



Schlussbericht 1. Dezember 2012

Kraftwerk Haus im ländlichen Raum

Umsetzung von Strom-Lastmanagement im
Gebäude mit Eigenerzeugung aus Photovoltaik

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:**Ökozentrum**

Schwengiweg 12
4438 Langenbruck
www.oekozentrum.ch

Fachhochschule Nordwestschweiz, FHNW

Institut für Aerosol und Sensortechnik
Klosterzelgstrasse 2
5210 Windisch
www.fhnw.ch

Empa, Building Science and Technology Laboratory

Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf
www.empa.ch

Autoren:

Michael Sattler, Ökozentrum,
michael.sattler@oekozentrum.ch

Martin Wiederkehr, FHNW

Tobias Strittmatter, FHNW

Viktor Dorer, Empa

Andreas Weber, Empa

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Rolf Moser / Dr. Charles Filleux

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154392 / 103330 (SI/500233-01 / SI500233)

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

Inhaltsverzeichnis

Abstract	4
1 Ausgangslage	5
2 Ziel der Arbeit.....	10
3 Strom-Lastmanagement im Praxisversuch	11
3.1 Aufbau Praxisversuch.....	11
3.1.1 Technische Installation	12
3.1.2 Schaltstrategie	13
3.1.3 Prädiktive Regelung	16
3.2 Resultate Praxisversuch	17
3.2.1 Reduktion der Lastspitzen durch das LLM	17
3.2.2 Erhöhung des Eigenstromverbrauchs durch das LLM	21
3.2.3 Auswirkungen der prädiktiven Regelung basierend auf Wetterdaten	23
3.2.4 Erfahrungen aus dem praktischen Betrieb	23
3.2.5 Auswirkungen des LLM auf die Netzqualität.....	25
4 Ökonomische Beurteilung von LLM-Systemen im Gebäude	26
4.1 Kategorisierung der im LLM angesteuerten Verbraucher	26
4.2 Verkauf von Regelleistung und Einsparungen durch Lastverschiebungen	27
4.3 Kosten für Installation, Betrieb, Unterhalt und Rechnungswesen	29
4.3.1 Installationskosten.....	29
4.3.2 Kosten für Betrieb und Unterhalt.....	29
4.3.3 Kosten im Fehlerfall.....	29
4.3.4 Abrechnung von Netzdienstleistungen des Gebäudes	30
4.4 Effizienzsteigerung durch Monitoring.....	30
5 Ergänzende Optionen zur Integration von erneuerbaren Energien im Stromnetz.....	32
5.1 Stromspeicher	32
5.1.1 Ausgleichsenergie und Netzentlastung	32
5.1.2 Wirtschaftlichkeit von Strom-Akkumulatoren im Wohnhaus	32
5.1.3 Die Wasserbatterie als indirekter Stromspeicher.....	33
5.2 Wirkleistungsreduktion von Photovoltaikanlagen	33
5.3 Stromgeführte WKK-Anlagen.....	34
6 Fazit.....	36
7 Ausblick	37
8 Literaturverzeichnis.....	39
9 Veröffentlichungen	41
10 Danksagung	41

Abstract

Die dezentrale Produktion erneuerbarer Energien und die intelligente Steuerung von relevanten Stromverbrauchern im Haushalt sind im Bereich der Elektrizitätsversorgung zentrale Elemente für die Umsetzung der Schweizer Energiestrategie 2050. Am Ökozentrum in Langenbruck wurde in einem Praxisversuch ein lokales Strom-Lastmanagement (LLM) mit verschiedenen Verbrauchern und einer Photovoltaik-Anlage installiert und auf Erzeugung und Verbrauch analysiert. Das Ziel der verwendeten LLM-Schaltalgorithmen war eine Reduktion von Bezugsspitzen aus dem Versorgungsnetz und eine Erhöhung des Eigenstromverbrauchs bzw. Reduktion der Rückspeisung. Basierend auf Meteodaten wurde zusätzlich die Wirkung einer prädiktiven Regelung untersucht.

Gemessen am Energiebezug des Gebäudes aus dem Versorgungsnetz konnte das LLM die Lastspitzen an Wochentagen um den Faktor 7 reduzieren. Gemessen an der Zeit mit erhöhtem Bezug aus dem Versorgungsnetz konnten die Lastspitzen um den Faktor 4 reduziert werden.

Der Eigenstromverbrauch konnte durch das LLM von 32% auf über 50% erhöht werden.

Die prädiktive Regelung war für das Institutsgebäude mit geringer thermischer und ohne elektrischer Speichermöglichkeit schwierig umzusetzen. Die Abweichungen des prognostizierten zum effektiv produzierten Stromertrag am Standort des Institutsgebäudes waren zu gross, um eine prädiktive Regelstrategie mit signifikantem Nutzen für die Reduktion der Lastspitzen einzusetzen.

Betrachtungen zur Technik und zur Ökonomie zeigen, dass ein effizientes und wirtschaftliches LLM aktuell nur mit ausgewählten Verbrauchern mit relevantem Strombedarf wie Wärmepumpen-Gebäudeheizung, Warmwassererwärmung und Elektroauto-Ladestationen zu erzielen ist. Speziell für Kleinverbraucher wie Gefrier- und Kühlgeräte sowie Waschmaschinen und Geschirrspüler ist der Aufwand für die Installation, Programmierung und Abrechnung eines LLM tendenziell zu hoch, betrachtet man die finanziell denkbaren Einsparungen.

Neben dem Lastmanagement sollten in zukünftigen Projekten weitere Optionen für das Zusammenspiel von dezentralen Produktionsanlagen und Netz geprüft werden. Die Leistungsreduktion bei Photovoltaikanlagen oder dezentrale Stromspeicherung sind mögliche Ergänzungen zum LLM. Speziell für die saisonale Energieversorgung sind stromgeführte Mikro-WKK-Anlagen im Gebäude zu prüfen.

1 Ausgangslage

Zubau erneuerbarer Energien und deren Integration ins Stromnetz

Die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien muss nach dem beschlossenen Atomausstieg in der Schweiz beschleunigt angegangen werden. Die wegfallende Stromproduktionskapazität der Atomkraftwerke soll mit Energieeffizienz und erneuerbaren Energien kompensiert werden [Energiestrategie 2050, 2012]. Die Umstellung auf erneuerbare Energien wird den Anteil an Elektrizität im Energiemix deutlich erhöhen. Viele erneuerbare Energien mit grossem Potenzial produzieren Strom. Dieser lässt sich effizient und vielseitig einsetzen.

Da die Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien oft weder zeitlich noch örtlich mit dem Verbrauch übereinstimmt, müssen Ausgleichssysteme geschaffen werden. Strom kann mit entsprechenden Verlusten über weite Strecken transportiert werden. Auch die Speicherung von Strom ist heute technisch lösbar, ist aber ebenfalls mit Energieverlusten verbunden. Die Herausforderung besteht darin, die Produktion von erneuerbaren Energien möglichst in die bestehende Energieverteilung zu integrieren.

Ein Ausbau der Stromnetze kann die örtlichen Differenzen zwischen Stromproduktion und Stromverbrauch ausgleichen. Dazu sind eine sehr weitsichtige Planung und grosse Investitionssummen notwendig. In Deutschland sind die überregionalen Netzplanungen für eine Stromversorgung mit erneuerbaren Energien bereits weit fortgeschritten [dena-Netzstudie II, 2010]. Die Studie zeigt einen grossen Bedarf an neuen Stromleitungen und an Verstärkungen von bestehenden Stromleitungen. Die grosse Herausforderung in Deutschland besteht darin, die Energie aus Windkraft aus dem Norden in den Süden zu leiten. In Anbetracht der grossen finanziellen Investitionen und der Planungsunsicherheiten auf Grund von diversen Einsprachemöglichkeiten gegen neue Stromleitungen, schreitet der Netzausbau in Deutschland nur zögerlich voran [SWW, 2012].

Neben dem örtlichen Ausgleich von Stromproduktion und Stromverbrauch muss auch Technologie für den zeitlichen Ausgleich bereitgestellt werden. Für die Stromspeicherung werden heute vor allem Pumpspeicherkraftwerke eingesetzt. Verschiedenste Technologien wie Luftdruckspeicher, Wasserstoffspeicher, Doppelschicht-Kondensatoren, Schwungräder und Akkumulatoren befinden sich in Entwicklung. Speziell Akkumulatoren werden zunehmend als mögliche dezentrale Stromspeicher der Zukunft gehandelt. Bei der Stromspeicherung muss zwischen Kurzzeitspeicherung (Stunden bis Tage) und Saisonspeicherung (mehrere Monate) unterschieden werden. Während die Ansätze in Forschung und Entwicklung bei der Kurzzeitspeicherung vielversprechend sind, ist das Problem der Saisonspeicherung von Strom noch weitgehend ungelöst.

Die Speicherung und der Transport von Strom sind neben den Energieverlusten mit erhöhten Kosten verbunden. Daher muss insbesondere die unregelmässig anfallende Elektrizität aus Photovoltaik und Windkraft mit intelligenten Massnahmen wie beispielsweise einem Lokalen Lastmanagement (LLM) direkt und effizient vor Ort genutzt werden.

Ein LLM auf Ebene Wohnhaus kann nicht die Netzverstärkungen des Übertragungsnetzes zwischen den nördlichen und südlichen Regionen in Europa ersetzen, aber einen Beitrag leisten, diese optimal zu nutzen so dass sie in adäquater Grösse dimensioniert werden können. Hingegen kann der Ausbau des Verteilnetzes reduziert werden.

Ausblick zu Stromverbrauch und -produktion in der Schweiz

Strom kann mit den heutigen Bandenergie- und Spitzenenergie-Kraftwerken in der Schweiz entsprechend dem Bedarf (gesteuert über Hoch- und Niedertarif) produziert werden. In Zukunft erfolgt die Stromproduktion vermehrt mit Photovoltaik- und Windkraftanlagen. Gemäss Swissolar [Swissolar, 2012] soll der Ausbau der Photovoltaik in der Schweiz bis 2025 12 Mia. kWh sauberen Strom liefern. Dafür ist die Installation einer kumulierten PV-Anlageleistung von ca. 14 GWp notwendig. Bei einer Betrachtung mit Systemgrenze

Schweiz können die durch diese PV-Kraftwerke generierten Einspeisespitzen zur Mittagszeit bis mehrere GW Leistung über dem heutigen Verbrauch liegen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

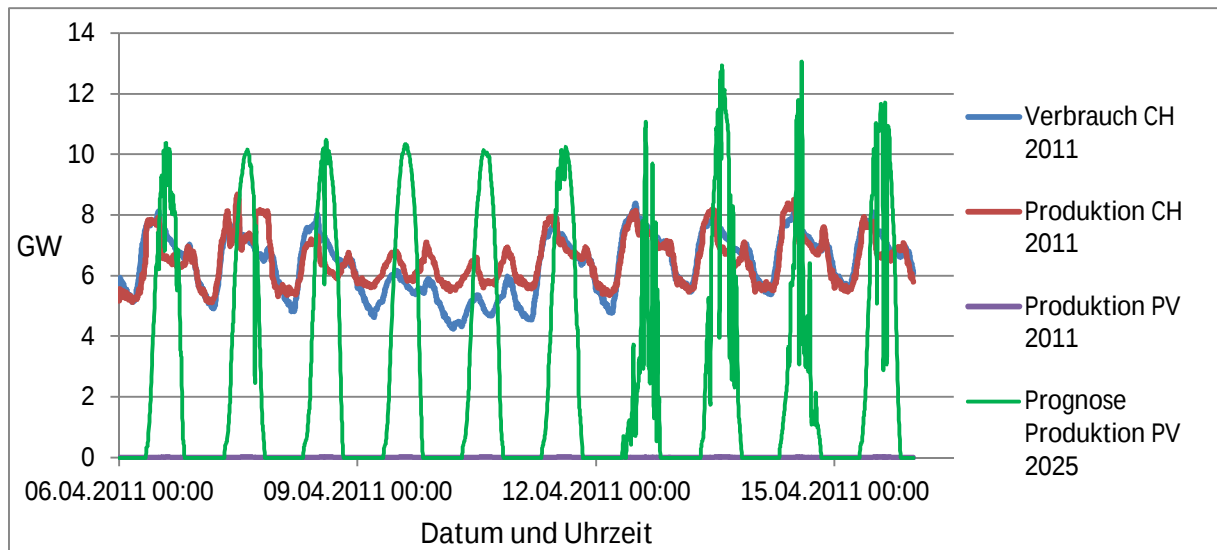


Abbildung 1 Die heutige Stromproduktion folgt zeitlich dem herrschenden Strombedarf. Der Lastverlauf bei Installation von 14 GWp PV-Leistung bis 2025 liegt an ausgewählten Tagen kurzzeitig bis 4 GW über dem heutigen Stromverbrauch (ohne Berücksichtigung von Windenergieanlagen, Systemgrenze Schweiz).

Auch eine Ausdehnung der Systemgrenzen auf Europa ändert nur wenig an diesen Prognosen. So beschäftigt sich Deutschland aktuell mit sehr ähnlichen Szenarien einer sehr hohen PV-Leistung an einzelnen Tagen.

Potenzial von LLM-Systemen im Kraftwerk Haus

Die Produktionsschwankungen, welche durch den vermehrten Zubau fluktuierender erneuerbarer Energien entstehen, müssen mit verschiedenen Massnahmen ausgeglichen werden, um das Stromnetz zuverlässig zu betreiben. Neben der Pumpspeicherung und dem Lastmanagement im Industrie- und Dienstleistungssektor sind neu auch Wohnhäuser mit einer intelligenten Schaltung ihrer Verbraucher als variable Last aufgerufen, ihren Beitrag zur Netzstabilität zu liefern. Die Schweizer Haushalte haben einen Anteil von ca. 30% am gesamten Schweizer Stromverbrauch. Innerhalb eines Haushalts machen Heizung, Warmwassererwärmung, Kochen, Geschirrspülen und Kühlen/Gefrieren ca. 60% des Stromkonsums aus (Abbildung 2).

Auf der Verbraucherseite steht prinzipiell das ganze Spektrum elektronischer Geräte für das Lastmanagement zur Verfügung. Hier muss eine Auswahl an steuerbaren Geräten getroffen werden, um für das Gebäude relevante Verbraucher mit vertretbarem Aufwand und ohne Komforteinbusse zu steuern.

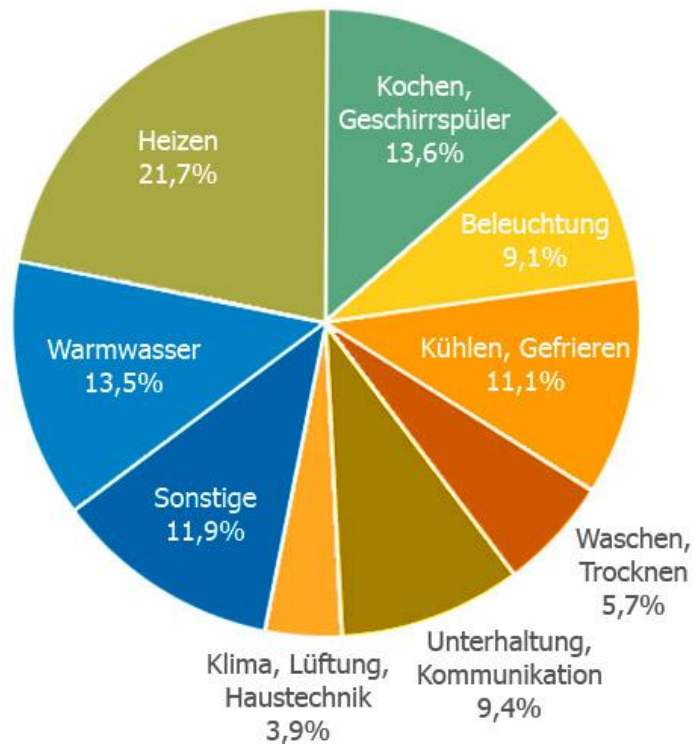


Abbildung 2: Stromverbrauch in privaten Haushalten nach Verwendungszweck, Quelle: BFE, Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2009 / www.immergenugstrom.ch

Der hohe Anteil des Haushaltstroms am Schweizer Stromverbrauch, zusammen mit der Tatsache, dass viele Wohngebäude sehr gut für die Nutzung von dezentralen Energien wie Photovoltaik oder Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen geeignet sind, macht das Wohngebäude zu einem bevorzugten Objekt für Ansätze die dezentral erzeugte Energien intelligent zu nutzen.

Der Gebäudepark Schweiz hat das Potenzial, einen relevanten Anteil an Regelenergie kostengünstig und ohne Komfortverlust bereitstellen, wenn die verschiedenen Stromverbraucher im Haushalt mit einem LLM mit einer klaren Regelstrategie geschaltet werden (Abbildung 3).

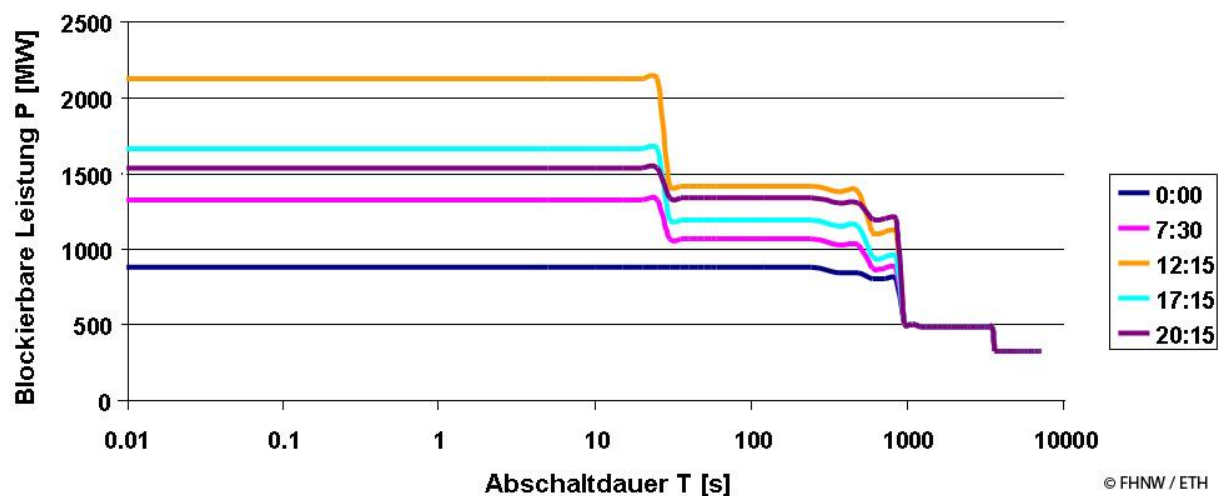


Abbildung 3: Blockierbare Leistung in den Schweizer Haushalten ohne Komfortverlust zu verschiedenen Tageszeiten. Quelle: [Gutzwiller et al, 2008].

Ein zusätzlicher Nutzen von intelligent geschalteten Verbrauchern ist der Lastabwurf in Notsituationen. Heute werden bei einer Grossstörung im Stromnetz ganze Versorgungsregionen inklusive dezentraler Einspeisung durch den automatischen, frequenzabhängigen Lastabwurf vom Stromnetz getrennt. In Zukunft könnten z. B. bei Unterfrequenz selektiv nur solche Verbraucher abgeworfen werden, die trotz kurzer Unterbrechung der Stromversorgung keine unmittelbaren Auswirkungen auf das tägliche Leben haben. Für den Endverbraucher wäre diese Lösung mit erhöhtem Komfort bei Grossstörungen verbunden. Weiter würde das Stromnetz in kritischen Situationen eine zusätzliche Stabilisierung erfahren, da dezentrale Einspeisungen weiter in Betrieb bleiben und so das Netz stützen.

Dezentrale LLM-Systeme in Wohngebäuden können in kurzer Zeit eingebaut und über bestehende Kommunikationskanäle wie Rundsteuerungssignale in die Energieversorgung integriert werden. LLM-Systeme können innert weniger Jahre eine hohe Durchdringung bei Elektroinstallationen in Wohngebäuden erreichen. Die Umsetzung von Grosstechnologien für Lastmanagement wie Pumpspeicherkraftwerke oder neuen Hochspannungsleitungen beanspruchen deutlich grössere Zeiträume.

Strom-Eigenproduktion im Wohngebäude

Von den verschiedenen erneuerbaren Energien mit grossem Potenzial sind für Wohngebäude im Bereich Stromproduktion vor allem die Photovoltaik und die Biomasse-Wärme-Kraft-Koppelung von Bedeutung. Während heute Photovoltaik für Wohngebäude ein Standardprodukt mit grossem Angebot ist, steht die Wärme-Kraft-Koppelung, speziell mit dem Brennstoff Biomasse, erst am Anfang der Verbreitung [Gaegauf et al. 2012].

Unklare Strompreisentwicklung als Herausforderungen für Regelstrategien und Hindernis für Investitionen

Der Stromverbrauch der Schweiz erreicht heute um die Mittagszeit und am frühen Abend jeweils einen Spitzenwert. Zu diesen Zeiten herrscht in der Schweiz Knappheit an Elektrizität, weshalb ein Grossteil der elektrischen Warmwassererwärmer und Waschmaschinen zu dieser Zeit von den Elektrizitätswerken über die Rundsteuerung blockiert werden. Die Grafik in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt, dass in Zukunft zur Mittagszeit auf Grund der hohen PV-Leistung ein Überschuss an elektrischer Energie vorhanden sein wird. Der Übergang von einer Mittags-Verbrauchsspitze zu einer Mittags-Produktionsspitze wird in wenigen Jahren vollzogen sein. Eine genaue Prognose zum Zeitpunkt und Verlauf dieses Übergangs ist jedoch sehr schwierig. Damit verbunden sind grosse Unsicherheiten der zukünftigen Strompreise. Insbesondere herrscht Unklarheit über die Preisentwicklung im Tagesverlauf. Das heutige System mit fixen Preisen für "Tag- und Nachtstrom" widerspiegelt bereits heute nur noch sehr eingeschränkt die Preise der Strombörse im Tagesverlauf.

Diese Unsicherheit über die zukünftigen Strompreise ist heute eine grosse Hürde für die Installation von LLM-Systemen sowie der Festlegung von Regelstrategien für Verbraucher im Haushalt. Während Energieversorger eine grösstmögliche Flexibilität suchen, um dynamisch auf Marktveränderungen reagieren zu können, wünschen sich Investoren von dezentralen erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen und LLM-Systemen langfristig stabile Voraussetzungen um ihre Investitionen ökonomisch zu bewerten.

Für die Umsetzung eines LLM-Systems bedeutet dies, dass die Regelstrategie heute nicht definitiv festgelegt werden kann. Ebenso sind keine eindeutigen Aussagen zum ökonomischen Nutzen für den Hausbesitzer möglich. So ist es denkbar, dass in wenigen Jahren LLM-Systeme hoch willkommen sind und entsprechend vergütet werden, weil sie das Stromnetz stabilisieren. Ebenso ist es möglich, dass LLM-Systeme kaum Beachtung finden, weil sich die Leistung und Produktionszeit von Strom aus erneuerbaren Energien mit Hilfe von zentralen und dezentralen Speichersystemen sowie regelbaren Kraftwerken weitgehend dem Verbrauch angepasst haben.

Energiestandards als Treiber für LLM Systeme

Energiestandards von Gebäuden wie Minergie-P oder Minergie-A schreiben eine Nutzung der Sonnenenergie vor. Oft geschieht diese Nutzung mittels Photovoltaik. Gleichzeitig darf der so produzierte Solarstrom nicht mit einem ökologischen Mehrwert verkauft werden (z. B. kein Verkauf mit kostendeckender Einspeisevergütung KEV). Da der Erlös von verkauftem Strom unter diesen Voraussetzungen weniger rentabel ist als eine Nutzung im Gebäude, werden zunehmend Systeme entwickelt um den Eigenstromverbrauch mittels Varianten von LLM zu erhöhen.

2 Ziel der Arbeit

Der Praxisversuch am Ökozentrum in Langenbruck soll das Zusammenspiel von Verbraucher-Strom-Lastmanagement und dezentraler Stromerzeugung am Institutsgebäude des Ökozentrums erproben.

Die Anwendung eines Lokalen Lastmanagement-Systems im Feldversuch liefert Erkenntnisse für die Optimierung der Software- und Hardwarekomponenten. Das Ziel der Regelalgorithmen besteht darin, Bezugs- und Einspeisespitzen gegenüber dem Stromnetz zu reduzieren. Gleichzeitig soll die im Gebäude produzierte Energie lokal genutzt werden. Die Regelung arbeitet dabei lokal und nicht mit Eingriffen aus dem Netz.

Der Einsatz des LLM in Alltagssituationen zeigt die Stärken und Schwächen der theoretischen Überlegungen zum LLM.

Weiter werden ökonomische Parameter für die funktionell-strategische Ausrichtung dezentraler LLM-Systeme erarbeitet.

3 Strom-Lastmanagement im Praxisversuch

3.1 Aufbau Praxisversuch

Grunddaten Institutsgebäude Ökozentrum

Das Institutsgebäude des Ökozentrums in Langenbruck besteht aus einer Forschungshalle, einem Bürotrakt mit 20 Arbeitsplätzen, einer grossen Küche für die Mitarbeitenden sowie zwei Familienwohnungen.

Während die Mitarbeitenden am Ökozentrum nur zu Bürozeiten anwesend sind und über Mittag die Küche benutzen, sind 2-4 Zivildienstleistende sowie die zwei Familien werktags dauernd am Ökozentrum. Am Wochenende bleiben lediglich die zwei Familien als Energiebezügler.

Elektrische Verbraucher

Um die Bezugs- und Einspeisespitzen des Gebäudes gegenüber dem Stromnetz zu reduzieren und gleichzeitig die im Gebäude produzierte Energie lokal zu nutzen, wurden verschiedene elektrisch Verbraucher ins LLM eingebunden. Die Auswahl der Geräte erfolgte auf Grund von zwei Hauptkriterien:

- Die Einbindung des Gerätes in ein LLM darf nur geringfügige Komforteinbussen für den Benutzer zur Folge haben.
- Die elektrische Leistung des Gerätes muss relevant sein.

Mit diesen Kriterien wurden folgende Geräte für die Einbindung ins LLM ausgewählt:

- Warmwassererwärmer I ($P_{\max}$ 5.5 kW, Blockierfunktion)
- Elektroauto-Ladestation ($P_{\max}$ 9 kW, Blockierfunktion)
- Waschmaschine ($P_{\max}$ 4 kW, Blockierfunktion)
- Gefrierschrank ($P_{\max}$ 65 W, Blockierfunktion)
- Gefrierschrank ($P_{\max}$ 65 W)
- 2 Kühlschränke ($\approx P_{\max}$ 65 W)

Bei den Geräten wurde jeweils die Wirk-, Blind- und Scheinleistung erfasst. Die mit "Blockierfunktion" bezeichneten Geräte konnten zusätzlich mittels Steuerung ein- bzw. ausgeschaltet werden. Weitere elektrische Verbraucher wie Kochherd, Backofen, Wasserkocher, Kaffeemaschine und Beleuchtung wurden nicht ins LLM eingebunden, da diese nicht ohne Komfortverlust geschaltet werden können.

Laptop-Computer mit eigenem Akku sind eine weitere interessante Verbrauchergruppe für ein LLM. Mit einer Leistung von 30 – 50 W pro Gerät summiert sich im Institutsgebäude des Ökozentrums mit ca. 20 Geräten die schaltbare Leistung auf 0.6 - 1 kW. Die technischen Voraussetzungen für eine Einbindung in ein LLM sind grundsätzlich ideal, da die Hardware bereits vorhanden ist. Die Programmierung einer Software zur Ansteuerung von Laptop-Computern ohne externe Hardware ist jedoch anspruchsvoll und wurde in diesem Projekt nicht realisiert.

Strom-Eigenerzeugung

Die Strom-Eigenerzeugungsanlagen bestehen aus zwei Photovoltaikanlagen. Eine Anlage weist eine Leistung von ca. 1.5 kWp und die andere Anlage eine von 8.9 kWp auf. Nur die grössere Anlage ist mit einer Leistungsmessung ausgerüstet. Stromerträge der kleineren Anlage wurden rechnerisch berücksichtigt.

- Photovoltaik ($P_{\max}$ 9 kW)

3.1.1 Technische Installation

Überwachung und Steuerung

Das LLM wird zentral von einem Computer mit LabVIEW-Software (National Instruments), dem sogenannten Lastmanager Haus (LMH), gesteuert (Abbildung 4). Die Schaltbefehle werden von diesem via Ethernet-LAN an eine Schaltbox am Elektroverbraucher, dem Lastmanager Gerät (LMG) (Abbildung 5), übermittelt und ausgeführt.

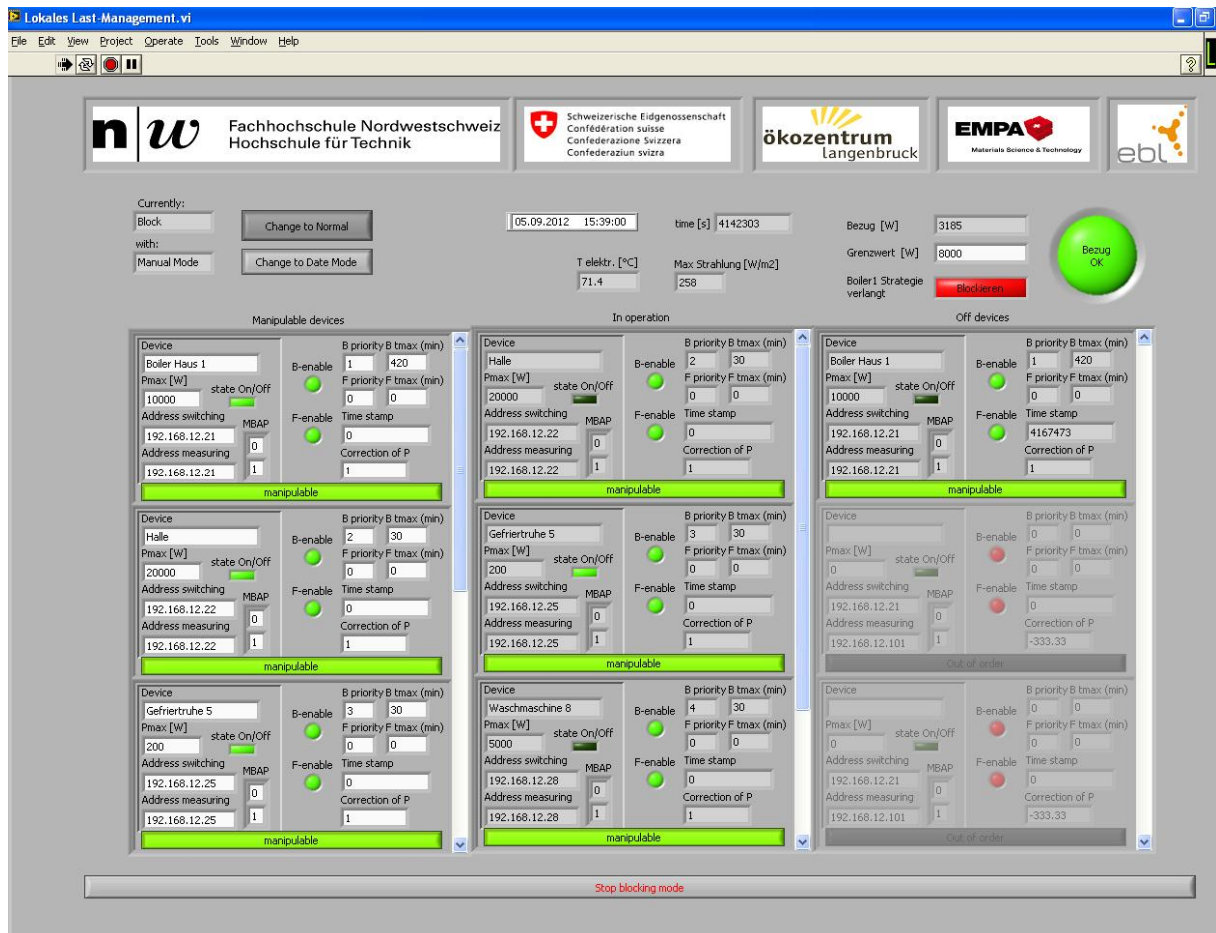


Abbildung 4: Graphische Oberfläche des Lastmanagers Haus (LMH). Jedes Gerät ist mit spezifischen Parametern versehen. In der linken Spalte ist neben den Geräte- und Kommunikationsparametern ersichtlich, ob das Gerät zur Verfügung steht (On/Off). Die mittlere Spalte zeigt entsprechend, ob das Gerät blockiert oder forciert werden kann. Die rechte Spalte zeigt den aktuellen LLM-Zustand.



Abbildung 5: Zwei Lastmanager-Gerät-Einheiten eingebaut in Aufputz-Elektrokästen. Sichtbar sind Stromwandler, Energiemeter, Signalwandler/Steuermodule und Niederspannungsversorgung.

Die Lastmanager Gerät beinhalten folgende Komponenten:

- Energiemeter EM24 DIN (Carlo Gavazzi Automation Components)
- Signalwandler (ADAM-Module, ADVANTECH)
- Steuermodule (ADAM-Module, ADVANTECH)
- Relais und Schütze (Allen-Bradley)
- Stromwandler (diverse Marken)

Hausanschluss

Um die Bezugs- oder Einspeiseleistung des Gebäudes gegenüber dem Stromnetz zu messen, wurden in der Hauptversorgung des Gebäudes Stromwandler für die Leistungs- und Energiemessung installiert.

Temperaturüberwachung

Für eine vollständige Information über den Zustand der im LLM eingebundenen Geräte wurden am Warmwassererwärmer und an den Kühl- und Gefrierschränken Temperaturfühler angebracht. Während die Temperaturfühler bei Kühl- und Gefrierschränken nur eine Sicherheitsfunktion innehatten, wurde die Temperatur des Warmwassererwärmers als Regelgrösse eingebunden.

3.1.2 Schaltstrategie

Allgemeine Schaltstrategie zur Entlastung des Stromnetzes und zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs

Nach Analyse des Stromverbrauchs des Gebäudes und der gerätespezifischen Verbrauchsmustern wurde versucht, die Strom-Bezugsspitzen des Gebäudes mit Schaltalgorithmen zu reduzieren. Grundsätzlich wurde für das Gebäude ein Schwellwert von 8 kW Bezugsleistung aus dem Stromnetz definiert, der nicht überschritten werden sollte. Gleichzeitig sollte der Strom aus der Photovoltaikanlage zu einem möglichst grossen Anteil im Institutsgebäude genutzt werden. Weiter wurde berücksichtigt, dass das Stromnetz zur Mittagszeit vermehrt mit Solarstrom aus der PV-Anlage versorgt werden sollte.

Der Algorithmus nutzte als Input den Wert der aktuell vom Stromnetz bezogenen Leistung. Liegt diese Bezugsleistung über dem vordefinierten Schwellenwert von 8 kW wurden sukzessive Verbraucher abgeschaltet. Bei der Waschmaschine wurde die Einschaltung blockiert, wenn damit die Schwelle von 8 kW überschritten worden wäre. Die Reihenfolge der Abschaltung erfolgte über eine festgelegte Priorisierung. Die Abschaltung eines Gerätes war auf eine gerätespezifische Dauer zugeschnitten.

Der Warmwassererwärmer (WWE) wurde durch eine differenzierte Regelstrategie gesteuert. Der WWE sollte wenn möglich auf die Solltemperatur gemäss Abbildung 6 aufgeheizt werden, ohne den Schwellenwert von 8 kW Bezugsleistung des Gebäudes zu überschreiten. Die Regelstrategie zielte darauf ab, den WWE im Verlauf des Morgens und während der Mittagszeit nicht einschalten zu müssen. Dies ergab sich aus den Analysen des Stromverbrauchs des Institutsgebäudes, in welchen erkannt wurde, dass die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Schwellwertes zwischen 8:00 und 13:00 Uhr erhöht ist. Daher wurde der WWE in den frühen Morgenstunden bis 7:00 Uhr auf 80°C aufgeheizt. So konnte erreicht werden, dass der WWE auch im ungünstigsten Fall erst nach der Mittagszeit eingeschaltet werden muss.

Um den Solarstrom im Gebäude zu nutzen, konnte der WWE zu den in Abbildung 6 angegebenen Zeiten bis auf 80°C aufgeheizt werden, sobald überschüssiger Strom aus der PV-Anlage zur Verfügung stand. Um die Mittagszeit wurde die Bezugsleistung reduziert bzw. die Einspeisung von Solarstrom priorisiert. Der WWE wurde dann erst zugeschaltet, wenn die Netto-Einspeiseleistung des Gebäudes über 2 kW lag.

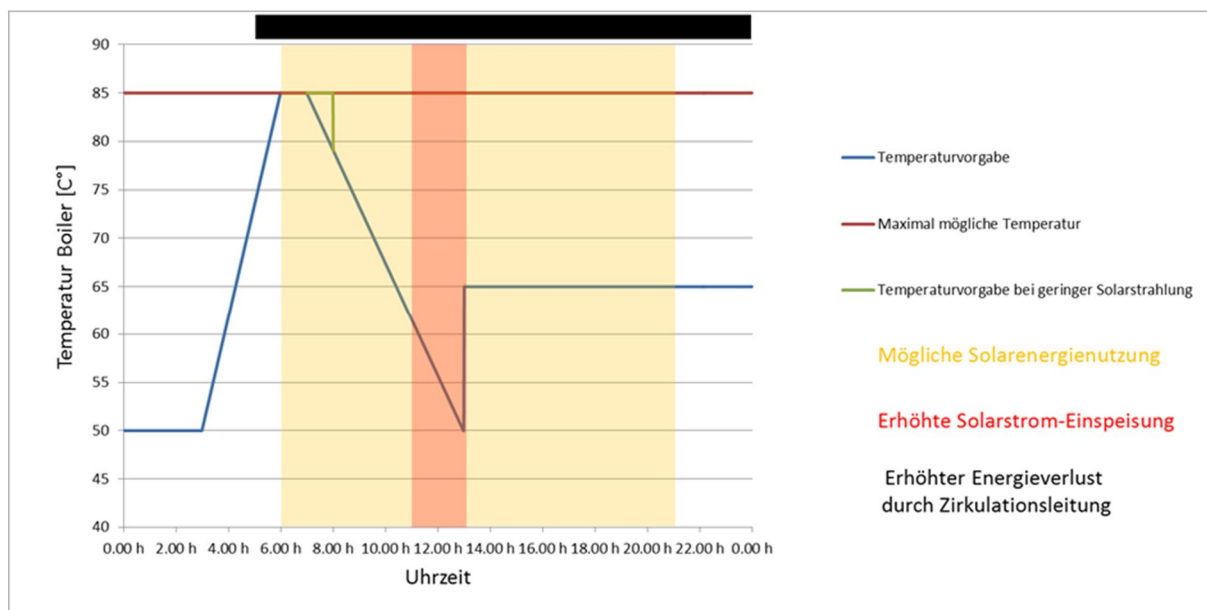


Abbildung 6 Die Grafik zeigt die Vorgaben für die Speichertemperatur im grossen Warmwassererwärmer. Zusätzlich ist ersichtlich, zu welchen Zeiten der Warmwassererwärmer durch Temperaturerhöhung Solarstrom aufnehmen kann und wann eine erhöhte Solarstrom-Einspeisung ins Stromnetz erfolgen soll. Auch der Bereich mit erhöhtem Energieverlust durch die Zirkulationsleitung ist dargestellt.

Gerätespezifische Umsetzung der Schaltstrategie

Warmwassererwärmer

Priorität: 1

Schaltvorgang: Der WWE wurde auf Grund der aktuellen Speichertemperatur und der Bezugsleistung des Gebäudes geschaltet. Die Vorgaben zur Temperatur und Bezugsleistung sind teilweise in Abbildung 6 ersichtlich. Zusätzlich wurde der Speicher jeweils in der Nacht

auf eine Solltemperatur aufgeheizt, um Bezugsspitzen $>8\text{ kW}$ zu vermeiden. Um die notwendige Aufheizzeit zu berechnen, wurde der Speicher simuliert. Dies wurde mit Hilfe eines rudimentären 2 Knotenmodelles des Speichers gemacht (Abbildung 7).

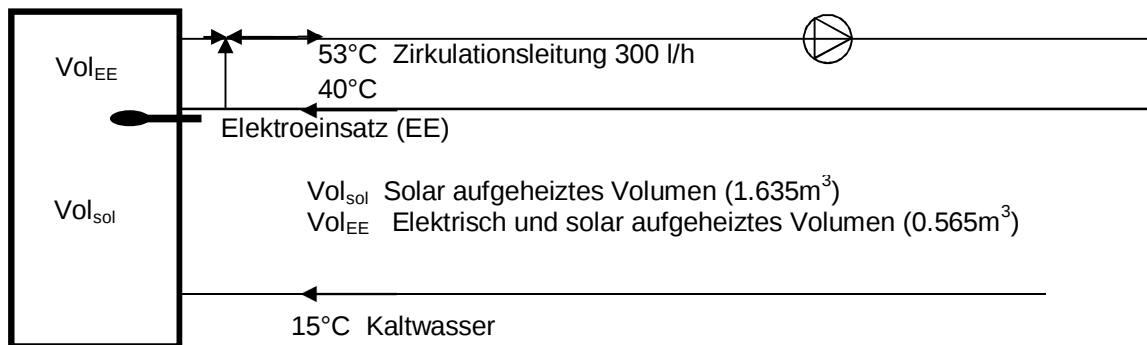


Abbildung 7: Verwendetes 2-Knotenmodell des Speichers

Der Speicher ist in zwei Volumina unterteilt. Der Elektroeinsatz kann nur das obere Volumen aufheizen. Der Solarwärmetauscher heizt sowohl den unteren wie auch den oberen Teil auf. Der Speicher wird in erster Linie durch die Verluste der Zirkulationsleitung entladen. Die Zirkulationsleitung wird mit 300 l/h mit einer Temperatur von 53°C beschickt. Messungen ergaben eine Verlustleistung der Zirkulationsleitung von $>4\text{ kW}$. Die daraus resultierende Rücklauftemperatur beträgt 40°C. Wenn der untere Bereich des Speichers kühler ist als diese 40°C, dann wird die Zirkulationsverlustleistung nur dem oberen Teil des Speichers entnommen. Im andern Fall, wenn der untere Bereich wärmer als 40°C ist, sinkt das 40-gradige Rücklaufwasser ab, wodurch der ganze Speicher durch die Zirkulation ausgekühlt wird. Wenn der Elektroeinsatz im Betrieb ist, dann wird das Zirkulationsrücklaufwasser direkt vom Elektroeinsatz aufgeheizt, d.h. der untere Speicherbereich wird dann unabhängig von seiner Temperatur nicht beeinflusst. Der Warmwasserbezug wird durch Kaltwasser von 15°C ersetzt. Dadurch wird immer das gesamte Speichervolumen ausgekühlt. Aus diesen Überlegungen und den gegebenen Leistungen und Speichervolumina resultieren die folgenden Aufheiz- und Auskühlgeschwindigkeiten (siehe Anhang):

$$\dot{g}_{\downarrow 1} = 2\text{ K/h} \quad \text{Auskühlung wenn } \vartheta_{\text{sol}} > 40^\circ\text{C}$$

$$\dot{g}_{\downarrow 2} = 7.3\text{ K/h} \quad \text{Auskühlung wenn } \vartheta_{\text{sol}} < 40^\circ\text{C}$$

$$\dot{g}_{\uparrow} = 1.2\text{ K/h} \quad \text{Aufheizung mit Elektroeinsatz}$$

$$\dot{g}_{\uparrow_{0Z}} = 8.4\text{ K/h} \quad \text{Aufheizung mit Elektroeinsatz ohne Zirkulation}$$

Wobei: ϑ_{sol} = mittlere Temperatur des unteren Speicherbereiches

Aus diesen Angaben konnte der Einschaltzeitpunkt berechnet werden, um um 7:00 Uhr eine vorgegebene Solltemperatur im Speicher zu erreichen.

Die maximale Blockierzeit betrug 6 Stunden

Sicherheit: Eine vom LMH unabhängige Temperaturüberwachung sowie ein Zeitrelais, welches die Blockierung bei Kommunikationsausfall überbrückt.

Gefrierschrank

Priorität: 2

Schaltvorgang: Blockierung jederzeit möglich. Nach einem Blockiervorgang war ein erneutes Blockieren erst nach einem vollständigen Regenerationszyklus möglich. Dies wird durch ein selbständiges Abschalten nach einem Kühlzyklus erkannt. Die maximale Blockierzeit betrug 30 Minuten.

Sicherheit: Eine vom LMH unabhängige Temperaturüberwachung sowie ein Zeitrelais, welches die Blockierung bei Kommunikationsausfall überbrückt.

Waschmaschine

Priorität: 3

Schaltvorgang: Blockierung ist nur möglich, wenn sich die Waschmaschine in der Startphase befand. In der Startphase wurde geprüft, ob das Einschalten der Heizeinsätze zu einer Überschreitung des Schwellenwertes führen würde. Falls ja, erfolgte der Blockierbefehl. Andernfalls wurde der volle Waschgang ohne Unterbrechung durchgeführt. Eine erneute Blockierung war erst bei einer neuen Startphase möglich. Die Startphase wurde an Hand des Motorenstroms des Waschtrommelmotors erkannt. Die maximale Blockierzeit betrug 30 Minuten.

Sicherheit: Ein Zeitrelais, welches die Blockierung bei Kommunikationsausfall überbrückte.

Elektroauto-Ladestation

Priorität: 4

Schaltvorgang: Blockierung war jederzeit möglich. Nach einem Blockiervorgang war ein erneutes Blockieren erst nach einem vollständigen Regenerationszyklus möglich. Dies wurde durch ein selbständiges Abschalten nach einem Ladezyklus erkannt. Die maximale Blockierzeit betrug 120 Minuten.

Sicherheit: Ein Zeitrelais, welches die Blockierung bei Kommunikationsausfall überbrückte.

3.1.3 Prädiktive Regelung

Das auf einer Strahlungsprognose basierende Schalten von Verbrauchern wurde zusätzlich ins LLM integriert. Die prädiktive Regelung verwendet am Morgen um 6:00 Uhr die Strahlungsprognosen der nächsten 6 Stunden von der Firma meteoblue als Schaltkriterium. Bei schönem Wetter ($> 500 \text{ W/m}^2$ Strahlung) zwischen 10:00 und 12:00 Uhr wurde der Warmwassererwärmer (WWE) um 7:00 Uhr blockiert, bei schlechtem Wetter ($< 500 \text{ W/m}^2$ Strahlung) wurde erst um 8:00 Uhr blockiert. Der relativ kleine Unterschied in der Regelstrategie ist durch den konstant hohen Warmwasserbezug durch die Zirkulationsleitung aus dem WWE und der Anforderung, zur Mittagszeit keine Lastspitze zu erzeugen, erklärbar. Zusätzlich erlaubte die grosse Unsicherheit der Prognose am Standort Langenbruck keine effiziente Nutzung der Strahlungsprognose für das Lastmanagement (Abbildung 8). Eine Blockierung zu einer früheren Tageszeit oder eine verstärkte Ausrichtung auf die unsicheren Strahlungsprognosen hätte zur Folge gehabt, dass eine Lastspitze zur Mittagszeit nicht mit Sicherheit vermieden werden kann.

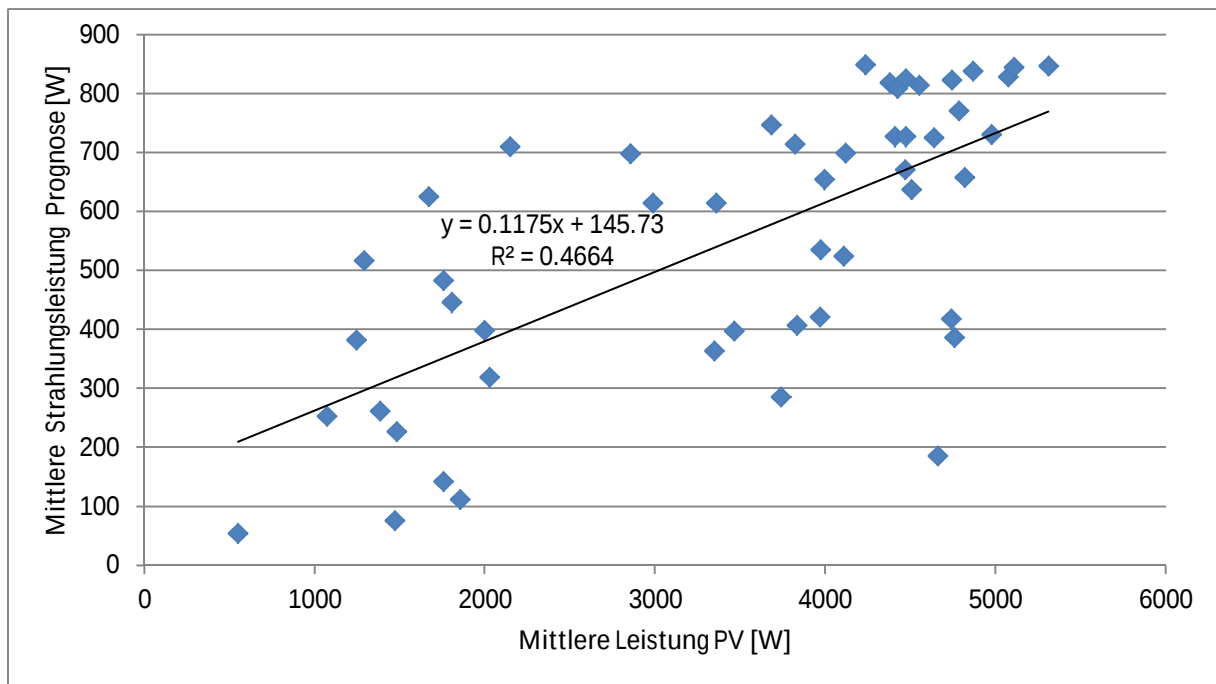


Abbildung 8 *Der Ertrag von Photovoltaikanlagen kann basierend auf Meteodaten prognostiziert werden. Die Prognosen für die Anlage am Institutsgebäude sind mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden. Prognosen für mehrere Anlagen einer Region dürften deutlich bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Werten aufweisen. Die prä-diktive Regelstrategie ist für die Systemgrenze Gebäude mit kleinem thermischem oder elektrischem Speicher schwierig umzusetzen.*

3.2 Resultate Praxisversuch

Der Praxisaufbau und -betrieb des LLM-Systems hat für die Umsetzung von zukünftigen LLM-Systemen relevante Erfahrungen ermöglicht. Weitere, auf Simulationen basierende Arbeiten, werden durch die gewonnenen Erkenntnisse verbessert und ergänzt.

3.2.1 Reduktion der Lastspitzen durch das LLM

Die Resultate des Praxisversuchs zeigen, dass in der Zeit von Juni bis August 2012 durch das LLM eine deutliche Reduktion der Lastspitzen erreicht werden konnte.

Um die unterschiedliche Nutzung des Gebäudes zu berücksichtigen, wurden die Messdaten für Wochentage und Wochenende teilweise getrennt ausgewertet.

Gemessen am Energiebezug des Gebäudes aus dem Versorgungsnetz, der bei mehr als 8 kW Bezugsleistung erfolgte, konnte das LLM die Lastspitzen an Wochentagen um den Faktor 7 reduzieren. An Wochenenden war eine Reduktion der Lastspitzen um den Faktor 10 möglich (Abbildung 9).

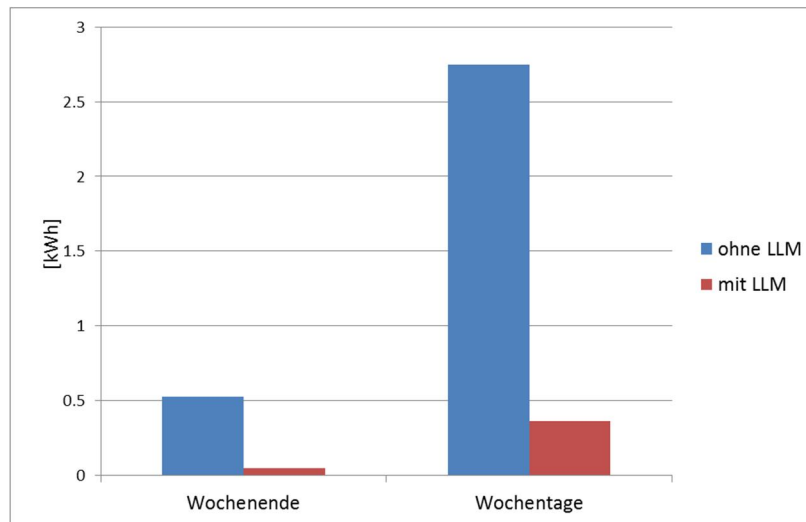


Abbildung 9: Energiebezug aus dem Versorgungsnetz bei mehr als 8 kW Bezugsleistung.

Gemessen an der Zeit, in der mehr als 8 kW Leistung vom Versorgungsnetz bezogen wurde, konnte das LLM die Lastspitzen ebenfalls deutlich reduzieren. Durch den Betrieb des LLM konnten die Lastspitzen an Wochentagen um den Faktor 4 reduziert werden. An Wochenenden war eine Reduktion der Lastspitzen um den Faktor 7 möglich (Abbildung 10).



Abbildung 10: Zeit mit mehr als 8 kW Bezugsleistung aus dem Versorgungsnetz.

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen den zeitlichen Verlauf der Lastüberschreitungen aller gemessenen Tage mit und ohne LLM. Während die Leistungsspitzen an einzelnen Tagen ähnlich hoch sind, werden die Häufigkeit und die Dauer der Leistungsspitzen durch das LLM deutlich reduziert.

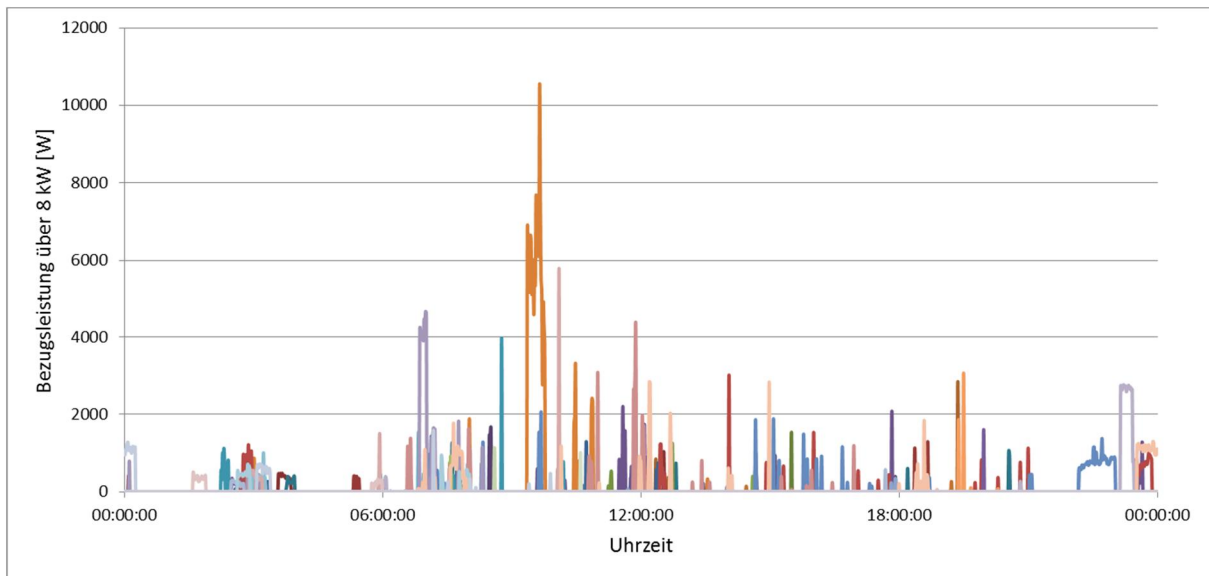


Abbildung 11: Verlauf der Lastüberschreitung (> 8 kW) mit LLM.

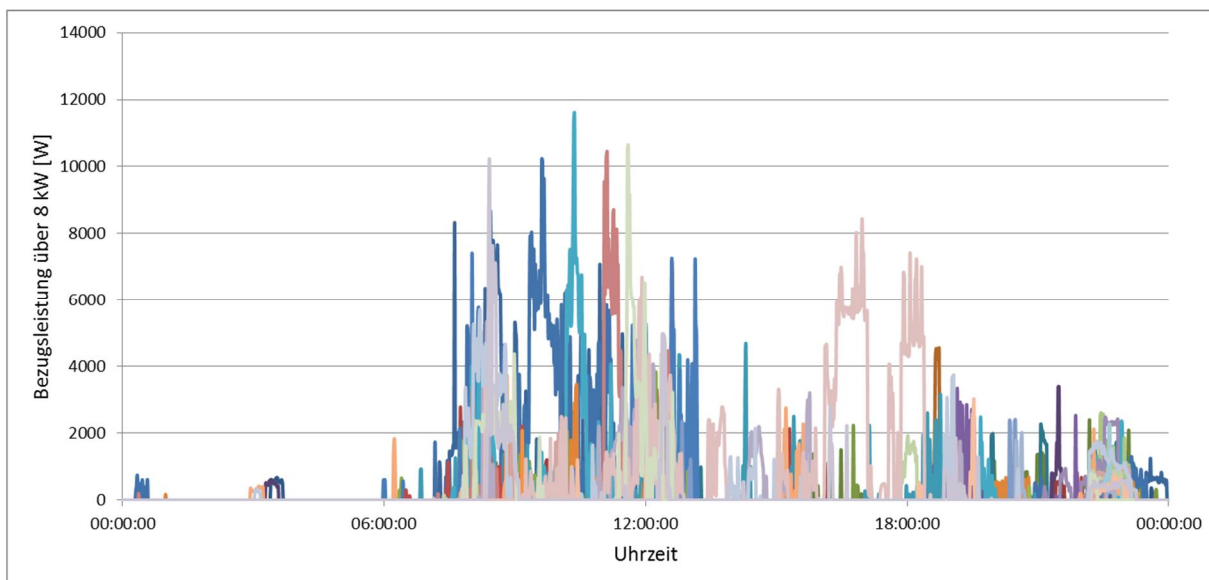


Abbildung 12: Verlauf der Lastüberschreitung (> 8 kW) ohne LLM.

Bei Betrachtung der über alle Messungen gemittelten Werte zeigt sich deutlich, dass das LLM vor allem am Vormittag die Lastspitzen reduziert (Abbildung 13). Zeitgesteuerte Geräte mit hoher Bezugsleistung verursachen ohne LLM bei der Berechnung des Mittelwertes eine deutlich erkennbare Leistungsspitze. So ist um ca. 11:00 in Abbildung 13 der zeitgesteuerte Warmwassererwärmer 2 deutlich erkennbar. Im Betrieb mit LLM ist diese Lastspitze nicht sichtbar, da beim Einschalten des WWE 2 andere Verbraucher blockiert werden.

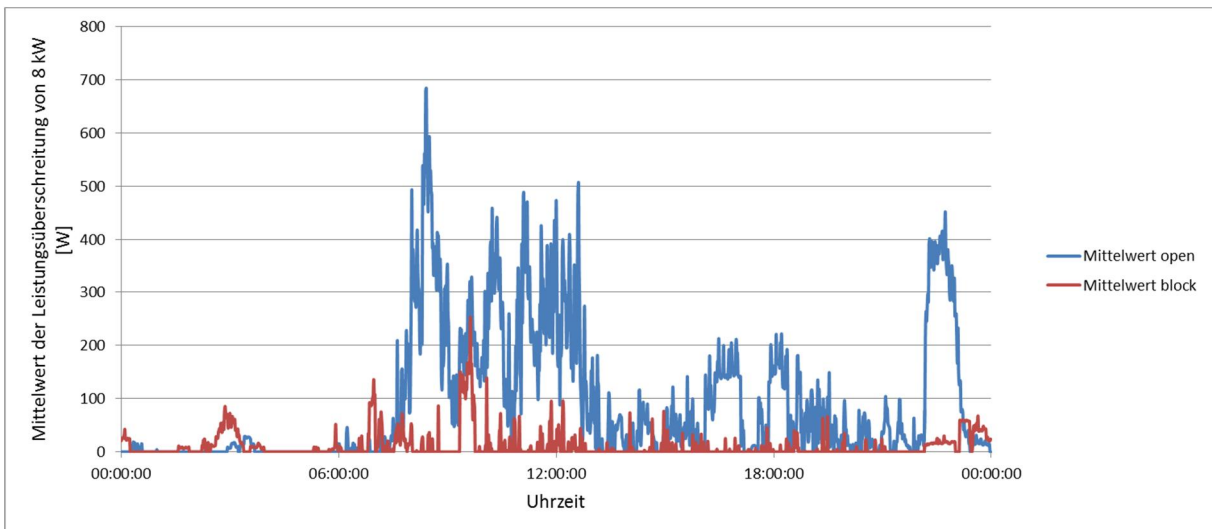


Abbildung 13: Verlauf der Lastüberschreitung mit und ohne LLM, gemittelte Werte über alle Versuchstage.

Anders als erwartet ist keine Abhängigkeit der Lastspitzen vom PV-Ertrag erkennbar (Abbildung 14). In den entscheidenden Vormittagsstunden scheint die Leistung der PV-Anlage zu gering, um die Lastspitzen nur durch die PV-Einspeisung zu reduzieren.

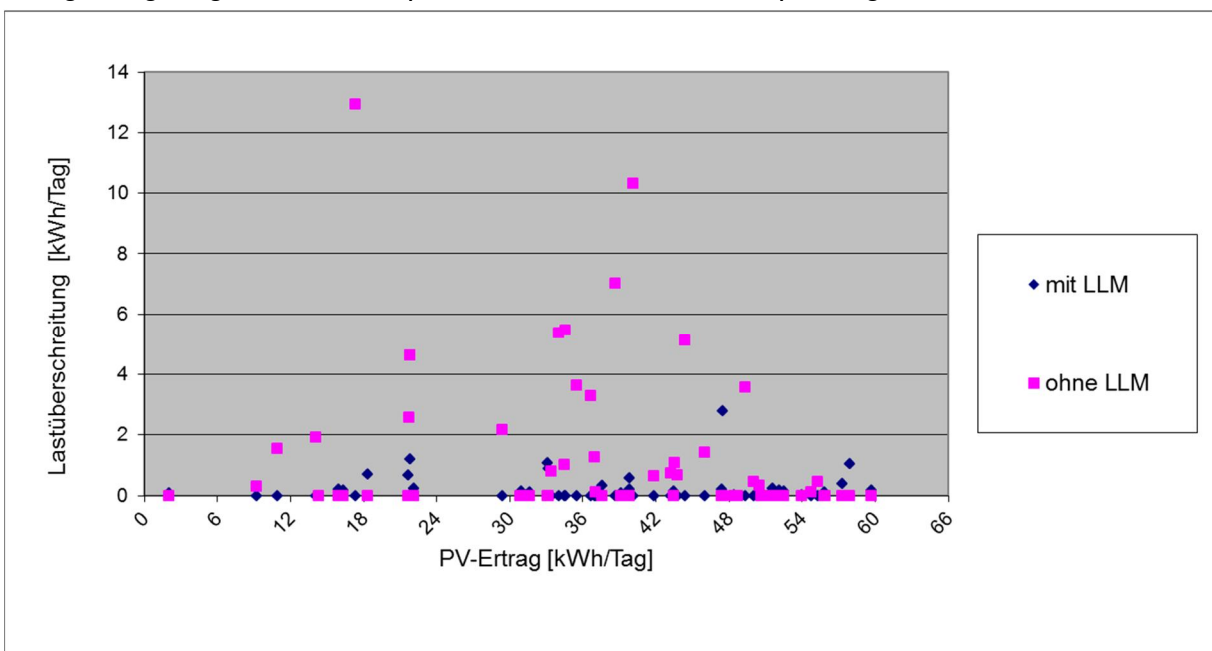


Abbildung 14: Abhängigkeit der Lastüberschreitung vom PV-Ertrag. Der PV-Ertrag hat keinen erkennbaren Einfluss auf die Lastüberschreitung gemessen am Energiebezug bei > 8 kW Bezugsleistung.

Die in Abbildung 15 dargestellte Übersicht der relevanten Verbraucher während eines Tages zeigt deutlich, dass die Lastspitzen des Gebäudes (Nettobezug Gebäude) vor allem vom Betrieb des WWE 1 (Boiler 1) abhängig sind.

In den frühen Morgenstunden wird der WWE 1 aufgeheizt und um ca. 8:00 blockiert. Nach ca. 10:00 liefert die PV-Anlage mehr Strom als das Gebäude aufnimmt. Für die Erhöhung des Eigenstromverbrauchs wird dann der WWE 1 wieder eingeschaltet bis der WWE die Temperaturschwelle von 80°C überschritten hat.

Nach Erreichen der maximalen Boilertemperatur um ca. 13:30 Uhr ist deutlich erkennbar, wie das Gebäude vom Strombezüger zum Stromlieferant wird. Dieser Wechsel entspricht einem schwer prognostizierbaren sprunghaften Wechsel in der Bezugsleistung des Gebäudes. Dies zeigt auch eine weitere Herausforderung in der Ausgestaltung eines zukünftigen LLM. Nicht nur für die Begrenzung der Bezugsleistung, sondern auch in der Begrenzung der Einspeiseleistung müssen noch Lösungen gefunden werden (vgl. Abschnitt 5.2).

Verbraucher wie Elektroautos haben an ausgewählten Tagen einen Einfluss auf die Lastspitzen, zeigen aber im Vergleich mehrerer Tage auf Grund der geringen Anzahl Ladevorgänge kaum eine Beeinflussung des Lastprofils des Gebäudes.

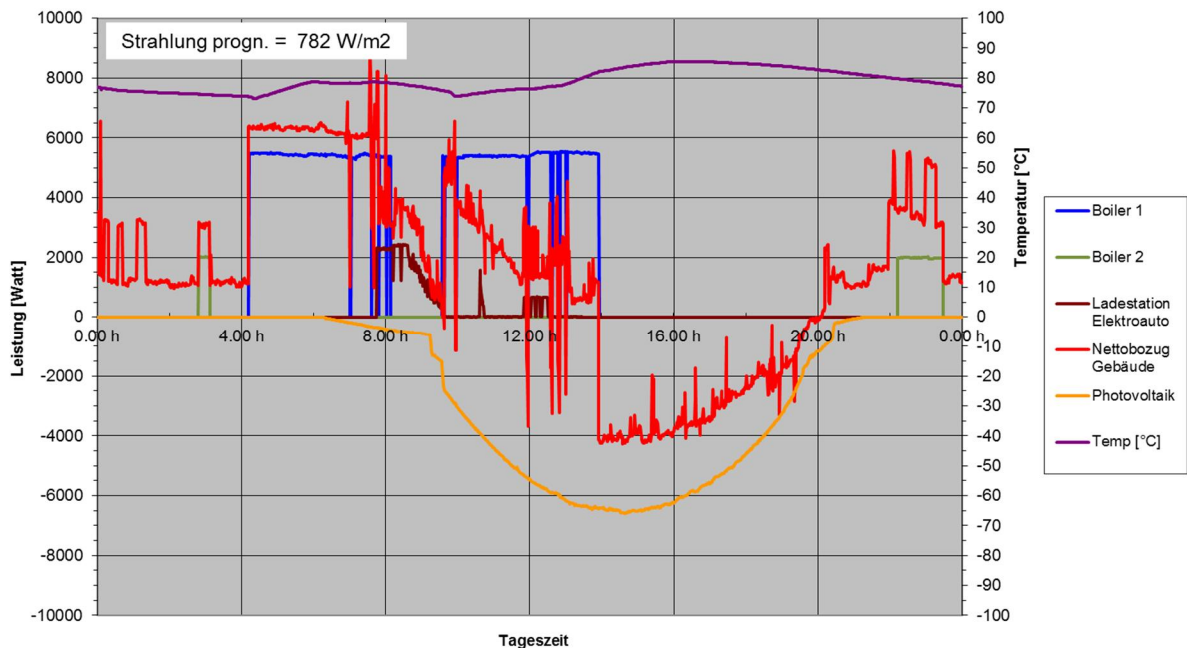


Abbildung 15: Übersicht der relevanten Verbraucher und Erzeuger im LLM während eines Tages.

3.2.2 Erhöhung des Eigenstromverbrauchs durch das LLM

Der Eigenstromverbrauch entspricht demjenigen Anteil des im Gebäude produzierten Stroms (Eigenstrom), der nicht ins Stromnetz eingespeist wird sondern im Gebäude direkt (zeitgleich) verbraucht wird.

Die Schaltalgorithmen im LLM lassen gemäß Abbildung 6 eine erhöhte Temperatur des Warmwassererwärmers zu, falls Strom aus Photovoltaik ins Stromnetz eingespeist würde. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Stromproduktion aus Photovoltaik den Stromverbrauch im Gebäude übersteigt. Im Versuchsgebäude traf diese Situation häufig am Nachmittag ein.

Das zusätzliche Aufheizen des Warmwasserspeichers hatte einen positiven Effekt auf den Eigenstromverbrauch (Abbildung 16 und Abbildung 17). Während der Eigenstromverbrauch am Wochenende auf Grund des niedrigen Verbrauchs im Gebäude deutlich tiefer ausfällt, zeigt sich am Wochenende wie auch an Wochentagen ein deutlich höherer Eigenstromanteil bei eingeschaltetem LLM.

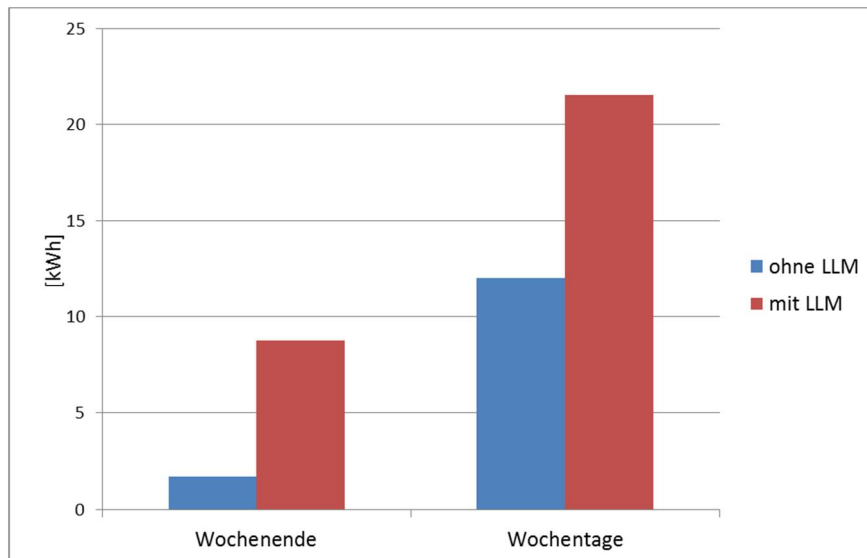


Abbildung 16: *Eigenstromverbrauch am Wochenende und an Wochentagen mit und ohne LLM*

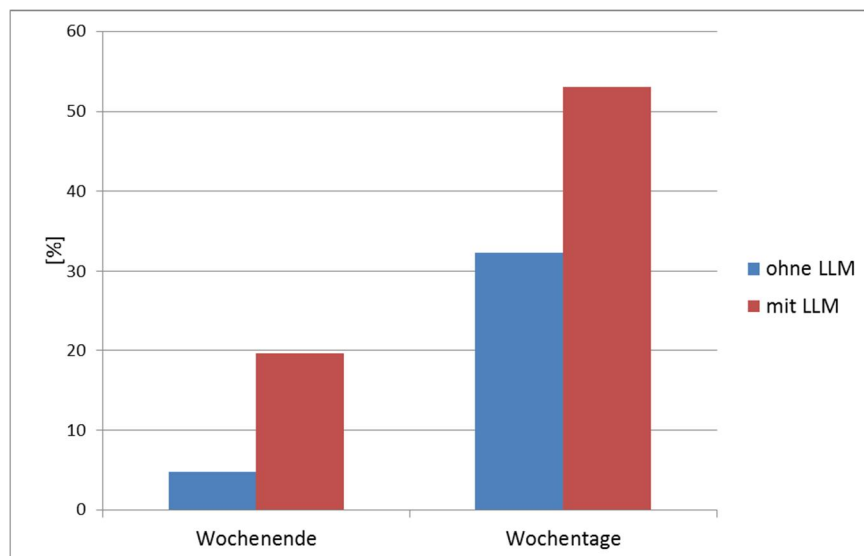


Abbildung 17: *Anteil Eigenstromverbrauch am Wochenende und an Wochentagen bezogen auf die Erträge der Photovoltaikanlage.*

Der Eigenstromanteil ohne LLM von 5% am Wochenende und 32% an Wochentagen entspricht dem zu erwartenden Anteil gemäss Informationsmaterial der MHH Solartechnik [MHH 2012]. Der Eigenstromanteil von über 50% an Wochentagen ist hingegen an der oberen Grenze des zu erwartenden Anteils.

Da der Eigenverbrauch stark vom Lastprofil des Gebäudes und dem Verhältnis der Leistung der PV-Anlage zum Stromverbrauch im Gebäude abhängig ist, können diese Werte nur als grobe Indikatoren verwendet werden. Eine allgemeingültige Aussage, welche Eigenstromanteile bei welcher Kombination aus Verbraucher und PV-Produktion erreicht werden sollte, kann noch nicht gemacht werden.

3.2.3 Auswirkungen der prädiktiven Regelung basierend auf Wetterdaten

Die prädiktive Regelung ist für das Institutsgebäude mit geringer thermischer und ohne elektrischer Speichermöglichkeit schwierig umzusetzen. Die Abweichungen des prognostizierten zum effektiv produzierten Stromertrag am Standort des Institutsgebäudes sind zu gross, um eine prädiktive Regelstrategie mit signifikantem Nutzen für die Reduktion der Lastspitzen einzusetzen (vgl. Abbildung 8).

Auch die Firma meteoblue bestätigt, dass die Abweichungen von Strahlungsprognose zu effektivem Strahlungswert in Abhängigkeit des Standortes bis zu 30% betragen können. Der Standort Langenbruck ist schwierig zu prognostizieren, da im Jura häufig schnell wechselnde Wettersituationen auftreten. Ein Vergleich der Ertragsdaten der PV-Anlage mit den Prognosedaten während eines Jahres würde die Berechnung einer standortspezifischen Korrekturformel erlauben. So könnte die Prognose gemäss Aussagen von meteoblue verbessert werden.

3.2.4 Erfahrungen aus dem praktischen Betrieb

Im praktischen Betrieb des LLM wurden verschiedene Erfahrungen gesammelt, die für die Umsetzung zukünftiger LLM-System von Bedeutung sind:

- **Elektroauto-Ladestation**

Das Erarbeiten einer zufriedenstellenden Lösung für die Einbindung der Elektroauto-Ladestation in ein LLM ist eine grosse Herausforderung. Im vorliegenden Praxisversuch war das Hauptproblem die unterschiedliche Reaktion der Elektroauto auf Unterbrechungen des Ladestromes durch das LLM. Während die meisten Modelle den Ladebetrieb nach einem Stromunterbruch von 60 Minuten wieder aufnehmen, war ein Modell nach dieser Zeit bereits im Standby-Modus und startete den Ladevorgang nicht mehr automatisch.

Auch wurde die Elektroauto-Ladestation als Stromquelle für verschiedene andere Zwecke verwendet (Elektrovelo, Staubsauger, Rasenmäher, Bohrmaschine, etc.). Diese Nutzungsarten müssen vom LLM erkannt und richtig interpretiert werden. Im bestehenden LLM war dies nicht möglich, wodurch unerwünschte Betriebsunterbrüche in den Fremdnutzungen erfolgten.

Wenn die Stromversorgung für die Ladung des Elektroautos im Moment der ersten Verbindung auf Grund des LLM ausgeschaltet ist, gibt es ohne Kommunikation keine Sicherheit, dass nicht ein Defekt vorliegt. Die Verunsicherung des Elektroauto-Besitzers ist dann sehr gross, so dass oft eine andere Lademöglichkeit gesucht wird.

Regelmässig wünschen Elektroautobesitzer eine sofortige Vollladung des Akkumulators. Diesem Wunsch sollte mit einer speziellen Einrichtung entsprochen werden, da andernfalls die Autobesitzer nach einer anderen Lademöglichkeit Ausschau halten.

Obwohl eines der Elektroautos die Möglichkeit hätte, mit einer Leistung von 9 kW zu laden, wurde diese Option nie genutzt (Abbildung 18). Ohne Solareinspeisung hätte die Bezugsleistung auch zum sofortigen Ausschalten der Elektroauto-Ladestation geführt, weil die maximale Bezugsleistung von 8 kW überschritten worden wäre.

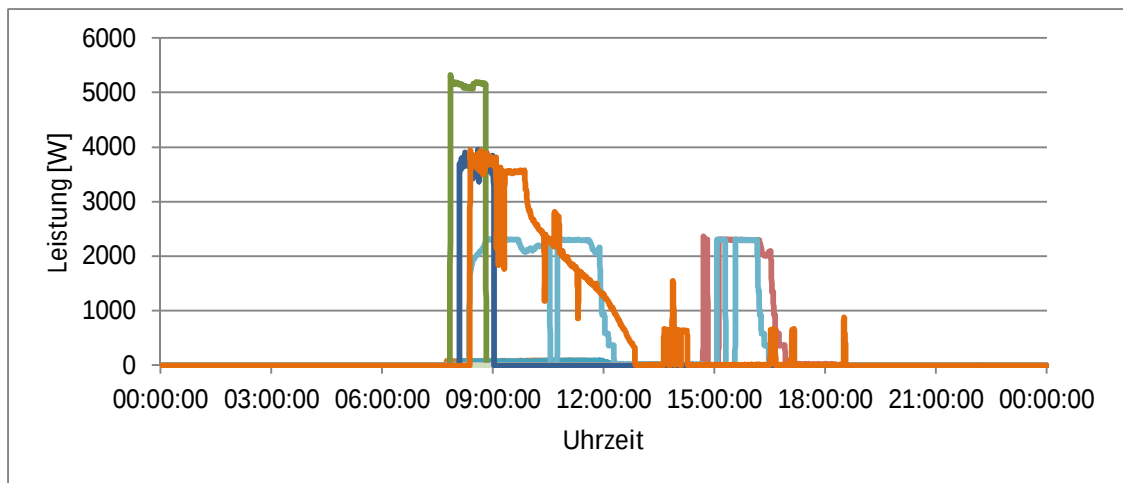


Abbildung 18: Strombezug an der Elektroauto-Ladestation. Zusammenstellung von Tagen mit Ladevorgängen.

Der geringe Einfluss der Elektroautos auf das Lastprofil des Versuchsgebäudes Ökozentrum lässt sich mit der begrenzten Schnelladefähigkeit und den geringen Kapazitäten der geladenen Traktionsakkumulatoren erklären. Einzelne auf dem Markt erhältliche Elektroautos bieten die Möglichkeit einer Schnellladung für Akkumulatoren hoher Kapazität. Dadurch sind Bezugsleistungen über 40 kW möglich. Diese extremen Ladeleistungen sind für ein LLM nicht ohne Komfortverlust für den Benutzer zu kontrollieren, sind aber gleichzeitig eine der Voraussetzungen für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen.

Die beschriebenen Praxiserfahrungen zeigen die Notwendigkeit einer Kommunikation zwischen LMG und Elektroauto. Diese Kommunikation muss die Möglichkeit bieten, dem Autobesitzer immer die letzte Entscheidung zum Lastmanagement mit seinem Fahrzeug zu überlassen.

- **Waschmaschine**

Bei einer Blockierung der Waschmaschine durch Ausschalten der Stromversorgung ist die Bedienung (Programmierung, Türöffnung) nicht mehr möglich. Eine Blockierung sollte daher erst kurz vor dem Waschgang erfolgen. Eine Blockierung während des Waschgangs ist wiederum nicht sinnvoll, da dann das aufgeheizte Waschwasser abkühlen würde und erneut erwärmt werden müsste. Für die effektive Blockierung blieb nur ein sehr kleines Zeitfenster. Der Beitrag der Waschmaschine zum LLM war daher gering.

Für ein effektives Lastmanagement mit Waschmaschinen muss geräteintern eine getrennte Ansteuerung von Bedienoptionen und effektivem Waschgang möglich sein. Eine solche Funktion kann nur durch den Gerätehersteller eingebaut werden.

- **Warmwassererwärmer**

Das erhöhte Temperaturniveau im WWE verursacht leicht höhere Speicherverluste und die Temperaturschwankungen bewirken eine vermehrte Auslösung des Sicherheitsventils. Der durch Fehlfunktionen am Sicherheitsventil (Leckage) verursachte Wasserverlust war während des Betriebs des LLM erhöht.

Wenn der WWE durch das LLM mit starken Temperaturschwankungen belastet wird sind speziell hohe Anforderungen an die Sanitärtechnik gestellt.

- **Tiefkühlgeräte**

Untersuchungen im Rahmen einer Semesterarbeit der Fachhochschule Nordwestschweiz zeigen, dass Veränderungen am Temperaturniveau von Tiefkühlgeräten negative Auswirkungen auf die Effizienz des Kühlsystems haben.

3.2.5 Auswirkungen des LLM auf die Netzqualität

Das Energieversorgungsunternehmen EBL, das Stromlieferant des Ökozentrums ist und als Projektpartner an den Untersuchungen beteiligt war, hat die Auswirkungen des LLM auf die Netzqualität ausführlich untersucht. Eine detaillierte Analyse während 5 Wochen hat ergeben, dass durch das LLM keine ungewöhnlichen Beeinflussungen des Stromnetzes oder Überschreitungen der Grenzwerte verursacht wurden. Als nicht optimal wurde die Verteilung der Last auf die 3 Phasen des Stromnetzes beurteilt, was bei vermehrtem Einsatz von LLM-Systemen negative Auswirkungen auf die Transformatorstationen haben könnte. Die ungleiche Verteilung der Last auf die drei Phasen wird durch den nur mit zwei Phasen angeschlossenen Warmwassererwärmer verursacht. Dieser Punkt sollte in einer zukünftigen Konzeption des LLM vermehrt berücksichtigt werden.

4 Ökonomische Beurteilung von LLM-Systemen im Gebäude

Für die ökonomische Betrachtung werden primär die rein finanziellen Aspekte einbezogen. Zusatznutzen eines LLM wie erhöhter Bedienerkomfort, erhöhter Solarstrom-Eigenverbrauch oder erhöhte Betriebssicherheit durch Monitoring werden nicht betrachtet.

Aus dem Einsatz eines LLM ergeben sich zwei potenzielle Einnahmequellen:

- Durch Abschalten oder Zuschalten von Lasten kann Regelleistung bereitgestellt werden. Diese hilft mit der Stromerzeugung und den Stromverbrauch aufeinander abzustimmen und so das Stromnetz zu stabilisieren. Diese Netzdienstleistung wird vom Betreiber des Stromnetzes vergütet.
- Durch die Verschiebung des Strombezugs von Zeitfenstern mit hohen Strompreisen in Zeitfenster mit tiefen Strompreisen können Energiekosten minimiert werden. Diese Lastverschiebung wird in Form einer tieferen Stromrechnung vergütet.

Grundsätzlich ergänzen sich die genannten Mechanismen von bereitgestellter Regelleistung und Lastverschiebung, da der Strom tendenziell dann günstig ist, wenn zu viel Strom im Netz angeboten wird.

Um die Berechnungen transparent und einfach zu halten, wurden in diesem Bericht stark vereinfachte Annahmen getroffen, die aber klar die Grössenordnungen für die ökonomische Beurteilung aufzeigen.

4.1 Kategorisierung der im LLM angesteuerten Verbraucher

Basierend auf den Erfahrungen aus dem vorliegenden Projekt können Geräte im Haushalt für die ökonomische Beurteilung in zwei Kategorien eingeteilt werden. Auf Grund des Energieverbrauchs können Geräte in die Kategorie Kleinverbraucher oder in die Kategorie Grossverbraucher eingeteilt werden.

Kleinverbraucher

Kleinverbraucher im Gebäude sind Geräte, deren Energieverbrauch pro Gerät im Jahresdurchschnitt nicht mehr als 10% des Gebäude-Energieverbrauchs einnimmt (vgl. Abbildung 2). Zur Kategorie Kleinverbraucher gehören Tiefkühlgeräte, Kühlschränke, Waschmaschinen, etc..

Die schaltbaren Lasten pro Gerät und somit der finanzielle Anreiz durch das Bereitstellen von Regelleistung oder durch Strombezug in Zeiten mit tiefem Strompreis bleibt aber für die Systemgrenze Gebäude auf tiefem Niveau.

Grossverbraucher

Grossverbraucher sind Geräte, die pro Gerät mehr als 10% des Jahresenergiebedarfs im Gebäude verbrauchen. Dies sind in der Regel Heizungen (Wärmepumpe), Warmwassererwärmer (Elektroboiler oder Wärmepumpe) und Elektrofahrzeuge.

Wärmepumpen für die Gebäudeheizung und die Warmwassererwärmung sowie Elektroboiler haben grosses Potenzial, um Regelleistung bereitzustellen oder den Energieverbrauch in Zeitfenstern mit tiefen Strompreisen zu verlegen. Bei entsprechender Vermarktung sind hier theoretisch rentable Geschäftsmodelle möglich. Die genannten Verbraucher werden aber in der Schweiz bereits heute teilweise durch die Rundsteuersignale des Energieversorgers geschaltet. Ein zusätzlicher Nutzen durch die Installation eines LLM ist aus Sicht der Energieversorger daher in vielen Fällen nicht gegeben. Für die Installation eines LLM besteht daher in Gebäuden, in denen die Grossverbraucher bereits über die Rundsteuerung angesteuert werden, kaum finanzieller Anreiz.

Ladestationen für Elektroautos sind heute noch nicht in die Rundsteuerung integriert. Mit der zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen ist eine Ansteuerung der Ladestationen aus Sicht des Energieversorgers wünschenswert oder sogar zwingend.

4.2 Verkauf von Regelleistung und Einsparungen durch Lastverschiebungen

Die Berechnungen für die möglichen Vergütungen aus dem Verkauf von Regelleistung und aus den Preisvorteilen durch eine Verschiebung des Energiebezugs in Zeiten mit tiefen Strompreisen (Lastverschiebung) sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 ersichtlich.

Vergütung durch Regelleistung

Berechnungsgrundlagen:

- Keine Differenzierung nach Primär-, Sekundär und Tertiärregelleistung.
- Keine Differenzierung nach positiver/negativer Regelleistung.
- Preis für Regelenergie CHF 30.-/MW/h [Swissgrid, 2012]:
Die Preise für Regelleistung weisen starke Schwankungen auf. Der gewählte Ansatz von 30 CHF/MW/h ist als Richtpreis gewählt. Es können während einzelner Monaten Preise für Regelleistung erzielt werden, die um den Faktor 2 höher liegen.
- Um am aktuellen Regelleistungsmarkt mit einer Mindestgebotsmenge von 5 MW (Sekundärregelung) mitbieten zu können, müssten mehrere zehntausend Gebäude gemeinsam koordiniert ein Angebot abgeben.

Gerät	Elektrische Bezugsleistung [kW]	Gleichzeitigkeitsfaktor	Vergütung [CHF/Jahr]
Kühlschrank	0.065	0.125	2.1
Gefrierschrank	0.060	0.4	6.3
Waschmaschine	4.5	0.004	4.7
Elektroboiler	5.5	0.5	722.7
Elektrofahrzeug	2.7	0.05	35.5

Tabelle 1: Finanzielle Vergütung durch den Verkauf von Regelleistung; aufgelistet für einzelne Geräte.

In Tabelle 1 ist der Unterschied in der finanziellen Vergütung zwischen Klein- und Grossverbrauchern deutlich sichtbar. Während Kleinverbraucher eine jährliche Vergütung von unter CHF 10.- ermöglichen, liegt bei Grossverbrauchern die mögliche Vergütung um knapp einen Faktor 10 darüber.

Der Elektroboiler des Institutsgebäudes ist auf Grund des hohen Wasserverbrauchs und der mit erheblichen Verlusten behafteten Zirkulationsleitung eine grosse installierte elektrische Leistung mit vielen Betriebsstunden. Dadurch fällt die Vergütung für den Verkauf von Regelleistung entsprechend hoch aus. Auch hier gilt es zu bedenken, dass derartige Geräte in der Regel bereits heute vom Energieversorger gesteuert werden. Eine zusätzliche finanzielle Vergütung durch ein LLM ist daher in der Praxis oft nicht möglich.

Einsparungen durch Lastverschiebung

Berechnungsgrundlagen:

- Preisdifferenz zwischen Hoch-und Tiefpreiszeitfenstern CHF 0.1/kWh

Die Preisdifferenz von CHF 0.1/kWh wird auch in Zukunft kaum übermässig ansteigen. Die Preise für über kurze Zeit gespeicherte Energie begrenzen die genannte Preisdifferenz auf voraussichtlich unter CHF 0.2/kWh.

- Die steuerbaren Zyklen pro Tag beruhen auf Annahmen der Autoren

Gerät	Energie pro Zyklus [kWh]	Steuerbare Zyklen pro Tag	Vergütung [CHF/Jahr]
Kühlschrank	0.013	2	0.95
Gefrierschrank	0.023	2	1.70
Waschmaschine	1.5	0.3	16.40
Elektroboiler	11	4	1606
Elektrofahrzeug	3.4	1	124.1

Tabelle 2: *Finanzielle Einsparungen durch eine Verschiebung des Bezugszeitpunktes von Energie in Zeitfenster mit tiefen Strompreisen; aufgelistet für einzelne Geräte.*

Auch in Tabelle 2 zeigt sich ein klarer Unterschied zwischen Klein- und Grossverbrauchern bei den jährlich möglichen Kosteneinsparungen. Während die jährlichen Kosteneinsparungen der Kleinverbraucher deutlich unter CHF 100.- liegen, kann bei Grossverbrauchern mit Kosteneinsparungen deutlich über CHF 100.-/Jahr gerechnet werden. Die berechneten Einsparungen sind exemplarisch für die Geräte am Ökozentrum, können aber ohne grosse Veränderungen auf andere Verbraucher des entsprechenden Typs angewendet werden.

Es gilt zu bedenken, dass Grossverbraucher bereits heute in der Regel zu Zeiten mit günstigem Stromtarif (Niedertarif) eingeschaltet sind. Für diese Verbraucher lässt sich auch bei schneller ändernden Strompreisen keine zusätzliche finanzielle Einsparung erzielen. Bis zu einer Intervallzeit der Steuersignale von ca. 15 Minuten kann die heutige Rundsteuerung weiter verwendet werden. Für deutlich kürzere Intervallzeiten muss die Rundsteuertechnik erneuert oder eine andere Kommunikation eingesetzt werden.

Da die Zeitfenster für Hoch- oder Niedertarif des Stroms nicht exakt auf mehrere Stunden prognostizierbar sind, ist auch eine optimale Ausnützung der maximalen Preisdifferenzen nicht immer möglich. Der Entscheid, wann ein Elektrofahrzeug geladen oder die Waschmaschine angeschaltet wird, wird auch vom Zeitpunkt beeinflusst an dem die Aufgabe abgeschlossen sein muss. Ein Algorithmus muss daher entscheiden, wann der Befehl für die Erledigung der Aufgabe erfolgen soll, ohne genau zu wissen ob es nicht doch noch einen aus finanzieller Sicht besseren Zeitpunkt geben wird. Die Optimierung der Algorithmen mit schneller Rückmeldung über den aktuellen Strompreis bietet auch die Gefahr, dass sich das System destabilisiert (Aufschaukeln).

Speziell bei Besitzern von Elektroautos ist die Bereitschaft, die maximale mögliche Reichweite temporär zu reduzieren sehr klein. Das Bedürfnis nach einer sofortigen Ladung eines leeren Akkumulators ist äusserst gross [Niesse A., 2012]. Es ist daher fraglich, ob wie angenommen, alle Ladezyklen von Elektrofahrzeugen in Zeitfenster mit tiefen Strompreisen verschoben werden können.

4.3 Kosten für Installation, Betrieb, Unterhalt und Rechnungswesen

4.3.1 Installationskosten

Die Kosten für die Installation von LLM-Systemen weisen eine sehr grosse Bandbreite auf. Während die Zusatzkosten für die LLM-fähigen Geräte theoretisch gering sind, zeigt sich heute oft die Situation, dass derartige Funktionen nur im Premium-Segment angeboten werden. Die breite Masse an Weisswarengeräten verfügt noch nicht über Schnittstellen zur Ansteuerung der Geräte. LLM-fähige Geräte sind aktuell deshalb teurer, weil ein grundsätzlich teureres Gerät mit LLM-Funktion eingekauft werden muss.

Die Installation der Kommunikation zwischen zentraler Steuerung (LMH) und Gerät (LMG), kann über verschiedene Wege erfolgen. Wenn in einem Neubau bereits bei der Planung zusätzliche Leerrohre vorgesehen werden oder wenn ein Funksystem vorhanden ist, wird die Installation der Kommunikation günstig. Wenn nachträglich Kommunikationskabel verlegt werden müssen, kann die Installation sehr teuer werden.

Die Hardware des LLM (LMH und LMG) kann bei einfachen Voraussetzungen günstig installiert werden. Die Programmierung der Algorithmen ist hingegen in der Regel sehr aufwändig, da für die meisten Installationen noch keine fertigen Algorithmen verwendet werden können. In Abhängigkeit vom Gebäudetyp, Lastprofil, Kundenwunsch und Vorgabe des EW muss die Programmierung individuell angepasst werden und ist daher entsprechend kostenintensiv.

Erfahrungen zu den Kosten für die Installation eines Lastmanagement-Systems im Neubau werden zurzeit in einem vom BFE unterstützten Projekt am Kirchrainweg in Kriens gesammelt.

4.3.2 Kosten für Betrieb und Unterhalt

Die Kosten für den Betrieb und Unterhalt eines LLM im Gebäude sind im Normalbetrieb gering. Die Kosten für die übergeordnete Kommunikation und Steuerung, welche die Schaltvorgänge der einzelnen Geräte mit den Anforderungen des Stromnetzes koordiniert, sind nur schwer abschätzbar. Es ist zu befürchten dass diese Kosten im Vergleich zu den möglichen Einnahmen sehr hoch ausfallen.

4.3.3 Kosten im Fehlerfall

Bei einem Fehler im LLM-System oder in der übergeordneten Kommunikation und Steuerung ist der potenzielle Schaden gross. Speziell der Tiefkühlschrank kann durch ungewolltes Auftauen hohe Kosten durch die verdorbene Tiefkühlware verursachen. Eine Fehlschaltung, die durch das LLM verursacht wurde, kann in der Schadenssumme die gesamten potenziellen Gewinne in 20 Jahren Betriebsdauer übersteigen. Die Installation eines LLM darf die Verfügbarkeit des Geräts nicht oder nur minim beeinträchtigen. Mit einer Integration der LLM-Funktionalität durch den Gerätehersteller lässt sich die Verfügbarkeit der Einheit aus Gerät und LLM hoch halten. Die Installation eines LLM als Zusatz ist für die Verfügbarkeit immer die ungünstigere Lösung.

Auch die Kosten für die Fehlersuche bei Fehlfunktionen sind hoch, da nicht immer sofort klar sein dürfte wo die Ursache für den Fehler zu suchen ist. Ein Fehler kann das Gerät selbst betreffen, wodurch die Herstellerfirma des Gerätes zuständig ist. Auch der Schaltbefehl des LLM kann Ursache eines Fehlers sein, wodurch die für das Gebäudeleitsystem zuständige Firma verantwortlich ist. Auch ein Fehler in der übergeordneten Kommunikation und Steuerung ist möglich, wodurch der Energieversorger/Netzbetreiber verantwortlich wird. Die Suche nach einem nicht eindeutig identifizierbaren Fehler dürfte durch die Aktivierung der verschiedenen involvierten Akteure finanziell sehr teuer werden. Die Erarbeitung von

Geschäftsmodellen, die die Verantwortlichkeiten und Kostenverteilung im Fehlerfall eindeutig regelt, ist eine grosse Herausforderung für zukünftige LLM-Installationen.

4.3.4 Abrechnung von Netzdienstleistungen des Gebäudes

Falls das Gebäude im Verbund Systemdienstleistungen für das Stromnetz verkauft, müssen diese Einnahmen je nach Geschäftsmodell entsprechend der Leistungen individuell auf Ebene Gebäude abgerechnet werden. Der Anbieter dieser aus vielen Gebäuden koordinierten Systemdienstleistung muss somit den Beitrag der einzelnen Gebäude erfassen und entsprechend vergüten. Das für ein auf Gebäudeebene notwendige Controlling und Rechnungswesen dürfte mit erheblichen Kosten verbunden sein. Dadurch würden die durch ein LLM möglichen Vergütungen deutlich reduziert. Eine Pauschalvergütung ähnlich dem Zähler-Grundtarif könnte die Kosten für die Abrechnung reduzieren. Zu überlegen wäre deshalb, ob eine Pauschalvergütung (ähnlich dem Zähler-Grundtarif) sinnvoll wäre.

4.4 Effizienzsteigerung durch Monitoring

Da ein LLM immer auf eine Überwachung der angeschlossenen Verbraucher und Erzeuger angewiesen ist, kann deren korrekte Funktion permanent überprüft werden. Durch das permanenten Monitoring werden Energieverluste der einzelnen Geräte in kurzer Zeit registriert und können mit Hilfe der Datenaufzeichnung effizient behoben werden.

Auflistung der Geräte und des entsprechenden Nutzen durch Monitoring:

Warmwassererwärmung (Elektroeinsatz)

- Erhöhter Energieverbrauch zeigt Verluste der Warmwasserverteilung.
- Bei in den Kreislauf integrierten solarthermischen Anlagen kann deren Energieertrag abgeschätzt werden.
- Zeitlich differenzierte Messdaten zeigen den Energieverbrauch von Warmwasser-Zirkulationsleitungen und erlauben eine Optimierung der Betriebszeiten.

Warmwassererwärmung (Wärmepumpe)

- Erhöhter Energieverbrauch zeigt Verluste der Warmwasserverteilung oder Fehlfunktionen der WP an.
- Bei in den Kreislauf integrierten solarthermischen Anlagen kann deren Energieertrag abgeschätzt werden.
- Zeitlich differenzierte Messdaten zeigen den Energieverbrauch von Warmwasser-Zirkulationsleitungen und erlauben eine Optimierung der Betriebszeiten.
- Im Zusammenspiel mit Temperaturdaten kann die Effizienz der Wärmepumpe kontrolliert werden.
- Leistungsdaten geben Auskunft über den Zustand des WP-Kompressors.

Ladestation für Elektrofahrzeuge

- Kontrolle des Energieverbrauchs.

Waschmaschine

- Erhöhte Leistungsaufnahme zeigt defekte Lagerung der Trommel und blockierte oder verstopfte Wasserpumpen.

Gefrierschrank

- Erhöhte Leistungsaufnahme zeigt defektes oder alterndes Kühlsystem.
- Erhöhter Energieverbrauch zeigt offene Türen, Wärmebrücken in der Isolation oder Vereisung.

Kühlschrank

- Erhöhte Leistungsaufnahme zeigt defektes oder alterndes Kühlsystem.
- Erhöhter Energieverbrauch zeigt offene Türen oder Wärmebrücken in der Isolation

Neben einem Monitoring für die einzelnen Geräte ist vor allem auch der Stromverbrauch des gesamten Gebäudes im zeitlichen Verlauf interessant. Regelmässig auftretende Strom-Bezugsspitzen können untersucht werden und Geräte mit hohem Stand-by Stromverbrauch werden identifiziert. Eine einfache Visualisierung der aktuellen Bezugsleistung des Gebäudes inklusive Datenspeicherung kann in der Regel kostengünstig installiert werden. Durch diese Massnahmen findet eine Effizienzsteigerung im Gebäude und gleichzeitig eine Sensibilisierung auf das Thema Stromverbrauch statt.

5 Ergänzende Optionen zur Integration von erneuerbaren Energien im Stromnetz

Im Verlauf des Projektes wurden neben dem lokalen Lastmanagement auch verschiedene zusätzliche Optionen zur Unterstützung der Integration von fluktuierenden erneuerbaren Energien im Stromnetz betrachtet. Diese Optionen sind thematisch eng mit dem im Bericht bearbeiteten LLM verknüpft. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über mögliche ergänzende Optionen zum LLM präsentiert.

Ergänzende Optionen für die Bereitstellung von Regelleistung und für die Lastverschiebung sind intensiv zu prüfen. Neben der rein finanziellen Beurteilung muss das Komfortbedürfnis des Endverbrauchers/Nutzers beachtet werden. Die Bereitschaft, für eine uneingeschränkte Stromversorgung ohne Fremdkontrolle durch ein Lastmanagement einen Zusatzbetrag zu bezahlen, scheint heute durchaus gegeben. Dadurch würde das Problem aus dem Gebäude ausgelagert und externen Anbietern (EVUs, Netzbetreibern, usw.) überlassen. Dies könnte Lösungsansätze wie Stromspeicherung in Batterien oder Wirkleistungsreduktion von Photovoltaikanlagen favorisieren, die ohne jegliche Komforteinbusse funktionieren.

5.1 Stromspeicher

5.1.1 Ausgleichsenergie und Netzentlastung

Die betrachteten Geräte im Haushalt wie Warmwassererwärmer und Wärmepumpenheizung sind in der Lage, Stromüberschuss durch eine forcierte Zuschaltung direkt in Form von Wärme zu speichern. Die Möglichkeit der direkten Stromspeicherung bieten chemische Speicher wie Akkus.

Stromspeicher helfen mit, das Gleichgewicht zwischen Stromproduktion und Stromverbrauch sicher zu stellen. Im Zusammenspiel mit unregelmässig anfallendem Strom aus Photovoltaik und Windkraft kann so eine gleichmässige Stromversorgung auf Basis unregelmässig anfallender erneuerbarer Energien erfolgen. Ein Lastmanagement-System kann dadurch teilweise ersetzt werden, da Verbraucher durch den Einsatz von Stromspeichern nicht mehr auf Gleichzeitigkeit mit der Stromerzeugung angesteuert werden müssen.

Der Standort der Stromspeicher entscheidet über deren Einsatzmöglichkeiten bei der Entlastung des Strom-Übertragungsnetzes. Zentrale Stromspeicher (Pumpspeicherwerke, Druckluftspeicher) können im Rahmen ihrer Kapazität bzw. Leistung Strom aufnehmen und bei Bedarf wieder abgeben. Grosse zentrale Speicher können hingegen kaum einen Beitrag leisten, um lokale und regionale Strom-Übertragungsnetze zu entlasten. Ein LLM hingegen hat die Möglichkeit, das lokale und regionale Strom-Übertragungsnetz zu entlasten.

Auch dezentral aufgestellte Stromspeicher (Akkumulatoren) haben die Möglichkeit, das lokale und regionale Strom-Übertragungsnetz zu entlasten. Diese sind somit eine direkte Alternative zum LLM. Für die dezentrale Stromspeicherung werden heute praktisch ausschliesslich Akkumulatoren verwendet.

5.1.2 Wirtschaftlichkeit von Strom-Akkumulatoren im Wohnhaus

Die Kosten für Stromspeicherung auf der Basis von Akkumulatorsystemen liegen aktuell zwischen CHF 0.3/kWh und CHF 0.15/kWh [Enertrag, 2012; Linder S., 2012] und dürften weiter sinken. Die Technologien für Akkumulatoren inklusive Einspeisemanagement/ Lastmanagement auf Ebene Wohnhaus oder im lokalen und regionalen Versorgungsnetz sind heute kommerziell erhältlich [SMA, 2012; EKZ, 2012], jedoch noch wenig erprobt.

Die Kosten für Stromspeicherung liegen aktuell noch über der Preisdifferenz von Hoch- und Niedertarif des Strombezugs. Dadurch sind Stromspeicher im Wohnhaus heute noch nicht wirtschaftlich.

Falls in Zukunft auf Grund von Engpässen im Strom-Übertragungsnetz Photovoltaikanlagen in der Einspeiseleistung begrenzt werden (Wirkleistungsreduktion), sind dezentrale Speicher bei den aktuellen Stromgestehungskosten aus Photovoltaik knapp wirtschaftlich. Die Wirtschaftlichkeit ist gegeben, falls die Stromgestehungskosten aus Photovoltaik über den Kosten für die Stromspeicherung liegen. Diese Situation ist bei kleinen PV-Anlagen eher gegeben als bei grossen PV-Anlagen.

Das Rechnungswesen wird durch den Einsatz von Akkumulatoren deutlich vereinfacht. An Stelle von mehreren kleinen Einheiten auf Geräteebeane muss nur eine zentrale Stelle mit Akkumulator erfasst werden. Sämtliche vom Akkumulatorsystem erbrachten Dienstleistungen werden erfasst und abgerechnet. Diese Abrechnungsart ist deutlich kostengünstiger als das Verrechnen von Dienstleistungen einzelner Geräte. Ebenso beschränkt sich Wartung und Unterhalt im Falle von Akkumulatoren auf eine zentrale Einheit. Der Komfort eines LLM mit Akkuspeichern ist sehr hoch. Einschränkungen für den Nutzer sind keine vorhanden. Auch Fragen zum Datenschutz sind bei Akkuspeichern kaum tangiert, da nicht über einzelne Geräte eine Aussage getroffen werden kann.

5.1.3 Die Wasserbatterie als indirekter Stromspeicher

Die Speicherung von Strom kann auch indirekt in Form von Warmwasser erfolgen, wie dies im vorliegenden Projekt gezeigt wurde. So kann bei Elektroeinsätzen oder Wärmepumpen zur Warmwassererwärmung mit einem Speicher die Strom-Leistungsaufnahme zeitlich unabhängig vom Wärme-Leistungsbedarf erfolgen. Ein Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 1000 l kann je nach Temperaturniveau ca. 40 – 60 kWh Wärmeenergie aufnehmen. Wird diese Energie mit einer Kombination aus PV-Anlage und Wärmepumpe erzeugt, kann theoretisch die gesamte Tagesenergie einer PV-Anlage mit 3 kWp (ca. 20 m²) in Form von Wärme gespeichert werden. Allerdings ist im Sommer die Speicherung durchschnittlich auf den Brauchwarmwasserverbrauch begrenzt, sofern nicht Saisonspeicher für die Heizung eingesetzt werden.

Mit der Umstellung der Heizsysteme von fossiler Energie auf Elektrizität, wird die indirekte Stromspeicherung an Bedeutung gewinnen, da diese Form der Stromspeicherung deutlich wirtschaftlicher ist als Akkuspeicher.

5.2 Wirkleistungsreduktion von Photovoltaikanlagen

Neben der Stromspeicherung ist auch die Wirkleistungsreduktion bei PV-Anlagen eine preisgünstige Option um Energieüberschuss zu vermeiden. Abbildung 19 zeigt am Beispiel der institutseigenen PV-Anlage den Energieertrag pro Jahr bei einer Begrenzung der Wirkleistung am Wechselrichter. Die Ertragsverluste der Jahresbilanz liegen weit unter der eingestellten Wirkleistungsbegrenzung.

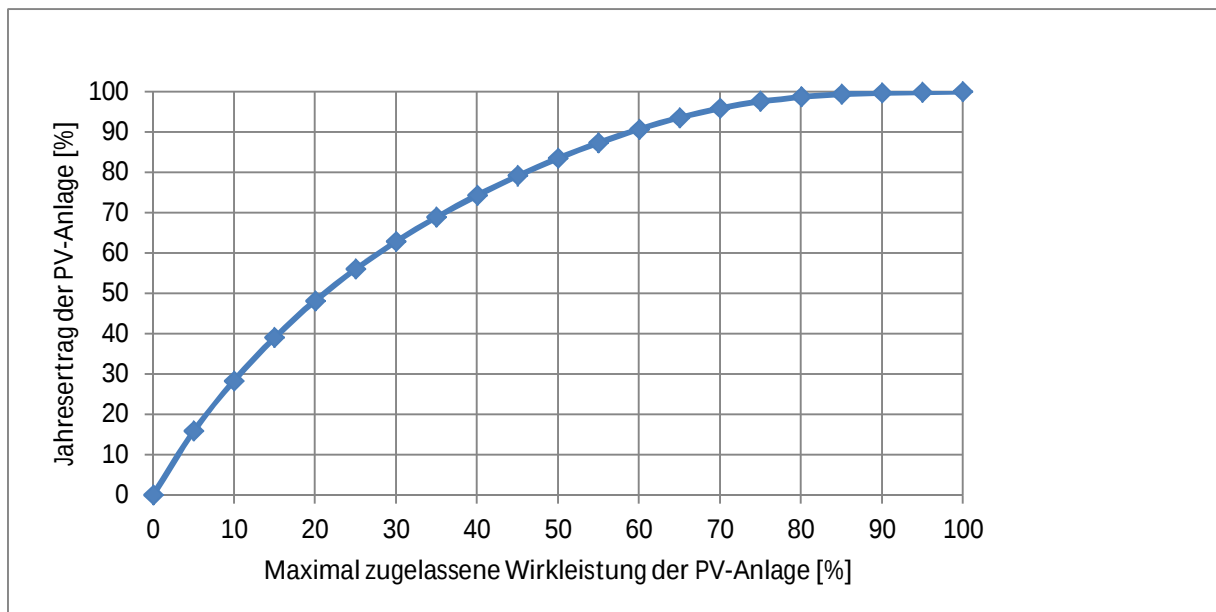


Abbildung 19 Die Reduktion der Wirkleistung bei PV-Anlagen kann Einspeisespitzen verhindern ohne relevante Ertragseinbussen hinzunehmen. Wird die Einspeiseleistung der PV-Anlage durch den Wechselrichter z.B. auf 70% begrenzt, beträgt der Ertragsverlust in der Jahresbilanz weniger als 5%. In der Praxis könnte eine Leistungsbegrenzung angepasst erfolgen, wodurch der Ertragsverlust weiter verringert wird.

Die Reduktion der Wirkleistung an einzelnen Tagen mit hoher Stromproduktion aus Photovoltaik oder zur Netzstabilisierung im Störfall ist mit geringen Ertragsverlusten in der Jahresbilanz möglich. Dennoch liegt der Preis für negative Regelleistung aus Wirkleistungsreduktion von PV-Anlagen noch über dem heutigen Marktpreis für Regelleistung [Swissgrid, 2012]. Der Preis für Regelleistung ist bei der Photovoltaik direkt mit einer Reduktion des Energieertrages verbunden. Für den Betreiber einer PV-Anlage wird die Wirkleistungsreduktion erst dann wirtschaftlich, wenn die Preise für Regelenergie (CHF/kW/h) auf das Niveau der Stromgestehungskosten (CHF/kWh) für Photovoltaik steigen.

Bei Situationen, in denen eine Verstärkung des Stromnetzes auf Grund des Anschlusses einer PV-Anlage notwendig wäre, ist die Wirkleistungsreduktion oft die günstigere Alternative. Die Wirkleistungsreduktion ist somit günstiges Lastmanagement, wenn das Ziel eine Entlastung eines Stromnetzes an der Kapazitätsgrenze ist. Für einen wirtschaftlichen Netzausbau muss die Möglichkeit der Wirkleistungsreduktion als alternative ins Auge gefasst werden.

5.3 Stromgeführte WKK-Anlagen

Der Einsatz von Wärme-Kraft-Koppelungsanlagen kann einen wesentlichen Beitrag zur Glättung des Bezugsprofils eines Gebäudes beitragen. Speziell die Option einer stromgeführten WKK-Anlage mit Wärmespeicher ist die ideale Kombination um einerseits den erhöhten Strombedarf im solarstrahlungsarmen Winterhalbjahr und andererseits Bezugsspitzen beispielsweise durch Elektroautos auszugleichen.

Da die Abwärmeleistung einer WKK-Anlage noch immer um den Faktor 2-5 über der Stromleistung liegt, sind WKK-Anlagen aktuell nur für Gebäude mit genügend grossem Heizwärmebedarf oder genügend grossem Warmwasserbedarf interessant. Einfamilienhäuser mit Energiestandard Minergie-P oder -A sind für den Einsatz der heute verfügbaren WKK-Anlagen nicht geeignet.

Zu Beginn des vorliegenden Projektes wurde für den Praxisversuch eine WKK-Anlage mit Pellet-Brennstoff der Firma Sunmachine ins LLM eingebunden. Leider war die

Standfestigkeit der Maschine ungenügend, so dass für den weiteren Projektverlauf der Fokus auf die Einbindung der PV-Anlage gelegt wurde.

Eine aktuelle Übersicht verschiedener WKK-Anlagen im kleinen Leistungsbereich bietet der Bericht Gebäudeintegrierte Polyvalente Energiebereitstellung [Gaegauf et al. 2012].

6 Fazit

Auch wenn die Entwicklung der Strompreise und die technischen Möglichkeiten noch nicht bis 2020 prognostiziert werden können, lässt sich bereits heute klar erkennen, dass zukünftig das Gebäude einen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen muss.

Da die Umsetzung von Systemen des Lastmanagements im Gebäude deutlich schneller starten kann als der Ausbau von Grossspeichern oder Starkstrom-Übertragungsleitungen, ist das Gebäude ein wichtiger Baustein der zukünftigen Energieversorgung mit erneuerbaren Energien mit raschem Umsetzungspotenzial.

Das installierte LLM-System im Institutsgebäude bewirkte eine deutliche Reduktion der Bezugs-Lastspitzen. Es konnte gezeigt werden, dass das Gebäude ohne Komfortverlust sein Strom-Bezugsprofil anpassen kann.

Die Vorteile der erreichten Glättung des Bezugsprofils für den Energieversorger sind derzeit noch nicht offensichtlich, da vom Energieversorger noch kein fester Fahrplan für ein ideales Bezugsprofil des Gebäudes vorgegeben werden konnte. Die Installation einer Kommunikation mit dem Energieversorger in Form einer erweiterten Rundsteuerung oder einem Smart Meter könnte hier eine Lösung sein.

Eine direkte Steuerung durch den Energieversorger ist primär für Grossverbraucher im Haus wie Warmwassererwärmer, Wärmepumpenheizungen und Elektrofahrzeuge zwingend.

Die Installation eines LLM-Systems für Kleinverbraucher im Haushalt ist heute mit hohen Kosten verbunden und bietet kaum ökonomische Anreize für eine Umsetzung durch den Gebäudebesitzer oder den Energieversorger.

In Kombination mit bestehender Gebäudeleitechnik kann ein LLM-System auch bei Kleinverbrauchern wirtschaftlich betrieben werden. Die Kosten für Installation und Betrieb werden in diesem Fall der Hausautomation zugeschrieben, die LLM-Funktion ist dann ein Zusatznutzen.

Gebäudestandards wie Minergie-P oder Minergie-A, die den Verkauf des ökologischen Mehrwerts von Solarstrom ausschliessen, fördern Technologien zur Maximierung des Eigenstromverbrauchs.

Die Option einer Unterfrequenz-Lastabwurf-Funktion für Verbraucher im Haushalt ist weiter interessant. Diese Systeme reagieren auf Zustandsparameter im Stromnetz und sind nicht zwingend auf eine Kommunikation mit dem Energieversorger angewiesen. Sie sind eine preisgünstige Lösung für einen Lastabwurf in Notsituationen.

Mit sinkenden Kosten für Akkumulatoren können LLM-Systeme für Kleinverbraucher mit Stromspeicher substituiert werden. Wenn die Preise für Regelenergie und die Energiepreisdifferenz ansteigen, sind Akkumulatoren in Kürze eine wirtschaftliche Lösungsoption. Wenn die Preise für Regelenergie und die Energiepreisdifferenz zwischen Hoch- und Niedertarif sinken oder stagnieren, sind für die Installation von LLM-Systemen bei den Kleinverbrauchern im Haushalt kaum Anreize vorhanden. Auch die Akzeptanz wird durch Stromspeicher verbessert, da keine Komforteinbussen zu erwarten sind und der Datenschutz nicht tangiert ist. Für Gebäude mit Stromspeicher wird eine bidirektionale Kommunikation mit dem Energieversorger notwendig, die aber lediglich über den Zustand des Stromspeichers informiert.

7 Ausblick

Folgende Fragestellungen sollten aus Sicht der Autoren weiter untersucht werden:

- Kommunikationstechniken für die Ansteuerung von in der Leistung modulierbaren Grossverbrauchern im Haushalt (Wärmepumpen, Elektroauto)

Da bei Grossverbrauchern aus Sicht der Autoren ein Lastmanagement notwendig ist, stellt sich die Frage nach der geeigneten Kommunikation zwischen einer Leitstelle (ev. Energieversorger) und dem Gebäude. Es gilt die verschiedenen Kommunikationstechniken wie Rundsteuerung, Powerline Communication, Funksysteme usw. zu vergleichen und ihre Stärken und Schwächen für das Anforderungsprofil „Lastmanagement von Wärmepumpen und Elektroauto-Ladestationen“ zu identifizieren.

- Das Elektrofahrzeug als flexibler Verbraucher – Ladestrategien für Autobesitzer und Energieversorger

Während bei der Ansteuerung von Grossverbrauchern für die Wärmebereitstellung bereits Erfahrungen vorliegen, ist die Ansteuerung von Elektroauto-Ladestationen noch kaum erprobt und von der Akzeptanz des Elektroautobesitzers abhängig. In erster Linie müssen Schaltstrategien und Geschäftsmodelle gefunden werden, die dem Besitzer des Elektroautos genehm sind und gleichzeitig dem Energieversorger den notwendigen Spielraum für ein Lastmanagement gewähren. Hier steht weniger die technische Lösung im Vordergrund als die Frage nach akzeptierten Geschäftsmodellen unter Einbindung der psychologischen Komponente, dass durch ein Lastmanagement am Elektroauto die Reichweite potenziell verringert wird.

- Lastmanagement-Funktionen als Zusatznutzen der bestehenden Gebäudeautomation.

Der vermehrte Einsatz von Gebäudeautomationssystemen eröffnet die Möglichkeit, LLM-Systeme kostengünstig als Zusatzfunktionen einzubauen. Da ein LLM nicht der primäre Nutzen der Gebäudeautomation darstellt, müssen die verschiedenen auf dem Markt erhältlichen Systeme auf ihre LLM-Fähigkeiten untersucht werden um Kunden und Produzenten auf die Thematik zu sensibilisieren.

- Akkumulatoren in verschiedenen Netzebenen für Leistungsregelung und Energiespeicherung.

Die Fragen der Stromspeicherung müssen für die verschiedenen Netzebenen untersucht werden. Akkumulatoren bieten eine heute bekannte Technologie mit Entwicklungspotenzial und der Option einer raschen Umsetzung. Daher sollte diese Technologie vermehrt evaluiert und in Pilotanlagen eingesetzt werden. Die Option einer maximierten Eigenstromnutzung im Gebäude ist aktuell ein Markttreiber für den dezentralen Einsatz von Akkumulatoren. Diese Bereitschaft für Investitionen sollte genutzt werden um mit begleitender Forschung und Entwicklung Erfahrungen mit Akkumulatoren und Energiemanagement-Systemen zu sammeln.

- Schnittstellen zwischen Stromnetz, Strom-Eigenerzeugung und thermischen Speichern ('Wasserbatterie')

Die Speicherung von Strom in Form von Wärme muss vermehrt in die Systemanalysen einfließen. Mit der zunehmenden Elektrifizierung der Energieversorgung und dem ver-

mehrten Einsatz von Photovoltaik ist die Speicherung von überschüssigem Strom in thermischen Speichern ein wichtiges Element des Lastmanagements. Auch im Hinblick auf die saisonale Versorgung mit erneuerbarer Energie hat die Weiterentwicklung der 'Wasserbatterie' hohe Priorität.

- Die Effektivität und Kosteneffizienz von Lastabwurf-Funktionen für Notsituationen.

Der selektive Lastabwurf bei Grossstörungen sollte weiter erforscht werden. Technische Lösungen müssen evaluiert werden und volkswirtschaftliche Kosten im Fehlerfall detailliert analysiert werden.

- Ökobilanzen der verschiedenen LLM- und Speichersysteme

Für die verschiedenen Varianten für die Integration von erneuerbaren Energien wie LLM- und Speichersysteme müssen Ökobilanzen erstellt werden.

- Stromgeführte Mikro-WKK-Anlagen mit Biomasse-Brennstoff

Die saisonale Versorgung mit erneuerbaren Energien kann mit der Entwicklung/Einführung von Mikro-WKK-Anlagen mit Biomasse-Brennstoff schnell voranschreiten. Auch wenn diese Technologien für moderne Gebäude ein ungünstiges Verhältnis von Strom- zu Wärmeleistung aufweisen, können Mikro-WKK-Anlagen auf Grund des aktuellen Gebäudebestandes noch mehrere Jahrzehnte sinnvoll eingesetzt werden.

8 Literaturverzeichnis

- [dena-Netzstudie II, 2010] dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Deutsche Energie-Agentur 2012
- [Energiestrategie 2050, 2012] Bundesrat, Faktenblatt 1: Erste Massnahmen Energiestrategie 2050, Faktenblatt 2: Fragen und Antworten zum Energiepaket 2050. Schweizerische Eidgenossenschaft, 18.4.2012
- [Enertrag, 2012] <https://www.enertrag.com/download/prospekt/stromspeichervergleich.pdf> September 2012
- [EKZ, 2012] <http://www.ekz.ch/content/ekz/de/umwelt/smartgrid/batteriespeicher.html> September 2012
- [Gaegauf et al., 2012] Gaegauf C., Viktor D., Weber A., Tillenkamp F., Keller T., Zweifel G., Struck C., Gebäudeintegrierte Polyvalente Energiebereitstellung - Gebäude als Kraftwerk, Schlussbericht, BFE, 25.6. 2012
- [Gutzwiller et al., 2008] Gutzwiller R. et. al., Lokales Lastmanagement - Stromverbrauch sinnvoll mit der Erzeugung koordinieren. Bulletin SEV/AES 22/23 2008
- [Linder S., 2012] Linder S., ABB Schweiz, Speicher-Anforderungen und -Lösungen zur Integration von grossen Mengen an photovoltaischer Energieproduktion. 10. Nationale Photovoltaik-Tagung vom 22./23. März 2012 in Baden.
- [MHH, 2012] Zukunft Eigenverbrauch – Solarstrom hausgemacht, Informationen und Hintergründe zum privaten und gewerblichen Eigenverbrauch von Solarstrom. MHH Solartechnik GmbH, Mai 2012
- [Niesse A., 2012] Nieße A., OFFIS Division Energy, Oldenburg: Using electric vehicle charging strategies to maximize PV-integration into the low voltage grid. 6th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2011) November 28 – 30, 2011 bcc Berlin Congress Center, Berlin / Germany
- [SMA, 2012] <http://www.sma.de/produkte/backup-systeme.html> September 2012
- [Swissgrid, 2012] http://www.swissgrid.ch/swissgrid/de/home/experts/topics/ancillary_services/tenders/secondary-

[control-power.html](#) September 2012

[Swissolar, 2012]

Hintergrundpapier Swissolar: Wie die Schweiz 20% Solarstrom bis 2025 erreicht. 10. Nationale Photovoltaik-Tagung vom 22./23. März 2012 in Baden.

[SWW, 2012]

“Es ist fünf vor zwölf”, Artikel, Sonne Wind und Wärme, Bielefelder Verlag GmbH & Co. KG, Ausgabe 11/2012, 2.8.2012

9 Veröffentlichungen

Im Verlaufe des Projektes erfolgten folgende Veröffentlichungen:

Strittmatter T.; *Kraftwerk Haus im ländlichen Raum –Umsetzung von Biomasse Wärme-Kraft-Anlagen und lokalem Lastmanagement*, 16. Status-Seminar 2010, «Forschen und Bauen im Kontext von Energie und Umwelt» 2./3. September 2010 - ETH Zürich

Sattler M., Strittmatter T., Weber A.; *Lokales Lastmanagement für den Haushalt*, Electrosuisse und VSE Bulletin, 16. Dezember 2011

Sattler M.; *Lastmanagement im Kraftwerk Haus - stabile Stromnetze und zufriedene Kunden*, i-net CleantechEvent "Smart Buildings", 21. März 2012, Basel

Sattler M.; *Kraftwerk Haus - Schnittstellen zum Smart Grid - Praxiserfahrungen mit geschalteten Verbrauchern und dezentraler Einspeisung*, 6. Innovationsgruppensitzung Metering, 3. April 2012, FHNW Hochschule für Technik, Windisch

Sattler M., Strittmatter T., Dorer V., Wiederkehr M.; *Lastmanagement im Kraftwerk Haus - Der Beitrag des Gebäudes zur Integration erneuerbarer Energien im Stromnetz*, 17. Status-Seminar «Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt», 13. September 2012, Zürich

10 Danksagung

Für die fachliche Unterstützung und Mitarbeit im Projekt danken die Autoren dem energievorsorgungsunternehmen EBL und der Firma Landis+Gyr.