

Eigenverbrauchsoptimierung in Mehrparteienhäusern mit Mieterbeteiligung

Lukas GAISBERGER, Philipp RECHBERGER*

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

*Franz Fritsch Straße 11/Top 3, 4600 Wels, philipp.rechberger@fh-wels.at, +43 5 0804 46914

Kurzfassung:

Durch die EIWOG-Novelle 2017 wurde die gemeinsame Nutzung der Energie aus hauseigenen Erzeugungsanlagen durch die Parteien eines Wohnhauses ermöglicht [EIWOG, 2010]. In dieser Arbeit wurde das Energiekonzept eines beispielhaften großvolumigen Wohnbaus analysiert und das Verbesserungspotential verschiedener Lastregelungsstrategien zur Verbrauchsoptimierung getestet. Dafür wurde ein Simulationsmodell der Heizungs- und Elektroanlagen erstellt. Dieses wurde unter Anwendung verschiedener Energiemanagement-Algorithmen simuliert und die Ergebnisse aus diesen Simulationen analysiert. Durch die Einführung eines Mieterstrommodells kann der Eigenverbrauch mit den ausgewählten Komponenten der Erzeugungsanlage und dem vorliegenden Gebäude unabhängig von der Regelungsstrategie um ca. 30 % erhöht werden. Der Eigenverbrauchsanteil erreicht damit ca. 99 %. Mit einer COP-Optimierten Regelung konnte der Anteil der elektrischen Wärmeerzeuger an der gesamten Wärmebereitstellung von ca. einem Viertel auf knapp über 50 % erhöht werden.

1 Mieterstrommodell

Derzeit stellt das Mieterstrommodell der „kaufmännisch-bilanziellen Weitergabe der PV-Erträge an Haushalte“ [Amann, 2016] das vielversprechendste Mieterstrommodell dar. Dieses Modell verlangt, dass alle beteiligten Zählpunkte mit Smart Metern ausgestattet sind, welche eine Viertelstundenmessung liefern. Der überschüssige Strom nach Versorgung des Allgemeinbereichs wird dann anhand eines Verteilschlüssels auf die Bewohner aufgeteilt. Die zugeteilte Energie aus der Erzeugungsanlage wird bei der Verrechnung vom gemessenen Verbrauch im jeweiligen Zählpunkt abgezogen. Für die Einführung eines solchen Modells ist eine gesetzlich vorgeschriebene Gebühr an den Netzbetreiber zu entrichten. Die Erzeugungsanlage wird am Allgemenstromzähler eingebunden. Dies lässt eine „kaufmännisch-bilanzielle Weitergabe der PV-Erträge an Haushalte“ zu, wobei die Priorisierung des Allgemenstrombedarfs automatisch gegeben ist.

Der Verteilschlüssel bildet den Kernpunkt dieses Mieterstrommodells. In Tabelle 1 sind drei verschiedene Varianten für Verteilschlüssel mit Vor- und Nachteilen aufgelistet.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Aufteilungsschlüsseln

	Anteilsart	Vorteile	Nachteile
Statisch	Relativ, Überschuss	Einfach, gerecht: jeder bekommt bestimmten Anteil	geringer Eigenverbrauch
Dynamisch	Relativ, Verbrauch	Maximaler Eigenverbrauch	Ungerecht: Größter Verbraucher hat größten Vorteil
Komplex	Primär nach Überschuss, sekundär nach (Rest-)Verbrauch	Maximaler Eigenverbrauch, trotzdem relativ faire Aufteilung	Aufwändig, zusätzliche Instanz nötig (evtl. Mehrkosten)

Die statische Aufteilung erfolgt nach einem vordefinierten Anteil der Überschussleistung. Es kann dabei der Fall eintreten, dass ein Bewohner / eine Bewohnerin Strom ins Netz einspeist, während die anderen Strom zukaufen müssen. Diese Variante eignet sich beispielsweise, wenn die BewohnerInnen sich bei der Investition beteiligen.

Ein dynamischer Verteilschlüssel liegt vor, wenn der Überschussstrom nach Verbrauch aufgeteilt wird. Dies führt dazu, dass jede Wohneinheit den gleichen Anteil ihres Verbrauchs mit Strom aus der gemeinschaftlichen Erzeugungsanlage decken kann. Es wird nur Energie ins Netz eingespeist, wenn alle Zählpunkte zu 100 % versorgt sind.

Die Idee hinter einem komplexen Verteilschlüssel ist eine Kombination aus statischem und dynamischem Modell. Der Strom wird primär beispielsweise nach Investitionsanteil oder Wohnungsgröße aufgeteilt. Sekundär kann die Verteilung nach Verbrauch oder Restverbrauch stattfinden. Abhängig von den Rahmenbedingungen der Finanzierung der Anlage kann der Reststrom dann gebäudeintern gehandelt werden. Diese Varianten verursachen jedoch einen zusätzlichen Berechnungsaufwand, für den möglicherweise eine zusätzliche Instanz nötig ist und erhöhte Kosten anfallen.

2 Gebäudetechnische Rahmenbedingungen

Die Wohnanlage, welche das Vorbild für die Simulationen darstellt, wurde 2018 erbaut. Auf einer Bruttogrundfläche von rund 11 000 m² befinden sich 133 Wohneinheiten. Die Wärmebereitstellung erfolgt in diesem Gebäudekomplex mittels Gas-Brennwertkessel und Wärmepumpe, welche abhängig von einer fixierten Bivalenztemperatur gesteuert werden. Als thermische Speicher dienen vier Pufferspeicher auf zwei verschiedenen Temperaturniveaus sowie eine hydraulische Weiche, welche für einen Ausgleich der Massenströme zwischen Heizungskreis und Wärmepumpe sorgt. Die Wärmespeicher sind zusätzlich mit elektrischen Heizstäben ausgestattet. Außerdem ist eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher installiert.

3 Zielsetzung

Im konkreten Fall der betrachteten sozialen Wohnanlage sollte die Nutzung der gemeinschaftlichen PV-Anlage zum Vorteil der Mieter in Form einer Energiekostensparnis optimiert werden. Ein komplexer Verteilschlüssel, durch welchen der Überschussstrom

optimal genutzt wird, ist in diesem Fall zu empfehlen, jedoch aufgrund aktueller rechtlicher und regulatorischer Unklarheiten sowie administrativem Aufwands im gegenständlichen Projekt nicht umsetzbar. Da die Erzeugungsanlage über die Errichtungskosten finanziert wird, ist der gebäudeinterne Stromhandel bei dieser Wohnanlage nicht zielführend. Vielmehr sollte die Nutzung der PV-Energie im Allgemeinbereich maximiert und der Überschussstrom kostenlos an die Mieter abgegeben werden.

Es wurde deshalb versucht mittels unterschiedlicher Regelungs- und Priorisierungskonzepte der Allgemeinverbraucher, insbesondere der Wärmepumpe und der Elektroheizstäbe, den Allgemeinteil des Eigenverbrauchs zu optimieren. Hierfür wurden detaillierte Simulationen durchgeführt.

4 Simulationsumgebung

Um verschiedene Regelungskonzepte und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch und -bezug zu testen, wurde ein Simulationsmodell des Gebäudeenergiesystems erstellt. Dafür wurden neue Verbrauchsprofile für den Haushaltsstrombedarf und den Warmwasserbedarf definiert. Die wichtigsten Komponenten und Parameter der Heizungsanlage, wie sie im Modell angenommen wurden, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Wichtige Komponenten und Parameter der Heizungsanlage

Heizwärmeverbrauch	400	MWh/a
Warmwasserenergiebedarf	229	MWh/a
Gas-Brennwertkessel	2 x 200	kW
Wärmepumpe	130	kW _{th}
PV Anlage	103	kW _p
Batteriespeicher	115	kWh
Heizungs-Pufferspeicher	1 m ³ @ 45°C	
Warmwasser-Pufferspeicher	2 - 6 m ³ @ 50°C & 70°C	
Elektro-Heizstäbe	5 x 6	kW
Allgemeinstrombedarf	16	MWh/a
Haushaltsstrombedarf	430	MWh/a

Der oben angegebene Heizwärmeverbrauch des Gebäudes ist ein Durchschnittswert, da er durch ein Gebäudemodell bestimmt ist und geringfügig mit den verschiedenen Regelungsstrategien schwankt. Der Bauträger hat sich trotz höherem Flächenpotentials aus wirtschaftlichen Gründen entschieden, nur die Parkplätze mit einer Photovoltaikanlage zu überdachen. Durch die Wahl leistungsfähigerer Modultypen kann dort eine Anlage mit 103 kW_p installiert werden. Das gesamte Simulationsmodell wurde in Simulink mithilfe der Carnot-Toolbox erstellt. Es ist so aufgebaut, dass die Komponenten eine eigene Regelung aufweisen, jedoch von einem übergeordneten Regelungsalgorithmus aktiviert werden. Dadurch können verschiedene Regelungsstrategien durch Ersetzen dieser übergeordneten Regelung getestet werden.

Das Energiesystem des Gebäudes wurde anhand des Heizungsanlagenschemas in Simulink modelliert. Die verwendeten Komponenten basieren auf physikalischen Modellen um das System möglichst realitätsgetreu nachzubilden. Es wurden verschiedene Vereinfachungen getroffen, um die Komplexität und damit die Simulationszeit in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Die dadurch hervorgerufenen Auswirkungen auf die gesamte Energiebilanz sind jedoch minimal. In Abbildung 1 ist das Simulink-Modell des Gebäudeenergiesystems dargestellt.

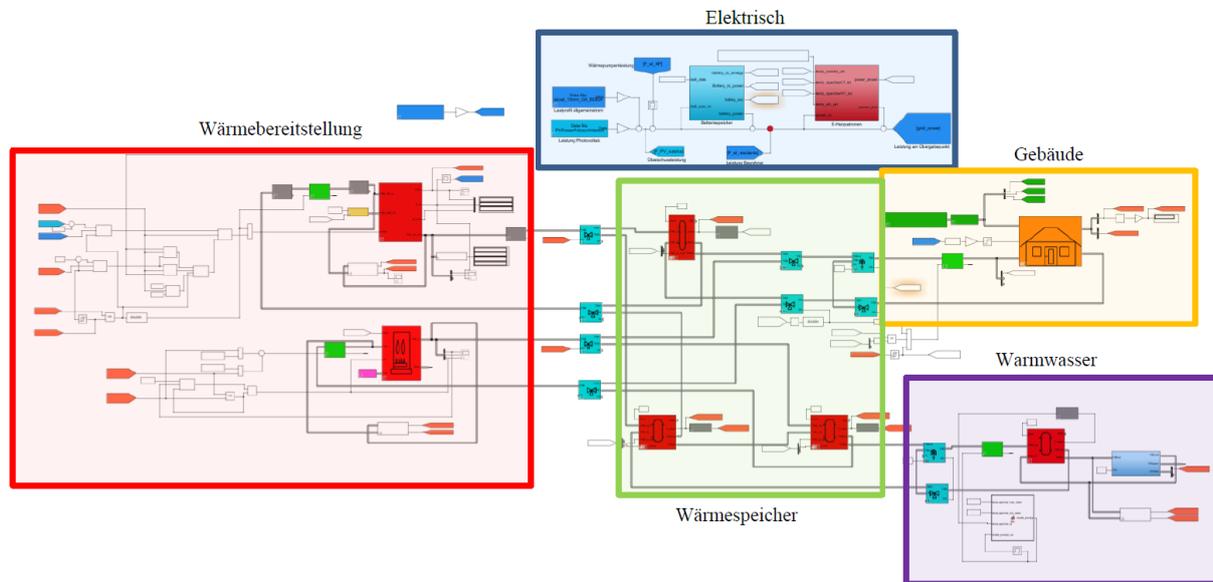


Abbildung 1: Modell des Gebäudeenergiesystems in Simulink

Der Bereich Wärmebereitstellung enthält die beiden Brennkessel, welche zusammengefasst wurden sowie die Wärmepumpe und die zugehörige Komponentenregelung. Für die Modellierung des Gebäudes wurde ein 1-Knoten-Modell herangezogen. Die Wärmeverluste des Gebäudes werden abhängig von Wetterdaten, Innentemperatur und zugeführter Heizleistung für jeden Zeitschritt berechnet. Zusätzlich wird dem Gebäude das modifizierte elektrische Lastprofil der Bewohner in Form von internen Wärmegewinnen zugeführt. Dadurch wird eine vereinfachte Modellierung der Anwesenheit erreicht. Das Warmwasser-Zapfprofil, wie auch das elektrische Lastprofil der Haushalte wurden mithilfe der Software *LoadProfileGenerator* [Pflugradt, 2017] erstellt und anschließend überprüft. Für das elektrische Lastprofil des Allgemeinbereichs wurde ein Standardlastprofil verwendet.

Der elektrische Bereich des Modells ist in Abbildung 2 detailliert dargestellt. Dort werden die Erzeugung, der Verbrauch, die Speicherung im Batteriespeicher sowie der Netzbezug und die Netzeinspeisung verarbeitet.

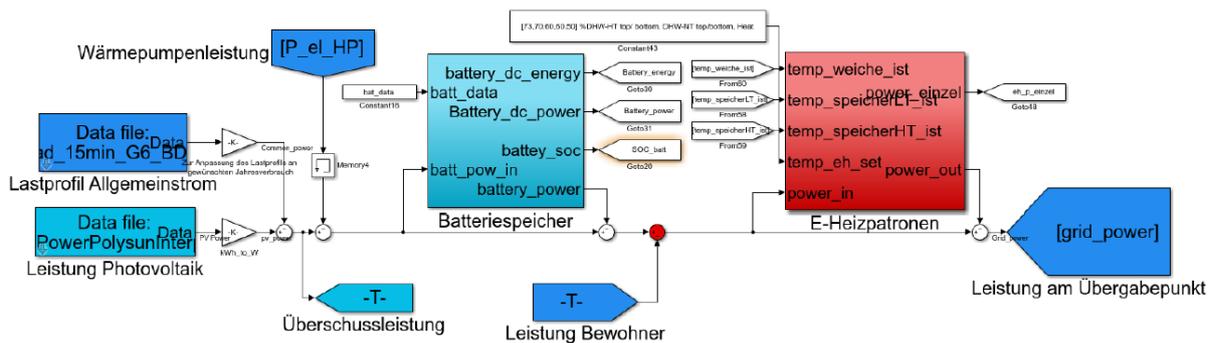


Abbildung 2: Ausschnitt des elektrischen Bereichs aus dem Gesamtmodell

Die Simulationen wurden jeweils über ein Jahr mit variabler Schrittweite simuliert, wobei die Ergebnisse mit einer Auflösung von 5 Minuten exportiert wurden. Da die Erzeugungs- und Lastprofile mit unterschiedlichen Zeitschrittweiten zur Verfügung standen, wurden die dazwischenliegenden Werte interpoliert.

4.1 Regelungsstrategien

Insgesamt wurden drei Lastregelungsstrategien analysiert. Davon ist eine die Standardregelung, welche eine Referenz für Vergleiche mit den anderen, verbesserten Regelungsstrategien darstellen soll. Die zweite Regelungsstrategie hat das Ziel, den Eigenverbrauch der Energie aus der Photovoltaikanlage zu steigern. In Regelung 3 werden die Kosten für Strom und Gas berücksichtigt, um somit das finanzielle Optimum für die Gebäudeenergieversorgung zu erreichen. In Abbildung 3 sind die drei Regelungsstrategien kurz zusammengefasst.

Die drei Strategien unterscheiden sich prinzipiell im Betrieb der Wärmepumpe. Primär wird die erzeugte Energie für die Versorgung der allgemeinen Stromverbraucher wie beispielsweise Beleuchtung, Lifte und Haustechnik verwendet. Daran nachgeschaltet ist der Batteriespeicher, welcher den Überschuss aufnimmt und für die spätere Verwendung durch Allgemeinverbraucher und Wärmepumpe bereithält. Die Wärmepumpe ist jedoch in allen Strategien unterschiedlich geregelt, wobei hier der Fokus auf die effiziente Nutzung der PV-Energie gelegt wurde. Durch die gewählte hydraulische Einbindung wird die Wärmepumpe sowohl für die Bereitstellung von Warmwasser als auch Heizenergie eingesetzt.

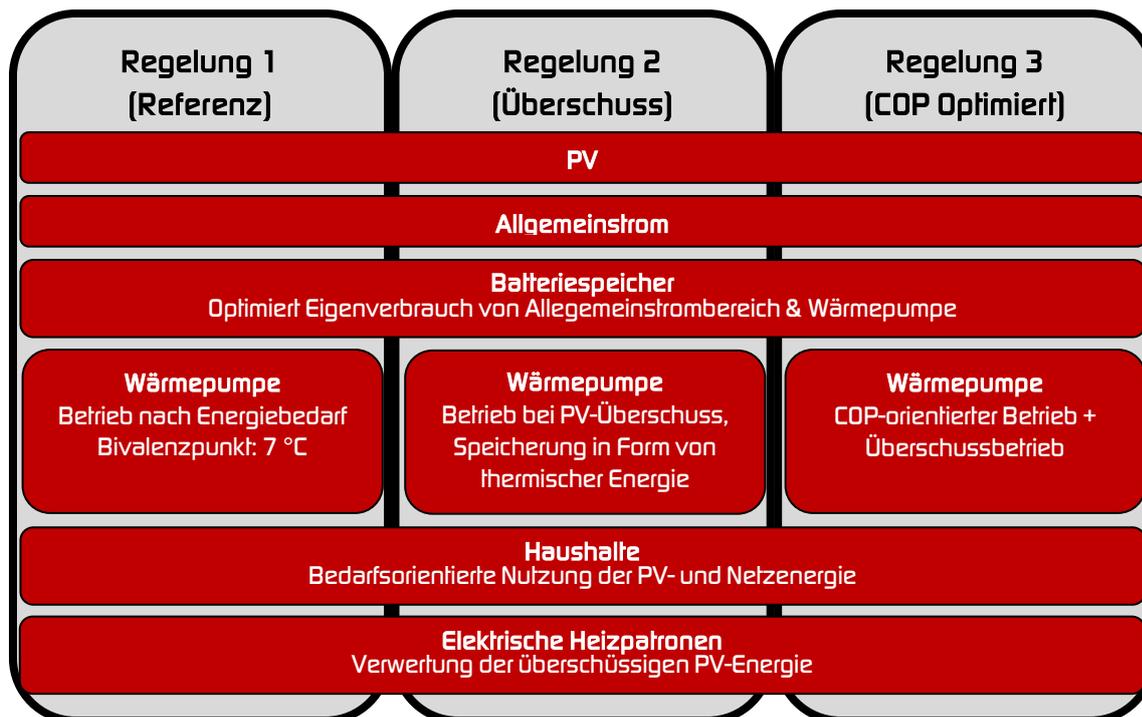


Abbildung 3: Übersicht über die 3 Regelungsstrategien

Die Regelungen bauen aufeinander auf. Regelung 3 beinhaltet also den Algorithmus von Regelung 1 und 2. Dies hat den Grund, dass der Betrieb der Wärmepumpe nicht eingeschränkt, sondern optimiert werden soll. Mit der Überschuss-Regelung soll beispielsweise eine Verschiebung des Betriebs in die Sonnenstunden bewirkt werden, nicht jedoch eine Einschränkung in den Nachtstunden. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Regelungsalgorithmen also nur im Betrieb der Wärmepumpe.

Regelung 3 stellt dahingehend eine Besonderheit dar, dass die Wärmepumpe auch unabhängig von der Überschussleistung aktiviert wird, sobald ein finanziell günstiger COP zu erwarten ist. Dieser ist dann erreicht, wenn er höher als das Verhältnis von Strompreis zu Gaspreis ist. Die Wärmepumpe bezieht in diesem Fall häufig Strom aus dem Netz. Um den COP vor Aktivierung des Wärmeerzeugers festzustellen, wird dieser durch Messung der Außen- und Speichertemperatur in Kombination mit der Kennlinie der Wärmepumpe ermittelt.

Sollte nach Allgemeinbereich, Batteriespeicher und Wärmepumpe noch Sonnenenergie verfügbar sein, wird diese den Haushalten und in weiterer Folge den Heizstäben zugeteilt.

5 Ergebnisse

Die drei oben beschriebenen Regelungsstrategien wurden sowohl mit als auch ohne Beteiligung bzw. PV-Nutzung der Haushalte betrachtet. Abbildung 4 zeigt die Wärmebereitstellung nach Erzeugern sowie den Anteil des Gas-Brennwertkessels für jeden simulierten Fall.

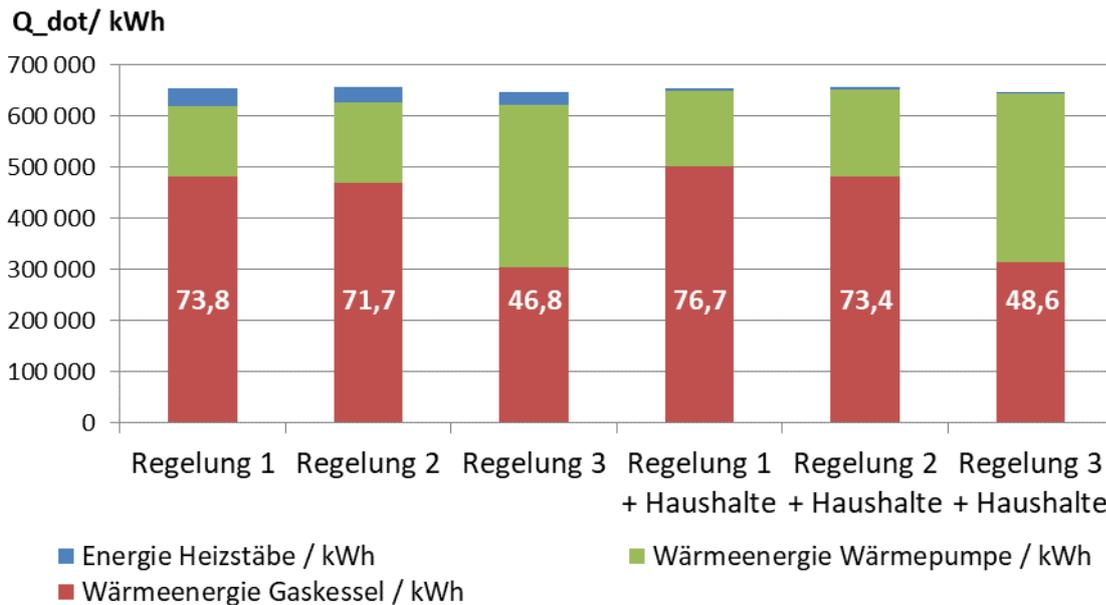


Abbildung 4: Wärmeenergie nach Erzeuger

Betrachtet man lediglich die Ergebnisse der Simulationen des Allgemeinbereichs, so lässt sich von Regelung 1 auf Regelung 2 eine Verlagerung von den Heizstäben auf die Wärmepumpe im Ausmaß von 7 MWh erkennen. Außerdem kann der Anteil des Gaskessels an der Wärmeerzeugung um 2,1 % reduziert werden. Regelung 3 bewirkt hingegen eine deutliche Verschiebung vom Brennwertkessel auf die Wärmepumpe. Der Wärmebereitstellungsanteil der elektrischen Wärmeerzeuger wird von 26,2 % auf 53,2 % gesteigert. Dies ist möglich, weil Regelung 3 die Wärmepumpe COP-Abhängig steuert. Da der Grenz-COP auch unterhalb der Bivalenztemperatur erreicht wird, wird diese von der COP-optimierten Regelung häufig ignoriert. Mit 49 % stellt die Wärmepumpe fast die Hälfte der Wärmeenergie bereit. Die elektrischen Heizpatronen liefern mit 27,1 MWh weniger Wärmeenergie als bei den anderen Regelungen.

In Abbildung 5 ist die Wärmeleistung der Wärmepumpe bei den verschiedenen Regelungsstrategien über das gesamte Jahr gegenübergestellt. Die Leistungswerte wurden über 7 Tage gemittelt um die starken Schwankungen durch Ein- und Ausschaltungen herauszufiltern.

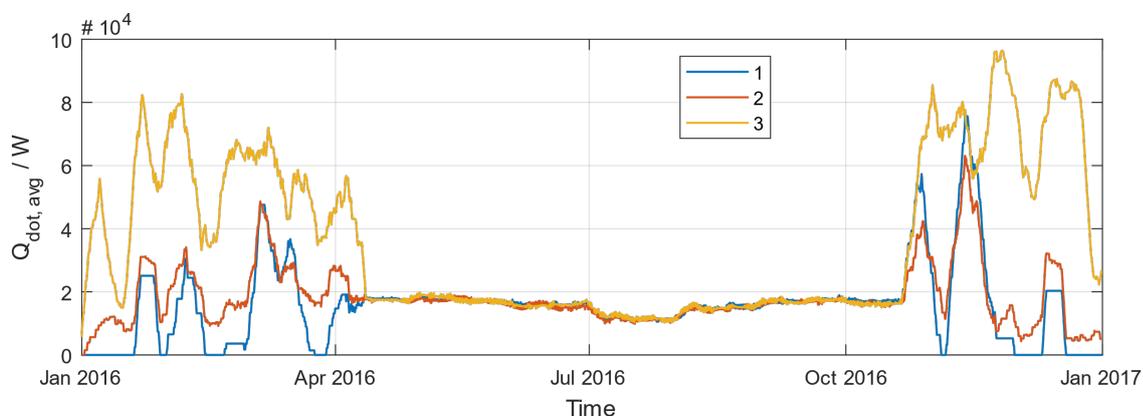


Abbildung 5: Wärmeleistung der Wärmepumpe bei verschiedenen Regelungen (gleitender Mittelwert über 7 Tage)

In diesem Diagramm wird deutlich, dass die Wärmeleistung der Wärmepumpe mit Regelung 3 vor allem in der Heizperiode deutlich höher ist. Von Mitte April bis Ende Oktober unterscheidet sich die mittlere Leistungsabgabe zwischen den Regelungen nur minimal. Eine optimierte Regelung der Wärmepumpe hat daher vor allem in den Wintermonaten großes Potential.

Bei den Simulationen, welche den Haushaltsstrom ebenfalls berücksichtigen, ist der Anteil der elektrischen Heizpatronen mit weniger als 1 % vernachlässigbar gering. Eine Implementierung dieser Zusatzheizungen ist daher in diesem Fall nicht zweckmäßig. Bei den angenommenen Tarifen für Strom und Gas, wäre der Betrieb der Heizstäbe jedoch wirtschaftlicher als die Einspeisung ins Stromnetz. Auch bei der Einbeziehung des Haushaltsstromverbrauchs kann der Anteil des Gaskessels mithilfe der Regelung von 76,7 % (Referenz) auf 48,6 % (COP Optimiert) gesenkt werden.

Der Vergleich zwischen den Szenarios mit und ohne Haushaltsstrom zeigt nur minimale Unterschiede im Anteil des Gaskessels an der Gesamtwärmeerzeugung. Der Eigenverbrauchsanteil liegt ohne Haushalte zwischen 66,4 % und 68,7 % und kann durch die Einführung eines Mieterstrommodells unabhängig von der Regelungsstrategie auf ca. 99 % gesteigert werden. Dieser hohe Eigenverbrauchsanteil zeigt, dass im Falle eines Mieterstrommodells auch eine Anlage mit höherer Leistung betrieben werden kann.

Abbildung 6 fasst die Ergebnisse aus der wirtschaftlichen als auch der ökologischen Analyse für die Simulationen des Allgemeinbereichs ohne Haushalte zusammen.

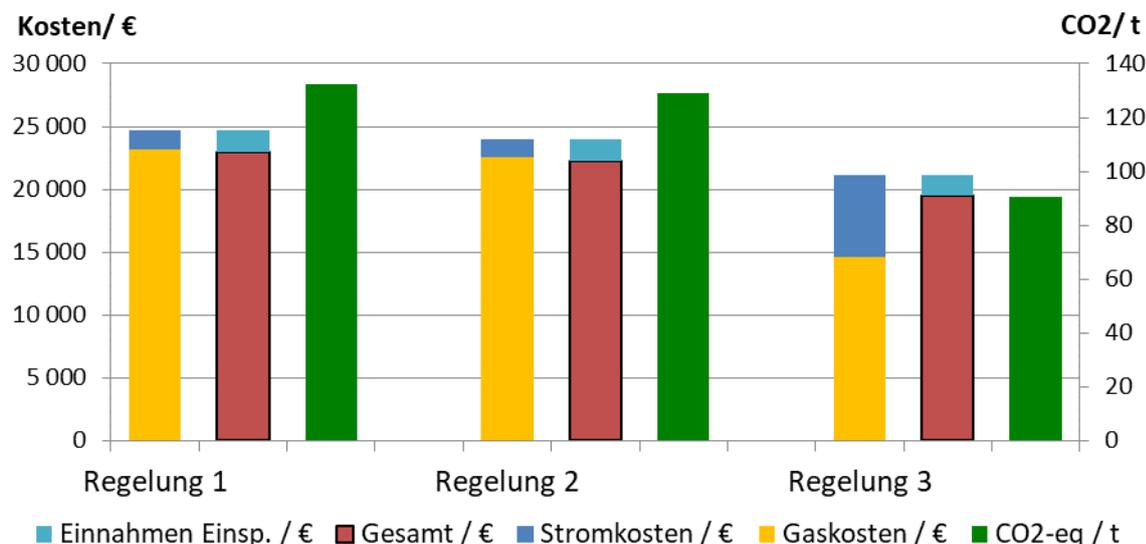


Abbildung 6: Energiekosten und CO₂-Emissionen - Allgemeinbereich

Würde kein Mieterstrommodell eingeführt werden, könnten die Energiekosten durch Regelung 3 um 3 480 € reduziert werden. Dies entspricht einem Anteil von 15 % der Kosten mit Regelung 1. Außerdem können die Treibhausgasemissionen um rund 42 t_{CO₂-eq}, beziehungsweise 31,6 % gesenkt werden. Regelung 2 bringt immerhin eine Einsparung von fast 720 € und 3,4 t_{CO₂-eq}.

Abbildung 7 fasst die Ergebnisse aus der wirtschaftlichen und ökologischen Analyse für die Simulationen des Gesamtmodells mit Haushaltsstrombedarf zusammen. Dabei sind auf der

linken Achse die Energiekosten in € und auf der rechten Achse die Treibhausgasemissionen in $t_{CO_2\text{-eq}}$ aufgetragen.

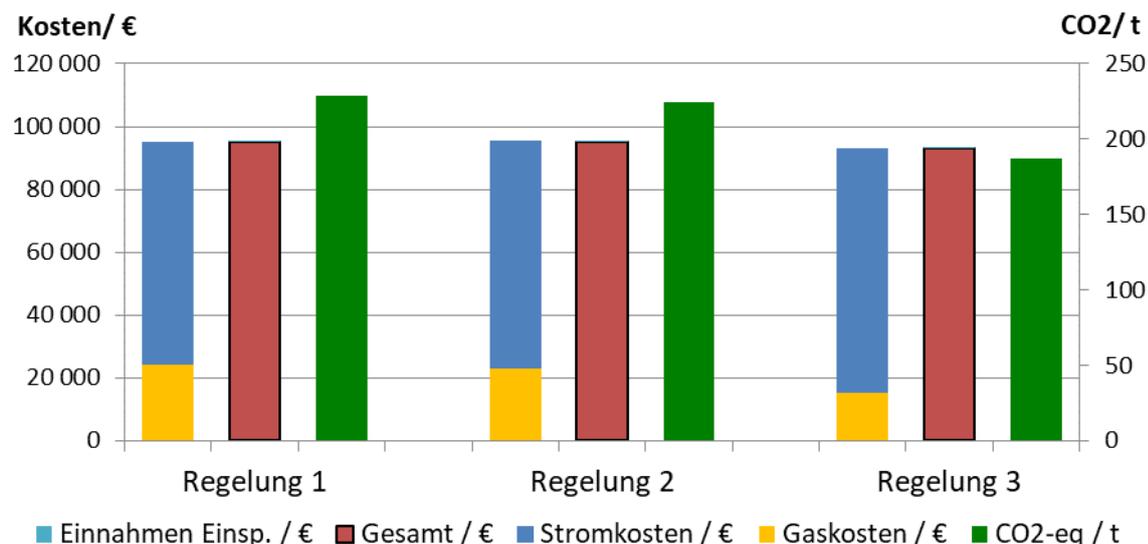


Abbildung 7: Energiekosten und CO₂-Emissionen - Gesamtsystem

In Abbildung 7 wird deutlich, dass der Haushaltsstrombedarf den Hauptposten bei den Energiekosten darstellt. Da der gesamte Strombedarf aller BewohnerInnen so hoch ist, wird unabhängig vom Regelungskonzept ein Eigenverbrauchsanteil von ca. 99 % erreicht. Dieser unterscheidet sich damit nur geringfügig von den Ergebnissen der Vorabsimulation. Ein Eigenverbrauchsanteil dieser Höhe zeigt, dass die installierte Leistung der Photovoltaikanlage im Verhältnis zum Verbrauch eher niedrig ist. Regelung 2 hat nur geringe Auswirkungen auf die Energiekosten und bewirkt sogar eine minimale Erhöhung. Die Treibhausgaseinsparung beträgt 4,4 $t_{CO_2\text{-eq}}$. Regelung 3 bewirkt hingegen eine Reduktion der Ausgaben für Energie um 2,2 %. Dies entspricht einer Einsparung von 2 090 € jährlich. Trotz des hohen Eigenverbrauchs können die Energiekosten mithilfe einer verbesserten Regelung deutlich gesenkt werden. Die Treibhausgasemissionen können mit Regelung 3 ebenfalls in einem Ausmaß von 18,3 % gesenkt werden. Dies entspricht einer Menge von rund 42 $t_{CO_2\text{-eq}}$ und stellt damit eine wesentliche Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit dar.

Mit Regelung 2 kann der Nutzen für die BewohnerInnen nur bedingt erhöht werden. Jedoch könnte eine Optimierung der Temperaturgrenzwerte in den Pufferspeichern die Einsparungen möglicherweise erhöhen. Ein COP-gesteuertes Regelungskonzept in der Art von Regelung 3 steigert den Nutzen für die BewohnerInnen maßgeblich, obwohl die erzielten Einsparungen nicht vom Mieterstrommodell abhängig sind. Ein optimierter Betrieb der Wärmepumpe kann den BewohnerInnen also einen größeren finanziellen Nutzen bringen als der direkte Verbrauch der erzeugten Energie. Die Implementierung dieses verbesserten Regelungsalgorithmus würde sich durch die Einsparungen innerhalb weniger Jahre amortisieren.

Literatur

- [Amann, 2016] Amann, W., Komendantova, N., Seitz, H., Kollmann, A., Klocker, F., & Prokschy, H. (2016). *STROMBIZ Geschäftsmodelle dezentrale Stromerzeugung und Distribution* (Berichte aus Energie- und Umweltforschung No. 20/2016) (S. 196). Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Abgerufen 8. März 2018, von https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2016-20_strombiz.pdf
- [EIWOG, 2010] Elektrizitätswirtschafts- und –organisationsgesetz 2010, in der Fassung BGBl. I Nr. 108/2017. §16a.
- [Pflugradt, 2017] Pflugradt, N. (2017). LoadProfileGenerator (Version 7.2.0) [Windows 7 (64bit)]. Abgerufen 10. Mai 2018, von <https://www.loadprofilegenerator.de/>