

Materialien zu RAVEL

**Betriebsoptimierung und
Erfolgskontrolle von
Wärmepumpen- und
Wärme-
kraft-
kopplungs-
Anlagen**

**Ruedi Bühler
Hans Mayer**

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|---|-------|
| Zusammenfassung..... | 1 |
| 1. Ausgangslage..... | 3 |
| 2. Ziele des Projektes..... | 5 |
| 3. Situationsanalyse..... | 7 |
| 3.1 Anforderungen an eine optimierte Haustechnikanlage..... | 7 |
| 3.2 Voraussetzungen für einen optimalen Betrieb..... | 7 |
| 3.3 Schwachstellen..... | 7 |
| 3.4 Forderungen für einen optimierten Energieverbrauch..... | 8 |
| 4. Fallbeispiele..... | 11 |
| 4.1 Wärmepumpenanlage RhV-Betriebsgebäude Altstätten..... | 11 |
| 4.2 Erdsonden-Wärmepumpenanlage Binzmatt, Uitikon..... | 15 |
| 4.3 Blockheizkraftwerk «Tiefenbrunnen»..... | 18 |
| 4.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Fallbeispielen..... | 26 |
| 5. Massnahmen zur Optimierung des Energieverbrauchs..... | 29 |
| 5.1 Standardschaltungen..... | 29 |
| 5.2 Anlagenkennzahlen bei optimiertem Energieverbrauch..... | 29 |
| 5.3 Betriebsoptimierung nach Inbetriebsetzung und erster Abnahme..... | 29 |
| 5.4 Anpassung des SIA-Vertrages für Ingenieurleistungen und der SIA-Honorarordnung 108..... | 30 |
| 6. Instrumentierung für die Betriebsoptimierung..... | 33 |
| 6.1 Instrumentierung einfacher Anlagen mit manueller Optimierung..... | 34 |
| 6.2 Instrumentierung und Optimierung komplexer Anlagen..... | 35 |
| 7. Weiteres Vorgehen..... | 39 |
| Literatur..... | 41 |
| Anhang 1 Kennzahlen für Wärmepumpenanlagen..... | 43 |
| Anhang 2 Beispiele von Standardschaltungen..... | 47 |
| Anhang 3 Messstellenlisten der Fallbeispiele..... | 51 |

Zusammenfassung

Wärme­kraft­kopplungs- und Wärmepumpenanlagen sind im Vergleich zu konventionellen Anlagen sehr komplex. Untersuchungen und Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass herkömmliche Methoden der Inbetriebsetzung und Abnahme für solche Anlagen völlig unzureichend sind. Viele Anlagen arbeiten überhaupt nicht so, wie sich das der Planer oder die Planerin eigentlich vorgestellt hatte. Das gilt aber leider auch oft für konventionelle Öl- oder Gasheizungen.

Mit einer Betriebsoptimierung, welche in den zwei Jahren zwischen der Übergabe der Anlage an den Bauherrn und der Garantieabnahme durchgeführt wird, kann die Funktionsweise der Anlage systematisch überprüft werden. Aufgrund dieser Überprüfung können Mängel an Anlagekomponenten behoben und die Einstellungen von Steuer- und Regelparametern verbessert werden. Diese Arbeiten werden mit einer Erfolgskontrolle abgeschlossen. Der Bauherr hat damit die Gewissheit, dass die Anlage einwandfrei und mit minimalem Energieverbrauch arbeitet.

Was sind die Voraussetzungen, dass eine Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle durchgeführt werden kann? Was sind die Ergebnisse? An drei Fallbeispielen wird untersucht, was für technische Vorkehrungen getroffen werden müssen und was mit einer Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle erreicht werden kann. Angepasst an die Komplexität einer Anlage wird gezeigt, wie die technische Ausrüstung einer Anlage sein muss (erforderliche Messinstrumente, Tauchhülsen, Ausgangssignale etc.).

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass zur Qualitätssicherung von Haustechnikanlagen die Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle institutionalisiert und in der Praxis eingeführt werden sollte, und zwar für alle Haustechnikanlagen.

Zur Einführung der Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle in der Praxis werden folgende Massnahmen empfohlen:

- Praxiserprobung der Betriebsoptimierung: Die in diesem Bericht vorgeschlagenen Massnahmen sind an weiteren Praxisbeispielen (insbesondere an Neuanlagen) zu erproben. Um Daten für die Honorierung der zusätzlichen Leistungen zu erhalten, sind dabei die Zusatzaufwendungen im Planungs- und Ausführungsprozess separat zu erfassen.
- Erarbeiten von Grenz- und Zielwerten für die energetische Beurteilung von Haustechnikanlagen. Die Grenzwerte werden im Ingenieurvertrag als Garantiewerte festgehalten. Die Erfolgskontrolle stellt dann fest, ob die vom Planer garantierten Werte erreicht wurden. Für Wärmepumpenanlagen sind Zielwerte vorhanden, aus denen Grenzwerte abgeleitet werden können. Für WKK-Anlagen müsste für die wichtigsten Standardfälle eine «Garantie-Energiebilanz» erstellt werden. Die Grenzwerte von Heizungsanlagen müssten aber auch für Öl- und Gasheizungen, Holzheizungen und Sonnenenergieanlagen erarbeitet werden.
- Anpassung der SIA-Honorarordnung und des SIA-Vertrages: Die für die Betriebsoptimierung erforderlichen Zusatzleistungen sind zu definieren und in der Honorierung zu berücksichtigen. Im Ingenieurvertrag ist die Garantieverpflichtung des Planers bezüglich Erreichen von energetischen Grenzwerten aufzunehmen.

1. Ausgangslage

Wärme­kraft­kopplungs- und Wärmepumpen-Anlagen sind im Vergleich zu konventionellen Anlagen komplexer. Untersuchungen und Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass herkömmliche Methoden der Inbetriebsetzung und Abnahme nicht nur für solche Anlagen, sondern auch für konventionelle Öl- oder Gasheizungen völlig unzureichend sind. Viele Anlagen arbeiten überhaupt nicht so, wie sich das der Planer eigentlich vorgestellt hatte.

Damit erreicht wird, dass die von den Planern entworfenen Konzepte nach Inbetriebsetzung der Anlage überprüft und ein optimaler Betrieb der Anlage erreicht wird, müssen neue Wege zur Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle gefunden werden, insbesondere zur besseren Nutzung der Zeit zwischen Inbetriebsetzung mit erster Abnahme und Garantieabnahme. Damit dies gemacht werden kann, müssen schon in der Planungs- und Projektierungsphase die notwendigen Vorkehrungen getroffen werden.

2. Ziele des Projektes

Ausgehend von einer Analyse der bestehenden Situation und mit Hilfe von Fallbeispielen soll das vorliegende Projekt aufzeigen,

- wie durch eine Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle die an vielen Anlagen festgestellten Mängel vermieden oder behoben werden können,
- was die Voraussetzungen sind, damit eine effiziente Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle möglich ist:
 - Welche Messtellen und Messgeräte müssen bei der Planung im Minimum vorgesehen werden?
 - In welchen Fällen genügt eine einfache manuelle Aufzeichnung, und wann ist eine automatische Aufzeichnung erforderlich?
- wie die Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle durchgeführt werden kann,
- wie diese in der Honorarordnung nur ansatzweise vorgesehene Leistung entschädigt werden kann.

3. Situationsanalyse

3.1 Anforderungen an eine optimierte Haustechnikanlage

Eine optimierte Haustechnikanlage muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Sie muss die geforderten Leistungen bei allen in der Praxis auftretenden Bedingungen erbringen. Bei einer Heizungsanlage ist dies die von den jeweiligen Betriebsparametern (z.B. der Aussen-temperatur) abhängige Heizleistung. Diese Leistung ist erforderlich, um die Komfortansprüche der Benutzer eines Gebäudes zu erfüllen. Bei Heizungen ist dies die Raumtemperatur.
- Sie darf Mensch und Umwelt nicht gefährden. Entsprechende Sicherheits- und Emissionsvorschriften müssen eingehalten werden.
- Sie muss die geforderten Leistungen mit minimalen Investitions- und Betriebskosten erbringen. Minimale Betriebskosten bei Wärmeerzeugung heisst unter anderem, dass der Energieverbrauch so tief als möglich gehalten (guter Nutzungsgrad) und bei einer WKK-Anlage zusätzlich die Stromproduktion optimiert werden muss.

3.2 Voraussetzungen für einen optimalen Betrieb

Damit eine Haustechnikanlage ihre Aufgabe auf optimale Weise erfüllen kann, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das technische Konzept muss so sein, dass die Anforderungen (Leistungen, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit) mit der bestmöglichen Lösung erfüllt werden.
- Mit dem Projekt wird das Konzept anlagentechnisch umgesetzt. Die Komponenten müssen entsprechend dimensioniert, ausgewählt und zusammengefügt werden.
- Bei der Ausführung müssen die vom Projekt vorgegebenen Komponenten nach den Projektplänen und den Regeln der Technik zusammengebaut werden.
- Bei der Inbetriebsetzung müssen die für einen ordnungsgemässen Betrieb erforderlichen hydraulischen und regeltechnischen Parameter eingestellt werden (hydraulischer Abgleich, Einstellung der Regler oder SPS-Programme in Betrieb nehmen und austesten).
- In der Phase der Betriebsoptimierung müssen die Betriebsparameter (z.B. Sollwerte, Regelfunktionen etc.) so angepasst werden, dass die geforderten Leistungen störungsfrei und mit minimalem Aufwand (hauptsächlich mit minimalem Energieaufwand, aber auch mit minimaler Abnutzung der Komponenten) erbracht werden.
- Nach Abschluss der Betriebsoptimierung muss mit einer Erfolgskontrolle festgestellt werden können, ob der bei der Planung anvisierte optimale Betrieb erreicht worden ist. Dazu müssen aus den Betriebsdaten einer Messperiode (z.B. einer Heizperiode) die relevanten Kenngrössen ermittelt und mit vorher vereinbarten Garantiewerten verglichen werden.

3.3 Schwachstellen

Die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Anforderungen werden in der Praxis dort am ehesten erfüllt, wo die Nichterfüllung für den Planer bzw. den Unternehmer finanzielle und evtl. strafrechtliche Folgen haben kann. Diese Voraussetzung ist gegeben bei

- **Erbringen der vorgegebenen Leistung**
Die zu erbringenden Leistungen wie Heizleistung, Raumtemperaturen etc. sind in der Regel in den Unternehmer- und Lieferantenverträgen festgehalten. Werden die von der Anlage zu erbringenden Leistungen (d.h. das Erfüllen der Komfortansprüche, bei Heizungsanlagen die erforderlichen Raumtemperaturen) nicht erreicht, so wird dies in der Regel vor Ablauf der Garantiezeit vom

Bauherrn bemerkt. Zuverlässige Planer und Unternehmer geben sich Mühe, dass solche Mängel vermieden werden. Es besteht allerdings die Gefahr, dass die Sicherheit der Leistungserfüllung auf Kosten der Wirtschaftlichkeit erreicht wird, z.B. durch Überdimensionierung (solange «es warm wird», wird kaum reklamiert!).

– **Einhalten der Sicherheits- und Umweltaforderungen**

In den Unternehmer- und Lieferantenverträgen ist heute in der Regel auch festgehalten, welche Umweltaforderungen erfüllt werden müssen, z.B. die Einhaltung der LRV-Grenzwerte. Bezüglich Sicherheit sind in der Regel Planer, Unternehmer und Lieferanten darauf bedacht, die Vorschriften einzuhalten und das Risiko von kostspieligen und Image gefährdenden Schadenfällen zu vermeiden. In den Verträgen zwischen Bauherr einerseits und Planern, Unternehmern und Lieferanten andererseits ist die Verantwortlichkeit bezüglich Verletzung der Sorgfaltspflicht und Nichtbeachtung der anerkannten Regeln des Fachgebietes klar geregelt.

Die Forderung nach Wirtschaftlichkeit und nach einem energieeffizienten Betrieb ist in der Regel weder im Vertrag für Ingenieurleistungen, noch in den Unternehmer- und Lieferantenverträgen enthalten. In erster Linie ist es der Planer, der die Garantie übernehmen sollte, dass das von ihm gewählte Anlagenkonzept und das darauf basierende Projekt auch bezüglich Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz optimal ist. Eine solche Garantie ist aber nur möglich, wenn bezüglich Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz im Vertrag mit dem Ingenieur allgemein anerkannte Zielvorgaben aufgenommen werden können, die in der Praxis auch nachgeprüft werden können.

Wenn in den Verträgen nicht festgehalten ist, dass eine gute Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz erreicht werden muss und wie diese überprüft wird, so kann vom Planer nicht erwartet werden, dass er für die energetische Optimierung viel Zeit aufwendet. Die SIA Honorarordnung für die Planer (SIA 108) ist abgestimmt auf den SIA-Vertrag Nr. 1008 «Vertrag für Ingenieurleistungen»: Sie enthält keine Ingenieurleistungen, die für die Überprüfung der optimalen Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz erforderlich wären. Solche Leistungen müssten zusätzlich vereinbart und zusätzlich honoriert werden. Angaben dazu sind in der Honorarordnung nicht enthalten.

3.4 Forderungen für einen optimierten Energieverbrauch

Im Planungs- und Projektierungsablauf von Haustechnikanlagen ist die Forderung nach Wirtschaftlichkeit und nach energieeffizientem Betrieb viel zu wenig berücksichtigt. Das führt dazu, dass viele Anlagen in der Praxis nicht im wirtschaftlich optimalen Betriebszustand arbeiten und nicht den tiefen Energieverbrauch erreichen, der möglich wäre.

Sollen Haustechnikanlagen möglichst energieeffizient betrieben werden, müssen folgende Forderungen erfüllt werden:

1. Für die verschiedenen Kategorien von Haustechnikanlagen müssen allgemein anerkannte Kennzahlen erarbeitet werden, welche die Beurteilung ermöglichen, ob eine Anlage energieeffizient arbeitet oder nicht. Für Wärmepumpen ist dies z.B. die Jahresarbeitszahl. Zielwerte für die Kennzahlen von Elektromotor-Wärmepumpen sind im Anhang 1 angegeben. Daraus können entsprechende Grenzwerte abgeleitet werden, welche in den Vertrag aufzunehmen sind. Bei WKK-Anlagen sollte z.B. die erwartete Energiebilanz als Beurteilungsgrösse beigezogen werden.
2. In den Verträgen zwischen Bauherr und Planer (Vertrag für Ingenieurleistungen, z.B. SIA Nr. 1008) ist das Erreichen dieser Grenzwerte als Ingenieurleistung zu garantieren.
3. Die Forderung nach einem optimierten Anlagenkonzept ist dann leicht zu erfüllen, wenn eine den Anforderungen und gewählten Lösungen entsprechende, in der Praxis bewährte Standardschaltung eingesetzt wird. Durch Standardschaltungen ist das hydraulische und das regeltechnische Konzept vorgegeben. Die Aufgabe des Planers beschränkt sich darauf, die den spezifischen Anforderungen entsprechenden Dimensionierungen vorzunehmen und die der Standardvorgabe entsprechenden Komponenten auszuwählen. Anhang 2 zeigt Beispiele der im Rahmen von RAVEL erarbeiteten Standardschaltungen für WP- und WKK-Anlagen [1].
4. Bei der Planung müssen die erforderlichen Massnahmen getroffen werden, dass überprüft werden kann, ob die garantierten Kennzahlen erreicht werden. Es müssen die entsprechenden Instrumentierungen vorgesehen werden.

5. Bei komplexen Anlagen muss schon bei der Planung vorgesehen werden, dass Diagnosemittel (z.B. automatische Datenaufzeichnung) ohne grossen Zusatzaufwand eingesetzt werden können.
6. Bei der Inbetriebsetzung sind die hydraulischen und regeltechnischen Parameter einzustellen. Anlagen mit Wasser als Wärmeträgermedium müssen immer hydraulisch abgeglichen werden. Nach der ersten Abnahme erfolgt die Übergabe an den Bauherrn.
7. Anschliessend an die Inbetriebsetzung und Übergabe an den Bauherrn müssen in der Phase der Betriebsoptimierung die Parameter wie z.B. Sollwert, Reglereinstellungen etc. soweit verändert werden, bis die geforderten Garantiewerte erreicht werden. Wird eine optimierte Standardschaltung eingesetzt, ist die Anlage den spezifischen Bedürfnissen entsprechend dimensioniert und fehlerfrei gebaut, so sollten die Zielwerte durch diese Änderung der Parameter erreicht werden. Ist dies nicht der Fall, so muss mit einer weitergehenden Untersuchung festgestellt werden, wo die Ursachen liegen und wer dafür verantwortlich ist.
8. Abschluss der Betriebsoptimierung ist die Erfolgskontrolle, in welchem dem Bauherrn der Nachweis erbracht wird, dass die garantierten Grenzwerte erreicht wurden. Kann der Bauherr diesen Nachweis nicht selber auf seine Richtigkeit überprüfen (was bei komplexen WP-Anlagen und bei WKK-Anlagen meist der Fall sein wird), so muss er für diese Überprüfung einen vom Planer unabhängigen Spezialisten beziehen. Detaillierte Angaben zur Erfolgskontrolle von Wärmepumpen-Anlagen sind als Beispiel in Anhang 1 wiedergegeben.

4. Fallbeispiele

An drei Fallbeispielen sollen die Betriebsoptimierung an bestehenden Anlagen gezeigt werden. Es handelt sich um zwei Wärmepumpenanlagen und um eine WKK-Anlage. Die Untersuchung soll zeigen,

- wie eine Betriebsoptimierung an bestehenden Anlagen durchgeführt werden kann,
- was für Instrumentierungen dazu erforderlich sind,
- wie die Datenaufzeichnung gemacht werden soll und
- was mit der Betriebsoptimierung für Verbesserungen erreicht werden können.

4.1 Wärmepumpenanlage RhV-Betriebsgebäude Altstätten

Ausgangslage

Das Betriebsgebäude der Rheintalischen Verkehrsbetriebe (RhV) wurde im Jahr 1985 als Neubau in Betrieb genommen. Die Energiebezugsfläche beträgt 6'700 m². Davon werden ca. 50 % als Einstellhallen und Lager benutzt und sind nur temperiert. Die restlichen 50% teilen sich auf Büro, Wohnung und Werkstatt auf.

Erst in der Ausführungsphase wurde der Entschluss gefasst, zusätzlich zum Ölkessel noch eine bivalent-alternative Luft-Wasser-Wärmepumpe einzubauen. Aus Platzgründen wurden Wärmepumpe und Speicher nicht in der Heizzentrale aufgestellt, sondern ca. 40 m davon entfernt in einem separaten Raum untergebracht. Als Betriebsart wurde folgender Alternativbetrieb gewählt:

- bis 3...5 °C Aussentemperatur mit Wärmepumpe,
- unter 3...5 °C mit Heizkessel.

Bild 1 zeigt das Prinzipschema der Wärmeerzeugung mit Heizungsverteiler.

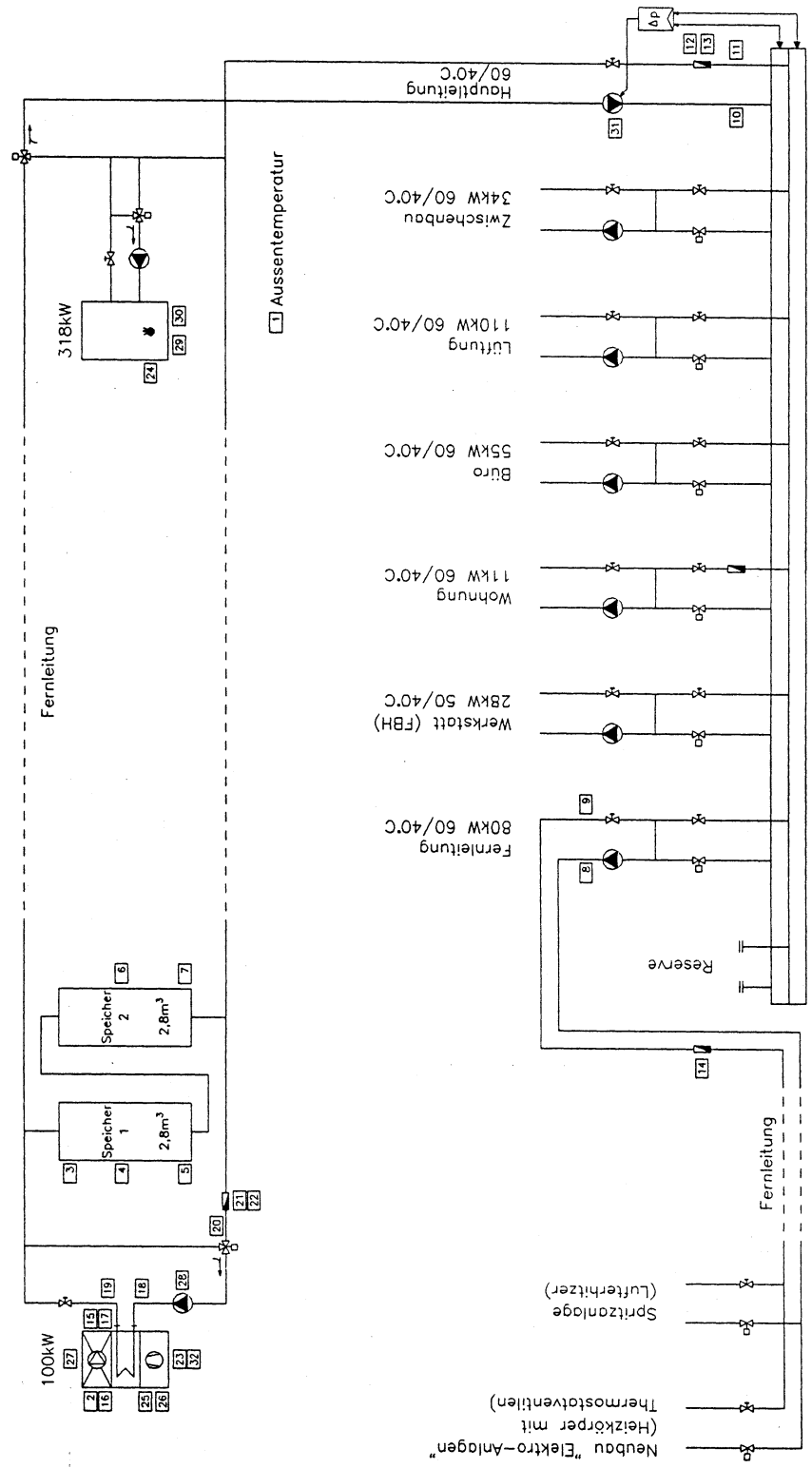


Bild 1: Prinzipschema der Wärmepumpen-Anlage RhV-Betriebsgebäude

Aufgabenstellung für das Messprojekt

Im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons St. Gallen wurde ein Messprojekt für energetische Messungen an der Luft-Wasser-Wärmepumpe durchgeführt. Ziele dieses Projektes sowie die detaillierten Ergebnisse sind im Bericht «Energetische Messungen an der Wärmepumpenanlage im RhV-Betriebsgebäude in Altstätten» beschrieben [2]. Im vorliegenden Bericht beschränken wir uns auf die Aspekte der Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle. Für diese Betrachtung wesentliche Einzelziele waren:

- Messtechnische Bestimmung typischer Kennwerte: Leistungszahl, Jahresarbeitszahl usw.
- Erfahrungen und Empfehlungen zur Planung, Ausführung, Inbetriebsetzung und Abnahme sowie Betrieb und Unterhalt.

Im Vordergrund des Messprojektes stand die Erfolgskontrolle. Eine Betriebsoptimierung fand nur gezwungenermassen am Rande statt.

Messkonzept

Es wurde eine manuelle Datenerfassung (Ablesungen) über die ganze Heizperiode durch Mitarbeiter der RhV durchgeführt. Damit konnten schon vor Beginn der automatisierten Intensivmessung die gravierendsten Mängel erkannt werden. Im weiteren dienten diese Ablesungen zur Berechnung der typischen Kennwerte (MALZ, Systemnutzungsgrad) und zum Aufstellen einer Jahres-Energiebilanz.

Die automatische Intensivmessung erfolgte über einen Zeitraum von 3 Monaten vom 27.2.89 bis 23.5.89 mit folgender Zielsetzung:

- Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Anlage
- Systemoptimierung.

Die Messdaten wurden in einem Abstand von etwa zwei Wochen ausgelesen. Zur Auswertung der Daten wurden zuerst Wochen-Ausdrucke aller Messgrössen gemacht und nach interessanten Tagen abgesucht. Anschliessend wurden von den interessierenden Tagen Tages-Ausdrucke erstellt. Anhang 3 zeigt die Messstellenliste der Intensivmessung sowie die in der Langzeitmessung erfolgten Ablesungen.

Ergebnisse

Die Analyse der Langzeit- und der Intensivmessungen führten im Fragenbereich «Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle» zu folgenden Ergebnissen:

- Erste Abklärungen zeigten, dass die Anlage gravierende konzeptionelle Mängel aufwies. Der Verteiler musste auf Einspritzschaltungen mit Durchgangsventilen umgebaut werden. Diese Arbeiten wurden noch vor Beginn der Intensivmessungen – teils mit beträchtlichem Aufwand – durchgeführt.
- Die Auswertung der ersten Tage der Intensivmessung zeigte, dass die Speicherladung völlig unbefriedigend funktionierte: die Wärmepumpe schaltete dauernd ein und aus. Der Speicher wurde nicht richtig durchgeladen und entleert. Ursache war eine falsche Einstellung der Steuerung/Regelung. Nach Korrektur dieser falschen Einstellung schaltet die Wärmepumpe nur noch wenige Male pro Tag ein und aus. Der Speicher wird dabei immer vollständig durchgeladen und entleert.
- Der berechnete Wärmeleistungsbedarf von 315 kW ist viel zu hoch. Eine Extrapolation der während der Intensivmessung ermittelten Werte ergibt bei einer Aussentemperatur von -13 °C einen Wert von 105 kW (Bild 2).
- Der Wärmepumpen-Hersteller gibt eine Leistungszahl von 3.17 bei einer Verdampfer-Eintrittstemperatur von 3 °C und einer Kondensatoraustrittstemperatur von 45 °C an. Aus Bild 3 ist ersichtlich,

dass dieser Wert nicht erreicht wurde: die Leistungsziffer beträgt bei diesen Randbedingungen nur 2.77.

- Eine repräsentative Bestimmung der Kennwerte war erst nach Abschluss der Intensivmessung möglich. Die vor und während der Messkampagne durchgeführten Sanierungen und Betriebsoptimierungen hätten eine Interpretation der Werte verunmöglicht. In der nach der Messung und Optimierung folgenden Heizperiode 89/90 wurde mit Hilfe der vom RhV durchgeführten Ablesungen eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage (inkl. Speicher- und Leitungsverluste der Verbindungsleitungen) von 1.98 ermittelt.

Der Zielwert für bivalent-alternative Luft-Wasser-Wärmepumpen liegt bei 2.5 - 2.9 (siehe Anhang 1). Der nach der hydraulischen Sanierung und nach der Betriebsoptimierung erreichte Wert von 1.98 liegt damit wesentlich unter dem Zielwert.

Eine Betriebsoptimierung war nur am Rande möglich und brachte deshalb nur einen beschränkten Erfolg. Vor der Messung war überhaupt kein ordentlicher und störungsfreier Betrieb möglich. Nach der Messung läuft die Anlage einwandfrei.

Die unbefriedigende Jahresarbeitszahl konnte nicht verbessert werden. Gründe dafür sind:

- Vom Betreiber wurde eine noch höhere Verflüssiger-Austrittstemperatur (Speicherladetemperatur) gefordert als vor der Messung eingestellt war.
- Ein Regress auf den Wärmepumpen-Lieferanten wegen der nicht erreichten Leistungszahl (2.77 statt 3.17) wurde nicht unternommen.

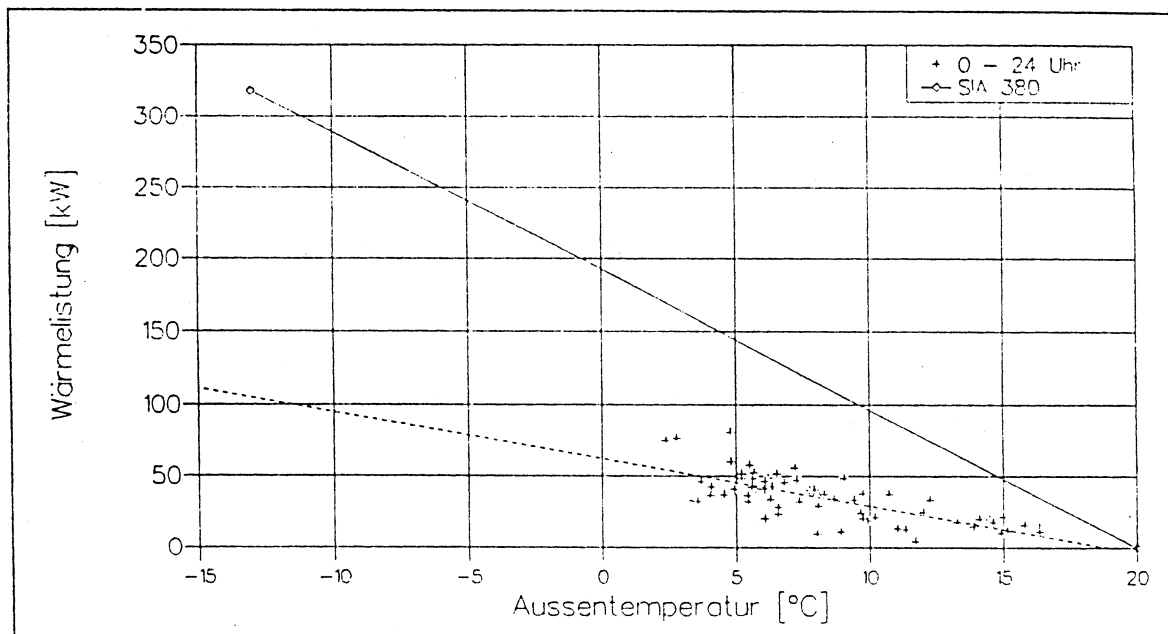


Bild 2: Energiekennlinie des RhV-Betriebsgebäudes

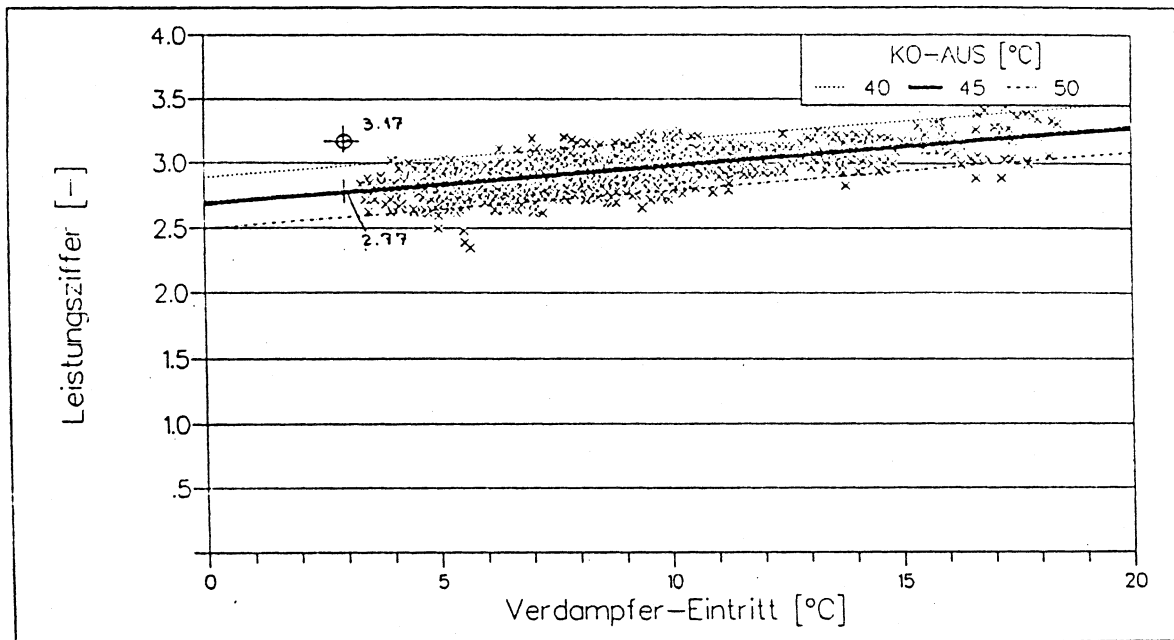


Bild 3: Leistungsziffer in Funktion der Verdampfer-Eintrittstemperatur, Kondensator-Austrittstemperatur als Parameter; der durch den Wärmepumpen-Hersteller angegebene Garantiewert ist eingezeichnet

4.2 Erdsonden-Wärmepumpenanlage Binzmatt, Uitikon

Beschreibung der Anlage

Die Binzmatt ist eine Wohnsiedlung der Gemeinde Uitikon. Sie besteht aus sieben Mehrfamilienhäusern. Die Siedlung wurde in zwei Etappen in den Jahren 1986/87 gebaut. Jedes Wohnhaus verfügt über eine eigene Heizung. Die Wärme wird pro Haus mit elektrisch angetriebener Wärmepumpe erzeugt, welche dem Erdboden mittels Erdsonden Wärme entzieht und damit das Heizungswasser auf 40 - 50 °C aufwärmt (siehe Bild 4). Die Beheizung der Räume erfolgt mit einer Fussbodenheizung. Damit eine individuelle Heizkostenabrechnung gemacht werden kann, wurden Wohnungswärmezähler eingebaut.

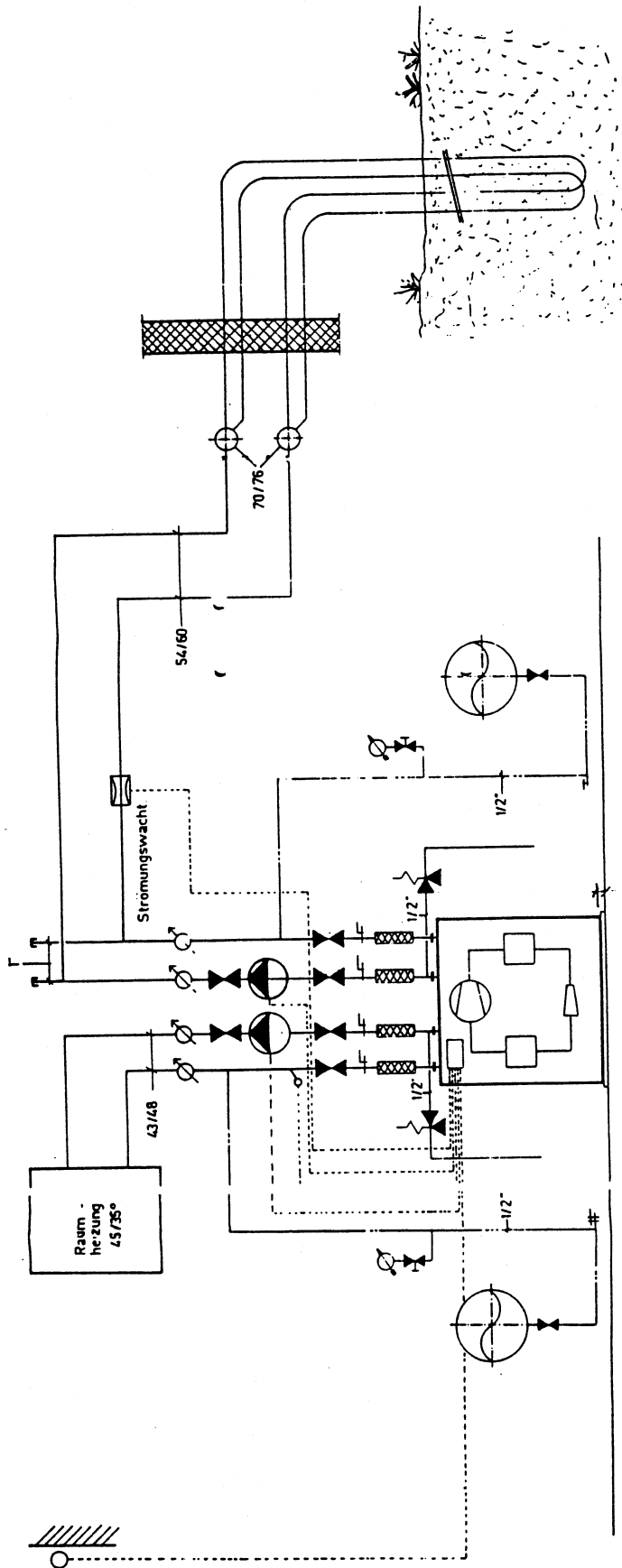


Bild 4: Prinzipschema der Erdsonden-Wärmepumpenanlage Binzmatt

Die Heizung der Wohnüberbauung Binzmatt gab immer wieder Anlass zu Klagen von Seiten der Mieter. Die häufigsten Beanstandungen betrafen zu tiefe Raumtemperaturen und zu hohe Heizkosten. Anfang 1991 erteilte die Gemeinde den Auftrag, die Gründe für die Mängel zu untersuchen und einen Sanierungsvorschlag auszuarbeiten.

Untersuchungen

Die Situationsanalyse ergab folgendes:

1. Die Bauhülle weist vor allem in der ersten Bauetappe bauliche Mängel auf. Da die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe auf ca. 50 °C beschränkt ist, können die dadurch entstehenden Komfortprobleme nicht mit Überheizen kompensiert werden.
2. Die Leistung der Wärmepumpen ist ausreichend. Die Heizungsregler sind aber auf völlig unrealistische Werte eingestellt. So ist z.B. in den Phasen mit reduzierter Heizleistung die Vorlauftemperatur soweit abgesenkt, dass in diesen Phasen die Wärmepumpen kaum eingeschaltet werden.
4. Da für die Bodenheizung keine diffusionsdichten Kunststoffrohre verwendet wurden, führt dies zu Verschlammungsproblemen mit verstopften Heizkreisen.
4. Mieter und Hauswart versuchten vergeblich, durch Veränderung der Voreinstellungen der Heizkreise die baulichen Mängel auszugleichen. Durch diese Eingriffe und durch die immer wieder auftretenden Verschlammungen ergaben sich völlig veränderte Durchflüsse in den Heizkreisen.
5. Die Wärmepumpenanlage hat keinen Speicher. Die Fussbodenheizung wird als Speicher benützt. Dies führt – vor allem durch die Aufhebung des Niedertarifs am Nachmittag – zu einem Zielkonflikt: entweder wird die Niedertarifzeit genutzt und die Fussbodenplatte während der Nacht aufgeladen (ergibt überheizte und trockene Schlafzimmer sowie Energieverschwendung durch geöffnete Fenster), oder die Wärmepumpe wird vor allem tagsüber betrieben, was erhöhte Energiekosten zu Folge hat.
6. Die eingebauten Wärmezähler sind grösstenteils defekt. Auf eine individuelle Heizkostenabrechnung musste verzichtet werden.

Möglichkeiten der Betriebsoptimierung

Die Analyse zeigt, dass mit dem bestehenden Anlagenzustand eine Betriebsoptimierung der Wärmeerzeugung nicht möglich ist. Zuerst müssen die Mängel der Wärmeabgabe behoben werden:

- Lösung des Verschlammungsproblems,
- Einbau von Durchflussmessern in den einzelnen Heizkreisen. Damit kann ein hydraulischer Abgleich vorgenommen und die erforderliche Durchflussmenge eingestellt werden.
- Individuelle Raumtemperaturregelung und neue Wärmezähler. Diese Massnahme bewirkt neben dem Energiesparen der Mieter, dass der Durchfluss von schlecht beheizten Räumen und damit die Raumtemperatur erhöht werden kann.

Der Vorschlag für die anschliessende Betriebsoptimierung umfasste folgende Massnahmen:

- Kontinuierliche Temperaturmessung und -aufzeichnung mit Data-Logger an einem Haus: In zwei Wohnungen werden die Raumtemperaturen von je zwei Räumen gemessen und aufgezeichnet. Zusätzlich wird erfasst: Aussentemperatur, Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur, Ein/Aus der Wärmepumpe.
- Periodische Auswertung der Messungen.
- Punktuelle Einzelmessungen in ausgewählten Wohnungen und Räumen in allen Gebäuden der Binzmatt.

- Neueinstellung von Reglern und Wärmepumpen aufgrund der Auswertungen der automatischen Aufzeichnungen und der punktuellen Einzelmessungen.
- Anpassen der Durchflüsse in den einzelnen Heizkreisen aufgrund der Messauswertungen und der Erfahrungen der Mieter.

Die vorgeschlagene Sanierung der Wärmeabgabe (Voraussetzung für eine Betriebsoptimierung) hätte pro Wohnung Kosten von Fr. 10'000.– und die anschliessende Betriebsoptimierung solche von ca. Fr. 1'000.– pro Wohnung verursacht. Diese Kosten wurden von den Stimmbürgern als zu hoch erachtet und die Sanierung wurde abgelehnt.

Erkenntnisse

Eine Betriebsoptimierung ist nur sinnvoll, wenn das Anlagenkonzept stimmt und die Bauausführung gemäss diesem Anlagenkonzept erfolgt. Ist dies nicht der Fall, so muss vor einer Betriebsoptimierung das Anlagenkonzept korrigiert und die Anlage muss mit z.T. hohen Kosten saniert werden, wie dies bei der Binzmatt der Fall gewesen wäre.

Die Voraussetzungen für eine Betriebsoptimierung sind dann sicher gegeben, wenn eine erprobte Standardschaltung eingesetzt wird.

4.3 Blockheizkraftwerk «Tiefenbrunnen»

Ausgangslage

Auf dem Areal des ehemaligen Tramdepots «Tiefenbrunnen» in Zürich entstand eine Wohnüberbauung mit einem Blockheizkraftwerk (Planung der Wärmeerzeugungsanlage: Dr. Eicher & Pauli AG). Dies war eine gute Gelegenheit, eine Betriebsoptimierung mit automatischer Datenaufzeichnung und anschliessender Erfolgskontrolle «im Massstab 1:1» durchzuführen. Bild 5 zeigt das Prinzipschema der Anlage.

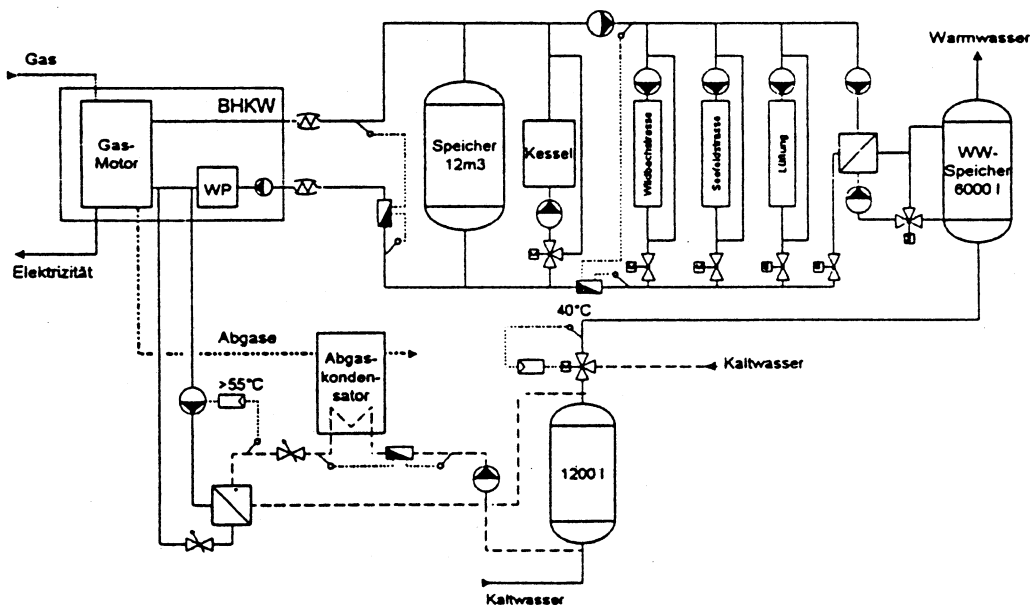


Bild 5: Prinzipschema BHKW Tiefenbrunnen

Messkonzept

Die Phase der Betriebsoptimierung dauerte vom 30.12.91 bis 2.8.92. Die automatische Datenaufzeichnung umfasste insgesamt 16 Temperaturen, 9 Betriebszustände (ein/aus), 8 Zähler sowie ein Solarimeter. Die Messdaten wurden gleichzeitig auch für das BEW-Forschungsprojekt «Dynamische Betriebsweise von WKK-Anlagen» (Projektleitung: Dr. Eicher & Pauli AG) verwendet. Die Messstellenliste ist in Anhang 3 aufgeführt.

Für eine «normale» Betriebsoptimierung hätten selbstverständlich nicht unbedingt alle Messgrößen automatisch aufgezeichnet werden müssen, und die Erfassung der Strahlung wäre nicht notwendig gewesen.

Probleme mit der Durchführung der Betriebsoptimierung

Im Laufe der Betriebsoptimierung zeigten sich einige typische Probleme, die immer wieder im Zusammenhang mit Messungen auftauchen. Diese könnten bei der Planung rechtzeitig erkannt und durch entsprechende Vorgaben gegenüber den Unternehmern und Lieferanten vermieden werden. Hier einige Beispiele:

- Vorbereitete Temperaturmessstellen (Tauchhülsen) waren nur beim Wärmespeicher vorhanden. Die interessierenden Temperaturen mussten deshalb vorwiegend an den Rohroberflächen gemessen werden.
- Die beiden Gaszähler hatten keine Impulsausgänge. Ein Gaszähler wurde deshalb vor Ort durch den Hersteller umgebaut und der andere durch das Gaswerk leihweise nachgerüstet.
- Das Rechenwerk des Abgaswärmehäufiger lieferte gerade 3 Impulse pro Stunde und musste deshalb durch den Hersteller auf 10fache Auflösung des Energiesignals umgebaut werden.
- Am Ölzähler war der nachträgliche Einbau eines Impulsausganges nicht vorgesehen. Dieser musste deshalb gegen ein anderes Modell mit Impulsausgang ausgetauscht werden.
- Von der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) gab es lediglich einen Funktionsbeschreibung des Planers, aber keine Softwaredokumentation über das realisierte Programm. Der BHKW-Lieferant (Dimag AG) weigerte sich unter Berufung auf Urheberrechte auf eine Herausgabe. Dies ist ein absolut unhaltbarer Zustand, insbesondere dann, wenn es sich um Funktionen der Gesamtanlage handelt!

Fehleraufdeckung mit der Betriebsoptimierung

Eine wesentliche Aufgabe der Betriebsoptimierung ist es, allfällige Probleme im dynamischen Verhalten der Anlage aufzudecken. Hier vier typische, dank der Betriebsoptimierung aufgedeckte Mängel:

- Bilder 6 und 7: Am 22.5.92 schaltete das BHKW 4mal ein und der Speicher wurde korrekt durchgeladen. Am 23.5.92 arbeitete die Anlage zu Beginn noch normal, begann dann aber plötzlich zu Takten und der Speicher wurde durch das Hin- und Herschieben komplett durchmischt. Als Ursache wurden falsch eingestellte Ein- und Ausschaltpunkte eruiert.
- Bilder 8 und 9: Während die Freigabe des Spitzenkessels am frühen Morgen akzeptabel ist, sind die restlichen drei Freigaben sicher überflüssig. Diese wurden dadurch verursacht, dass die Verzögerung der Spitzenkesselfreigabe während der Wassererwärmerladung überbrückt wurde. Es zeigte sich jedoch, dass die Freigabeverzögerung nur bei leerem Wassererwärmer überbrückt werden muss. Dadurch ergaben sich keine störenden Einbrüche bei der Warmwasserversorgung.
- Bild 10: Die Pumpe zwischen BHKW und Plattentauscher (UP-2) taktete über längere Zeiten mit mehr als 6 Impulsen pro Minute. Die Ursache war eine ungenügende Hysterese des Reglers.
- Bild 10: Gemäss Planung hätte der Abgaskondensator eine Leistung von 52 kW haben sollen. Die gemessene Leistung betrug jedoch durchschnittlich nur 28 kW. Abklärungen ergaben, dass ein Missverständnis zwischen BHKW-Lieferant und Abgaswärmehäufiger-Lieferant vorlag.

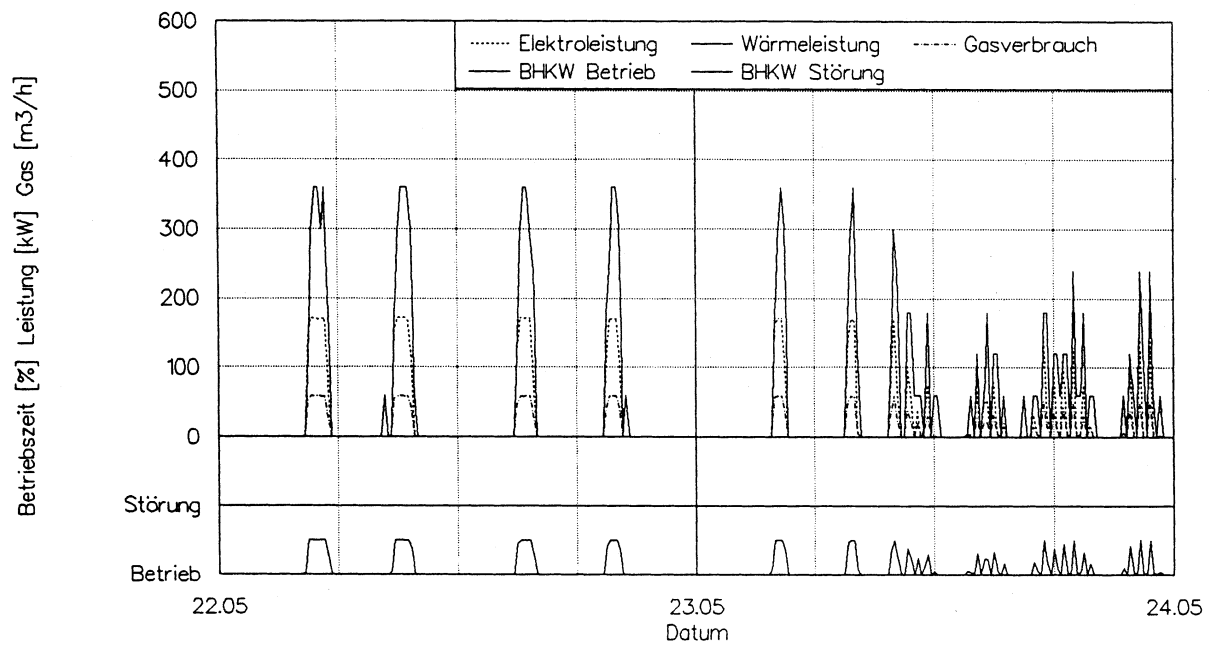


Bild 6: Betriebszeit, Leistung und Gasverbrauch des BHKW's

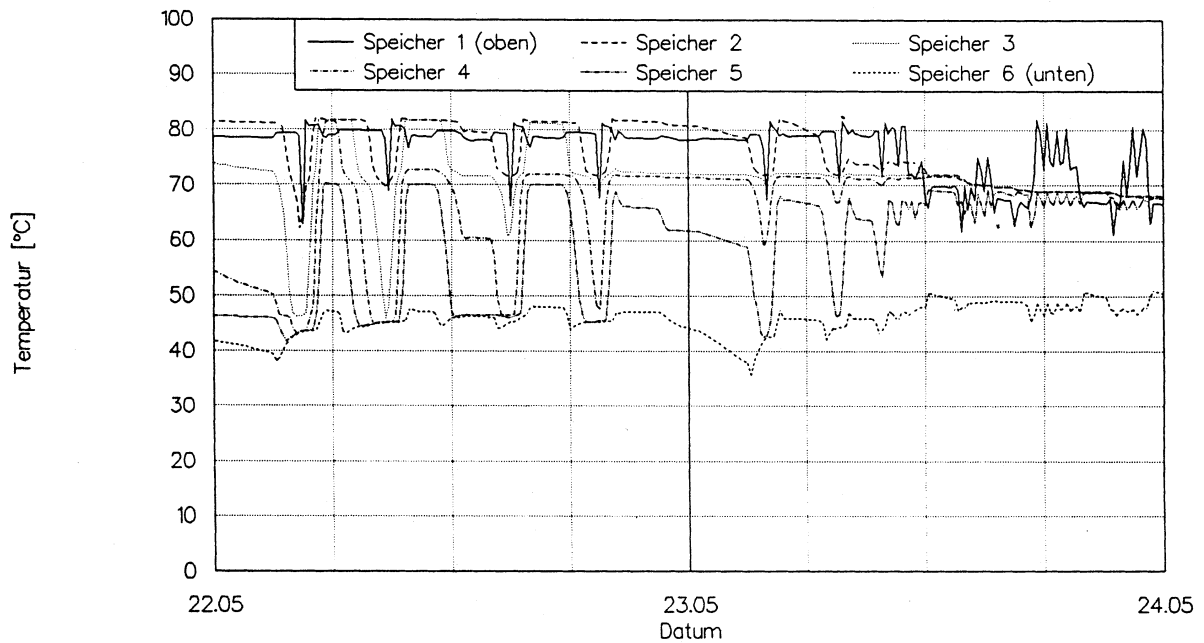


Bild 7: Speichertemperaturen

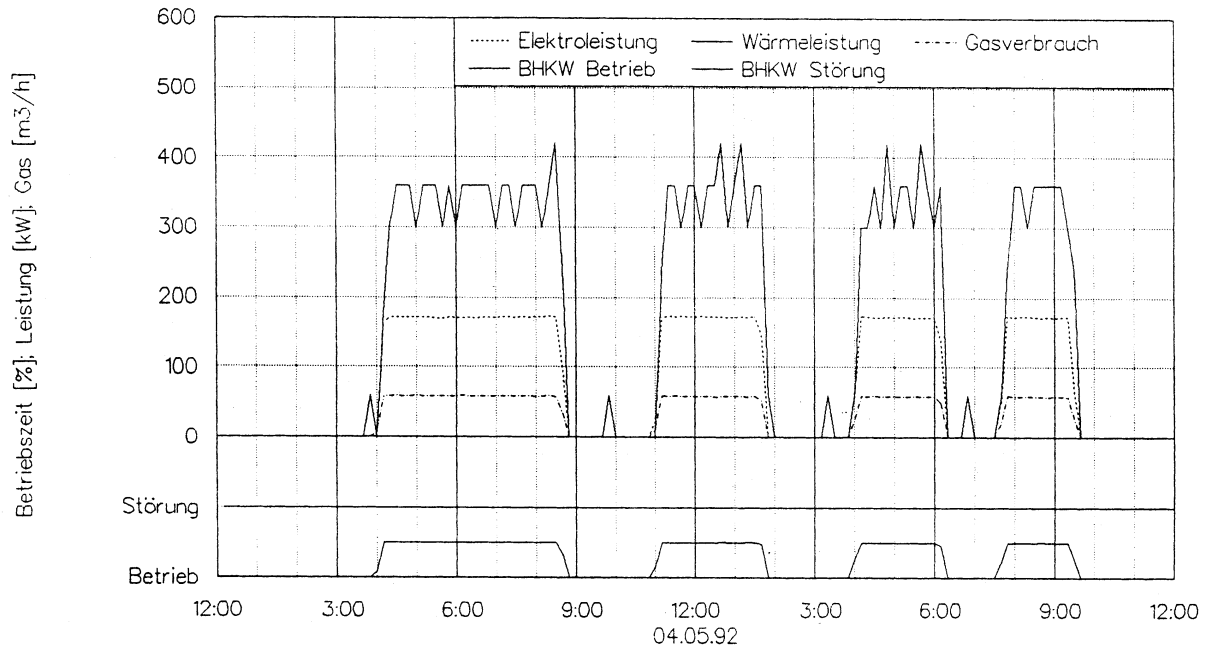


Bild 8: Betriebszeit, Leistung und Gasverbrauch des BHKW's

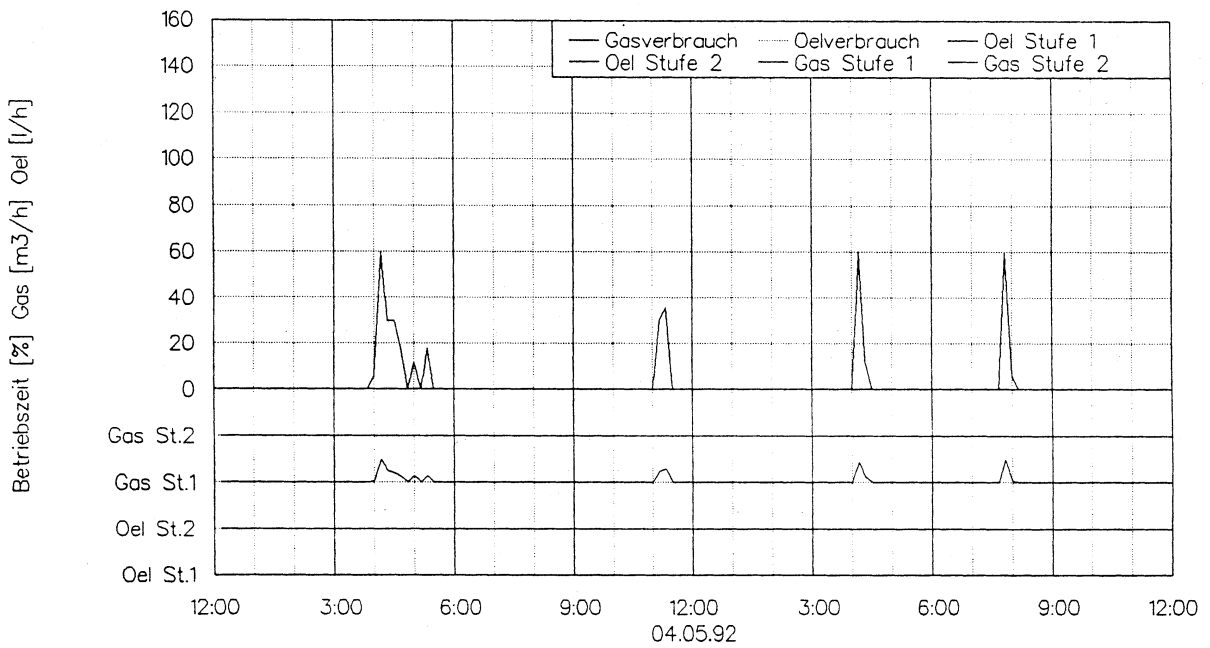


Bild 9: Betriebszeit und Gasverbrauch des Spitzenkessel

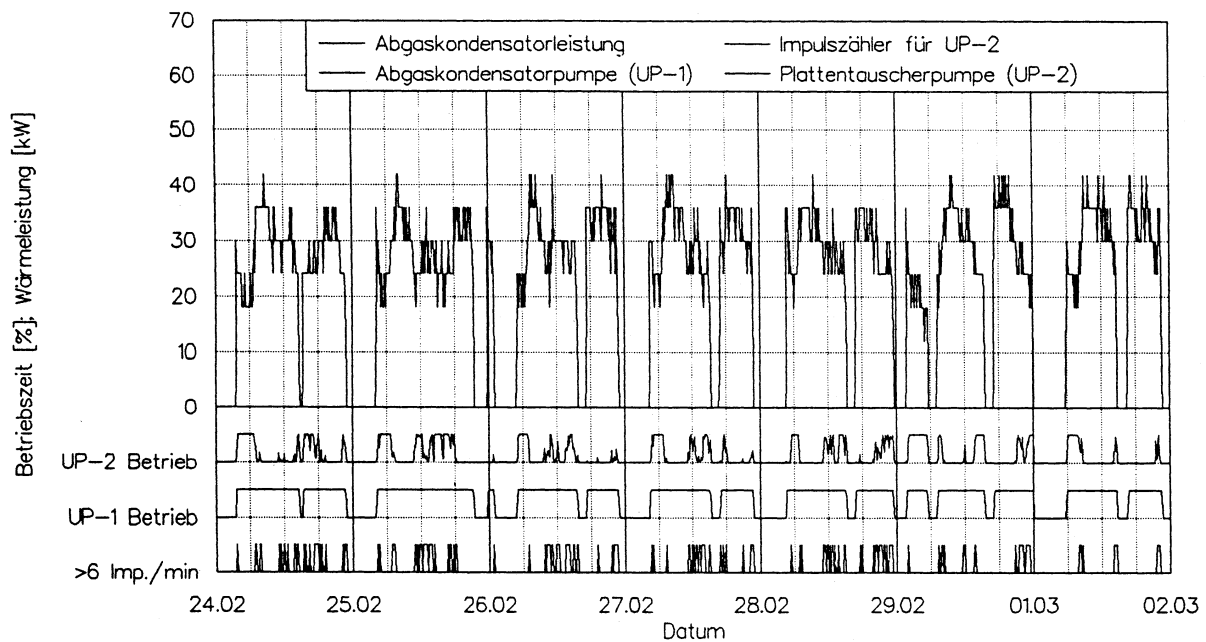


Bild 10: Betriebszeit und Wärmeleistung von Abgaskondensator und Plattentauscher

Vergleich der Messdaten mit den Auslegedaten

Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Aspekt der Betriebsoptimierung ist es, dass dabei handfeste Erfahrungen für den Bau zukünftiger Anlagen gesammelt werden können. Wurden die Anlagenteile zu knapp bemessen, oder wurden unnötige Sicherheitszuschläge gemacht?

- Bild 11: Die Energiekennlinie (Wärmebedarf) setzt sich aus einem witterungsabhängigen und einem konstanten Teil zusammen. Der konstante Teil enthält im Wesentlichen die Wassererwärmung sowie Bereitschafts- und Verteilverluste. An der Heizgrenze entsteht ein Sprung durch den Wegfall der Verteilverluste. Die Heizgrenze kann man sich als Zweipunktregler mit variabler Hysterese vorstellen, deren Mittelpunkt bei 15°C angenommen wurde.
- Bild 12 und 13: Der durch die Energiekennlinie gegebene Wärmebedarf wird einerseits durch das BHKW und andererseits durch den Spitzenkessel gedeckt.
- Bild 14: Die Addition der beiden Kennlinien aus Bild 12 und 13 ergibt die Gesamt-Wärmeerzeugung, die um die Speicherverluste höher liegt als der Wärmebedarf. Das Dreieck des Kessels zwischen 0°C und 15°C wird durch Lastspitzen verursacht. Diese Fläche kann durch eine Optimierung der Spitzenkesselfreigabe noch verkleinert werden.
- Bild 15: Der Wärmeleistungsbedarf von 720 kW gemäss SIA 384/2 berücksichtigt weder die Wassererwärmung noch die Wärmegewinne. Die gemessene Kurve beinhaltet im Gegensatz dazu auch die Wassererwärmung und die Wärmegewinne. Das Bild zeigt deutlich, dass die SIA-Kurve nur zur Auslegung des maximalen Wärmeleistungsbedarfs verwendet werden darf, hingegen nicht zur Berechnung der Laufzeiten. (Die Laufzeit gemäss SIA 384/2 hätte 5990 h/a betragen; gemäss gemessener Kurve beträgt sie hingegen nur 5270 h/a, und die tatsächliche Laufzeit wird noch zusätzlich durch den Spitzenkessel reduziert.) Auf der anderen Seite darf der maximale Wärmeleistungsbedarf bei der gemessenen Kurve nicht bei den -8°C gemäss SIA 384/2 (Massivbau, Zürich) herausgelesen, sondern er muss bei der tatsächlich auftretenden minimalen Aussentemperatur (Tageswert) bestimmt werden: beispielsweise bei einer Aussentemperatur von -13°C beträgt der Wärmeleistungsbedarf 620 kW (gemäss Bild 11).

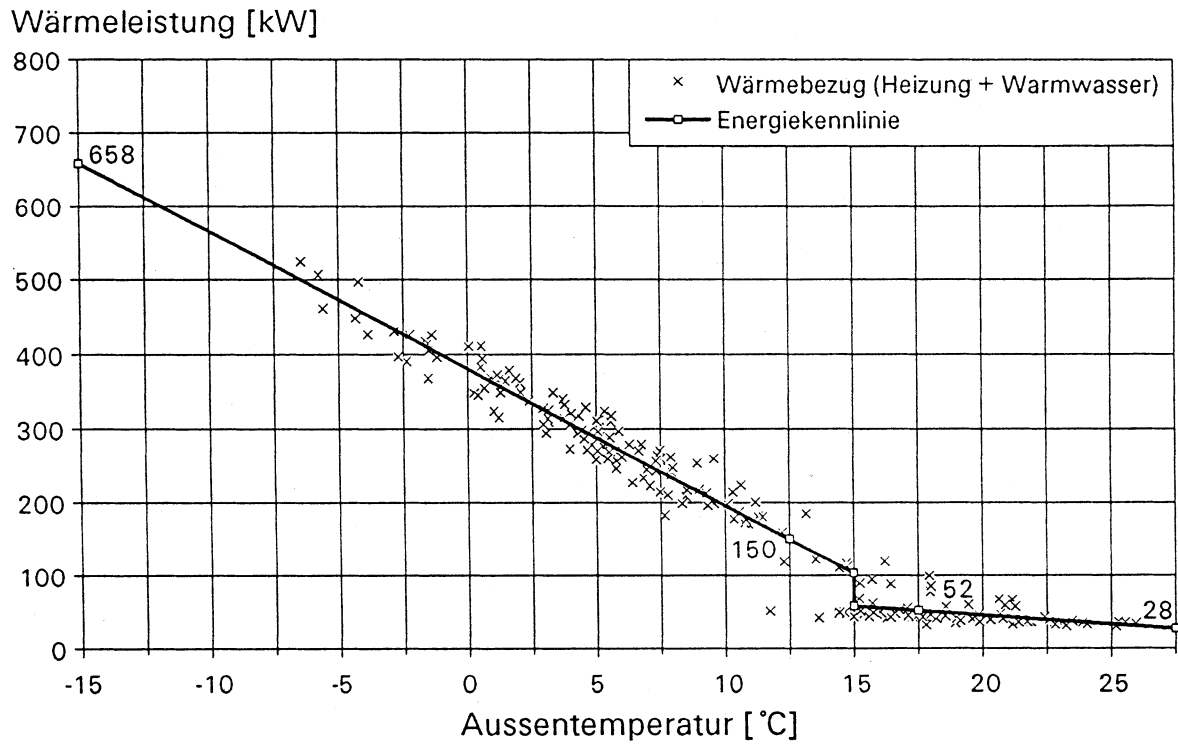


Bild 11: Energiekennlinie

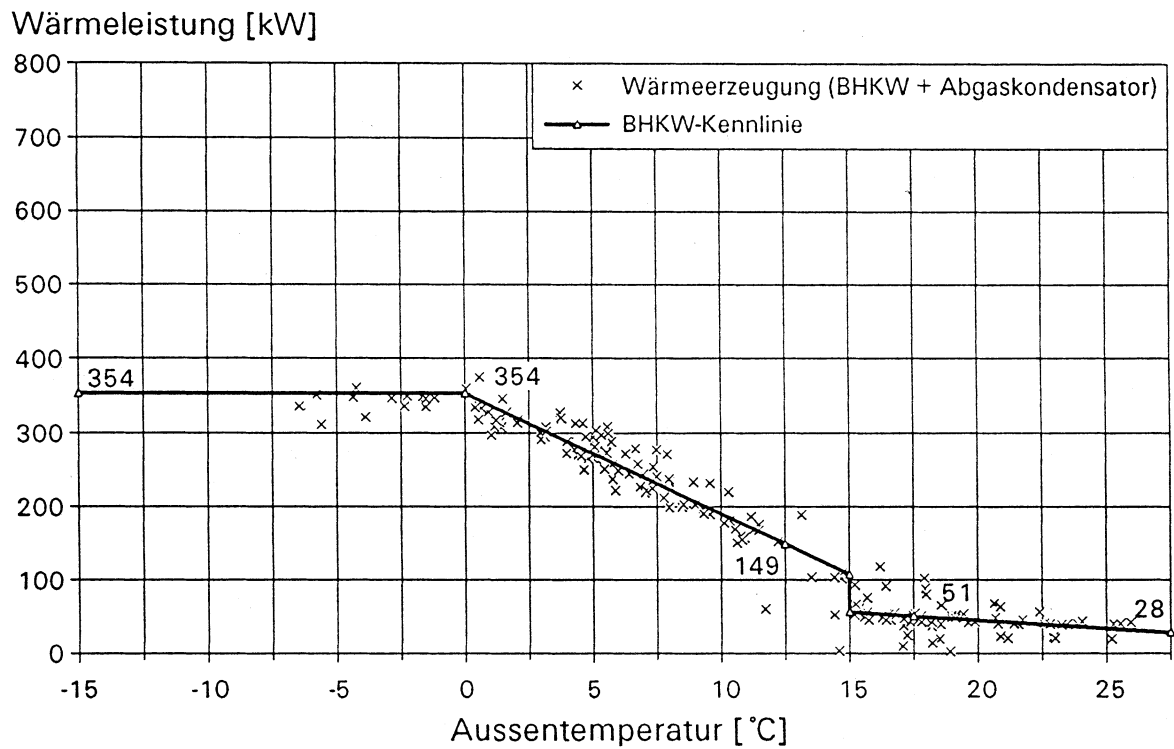


Bild 12: Kennlinie Wärmeerzeugung BHKW

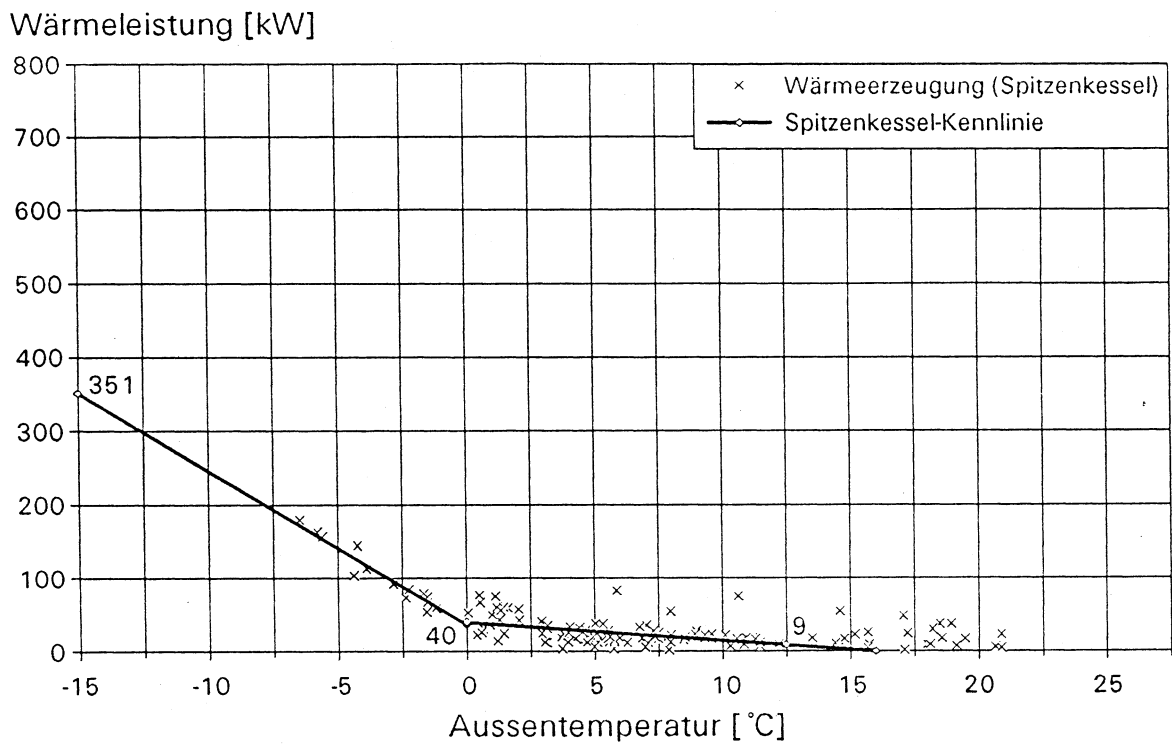


Bild 13: Kennlinie Wärmeerzeugung Spitzenkessel

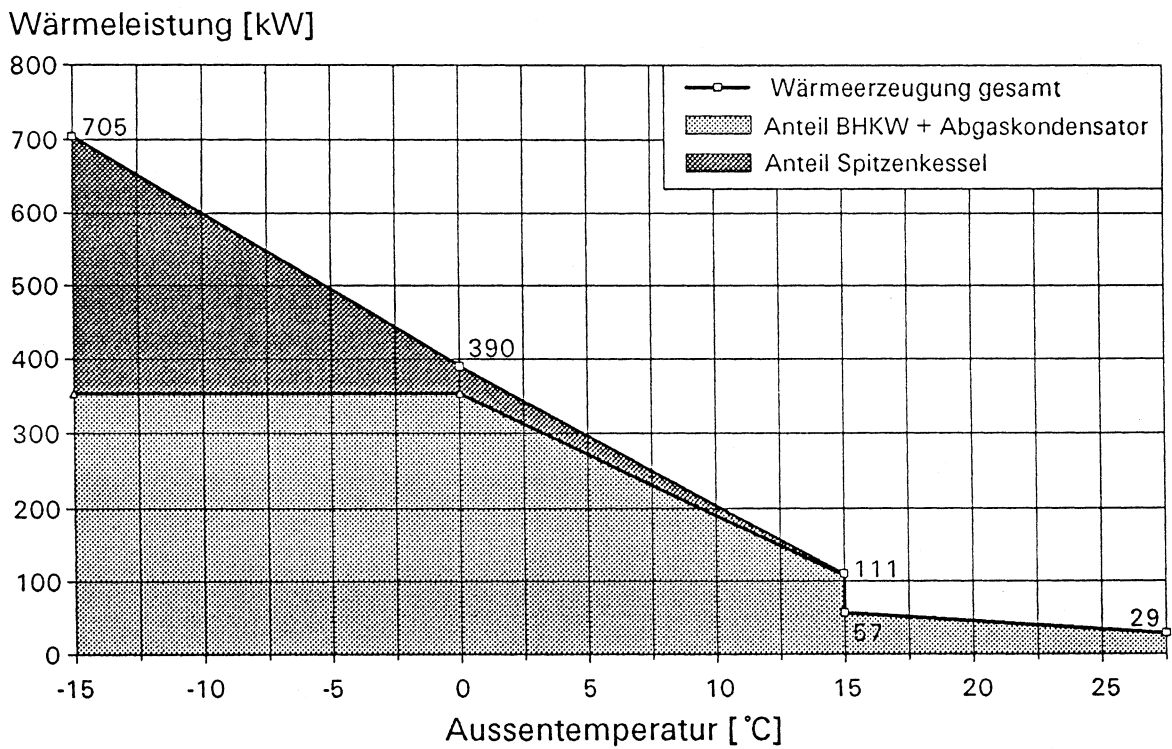


Bild 14: Kennlinie Wärmeerzeugung gesamt

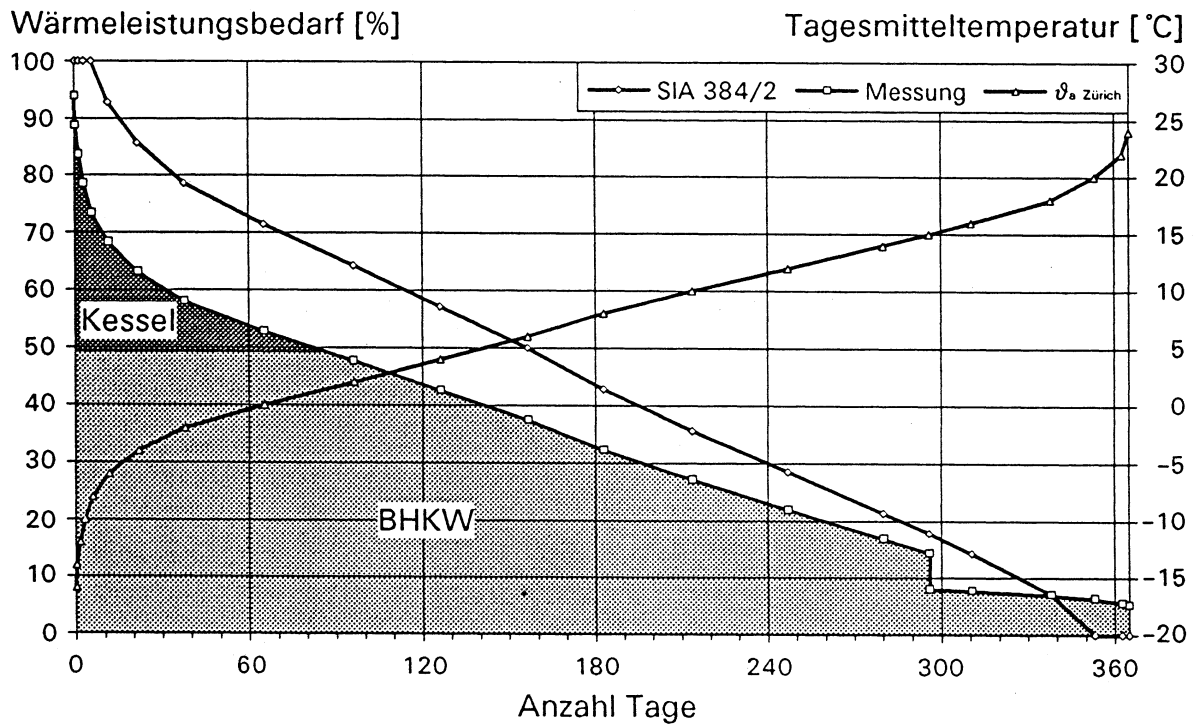


Bild 15: Summenhäufigkeit (Wärmeleistungsbedarf 100% entspricht 720 kW)

Erfolgskontrolle

| | Gas | Elektrizität (Generator- WP) | Wärme (inkl. WP) | Abgas- kondensation | Gesamt |
|--|--------|------------------------------------|---------------------|------------------------|--------|
| Leistung gem. Planung | 543 kW | 162 kW | 350 kW | 52 kW | 546 kW |
| Leistung gemessen | 550 kW | 159 kW | 345 kW | 28 kW | 532 kW |
| Nutzungsgrad | - | 28.9% | 62.7% | 5.1% | 96.7% |
| Leistungsab- weichung (Planung = 100 %) | + 1.3% | -1.9% | -1.4% | -46.2% | -5.7% |

Tabelle 13: Kennzahlen (Beobachtungsperiode: 30.12.91 bis 29.6.92)

Weitere Kennzahlen:

| Beobachtungsperiode | 30.12.91 bis 29.6.92 | 3.1.92 bis 31.12.92 |
|---|---------------------------------|--------------------------|
| - Betriebsstunden BHKW | 2344 h | 4119 h |
| - Betriebsstörungen BHKW | 97 h | |
| - Stromkennzahl (Elektrizität: Generator - WP, Wärme inkl. WP) | 0.46 | 0.44 |
| - Brennstoffverbrauch Kessel | Gas 137'760 kWh Öl 3'030 kWh | 194'769 kWh 3'030 kWh |

4.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Fallbeispielen

Die Analyse der Fallbeispiele und weiterer Untersuchungen (z.B. Werkhof Flooz, Wattwil [3]; Haldenring [4]) zeigen, dass mit der nach SIA 108 und SWKI 88-1 durchgeführten Abnahmen viele Mängel einer Anlage nicht entdeckt werden. Die wichtigsten Gruppen von Mängeln sind:

- Konzeptionelle Mängel
Beispiel: Hydraulische Schaltung berücksichtigt nicht die Anforderungen einer Wärmepumpenanlage nach tiefen Rücklauftemperaturen.
- Mängel in der Ausführung: Das Konzept wurde in der Ausführung verändert oder es wurden Armaturen oder Messinstrumente eingesetzt, welche nicht den Anforderungen entsprechen.
- Mängel in der Einregulierung: Ein gutes Konzept und eine einwandfreie Ausführung kommen nur dann zum Tragen, wenn bei der Inbetriebnahme die Steuer- und Regelparameter richtig eingestellt werden.

Auch mit sorgfältig nach SIA 108 und SWKI 88-1 durchgeführten Abnahmen werden viele Mängel nicht entdeckt. Die Gründe sind:

- Die Verantwortung für die konzeptionellen Mängel liegen beim Planer. Bei der Abnahme wird aber nur die Arbeit des Unternehmers geprüft. Eine Überprüfung des Konzeptes findet nicht statt.
- Bei komplexen Anlagen können mit einer punktuellen Überprüfung bei weitem nicht alle Funktionen überprüft werden. Mit der punktuellen Abnahmekontrolle werden daher vor allem die Komfortbedingungen und die einfachsten Steuerfunktionen erfasst. Die komplizierten Funktionen einer Anlage (z.B. Zusammenspiel der Wärmepumpe mit Heizkessel für optimale Speicherbewirtschaftung) können auch mit einer einfachen manuellen Datenaufschreibung nicht mit Sicherheit erkannt werden. Dazu sind automatisierte Intensivmessungen nötig.

Eine automatisierte Intensivmessung ist aufwendig und teuer. Die Kosten für die Datenerfassung und -auswertung liegen heute für WKK-Anlagen bei ca. Fr. 30'000.–. Wenn in der Planung und Ausführung die notwendigen Vorkehrungen für eine spätere Intensivmessung getroffen würden (siehe Kap. 6), so könnten diese Kosten stark reduziert werden.

Bei einfacheren Wärmepumpenanlagen sollte die Betriebsoptimierung im Normalfall ohne automatisierte Intensivmessung durchgeführt werden können. Hier genügt es, wenn über eine längere Betriebsperiode (normalerweise die Heizperiode) die wichtigsten Kennwerte durch den Betreiber aufgeschrieben und dann periodisch durch den Planer ausgewertet werden. Erst wenn sich hier Mängel zeigen, deren Gründe mit der manuellen Datenerfassung nicht eruiert werden können, ist eine automatisierte Intensivmessung vorzusehen.

Eine Betriebsoptimierung sollte auch nach einer längeren Betriebszeit wiederholt werden können. Dies erfordert aber, dass in der Dokumentation folgende Unterlagen vorhanden sind:

- Anlagenkonzept mit Beschreibung der Anlagenfunktionen und der zu erreichenden Ziel- und Grenzwerte.
- Dokumentation der Einstellwerte für Sollwerte und Regelparameter.

Moderne Anlagen mit SPS weisen bezüglich Dokumentation gravierende Mängel auf. Aufgrund der Funktionsbeschreibung des Planers erstellt der SPS-Programmierer der Regelfirma das Regelprogramm. Die Programmierung erfolgt in einer Sprache, welche nur von der Regelfirma beherrscht wird. Eine Dokumentation über die vorhandene Programmierung wird in der Regel nicht an den Bauherrn abgegeben. In der bestehenden Form würde sie ihm auch nichts nützen.

Negative Folgen bei Anlagen mit SPS:

1. Nur die Regelfirma selber, bzw. der Programmierer selber kann überprüfen, ob die Vorgaben auch richtig umgesetzt werden. Eine unabhängige Kontrolle ist nicht möglich.

2. Spätere Anpassungen der SPS an neue Bedürfnisse können im besten Fall nur von der verantwortlichen Regelfirma gemacht werden, auch hier wieder ohne unabhängige Kontrollinstanz. Hat der Mitarbeiter, welcher die SPS-Programmierung gemacht hat, die Firma in der Zwischenzeit verlassen, so wird auch die Firma in den meisten Fällen Mühe haben, die SPS anzupassen.

5. Massnahmen zur Optimierung des Energieverbrauchs

Die Optimierung einer Haustechnikanlage kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen: Investitionskosten, Wartungsaufwand, Energieverbrauch etc. Im nachfolgenden konzentrieren wir uns auf die Massnahmen die notwendig sind, um die Energieeffizienz von Haustechnikanlagen zu verbessern. Der Schwerpunkt liegt dabei bei den WP- und WKK-Anlagen.

5.1 Standardschaltungen

Die Optimierung und damit auch die Optimierung bezüglich Energieverbrauch beginnt am anfang der Planungsphase, beim Erstellen des Anlagenkonzeptes. Eine gute Optimierung eines Anlagenkonzeptes erfordert viel Gedankenarbeit und damit viel Arbeitsaufwand und einen längeren Reifeprozess. Ein solcher Aufwand kann und soll nicht bei jeder Haustechnikanlage von Neuem erbracht werden. Die Aufgabenstellung für Haustechnikanlagen und die dafür sinnvollen Lösungen wiederholen sich vor allem im Heizungsbereich immer wieder. Es ist daher sinnvoll, für die verschiedenen Aufgabenstellungen Standardlösungen zu entwickeln. Die Aufgabe des Planers besteht dann darin, die Standardlösung optimal an die spezifischen Verhältnisse anzupassen.

Für Wärmepumpenanlagen werden im Rahmen von RAVEL und des Förderprogramms Wärmepumpen solche Standardschaltungen entwickelt [1]. Beispiele sind in Anhang 2 gezeigt.

5.2 Anlagenkennzahlen bei optimiertem Energieverbrauch

Mit energiebezogenen Kennzahlen kann beurteilt werden, ob eine Haustechnikanlage bezüglich Energieverbrauch die vorgegebenen Zielwerte erreicht. Bei Wärmepumpenanlagen ist dies zum Beispiel die Jahresarbeitszahl. Für die standardisierten Anwendungsfälle können solche Kennzahlen losgelöst vom Einzelfall erarbeitet werden (siehe Anhang 1 für Elektrowärmepumpen-Anlagen). Bei komplexeren Anlagen müssen diese Kennwerte anlagenspezifisch erarbeitet werden (z.B. die erwartete Jahresenergiebilanz).

5.3 Betriebsoptimierung nach Inbetriebsetzung und erster Abnahme

Nach der ersten Abnahme mit Übergabe an den Bauherrn sollte während einer vorgegebenen Zeitspanne (normalerweise eine Heizperiode) die Betriebsoptimierung vorgenommen werden. Verantwortlich dafür ist der Planer. Bei einfachen Anlagen genügt es, wenn die wichtigsten Messgrössen periodisch manuell erfasst und zu Kennwerten aufgearbeitet werden. Bei komplexeren Anlagen ist eine automatische Intensivmessung erforderlich.

Da im Verlauf der Optimierungsphase meistens verschiedene Betriebs- und Regelparameter verändert werden, sind die bei der Betriebsoptimierung ermittelten Kennwerte für eine Erfolgskontrolle noch nicht verwendbar. Die Erfolgskontrolle muss daher nach Abschluss der Betriebsoptimierung durchgeführt werden. In einer vorgegebene Zeitspanne (normalerweise die Heizperiode) werden nochmals die wichtigsten Daten der Anlage erfasst und zu Kennwerten aufgearbeitet. Wesentliche Eingriffe zur Optimierung sollten in dieser Phase nicht mehr nötig sein. Bei einfachen Anlagen ist auch hier wieder eine manuelle Datenerfassung möglich. Erst, wenn die Erfolgskontrolle Mängel aufzeigt, kann es sinnvoll sein, zur Diagnose der Ursachen eine automatische Intensivmessung vorzunehmen.

5.4 Anpassung des SIA-Vertrages für Ingenieurleistungen und der SIA-Honorarordnung 108

Der SIA-Vertrag Nr. 1008 für Ingenieurleistungen und die Honorarordnung 108 sollten in dem Sinne ergänzt werden, dass in den allgemeinen Grundlagen (Art. 1) festgehalten wird, dass der Ingenieur auch für die Wirtschaftlichkeit, den Energieverbrauch und den Nutzungsgrad der von ihm geplanten Anlage verantwortlich ist.

Im SIA-Vertrag Nr 1008 ist ein zusätzlicher Artikel aufzunehmen, in welchem die vom Planer zu garantierenden energierelevanten Kennwerte aufgeführt sind. Vorschlag:

Ziff. x *Garantien* *Der Planer ist dafür verantwortlich, dass die von ihm geplante Installation energetisch optimal betrieben werden kann. Er garantiert folgende Kennwerte, welche vor der Garantieabnahme mit einer Erfolgskontrolle nachgewiesen werden müssen:*

(Hier werden die Kennwerte mit Ziel- und Grenzwerten aufgeführt)

Die Planung erfolgt aufgrund der Zielwerte, deren Nichteinhaltung zwar etwas über die Qualität der Planung aussagt, aber keine garantierechtlichen Folgen hat. Einzig die Nichteinhaltung der Grenzwerte hat garantierechtliche Folgen.

Der Leistungsbeschreibung (Art. 4) der Honorarordnung 108 ist zu ergänzen. Die nachfolgende Beschreibung zeigt, in welche Phasen und Teilleistungen von der neu einzuführenden Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle tangiert werden und wie weit Ergänzungen erforderlich sind. Im weiteren ist aufgeführt, wie sich diese Ergänzungen auf die Honorierung auswirken.

Vorstudienphase

In der Vorstudienphase geht es darum, dass ein fähiger Ingenieur ein Gesamtkonzept erstellt und die für eine Beurteilung (und in der späteren Erfolgskontrolle nachzuprüfenden) notwendigen Kennwerte und Energiebilanzen in einem Pflichtenheft festlegt. Bei einfachen Anlagen kann diese Aufgabe vom hauptverantwortlichen Planer gelöst werden (Minimalvariante). Bei komplexen Anlagen kann eine weitergehende Begleitung (durch einen vom Planer unabhängigen Ingenieur) vom Pflichtenheft bis zur Erfolgskontrolle sinnvoll sein.

Honorierung

Für die Vorstudienphase sind in der SIA Honorarordnung keine Teilleistungen definiert. Die Honorierung muss daher im Zeittarif oder mit einer Pauschale erfolgen. Der Leistungsbeschreibung der Vorstudienphase sollte wie folgt ergänzt werden:

- *Erarbeiten eines Pflichtenheftes, in welchem die dem Konzept zugrunde liegenden energetischen Kennwerte und Energiebilanzen mit Ziel- und Grenzwerten aufgeführt sind, welche später bei der Erfolgskontrolle zur Beurteilung des Bauwerks herangezogen werden.*

Vorprojektphase (TL 1 + 2)

Bei der Erarbeitung des Vorprojektes muss klar sein, dass im Anschluss an die erste Abnahme eine Betriebsoptimierung und vor der zweiten Abnahme (Garantieabnahme) eine Erfolgskontrolle durchgeführt wird. In der Teilleistung 1 (Vorprojekt) ist die dazu erforderliche Instrumentierung soweit zu konzipieren, dass in der Teilleistung 2 (Kosten und Termine) eine genügend genaue Kostenschätzung ($\pm 20\%$) gemacht werden kann.

Honorierung

Die Zusatzaufwendungen für Konzeption und Kostenschätzung für die Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle sind mit dem für die Teilleistungen 1 + 2 vorgesehenen Honorarprozentsatz abgegolten.

Projektphase (TL 3 - 5)

In der Teilleistung 3 (Bauprojekt) müssen die massgeblichen technischen Daten, wie Energie- und Leistungsbedarf ermittelt und ein Energiekonzept erarbeitet werden. Das Projekt ist mit Hilfe von Übersichts- und Dispositionsplänen sowie Prinzipschemata darzustellen.

In dieser Umschreibung der zu erbringenden Leistungen sind auch diejenigen Daten enthalten, die für eine spätere Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle erforderlich sind. Der Leistungsbeschreibung ist in dem Sinn zu ergänzen, dass hier auf die vertraglich zu garantierenden Kennwerte hingewiesen wird.

Die in der Teilleistung 3 erarbeiteten Grundlagen dienen als Basis für die Erarbeitung des detaillierten Kostenvoranschlags (TL 4). Zusätzliche Grundleistungen müssen nicht umschrieben werden.

Die Teilleistung 5 (Bewilligungsverfahren) ist von der Betriebsoptimierung nicht tangiert.

Honorierung

Die Zusatzaufwendungen für die Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle sind klein, vor allem dann, wenn Standardlösungen verwendet werden. Bei komplexen Anlagen wird der Zusatzaufwand abgedeckt durch den erhöhten Schwierigkeitsgrad n. Die Aufwendungen sind damit durch die bestehenden Honorarprozente abgedeckt.

Vorbereitungsphase der Ausführung, Ausführungsphase und Bauleitung (TL 6 - 13)

In diesen Phasen müssen bezüglich Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle keine konzeptionellen Überlegungen gemacht werden. Die wegen der Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle allenfalls erforderlichen Zusatzaufwendungen für Instrumentierung und Datenerfassung sind durch die erhöhten honorarberechtigten Baukosten abgedeckt.

Neu Betriebsoptimierungsphase (TL 13a)

- Ziel:* – *Optimaler Betrieb der Anlage*
- Grundlagen:* – *Die vom Bauherrn wöchentlich zu erhebenden Daten oder von einem Spezialisten (mit automatischer Aufzeichnung) ermittelten Betriebsdaten*
- Grundleistungen:* – *Auswertung der Betriebsdaten, Anpassung der Betriebsparameter, bis die vom Planer garantierten Kennwerte erreicht werden*
- Zusatzleistungen:* – *Erfassen der Betriebsdaten, die für die Anpassung der Betriebsparameter und für die Erfolgskontrolle erforderlich sind. Diese Zusatzleistung sollte entweder vom Bauherrn selber (einfache Datenerfassung) oder von einem vom Planer unabhängigen Spezialisten (komplexe Anlagen mit automatischer Datenaufzeichnung) erbracht werden.*

Honorierung: Da dies eine neue Phase des Projektablaufes ist, muss dafür eine zusätzliche Honorierung vorgesehen werden.

Revidierte Ausführungs- und Betriebsunterlagen (TL 14)

Diese Teilleistung bleibt unverändert. Die Ausführungs- und Betriebsunterlagen sind aber erst nach Abschluss der Betriebsoptimierung und unter Einbezug der Ergebnisse (Änderungen, Ergänzungen) abzuliefern.

Garantiarbeiten (TL 15)

In diese Teilleistung ist folgende Grundleistung neu aufzuführen:

- Ermitteln der im Vertrag festgelegten Kennwerte und Einholen der Genehmigung beim Bauherrn oder einer von diesem bezeichneten Kontrollstelle.

Bei einfachen Anlagen erfordert diese neue Teilleistung keinen grossen zusätzlichen Aufwand. Die allfällige externe Überprüfung der Kennzahlen ist vom Bauherrn direkt zu finanzieren.

Bei komplexen Anlagen ist die Überprüfung der im Pflichtenheft festgelegten Garantiewerte (siehe Vorstudienphase) ohne eine vom Planer unabhängige Messung nicht mehr möglich. Der mit dieser Überprüfung beauftragte beratende Ingenieur muss (wie die externe Überprüfung bei einfachen Anlagen) vom Bauherr separat entschädigt werden.

6. Instrumentierung für die Betriebsoptimierung

In der Planungsphase muss festgelegt werden, welche Kennwerte für die Beurteilung der Anlage ermittelt werden müssen, was für Ziel- und Grenzwerte vorgegeben werden und welche Daten zu diesem Zweck erfasst werden müssen. Der Aufwand für die Datenerfassung und Auswertung richtet sich nach der Komplexität und Grösse einer Anlage.

Bei allen Anlagen müssen die Daten für die wichtigsten Kenngrössen dauernd ermittelt werden können. In der Regel erfolgt dies heute noch mit manueller Datenerfassung. Wenn ein Leitsystem vorhanden ist, sollte die Ermittlung der Kennwerte von diesem gemacht werden können. Wichtig ist, dass bei manueller oder automatischer Datenaufzeichnung und Kennzahlenermittlung in der Planungsphase bestimmt wird, was gemessen und berechnet werden soll.

Unbedingt notwendige Messgrössen

Messgrössen, welche der Überprüfung der Kennzahlen und Energieverbräuche sowie der richtigen Funktion der Anlage dienen, müssen mit qualitativ guten Messgeräten als Dauermessung mit Messwertanzeige zur manuellen (evtl. automatischen bei Leitsystemen) Datenaufzeichnung ausgerüstet sein.

Temporäre Messgrössen

Temporäre Messgrössen, welche lediglich kurzzeitig gebraucht werden, beispielsweise zum hydraulischen Abgleich, als Hilfsgrössen bei der Betriebsoptimierung oder als Messgrössen zur Ermittlung von Fehlern, können auch nur als Messstellen vorbereitet werden:

- Zur Durchflussmessung absperrbare Passstücke oder Messwertgeber bzw. Messstrecken ohne die teuren Mess-, Umformer- und Anzeigeeinheiten einbauen
- Zur Temperaturmessung Tauchhülsen für Kabeltemperaturfühler vorsehen.

Bei komplexen Anlagen ist in allen Fällen eine automatische Datenaufzeichnung (mind. für die Phase der Betriebsoptimierung und der Erfolgskontrolle) erforderlich. Bei einfachen Anlagen kann dies dann der Fall sein, wenn die Anlage nicht richtig funktioniert und der Fehler mit manueller Datenaufzeichnung nicht gefunden werden kann. Im Hinblick auf eine automatische Aufzeichnung sollten folgendes beachtet werden:

- Alle Energiezähler müssen mit Ausgängen zur Aufzeichnung der Energieflüsse ausgerüstet sein. Bei Wärme- bzw. Kältezählern sollte zudem noch ein Ausgang für die Durchflussmenge vorhanden sein. Eine äusserst wichtige Forderung bei diesen Ausgängen ist eine der Messstelle angepasste Auflösung (genügend Impulse pro Energie- bzw. Volumeneinheit). Dies bedeutet, dass bei maximaler Leistung bzw. maximalem Durchfluss Impulsfrequenzen im Bereich von 0.1 - 1 Hz erreicht werden sollten.
- Zusätzliche im Schaltschrank auf Klemmen herausgeführte potentialfreie Kontakte vereinfachen die Erfassung der Betriebszustände wichtiger Schaltschützen und Melderelais.
- Die Aussentemperatur sollte mit möglichst geringem Aufwand erfasst werden können. Am einfachsten ist es, wenn diese im Schaltschrank ab Klemmen als Normsignal vorliegt (z.B. 0 - 10 V).
- Tauchhülsen sind bei allen Temperaturmessstellen einzubauen. Eine lichte Weite von 7 mm ist für praktisch alle Kabeltemperaturfühler geeignet. Bei jedem Speicher sollten mindestens drei Messstellen (oben, Mitte, unten) vorhanden sein. Hohe Schichtspeicher erfordern oft mehr als drei Messstellen. Teilweise können Tauchhülsen auch doppelt genutzt werden: normalerweise mit Tauchthermometer und während einer automatischen Datenaufzeichnung mit Kabeltemperaturfühler.

6.1 Instrumentierung einfacher Anlagen mit manueller Optimierung

Werden Standardschaltungen verwendet, so handelt es sich bei nicht allzu komplexen Anlagen (z.B. in Ein- und Mehrfamilienhäusern) um solche, bei denen eine manuelle Optimierung vorgenommen werden kann und eine automatische Datenaufzeichnung nur für eine allfällige Fehlersuche vorgesehen werden muss.

Messstellen und Datenaufzeichnung

Für jede Anlage muss eine Messstellenliste erstellt werden. Bei Standardanlagen sind die erforderlichen Messstellen Teil des vorgegebenen Standards. Folgende Gruppen von Messgrößen sind zu berücksichtigen:

- zugeführte Energien wie Strom, Gas und Öl,
- abgegebene Energie (Nutzenergien)
- Betriebsstunden und Schalthäufigkeit einzelner Anlagenteile, wie Kompressoren, Pumpen, Ventilatoren und Brenner (evtl. mehrstufig). Bei bivalent-parallelen Anlagen sollte auch ein Zähler die Betriebsstunden aufzeichnen, in welchen Wärmepumpe und Kessel gleichzeitig in Betrieb sind.
- Aussentemperatur (bei einfachen Anlagen ein Quecksilberthermometer für den Hauswart)
- Wichtige Systemtemperaturen (jeweils Vor- und Rücklauf bzw. Ein- Austritt), wie Verdampfer-, Verflüssiger- und Speichertemperaturen
- Volumenströme an wichtigen Punkten im hydraulischen System (bei Luft-Wasser-Wärmepumpen evtl. auch im Luftsystem).

Dem Betreiber muss klar gemacht werden, dass es in seinem eigenen Interesse ist, eine gewissenhafte manuelle Datenaufzeichnung und Auswertung durchzuführen. Dazu sind dem Betreiber nach der Inbetriebnahme vorbereitete Messprotokolle und eine Anleitung für die manuelle Datenaufzeichnung zu überreichen. Während der Betriebsoptimierung ist eine wöchentliche, möglichst immer zur selben Zeit stattfindende Datenaufzeichnung nötig. Für spezielle Betriebszustände und Lastphasen ist sogar – für kurze Zeit – eine tägliche Datenaufzeichnung sinnvoll. Nur auf diese Weise besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, das Regelverhalten überprüfen zu können oder Fehlfunktionen zu erfassen (z.B. häufiges Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe).

Auswertung und Interpretation während der Betriebsoptimierung

Die Auswertung und Interpretation muss laufend durch den Planer erfolgen. Die so gewonnenen Erkenntnisse versetzen ihn in die Lage, Mängel zu eliminieren und durch gezielte Korrekturen einen einwandfreien Betrieb zu garantieren.

Die zur Prüfung jeder Elektrowärmepumpen-Anlage wichtigen Kennzahlen und deren Berechnung sind in Anhang 1 zusammengestellt. Die ermittelten Daten dienen zur Überprüfung der Garantiewerte (falls sie mit dem Bauherr schriftlich vereinbart wurden) und als Vergleichswerte für die spätere Überwachung der Anlage durch den Betreiber im regulären Betrieb.

Erfolgskontrolle

Bei einfachen Anlagen genügt es in der Regel, wenn die zu erfüllenden Kennwerte zwischen Planer und Bauherr schriftlich festgelegt und die Datenerfassung durch den Bauherrn im Detail geregelt wurde. Zum Abschluss der – vorher vertraglich festgelegten, bzw. in der Honorarordnung definierten – Erfolgskontrolle legt der Planer dem Bauherrn die ermittelten und mit den Garantiewerten verglichenen Kennwerte zu Überprüfung und Genehmigung vor. Ist der Bauherr mit dieser Überprüfung überfordert, so sollte er eine neutrale Stelle zur Beurteilung beziehen können. Diese Dienstleistung «neutrale Beurteilung» könnte – zusammen mit der Beratung über die im Ingenieurvertrag aufzunehmenden Garantiewerte – von einer neutralen Beratungsstelle (z.B. Infoenergie, kantonale Energiefachstelle oder Energieberaterverein) angeboten werden.

6.2 Instrumentierung und Optimierung komplexer Anlagen

Komplexe Anlagen benötigen für die Betriebsoptimierung neben der manuellen Datenaufzeichnung zusätzlich eine automatische Aufzeichnung mit Intensivmessung über eine mehrwöchige Zeitperiode. Komplexe Anlagen sind

- nicht standardisierte Anlagen
- standardisierte Anlagen mit langen Verbindungswegen oder vielen Nutzergruppen

Für eine gezielte Systemoptimierung (Speicherbewirtschaftung, Spitzenlasten, Tarifoptimierung bei WKK etc.) ist bei grösseren oder komplexeren Anlagen die Erfassung des zeitlichen Zusammenspiels der verschiedenen Komponenten entscheidend. Nur mit Hilfe einer Intensivmessung mit dichtem Aufzeichnungsintervall können diese dynamischen Zusammenhänge und Funktionsabläufe erfasst werden. Dies bedingt den Einsatz von Geräten zur automatischen Datenerfassung.

Messtellen und Datenaufzeichnung

Für jede Anlage muss eine Messtellenliste erstellt werden. Bei komplexen Anlagen muss bei der Planung im Detail analysiert werden, welche Messtellen nötig sind, um eine Beurteilung der möglichen Betriebszustände vornehmen zu können. Beispiele von Messtellenlisten aus den Fallbeispielen sind in Anhang 3 enthalten.

Für die automatische Datenaufzeichnung können unter gewissen Umständen auch Leitsysteme eingesetzt werden. Bedingung dafür ist, dass die Messgrössen mit genügender Genauigkeit erfasst und die benötigten Daten auch tatsächlich ausgelesen und in ein PC-Tabellenkalkulationsprogramm eingelesen werden können.

Für die Datenaufzeichnung immer einsetzbar sind sogenannte Datalogger, welche mit Eingängen für die Messung von analogen Signalen (Spannung, Temperaturen, usw.) und digitalen Signalen (Statussignale und Impulse) sowie einem Programmspeicher und einem Messdatenspeicher ausgerüstet sind. Folgende Hinweise betreffend Messsignal und Messfühler sind zu beachten:

- Messfühler mit Normsignalausgang (0...1/10 V oder 0/4...20 mA) sind üblicherweise direkt an den Datalogger anzuschliessen. Vorsicht gilt aber bei unterschiedlichen Potentialen der verschiedenen Messsignale. Häufig kann zwischen Momentanwert- und Mittelwertaufzeichnung gewählt werden; bei den hier vorkommenden Signalen ist eine Mittelwertaufzeichnung unbedingt vorzuziehen.
- Die in der Haustechnik am häufigsten verwendeten Widerstands-Temperaturfühler (Pt 100, Pt 1000, Ni 1000, Heissleiter) bedürfen einer Linearisierung, welche oft bereits im Datalogger vorgesehen ist (speziell für Pt 100). Bei manchen Dataloggern können auch eigene Fühlerlinearisierungen definiert werden. Bei Temperaturmessungen mit Widerstandsfühlern muss unbedingt der zusätzliche Widerstand der Anschlussleitungen mitberücksichtigt werden (z.B. Kompensation mittels Vierleiterschaltung). Infolge der grösseren Widerstandsänderung pro Grad sind deshalb auch Fühler mit höheren Widerstandswerten vorzuziehen (Pt 1000 oder Ni 1000). Auch Temperaturen sollen, wenn möglich, als Mittelwerte über den Aufzeichnungsintervall aufgezeichnet werden.

- Die bei Durchfluss- und Energiezählern üblichen Impulssignalen können mit Zählereingängen erfasst werden, welche die meisten Datalogger vorsehen. Zählereingänge werden mit Relaiskontakten (potentialfrei) oder mit Transistorausgängen (nicht immer potentialfrei) angesteuert. Da Zählereingänge die Impulse über den gewählten Aufzeichnungsintervall aufsummieren, muss darauf geachtet werden, dass der maximale Zählbereich der Eingänge nicht überschritten wird.
- Statussignale (z.B. «Pumpe ein» oder «Stufe 2 ein») können mit den meisten Dataloggern erfasst werden. Mittels auf Klemmen im Schaltschrank herausgeführten Relaiskontakten oder Optokoppler-Ausgängen sind diese Signale problemlos und insbesondere ungefährlich zu erfassen.
- Interessanter als Momentanwerte sind bei Statussignalen Zeitwerte («Betriebsstunden»), welche die Einschaltdauer innerhalb eines Aufzeichnungsintervalls angeben. Diese Art von Eingang sieht man bei Dataloggern allerdings eher selten. Diese Messungen müssen deshalb oft über Zählereingänge durchgeführt werden (mit Hilfe von fixen externen Zeitimpulsen).

Bei Automatischen Datenaufzeichnungen zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens einer Anlage haben sich Aufzeichnungsintervalle von etwa 10 Minuten als günstig erwiesen. Nachdem anhand der manuellen Datenerfassung sichergestellt wurde, dass eine Anlage keine grösseren Mängel mehr aufweist, genügen üblicherweise Intensivmessungen über 1 bis 2 Monate. Für die Auswertung sind normale Tabellenkalkulationsprogramme (Excel, SuperCalc, usw.) geeignet. Der Datenaustausch zwischen Datalogger und Tabellenkalkulationsprogramm geschieht am einfachsten über ein ASCII-Datenfile. Intensivmessungen mit oder ohne Datenauswertung und Dateninterpretation werden auch als Dienstleistungen von verschiedenen Firmen Angeboten

Auswertung und Interpretation während der Betriebsoptimierung

Während der Betriebsoptimierung muss die Auswertung und Interpretation durch den Planer erfolgen. Die Auswertungen zeigen ihm, ob die Anlage in der von ihm konzipierten Art funktioniert oder ob durch Anpassung von Regel- und Steuerparametern das anvisierte Ziel erreicht werden kann.

Der Datenaustausch zwischen Data-Logger bzw. Leitsystem und Tabellenkalkulationsprogramm auf dem PC erfolgt am einfachsten über ein ASCII-Datenfile.

Auswertungsbeispiele von automatischen Intensivmessungen sind in den Fallbeispielen «RhV-Betriebsgebäude» (Kap. 4.1) und «BHKW Tiefenbrunnen» (Kap. 4.3) gezeigt.

Oft wird der Planer selber nicht über die geeigneten Geräte für Datenaufzeichnung und -auswertung verfügen. In diesem Fall kann er eine auf Messungen von Haustechnikanlagen spezialisierte Firma damit beauftragen. Diese Firma soll ihm die notwendige Unterstützung bei der Interpretation der Auswertungen geben. Die Verantwortung für die aus den Messungen sich ergebenden Konsequenzen liegt aber während der ganzen Phase der Betriebsoptimierung beim Planer.

Erfolgskontrolle

Nach Abschluss der Betriebsoptimierung wird über eine vorgegebene Zeitperiode (meist eine Heizperiode oder ein Jahr) die Erfolgskontrolle durchgeführt. Nur auf der Basis einer Erfolgskontrolle kann eine einwandfreie zweite Abnahme (Garantieabnahme) durchgeführt werden.

Für WP-Anlagen ist in jedem Fall die Jahresarbeitszahl (siehe auch Anhang 1) zu ermitteln und mit dem im Ingenieurvertrag garantierten Grenzwert zu vergleichen. Bei bivalenten Anlagen sollte auch der Nutzungsgrad der Wärmeerzeugungsanlage garantiert werden. Dazu muss allerdings auch der Energieverbrauch des zusätzlichen Wärmeerzeugers gemessen werden. Für komplexe Anlagen ist zusätzlich eine Jahresenergiebilanz zu erstellen und mit weiteren Kennzahlen bezüglich Energieverbrauch und Wirtschaftlichkeit zu ergänzen. Die wichtigsten zusätzlichen Kennzahlen sind

- für komplexe Wärmepumpenanlagen: Jahresnutzungsgrad der Wärmeerzeugung, Energiekennzahl, Anteil der WP an der genutzten Wärmemenge
- für WKK-Anlagen: Vollbetriebsstunden des BHKW's pro Jahr mit Aufteilung der produzierten Energie nach Hochtarif und Niedertarif Sommer/Winter.

Mit der Erfolgskontrolle wird gezeigt, ob die Anlage die vorgesehenen Leistungen erbringt und ob die Garantiewerte erreicht werden. Voraussetzung ist allerdings, dass der Bauherr diese Garantiewerte vor Auftragserteilung an den Planer und an den Unternehmer vertraglich festhält.

7. Weiteres Vorgehen

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass die Betriebsoptimierung mit Erfolgskontrolle institutionalisiert und in der Praxis eingeführt werden sollte, und zwar für alle Haustechnikanlagen. Die nachfolgenden Vorschläge für das weitere Vorgehen konzentrieren sich aber vor allem auf den Bereich der Wärmepumpen und WKK-Anlagen.

1. Praxiserprobung der Betriebsoptimierung

Die hier vorgeschlagenen Massnahmen zur Betriebsoptimierung sind an weiteren Praxisbeispielen, insbesondere an neu zu bauenden Anlagen zu erproben:

- An WP- und WKK-Anlagen deren Realisierung geplant ist, werden die Ingenieurverträge gemäss obigen Vorschlägen ergänzt. Nach der ersten Abnahme wird eine Betriebsoptimierung vorgesehen. Der Planer berücksichtigt dies schon im Konzept und beim Projekt durch entsprechende Vorbereitungen (Instrumentierung etc.).
- Für die Projekte sollten so weit als möglich Standardschaltungen verwendet werden.
- Ein vom Planer unabhängiger Spezialist begleitet die Projektierung und Ausführung und führt die Datenerfassung während der Betriebsoptimierung und während der Erfolgskontrolle durch.
- Um Daten für die Honorierung zu erhalten, werden die zusätzlichen Aufwendungen von Planer und Spezialist separat erfasst.

Die Erfahrungen an diesen Objekten dienen dazu, die in der vorliegenden Untersuchung vorgeschlagenen Massnahmen zu überprüfen, anzupassen und zu konkretisieren.

2. Erarbeiten von Zielwerten für die energetische Beurteilung von Haustechnikanlagen

Für Wärmepumpenanlagen sind solche Zielwerte schon vorhanden. Für WKK-Anlagen müsste für die wichtigsten Standardfälle eine «Zielenergiebilanz» erstellt werden. Die Zielwerte von Heizungsanlagen müssten aber auch für Öl- und Gasheizungen, Holzheizungen und Sonnenenergieanlagen erarbeitet werden. Wie im Bereich der Lüftung vorgegangen werden könnte, entzieht sich im Moment unserer Kenntnis.

3. Anpassung der SIA-Honorarordnung und des SIA-Vertrages

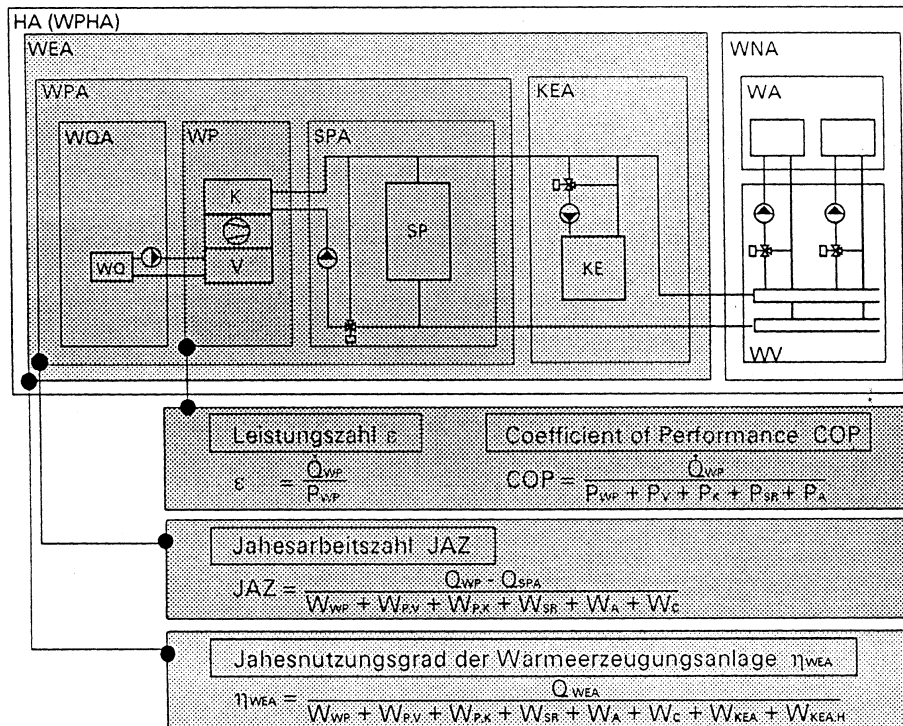
Mit den Erfahrungen aus den Schritten 1 und 2 (wobei Schritt 2 auch für andere Heizungsanlagen durchgeführt werden sollte) ist es möglich die SIA-Honorarordnung 108 und den zugehörigen SIA-Vertrag für Ingenieurleistungen anzupassen.

Literatur

- [1] Standardschaltungen, Wärmepumpen, Wärmekraftkopplung, Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung, RAVEL im Wärmesektor Heft 5. Provisorische Version April 1993.
- [2] Gabathuler H.R., Mayer H., Baumgartner Th.: Energetische Messungen an der Wärmepumpenanlage im RhV-Betriebsgebäude in Altstätten, Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen. Bezugsquelle: Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, Linsenbühlstrasse 91, 9001 St. Gallen.
- [3] Baumann E., Baumgartner Th.: Energetische Messungen an der Wärmepumpenanlage Flooz, Wattwil, Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, 1989.
- [4] Gabathuler H.R., Mayer H., Baumgartner Th.: Energetische Messungen an der Wärmekraftkopplungsanlage, Haldenring», Amt für Wirtschaft, Energie und Verkehr des Kantons Thurgau (AWEV), 8500 Frauenfeld, Oktober 1990
- [5] Baumgartner Th. et al.: Wärmepumpen, Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen, Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfürfragen, Bern, Juni 1993. (Bezugsquelle: Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern, Best.-Nr. 724.356d)
- [6] Gabathuler H.R. et al.: Elektrizität im Wärmesektor. Wärmekraftkopplung, Wärmepumpen, Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung, Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfürfragen, Bern, 1991. (Bezugsquelle: Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern, Best.-Nr. 724.354d)
- [7] Steinemann U. et al.: Die Bedeutung organisatorischer Fragen für die Planung energetisch guter Gebäude- und Haustechnikanlagen, Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfürfragen, Bern, 1993

Anhang 1 Kennzahlen für Wärmepumpenanlagen

Auszug aus der RAVEL Dokumentation «Wärmepumpen» [5]



Bilanzgrenzen

- HA** Heizungsanlage; auch WPHA für Wärmepumpenheizungsanlage (diese Bezeichnung ist aber nur sinnvoll für eine monovalente Anlage)
- WEA** Wärmeergezeugungsanlage
- WPA** Wärmepumpenanlage
- WQA** Wärmequellenanlage
- WP** Wärmepumpe
- SPA** Speicheranlage
- KEA** Kesselanlage
- WNA** Wärmenutzungsanlage
- WW** Wärmeverteilung
- WA** Wärmeabgabe

Weitere Abkürzungen

- WQ** Wärmequelle
- V** Verdampfer
- K** Verflüssiger (Kondensator)
- SP** Speicher
- KE** Kessel

Leistungen (Momentanwerte oder Mittelwerte über kurze Zeitdauer)


- Q_{WP} Heizleistung der Wärmepumpe
- P_{WP} Verdichter-Leistungsaufnahme der Wärmepumpe
- P_V Leistungsanteil zur Überwindung des Verdampferdruckabfalls
- P_K Leistungsanteil zur Überwindung des Verflüssigerdruckabfalls
- P_{SR} Leistungsaufnahme der Steuerung und Regelung innerhalb der Wärmepumpe
- P_A mittlere Leistungsaufnahme der Abtaueinrichtung

Energiemengen (Jahreswerte)

- Q_{WP} von der Wärmepumpe produzierte Wärmemenge
- Q_{SPA} Wärmeverluste der Speicheranlage
- Q_{WEA} von der ganzen Wärmeergezeugungsanlage produzierte Wärmemenge
- W_{WP} Verdichter-Energieverbrauch der Wärmepumpe
- $W_{P,V}$ Energieverbrauch der Verdampferpumpe
- $W_{P,K}$ Energieverbrauch der Verflüssigerpumpe
- W_{SR} Energieverbrauch der Steuerung und Regelung
- W_A Energieverbrauch der Abtaueinrichtung
- W_C Energieverbrauch der Carterheizung
- W_{KEA} Brennstoffverbrauch der Kesselanlage
- $W_{KEA,H}$ Hilfsenergieverbrauch der Kesselanlage

Bild 2: Bilanzgrenzen und Definition der Kennzahlen

Kennzahlen zur Erfolgskontrolle


 Wärmepumpenkennzahlen und deren Bilanzgrenzen sind ausführlich in Bild 3 definiert. Zielwerte sind in Tabelle 39 zusammengestellt.

Die **Leistungszahl ϵ** oder der **Coefficient of Performance COP** muss durch den Hersteller bzw. Lieferanten der Wärmepumpe als Ziel- und Grenzwert (siehe unten) garantiert werden. Da diese Kennzahl als Momentanwert definiert und immer an Randbedingungen gebunden ist (Verdampfeintritts- und Verflüssigeraustrittstemperatur), ist ein exakter messtechnischer Nachweis nur mit automatischer Datenaufzeichnung möglich (Bild 83). Plausibilitätsbetrachtungen sind aber auch mit manueller Aufzeichnung möglich.

Die wichtigste Kennzahl einer Wärmepumpenanlage ist die **Jahresarbeitszahl JAZ**. Diese muss in jedem Falle durch die Planerin oder den Planer schriftlich als Ziel- und Grenzwert (siehe unten) garantiert werden. Die Kontrolle ist mittels manueller Datenaufzeichnung – auch durch einen Laien – problemlos möglich.

Bei bivalenten Anlagen ist es zusätzlich sinnvoll, den **Nutzungsgrad der Wärmeerzeugungsanlage η_{WEA}** garantieren zu lassen. Eine Überprüfung ist allerdings nur möglich, wenn auch der Energieverbrauch des zusätzlichen Wärmeerzeugers gemessen wird.

Als weitere wichtige Kennzahl, die hier nicht näher behandelt wird, muss noch die **Energiekennzahl E** erwähnt werden. Sie berücksichtigt noch zusätzlich bauliche und nutzungsspezifische Aspekte. Je nach Gebäudeart (Neubau, Sanierung) werden Ziel- und Grenzwerte für Wärme (Heizung und Warmwasser) und für den allgemeinen Stromverbrauch vorgegeben. Verschiedene kantonale Energiegesetze schreiben für den Heizenergiebedarf (Wärmedämmnachweis nach SIA 380/1) Grenzwerte für die Planung vor.

 *Als absolutes Minimum sollte beim Bau einer Wärmepumpenanlage die **Jahresarbeitszahl** als Ziel- und Grenzwert dem Bauherrn schriftlich garantiert werden. Den beiden Werten soll dabei eine unterschiedliche rechtliche Bedeutung beigemessen werden:*

– Nichteinhaltung des **Zielwertes** sagt nur etwas über die Qualität der Planung aus, hat aber keine

garantierte rechtlichen Folgen

– Nichteinhaltung des **Grenzwertes** hat hingegen garantierte rechtliche Folgen

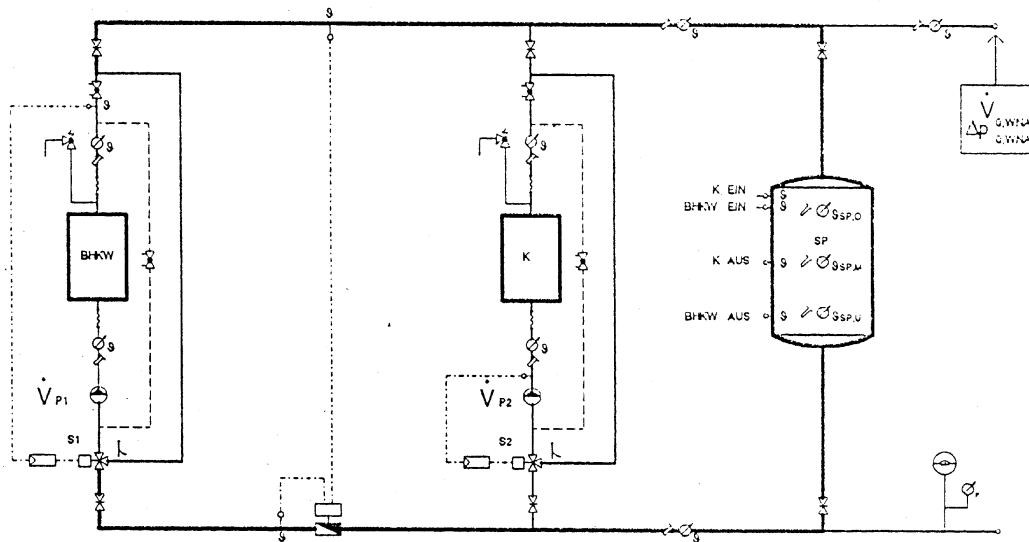
Wie weit und mit welchen rechtlichen Konsequenzen die übrigen Kennzahlen fixiert werden, bleibt den Beteiligten überlassen. Der Bauherr sollte sich den Endenergieverbrauch «Wärme» garantieren lassen, und der Planer sollte sich – als «Rückversicherung» – vom Wärmepumpenhersteller eine Garantie über Leistungszahl oder COP geben lassen.

| Wärmequelle Betriebsart Nutzung | Leistungs- zahl* ϵ | Jahres- arbeits- zahl** JAZ | Jahres- nutzungs- grad*** η_{WEA} |
|---|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| Grundwasser monovalent | | | |
| – Direktnutzung | 3,5...4,0 | 3,0...3,5 | = JAZ |
| – Indirektnutzung | 3,3...3,8 | 2,8...3,3 | = JAZ |
| Oberflächengewässer monovalent | | | |
| Indirektnutzung | 3,1...3,6 | 2,6...3,1 | = JAZ |
| Abwasser monovalent | | | |
| Indirektnutzung | 3,4...3,9 | 2,9...3,4 | = JAZ |
| Erdreich monovalent | | | |
| – Erdregister | 3,1...3,4 | 2,6...2,9 | = JAZ |
| – Erdsonden | 3,3...3,6 | 2,8...3,1 | = JAZ |
| Aussenluft | | | |
| – EFH, monovalent | 2,5...2,9 | 2,0...2,5 | = JAZ |
| – bivalent-parallel**** | 2,8...3,2 | 2,3...2,7 | 1,3...2,3 |
| – bivalent- alternativ**** | 3,0...3,4 | 2,5...2,9 | 1,5...2,5 |
| * Bezogen auf die Jahresmittelwerte der entsprechenden Verdampfeintrittstemperatur und 40...45°C Verflüssigeraustrittstemperatur | | | |
| ** Bei Verflüssigeraustrittstemperatur 40...45°C | | | |
| *** Bilanzgrenze = Wärmeerzeugungsanlage; Kessel im Jahresnutzungsgrad enthalten, je nach Deckungsgrad ergeben sich sehr unterschiedliche Werte | | | |
| **** Bivalenzpunkt 0...3°C | | | |

Tabelle 39: Zielwerte für die Kennzahlen von Elektromotorwärmepumpen im schweizerischen Mittelland. Bei monovalentem Betrieb sind Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage und Jahresnutzungsgrad der Wärmeerzeugungsanlage identisch. Als Wert für die Elektro-Thermo-Verstärkung ETV kann in der Praxis die Jahresarbeitszahl verwendet werden.

Anhang 2 Beispiele von Standardschaltungen

Auszug aus der RAVEL Dokumentation «Standardschaltungen» [1], provisorische Version vom 29.4.1993



Anwendungsfälle

- Wärmegeführtes BHKW
- Bivalent-paralleler Betrieb
- Im Normalfall einstufig (BHKW)
- Vorlauftemperatur zu Verbrauchern ≤ max. Austrittstemperatur des BHKW's
- Wärmespeicher mit Schichtladung
- Parallelbetrieb mehrerer BHKW's möglich

Funktionsbeschreibung

- Einschalt- und Ausschaltbefehl erfolgen über Fühler im Speicher.
- Sollwert für BHKW-Austrittstemperatur (in der Regel) konstant
- Bei BHKW = aus muss das Dreiwegventil S1 auf Bypass stehen
- Geregelte BHKW-Austrittstemperatur zur Schichtladung des Speichers
- Lastabhängige Entladung des Speichers (variabler Durchfluss $V_{d,WNA}$ zu den Verbrauchern)

Empfehlungen zur hydraulischen Auslegung

- BHKW-Eintrittstemperatur maximal 70°C (mit dem Hersteller abklären!)
- BHKW-Austrittstemperatur maximal 75...90°C, Motoren mit Heisskühlung bis 110°C (mit dem Hersteller abklären!)
- Ob beim BHKW ein konstanter Bypass erforderlich ist (gestrichelt), hängt von der Auslegung des BHKW-Wärmetauschers ab (mit dem Hersteller abklären!)
- Temperaturdifferenz über BHKW $\Delta\vartheta_{BHKW} = 7...20\text{ K}$, bei entsprechender Auslegung des BHKW-Wärmetauschers auch mehr, massgebend: $\vartheta_{Rücklauf}$, Verbraucher möglichst tief

- Das Dreiwegventil S1 muss möglichst nahe beim BHKW eingebaut werden (kurze Totzeit)
- Speicher und Anschlussleitungen druckdifferenzarm $\Delta p_{d,WNA} \leq 2\text{ kPa}$
- Berechnung des Speicherinhalts: Dimensionierung so, dass eine minimale Laufzeit von 1 Stunde im ungünstigsten Betriebsfall garantiert werden kann

$$V_{Sp} [m^3] = 0.86 \cdot \frac{\dot{Q}_{BHKW} [kW] \cdot t [h]}{\Delta\vartheta_{BHKW} [K]}$$

Achtung: der Speicher muss um das Volumen von K_{ein} bis $BHKW_{ein}$ grösser dimensioniert werden (± 5...10 min BHKW-Betrieb)

- Für das $\Delta\vartheta_{BHKW}$ sind die effektiven Temperaturen in jedem Betriebszustand einzusetzen
- Auslegedurchfluss BHKW und S1:

$$\dot{V}_{BHKW} [m^3/h] = 0.86 \cdot \frac{\dot{Q}_{BHKW} [kW]}{\Delta\vartheta_{BHKW} [K]}$$

- Ventilautorität $S1 \geq 0.5$, das heisst: $\Delta p_{S1} \geq \Delta p_{var}$ (Wärmezähler und Speicher gehören zu Δp_{var} !)
- Das Kesselventil S2 muss dicht schliessen, wenn der Kessel nicht in Betrieb ist.

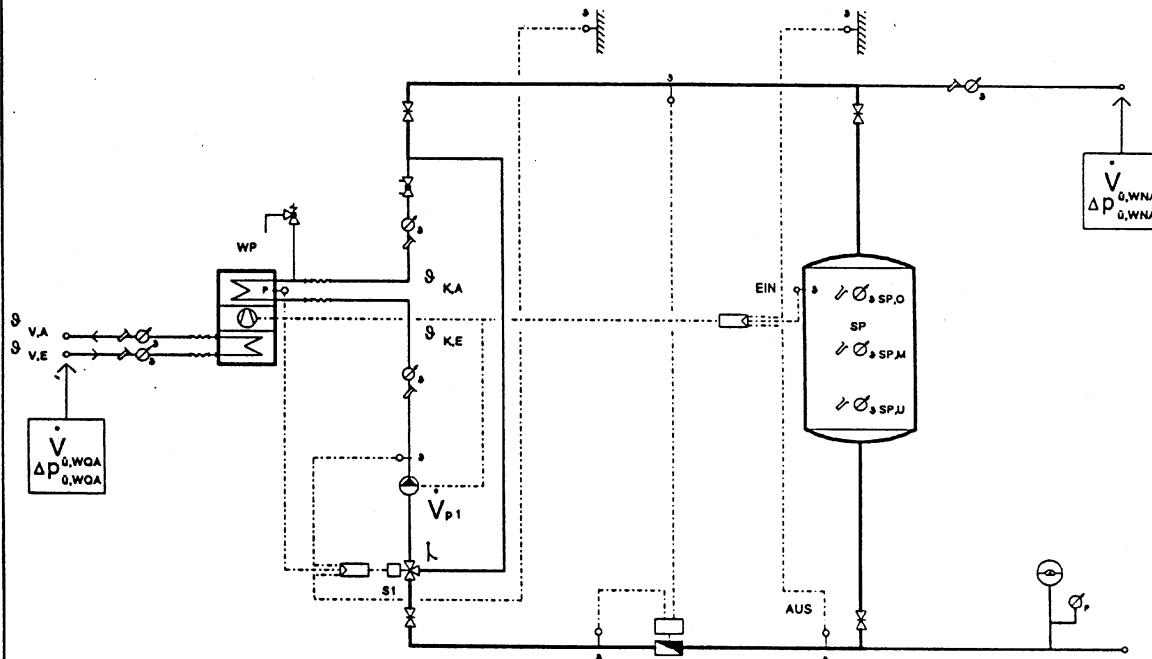
Regelungstechnische Empfehlungen

- Regelung mit einer SPS (Speicherprogrammierbaren Steuerung) ausrüsten oder eine DDC-Regulierung einsetzen
- Laufzeit Dreiwegventil S1 ≤ 30 Sekunden
- Die Nachlauftemperatur soll so hoch wie möglich und die Nachlaufzeit so kurz als möglich eingestellt werden
- BHKW-Aus-Fühler im Speicher so platzieren, dass Nachlauf garantiert werden kann

- Der Kessel ist verzögert zuzuschalten, je nach dem welche Vorlauftemperaturschwankungen für die WNA zulässig sind

Besonderes

- Die Stromproduktion des BHKW's und der Stromverbrauch der Hilfsaggregate sind mit separaten Stromzählern zu messen
- Betriebsstundenzähler und Impulszähler sind unbedingt nötig
- Der Wärmezähler erlaubt die Überprüfung des BHKW-Wirkungsgrads
- Frühzeitig mit dem Elektrizitätswerk Kontakt aufnehmen, insbesondere muss die Dauerbelastung (nicht die sogenannte Industriellast!) der Anschlussleitungen abgeklärt werden
- Es ist sehr zu empfehlen den Gasverbrauch des BHKW's mit einem sep. Zähler zu erfassen. Tarif mit Gaswerk abklären. Ziel: Spezialtarif für BHKW
- Oft wird zur Nutzung der Strahlungswärme des Motors und des Generators eine Wärmepumpe eingesetzt. Beim Anfahren ist die Wärmepumpe verzögert einzuschalten und nach dem Abschalten des Motors muss sie zur Abführung der Strahlungswärme nachlaufen. Um minimalen Durchfluss über die WP zu erreichen, ist der Verflüssigungsdruck zu regulieren
- Bei der hydraulischen Einbindung der WP speziell zu beachten sind: Speichereinführung, Nachlaufvolumen und Mischzone

**Anwendungsfälle / Merkmale**

- Für monovalenten Betrieb einstufiger Wärmepumpen
- Für Wärmequellen mit wenig schwankender Temperatur, wie Erdsonden, Grundwasser und Oberflächengewässer. Aussenluft als Wärmequelle wird in der Regel bei bivalenten Anlagen eingesetzt
- Technischer Speicher / Wärmespeicher mit Schichtladung. Zur Nutzung des Niedertarifs, zur Überbrückung von Sperrzeiten sowie bei zeitlicher Verschiebung von Angebot und Nachfrage
- Für den Parallelbetrieb mehrerer Wärmepumpen geeignet
- Vorteil gegenüber WP-02: Die max. mögliche Speicher- (resp. Vorlauf-)temperatur entspricht $\vartheta_{K,A} \max$
- Nachteil gegenüber WP-02: Schlechtere Leistungszahl und aufwendigere Steuerung / Regulierung

Funktionsbeschreibung

- Der Einschaltbefehl erfolgt über einen Fühler im Speicher, der Ausschaltbefehl über einen Fühler mit schneller Reaktion im Rücklauf zur Wärmepumpe
- Die Ein- und Ausschalttemperaturen können in Abhängigkeit der Aussentemperatur geschoben oder auf konstante Werte (etwas schlechtere Leistungszahl) eingestellt werden
- Bei WP = aus muss das Drehwegventil S1 auf Bypass stehen
- Der Verflüssigungsdruck wird reguliert und so die Austrittstemperatur $\vartheta_{K,A}$ gesteuert. Sollwert für den Verflüssigungsdruck aussentemperaturabhängig gekoppelt, mit Sollwertsprung

- Schichtladung des Speichers
- Lastabhängige Entladung des Speichers (variabler Durchfluss \dot{V}_{WNA} zu den Verbrauchern)

Empfehlungen zur hydraulischen Auslegung

- Austrittstemperatur $\vartheta_{K,A} \max$ der Wärmepumpe mit Arbeitsmittel R22 50...52 °C
- Auslege-Temperaturdifferenzen über
 - Verbraucher: $\Delta\vartheta_{\text{Verbraucher}} = 5 \text{ K} \dots 15 \text{ K}$
 - Wärmequelle: $\Delta\vartheta_V = \vartheta_{V,E} - \vartheta_{V,A} = 3 \text{ K} \dots 5 \text{ K}$
 - Verflüssiger: $\Delta\vartheta_K = \vartheta_{K,A} - \vartheta_{K,E} = 5 \text{ K} \dots 10 \text{ K}$
- Durchfluss \dot{V}_{P1} über Verflüssiger konstant
- Durchfluss $\dot{V}_{P1} > \dot{V}_{0,WNA}$ (ca. 10...20%)
- Auslegedurchfluss Verflüssiger und S1:

$$\dot{V}_K [\text{m}^3/\text{h}] = \dot{V}_{S1} = 0.86 \cdot \frac{\dot{Q}_{WP \max} [\text{kW}]}{\vartheta_{K,A} - \vartheta_{K,E} [\text{K}]}$$

- Das Drehwegventil muss möglichst nahe beim Verflüssiger eingebaut werden (kurze Totzeit)
- Ventilautorität $S1 \geq 0.5$, das heisst: $\Delta p_{S1} \geq \Delta p_{\text{var}}$ (Wärmezähler und Speicher gehören zu Δp_{var})
- Kriterium zur Berechnung des Speicherinhaltes:
 - Minimallaufzeit der WP = 20 Minuten
 - Berechnung des nutzbaren Speicherenergieinhaltes: $Q [\text{kWh}] = 1.16 \cdot V_{SP} [\text{m}^3] \cdot \Delta\vartheta_{SP} [\text{K}]$
 - Speicher und Anschlussleitungen druckdifferenzarm $\Delta p_{0,WNA} < 2 \text{ kPa}$

Regelungstechnische Empfehlungen

- Einschaltverzögerung für Verdichter zur Vorspülung des Verflüssigers
- Steuerung $\vartheta_{K,A}$ nur nach Verflüssigungsdruck oder in Kaskade mit der Eintrittstemperatur $\vartheta_{K,E}$. (Fühler direkt im Wasser und nahe beim Ventil S1).

- Nur Eintrittstemperaturregulierung gibt keine Garantie für die Austrittstemperatur
- Der Druckfühler muss vibrationsfrei angeordnet sein
- Regelkreise mit einstellbarer PID - Charakteristik
- Laufzeit Drehwegventil < 30 Sekunden

Besonderes

- Der Stromverbrauch der WP mit ihren Hilfsaggregaten ist mit einem separaten Stromzähler zu messen
- Betriebsstunden- und Impulszähler sind unbedingt notwendig
- Strom- und Wärmezähler mit Impulsausgang (0,1...1 Hz im Auslegungspunkt)
- Der Wärmezähler ist so anzuordnen, dass die Leistungszahl und die Jahresarbeitszahl überprüft werden können
- Wiederanlaufsperrung und Anlaufstrombegrenzung gemäss örtlichen Vorschriften
- In der Regel ist für den Verflüssiger keine Durchflussüberwachung notwendig
- Optimierungsmaßnahme: Austrittstemperatur $\vartheta_{K,A}$ der WP so tief wie möglich (witterungsgelührt)
- Richtlinie SWK1 92-1, speziell: hydraulische Schaltung der Wärmequellen
- AWP Richtlinie Nr. 9

Anhang 3 Messstellenlisten der Fallbeispiele

| Nr. | Messgrösse, Messort | Auflösung bei der Intensivmessung | Langzeitmessung LM Intensivmessung IM |
|--|---|-----------------------------------|--|
| 1 | Temperatur aussen (Dach) | 0,1°C | IM |
| 2 | Relative Feuchtigkeit aussen (Luft Verdampfer Eintritt) | 1% | IM |
| 3 | Temperatur Speicher 1 oben | 0,1°C | IM |
| 4 | Temperatur Speicher 1 mitte | 0,1°C | LM, IM |
| 5 | Temperatur Speicher 1 unten | 0,1°C | IM |
| 6 | Temperatur Speicher 2 mitte | 0,1°C | LM, IM |
| 7 | Temperatur Speicher 2 unten | 0,1°C | IM |
| 8 | Temperatur Gruppen-Vorlauf (Fernleitung) | 0,1°C | IM |
| 9 | Temperatur Gruppen-Rücklauf (Fernleitung) | 0,1°C | IM |
| 10 | Temperatur Haupt-Vorlauf | 0,1°C | IM |
| 11 | Temperatur Haupt-Rücklauf | 0,1°C | IM |
| 12 | Volumenstrom Hauptkreis | 25 l * | LM, IM |
| 13 | Wärmeseitigung Hauptkreis | 10 kWh | LM, IM |
| 14 | Wärmeleistung Fernleitung Neubau | 1 kWh | LM, IM |
| 15 | Temperatur Kältemittel Verdampfer-Austritt | 0,1 °C | IM |
| 16 | Temperatur Luft Verdampfer-Eintritt | 0,1°C | IM |
| 17 | Temperatur Luft Verdampfer-Austritt | 0,1°C | IM |
| 18 | Temperatur Kondensator-Eintritt | 0,1°C | IM |
| 19 | Temperatur Kondensator-Austritt | 0,1°C | IM |
| 20 | Temperatur Wärmepumpe-Eintritt (Laderegulung) | 0,1°C | IM |
| 21 | Volumenstrom Wärmepumpe | 100 l | LM, IM |
| 22 | Wärmeleistung Wärmepumpe | 1 kWh | LM, IM |
| 23 | Elektronleistung Wärmepumpe inkl. Umwälzpumpe | 16,67 Wh | LM, IM |
| 24 | Ölzähler Kessel | 0.1 l | LM, IM |
| 25 | Druck Kältemittel (Lieferung Frigorex)** | | |
| 26 | Laufzeit Kompressor | 1 s | LM,IM |
| 27 | Laufzeit Ventilator Verdampfer | 1 s | IM |
| 28 | Laufzeit Kondensatorkreis-Pumpe | 1 s | IM |
| 29 | Laufzeit Brenner Stufe 1 | 1 s | LM,IM |
| 30 | Laufzeit Brenner Stufe 2 | 1 s | LM,IM |
| 31 | Laufzeit Hauptpumpe | 1 s | IM |
| 32 | Sammelalarm Wärmepumpe (EIN) | 1 s | IM |
| 33 | Dreiwegventil Nr. 10 (Stellung WP-Betrieb) | 1 s | IM |
| <p>Im Rahmen der Langzeitmessung wurden die folgenden weiteren wöchentlichen Ablesungen durch das Betriebspersonal durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Elektrozähler ganzes Betriebsgebäude (HT/NT) – Elektro-Spitzenlastzähler ganzes Betriebsgebäude (gesamt) – Elektrozähler Neubau (HT/NT) – Betriebsstundenzähler der Wassererwärmer – Wärmeleistung Abwartwohnung <p>Ausserdem wurde durch das Betriebspersonal ein Protokoll über die Störungen und die Zeitpunkte der Zu- und Abschaltungen der Wärmeerzeuger und der einzelnen Heizgruppen geführt.</p> | | | |
| * Bis und mit Woche 15: 1'0001 | | | |
| ** Nicht gemessen | | | |

Messstellenliste des RhV-Betriebsgebäudes (siehe Kap. 4.1)

Messstellenliste für autom. Datenerfassung – Tramdepot Tiefenbrunnen

| Nr. | Messgrösse, Messort | Auflösung | Messgerät |
|-----|--|---------------------|---------------|
| 1 | Elektr. Wirkleistung: BHKW (Produktion) | 0,08 kWh | Elektrozähler |
| 2 | Gas: BHKW (Bezug) | 0,1 m ³ | Gaszähler |
| 3 | Gas: BRENNER (Bezug) | 1 m ³ | Gaszähler |
| 4 | Öl: Brenner (Bezug) | 0,1 l | Ölzähler |
| 5 | Betriebszustand: BHKW Betrieb ein/aus | 1 s | |
| 6 | Betriebszustand: BHKW Störung ein/aus | 1 s | |
| 7 | Betriebszustand: BRENNER Stufe 1 ein/aus (Gas) | 1 s | |
| 8 | Betriebszustand: BRENNER Stufe 2 ein/aus (Gas) | 1 s | |
| 9 | Betriebszustand: BRENNER Stufe 1 ein/aus (Öl) | 1 s | |
| 10 | Betriebszustand: BRENNER Stufe 2 ein/aus (Öl) | 1 s | |
| 11 | Betriebszustand: HP-UP 2 (Haupt-Pumpe) ein/aus | 1 s | |
| 12 | Betriebszustand: UP 1 (Abgas-Kondensator) ein/aus | 1 s | |
| 13 | Betriebszustand: UP 2 (Abgas-Plattentaucher) ein/aus | 1 s | |
| 14 | Temperatur: AUSSEN | 0,1°C | |
| 15 | Temperatur: HAUPTVORLAUF (Verbraucher) | 0,1°C | |
| 16 | Temperatur: HAUPTRÜCKLAUF (Verbraucher) | 0,1°C | |
| 17 | Temperatur: BHKW Eintritt | 0,1°C | |
| 18 | Temperatur: BHKW Austritt | 0,1°C | |
| 19 | Temperatur: KESSELKREIS Austritt | 0,1°C | |
| 20 | Temperatur: WW-VORWÄRMUNG Eintritt (Abgas-Kondensator) | 0,1°C | |
| 21 | Temperatur: WW-VORWÄRMUNG Austritt (Abgas-Kondensator) | 0,1°C | |
| 22 | Temperatur: ABGAS-PLATTENTAUSCHER Eintritt (RL-Anhebung) | 0,1°C | |
| 23 | Temperatur: ABGAS-PLATTENTAUSCHER Austritt (RL-Anhebung) | 0,1°C | |
| 24 | Temperatur: Speicher 1.1 (oben) | 0,1°C | |
| 25 | Temperatur: Speicher 1.2 | 0,1°C | |
| 26 | Temperatur: Speicher 1.3 | 0,1°C | |
| 27 | Temperatur: Speicher 1.4 | 0,1°C | |
| 28 | Temperatur: Speicher 1.5 | 0,1°C | |
| 29 | Temperatur: Speicher 1.6 (unten) | 0,1°C | |
| 30 | Wärmeleistung: HAUPTKREIS (Verbraucher) | 10 kWh | Wärmezähler |
| 31 | Wärmeleistung: BHKW | 10 kWh | Wärmezähler |
| 32 | Wärmeleistung: ABGAS-KONDENSATOR | 1 kWh | Wärmezähler |
| 33 | Durchfluss: HAUPTKREIS (Verbraucher) | 0,01 m ³ | Wärmezähler |
| 34 | Strahlung (global/horizontal) | | Solarzähler |
| 16 | Temperaturen | | |
| 1 | Strahlung | | |
| 9 | Betriebszustände ein/aus | | |
| 8 | Zähler | | |

Messstellenliste des Blockheizkraftwerks «Tiefenbrunnen» (siehe Kap. 4.3)

