dann, wenn auch die Kantonsschule ihren höchsten Wärmeleistungsbedarf hat (max. 1300 kW).

Auslegung

Aufgrund der ermittelten Randbedingungen wurde die Anlage auf 400 kW Wärmeleistung dimensioniert.

Da sowohl die Abwärmeleistung als auch der Wärmebedarf der Schule und der mitangeschlossenen Wohnblöcke variabel sind, wurde folgendes Konzept gewählt:

- 2 Kolbenkompressoreinheiten
- variable Drehzahl 50–100%
- 2 Kondensatoren in Serie
- 2 überflutete Verdampfer mit einem gemeinsamen Tropfenabscheider

Die Anlage mit einer Wärmeleistung zwischen 100 kW und 400 kW bezieht die Abwärme primär aus dem Kühlkreislauf der Spurlager und Transformatoren. Über einen separaten, geschlossenen Kreislauf wird die Generatorenabwärme zusätzlich verwendet, wenn sie zur Verfügung steht. Dazu ist ein zweiter Verdampfer vorgesehen. Wenn genügend Abwärme dem Kühlkreis entnommen werden kann, wird dieser bevorzugt, da höhere Verdampfungstemperaturen erreicht werden können.

Da zur Vollversorgung eine Vorlauftemperatur von 60 °C erreicht werden musste, kamen nur Ammoniakkompressoren für Drücke bis 35 bar in Frage. Zum Zeitpunkt der Ausschreibung der Anlage (1988) konnte nur ein ölfreier Labyrinthkolbenverdichter von Sulzer Burckhardt die Bedingungen erfüllen (Bild 2).

Aufbau der Anlage

Alle mit Ammoniak gefüllten Komponenten sind in einem geschlossenen Raum untergebracht, der im Unterdruck belüftet wird. Ausserhalb dieses Raumes sind alle elektrischen Installationen untergebracht.

Die zum Kraftwerk führenden Kühlwasserleitungen sind an zwei Stellen (redundant) überwacht, so dass ein Ammoniak-Austritt ins Kühlsystem sofort detektiert würde und die Leitungen automatisch abgeschiebert würden.

In Bild 3 sind unten die beiden Kompressoren sichtbar. Im oberen Stockwerk sind vorne die beiden überfluteten Verdampfer mit dem darüberliegenden gemeinsamen Tropfenabscheider angeordnet. Dahinter sind übereinander die in Serie geschalteten Kondensatoren aufgestellt. Die Zylinderkopfkühlung kann bei diesem Verdichter direkt mit dem Heizwasser erfolgen, was einen zusätzlichen thermodynamischen Vorteil bringt. (Das Bild konnte aufgenommen werden, bevor die umhüllende Mauer geschlossen wurde).

Im danebenliegenden Raum wurden die Leittechnik und die Frequenzumrichter aufgestellt. Die räumliche Trennung ist empfehlenswert, da Ammoniakdämpfe auch in geringer Konzentration genügen, um Kupfermetalle anzugreifen.

Die Verwendung von Wechselrichtern für die Leistungsregulierung hat neben den Vorteilen (frei wählbare Drehzahlen, die ausserhalb von Resonanzfrequenzen liegen) auch zu Nachteilen geführt. Da die Wechselrichter an einem kleinen Eigenbedarfstransformator des Kraftwerkes angeschlossen sind,

mussten die entstehenden Oberwellen mit hohem Aufwand gefiltert werden.

Die Leittechnik erlaubt eine flexible Anpassung der Prozesse und deren Überwachung. Störmeldungen werden über ein Telefonmodem direkt an die Servicezentrale übertragen.

Alle Regelkreise, die die Kraftwerks-sicherheit beeinflussen könnten, sind dezentralisiert. Bei Ausfall eines lokalen Reglers gehen die Ventile in die «sichere Position». Es fließt dann mehr Kühlwasser durch die Kühler als minimal notwendig.

Messungen

Während eines vollen Jahres wurden Messungen mittels Datalogger durchgeführt.

Unabhängig davon werden die wichtigsten vier Parameter der Fernwärmeabgabe immer kontinuierlich auf Papierstreifen geschrieben:

- abgegebene Wärmeleistung
- Heizwasserdurchfluss
- Vorlauftemperatur des Heizwassers
- Rücklauftemperatur des Heizwassers

Der Energiebedarf der gesamten Anlage und derjenigen der Wärmepumpe allein können mit geeichten Stromzählern erfasst werden. Die Leistungen der beiden Verdampfer können über wasserseitig eingebaute Wärmezähler gemessen werden.

Die Messungen hatten zum Ziel, das dynamische Verhalten der Anlage zu erfassen und eine thermodynamische

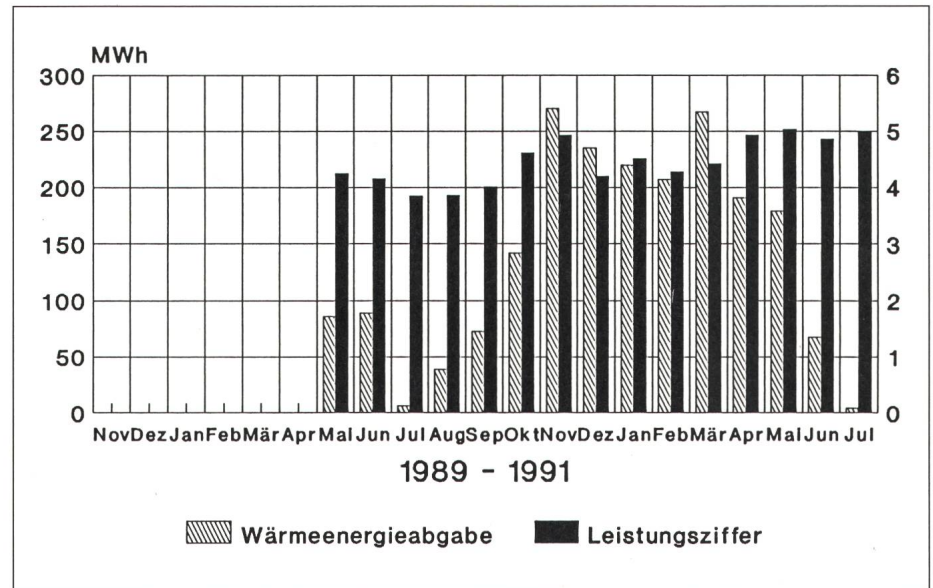


Bild 4 Leistungsziffer der Wärmepumpe

Optimierung durchzuführen. Bild 4 zeigt deutlich, dass die Leistungsziffer von 4 in der Periode Mai bis September 1990 auf 4,5 in der Periode Oktober 1990 bis März 1991 und schliesslich auf 5 gesteigert werden konnte (ab April 1991). Die Nebenaggregate (Umwälzpumpen der Kühlkreisläufe, drehzahl-geregelte Fernwärmepumpe) tragen allerdings dazu bei, dass die mittlere Anlagen-Leistungszahl bei 4,3 liegt.

Die Auslegung der Wärmepumpe auf 400 kW Heizleistung hat sich als richtig erwiesen. Die Anlage erreicht – eingeschränkt durch Abwärmeangebot und

Wärmebedarf – 4000 Vollaststunden im Jahr. Vom Gesamtwärmebedarf der Wohnblöcke und der Kantonsschule deckt die Wärmepumpe 70%. Eine Kesselanlage übernimmt die Spitzendeckung im Parallelbetrieb. Die Wärmepumpenanlage im EWZ-Limmatwerk hat die Erwartungen bezüglich Leistung, Leistungsziffer und Wärmeproduktion um je etwa 10% übertroffen (Bild 5).

Erfahrungen und Ausblick

Mit der Wärmepumpenanlage im Limmatwerk in Wettingen konnten gute, aber auch harte Erfahrungen gesammelt werden:

- Die Ammoniak-Technologie hat sich bewährt und führte zu guten Resultaten.
- Die Beobachtung einer Anlage über ein Jahr lohnt sich, es können wesentliche Verbesserungen der Betriebsweise erzielt werden.
- Die Umrichtertechnik wird mit vermehrter Anwendung – speziell bei kleinen Netzen – zu einem grossen Problem bezüglich Oberwellen.

Die Wärmepumpentechnologie sollte unter Berücksichtigung der lokalen und globalen Umweltsituation weiterentwickelt werden, auch wenn sie zurzeit meist unwirtschaftlich ist. Beim heutigen Missverhältnis von Kapitalkosten und Preisen für fossile Energie sind die Anlagen selten amortisierbar. Sie gehören aber trotzdem zu den effektivsten Möglichkeiten, Energie zu sparen und fossile Energie zu substituieren.

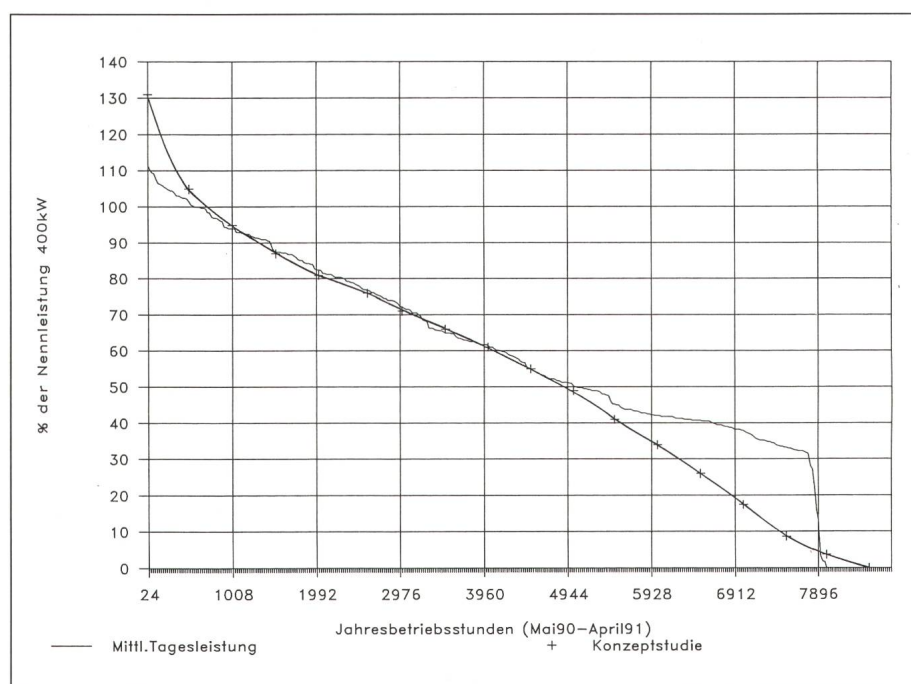


Bild 5 Geordnete Jahresganglinie der Heizleistung

Beispielhaft in der Montage



Kanäle auflegen – Kabel einlegen

Kabel- und Bodenkanäle aus glasfaserverstärktem Polyester-Kunststoff (GFK) bieten Sicherheit in Geschäfts- und Industriebauten, in Bahn- und Strassentunnels sowie in Freiluftanlagen. Das Material hat sich in Raumfahrt und anderen Hochtechnologiegebieten bewährt – und die daraus gefertigten Ebo-Kanäle sind international bekannt.

Ebo-Systeme sind von Praktikern für Praktiker entwickelt worden.

Für eine schnelle, perfekte und wirtschaftliche Montage stehen Formteile für Richtungsänderungen, Deckel, umfassendes Zubehör sowie ein patentiertes Befestigungssystem zur Verfügung. Mit einem leichten Hammerschlag werden die Ordnungstrennbolzen in die dafür vorgesehenen Schlitze dauerhaft eingebracht. Verstärkungsrippen ergeben eine hohe Stabilität und einen geringen Gleitwiderstand beim Einziehen der Kabel.

Das Preis-Leistungsverhältnis ist sehr attraktiv, denn das geringe Gewicht der Kanäle, die schraubenlosen Verbindungen durch das Muffensystem sowie die einfache Bearbeitung mit üblichen Handwerkzeugen wie Stichsäge und Bohrer, verkürzen die Montagezeiten erheblich. Entgraten entfällt und es besteht weder für die Arbeitenden noch für die Kabel eine Verletzungsgefahr. Der Langzeitnutzen ist der «Zusatzbonus».

Kabelkanäle mit besonderen Eigenschaften

GFK unterliegt im Temperaturbereich von -80 bis $+130^{\circ}\text{C}$ keinerlei Verformungen. Ein 8-mm-Zwischenraum in den Muffenverbindungen gleicht Längenänderungen aus. Die Kanäle sind dauerhaft beständig gegen intensive UV-Strahlung, Witterungseinflüsse, Abgase und Flugrost. Ebo-Kanäle sind alterungsbeständig weil sie nicht verspröden.

Ebo-Kanäle korrodieren nicht. Sie sind beständig gegen Säuren, Laugen und die meisten Chemikalien. Das Material ist lebensmittelunbedenklich und ausserdem



isolierend, schwerentflammbar, hitzebeständig, selbstverlöschend und halogenfrei. Im Brandfall bietet es den Kabeln einen längeren Schutz.

Keine Umgebung ist für Ebo-GFK-Kanäle zu extrem: Feucht- und Nassräume, Flughäfen, Strassen-, Bahn- und Kläranlagen, Chemie- und Lebensmittelbetriebe – aber auch Banken, Versicherungen, Sportstadien, öffentliche Gebäude, Parkgarage usw.

Der Vertrieb über den Elektro-Grosshandel garantiert, dass Ebo-Produkte immer in der Nähe zu finden sind.



Ebo AG
Zürichstrasse 103
CH-8134 Adliswil
Tel. 01/482 86 86
Fax 01/482 86 25