



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**  
**F&E Programm Verfahrenstechnische Prozesse VTP**

# PROZESSOPTIMIERUNG BEI DER WÄRMEEERZEUGUNG MIT HOLZ IN GEWÄCHSHÄUSERN

## 1'600 KW HOLZHEIZUNG STEINMAUR

### Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Daniel Meier, Encontrol GmbH**

Bremgartenstrasse 2

5443 Niederrohrdorf

daniel.meier@encontrol.ch

www.encontrol.ch

## **Impressum**

4. Dezember 2006

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, F&E Programm Verfahrenstechnische Prozesse VTP

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, [martin.stettler@bfe.admin.ch](mailto:martin.stettler@bfe.admin.ch)

Projektnummer: 101453

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	4
Resumée .....	4
Abstract .....	4
1. Ausgangslage .....	5
2. Ziel der Arbeit .....	5
3. Zusammenfassung der Ergebnisse .....	5
Positive Bilanz nach einem halben Jahr Betriebszeit .....	5
Wirtschaftlichkeit .....	5
CO <sub>2</sub> -Abgabe .....	6
Technische Highlights .....	6
Betriebsoptimierung .....	6
4. Detailergebnisse .....	6
Wärmeanforderung von Gewächshäusern .....	6
Solltemperaturen am Tag .....	7
Solltemperaturen in der Nacht .....	7
Auswirkungen auf die Wärmeerzeugung .....	7
Bekanntes Anlagenkonzept – neues Betriebskonzept .....	7
Anlagenkonzept .....	8
Betriebskonzept .....	8
Betriebsarten .....	10
5. Übergeordnete Steuerung der Wärmeerzeugung .....	12
Zusammenfassung der Aufgaben der Steuerungskomponenten .....	12
Eigenheiten der Holzheizung und ihr Einfluss auf die Regelung .....	13
Die übergeordnete Steuerung – holländische Innovation .....	13
Regelprinzip der übergeordneten Steuerung .....	13
Bedienung und Visualisierung .....	14
6. Bedienung Holz- und Ölkessel .....	16
Schnittstelle zu Steuerschrank Holzheizung .....	16
7. Wirtschaftlichkeit .....	18
Investitionskosten .....	18
Energien Mengen, Energiekosten und CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	18
8. Betriebsoptimierung .....	18
Wirkungsgrad der Holzheizung .....	18
Anlagenoptimierung .....	18
Fazit Optimierung .....	19
9. Schlussfolgerungen .....	20

## Zusammenfassung

Gewächshäuser werden in der Schweiz wie auch im auf Gewächshauskulturen spezialisierten Holland in der Regel mit Öl-, Erdgas- oder Propangasheizungen beheizt. Es existieren in beiden Ländern wenige Erfahrungen im effizienten Beheizen von Gewächshäusern mit einer Holzheizung. Die Wärmeanforderungen von Gewächshäusern sind abhängig von der oft schnell wechselnden Witterung sowie der Bauart der Gewächshaushülle. Das führt zu neuen Anforderungen für eine Holzheizung.

Trotzdem haben sich die *Gebrüder Müller Agrarbetriebe* in Steinmaur aus ökonomischen und ökologischen Gründen entschlossen, zur Beheizung der neuen und der alten Gewächshäuser eine Holzheizung einzusetzen mit dem Ziel, den Heizölverbrauch von maximal 500'000 Liter zu substituieren.

Ziel des Forschungsprojektes war es, dieses Projekt zu begleiten und die Erkenntnisse daraus über verschiedene Kanäle, allen voran über das Netzwerk der *Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW)*, den weiteren in der Schweiz ansässigen Gewächshausproduzenten zukommen zu lassen.

Seit Anfang 2006 erzeugt nun ein Holzkessel mit 1'600 Kilowatt Heizleistung und einem 100 Kubikmeter grossen Energiespeicher die benötigte Wärme. Eine neue intelligente übergeordnete Steuerung ist zusammen mit dem grossen Speicher die Grundlage für den bisher sehr zufriedenstellenden Betrieb der Anlage. Die übergeordnete Steuerung berechnet aus den Betriebsdaten der letzten 24 Stunden und der Wetterprognose der nächsten 24 Stunden die notwendige Heizleistung und passt das Wärmeangebot dauernd den aktuellen Wetterbedingungen an. Sie sorgt damit für eine hohe Anlageneffizienz und für minimale Energieverluste. Dank der Steuerung und des grossen Speichers war bisher der Einsatz des bestehenden Ölkessels zur Spitzenabdeckung nicht erforderlich.

## Resumée

## Abstract

## 1. Ausgangslage

Die geplante Erweiterung der Gewächshausfläche von 1.5 Hektaren auf 2.5 Hektaren der Gebrüder Müller in Steinmaur machte die Vergrösserung der Heizleistung der Wärmeerzeugungsanlage erforderlich. Die hohen Ölpreise veranlassten den Bauherrn, nach Alternativen zum bestehenden Heizölkessel zu suchen.

Holz als ökologischer und seit der Verdoppelung der Ölpreise innert zweier Jahre auch ökonomischer Brennstoff stand von Beginn an im Vordergrund. Allerdings ist das Betreiben eines Holzkessels aufgrund der stark wetterabhängigen Anforderungen bei Gewächshäusern komplexer als beim konventionellen Betrieb zur Komfortwärmeerzeugung z.B. in Nahwärmenetzen.

Gemäss Aussagen der beiden grossen schweizerischen Holzkesselproduzenten und von Holzenergie Schweiz waren bis zur Realisierung dieses Projektes in der Schweiz keine Wärmeerzeugungsanlagen für Gewächshäuser bekannt, die zur Hauptsache mit einem Holzkessel betrieben werden. Auch in Holland werden Gewächshäuser praktisch ausnahmslos mit Erdgas beheizt. Es konnte nicht auf Betriebserfahrungen mit Holzheizungen zurückgegriffen werden.

Aus diesem Grund unterstützt das *Bundesamt für Energie (BFE)* im Rahmen des Forschungsprogramms Verfahrenstechnische Prozesse VTP das Projekt mit einem finanziellen Beitrag.

Die zusätzliche Prozessanalyse / -optimierung soll gewährleisten, dass die neue Wärmeerzeugungsanlage optimal in die Prozesskette eingebunden und bedarfsgerecht und energieeffizient betrieben werden kann.

## 2. Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde Einfluss genommen auf das Bauprojekt mit folgenden Zielen:

- Überprüfung des Anlagenkonzeptes mit Holzheizung, Speicher und bestehendem Ölkessel
- Erstellen des Betriebskonzeptes mit dem Ziel einer hohen Anlageneffizienz
- Erstellen einer Spezifikation für das übergeordnete Regelregime unter Berücksichtigung der speziellen Eigenheiten und Anforderungen von Gewächshäusern und Holzheizungen.
- Erstellen eines Messkonzeptes und Überprüfung des Baus der Messeinrichtungen zur Beurteilung der Ergebnisse
- Erstellen der notwendigen Beschreibungen
- Einführen und Konfigurieren einer geeigneten Energiebuchhaltung
- Überprüfung und Optimierung der Effizienz der Anlage nach der Inbetriebnahme durch regelmässige Messwertablesungen und Kontrolle von Kenngrössen
- Aufzeigen des Kundennutzens

## 3. Zusammenfassung der Ergebnisse

### POSITIVE BILANZ NACH EINEM HALBEN JAHR BETRIEBSZEIT

Seit Januar 2006 werden die Gewächshäuser der *Gebrüder Müller Agrarbetriebe* zur vollsten Zufriedenheit der Bauherrschaft beheizt. Die Zuverlässigkeit der Anlage ist hoch. Dank der intelligenten übergeordneten Steuerung, dem grossen Energiespeicher mit 100 m<sup>3</sup> Inhalt und einem optimalen Speichermanagement war der Einsatz des Ölkessels zur Spitzenabdeckung bisher nicht notwendig.

### WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die externen Investitionskosten für die gesamte Anlage betrugen CHF 800'000.-. Überdurchschnittliche Kosten verursachte dabei der Bau der Heizzentrale aufgrund extremer Wettereinflüsse (Wasser, Kälte). Die Energiekosteneinsparungen im Vergleich zu einer Ölheizung werden jährlich mehr als CHF 100'000.- betragen.

Das *Bundesamt für Energie* ermöglichte mit einem finanziellen Beitrag von CHF 27'000.- die Erbringung von zusätzlich notwendigen Ingenieurleistungen für die Anlagenauslegung, die Anlagenoptimierung und die Berichterstattung. Die Ergebnisse und Erfahrungen dieses Projektes sollen innerhalb der Branche für weitere Projekte genutzt werden können.

## CO<sub>2</sub>-ABGABE

Die *Gebrüder Müller Agrarbetriebe* haben mit der *Energie-Agentur der Wirtschaft* eine Zielvereinbarung erarbeitet und diese durch den Bund auditieren lassen. Mit der Realisierung dieser Holzheizung werden die Ziele dieser Zielvereinbarung deutlich übertroffen. Durch die Substitution von jährlich 500'000 Liter Heizöl wird die Emission von 1'340 Tonnen CO<sub>2</sub> vermieden.

## TECHNISCHE HIGHLIGHTS

Die Bauherren Stephan und Daniel Müller haben bei Ihrem Entscheid für den Bau der Holzheizung in verschiedenen Punkten Neuland betreten und entsprechende Risiken auf sich genommen. In der Schweiz werden Gewächshäuser praktisch ausnahmslos mit fossiler Energie oder Fernwärme beheizt. Dasselbe gilt auch für Holland, ein Land mit umfangreichen Erfahrungen beim Bau und beim Betrieb von grossen Gewächshäusern.

Gewächshäuser mit einer gegenüber Öl- oder Gasheizungen viel trägeren Holzheizung zu beheizen setzt gute Kenntnisse der Heizleistungsanforderungen voraus. Es muss berücksichtigt werden, dass die Wärmeverluste in der Nacht sehr gross sind und dass der Heizleistungsbedarf tagsüber dank der solaren Wärmeeinstrahlung auch im Winter gegen Null sinken kann. Einfluss auf den Heizleistungsbedarf haben die Wahl der Gewächshaushülle, der Einsatz von Energieschirmen, die Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeiten, der Bewölkungsgrad und ganz wichtig auch der von der Saison und dem Produktsortiment abhängige Temperatursollwert in den Gewächshäusern.

Als richtig und entscheidend für den effizienten Betrieb der Wärmeerzeugung erweisen sich nach einem halben Jahr Betriebszeit die folgenden technischen Konzepte:

- Ein grosser technischer Speicher (z.B. 100m<sup>3</sup>) ist zwingend erforderlich.
- Eine übergeordnete Steuerung für die Koordination zwischen Holzkessel und Ölkessel und einem optimierten Speichermanagement ist zwingend erforderlich. Die übergeordnete Steuerung berücksichtigt die speziellen Anforderungen der Gewächshäuser.
- Die Regulierung der Wärmeerzeugung ist vollständig getrennt von der Regulierung der Wärmeverteilung (Klimarechner).

Als technisches Highlight und Novum in der Schweiz kann der Einsatz der übergeordneten Steuerung der holländischen Firma *Romesq BV* bezeichnet werden. Seit einigen Jahren wird diese Software in Holland für die Wärmeversorgung von Gewächshäusern eingesetzt. Die Software wurde an die Eigenheiten einer Holzheizung adaptiert und die bisherigen Betriebserfahrungen sind sehr positiv.

Kernaufgabe der Software ist die Leistungsregelung der Wärmeerzeugungsanlage mit Bewirtschaftung des technischen Speichers. Dazu werden über eine ADSL-Verbindung via Richtstrahlantenne stündlich die Wetterprognosedaten der Wetterstation Zürich-Kloten eingelesen, mit den Erfahrungswerten der vergangenen 24 Stunden verglichen und daraus die erforderliche Heizleistung berechnet.

## BETRIEBSOPTIMIERUNG

Die Online-Überwachung des Anlagenbetriebes mit Aufzeichnung und Auswertung von Betriebsdaten ermöglicht eine gezielte Betriebsoptimierung. Bisher wurde durch sieben Eingriffe in die übergeordnete Steuerung, in die Holzkesselsteuerung und in hydraulische Armaturen der Betrieb optimiert.

## 4. Detailergebnisse

### WÄRMEANFORDERUNG VON GEWÄCHSHÄUSERN

Gewächshäuser stellen stark wetterabhängige Anforderungen an die Wärmeerzeugung. Diese Anforderungen sind nicht vergleichbar mit denjenigen im Komfortwärmebereich oder mit Prozesswärmeanforderungen in der Industrie.

Gewächshäuser weisen aufgrund der transparenten Hülle einen vergleichsweise schlechten U-Wert auf, was in der Nacht zu hohen Wärmeverlusten führt. Tagsüber sorgen die direkte und die diffuse Sonneneinstrahlung für einen erheblichen Wärmeeintrag. Die Heizleistung muss diese stark unterschiedlichen Anforderungen genügend schnell berücksichtigen.

Aussentemperatur und Sonneneinstrahlung sind nicht die einzigen leistungsbestimmenden Faktoren.

- Die Gewächshäuser werden zur Regulierung der Luftfeuchtigkeit oder bei zu hoher Innentemperatur zeitweise durchlüftet.

- Energieschirme reduzieren in der Nacht die Wärmeverluste. Bei Tagesanbruch müssen sie des Lichtes wegen wieder geöffnet werden. Das führt vor allem im Winter zu einem kurzzeitigen Wärmeverlust, welcher mit einer Heizleistungsspitze abgefangen werden muss.
- Die Gewächshaustemperaturen sind je nach Produktsortiment und Jahreszeit verschieden.
- Einfluss auf die Beheizung und Belüftung der Gewächshäuser haben auch der Wind (Chill-Faktor), der Regen (Luftfeuchtigkeit) und der Schnee (Einsturzgefahr Dächer).

Im Beispiel des Biobetriebes der Gebrüder Müller in Steinmaur sind die Anforderungen an die Raumtemperatur in den Gewächshäusern wie folgt festgelegt:

#### **Solltemperaturen am Tag**

- |                      |                       |                  |                        |
|----------------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| • Oktober - März:    | 10'000 m <sup>2</sup> | (Salat, Nüssli)  | Solltemperatur = 5 °C  |
| • April– September:  | 5'000 m <sup>2</sup>  | (Gurken)         | Solltemperatur ≥ 14 °C |
| • April – September: | 3'800 m <sup>2</sup>  | (Cherry-Tomaten) | Solltemperatur ≥ 16 °C |
| • April – September: | 1'200 m <sup>2</sup>  | (grosse Tomaten) | Solltemperatur ≥ 20 °C |

#### **Solltemperaturen in der Nacht**

- |                      |                       |                  |                        |
|----------------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| • Oktober - März:    | 10'000 m <sup>2</sup> | (Salat, Nüssli)  | Solltemperatur = 5 °C  |
| • April – September: | 5'000 m <sup>2</sup>  | (Gurken)         | Solltemperatur ≥ 10 °C |
| • April – September: | 3'800 m <sup>2</sup>  | (Cherry-Tomaten) | Solltemperatur ≥ 13 °C |
| • April – September: | 1'200 m <sup>2</sup>  | (grosse Tomaten) | Solltemperatur ≥ 18 °C |

#### **AUSWIRKUNGEN AUF DIE WÄRMEERZEUGUNG**

Auf die Wärmeerzeugung haben diese Anforderungen folgende Auswirkungen:

- Die Wärmeerzeugungsanlage muss den schnell wechselnden Leistungsbedarf sicher stellen.
- Die Gebäudehülle kann keine Wärme speichern. Ein technischer Speicher stabilisiert die Heizleistung, vermeidet zu viele Anfahrvorgänge und erhöht damit den Jahreswirkungsgrad.
- Es muss je nach Produktsortiment eine mittlere bis sehr hohe Verfügbarkeit gewährleistet werden, da unter Umständen schon kurzzeitige Temperatureinbrüche zu grossen Schäden führen.

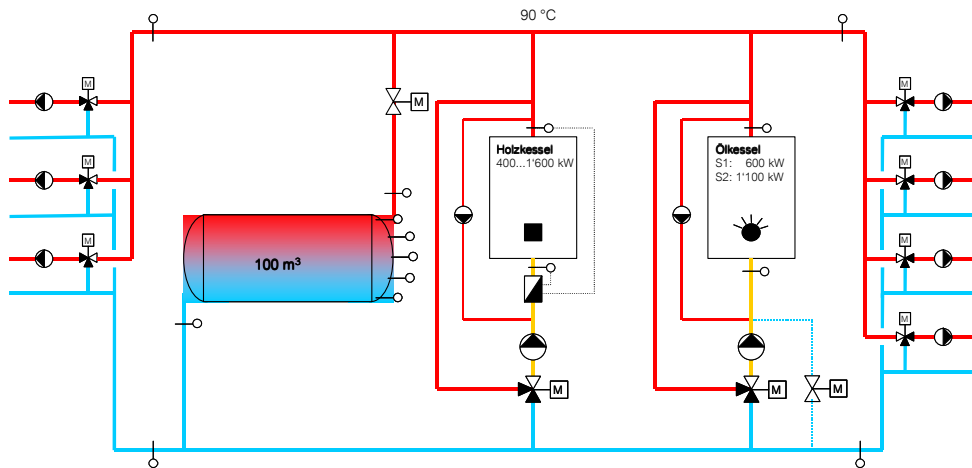
Da in diesem Projekt anstelle des üblichen Öl- oder Gaskessels ein Holzkessel die Wärme erzeugen muss, steigen die Anforderungen zusätzlich, denn

- ein Holzkessel reagiert bei Änderungen der Heizleistung mit einer bestimmten Trägheit
- ein Holzkessel kann bei Wegfall des Leistungsbedarfes nicht kurzfristig abgestellt werden
- der Wirkungsgrad eines Holzkessels verschlechtert sich im Teillastbereich und bei längeren Feuerunterhaltsphasen

#### **BEKANNTES ANLAGENKONZEPT – NEUES BETRIEBSKONZEPT**

Die Anlage ist als bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher konzipiert und entspricht weitgehend der entsprechenden Standard-Schaltung gemäss QM Holzheizwerke.

In der Schweiz wie auch in Holland werden Gewächshäuser normalerweise mit Öl- oder Gaskesseln beheizt. Es ist nicht bekannt, dass das vorliegende Anlagenkonzept (siehe Figur 1) für Gewächshäuser in der Schweiz schon einmal realisiert wurde.



**Figur 1:** Wärmeerzeugung mit Holzessel, Ökessel und Speicher; Wärmeverteilung über Mischgruppen in die Gewächshäuser (Grafik: Encontrol GmbH)

## ANLAGENKONZEPT

**Holzessel 1'600 kW:** Die automatische Holzfeuerung der Firma Schmid AG wird in einem regulierbaren Leistungsbereich von 400 kW bis 1'600 kW betrieben. Als Brennstoff werden Restholz aus der Holzverarbeitenden Industrie (Industriepellets, Holzbriketts) oder Hackschnitzel verwendet.

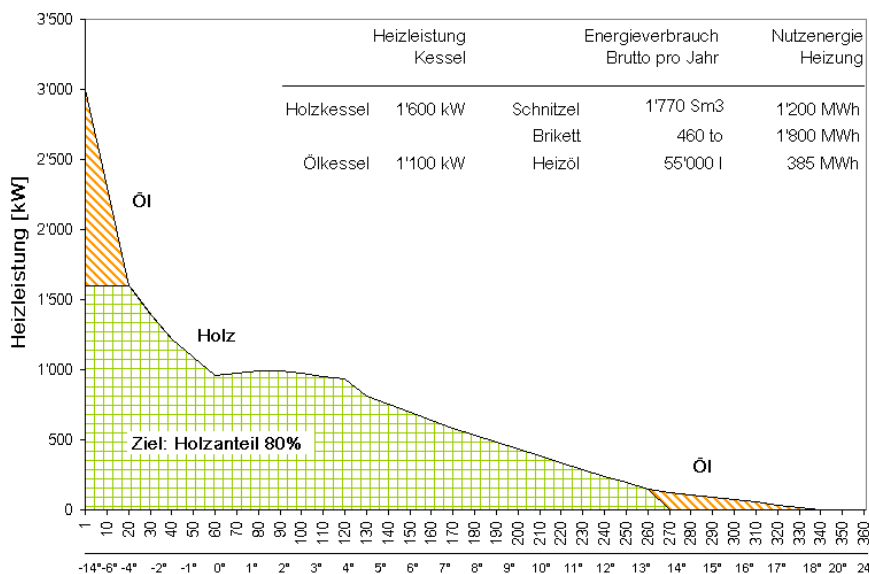
**Speicher 100 m<sup>3</sup>:** Ein liegender Speicher mit 100 m<sup>3</sup> Volumen dient der Spitzenabdeckung und dem Leistungsausgleich des Holzessels. Im Winter reicht der Wärmehalt des Speichers aus, um den Wärmebedarf der Gewächshäuser an einem bewölkten Tag abzudecken. Im Sommer kann der Speicher den Wärmebedarf während 24 Stunden und mehr abdecken.

**Ökessel 600 kW / 1'100 kW:** Der bestehende zweistufige Ökessel dient der Spitzenabdeckung im Winterbetrieb. Im Sommer kann der Ökessel den Wärmebedarf abdecken, wenn die Holzheizung wegen zu geringem Leistungsbedarf nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden kann.

**Wärmeverteilung:** Ein separater, nicht an das Wärmeerzeugungssystem gekoppelter „Klimarechner“ regelt über verschiedene Heizgruppen die Wärmeverteilung in die Gewächshäuser. Die Wärme wird einerseits verteilt über ein mehr oder weniger dichtes Heizungsrohrnetz und andererseits über Luftheizer. Die Vorlauftemperaturen der Heizgruppen werden aussentemperaturabhängig zwischen 50 °C und 90 °C geregelt.

## BETRIEBSKONZEPT

Figur 2 zeigt das mittlere Jahreslastprofil.

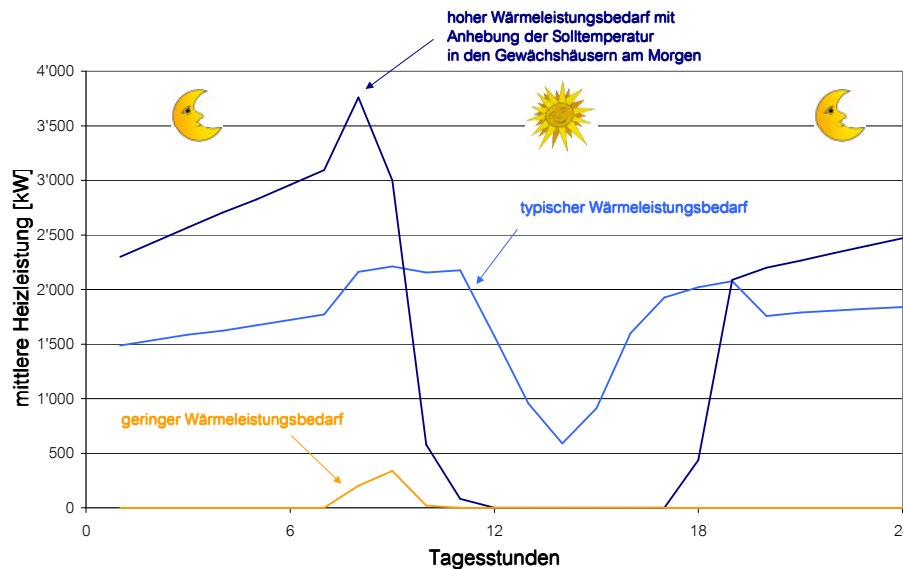


**Figur 2:** mittleres Jahreslastprofil: X-Achse = Anzahl Tage mit zugehöriger mittlerer Tagestemperatur. Lesebeispiel: an 120 Tagen pro Jahr ist die über 24 Stunden gemittelte Aussentemperatur  $\leq 4$  °C (Grafik: Encontrol GmbH)



Es ist das Ziel, mindestens 80% des Jahreswärmebedarfes mit Holz abzudecken. Der mittlere Leistungsbedarf verläuft in Funktion der Aussentemperatur gemäss obiger Grafik (Figur 2). Die Leistungszunahme im mittleren Teil der Grafik ist darauf zurückzuführen, dass die Gewächshaustemperatur in der Übergangszeit zur Beschleunigung des Wachstums der Produkte angehoben wird.

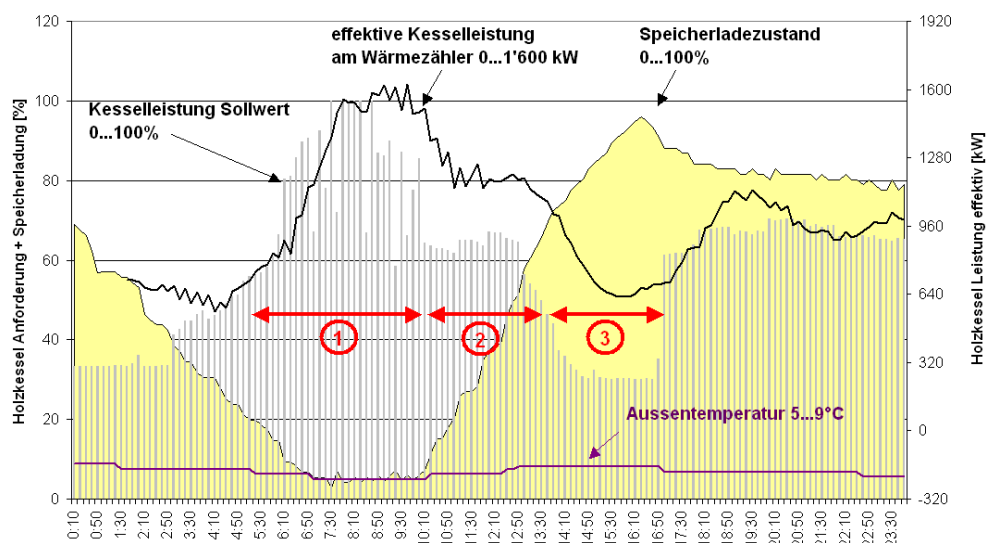
Zu beachten ist weiter, dass obiges Lastprofil nur einen über 24 Stunden gemittelten Verlauf darstellt. In Wirklichkeit ist der Leistungsbedarf aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen am Tag und in der Nacht viel unruhiger, wie die nachfolgende Grafik (Figur 3) zeigt.



**Figur 3:** Simulation von 24 Stunden Lastprofilen mit unterschiedlichem Leistungsbedarf (Grafik: Encontrol GmbH)

Der Lastverlauf innerhalb eines Tages verhält sich gemäss obigen simulierten Kurven.

- In einer klaren Winternacht bei tiefen Aussentemperaturen nimmt der Wärmeleistungsbedarf gegen Morgen bei weiterem Absinken der Aussentemperatur zu.
- In der Nacht werden die Gewächshaustemperaturen auf 5°C geregelt.
- Bei Tagesanbruch wird die Gewächshaustemperatur um einige Grad angehoben, was zu einer Bedarfsspitze führt, die durch den Speicher abgedeckt wird.
- Nach dem Sonnenaufgang reduziert sich der Wärmeleistungsbedarf innerhalb 1 – 2 Stunden stark, bei klarem Himmel sogar gegen Null.
- Gegen Abend oder bei bedecktem Himmel steigt der Wärmeleistungsbedarf wieder an.



**Figur 4:** Gemessenes Lastprofil vom Donnerstag, 23. März 2006 (Grafik: Encontrol GmbH)

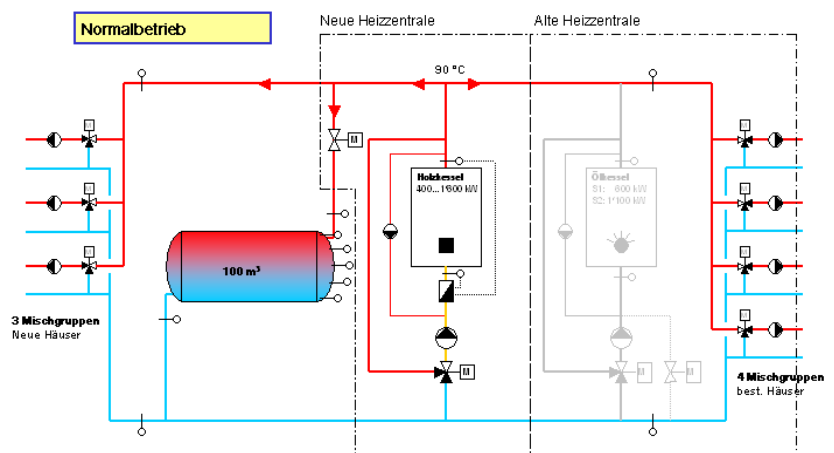
Der tatsächliche Lastverlauf innerhalb eines Tages wurde ausgewertet über die übergeordnete Steuerung der holländischen Firma *Romesq BV* und verhält sich gemäss Grafik Figur 4:

- Die am Wärmezähler gemessene Heizleistung folgt dem Sollwert mit einer Verzögerung von ca. einer halben Stunde.
- ① Gegen Morgen steigt der Heizleistungsbedarf aufgrund fallender Aussentemperaturen. Über die Wetterprognose ist der Steuerung bekannt, dass der maximale Heizleistungsbedarf am Morgen durch den Holzkessel alleine erbracht werden kann. Deshalb wird der Speicher bis 07:00 Uhr vollständig geleert. Danach wird die von den Gewächshäusern benötigte Heizleistung zu 100% durch den Holzkessel abgedeckt.
- ② Am Morgen ist der Himmel erwartungsgemäss bedeckt. Die benötigte Heizleistung in den Gewächshäusern reduziert sich aufgrund zunehmender Aussentemperaturen wieder leicht. Der Sollwert wird jedoch von der Steuerung so hoch angesetzt, dass der Speicher wieder geladen wird.
- ③ Am Nachmittag scheint die Sonne, die Gewächshäuser benötigen keine zusätzliche Wärme. Die Heizleistung wird auf den minimal möglichen Sollwert von 30% reduziert. Damit wird der Speicher bis um 17:00 Uhr wie gewünscht wieder vollständig geladen. Das Ziel, dass der Holzkessel tagsüber nie in den Feuerunterhalt versetzt werden muss, konnte erreicht werden.

## BETRIEBSARTEN

### Normalbetrieb

Der Holzkessel ist eingeschaltet und der Ölkessel ist ausgeschaltet. Die Leistung des Holzkessels wird durch die übergeordnete Steuerung im Bereich zwischen 400 kW und 1'600 kW vorgegeben. Die übergeordnete Steuerung sorgt mit einem intelligenten Speichermanagement dafür, dass Leistungsspitzen mit erster Priorität durch den Speicher abgedeckt werden.



Figur 5: Normalbetrieb Holzheizung / Speicher (Grafik: Encontrol)

### Bivalentbetrieb

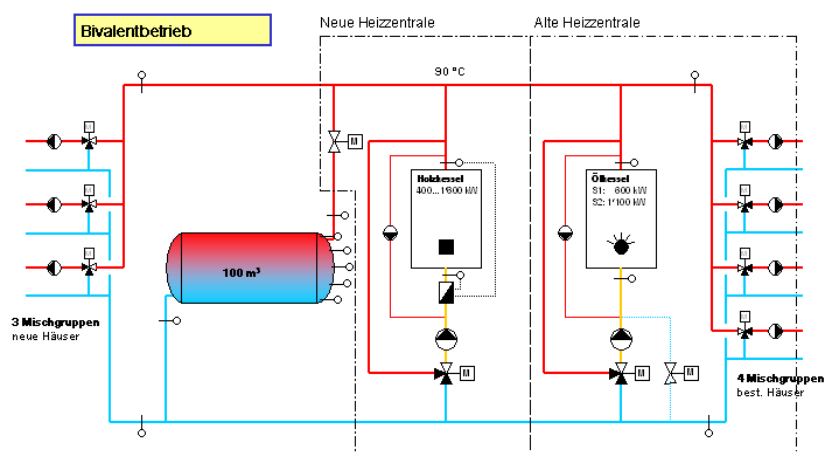
Reichen die Leistung des Holzkessels und die kurzfristig zur Verfügung stehende Leistung des Speichers nicht aus, muss der Ölkessel zugeschaltet werden. Dies geschieht nur unter folgenden Bedingungen:

**Ölkessel Stufe 1** wird eingeschaltet, wenn folgende 3 Bedingungen gleichzeitig während 15 Minuten erfüllt sind:

- Aussentemperatur  $< 0^{\circ}\text{C}$
- Speicherladezustand  $< 10\%$
- Sollwert Wärmeleistung  $> 2'200\text{ kW}$

**Ölkessel Stufe 2** wird eingeschaltet, wenn folgende 3 Bedingungen gleichzeitig während 60 Minuten erfüllt sind:

- Aussentemperatur  $< 0^{\circ}\text{C}$
- Speicherladezustand  $= 0\%$
- Sollwert Wärmeleistung  $> 2'700\text{ kW}$



Figur 6: Bivalentbetrieb Holzheizung / Ölkessel (Grafik: Encontrol GmbH)

### Feuerunterhalt

Die Leistungsabgabe des Holzkessels kann nicht kurzfristig gestoppt werden. Nach einem Stopp der Brennstoffzufuhr dauert es ca. 1.5 Stunden, bis die Kesselleistung von 100% auf 0% reduziert ist. Dann befindet sich der Holzkessel im Feuerunterhalt, d.h. die Regelung führt nur soviel Brennstoff zu, dass das Feuer nicht erlischt. Diese Betriebsart ist unwirtschaftlich und führt zu einer Verschlechterung des Jahreswirkungsgrad der Anlage.

Es ist Aufgabe der übergeordneten Steuerung, die Feuerunterhaltsphasen durch optimales Speichermanagement kurz zu halten.

### Sommerbetrieb

Im Sommer ist der Wärmeleistungsbedarf sehr gering. Der Holzkessel wird ganz abgeschaltet. Vor allem in der Nacht kommt es aber vor, dass die Temperaturen unter 18 °C sinken, weshalb die Heizung eingeschaltet werden muss.

In dieser Situation wird der Ölkessel eingeschaltet und der Holzkessel bleibt ausser Betrieb. Damit verhindert man unnötige Feuerunterhaltsphasen.

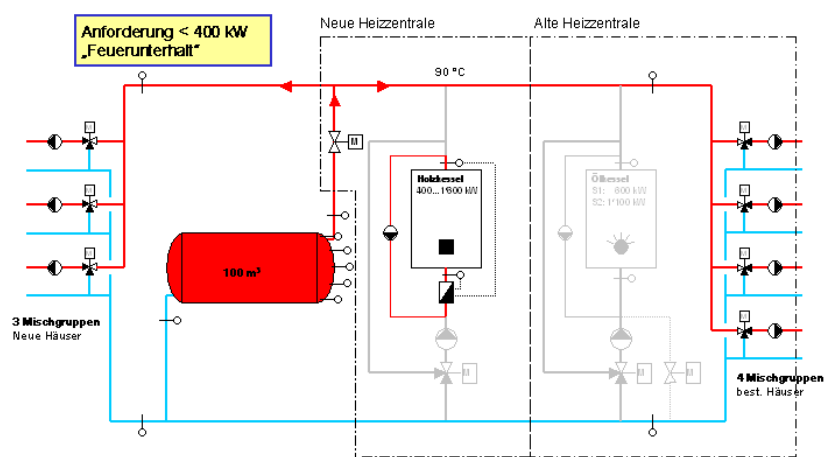
### Notbetrieb

Die Wahrscheinlichkeit von Notfällen ist gering. Es gibt verschiedene Not-szenarios:

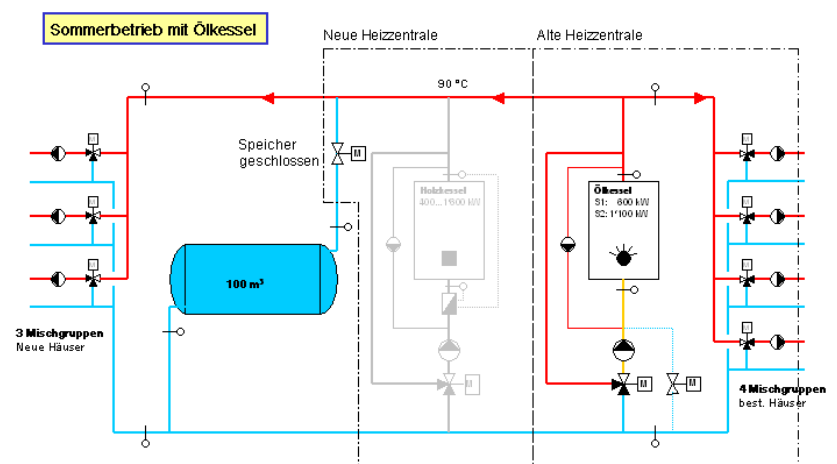
**Ausfall übergeordnete Steuerung:** Der Holzkessel kann auf Handbetrieb geschaltet werden. Die Heizleistung beträgt dauernd 100%, bis der Speicher gefüllt ist.

**Ausfall Holzheizung:** Der Ölkessel kann jederzeit von Hand auf Stufe 1 oder Stufe 2 geschaltet werden.

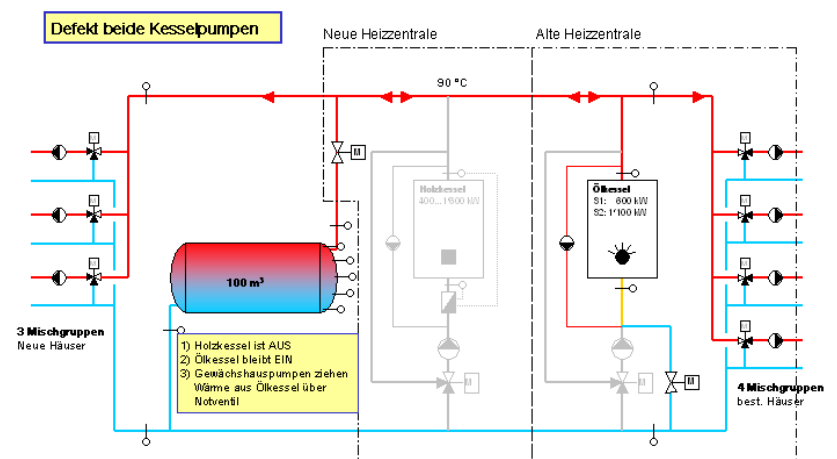
**Ausfall beider Heizungspumpen gleichzeitig:** Falls dieser seltene Fall eintreten sollte, dann stellt die Holzheizung ab, der Ölkessel bleibt eingeschaltet und die Gruppenpumpen holen sich die Wärme aus dem Ölkessel durch das in diesem Fall geöffnete Bypass-Ventil.



Figur 7: Feuerunterhalt (Grafik: Encontrol GmbH)



Figur 8: Sommerbetrieb Ölkessel (Grafik: Encontrol GmbH)

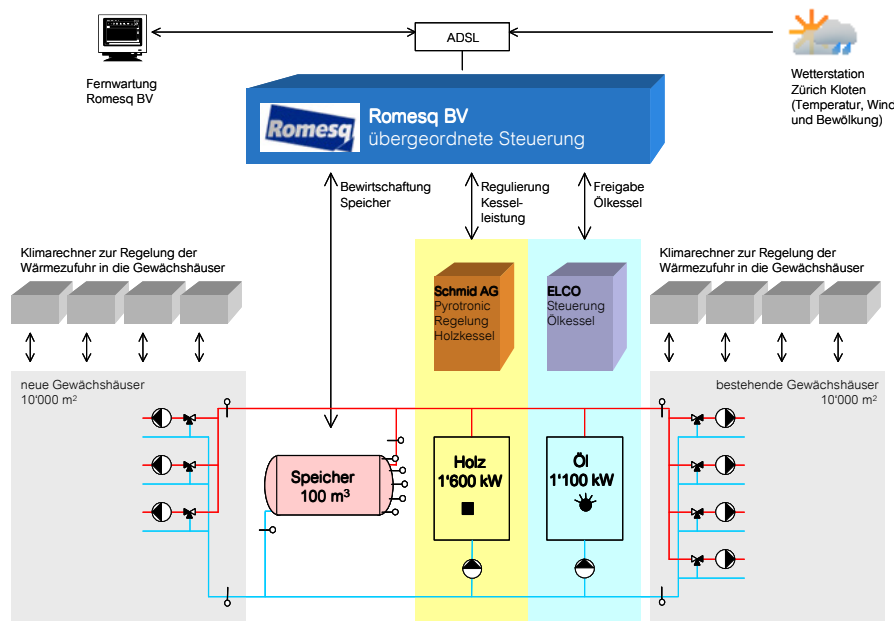


Figur 9: Notbetrieb (Grafik: Encontrol GmbH)

## 5. Übergeordnete Steuerung der Wärmeerzeugung

Für die Encontrol GmbH war es aufgrund der Erfahrungen nach mehrjähriger Beratungstätigkeit in der Gewächshausbranche eine zwingende Voraussetzung, dass es für den Betrieb einer Holzheizung eine intelligente übergeordnete Steuerung braucht. Wir haben die Anforderungen dafür spezifiziert und *Romesq BV* hat diese in ihr bestehendes Produkt aufgenommen und die Software entsprechend angepasst.

Das Steuerungskonzept für Wärmeerzeugung und -verteilung arbeitet nach folgendem Prinzip gemäss Figur 10):



**Figur 10:** Steuerungskonzept Wärmeerzeugung mit übergeordneter Steuerung als Master (Grafik: Encontrol GmbH)

### ZUSAMMENFASSUNG DER AUFGABEN DER STEUERUNGSKOMPONENTEN

übergeordnete Steuerung	Die übergeordnete Steuerung reguliert unter Berücksichtigung der Wetterprognose und des tatsächlichen Wetters der letzten 24 Stunden die Heizleistung des Holzkessels, bewirtschaftet den Speicher nach ökonomischen Kriterien und gibt den Ölkessel bei Bedarf frei.
Bewirtschaftung Speicher	Die übergeordnete Steuerung lädt den Speicher am Tag und entlädt ihn in der Nacht. Die Ladetemperatur beträgt konstant 90°C. Die Ladung erfolgt mit der minimal möglichen Heizleistung des Holzkessels von 30% mit dem Ziel, den Holzkessel tagsüber nicht im Feuerunterhalt betreiben zu müssen.
Regelung Holzkessel	Das Softwareprogramm der <i>Schmid AG</i> regelt entsprechend der Leistungsvorgabe der übergeordneten Steuerung die Brennstoffzufuhr in den Holzkessel und die optimale Verbrennung mit Lambda - Regulierung, Unterdruckregulierung und Luftmengenregulierung.
Steuerung Ölkessel	Wenn die Stufen 1 oder 2 des Ölkessels durch die übergeordnete Steuerung freigegeben werden, regelt die Steuerung im Schaltschrank der <i>ELCO</i> die Wärmeerzeugung des Ölkessels. Die Steuerung regelt den Ölkessel auf eine konstante Vorlauftemperatur mit Rücklaufhochhaltung und Überwachung.
Klimarechner	Die Wärmeverteilung in die Gewächshäuser wird durch die Klimarechner geregelt. Die Klimarechner lesen die aktuellen Wetterdaten (Aussentemperatur, Gewächshaustemperatur, Feuchtigkeit, Wind und Licht) ein und regeln entsprechend den eingestellten Sollwerten die Wärmezufuhr und die Gewächshausbelüftung. Die Klimarechner sind nicht an die Wärmeerzeugung gekoppelt.

## EIGENHEITEN DER HOLZHEIZUNG UND IHR EINFLUSS AUF DIE REGELUNG

Da die Holzheizung im Leistungsbereich 0...30% nicht regelbar ist, muss sie entweder mit 30% betrieben oder in den unwirtschaftlichen Feuerunterhalt mit 0% Leistung versetzt werden.

An das Regelkonzept wurde die Aufgabe gestellt, die Feuerunterhaltsphasen möglichst kurz zu halten. Es ist unwirtschaftlich, den Speicher tagsüber während 2 Stunden mit voller Heizleistung zu laden und danach den Kessel in den Feuerunterhalt zu versetzen. Es ist effizienter, den Speicher während 6 Stunden mit 30% der Heizleistung zu laden.

Diese Vorgabe erfüllt die übergeordnete Steuerung der Firma *Romesq BV* nach folgendem Prinzip:

- Bei rückläufiger Heizleistung (z.B. nach Tagesanbruch) bleibt der Sollwert bei 30% stehen und lädt den Speicher mit minimaler Leistung. Wenn der Speicher gefüllt ist, wird der Holzkessel zwangsläufig in den Feuerunterhalt versetzt (0% Leistung).
- Bei zunehmender Heizleistung wird die Wärme zuerst aus dem Speicher genommen, bis der Sollwert wieder auf 30% angewachsen ist. Bei 30% wird wieder eine minimale Heizleistung von 480 kW (=30%) erzeugt.

## DIE ÜBERGEORDNETE STEUERUNG – HOLLÄNDISCHE INNOVATION

Der übergeordneten Steuerung des holländischen Regelungsspezialisten *Romesq BV* fällt eine zentrale und wichtige Aufgabe zu. Sie betreibt das Wärmeerzeugungssystem während des ganzen Jahres im wirtschaftlichsten Arbeitspunkt.

Die Hauptfunktion ist die Leistungsregelung der Wärmeerzeugungsanlage mit Bewirtschaftung des technischen Speichers. Sie stützt sich einerseits auf die Wetterprognose der nächsten 24 Stunden und andererseits auf die tatsächlichen Wetterdaten der vergangenen 24 Stunden.

## REGELPRINZIP DER ÜBERGEORDNETEN STEUERUNG

Die aktuell benötigte Heizleistung wird nach folgendem Muster bestimmt:

### 1. Bestimmung der aktuell notwendigen Heizleistung

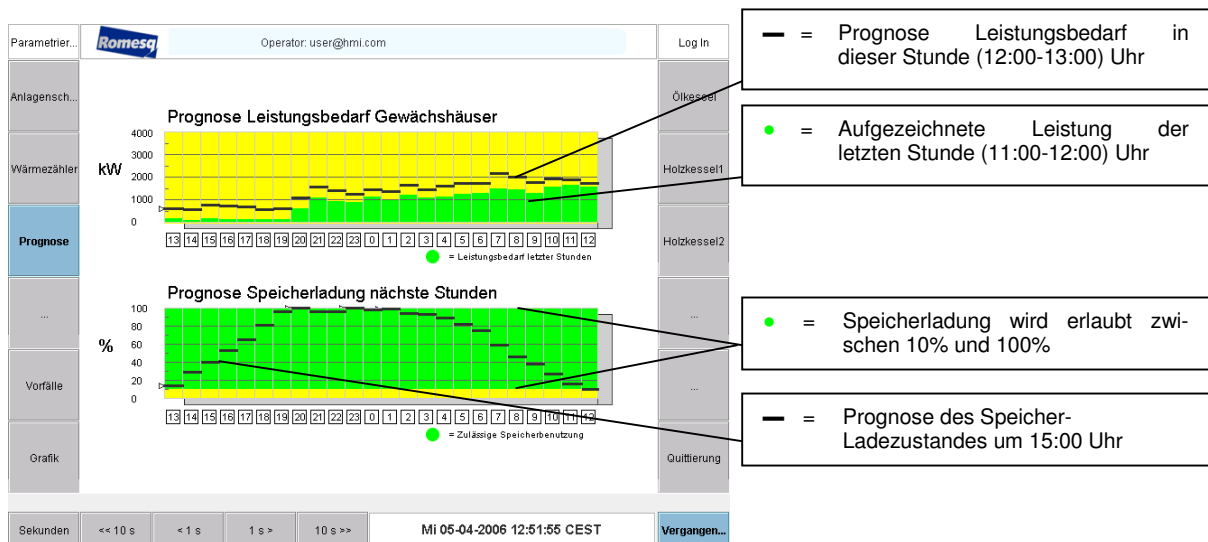
Zur Bestimmung der aktuell benötigten Heizleistung stützt sich übergeordnete Steuerung von *Romesq* auf die benötigte durchschnittliche Heizleistung der letzten 24 Stunden. Falls die effektive durchschnittliche Heizleistung der letzten 24 Stunden stark von der theoretischen Heizleistung abgewichen ist, wird die neue Heizleistung korrigiert.

### 2. Korrekturfaktor Wetterprognose

Es werden die Wetterdaten Temperatur, Wind und Bewölkungsgrad der letzten 24 Stunden sowie der nächsten 24 Stunden (Wetterprognose) miteinander verglichen. Die Daten stehen bei der Wetterstation Zürich Kloten zur Verfügung und werden von der übergeordneten Steuerung von *Romesq* über eine Online-Verbindung laufend eingelesen. Unterscheiden sich Vergangenheitswerte und Prognose voneinander, dann wird die Heizleistung korrigiert.

### 3. Korrekturfaktor Speicherladezustand

Es wird die durchschnittliche Heizleistung berechnet, die notwendig ist, um den Speicher in den nächsten 24 Stunden wieder voll zu laden. Um diesen Wert wird die aktuelle Heizleistung korrigiert. Prinzipiell wird der Speicher so bewirtschaftet, dass er innerhalb von 24 Stunden einmal ganz gefüllt und einmal ganz geleert, also optimal ausgenutzt wird.



**Figur 11:** Berechnung des Leistungsbedarfes in den Gewächshäusern (Grafik: Romesq BV)

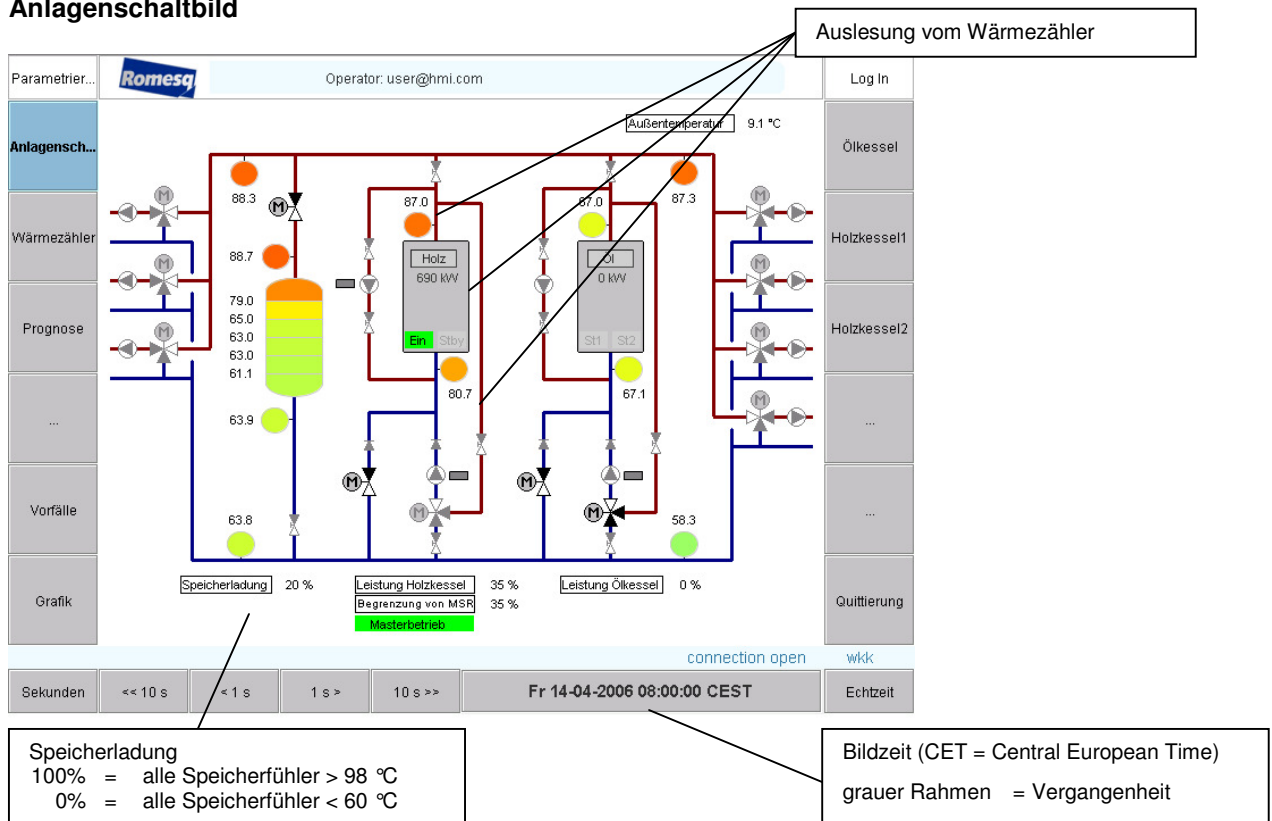
Das Resultat dieser Berechnungen wird in obiger Grafik (Figur 11) als *Prognose Leistungsbedarf Gewächshäuser* dargestellt und nach jeder Stunde erneuert. Dieses System ist selbstlernend.

## BEDIENUNG UND VISUALISIERUNG

Zur Bedienung und Visualisierung steht ein 12-Zoll Display mit Touchscreen zur Verfügung. Das Control-Panel ist eine eigenständige Einheit und getrennt vom Steuerungsrechner. Als Webserver und Datenrekorder entlastet das Control-Panel den Steuerungsrechner.

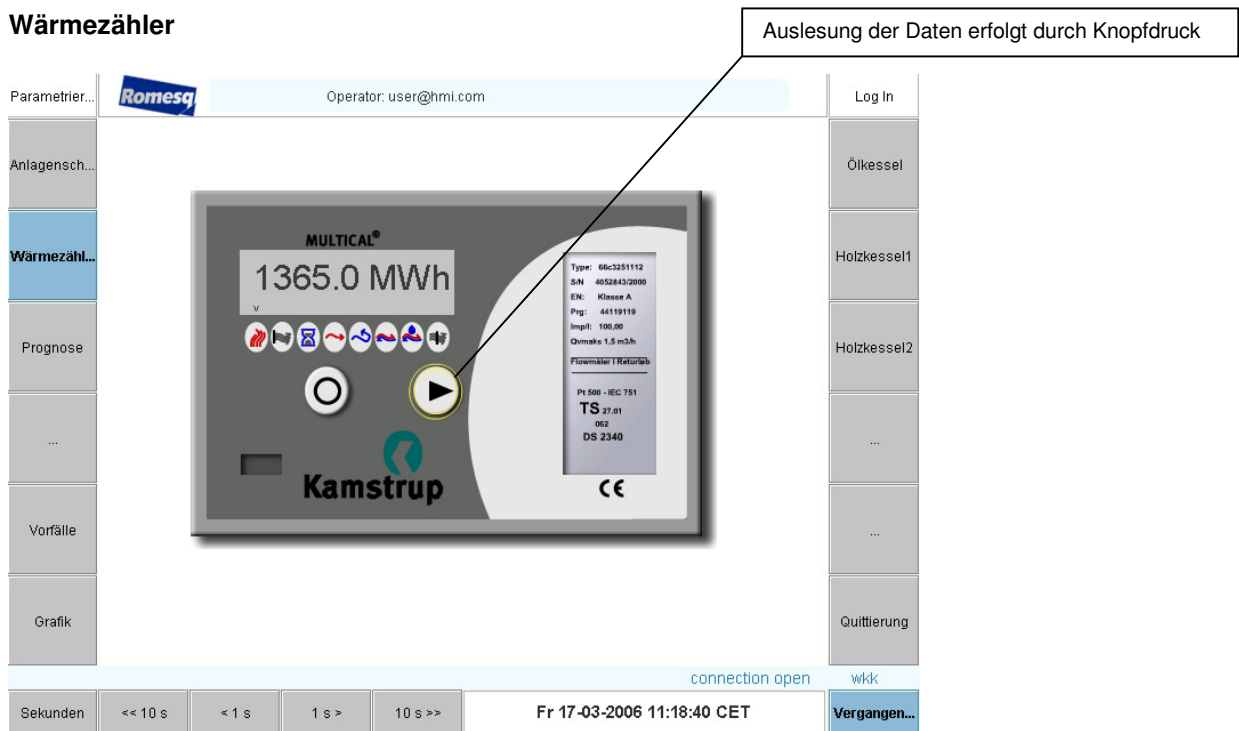
Auf dem Control Panel (Figur 12) sind mehrere Bilder wählbar, welche Echtzeitmesswerte oder Messwerte aus der Vergangenheit zeigen. Der Zeitpunkt der Beobachtung ist am unteren Rahmen dargestellt. Ein weisses Hintergrundfeld bedeutet Echtzeit, ein graues Hintergrundfeld bedeutet Vergangenheit.

## Anlagenschaltbild



**Figur 12:** Visualisierung Anlagenschaltbild (Grafik: Romesq BV)

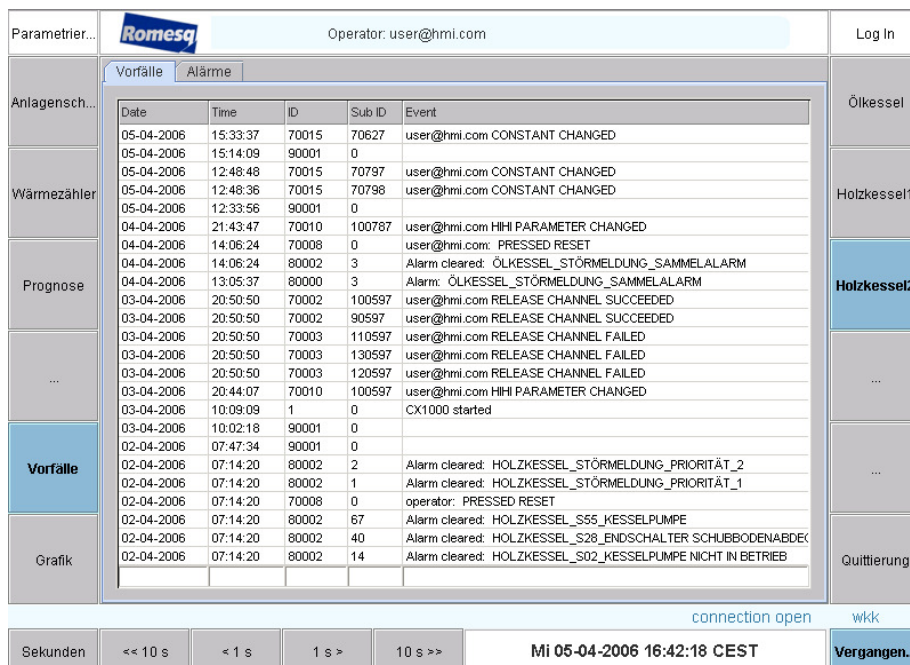
## Wärmezähler



**Figur 13** Visualisierung des Wärmezählers (Grafik: Romesq BV)

Der MULTICAL-Wärmezähler von Kamstrup ist grafisch auf das Display übernommen worden (Figur 13). Mittels Knopfdruck werden die gewünschten Daten vom Wärmezähler in die Visualisierung übertragen und auf dem Display dargestellt.

## Ereignisliste



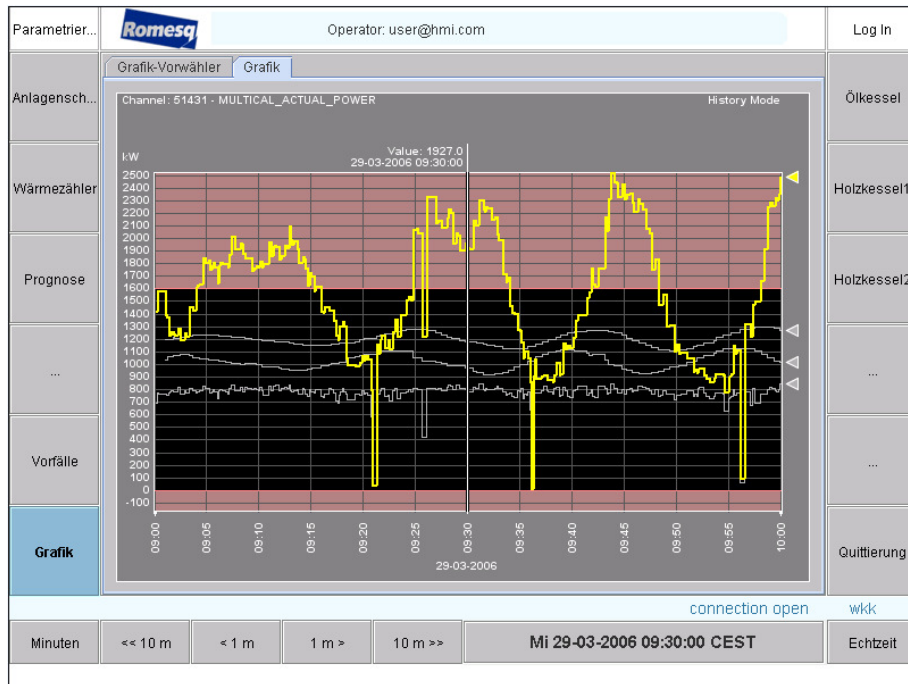
**Figur 14** Ereignisliste (Grafik: Romesq BV)

Wichtige Ereignisse wie Störmeldungen, Handeingriffe oder Störungsende werden durch ECOgen aufgezeichnet und aufgelistet unter Angabe von Datum und Zeit.

Die letzten 24 Ereignisse werden auf dem aktuellen Bildschirm gezeigt (Figur 14). Frühere Ereignisse sind durch Knopfdruck in die „Vergangenheit“ abrufbar.



## Datenlogger



**Figur 15** Datenlogger (Grafik: Romesq BV)

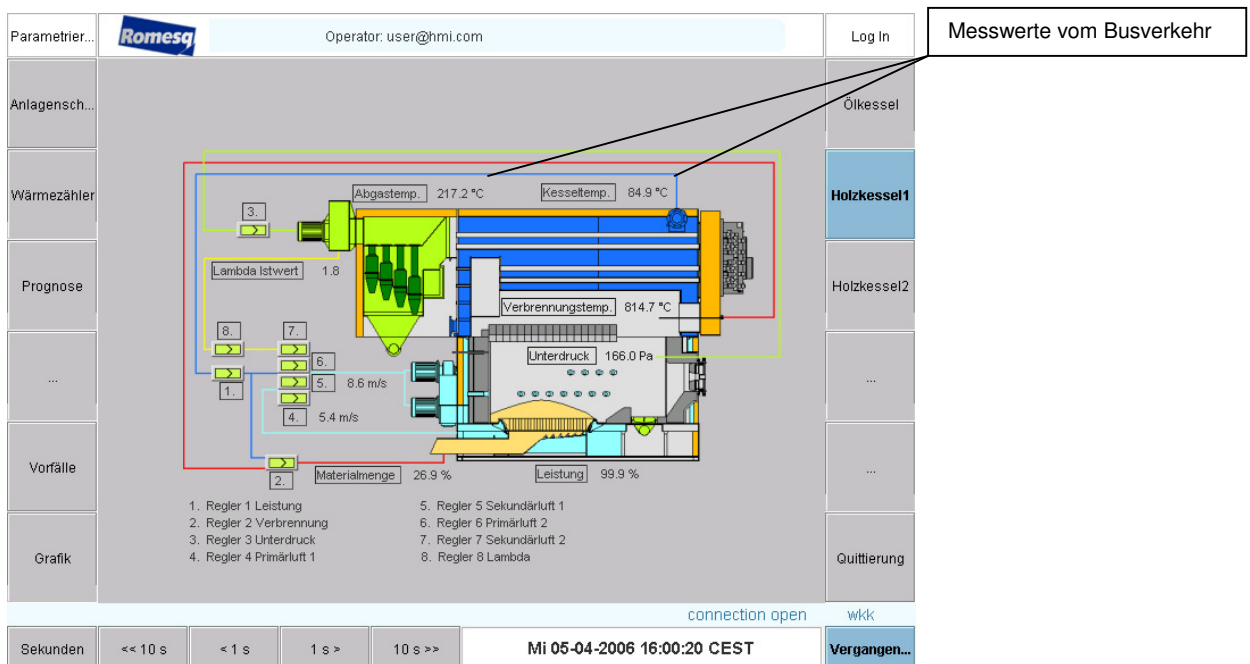
Sämtliche verfügbare Soll- und Istwerte können zu Analyse Zwecken grafisch dargestellt werden (Figur 15).

## 6. Bedienung Holz- und Ölkessel

### SCHNITTSTELLE ZU STEUERSCHRANK HOLZHEIZUNG

Analoge Istwerte des Holzkessels werden über eine Modbus Schnittstelle von der Holzkesselsteuerung an die übergeordnete Steuerung übertragen.

Die Signale sind auf dem Display der übergeordneten Steuerung visualisiert (Figur 16).

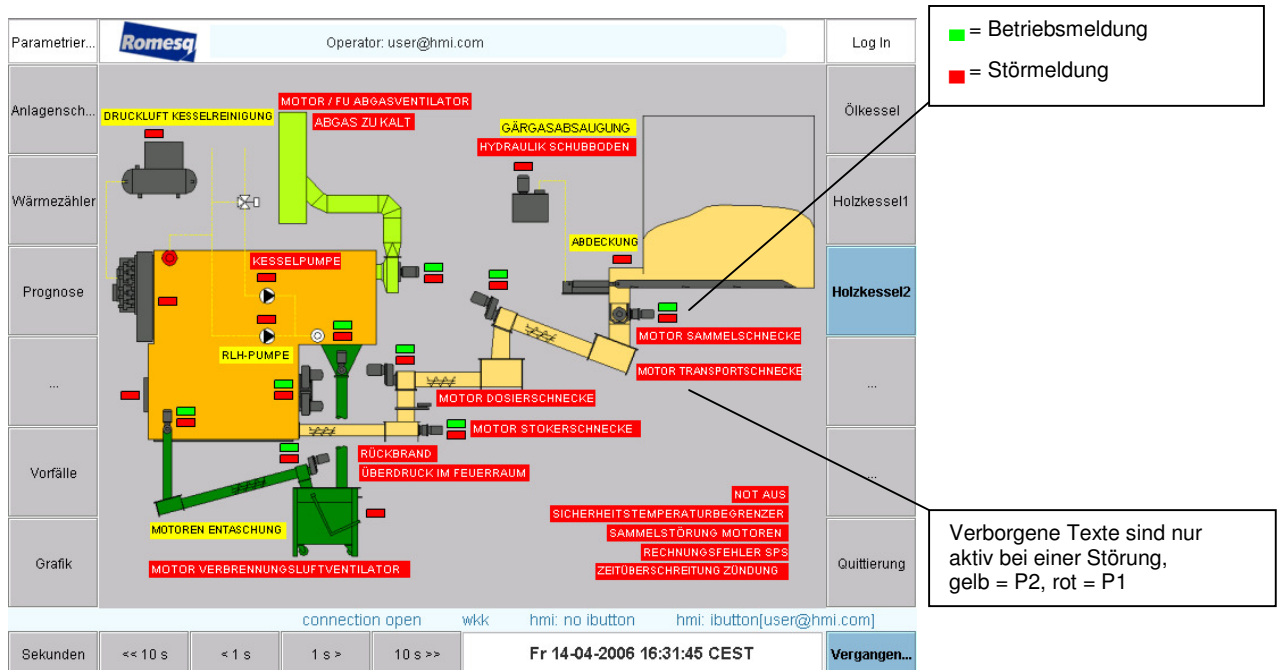


**Figur 16:** Visualisierung der Betriebswerte des Holzkessels (Grafik: Schmid AG)



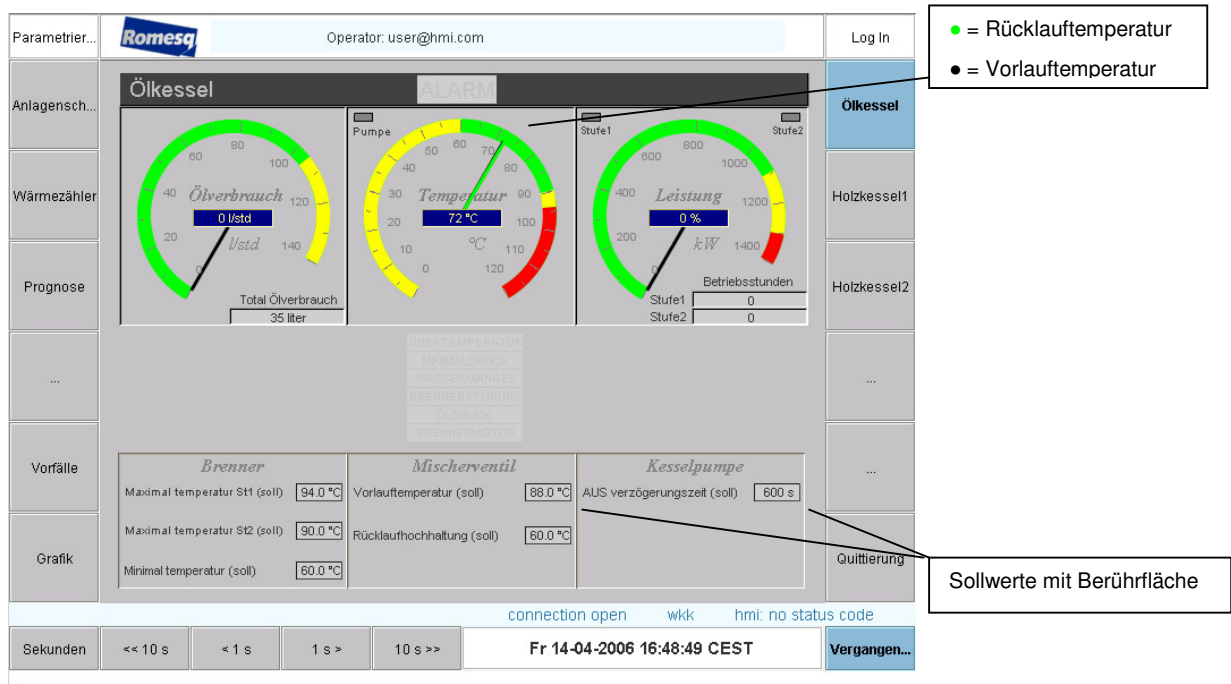
Betriebs- und Störmeldungen werden ebenfalls über die Modbus Schnittstelle von der Holzkesselsteuerung an die übergeordnete Steuerung übertragen.

Die Signale sind auf dem Display der übergeordneten Steuerung visualisiert (Figur 17).



**Figur 17:** Visualisierung der Betriebs- und Störmeldungen des Holzkessels (Grafik: Schmid AG)

Analoge Istwerte, Betriebs- und Störmeldungen des Ölkessels werden über physikalische Verbindungen vom Steuerschrank des Ölkessels an die übergeordnete Steuerung übertragen und dort visualisiert (Figur 18).



**Figur 18:** Visualisierung der Betriebs- und Störmeldungen des Ölkessels (Grafik: Romesq BV)

## 7. Wirtschaftlichkeit

### INVESTITIONSKOSTEN

• Holzheizung inkl. Siloaustragung und Transportanlage	CHF 260'000.-
• Bauarbeiten Heizzentrale, Silo, Umgebung	CHF 240'000.-
• Kaminanlage und Energiespeicher	CHF 60'000.-
• Installationen hydraulisch	CHF 80'000.-
• Installationen elektrisch und übergeordnete Steuerung	CHF 60'000.-
• Planung, Projektleitung und Betriebsoptimierung	CHF 100'000.-
• Förderbeiträge Kanton Zürich und Bundesamt für Energie	CHF – 80'000.-

### TOTAL Investitionskosten

**CHF 720'000.-**

### ENERGIEMENGEN, ENERGIEKOSTEN UND CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN

Mit der neuen Holzheizung wurden zwischen Januar und Juni 2006 rund 20'000 m<sup>2</sup> Gewächshausfläche beheizt. Dank gutem Speichermanagement musste der Ölkessel zur Spitzenabdeckung nicht zugeschaltet werden.

• Nutzwärmebedarf Jan – Juni 2006	2'600 MWh
• Brennstoffmenge Briketts aus Industrierestholz	750 to

Hätte dieselbe Nutzwärme mit einem neuen grösseren Ölkessel bei einem Jahreswirkungsgrad von 90% erbracht werden müssen, dann wären in derselben Zeit 290'000 Liter Heizöl verbraucht worden. Mit den heutigen Energiepreisen können die Mehrinvestitionen der Holzheizung in 6 bis 7 Jahren amortisiert werden.

Der zukünftige jährliche Nutzenergiebedarf wird aufgrund der Vergrösserung der Gewächshausfläche und des grosszügigeren Wärmeeinsatzes des Produzenten auf neu 4'500 MWh geschätzt. Das entspräche einem Heizölverbrauch von rund 500'000 Liter. Durch die Substitution dieser 500'000 Liter Heizöl wird eine Emission von 1'340 Tonnen CO<sub>2</sub> vermieden.

## 8. Betriebsoptimierung

### WIRKUNGSGRAD DER HOLZHEIZUNG

Der Wirkungsgrad des Holzkessels ist abhängig vom Energieinhalt des verwendeten Brennstoffes. Dieser ist nicht bekannt und wird vom Lieferanten nur abgeschätzt. Der Heizwert des Brennstoffs muss zuerst untersucht werden.

Als Brennstoff werden zu Briketts gepresste Holzfasern aus holzverarbeitenden Betrieben verwendet. Diese sind nicht so kompakt wie Pellets und werden zudem im Winter beim Zwischenhändler sowie im Schnitzelsilo mit Aussenluftkontakt gelagert. Die Briketts nehmen eine nicht bekannte Menge Feuchtigkeit auf.

In einer ersten Annäherung geht der Brennstofflieferant von einem Energieinhalt der Briketts von rund 4.5 kWh/kg aus. Das sind im Vergleich zu den handelsüblichen kleinen Pellets 9% weniger Energieinhalt. Nachfolgend die Ergebnisse des ersten halben Betriebsjahres.

- Per 20. Juni 2006 wurden 744 Tonnen Briketts (bei 4.5 kWh/kg = 3'348 MWh) verbraucht.
- Per 20. Juni 2006 hat der Wärmezähler eine Wärmemenge von 2'614 MWh gemessen.
- Das ergibt einen Jahreswirkungsgrad des Holzkessels von 78%.
- Zu berücksichtigen ist, dass in den ersten beiden Betriebsmonaten (Januar und Februar 2006) noch keine Leitungen gedämmt waren und die übergeordnete Steuerung noch nicht in Betrieb war.
- Bei einem Energieinhalt der Briketts von 4.0 kWh/kg käme der Kesselwirkungsgrad auf 88%.

### ANLAGENOPTIMIERUNG

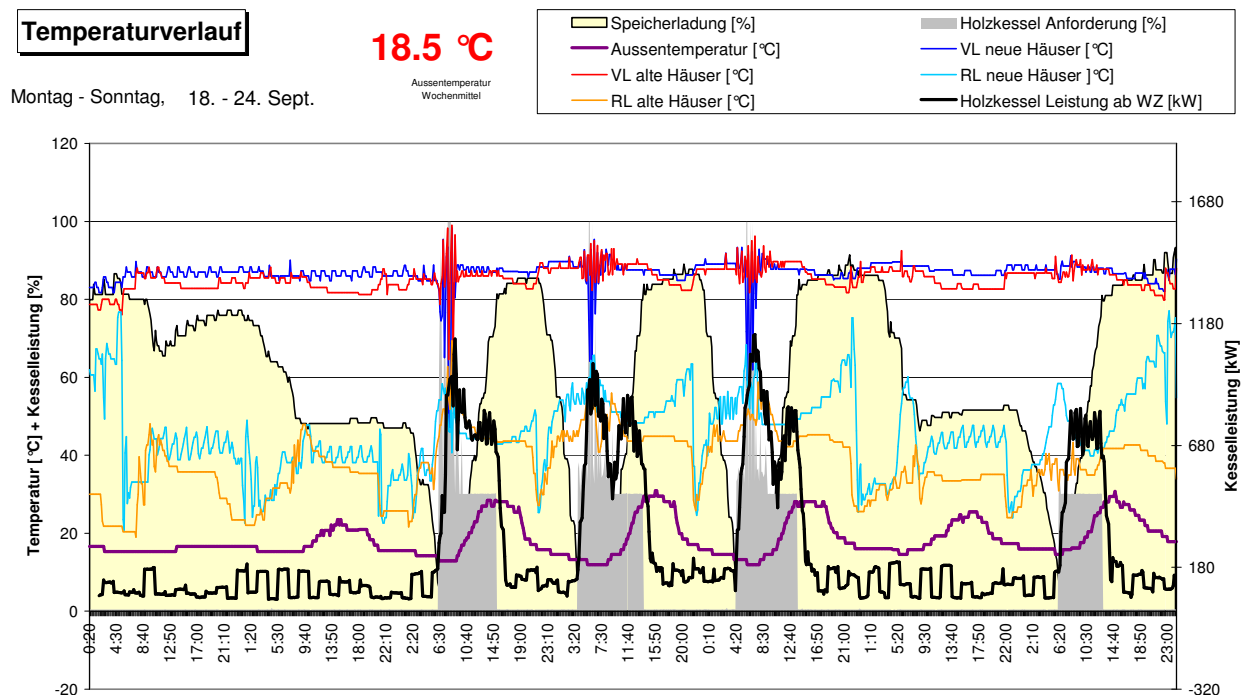
Die Überwachung der Betriebszustände seit Betriebsbeginn hatte einige Anpassungen in der Software der übergeordneten Steuerung zur Folge, die den Betrieb verbessert haben.

Folgende Funktionen wurden nachträglich realisiert:

- April 2006: Reduktion der RL-Temperaturen in den Gewächshäusern
- April 2006: Begrenzung der Speicherladung im Sommer auf 60%
- April 2006: Regulierung des Sollwertes für die Heizleistung auch unterhalb 30%
- Juli 2006: Automatischer Sommerbetrieb
- Juli 2006: VL/RL-Temperaturregelung des Holzkessels
- Juli 2006: Stabilisierung der Regelung
- Juli 2006: Reduktion der Kesselleistung im Feuerunterhalt

## FAZIT OPTIMIERUNG

Die bisherige Anlagenoptimierung hat zu einer Stabilisierung des Regelverhaltens, zu einer besseren Ausnutzung des Energiespeichers und zur Optimierung der Feuerunterhaltsphase geführt.



**Figur 19:** Darstellung der Betriebsdaten in der Übergangszeit (Grafik: Encontrol GmbH)

Die Grafik (Figur 19) zeigt ein typisches Verhalten in der Übergangszeit. Die Holzheizung wird innerhalb dieser sieben Tage nur vier Mal gestartet. Der Leistungssollwert beträgt jeweils 30%, der am Wärmezähler gemessene effektive Heizleistung ist etwas höher. Die Heizung wird gestartet in den frühen Morgenstunden und läuft durchschnittlich ca. 8 Stunden. In dieser Zeit versorgt sie die Gewächshäuser mit Wärme und lädt den Energiespeicher auf.

Ausserhalb der Betriebszeit wird ca. alle 3 Stunden etwas Holz zugeführt, damit das Feuer nicht erlischt. Der Kessel befindet sich in der Feuerunterhaltsphase.

An drei Tagen scheint die Sonne und bringt genügend Wärme, so dass die Holzheizung tagsüber nicht in Betrieb ist.

## 9. Schlussfolgerungen

Die *Gebrüder Müller Agrarbetriebe* in Steinmaur sind sehr zufrieden mit ihrer neuen Holzheizungsanlage. Bauherr Stephan Müller unterstützt als Präsident der Fachkommission Gemüse beim *Verband Bio Suisse* und als Mitglied im Leitungsgremium des *Verbandes Schweizerischer Gemüseproduzenten (VSGP)* die Weitergabe der Erkenntnisse der gut funktionierenden Anlage und motiviert andere Gewächshausproduzenten zur Nachahmung. Die *Gebrüder Müller Agrarbetriebe* sind zudem Mitglied der *Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW)* und besitzen eine durch das *BFE* auditierte Zielvereinbarung.

Das Bauprojekt ist dank den kurzen Entscheidungswegen und der hohen Fachkompetenz der beteiligten Unternehmen in kürzester Zeit ohne grosse Pannen realisiert worden. Einzig das kalte und feuchte Wetter erschwerte den Bau des Fundamentes der Heizzentrale und des Schnitzelbunkers und sorgte für unvorhergesehene Zusatzkosten.

Inbetriebnahme und Betrieb erfolgten reibungslos. Nach dem ersten Betriebsjahr können folgende Punkte festgehalten werden:

- Der Entscheid zu Gunsten einer Holzheizung war richtig.
- Der wöchentliche Betriebsaufwand für die Reinigung beträgt 2 Stunden.
- Der Heizölverbrauch kann zu 100% substituiert werden, im Sommer ist der Einsatz des Ölkessels nicht erforderlich.
- Der Support der beteiligten Lieferanten *Romesq BV* (Steuerung) und *Schmid AG* (Holzkessel) war sehr gut.

### Empfehlung für Folgeprojekte

Der Einsatz eines grossen Energiespeichers und einer übergeordneten Steuerung ist zwingend erforderlich. Die Anforderungen von Gewächshäusern können mit einer konventionellen Regelung, wie sie von Kessellieferanten zur Verfügung gestellt werden, nicht mit der erwünschten Effizienz erfüllt werden.

Die Bestimmung der Grösse der Kesselleistung und des Speicherinhaltes ist individuell und hängt von der Bauart der Gewächshäuser und der darin gepflegten Kulturen ab.

Die Steuerungen der Wärmeerzeugung und der Wärmeverteilung können unabhängig voneinander ausgeführt werden. Dies ermöglicht im Falle einer Sanierung wie auch beim Neubau den uneingeschränkten Einsatz der in Gewächshäusern eingesetzten Klimarechner.