Die Komponenten des Wärmeversorgungssystems

Autor(en): **Brechbühl, Bernhard / Unger, Kurt**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 50

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74625

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die Komponenten des Wärmeversorgungssystems

Von Bernhard Brechbühl und Kurt Unger

Raumheizung

Aufgrund der hohen Installationsdichte und der geforderten Flexibilität bei späteren Aus- und Umbauten musste auf eine Bodenheizung verzichtet werden. Im Sinne eines Kompromisses zwischen Niedertemperaturheizung und minimalen Heizkörperabmessungen wurde das Heizungssystem mit Vorlauftemperaturen von 65 °C bei −11 °C Aussentemperatur ausgelegt. Die Heizlastberechnung erfolgte nach SIA 380 ohne spezielle Sicherheitszuschläge. Sie beträgt gemäss den Berechnungen in Tabelle 1 im Kapitel «Messungen an der Gebäudehülle des Laboratoriums» $\bar{k} \cdot F \cdot \Delta t = 0{,}61 \cdot 3820{,}62 \cdot 31 = 72{,}2\,kW$. Im Betrieb hat sich gezeigt, dass die berechnete Heizungskennlinie auch gefahren werden muss. Da der Speicher von der Wärmepumpe nur auf max. 53 °C aufgeladen werden kann, ergibt sich, dass die Raumheizung bei Aussentemperaturen unter 0 °C über die Fernwärme mit Energie versorgt werden muss. Die Umstellung Heizung ab Speicher bzw. ab Fernwärme erfolgt automatisch über einen *Aussenthermostaten* oder über ein *Optimierungsprogramm des Prozessrechners* (Bild 1).

Heizungsanlage Altbau

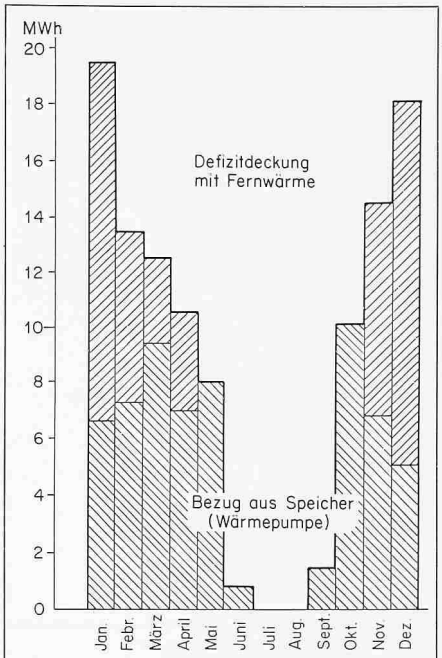
Unabhängig vom bereits beschriebenen Wärmekollektiv sind Alt- und Neubau von der Belegung und vom Verwendungszweck her vergleichbar. Für den ganzen Altbau war nur eine Heizgruppe vorhanden, die nach den Bedürfnissen der Hauswartwohnung reguliert wurde. Für die verschiedenen Laborkapellen ist keine Zuluftanlage vorhanden, d. h. die Ersatzluft, die über die Fenster- und Türundichtheiten angesaugt wird, muss über die Raumheizung erwärmt werden. Ende 1980 wurde die Heizungsanlage saniert, indem für die Abwartwohnung eine separate Heizgruppe installiert wurde. Somit muss über das Wochenende nicht mehr das ganze Haus beheizt werden. Zusätzlich wurden an allen Heizkörpern thermostatische Radiatorventile angebracht, mit Begrenzung auf 20 °C. Unter Berücksichtigung der Heizgradtage hat sich mit diesen Massnahmen der Wärmeverbrauch des Altbaus von 269 MWh um 14% reduziert.

Energiekennzahlen

Alt- und Neubau sind kompakt gebaute Baukörper mit Volumen von 6460 bzw. 13 800 m³. Die Wirksamkeit der Isolations- und Energiesparmassnahmen im Neubau kommt darin zum Ausdruck, dass der spezifische Energieverbrauch für Wärmezwecke im Neubau mit 79,5 MJ/m³ nur 47% des vergleichbaren Wertes des Altbaus erreicht. Mit 118,7 MJ/m³ über das gesamte Bauvolumen des Neubaus betrachtet, erreicht dieses Bauobjekt eine hervorragende Energiekennzahl (Tabelle 1). Noch tiefere Werte können nur noch mit unverhältnismässigem baulichem und technischem Aufwand erzielt werden.

Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung

Von der totalen Bodenfläche von etwa 3400 m² kann knapp die Hälfte der Räume mechanisch belüftet werden.



Raumheizungsbedarf		
Deckung mit Wärmepumpe	61 MWh ≙	56 %
Zusatzheizung mit Fernwärme	48 MWh	44 %
Verbrauch Raumheizung	109 MWh	100 %

Bild 1. Deckung des Raumheizungsbedarfs ab Speicher bzw. mit Fernwärme

Einige wenige Spezialräume verfügen zudem über eine Vollklimaanlage mit Kühlung und Befeuchtung. Für jeden einzelnen Raum kann die Lüftung entsprechend dem Bedürfnis von Hand zu- und abgeschaltet werden.

Die schematische Darstellung (Bild 2) gibt eine Übersicht der Lüftungsanlagen. Über eine gemeinsame Frischluftfassung (1) wird Luft angesaugt und durch die Klappen (2) über den Glasrohr-Wärmetauscher (3) oder bei hohen Aussentemperaturen direkt zu den Luftaufbereitungsgeräten (4, 10, 11, 12) geführt. Die Luft wird gefiltert, erwärmt und mit einem drehzahlregulierten Ventilator (5) entsprechend dem momentanen Luftbedarf den einzelnen Geschossverteilkanälen (6) zugeführt.

Tabelle 1. Energiekennzahlen für das Kantonale Chemische Laboratorium. Alt- und Neubau

	NEUBAU			ALTBAU		
	Energieverbrauch	Energiekennzahlen bezogen auf beheizte Grundfläche 2300 m²	Rauminhalt 8600 m³	Energieverbrauch	Energiekennzahlen bezogen auf beheizte Grundfläche 1620 m²	Rauminhalt 5680 m³
A) Für Wärmezwecke Raumheizung, Lüftung, Brauchwarmwasser						
Verbrauch Elektro, Fernwärme	93,3 MWh	146,1 MJ/m²	39 MJ/m³	269 MWh	598 MJ/m²	170,5 MJ/m³
Verbrauch Umweltenergie und Abwärme	96,7 MWh	151,3 MJ/m²	40,5 MJ/m³	–	–	–
Total	190 MWh	297,4 MJ/m²	79,5 MJ/m³	269 MWh	598 MJ/m²	170,5 MJ/m³
		Energiekennzahlen auf totale Grundfläche	Rauminhalt		Energiekennzahlen auf totale Grundfläche	Rauminhalt
B) Alle Verwendungszwecke						
Elektro, Fernwärme	358,3 MWh			334 MWh		
Umweltenergie und Abwärme	96,7 MWh			–		
Total	455,0 MWh	481,8 MJ/m²	118,7 MJ/m³	334 MWh	653,5 MJ/m²	186 MJ/m³

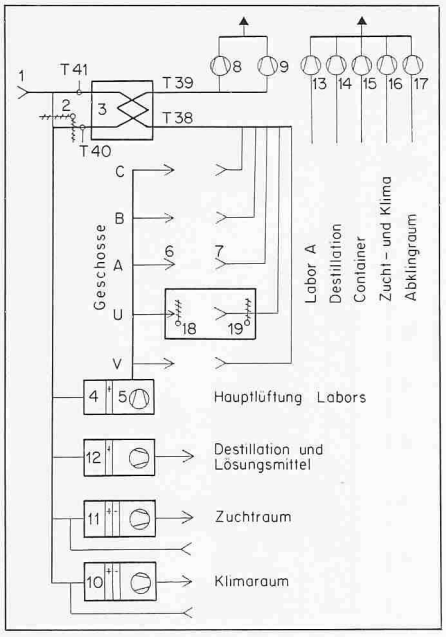


Bild 2. Schema Lüftungsanlage

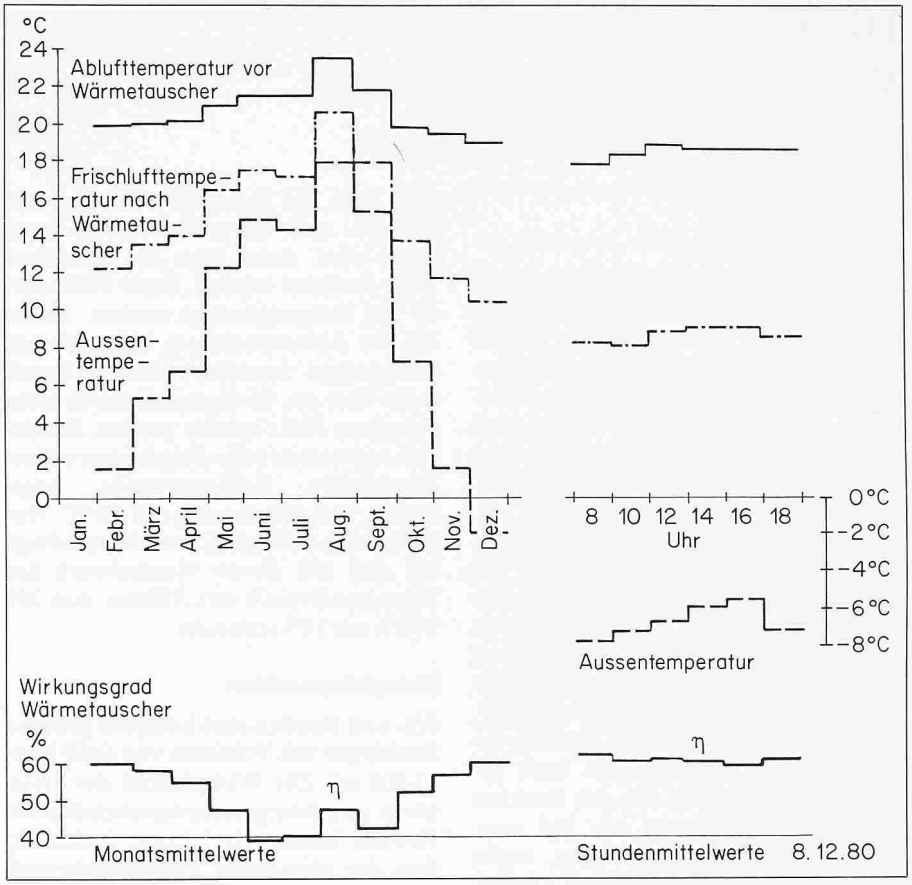


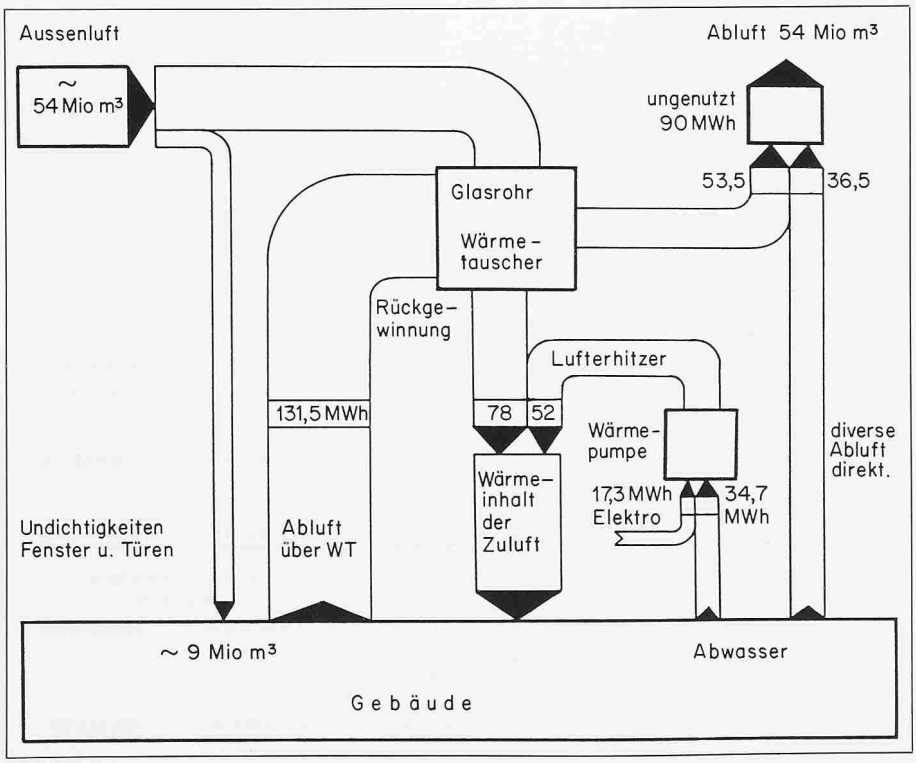
Bild 3 (rechts). Temperatur- und Wirkungsgradverlauf Glasrohr-Wärmetauscher

Die *Abluft* aus den Labors (7) wird durch ein Kunststoff-Abluftkanalsystem gesammelt und zum Glasrohr-Wärmetauscher (3) geführt. Der Abluftventilator (8) ist drehzahlreguliert, der Notabluftventilator (9) wird von Hand zugeschaltet.

Für Spezialräume wie Klimaraum (10), Zuchtraum (11) und Lösungsmittelraum (12) sind separate Anlagen installiert.

Die Räume Labor (13), Destillation (14), Container (15), Zucht- und Klima- (16) sowie der Mess- und Abklingraum (17) haben unabhängige Abluftanlagen und sind aus Sicherheitsgründen nicht an den Glasrohr-Wärmetauscher (3) angeschlossen.

Bild 4. Energie- und Luftmengenbilanz Lüftungsanlagen



Die *Zuluft* zu den einzelnen Laborräumen (18) und ihren Kapellen (19), über welche die Abluft abgesaugt wird, haben Motorklappen, die nur im Bedarfsfall geöffnet sind.

Die Ventilatoren (5) und (8) halten drehzahlreguliert konstante Druckverhältnisse in den Kanalnetzen. Die maximale Fördermenge des Ventilators (5) beträgt 21 000 m³/h, die mittlere gemessene Menge 10 000 m³/h, so dass sich eine Gleichzeitigkeit von 48% ergibt.

Der *Speicher* reicht ganzjährig für die Versorgung der Lüftungsanlagen. Die Lufterhitzer sind auf 45/40 °C ausgelegt.

Jahreswirkungsgrad des Glasrohr-Wärmetauschers

Der Wirkungsgrad des Wärmetauschers wird definiert zu (vergl. Bild 2, Schema):

$$\eta_{WT} = \frac{\text{eff. Erwärmung der Frischluft}}{\text{max. mögl. Erwärmung der Frischluft}}$$

$$\eta_{WT} = \frac{T_{40} - T_{41}}{T_{38} - T_{41}} \cdot 100\,(\%)$$

Die EDV-Anlage hat die einzelnen Mittelwerte in Bild 3 errechnet. Die Daten auf der rechten Seite sind für einen kalten Tag.

Es ergibt sich, dass der Glasrohr-Wärmetauscher einen Wirkungsgrad von etwa 60% hat. Das Energieflussdiagramm (Bild 4) zeigt einen Wert für die Summe Lufterhitzerleistungen von 52

MWh/a, was 40% des Wertes ausmacht, der ohne Wärmerückgewinnung erforderlich gewesen wäre. Die Einsparung der WR beträgt demnach 78 MWh/a, das entspricht etwa 9 t Heizöl pro Jahr bei einem Heizkesselwirkungsgrad von 75%. Eine weitere Einsparung ergibt sich durch die bedarfsabhängige Luftmengenregulierung. Da im Mittel nur 48% der maximal möglichen Luftmenge benötigt werden, ergeben sich daraus nochmalige Einsparungen von ca. 6,5 t Öl.

Die Mehrkosten für die Wärmerückgewinnung und die Drehzahlregulierung, wie zuvor im diesbezüglichen Abschnitt beschrieben, sind in sehr kurzer Zeit amortisiert.

Von der in der Zuluft enthaltenen Energie von 130 MWh müssen lediglich 17,3 MWh oder 13,3% an Fremdenergie (Elektroantrieb Wärmepumpe) erbracht werden. Der Rest wird durch die Wärmerückgewinnung des Glasrohrtauschers bzw. aus der Abwärme des Abwassers gedeckt.

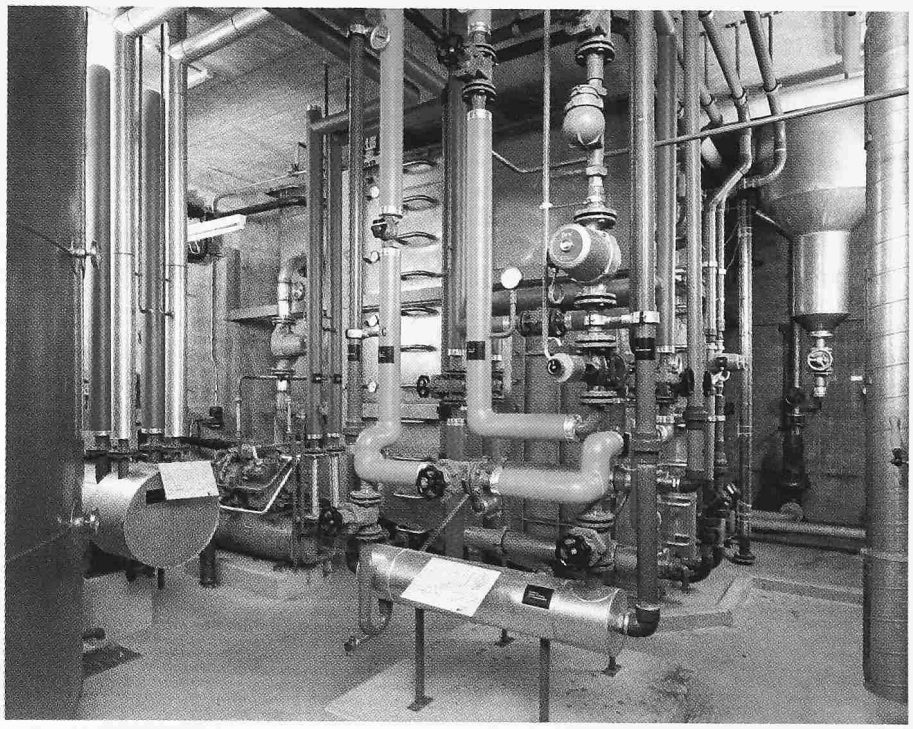


Bild 5. Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Abwassertank aus Chromstahl im Hintergrund, Wärmepumpe links hinten und Wärmetauscher Sonnenenergie/Abwasser im Vordergrund

Wärmepumpenanlage und Abwasserwärmerückgewinnung

In der Schweiz sind nur wenige Anlagen für Abwärmenutzung aus Abwasser mittels Wärmepumpen installiert (Bilder 5 bis 7). Primär war es das Ziel herauszufinden, in welchem Umfang dem Abwasser Energie entzogen werden kann. Grosse Unsicherheit herrschte bereits bei der Planung über die zu erwartende Menge von Laborwasser. Einzig die Meteorwassermenge konnte aufgrund der statistischen Daten einigermassen genau vorausberechnet werden. Ebenfalls waren nur ungenaue Angaben über die Temperatur-Monatsmittelwerte des Abwassers vorhanden. Bei den Systemberechnungen ging man von Temperaturen zwischen 15–25 °C aus. Um Abwasser möglichst tief abkühlen zu können, sind tiefe Verdampfungstemperaturen am Wärmetauscher notwendig. Aufgrund der Vereisungsgefahr sind wasserdurchflossene Umformer nicht mehr verwendbar, deshalb wurden vier Chromstahl-Verdampferplatten mit einer totalen Oberfläche von 16 m² in senkrechter Lage in die Mitte des Abwassertanks montiert. Der natürliche Wasserauftrieb als Folge der Temperaturdifferenz zwischen Verdampferplatten und umgebendem Wasser genügte, um ein Vereisen der Platten zu verhindern. Bei Abwassertemperaturen zwischen 4 bis 6 °C hörte die Eigenzirkulation aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Wassers auf. In der Zeit vom November bis März fällt das Meteorwasser jedoch mit Temperaturen unter 5 °C an und kann

Bild 6. Prinzip Wärmepumpensystem

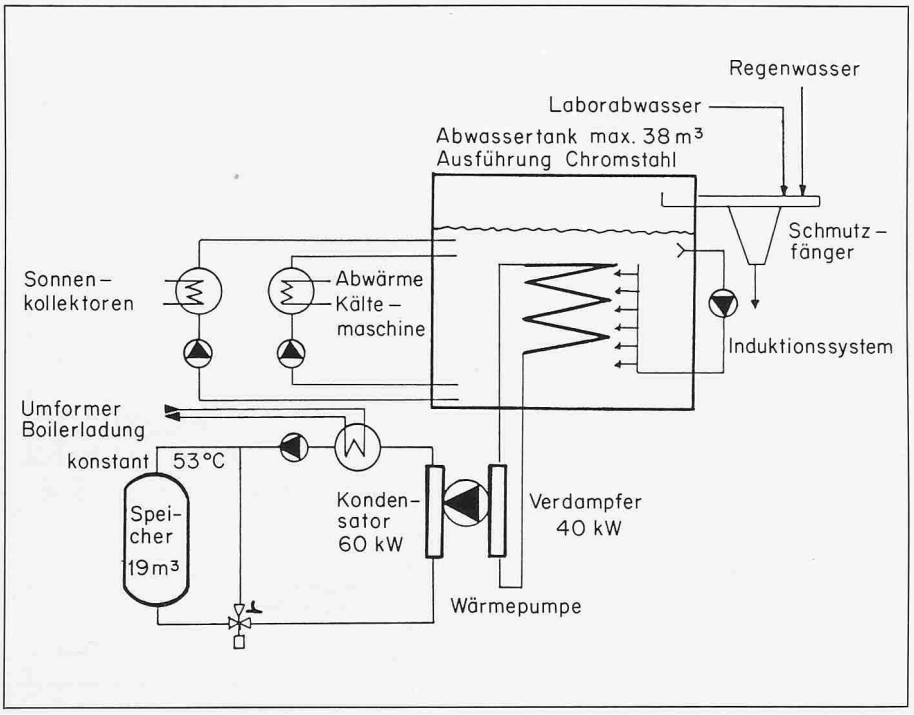
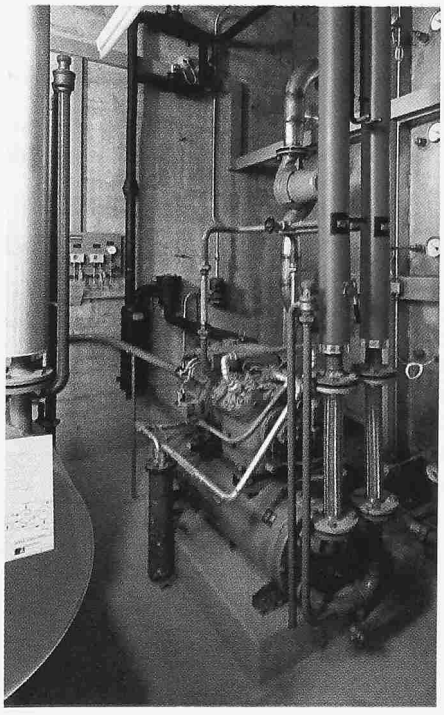


Bild 7. Elektro-Wärmepumpe. Wasser-Wasser mit 60 kW Kondensatorleistung



demzufolge nicht mehr genutzt werden, im Gegenteil: durch die Vermischung mit dem wärmeren Abwasser aus den Labors kann auch aus diesem nicht mehr Abwärme entzogen werden. Um das Abwasser trotzdem tiefer abkühlen zu können, wurde nachträglich ein *Induktionssystem* eingebaut. Mit einer Pumpe wird über ein Düsensystem eine künstliche Strömung entlang den Verdampferplatten erzeugt. Auf diese Weise wurde es möglich, das Wasser auf 0 °C auszukühlen (Tabelle 2).

Deckungsgrad und Leistungsziffer

Aus dem Gesamt-Energieflussschema kann für die Wärmepumpe ein Dekkungsgrad von 63% errechnet werden (Bild 8, Tabelle 4).

Die Leistungsziffer ε ist definiert als

$$\varepsilon_{WP} = \frac{\text{Heizleistung}}{\text{Antriebsleistung}}$$

Für die Gesamtbeurteilung einer Wärmepumpenanlage muss ein Anlage- ε definiert werden.

$$\varepsilon_{A} = \frac{\text{Heizenergie}}{\Sigma \text{ aller kostenpflichtigen Energien}}$$

Mittels Wärmemessungen, Betriebsstunden- und kWh-Zählern sind sowohl das ε_{WP} wie das ε_{A} ermittelt worden.

Zum Energiebezug von 35 MWh für den Wärmepumpenmotor muss der Stromverbrauch der Induktions- und Kondensatorpumpe addiert werden, so dass das ganze System einen Strombezug von 40 MWh hat; woraus ein Anlage-Epsilon von 3,0 resultiert. Dieser Wert ist um 14% schlechter als das ε_{WP} von 3,42.

Betrieb

Die Wärmepumpe wird teilweise von einer Schaltuhr oder vom Prozessrechner aufgrund des Wärmebedarfs zu- und abgeschaltet. Etwa zwei Drittel des Betriebs fallen auf die Niedertarifzeit von 22.00 bis 06.00 Uhr, der Rest auf die Hochtarifzeit. Die Gestehungskosten der Wärmepumpenenergie (ohne Amortisation) sind auch in der Hochtarifzeit nur halb so hoch wie die vergleichbaren Kosten bei der Erzeugung mit einem Ölheizkessel.

Wärmeabgabe Brutto	120 MWh/a
Elektrobezug Wärmepumpe	35 MWh/a
Mittleres ε_{WP}	3,42
Laufzeit der Wärmepumpe	2396 Std./a
Mittlere Leistungsabgabe der Wärmepumpe	50,1 kW
Nominalwert bei 0 °C Verdampfung	60 kW
Nominalwert bei −10 °C Verdampfung	44 kW

Die hohe Zahl der Betriebsstunden weist auf eine gute Bemessung der Anlage hin. Ebenso wurden die vom Wärmepumpenlieferanten offerierten Leistungsdaten voll erbracht. Bis Ende August 1981 ist die Anlage bereits 5500 Stunden störungsfrei gelaufen. Die Anlage wird vom Lieferanten zweimal jährlich kontrolliert. Die Servicekosten sind mit einem Ölbrenner-Service-Abonnement vergleichbar.

Tabelle 2. Beispiel Wärmeentzug bei Abwassertemperaturen um 0 °C (5. bis 25. Jan. 1980)

Mittelwert der Abwassertemperatur im Tank	0,5 °C
Aussentemperaturen (keine Niederschläge in Form von Wasser)	−1 bis −7 °C
Abwasser aus den Labors ca. 135 m³	ca. 2350 kWh
Warmwasser ca. 13 m³	ca. 600 kWh
Sonnenenergie	175 kWh
Abwärme Kältemaschine	22 kWh
Abwärme Heizzentrale* (Temperaturdifferenz Raum zu Abwasser ca. 15 °C)	ca. 1800 kWh
Total zugeführte Wärme	ca. 4947 kWh
Wärmeentzug durch Wärmepumpe (Verdampfer)	5100 kWh

* Konvektiver Wärmeübergang der warmen Raumluft an der kalten Behälterwand des Abwassertanks (geschätzter Wert, da die genaue Temperaturdifferenz Raum zu Abwasser nicht gemessen wurde).

Tabelle 3. Wassermengen- und Energiebilanz Abwassertank

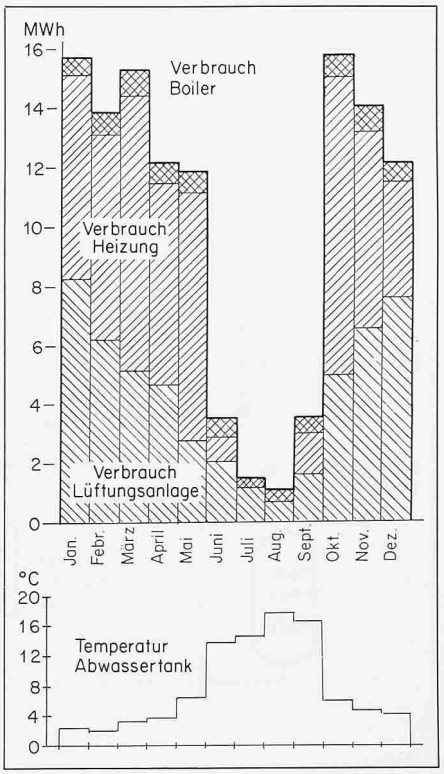
	m³	MWh	%
① *Meteorwasser.* Flachdach 650 m² Niederschläge 1028 mm, Mittlere Temperatur 10 °C	670	7,8	8,5
② *Kaltwasser Labors.* Mittlere Temperatur 15 °C	2255	39,3	42,9
③ *Brauchwarmwasser*	255	7,6	8,3
– Entleerung aus Abwassertank (Pumpen)	3180		
– Kaltwasserbezug total (Wasseruhr)	3400		
– davon für 12 Toiletten und Pissoirs auf 3 Stockwerken (mittlere Belegung 40 Personen, etwa 240 Arbeitstage)	890		
④ *Sonnenenergie.* Die Sonnenkollektoren erzeugen bei schwacher Sonnenbestrahlung Niedertemperaturwärme, die während der Heizsaison in den Tank abgegeben wird		7,1	7,8
⑤ *Kältemaschine.* Der Kondensator der Kältemaschine gibt die Abwärme in den Tank		6,4	7,0
⑥ *Pumpen.* 1 Induktions-, 2 Umformerpumpen		3,4	3,7
⑦ *Transmission.* Transport von Umgebungswärme in den Abwassertank. Temperaturdifferenz bis 15 °C		20	21,8
Theoretisch nutzbare, sensible Energie		91,6	100
Mit Wärmepumpe (Verdampfer) entzogene Energie		85	
Theoretisch nicht genutzte Energie		6,6	

Die dem Abwassertank entnommene Wärme, vermehrt um die Motorleistung der Wärmepumpe, wird auf einem bis 50 °C höheren Temperaturniveau aus dem Kondensator entnommen und dem Speicher zugeführt.

Tabelle 4. Deckungsgrad Wärmepumpe

		Wärmepumpe	
Wärmebedarf Raumheizung	109 MWh/a	61 MWh/a	56%
Wärmebedarf Lüftung	52 MWh/a	52 MWh/a	100%
Wärmebedarf Brauchwasser	29 MWh/a	7 MWh/a	24%
Wärmebedarf total	190 MWh/a	120 MWh/a	
Wärmeabgabe Wärmepumpe Brutto	120 MWh/a		
Deckungsgrad	63%		

Bild 8. Energieabgabe Wärmepumpe



Der Abwassertank wurde bis jetzt zweimal im Abstand von anderthalb Jahren geöffnet. Die Verschmutzung war beide Male unbedeutend. Der Schlamm konnte mit normalem Leitungswasser abgespült werden.

Der Abwassertank dient nicht nur als Energiespender für die Wärmepumpe, sondern erfüllt gleichzeitig die Funktion eines Abwasser-Neutralisators. Bei einem Puffervolumen von etwa 35 m³ werden allfällige im Laborbetrieb anfallende Säuren und Laugen stark verdünnt und auf natürliche Art neutralisiert. Dadurch konnte auf den Einbau einer teuren Neutralisationsanlage mit den entsprechend hohen Betriebskosten verzichtet werden. Dieser Umstand wurde in der Rentabilitätsrechnung berücksichtigt.



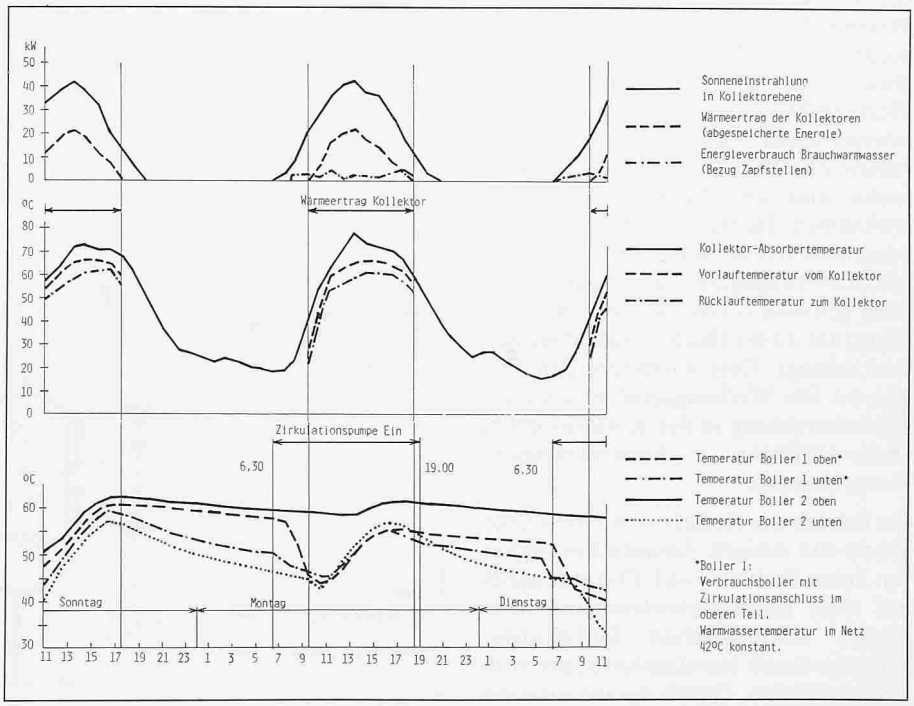
Bild 9. Sonnenkollektoranlage. 20 Elemente mit insgesamt 55 m² Absorberfläche. Ausrichtung nach Süden, Neigung verstellbar 30–60°.

Sonnenkollektoren

Auf dem Flachdach sind 20 Kollektorenelemente mit einer totalen Aluminium-Absorberfläche von 55 m² (Einstrahlungsöffnung 52 m²) aufgestellt (Bild 9). Die Elemente haben eine doppelt verglaste Kunststoffabdeckung und sind in Südrichtung aufgestellt. Die Neigung kann von Hand entsprechend dem jahreszeitlichen Sonnenstand zwischen 30 ° und 60 °C verstellt werden. Die Verbindungsleitung zwischen den Sonnenkollektoren und den Speichern im Keller sind aus Kunststoff bzw. aus Schwarzeisenrohren. Die Wärmeträgerflüssigkeit ist ein Wasser-Glykolgemisch mit Stockpunkt bei etwa −15 °C. Die Solarwärme dient in erster Linie zur Erwärmung des Brauchwarmwassers. Die Wärmetauscher (Doppelmantelboiler) sind im Gegenstrom geschaltet. Um die Sonnenenergie bei jedem Strahlungswert mit dem bestmöglichen Wirkungsgrad abspeichern zu können, wird mit Hilfe eines Optimierungsprogramms des Prozessrechners der jeweils günstigste Speicher vorbestimmt (siehe auch den Abschnitt «Datenerfassung»). Die Umwälzpumpe wird hingegen von einer normalen Zweipunkt-Temperaturregulierung aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen dem Kollektor und dem vorgewählten Speicher ein- und ausgeschaltet. Infolge der grossen Absorbermasse und dem grossen Kollektorinhalt (drei Liter/m²) sind die Pumpenlaufzeiten nicht kürzer als fünf Minuten. Ein Pendeln der Anlage beim Anfahren stellt sich praktisch nicht ein.

Bild 10 zeigt den typischen Verlauf zwischen Sonneneinstrahlung, Wärmeabgabe der Kollektoren und dem Brauchwarmwasserbezug. Nicht jeder Sonnenstrahl kann genutzt werden! Um das Temperaturniveau von etwa 30 bis 35 °C zu erreichen, ist eine Sonneneinstrahlung von etwa 350 bis 400 Watt/m² notwendig. Vom Sonnenaufgang bis zum Beginn der Wärmeabgabe des Kollektors verstreichen knapp drei Stunden. Am Abend endet die Wärmeabgabe erst bei einer Einstrahlung von etwa 210 bis 260 W/m². (Wegen der Wärmekapazität der Kollektoren und Leitungen sowie wegen der Hysterese der Pumpensteuerung liegt dieser Wert tiefer als der, welcher das Einschalten am Morgen bestimmt.) Die Sonnenenergie der beiden letzten Stunden bis Sonnenuntergang kann nicht mehr genutzt werden, da die Einstrahlung zu gering ist, um Temperaturen von 40–60 °C zu erreichen. Um die Energie bei Einstrahlungswerten von 150 bis 350 W/m² ausnutzen zu können, ist ein *Niedertemperaturspeicher* mit Nutzungstemperaturen von 0 bis 15 °C erforderlich. Aus diesem Grund wird mit Hilfe der Einstrahlungsmessung die bei niedriger Einstrahlung anfallende Energie in den Abwassertank geleitet und mit der Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau angehoben.

Bild 10. Typischer Tagesverlauf der Sonnenkollektoranlage vom 31. Mai bis 2. Juni 1981



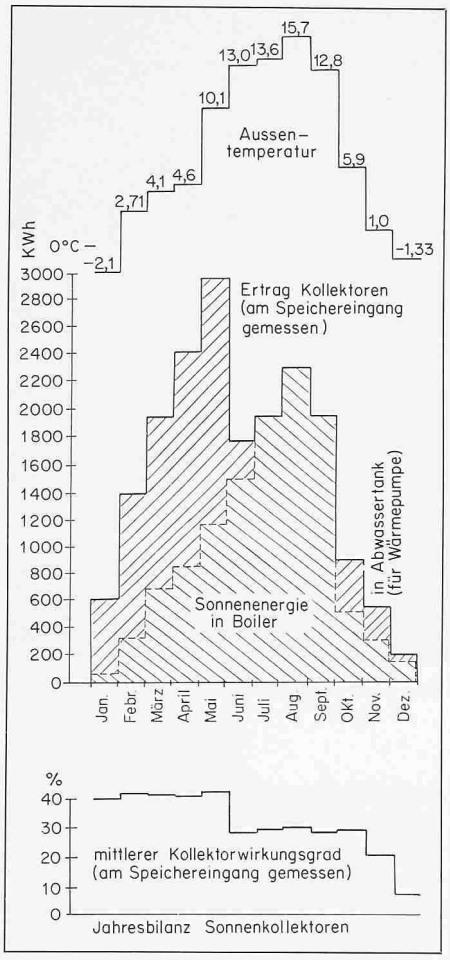


Bild 11. Jahresbilanz Sonnenkollektoren

Jahresbilanz (Bild 11, Tabelle 5)

Üblicherweise haben Sonnenkollektoren in der kalten Jahreszeit mit den wenigen Sonnenscheinstunden und der grossen Temperaturdifferenz zwischen Aussentemperatur und Nutzungstemperatur (Boiler) den kleinsten Wirkungsgrad. Im vorliegenden Fall wird der Sonnenkollektor dazu benutzt, neben der Brauchwarmwassererwärmung zusätzlich den Abwassertank aufzuwärmen, sofern die Wärmepumpe einen Heizungsbedarf anmeldet. Die Sonnenenergie leistet damit in der kalten Jahreszeit über den Umweg des Abwassertanks und die Wärmepumpe einen wirksamen Beitrag an die Raumheizung und erhöht damit den Jahreskollektorwirkungsgrad (am Speichereingang gemessen) von 20% (nur Boilerladung) auf 32,6% (Boiler- und Abwassertankladung). Dies entspricht den Prognosen. Der Wirkungsgrad wird auf die Globalstrahlung in der Kollektorebene (Referenzfläche = Einstrahlungsöffnung) bezogen.

Im Betrieb der Kollektoren traten abgesehen von einigen Anlaufschwierigkeiten keine Probleme auf. Die anfänglich auf allen Kollektorenelementen montierten automatischen Entlüftungen mussten durch Handentlüftungsventile ersetzt werden. Durch die unterschiedliche Neigung der Kollektoren gerieten die Schwimmer der automatischen Entlüfter aus der senkrechten Lage und arbeiteten nicht mehr einwandfrei. Ebenso mussten die flexiblen Kollektoranschlussleitungen (Gummi-Panzerschläuche mit Klemmbriden) durch Metallpanzerschläuche mit festverbundener Anschlussverschraubung ersetzt werden, da die Schlauchbridenverbindungen auch nach mehrmaligem Nachziehen immer wieder Leckverluste aufwiesen.

Tabelle 5. Jahresbilanz Sonnenkollektoren

Auf die Sonnenkollektorebene eingestrahlte Energie			58 000 kWh
Abgespeicherte Wärme	Boiler	11 710 kWh	
	Abwassertank	7 186 kWh	
Kollektorfeldertrag	Total	18 896 kWh	18 896 kWh
			(363 kWh/m²)
Jahreswirkungsgrad Sonnenkollektor (am Speichereingang gemessen)			32,6 %
Laufzeit Umwälzpumpe			1012 Std.
Energieverbrauch Umwälzpumpe in % des Kollektorfeldertrags			435 kWh
			2,3 %
Mittlere Wärmeleistung (wenn Umwälzpumpe läuft)			18,7 kWh
Maximaler Tagesertrag 14. August 1980			146,7 kWh
			(2,82 kWh/m² Tag)

Brauchwarmwasser

Aufbereitung

Für die Brauchwarmwasserbereitung (Bild 12) sind zentral im Kellergeschoss zwei Boiler zu je 2500 Liter Inhalt installiert. Über den Doppelmantel erfolgt die Aufheizung im Gegenstrom mittels Sonnenenergie. Je nach Boilertemperatur und Sonneneinstrahlung sind die beiden Solarheizmäntel in Serie oder einzeln zugeschaltet.

Als zweite Möglichkeit kann der Boiler 1 über ein Ladesystem (Magro) mit der Kondensatorabwärme der Heizungswärmepumpe aufgeladen werden.

Als dritte Möglichkeit und zugleich als Sicherheit immer genügend Warmwasser beziehen zu können, ist im obersten Drittel des Boilers 1 ein Heizregister eingebaut. Im Winter wird diese Zusatzheizung mit Fernwärme und im Sommer mit Elektrizität gedeckt.

Warmwasserverteilung

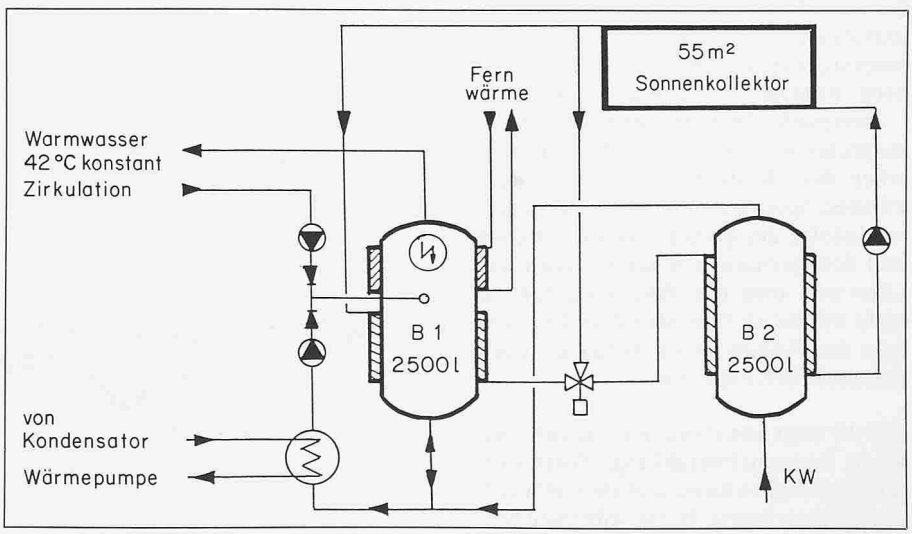
Auf vier Stockwerken sind 49 Warmwasserzapfstellen vorhanden. Um die Ausstosszeiten kurz zu halten, musste eine Zirkulationspumpe installiert werden.

Die Daten der installierten Leitungen für das Warmwassernetz enthält Tabelle 6.

Tabelle 6. Installierte Leitungen für das Warmwassernetz

	Ausstossleitungen			WW Vorlauf		WW Rücklauf	
Dimension	CU 15×1	½"	½"	¾"	2"	¾"	1"
Isolation	20	5	20	30	30	20	30
Länge in m	207	59	209	193	40	234	29
Mauer- und Deckendurchführungen 76 Stück							

Bild 12. Prinzip der Brauchwarmwasserbereitung



Wasserverbrauch und Energiebilanz

Kaltwasserverbrauch total 3400 m³ p.a
Warmwasserverbrauch 255 m³ p.a
Zirkulationsumwälzpumpe eingeschaltet von Montag–Freitag je 06.30 bis 19.00 Uhr. Nachts und über das Wochenende abgestellt (Pumpe).
Umgewälzte Wassermenge etwa 1220 Liter/h.
Zur Verminderung der Energieverluste wird der Warmwasservorlauf mit einem Irgumat-Thermostatventil auf 42 °C begrenzt.

Energiebilanz (Bild 13)

Boilerladung mit:		
Sonnenenergie	11 710 kWh	40,28%
Wärmepumpe	7 067 kWh	24,31%
Fernwärme/Elektro	10 296 kWh	35,41%
Energiezufuhr total	29 073 kWh	100 %
Bezug Brauchwarmwasser an den Zapfstellen	7 625 kWh	26,23%
Zirkulations- und Boilerverluste	21 448 kWh	73,77%
	29 073 kWh	100 %

Die Monatsmittel der Zirkulations- und Boilerverluste variieren zwischen 63 und 80%, die Tagesmittel zwischen 22 und 98%.

Schlussfolgerung

Die Sonnenenergie vermag den Anteil des Brauchwarmwasserbezugs zu decken. Knapp zwei Drittel der Energiezufuhr erfolgen durch die alternativen Energiesysteme Sonnenkollektoren und Wärmepumpe. Die Sonnenkollektorenfläche von 55 Quadratmeter ist unter Berücksichtigung der übrigen Abwärmenutzungsmöglichkeiten gut auf den Boilerinhalt und den Verbrauch abgestimmt. Die Boilertemperatur stieg im Maximum auf 65 °C.

Dass die Zirkulations- und Boilerverluste knapp drei Viertel der zugeführten Energie ausmachen, wobei der grösste Teil den Zirkulationsverlusten zuzuschreiben ist – trotz flankierenden Massnahmen wie niedrige Wassertemperatur und Abschaltung der Zirkulation ausserhalb der Bürozeiten –, ist erstaunlich. Untersuchungen an anderen ähnlich gelagerten Objekten mit weitverzweigten Installationsnetzen und geringem Warmwasserbezug haben Zirkulationsverluste bis 90% ergeben. Es stellt sich sofort die Frage, ob in Zukunft auf die zentrale Warmwasserbereitung, zugunsten dezentraler Kleinboiler mit Einzelzapfstellen, verzichtet werden soll. Demgegenüber ist festzuhalten, dass nur in zentralen Boileranlagen mit vernünftigem Aufwand Alternativenergiesysteme wie Sonnenkollektoren und Wärmepumpen zum Einsatz gelangen können. Wie aus dem Jahresenergieflussdiagramm ersichtlich ist, kommen die Zirkulationsverluste der Gebäudeheizung zugute. Ausserhalb der eigentlichen Heizperiode sind diese Verluste hingegen nicht erwünscht. Vergleicht man den absoluten Betrag der Zirkulationsverluste in den Sommermonaten mit den übrigen Abwärmequellen, so haben sie einen Anteil von höchstens 10%. Dennoch lohnt es sich, Gedanken zu machen, wie diese Verluste in Zukunft reduziert werden könnten, z. B. durch Reduktion der Rohrleitungsdurchmesser unter Inkaufnahme von höheren Druckverlusten bei gleichzeitiger Wasserentnahme an verschiedenen Zapfstellen oder durch noch bessere Isolation der Leitungen, Schieber und Mauerdurchbrüche.

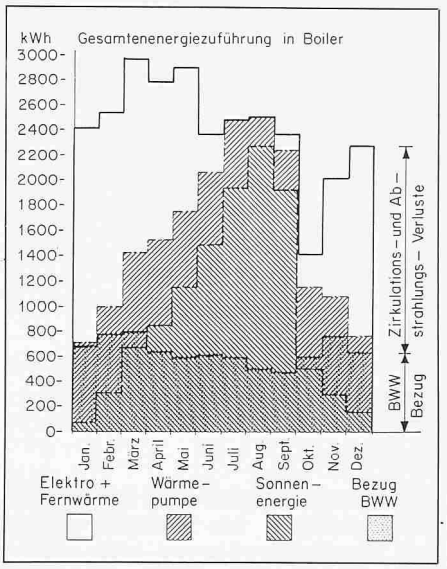


Bild 13. Jahresbilanz Brauchwarmwassersystem

Elektroverbrauch

Elektrogesamtverbrauch

Im Hinblick auf die weiteren Ausbauetappen auf dem angrenzenden Grundstück wurde das Kantonale Labor an das Hochspannungsnetz angeschlossen. Die Trafostation ist mit einem Trafo von 630 kVA Leistung bestückt.

Der Jahresenergieverbrauch beträgt 364 MWh (300 MWh Neubau, 64 MWh Altbau). Vom Gesamtverbrauch entfallen 77% auf die Hochtarifzeit von 06.00 bis 22.00 Uhr und 23% auf die Niedertarifzeit.

Energiekosten

Hochspannungstarif (EWZ)	HST 1976
Hochtarif	12,5 Rp./kWh
Niedertarif	4,5 Rp./kWh
Leistungspreis	Fr. 6.–/kW

Rückvergütung Trafoverluste für die ersten 40 000 kWh/Monat 5,5 Rp./kWh, für alle übrigen 1,5 Rp./kWh.

Der Jahresenergieverbrauch von 364 MWh belief sich inkl. Leistungsgebühr auf Fr. 26 850.–, was einem mittleren kWh-Preis von 7,37 Rp. entspricht.

Lichtverbrauch

Mit 33 MWh entfallen etwa 11% des totalen Elektroverbrauchs auf die Beleuchtung. Der Gesamtverbrauch wurde aufgrund der Einzelmessungen in zwei Labors ermittelt.

Im Labors B9 mit 32 m² Bodenfläche sind 22 Fluoreszenzröhren 40 Watt installiert. Der Jahreslichtverbrauch betrug 985 kWh oder etwa 30,8 kWh/m² (Bild 14, Tabelle 7).

Die Frage, ob eine Verkleinerung der Fensterfläche einen Mehrverbrauch an Licht zur Folge hat, konnte im Projektierungsstadium nicht mit Sicherheit beantwortet werden. Untersuchungen haben ergeben, dass im hinteren Teil von etwa 6 m tiefen Labors auch bei grossen Fensterflächen für verschiedene Arbeiten zusätzliches künstliches Licht benötigt wird. Im übrigen hängt der Lichtverbrauch wesentlich von der Disziplin der Benutzer ab. Es hat sich gezeigt, dass die morgens eingeschaltete Beleuchtung bei zunehmendem von aussen eindringendem Sonnenlicht nicht reduziert oder ausgeschaltet wird. Ebenso wird die Beleuchtung während der Mittagszeit oft nicht ausgeschaltet.

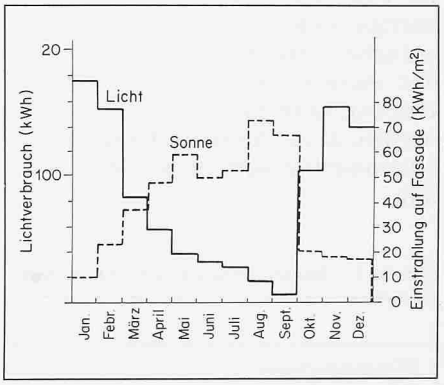


Bild 14. Monatlicher Lichtverbrauch Labor B9 in Funktion der mittleren Sonneneinstrahlung auf die senkrechte Südfassade (B-Stock)

Monatliche Verbrauchswerte

	minimal	*mittel*	*maximal*
Strom	24 570 kWh (Juni)	26 720 kWh	30 347 kWh (Okt.)
Leistung	90 kW (Aug.)	111 kW	126 kW (Nov./Dez.)

Tabelle 7. Lichtverbrauch

		Jahres-Verbrauch kWh/m²	Jahres-Verbrauch total kWh	Anzahl FL-Röhren
Büro und Laborfläche Hauptgeschosse	1000 m²	30,8	30 800	≈ 600
Nebenräume, Lager, Treppe, Lift, Korridor, WC, Technik	2400 m²	≈ 9,2	2 200	≈ 400
			33 000	

Gegenüberstellung

a) Mehrverbrauch Licht: etwa 15% (ca. 5 MWh)
b) Einsparung durch kleinere Fensterflächen:
Reduzierte Fensterfläche etwa 180 m²
Differenz *k*-Wert Fenster zu Wand 1,8 W/m² °K
Energieeinsparung Transmissions- und Fugenverluste: etwa 22 MWh

Auch wenn infolge der reduzierten Fensterfläche der Lichtverbrauch etwa 10–15% höher wäre, so ist die Energieeinsparung aufgrund der kleineren Fensterfläche immer noch etwa viereinhalb Mal grösser.

Elektroverbrauch Laborapparate

Der Gesamtverbrauch der Laborapparate konnte nur indirekt ermittelt werden, indem vom Gesamtverbrauch die einigermassen genau messbaren Verbrauchskategorien wie Licht, Haustechnik usw. abgezogen wurden. Der so ermittelte Verbrauch beträgt etwa 165,3 MWh oder etwa 55% des Gesamtverbrauchs. In den beiden Referenzlabors B9 und B2 wurden 8925 kWh bzw. 104 kWh Jahresverbrauch gemessen.

Die *Abwärme der Elektro-Laborapparate* unterstützt die Raumheizung wesentlich. Während der Heizperiode kann ein Überheizen der Räume durch das korrigierende Eingreifen der thermostatischen Heizkörperventile verhindert werden. Auf die normale statische Heizung kann jedoch nicht verzichtet werden, da die Apparateabwärme nicht kontinuierlich über den ganzen Tag anfällt.

Energieverbrauch Haustechnik

Allgemeines

Der Energieverbrauch der haustechnischen Anlagen wie Umwälzpumpen und Ventilationsmotoren wird immer wieder stark unterschätzt. Aus dem Zwang heraus, Investitionskosten zu senken, werden die Verrohrungen der Heizungsanlagen kleiner bemessen. Die höheren Widerstände müssen mit stärkeren Pumpen überwunden werden. Das gleiche gilt für Lüftungsanlagen. Kleinere Kanalquerschnitte, höhere Luftgeschwindigkeiten und hochtourige Ventilatoren bedingen ebenfalls stärkere Antriebsmotoren.

Mit Hilfe von monatlich abgelesenen Betriebsstundenzählern liessen sich die in Tabelle 8 aufgeführten Energieverbrauchswerte ermitteln.

Der Anteil des Energieverbrauchs für die Antriebe der haustechnischen Anlagen entspricht 20% des gesamten Elektroverbrauchs und 32% des Wärmeverbrauchs der Heizungsanlage, der Lüftung und des Boilers gesamthaft (inkl. Zirkulationsverluste).

Hilfsbetriebe Heizungsanlagen

Vom Jahreswärmeverbrauch der Raumheizung von 109 MWh entfallen 8,6% auf die Pumpenantriebsenergie. In den meisten Heizungssteuerungen laufen die Pumpen ununterbrochen während der ganzen Heizsaison. In den Übergangszeiten mit Aussentemperaturen über 0 °C ist es ohne Nachteile möglich, die Pumpen nachts und über das Wochenende auszuschalten. Dadurch konnten im Laborbau etwa 20% (d. h. 3400 kWh, ca. Fr. 250.–) an Pumpenantriebsenergie eingespart werden.

Wärmekollektiv

In dieser Kategorie sind die verschiedenen Umwälzpumpen für die Sonnenkollektorenanlage, die Hilfsbetriebe für die Abwärmenutzung der Kältemaschine und das Ladesystem für die Boilerladung enthalten.

Lüftungs- und Klimaanlagen

Die Haupt-Zuluft- und -Abluftventilatoren laufen bedarfsabhängig mit variabler Drehzahl. Dadurch lassen sich nicht nur Aufbereitungskosten für die Frischluft, sondern auch Ventilatorenantriebsenergie einsparen. Nachts und über das Wochenende werden die grossen Anlagen abgeschaltet. 80% der Antriebsenergie werden von der Hauptlüftungsanlage inkl. Hilfsbetriebe verbraucht. Diverse Abluftventilatoren sind dauernd eingeschaltet und kommen trotz kleinen Antriebsleistungen auf einen respektablen Jahresenergieverbrauch.

Tabelle 8. Energieverbrauchswerte Haustechnik

		Jahresverbrauch
Klimabefeuchtung	1 Verdampfer	8 400 kWh
Heizungsanlage	4 Pumpen	9 400 kWh
Wärmekollektiv (Hilfsbetriebe Wärmepumpen und Kältemaschinen, Sonnenkollektoren) und Sanitäranlagen	12 Pumpen	8 000 kWh
Lüftungs-, Klima-, Kälteanlagen		
Zuluftanlagen	7 Pumpen 5 Ventilatoren	20 500 kWh
Abluftventilatoren	8 Ventilatoren	13 700 kWh
	Total Haustechnik	60 000 kWh

Datenerfassung, Auswertung, Optimierung

Datenerfassung

Die Installation dieses umfangreichen Wärmekollektivs soll nicht nur helfen, Energie sinnvoll und sparsam zu nutzen, sondern es soll auch neue Erkenntnisse liefern über

- die Qualität und Einsatzmöglichkeiten einzelner Anlageteile,
- die wechselseitigen Beziehungen der Systemkomponenten untereinander,
- die Auswirkungen komplexer Installationstechnik und alternativer Bauweise auf die Hausbenutzer.

Um möglichst aussagekräftige Daten erhalten zu können, wurde eine umfangreiche, speziell auf diese Testgebäude angefertigte Datenerfassungsanlage installiert (Bild 15). Alle drei Sekunden werden 58 Temperaturwerte, 54 digitale Zustände von Ventilatoren, Pumpen, Ventilen, neun Energiemengen von Elektrizitäts-, Fernwärme- und Strahlungsmessgeräten erfasst und fortlaufend verarbeitet. Zu jeder vollen Stunde werden 110 aufgearbeitete Daten, davon 50 Einzelenergieverbrauchswerte und 50 Temperaturmittelwerte auf ein Kassettenmagnetband abgespeichert. Innerhalb eines Jahres fallen knapp eine Million Einzeldaten an.

Wärmemessungen mit genügender Genauigkeit, speziell auf niederem Tem-

peraturniveau, sind sehr problematisch. Die Schwierigkeiten liegen im allgemeinen bei der Messung von sehr kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rückläufen der einzelnen Verbraucher. Hingegen können Wasserdurchflüsse, speziell wenn sie wie in diesem Gebäude konstant fliessen, genügend genau gemessen werden. Die Temperaturen der meisten Wärmeverbraucher liegen zwischen 40 und 60 °C. Bei diesen geringen Temperaturschwankungen ist die Temperaturabhängigkeit der Dichte und der spezifischen Wärme vernachlässigbar. Die meisten Energiemengen werden in diesem Objekt mit Hilfe des Prozessrechners berechnet. Dabei wird für jeden Verbraucher der einmal gemessene Wasserdurchfluss im Rechner als Konstantwert eingegeben. Über den Schaltbefehl der Pumpe oder des Ventilators wird dann, zusammen mit der fortlaufend gemessenen Temperaturdifferenz des Verbrauchers, die Energiemenge errechnet.

Um Messfehler oder Ausfälle einzelner Messungen rechtzeitig erkennen zu können, wurden verschiedene *Kontrollmöglichkeiten* eingeplant. So wurden bei allen Motoren zusätzlich Betriebsstundenzähler eingebaut, mit deren Hilfe die vom Rechner ermittelten Verbrauchswerte in groben Zügen überprüft werden konnten. Die vom Prozessrechner auf Magnetband abgespeicherten Daten werden parallel über ein spezielles Programm weiterverarbeitet und können jederzeit über Bildschirm oder Ausgabedrucker abgerufen werden.

So ist es möglich, die Stundenwerte der letzten 48 Stunden, die Tageswerte der letzten 14 Tage, die Wochenwerte der letzten 12 Wochen und die Monatswerte der letzten 12 Monate abzufragen; d. h. bei Anlagestörungen können die Ursachen durch *Rückblenden* rasch ermittelt werden. Weiter zurückliegende Daten sind dann nur noch in einer zunehmend komprimierteren Form herauszulesen. Mit Hilfe dieses Spezialprogramms war es schon kurz nach Betriebsaufnahme möglich, Einstellwerte der Regulierungs- und Steuerapparate zu korrigieren und optimal einzustellen.

Auswertung

Um die Menge von jährlich einer Million Einzeldaten auszuwerten, sind grössere Datenverarbeitungsanlagen notwendig. Im Eidg. Institut für Reaktorforschung (Projekt Solarwärme) konnte ein idealer Partner gefunden werden. Das Institut besitzt nicht nur bestens qualifizierte Fachleute auf dem Gebiet der Hydraulik und Wärmetechnik, sondern auch verschiedene Computerprogramme zur Verarbeitung und Auswertung grosser Datenmengen. Die Zurverfügungstellung ihrer Infrastruktur hat uns wesentlich geholfen, den Bericht über die Energiesparmassnahmen in dieser Form veröffentlichen zu können.

Im Laborgebäude werden die Daten auf ein Kassettenband abgespeichert, wobei auf jeder Bandseite die Daten einer Woche Platz finden. Der Prozessrechner schaltet jede Woche die Datenabspeicherung automatisch von der Kassette 1 auf Kassette 2 oder umgekehrt. Dadurch ist das Wechseln der Magnetbänder lediglich ein Mal innert zwei Wochen notwendig. Die fertig beschriebenen Kassetten werden periodisch im Rechenzentrum der ETH Zürich eingelesen und auf ein Grossmagnetband übertragen. Auf der Rechenanlage der ETH werden die Daten nach den Anweisungen und Programmen des EIR verarbeitet und anschliessend in der Satelitenstation des EIR tabellarisch ausgedruckt.

Optimierung

Da für die Datenerfassung ein Prozessrechner verwendet wurde, war es naheliegend, diesen mindestens versuchsweise zur Systemoptimierung und optimalen Bewirtschaftung der Anlagekomponenten einzusetzen. Es können bis zu *drei Optimierungsprogramme* einzeln oder gemeinsam der konventionellen Steuerung übergeordnet zugeschaltet werden:

Bewirtschaftung des Wärmespeichers.

Aufgrund des Energieverbrauchs der letzten 24 Stunden wird die Dauer der Speicherladung vorausbestimmt. Über den Temperaturvergleich zwischen Speicher und Raumheizungssystem wird festgelegt, zu welchem Zeitpunkt die Raumheizung abgekoppelt und direkt mit Fernwärme versorgt werden muss.

Wärmepumpenzuschaltung

Grundsätzlich war geplant, die Wärmepumpe aus Kostengründen nur nachts in der Niedertarifzeit einzuschalten. Es hat sich sehr schnell gezeigt, dass während einiger Monate im Jahr die achtstündige Niedertarifzeit nicht ausreicht, um den jeweiligen Tageswärmebedarf zu decken, und es musste zusätzlich Fernwärme zur Defizitdeckung zugeschaltet werden.

Die Wärmegestehungskosten der Wärmepumpe beim Betrieb in der Hochtarifzeit sind nur halb so gross wie die vergleichbaren Wärmepreise bei der Erzeugung mit Heizöl. Das Optimierungsprogramm schaltet die Wärmepumpe auch in der Hochtarifzeit zu, sofern die momentane gesamte Elektroleistung im Gebäude einen maximal vorgegebenen Wert nicht übersteigt.

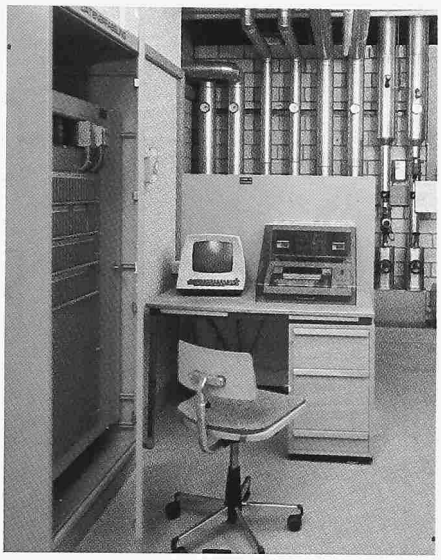


Bild 15. Datenerfassungsanlage. Im Schrank (links): Zentraleinheit und Messumformer. Mitte: Bildschirm mit Ein/Ausgabe-Gerät und Magnetband-Aufzeichnungsstation

Optimierung der Sonnenkollektorenanlage (Bild 16)

Normalerweise werden Sonnenkollektorenanlagen in Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Kollektor gesteuert. Die absolute Temperatur des Kollektors, d. h. die Temperaturdifferenz zwischen Aussenluft- und Kollektoroberflächentemperatur, beeinflusst den Wirkungsgrad der Kollektoranlage. Aus der Sicht des Benützers sind höhere Boilertemperaturen erwünscht, diese verschlechtern hingegen den Kollektorwirkungsgrad. Sind in einer Anlage mehrere Speicher mit unterschiedlicher Grösse und Temperaturniveau vorhanden, ist es mit konventionellen Temperatursteuerungen sehr schwierig, den jeweils günstigsten Speicher zuzuschalten. Sind hingegen Sonneneinstrahlung und die Kennlinie des Kollektors bekannt, so lässt sich leicht vorausbestimmen, welche Speichertemperatur mit einem bestimmten Wirkungsgrad erreicht werden kann.

Im vorliegenden Fall hat der Prozessrechner drei Auswahlmöglichkeiten, Sonnenenergie abzuspeichern:

A: Brauchwarmwasserboiler 1 + 2 in Serie.
B: Brauchwarmwasserboiler 2 separat, wenn Boiler 1 eine zu hohe Temperatur aufweist.
C: Abwassertank mit nachträglichem Energieentzug durch die Wärmepumpe für Heizzwecke.

Im Fall C wird der Abwassertank automatisch gesperrt, sofern in den vergangenen 24 Stunden für Raumheizung und Lüftung keine Wärme benötigt wurde. Dieses Optimierungsprogramm

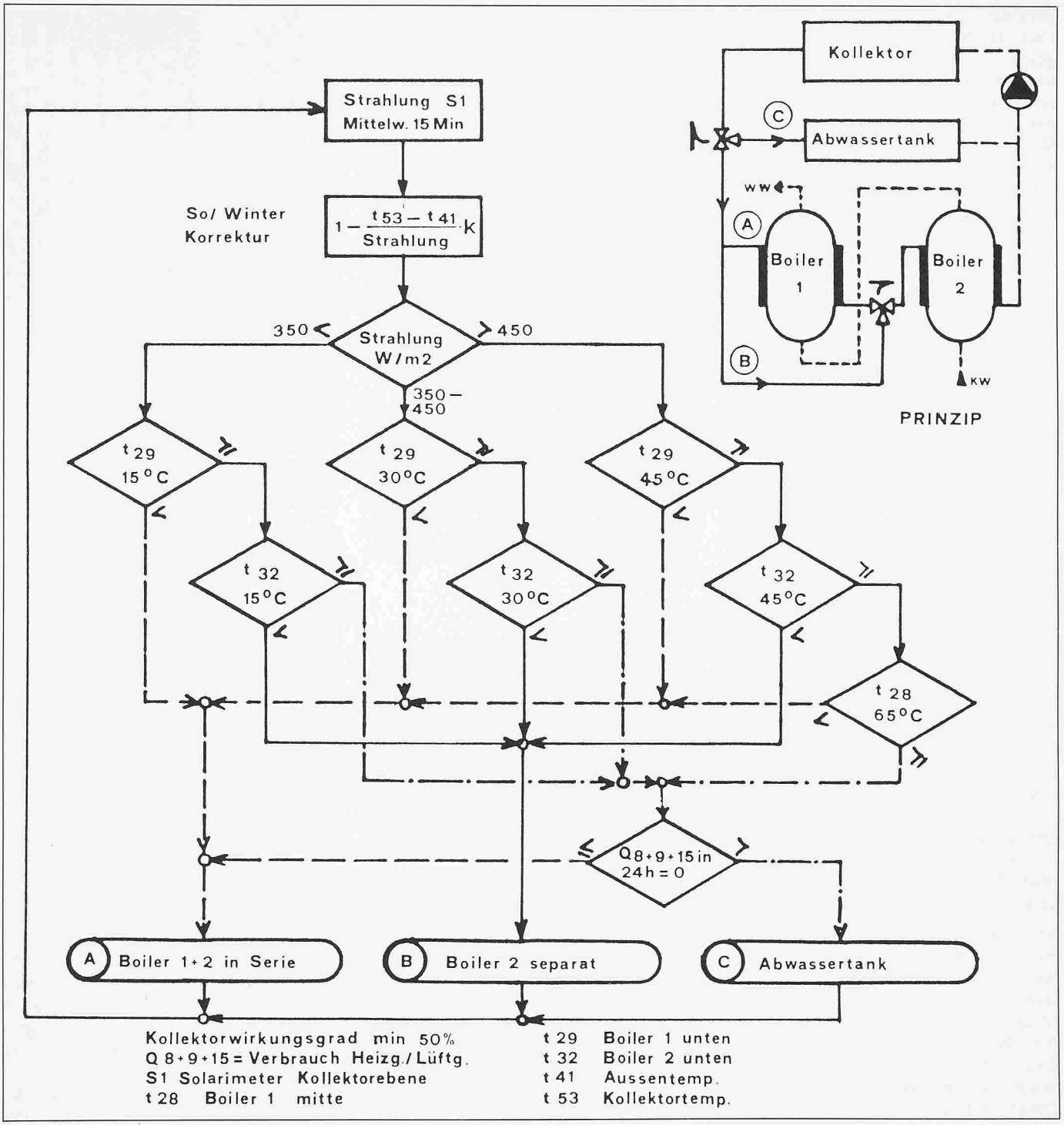


Bild 16. Optimierungsprogramm Sonnenkollektoranlage

funktioniert einwandfrei und hat viel zur Verbesserung des Jahreswirkungsgrades der Sonnenkollektoranlage beigetragen.

Kosten-Nutzen-Vergleich

Bereits bei der Bewilligung des Zusatzkredites für die speziellen Einrichtungen zur Energieeinsparung im Juni 1976 war man sich bewusst, dass unter Umständen nicht alle baulichen und installationstechnischen Massnahmen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten amortisiert werden können. Ziel dieser Pilotanlage war es, unter wirklichkeitsnahen Bedingungen Erfahrungen über die Wirksamkeit der getroffenen Massnahmen zu sammeln und für die einzelnen Anlageteile Kosten-Nutzen-Rechnungen aufzustellen.

In Tabelle 9 wird klar unterschieden zwischen reinen Installationskosten, wie sie bei jedem privaten Bauwerk ebenfalls anfallen würden, zweitens den Engineeringkosten für die Systemstudie, Erarbeitung der Entscheidungsgrundlagen und Ausführungsprojektierung und drittens den speziellen Aufwendungen für die Datenerfassung und Auswertung.

Bemerkungen zum Rentabilitätsvergleich der einzelnen Anlagen (Tabelle 10).

Da in der Schweiz für Wärmezwecke zum überwiegenden Teil Erdöl verwendet wird, wurden die Energieeinsparungen auf diesen Energieträger umgerechnet, unter Berücksichtigung eines mittleren Jahres-Heizkesselwirkungsgrades von 55 bis 80% je nach Jahresbetriebsdauer und eines Ölpreises von 70 Rp./kg.

Die mittlere jährliche Ölpreisteuerung über die letzten 15 Jahre beträgt 10%. Es ist anzunehmen, dass sich die zukünftige Energieteuerung mindestens

Tabelle 10. Rentabilitätsvergleich

	Sonnen-kollektor	*Wärme-pumpe*	*Abwärme Kältemasch.*	*Wärmerück-gewinnung Lüftung*	*Drehzahl-regulierung Ventilatoren*	*Bessere Isolation, klei-nere Fenster*	*Total Anlage- und Projektkosten*
Investitionen Fr.	85 000.–	85 000.–	20 000.–	25 000.–	30 000.–	90 000.–	392 000
Ertrag, Einsparung kWh	18 800	85 000 (ohne Elektro)	6 400	78 000	56 000	167 000	
Einsparung nicht erneuerbarer Energien gegenüber Projekt 1973 (kWh)							542 700
Öleinsparung p.a in kg	2 940	9 747	734	8 944	6 421	17 952	62 229
bei Wirkungsgrad p.a	55%	75%	75%	75%	75%	80%	75%
Ölpreis 1 kg = 70 Rp., in Fr.	2 058.–	6 822.–	514.–	6 261.–	4 495.–	12 566.–	43 560
Verzinsung effektiv	2,42%	11,37%	2,57%	25,05%	14,98%	13,96%	11,11%
Amortisation (Zins 5%)							
a) bei gleichbleibenden Energiepreisen	–	20 Jahre	–	4,5 Jahre	8,5 Jahre	9 Jahre	12 Jahre
b) bei 5% Jahresenergieteuerung	40 Jahre	12,5 Jahre	40 Jahre	4 Jahre	7 Jahre	7,5 Jahre	9,5 Jahre
c) bei 10% Jahresenergieteuerung	24 Jahre	9,5 Jahre	24 Jahre	3,5 Jahre	6 Jahre	6,3 Jahre	7,5 Jahre

im Umfang der mittleren Teuerungsraten der OECD-Staaten bewegen und kaum den Wert von 5% unterschreiten wird.

Sonnenkollektoranlage

Die Investitionskosten von Fr. 1545.–/m² Kollektorfläche sind sehr hoch. Sie sind dadurch zu erklären, dass die Kollektorelemente auf einem Flachdach mit verstellbarer Neigung zu Experimentierzwecken aufgestellt wurden. Beim Einbau der Elemente in ein Satteldach unter Weglassung verschiedener Sonderanfertigungen kann der Quadratmeterpreis auf etwa Fr. 1000.– reduziert werden, was die Amortisationszeit bei jährlichen Energieteuerungsraten von 5% auf 25 Jahre bzw. bei 10% Teuerung auf 17 Jahre verkürzen würde.

Wärmepumpe

Die Rentabilität basiert lediglich auf dem Energiegewinn aus der Umweltwärme (Verdampfer). Würde man die gegenüber dem Ölpreis viel billigere Niedertarif-Elektroenergie für den Antrieb der Wärmepumpe hinzurechnen, so würde dies die gesamte Rentabilität nochmals verbessern.

Abwärme Kältemaschine

Üblicherweise wird die Abwärme von Kältemaschinen an die Aussenluft oder über Frischwasser an die Kanalisation abgegeben. Aufgrund des minimalen Kältebedarfs ist der absolute Ertrag der rückgewonnenen Energie gering und die Rentabilität in Frage gestellt. Ab Ende 1981 wird sich der Kältebedarf aufgrund zusätzlicher Bedürfnisse mindestens verdreifachen. Durch eine Anpassung des hydraulischen Systems wird es möglich sein, die Abwärme direkt für Heizzwecke zu verwenden.

Isolationsverbesserungen, Reduzierung der Fensterfläche

Gegenüber dem ursprünglichen Projekt aus dem Jahr 1973 weist der heutige Baukörper eine wesentlich bessere Aussenisolation auf. Die Fensterfläche wurde um mindestens die Hälfte reduziert und hat heute nur noch einen Anteil von 11% von der gesamten sichtbaren Fassadenoberfläche. Die Fensterrahmen wurden speziell isoliert und mit Gummidichtungen zur Verminderung der Fugen-Lüftungsverluste versehen. Die Wärmeverbrauchsdifferenz für die Raumheizung von 167 000 kWh zwischen dem Projekt 1973 und dem heutigen gemessenen Wert wurde rechnerisch ermittelt.

Tabelle 9. Kostenvergleich

Anlagekosten	*Fr.*
Sonnenkollektoranlage (nur Mehrkosten inkl. 1 Boiler)	85 000.–
Wärmepumpenanlage/Abwassertank/Speicher Fr. 115 000.–	
abzüglich Neutralisationsanlage Fr. 30 000.–	85 000.–
Abwärmerückgewinnung Kälteanlage	20 000.–
Wärmerückgewinnung Lüftungsanlage	25 000.–
Drehzahlregulierung Ventilatoren	30 000.–
Aussenisolation	90 000.–
Total Zusatzinvestitionen	*335 000.–
Engineeringkosten	
Vorprojektierung und Untersuchungsbericht für Vorentscheid	113 000.–
Ausführungsprojektierung Fachingenieure Heizung, Lüftung, Sanitär, Elektro	* 57 500.–
	171 000.–
Anrechenbare Mehrkosten (mit * bezeichnet bei Anlage- und Ausführungsprojektierung), dies entspricht ca. 5% der Gebäudekosten BKP 2)	392 500.–
Datenerfassung und Auswertung	
Installation Datenerfassungsanlage inkl. Zusätze	186 500.–
Unterhalt, Service Datenerfassung	26 000.–
Verschiedene Nebenarbeiten	5 000.–
Datenübertragungen ETH	7 500.–
Datenverarbeitung EIR Personal	33 000.–
Rechenzeit	26 000.–
Datenauswertung, Amt für technische Anlagen und Lufthygiene, inkl. Anlageüberwachung für 3 Jahre etwa 1000 Stunden	55 000.–
	339 000.–

Total Anlage- und Projektkosten

Im Betrag von Fr. 392 000.– sind die baulichen und installationstechnischen Zusatzkosten sowie die anteilmässigen Ausführungsprojektierungskosten enthalten. Die übrigen für dieses Pilotprojekt aufgelaufenen Kosten werden vom Kanton Zürich und dem Bund (EIR) als *Forschungsbeitrag* abgeschrieben. Die gesamten Ausgaben für die Energiesparmassnahmen erzielen eine Rendite von knapp 11% und sind in weniger als zehn Jahren, d. h. mit Sicherheit innerhalb der Lebensdauer der einzelnen Anlageteile, amortisiert.

Adresse der Verfasser: *B. Brechbühl*, Projektleiter Technische Gebäudeausrüstung, Amt für technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich, 8090 Zürich; *K. Unger*, Projektingenieur Energietechnik, Schindler Haerter AG, Stockerstr. 12, 8002 Zürich.