

Fachhochschule Burgenland GmbH
Campus 1
A-7000 Eisenstadt

Eigenverbrauchsoptimierung von Photovoltaikstrom in Einfamilienhäusern

Bachelorarbeit 1
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science in Engineering

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. Robert Matzinger
Eingereicht von: Ing. Andreas Vogler
Personenkennzeichen: 1110640035
Datum: 28. Februar 2014

Kurzfassung Deutsch

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Verbrauch von elektrischem Strom aus Eigenproduktion, mit den verschiedenen Arten des Stromeigenverbrauchs und damit wie dieser Eigenverbrauch durch Smart Home und Smart Metering erhöht und optimiert werden kann.

Durch die zunehmende Verbreitung von stromproduzierenden Anlagen (vornehmlich Photovoltaikanlagen) nehmen die Vergütungen für in das Stromnetz eingespeisten Strom, ab. Eine sogenannte Stromparität ist derzeit nicht gegeben, da der Ertrag von eigenerzeugtem Strom unter dem Preis von zugekauftem Strom liegt. Durch die Erhöhung des Eigenverbrauches kann die Wirtschaftlichkeit einer Photovoltaikanlage jedoch entscheidend verbessert werden, da dem Verbrauch von eigenerzeugtem Strom ein Ertrag in der Höhe von zugekauftem Strom gegenübergestellt werden kann.

In der Arbeit wird eruiert wo sinnvolle Möglichkeiten des automatisierten Stromeigenverbrauches liegen, und wie dieser Eigenverbrauch mit einem System automatisiert gesteuert werden kann. Es wurde untersucht welche Komponenten ein derartiges System benötigt, welche Lösungen es dafür gibt, wo Lösungen fehlen und wie diese geschaffen werden können, und wie die Komponenten in ein Gesamtsystem integriert werden können. Ziel ist eine automatisierte Steuerung, damit der Eigenverbrauch erfolgt, wenn eigenproduzierter Strom im Überfluss vorhanden ist.

Die Studie von Literatur hat gezeigt dass der Verbrauch durch Nutzung in Form von thermischer Energie eine gute Möglichkeit ist, überschüssige Energie zu verwerten. Auf Grund dessen wurde in der Arbeit eine Simulationsmessung mit einem Warmwasserboiler durchgeführt, welcher in Abhängigkeit von vorhandener Energie aus Eigenproduktion beheizt wurde. Damit konnte aufgezeigt werden dass die Beheizung zu 74% mit selbstproduzierter, überschüssiger vorhandener, Energie erfolgen kann. Daraus folgt dass 74% der Heizkosten, über andere Energiequellen, gespart werden kann.

Abstract

The main purpose of this thesis is to analyse how smart home and smart metering in combination with automated power switches can increase power parity of photovoltaic facilities in small homes. Most analytic papers about power consumption and grid-parity emphasize the importance of controlling power usage – automated or by changing behaviour of the users. Controlled power consumption is a crucial issue when grid-nodes are producing their own electricity, for example with photovoltaic equipment.

In this analysis we focus on the automated control of power consumption inside photovoltaic grid nodes to increase home energy parity of the nodes themselves. The idea of automated power control is becoming increasingly well known, but existing systems do not take into account the amount of energy produced by the node itself. Furthermore systems for automated power control are still expensive and hardly affordable for consumers.

This thesis shows that it is possible to build an intelligent and affordable power control system in combination with smart metering, and it demonstrates, with a case study, to which amount such an intelligent power control system can improve home energy parity.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	5
1.1 Motivation	5
1.2 Zielsetzung und Fragestellung.....	6
1.3 Vorgangsweise und Methode.....	7
2 Grundlagen.....	9
2.1 Eigenverbrauch vs. Einspeisung von elektrischer Energie	9
2.2 Akzeptanz der Eigenverbrauchsanpassung.....	10
2.3 Bereiche der Eigenverbrauchsanpassung.....	11
2.4 Thermische Nutzung vs. Batterie-Stromspeicher.....	12
2.5 Markterhebung Eigenverbrauchsautomatisierungssysteme	13
3 Auswahl der Systemkomponenten	15
3.1 Stromerzeugungsdatenerfassung	15
3.1.1 Wechselrichterbeschreibung.....	15
3.1.2 Datenerfassung über Webbox	16
3.1.3 Datenerfassung über Sunny Home Manager.....	16
3.1.4 Datenerfassung mit eigener Software	17
3.1.5 Visualisierung der Stromerzeugungsdaten.....	18
3.2 Stromverbrauchsdatenerfassung	19
3.3 Warmwasserboiler als Energiespeicher	20
3.3.1 Regelgröße des Warmwasserboilers.....	21
3.3.2 Messung der Gasthermenaktivität	21
3.4 Endgerätesteuerung.....	21
3.4.1 Ansatz einer Endgerätesteuerung.....	22
3.4.2 Smart Home-Funksteckdosen der Firma SMA.....	22
3.4.3 Verwendung von beliebigen Funksteckdosen.....	23
3.4.4 Funksteckdosen der Firma ELRO	24
4 Integration der Systemkomponenten	26

4.1	Datenverarbeitung	27
4.2	Steuerung und Regelung.....	29
4.3	Optimierungsmöglichkeiten.....	32
5	Laborversuch und Ergebnis	33
6	Zusammenfassung	35
7	Literaturverzeichnis	37

1 Einleitung

1.1 Motivation

Eigenverbrauch von Solarstrom bezeichnet einen Vorgang, bei dem der selbst erzeugte Strom durch Solaranlagen direkt vor Ort genutzt wird und nicht ins öffentliche Stromnetz eingespeist wird. Während bislang die Einspeisung von selbst erzeugtem Solarstrom in das öffentliche Netz der Regelfall war, nimmt, vor dem Hintergrund der sinkenden Einspeisevergütung der Eigenverbrauch an Bedeutung zu.

Der Begriff Netzparität bezeichnet den Zustand gleicher Kosten für selbst erzeugte im Vergleich zu eingekaufter elektrischer Energie. Diese gilt üblicherweise dann als erreicht, wenn aus Sicht der Endverbraucher selbst produzierter Strom dieselben Kosten je Kilowattstunde verursacht wie der Kauf von einem Stromanbieter, also der Strombezug über das Netz. Der Begriff Netzparität ist jedoch nicht eindeutig definiert (Bost et al., 2011, S. 20).

Durch einen erhöhten Eigenverbrauch kann der Ertrag der Photovoltaikanlage gesteigert werden. Genutzter Strom aus Eigenproduktion muss nicht zu einem ungünstigem Preis an den Stromanbieter verkauft werden. Damit kann der Strom, welcher nicht vom Lieferanten bezogen werden musste, als Ertrag gerechnet werden. Mit steigendem Ertrag einer Anlage sinkt der Eigenstrompreis, da die Leistung der Anlage höher wird und damit der Anschaffungspreis der Anlage einer höheren Leistung gegenüber steht.

In der Studie des IÖW (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung) wird unter anderem hervorgegeben dass smarte Regelungstechnik noch zu teuer sei, jedoch wird der smarten Regelung einer hohen Bedeutung zugesagt. „Dazu könnte man bspw. die Eigenverbrauchsförderung nur für diejenigen Anlagen gewähren, die mit einem Speicher oder mit smarterer Regelungstechnik betrieben werden, welche den Eigenverbrauch in Abhängigkeit von der Photovoltaikstromerzeugung steuert. ... darüber hinaus ist die dafür notwendige Technologie noch zu teuer...“ (Bost et al., 2011, S. 7).

Dem Eigenverbrauch wird ein hohes Potential zugeschrieben: „Chancen und Risiken für unterschiedliche Marktakteure: Netzparität wird vor allem zu einem stärkeren Eigenverbrauch motivieren. Dies eröffnet neue Geschäftsfelder für

Systemintegratoren und Anbieter von Eigenverbrauchs- und Speicherlösungen“ (Bost et al., 2011, S. 8).

„Eine wesentliche Rolle für die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaikanlagen spielt der Eigenverbrauchsanteil (d.h. jener Anteil der Stromerzeugung, der im selben Haushalt verbraucht wird und Strom aus dem Netz ersetzt), da davon auszugehen ist, dass die Vergütung für ins Netz eingespeisten Strom deutlich unter dem Haushaltsstrompreis liegt.“ (Kalt & Baumann, 2013, S. 10).

1.2 Zielsetzung und Fragestellung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen umsetzbaren Lösungsweg und eine Systemarchitektur für eine Anlage zu finden, welche durch das automatisierte Steuern von Endgeräten (Stromverbrauchern) den Eigenverbrauch von selbst erzeugtem Strom erhöht, und damit einen Beitrag zur Stromparität im Eigenheim leistet.

Es wird daher eruiert, welche Daten für die Regelung eines solchen Systems benötigt werden, welche Endgeräte sinnvoll gesteuert werden können, welche technische Mittel sich für ein derartiges System im Bereich des Smart Home mit integriertem Smart Metering eignen, und wie diese in ein Gesamtsystem integriert werden können.

Im Zentrum des zu entwerfenden Systems steht die optimierte Steuerung, damit der Eigenverbrauch erfolgt, wenn eigenproduzierter Strom im Überfluss vorhanden ist. Ein weiterer Aspekt des Lösungsweges sind die Investitionskosten. Diese sollen gering gehalten werden, sodass die Amortisation des Investments der Anlage und des Steuerungssystems nicht den Nutzen des Eigenverbrauches wesentlich mindert.

Anschließend soll die Arbeit eine grobe Prognose über die Auswirkungen und den möglichen Ertrag, und den Nutzen des Systems der automatischen Steuerung von Endgeräten, in Abhängigkeit von in Eigenproduktion erzeugter Energie, aufzeigen. Da die Umsetzung eines Systems nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, wird der Nutzen anhand der ermittelten Möglichkeiten theoretisch, anhand von Annahmen und recherchierten Daten, ermittelt. Bei der Ermittlung des Ertrages kann auf Daten, welche bei der Untersuchung der Teillösungen ermittelt wurden, zurückgegriffen werden, und ein simulierter Betrieb (manuelle Steuerung) von Endgeräten durchgeführt werden. Aus diesem Simulationsbetrieb können ebenfalls Ertragsdaten ermittelt werden.

1.3 Vorgangsweise und Methode

Zuerst werden die Grundlagen über Eigenstromerzeugung und deren wirtschaftlichen Aspekte in Form von Literatur-Recherche erarbeitet und dargestellt. Über die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurde das Ziel der smarten Regelung im Wärmesektor abgeleitet. Es werden die dafür benötigten Komponenten identifiziert, und daraus ein Forschungsplan / Projektstrukturplan zur strukturierten Vorgangsweise erstellt.

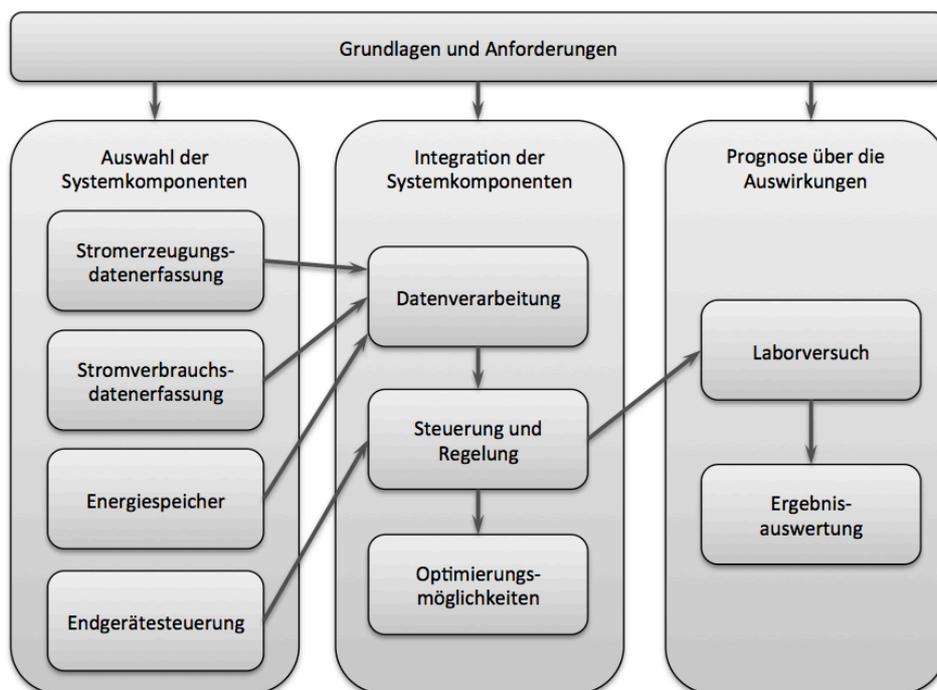


Abb. 1) Forschungsplan mit Abhängigkeiten der Komponenten

Über das Ziel der smarten Regelung im Wärmesektor wird eruiert welche Hauptaufgaben erfüllt werden müssen damit das folgende Ziel erreicht werden kann:

- Erkennung vorhandener überschüssiger Energie
- Einspeisung von Energie in einen Speicher

Diese Aufgaben müssen automatisiert und in ein Steuerungssystem eingebunden werden. Die Hauptaufgaben werden in folgende Teilaufgaben gegliedert, und für die Verwendung in einem Regelsystem untersucht:

- Erfassung von Photovoltaikanlagendaten über die Stromerzeugung
- Erfassung des Stromverbrauches im Haushalt über Stromzähler

- Auswahl eines geeigneten Energiespeichers für den Energieüberschuss
- Ermittlung von Möglichkeiten zum automatisierten Schalten von Heizgeräten, welche zur Energieeinspeisung in den Wärmespeicher verwendet werden.
- Ermittlung und Erfassung von Regelgrößen, mit welchen ermittelt werden kann, zu welchem Zeitpunkt das Aufladen des Wärmespeichers sinnvoll und notwendig ist.
- Regelungs- und Steuerungssystem für das Aufladen des Wärmespeichers mit den ermittelten Daten als Regelgrößen.
- Suche nach Optimierungsmöglichkeiten der Steuerung.

Nach der Grundlagenforschung wurde am Markt nach einer existierenden Lösung zur Erfüllung der Gesamtaufgabe gesucht. Da keine passende Gesamtlösung gefunden werden konnte, wurde nach Lösungen für die Teilaufgaben gesucht. Es wurde untersucht, wie diese in ein Gesamtsystem, zur Erfüllung der Hauptaufgabe, integriert werden können.

Aspekte für die Zusammenführung der Teilsysteme in ein Gesamtsystem sind die Schnittstellen der Teillösungen, die Integration in ein Regelungssystem, und die Kosten dieser Teillösungen. Wurden keine bestehenden Teillösungen gefunden, so wurde das Implementieren von eigenen Lösungen untersucht.

2 Grundlagen

2.1 Eigenverbrauch vs. Einspeisung von elektrischer Energie

Je niedriger die Einspeisevergütungen für elektrische Energie werden, desto wichtiger ist es, den Eigenverbrauch zu erhöhen um damit die Netzparität positiv zu beeinflussen. Laut einer von Greenpeace in Auftrag gegebenen Studie des „Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)“ mit dem Titel „Effekte von Eigenverbrauch und Netzparität bei der Photovoltaik“ hängt der Eigenverbrauch im hohen Maße von Geräteausstattung und Verbrauchsverhalten ab. In dieser Studie wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches zeigt, dass ein Eigenverbrauch von etwa 20% realisiert werden kann. Nur durch aktive Verbrauchsanpassung können höhere Anteile bis ca. 40% ohne Speicher erreicht werden (Bost et al., 2011, S. 81).

Es ist davon auszugehen, dass einerseits bedingt durch weiterhin zurückgehende Preise für Photovoltaikanlagen und andererseits durch steigende Strombezugspreise die Veränderung der Betreiber-Geschäftsmodelle von der Maximierung der Stromeinspeisung hin auf eine Maximierung des Eigenverbrauchs bei den Privathaushalten und in der Industrie stattfinden wird (Huber et al., 2012, S. 57). Abbildung 1 veranschaulicht diese Entwicklung in Deutschland. Das deutsche Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Kurztitel Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) regelt die bevorzugte Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Quellen ins Stromnetz und garantiert deren Erzeugern feste Einspeisevergütungen.

Der Wichtigkeit des Eigenverbrauchs wurde auch bereits 2009 am Internationalen ETG (Energietechnische Gesellschaft) Kongress hoher Bedeutung zugeordnet, vor allem in Bezug auf die Netzstabilität, den stark wachsenden Markt der dezentralen Photovoltaikanlagen, und dessen Wechselwirkungen. Und auch aufgrund der mittlerweile in Deutschland eingetretenen Stromparität, bzw. deren Unterschreitung: Der Strompreis für eingespeiste Energie liegt mittlerweile unter dem Strompreis der bezogenen Energie.

Gemäß einer von der europäischen Photovoltaikindustrie beauftragten Studie soll die installierte Photovoltaikleistung in Deutschland von aktuell rund 5,5 GW auf nahezu 80 GW bis 2020 steigen. Dieser Wert liegt bereits über der prognostizierten maximalen Netzlast. Aufgrund der heutigen Marktsituation ist davon auszugehen, dass auch nach diesem Ausbau noch ein relevanter Anteil der Photovoltaik dezentral ins Netz eingespeist wird. Maßnahmen zur Sicherstellung der Netzstabilität dürfen

dementsprechend nicht auf Hoch- und Höchstspannungsebenen beschränkt werden. Zur Entlastung der Netze schafft die deutsche Bunderegierung mit dem EEG 2009 schon heute Anreize, den dezentral aus der Photovoltaik erzeugten Strom auch vorrangig direkt zu verbrauchen. Auf dieser Grundlage ergeben sich neue Anforderungen an die Photovoltaiksystemtechnik: Lasten sollten in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Energie gezielt ein- und ausgeschaltet werden (Wachenfeld et al, 2009).

2.2 Akzeptanz der Eigenverbrauchsanpassung

Die Akzeptanz der Eigenverbrauchsanpassung durch den Kunden kann durch Darstellung und Visualisierung der Kosten, und des Nutzens bei einer verantwortungsvollen manuellen Steuerung von Haushaltsgeräten, wesentlich erhöht werden. Daher ist eine Erfassung und Aufzeichnung der Stromerzeugung und des Stromverbrauches notwendig, um diese in geeigneter Weise visualisieren zu können. Für Geräte welche nicht automatisiert gesteuert werden können, kann dies zu einer Veränderung des Verhaltens des Verbrauchers beitragen.

Darüber hinaus könnten im Umfeld des privaten Endkunden die Erfassung der Stromerzeugung und des Stromverbrauches als Basisplattform für weiterführende Dienste oder Services (Eigenverbrauch, Smart Home) genutzt werden. Aus energiewirtschaftlicher Perspektive bietet dies in einem Versorgungssystem aber auch die Möglichkeit, den an sich immateriellen Energieträger Strom mit einem Erlebnisfaktor für den Endkunden zu versehen. Die Akzeptanz und der Nutzen dieser Services sollte in weiterführenden Forschungsprojekten untersucht werden (Westermann et al., 2013, S. 125).

In einem Feldversuch „Preis- und Effizienzsignale im MeRegio SmartGrid Feldtest“, durchgeführt von Lutz Hillemacher, Anke Eßer-Frey, und Wolf Fichter, wurde gezeigt dass das Schaffen von Bewusstsein über die aktuelle Preislage eine Veränderung im Eigenverbrauch des Verbrauches hervorruft (Hillemacher et al, 2011).

2.3 Bereiche der Eigenverbrauchsanpassung

Die aktive Verbrauchsanpassung ist ein wesentlicher Punkt um die Netzparität zu erreichen. Die Verbrauchsanpassung kann in zwei unterschiedlichen Bereichen durchgeführt werden: Anpassung von manuellen nicht regelmäßig wiederkehrenden Aktionen, und notwendig regelmäßigen Aktionen (z.B. thermische Heizungssteuerung).

Die notwendig regelmäßigen Aktionen können sinnvollerweise nur durch Automatisierung erfolgen. Für eine manuelle Verbrauchsanpassung sind zumindest die folgenden Umgebungsvariablen zu erfassen und dem Verbraucher in geeigneter Weise zu visualisieren. Bei Unter- oder Überschreitungen von definierten Grenzen sollte aktiv eine Information gesendet werden.

- Daten über den aktuellen Ertrag
- Daten über den aktuellen Verbrauch
- Differenz aus Ertrag und Verbrauch

Daten über den Stromertrag und des Stromverbrauches können über Stromzähler erfasst, ausgewertet, und visualisiert werden.

2.4 Thermische Nutzung vs. Batterie-Stromspeicher

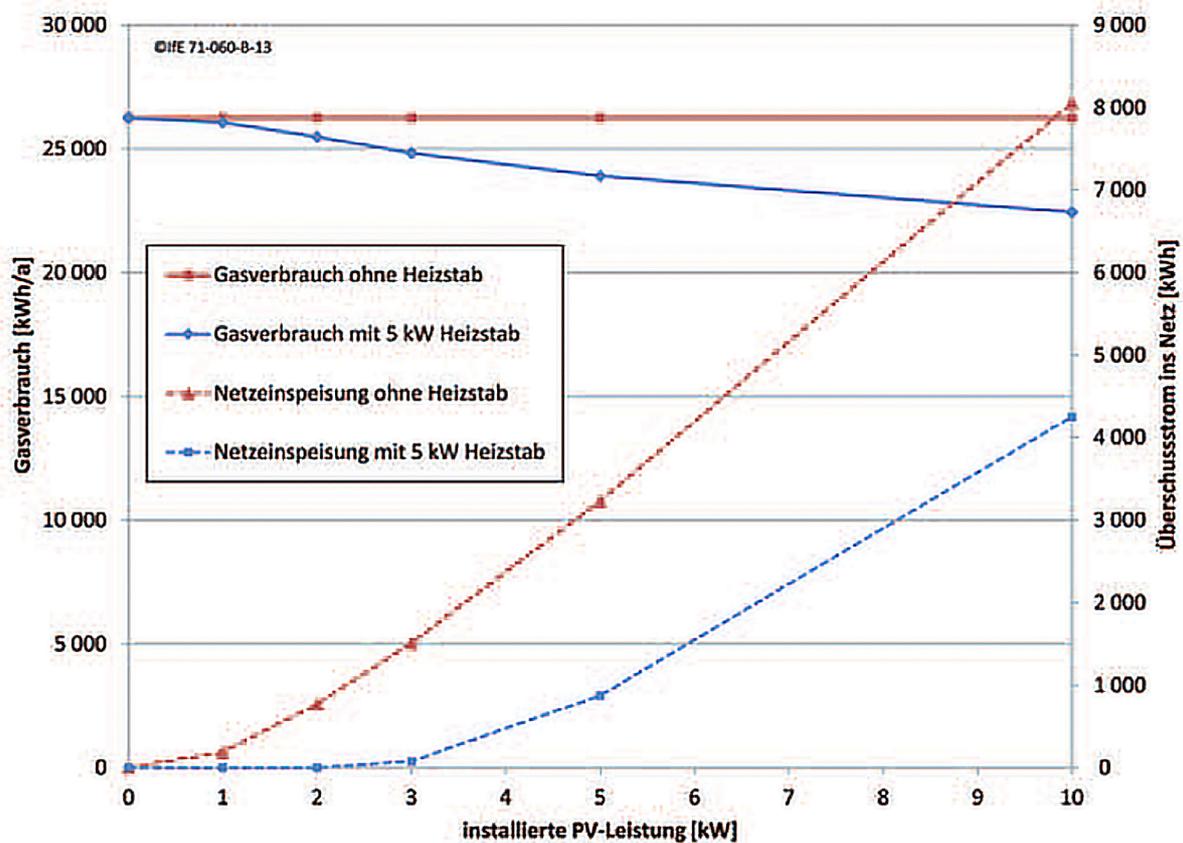


Abb. 2) Möglichkeiten zur Verwertung von Überschussstrom im Wärmesystem in Abhängigkeit der installierten PV (Photovoltaik)-Leistung. Die roten Linien stellen den Gasverbrauch und die Netzeinspeisung ohne Einsatz eines Heizstabs dar, die blauen Linien zeigen den Fall mit Einsatz eines Heizstabs (Huber et al., 2012, S. 59).

Bereits bei den kleinsten Photovoltaikanlagen fällt Überschussstrom an, welcher nicht nutzbar ist. Da die Vergütungen für elektrische Energie zurückgehen, ist die Möglichkeit diesen Strom gewinnbringend in das Netz einzuspeisen gering.

Überschüsse werden immer dann anfallen, wenn viel Photovoltaikstrom im Netz ist und die Strompreise deshalb bereits sehr niedrig sind.

In der Ausgabe „Energiewirtschaftliche Tagesfragen 63. Jg (2013) Heft 9“ wurden von Matthias Huber, Florian Sängler und Thomas Hamacher zwei Szenarien zur Verwendung des Überschussstroms untersucht. Die Speicherung in Batterien, sowie die Verwendung im Wärmesektor durch einen Heizstab. Diese Technologien wurden mittels der angewandten Optimierung kostenoptimal in den Szenarien eingesetzt.

Dabei wurde dargestellt dass ein wesentlicher Vorteil von Lösungen im Wärmesektor in den niedrigen Anschaffungskosten und einer einfachen Integrierbarkeit in existierende Heizungssysteme ist (Huber et al., 2012, S. 59-60).

Als Alternative zur Verwendung des Stroms im Wärmebereich wurde die Speicherung in Li-Ion-Batterien untersucht. Durch diese Speicherung hat sich der Eigendeckungsanteil der Stromversorgung erhöhen lassen. Es zeigte sich jedoch auch, dass Batterien zwar den Eigenverbrauch deutlich erhöhen können, jedoch immer ein kleiner Stromüberschuss verbleibt. Zum Beispiel bei einer 3 kWpeak-Anlage können auch mit einer Batterie nur noch 84 % der Energie integriert werden. Bei Einsatz eines Heizstabes hingegen sind 98 % integrierbar (Huber et al., 2012, S. 59-60).

2.5 Markterhebung Eigenverbrauchsautomatisierungssysteme

Es wurden zwei Patente gefunden welche im Wesentlichen die gewünschte Automatisierung zur Unterstützung des Eigenverbrauchs beschreiben.

DE 202011003152 U1: Steuereinheit zur Speicherung von Energie und Steigerung des Eigenverbrauchs bei elektrischen Anlagen

Die Steuereinheit ist dadurch gekennzeichnet, dass sie mit geeigneten Stromsensoren die lokal erzeugte und die lokal verbrauchte Energie erfasst (alternativ kann auch die Differenz in Betrag und Richtung erfasst werden) und zentrale oder dezentrale Geräte so steuert, dass möglichst viel der lokal erzeugten Energie auch lokal verbraucht wird (minimaler Eigenverbrauch).

DE 102012100864 A1: „Verfahren zur Verteilung einer Strommenge eines lokalen Stromerzeugers, Stromverteilungseinrichtung und ein Stromnetzwerk mit einer solchen Stromverteilungseinrichtung“

Stromeinspeisungsbegrenzungen für die Einspeisung von lokal erzeugtem Strom in das öffentliche Stromnetz führen zur Nicht-Nutzbarkeit lokal produzierten Stroms. Die hierdurch entstehenden Nachteile sollen reduziert werden. Hierfür ist ein Verfahren zur Verteilung einer von einem Stromerzeuger in einem ersten Stromnetz erzeugten Gesamtstrommenge auf

- a) ein zweites Stromnetz,
- b) ein drittes Stromnetz mit Stromverbrauchern, und
- c) auf einen Überschussstromverbraucher,

vorgesehen. Die Verteilung erfolgt mittels einer Stromverteilungseinrichtung mit einer Regeleinheit, in welcher ein Verbrauchsprogramm, ein Einspeisungsprogramm und ein Überschussprogramm hinterlegt sind. Weiterhin wird der Regeleinheit eine maximal in das zweite Stromnetz einzuspeisende Stromeinspeisungsmenge vorgegeben. Mit dem Überschussprogramm ist eine Überschussstrommenge mittels des Überschussstromverbrauchers verbrauchbar, wobei diese der im ersten Stromnetz verfügbaren Gesamtstrommenge abzüglich einer in das zweite Stromnetz einzuspeisenden Einspeisungstrommenge und abzüglich einer im dritten Stromnetz nachgefragten Strommenge entspricht. Verfahrensgemäß führt die Regeleinheit das Verbrauchsprogramm, das Einspeisungsprogramm und das Überschussprogramm durch.

Außerdem betrifft die Erfindung ein Stromnetzwerk und eine Stromverteilungseinrichtung zur Verfahrensdurchführung.

Auf Anfrage an den Patenteigentümer nach Produkten, die diesen Patenten entsprechen, kam als Antwort dass es keine fertigen Produkte dafür gibt, dass aber verschiedene Nachrüstlösungen angeboten werden können.

„Das von Ihnen angesprochene Patent ist weiterhin Grundlage unserer Entwicklungsarbeit, ist aber noch nicht in ein fertiges Produkt überführt worden.“

Als Nachrüstlösungen wurden zum Beispiel der „Sunny Home Manager“ der Firma SMA und Produkte der Firma Solar-log für Home Automatisierung genannt. Ein geeigneter Verbund zwischen erzeugter Energie und gesteuerten Verbrauchern existiert in diesen Lösungen nicht (SMA Hersteller, 2014).

3 Auswahl der Systemkomponenten

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit der Analyse der Umsetzungsmöglichkeiten der Systemkomponenten, und wie diese in ein Gesamtsystem, welches Energie aus Eigenproduktion intelligent in einem Energiespeicher (Warmwasserspeichers) speichert, eingebunden werden können. Das System besteht aus folgenden Komponenten:

- Erfassung von Photovoltaikanlagendaten über die Stromerzeugung.
- Erfassung des Stromverbrauches im Haushalt über Stromzähler.
- Ermittlung eines geeigneten Energiespeichers für den Energieüberschuss.
- Ermittlung von Möglichkeiten zum automatisierten Schalten von Heizgeräten, welche zur Energieeinspeisung in den Wärmespeicher verwendet werden.

3.1 Stromerzeugungsdatenerfassung

3.1.1 Wechselrichterbeschreibung

Als Wechselrichter wird ein Gerät bezeichnet, das die Gleichspannung aus Photovoltaikmodulen in Wechselspannung umwandelt und in das Haushaltstromnetz einspeist. Der Wechselrichter ist damit Teil einer Photovoltaikanlage. Auf der Eingangsseite befindet sich üblicherweise ein Gleichspannungswandler. Auf der Ausgangsseite befindet sich ein Wechselrichter, welcher in das Niederspannungsnetz einspeist und sich automatisch mit dem Stromnetz synchronisiert. Als Forschungsobjekt dient ein Wechselrichter Sunny Boy 4000tl der Firma SMA. Zur Evaluierung der Erfassungsmöglichkeiten der Daten des Wechselrichters wurde eine Anfrage an den Wechselrichterhersteller SMA gestellt. Folgende Möglichkeiten werden von der Firma SMA (SMA Hersteller, 2014) angeboten:

- Sunny Webbox
- Sunny Home Manager

Als weitere Möglichkeit kann die Anbindung über eine Eigenimplementierung und/oder der Hilfe von frei zugänglichen Open Source-Projekten in Betracht gezogen werden (ohne Zwischengeräte vom Hersteller).

3.1.2 Datenerfassung über Webbox

Die Sunny Webbox ist die einfachste Möglichkeit die Daten über eine definierte Schnittstelle auszulesen. Diese wird entweder per Draht oder per Bluetooth an die Anlage angeschlossen.

Die aktuellen und historischen Daten der Anlage können über eine RPC Schnittstelle per HTTP/JSON ausgelesen werden. Dies ist eine einfache und definierte Schnittstelle, und bietet sich somit am besten an um die Daten auszulesen.

Über diese Webbox bekommt man auch einen Zugang auf ein Portal des Herstellers (www.sunnyportal.com). Die Daten der Anlage werden von der Webbox in die SMA „Cloud“ gespeist. Über diese Weblösung können verschiedene Auswertungen durchgeführt werden.

Die Webbox kann die Daten der erzeugten Energie zur Verfügung stellen. Die verbrauchte Energie sowie die eingespeiste und verkaufte Energie kann dieses System nicht liefern. Die Kosten der Webbox liegen bei ca. 500 EUR.

3.1.3 Datenerfassung über Sunny Home Manager

Der Sunny Home Manager ist eine Erweiterung zur Webbox und bietet grundsätzlich die Funktionalitäten der Webbox - Datenlogging und Portal. Zusätzlich können über den Sunny Home Manager auch Funksteckdosen des Herstellers gesteuert werden. Diese Steckdosen bieten den Vorteil dass Verbrauchsdaten geliefert werden. Der Sunny Home Manager kostet ca. 500 EUR. Der Preis einer Funksteckdose beläuft sich auf ca. 130 EUR. Die Anbindung per RPC (Remote Procedure Call) ist mit dem Sunny Home Manager nicht möglich, womit ein eigenes Datenlogging nicht durchgeführt werden kann. An dieses System können auch bis zu drei Stromzähler angeschlossen werden, womit auch der Gesamtverbrauch des Gebäudes erfassbar ist.

Es handelt sich dabei um ein geschlossenes System, welches keine Möglichkeiten zur Anbindung an ein Programm oder API (Application Programming Interface) bietet. Daher scheidet diese Lösung zur Einbindung in ein Steuerungssystem aus.

3.1.4 Datenerfassung mit eigener Software

Zum Auslesen von Daten kann die Photovoltaikanlage direkt über eine serielle Schnittstelle angebunden werden. Jedoch sind über das Protokoll keine Informationen vorhanden. Die Schnittstelle ist für die Analyse der Anlage durch den Hersteller vorgesehen.

Der Wechselrichter besitzt auch eine Bluetooth-Schnittstelle zum Auslesen der Daten. Mit dem vom Hersteller frei verfügbarem Programm „Sunny Explorer“ können die Daten der Anlage per Bluetooth ausgelesen werden. Der „Sunny Explorer“ besitzt auch versteckte Möglichkeiten, per Kommandozeile Daten in eine CSV Datei zu übertragen. Aktuelle und Detailwerte können jedoch nicht exportiert werden, es handelt sich hierbei lediglich um Durchschnittswerte im Stundenbereich und länger. Das Programm ist nur für Microsoft Windows erhältlich, womit eine Verwendung unter Linux nicht möglich ist. Dadurch kann die Software zum Beispiel nicht auf einem Raspberry Pi verwendet werden können. Dieser könnte auch Steuerungsaufgaben übernehmen.

Das Bluetooth Protokoll ist vom Hersteller nicht öffentlich zugänglich. Es gibt jedoch Open Source-Programme, welche das Protokoll implementiert haben und die Daten der Anlage auslesen können. Der Quellcode dieser Programme ist, unter den Bedingungen der Open Source-Lizenz, frei verfügbar und kann daher für einen Anbindung an ein Steuerungssystem verwendet werden (SMA Spot, 2014 & SMA Bluetooth, 2014).

3.1.5 Visualisierung der Stromerzeugungsdaten

Eine mögliche Visualisierung der erfassten Stromerzeugungsdaten kann auf einfache Weise über Oracle APEX erfolgen. Oracle APEX ist eine Web-Entwicklungsumgebung, welche in der Oracle Datenbank integriert ist, und frei zur Verfügung steht. Diese Web-Entwicklungsumgebung bietet die Möglichkeit schnell Web-Applikation zu implementieren, und bietet integrierte Funktionalitäten zur Visualisierung von Zeitreihen.

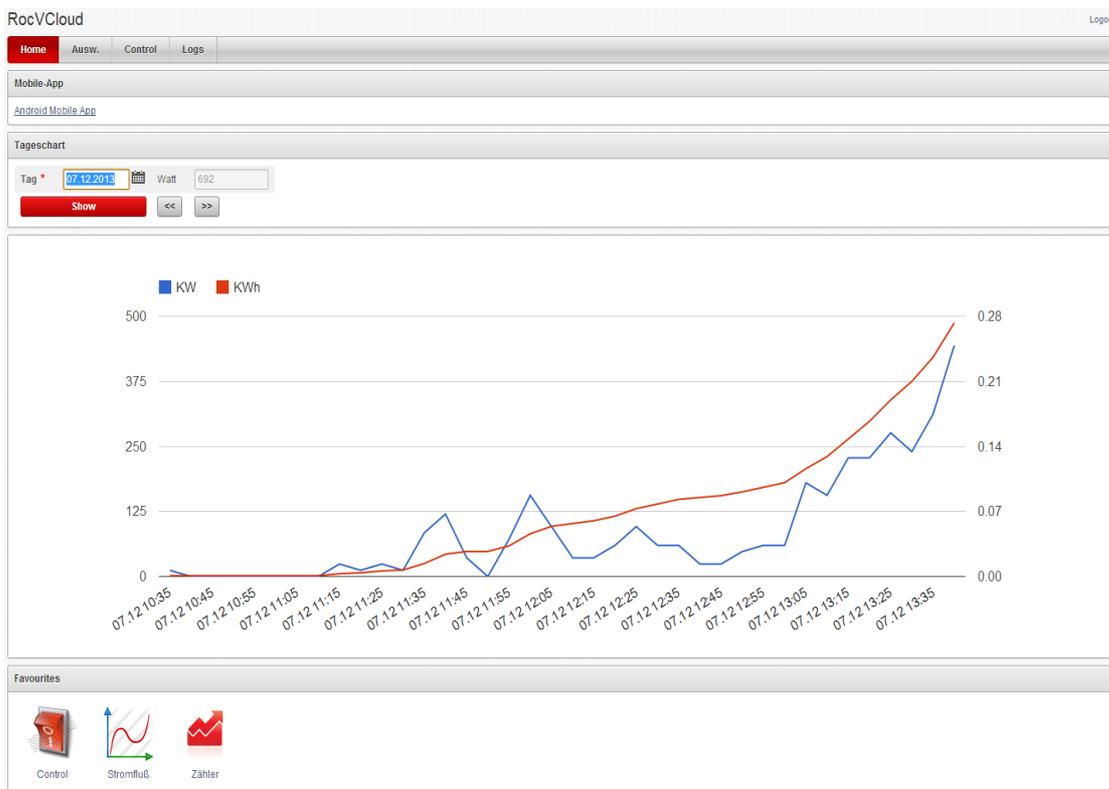


Abb. 3) Mögliche Visualisierung der Stromerzeugung durch die Photovoltaikanlage.

Voraussetzung ist, dass man eine gültige Datenbanklizenz besitzt. Mit Oracle XE (Express Edition) bietet Oracle eine Datenbankversion welche kostenlos verwendet werden kann. Diese freie Version hat einen eingeschränkten Funktionsumfang, und ist auf elf Gigabyte Benutzerdaten eingeschränkt. Für die Erfassung und Visualisierung aktueller Stromerzeugungsdaten ist der Umfang dieser Version ausreichend (Oracle Database Express Edition, 2014).

3.2 Stromverbrauchsdatenerfassung

Aufgrund der Installation einer Photovoltaikanlage werden vom Stromlieferanten zwei getrennte Zähler installiert. Einer zur Erfassung des Strombezuges vom Lieferanten, und einer zur Erfassung der Stromlieferung an den Lieferanten. Diese Zähler haben jedoch keine digitale Schnittstelle, um Daten auslesen zu können.

Daher wurden handelsübliche drei Phasen Drehstromzähler mit einer S0-Schnittstelle aus dem Elektromarkt verbaut. Die S0-Schnittstelle ist ein einfaches Protokoll, welches über einen Raspberry Pi erfasst und ausgewertet werden kann.

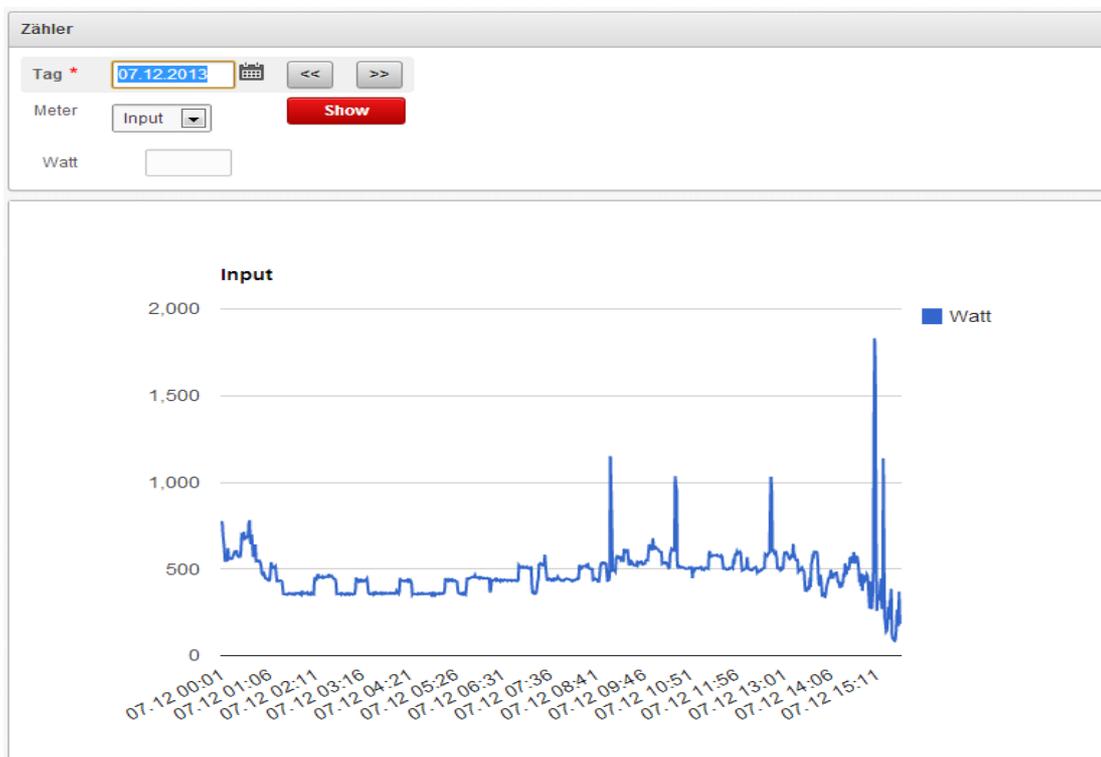


Abb. 4) Mögliche Visualisierung des Strombezuges.

Es gibt Zwei-Wege-Drei-Phasen Drehstromzähler, welche den Stromverbrauch in beide Richtungen (Bezug/Lieferung) erfassen können. Jedoch bietet die S0-Schnittstelle nur ein PWM (Pulse Width Modulation) Signal (Wikipedia Pulsweitenmodulation, 2014), womit die Richtung in welcher der Strom fließt, nicht erfassbar ist. Und somit nicht unterschieden werden kann ob die Leistung bezogen oder geliefert wird.

Daher müssen zwei Drehstromzähler verwendet werden, welche so verschaltet werden, dass einer den Verbrauch, und einer die Lieferung zählt.

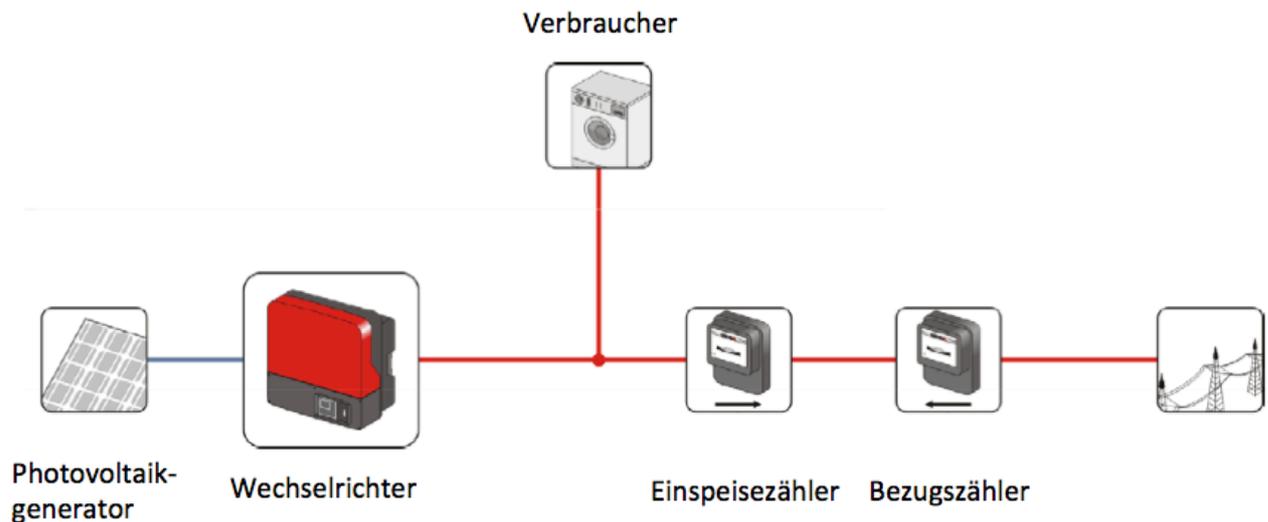


Abb. 5) Zählerkonstellation für Verbrauchs- und Bezugsmessung.

3.3 Warmwasserboiler als Energiespeicher

Wie bereits erläutert, wird aufgrund der Literatur-Recherche, ein Wärmespeicher zur Speicherung der überschüssigen Energie projiziert. Als Wärmespeicher wird ein Warmwasserboiler, welcher in jedem Einfamilienhaus vorhanden ist, verwendet. In diesem soll überschüssige Energie aus der Energieeigenproduktion gespeichert werden.

Der Warmwasserboiler wird im Normalbetrieb mit Gas betrieben. Über eine elektrische Zusatzheizung kann das Aufheizen über selbst erzeugten Photovoltaikstrom erfolgen. Damit wird das Aufheizen über die Gastherme minimiert, wodurch der Gasverbrauch sinkt, und die Kosten für Gas reduziert werden.

Ziel ist, dass das Warmwasser im Warmwasserboiler über eine elektrische Zusatzheizung aufgeheizt werden kann. Damit dies intelligent erfolgen kann, muss die Temperatur des Wassers im Boiler als Regelgröße gemessen und in das System übertragen werden. Damit kann das System anhand der Temperatur entscheiden, ob ein Aufheizen notwendig ist.

3.3.1 Regelgröße des Warmwasserboilers

Der Warmwasserboiler soll nur dann geheizt werden, wenn das Warmwasser einen definierten Temperaturwert unterschreitet. Damit diese Regelgröße in das System geführt werden kann, muss die Temperatur des Warmwasserboilers mit einem Temperaturfühler erfasst werden.

Der Warmwasserboiler wird primär über die Gastherme geheizt, diese Heizung befindet sich im unteren Teil des Boilers. In diesem Bereich befindet sich ein analoger Temperaturfühler, welcher primär an der Heizungsanlage angeschlossen ist, und auch parallel über einen Mikrokontroller ausgelesen werden kann.

Die elektronische Zusatzheizung, welche über den Strom der Photovoltaikanlage betrieben werden soll, befindet sich im mittleren Bereich des Boilers. Hier kann ein analoger Temperaturfühler zur Ermittlung der Temperatur eingeführt werden.

Welcher der beiden Temperaturfühler in Folge für die Regelung als Regelgröße herangezogen wird, ist zu untersuchen. Dabei muss untersucht werden, welchen Einfluss welche Heizung auf welchen Temperaturfühler hat, und welcher Fühler die bessere Regelgröße ist. Es ist zu beachten dass sich die Heizungen auf unterschiedlichen Ebenen im Boiler befinden. Diese Analyse kann durchgeführt werden wenn eine Erfassung der Temperaturwerte implementiert ist.

3.3.2 Messung der Gasthermenaktivität

Der Gaszähler besitzt keine Möglichkeit zum digitalen Auslesen des Verbrauches. Die Erfassung ist jedoch zur Eruiierung des verbrauchten bzw. weniger verbrauchten Gases von Interesse. Damit könnte eruiert werden, welche Einsparung die automatisierte Heizungssteuerung mit einem elektrischen Heizstab bringt.

Als Alternative kann die Temperatur des Wassers gemessen werden, welches von der Gastherme in den Boiler fließt. Durch einen Temperaturanstieg des Wassers ist erkennbar, dass die Gastherme heizt. Damit kann aufgezeichnet werden, wann und wie lange die Gastherme das Warmwasser des Boilers heizt.

3.4 Endgerätesteuerung

Das Wasser des Warmwasserboilers soll über eine elektrische Zusatzheizung geheizt werden. Damit dies von einem System automatisiert erfolgen kann, muss die elektrische Zusatzheizung vom System geschaltet werden können. Welche Möglichkeiten untersucht wurden, wird in den folgenden Kapiteln behandelt.

3.4.1 Ansatz einer Endgerätesteuerung

Um herkömmliche Geräte im Haushalt steuern zu können, gibt es Schaltelemente die sich vor die Geräte schalten lassen. Diese erhalten ihre Steuersignale zum Beispiel über Funk, oder über die Stromleitung (Power Line Communication – PLC). Diese Schaltelemente sind eine Art „Brückentechnologie“ zu den intelligenten Haushaltsgeräten – sie erlauben die Nutzung der neuen Technik auch mit herkömmlichen Geräten (Müller, 2010, S. 23).

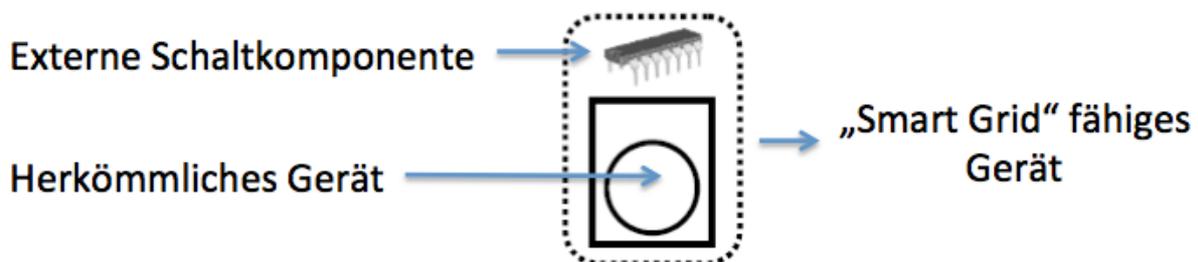


Abb. 6) Heizstab, welcher durch eine externe Komponente „Smart Grid“ fähig wird (Müller, 2010, S. 23)

3.4.2 Smart Home-Funksteckdosen der Firma SMA

Der Sunny Home Manager der Firma SMA (Hersteller von Wechselrichter für Photovoltaikanlagen) bietet die Möglichkeit Endgeräte mit proprietären Schaltern zu steuern. Die Steuerung kann über das proprietäre Web Portal erfolgen und bietet Möglichkeiten zur Programmierung (z.B. zeitgesteuert). Das Erstellen einer eigenen Regelungslogik in diesem System ist nicht möglich. Auch würden die benötigten Basisdaten, wie der aktuelle Stromverbrauch, in diesem System fehlen. Eine Integration in ein Regelsystem ist aufgrund eines fehlenden API (Application Programming Interface) nicht möglich.

Am Markt sind Lösungen mit Netzschaltern erhältlich, welche über eine Benutzeroberfläche am Computer gesteuert werden können:

- o Anbindung an den PC über proprietärer Software.
- o Steuern von Funksteckdosen beschränkt auf Typen gewisser Hersteller.

Bei den betrachteten Systemen fehlt ebenfalls ein API, welches zur Integration in ein Regelsystem benötigt wird.

3.4.3 Verwendung von beliebigen Funksteckdosen

Eine mögliche Lösung wäre die Verwendung von beliebigen Funksteckdosen unterschiedlicher Hersteller, welche im Elektrofachhandel gekauft werden können. Die gesendeten Funksignale können über einen RF (Radio Frequency) Empfänger aufgefangen und gespeichert werden, um diese bei Bedarf aus dem Speicher zu lesen und über einen RF Sender wieder zu geben.

Die Vorgangsweise, um beliebige Funksteckdosen in ein System einbinden zu, können ist folgende:

- Sendersignale der Funkfernbedienung aufzeichnen.
- Der Signalverlauf wird protokolliert und gespeichert.
- Die gespeicherten Signale können wiedergegeben werden.
- Steuerung über eigenes Programm am PC oder Raspberry Pi.

Ein Prototyp zur Steuerung von beliebigen Funksteckdosen wurde implementiert. Jedoch wurde dieser Prototyp aus folgenden Gründen nicht weiter verfolgt. Funksignale haben eine hohe Impulsdichte, in einem kurzen Zeitraum. Die Erfassung müsste daher über einen Mikrokontroller erfolgen, welcher hohe Zyklusraten in einer Echtzeitverarbeitung durchführen kann. Aufgrund des Speichermangels des Mikrokontrollers müssten die Daten über geeignete Puffer an einen Rechner gesendet werden. Das Senden der Signale müsste zeitgetreu wiedergegeben werden, womit eine Ausgabe über einen Raspberry Pi kritisch ist (Raspberry Pi bietet mit Linux kein Echtzeitbetriebssystem), und somit eine zuverlässige Steuerung nicht gewährleistet werden kann.

3.4.4 Funksteckdosen der Firma ELRO

Es wurden Funksteckdosen der Firma ELRO untersucht, welche im Elektrofachhandel erhältlich für die Heimverwendung angeboten werden. Über eine Funkfernbedienung können mehrere Funksteckdosen geschaltet werden. Varianten der Funksteckdosen sind mit einer Maximalleistung von bis zu 3000 Watt erhältlich. Damit können auch Heizstäbe gefahrlos gesteuert werden.



Abb. 7) ELRO Funksteckdose.

Zur automatisierten Steuerung über einen PC kann ein erhältliches USB Dongle-Modul verwendet werden. Zu diesem USB Dongle-Modul wird eine Software geliefert, über welche von einem Windows-PC die Funksteckdosen geschaltet werden können.

Beschreibung des Herstellers:

Zum Steuern aller Empfänger der HOME EASY und AB600 Serien.

- Ideal zum Ein/ Ausschalten der Schalter und Dimmer zu einem festgelegten Zeitpunkt über PC
- Inkl. Windows Software
- Frequenz: 433.92MHz
- Funkreichweite bis zu 50 Meter
- Signal durchdringt Fenster, Türen, Wände und Decken

- verbindbar mit allen Home Easy Unterputz- und steckfertigen Schaltern und Dimmern

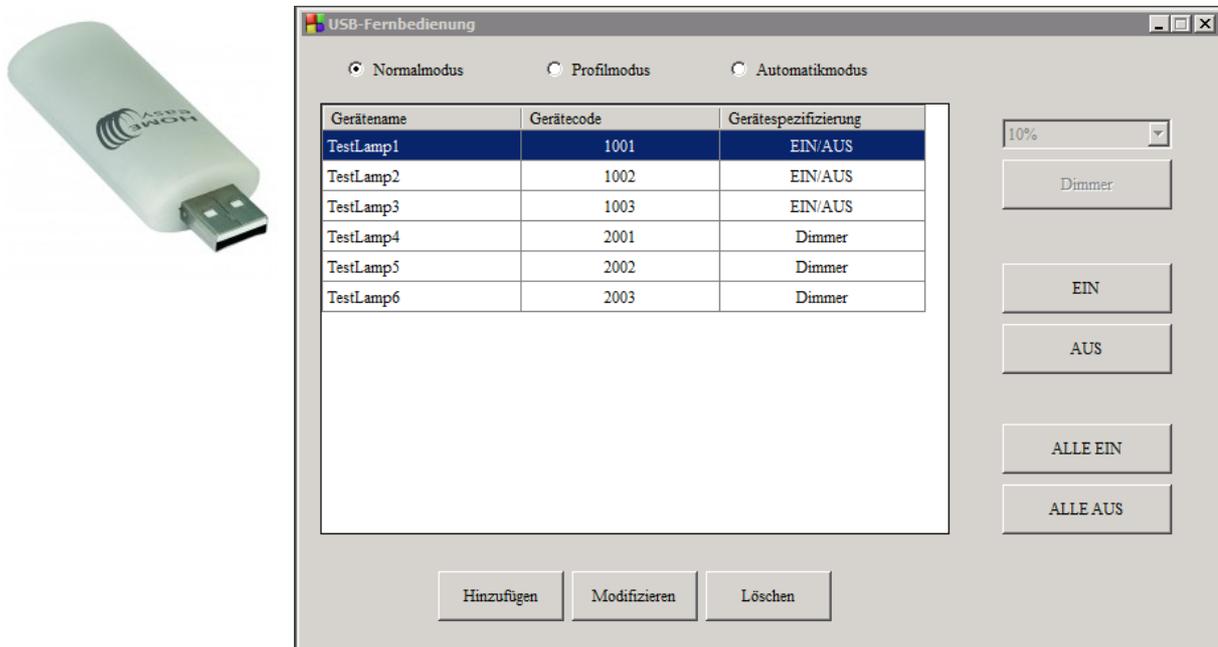


Abb. 8) ELRO USB Modul und Windows Software zur Steuerung

Die Software ist einfach gehalten und bietet keine Schnittstellen zur Kommunikation mit Fremdsystemen. Daher wurde das USB Dongle-Modul mit geringem Programmieraufwand fremdsystemtauglich gemacht werden. Das USB Protokoll wurde eruiert und ein C++ Programm mittels einer Multiplattform USB Library (HIDAPI - Multi-Platform library for communication with HID devices) implementiert. Das Programm ist auf einem Raspberry Pi lauffähig, und kann mit Standardmethoden von Linux auch von einem entfernten Rechner aufgerufen werden (Remote Program Call über SSH). Damit kann die Steuerung von Endgeräten auch von einem Steuerungsrechner erfolgen.

4 Integration der Systemkomponenten

In den vorherigen Kapiteln wurden die benötigten Teilkomponenten untersucht. Für die gewünschte Steuerung der Heizung wird ein Steuerungs- und Regelsystem benötigt, welches die Teilkomponenten zu einem Gesamtsystem zusammenführt.

Das Steuerungs- und Regelsystem bildet somit den Kern des Systems. Es benötigt zur Erfüllung seiner Aufgabe die Stromerzeugungsdaten, die Stromverbrauchsdaten, und die Daten des Energiespeichers. Aus diesen Informationen kann eine Stellgröße (Schalten der Heizung) abgeleitet werden.

Die Datenverarbeitung wird als eigene Teilkomponente des Gesamtsystems behandelt. Es dient der Erfassung und Speicherung der Daten der Teilkomponenten, und hat die Aufgabe die Daten in geeigneter und brauchbarer Form zu speichern, mögliche Störfaktoren zu filtern, und dem Steuerungs- und Regelsystem die Daten in geeigneter Form zur Verfügung zu stellen.

4.1 Datenverarbeitung

Folgende Daten werden für die automatisierte Steuerung der elektrischen Heizung des Warmwasserboilers benötigt:

- Temperatur des Warmwasserboilers
- Energieerzeugung der Photovoltaikanlage (PV)
- Energiefluss (Flow) – Strombezug oder -Lieferung von/an Netzbetreiber
- Stromverbrauch im Haushalt (Burn)

Diese Daten können, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, mit den Teilkomponenten erfasst werden. Die Teilkomponenten liefern unbehandelte Rohwerte. Die Aufgabe des Datenverarbeitungssystems soll es sein die Daten für das Regelsystem aufzubereiten, damit daraus zuverlässige Informationen gebildet werden können.

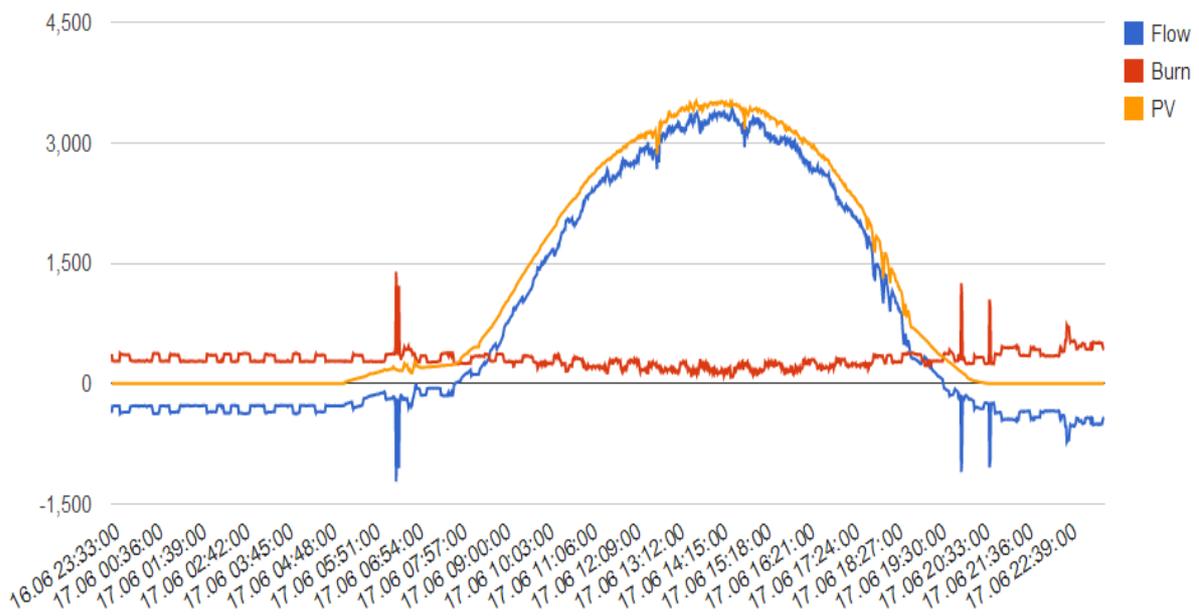


Abb. 9) Beispiel einer Visualisierung der Photovoltaikanlagenleistung, des berechneten Energieverbrauches, und des Energieflusses (Bezug oder Lieferung von/an Netzbetreiber).

Damit die Regelung bei Unregelmäßigkeiten nicht unmittelbar schaltet, wird ein gleitender Durchschnitt des Energieflusses gebildet. Dieser bildet die Regelgröße für die Regelung. Der Energiefluss wird über die drei erfassten Stromwerte (Stromeingang, Stromausgang, Photovoltaik) berechnet.

Durch die Glättung wird vermieden dass kurze Einbrüche der Stromproduktion zur Abschaltung eines aktiven und trägen Heizprozesses führen. Im umgekehrten Fall führen kurze Stromproduktionsschübe nicht zum Einschalten des Heizprozesses. Beides kombiniert unterdrückt dies ein häufiges Ein-/Auswalten des Steuerungsprozesses.

Als zusätzliche Regelgröße wird eine Tendenz des Energieflusses berechnet. Als Tendenz wird die Steigung des Energieflusswertes berechnet. Mit dieser Regelgröße kann der Algorithmus die Tendenz des Energieflusses einbeziehen. Anhand dessen kann „intelligenter“ entschieden werden ob das Einschalten des Verbrauchers sinnvoll ist.

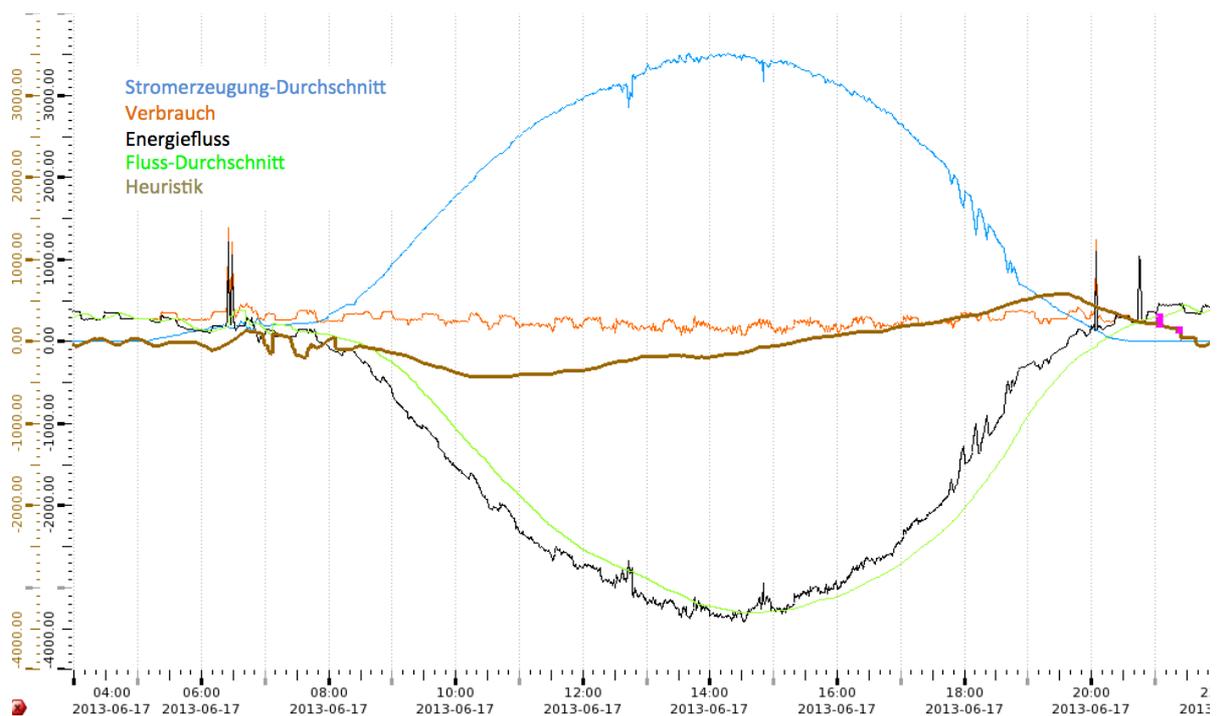


Abb. 10) Beispiel der Heuristik „Steigung des Energieflusses“ (Kurve „Heuristik“, Braune Linie).

4.2 Steuerung und Regelung

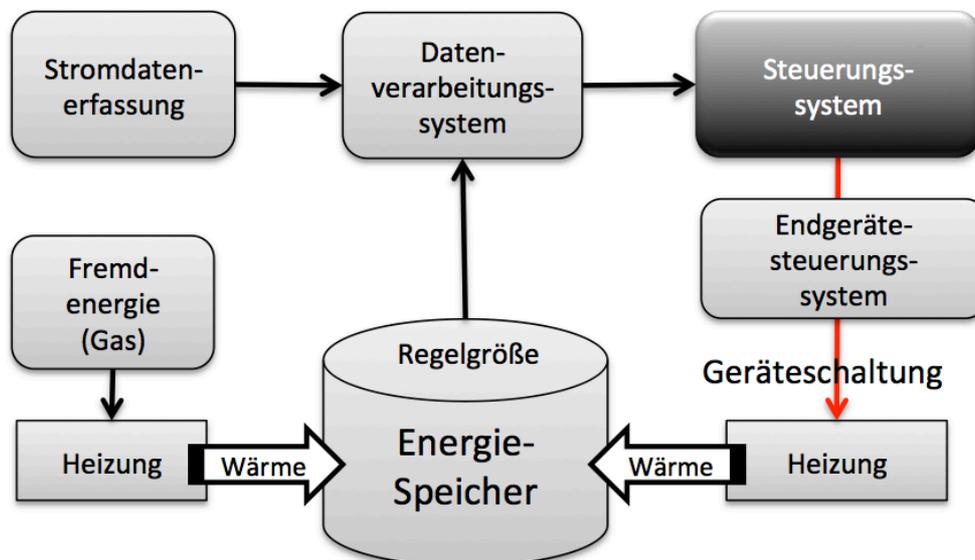


Abb. 11) Darstellung der Teilkomponenten des Regelsystems zur automatisierten Speicherung von Energie in Form von Wärme.

Die Steuer- und Regelungskomponente hat die Aufgabe die Informationen aus der Datenverarbeitungskomponente zu lesen, und in Abhängigkeit davon die Heizung ein- und auszuschalten. Das Ein- und Ausschalten läuft über die Teilkomponente der Endgerätsteuerung.

Für den Teil der Regelung kann im ersten Schritt ein einfacher Algorithmus verwendet werden. Dieser kann in weiteren Ausbaustufen durch komplexere und optimierte Algorithmen erweitert oder ausgetauscht werden.

Als vereinfacht dargestellter Ansatz eines möglichen Algorithmus als Pseudocode ergibt sich:

Wenn der Energieüberschuss $>$ Min. Energieüberschuss (Konstante) ist
 und die Regelgröße (Temperatur) $<$ Min. Temperatur (Konstante) ist
 und die Heizung nicht läuft

→ dann wird die Heizung eingeschaltet.

Wenn die Heizung läuft und der Energieüberschuss ≤ 0 ist
 oder die Regelgröße (Temperatur) \geq Zieltemperatur (Konstante)

→ dann wird die Heizung ausgeschaltet.

Der Algorithmus kann in Form einer endlosen Schleife implementiert werden, oder wenn es sich bei der Implementierung um ein ereignisgesteuertes System handelt, bei jeder Änderung einer Eingangsgröße ausgeführt werden.

Über die Konstanten kann der Algorithmus adjustiert werden. Diese können als konfigurierbare Parameter im System hinterlegt werden.

Die Konstante „Min. Energieüberschuss“ könnte auch unter- oder oberhalb der benötigten Energie des Heizstabes angesetzt werden. Wird der Wert unterhalb angesetzt, dann würde die Heizung bereits starten ohne dass genug Energie aus Eigenproduktion vorhanden ist. Mit dem Ziel, einen Großteil der Energie aus Eigenproduktion selbst zu verbrauchen, selbst wenn dabei zusätzliche Energie vom Lieferanten bezogen werden muss. Dies könnte in Summe einen besseren Ertrag bringen als den Gesamtenergieüberschuss zu einem schlechten Preis zu verkaufen, und benötigte Energie zu einem späteren Zeitpunkt teuer zukaufen zu müssen (wenn keine Energie aus Eigenproduktion zur Verfügung steht, jedoch das Heizen notwendig ist).

Zu beachten ist dass die elektrische Heizung die Gasheizung nicht komplett ersetzen kann. Die elektrische Heizung soll grundsätzlich nur betrieben werden, wenn Energie aus der Photovoltaikanlage bezogen werden kann.

Dadurch, dass die Gasheizung im unteren Bereich, und die elektrische Heizung im mittleren Bereich des Boilers liegt, können die beiden Heizungen nicht ohne Wechselwirkungen miteinander kombiniert werden. Die Regelung der Gasheizung kann nicht direkt beeinflusst werden, da es sich um eine eigenständige Regelung ohne Anschlüsse zur Steuerung oder Überwachung handelt. Die Regelung wird jedoch indirekt durch das Aufheizen des Wassers beeinflusst.

Das über die Gasheizung erwärmte Wasser im unteren Bereich vermischt sich mit dem oberen Bereich. Das über die elektrische Heizung erwärmte Wasser im mittleren Bereich vermischt sich mit dem unteren Wasser. Daher ist bei elektrischem Heizungsbetrieb das Wasser im unteren Bereich unter der Heizgrenze der Gasheizung.

Die Abbildungen zeigen, wie die elektrische Heizung aufgrund der Unterschreitung des Temperaturfühlerwertes von 115 und einem definiertem Überschuss an Photovoltaikstrom eingeschaltet wurde.

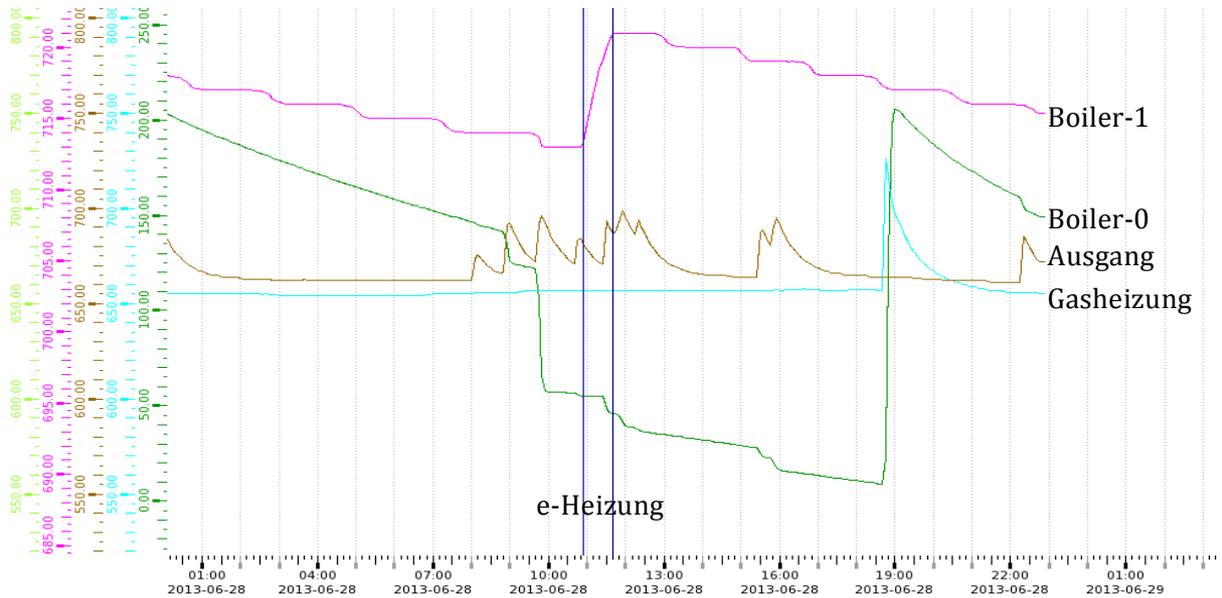


Abb. 12) In dieser Abbildung ist ersichtlich dass das Heizen über die elektrische Heizung (Kurve „e-Heizung“, Farbe Blau) einen wesentlich Einfluss auf die Warmwassertemperatur im oberen Bereich (Kurve „Boiler-1“, Farbe Magenta), jedoch wenig Einfluss auf die Warmwassertemperatur im unteren Bereich (Kurve „Boiler-0“, Farbe Grün) hat.

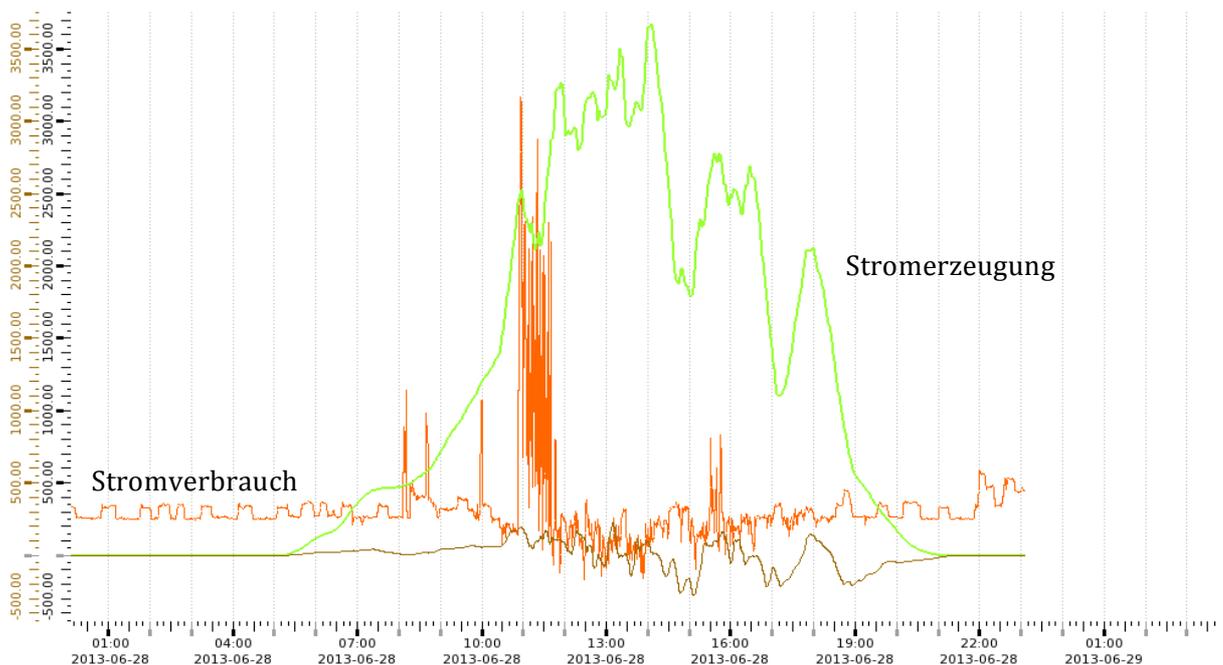


Abb. 13) Zeigt die Rückkopplung der eingeschalteten elektrischen Heizung (siehe Abb. 15) auf den Stromverbrauch (Kurve „Stromverbrauch“, Farbe Orange).

Es muss untersucht werden welchen Einfluss die elektrische Heizung auf das Heizverhalten der Gasheizung hat, bzw. ob aufgrund der elektrischen Heizung die Gasheizung in einem niedrigeren Temperaturbereich betrieben werden kann.

Zu beachten ist, dass das Warmwasser zumindest einmal täglich auf 60° geheizt werden sollte, damit eine Bakterienbildung wie z.B. von Legionellen verhindert wird.

4.3 Optimierungsmöglichkeiten

Über den Temperaturfühler des Warmwasserausganges des Boilers kann eruiert werden, ob aktuell warmes Wasser entnommen wird. Diese Information könnte zusätzlich zur Warmwassertemperatur herangezogen werden um den Einschaltpunkt der Heizung zu optimieren.

Langzeittagesprognosen könnten einen Heizungsstart ermöglichen, bevor Warmwasser verbraucht wird. Exemplarisch: Wird jeden Abend zu ähnlichen Zeiten geduscht, dann könnte der Boiler bei überschüssig vorhandener Energie unter Tags vor-/überheizt werden.

Dies ist eine sehr grobe Überlegung einer möglichen Optimierung der Heizungssteuerung. Im Detail wurde der Ansatz der Optimierung über Langzeitauswertungen nicht untersucht. Dies bedarf einer eigenen Untersuchung und würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten.

5 Laborversuch und Ergebnis

Die elektrische Heizunterstützung wurde über einen Zeitraum von einer Woche manuell betrieben und die Messwerte aufgezeichnet. Um den Zeitpunkt des Ein- und Ausschaltens der elektrischen Heizung zu eruieren, wurde die implementierte Visualisierung herangezogen. Diese stellt die Temperatur des Warmwassers im Boiler, der Stromproduktion der Photovoltaikanlage, und den aktuellen Stromverbrauch dar.

Als Metrik zur Beurteilung der automatisierten Steuerung wurde die Frequenz der Herzperioden der Gasheizung herangezogen. Daraus kann geschlossen werden, welchen Erfolg die Steuerung in Bezug auf den Energiekostenhaushalt haben kann.

Die Frequenz der Gasheizung wurde über den Warmwasserausgang der Gastherme, welcher in den Wasserboiler führt, überwacht. Durch die Überwachung und Aufzeichnung dieser Temperaturwerte ist ersichtlich wie oft und in welcher Intensität die Gastherme unterstützend heizen musste, um das Warmwasser auf dem gewünschten Niveau zu halten.

Ergebnis des Vergleiches der Frequenz der Gas-Heizung:

- Ohne e-Zusatzheizung 19 Gas-Heizperioden
- Mit e-Zusatzheizung 5 Gas-Heizperioden
(davon zwei mit geringer Intensität)

Dies bedeutet dass in fünf notwendigen Fällen der Warmwasseraufheizung nicht genug Stromüberschuss zur Verfügung stand, in Folge dessen das Warmwasser mit Gasenergie geheizt werden musste. In 19 notwendigen Fällen war genug eigenproduzierter Strom zur Verfügung, um das Wasser elektrisch aufzuheizen. Dies entspricht einer Senkung der Warmwasserheizkosten auf ~26%, einer Ersparnis von 74%.

Die Zeitskala ist bei den abgebildeten Auswertungen gleich und zeigt das Ergebnis über den beobachteten Zeitraum. Der Warmwasserverbrauch war in beiden Beobachtungsräumen im Haushalt ohne signifikante Unterschiede.

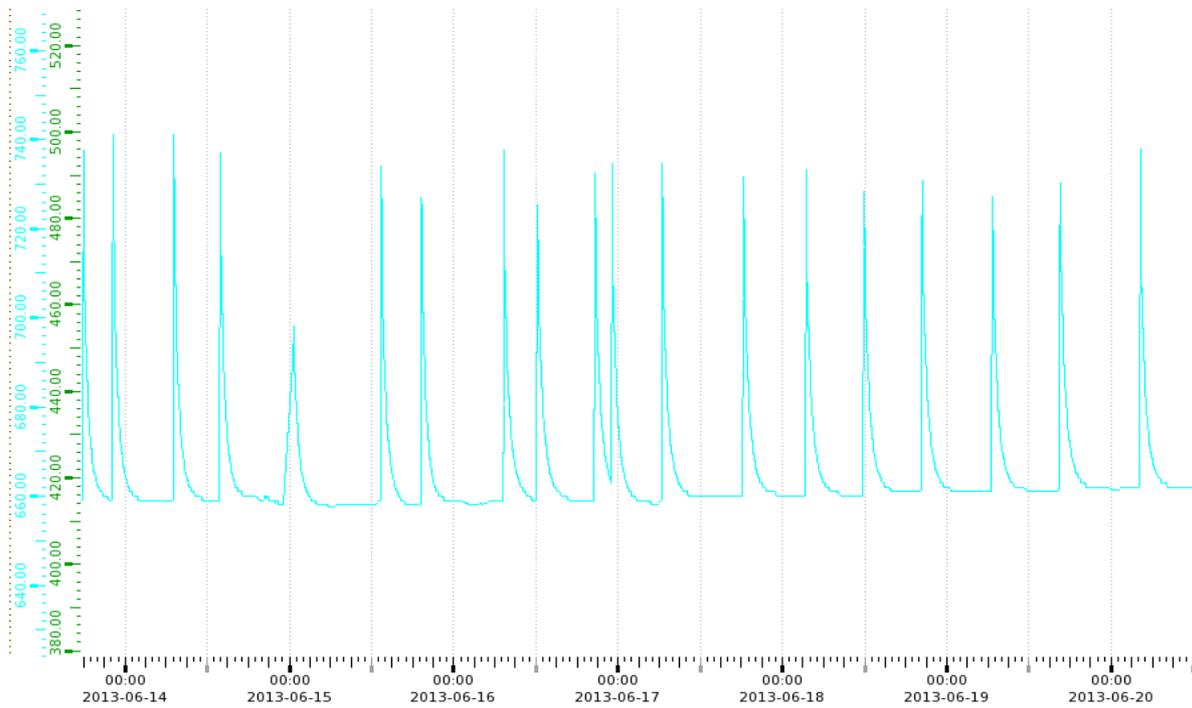


Abb. 14) Aktivität der Gasheizung in der Periode ohne E-Heizunterstützung.

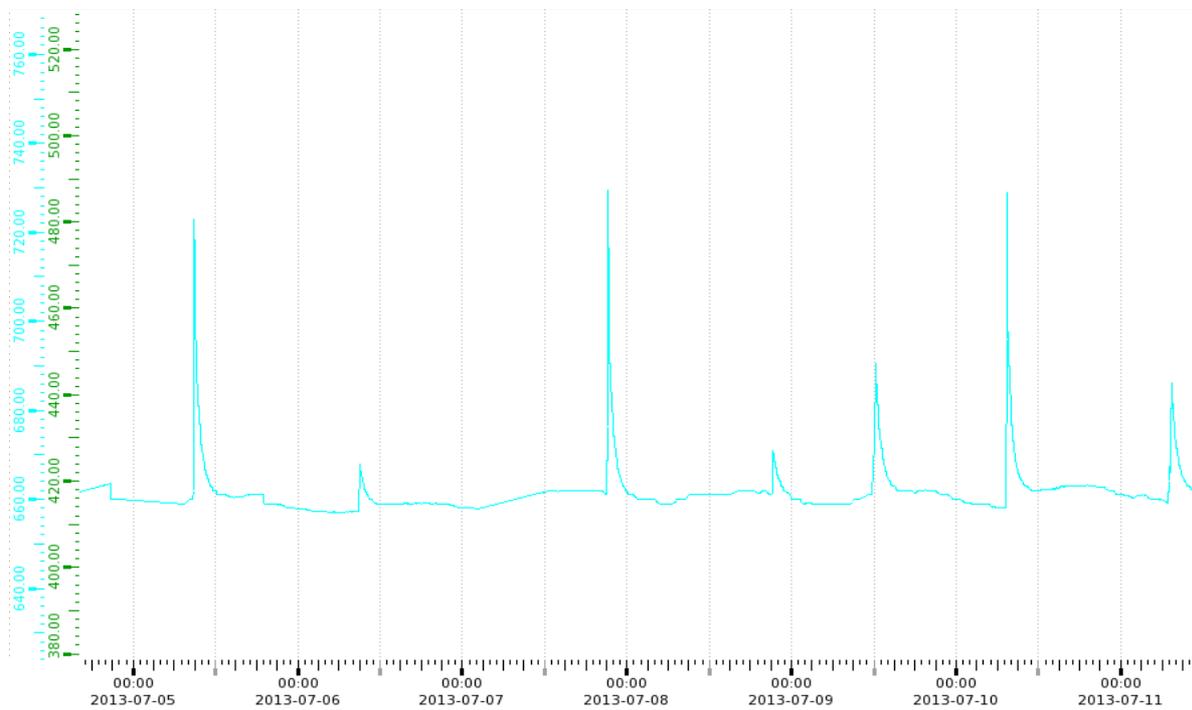


Abb. 15) Aktivität der Gasheizung in der Periode mit E-Heizunterstützung.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Verbrauch des Stromes aus Eigenproduktion, welche Arten des Eigenverbrauches möglich sind, und wie dieser Eigenverbrauch durch Smart Home und Smart Metering erhöht und optimiert werden kann.

Durch die zunehmende Verbreitung von stromproduzierenden Anlagen (vornehmlich Photovoltaikanlagen) nehmen die Vergütungen für in das Stromnetz eingespeisten Strom ab. Eine Stromparität ist nicht gegeben, da der Ertrag von eigenerzeugtem Strom unter dem Preis von zugekauftem Strom liegt. Durch die Erhöhung des Eigenverbrauches kann diesem Zustand entgegengewirkt werden, da dem Verbrauch von eigenerzeugtem Strom ein Ertrag in der Höhe von zugekauftem Strom gegenübergestellt werden kann.

In der Arbeit wurde eruiert, wo sinnvolle Möglichkeiten des automatisierten Eigenverbrauches liegen, und wie dieser Eigenverbrauch mit einem Regelungssystem gesteuert werden kann. Die Studie von wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Literatur führte zum gewählten Ansatz „Verbrauch durch Nutzung in Form von thermischer Energie“. Die Recherche erbrachte, dass die aktive Verbrauchsanpassung ein wesentlicher Kernpunkt ist, um die Netzparität zu erreichen. Eine manuell, durch den Verbraucher, gesteuerte Anpassung des Verbrauches kann durch Schaffung von Bewusstsein über die Kosten und des Ertrages erfolgen. Dies kann durch Visualisierung der Kosten und des Ertrages über Smart-Home Systeme unterstützend erfolgen. Ein nachhaltiges Ändern des Verbrauches ist aufgrund der Unregelmäßigkeit des produzierten Stromes schwer bzw. nur in bedingtem Maße, und in bestimmten Bereichen, möglich. Eine automatisierte Steuerung von regelmäßig notwendigen Verbrauchern kann durch Smart Home-Systeme mit einer aktiven Steuerung erfolgen. Zur Analyse, wie sich ein Steuerungssystem in diesem Bereich umsetzen lassen kann, wurde ein Prototyp zur Erfassung von relevanten Daten umgesetzt. Aus den gewonnen Daten konnte eine automatisierte Steuerungsmöglichkeit einer thermischen Heizung abgeleitet werden.

Für eine Umsetzung wurde eruiert, welche bestehenden Lösungen oder Teillösungen für ein derartiges Smart Home-System mit integriertem Smart Metering sich eignen, und in welchen Bereichen neue Lösungen geschaffen werden müssen. Dies umfasst die Schaffung von drei wesentlichen Informationen: Stromverbrauch,

Stromproduktion, und daraus abgeleitet der Stromfluss (Lieferung/Verkauf oder Bezug/Einkauf von Strom).

Mit Hilfe dieser Informationen können über ein System automatisierte Aktionen gesetzt werden, um Strom einzusetzen und zu verbrauchen, wo es notwendig ist. Im Fokus steht eine optimierte Steuerung, durch welche der Eigenverbrauch zum Zeitpunkt erfolgt, wenn eigenproduzierter Strom im Überfluss vorhanden ist, und diese Energie für einen Vorgang verwendet werden kann, wo Energie benötigt wird. Der Einsatz dieser Energie kann ebenso anstatt eines anderen Energieträgers erfolgen, womit zum Beispiel der Verbrauch von Gas reduziert werden kann.

Das Ergebnis der Arbeit ist ein umsetzbarer Lösungsweg für die Erstellung eines Systems, welches durch das automatisierte Steuern einer elektrischen Heizung eines thermischen Speichers den Eigenverbrauch, von selbst erzeugtem Strom, erhöht. Um einen Beitrag zur Stromparität im Eigenheim zu leisten, wird der Verbrauch von alternativer Energie (Gas) zur Beheizung wird reduziert.

Ein weiterer Aspekt des Lösungsweges sind die Investitionskosten. Diese sollen gering gehalten werden, sodass die Amortisation des Investments der Anlage und des Steuerungssystems nicht den Nutzen des Eigenverbrauches wesentlich mindert. In dieser Arbeit wurde für die Analyse und für die Erarbeitung der automatisierten Steuerung auf Komponenten aufgesetzt, welche für Smart Home-Automatisierung verfügbar sind. Auf industrielle Komponenten wurde so weit wie möglich, aufgrund der Kosten, verzichtet. Eingesetzte industrielle Komponenten (Oracle Datenbank, Prozessleitsystem) wurden für die Findung des Lösungsweges verwendet. Für die Umsetzung der gefundenen Lösung können alternative und frei verfügbare Komponenten verwendet werden.

In einem Laborversuch wurde über einen Zeitraum das Aufheizen eines thermischen Warmwasserspeichers, nach den Erkenntnissen wie eine automatisierte Steuerungslogik ablaufen könnte, manuell durchgeführt. Durch die Erfassung der Heizperioden eines Vergleichszeitraumes mit Gasenergie, und der Erfassung der Heizperioden aus dem Laborversuch, konnte gemessen werden, dass die Gasheizaktivitäten auf ein fünftel reduziert wurden.

7 Literaturverzeichnis

- Kalt, G. & Baumann, M (2013): Modellierung zukünftiger Entwicklungen des Haushaltsstromverbrauchs im Kontext von Time-of-use-Tarifen, Load-shifting, Elektromobilität und Energieeffizienz: Internationale Energiewirtschaftstagung 2013 an der TU Wien, Wien.
- Hoberg, A; Piele, C. & Veit, J. (2013): Mobiles Lernen für Smart Home/Smart Grid. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Heft 291, Sonderdruck.
- Westermann, D.; Döring, N. & Bretschneider P. (Hrsg.) (2013): Smart Metering. Zwischen technischer Herausforderung und gesellschaftlicher Akzeptanz - Interdisziplinärer Status Quo, Band 4, Universitätsverlag Ilmenau.
- Müller K.; (2010): Sicherheit in vernetzten Systemen, Workshop, Firma Secorvo Security Consulting GmbH, Karlsruhe.
- Hillemacher, L.; Eßer-Frey, A. & Fichtner, W. (2011): Preis- und Effizienzsignale im MeRegio SmartGrid Feldtest - Simulationen und erste Ergebnisse, Internationale Energiewirtschaftstagung 2011 an der TU Wien, Wien.
- Bost, M.; Hirschl, B. & Aretz A. (2011): Effekte von Eigenverbrauch und Netzparität bei der Photovoltaik. Studie im Auftrag von Greenpeace Energy eG, Langfassung, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
- Huber, M.; Sängler, F. & Hamacher T. (2013): Das „Post-EEG“-Potenzial von Photovoltaik im privaten Strom- und Wärmesektor. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 2013 Heft 9
- Wachenfeld V.; Engel, B. & Rothert, M. (2009): Leistungselektronik von PV Anlagen nach Erreichen der „Grid Parity“, Conference Paper, Internationaler ETG Kongress 2009
- Wikipedia Pulsweitenmodulation (2014):
<http://de.wikipedia.org/wiki/Pulsweitenmodulation>
- Wikipedia Voltage Divider (2014): http://en.wikipedia.org/wiki/Voltage_divider
- Wikipedia Legionellen (2014): <http://de.wikipedia.org/wiki/Legionellen>
- SMA Hersteller (2014): www.sma.de, abgerufen am 13.02.2014, 20:00 Uhr
- SMA Web-Portal (2014): www.sunnyportal.com, abgerufen am 13.02.2014, 20:00 Uhr
- SMA Spot (2014): Software zum Auslesen der SMA Bluetooth-Schnittstelle,
<https://code.google.com/p/sma-spot/>, abgerufen am 13.02.2014, 20:00 Uhr
- SMA Bluetooth (2014): Software zum Auslesen der SMA Bluetooth-Schnittstelle,
<https://code.google.com/p/sma-bluetooth/wiki/Installation>, abgerufen am 13.02.2014, 20:00 Uhr

Oracle Database Express Edition (2014):

<http://www.oracle.com/technetwork/database/database-technologies/express-edition>, abgerufen am 13.02.2014, 20:00 Uhr

ELRO Funk Steckschalter (2014): <http://www.elro.eu/de/produkte/cat/home-automation/home-easy-next/empfaenger-on-off2>, abgerufen am 13.02.2014, 20:00 Uhr

ELRO-USB-Dongle-Modul (2014): <http://www.elro.eu/de/produkte/cat/home-automation/home-easy-next/sender2/fernbedienbarer-pc-usb-dongle>, abgerufen am 13.02.2014, 20:00 Uhr

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift