

Lastverhalten und DSM-Potential in Bürogebäuden

Markus Puchegger

Fachhochschulstudiengänge Burgenland GmbH, Masterstudiengang Nachhaltige Energiesysteme, Pinkafeld, Österreich

KURZFASSUNG: Dieses Paper beschäftigt sich mit dem elektrischen Lastverhalten von Bürogebäuden. Durch den vermehrten Einsatz von fluktuierend produzierenden Anlagen zur erneuerbaren Energieerzeugung kann die Stromerzeugung nicht mehr einfach dem Bedarf folgen. Daher sind zukünftig variable, zeitkritische Stromtarife zu erwarten. Dies bedeutet, dass der Zeitpunkt der abgerufenen Leistungen kostenrelevant sein wird.

Die Betrachtung der einzelnen Verbraucher erfolgte unter Zuhilfenahme von Zusammenhängen aus der Literatur. Weitere Basisdaten waren die Börsenstrompreise des Jahres 2008, ein fiktiver jährlicher Wetterdatensatz aus einem Gebäudesimulationstool und das Nutzerverhalten anhand einer Wahrscheinlichkeitsmatrix.

Die Hauptnutzungszeit der Bürogebäude fällt in jene Zeit, in der die Strompreise bzw. Börsenstrompreise im Allgemeinen höher sind. Durch die Ausnutzung von Lastverschiebungspotentialen kann hier jedoch abhängig von der Zusammensetzung der elektrischen Verbraucher ein nennenswerter Teil des Bezugs in Zeiten niedriger Preise verschoben werden.

1 EINLEITUNG

Da sich elektrische Energie nicht ohne Umwandlung (in z.B. chemische, thermische oder potentielle Energie) speichern lässt, muss stets ein Gleichgewicht zwischen der von den Kraftwerken gelieferten und der von den Verbrauchern benötigten Leistung vorhanden sein. Dies wird derzeit durch die Anpassung der Erzeugungsleistung an den jeweiligen Verbrauch gewährleistet. Durch den steigenden Einsatz von Anlagen zur erneuerbaren Energieerzeugung ist jedoch ein Paradigmenwandel absehbar und diese Aufgabe wird mittelfristig zumindest teilweise auch von der Verbraucherseite übernommen werden müssen. Nachfrageseitige Lastmanagementmaßnahmen im Stromnetz werden in der Literatur allgemein als Demand Side Management (DSM) bezeichnet.

Derzeit werden Lastverschiebungsmaßnahmen vor allem in Industriebetrieben getätigt, da Leistungspreise erst ab einem Verbrauch von 100.000 kWh/a bzw. einer Anschlussleistung ab 50 kW individuell verrechnet werden (ElWOG 2010). Die Ausweitung der Lastgangmessung auf alle Endkunden (Europäisches Parlament 2006, IME-VO 2012) ermöglicht zukünftig den Einsatz zeitlich variabler, lastkritischer Tarife für alle Endkunden.

Arbeitspreise für Strom an der Börse werden für jede Stunde gesondert ermittelt. Da sich der Börsenpreis stets beim Gleichgewicht aus Angebot und Nachfrage bildet und die Nachfrage tagsüber höher ist als nachts, sind tagsüber auch höhere Strompreise zu erwarten. Diese Annahme bestätigt sich auch beim Blick auf die historischen Preisverläufe des Stroms an der Börse (EXAA 2011).

In diesem Kontext wird das Lastverhalten von Bürogebäuden in dieser Arbeit anhand eines Beispielgebäudes und theoretischer Grundlagen erarbeitet. In einem weiteren Schritt wird untersucht, welche DSM-Potentiale in diesem Bürogebäude bestehen und welche Wechselwirkungen und Kosteneinsparungen sich durch die Nutzung dieser ergeben können.

2 METHODIK

2.1 Das Gebäude

Für die Erstellung der Lastgänge wurde ein Standardbürogebäude mit drei Etagen definiert. Dabei weist jede Etage den gleichen Grundriss gemäß Abb. 1 auf. Die Etagen bestehen jeweils aus einem Großraumbüro und mehreren Einzel- bzw. Gruppenbüros, einer Teeküche sowie Verkehrsflächen (Stiegenhaus, Gang). Die U-Werte der nicht transparenten Hüllflächen wurden mit $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, die der Fenster mit $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem Flächenanteil von 60 % der Fassadenfläche angesetzt.

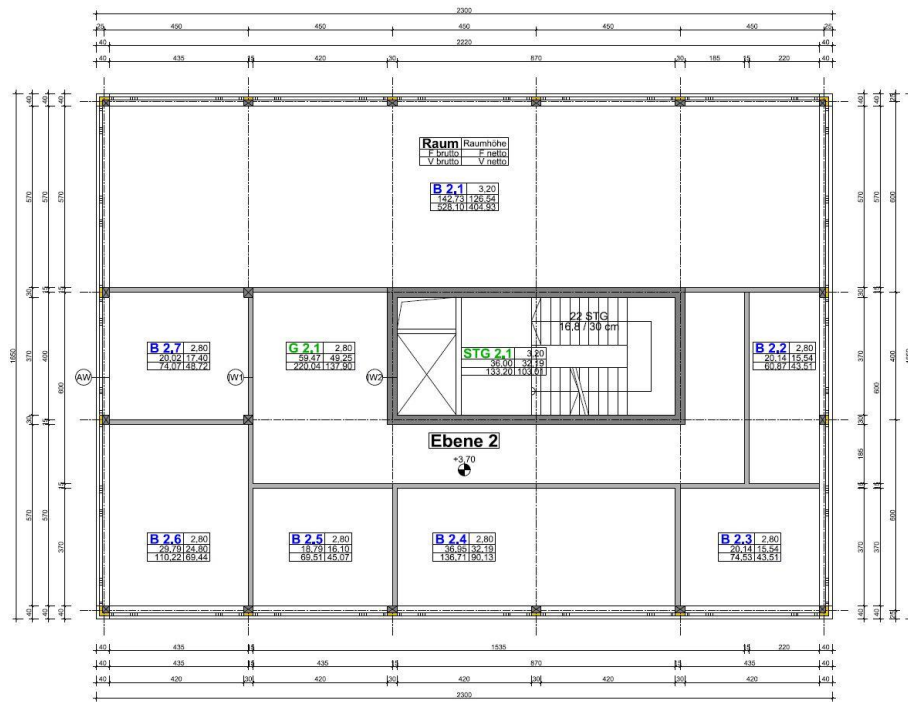


Abb. 1: Grundriss Bürogebäude (Stumpf, 2011)

2.2 Die Verbraucher

Nach Brauner et al. (2007) können Verbraucher hinsichtlich ihres Lastverschiebungspotentials in drei Kategorien eingeteilt werden.

Bei Geräten, die einen Energiespeicher nutzen können, ist es oftmals möglich, elektrische Leistungsaufnahme zeitlich zu verschieben, ohne dafür den Nutzen des Geräts zu beeinträchtigen. Kühlschränke können beispielsweise innerhalb eines Temperaturfensters hinsichtlich ihrer Leistungsaufnahme zeitlich variabel betrieben werden.

Applikationen, deren Einsatz zeitlich unkritisch ist, bieten eine weitere Möglichkeit, DSM-Maßnahmen umzusetzen. Es ist hier oft nur wichtig, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Ergebnis vorliegt (Geschirr ist am nächsten Morgen gewaschen), nicht jedoch, wann der Vorgang, der zum Ziel führt, passiert. Es ist allerdings zu beachten, dass auf die Nutzeranforderungen Rücksicht zu nehmen ist. Wird ein Geschirrspüler beispielsweise in der Gastronomie im Dauerbetrieb eingesetzt, so ist er nicht dieser Kategorie zuzurechnen.

Verbraucher, deren Funktion in enger Verbindung mit deren Einsatzzeitpunkt steht, sind für Lastverschiebungsmaßnahmen ungeeignet (z.B. Beleuchtung). Effizienzmaßnahmen haben aber auch bei diesen Verbrauchern einen Einfluss auf das Lastverhalten des Gesamtsystems.

Die Verbraucher im Gebäude sind in drei Gruppen eingeteilt. Zur Gruppe der Peripherie gehören alle elektrischen Anwendungen, die für die Raumklimatisierung sowie die Warmwasserversorgung notwendig sind. Die Beleuchtung sowie die Geräte, die über Steckdosen versorgt werden (Infrastruktur), bilden die weiteren Gruppen. Es wurden Lastgänge für verschiedene Gebäudeausstattungen bestimmt.

Die Variante A repräsentiert ein Bürogebäude, bei dem nach Möglichkeit Verbraucher ohne DSM-Potential verwendet werden (z.B. Desktops statt Laptops). Die Wärmebereitstellung erfolgt über einen nicht elektrisch betriebenen Wärmeerzeuger, im Sommer erfolgt keine Kühlung.

Bei Variante B wurden, wo möglich, Geräte mit Lastverschiebungspotential ausgewählt. Die Arbeitsplätze sind mit Laptops ausgestattet, die zu Hochpreisen über die Akkus betrieben werden können. Die Wärmebereitstellung wird zudem in hohem Maß durch elektrische Energie (Luft-Wasser-Wärmepumpe) bewerkstelligt und das Gebäude im Sommer durch eine Kompressionskältemaschine gekühlt.

Variante C deckt sich weitgehend mit Variante B. Es werden lediglich einige Energieeffizienzpotentiale genutzt (freie Kühlung wenn Außentemperatur < Raumtemperatur sowie effizientere Beleuchtung).

Sonstige Verbraucher (Telefone, Drucker, Beamer, Kochgeräte, Geschirrspüler, Kühlschränke sowie Hilfsenergien der Raumklimatisierung und Warmwasserversorgung) wurden unabhängig von der Gebäudeausstattung immer gleich modelliert. Es wurden jedoch Wechselwirkungen (z.B. der Erzeugungsverlauf der Wärmeerzeugung beeinflusst die Hilfsenergien) berücksichtigt.

2.3 Fiktiver Strompreis

Die Stundenpreise des Stroms an der Österreichischen Strombörse EXAA sind als Arbeitspreise zu verstehen, die als Kalkulationsgrundlage für Stromversorger (EVUs) dienen können. Von den Endkunden sind zudem noch Netzegebühren, Steuern und sonstige Abgaben zu entrichten.

Da in dieser Arbeit von einer Strompreisbildung ausgegangen wird, die in allen Komponenten (Arbeitspreis, Leistungspreis sowie Steuern und Abgaben) variabel ist, erfolgen die Untersuchungen anhand der Börsenstrompreise. Da es sich hier nur um eine Preiskomponente handelt, ist die Aussage über den tatsächlichen Strompreis bzw. die Kosten hier nicht zulässig, Veränderungen können aber miteinander ins Verhältnis gesetzt werden. Es wurden die Börsenstrompreise des Jahres 2008 nach EXAA (2011) verwendet.

2.4 Erstellung der Lastgänge

Nach dem EIWOG (2010) müssen zur Ermittlung der lastabhängigen Netznutzungsentgelte von Großverbrauchern Messungen der viertelstündlichen Durchschnittbelastung herangezogen werden. Für die weiteren Betrachtungen wurde ebenfalls dieser Ansatz gewählt.

Allen Lastgängen liegt ein synthetischer, mittels Gebäudesimulationstool TRNSYS 16 ermittelter Wetterdatensatz eines Jahres für Graz zu Grunde. Dieser Datensatz enthält für jedes Intervall Werte für die Außentemperatur und die Globalstrahlung. Ebenfalls mit TRNSYS 16 wurde der thermische Lastgang vor und nach der Optimierung simuliert (Inschlag 2011).

Das Nutzerverhalten, insbesondere die Anwesenheit der Nutzer an ihren Büroarbeitsplätzen, wurde anhand einer Zufallsmatrix simuliert und für alle Lastgangvarianten gleich angesetzt. Als Wahrscheinlichkeitsfaktoren für diese Matrix dienten Werte aus der Literatur. So wurde beispielsweise für die Anwesenheitszeit eines Benutzers in einem Einzelbüro der Faktor 0,7 (DIN 18599-10 2007). angesetzt Das bedeutet, dass der Nutzer 70 % seiner Arbeitszeit in seinem Büro verbringt und somit die dort vorhandene Infrastruktur nutzt. Außerhalb dieser Zeit können sich die Verbraucher abhängig von der Tageszeit bzw. der Geräteeinstellungen entweder im ausgeschalteten, in einem Modus verringerter Leistungsaufnahme (Sleep-Modus) oder weiter im eingeschalteten Modus befinden. Als Arbeitszeit wurde der Zeitraum von 08:00 bis 16:30 montags bis freitags angesetzt.

Die Lastgänge der einzelnen Verbraucher in der jeweiligen Gebäudeausstattung wurden anhand von Literatur in Kombination mit dem Nutzerverhalten (sowie teilweise den Wetterdaten) erstellt. Der elektrische Lastgang des gesamten Gebäudes ergibt sich aus der Summe der Lastgänge der Einzelverbraucher. Exemplarisch wird die Vorgehensweise für die Beleuchtung eines Einzelbüros dargestellt. Die Mindestbeleuchtung von Räumen wird in DIN 18599-10 (2007) geregelt. Die Normarbeitsplatzbeleuchtung in Büroräumen beträgt beispielsweise 500 lx.

Als Ausgangswert dient die elektrische Bewertungsleistung der Beleuchtung. Sie stellt die gesamte elektrische Anschlussleistung der Beleuchtungsanlage im jeweiligen Berechnungsbereich dar und wird spezifisch in W/m^2 angegeben. Bei besonders effizienten Konzepten kann dieser Wert um die 8 W/m^2 (Juwi 2008) liegen. Um die natürliche Beleuchtungsstärke in einem Gebäude ermitteln zu können, ist der Tageslichtquotient hilfreich. Dieser ist definiert durch das

Verhältnis der Beleuchtungsstärke in einem Punkt einer Ebene im Gebäude zur Horizontalbeleuchtungsstärke bei unverbaute Himmelskugel. (DIN 18599-4 2007)

Der Tageslichtquotient kann als Durchschnittswert für einen Raum (eine Regelzone) mit Hilfe von Lichtsimulationssoftware (hier Dialux 4.9) ermittelt werden. Die Horizontalbeleuchtungsstärke bei unverbaute Himmelskugel lässt sich näherungsweise von der Globalstrahlung durch Multiplikation mit dem Faktor 125 ableiten (Heimrath 2009). Die Effizienz der Beleuchtungsregelung wird schließlich nach DIN 18599-4 (2007) noch durch einen Faktor berücksichtigt. Dieser bestimmt bei Abwesenheit der Nutzer bzw. bei ausreichender Versorgung mit Tageslicht die Wahrscheinlichkeit, mit der die Beleuchtung außer Betrieb gesetzt wurde. So unterscheiden sich beispielsweise die Faktoren für manuelle Lichtsteuerung und Steuerung über Anwesenheitssensoren. Es wurde zudem festgelegt, dass wenn die Beleuchtung vom Nutzer einmal ausgeschaltet wurde, diese erst bei nicht ausreichender natürlicher Beleuchtung wieder aktiviert wird. Das jeweils betrachtete Viertelstundenintervall wird also durch das vorige Intervall beeinflusst. Durch diese Angaben kann die elektrische Leistungsaufnahme für jedes Viertelstundenintervall bestimmt werden.

2.5 Standardlastgänge

Die ermittelten Standardlastgänge für die Ausstattungsvarianten A, B und C (je ein Winter- und Sommertag) ohne Ausnutzung von Lastverschiebungspotentialen sowie der Strompreis zur jeweiligen Stunde sind in Abb. 2 dargestellt.

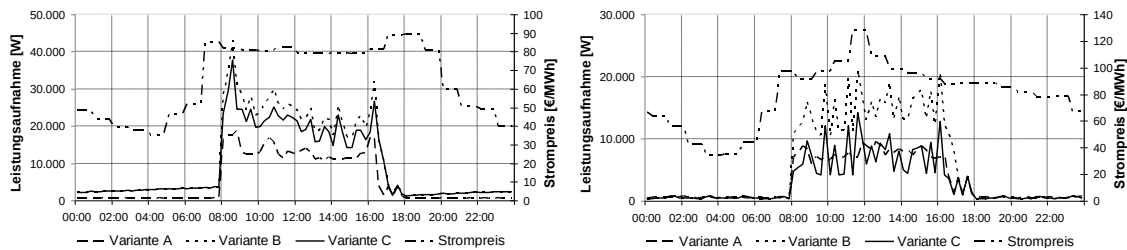


Abb. 2: Standardlastgänge Winter und Sommer (Daten aus EXAA 2011 und Inschlag 2011)

Es ist zu sehen, dass sowohl im Winter als auch im Sommer der überwiegende Teil des Stromverbrauchs am Tag anfällt, wo auch der Strompreis üblicherweise höher ist, als nachts.

3 OPTIMIERUNGSPOTENTIAL

3.1 Variante A

Bei Variante A können nur die Potentiale von Kühlschränken und Geschirrspülern ausgenutzt werden. Zudem wird die Warmwasserzirkulationspumpe außerhalb der Betriebszeit des Gebäudes abgestellt. Bei der Beleuchtung wurde automatische Dimmung vorausgesetzt, wodurch nur die Differenz zwischen der natürlichen Beleuchtung und der Normbeleuchtung geliefert werden muss. Abb. 3 zeigt die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf den Lastverlauf.

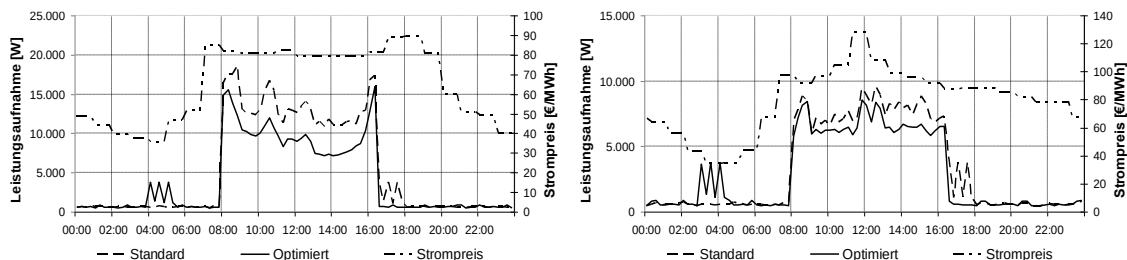


Abb. 3: Optimierung Variante A Winter und Sommer (Daten aus EXAA 2011 und Inschlag 2011)

Der Gesamtverbrauch sinkt vor allem durch die Effizienzmaßnahmen im Bereich der Beleuchtung von 26.292 kWh/a auf 21.710 kWh/a. Der fiktive Strompreis nach der Optimierung

beträgt 7,75 ct/kWh (zuvor 7,95 ct/kWh). Dies hat jährliche fiktive Kosten von € 1.683,- (zuvor € 2.090,-) zur Folge.

3.2 Variante B

Neben den Optimierungen der Variante A kommt bei Variante B noch die Ausnutzung der Speicherkapazität der Laptops hinzu. Zudem wird nach Bukvic-Schäfer (2007) die thermische Speicherkapazität des Gebäudes ausgenutzt. In der Heizperiode wird das Gebäude außerhalb der Betriebszeiten auf ein höheres Temperaturniveau aufgeheizt, wodurch eine niedrigere Leistungsaufnahme während der Hochtarifzeiten tagsüber bewirkt wird. Während der Kühlperiode erfolgt der Vorgang umgekehrt, nachts wird heruntergekühlt, um die Leistung tagsüber reduzieren zu können. Abb. 4 zeigt die Veränderung des Lastgangs durch diese Maßnahmen.

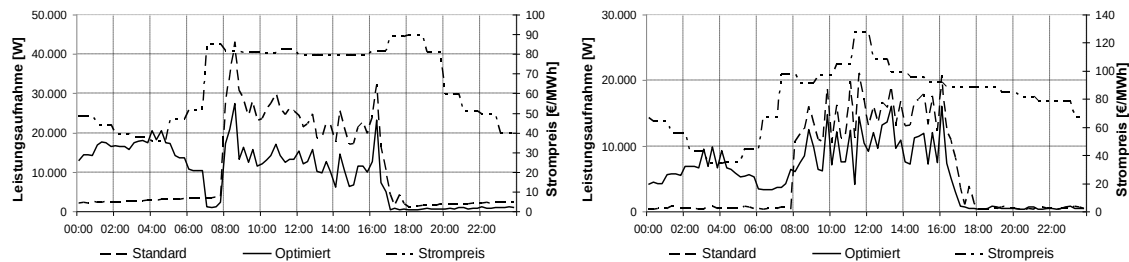


Abb. 4: Optimierung Variante B Winter und Sommer (Daten aus EXAA 2011 und Inschlag 2011)

Der Gesamtverbrauch gegenüber der Standardvariante (38.405 kWh/a) ändert sich bei der optimierten Variante (37.791 kWh/a) nur gering. Dabei überlagern sich zwei Effekte, einerseits ergibt sich durch die Effizienzmaßnahmen - vor allem bei der Beleuchtung - eine Senkung des Verbrauchs. Durch die höheren Wärmeverluste des Gebäudes bedingt durch die höheren Temperaturdifferenzen bei der Vorheiz- und Vorkühlstrategie steigt andererseits der Stromverbrauch der Peripherie von ursprünglich 18.720 kWh/a auf 22.442 kWh/a. Durch den niedrigeren durchschnittlichen Strompreis (6,31 ct/kWh statt 8,09 ct/kWh) sinken dennoch auch die jährlichen Stromkosten der Peripherie von € 1.514,- auf € 1.416,-.

3.3 Variante C

Die Optimierungsmaßnahmen der Variante C decken sich mit jenen der Variante B, es liegen allerdings andere Voraussetzungen im Standardszenario vor. Durch die tieferen nächtlichen Temperaturen ist anzunehmen, dass auch die Verschiebung der Kühlung in die Nachtstunden einen höheren Anteil an freier Kühlung möglich macht. Abb. 5 zeigt die Auswirkungen der Maßnahmen auf den Lastgang der Ausstattungsvariante C.

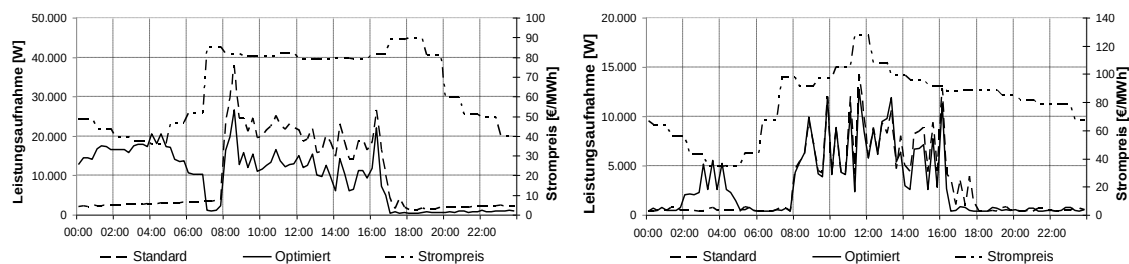


Abb. 5: Optimierung Variante C Winter und Sommer (Daten aus EXAA 2011 und Inschlag 2011)

Während sich beim Wintertag ein ähnliches Bild wie bei der Variante B zeigt, kann die Kälterzeugung im Sommer beim betrachteten Tag durch freie Kühlung in der Nacht ersetzt werden. Da bei der Variante C eine effizientere Beleuchtung vorausgesetzt wird, ergibt sich hier bei der optimierten Variante weniger Einsparung gegenüber der Standardvariante. Die Einsparungsmaßnahmen im Bereich der freien Kühlung und der Beleuchtung werden durch den höheren Heizwärmebedarf mehr als aufgehoben, der Gesamtstromverbrauch steigt von 28.478 kWh/a auf 29.781 kWh/a. Durch den niedrigeren durchschnittlichen Strompreis sinken aber auch hier die jährlichen Kosten von € 2.196,- auf € 1.986.

4 SCHLUSSFOLGERUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Das elektrische Lastverhalten sowie das Lastmanagement wird bei einer Änderung der Tarifstruktur sowie bei zunehmender Einbindung fluktuierend auftretender Stromerzeugung in Zukunft eine zentrale Rolle spielen. Die Betrachtung des Lastverhaltens von Bürogebäuden zeigt, dass ohne Optimierungsmaßnahmen der überwiegende Teil des Stromverbrauchs zu Zeiten hoher Strompreise auftritt. Durch die Ausnutzung von Lastverschiebungspotentialen kann allerdings ein Teil der elektrischen Lasten in Zeiten niedriger Strompreise verschoben werden, ohne den Nutzer nachteilig zu beeinträchtigen. Nicht nur Maßnahmen der Lastverschiebung haben Auswirkungen auf das Lastverhalten von Gebäuden, sondern auch alle Effizienzmaßnahmen, die elektrische Verbraucher betreffen. Das Ausmaß der Optimierungsmöglichkeit von Gebäuden hinsichtlich ihres Lastverhaltens hängt zudem stark von ihrer Ausstattung ab. Tab. 1 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Varianten.

Tab. 1: Fiktive Strompreise und Stromkosten der Varianten

Variante	Stromverbrauch in kWh/a		Ø Strompreis in ct/kWh		Stromkosten in €/a	
	Standard	Optimiert	Standard	Optimiert	Standard	Optimiert
A	26.292	21.710	7,95	7,75	2.090	1.683
B	38.405	37.791	7,98	6,67	3.065	2.521
C	37.791	29.781	7,71	6,67	2.196	1.986

Es zeigt sich, dass vor allem bei Verwendung von stark stromabhängiger Raumklimatisierung in der Nutzung des Gebäudes als Speicher hohes Potential gesteht. Die Erhöhung des Verbrauchs durch die Verschiebung der thermischen Lasten könnte durch die Nutzung separater, meist effizienterer Speichereinheiten minimiert werden (im Vergleich zum Gebäude als Speicher). Dadurch ist eine noch höhere Reduktion bei den fiktiven Stromkosten wahrscheinlich.

LITERATUR

- Brauner, G., Einfalt, A., Poepl, G. & Tiefgraber D. (2007) *Balancing of fluctuating Regenerative Generation by DSM*. 19th International Conference on Electricity Distribution, Paper 832, Wien
- Bukvic Schäfer, A. (2007) *Lastmanagement – Nutzung der Thermischen Kapazität von Gebäuden als nichtelektrischer Energiespeicher in elektrischen Versorgungsnetzen*, Universität Kassel, Kassel, Deutschland
- DIN 18599-4 (2007) *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland
- DIN 18599-10 (2007) *Vornorm Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland
- ElWOG (2010) *Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2010*, Bundeskanzleramt, Wien
- Europäisches Parlament (2006) *Richtlinie 2006/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen*. Artikel 13, Straßburg, Frankreich
- EXAA (2011) *EXAA Spotpreise 2011*. http://www.exaa.at/market/historical/austria_germany/ aufgerufen am 12.04.2011 um 19:00, Energy Exchange Austria GmbH, Wien
- Heimrath, R. (2009) *Einführung TRNSYS*. TU Graz, Graz
- IME-VO (2012) *Intelligente Messgeräte-Einführungsverordnung*. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien
- Inschlag, F. (2011) *Simulation des energetischen Verhaltens von Bürogebäuden mittels TRNSYS*. Ausgabedatei, FH Burgenland, Pinkafeld
- Juwi (2008) *Das Energieeffizienteste Bürogebäude der Welt – Sonderheft zum Neubau der Firmenzentrale in Wörrstadt*. juwi Holding AG, Wörrstadt, Deutschland
- Stumpf, W. (2011) *Gebäudeplan des Standardgebäudes*. CAD-Plan, FH Studiengänge Burgenland GmbH, Pinkafeld