

# Energetische und wirtschaftliche Optimierung der GA

Dipl. Wi.-Ing. Serafin von Roon, Dipl.-Ing Thomas Gobmaier,  
Prof. Dr.-Ing- Wolfgang Mauch  
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München  
- Dieser Beitrag ist in der HLH Heft 6, 2009 erschienen -

Im Rahmen eines durch das BMWi geförderten Projektes wurden die Daten der Gebäudeautomatisation (GA) eines Bürogebäudes rechnergestützt ausgewertet, um optimale Betriebsparameter und die damit verbundenen Einsparpotenziale zu ermitteln. In diesem Beitrag soll die dabei angewendete Vorgehensweise zur Analyse von GA-Daten gezeigt und mit den Ergebnissen des Projektes veranschaulicht werden.

Für die Übergabe eines neuen Gebäudes bzw. neuer gebäudetechnischer Anlagen werden meist die Parameter, wie Luftwechsel und Vorlauftemperaturen auf maximale Werte eingestellt, um Reklamationen bei der Abnahme vorzubeugen. Diese wenig effiziente Betriebsweise ist für den Nachweis der Leistungsfähigkeit der Anlagen geeignet, nicht jedoch für einen dauerhaften energetisch optimalen und kostengünstigen Betrieb. Nach der Abnahme ist daher stets eine Einregulierung und Optimierung der Parameter auf den realen Betriebsfall notwendig.

Verschiedene messtechnische Untersuchungen der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. zeigen, dass häufig eine Optimierung des Regelsystems wegen der hohen Komplexität und der fehlenden Möglichkeit zur Einsichtnahme in die Programmierung ausbleibt, und dem Betreiber des Gebäudes ein Anlagenbetrieb ohne Störungen genügt. Moderne GA-Anlagen bieten jedoch die Möglichkeit, Daten wie Temperaturen oder Stellwerte zu protokollieren und mittels PC auszulesen. Die Auswertung dieser Daten ermöglicht eine Funktionskontrolle von Sensoren und Regelung sowie die Ermittlung von optimalen Parametern und deren Einsparpotenziale, ohne die Programmierung der GA zu kennen.

Die Analyse besteht aus den Arbeitspaketen Validierung der Sensorik, Prüfung des Regelverhaltens, Aufstellen von Energiebilanzen und Analyse der Energiebilanzen.

## **Validierung der Sensorik**

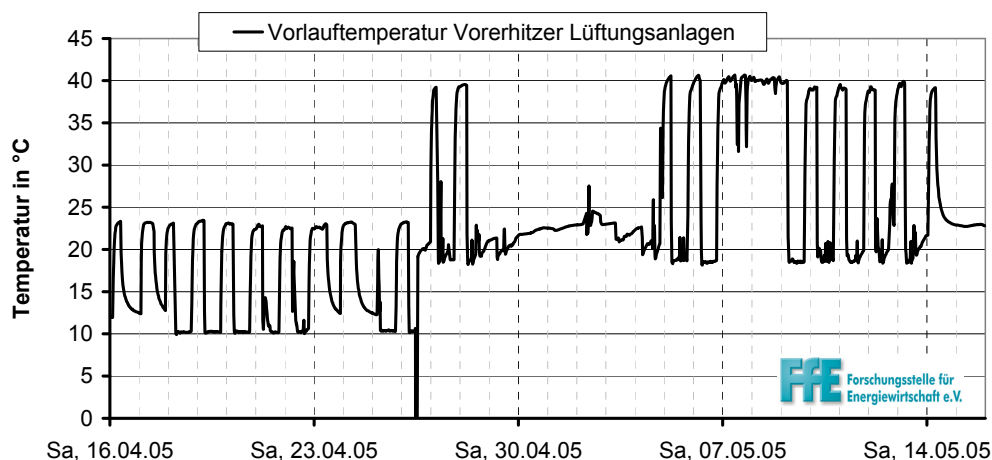
Um für die weiteren Auswertungen auf verlässliche Daten zugreifen zu können, müssen zuerst die von den Sensoren gelieferten Werte auf Plausibilität geprüft werden. Neben dem Ausfall von Kabeln und schlechten Verbindungen können auch vertauschte Datenpunktbenennungen oder falsche Montagepunkte für fehlerhaftes Regelverhalten verantwortlich sein.

Weiterhin können defekte Sensoren, falsche Einbaupositionen, defekte Auswertungs-elektronik oder vertauschte Kabel sowie auch in der Weiterverarbeitung durch die GA doppelt vergebene Namen, falsche Beschriftungen oder vergessene manuell gesetzte Werte auftreten. Werden ungültige Werte weiter verarbeitet, so ist das Ergebnis unbrauchbar. Daher wurden alle Werte der GA (Betriebsmeldung, Gerätestellung,

Schaltbefehl, Sollwert-Vorgabe, Stellwerte und Messwerte) einer eingehenden Validierung mit den folgenden Prüfungen unterzogen:

- Wertebereich: Jeder Wert muss in einem definierten Wertebereich liegen. Temperaturen unter  $-20\text{ °C}$  oder über  $100\text{ °C}$  sind für Luft- oder Wassertemperaturen pauschal unglaubwürdig.
- Zeitliche Dynamik: Temperaturen, die über Tage konstant sind, können nur Sollwerte sein. Unterliegt das Signal einem geringen Rauschen um einen Mittelwert z. B. durch einen AD-Wandler, ist sonst aber konstant, so ist fraglich ob ein funktionsfähiger Sensor angeschlossen ist. Eine große Änderung von Messwerten in einem sehr kurzen Zeitraum (z. B. Wassertemperatur in 3 s von  $6\text{ °C}$  auf  $90\text{ °C}$ ) ist unglaubwürdig. Deshalb ist es fraglich ob der Sensor überhaupt einen gültigen Wert liefern kann.
- Anlagen-, Medium-, Betriebs- oder Sensorspezifische Größen: Jeder Sollwert, Stellwert oder Messwert hat einen Wertebereich, der für die Anlage typisch ist. Zur Validierung dieser Werte ist ein detailliertes Wissen über die Anlage und deren Betriebsparameter notwendig.

Ein Beispiel für die Validierung der sensorspezifischen Größen zeigt **Abbildung 1**. Um die Vorlauftemperatur des Vorerhitzers der Lüftungsanlagen für die Büros erfassen zu können, wurde für das Projekt der Einbau eines Temperatursensors von einem Installationsunternehmen durchgeführt. In **Abbildung 1** sind die von dem Sensor gelieferten Werte ab dem 16. April dargestellt. Die Lüftungsanlage läuft jeden Tag zu den normalen Bürozeiten. Die Validierung ergab, dass eine untere Temperatur von  $10\text{ °C}$  für die Lufterhitzer im ausgeschalteten Zustand unwahrscheinlich ist, da die Temperatur im Heizungskeller höher liegt. Die darauf folgende Systemanalyse ergab, dass in diesem Zeitraum die Heizwasser-Rücklauftemperatur des Lufterhitzers bei Betrieb weitaus höhere Temperaturen hatte und sich bei Anlagenstillstand an die Raumtemperatur im Heizungskeller anpasste. Folglich zeigte der Sensor eine falsche Temperatur an. Am Dienstag den 26. April wurde der PT100 Temperatursensor zusammen mit zahlreichen anderen gegen aktive Sensoren ausgetauscht. Am Montag den 9. Mai waren die Nachbesserungsarbeiten abgeschlossen, danach zeigte der Sensor ein nachvollziehbares Verhalten.



**Abbildung 1:** *Austausch eines Sensors nach der Validierung*

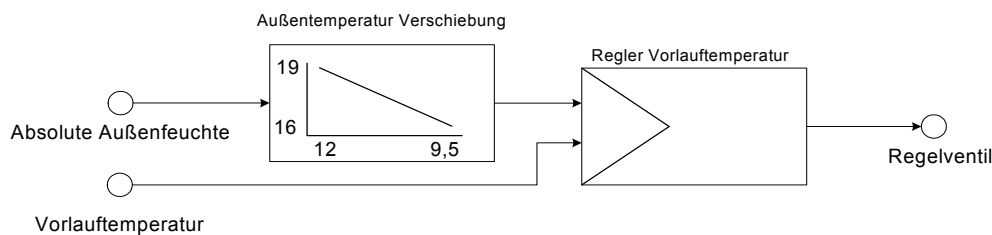
Dieses Beispiel zeigt die Notwendigkeit, auch Daten mit prinzipiell sinnvollem Verlauf auf der Basis weiterer Informationen, wie z. B. Anlagenschemata, Außentemperatur, Umgebungstemperatur oder externen Wetterdaten zu prüfen.

Eine automatisierte Validierung der Daten auf Sensorausfälle oder Überschreitung der physikalischen Wertebereiche ist Stand der Technik. Eine detailliertere Validierung erfordert viel Wissen, um die Anlage und die Zusammenhänge, welches entweder von einem Projektbearbeiter eingegeben werden muss, oder aus einem vorhandenen Modell einer Anlage exportiert werden kann. Ohne ein detailliertes Anlagenmodell oder die Erfahrungen und Kenntnisse eines Technikers ist eine fundierte Validierung von Daten nicht möglich.

### Prüfung des Regelverhaltens

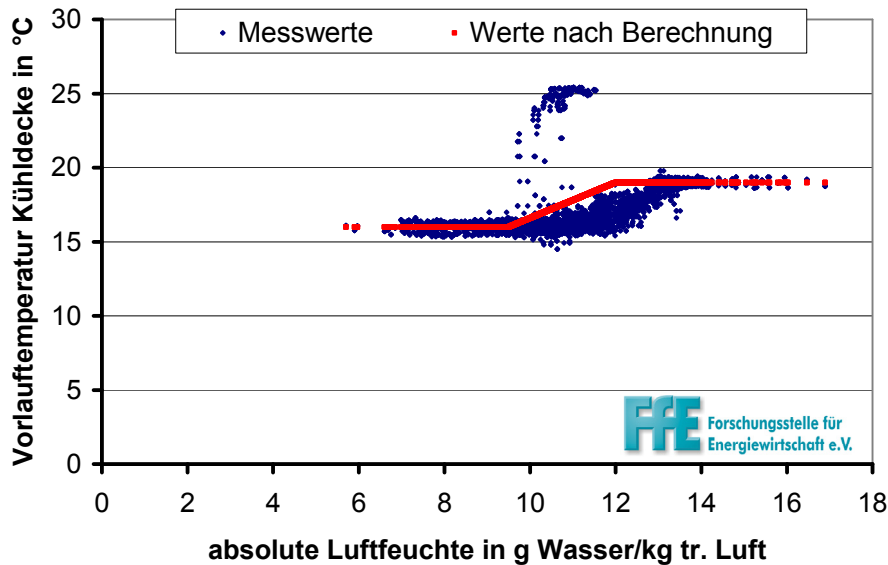
Im nächsten Schritt wird geprüft, ob das Regelverhalten den Vorgaben entspricht und sinnvoll ist. Neben falschen Parametern für die Regelung können auch die Wahl eines falschen Eingangssignals oder eine andere Auslegung der Vorgaben zu wenig sinnvollem Regelverhalten führen. Zur Prüfung des Regelverhaltens werden Eingangsgröße und Ausgangsgröße in einem Streudiagramm aufgetragen. Dabei sollte das gewünschte Regelverhalten deutlich erkennbar sein.

Zur Vermeidung von Kondenswasserbildung in den Kühldecken des Bürogebäudes wird die Vorlauftemperatur nach der absoluten Feuchte der Außenluft gesteuert. **Abbildung 2** zeigt das Regelschema.



**Abbildung 2:** *Regelschema für die Vorlauftemperatur der Kühldecken*

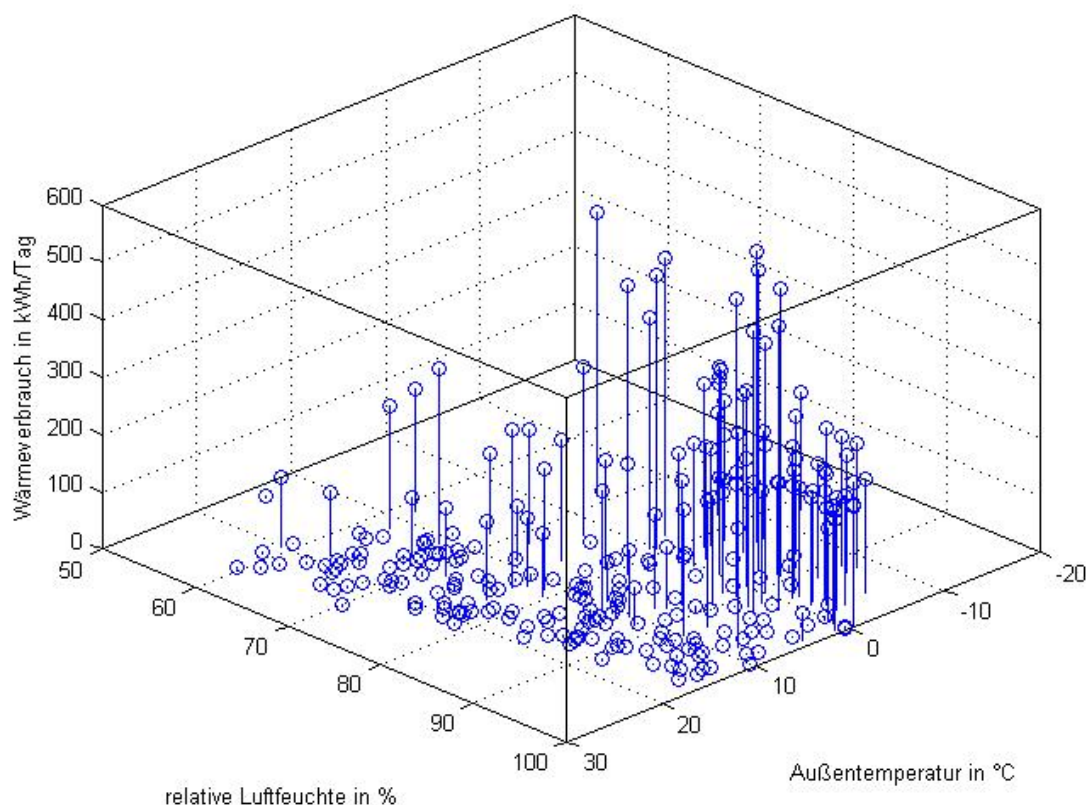
In Abhängigkeit der absoluten Luftfeuchte (in g Wasser / kg trockener Luft) wird die Vorlauftemperatur in einem Temperaturbereich von 16 °C bis 19 °C geregelt. **Abbildung 3** zeigt den Vergleich zwischen der nach dem Regelschema berechneten Vorlauftemperatur (rote Punkte) und der gemessenen Vorlauftemperatur (blaue Punkte) in einem Streudiagramm. Die blauen Punkte im Temperaturbereich von 20 °C bis 26 °C wurden bei Anlagenstillstand ohne Regelung gemessen. Die Abbildung zeigt, dass das Regelverhalten bis auf eine Verschiebung auf der x-Achse mit den berechneten Werten übereinstimmt; die Regelung arbeitet den Vorgaben entsprechend. Die Verschiebung auf der x-Achse entsteht durch die Berechnung der absoluten Luftfeuchte über die relative Luftfeuchte und die Außentemperatur, welche etwas geringere Werte liefert als der Sensor der absoluten Luftfeuchte.



**Abbildung 3:** *Analyse des Regelverhaltens der Vorlauftemperatur der Kühldecken*

Eine andere Darstellungsweise wurde für den Energieverbrauch des Dampfbefeuchters in Abhängigkeit der beiden Parameter Außenlufttemperatur und –feuchtigkeit gewählt. Zur Darstellung des von zwei Eingangsparametern abhängigen Energieverbrauchs wurde das in **Abbildung 4** dargestellte dreidimensionale Streudiagramm generiert.

Da besonders bei niedrigen Außentemperaturen und niedriger Luftfeuchtigkeit der Dampfbefeuchter mehr arbeiten muss, wäre eine in Richtung niedriger Außentemperaturen und niedriger Luftfeuchte ansteigende Rampe zu erwarten. In dieser Darstellung zeigen sich zwei Leistungsbereiche mit Verbräuchen um 200 kWh/Tag und 500 kWh/Tag. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Luftparametern und dem Energieverbrauch lässt sich nicht erkennen. Bei der weiteren Analyse vor Ort zeigte sich, dass der Luftfeuchtesensor der Zuluft defekt war, weshalb der Dampfbefeuchter nur zeitweise die Freigabe erhielt.



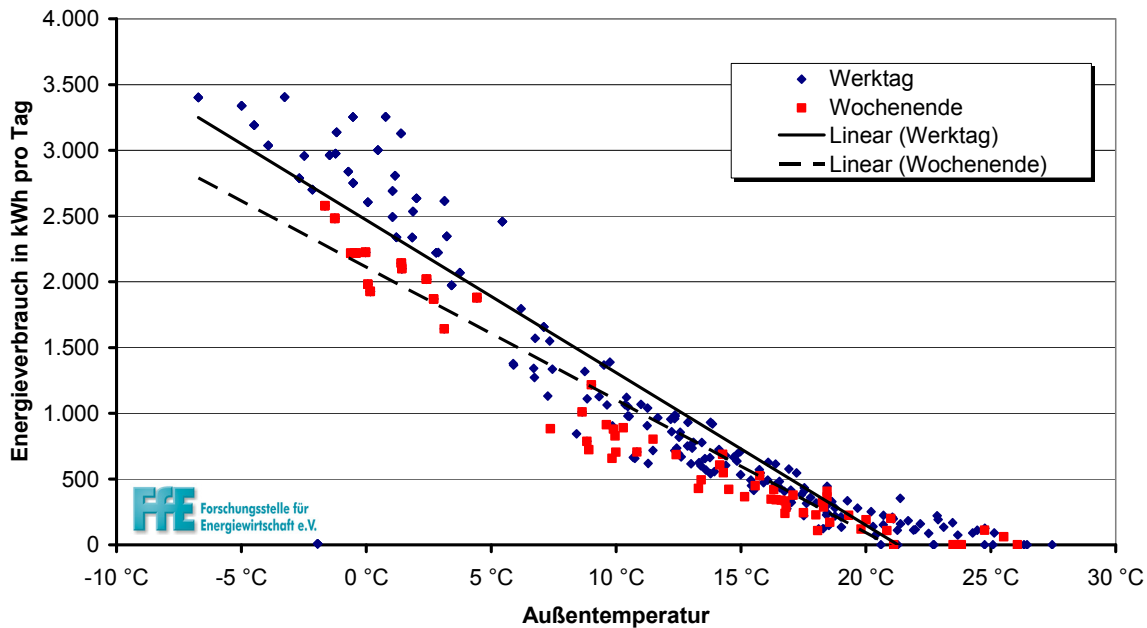
**Abbildung 4:** *Wärmeverbrauch des Dampfbefeuchters in Abhängigkeit von Außentemperatur und relativer Außenluftfeuchtigkeit*

### **Aufstellen von Energiebilanzen**

Nachdem die Messdaten um die Werte der defekten Sensoren bereinigt waren, wurden Energiebilanzen erstellt. Im Vergleich zu den ersten Schritten, bei denen immer nur eine einzelne Komponente geprüft wurde, ermöglicht eine Energiebilanz Aussagen zum Zusammenwirken von Gebäudehülle, Anlagen, Regelung und Nutzern. Hierzu wurden die mittels Wärmemengenzählern gemessenen Heizwärmeverbräuche nach der Außentemperatur sortiert (Heizkurve) und in ein Streudiagramm eingetragen.

Erwartungsgemäß ist mit sinkenden Außentemperaturen ein steigender Heizwärmeverbrauch zu erkennen. Da sich zwei Punktwolken mit unterschiedlicher Steilheit abzeichneten, wurde in **Abbildung 5** zusätzlich zwischen Werktagen (blau) und Wochenenden (rot) unterschieden. Der Wärmeverbrauch in den Heizkreisen ist an den Wochenenden geringer als an den Werktagen. Außerhalb der Bürozeiten wird in der Heizperiode eine Raumtemperatur von 18 °C gehalten, wodurch der Energiebedarf geringer als zu Bürozeiten mit einer Raumtemperatur von 21,5 °C war.

Es empfiehlt sich, die Energiebilanzen grundsätzlich tiefer gehend zu analysieren, da eine genaue Betrachtung weitere Erkenntnisse über die verschiedenen Einflussparameter liefern kann.



**Abbildung 5:** Wärmeverbrauch in den Heizkreisen

### Analyse der Energiebilanzen

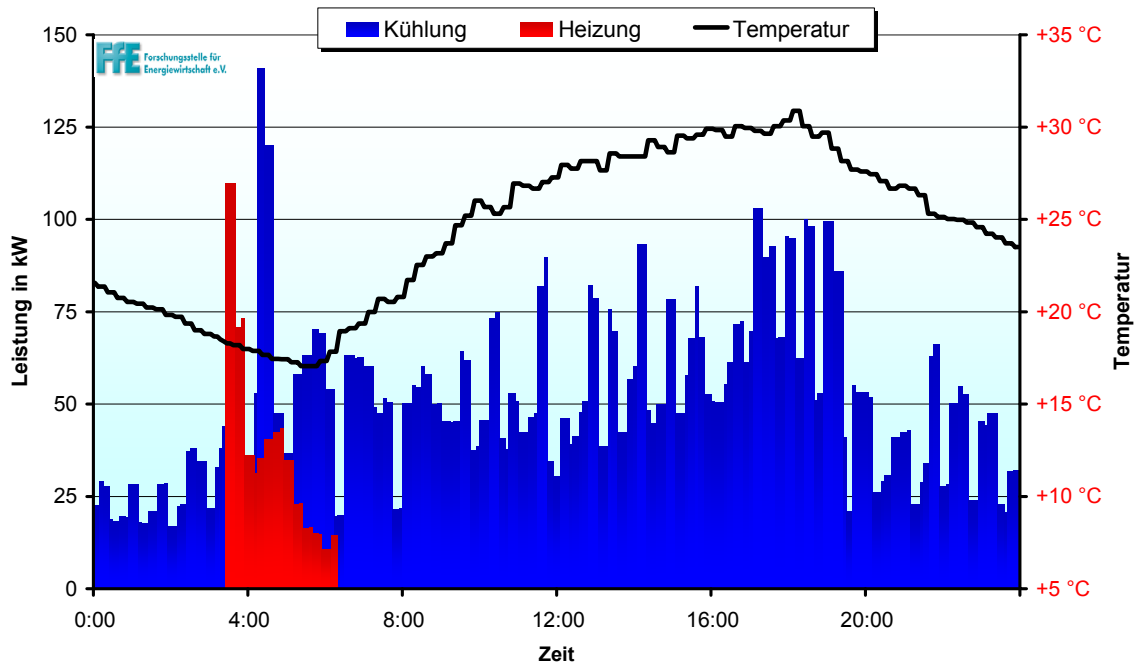
Auffällig an dem Wärmeverbrauch ist, dass auch bei mittleren Tagesaußentemperaturen von über 20 °C noch geheizt wird. Die Analyse ergab, dass auch im Sommer, wenn die Außentemperatur z. B. nachts kurzfristig unter 18,5 °C fällt, geheizt wird. Dies wird deutlich, wenn anstelle der Tagesbilanzen die 15-Minuten-Messwerte der Heizkreise betrachtet werden. Handelsübliche Heizungsregler haben eine Mittelwertbildung der Außentemperatur, um die thermischen Speichermassen im Gebäude zu berücksichtigen. Bei dem untersuchten Bürogebäude schaltet die Heizung ein, wenn die Außentemperatur nur wenige Minuten lang unter dem Einschaltwert von 18,5 °C liegt. Der Heizwärmeverbrauch an Tagen mit sehr hohen mittleren Außentemperaturen beruhen demnach darauf, dass die Außentemperatur kurzfristig unter diesen Grenzwert fällt.

Die darauf folgende Aufstellung einer „Heizkurve“ für die Kältemaschine zeigte, dass an vielen Tagen bei einer Außentemperatur zwischen 5 °C bis über 20 °C sowohl geheizt als auch gekühlt. Dies liegt bei niedrigeren Temperaturen daran, dass die innen liegenden Serverräume Kältebedarf haben, während die Büros schon geheizt werden müssen. Bei höheren Tagesmitteltemperaturen stellt sich weiterhin die Frage, wieso Heizwärmebedarf vorhanden ist.

Hierzu wurden zwei Tagesbilanzen mit 5-Minuten Auflösung gebildet. **Abbildung 6** zeigt für einen Sommertag mit einer maximalen Temperatur von über 30 °C und einer mittleren Tagestemperatur von 24,5 °C den Energiebedarf der Heizung und den Energiebedarf der Kühlung.

Um 3:20 Uhr morgens sinkt die Außentemperatur unter 18,5 °C. Sofort springt die Heizung an und heizt alle Räume, deren Temperatur nachts unter die Solltemperatur von 21,5 °C gesunken ist, auf Solltemperatur. Nach der Einschaltspitze sinkt der Heizwärmebedarf, da die Räume auf Solltemperatur erwärmt wurden. Durch die thermische Trägheit der Wärmetauscherflächen überschreiten einige Räume die

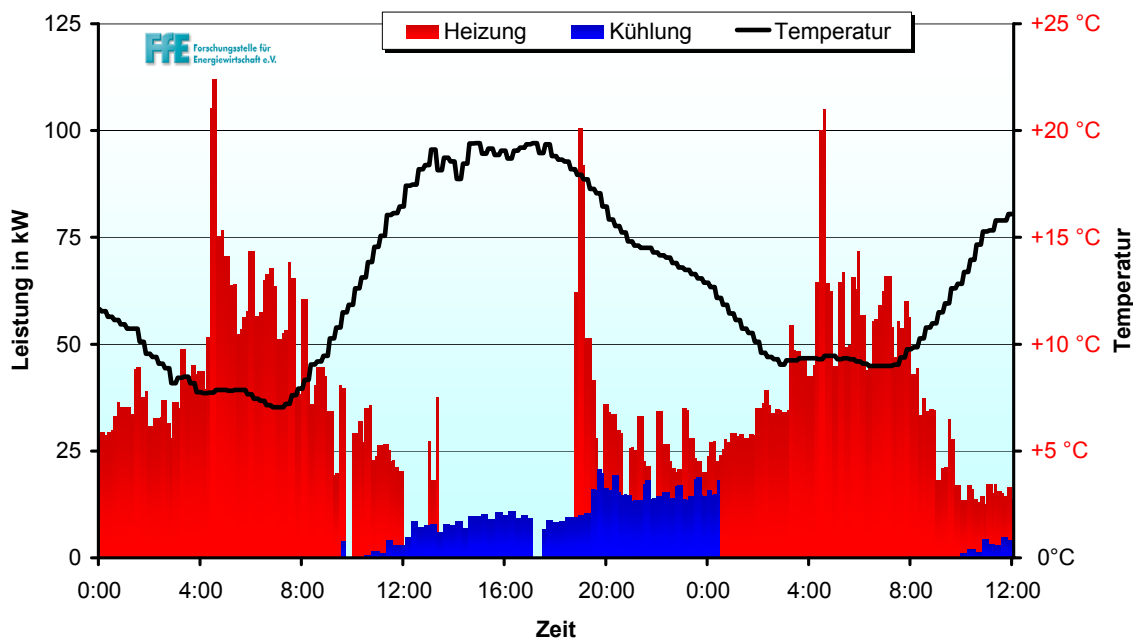
Solltemperatur. Die daraufhin einsetzende Kühlung ist als das Tagesmaximum um ca. 4:15 Uhr zu sehen. Ob der darauf folgende Anstieg des Heizwärmebedarfs kurz nach 4:15 Uhr auf eine leichte Unterschreitung der Solltemperatur beim Kühlen hinweist, der durch Heizen wieder ausgeglichen wird, kann nur vermutet werden.



**Abbildung 6:** *Tagesverlauf Heiz- und Kühlleistung am 21. Juni*

Sobald die Außentemperatur um 6:15 Uhr die Einschaltgrenze der Heizung von 18,5 °C überschreitet, wird die Heizung deaktiviert. Nachts sind die Raumregler auf Bereitschaft, in diesem Betriebsmodus wird erst unter 18 °C geheizt und über 25 °C gekühlt. Würde auch im Komfortbetrieb tagsüber eine Temperaturspanne eingefügt, in der weder geheizt noch gekühlt wird (z. B. heizen unter 21 °C, kühlen über 22 °C), könnte das unnötige Heizen an Tagen mit hoher Außentemperatur vermieden werden.

Die zweite Tagesbilanz mit 5-Minuten Auflösung (**Abbildung 7**) zeigt einen Heiztag mit einer mittleren Außentemperatur von 13,3 °C (Tagesmaximum 19,4 °C, Tagesminimum 7,0 °C). Durch die inneren Gewinne und die solaren Gewinne steigt der Kühlbedarf ab 9:00 Uhr. Unklar ist jedoch, wieso der Kühlbedarf auch bis nach 0:00 Uhr anhält. Beim Überschreiten der Ausschalttemperatur der Heizung (ca. 18,5 °C) setzt die Heizung aus. Beim Unterschreiten dieser Temperatur gegen 18:45 Uhr gibt es eine Lastspitze, die Räume werden geheizt. Scheinbar werden die Räume wieder etwas überheizt, denn auf die Bedarfsspitze folgt gegen 22:40 Uhr ein erhöhter Kältebedarf. Dieses Schwingen findet bis zum Abschalten der Kühlung um ca. 0:25 Uhr statt.



**Abbildung 7:** *Tagesverlauf Heiz- und Kühlleistung am 04. April*

Erstaunlich bei diesem Schwingen ist das gleichartige Verhalten der unterschiedlichen Räume. Durch thermische Trägheit und innere Gewinne könnte jeder Raum mit einer anderen Periodendauer schwingen. In diesem Fall würde das Schwingen in der Gesamtbilanz nur als Rauschen eingehen. Da sich scheinbar viele Räume ähnlich verhalten, ist das Schwingen in der Energiebilanz zu sehen.

Prinzipiell wird durch dieses Schwingen zuerst Wärme in die Räume eingebracht, dann über die Kühlung entfernt. Jeder Vorgang ist mit einem vermeidbaren Energieverbrauch verbunden. Die Einbindung eines Toleranzbandes von  $\pm 1$  K um die Solltemperatur würde dieses Anlagenverhalten verhindern, ebenso wäre es sinnvoll, die Tagesmitteltemperatur für das Ein- und Ausschalten der Heizung zu verwenden, um die Anzahl der Schaltzyklen zu verringern.

Für das Bürogebäude wurde ein Einsparpotenzial von 13 % der Wärme und von 12 % der beeinflussbaren Stromverbraucher (ohne Computer) ermittelt, welche sich ohne Investition, allein durch die Optimierung der Parameter der Gebäudeleittechnik ergeben.

### Zusammenfassung

Durch die Analyse der Gebäudeleittechnik konnten Schwachstellen in der Sensorik und der Regelung aufgezeigt werden. In Verbindung mit den Anlagen- und Steuerungsschemata konnten die optimalen Parameter für den aktuellen Gebäudebetrieb berechnet werden. Die reine Analyse der GA-Daten reicht jedoch nicht aus, es ist weiterhin der Gang in das Gebäude erforderlich, um z. B. Abweichungen von Plänen, Sensorpositionen oder Gerätedaten zu ermitteln bzw. eigenständige Steuerungen prüfen zu können. Mittels reiner Fernanalyse wird trotz moderner Automationssysteme auch in den nächsten Jahren nur die Funktionsprüfung möglich sein, für die Fehlersuche ist der Besuch der Technikräume weiterhin unumgänglich.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0327246E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Langfassung dieses Berichts ist unter [www.ffe.de](http://www.ffe.de) erhältlich.

Dipl. Wi.-Ing. Serafin von Roon

Dipl.-Ing. Thomas Gobmaier

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mauch