

---

## Simulation der Smart Grid Integration eines modernen Bürogebäudes am Beispiel von IBM-Schweiz

# 6

Nikolaus Bornhöft, Lorenz Hilty und Sutharshini Rasathurai

---

### Zusammenfassung

Die Entwicklung von Smart Grids ermöglicht die Einführung dynamischer Stromtarife, etwa mit sich stündlich ändernden Preisen. Diese können der zeitlichen Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage nach elektrischer Energie und Netzkapazität Rechnung tragen, dadurch Lastspitzen vermeiden und die Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energiequellen begünstigen. Wir stellen ein Simulationsmodell vor, das den hohen Strombedarf für die Beheizung und Kühlung moderner Bürogebäude im Kontext dynamischer Strompreise untersucht. Das Modell erlaubt die Simulation von Szenarien, in denen vorhandene thermische Energiespeicher (Warm- und Kaltwassertanks) durch eine angepasste Steuerung und Regelung gezielt für die Smart-Grid-Integration genutzt werden. Das Modell wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der Universität Zürich in Zusammenarbeit mit IBM-Research entwickelt und am Beispiel des Gebäudes von IBM-Schweiz erprobt. Insbesondere wurden die Einsparpotentiale abgeschätzt, die eine Anpassung der Steuerung der bestehenden Anlage unter der Annahme dynamischer Strompreise bietet. Im Modell konnte unter diesen Annahmen für den untersuchten Sommermonat Juni eine Einsparung von 31 % der Energiekosten erreicht werden.

---

N. Bornhöft (✉)

Institut für Informatik, Universität Zürich, Binzmühlestrasse 14, CH-8050 Zürich, Schweiz  
e-mail: nikolaus.bornhoeft@empa.ch

L. Hilty

Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Abteilung  
Technologie und Gesellschaft, Institut für Informatik, Universität Zürich, Zürich, Schweiz  
e-mail: Lorenz.Hilty@empa.ch

S. Rasathurai

IBM Schweiz, Abteilung Strategic Outsourcing Delivery, Institut für Informatik, Universität  
Zürich, Zürich, Schweiz  
e-mail: sutha87@googlemail.com

J. Marx Gómez et al. (Hrsg.), *IT-gestütztes Ressourcen- und Energiemanagement*,  
DOI: 10.1007/978-3-642-35030-6\_6, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

---

**Schlüsselwörter**Smart-Grid • Demand Shaping • HVAC • Simulation • DESMO-J

---

## 6.1 Einleitung

Bei der modernen Energieversorgung spielen Smart Grids eine zunehmend wichtigere Rolle. Sie integrieren alle beteiligten Akteure wie Erzeuger, Verbraucher und Netzbetriebsmittel zu einem System mit aufeinander abgestimmter Kommunikation und Kontrolle (Smart Grids European Technology Platform 2010). Die Koordination der Komponenten kann u.a. durch Preissignale erfolgen, wobei die Preise für elektrische Energie sich kurzfristig auf Basis des aktuellen Angebots und der aktuellen Nachfrage bilden. Der Vorteil dynamischer Tarife besteht darin, dass im gesamten System ein einfach zu verstehendes Signal existiert, das zumindest bei einem funktionierenden Markt für ein Gleichgewicht sorgt. So sind Stromtarife denkbar, bei denen schwankende Einkaufspreise an der Strombörse vom Versorger an den Endverbraucher weitergegeben werden. (Gantenbein et al. 2012)

Das Heizen und Kühlen von Gebäuden ist jener Teil des Gesamtenergieverbrauchs, in dem die größten ungenutzten Einsparungspotenziale durch intelligentere Steuerung und Regelung liegen (Hilty et al. 2006). Die Nutzung dieser Potenziale wird heute im Kontext der Nachhaltigkeit von Smart Homes diskutiert (für einen Überblick siehe Blumendorf 2013). Einige Ansätze stützen sich auf einen massiven Ausbau der Sensorik in Gebäuden (Li et al. 2013) oder beziehen die dezentrale Erzeugung von elektrischer Energie mit ein (Price et al. 2013). Die hier vorgestellte Studie hat einen engeren Fokus, indem sie für ein existierendes Gebäude die Einsparpotenziale allein durch die Modifikation der Steuerstrategie (also einer reinen Softwarekomponente) und die daraus resultierende gezieltere Nutzung der thermischen Speicherkapazitäten im Gebäude auslotet. Es werden keine zusätzlichen Sensoren, Aktoren oder sonstigen Hardwarekomponenten eingebaut und keine baulichen Veränderungen vorgenommen. Wir setzen einzig voraus, dass das Steuerungssystem über den Stromtarif informiert ist.

Moderne kombinierte Heiz- und Kühlanlagen wie die im Bürogebäude von IBM-Schweiz in Zürich-Altstetten nutzen die Abwärme von Kältemaschinen. Außerdem verfügen sie über Wassertanks zur Zwischenspeicherung der erzeugten Wärme und Kälte.

In Zusammenarbeit mit dem IBM-Forschungslabor, Rüschlikon haben wir ein Simulationsmodell entwickelt, um zu untersuchen, inwieweit eine Anpassung des bestehenden Systems und seiner Steuerung in der Lage ist, durch die gezielte Nutzung der vorhandenen thermischen Speicher den Bezug elektrischer Energie in Zeiten niedriger Strompreise zu verlagern. Die dadurch mögliche Einsparung von Energiekosten zum Betrieb des Gebäudes schafft einen Anreiz zur Verschiebung des Verbrauchs in Zeiten mit größerem Angebot und geringerer Nachfrage, was zu einer Entlastung des Stromnetzes führt und die Nutzung fluktuierender regenerativer Energien zur Stromerzeugung begünstigt. Die Verwendung der Simulationstechnik erlaubt dabei die Untersuchung

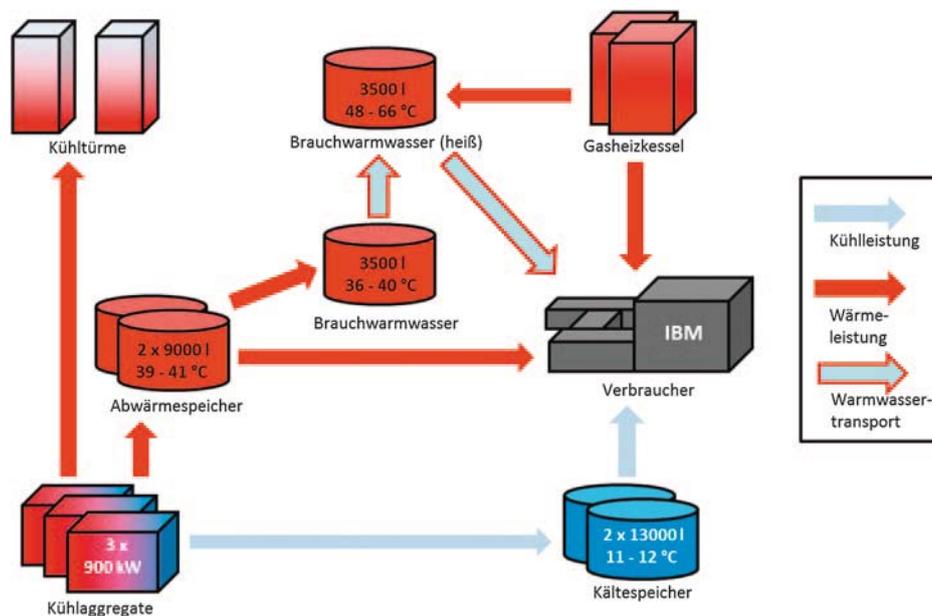
komplexer Hypothesen und Szenarien bezüglich der Steuerung und des Stromtarifs (s. Abb. 6.1).

Zur Untersuchung der vorliegenden Fragestellung haben wir uns für die diskrete Ereignissimulation entschieden, da sämtliche externe Größen wie die Änderung des Strompreises und die nichtlinearen Änderungen interner Größen wie das Erreichen der maximalen Ladung eines Speichers als diskrete Ereignisse formuliert werden können.

Zur Modellierung wurde das Simulationsframework DESMO-J (Discrete Event Simulation and Modeling in Java) verwendet. DESMO-J bietet eine Infrastruktur zur Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten und liefert dem Modellierer Komponenten zur Modellerstellung, die Funktionen zur Interaktion als Teil der Simulationsinfrastruktur enthalten. Die Gestaltung der modellspezifischen Funktionen wird jedoch dem Modeldesigner überlassen (Page und Kreuzer 2005).

Die für die Modellierung benötigten Verbrauchsdaten wurden in Form von Zeitreihen mit der Automationssoftware der Firma Comsys Bärtsch AG gewonnen, die das Real-system (das Heiz- und Kühlsystem im untersuchten Gebäude) steuert und regelt. Diese Daten sowie die Spezifikationen der technischen Anlagen wurden von IBM-Schweiz für eine Masterarbeit an der Universität Zürich zur Verfügung gestellt (Rasathurai 2012).

Wir analysierten je ein Sommer- und ein Winter-Szenario, das aus Realdaten abgeleitet wurde. Für beide Szenarien wurden die Sparpotentiale der Anpassung der Steuerung sowohl bei bestehendem als auch bei einem hypothetischen dynamischen Stromtarif



**Abb. 6.1** Relevante Wärme- und Kälte Produktions-, Verbrauchs-, Speicher- und Transportprozesse des Realsystems

untersucht. Dem dynamischen Tarif wurden die tatsächlichen Spotmarktpreise des betrachteten Zeitraums zugrunde gelegt, so dass wir annehmen können, dass die Variabilität im Tages- und Wochenverlauf realistisch ist.

---

## 6.2 Modellierung des bestehenden Systems

Zur Untersuchung des Systems wurde ein deterministisches Modell gewählt. Die Varianz in den Originaldaten wird dabei durch den Untersuchungszeitraum von jeweils einem Monat pro Szenario bei hoher Dichte von Beobachtungswerten berücksichtigt. Eine große Varianz weisen dabei der zeitabhängige Bedarf an Heißwasser, Wärme und Kälte, sowie die Spotmarktpreise für elektrische Energie auf. Die Lastgänge für die Bedarfe werden auf 15-minütige Intervalle abgebildet, die Spotmarktpreise für elektrische Energie auf die von der Börse vorgegebenen Intervalle von einer Stunde. Zur Entwicklung des Simulationsmodells wurden zunächst alle relevanten Komponenten des Systems identifiziert und in ein konzeptuelles Modell abgebildet. Die Komponenten dienen der Produktion, dem Verbrauch oder dem Transport von Wärme. Im Modell wurden einige Vereinfachungen vorgenommen. So wird von konkreten Temperaturniveaus abstrahiert und direkt der aus Temperaturdifferenzen resultierende Wärmetransport modelliert. Aus den Spezifikationen der Speicher mit Minimal- und Maximaltemperatur wurden deren Speicherkapazitäten bestimmt. Hier wird im Folgenden der Anschaulichkeit halber von Transport und Speicherung von Kälte gesprochen, auch wenn es sich physikalisch um die Übertragung von Wärmeenergie in die entgegengesetzte Richtung handelt. Wärmetransporte werden als linear angenommen, d. h. die dabei auftretenden Leistungen sind zwischen zwei betrachteten diskreten Zeitpunkten konstant. Von temperaturabhängigen Effizienzschwankungen wurde folglich bei der Modellierung abstrahiert.

Im Folgenden werden die einzelnen relevanten Bereiche des Realsystems sowie die Implementierung ihres Verhaltens im Modell vorgestellt. Eine detaillierte Beschreibung dazu findet sich bei Rasathurai (2012).

**Verbraucher:** Die Verbraucher repräsentieren jene Komponenten, für die das System Wärme, Kälte und Warmwasser zum Betrieb des Bürogebäudes bereitstellt. Die bereitgestellte Leistung wird primär für die Klimatisierung, die Serverkühlung und die Raumheizung verwendet. Die Lastgänge der unterschiedlichen Verbraucher sind für den betrachteten Zeitraum bekannt. Bei der Erstellung der verschiedenen Szenarien werden sie als Zeitreihen für die Bedarfe verwendet, die durch die Steuerung des Systems gedeckt werden müssen.

**Kühlaggregate:** Die Kühlaggregate nutzen elektrische Energie, um Wasser abzukühlen. Dabei entsteht Abwärme, die nach Möglichkeit genutzt wird. Das Realsystem umfasst 3 Kühlaggregate mit einer Maximalleistung von je 900 kW. Im Modell werden diese als eine einzige logische Einheit aufgefasst. Da die Aggregate einzeln zu- und abschaltbar sind und nur oberhalb einer Minimalleistung betrieben werden können, ist die Gesamtleistung zwischen 150 kW und 2700 kW regelbar.

**Speicher:** Die Speicher dienen dazu, Wasser bei einer bestimmten Temperatur verfügbar zu halten. Aufgrund der Temperaturdifferenz mit einem anderen Medium kann der Speicher benutzt werden, um dieses aufzuwärmen oder abzukühlen. Die Speicher werden im Modell durch ihre Wärmekapazität beschrieben. Sie ergibt sich aus der Maximal- und der Minimaltemperatur, der (konstanten) Wassermasse im Speicher und der spezifischen Wärmekapazität von Wasser. Bei der „Leerung“ eines Wärmespeichers verändert sich seine Temperatur von der festgelegten Maximal- zur Minimaltemperatur, bei der „Leerung“ eines „Kältespeichers“ geschieht das Umgekehrte. Die Kältespeicher, Abwärmespeicher und ein Brauchwarmwasserspeicher werden wie im Realsystems vorhanden modelliert. Der vorhandene zweite Brauchwarmwasserspeicher für heißes Wasser (48–66 °C) wird dagegen nicht explizit als Entität abgebildet. Er hat für das Modell nur eine geringe Bedeutung, da die gespeicherte Energie auf Grund der hohen Temperatur vorwiegend durch den Gasheizkessel bereitgestellt werden muss und der Preis für Erdgas nicht vom Verbrauchszeitpunkt abhängt.

**Energieflüsse:** Neben der Zufuhr von elektrischer Energie betrachten wir den Transport von Wärmeenergie von einer Komponente des Systems in eine andere. Dies geschieht entweder indirekt über den Einsatz von Wärmetauschern oder direkt durch den Transport von Brauchwasser zur anderen Komponente. Im Modell werden die Flüsse von Wärme und Kälte vereinfachend als konstante Leistungsabgabe über einen Zeitraum zwischen zwei diskreten Ereignissen abgebildet. Sie sind durch die Kapazitäten der Speicher begrenzt. Darüber hinaus besteht für den Abwärmespeicher eine Beschränkung der Leistungsaufnahme. Sie spiegelt die maximale Leistung der Wärmetauscher zwischen den Kühlaggregaten und den Abwärmespeichern wider. Für die Versorgung mit Warmwasser besteht darüber hinaus die Beschränkung, dass nur ein bestimmter Anteil der benötigten Wärmeleistung durch gespeicherte Abwärme bereitgestellt werden kann. Dadurch wird der Unterschied zwischen der Temperatur im Brauchwasserspeicher und der benötigten Temperatur bei den Verbrauchern ausgedrückt.

**Kühltürme:** Die Kühltürme dienen der Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung. Sie wurden nicht als Entitäten im Modell abgebildet und repräsentieren den Fluss von Wärme aus dem System aufgrund erschöpfter Speicherkapazitäten, also wenn Abwärme produziert wird, während die Abwärmespeicher vollständig geladen sind.

**Gasheizung:** Die Gasheizung dient zum Aufheizen von Wasser. Bedarfe nach Raumheizung und Warmwasser werden zunächst immer mit gespeicherter Abwärme aus den Kühlaggregaten gedeckt. Eine darüber hinaus gehende Nachfrage wird durch die Gasheizung befriedigt.

**Steuerung:** Die Steuerung des Systems bestimmt aufgrund eines Satzes von Regeln, zu welcher Zeit welche Teile der Anlage mit welcher Leistung betrieben werden.

Im Modell geht es dabei insbesondere darum, unter welchen Bedingungen die Kühlaggregate (Wärmepumpen) mit welcher Leistung betrieben werden. Dabei werden aktuelle und erwartete Verbräuche und Strompreise sowie Speicherstände und die Leistung der Wärmepumpen berücksichtigt.

### 6.3 Implementierung

Das Modell wurde im prozessorientierten Modellierungsstil erstellt. Die persistenten Einheiten des Modells wie die Speicher, Kältemaschinen und die Gasheizung wurden daher in DESMO-J als `SimProcess` abgebildet. Das zentrale Element des Modells ist der Steuerungsprozess. Er wird mittels `externalEvents` über veränderte Bedarfe und Strompreisänderungen informiert. Zusätzlich senden die Speicher die Information über das Erreichen von Maximal- und Minimalständen an den Steuerungsprozess.

In Abhängigkeit der Ladestände der Speicher, der aktuellen Bedarfe, der aktuellen und zukünftigen Strompreise und der Maximalleistung der Kühlaggregate bestimmt der Steuerungsprozess gemäß der hinterlegten Strategie die Betriebsleistung der Kühlaggregate. Des Weiteren aktiviert er die abhängigen Flüsse und initiiert ein etwaiges Zuheizen mit Erdgas.

Eine Besonderheit des Modells ist die Abbildung von Flussänderungen durch diskrete Ereignisse. Es werden für einen Speicher der zugehörige Ladestand, eine aktuelle Laderate und ein Zeitstempel definiert, um den Energiezu- und abfluss und die daraus resultierende Temperaturänderung abzubilden. Wenn ein Ereignis einen Zufluss zum Speicher zur Folge hat, wird der Zeitstempel auf die aktuelle Simulationszeit gesetzt. Außerdem wird das Ereignis, dass der Speicher vollständig geladen sein wird, für den vorausberechneten Zeitpunkt in der Ereignisliste vorgemerkt. Wird der Ladevorgang des Speichers durch ein anderes Ereignis unterbrochen, führt der Speicher ein Update seines Ladestandes aus und entfernt das Ereignis der vollständigen Ladung wieder aus der Ereignisliste. Für weiterführende Informationen zur Modellierung in DESMO-J sei auf Page und Kreutzer (2005), zum Modell selbst auf Rasathurai (2012) verwiesen.

---

### 6.4 Ergebnisse

Wir haben drei Hauptszenarien simuliert, von denen jedes wiederum die erwähnten Sommer- und Winterszenarien als Varianten enthielt. Zunächst wurde der Ist-Zustand rekonstruiert. Dieser wurde zur Validierung des Modells an den empirischen Daten verwendet und dient darüber hinaus als Referenz für die beiden anderen Szenarien (6.4.1 Referenzszenario). Danach wurde ein Szenario mit einer neuen Steuerung und dem aktuell gegebenen Tarif (Hoch-/Niedertarif) untersucht (6.4.2 Szenario I). Zuletzt untersuchten wir ein Szenario mit sowohl der neuen Steuerung als auch einem hypothetischen, am Spotmarkt orientierten „Smart Grid“-Tarif (6.4.3 Szenario II).

#### 6.4.1 Referenzszenario: Ist-Zustand

In der Simulation bestimmt – wie in der Realität – der Bedarf der verschiedenen Verbraucher im Gebäude das Geschehen.

Im Rahmen der bestehenden Steuerstrategie wird „gespeicherte Kälte“ zur Deckung der Kühlbedarfe verwendet. Sinkt der Speicherstand auf etwa 50 %, aktiviert die aktuelle Steuerung die Kühlaggregate und lädt die Kältespeicher bis auf etwa 75 % ihrer Kapazität. Die Abwärme wird teilweise genutzt. Im Untersuchungszeitraum im Dezember 2011 betrug die Rate, mit der Energie über die Wärmetauscher im Abwärmespeicher gespeichert wurde durchschnittlich 50 kW, im Juni durchschnittlich 145 kW.

Der aktuell genutzte Stromtarif ist „ewz.naturpower“ (ewz 2012) der Elektrizitätswerke Zürich. Er enthält einen Hochtarif von montags bis samstags, 6–22 Uhr und einen Niedertarif in der restlichen Zeit. Zusätzlich fallen Kosten für die höchste 15-minütige Verbrauchsspitze an.

Zur Validierung des Modells wurden die simulierten Energieverbräuche mit den realen Verbrauchsdaten verglichen. Für Dezember 2011 ergab die Simulation einen Stromverbrauch von 45.789 kWh, gegenüber einem realen Verbrauch von 43.397 kWh. Den simulierten Abwärme- und Gasverbräuchen von 30.603 kWh und 144.289 kWh stehen Realwerte von 35.142 kWh und 139.776 kWh gegenüber.

Für Juni 2012 berechnete das Simulationsmodell einen Stromverbrauch von 101.485 kWh, eine Abwärmenutzung von 31.371 kWh und ein Gasverbrauch von 12.939 kWh. Diesen Werten stehen Realwerte eines Stromverbrauchs von 92.216 kWh, einer Abwärmenutzung von 30.638 kWh und eines Gasverbrauchs von 13.680 kWh gegenüber.

Das Modell scheint das bestehende System damit recht präzise nachzubilden. Die Abweichungen resultieren vermutlich aus den erwähnten Idealisierungen und Vereinfachungen.

#### 6.4.2 Szenario I: Neue Steuerstrategie

Um die Sparpotentiale variabler Strompreise zu nutzen, müssen die Speicher bei niedrigen Preisen geladen und bei hohen Preisen nutzbringend entladen werden. Die neue Steuerstrategie sieht vor, die Kühlaggregate intensiv zu nutzen, wenn die nächste Strompreisänderung vorhersehbar eine Erhöhung sein wird. So sollen der aktuelle Kältebedarf direkt gedeckt und die Kältespeicher soweit möglich geladen werden. Falls der Strompreis bei der nächsten Änderung sinken wird, soll zur Deckung der Bedarfe zunächst gespeicherte Energie verwendet werden. Erst, wenn die Kältespeicher erschöpft sind, werden die aktuellen Bedarfe durch Betrieb der Kältemaschinen gedeckt. Die Strategie setzt also ein Minimum an Information über die Preisentwicklung voraus (steigend/sinkend).

Bestandteil dieser Strategie ist es auch, die Kapazitäten der Speicher nominell zu erhöhen, soweit es die technischen Spezifikationen zulassen. Die verwendeten Temperaturbereiche wurden wie folgt vergrößert:

- Kältespeicher von 11–12 °C auf 5–12 °C (Kapazität von 30,23 kWh auf 211,68 kWh)
- Heißwasser-Speicher von 36–40 °C auf 36–41 °C (Kapazität von 16,28 kWh auf 20,35 kWh)

In Szenario I wird diese neue Steuerstrategie auf den bestehenden Stromtarif angewendet.

### 6.4.3 Szenario II: Dynamische Strompreise

Der zu untersuchende Stromtarif ist, ebenso wie der aktuell genutzte ein zeitvariabler Tarif. Im aktuellen Tarif vollziehen die unterschiedlichen Preise für Tag- und Nachtstrom die wirklichen zeitabhängigen Kosten des Stromanbieters nur ungenau nach. Ein zeitvariabler Tarif mit stündlich wechselnden Preisen, der sich an Spotmarktpreisen orientiert, würde die jeweilige Knappheit der elektrischen Energie differenzierter wiedergeben.

Da jedoch für den Endverbraucher in unserem Fall noch keine dynamischen Stromtarife angeboten werden, haben wir einen hypothetischen dynamischen Tarif konstruiert. Die Grundlagen dafür bilden der aktuell gewählte Tarif (ewz 2012) und die Preise an der Europäischen Strombörse in Leipzig (eex 2012). Dort finden Auktionen über die Bereitstellung und Abnahme elektrischer Energie über den Zeitraum einer bestimmten Stunde des Folgetages (z. B. 13–14 Uhr) statt (Madlener und Kaufmann 2002). Nach Abschluss der Stromauktionen kennt der Stromanbieter die zeitabhängigen Marktpreise. Er könnte nun theoretisch mit einem dynamischen Stromtarif die Preise antizipieren und die Endverbraucher über die konkreten Strompreise des Folgetages informieren.

Auf Basis der Durchschnittspreise pro kWh, die vom Versorger an der Börse bezahlt wurden, und den Durchschnittspreisen, die der Endverbraucher zu zahlen hatte, ergibt sich der Faktor für die zusätzlich anfallenden Kosten durch Transport, Gewinnmargen der Händler etc. Zur Simulation mit dynamischen Strompreisen wurden die tatsächlichen Spotmarktpreise des Beobachtungszeitraums verwendet und mit dem Faktor für den Endverbraucherpreis multipliziert. Szenario II nimmt diesen dynamischen Stromtarif zur Grundlage und wendet die gleiche erweiterte Steuerstrategie wie in Szenario I an.

---

## 6.5 Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse für die oben definierten Szenarien sind in Abb. 6.2 dargestellt. Dort sind die durchschnittlichen Energiekosten in CHF je Monat für die drei Szenarien angegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere im Sommer, wenn ein großer Bedarf an Kühlung besteht, sowohl durch die Anwendung der neuen Steuerstrategie (17 %), als auch durch die neue Steuerstrategie bei dynamischen Preisen (31 %) erhebliche Einsparpotentiale bestehen.

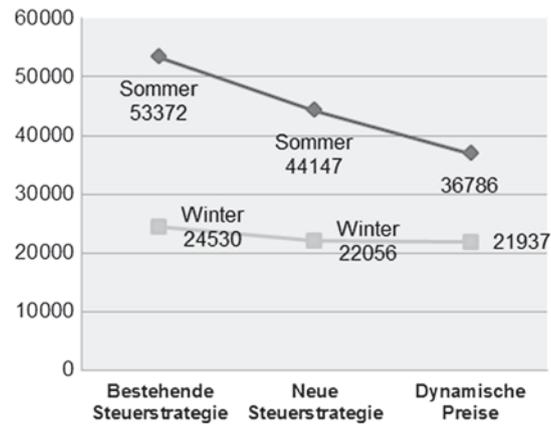
Im Winter dagegen ist die Einsparung durch das Erzeugen von Kälte und Abwärme zu Zeiten mit niedrigeren Strompreisen weniger groß und beträgt insgesamt etwa 10 %, die sich bereits in Szenario I einstellen.

---

## 6.6 Fazit

Eine effiziente Steuerstrategie von Kältemaschinen in Kombination mit der Zwischenspeicherung von Wärme und Kälte könnte die Energiekosten des Bürogebäudes von IBM-Schweiz signifikant senken, wenn der Stromtarif wie in der Simulation angenommen

**Abb. 6.2** Simulationsergebnisse;  
Energiekosten in CHF/Monat



dynamisiert würde. Diese Sparpotentiale ergeben sich daraus, dass der Betrieb der Kältemaschinen in die Zeiten relativ niedriger Strompreise verschoben wird. Dieser Effekt wird durch die Erweiterung der Kapazität der Speicher durch Erweiterung der zulässigen Temperaturbereiche wesentlich verstärkt.

Die Sparpotentiale stellen sich insbesondere in den Sommermonaten ein, da zu dieser Zeit der Bedarf an Kälte, die mittels elektrischer Energie produziert wird, besonders groß ist. Ein Teil dieser Potentiale ergibt sich dabei bereits bei bestmöglicher Ausnutzung des günstigen Nachtstroms durch die neue Steuerung. Eine Ausnutzung von weiteren – durch den an der Börse orientierten Stromtarif bedingten – Phasen günstigen Stroms führt zu einer zusätzlichen Ersparnis. Möglicherweise könnten weitere Effizienzpotenziale erschlossen werden, wenn der Zeithorizont für die Ladestrategie des Speichers erweitert würde.

Eine genauere Betrachtung der Leistungscharakteristik der Wärmepumpe unter Berücksichtigung des Auslegungspunktes und der jahreszeitlich wechselnden Außentemperatur könnte zu einer besseren Abwärmenutzung führen und dadurch insbesondere in den Wintermonaten weitere Einsparungen ermöglichen.

Einschränkend ist dabei anzumerken, dass die Funktion der Speicher als Puffer gegen Ausfälle erhalten bleiben muss.

Auch wenn das bestehende Modell eine gute Abschätzung der Sparpotentiale der Anlage durch das Zwischenspeichern von Wärme und Kälte bei dynamischem Stromtarif aufzeigt, könnte ein detaillierteres Modell noch präzisere Erkenntnisse liefern. Des Weiteren hängt dabei viel von der tatsächlichen Ausgestaltung zukünftiger dynamischer Tarife ab.

## Literatur

- Blumendorf M (2013) Building sustainable smart Homes. In: Hilty L, Aebischer B, Andersson G, Lohmann W (Hrsg) First international conference on information and communication technologies for sustainability, ETH Zürich, 14.–16. February 2013, S 151–158. doi:10.3929/ethz-a-007337628
- eex (2012) European Energy Exchange. <http://www.eex.com/de/>. Zugegriffen: 21. Dez 2012

- ewz (2012) ewz.naturpower. <http://www.stadt-zuerich.ch/content/ewz/de/index/energie/stromprodukte-zuerich.html>. Zugegriffen: 21. Dez 2012
- Gantenbein D, Binding C, Jansen B, Mishra A, Sundström O (2012) EcoGrid EU: An Efficient ICT approach for a sustainable power system. In: IEEE SustainIT, Pisa, Italy, 4.–5. Okto 2012
- Hilty LM, Arnfalk P, Erdmann L, Goodman J, Lehmann M, Wäger P (2006) The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability – a prospective simulation study. *Environ Modell Softw* 21(11):1618–1629. doi:10.1016/j.envsoft.2006.05.007
- Li C, Meggers F, Li M, Sundaravaradan J, Xue F, Lim HB, Schlueter A (2013) Bubblesense: wireless sensor network based intelligent building monitoring. In: Hilty L, Aebischer B, Andersson G, Lohmann W (Hrsg) First international conference on information and communication technologies for sustainability, ETH Zürich, 14.–16. February 2013, S 159–166. doi:10.3929/ethz-a-007337628
- Madlener R, Kaufmann M (2002) Power exchange spot market trading in Europe: theoretical considerations and empirical evidence
- Page B, Kreutzer W (2005) The Java simulation handbook: simulating discrete event systems with UML and Java. Shaker, Aachen
- Price BA, van der Linden J, Bourgeois J, Kortuem G (2013) When looking out of the window is not enough: informing the design of in-home technologies for domestic energy microgeneration. In: Hilty L, Aebischer B, Andersson G, Lohmann W (Hrsg) First international conference on information and communication technologies for sustainability, ETH Zürich, 14.–16. February 2013, S 73–80. doi:10.3929/ethz-a-007337628
- Rasathurai S (2012) Improving on the electricity costs of office buildings by optimal Smart Grid integration. Master's thesis, Universität Zürich, Zürich
- Smart Grids European Technology Platform (2010) Smart Grids – strategic deployment document for European electricity networks of the future