



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 29. Oktober 2012

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

Kofinanzierung:

Siemens Schweiz AG, CH-6301 Zug

Auftragnehmer:

Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik, ETH Zürich
Sonneggstrasse 3
CH-8092 Zürich
www.idsc.ethz.ch

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

Siemens Schweiz AG
Building Technologies Division
Gubelstrasse 22
CH-6301 Zug
www.siemens.com/buildingtechnologies

Autoren:

Samuel Fux, ETH Zürich, foxs@ethz.ch
Michael Benz, ETH Zürich, benzm@ethz.ch
Franz Sidler, Hochschule Luzern, franz.sidler@hslu.ch
Urs-Peter Menti, Hochschule Luzern, urs-peter.menti@hslu.ch
Iwan Plüss, Hochschule Luzern, iwan.pluess@hslu.ch
Markus Gwerder, Siemens, markus.gwerder@siemens.com

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Rolf Moser

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153783 / 102946

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

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	6
1.1. Ausgangslage	6
1.2. Energiemanagementsysteme: Stand der Technik	6
1.3. Das Projekt „Neue Monte Rosa-Hütte“	7
1.4. Ziele der Arbeit	8
1.5. Gewählter Lösungsweg	8
2. Anlagenbeschrieb.....	9
2.1. Energie- und Gebäudetechnik der Neuen Monte Rosa-Hütte.....	9
2.2. Standardlösung Regelung und Steuerung	11
3. System-Monitoring	12
3.1. Messungen	12
3.2. Visualisierung der Energieflüsse	13
3.3. Remote Access.....	15
4. Betriebsanalyse und -optimierung.....	15
4.1. Betriebsanalyse	15
4.2. Optimierung PV-Anlage	16
4.3. Optimierung Abwasserkläranlage.....	17
4.4. Optimierung Internetverbindung zur Hütte	17
5. Modellierung der Energie- und Gebäudetechnik.....	17
5.1. Ausgangslage	17
5.2. Vorgehen	18
5.3. Gebäudehülle	19
5.4. Gebäudetechnik.....	20
5.5. Bestimmung der Verbräuche	21
5.6. Regulierung der Anlage	22
5.7. Modellvergleich IDA und ETH.....	23
5.8. Resultate.....	24
5.9. Variantenvergleich	27
5.10. Ausblick.....	30
6. Optimales Energie- und Stoffmanagementsystem.....	31
6.1. Beschreibung des Algorithmus	31
6.2. Implementierung auf der Neuen Monte Rosa-Hütte	34
7. Dimensionierungsstudie mit gemessenen Verbräuchen.....	35
7.1. Methodik	35
7.2. Resultate.....	37
8. Optimales Batterie- und Energiemanagement.....	40
9. Fazit und Ausblick	41
Literaturverzeichnis	42
Anhang A: Publikationen	45
Journals und Konferenzen.....	45
Studentenarbeiten	45
Anhang B: Simulationsmodell: Energieerzeugung und Wärmeabgabe	47

Zusammenfassung

Heute werden in der Gebäudetechnik gut bewährte Einzelkomponenten eingesetzt, welche in ihrer Funktion weitgehend optimiert sind. Das vorhandene Energiesparpotenzial lässt sich nur ganz erschliessen, wenn auch eine Optimierung des Zusammenspiels dieser Komponenten durchgeführt wird. Ziel dieses Projektes ist es deshalb, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, mit denen das Energie- und Stoffmanagement in modernen Gebäuden optimiert und dadurch eine erhebliche Energieeinsparung realisiert werden kann. Dabei werden die externen Einflüsse (z.B. das Wetter, die Gebäudenutzung, die Energiekosten etc.) aber auch der Netz- und lokale Speicherzustand berücksichtigt. Mit einer vorausschauenden Steuerung werden die einzelnen Erzeuger, Speicher und Verbraucher im System optimal betrieben, mit dem Ziel, die vorhandene Energie effizienter einzusetzen und Kosten zu sparen. Um alle diese Ideen in konkreten Versuchen zu testen, wird in diesem Projekt die autonome Neue Monte Rosa-Hütte verwendet.

Als Grundlage für alle in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten wurde zu Beginn ein Monitoring-System installiert, welches sowohl alle Energieflüsse innerhalb der Neuen Monte Rosa-Hütte, die Wetterbedingungen als auch die Übernachtungszahlen aufzeichnet. Diese Messdaten erlaubten eine detaillierte Analyse des Betriebs und dessen Optimierung.

In einem weiteren Schritt wurde das aus der Planungsphase der Neuen Monte Rosa-Hütte bestehende detaillierte Gebäudemodell überarbeitet und mit Modellen für die Gebäudetechnik erweitert. Das gesamte Modell wurde danach mit Messdaten verifiziert. Dieses integrale Gebäudemodell mit der gesamten Anlagentechnik erlaubt nun, vor einem allfälligen Umbau die Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu berechnen.

Des Weiteren wurde basierend auf der modellbasierten vorausschauenden Regelung ein Energie- und Stoffmanagementsystem für die Neue Monte Rosa-Hütte entwickelt. Da in der momentanen Situation der Hütte, d.h. nach der Entfernung des Abwasserspeichertanks, keine relevante Verbesserung der Energieautarkie durch die Implementierung des entwickelten Energie- und Stoffmanagementsystems zu erwarten ist, wurde auf die Implementierung verzichtet.

Stattdessen wurde eine simulationsbasierte Dimensionierungsstudie durchgeführt. Für diese Dimensionierungsstudie basierend auf den gemessenen elektrischen und thermischen Verbräuchen wurde angenommen, dass ein Abwasserspeichertank wie in der ursprünglichen Anlage zur Verfügung steht. Die Resultate dieser Studie haben gezeigt, dass das entwickelte Energie- und Stoffmanagementsystem im Vergleich mit einer konventionellen Regelung die Betriebskosten stark reduziert.

Zusätzlich wurde ein Batterieenergiemanagementsystem entwickelt, welches ebenfalls auf der modellbasierten vorausschauenden Regelung basiert. Dieses Batterieenergiemanagementsystem optimiert den Betrieb des elektrischen Systems, so dass die Lebensdauer der Batterie verlängert wird. Zukünftig ist geplant, dieses Batterieenergiemanagementsystem in der Neuen Monte Rosa-Hütte zu implementieren.

Abstract

Today building technology makes use of well-proven components, that are highly optimized in their function. The existing potential for energy savings, however, can often only be exploited completely by the optimization of the interaction of these components. The aim of this project is therefore to develop methods and tools to optimize the energy and waste management in modern buildings in order that considerable energy savings can be realized. In doing so the external influences (i.e. the weather, the use of the building, the energy costs, etc.) but also the state of the grid and the local storage are considered. With a predictive control the individual producers, storages and appliances in the system are operated optimally, with the aim of using available energy more efficiently and saving costs. To test these ideas in concrete experiments this project uses the autonomous New Monte Rosa Hut.

At the beginning, as a basis for all work carried out in this project, a monitoring system has been installed that records all the energy flows within the new Monte Rosa hut, the weather conditions and the number of overnight stays. These data allowed a detailed analysis and optimization of the operation of the hut.

In a further step, the detailed building model developed in the planning phase of the New Monte Rosa Hut has been revised and extended with models for the building technology. The entire model was then verified with measurement data. This integrated building model with the entire system technology now allows computing the impact of a possible modification on the overall system.

Furthermore, based on the model predictive control strategy an energy- and waste management system has been developed for the new Monte Rosa hut. As in the current situation of the hut, i.e. after the removal of the waste water storage tank, no relevant improvement of the energy self-sufficiency is to be expected through the implementation of the advanced energy and waste management system, the implementation was eventually not carried out.

Instead, a simulation based sizing study was conducted. For this study based on measurement data of the electric and thermal loads, it was assumed that a waste water storage tank as in the original system is available. The results of the study have shown that - compared to conventional control - the developed energy and waste management system considerably reduces operating costs.

In addition, a battery energy management system was developed, which is also based on model predictive control strategy. This battery energy management system optimizes the operation of the electrical system extending the battery life. In the future, an implementation of this battery energy management system in the new Monte Rosa Hut is planned.

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Die Gebäudeinfrastruktur spielt in der modernen Gesellschaft eine zentrale Rolle und die Anforderungen an die Gebäude steigen stetig. Ungefähr 40% des weltweiten Energieverbrauchs entfällt auf die Gebäudeinfrastruktur, wobei ein grosser Teil für die Raumwärme und -kühlung, der Rest für Warmwasser, Lüftung, Haustechnik und die Beleuchtung und sonstige elektrische Geräte eingesetzt wird. Gemäss Beschluss des EU-Parlaments von April 2009 müssen Neubauten in der EU ab 2019 Netto-Nullenergie-Bauten sein, d.h. sie dürfen pro Jahr nicht mehr Primärenergie verbrauchen als sie selbst produzieren. Diese Ziele sind nur mit einer lokalen Energieproduktion, wie z.B. erneuerbaren Energiequellen oder Wärme-Kraft-Kopplung-Systemen, erreichbar. Da der Ertrag von erneuerbaren Energiequellen wie Photovoltaik oder thermischen Solarkollektoren von der Sonneneinstrahlung abhängt, ist zu erwarten, dass Gebäude in Zukunft vermehrt mit Speichersystemen ausgerüstet sein werden, um die Überproduktion von erneuerbaren Energiequellen während des Tages in der Nacht zu erschliessen.

Die heutige Gebäudetechnik basiert auf konventionellen und gut bewährten Anlagen mit weitgehend in ihrer Funktion optimierten Komponenten. Werden neue Energiespeicher im Haus platziert oder kommen erneuerbare Energiequellen hinzu, ergibt sich oft ein komplexes Gesamtsystem, bei welchem die Energieeffizienz nicht mehr nur von der Optimierung der einzelnen Komponenten abhängt, sondern wesentlich von der Vernetzung dieser Einzelteile und von der gewählten Steuer- und Regelstrategie bestimmt wird. Ziel dieses Projektes ist es deshalb, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, mit denen das Energie- und Stoffmanagement in modernen Gebäuden optimiert und dadurch eine erhebliche Energieeinsparung realisiert werden kann. Dabei werden die externen Einflüsse (z.B. das Wetter, die Gebäudenutzung, die Energiekosten etc.) aber auch der Netz- und lokale Speicherzustand berücksichtigt. Mit einer vorausschauenden Regelung werden die einzelnen Erzeuger, Speicher und Verbraucher im System optimal betrieben, mit dem Ziel, die vorhandene Energie effizienter einzusetzen und gleichzeitig Kosten zu sparen. Um diese Ideen in konkreten Versuchen zu testen wird in diesem Projekt die Neue Monte Rosa-Hütte mit ihrem komplexen Energie- und Stoffkreislauf verwendet.

1.2. Energiemanagementsysteme: Stand der Technik

Konventionelle Energiemanagementsysteme von komplexen Energiesystemen mit aktiven Speichersystemen verwenden regelbasierte Regelstrategien (z.B. [1, 2, 3]), bei welchen die Regeln und Sollwerte üblicherweise auf Erfahrungswerten beruhen und über die Zeit unverändert bleiben. In den vergangenen Jahren erhielten Energiemanagementsysteme basierend auf der modellbasierten vorausschauenden Regelung innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft vermehrt Aufmerksamkeit.

Untenstehend folgt ein kurzer (nicht abschliessender) Überblick über Publikationen, in welchen die Anwendung der modellbasierten vorausschauenden Regelung auf Energiesysteme mit aktiven Speichern beschrieben wird. Die Publikationen sind geordnet nach Anwendungsgebiet.

Heiz- und Brauchwarmwassersysteme: Prud'homme und Gillet [4] schlagen einen modellbasierten vorausschauenden Regler für die Regelung von elektrischen Heizkörpern in einem solaren Brauchwarmwassersystem vor. Zhang und Hanby [5] beschäftigen sich mit der optimalen Regelung eines Heizsystems bestehend aus erneuerbaren Energiequellen, einem Heizkessel und aktiven und passiven Speichern. Bianchi [6] wendet die vorausschauende Regelung auf ein Einfamilienhaus mit Kleinwärmepumpenanlage an

Kühlsysteme: Zambrano und Camacho [7] untersuchen die Anwendung der modellbasierten vorausschauenden Regelung auf ein solares Kühlsystem. Henze et al. [8] fokussieren sich auf die Anwendung der modellbasierten vorausschauenden Regelung auf ein Kühlsystem mit Eisspeicher.

Systeme mit Wärme-Kraft-Kopplung: Die Anwendung von optimaler Regelung auf Blockheizkraftwerk (BHKW)-basierte Energiesysteme mit elektrischer Netzkoppelung wird z.B. von Faille et al. [9], Collazos et al. [10], Negenborn et al. [11] und Gähler et al. [12] beschrieben.

Elektrische Systeme mit mehreren Energiequellen: Mehrere Autoren beschäftigen sich mit der Anwendung von optimaler Regelung auf elektrische Energiesystem mit mehreren Energiequellen wie PV-Anlagen, Diesel-Aggregate, Windturbinen usw. und elektrischen Speichern [13, 14, 15].

In vielen dieser Publikationen (und auch in anderen) wird gezeigt, dass mit Hilfe der modellbasierten vorausschauenden Regelung Energie- und/oder Kosteneinsparungen möglich sind. Allerdings basieren diese Analysen meistens nur auf Computersimulationen. Den Autoren dieses Berichtes sind nur wenige Studien mit experimentellen Resultaten aus realen Systemen bekannt, wo die vorausschauende Regelung eingesetzt wird.

1.3. Das Projekt „Neue Monte Rosa-Hütte“

Die Neue Monte Rosa-Hütte ist eine Berghütte des Schweizer Alpen-Clubs SAC, welche in der Nähe von Zermatt auf 2883 m ü. M. gelegen ist. Vor dem Hintergrund des Jubiläums zum 150. Geburtstag der ETH Zürich wurde im Jahr 2009 die alte Hütte in einem Gemeinschaftsprojekt der ETH Zürich und des SAC durch einen Neubau ersetzt [16].

Die Neue Monte Rosa-Hütte wurde auf einem exponierten Felsplateau etwas oberhalb der alten Hütte erbaut. Sie hat eine moderne Architektur mit einem äusserst markanten Erscheinungsbild und ist extremen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Sie ist mit diversen technischen Einrichtungen ausgerüstet, die im Gebirgsbau bisher nicht üblich waren, die aber sowohl in dieser Umgebung als auch in moderaterem Umfeld durchaus breit anwendbares Zukunftspotenzial haben. In diesem Sinne ist das Vorhaben ein Pionierprojekt im hochalpinen Bauen und hat durch seine wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen eine grosse internationale Ausstrahlung.

Das Projekt der Neuen Monte Rosa-Hütte ist in drei Phasen aufgeteilt [16]:

1. Während der sogenannten Forschungs- und Entwicklungsphase 1 (Mitte 2005 bis Mitte 2008) wurden grundsätzliche Studien bezüglich Architektur, Konstruktion, Baumaterialien und Haustechnik im Hinblick auf Qualität, Risiko, Logistik, Nachhaltigkeit, Termine und Kosten durchgeführt. In dieser Planungsphase wurde die Forderung aufgestellt, dass die neue Hütte zu mindestens 90 Prozent energieautark ist und dass Wasser in genügender Menge vorhanden sein soll. Diese Phase bildet die Grundlage für das in diesem Bericht beschriebene Forschungsprojekt.
2. Bauphase (2008 bis 2009).
3. Das in diesem Bericht beschriebene Forschungsprojekt entspricht der sogenannten Forschungs- und Entwicklungsphase 2 (Mitte 2008 bis Mitte 2012), in welcher das konventionelle Energiemanagement durch ein intelligentes Energie- und Stoffmanagement zur optimalen Bewirtschaftung der Hütte ersetzt werden soll.

1.4. Ziele der Arbeit

Die Ziele dieser Forschungsarbeit sind:

Zielsetzung 1

Für die Neue Monte Rosa-Hütte soll basierend auf der vorhandenen Infrastruktur ein optimiertes Energie- und Stoffmanagementsystem entwickelt werden, welches basierend auf den neusten Erkenntnissen der Gebäudeautomation, eine optimale Bewirtschaftung der Hütte mit einem maximalen Energie-Autarkiegrad ermöglicht. Ziel ist es insbesondere, die Energieversorgung möglichst über die vorhandenen erneuerbaren Quellen zu gewährleisten. Ein hoher Autarkiegrad reduziert die benötigte Treibstoffmenge für das lokale BHKW sowie die Anzahl nötiger Helikopterflüge zur Hütte und somit den durch den Betrieb der Hütte verursachten CO₂-Ausstoss.

Zielsetzung 2

Die Energieflüsse, der Betrieb der Anlagen und der Zustand der Speichersysteme sollen mittels System-Monitoring überwacht, die Daten visuell aufbereitet und in geeigneter Form allen Interessierten zugänglich gemacht werden. Damit wird eine hohe Kommunikationswirkung angestrebt. Gleichzeitig wird mit diesem Monitoring den Projektmitarbeitern die Möglichkeit geboten, das System von aussen gezielt zu beeinflussen (Remote Access). Dieser Ansatz ermöglicht einen detaillierten Einblick in das Verhalten des Gebäudesystems und erlaubt eine kontinuierliche Optimierung der Steuerung und der technischen Einrichtungen während des Betriebs der Anlage. Dank des Remote Access ist dies auch ausserhalb der bewarteten Zeit während den Wintermonaten möglich.

1.5. Gewählter Lösungsweg

Am Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG) wurden zur Dimensionierung der einzelnen Komponenten und zur Prognostizierung des Energiebedarfs ausführliche thermische Gebäudesimulationen durchgeführt. Für diese Arbeiten war ein sehr detailliertes Gebäudemodell nötig. In einem ersten Schritt wird das ZIG dieses bestehende Modell erweitern und mit Messdaten verifizieren. Weiter wird das ZIG bei der Auswertung und Analyse der Messungen am Gebäude mithelfen. Durch diese Mitarbeit können die Erfahrungen aus dem Gebiet der Gebäudetechnik, der Messung und Auswertung von Anlagen in der Gebäudetechnik und der Simulation mit exakten Modellen im Gebäudebereich ideal genutzt werden. Zudem können die Erfahrungen aus der Konzept- und Planungsphase der Neuen Monte Rosa-Hütte (in welcher das ZIG den Bereich Energie- und Gebäudetechnik betreute) eingebracht werden.

Die Hauptaufgabe des Instituts für Dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC) ist die Entwicklung eines regelungsorientierten Modelles. Auf Basis dieses Modells wird eine bestmögliche Steuerstrategie rückwirkend auf die alten Wetterdaten, Besucherzahlen und weiteren Einflüsse berechnet. In einem weiteren Schritt werden die aktuellen Daten in das modellbasierte vorausschauende Regelsystem übernommen und das erhaltene Ergebnis mit dem Optimum verglichen. Danach wird es möglich sein, einen ersten Regelentwurf in der Hütte zu implementieren und anschliessend eine Optimierung im Betrieb vorzunehmen.

Um die Schnittstelle zur Standardgebäudesteuerung zu erhalten, muss diese so ausgelegt sein, dass auf alle Parameter zugegriffen werden kann. Ebenfalls muss es möglich sein, die optimierten Stellsignale des vorausschauenden Regelalgorithmus in das Steuerungssystem einfließen zu lassen. Siemens Schweiz AG übernimmt als Industriepartner diese Aufgaben. Alle nötigen Sensoren und Überwachungsmechanismen werden durch Siemens Schweiz AG vor dem Bau eingeplant und auf die Standardsteuerung abgebildet. Parallel zur Entwicklung

des Regelalgorithmus wird eine Visualisierung erstellt, die das Verhalten des Gebäudes aufzeigt. Die nötigen Einrichtungen werden ebenfalls von Siemens Schweiz AG zur Verfügung gestellt. In einem weiteren Schritt wird ein Remote Access implementiert, der es Fachpersonen erlaubt, von aussen gezielt auf die Gebäudesteuerung einzuwirken.

2. Anlagenbeschreibung

2.1. Energie- und Gebäudetechnik der Neuen Monte Rosa-Hütte

Stromversorgung

Die Stromversorgung der Hütte ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Eine in der Südfassade der Hütte integrierte Photovoltaik (PV)-Anlage (122 m²) und ein BHKW (ca. 10 kW_{el}) garantieren eine unterbrechungsfreie Stromversorgung der Hütte. Zur Zwischenspeicherung der elektrischen Energie steht eine Blei-Säure-Batterie (255 kWh) zur Verfügung. Ein Lastabwurfprogramm ermöglicht das Sperren von abschaltbaren Verbrauchern [16].

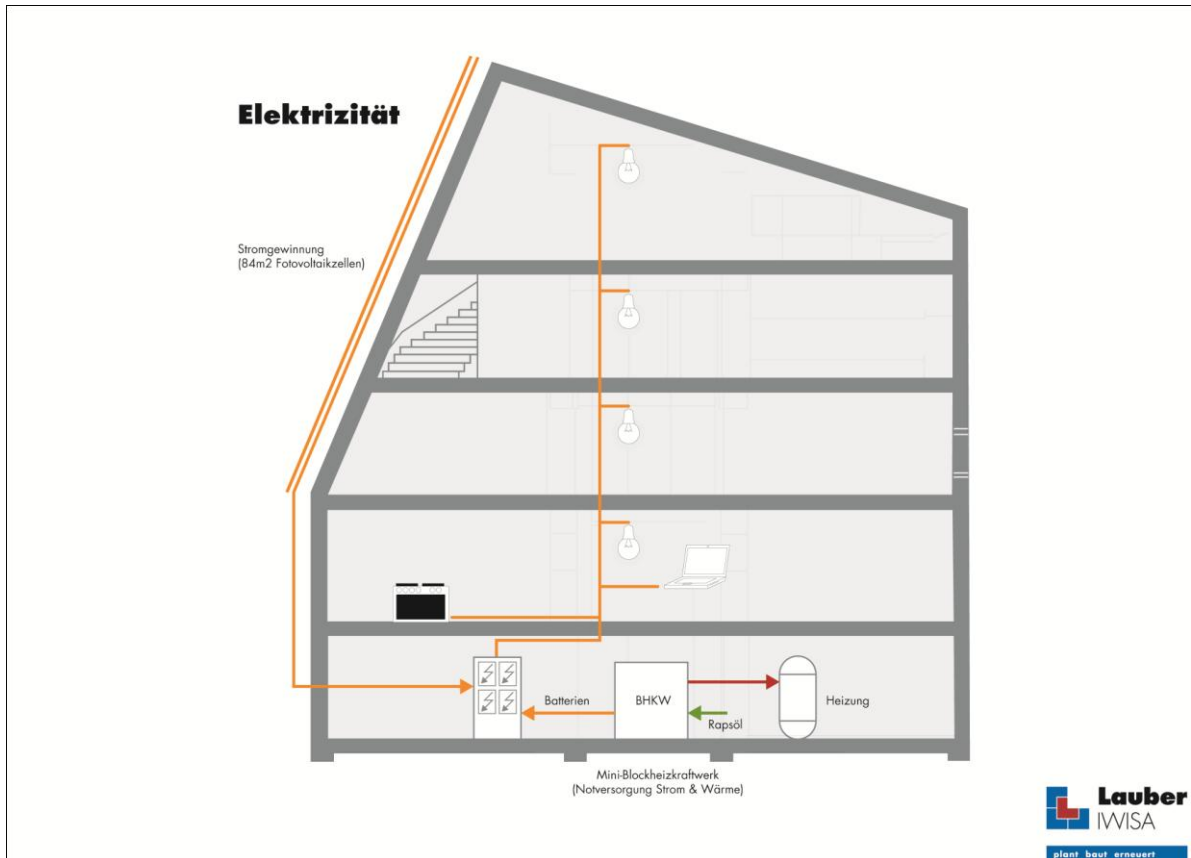


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Stromversorgung der Neuen Monte Rosa Hütte [17].

Heizung und Lüftung

Wie in Abbildung 2 gezeigt, wird der Wärmebedarf für das Gebäude durch passive Solarenergienutzung und thermische Solarkollektoren (60 m²) abgedeckt. Die nach Südwesten ausgerichteten, ausserhalb des Gebäudes an einer Felswand montierten Solarkollektoren erwärmen die Warmwasserspeicher (ca. 5800 l) für die Raumheizung und das Brauchwarmwasser.

Zur Wärmeverteilung und aus Komfortgründen wird das ganze Gebäude mechanisch belüftet. Um die Lüftungsverluste zu minimieren, wird die Abwärme aus der Abluft mittels einer Wärmerückgewinnung der Zuluft zugeführt. Bei Bedarf kann die Zuluft mittels Lufterhitzer zusätzlich erwärmt werden, um die Raumtemperaturen anzuheben.

Bei zu tiefem Ladezustand der Wärmespeicher kann zusätzliche Wärme mittels des BHKWs (ca. 18 kW_{th}) produziert werden [16].

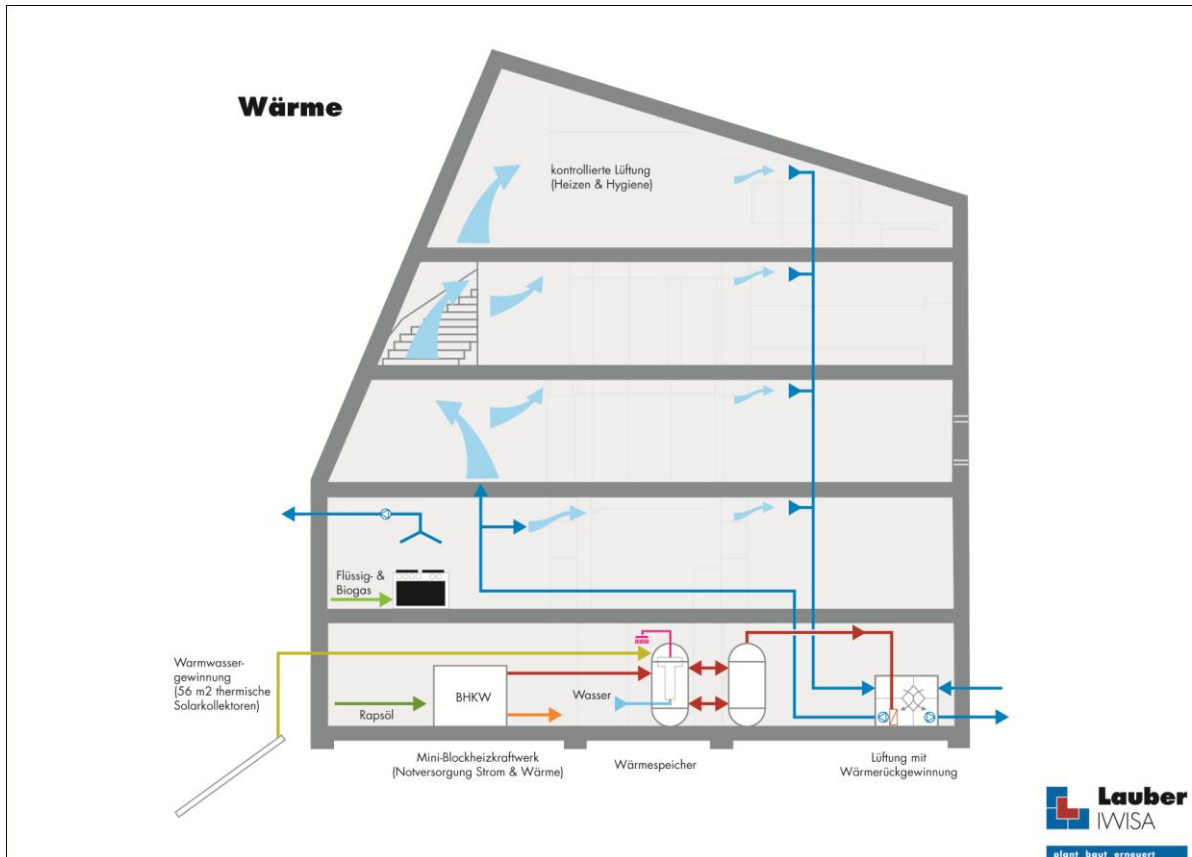


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Wärmeversorgung der Neuen Monte Rosa Hütte [17].

Wasserkreislauf

Da in der Umgebung der Hütte keine ganzjährig nutzbaren Quellen verfügbar sind, wird im Sommer anfallendes Schmelzwasser gesammelt und in einer Felskaverne (ca. 200 m³) frostsicher gelagert. Das Wasser wird in der Hütte gefiltert sowie mittels ultravioletter Strahlung desinfiziert und steht als Warm- oder Kaltwasser für das Kochen und die Körperhygiene zur Verfügung.

Das Abwasser wird mit einer Mikrofilterkläranlage auf biologischer Basis gereinigt und dann für die Toilettenspülung wiederverwendet (vgl. Abbildung 3). Auf diese Weise wird wertvolles Frischwasser gespart [16].

Das anfallende Abwasser kann einige Stunden in einem Abwasserspeichertank (ca. 3 m³) gespeichert werden, so dass die Abwasserreinigungsanlage (ARA) in Abhängigkeit der verfügbaren Energiemengen ein- und ausgeschaltet werden kann. Auch dieses Subsystem wird sinnvollerweise in das Energienetz integriert, da zur Wasseraufbereitung grosse Mengen an elektrischer Energie benötigt werden.

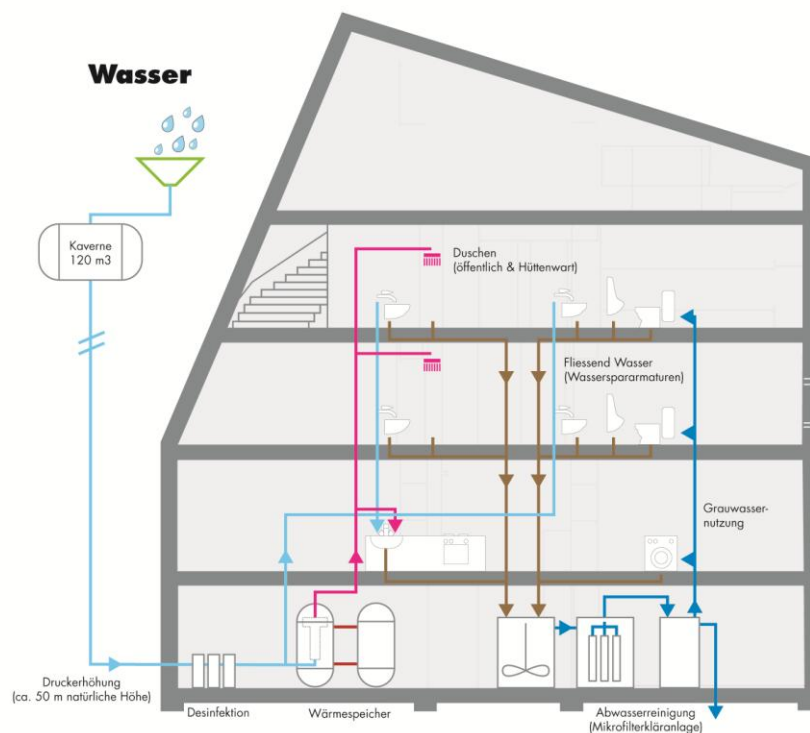


Abbildung 3: Der Wasserkreislauf der Neuen Monte Rosa-Hütte [17].

2.2. Standardlösung Regelung und Steuerung

Die Neue Monte Rosa-Hütte ist mit dem Siemens Gebäudeautomationssystem Desigo ausgerüstet. Darin wurde von Siemens Schweiz AG eine Standardlösung für die Steuerung und Regelung der Hütte implementiert – „Standardlösung“ im Sinne einer Lösung, in der die in der Gebäudeautomation standardmässig angewandten Steuer- und Regelkonzepte verwendet wurden. Die Standardlösung enthält keine modellbasierte Regelung, typische Elemente der Regelung sind Zweipunkt- sowie PID-Regler und Logikelemente. Die Lösung arbeitet ausschliesslich mit den lokalen, aktuellen Messdaten des Gebäudeautomationssystems, es werden keine Informationen von aussen wie z.B. Wettervorhersagen verwendet.

Die Standardlösung deckt die gesamte Steuerung und Regelung der Hütte ab. Sie wurde so realisiert, dass dieser Lösung optional ein optimales Energie- und Stoffmanagement (siehe Kapitel 6) übergeordnet werden kann.

Bereits die Standardlösung geht in ihrer Funktionalität über typische konventionelle Lösungen hinaus. So werden in der Lösung beispielsweise für die Regelung der Luftaufbereitung die Speicherzustände der Wärmespeicher und der Batterie benutzt. Ein vereinfachtes Prinzipschema dieser Regelung ist in Abbildung 4 dargestellt: Ist der Wärmespeicher nur wenig geladen, so wird der Ablufttemperatursollwert reduziert, um Wärme zu sparen. Ist hingegen der Batteriespeicherladezustand tief, so wird die geförderte Luftmenge reduziert, um elektrische Energie zu sparen. Beide Massnahmen haben eine Komfortreduktion zur Folge.

Zudem enthält die Standardlösung ein einfaches Lastabwurfprogramm, mit welchem bei tiefem Batteriespeicherladezustand elektrische Verbrauchergruppen ausgeschaltet werden können.

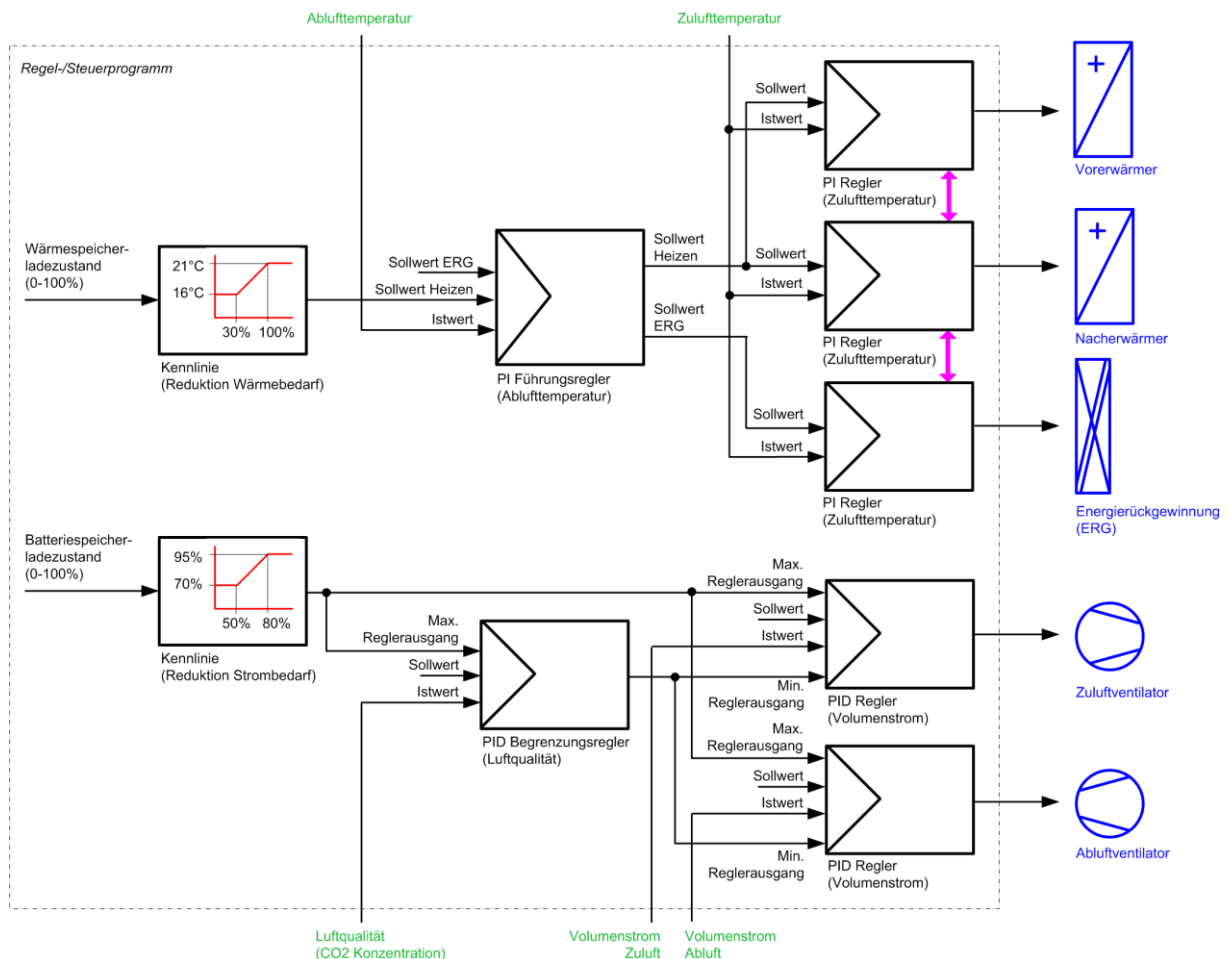


Abbildung 4: Vereinfachtes Prinzipschema der Regelung der Luftaufbereitung (Standardlösung).

3. System-Monitoring

3.1. Messungen

Zur Überwachung des Betriebes der Hütte (vgl. Zielsetzung 2) wurde das in der Abbildung 5 dargestellte Mess- und Überwachungssystem aufgebaut. Dieses System sammelt Daten aus dem Gebäudeautomationssystem, Messdaten der Wetterstation, Wettervorhersagen und Daten aus einem Reservationssystem des SAC:

- Zusätzlich zu den für die Steuerung und Regelung der Hütte benötigten Sensoren wurden in der Hütte Sensoren verbaut, welche alle Energieflüsse überwachen. Insgesamt werden vom Gebäudeautomationssystem über 150 Datenpunkte aufgezeichnet und an die ETH Zürich gesendet. Diese Daten werden für die spätere Verwendung in eine Datenbank gespeichert.
- Von MeteoSchweiz werden alle 10 Minuten Messungen der Wetterstation Monte Rosa-Plattje und zusätzlich täglich achtmal COSMO-2, dreimal COSMO-7 und einmal COSMO-LEPS Wetterprognosen zur Verfügung gestellt. Die Wetterstation Monte Rosa-Plattje, welche sich ca. 20m neben der Hütte befindet, wurde speziell für dieses Projekt installiert, um bessere Wetterprognosen für den Standort der Hütte zu erstellen.
- Speziell für die Neue Monte Rosa-Hütte wurde von der Fachhochschule Westschweiz ein Reservationssystem entwickelt. Die ETH Zürich kann von diesem Reservationssystem über einen Internetdienst die aktuellen Buchungszahlen abfragen. Der Hüttenwart aktualisiert zudem täglich die tatsächliche Anzahl Gäste.

Dieses Messsystem bildet die Grundlage für die in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Arbeiten. Die Messdaten werden sowohl für die Betriebsoptimierung als auch für die Verifikation der entwickelten Modelle verwendet.

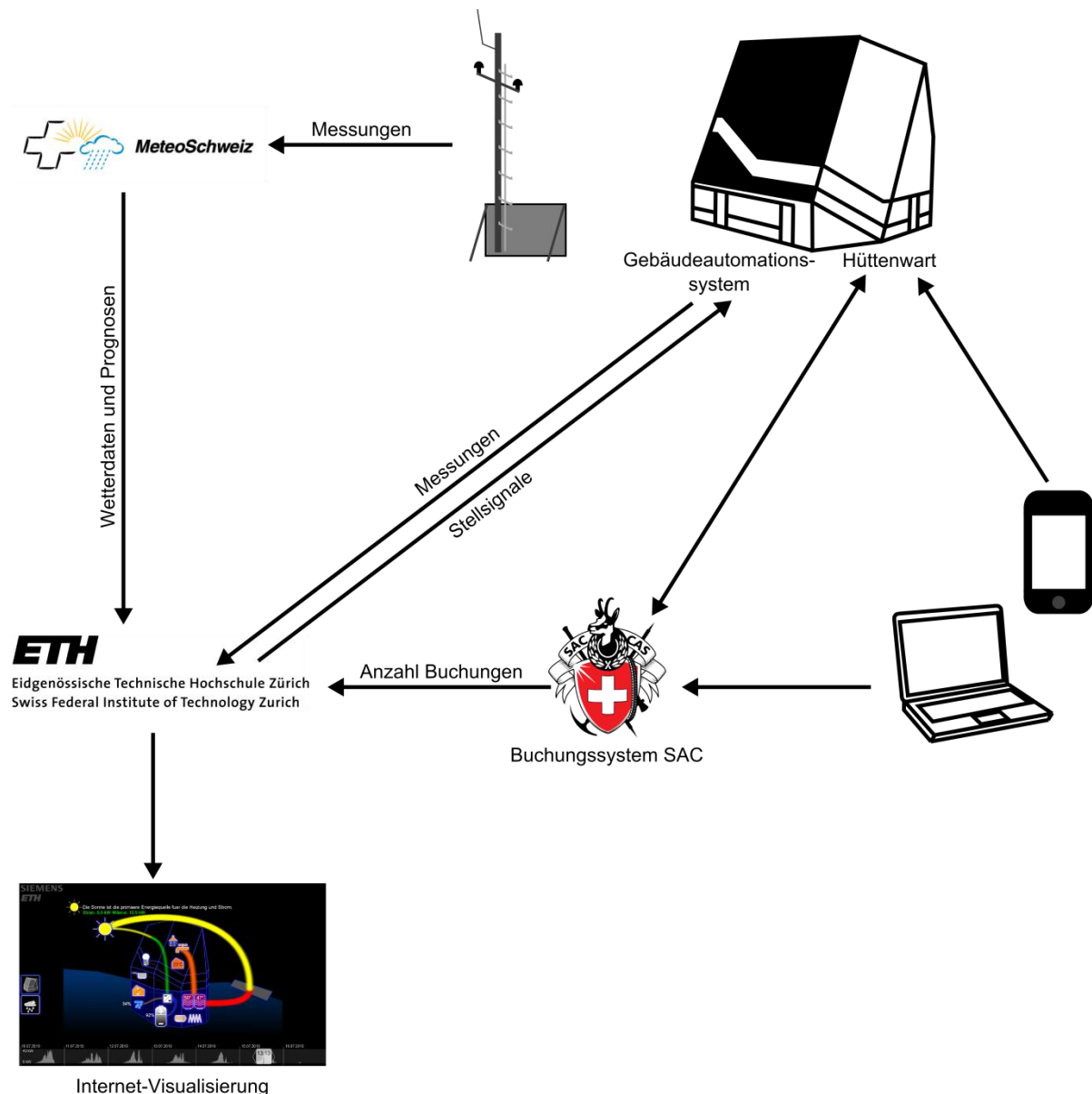


Abbildung 5: Das Mess- und Überwachungssystem der Neuen Monte Rosa-Hütte.

3.2. Visualisierung der Energieflüsse

Es wurden zwei verschiedene Visualisierungen mit verschiedenem Zielpublikum entwickelt (vgl. Zielsetzung 2):

Internet-Visualisierung:

Von der ETH Zürich wurde eine Internet-Visualisierung entwickelt, welche die aktuellen Speicherzustände und Energieflüsse der Hütte und das aktuelle Wetter vereinfacht darstellt. Screenshots dieser Visualisierung sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigt. Diese Visualisierung soll den interessierten Laien einen Einblick in den Betrieb der Neuen Monte Rosa-Hütte ermöglichen.

Während des Jahres 2010 war ein berührungsempfindlicher Bildschirm mit dieser Visualisierung auf der Neuen Monte Rosa-Hütte installiert. Da das Interesse der Besucher an

der Visualisierung nicht besonders gross war, wurde der Bildschirm aber wieder deinstalliert, um den elektrischen Verbrauch der Hütte zu reduzieren.

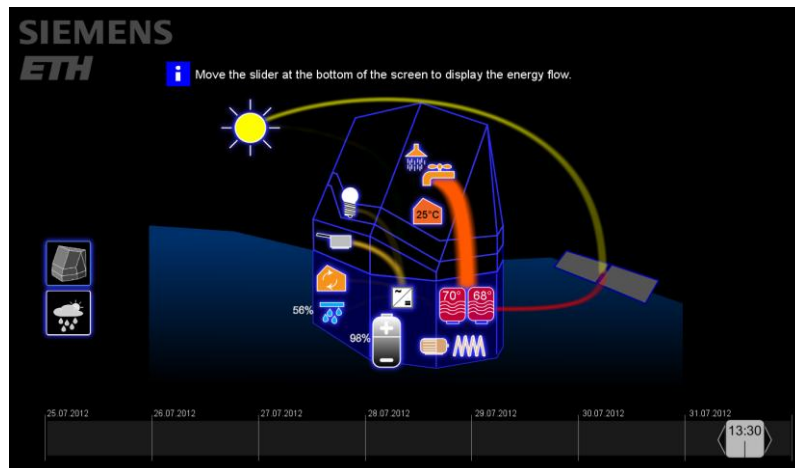


Abbildung 6: Screenshot der Visualisierung der Speicherzustände und Energieflüsse.

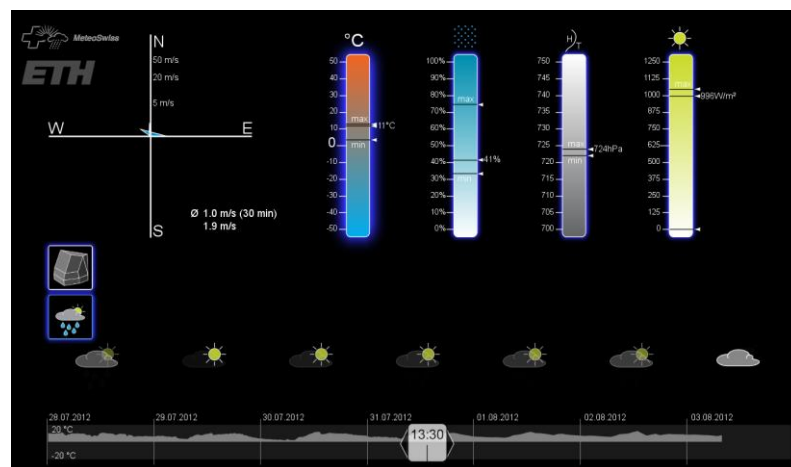


Abbildung 7: Screenshot der Wetter-Visualisierung.

Visualisierung mit Desigo Insight:

Von Siemens wurde in der Gebäudemanagementsoftware Desigo Insight der Siemens-Division Building Technologies eine detaillierte Visualisierung der Betriebszustände aller Systemkomponenten entwickelt (Abbildung 8). Diese Visualisierung richtet sich an die Experten und wird zur Analyse und Optimierung des Betriebes der Hütte verwendet.

- Der Verbrauch an elektrischer Energie ist viel grösser als erwartet. Dies hat zur Folge, dass das BHKW fast täglich in Betrieb genommen werden muss.
- Durch die langen Betriebszeiten des BHKWs ist zu viel thermische Energie vorhanden, welche in die Kaverne abgeführt werden muss.
- In den Betriebsjahren 2010 und 2011 wurde die Energieautarkie von 90% nicht erreicht.

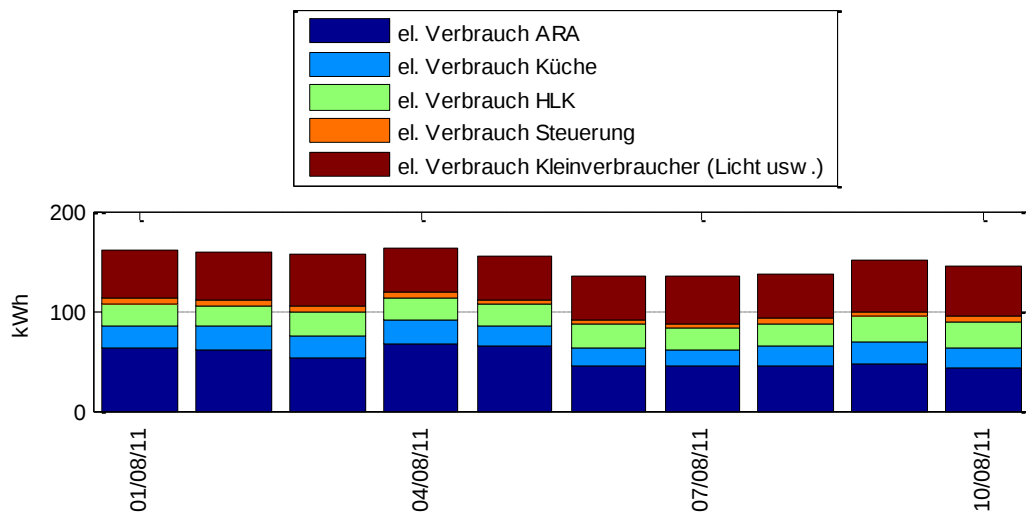


Abbildung 9: Beispiel einer detaillierten Aufgliederung des elektrischen Gesamtverbrauchs.

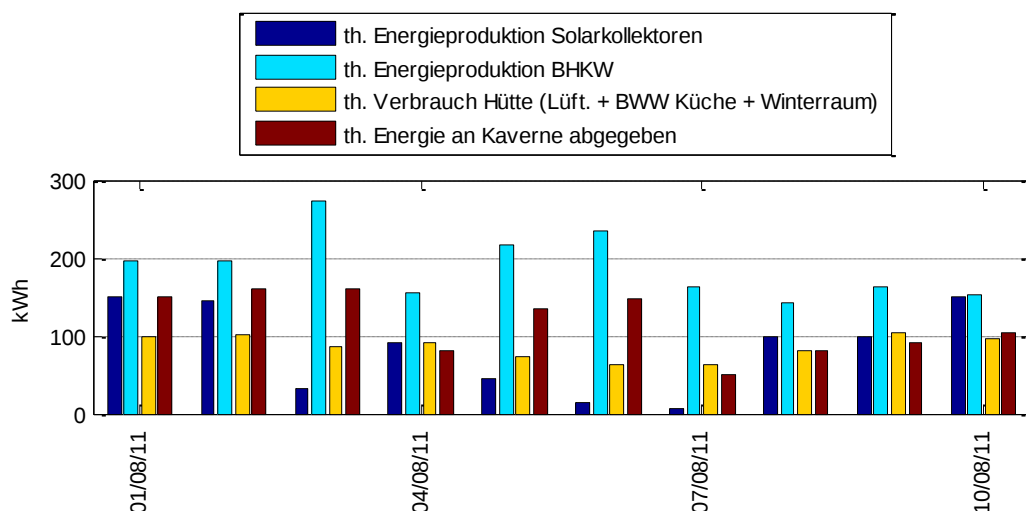


Abbildung 10: Beispiel eines Vergleichs der thermischen Energieproduzenten und –verbraucher.

4.2. Optimierung PV-Anlage

Bei der PV-Anlage wurde das Problem entdeckt, dass trotz schönem Strahlungsverlauf plötzliche Leistungseinbrüche auftreten können. Dieses Verhalten ist beispielhaft in Abbildung 11 für den 2. April 2011 gezeigt. Abklärungen haben ergeben, dass wegen den hohen Temperaturen der fassadenintegrierten PV-Anlage die PV-Spannung beim Punkt maximaler Leistung unter die Batteriespannung fällt. Dies hat zur Folge, dass in solchen Fällen die Batterie nicht mehr geladen werden kann.

Durch Anpassen der Einstellungen in den Laderegler konnten die Leistungseinbrüche behoben werden.

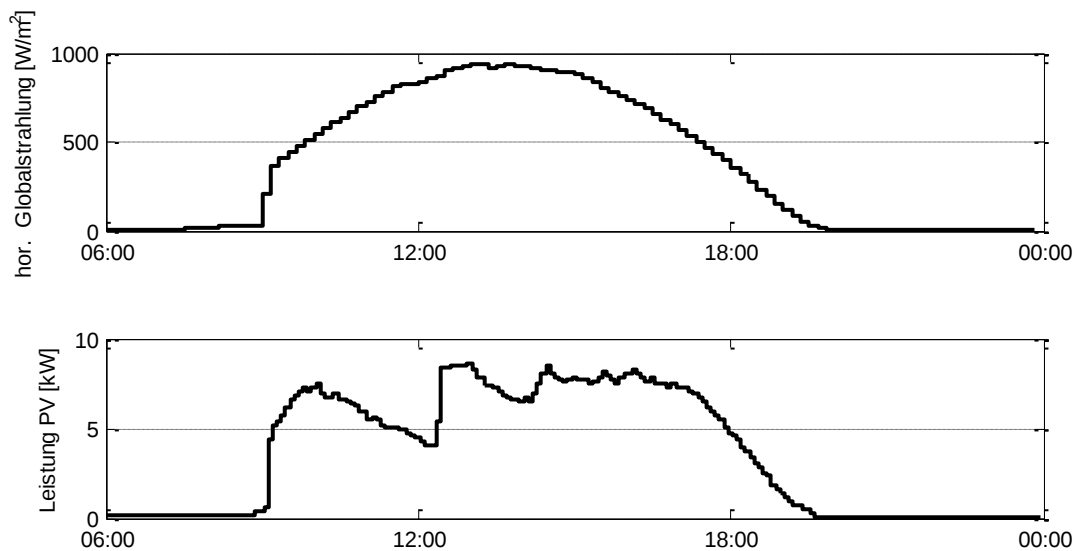


Abbildung 11: Gemessene horizontale Globalstrahlung und Leistung der PV-Anlage am 2. April 2011.

4.3. Optimierung Abwasserkläranlage

Die ARA wurde für ein Besucheraufkommen von 6500 Übernachtungen pro Jahr ausgelegt. Schon im ersten Betriebsjahr 2010 wurde diese Zahl mit mehr als 10000 Übernachtung übertroffen. Dies hatte zur Folge, dass die Kläranlage das anfallende Abwasser nicht mehr zufriedenstellend reinigen konnte. Aus diesem Grund wurde unter der Leitung der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) die Reinigungsleistung der bestehenden Kläranlage im Sommer 2011 durch einen Umbau erhöht. Wegen den beschränkten Platzverhältnissen in der Hütte wurde der Abwasserspeichertank im Zuge dieses Umbaus anderweitig in die Kläranlage integriert, weshalb es bei der umgebauten Kläranlage die Möglichkeit der Abwasserspeicherung nicht mehr gibt.

Zusätzlich wurde für die ARA nachträglich ein eigenes Überwachungssystem installiert, welches unabhängig vom Gebäudeautomationssystem der Hütte ist. Mit Hilfe dieses Überwachungssystems kann die Kläranlage aus der Ferne analysiert und optimiert werden.

4.4. Optimierung Internetverbindung zur Hütte

Für den Zugriff auf die Messdaten des Gebäudeautomationssystems wird eine Internetverbindung zur Hütte benötigt. Von der Swisscom wurde daher im Herbst 2009 eine Internet-Lösung über Satelliten-Verbindung installiert. Diese Lösung hat sich als zu wenig stabil erwiesen, was viele Messlücken zur Folge hatte. Darum hat Swisscom die Satelliten-Lösung im Winter 2011/2012 durch eine UMTS-Lösung ersetzt.

5. Modellierung der Energie- und Gebäudetechnik

5.1. Ausgangslage

Die Neue Monte Rosa Hütte ist seit zwei Jahren in Betrieb. Der Betrieb der Anlage mit den verschiedenen Teilsystemen wie Photovoltaik, Blockheizkraftwerk, Wärmespeicher, Lüftung, Heizung, Abwasseranlage etc. wird stetig überwacht, und die Daten werden für weitere Analysen, Optimierungen und Tests gespeichert.

Während der Planungsphase wurde zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit ein Gebäudemodell mit über 50 Zonen in IDA ICE 3.0 erstellt. Bei diesen Simulationen wurde die komplexe Gebäudetechnik nicht simuliert. Diese wurde erst mit der neuen Version von IDA ICE 4.2 ins Modell integriert. Mit der Version 3.0 wäre die Erstellung der Anlagentechnik noch sehr komplex ausgefallen, denn für viele Anlagenteile standen noch keine Modelle zur Verfügung, mit der Version 4.2 sieht das anders aus. So wurde es möglich, das Gebäudemodell mit Modellen für die verschiedenen Anlagenteile wie Photovoltaik, thermische Solaranlage, geschichtete Warmwasserspeicher, das Blockheizkraftwerk sowie die Abwasseranlage zu ergänzen. Dabei wurden schrittweise die neuen Anlagenteile aufgebaut, implementiert, getestet und Vergleiche mit den realen Messwerten durchgeführt. Dank dem integralen Gebäudemodell inkl. Anlagentechnik im gleichen Simulationstool können nun zusätzlich zu den Fragen der Raumtemperaturen und Behaglichkeit auch Fragen zur Anlagendimensionierung oder auch Kostenoptimierung ganzheitlich für das Gebäude beantwortet werden. Dies gibt dem Planer und dem Bauherrn mehr Sicherheit für die zusätzlich geplanten Investitionen beim Ausbau oder bei der Optimierung der Anlage.

5.2. Vorgehen

Im ersten Schritt wurde das Gebäudemodell (Abbildung 12) in IDA ICE 4.22 mit über 50 Zonen komplett neu erstellt. Die Oberfläche der Aussenwand besteht aus einer dünnen Aluminiumschicht, welche bezüglich des Emissions- und Absorptionsverhaltens deutlich andere Kennwerte als z.B. ein Abrieb aufweist. Die schrägen Dachpartien konnten neu ebenfalls berücksichtigt werden, womit bezüglich der Einstrahlungsergebnisse genauere Resultate zu erwarten sind. Für die Gebäudetechnik wurde eine Standardlüftungsanlage mit der entsprechenden Luftheizung eingefügt, welche durch einen fiktiven Ölkessel mit genügend Energie versorgt wird. Lasten wie Geräte, Licht und Personen wurden bewusst noch nicht berücksichtigt, so dass die Simulationsergebnisse mit den Messungen in der Hütte ausserhalb der Nutzungszeit verglichen werden konnten.

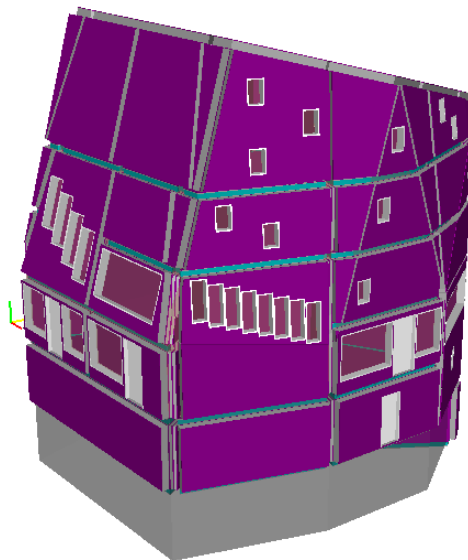


Abbildung 12: Gebäudemodell

Im zweiten Schritt wurden die internen Lasten gemäss einem angenommenen Nutzerverhalten ergänzt und mit den Messwerten aus der genutzten Zeit verglichen.

Im dritten Schritt wurde die Gebäudetechnik schrittweise mit den folgenden Teilen ergänzt: zwei getrennte Speicher für Heizung und Warmwasser, Photovoltaikanlage auf dem Dach, thermische Solaranlage neben der Hütte, Blockheizkraftwerk, Abwasseranlage und die

Notkühlung zur Abgabe der überschüssigen Energie im Heizungsspeicher an das Wasser in der Frischwasser-Kaverne.

5.3. Gebäudehülle

Das im ersten Schritt erstellte Gebäudemodell ohne die detaillierte Implementation der Anlagentechnik wurde zum Abgleich der Gebäudehülle mit den Messungen im Winter vom 10.2. bis zum 10.3.2011 ausserhalb der Nutzungszeit und ohne interne Lasten verglichen. Damit die Simulationsergebnisse mit den Messwerten vergleichbar sind, mussten auch die gleichen Bedingungen hergestellt werden. In diesem Fall wurden die Klimadaten, Zuluftvolumenströme und die Zulufttemperaturen aus der Messung als Vorgabe in der Simulation berücksichtigt. Die anderen Einflussfaktoren wie Personen und Geräte wurden bewusst noch weggelassen, um das Modell schrittweise zu überprüfen. Das Auskühlverhalten des Gebäudes wurde ohne weitere Energiezufuhr von der Heizung und Lüftung gemessen. Für jede einzelne Zone stellt IDA die entsprechenden Resultate für die Beurteilung der Raumtemperaturen, Oberflächentemperaturen (Abbildung 13), Volumenströme und die Wärmeflüsse zur Verfügung.

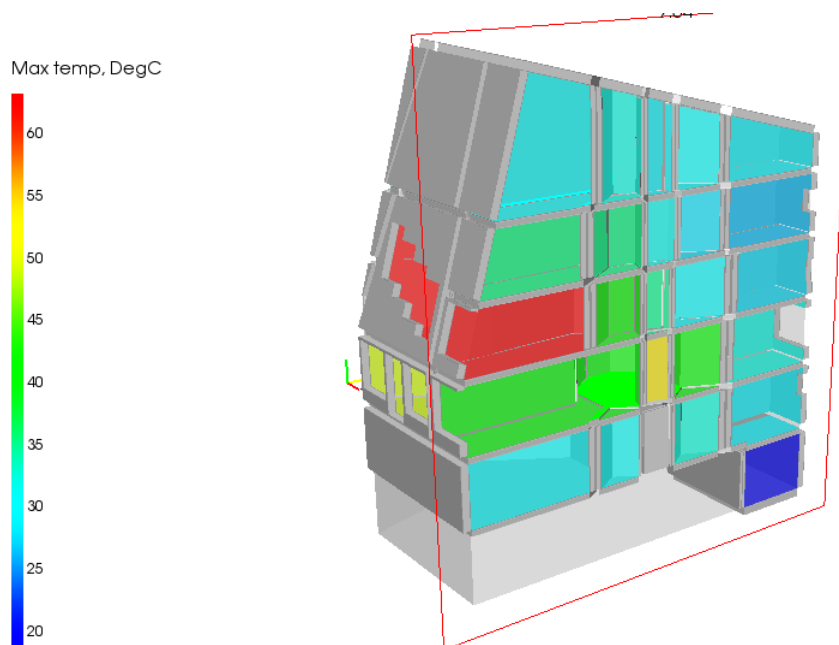


Abbildung 13: Oberflächentemperaturen in den Zonen

Der Temperaturverlauf in Abbildung 14 zeigt, dass die Resultate vor allem bei ausgeschalteter Lüftung vom 14.2. bis 28.2.11 unterschiedlich steil verlaufen. Die gemessenen Temperaturen sinken bei ausgeschalteter Lüftung ohne interne Wärmezufuhr weniger steil ab als die simulierten Temperaturen.

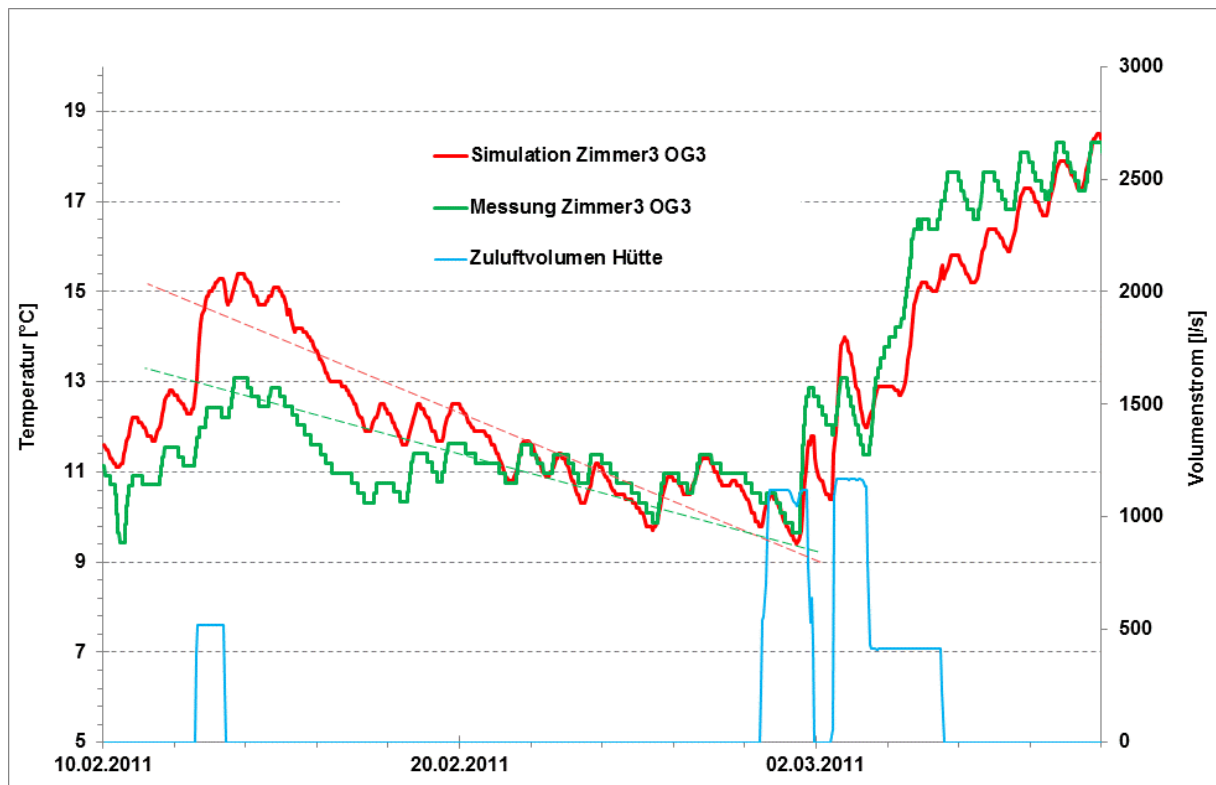


Abbildung 14: Temperaturvergleich

Das bedeutet, dass im Modell entweder zu viel Energie an die Umgebung verloren geht oder die Wärmegewinne zu klein sind. Da die Klimadaten direkt von der nur wenige Meter entfernten Meteostation stammen, wurde der Fehler nicht im Bereich der Meteodaten vermutet. Es zeigte sich dann aber, dass die Meteodaten wie vermutet korrekt waren, aber beim Import in die Simulationssoftware nicht berücksichtigt wurden, dass in der Simulationssoftware IDA die Globalstrahlung horizontal, wie sie von der Meteostation geliefert wird, nicht direkt verwendet werden kann. Für die Simulation müssen die Strahlungswerte zwingend als Direktstrahlung normal eingegeben werden. Die umgerechneten Werte mit dem aktuellen Sonnenstand ergaben eine um ca. 50% grössere Globalstrahlung als normal bei direkter Sonneneinstrahlung. Mit den umgerechneten Strahlungswerten stimmt nun der Verlauf der Temperaturzonen mit den Messwerten deutlich besser überein. Um eine noch bessere Genauigkeit beim Vergleich der Temperaturen bei ausgeschalteter Lüftung zu erhalten, müssten die Temperaturfühler in der Hütte besser angeordnet werden. Diese wurden einige Zentimeter hinter dem Abluftgitter oberhalb der Türen platziert. Für unsere Zwecke wäre eine Messung mit an der Wand montierten Raumfühlern genauer. Der Messfehler bei ausgeschalteter Lüftung konnte nicht ermittelt werden, da die Hütte während dieser Zeit nicht bewohnt war. Bei einer erneuten Messung könnte der Messfehler auch deutlich verringert werden, indem der Volumenstrom der Lüftung in der Simulation wie auch in der Anlage nicht ganz auf null reduziert wird, so dass der Fühler hinter dem Gitter stets von der Raumluft umströmt wird.

Eine weitere detailliertere Überprüfung für das Aufheiz- und Auskühlverhalten am angepassten Modell konnte im Winter 2011/2012 leider nicht mehr durchgeführt werden, weil in dieser Periode die Kommunikation unterbrochen war.

5.4. Gebäudetechnik

Im ersten Schritt wurde das Gebäude ohne Berücksichtigung der spezifischen Anlagentechnik der Hütte optimiert. Nach den Anpassungen der Gebäudegeometrie (inkl. Hülle, Struktur, Materialisierung und Nutzung) wurde die Simulation im zweiten Schritt mit den verschiedenen Systemen wie Photovoltaik, BHKW, Wärmespeicher, Luftheizung und

Abwasseranlage erweitert. Diese Erweiterung ermöglicht nun die Simulation des gesamten Gebäudes inklusive der komplexen Gebäudetechnik, so dass das Gebäude als Ganzes beurteilt werden kann. Im Modell wurde zuerst der zentrale Schichtspeicher implementiert, welcher je nach Temperaturniveau von der Solaranlage in unterschiedlicher Höhe mit Wärme geladen werden kann. Die Solaranlage wird mit einer konstanten Temperaturdifferenz von 8 Kelvin zwischen Vor- und Rücklauf geregelt. Mit erster Priorität wird die Solarenergie in den BWW Speicher und anschliessend in den Heizungsspeicher geladen. Das Blockheizkraftwerk liefert eine Nennleistung von 12 kW elektrisch und 27 kW thermisch beim Betrieb auf Meereshöhe. Im Betrieb auf 2'883 Metern verringert sich die Leistung um ca. 20% bis 25%. Wenn der Akku mit der Kapazität von 255 kWh auf 50% entladen ist, wird das BHKW eingeschaltet, bis der Akku wieder auf 70% geladen ist.

5.5. Bestimmung der Verbräuche

Die Qualität und Genauigkeit einer Simulation ist neben den genauen Modellen sehr stark abhängig von den zugrunde gelegten Fahrplänen für Personen, Licht und Geräte. Bei der Simulation der Anlagentechnik müssen weitere Daten detailliert zur Verfügung stehen. Bei der Neuen Monte Rosa Hütte wurden viele Messgeräte zur Aufzeichnung von Temperaturen, Leistungen, Energieverbräuchen etc. eingebaut. Bei einigen Verbrauchern jedoch ist der Energiebedarf nicht genügend genau bekannt. So wurde der Energieverbrauch der Abwasserreinigungsanlage (ARA), welcher nicht aus Datenblättern entnommen werden konnte, basierend auf den aufgezeichneten Daten, bestimmt. Mit Hilfe der gemessenen Energie und den Besucherzahlen im Jahr 2011 wurde der Energieverbrauch der ARA ermittelt und als Geradengleichung (1) implementiert.

$$(1) \quad Q_{ARA} = n \cdot 9.6 + 1042$$

Q_{ARA} : Energiebedarf in Wh pro Tag
n: Anzahl Gäste pro Tag

So stellt die ARA in der Simulation vereinfacht einen Verbraucher in Abhängigkeit der Besucherzahlen dar. Analog zur Bestimmung des Energieverbrauches der ARA wurde der Stromverbrauch der Küche gemäss den Messdaten ermittelt und implementiert. Wie in Abbildung 15 ersichtlich ist, streut der Tagesverbrauch hier sehr stark. Dabei nicht berücksichtigt werden kann der Anteil an thermischer Gasenergie zum Kochen.

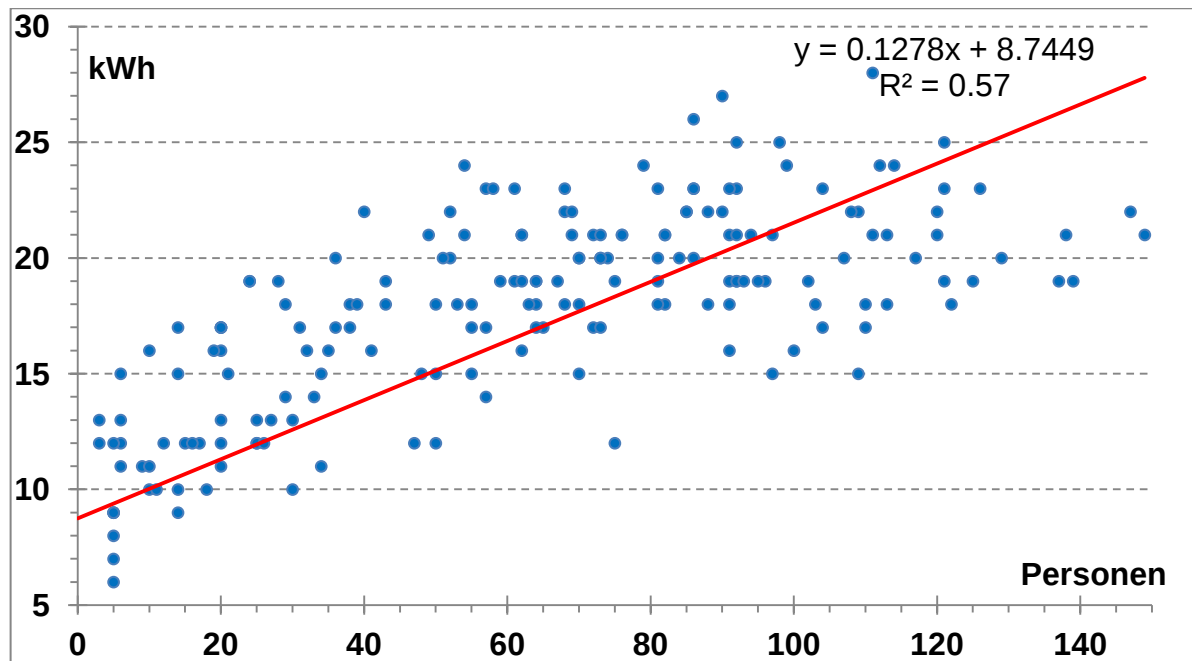


Abbildung 15: elektrischer Energiebedarf Küche

5.6 Regulierung der Anlage

Im nächsten Schritt wurden die einzelnen Anlageteile mit der Regeltechnik ergänzt. Bei der Regeltechnik galt es abzuwägen, wie stark diese vereinfacht werden kann, ohne dass die Resultate zu stark beeinflusst werden. Ist die Regeltechnik definiert, sind die Regelparameter zu bestimmen und so die Simulation wie bei einer realen Anlage quasi „einzuregulieren“, so dass weder ein PI-Regler schwingt noch das BHKW taktet. Der Vergleich der Resultate in Abbildung 16 zeigt, dass nach diversen Anpassungen in der Simulation die Werte gut übereinstimmen. Bei den ersten Modellen wurde in der Simulation deutlich mehr überschüssige Energie vom BHKW über die Notkühlung abgeführt als in der realen Hütte. Mit der starken Vergrößerung der Speicherverluste über die Anschlüsse in der Simulation konnte die Differenz ausgeglichen werden. Hier ist noch zu klären, weshalb die Speicher in der Hütte derart viel Energie über die Anschlussleitungen verlieren. Im Anhang B ist das Simulationsmodell für die Energieerzeugung und die Wärmeabgabe an die Verbraucher abgebildet.

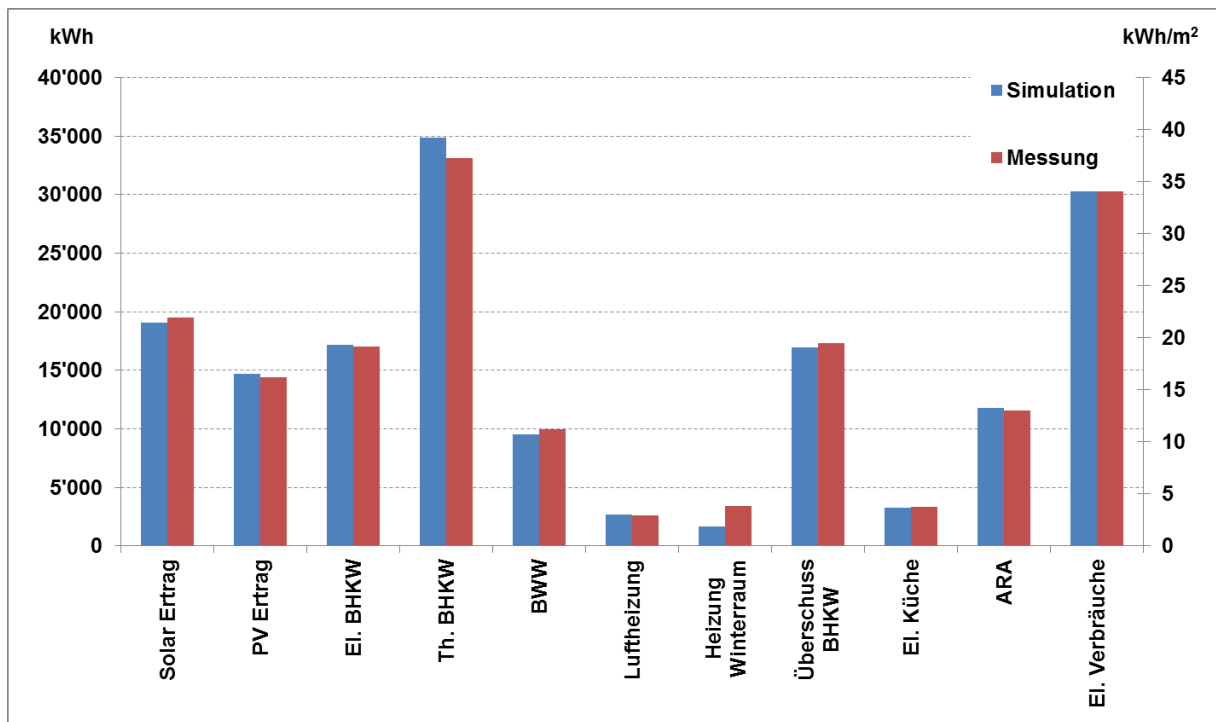


Abbildung 16: Vergleich Energiebedarf im Jahr 2011

5.7. Modellvergleich IDA und ETH

An der ETH wurde ein regelungsorientiertes Modell entwickelt, welches in einem modellbasierten, vorausschauenden Regelalgorithmus verwendet werden kann. Das Modell der ETH soll nun mit dem Modell der Hochschule Luzern verglichen werden. Dazu wurde an der Hochschule Luzern das komplette Gebäude ohne interne Lasten und Personen simuliert. Zum Vergleich der beiden Modelle wurden die Klimawerte, die Zulufttemperatur und der Zuluftvolumenstrom in ein Outputfile geschrieben. Diese Werte wurden als Input für die Simulation an der ETH verwendet, so dass beide Modelle mit den gleichen Eingangsgrößen verglichen werden können. In Abbildung 17 sind die Resultate der Raumtemperaturen für den Fall, dass die Zulufttemperatur zwischen 10°C und 30°C und der Zuluftvolumenstrom zwischen 1250 und 125 m³/h gewechselt wurde, dargestellt. Die Verläufe der beiden Temperaturkurven stimmen gut zusammen. Die Raumtemperatur vom ETH-Modell ist über das Jahr gemittelt um 1.9 °C und in den Sommermonaten vom 1.4 bis 31.8. um 2.9 °C tiefer. In einem weiteren Vergleich gemäss Abbildung 18 wurde ein konstanter Zuluftvolumenstrom von 1250 m³/h verwendet. Die Zulufttemperatur wurde so reguliert, dass im Restaurant eine konstante Raumtemperatur von 20°C resultierte. Der Vergleich der beiden Raumtemperaturen gemittelt über das ganze Gebäude zeigt, dass das ETH-Modell im Mittel um ca. 1.5 °C tiefer als das Modell der Hochschule Luzern liegt.

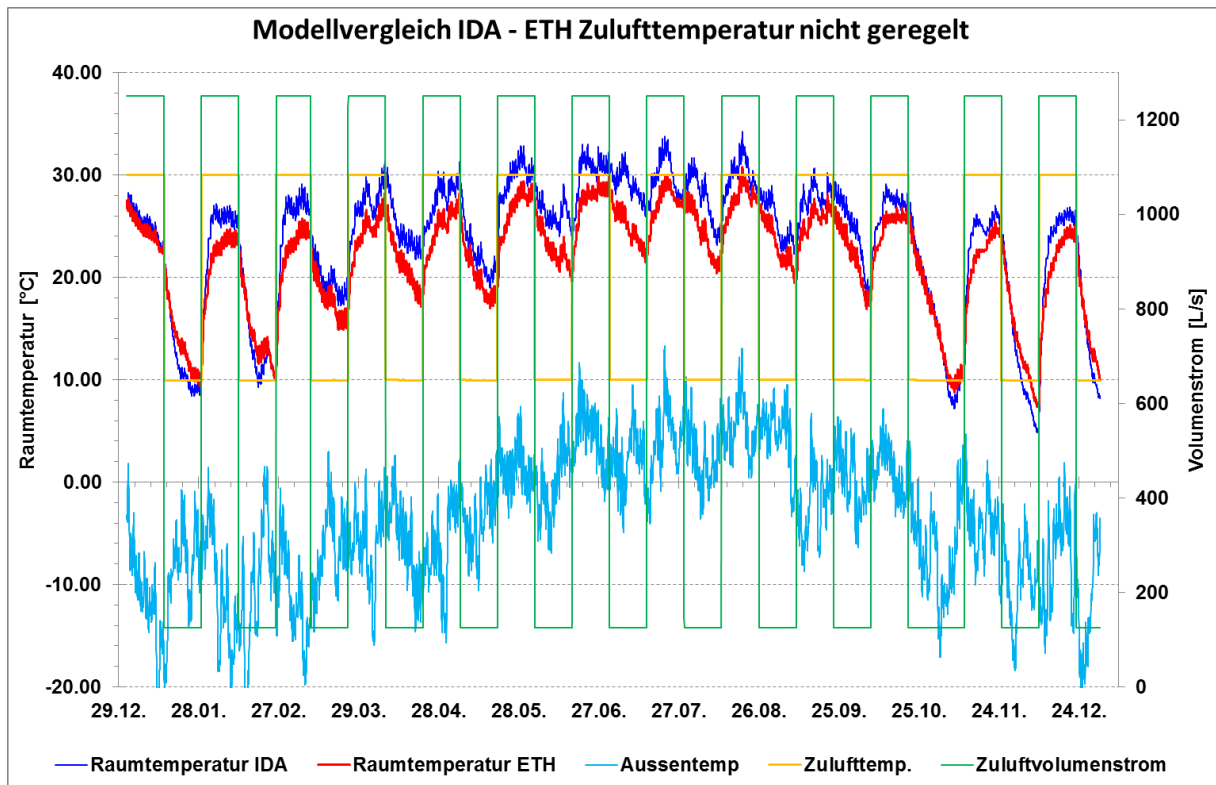


Abbildung 17: Modellvergleich mit konstanten Zulufttemperaturen und Volumenströmen

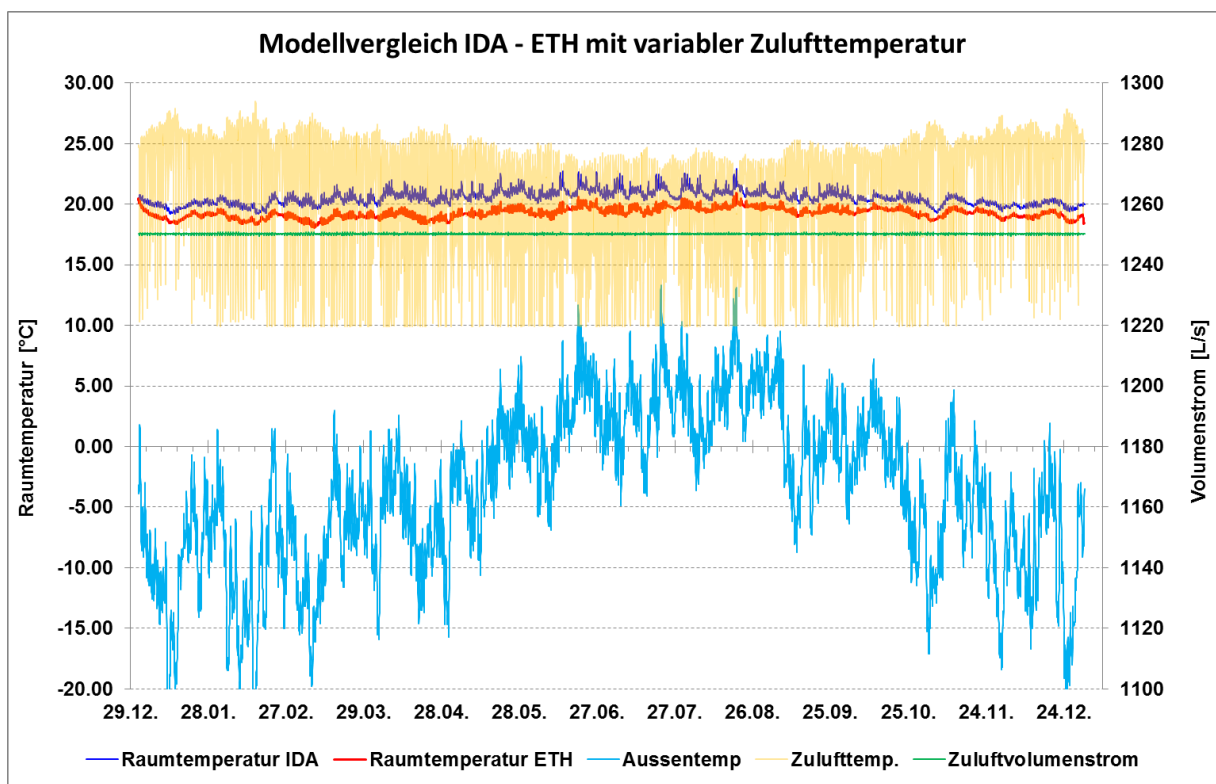


Abbildung 18: Modellvergleich mit geregelter Zulufttemperatur

5.8. Resultate

Mit den erforderlichen Anpassungen in der Simulation stimmt der Energiebedarf in der Simulation gut mit den realen Messwerten der Neuen Monte Rosa Hütte überein. Dies

erlaubt nun, Änderungen bei den Anlagen bereits in der Planungsphase mittels Simulation zu überprüfen.

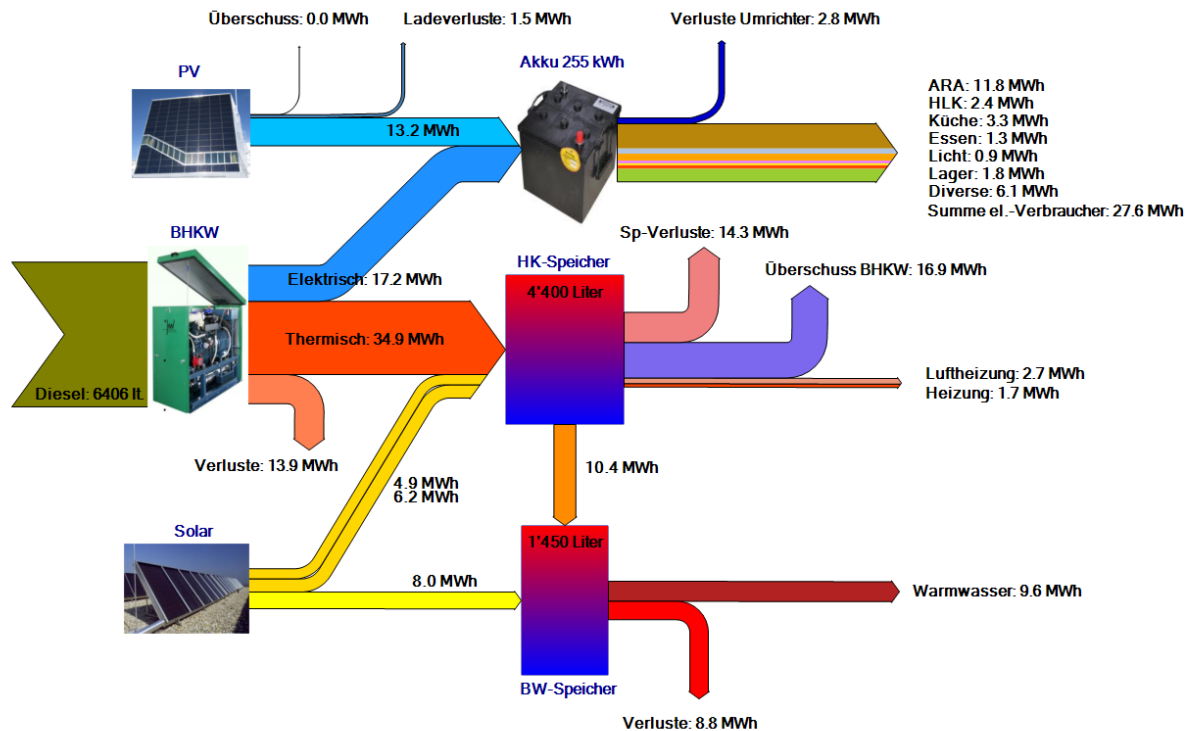


Abbildung 19: Energieflussdiagramm der Monte Rosa Hütte

In Abbildung 19 ist der Energiefluss für die Basisvariante dargestellt. Der grosse Energiebedarf des BHKW kommt daher, dass das BHKW gemäss dem Strombedarf gesteuert wird. So bleibt der grösste Teil der durch das BHKW produzierten Wärme ungenutzt und muss als Überschuss abgeführt werden, da die Solaranlage den Wärmebedarf zu einem grossen Teil deckt. Der Wirkungsgrad des BHKW's zur Stromproduktion beträgt ca. 26%. Dabei sind die Umrichterverluste von Wechselspannung in Gleichspannung und die Ladeverluste des Akkus nicht berücksichtigt. Auffallend gross sind auch hier die bereits oben beschriebenen Verluste bei den Speichern und deren Anschlüsse oder nicht erfassten Wärmeabgängen. Der HK-Speicher ist mit zwei Speichern zu je 2'200 Liter, welche über vier Verbindungsleitungen miteinander verbunden sind, zu total 4'400 Liter realisiert. Diese Verbindungsleitungen sind nicht isoliert, womit ein Teil der Verluste erklärt werden kann. Aber auch im BW-Speicher geht rund die Hälfte der Energie durch den Speicher, der Zirkulation oder unbekannte Wärmeabgabe verloren. Bei den elektrischen Verbrauchern wurde unter Diverse die Differenz vom gesamten Verbrauch minus die erfassten Lasten zusammengefasst. Hier sei noch erwähnt, dass der elektrische Energiezähler für die Messung des gesamten elektrischen Verbrauches gemäss Auskunft der ETH einen grossen Messfehler von ca. 10% aufweist. Ungenau ist auch die thermische Wärmemessung vom Brauchwarmwasser, weil der Vorlauftemperaturmessfühler an der falschen Leitung montiert wurde. Dieser Fehler ist inzwischen behoben, aber erst nach der Auswertung der Basisdaten für das Jahr 2011.

Der grosse Überschuss der Wärme vom BHKW ist auch in Abbildung 20 ersichtlich. Für den Betrieb der Hütte sind total 41.5 MWh Energie erforderlich. Dafür werden 66 MWh Primärenergie benötigt. Im nächsten Abschnitt werden verschiedene Varianten simuliert, um zu zeigen, wie der grosse Bedarf an Primärenergie gesenkt werden kann. Dabei wird die Energie, welche zum Transport des Diesels mit dem Helikopter zur Monte Rosa Hütte benötigt wird, nicht berücksichtigt.

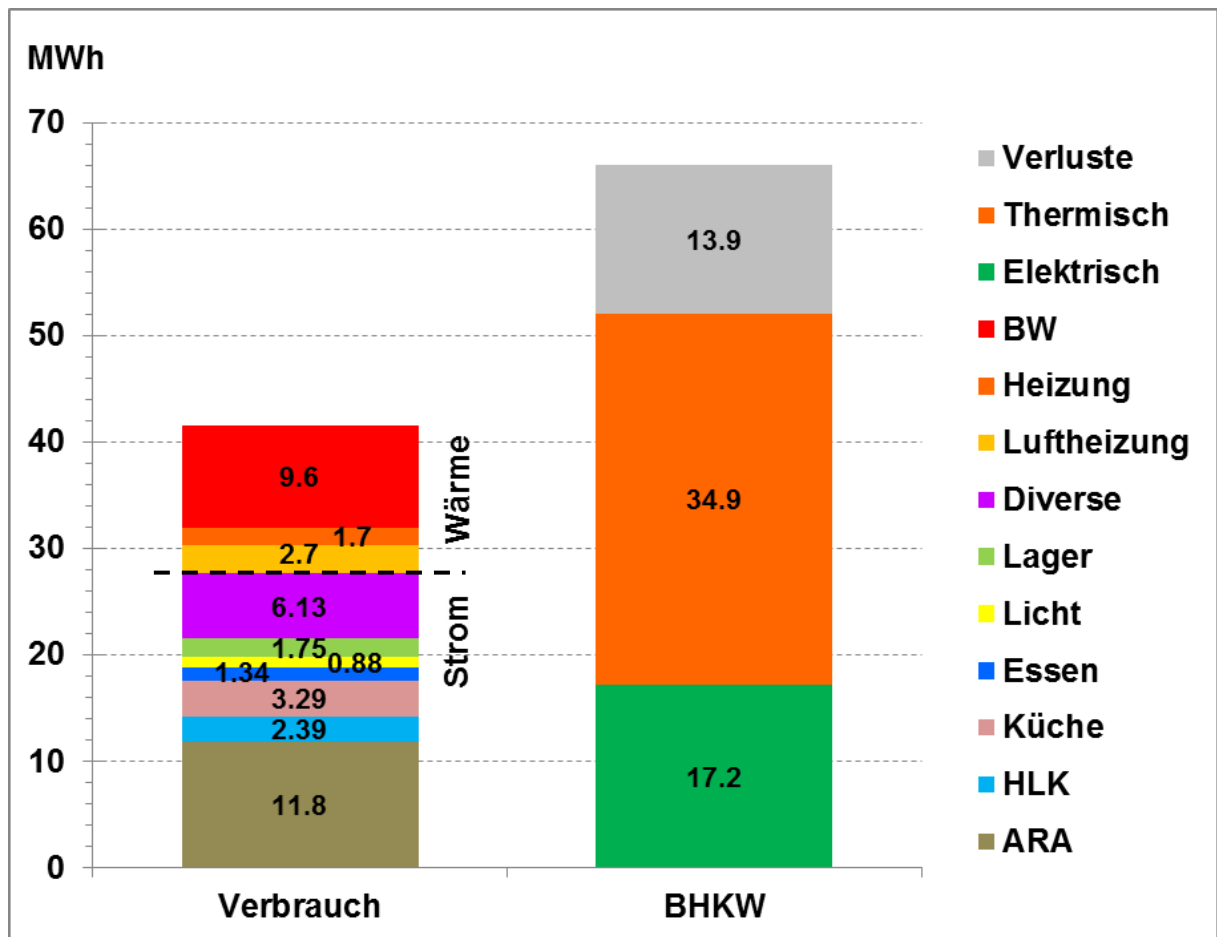


Abbildung 20: Verbrauch und Bedarf BHKW

5.9. Variantenvergleich

Alle oben aufgeführten Grafiken und Resultate beruhen auf der Basisversion. Im Weiteren wurden die Auswirkung durch Veränderungen an der Anlage simuliert, welche in Tabelle 1 kurz beschrieben werden.

Variante	Beschreibung
Basisvariante	Entspricht der Basis für die weiteren Varianten.
PV_West +25%	Die PV-Anlagefläche wurde auf der Westseite am gleichen Standort mit der gleichen Ausrichtung wie die Solaranlage um 25 % (22 m ²) erweitert
PV_Süd +25%	Die PV-Anlagefläche wurde auf der Südseite mit der gleichen Ausrichtung wie die bestehende PV-Anlage auf dem Dach um 25 % (22 m ²) erweitert
PV_West +50%	Die PV-Anlagefläche wurde auf der Westseite am gleichen Standort mit der gleichen Ausrichtung wie die Solaranlage um 50 % (44 m ²) erweitert
PV_Süd +50%	Die PV-Anlagefläche wurde auf der Südseite mit der gleichen Ausrichtung wie die bestehende PV-Anlage auf dem Dach um 50 % (44 m ²) erweitert
PV_West +100%	Die PV-Anlagefläche wurde auf der Westseite am gleichen Standort mit der gleichen Ausrichtung wie die Solaranlage um 100 % (88 m ²) erweitert
PV_Süd +100%	Die PV-Anlagefläche wurde auf der Südseite mit der gleichen Ausrichtung wie die bestehende PV-Anlage auf dem Dach um 100 % (88 m ²) erweitert
ARA -25%	Der konstante und der Belegungsabhängige variable Energieverbrauch wurde um 25 % reduziert. Ebenfalls wurde die Wärmeabgabe durch die ARA an den Raum um 25 % reduziert
ARA -50%	Der konstante und der Belegungsabhängige variable Energieverbrauch wurde um 50 % reduziert. Ebenfalls wurde die Wärmeabgabe durch die ARA an den Raum um 50 % reduziert
Besucher +25%	Die Besucherzahlen wurden um 25 % erhöht. Entsprechend wurde der Verbrauch BW, ARA, Kochen und die Fahrpläne für Licht und Geräte angepasst.
Besucher -25%	Die Besucherzahlen wurden um 25 % reduziert. Entsprechend wurde der Verbrauch BW, ARA, Kochen und die Fahrpläne für Licht und Geräte angepasst.
Besucher -50%	Die Besucherzahlen wurden um 50 % reduziert. Entsprechend wurde der Verbrauch BW, ARA, Kochen und die Fahrpläne für Licht und Geräte angepasst.
Besucher -50% +100% PV	Die Besucherzahlen wurden um 50 % reduziert. Entsprechend wurde der Verbrauch BW, ARA, Kochen und die Fahrpläne für Licht und Geräte angepasst. Die PV-Anlagefläche wurde auf der Westseite um 100 % erweitert.
Besucher -50% -Kochen	Die Besucherzahlen wurden um 50 % reduziert. Die Kochenergie wurde auf 0 reduziert und somit nicht berücksichtigt. Entsprechend wurde der Verbrauch BW, ARA, und die Fahrpläne für Licht und Geräte angepasst.
ohne Kochen	Die Kochenergie wurde auf 0 reduziert und somit nicht berücksichtigt. Entsprechend wurde der Verbrauch BW, ARA, und die Fahrpläne für Licht und Geräte angepasst.

Tabelle 1: Übersicht der simulierten Varianten

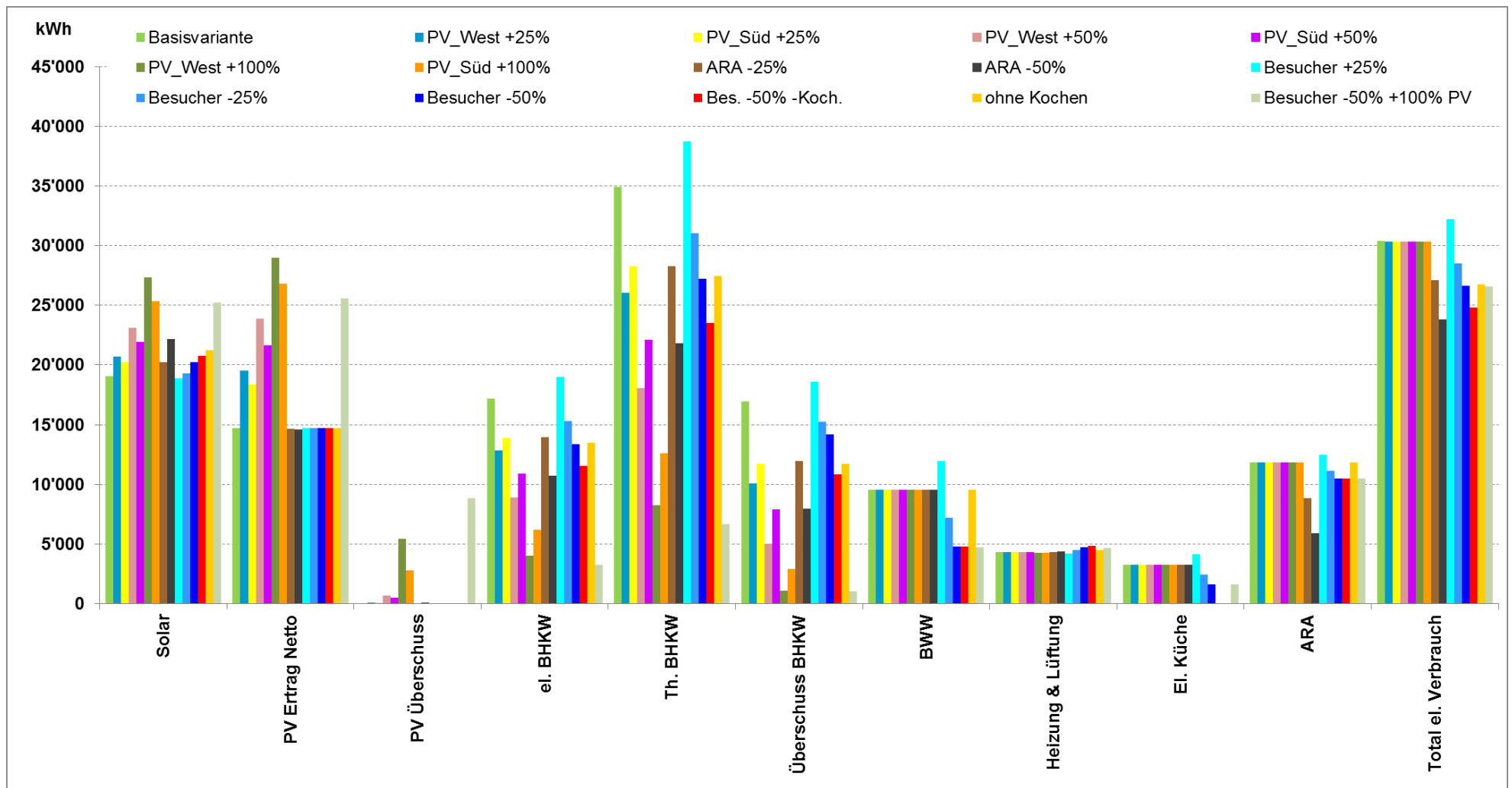


Abbildung 21: Energie der verschiedenen Varianten

In Abbildung 21 sind die Energien der simulierten Varianten für die verschiedenen Teilanlagen dargestellt. Der PV Brutto Ertrag entspricht demjenigen, welche die Solaranlage mit den aktuellen Klimadaten vom Jahr 2011 zur Verfügung stellt. Im Ertrag PV Netto wird nur derjenige Anteil berücksichtigt, welcher in der Hütte auch verwendet werden kann. Das heisst, wenn der Akku zu 100% (255kWh) geladen ist, wird nur noch berücksichtigt, was durch die elektrischen Verbraucher direkt genutzt werden kann. Der Rest bleibt ungenutzt und ist „verloren“. In der Basisvariante ist die Akkugrösse ohne PV-Überschuss gut auf die PV-Anlage gut abgestimmt. Wird jedoch die Solaranlage verdoppelt, kann mit dem bestehenden Akku nicht mehr die ganze PV-Energie genutzt werden. Am grössten ist der ungenutzte Teil der PV-Anlage mit 16% bei der Verdopplung der PV-Fläche nach Westen gemäss Energiefluss nach Abbildung 22. Da stellt sich die Frage, ob bei dieser PV-Erweiterung auch die Akkukapazität angepasst werden muss.

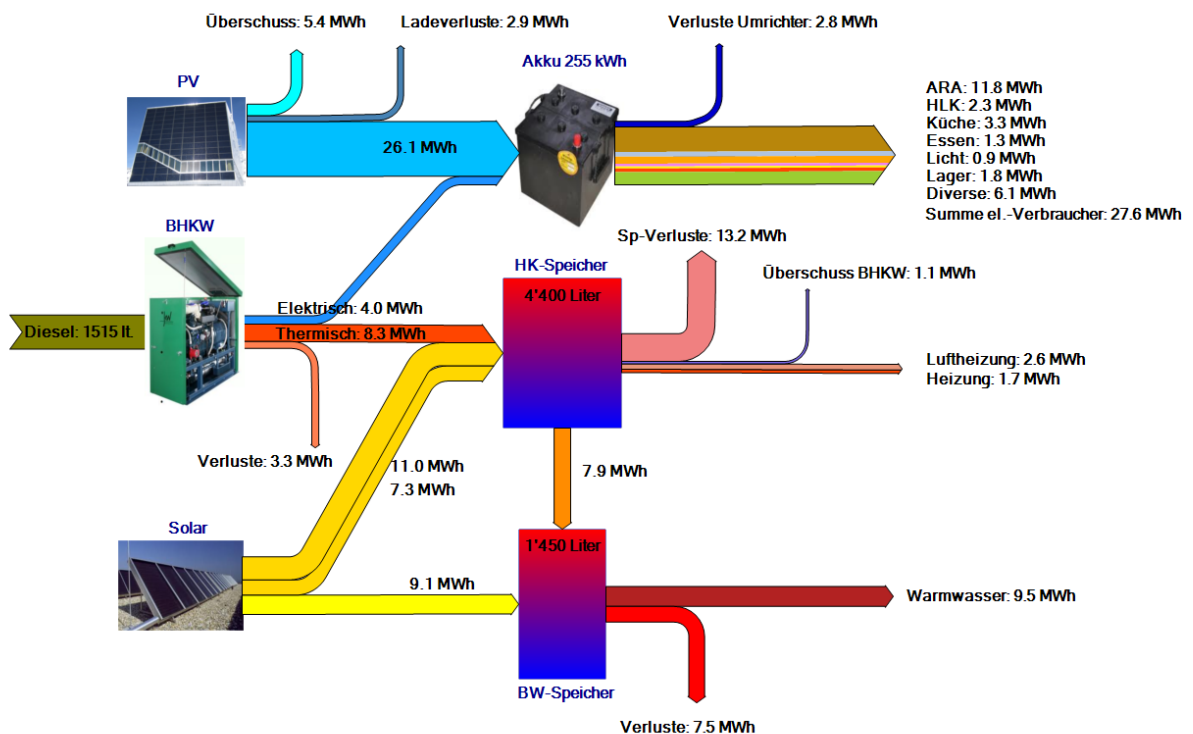


Abbildung 22: Energiefluss der Variante PV West + 100%

Die Auswirkung auf den Ölverbrauch der verschiedenen Varianten ist in *Abbildung 23* dargestellt. Auf der linken Achse wird der gesamte Ölverbrauch und auf der rechten Achse der Ölverbrauch pro Person dargestellt. In der Basisvariante übernachteten im Jahr 2011 11'692 Personen in der Hütte. Den geringsten Ölverbrauch wird mit der Verdopplung der PV-Fläche auf der Westseite am gleichen Standort der bestehende Solaranlage mit Ausrichtung 120° und einem Aufstellwinkel von 60° erreicht. Die nach Süden ausgerichtete Anlage mit einem Aufstellwinkel von 66° auf dem Dach erreicht leicht tiefere Erträge.

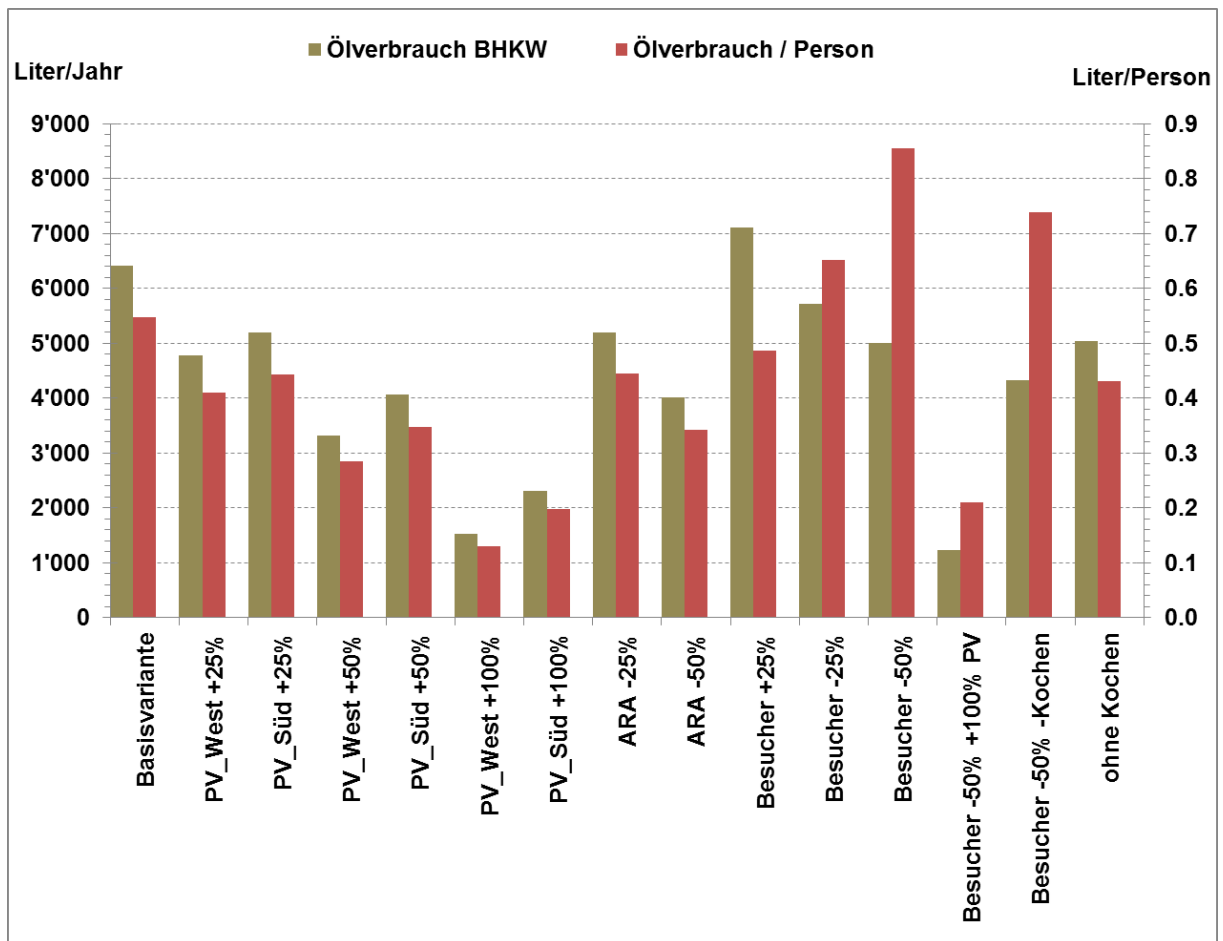


Abbildung 23: Ölverbrauch der verschiedenen Varianten

5.10. Ausblick

Dank dem integralen Gebäudemodell mit der gesamten Anlagentechnik im gleichen Simulationstool können wir nun vor den Änderungen mithilfe der Simulation die Auswirkungen berechnen. So kann mit der doppelten PV-Fläche nach Westen gemäss Abbildung 24 der Energiebedarf vom BHKW deutlich reduziert werden, so dass bei der aktuellen Belegung inklusive der Kochenergie eine Energieautarkie von 67% erreicht wird. Mit weiteren zusätzlichen Optimierungen lässt sich die Primärenergiezufuhr weiter reduzieren. Dies erlaubt nun, Änderungen an der Anlage bereits in der Planungsphase mittels Simulation zu überprüfen. So können geplante Investitionen nicht nur partiell auf einen Anlagenteil, sondern für das gesamte System bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit überprüft werden. Dies gibt dem Planer und dem Bauherrn mehr Sicherheit für die zusätzlich geplanten Investitionen beim Ausbau oder bei der Optimierung der Anlage.

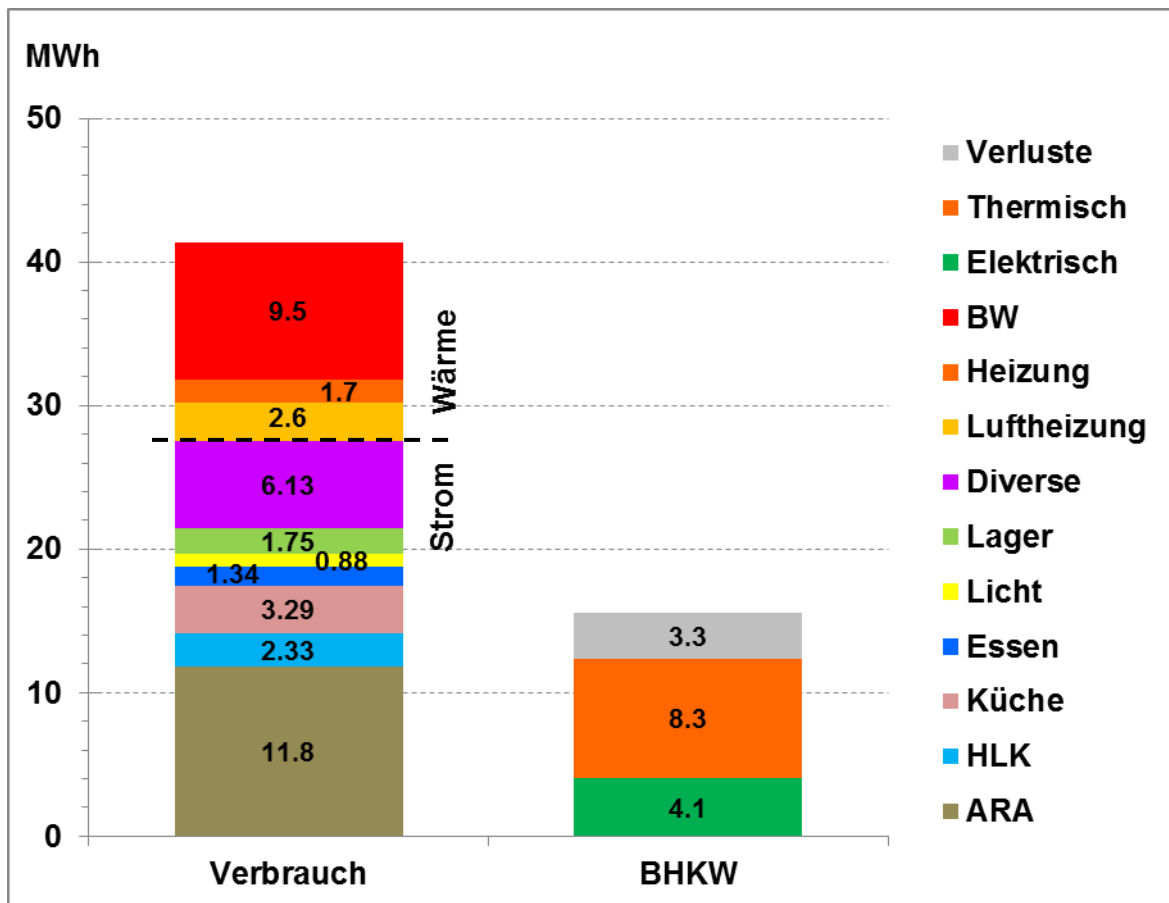


Abbildung 24 Verbrauch und Bedarf BHKW mit mehr PV

6. Optimales Energie- und Stoffmanagementsystem

6.1. Beschreibung des Algorithmus

Als Regelungskonzept für das entwickelte Energie- und Stoffmanagementsystem wurde die modellbasierte vorausschauende Regelung gewählt. Die Gründe hierfür sind [19]:

- Die modellbasierte vorausschauende Regelung kann Regelstrecken mit mehreren Stellgrößen optimal handhaben.
- Die modellbasierte vorausschauende Regelung kann Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigen.
- Die modellbasierte vorausschauende Regelung ermöglicht den Betrieb näher an technische Begrenzung.
- Das Energiesystem der Neuen Monte Rosa-Hütte ist ein „langsames“ System, so dass es genügend Zeit für die benötigten Berechnungen gibt.

Die Funktionsweise der modellbasierten vorausschauenden Regelung ist in Abbildung 25 gezeigt. In der modellbasierten vorausschauenden Regelung wird bei jedem diskreten Zeitschritt ein optimales Regelungsproblem gelöst um die optimalen Stellsignale über einen endlichen Prädiktionshorizont zu erhalten. Stellsignal-, Ausgangs- und Zustandsbeschränkungen können in diesem Optimierungsproblem berücksichtigt werden. Ebenfalls können Vorhersagen über das Wetter und das Verbraucherverhalten integriert werden. Von der so erhaltenen Sequenz von optimalen Stellsignalen wird nur das Stellsignal des ersten Zeitschrittes auf das System angewandt. Im nächsten Zeitschritt wird der

Prädiktionshorizont um einen Zeitschritt vorgeschoben und der ganze Prozess wird wiederholt [19].

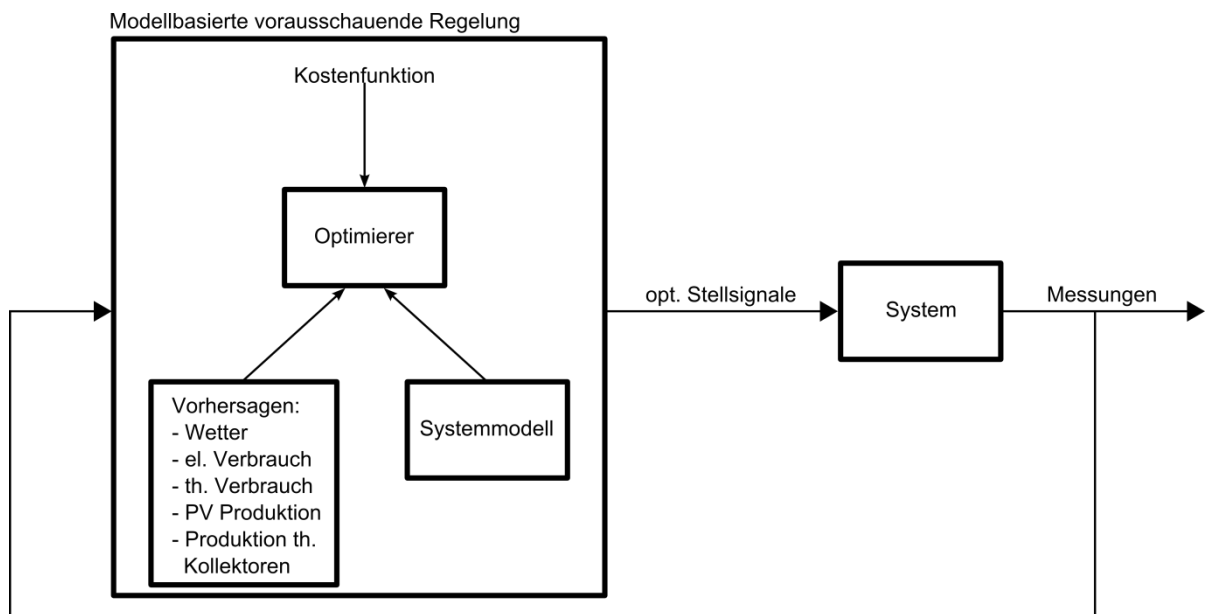


Abbildung 25: Funktionsprinzip der modellbasierten, vorausschauenden Regelung.

Die somit für ein Energie- und Stoffmanagementsystem basierend auf der modellbasierten vorausschauenden Regelung im Falle der Neuen Monte Rosa-Hütte wichtigen Komponenten sind:

- Wetterprognosen
- Verbrauchsvorhersagen
- Vorhersage der PV Produktion
- Vorhersage der Wärmeerträge der Solarkollektoranlage
- Regelungsorientiertes Systemmodell

Im Folgenden wird auf diese Komponenten näher eingegangen.

Wetterprognosen:

Von MeteoSchweiz werden mehrmals täglich COSMO-2, COSMO-7 und COSMO-LEPS Wetterprognosen zur Verfügung gestellt und in einer Datenbank auf einem ETH Server gespeichert.

Verbrauchsvorhersagen:

Um Prognosen des elektrischen und thermischen Verbrauchs der Hütte zu erstellen, wird die Methodik der „Support Vector Machine“ verwendet [20]. Die Verbrauchsvorhersage berücksichtigt dabei sowohl die Wetterbedingungen, die Buchungszahlen, als auch die Verbräuche der letzten Tage [21, 22].

Abbildung 26 zeigt beispielhaft die Vorhersage des el. Verbrauchs für den 29. Juli 2012. Zum Vergleich wird ebenfalls der gemessene el. Verbrauch gezeigt.

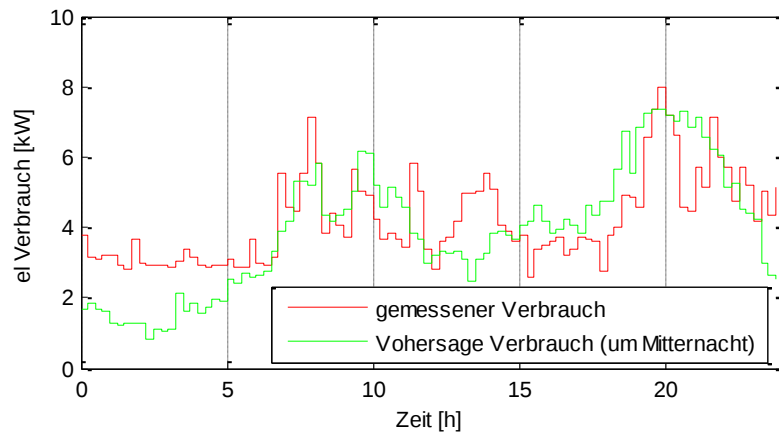


Abbildung 26: Vergleich zwischen gemessenem und vorhergesagtem el. Verbrauch für den 29. Juli 2012.

Vorhersage PV Produktion:

Um die elektrische Produktion der gebäudeintegrierten PV-Anlage vorherzusagen, wurde ein detailliertes thermisches [23] und elektrisches [24] Modell der Anlage entwickelt. Mit diesem lassen sich aufgrund der Einstrahlungs- und Umgebungstemperaturvorhersagen sowohl die Paneeltemperaturen (Abbildung 27) als auch der el. Ertrag (Abbildung 28) abschätzen. Aufgrund der hohen Paneeltemperaturen wegen der Fassadenintegration nimmt der Wirkungsgrad der PV-Anlage deutlich ab. Dies muss in der Vorhersage berücksichtigt werden.

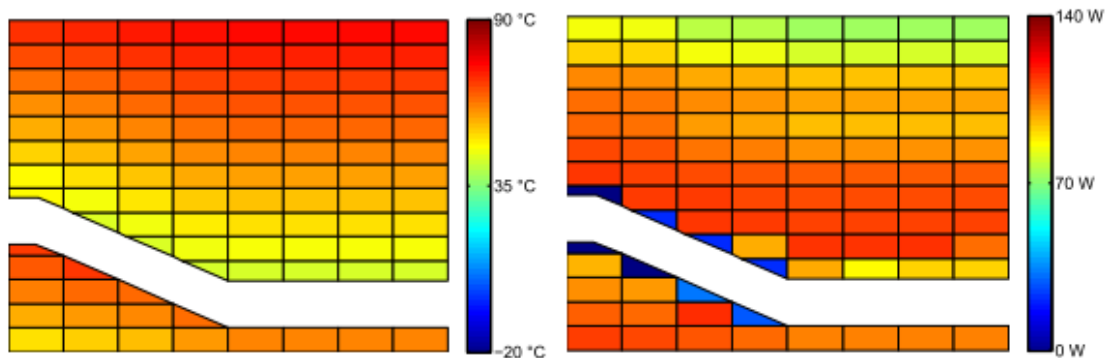


Abbildung 27: Mit dem entwickelten Modell der PV-Anlage werden sowohl die Temperatur (links) als auch die el. Leistung (rechts) von jedem Paneel berechnet [24].

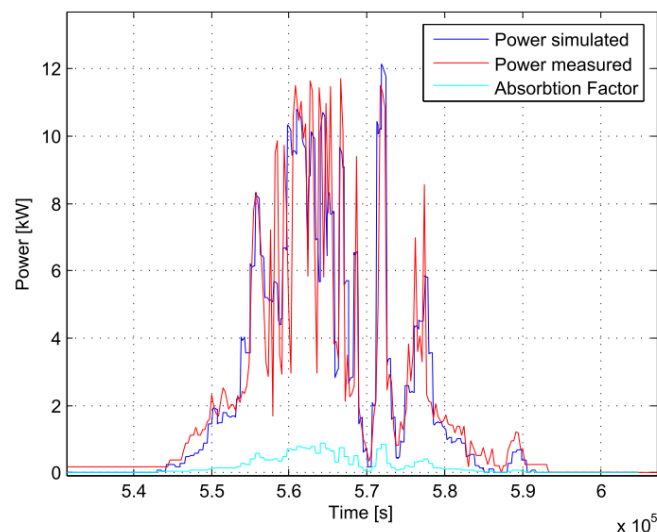


Abbildung 28: Vergleich zwischen gemessener und simulierter el. Leistung der fassadenintegrierten PV-Anlage [24].

Vorhersage der Wärmeerträge der Solarkollektoranlage:

Für die Vorhersage des Wärmeertrags der Solarkollektoranlage wird das Modell von Hottel-Whillier [25] verwendet. Abbildung 29 zeigt beispielhaft einen Vergleich zwischen gemessener und simulierter Kollektoraustrittstemperatur.

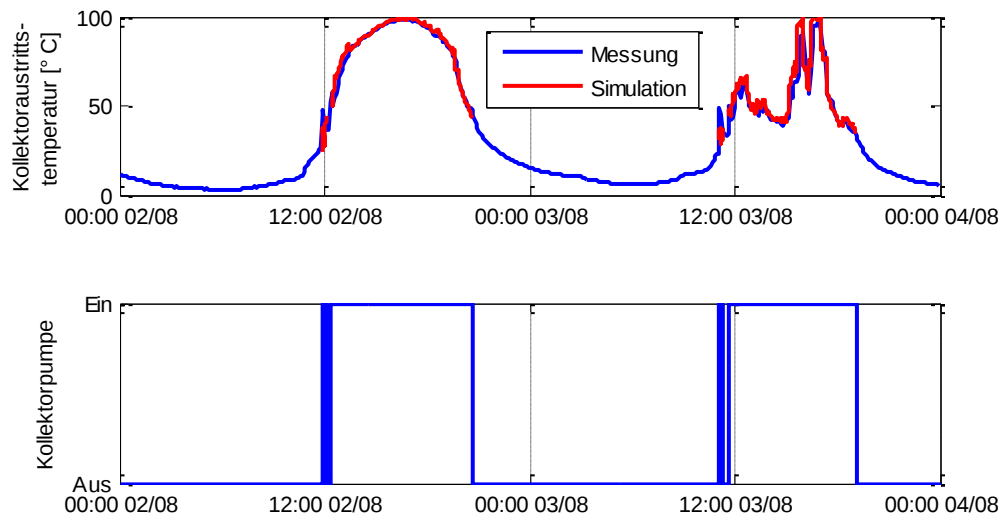


Abbildung 29: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Kollektoraustrittstemperatur.

Regelungsorientiertes Systemmodell:

Detaillierte mathematische Modelle von Energie- und Gebäudetechniksystemen (siehe Kapitel 5) enthalten typischerweise nichtlineare Modellierungsansätze. Werden solche nichtlinearen Modelle für die Formulierung des optimalen Regelungsproblems verwendet, erhält man folglich ein nichtlineares Optimierungsproblem, dessen Lösung rechen- und zeitintensiv ist [26]. Weil hingegen für die Lösung von linearen Optimierungsproblemen heutzutage numerisch effiziente Optimierer kommerziell erhältlich sind (z.B. CPLEX [27]), wurde eine lineare Modellierung entwickelt, welche die relevante Systemdynamik des untersuchten Energiesystems abbildet.

Damit ein korrekter Betrieb des Energiesystems garantiert wird, müssen zusätzlich zur Systemdynamik auch Betriebsbedingungen im optimalen Regelungsproblem berücksichtigt werden. Im betrachteten Fall wird ein Teil dieser Betriebsbedingungen als logische Ausdrücke (if-else Bedingungen) beschrieben. Durch Einführung von ganzzahligen Optimierungsvariablen können solche logischen Ausdrücke ins Optimierungsproblem integriert werden [28]. Das resultierende Optimierungsproblem mit sowohl kontinuierlichen als auch ganzzahligen Optimierungsvariablen wird als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem bezeichnet und kann mit CPLEX [27] effizient gelöst werden.

Die im entwickelten Modell modellierten Systemkomponenten sind:

- BHKW
- Batterie
- Wechselrichter
- Wärmespeicher
- ARA

Das entwickelte Modell ist in [29] detailliert beschrieben.

6.2. Implementierung auf der Neuen Monte Rosa-Hütte

Auf eine Implementierung des in Kapitel 6.1 beschriebenen Energie- und Stoffmanagementsystems wurde verzichtet. Die Gründe hierfür sind:

- Das Ein- und Ausschalten der ARA gilt als wichtiges Element, um den Treibstoffverbrauch mittels vorausschauender Regelung des BHKWs zu reduzieren [30]. Infolge des Umbaus

der ARA (vgl. Kapitel 4) gibt es keinen Abwasserspeichertank mehr, weshalb die ARA kontinuierlich betrieben werden muss und nicht mehr als schaltbare Last zur Verfügung steht.

- In der Planungsphase wurde von einem Besucheraufkommen von 6500 Übernachtungen pro Jahr ausgegangen [31]. In den Jahren 2010 und 2011 wurde diese Zahl mit 10600 bzw. 11200 Übernachtungen pro Jahr bei weitem übertroffen. Dies führte zu einem höheren elektrischen Energiebedarf als erwartet, weshalb das BHKW beinahe täglich eingeschaltet werden muss. Zudem wurde von einem schwankenden Besucheraufkommen ausgegangen, d.h. am Wochenende hat es viele Besucher, während der Woche wenig Besucher. In den Jahren 2010 und 2011 war die Hütte aber sehr oft während der ganzen Woche ausgebucht.

Aufgrund dieser zwei Gründe ist bei der Neuen Monte Rosa-Hütte zurzeit keine Verbesserung der Energieautarkie durch die Implementierung des vorausschauenden Energie- und Stoffmanagementsystems zu erwarten.

Daher wurde auf die Implementierung des vorausschauenden Energie- und Stoffmanagementsystems verzichtet. Stattdessen wurde eine Dimensionierungsstudie durchgeführt und ein optimales Batterieenergiemanagement entwickelt. Diese Arbeiten sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

7. Dimensionierungsstudie mit gemessenen Verbräuchen

Für die Dimensionierungsstudie basierend auf den gemessenen elektrischen und thermischen Verbräuchen wurde angenommen, dass ein Abwasserspeichertank wie in der ursprünglichen Anlage zur Verfügung steht [32].

7.1. Methodik

In dieser Dimensionierungsstudie wurde mit einem in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink implementierten detaillierten Systemmodell des Energiesystems der Neuen Monte Rosa-Hütte Jahressimulationen mit verschiedenen Kombinationen der Größen der Systemkomponenten durchgeführt. Das System wird dabei mit dem in [29] beschriebenen optimalen Energie- und Stoffmanagementsystem geregelt, wobei ein Prädiktionshorizont von fünf Tagen verwendet wird. In der Kostenfunktion des Energie- und Stoffmanagementsystems werden sowohl die Betriebs- und Treibstoffkosten des BHKWs als auch die Kosten für die Beanspruchung der Batterie berücksichtigt. Da zum Zeitpunkt dieser Studie die in Kapitel 6 beschriebenen Vorhersage-Komponenten noch nicht zur Verfügung standen, wurde „perfektes Wissen“ der Zukunft angenommen.

Die Komponentendimensionierung wurde nicht nur mit Blick auf die Kosten über die gesamte Lebensdauer der Anlage (Netto-Kapitalkosten (NKK) [33]) von 50 Jahren durchgeführt, sondern es wurden auch der nicht erneuerbare kumulative Energiebedarf (KEB) der Anlage und der Energieanteil aus erneuerbaren Energiequellen (EEE) untersucht.

Die für die Berechnung der NKK verwendeten Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet. Weil die Komponenten mit dem Helikopter zur Hütte transportiert werden, werden die Helikopter-Transportkosten ebenfalls mitberücksichtigt.

Der KEB repräsentiert den direkten und indirekten Energiebedarf während der gesamten Lebensdauer einer Komponente [34]. Der nicht-erneuerbare KEB bezieht sich dementsprechend auf den Abbau von nicht erneuerbaren Energiequellen [35]. Die verwendeten Werte für die Berechnung des nicht erneuerbaren KEBs sind in Tabelle 3 angegeben. Auch hier wird der Einfluss des Helikopter-Transportes berücksichtigt.

Der EEE ist definiert als der Anteil des gesamten Energieeintrages während eines Jahres, welcher aus erneuerbaren Energiequellen stammt. Allfällige Überproduktionen der erneuerbaren Energiequellen werden in der Berechnung des EEE nicht berücksichtigt.

Komponente	Kapitalkosten	Betriebs- und Unterhaltskosten	Transportkosten	Lebensdauer
BHKW	3000 Fr./kW _{el}	0.016 Fr./kWh _{el}	864 Fr./Einheit	20000 h / 15 a
Diesel	2.10 Fr./l	-	0.64 Fr./l	-
PV	2214 Fr./m ²	22.15 Fr./(m ² a)	22.85 Fr./m ²	25 a
Laderegler	71.42 Fr./m ²	-	0.19 Fr./m ²	10 a
Batterie	243 Fr./kWh	2.43 Fr./(kWh a)	22.85 Fr./kWh	450 EVZ ¹ / 15 a
Th. Kollektoren	514 Fr./m ²	15.43 Fr.(m ² a)	78.60 Fr./m ²	25 a
Warmwasserspeicher	6 Fr./l	-	432 Fr./Einheit	25 a
Abwassertank	1.15 Fr./l	-	432 Fr./Einheit	25 a

¹ äquivalente volle Zyklen

Tabelle 2: Die verwendeten Werte für die Berechnung der Netto-Kapitalkosten [36, 37, 38, 39, 40, 41].

Komponente	Nicht erneuerbarer KEB	
	Komponente	Transport
BHKW	99732 MJ-eq + 21331 MJ-eq/kW _{el}	4308 MJ-eq/Einheit
Diesel	47.58 MJ-eq/l	3.3 MJ-eq/l
PV + Laderegler	4277 MJ-eq/m ²	112 MJ-eq/l
Batterie	686 MJ-eq/kWh	112 MJ-eq/kWh
Th. Kollektoren	1637 MJ-eq/m ²	394 MJ-eq/m ²
Warmwasserspeicher	6.8 MJ-eq/l	2154 MJ-eq/Einheit
Abwassertank	21.9 MJ-eq/l	2154 MJ-eq/Einheit
Helikopterflug	2154 MJ-eq/Flug	-

Tabelle 3: Nicht erneuerbarer KEB von jeder Komponente [41, 42].

7.2. Resultate

Um die Komponentendimensionierung analysieren zu können, wurden Jahressimulationen für alle möglichen Kombinationen der in Tabelle 4 aufgelisteten Komponentengrößen durchgeführt.

Simulationsatz 1	Simulationsatz 2
CHP plant $\in \{5, 9\} \text{ kW}_{\text{el}}$	CHP plant = 5 kW_{el}
PV $\in \{70, 85, 100, \dots, 280, 295\} \text{ m}^2$	PV $\in \{220, 235, 250, \dots, 295, 310\} \text{ m}^2$
Battery $\in \{100, 250, 400, 550\} \text{ kWh}$	Battery $\in \{250, 400, 550\} \text{ kWh}$
TSC $\in \{40, 60, 80\} \text{ m}^2$	TSC $\in \{80, 100, 120\} \text{ m}^2$
HS tank $\in \{2000, 3500, 5000, 6500\} \text{ l}$	HS tank $\in \{6500, 8000, 9500\} \text{ l}$
WW tank = 3000 l	WW tank = 3000 l

Tabelle 4: Die in der Dimensionierungsstudie analysierten Komponentengrößen.

Die Resultate aller simulierten Kombinationen sind in Abbildung 30 dargestellt.

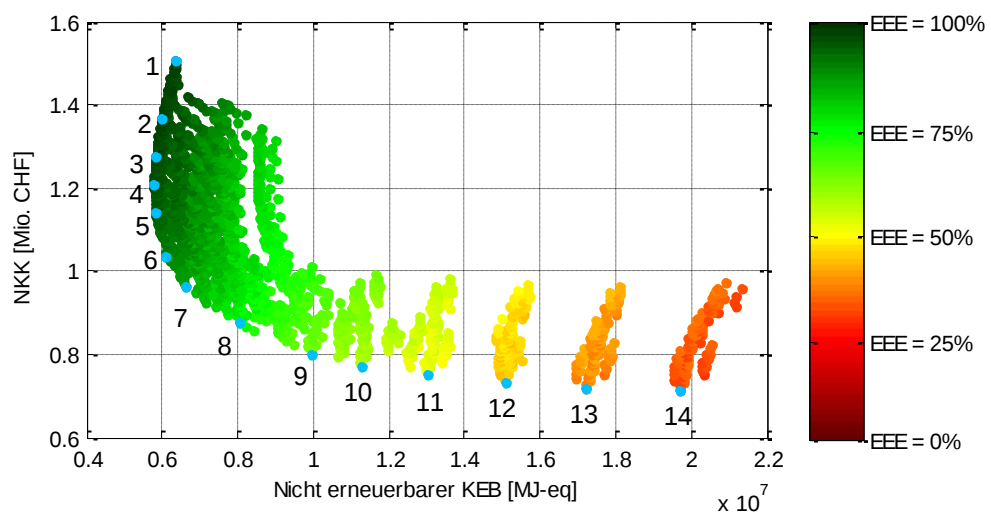


Abbildung 30: Simulationsergebnisse: Jeder Punkt stellt das Resultat einer simulierten Kombination von Komponentengrößen dar.

Offensichtlich sind der nicht erneuerbare KEB und die NKK konkurrierende Kriterien, und dementsprechend kann keine optimale Konfiguration bestimmt werden. Die Konfigurationen, welche jeweils einen optimalen Kompromiss zwischen nicht erneuerbarem KEB und NKK bilden, liegen auf einer Front. In Abbildung 30 sind 14 ausgewählte Konfigurationen markiert, welche auf dieser Front liegen. Die Komponentengrößen dieser Konfigurationen sind in Abbildung 31 gezeigt. Die Größe des BHKWs ist in allen ausgewählten Konfigurationen 5 kW_{el} .

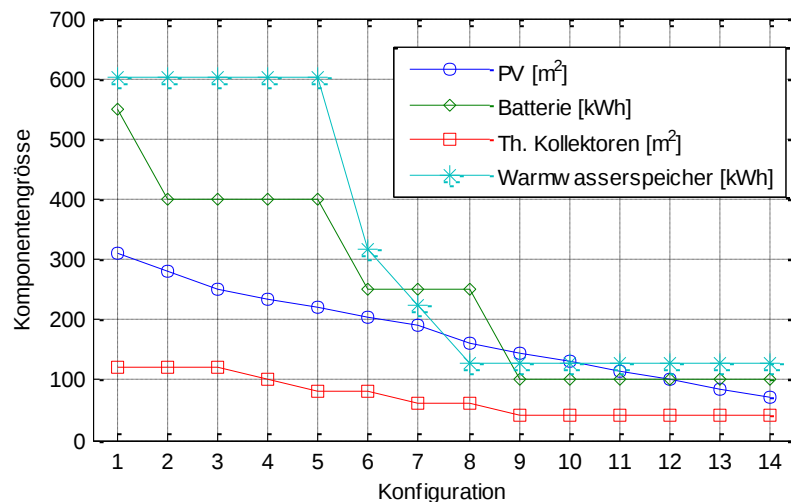


Abbildung 31: Komponentengrößen der ausgewählten Konfigurationen.

Wie aus Abbildung 30 und Abbildung 31 ersichtlich ist, kann der nicht erneuerbare KEB durch Vergrössern der erneuerbaren Energiequellen und der entsprechenden Speicher reduziert werden. Zwischen Konfiguration 14 und Konfiguration 9 kann der nicht erneuerbare KEB mit sehr wenigen zusätzlichen Kosten beträchtlich reduziert werden. Ab Konfiguration 8 steigen die Kosten stark an. Zwischen Konfiguration 4 und Konfiguration 1 nimmt der nicht erneuerbare KEB trotz vergrössern der erneuerbaren Energiequellen und der Speicher hingegen wieder zu. Der Grund hierfür ist, dass in diesen Konfigurationen die zusätzlich installierten Kapazitäten der erneuerbaren Energiequellen nur während ein paar wenigen Stunden im Jahr einen zusätzlichen Nutzen erbringen. Während des Rests des Jahres sind die erneuerbaren Energiequellen überdimensioniert und produzieren nicht nutzbare überschüssige Energie.

In Abbildung 32 ist der EEE der 14 ausgewählten Konfigurationen dargestellt. Zwischen Konfiguration 14 und Konfiguration 5 wird der EEE von ca. 30% auf über 90% gesteigert. Zwischen Konfiguration 4 und Konfiguration 1 wird der EEE trotz beträchtlicher Vergrösserung der PV Fläche nur minimal verbessert und 100% EEE werden in keiner Konfiguration erreicht.

Zusätzlich ist in Abbildung 32 der Beitrag der einzelnen Komponenten am gesamten nicht erneuerbaren KEB der ausgewählten Konfiguration dargestellt. Wie diese Resultate zeigen, wird durch Vergrössern der erneuerbaren Energiequellen und der entsprechenden Speicher der nicht erneuerbare KEB vom Betrieb in den Bau des Energiesystems verschoben.

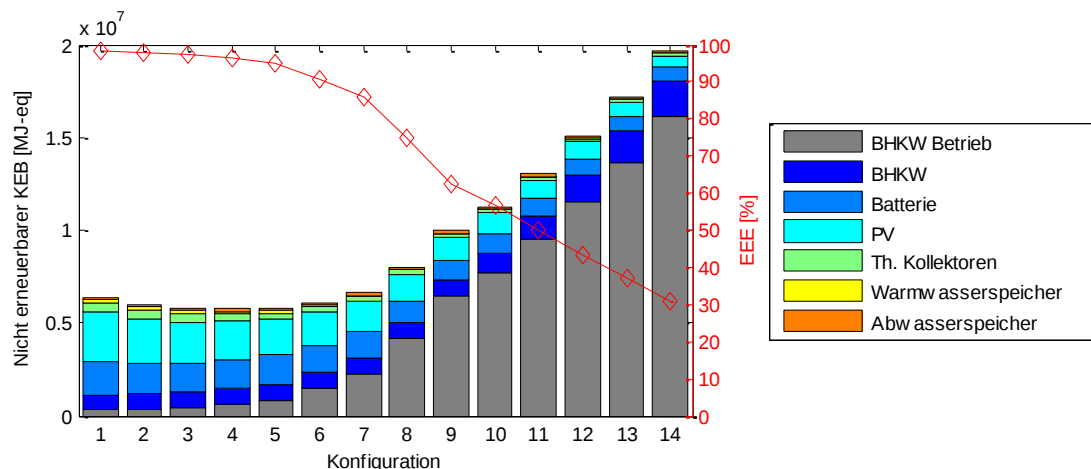


Abbildung 32: Anteil der einzelnen Komponenten am gesamten nicht erneuerbaren KEB der ausgewählten Konfigurationen.

Um einen Vergleich zwischen einer konventioneller Regelung und dem entwickelten optimalen Energie- und Stoffmanagementsystem zu erhalten, wurden die

Jahressimulationen der 14 ausgewählten Konfigurationen mit einer konventionellen Regelung wiederholt, d.h. das optimale Energie- und Stoffmanagementsystem wurde ausschliesslich durch Zweipunkt-Regler ersetzt. Für die Parameter der Zweipunkt-Regler wurden vernünftige Werte eingesetzt, welche aber nicht im Detail optimiert wurden.

Das Resultat dieser Analyse ist in in Abbildung 33 gezeigt. Offensichtlich nehmen sowohl die NKK als auch der nicht erneuerbare KEB bei allen 14 ausgewählten Konfiguration mit der konventionellen Regelung stark zu.

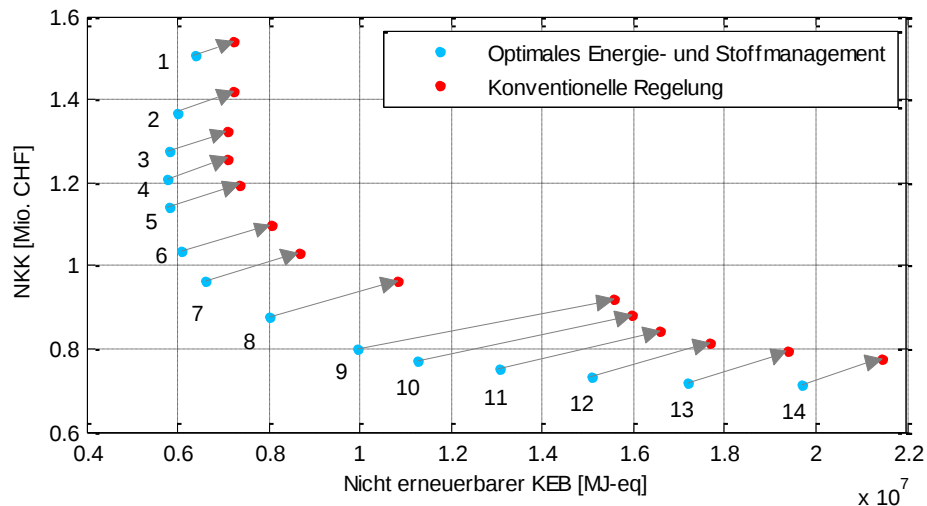


Abbildung 33: Vergleich zwischen konventioneller Regelung und dem optimalen Energie- und Stoffmanagementsystem.

Abbildung 34 zeigt eine Gegenüberstellung der Anzahl BHKW Betriebsstunden pro Jahr, der Anzahl BHKW Auswechslungen und der Anzahl Batterie Auswechslungen für die 14 ausgewählten Konfiguration mit dem optimalen Energie- und Stoffmanagementsystem und der konventionellen Regelung.

Wie oben erwähnt, werden in der Kostenfunktion des optimalen Energie- und Stoffmanagementsystems sowohl die Betriebs- und Treibstoffkosten des BHKWs als auch die Kosten für die Beanspruchung der Batterie berücksichtigt. Dementsprechend werden im Vergleich zur konventionellen Regelung mit dem optimalen Energie- und Stoffmanagementsystem sowohl die jährlichen BHKW Betriebsstunden als auch die Anzahl Auswechslungen des BHKWs und der Batterie reduziert. Dies hat somit eine Reduktion der Betriebs- und Installationskosten zur Folge.

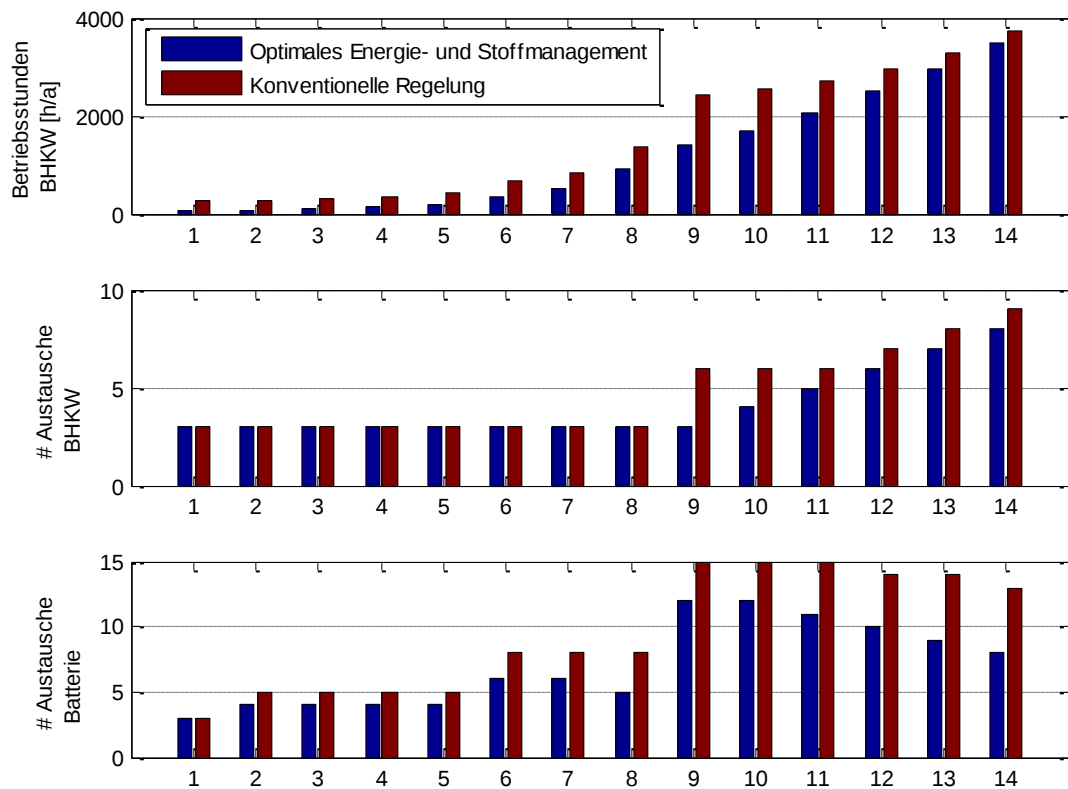


Abbildung 34: Gegenüberstellung der ausgewählten Konfigurationen mit optimalem Energie- und Stoffmanagementsystem und mit konventioneller Regelung.

Die aus dieser Studie gewonnen Erkenntnisse sind folglich:

- Beim analysierten System ist ein System ohne konventionelle Energiequelle (BHKW) weder ökonomisch noch ökologisch nutzbringend.
- Das optimale Energie- und Stoffmanagementsystem verbessert die Effizienz des betrachteten Systems im Vergleich mit einer konventionellen Regelung.
- Die Regelstrategie muss in der Dimensionierungsphase berücksichtigt werden.

8. Optimales Batterie- und Energiemanagement

Die Lebensdauer von Blei-Säure-Batterien hängt stark von deren Betriebsweise ab (z.B. Anzahl Lade-/Entladezyklen, Tiefe der Entladung, Zeit seit letzter voller Ladung usw.) [43]. Schiffer et al. [44] entwickelten ein nichtlineares mathematisches Modell, welches den Einfluss der Betriebsweise auf die Batterielebensdauer beschreibt.

Dieses Batterielebensdauer-Modell wurde mit dem „Iterative Dynamic Programming“ Optimierungsalgorithmus [45] kombiniert, um ein optimales vorausschauendes Batterieenergiemanagementsystem zu entwickeln [46, 47, 48], welches den Betrieb des elektrischen Systems der Hütte optimiert. Dieses Batterieenergiemanagement minimiert sowohl den externen Energieeintrag (BHKW) als auch die Schädigung der Batterie.

Um das entwickelte Batterieenergiemanagement auf der Hütte einzusetzen, wurde ein OPC Server an der ETH Zürich aufgesetzt. Mit diesem Server kann direkt aus Matlab auf den Automationsserver der Hütte zugegriffen werden und z.B. das BHKW ein- bzw. ausgeschaltet werden. Zusätzlich können auf alle Datenpunkte in Echtzeit zugegriffen werden.

9. Fazit und Ausblick

In einem ersten Schritt konnte für die Neue Monte Rosa-Hütte erfolgreich ein System-Monitoring installiert werden. Dieses System-Monitoring wurde einerseits eingesetzt, um eine detaillierte Betriebsanalyse durchzuführen. Mit Hilfe dieser Betriebsanalyse konnten Probleme im Betrieb der einzelnen Systemkomponenten erkannt und korrigiert werden, was zu einer Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems geführt hat. Dank des vorhandenen Remote-Access konnten diese Korrekturen zum Teil von aussen durchgeführt werden. Zusätzlich wurde eine Internet-Visualisierung mit vereinfachter Darstellung der Energieflüsse der Neuen Monte Rosa-Hütte entwickelt. Die unter *Zielsetzung 2* formulierten Ziele konnten erfolgreich erreicht werden.

Die Messdaten aus dem System-Monitoring wurden andererseits dazu verwendet, um die entwickelten mathematischen Modelle zu parametrieren und zu verifizieren. Hierzu wurden teilweise spezifische Tests (z.B. mit der Lüftung) durchgeführt.

Des Weiteren wurde für das ursprüngliche Gesamtsystem der Neuen Monte Rosa-Hütte ein Energie- und Stoffmanagementsystem basierend auf der modellbasierten vorausschauenden Regelung entwickelt. Da in der momentanen Situation der Hütte keine Verbesserung der Energieautarkie durch die Implementierung des vorausschauenden Energie- und Stoffmanagementsystems zu erwarten ist, wurde auf die Implementierung verzichtet. Dementsprechend konnte keine Gegenüberstellung von dem konventionellen mit dem vorausschauenden Energie- und Stoffmanagementsystem durchgeführt werden. Somit konnten die *Zielsetzungen 1* nur teilweise umgesetzt werden.

Zukünftig ist geplant, das in diesem Projekt entwickelte vorausschauende optimale Batterieenergiemanagementsystem in der Neuen Monte Rosa-Hütte zu implementieren. Zusätzlich ist ein Projekt geplant, welches sich mit dem Vergleich der in der Phase F&E 1 angenommenen Verbrauchswerten mit den im Betrieb gemessenen Werten beschäftigt. Der aus diesem geplanten Projekt generierte Lerneffekt soll helfen, Erfahrungen für zukünftige Gebäudeprojekte zu sammeln.

In Abklärung ist ebenfalls, ob allenfalls die im Moment kontinuierlich laufende ARA in Zukunft getaktet betrieben werden kann und somit wieder mehr Freiheitsgrade für das Energie- und Stoffmanagementsystem zur Verfügung stehen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Ashari, C. Nayar, An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)–diesel–battery hybrid power system, *Solar Energy* 66 (1999) 1-9.
- [2] R. Dufo-Lopez, J.L. Bernal-Agustin, J. Contreras, Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage, *Renewable Energy* 32 (2007) 1102-1126.
- [3] O. Ulleberg, The importance of control strategies in PV–hydrogen systems, *Solar Energy* 76 (2004) 323-329.
- [4] T. Prud'homme, D. Gillet, Advanced control strategies for solar combisystems, *ISES Solar World Congress*, 2003.
- [5] Y. Zhang, V.I. Hanby, Model-based control of renewable energy systems in buildings, *HVAC&R Research* 12 (2006), 739-760.
- [6] M.A. Bianchi, Adaptive Modellbasierte Prädiktive Regelung einer Kleinwärmepumpenanlage, Diss. ETH Nr. 16892, 2006.
- [7] D. Zambrano, E.F. Camacho, Application of MPC with multiple objective for a solar refrigeration plant, *IEEE International Conference on Control Applications*, 2002.
- [8] G.P. Henze, D.E. Kalz, S. Liu, C. Felsmann, Experimental analysis of model-based predictive optimal control for active and passive building thermal storage inventory, *HVAC&R Research* 11 (2005) 189-213.
- [9] D. Faille, C. Mondon, B. Al-Nasrawi, mCHP optimization by dynamic programming and mixed integer linear programming, *14th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems*, 2007.
- [10] Collazos, F. Maréchal, C. Gähler, Predictive optimal management method for the control of polygeneration systems, *Computers & Chemical Engineering* 33 (2009) 1584-1592.
- [11] R.R. Negenborn, M. Houwing, B. De Schutter, J. Hellendoorn, Model predictive control for residential energy resources using a mixed-logical dynamic model, *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 2009.
- [12] C. Gähler, M. Gwerder, R. Lamon, J. Tödtli, Optimal control of cogenerations building energy systems, *9th REHVA World Congress for Building Technologies*, Helsinki, 2007.
- [13] E. Handschin, F. Neise, H. Neumann, R. Schultz, Optimal operation of dispersed generation under uncertainty using mathematical programming, *Electrical Power and Energy Systems* 28 (2006) 618-626.
- [14] H. Morais, P. Kadar, P. Faria, Z.A. Vale, H.M. Khodr, Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming, *Renewable Energy* 35 (2010) 151-156.
- [15] C. Clastres, T.T. Ha Pham, F. Wurtz, S. Bacha, Ancillary services and optimal household energy management with photovoltaic production, *Energy* 35 (2010) 55-64.
- [16] Neue Monte Rosa-Hütte SAC. Ein autarkes Bauwerk im hochalpinen Raum. Gta Verlag, Zürich, 2010.
- [17] Lauber IWISA AG, 3904 Naters.
- [18] S.F. Fux, M.J. Benz, L. Guzzella, Comparing control-oriented thermal models for a passive solar house, *CISBAT Conference*, 2011.
- [19] J. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, 2002.
- [20] J.A.K. Suykens, T. Van Gestel, J. De Brabanter, B. De Moor, J. Vandewalle, *Least Squares Support Vector Machines*, World Scientific, Singapore, 2002.
- [21] M. Hubacher, M. Gehlen, Estimating electric power consumption, Bachelorarbeit, ETH Zürich, 2011.
- [22] O. Lombardi, Energy consumption prediction for the Monte Rosa Hut, Bachelorarbeit, ETH Zürich, 2012.

- [23] D. Glenck, Development of a simplified thermal model of a building integrated photovoltaic system, Bachelorarbeit, ETH Zürich, 2012.
- [24] C. Baumeler, Development of an electrical model of a building integrated photovoltaic system, Bachelorarbeit, ETH Zürich, 2012.
- [25] J. Duffie, W. Beckman, Solar Energy of Thermal Processes, Wiley, 2006.
- [26] Y. Zhang, V.I. Hanby, Model-based control of renewable energy systems in buildings, HVAC&R Research 12 (2006) 739-760.
- [27] ILOG CPLEX10.0, User's Manual, 2006.
- [28] A. Bemporad, M. Morari, Control of systems integrating logic, dynamic, and constraints, Automatica 35 (1999) 407-427.
- [29] S.F. Fux, M.J. Benz, L. Guzzella, Economic and environmental aspects of the component sizing for a stand-alone building energy system: A case study, Eingereicht in Renewable Energy.
- [30] J. Tödtli, Prädiktive Regelung und Wetterprognosen in der Gebäudautomation – Überlegungen im Vorfeld zweier Forschungsprojekte, SGA Bulletin Nr. 59, 2011.
- [31] U.-P. Menti, M. Sulzer, I. Plüss, Neue Monte-Rosa-Hütte. Energie- und Gebäudetechnik. Phasendokumentation, 21. Dezember 2006.
- [32] S.F. Fux, M.J. Benz, L. Guzzella, New Monte Rosa Hut: Optimal sizing of a stand-alone hybrid energy system, brenet Statusseminar, Zürich, 2012.
- [33] S.M. Hakimi, S.M. Moghaddas-Tafreshi, Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization for Kahnouj area in south-east of Iran, Renewable Energy 34 (2009) 1855-1862.
- [34] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-richtlinie 4600: Cumulative Energy Demand, Terms, Definitions, Methods of Calculation, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1997.
- [35] D. Kellenberger, H.-J. Althaus, Relevance of simplifications in LCA of building components, Building and Environment 44 (2009) 818-825.
- [36] R. Bornatico, M. Pfeiffer, A. Witzig, L. Guzzella, Optimal sizing of a solar thermal building installation using particle swarm optimization, Energy 41 (2012) 31–37.
- [37] H. Onowwiona, V. Ugursal, Residential cogeneration systems: review of the current technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews 10 (2006) 389–431.
- [38] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche, A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system, Energy Policy 35 (2007) 5708–5718.
- [39] J. Lagorse, D. Paire, A. Miraoui, Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery, Renewable Energy 34 (2009) 683–691.
- [40] V. Quaschnig, Understanding Renewable Energy Systems, Earthscan, 2005.
- [41] R. Dones, C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, M. Faist Emmenegger, R. Frischknecht, T. Heck, N. Jungbluth, A. Röder, Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent data v2.0, No. 6, Tech. rep., Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2007).
- [42] M. Meyer, Das Energiesystem der Neuen Monte Rosa Hütte – Planung, Realität und Zukunft, Masterarbeit, ETH Zürich (2011).
- [43] H. Wenzl, I. Baring-Gould, R. Kaiser, B. Y. Liaw, P. Lundsager, J. Manwell, A. Ruddel, V. Svoboda, Vojtech, Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery, Journal of Power Sources 144 (2005) 373-384.
- [44] J. Schiffer, D.U. Sauer, H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, R. Kaiser, Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems, Journal of Power Sources 168 (2007) 66-78.
- [45] R. Luus, Iterative Dynamic Programming, Chapman & Hall, 2000.

- [46] V. Lenzi, Battery health model and optimal operating strategies, Semesterarbeit, ETH Zürich, 2010.
- [47] Abou-Zeid, Optimal Battery Management using iterative dynamic programming, Semesterarbeit, ETH Zürich 2011.
- [48] D. Kouzoupis, M. Tsopelas, Optimal operation strategies of a battery system, Semesterarbeit, ETH Zürich, 2012.

Anhang A: Publikationen

Journals und Konferenzen

Aus den in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten entstanden folgende Publikationen:

- M. Benz, S. Fux, M.K. Eberle, Neue Monte Rosa Hütte – Integrierte Haussysteme für optimale Energie- und Stoffbewirtschaftung, SGA-SSPA-SSAC Bulletin Nr. 57, 2010.
- S.F. Fux, M.J. Benz, L. Guzzella, Comparing control-oriented thermal models for a passive solar house, CISBAT Konferenz, Lausanne, 2011.
- A. Ashouri, M. Benz, S. Fux, L. Guzzella, Heat demand estimation using self-adapting building model for model predictive control, CISBAT Konferenz, Lausanne, 2011.
- R. Bornatico, S.F. Fux, L. Guzzella, Optimal Design of Building Energy Systems under Parameter Uncertainty, SES Konferenz, Zürich, 2011.
- S.F. Fux, A. Ashouri, M.J. Benz, L. Guzzella, EKF based self-adaptive thermal model for a passive house, Energy and Buildings (2012), DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.06.016.
- S.F. Fux, M.J. Benz, L. Guzzella, New Monte Rosa Hut: Optimal sizing of a stand-alone hybrid energy system, brenet Statusseminar, Zürich, 2012.
- F. Silder, I. Plüss, U.-P. Menti, S. Fux, L. Guzzella, Anlagenoptimierung für PV, Solar, BHKW und Abwasseranlage der Neuen Monte Rosa-Hütte, BauSIM Konferenz, Berlin, 2012.
- S.F. Fux, M.J. Benz, L. Guzzella, Economic and environmental aspects of the component sizing for a stand-alone thermal-electric building energy system: A case study, Eingereicht in Renewable Energy.

Studentenarbeiten

Im Rahmen des in diesem Bericht beschriebenen Projektes wurden folgende Studentenarbeiten an der ETH Zürich betreut:

Bachelorarbeiten:

- A. Isler & T. Baltensperger: Modeling of the New Monte Rosa lodge and determination of an optimal control signal, 2008.
- D. Heid: Modeling of the Monte Rosa hut – Room air temperature modeling, 2010.
- P. Müller: Modeling of the Monte Rosa hut – Thermal solar collectors & photovoltaics, 2010.
- S. Nüesch: Modeling of the Monte Rosa hut – Thermal heat storage system, 2010.
- D. Trüssel: Robust design of renewable energy system, 2011.
- S. Bötschi & D. da Silva: Robust building system design, 2012.
- D. Glenck: Development of a simplified thermal model of a building integrated photovoltaic system, 2012.
- C. Baumeler: Development of an electrical model of a building integrated photovoltaic system, 2012.
- O. Lombardi: Energy consumption prediction for the Monte Rosa hut, 2012.

Semesterarbeiten:

- D. Flubacher: Generic optimization tool, 2009.
- L. Ineichen: Implementation and evaluation of Genetic Algorithms for solving MINLP problems, 2010.
- B. Troxler: Modeling the thermal behavior of the New Monte Rosa hut, 2011.
- K.S. Schwabe: Stochastic model predictive control, 2012.

- D. Kouzoupis & M. Tsopelas, Optimal operation strategies of a battery system, Semesterarbeit, ETH Zürich, 2012.

Masterarbeiten:

- M. Meyer: Das Energiesystem der Neuen Monte Rosa-Hütte – Planung, Realität und Zukunft, 2011.

Anhang B: Simulationsmodell: Energieerzeugung und Wärmeabgabe

