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: 85 (1994)

Heft: 24

Artikel: Messungen an elf Wärmekraftkopplungsanlagen im Kanton Zürich

Autor: Lang, R. / Gmür, C. / Leibundgut, H. J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902639

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

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

Unter dem Begriff Wärmekraftkopplungsanlagen (WKK) versteht man Anlagen, die in die Heizung eines Gebäudes integriert werden und gleichzeitig Heizwärme und Strom produzieren. Die WKK-Technologie wird in Zukunft möglicherweise erheblich an Bedeutung gewinnen, weil sie an das globale Ziel, den CO_2-Ausstoss zu verringern, einen namhaften Beitrag leisten kann, wenn gleichzeitig elektrische Wärmepumpen vermehrt eingesetzt werden. Die WKK-Technologie bietet den grossen Vorteil, dass das Potential möglicher Standorte in bestehenden Heizanlagen gross ist und die Anlagen bei Bedarf kurzfristig realisiert werden können.

Messungen an elf Wärmekraft-kopplungsanlagen im Kanton Zürich

■ R. Lang, Ch. Gmür, H.J. Leibundgut, P. Mauchle

Messprojekt

Der Kanton Zürich hat in den Jahren 1988–1992 an elf Wärmekraftkopplungsanlagen auf Kantonsgebiet Messungen durchgeführt. Die Auswahl der ins Messprogramm einzubeziehenden Anlagen erfolgte mit dem Ziel, möglichst viele repräsentative Einsatzmöglichkeiten abzudekken. Es wurden ausschliesslich Blockheizkraftwerke in Industriebauten, in Dienstleistungs- und in Wohnbauten gewählt, wobei sowohl (Heizungs-)Sanierungen als auch Neubauten berücksichtigt wurden. Als Blockheizkraftwerke (BHKW) werden WKK-Anlagen mit Verbrennungsmotor bezeichnet, die als Liefereinheit alle notwendigen Elemente (d.h. Motor, Generator, Wärmetauscher usw.) enthalten.

Die für die Messungen ausgewählten Anlagen verfügen über einen Ottomotor mit geregeltem Dreiwegkatalysator und verwenden als Brennstoff Erdgas. Bei fünf Anlagen wurden die Messwerte kontinuierlich erfasst und als 15-Minuten-Mittelwerte abgespeichert. Bei den andern sechs Anlagen wurde aufgrund von Zählerablesungen des Betreibers die Energiebilanz berechnet. Mit Stichprobenmessungen wurden bei allen Anlagen die Abgas- und Schallemissionen erfasst.

Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad sagt aus, wie gut die Brennstoffausnutzung *über eine längere Periode* (meist ein Jahr) ist. Im Gegensatz zum Nutzungsgrad zeigt der Wirkungsgrad die *momentane* Brennstoff-Ausnutzung an. Gute Blockheizkraftwerke erreichen einen Nutzungsgrad zwischen 85% und 95% (Bild 1). Die Anlage Nr. 2 wird stromgeführt betrieben. Wenn die Wärme nicht benötigt wird, so erfolgt die Kühlung des Motors mittels einer Rückkühlanlage auf dem Dach. Wenn die Wärme vollständig genutzt werden könnte, würde der Nutzungsgrad 94% betragen (vgl. ×). Die An-

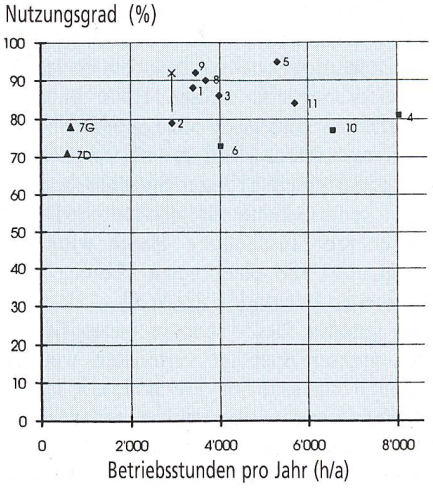


Bild 1 Nutzungsgrad der Blockheizkraftwerke in Abhängigkeit der Betriebsstunden pro Jahr

Adresse der Autoren:
R. Lang, Ch. Gmür, Gruenberg & Partner AG, Ingenieure für Energie- und Haustechnik SIA, Alfred-Escher-Strasse 9, 8027 Zürich,
Dr. *H.J. Leibundgut, P. Mauchle*, Amstein + Walthert AG, Beratende Ingenieure, Leutschenbachstrasse 45, 8050 Zürich.

Im Auftrag vom:
Amt für Technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich (ATAL), Stampfenbachstrasse 12, 8090 Zürich.

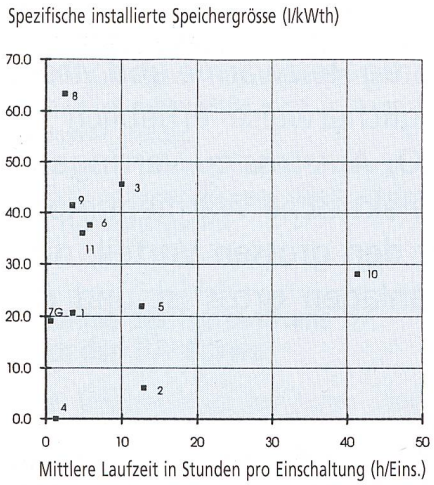


Bild 2 Zusammenhang zwischen der mittleren Laufzeit pro Einschaltung und der Speichergrösse pro kW thermische Blockheizkraftwerk-Leistung

lagen 4, 6 und 10 sind Blockheizkraftwerke des gleichen Typs mit einer kleinen elektrischen Leistung (< 50 kW). Durch die Lüftung zur Kühlung der Schalldämmhauben wird bei diesen Geräten im Verhältnis zur Heizleistung viel Wärme abgeführt. Dass aber auch kleine Blockheizkraftwerke einen guten Nutzungsgrad (deutlich über 90%) erreichen können, zeigen Messungen an anderen Anlagen, die keine Lüftung für die Kühlung der Schalldämmhaube benötigen.

Die Anlagen 1, 5, 8, 9 nutzen die Abstrahlungswärme des Motors über eine in der Schalldämmkabine eingebaute Wärmepumpe. Der dadurch erhöhte Nutzungsgrad ist gut ersichtlich.

Mittlere Laufzeit pro Einschaltung

Hohe mittlere Laufzeiten pro Einschaltung sind erwünscht, da jeder Anlauf lufthygienisch problematisch ist, der Nutzungsgrad durch die Auskühlverluste nach jedem Ausschalten verschlechtert wird und durch häufige Schaltvorgänge ein übermässiger Verschleiss erfolgt. Hohe mittlere Laufzeiten sind auch ohne grossen Speicher realisierbar (Bild 2) und umgekehrt, auch mit einem grossen Speicher besteht noch keine Garantie für hohe mittlere Laufzeiten pro Einschaltung. Damit wird gezeigt, dass mit einer guten Planung und optimalen Integration der WKK-Anlage in das gesamte Heizsystem in vielen Fällen ein grosser Speicher vermieden werden kann.

Es ist nicht möglich, aufgrund der Messresultate (Nutzungsgrad, Laufzeit pro Einschaltung) auf die hydraulische Einbindung des Blockheizkraftwerks rückzuschliessen. Bei den Anlagen 2, 3, 4, 8 und 11 ist das Blockheizkraftwerk parallel zum Heizkessel, bei den Anlagen 1, 5, 6, 7, 9 und 10 ist der Heizkessel in Serie zum Blockheizkraftwerk eingebunden. Jede Schaltungsart hat Vor- und Nachteile. Die Wahl der hydraulischen Einbindung hat aufgrund der Randbedingungen der ganzen Heizungsanlage (Wärmeerzeugung, -verteilung und -abgabe) zu erfolgen.

Investitionskosten

Unter den spezifischen Investitionskosten versteht man die zusätzlichen Investitionskosten für die Installation einer WKK-Anlage, bezogen auf die installierte elektrische Leistung. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die bereits mit den Heizkesseln installierte Heizleistung auch bei einem Ausfall des Blockheizkraftwerks den gesamten Heizleistungsbedarf der angeschlossenen Wärmebezüger abdecken kann. Die Kostenangaben basieren auf den Angaben der Bauherren bzw. der Bauabrechnung. Je grösser die elektrische Leistung eines Blockheizkraftwerks, desto tiefer sind die spezifischen Investitionskosten. Bei grossen Anlagen (450 kW_e [$_e$ = elektrische Leistung]) betrugen die Kosten etwa 2000 Fr./kW_e, bei mittleren Anlagen (100–200 kW_e) 3000–4000 Fr./kW_e und bei kleinen (< 50 kW_e) zwischen 5000 und 10 000 Fr./kW_e (Preisstand 1988/89). Ein Verbilligungspotential dürfte jedoch noch vorhanden sein. Dies zeigt auch das «Totem» von Fiat mit 15 kW elektrischer Leistung, das komplett installiert normalerweise noch unter 3000 Fr./kW_e liegt.

Wartungskosten

Die Wartungskosten wurden durch Befragung der Bauherren ermittelt. Die Blockheizkraftwerk-Lieferanten verrechnen bei einem Vollservicevertrag den Aufwand mit einer Pauschale pro produzierte kWh Strom (spezifische Wartungskosten in Rappen/kWh_e), unabhängig von den Betriebsstunden pro Jahr. Bei fast allen Anlagen werden zwischen 3 und 4,5 Rp./kWh_e verrechnet, wobei der Katalysator teilweise nicht im Wartungsumfang inbegriffen ist. Es ist möglich, dass ein Bauherr einen Teil der Service- und Unterhaltsarbeiten selbst übernimmt. Erstaunlicherweise ist der Zusammenhang zwischen der elektrischen Leistung und den spezifischen Wartungskosten relativ schwach, obwohl zum Beispiel Wegkosten bei kleineren Anlagen viel mehr ins Gewicht fallen sollten. Die weitgehende Unabhängigkeit der spezifischen Wartungskosten von der installierten elektrischen Leistung und den Betriebsstunden lässt auf ein wesentliches Verbilligungspotential schliessen.

Nach unserer Ansicht ist für den Betrieb eines Blockheizkraftwerks eine Maschinenbruch-Versicherung erforderlich. Diese deckt bei einem unerwarteten Schaden die Kosten. In einem Vollservicevertrag sind die Prämien für diese Versicherung oft inbegriffen. Der Servicevertrag darf bei der Ausschreibung des Blockheizkraftwerks nicht vergessen werden. Er sollte Bestandteil der Offerte des Lieferanten sein. Bei einem Vollservicevertrag sollten alle Arbeiten und alle Ersatzteile (z.B. auch der Katalysator) eingeschlossen sein. Es ist auch das Vorgehen und die Kostenfolge zu regeln, wenn bei einer behördlichen Kontrolle Mängel, zum Beispiel zu hohe Abgasemissionen, festgestellt werden.

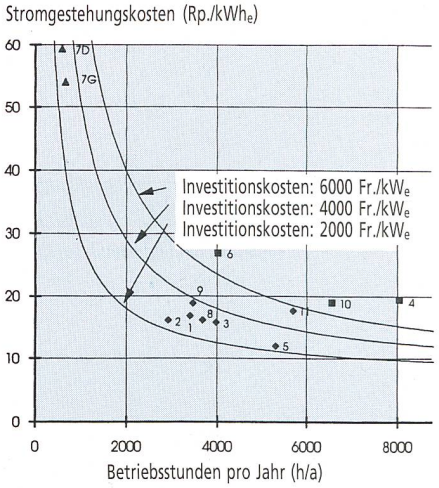


Bild 3 Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Betriebsstunden pro Jahr. Als Orientierungshilfe sind berechnete Kurven in Abhängigkeit der Investitionskosten eingezeichnet (Basis: Zins 7%, Amortisationszeit 15 Jahre, Wartungskosten 3,5 Rp./kWh_e, Gaspreis 3,5 Rp./kWh)

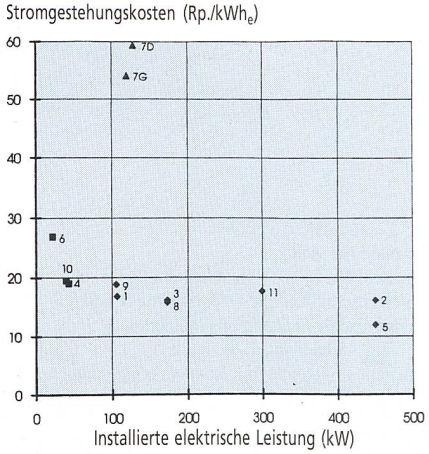


Bild 4 Abhängigkeit der Stromgestehungskosten von der installierten elektrischen Leistung

Stromgestehungskosten

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Blockheizkraftwerks werden üblicherweise die Stromgestehungskosten verwendet. Darunter versteht man die Kosten des selbstproduzierten Stroms unter der Annahme, dass die abgegebene Heizenergie gleichviel kostet, wie wenn sie mit einem Heizkessel erzeugt würde. Die Stromgestehungskosten setzen sich zusammen aus

- dem Brennstoffmehrverbrauch eines Blockheizkraftwerks gegenüber einem Heizkessel,
- dem Service- und Unterhaltsaufwand sowie
- der Amortisation.

Für die Amortisation der technischen Anlagen wurden unabhängig von den Betriebsstunden pro Jahr bei allen Anlagen 15 Jahre eingesetzt. Zum Bearbeitungszeitpunkt waren die Zinsen sehr hoch (7%). Die Stromgestehungskosten hängen stark von den jährlichen Betriebsstunden ab. Je höher diese liegen, desto tiefer sind auch die Stromgestehungskosten (Bild 3). Die Betriebsstunden hängen in erster Linie von der Dimensionierung der Anlage ab. Bei einer gut dimensionierten Anlage sind, ausgenommen bei Kleinstanlagen, Stromgestehungskosten zwischen 10 und 20 Rp./kWh realisierbar. Eine gewisse Abhängigkeit der Stromgestehungskosten von der installierten elektrischen Leistung ist unverkennbar (Bild 4). Da bei den Anlagen 4, 6 und 10 die spezifischen Investitionskosten höher liegen als bei den anderen Anlagen, weisen diese auch etwas höhere Stromgestehungskosten auf (grösserer Anteil Amortisation). Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Anlagen für den Betreiber müssen die jeweils geltenden Stromtarife berücksichtigt werden. Bei verschiedenen Anlagen sind die Rahmenbedingungen so, dass ein (knapp) wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Bild 5 zeigt eine Sensitivitäts-Betrachtung, um den Einfluss verschiedener Bestimmungsgrössen (z.B. tieferer Zins) darzustellen.

Schadstoffemissionen

Als problematisch haben sich die NO_x-Emissionen erwiesen (Bild 6), während die CO_2-Emissionen bei allen Kontrollmessungen in Ordnung waren. Die WKK-Anlagen erreichen sehr tiefe Abgaswerte, sofern die Abgasreinigungsanlage (Dreiwegkatalysator mit Lambdaregelung) richtig eingestellt ist und richtig funktioniert. Bei Störungen können die Abgasemissionen jedoch sehr schlechte Resultate aufweisen. Da momentan nur alle zwei Jahre Emissionskontrollen durchgeführt werden und eine gut dimensionierte Wärmekraftkopplungsanlage in dieser Zeit zwischen 8000 und 10 000 Stunden betrieben wird, können theoretisch über sehr lange Zeit um bis zu 50mal zu viel Schadstoffe ausgestossen werden, ohne dass jemand davon Notiz nimmt.

Die Ursache der schlechten NO_x-Emissionen kann nicht immer auf das gleiche Bauteil zurückgeführt werden. Als kritisch haben sich die Regelung der λ-Sonde, die Regelung des Gasmischers und auch der Katalysator selbst erwiesen. Aufgrund der Messresultate muss für ein Blockheizkraftwerk unbedingt eine Katalysatorüberwachung mit automatischer Abschaltung installiert werden, die insbesondere die Temperaturerhöhung im Katalysator und die Spannung der λ-Sonde umfasst. Ein funktionsfähiger Katalysator bewirkt durch die in ihm ablaufende chemische Reduktion der Schadstoffe eine Temperaturerhöhung des Abgases. Diese Temperaturerhöhung ist ein Mass für die Wirkung des Katalysators und bewegt sich im Normalbetrieb in einem messbaren Bereich (meistens etwa 40–60 °C). Da die für die Katalysatorüberwachung benötigten Messpunkte schon heute bei fast allen Anlagen an der Anzeige am Schaltschrank abgefragt werden können, bleibt der Mehraufwand sehr gering. Allerdings fehlte für die Blockheizkraftwerkhersteller bisher ein Anreiz zu deren Verwirklichung.

Es ist bekannt, dass kurze Laufzeiten pro Einschaltung die Lebensdauer des Katalysators negativ beeinflussen. Das Diagramm in Bild 7 deutet trotz der kleinen Anzahl Messpunkte darauf hin, dass der Zusammenhang zwischen der mittleren Laufzeit pro Einschaltung und der Funktionsfähigkeit des Emissionsminderungssystems grösser ist als erwartet.

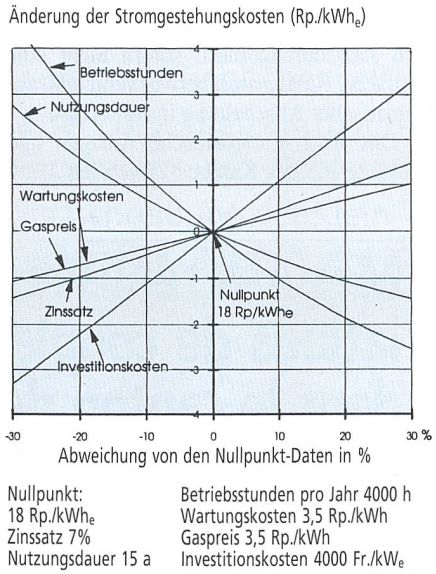


Bild 5 Sensitivität der Stromgestehungskosten (Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrössen)

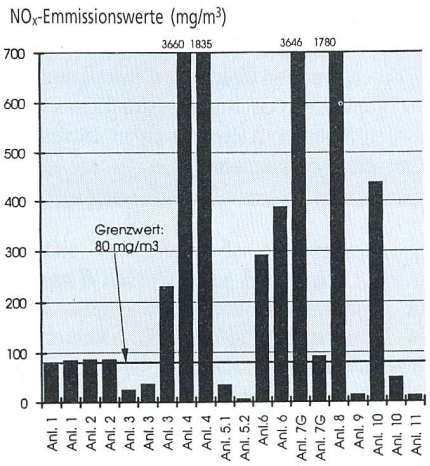


Bild 6 NO_x-Emissionen (Momentanmessung bei warmem Motor, ohne Berücksichtigung des Anlaufvorgangs). Mehrfachangaben der gleichen Anlage bedeuten Messungen, die mindestens ein Jahr auseinanderliegen

Verfügbarkeit/Störungen

Die Verfügbarkeit der Anlagen beträgt im Durchschnitt über 92% (inkl. Berücksichtigung der Stillstandszeiten für Wartung/Service), bezogen auf die Bereitschafts- und Betriebszeit einer Anlage. Die durchschnittliche Zeit zur Behebung einer Störung beträgt rund siebeneinhalb Stunden. Diese Dauer könnte durch raschere Reaktion des Betreibers vor allem bei unbedeutenden Störungen, die nur quittiert und ins Betriebsjournal eingetragen werden müssen, stark verkleinert werden. Dies würde auch die durchschnittliche Verfügbarkeit erhöhen. Durchschnittlich waren pro 1000 Betriebsstunden zehn Ausfälle, inklusive Unterbrüche für Wartung/Service, zu verzeichnen. Es ist zu beachten, dass alle Anlagen noch «jung» waren und deshalb ein grosser Teil der Störungen als Anfangsstörungen (Kinderkrankheiten) eingestuft werden muss.

Ausblick

Die Resultate zeigen, dass die WKK-Technologie für ihre zukünftige Aufgabe gerüstet ist. Die Ergebnisse betreffend Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit sind im allgemeinen gut. Voraussetzung ist aber eine sorgfältige Pla-

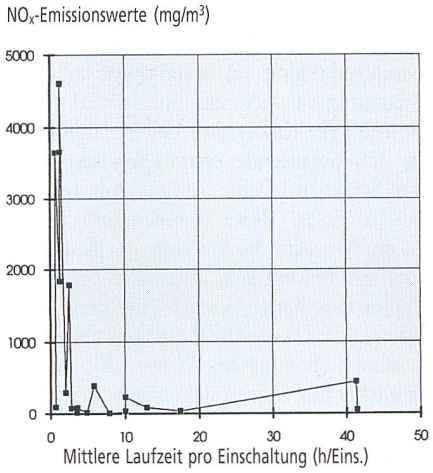


Bild 7 Zusammenhang zwischen NO_x-Emissionen (ermittelt aus Momentanmessungen im stationären Betrieb) und mittlere Laufzeit pro Einschaltung. Je Anlage wurden zum Teil mehrere Messungen berücksichtigt

nung; bei nachträglich in die Heizung eingebauten WKK-Anlagen sind die hydraulischen Verhältnisse der ganzen Heizungsanlage speziell zu berücksichtigen. Die Wartungskosten sind unerwartet hoch. Als problematisch haben sich einzig die NO_x-Emissionen erwiesen. Deshalb werden bis auf weiteres die Abgaskontrollmessungen bei Wärmekraftkopplungsanlagen einmal pro Jahr durchgeführt, sofern nicht eine einfache Katalysatorüberwachung mit automatischer Abschaltung installiert ist.

Das Amt für technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich hat Mitte 1994 eine Bauherrenbroschüre veröffentlicht, die unter anderem die wichtigsten Punkte auflistet, die ein Bauherr beim Abschluss des Kauf- und des Wartungsvertrags für eine Wärmekraftkopplungsanlage beachten sollte.

Mesures réalisées sur onze installations de couplage chaleur-force dans le canton de Zurich

Une installation de couplage chaleur-force (CCF) est une installation intégrée dans le chauffage d'un bâtiment et produisant simultanément de la chaleur et de l'électricité. La technologie du CCF pourrait gagner en importance à l'avenir. Elle pourrait en effet contribuer considérablement à la diminution des émissions de CO_2, et ce grâce à une utilisation simultanée accrue de pompes à chaleur électriques. Durant la période allant de 1988 à 1992, le canton de Zurich a réalisé des mesures sur onze installations de couplage chaleur-force. La sélection des installations a été faite de manière à couvrir un nombre optimal de possibilités d'utilisation représentatives. Les résultats mettent en évidence le fait que la technologie CCF est en mesure de remplir sa tâche future et que, du point de vue du rendement, de la fiabilité et de la rentabilité, ceux-ci sont en général bons. Une planification soigneuse est ici toutefois indispensable; il faut, lors de l'incorporation ultérieure d'installations CCF dans le chauffage, tenir tout spécialement compte des conditions hydrauliques de l'installation de chauffage globale. Les frais d'entretien sont étonnamment élevés. Les émissions de NO_x se sont quant à elles révélées problématiques.

Wintervorrat

STROM-FORUM 7/94

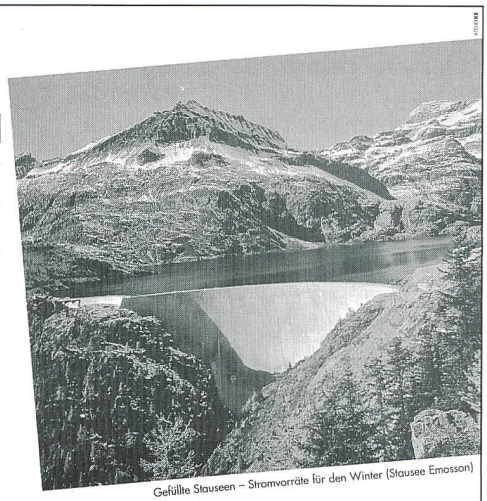
Nicht nur Eichhörnchen, auch Elektrizitätswerke legen für den Winter Vorräte an. Dann brauchen wir nämlich mehr Strom. In der Industrie sind die Betriebsferien zu Ende. Warme Essen sind wieder Trumpf. Bei Wind und Wetter bleiben wir vermehrt in der beleuchteten Stube und benützen häufiger die öffentlichen Verkehrsmittel. Zum Glück sind jetzt die Stauseen gefüllt, denn sie helfen mit, unseren höheren Winterstrombedarf zu decken.

Wasserkraft*produktion:*
im Sommer höher – im Winter tiefer
Die Sonne treibt den Zyklus von Wolken, Regen und Schnee. Wasserkraft ist also erneuerbare Sonnenenergie. Im Sommer fallen dank Regen und Schneeschmelze 75% des Wassers an. Im Winter, wenn die Niederschläge in den Alpen als Schnee liegen bleiben, sind es bloss 25%.

Strom*verbrauch:*
im Sommer tiefer – im Winter höher
Wenn die Tage länger und wärmer sind, wir Betriebsferien haben, wandern, velofahren und kalt essen, ist der Stromverbrauch geringer. Im Jahresdurchschnitt entfallen 45% des Stromverbrauchs auf das Sommerhalbjahr. Im Winterhalbjahr mit kürzeren und dunkleren Tagen, sind es 55%. Die Grillparty wird ins Haus verlegt, die Holzkohle von Strom abgelöst. Wir lassen uns von Bergbahnen in die Höhe ziehen, um stiebende Abfahrten zu geniessen. Strom hilft mit, heimelige Winterabende und festliche Feiertage mit Musik zu erleben.

Vorräte dank Speicherseen
Dank unserer Alpenlandschaft ist es möglich, Sommerwasser in Speicherseen zurückzubehalten, um es im Winter zur Stromproduktion zu nutzen. Damit gelingt es, den Winteranteil der Wasserkraft auf 40% zu steigern. Gut gefüllte Speicherseen sind somit unsere «Stromvorräte».

Verbrauch und Produktion ausgleichen
Damit Maschinen oder Fernseher laufen, das Licht brennt und die Kochplatte heiss wird, muss *gleichzeitig* ein Kraftwerk den nötigen Strom dafür produzieren. Es gilt also, die Stromerzeugung dem augenblicklichen Verbrauch anzupassen. Die Stromproduktion in Speicherkraftwerken kann innert Minuten herauf- und heruntergefahren werden und so den momentanen Bedarf decken.


Gefüllte Stauseen – Stromvorräte für den Winter (Stausee Emosson)

VSE UCS
VERBAND SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE, Postfach 6140, 8023 Zürich

SCHWEIZER ELEKTRIZITÄT
DER DRAHT MIT ZUKUNFT