



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Zwischenbericht** 30. November 2011

---

# **Monte Rosa Hütte: Integrierte Haussysteme für optimale Energie- und Stoffbewirtschaftung**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Siemens Schweiz AG, CH-6301 Zug

**Auftragnehmer:**

Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik, ETH Zürich  
Soneggstrasse 3  
CH-8092 Zürich  
[www.idsc.ethz.ch](http://www.idsc.ethz.ch)

Zentrum für Integrale Gebäudetechnik, Hochschule Luzern – Technik & Architektur  
Technikumstrasse 21  
CH-6048 Horw  
[www.hslu.ch/technik-architektur/](http://www.hslu.ch/technik-architektur/)

Siemens Schweiz AG  
Building Technologies Division  
Gubelstrasse 22  
CH-6301 Zug  
[www.siemens.com/buildingtechnologies](http://www.siemens.com/buildingtechnologies)

**Autoren:**

Samuel Fux, ETH Zürich, [fuxs@ethz.ch](mailto:fuxs@ethz.ch)  
Urs-Peter Menti, HSLU, [urs-peter.menti@hslu.ch](mailto:urs-peter.menti@hslu.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Andreas Eckmanns  
**BFE-Programmleiter:** Charles Filleux  
**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 153783 / 102946

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



## **Abstract**

Der vorliegende Bericht beschreibt die seit dem letzten Zwischenbericht vom 1. Oktober 2010 im Zusammenhang mit der Neuen Monte Rosa-Hütte durchgeführten Arbeiten.

Seitens der ETH Zürich konnten in dieser Zeit mathematische Modelle von mehreren Gebäudetechnikkomponenten mit Messdaten verglichen und nachfolgend teilweise auch verbessert werden. Basierend auf den dabei gesammelten Erfahrungen wurde ein regelungsorientierter Modellierungsansatz entwickelt, mit welchem sich die Optimierung des Energie- und Stoffmanagements als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem formulieren lässt.

Zusätzlich wurde von der ETH Zürich der Betrieb der Neuen Monte-Rosa Hütte weiterhin überwacht und analysiert. So konnte an verschiedenen Orten ein Optimierungspotential aufgezeigt werden.

# Durchgeführte Arbeiten

## Durchgeführte Arbeiten am Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC)

In diesem Kapitel werden die seit dem letzten Zwischenbericht vom 1. Oktober 2010 durchgeführten Arbeiten seitens der ETH Zürich beschrieben. In dieser Periode konzentrierte sich die Arbeit vor allem auf

- die Überwachung und Optimierung des Betriebes der Neuen Monte Rosa Hütte,
- die Weiterentwicklung der mathematischen Modelle für thermisches Gebäudeverhalten und Gebäudetechnik,
- und die Entwicklung eines vorausschauenden, modellbasierten Energie- und Stoffmanagements.

Im Folgenden werden diese Arbeiten näher beschrieben.

### Überwachung und Optimierung Neue Monte Rosa-Hütte

Im Auftrag der Projektleitung wurde weiterhin der Betrieb der Neuen Monte Rosa-Hütte analysiert. So konnte sowohl bei der Photovoltaik-Anlage als auch bei der Lüftung ein Verbesserungspotential aufgezeigt werden. Ein Beispiel einer solchen Analyse für die Photovoltaik-Anlage wird in Abbildung 1 gezeigt.

Zusätzlich mussten Messdaten aufbereitet und den am Bau der Hütte beteiligten Firmen zur Verfügung gestellt werden.

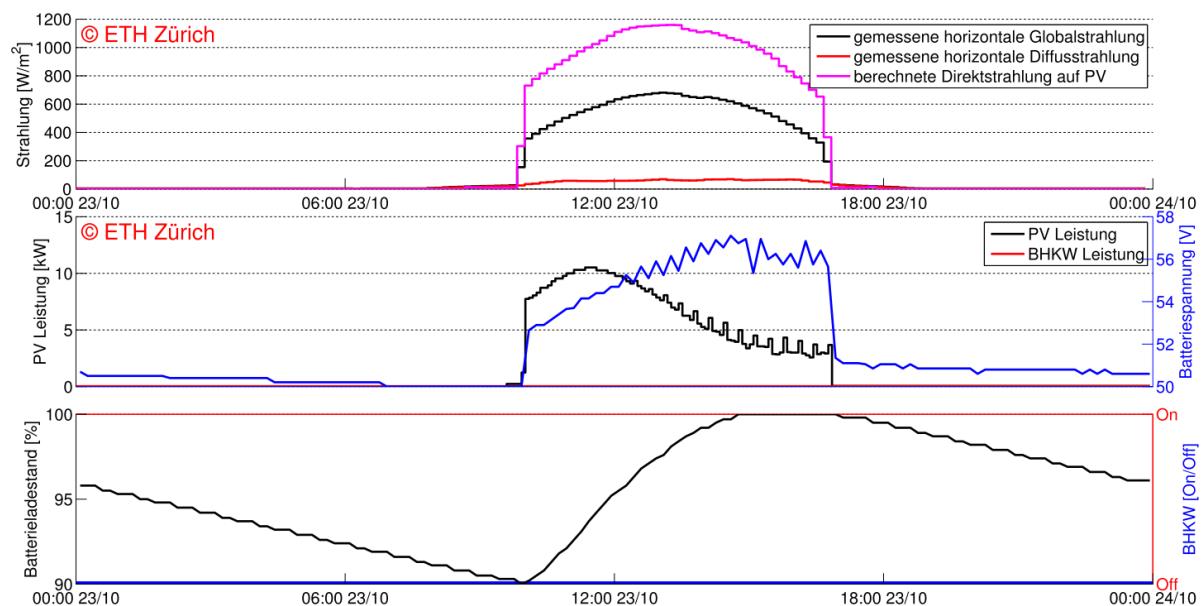


Abbildung 1: Beispiel der Analyse der Photovoltaik-Anlage für den 24.10.2011.

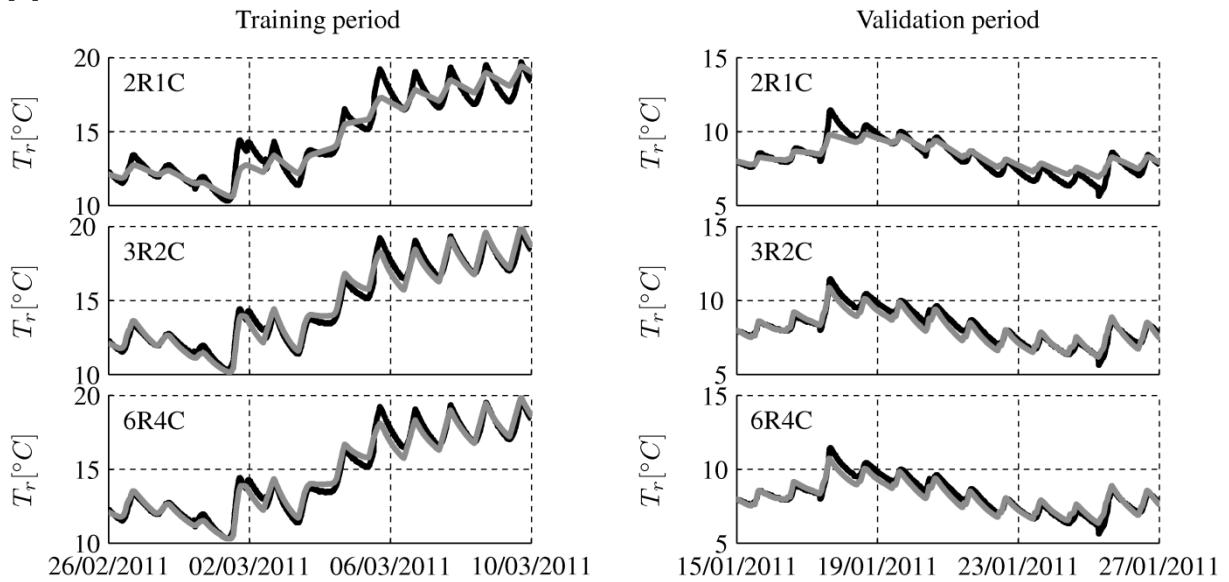
### Entwicklung mathematischer Modelle der Gebäudetechnik

Ein vorausschauendes, modellbasiertes Energie- und Stoffmanagement benötigt Modelle, welche das Verhalten der Gebäudetechnikkomponenten möglichst genau beschreiben, gleichzeitig aber nicht zu rechenintensiv sind. Am IDSC wurden Modelle von verschiedenen Gebäudetechnikkomponenten in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink implementiert

und wo möglich mit Messdaten verglichen. So konnte die Eignung der Modelle hinsichtlich einer Verwendung in einem vorausschauenden, modellbasierten Energie- und Stoffmanagement evaluiert werden. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse zur Modellierung der verschiedenen Komponenten beschrieben.

#### *Modell für das thermische Verhalten der Neuen Monte Rosa-Hütte:*

Es wurden verschiedene detaillierte, regelungsorientierte Modelle für das thermische Verhalten der Neuen Monte Rosa-Hütte mit Messdaten parametrisiert und validiert [1]. Die Resultate zeigen, dass bereits ein einfaches Modell mit zwei dynamischen Zuständen das thermische Verhalten der Hütte recht genau abbilden kann. Abbildung 2 zeigt die Resultate dieser Studie, welche auch an der CISBAT Konferenz 2011 in Lausanne publiziert wurden [1].



**Abbildung 2:** Vergleich zwischen simulierter Raumtemperatur (grau) und gemessener Durchschnittstemperatur (schwarz) für drei verschiedene detaillierte Modelle. Links: Resultate aus der Parameteridentifikationsperiode, rechts: Resultate aus der Validierungsperiode (aus [1]).

Zusätzlich wurde innerhalb des Projektes SAMBA (KTI-Nummer 12122.1), welches auch am IDSC bearbeitet wird, ein selbstlernender Algorithmus entwickelt, welcher für die Neue Monte Rosa-Hütte online die unbekannten Parameter des Gebäudemodells schätzt und eine Vorhersage des zukünftigen Energieverbrauchs macht [2].

#### *Gebäudeintegrierte Photovoltaik-Anlage:*

Die Modelle in der Literatur gehen davon aus, dass die Photovoltaik-Anlagen im Betriebspunkt mit der maximalen Leistung (Maximum Power Point, MPP) betrieben werden. Da die Photovoltaik-Anlage der neuen Monte Rosa-Hütte nicht im MPP betrieben wird, konnte kein Vergleich zwischen Modellen und Messdaten gemacht werden.

#### *Thermische Solarkollektoren:*

Es wurden verschiedene detaillierte Modelle für den Ertrag von thermischen Solarkollektoren mit Messdaten verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass die sehr detaillierten Modelle kein viel besseres Resultat liefern als das bekannte Hottel-Whillier Modell [3]. Es ist aber zu erwähnen, dass für eine optimale Parameteridentifikation der detaillierten Modelle zu wenig Messdaten vorhanden sind.

Generell ist hervorzuheben, dass vor allem die fehlende Messung der Sonneneinstrahlung auf die geneigten thermischen Solarkollektoren die Parameteridentifikation erschwert, da diese anhand von (fehlerbehafteten) Modellen aus der horizontalen Strahlungsmessung der Wetterstation berechnet werden muss.

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich zwischen gemessener Kollektor-Austrittstemperatur und der mit dem Hottel-Whillier Modell simulierten Austrittstemperatur.

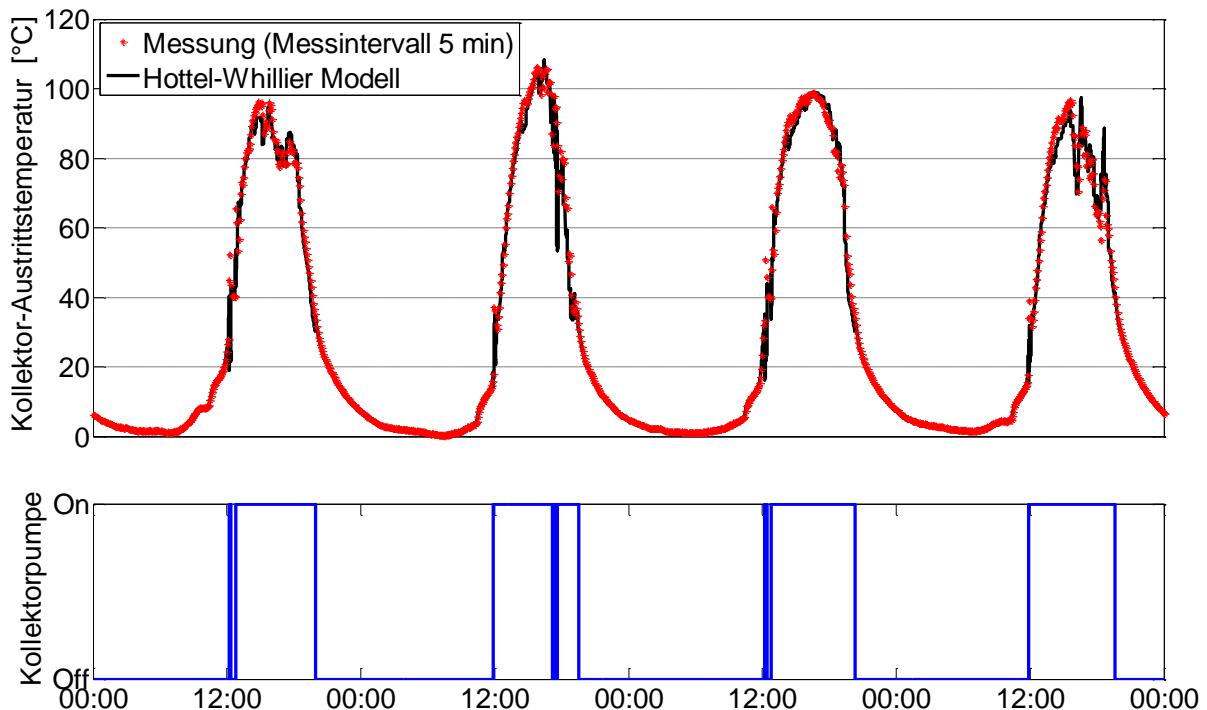


Abbildung 3: Vergleich zwischen der mit dem Hottel-Whillier Modell simulierten Kollektor-Austrittstemperatur und der gemessenen Kollektor-Austrittstemperatur für die Periode 02.09.2010-05.09.2010.

#### Warmwasserspeicher:

Das bestehende „multinode“ Modell zur Beschreibung der Temperaturverteilung in einem Warmwassertank wurde überarbeitet, so dass das Laden der Warmwasserspeicher durch die Solarkollektoren nun besser simuliert werden kann (vgl. Abbildung 4).

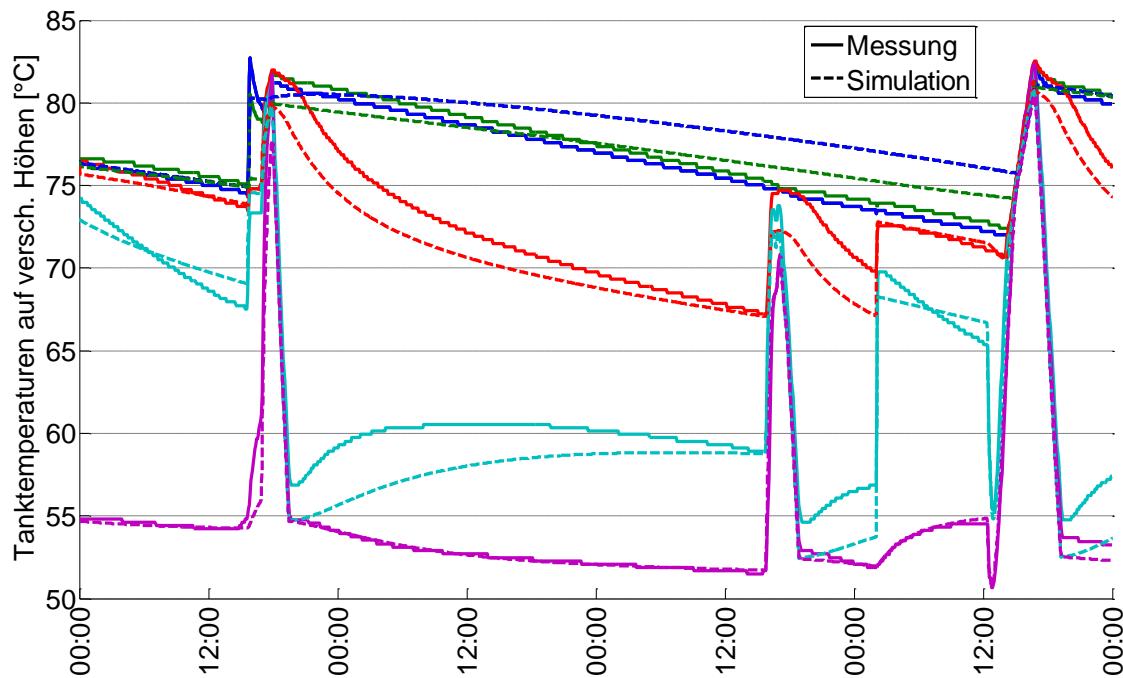


Abbildung 4: Gemessene und simulierte Tanktemperaturen auf verschiedenen Höhen des Brauchwarmwasser-Tanks der Neuen Monte Rosa-Hütte für die Periode 03.10.2010-06.10.2010.

### **Blei-Säure-Batterie:**

Die Lebensdauer von Blei-Säure-Batterien hängt stark von den Betriebsbedingungen ab (z.B. Anzahl Lade/Entladezyklen, Tiefe der Entladung usw.). Am IDSC wurde deshalb ein aus der Literatur bekanntes Batterie-Modell [4] implementiert, mit welchem sich die Lebensdauer einer Batterie vorhersagen lässt. Die bei der Neuen Monte Rosa-Hütte zur Verfügung stehenden Messungen erlauben jedoch keine Parameteridentifikation dieses Modells. Darum wurde eine Zusammenarbeit mit einem Schweizer Batterie-Hersteller angestrebt, welche aber bis heute nicht zustande gekommen ist.

### **Entwicklung Regelalgorithmen**

Es wurde eine regelungsorientierte Modellierung entwickelt, mit welcher sich die Optimierung des Energie- und Stoffmanagements als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (Mixed-integer linear program (MILP)) formulieren lässt. Dabei wurden bestehende MILP-Modellierungsansätze für elektrische Energiesysteme (z.B. in [5]) weiterentwickelt um die Wirkungsgrade von der Batterie und der Leistungselektronik mit zu berücksichtigen. Zusätzlich wurden MILP-Modelle für den thermischen Teil des Energiesystems entwickelt und hinzugefügt.

Das oben erwähnte Modell für die Lebensdauer von Blei-Säure-Batterien ist zu detailliert, um in dieses MILP-Modell integriert zu werden. Darum wird zusätzlich, unabhängig vom beschriebenen MILP-Ansatz zur Optimierung des Energie- und Stoffmanagements, an Algorithmen geforscht um das Batterie-Energiemanagement zu optimieren [6].

### **Sonstige Arbeiten zur Neuen Monte Rosa-Hütte an der ETH Zürich**

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem in diesem Bericht beschriebenen Projekt wurden an der ETH Zürich weitere Arbeiten durchgeführt, welche aber keinen direkten Zusammenhang zu diesem Projekt haben:

- Am Institut für Flüssigkeitsdynamik wurde eine Masterarbeit durchgeführt, in welcher anhand von CFD Simulationen versucht wurde, den optimalen Abstand der Photovoltaik-Paneele zur Hauswand für eine optimale Hinterlüftung der Photovoltaik-Paneele zu bestimmen.
- Am Institut für Umweltingenieurwissenschaften wurde ein Masterarbeit durchgeführt [7], in welcher ein erster Vergleich zwischen Planungswerten und Istwerten gemacht wurde. Ohne die Messwerte aus dem in diesem Bericht beschriebenen Projekt wäre das nicht möglich gewesen.

## Hochschule Luzern – Technik & Architektur (Zentrum für Integrale Gebäudetechnik)

Die Gebäudehülle des detaillierten Gebäudemodelles (Abbildung 5) wurde fertig erstellt. Mit dem Modell lassen sich in Abhängigkeit des Außenklimas, der Haustechnik und der internen Lasten (Personen, Geräte, usw.) im gesamten Gebäude die Raumlufttemperaturen und die operativen Temperaturen pro Zone berechnen. Aktuell wird nun die Gebäudetechnik im Detail modelliert. Damit lässt sich in einem weiteren Schritt die gesamte Anlage mit allen technischen Komponenten vorausberechnen.

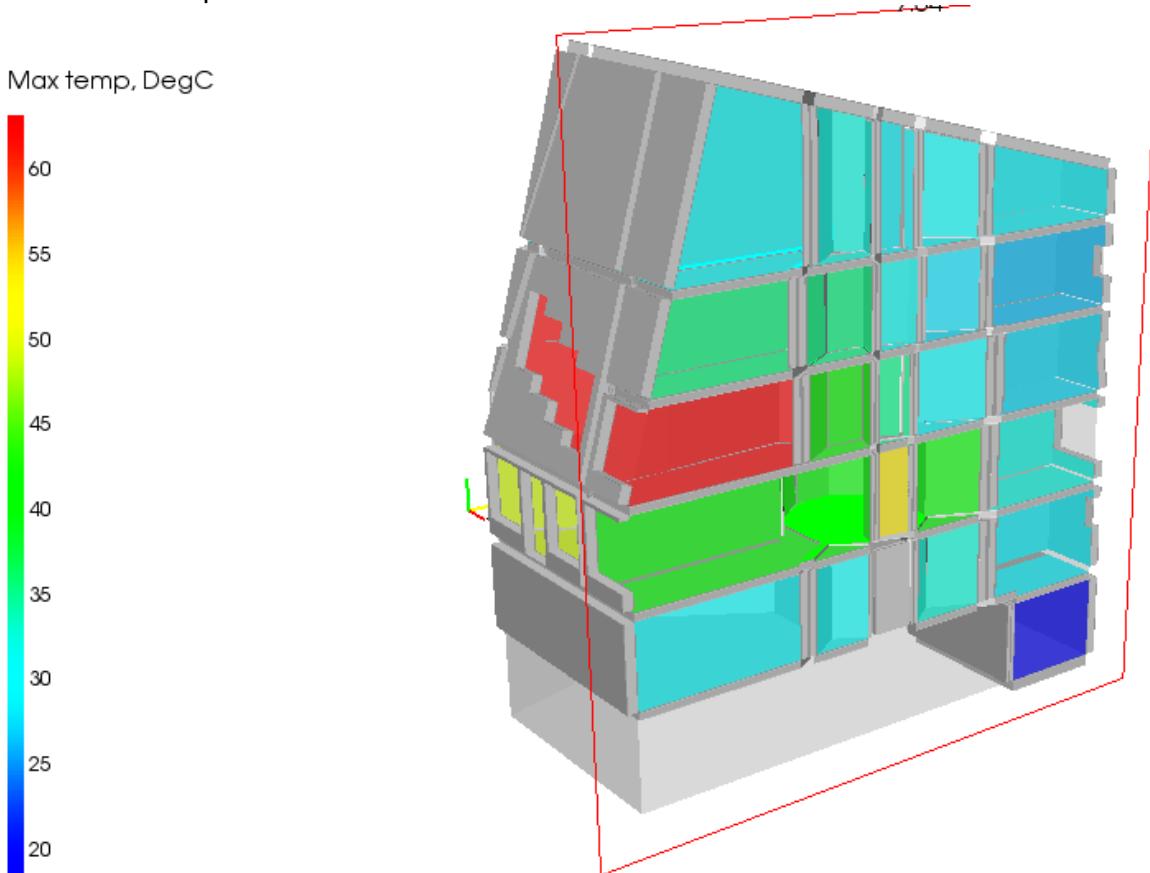
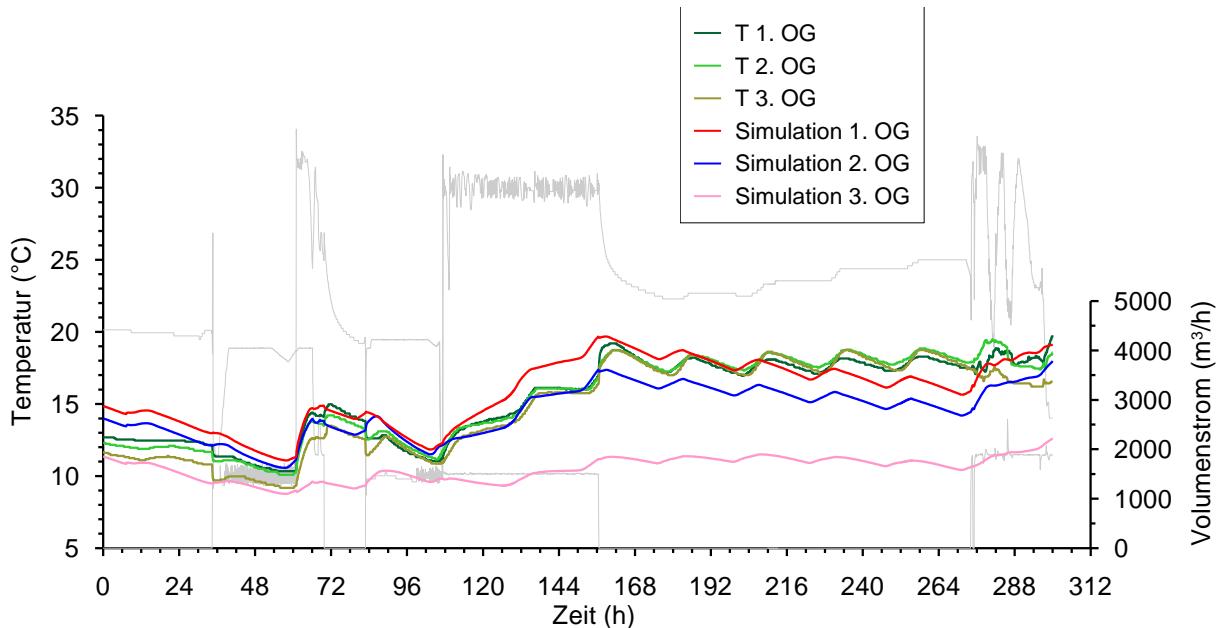


Abbildung 5: Simulation mit dem detaillierten Gebäudemodell. Auf dem Bild sind die unterschiedlichen Temperaturen im Gebäude zu sehen.

Parallel zur Verfeinerung des Simulationsmodells (Gebäudetechnik) wurde das Simulationsmodell mit vor Ort erhobenen Messwerten abgeglichen. Die unbewohnte, von Störgrößen möglichst befreite Zeit im Winter wurde genutzt, um das thermische Verhalten der Hütte zu prüfen (Ermitteln von Sprungantworten auf Anpassung einzelner Parameter). Weiter wurde untersucht, wie sich die Raumlufttemperaturen in der Hütte bei konstantem Lüftungsbetrieb oder bei komplett ausgeschalteter Lüftung verhalten. Diese Messungen wurden dann mit dem Simulationsmodell (IDA ICE) verglichen. Die Auswertung dieser Versuche ist zurzeit in Bearbeitung. Bei Bedarf werden im kommenden Winter nochmals weitere Sprungantwortversuche durchgeführt.



**Abbildung 6: Vergleich Messungen mit Simulationsmodell (IDA ICE).**

Erste Vergleiche zwischen Messwerten und Simulationswerten zeigen eine erfreulich gute Übereinstimmung. Die Temperaturen im 1. und 2. Obergeschoss (rot, blau) stimmen sehr gut mit den Messungen überein. Die simulierte Temperatur im 3. Obergeschoss (pink) hingegen weicht noch stark von der gemessenen Temperatur ab. Hier müssen weitere Analysen den Grund für diese Abweichungen zeigen.

# Erfolge und Herausforderungen

## Erfolge

### IDSC

- Ohne die Messdaten aus dem in vorliegendem Bericht beschriebenen Projekt wäre eine Bewertung und Optimierung des Betriebes der neuen Monte Rosa-Hütte nicht möglich.
- Dank den durchgeföhrten Analysen konnte viel über Photovoltaik-Anlagen gelernt werden.
- Die mathematischen Modelle mehrerer Gebäudetechnikkomponenten konnten erfolgreich mit Messdaten parametrisiert und validiert werden.
- Es wurde ein für die Optimierung des Energie- und Stoffmanagements geeignetes Modell entwickelt.

## Herausforderungen

### IDSC

- Die Aufbereitung der Messdaten für die Projektleitung und für die verschiedenen am Bau beteiligten Firmen benötigt sehr viel Zeit. Diese Zeit fehlt dementsprechend für die Forschung und folglich ist diese nicht wie gewünscht fortgeschritten.

## Erkenntnisse

### IDSC

- In der Betriebssaison 2011 wurde von der Photovoltaik-Anlage an keinem Tag mehr Energie produziert als von der Hütte verbraucht wurde. Dies bedeutet, dass die Autarkie der Neuen Monte Rosa-Hütte durch ein optimals Energie- und Stoffmanagement nicht wesentlich erhöht werden kann.
- Das Potential zur Erhöhung der Autarkie durch die Optimierung der Funktion der bestehenden Anlagen ist höher einzuschätzen als durch die Optimierung des Energie- und Stoffmanagements.
- Das Interesse an der Neuen Monte-Rosa Hütte ist weiterhin ungebrochen (2010: ca. 10`600 Übernachtungen, 2011: ca. 11`200 Übernachtungen).
- Da die aktuelle Anzahl Übernachtungen pro Jahr viel grösser ist als in der Planungsphase angenommen, ist auch die Abwassermenge viel grösser als geplant. Die Abwasserreinigungsanlage musste daher im Jahr 2011 ausgebaut werden. Wegen den beschränkten Platzverhältnissen im ARA-Raum gibt es seit dem Ausbau keinen Abwasserspeichertank mehr.

## Weiteres Vorgehen

### IDSC

Da aufgrund der gegebenen Situation bei der Neuen Monte Rosa-Hütte ein vorausschauendes, modellbasiertes Energie- und Stoffmanagement keinen Vorteil

gegenüber einer konventionellen Regelung bringt, kann die Hütte nicht als Demonstrationsobjekt verwendet werden.

Die Forschung seitens des IDSC wird darum zukünftig mit Hilfe von Simulationen durchgeführt. Die Messdaten der realen Hütte werden weiterhin verwendet werden, um diese Simulationsmodelle zu parametrisieren und verifizieren.

Da die Implementation im Demonstrationsobjekt wegfällt, eröffnen sich folgende neue Forschungsmöglichkeiten:

- Was wären die optimalen Größen der Gebäudetechnikkomponenten bei den nun bekannten Verbräuchen der Neuen Monte Rosa-Hütte?
- Was ist der Einfluss von verschiedenen Speichergrößen auf das Verhalten des vorausschauenden, modellbasierten Energie- und Stoffmanagements?

## **Projekt-Abschluss**

Der Abschluss des Projektes ist auf den 31. August 2012 geplant. Diese Verlängerung hat keine Mehrkosten für das Bundesamt für Energie zur Folge.

# Literaturverzeichnis

- [1] **Fux, S.F., Benz, M.J. und Guzzella, L.** *Comparing control-oriented thermal models for a passive solar house*. In: Proceedings of CISBAT Conference, September 2011
- [2] **Ashouri, A., Benz, M.J., Stettler, R., Fux, S.F., Guzzella, L.** *Heating and cooling demand estimation using a self-learning thermal building model*. In: Proceedings of CISBAT Conference, September 2011
- [3] **Duffie, J.A. und Beckman, W.A.** *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2006
- [4] **Schiffer, J., Sauer, D.U., Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., Kaiser, R.** *Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems*. Journal of Power Sources, Vol. 168, Seiten 66-78, 2007
- [5] **Handschin, E., Neise, F., Neumann, H., Schultz, R.** *Optimal operation of dispersed generation under uncertainty using mathematical programming*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 28, Seiten 618-626, 2006
- [6] **Abou-Zeid, I.** *Optimal Battery Management Using Iterative Dynamic Programming*. Semesterarbeit, ETH Zürich, 2011
- [7] **Meyer, M.** *Das Energiesystem der Neuen Monte Rosa-Hütte – Planung, Realität und Zukunft*. Masterarbeit, ETH Zürich, 2010