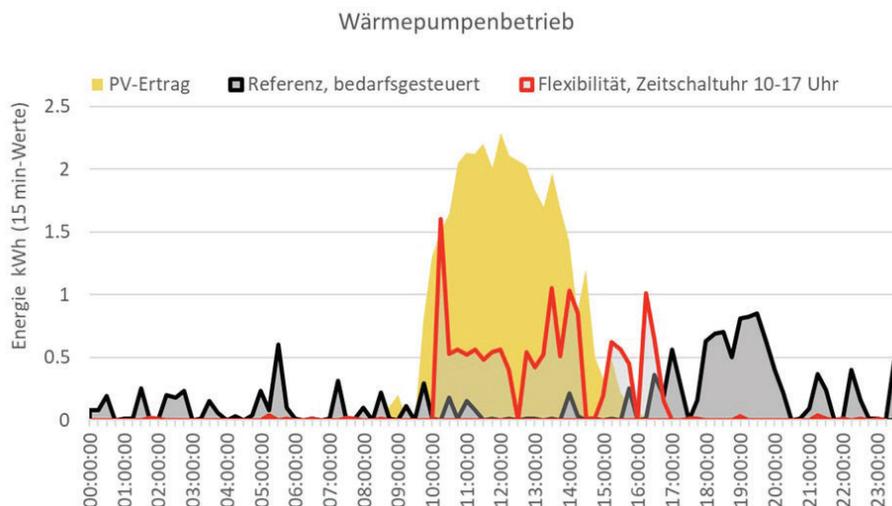


Smarte Gebäude - netzdienlich oder nicht?



Monika Hall, Achim Geissler
 Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau
 Hofackerstrasse 30, CH - 4132 Muttenz
 monika.hall@fhnw.ch

Zusammenfassung	Résumé	Abstract
-----------------	--------	----------

Die Laststeuerung nach Strompreisen (Hoch-/Niedertarif, Spotmarktpreise), CO₂-eq-Emissionen bzw. dem Eigenverbrauch wird für die Wärmepumpe eines kleinen Mehrfamilienhauses untersucht. Die Ergebnisse werden anhand von vier verschiedenen Flexibilitätskenngrössen dargestellt. Die Berechnungsmethodik der vorgestellten Kenngrössen GSC_{abs}, RIP, FF und FI ist sehr unterschiedlich. Somit sind auch die Wertebereiche, die eine Kenngrösse annehmen kann bzw. Zielwerte, die eine hohe Flexibilität anzeigen, sehr verschieden. Dies macht die Vergleichbarkeit der Kenngrössen schwierig. Die vorgestellten Flexibilitätskenngrössen zeigen jedoch grundsätzlich dieselben Tendenzen an, so dass jede Kenngrösse genutzt werden kann. Die Ziele von Netz- und Gebäudebetreiber widersprechen sich nicht. Es muss jedoch entschieden werden, ob der Fokus auf einer Netzentlastung bei tiefen Stromkosten oder auf der Reduktion der CO₂-eq-Emissionen liegt.

Demand side management based on electricity prices (high/low tariff, spot market prices), CO₂-eq emissions or self-consumption is investigated for the heat pump of a small apartment building. The results are presented using four different flexibility factors. The calculation methodology of the presented flexibility factors GSC_{abs}, RIP, FF and FI is very different. Thus, the value range that a factor can assume and target values that indicate high flexibility are also very different. This makes direct comparison of the flexibility factors difficult. However, the flexibility factors basically show the same tendencies. The objectives of network and building operators are not contradictory. However, it must be decided whether the focus should be on grid relief at low electricity costs or on the reduction of CO₂-eq emissions.

1. Ausgangslage

Durch den stetig steigenden, aber fluktuierenden Anteil an erneuerbaren Energien in den Stromnetzen wird neben der Höhe des Strombezugs bzw. der Netzeinspeisung auch das zeitliche Bezugs- und Einspeiseprofil immer wichtiger. In diesem Zusammenhang ist das zeitliche Lastmanagement (Demand Side Management DSM) ein wichtiges Instrument. Mit gezieltem Aktivieren bzw. Abschalten von elektrischen Verbrauchern werden dabei Lastprofile so verändert, dass diese den Strombedarf z.B. aus Spitzenlastzeiten zu Niedriglastzeiten hin oder in Stunden mit Solarertrag verschieben. Die Laststeuerung erfolgt in den meisten Fällen aus Sicht der Gebäudebetreiber nach

- Erhöhung des Eigenverbrauchs und des Autarkiegrades und/oder der
- Minimierung der Stromkosten.

Für den Netzbetreiber hat die Laststeuerung andere Ziele, z.B.

- Ausgleich von Netzschwankungen
- Vermeidung von Spitzenbezugs und -einspeisungslasten

Es wurde schon mehrfach gezeigt, dass in Wohngebäuden die Wärmepumpe bzw. Warmwasserboiler die einzigen grossen, flexibel steuerbaren Verbraucher sind. In dem hier beschriebenen Projekt wird die Flexibilität der Wärmepumpenlaufzeit im Zusammenhang mit folgenden Führungsgrössen (penalty signals) untersucht:

- Optimierung der Stromkosten bei Hoch-/Niedertarif
- Regelung nach Spotmarktpreisen (Annahme: Ein tiefer Spotmarktpreis bedeutet ein Stromüberschuss im Netz und es ist für das Netz vorteilhaft, Verbraucher in diesen Zeiten zu aktivieren)
- Regelung nach CO_{2-eq} Emissionskoeffizienten des Strommixes (Annahme: Ein tiefer CO_{2-eq} Koeffizient des Strommixes bedeutet einen hohen Anteil an erneuerbaren Energien (EE) im Netz und es ist für das Netz vorteilhaft, Verbraucher in diesen Zeiten zu aktivieren, damit die EE nicht gespeichert oder gar abgeregelt werden müssen)
- Optimierung des Eigenverbrauchs (hohe Eigennutzung des eigenen Photovoltaikertrages führt zu geringeren Bezugs- und Einspeisemengen und –spitzen)

Mit einer thermischen Gebäudesimulation inkl. integrierter expliziter Anlagentechnik wird der Einfluss o.g. Führungsgrössen auf das Flexibilitätspotential untersucht und in verschiedenen Flexibilitätsskenngrössen dargestellt. Der Vergleich zwischen der Führung der Wärmepumpe nach Wärmebedarf (Basisfall) und den o.g. Grössen weist das Flexibilitätspotential des Gebäudes aus. Zu beachten ist dabei, dass der Komfort nicht beeinträchtigt wird. Die Ergebnisse geben Antworten auf folgende Fragen:

- Wie beeinflussen verschiedene Führungsgrössen die Netzinteraktion und die Stromkosten?
- Welchen Einfluss hat die Optimierung einer Führungsgrösse auf die anderen?
- Widersprechen sich die Ziele der Netz- und Gebäudebetreiber?

2. Vorgehen

2.1 Beispielgebäude

Die Basis für die Untersuchungen ist ein kleines Minergie-P Mehrfamilienhaus mit drei Wohnungen in Massivbauweise [1], [2]. Die internen Lasten für Personen, Geräte und Beleuchtung entsprechen den Profile von Merkblatt SIA 2024 [3]. Es wird eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (80 %) berücksichtigt. Die modulierende Erdsonden Wärmepumpe hat eine Nenn-Leistung von 9 kW (B0/W35, 100 %) und die Wärme wird über eine Fussbodenheizung abgegeben. Die Erwärmung des Warmwassers (800 l Tank) erfolgt in zwei festgelegten Blockzeiten (Dauer: 1 h und 2 h) pro Tag in Abhängigkeit von der Führungsgrösse. Für die Quelltemperatur wird die gemäss [4] aus der Aussenlufttemperatur ermittelte monatliche Erdreichtemperatur in 10 m Tiefe angenommen.

Der Warmwassertank wird zum Legionellenschutz jeden Samstag für zwei Stunden auf 65 °C erhitzt. In der übrigen Zeit wird der Tank maximal auf 53 °C erwärmt. Es wird ein stochastisches Warmwasserzapfprofil aus dem Simulationsprogramm ESP-r verwendet [5]. Pro Tag werden 175 l Warmwasser dem Tank entnommen (8.3 Personen mit je 35 l/d Warmwasserbedarf [3], Annahme: 40 % Frischwasserzumischung).

Die Jahressimulation wird gebäudeseitig in fünfminuten Zeitschritten und anlagenseitig in einminuten Zeitschritten mit dem Klima Buchs-Aarau durchgeführt.

2.2 Varianten/Führungsgrößen

Die Steuerung der Wärmepumpenlaufzeit erfolgt nach verschiedenen Führungsgrößen: Hoch-/Niedertrarif «HTNT», Spotmarktpreise «SPOT», CO_{2-eq}-Koeffizienten «CO2» und Eigenverbrauch «EVR» (Tabelle 1). Im Basisfall «NABE» wird nach Bedarf geheizt.

Tabelle 1 Untersuchte Varianten

Variante	Erlaubte Zeitfenster für Heizbetrieb (exkl. Bockzeiten für Warmwasser)	Blockzeiten für Warmwasserbereitung
#NABE	nach Bedarf (Basisfall)	5-6 Uhr, 13-15 Uhr
#HTNT	nur im Niedertarif, d.h. immer ausser Mo-Fr 6-20 Uhr	4-6 Uhr, 20-21 Uhr
#SPOT	wenn der Spotmarktpreis ≤ 100% dem Tagesmittelwert ist	2-4 Uhr, 14-15 Uhr
#CO2	wenn der CO _{2-eq} -Koeffizient ≤ 100 % dem Tagesmittelwert ist	8-9 Uhr, 18-20 Uhr
#EVR	zwischen 7-18 Uhr	5-6 Uhr, 13-15 Uhr

2.3 Flexibilitätskenngrößen

Die Wirksamkeit der betrachteten Führungsgrößen wird mit verschiedenen Flexibilitätskenngrößen ausgedrückt. Bei den Kenngrößen wird der Strombezug mit einer stromnetzrepresentativen Grösse (Strompreis, CO_{2-eq}-Koeffizient) verrechnet. Das Flexibilitätspotential eines Gebäudes drückt sich darin aus, ob der Strombezug eher zu hohen oder tiefen Preisen/CO_{2-eq}-Koeffizienten stattfindet. Nur die Flexibilitätskenngrösse FI vergleicht einen Basisfall mit einer Variante. Die Höhe des Energiebedarfs wird in den Kenngrößen nicht bewertet. In Tabelle 2 sind die untersuchten die Flexibilitätskenngrößen zusammengefasst.

Tabelle 2 Zusammenfassung der Flexibilitätskenngrößen.

Flexibilitätskenngrösse	Wertebereich	Netzdienlich, wenn ...	Welche Daten werden benötigt?
GSC _{abs} Grid Support Coefficient [6]	> 0	< 1	Zeitschrittweite für Energie/Netzgrösse, Tagessumme Energie, Tagesmittelwerte der Führungsgrösse
RIB Relative Import Bill [7]	0 - 1	Tiefer Wert	Zeitschrittweite für Energie, tiefster bzw. höchster Tageswert der Führungsgrösse
FF Flexibility Factor [8]	-1 bis +1	Hoher Wert	Zeitschrittweite für Heizleistung/Energie, erste/vierte Quartil der Führungsgrösse
FI Flexibility Index [9]	-1 bis +1	Hoher pos. Wert, neg. Wert = Verschlechterung gg. Basisfall	Zeitschrittweite für Energie/Führungsgrösse für Variante und Basisfall

3. Resultate

Die hohe Wärmespeicherfähigkeit in Kombination mit dem guten Dämmstandard des Gebäudes wird genutzt, um die Wärmepumpe flexibel über ein Lastmanagement in Abhängigkeit von verschiedenen Führungsgrössen zu betreiben. Da nur die Lastverschiebung der Wärmepumpe betrachtet wird, erfolgt die gesamte Auswertung nur für die Wärmepumpe.

Die Flexibilitätskenngrössen werden in fünfminuten Zeitschritten jeweils pro Tag berechnet und anschliessend zu einem Jahreswert zusammengezogen. Der Energiebezug wird entweder mit dem Strompreis oder den ausgelösten CO_{2-eq}-Emissionen bewertet:

- Hoch-/Niedertarif (HTNT): HT: Mo-Fr 6-20 Uhr, NT übrige Zeit [10]
- Spotmarktpreise (SPOT): 15 min Werte, Deutschland 2015 [11]
- CO_{2-eq}-Koeffizienten (CO_{2-eq}): Stundenwerte, Schweizer Strommix 2015 [12]

Abbildung 1 zeigt die Resultate der Flexibilitätskenngrössen für alle Varianten. Dabei wird jede Variante bzgl. des Einflusses auf die Kosten für Hoch-/Niedertarif, Spotmarktpreise und CO_{2-eq}-Emissionen bewertet. Über alle Varianten zeigen GSC_{abs}, RIB und FF folgende Tendenzen:

- NABE: GSC_{abs}/RIB zeigen an, dass der Energiebezug häufiger im Hochtarif als im Niedertarif stattfindet, während FF den Bezug ausgeglichen bei den beiden Tarifen darstellt (gelb). Die Bewertung nach Spotmarktpreisen (rot) und CO_{2-eq}-Koeffizienten (blau) weist aus, dass der Energiebezug im Schnitt bei dem Tagesmittelwert erfolgt.
- HTNT, SPOT: Bei der Führung nach Kosten (HTNT (gelb), Spotmarktpreise (rot)) zeigen die strompreisbewerteten Kenngrössen entsprechend gute Werte für einen Bezug bei tiefen Kosten an, jedoch schneiden diese Varianten mit der Bewertung nach CO_{2-eq}-Koeffizienten (blau) weniger gut ab.
- CO₂, EVR: Bei diesen Varianten wird Energie bei tiefen CO_{2-eq}-Koeffizienten (blau) bezogen, was jedoch zu höheren Kosten (gelb, rot) führt.

Die Flexibilitätskenngrösse FI gibt die Veränderung zur Basisvariante, hier NABE, an. So zeigt eine Bewertung nach HTNT (gelb) bei den kostenbasierten Varianten (HTNT, SPOT), dass ein Anteil der Energiekosten gegenüber der Basisvariante reduziert wird (pos. Werte). Bei HTNT werden z.B. die Kosten um 24 % reduziert. Die negativen Werte der Varianten CO₂ und EVR zeigen den Anteil der Energiekostenerhöhung gegenüber dem Basisfall auf. Genau spiegelbildlich ist das Ergebnis für die Bewertung der Varianten nach CO_{2-eq}-Koeffizienten (blau). Bei der Bewertung nach Spotmarktpreisen (rot) zeigt nur die Variante HTNT eine leichte Energiekostenreduktion gegenüber der Basisvariante. Die anderen Varianten führen zu einer Kostenerhöhung. FI stellt dieselben Tendenzen wie GSC_{abs}, RIB und FF dar, wenn man dort die Varianten mit dem Basisfall NABE vergleicht.

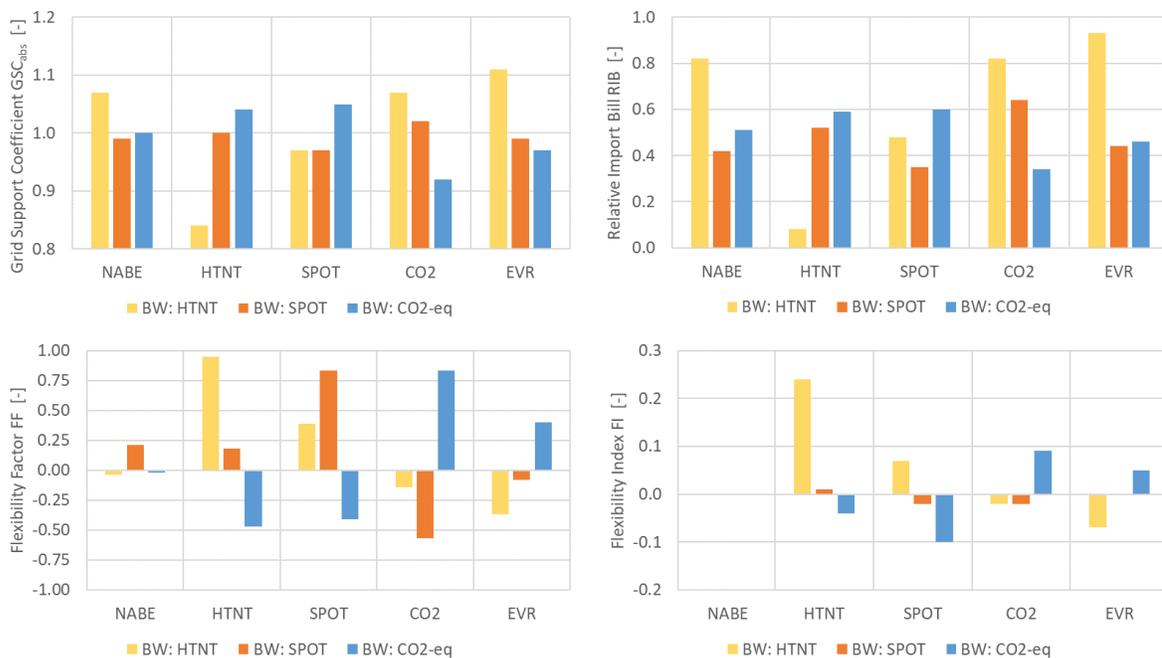


Abbildung 1 Darstellung der Flexibilitätskenngrößen GSC_{abs} (oben links), RIB (oben rechts), FF (unten links) und FI (unten rechts) für alle Varianten und deren Bewertungen (BW).

4. Diskussion

Die Berechnungsmethodik der Flexibilitätskenngrößen GSC_{abs} , RIP , FF , FI und EVR/AG ist sehr unterschiedlich. Somit sind auch die Wertebereiche, die eine Kenngrösse annehmen kann bzw. Zielwerte, die eine hohe Flexibilität anzeigen, sehr verschieden. Dies macht die Vergleichbarkeit der Kenngrößen schwierig. Die vorgestellten Flexibilitätskenngrößen GSC_{abs} , RIP , FF , FI zeigen jedoch dieselben Tendenzen, so dass prinzipiell jede dieser Kenngrößen zur Quantifizierung der Flexibilität genutzt werden kann.

Vergleicht man die Optimierung nach Strompreis (HTNT/SPOT), CO_{2-eq} -Koeffizienten und Eigenverbrauch, ergeben sich folgende Empfehlungen für das Einschalten der Verbraucher:

- Optimierung nach Strompreisen: Verbraucher laufen in der Nacht
- Optimierung nach Eigenverbrauch und CO_{2-eq} - Koeffizienten: Verbraucher laufen am Tag

Die Optimierung nach Strompreisen, CO_{2-eq} -Koeffizienten und Eigenverbrauch ist positiv für Gebäudenutzer und Netzbetreiber:

- Tiefe Strompreise werden von den Energiedienstleistern angeboten, wenn sie Stromabnehmer brauchen. Im Moment verschieben der übliche Hoch-/Niedertraif oder die Spotmarktpreise den Netzbezug in die Nacht. Dies kann sich mit zukünftigen Preisstrukturen ändern.
- Strombezüge sollten gemäss Strommix 2015 am Morgen und Abend in Zeiten mit tiefen CO_{2-eq} -Koeffizienten stattfinden. Tiefe CO_{2-eq} -Koeffizienten bedeuten, dass ein hoher Anteil an Erneuerbaren Energien im Netz vorhanden ist. Wird dieser zeitgleich verbraucht, muss nicht in Speicher für Erneuerbare Energien investiert werden.
- Der Eigenverbrauch reduziert grundsätzlich den Strombezug und die Netzeinspeisung. Im Strommix 2015 reduziert der Eigenverbrauch am Nachmittag die Nutzung von Strom mit hohen CO_{2-eq} -Koeffizienten, d.h. es muss weniger Strom aus fossilen Erzeugern bereitgestellt werden.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts "Energetische Flexibilität von Gebäuden" [13] erarbeitet, welches das Bundesamt für Energie BFE (Schweiz) unter dem Kennzeichen SI/501240-01 fördert. Das Projekt ist ein Beitrag zum IEA Annex 67 "Energy Flexible Buildings" (<http://www.annex67.org/>).

5. Literatur

- [1] F. Dorusch, M. Hall, and R. Dott, "Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Rapperswil," FHNW, Institut Energie am Bau, Schlussbericht, BFE SI/500645 // SI/500645-01, www.fhnw.ch/habg/iebau, 2014.
- [2] M. Hall and A. Geissler, "Einfluss der Wärmespeicherefähigkeit auf die energetische Flexibilität von Gebäuden," *Bauphysik*, vol. 37, no. 2, pp. 115–123, 2015.
- [3] Merkblatt SIA 2024, "Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik." 2015.
- [4] T. Kusuda, "Earth temperatures beneath five different surfaces: final report," National Bureau of Standards, Final report 10 373, 1971.
- [5] N. Kelly, A. Samuel, and P. Tuohy, "The effect of hot water use patterns on heating load and demand shifting opportunities," in *Building Performance Simulation Association*, 2015, pp. 1298–1305.
- [6] K. Klein, S. Herkel, H.-M. Henning, and C. Felsmann, "Load shifting using the heating and cooling system of an office building: Quantitative potential evaluation for different flexibility and storage options," *Appl. Energy*, vol. 203, pp. 917–937, 2017.
- [7] U. I. Dar, I. Sartori, L. Georges, and V. Novakovic, "Advanced control of heat pumps for improved flexibility of Net-ZEB towards the grid," *Energy Build.*, vol. 69, pp. 74–84, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2013.10.019.
- [8] J. Le Dréau and P. Heiselberg, "Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass," *Energy*, vol. 111, pp. 991–1002, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.ENERGY.2016.05.076.
- [9] R. G. Junker *et al.*, "Characterizing the energy flexibility of buildings and districts," *Appl. Energy*, vol. 225, pp. 175–182, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.05.037.
- [10] Industrielle Werke Basel, "Stromtarife 2020 inkl. MwSt." <https://www.iwb.ch/Fuer-Zuhause/Strom/Stromtarife.html> (accessed Apr. 30, 2020).
- [11] EPEX SPOT Market DATA, "Intraday Auctions Data DE 2015." <https://www.epexspot.com>.
- [12] Pronovo AG, "Cockpit Stromkennzeichnung Schweiz, Stand Februar 2020." <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/60212.pdf> (accessed May 12, 2020).
- [13] M. Hall and A. Geissler, "Energetische Flexibilität von Gebäuden," BFE SI/501240-01 Schlussbericht, FHNW IEBau, 2020.