

1

38. Jahrgang
Februar 2016, S. 38–49
ISSN 0171-5445
A 1879

Sonderdruck

Bauphysik

Wärme | Feuchte | Schall | Brand | Licht | Energie



Möglichkeiten und Grenzen von großen Nullenergiegebäuden

Dr.-Ing. Monika Hall
Prof. Dr.-Ing. Achim Geissler

Zum Titelbild:

Schweizer Solarpreis 2013,
Plusenergiesanierung eines Mehrfamilienhauses in Romanshorn
Foto: Viridén + Partner AG, Zürich

Möglichkeiten und Grenzen von großen Nullenergiegebäuden

Nullenergiegebäude haben üblicher Weise zwei bis vier Stockwerke. Daher interessiert die Frage, ob auch große Gebäude, d. h. Gebäude bis zu 40 Stockwerken, mit langgestrecktem bzw. quadratischem Grundriss genügend Fläche für Photovoltaik zur Verfügung stellen können, so dass eine Nullbilanz für die gesamte Gebäudetechnik (HWLK-Nullbilanz „Nullwärmeenergiegebäude“) oder den Gesamtenergiebedarf des Gebäudes (GEB-Nullbilanz „Nullenergiegebäude“) im Jahr erreicht werden kann. Auf der Grundlage von Simulationen anhand von vier Basismodellen, je zwei Mehrfamilienhäuser und Verwaltungsbauten, werden die Auswirkungen verschiedener Parameter auf die Nullbilanz analysiert. Ausgangspunkt ist jeweils eine sehr gute Gebäudehülle, eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und die Klimastation Bern-Liebefeld, Schweiz (mittleres Klima).

Die Hauptergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die HWLK-Nullbilanz kann bis auf eine Ausnahme für alle Varianten bis zu 40 Stockwerken erreicht werden.
- Um auch bei sehr gut gedämmten Gebäuden eine GEB-Nullbilanz zu erreichen, sind die vier wichtigsten Parameter
 - die Effizienz von Geräten und Beleuchtung,
 - die Art des Wärmeerzeugers,
 - die tatsächlich verfügbare PV-Fläche
 - sowie der effektive Systemwirkungsgrad der gesamten PV-Installation.

Die untersuchten Varianten zeigen, dass schon heute große Mehrfamilienhäuser und Verwaltungsbauten trotz Verschattung nicht nur als Nullwärmeenergiegebäude bis zu 40 Stockwerken realisiert werden können, sondern sogar als Nullenergiegebäude. Dabei muss das Augenmerk bei der Planung auf einem geringen Bedarf für Geräte und Beleuchtung und einem hohen PV-Ertrag liegen. Dies gilt insbesondere für Verwaltungsbauten.

The feasibility of large net zero energy buildings. *A typical net zero energy buildings has two up to four stories. The question appears if large buildings of up to 40 levels could achieve a net zero balance for HVAC only and/or achieving net zero energy building status. The analysis is based on the simulation of two multifamily dwellings and two office buildings, one each with a square and a stretched footprint. The four basic models are well insulated, equipped with a mechanical ventilation system including heat recovery and allocated with the climate of Bern-Liebefeld (average climate). A wide range of parameters is investigated in regard to their impact on the zero energy balance.*

The main results can be summarized as follows:

- *The net zero balance for HVAC only can be achieved for up to 40 levels for all variants studied but one*

- *The four main parameters in regard to achieving a net zero energy balance are*
 - *efficient electric devices and lighting,*
 - *the type of heating system,*
 - *the actually available area for PV and*
 - *the overall efficiency of the PV-system.*

The results show that a net zero balance can be achieved for large multifamily dwellings and office build-ings of up to 40 levels. To this end, however, electronic devices, lighting and PV systems with a very high efficiency are necessary. This is true particularly for office buildings.

1 Einführung

1.1 Hintergründe

Standards, wie Minergie-A, Nullenergie- und Plusenergiegebäude, fordern für unterschiedliche Bilanzgrenzen eine Netto-Nulljahresbilanz. Für Einfamilienhäuser und kleine Mehrfamiliengebäude reicht in der Regel der Platz für eine entsprechend große Photovoltaikanlage auf dem Dach aus, um in der Jahresbetrachtung den Energiebedarf oder mehr durch den PV-Ertrag zu decken. Üblicherweise sind Gebäude mit einer Netto-Nulljahresbilanz ca. zwei bis vier Stockwerke hoch. Bei höheren Gebäuden wird das Verhältnis von Dachfläche zur Wohn-/Nutzfläche immer kleiner, so dass die Dachfläche nicht mehr ausreicht, um entsprechend große Anlagen zur Energiewandlung aus erneuerbaren Quellen (Photovoltaik/Solarthermie) zu installieren. In diesem Fall müssen Fassadenflächen mit einbezogen werden. Einige größere Gebäude wurden schon vollflächig mit Photovoltaikfassaden ausgestattet und können z. T. die Plusenergiebilanz (GEB-Nullbilanz: >100 %) erreichen (Bilder 1 bis 3).

Die Energieeffizienz der Geräte, der Dämmstandard, die Belegungsdichte, die Anzahl Geschosse, die nutzbare Fassaden-/Dachfläche, die Kompaktheit, die Ausrichtung und die Beschattungssituation sind wesentliche Parameter, die den Netto-Energiebedarf einerseits und den möglichen Ertrag aus erneuerbaren Quellen andererseits beeinflussen.

In vorliegendem Beitrag werden Grenzen und Möglichkeiten sowie sinnvolle Kombinationen der genannten Parameter auf der Grundlage von Parameterstudien vorgestellt. Es wird dabei sowohl die Bilanzgrenze „Nullwärmeenergiegebäude“ (HWLK-Nullbilanz) als auch das „Nullenergiegebäude“ (GEB-Nullbilanz) betrachtet (Bild 4).



Bild 1. Sanierte Mehrfamilienhäuser mit GEB-Nullbilanz (%); von links: in Chiasso (114 %), Romanshorn (107 %) und Zürich (Quellen: [1], [22])

Fig. 1. Retrofit of multi-family buildings with PV gain greater than total energy use (%); from left: in Chiasso (114 %), Romanshorn (107 %) und Zürich (Sources: [1], [22])



Bild 2. Neubau Aktiv-Stadthaus in Wien (GEB >100 %), Sanierung des Verwaltungsbaus Flumroc, Flums (GEB 115 %), Anbau Bracher+Schaub AG, Ormalingen (GEB 96 %) (Quellen: ABG Frankfurt Holding, Solarpreis [1])

Fig. 2. New building Aktiv-Stadthaus in Wien (GEB >100 %), Retrofit office building Flumroc, Flums (GEB 115 %), extension Bracher+Schaub AG, Ormalingen (GEB 96 %) (Sources: ABG Frankfurt Holding, Solarpreis [1])

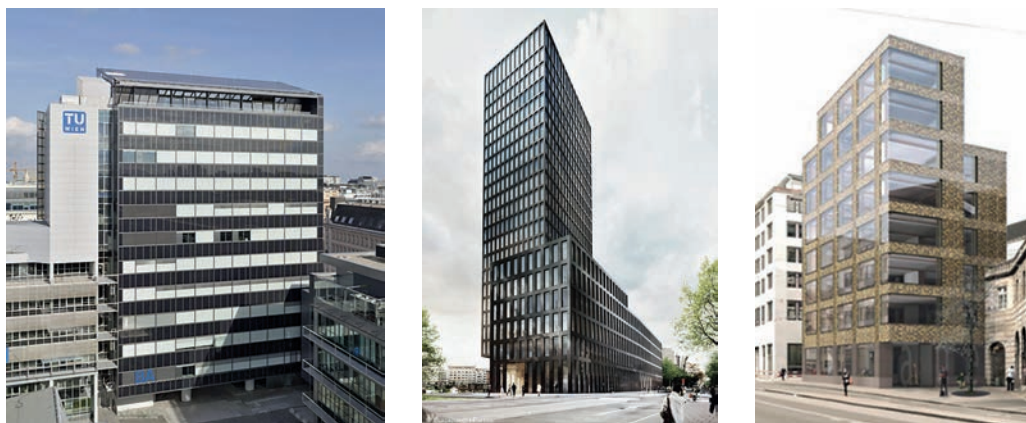


Bild 3. Sanierung TU Wien, Campusgebäude am Getreidemarkt; Planung: Neubau Bürogebäude und Hotel Grosspeter Tower Basel; Planung: Neubau Amt für Umwelt und Energie Basel (Quellen: TU Wien, Burckhardt+Partner AG, Hochbauamt Basel)

Fig. 3. Retrofit TU Vienna, Campusgebäude am Getreidemarkt; Design stage: new office building and hotel Grosspeter Tower Basel; Design stage: new office building Amt für Umwelt und Energie Basel (Sources: TU Vienna, Burckhardt+Partner AG, Building department Basel)

1.2 Methodik

Zur Erarbeitung der Grenzen und Möglichkeiten werden verschiedene Gebäudegeometrien und -größen sowie unterschiedliche Parameterkombinationen herangezogen. Die Parameterstudie wird für die Typen Mehrfamilienhaus und Verwaltungsbau an je zwei typischen Basismodellen durchgeführt (Bild 5):

- Variante 1: langgestrecktes Mehrfamilienhaus mit sechs Wohnungen pro Stockwerk

- Variante 2: quadratisches Mehrfamilienhaus mit vier Wohnungen pro Stockwerk
- Variante 3: langgestreckter Verwaltungsbau
- Variante 4: quadratischer Verwaltungsbau

Bei diesen vier Basisvarianten (fett) werden folgende Parameter variiert:

- Klimastation (**Bern**, Davos, Lugano)
- Heizwärmebedarf (**60 %** (Minergie-P) bzw. 110 % der Neubauanforderung bei 4 Stockwerken)

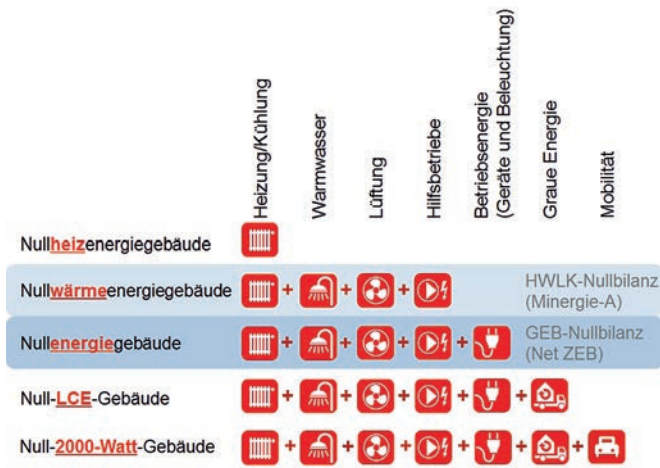


Bild 4. Umfang von verschiedenen Nullenergiestandards
Fig. 4. Scope of different net zero energy building standards

- Wärmeerzeuger (**Gasfeuerung**, Fernwärme, Erdsonden-Wärmepumpe)
- Verteil- und Speicherverluste von Heizung/Warmwasser (**10 %/40 %**, 50 %/60 %)
- Energiebedarf für Geräte und Beleuchtung (hoher/**niedriger** Bedarf)
- Abstand und Höhe der Nachbargebäude (nah/**mittel**/fern, hoch/**tief**)
- Ausrichtung des Gebäudes (nur langgestreckte Gebäude: **Süd/Nord**, Ost/West)
- Eigenverschattung durch 2 m tiefe, vorgelagerte Balkone (nur Wohnen)
- Größe der nutzbaren PV-Flächen (nur Wohnen, Südfassade: **komplett**, nur Brüstung) und
- Systemwirkungsgrad der Photovoltaikanlage (**14 %**, 22 %).

Es wird davon ausgegangen, dass immer die gesamten möglichen Flächen auf dem Dach und den opaken Bereichen der Fassaden mit PV-Modulen belegt sind.

Abkürzungen

HWLK	Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung (Der Begriff HWLK wird verwendet, auch wenn in vorliegender Untersuchung die Klimatisierung nicht berücksichtigt wird)
HWLK-Nullbilanz	Die Jahressumme des PV-Ertrags muss höher sein als der Jahresbedarf für HWLK
GEB	Gesamtenergiebedarf: HWLK, Haushaltsstrom, Geräte, Beleuchtung, Lift
GEB-Nullbilanz	Die Jahressumme des PV-Ertrags muss höher sein als der Jahresbedarf für GEB
HB	hoher Gesamtenergiebedarf: Wohnen – Effizienzklasse C [2] für Haushaltsstrom, Lift und Lüftungsanlage, Belegungsdichte 2.23 Verwaltung – Geräte, Beleuchtung (nach [3] Einzel-/Gruppenbüro)
TB	tiefer Gesamtenergiebedarf: Wohnen – Effizienzklasse A [2] für Haushaltsstrom, Lift und Lüftungsanlage, Belegungsdichte 1.78 Verwaltung – Geräte, Beleuchtung (nach [3] Einzel-/Gruppenbüro)

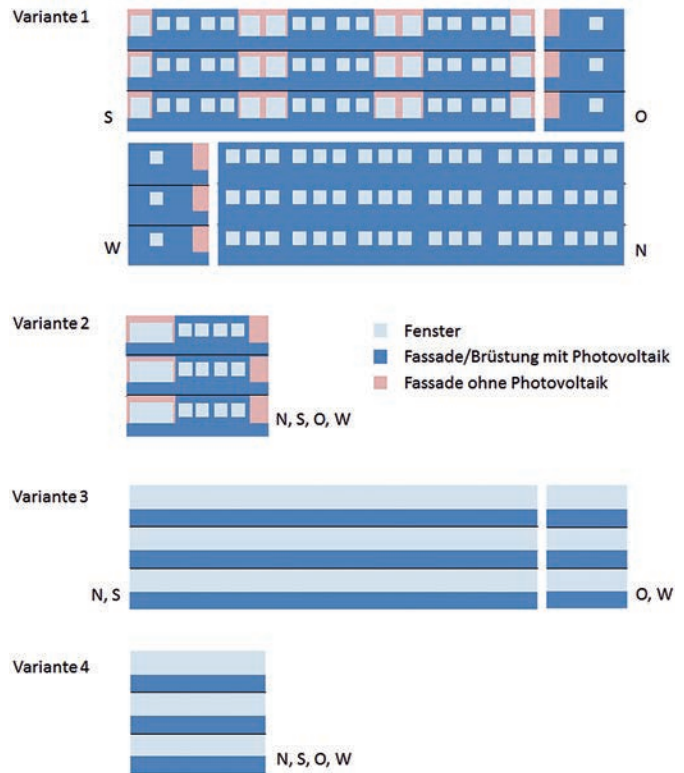


Bild 5. Schematische Darstellung der Fassadenansichten der vier betrachteten Varianten
Fig. 5. Façade layout for the four basic building variants

f_{CH}	Schweizer nationale Gewichtungsfaktoren der Energieträger (Erdgas 1, Fernwärme 0.6, Strom 2 [4])
ECH	Energieträger mit Schweizer nationalen Gewichtungsfaktoren gewichtet
E_{hwlk}	Grenzwert des gewichteten Endenergiebedarfs für HWLK nach MuKE n [5], gewichtet mit Schweizer nationalen Gewichtungsfaktoren, Wohnen: $E_{hwlk} = 35 \text{ kWh}_{ECH}/(\text{m}^2 \text{ a})$
EE	Endenergiebedarf
HH/HS	Haushalt, Haushaltsstrom
η_{PV}	Systemwirkungsgrad der Photovoltaikanlage: Module und Verluste (PV-Systemwirkungsgrad)
EBF	Energiebezugsfläche: beheizte/gekühlte Fläche inkl. Konstruktionsflächen

2 Randbedingungen
2.1 Gebäudedaten

Alle Gebäude haben einen rechteckigen Grundriss und weisen ein Flachdach auf. In Tabellen 1 und 2 sind die Basisdaten für die Geometrie sowie die energetischen Eigenschaften der Bauteile zusammengestellt. Die energetischen Daten sind so gewählt, dass die verschatteten vierstöckigen Basisvarianten der langgestreckten Gebäude (V1, V3) die Primäranforderungen des Minergie-P-Standards, d. h. 60 % der Neubauanforderung an den normativen Heizwärmebedarf, erfüllen. Die quadratischen Gebäude (V2, V4) weisen einen etwas geringeren Heizwärmebedarf auf.

Es wird davon ausgegangen, dass die Fassade des Verwaltungsbaus nicht raumhoch verglast ist, sondern ein

Tabelle 1. Daten der Gebäudegeometrie für die Varianten 1 bis 4

Table 1. Geometry data for all variants V1 to V4

Parameter	MFH (V1/V2)	Verwaltung (V3/V4)
Gebäudetiefe [m]	11,5/21,8	11,5/21,8
Gebäudebreite [m]	63,7/21,8	63,7/21,8
Etagenhöhe [m]	2,85	3,3
Netto-Wohnungsfläche [m ²]	87	–
Anzahl Wohnungen pro Geschoss	6/4	–
Betrachtete Anzahl Geschosse	2 ... 40	2 ... 40
Energiebezugsfläche pro Geschoss [m ²]	684/441	732/473
Fensteranteil N [%]	21/24	58
Fensteranteil S [%]	35/24	58
Fensteranteil O/W [%]	7/24	58
Standardfenster [m ²]	1,6 × 1,3	Fensterband
Anzahl pro Etage	O/W: je 1/4	–
	N: 18/4	–
	S: 12/4	–
Balkontüren [m ²]	3 × 2,1	–
Anzahl pro Etage	S: 6 / N/S/O/W: je 1	–

Tabelle 2. Energetische Daten der Basisvarianten und die zusätzlich untersuchte Variante „Heizwärme 110 %“

Table 2. Energy data for basis variations and an additional lower insulation level as a variation

Parameter	Basis	Variante „Heizwärme 110 %“
U _{opakt} [W/(m ² K)]	0,20*	0,48**
U _{Fenster} [W/(m ² K)]	0,90	1,4
g-Wert [-]	0,50	0,60
Glasanteil Fenster [-]	0,80	
Reduktionsfaktor für EG zu unbeheizten Kellergeschoss [-]	0,73	
Bauweise	massiv	

* U-Wert = 0,15 W/(m² K) + 30 % Wärmebrücke** U-Wert = 0,40 W/(m² K) + 20 % Wärmebrücke

durchgängiges Fensterband und einen Brüstungsbereich aufweist (V3, V4 in Bild 5). Damit können PV-Module im Bereich der Fensterbrüstung/Geschossdecke platziert werden. Dieser Bereich ist 1,4 m hoch und geht pro Stockwerk über den vollen Umfang des Gebäudes. Bei einer üblichen Geschosshöhe von 3,3 m ist das Fensterband damit 1,9 m hoch, dies entspricht einem Fensterflächenanteil der Fassade von knapp 58 %. Viele Verwaltungsbauten sind höher verglast. Es ist jedoch klar, dass ein hohes Gebäude mit einer geschosshohen Verglasung ohne Einbezug anderer Maßnahmen nicht genügend Fläche für PV zur Verfügung stellen kann, um eine Nullbilanz zu erzielen. Aus diesem Grund wird eine Fassade mit Brüstung und Fensterbändern gewählt.

2.2 Klimadaten

Die Auswertungen basieren hauptsächlich auf den Daten der Klimastation Bern-Liebefeld – kurz „Bern“ (mittleres Klima, mittlere Einstrahlung). Einzelne Ergebnisse werden vergleichend für die Klimastationen Lugano (warmes Klima, mittlere Einstrahlung) und Davos (kaltes Klima, hohe Einstrahlung mit Berücksichtigung des Horizonts) dargestellt. Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1:2009 beruhen die Klimadaten auf dem Merkblatt SIA 2028 [6]. Die Strahlungsdaten zur Berechnung des PV-Ertrags werden aus dem Programm Meteonorm 6.1, mit der Einstellung „Standard“, entnommen.

2.3 Bedarf

Berechnungsgrundlage

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgt nach SIA 380/1:2009. Für den Warmwasserbedarf werden die Standardwerte aus SIA 380/1:2009 verwendet: Mehrfamilienhaus: 75 MJ/(m² a), Verwaltung 25 MJ/(m² a). Tabelle 3 zeigt die verwendeten Nutzungsgrade und Jahresarbeitszahlen der Wärmeerzeuger. Für die Verteilung und Speicherung werden folgende Verluste angenommen: Heizung: 10 %, Warmwasser 40 % [7].

Wohnen

Die Komfortlüftung wird bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs durch den reduzierten flächenbezogene Außenluftvolumenstrom von 0,3 m³/(m² h) berücksichtigt.

Die Modellierung der Wohnungsgröße und -belegung beruht auf Schweizer Durchschnittswerten. Die durchschnittliche Netto-Wohnfläche wird auf 87 m² für die Mehrfamilienhäuser festgelegt [2], [8]. Dazu wird ein Anteil des Treppenhauses addiert. Mit diesen Annahmen betragen die Brutto-Flächen je Wohnung inklusive Anteil Treppenhaus/

Tabelle 3. Nutzungsgrad/JAZ

Table 3. Efficiency of heating systems

Wärmeerzeuger	Nutzungsgrad/JAZ	
	HZ	WW
Gasfeuerung, kondensierend*	0,95	0,92
Fernwärme (CH-Durchschnitt) [7]	0,98	1,0
Wärmepumpe, Erdwärme [7]	4,3	2,8

* Minergie: NachweisVers2015P.xlsx, gültig bis 31.12.2015

Tabelle 4. Hoher und niedriger Bedarf für Haushaltsstrom, Lift und Lüftung pro Energiebezugsfläche

Table 4. High and low electricity demand for dwellings, lift and mechanical ventilation per heated floor area

	Langgest. MFH [kWh/(m ² a)]		Quadrat. MFH [kWh/(m ² a)]	
	niedrig	hoch	niedrig	hoch
Strom pro HH	15,3	24,5	15,8	25,3
Lift	0,35	0,88	0,36	0,90
Lüftung	2,2	3,1	2,3	3,4

Lift 114 m² (V1) bzw. 110 m² (V2). Diese Flächen bilden die Grundlage zur Berechnung der Energiebezugsfläche (Faktor 1.2).

Es werden zwei Wohnungsbelegungen betrachtet: als durchschnittliche Wohnungsbelegung in der Schweiz im Jahr 2005 der Wert 2.23 und für das Jahr 2030 eine städtische Belegungsdichte von 1.78 [9].

Der Stromverbrauch pro Haushalt wird nach [2] bestimmt. Es werden die Effizienzklasse C mit der Belegungsdichte 2.23 (HB) als höchster Wert sowie die Effizienzklasse A mit der Belegungsdichte 1.78 (TB) als geringster Wert für den Haushaltsstrom verwendet. Der Bedarf für Lift und Lüftung wird entsprechend der verwendeten Effizienzklasse übernommen. In Tabelle 4 sind die resultierenden Zahlenwerte gegeben. Diese entsprechen einem Haushaltsstrombedarf inkl. Lift pro Wohnung von 2886 kWh/a bzw. 1782 kWh/a. Diese Werte liegen in einem Bereich, wie sie in der Literatur zu finden sind [3], [10], [11], [12].

Verwaltung

Der minimale und maximale Strombedarf für Geräte und Beleuchtung wird nach Merkblatt SIA 2024 [3] „Einzel-, Gruppenbüro“ bestimmt (Tabelle 5). Diese Werte entsprechen in etwa den Werten aus der Literatur [13], [14].

PV-Ertrag

Ausgehend von einem heutigen Modulwirkungsgrad von 18 % bzw. einem zukünftig möglichen von 28 %, werden PV-Gesamtsystemwirkungsgrade von 14 % bzw. 22 % betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass in der Fassade die gesamte Fläche genutzt wird, die abzüglich der Fensterflächen und einem konstruktiv nicht nutzbaren Anteil von 8 % zur Verfügung steht. Die Fassade wird ab dem ersten Stockwerk mit PV belegt. Es wird angenommen, dass sich das unbeheizte Kellergeschoss mit Eingangsbereich halb im Erdreich befindet und die Gebäude damit kein eigentliches Erdgeschoss aufweisen. Auf dem Dach wird die PV-Anlage mit einer Neigung von 10° in Ost- und Westrichtung aufgeständert. Diese Anordnung ergibt einen höheren Ertrag als eine südliche Aufständering mit einem Neigungsgrad von 30° [15].

Verschattung durch Nachbargebäude

Für die Verschattung wird angenommen, dass das betrachtete Gebäude in alle vier Himmelsrichtungen von Nachbargebäuden umgeben ist. Die Anzahl von sechs Stockwerken für die Nachbargebäude wird gewählt, weil dies typisch ist für Mehrfamilienhäuser und Verwaltungsbauten.

Tabelle 5. Strombedarf für Verwaltungsbauten; Werte für Einzel- und Gruppenbüro aus [3]

Table 5. Electricity demand of office buildings; data for single and open offices [3]

	Strombedarf [kWh/(m ² a)]	
	niedrig	hoch
Beleuchtung	7	24
Betriebseinrichtungen	5	25
Lüftung (ohne Klimatisierung)	1	3
Total	13	52

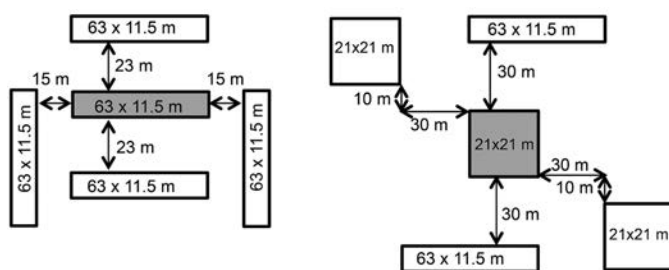


Bild 6. Verschattungssituation für die Basisvariante, Abstände und Lage der Nachbargebäude zum betrachteten Gebäude (links V1, V3, rechts V2, V4)

Fig. 6. Shading situation for basis variants, distance and location of neighboring buildings (left V1, V3, right V2, V4)

- Variante 1 und 3: 6 Stockwerke
- Variante 2 und 4: 6 (langgestrecktes Geb.) und 10 (quadratisches Geb.) Stockwerke

Die gewählten Abstände der Basisvarianten 1 und 3 bzw. 2 und 4 sind in Bild 6 dargestellt.

Verschattungsfaktoren

Die Höhe und der Abstand der Nachbargebäude spiegeln sich in den Verschattungsfaktoren für die Horizontverschattung wider. Die Faktoren werden pro Stockwerk, pro Fassade und für das Dach mit ESP-r [16] bestimmt und bei der Bestimmung des Heizwärmebedarfs (solare Gewinne) und für den PV-Ertrag verwendet.

Die Auswirkung durch unterschiedliche Abstände der Nachbargebäude auf den PV-Ertrag für Variante 1 ist in Bild 7 dargestellt. Die erste Zahl gibt den Abstand der Gebäude vor Kopf (Ost/West) und die zweite Zahl den Abstand der Gebäude, die parallel stehen (Nord/Süd) an. Je höher das betrachtete Gebäude und je größer die Abstände zu den Nachbargebäuden werden, desto geringer ist erwartungsgemäß der Einfluss der Verschattung von niedrigeren Nachbargebäuden.

Der Einfluss auf den PV-Ertrag durch die Verschattung, die sich durch unterschiedlich hohe Nachbargebäude der Variante 2 ergibt, ist in Bild 8 dargestellt. Es werden die Höhen der quadratischen Nachbargebäude variiert, da Hochhäuser oft aus einem Ensemble aus drei Gebäuden bestehen. Der Sprung in der Verschattung zwischen dem

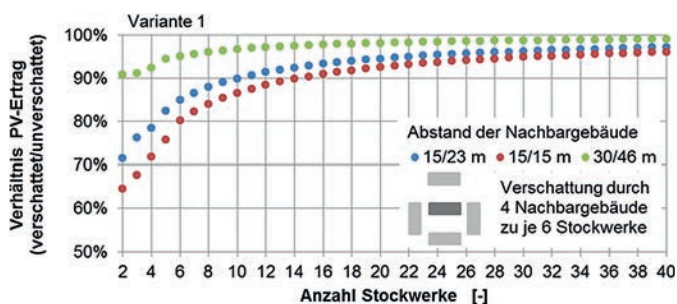


Bild 7. Variante 1: Verhältnis des PV-Ertrags verschattet/unverschattet durch Nachbargebäude in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke und dem Abstand der Nachbargebäude

Fig. 7. Variation 1: ratio of shaded/unshaded PV generation depending on the number of levels for different distances of the neighboring buildings

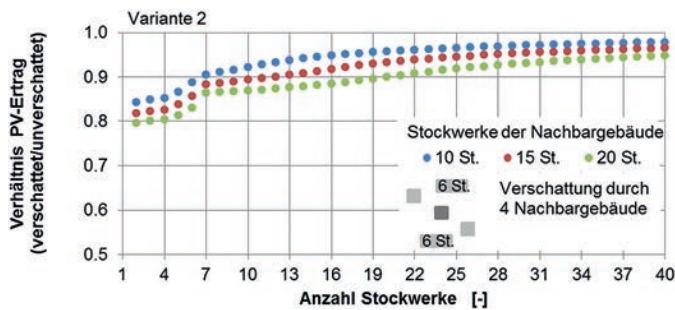


Bild 8. Verhältnis des PV-Ertrags verschattet zu unverschattet für Variante 2; die Höhe der quadratischen Nachbargebäude wird variiert

Fig. 8. Variation 2: ratio of shaded/unshaded PV generation depending on the height of the square neighboring buildings

6. und 7. Stockwerk ist mit dem Wegfall der Verschattung der 6-stöckigen Nachbargebäude zu erklären.

Bilanzierung

Es werden die HWLK- und die GEB-Nullbilanz untersucht. Alle Auswertungen basieren auf einer Gewichtung mit den Schweizer nationalen Gewichtungsfaktoren f_{CH} . Für den Elektrizitätsbedarf und den PV-Ertrag wird derselbe Strom-Gewichtungsfaktor verwendet (symmetrische Faktoren). Die Ergebnisse werden auf die Energiebezugsfläche bezogen. Zur Information sind bei den Varianten jeweils die Grenzwerte des gewichteten Energiebedarfs nach MuKE n 2014 dargestellt [5].

3 Auswertung

3.1 PV-Ertrag

Die Anteile des PV-Ertrags von Dach und Fassade am gesamten PV-Ertrag für alle 4 Varianten ist in Bild 9 abgebildet. Deutlich ist zu erkennen, wie der PV-Ertragsanteil vom Dach mit zunehmender Anzahl an Stockwerken stark abnimmt. Dabei ist der Verlauf hauptsächlich von der Fläche abhängig, die an den Fassaden für PV zur Verfügung steht. Die Form des Gebäudes spielt eine untergeordnete Rolle. Während bei dem Mehrfamilienhaus ca. 57 % der Fassade für PV genutzt werden kann, sind es bei der Verwaltung nur rund 42 %. Damit ist bei dem Verwaltungsbau der Anteil des PV-Ertrags vom Dach am Gesamtertrag höher, als bei dem Mehrfamilienhaus.

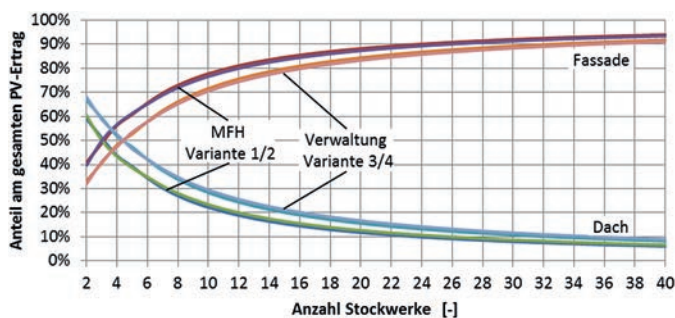


Bild 9. Anteile des PV-Ertrags von Dach und Fassade am gesamten PV-Ertrag für alle 4 Varianten

Fig. 9. Share of PV generation to total generation for all variants

3.2 Parameterstudie

Die Basisvariante für alle Varianten weist folgende Merkmale auf:

- Systemwirkungsgrad der PV-Anlage von 14 %,
- Klimastation Bern-Liebefeld,
- Orientierung der Hauptfassade nach Süden (V1, V3),
- Verteil- und Speicherverluste von Heizung/Warmwasser 10 %/40 %,
- Heizwärmebedarf erreicht den Minergie-P-Standard (60 % Neubauanforderung) bei 4 Stockwerken.

Für die Varianten wird immer ein Parameter gegenüber der Basisvariante geändert. Die einzelnen Varianten sind in Tabelle 6 beschrieben.

In diesem Beitrag wird an einem Beispiel gezeigt, wie sich die Parameter auswirken. Alle weiteren Resultate können [17] entnommen werden.

Welche Flächen mit welchem Anteil PV-Module belegt werden müssen, um die verschiedenen Nullbilanzen zu erreichen, zeigt Bild 10 für Variante 1. Je nach Anzahl Stockwerke, Wärmeerzeuger und Effizienz werden unterschiedliche PV-Flächen zur Erreichung der Nullbilanz benötigt. Diese können unterschiedlich kombiniert werden. Bild 10 zeigt mögliche Kombinationen.

Beispiel:

Ein Gebäude in Bern mit 10 Stockwerken, $\eta_{PV} = 14 \%$ und einer Gasfeuerung kann für einen hohen Strombedarf die HWLK-Nullbilanz erreichen (schwarze, durchgezogene

Tabelle 6. Zusammenfassung aller Varianten

Table 6. Summary of all variants

Variante				Kurzbegriff
1	2	3	4	„Basisvariante“
1a	2a	3a	4a	„ $\eta_{PV} = 0,22$ “
1b	2b	3b	4b	Klima „Lugano“
1c	2c	3c	4c	Klima „Davos“
1d	2d			„Brüstung Süd“ PV nur im Brüstungsbereich an Südfassade (V1), bzw. PV nur im Brüstungsbereich auf allen Fassaden (V2), (1 m hoch)
1e	2e	3d	4d	Heizwärmebedarf „Heizwärme 110 %“, Tabelle 1
1f		3e		Ausrichtung der Hauptfassade nach Ost
1g		3e		Ausrichtung der Hauptfassade nach West
1h	2h	3f	4e	„Verteilverluste“ Heizung 50 %, Warmwasser 60 %
1i		3g		„Nachbar nah“ 15/15 m
1j		3h		„Nachbar fern“ 30/46 m
1k	2i			2 m tiefer vorgesetzter „Balkon“
	2f			„15 St“ Nachbar 15 Stockwerke hoch
	2g			„20 St“ Nachbar 20 Stockwerke hoch

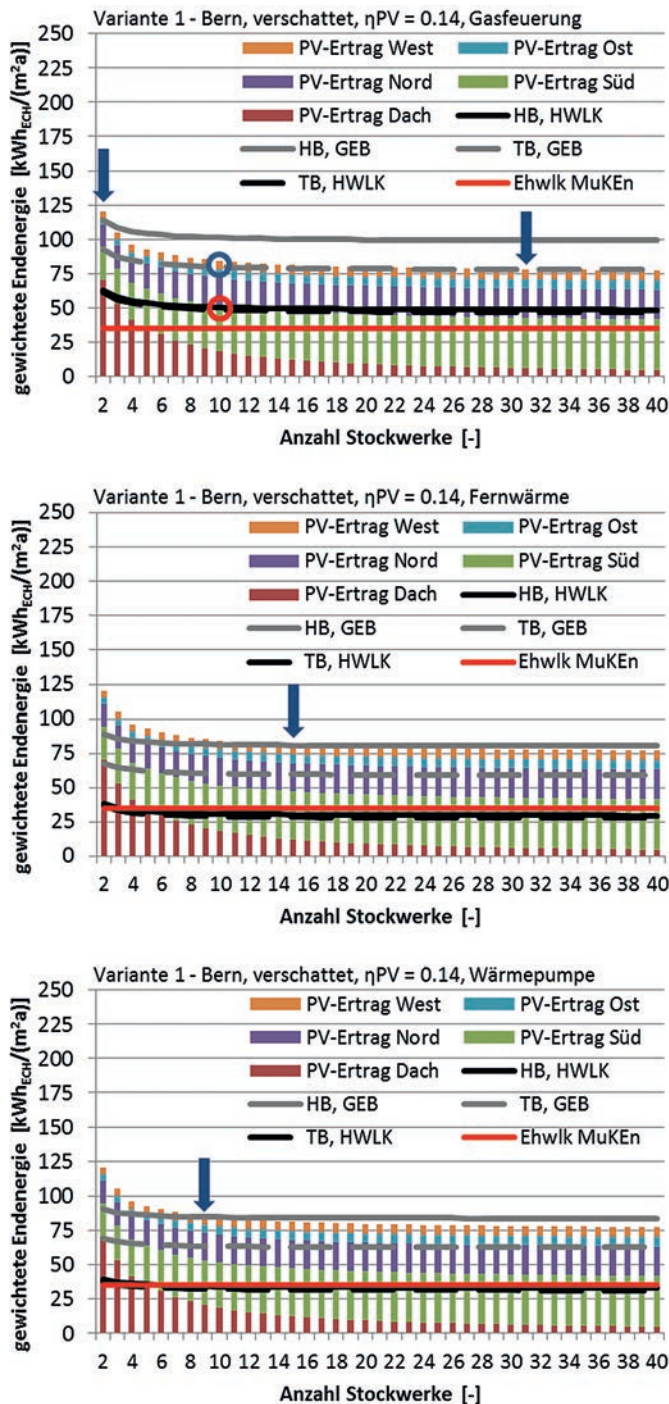


Bild 10. Variante 1 „Basisvariante“: gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung der Verschattung in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke Fig. 10. Variation 1 “basis variation”: weighted final energy for energy load and PV generation with shading depending on the number of floors

Linie, „HB, HWLK“), wenn das komplette Dach und die komplette Südfassade mit PV belegt sind (roter Kreis). Eine GEB-Nullbilanz kann bei einem niedrigen Haushaltsstrombedarf von 16 kWh_{EE}/(m² a) (TB, GEB, hellgrau gestrichelt) erreicht werden, wenn neben Dach, Süd-, Nord und Ostfassade noch ein Teil der Westfassade für PV genutzt wird (blauer Kreis). Mit einem hohen Haushaltsstrombedarf (25 kWh_{EE}/(m² a)) kann keine GEB-Nullbilanz erreicht werden (durchgezogene graue Linie liegt oberhalb des insgesamt möglichen PV-Ertrags).

Die Pfeile zeigen jeweils die maximale Anzahl an Stockwerken an, für die eine GEB-Nullbilanz erreicht werden kann. Mit Fernwärme bzw. Wärmepumpe kann die GEB-Bilanz bei einem hohen Bedarf noch mit 15 bzw. neun Stockwerken erreicht werden.

Der Grenzwert für die gewichtete HWLK-Endenergie nach MuKEn 2014 wird mit einer Gasfeuerung nicht eingehalten (gestrichelte schwarze „TB, HWLK“-Linie liegt über der roten Linie), jedoch mit Fernwärme und einer Wärmepumpe ab ca. 4 Stockwerken.

Wird der Systemwirkungsgrad der PV-Anlage von 14 % auf 22 % erhöht, ist bei gleichem HWLK-Bedarf mit einem höheren Haushaltsstrom die GEB-Nullbilanz erreichbar. Den Zusammenhang zeigt Bild 11.

Grundsätzlich kann bei sechs Stockwerken der Bedarf für Haushaltsstrom inkl. Lift etwas höher sein als bei 40 Stockwerken. Dies liegt am Anteil des PV-Ertrags vom Dach zum Gesamtertrag, der mit zunehmender Anzahl an Stockwerken immer geringer wird.

Überblick über die Varianten

In Bild 12 ist die mögliche Anzahl der Stockwerke mit einer GEB-Nullbilanz für alle betrachteten Parameter der

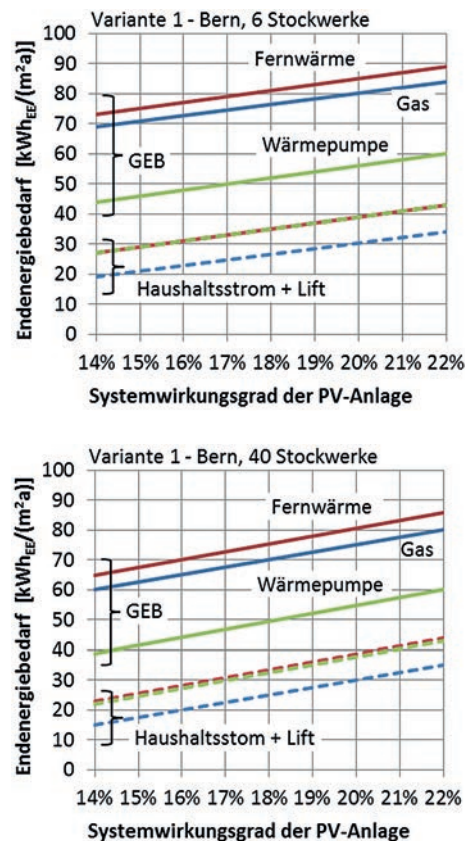


Bild 11. Zusammenhang zwischen dem Bedarf für Haushaltsstrom/Lift und dem Systemwirkungsgrad der PV-Anlage, um die GEB-Nullbilanz für Variante 1 inkl. Verschattung zu erreichen (oben/unten: 6/40 Stockwerke, HWLK Bedarf für Gas/FW/WP: 50/46/17 kWh_{EE}/(m² a), 6 Stockwerke bzw. 45/42/17 kWh_{EE}/(m² a), 40 St.) Fig. 11. Context of energy load for lighting, devices and lifts for GEB-zero balance of variation 1 (top/bottom 6/40 floors, HVAC load for gas/district heating/heat pump: 50/46/17 kWh_{EE}/(m² a), 6 floors or 45/42/17 kWh_{EE}/(m² a), 40 floors)

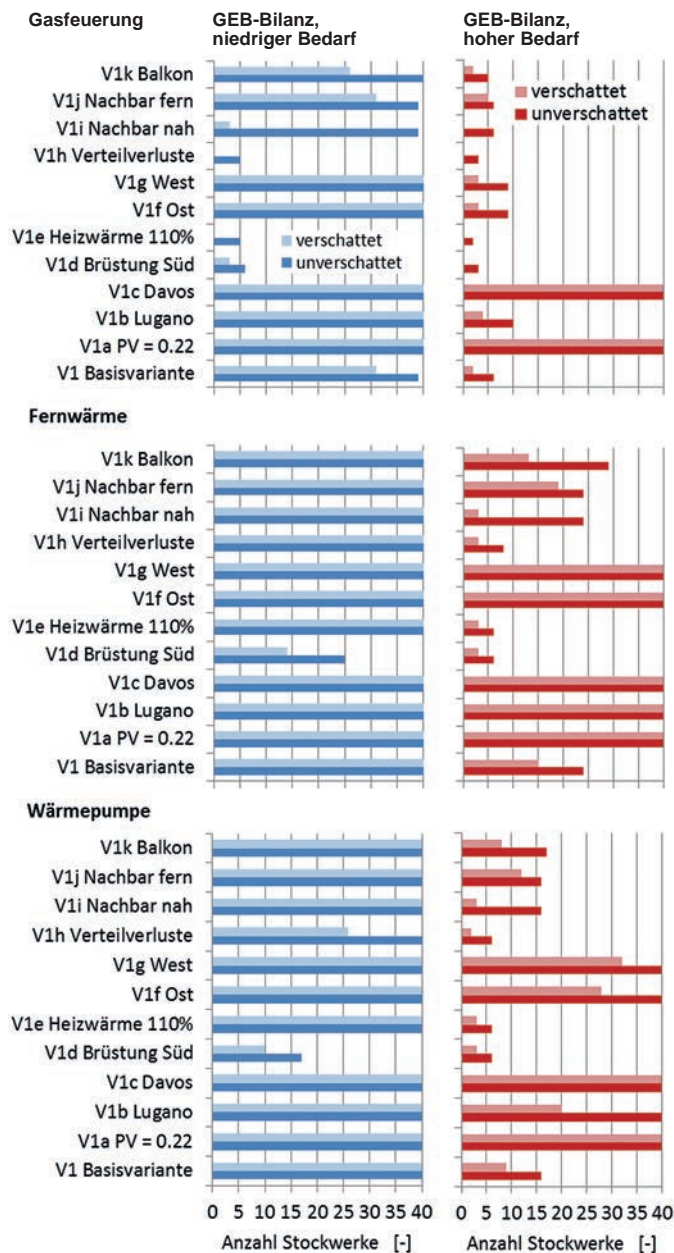


Bild 12. Anzahl Stockwerke, für die eine GEB-Nullbilanz erreicht werden kann; dargestellt sind die Ergebnisse für langgestreckte Mehrfamilienhäuser (Variante 1). Die Bilanzen sind mit nationalen Gewichtungsfaktoren bewertet (niedriger/hoher (HS+Lift) Bedarf: 16/25 kWh_{EE}/(m² a))
 Fig. 12. Number of floors for which a GEB zero balance can be achieved for multifamily dwellings (Variant 1). Balances are weighted with Swiss national weighting factors (low/high load for domestic electricity/lift 16/25 kWh_{EE}/(m² a))

Variante 1 zusammengefasst. Die HWLK-Bilanz wird nicht dargestellt, da sie für alle Varianten bis zu 40 Stockwerken erreicht wird. Hierzu ist in vielen Fällen nur die Belegung des Dachs und der Südfassade mit PV notwendig. Folgende Aussagen für langgestreckte Mehrfamilienhäuser können Bild 12 entnommen werden:

- Hat das Gebäude einen tiefen Gesamtenergiebedarf, kann bei den meisten Varianten die GEB-Nullbilanz mit bis zu 40 Stockwerken erreicht werden.
- Ist die Südfassade nur teilweise für PV nutzbar (Variante „Brüstung Süd“), ist die GEB-Nullbilanz auch mit niedrigem Bedarf für keinen Wärmeerzeuger bis 40 Stockwerke möglich.

- Mit einer Gasfeuerung ist eine GEB-Nullbilanz für mehrere Parameter nicht bis 40 Stockwerke zu erreichen.
- Ist der Gesamtenergiebedarf hoch, ist die GEB-Nullbilanz für Gebäude mit 40 Stockwerken für alle Wärmeerzeuger nur mit einem Systemwirkungsgrad der PV-Anlage von 22 % und für den Standort Davos möglich. Für Fernwärme sind 40 Stockwerke auch in Lugano bzw. mit Ost/West-Ausrichtung möglich.

Variante 2 zeigt recht ähnliche Resultate (s. [17]). Insgesamt zeigt Variante 1 jedoch ein leicht höheres Potential für eine GEB-Nullbilanz als Variante 2. Das größere Verhältnis von Fassadenfläche zu Energiebezugsfläche von Variante 1 macht dies möglich.

Bei beiden Varianten schneidet die Fernwärme am besten ab. Dies liegt hauptsächlich an der geringen Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für Warmwasser. Dadurch ist der HWLK-Endenergiebedarf für die Wärmepumpe im Mittel um 10 % höher als bei Fernwärme. Obwohl die Differenz nicht groß ist, führt die mit zunehmender Anzahl an Stockwerken abflachende PV-Ertragskurve dazu, dass die GEB-Nullbilanz mit einer Wärmepumpe gerade nicht mehr möglich ist.

Für Variante 3 zeigt Bild 13 eine Zusammenfassung der Resultate. Die HWLK-Bilanz ist wiederum nicht darge-

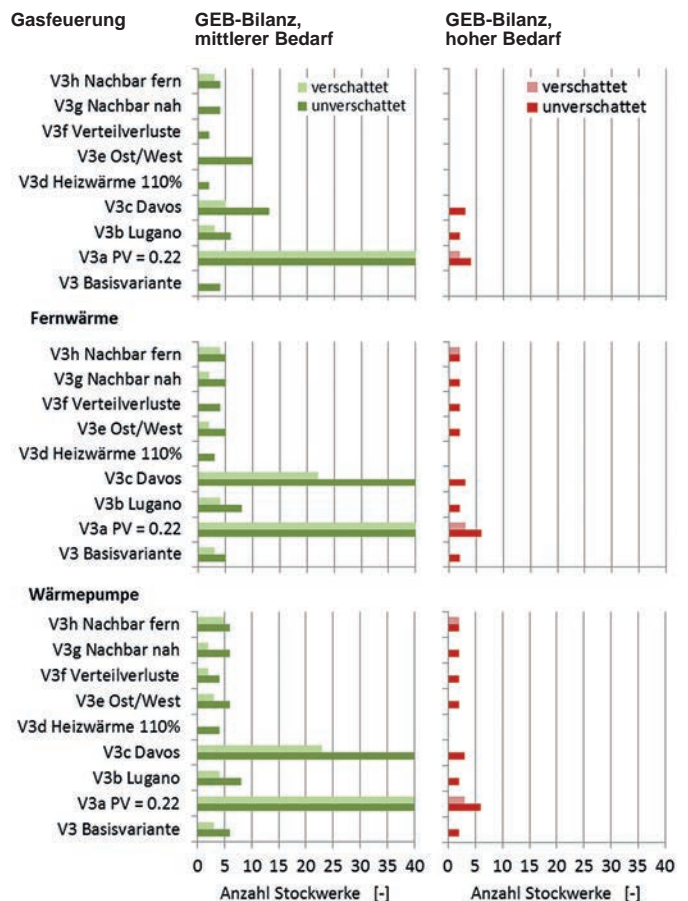


Bild 13. Anzahl Stockwerke, für die eine GEB-Nullbilanz erreicht werden kann; dargestellt sind die Ergebnisse für langgestreckte Verwaltungsbauten (Variante 3, mittlerer/hoher (Strom-)Bedarf: 30/49 kWh_{EE}/(m² a))
 Fig. 13. Number of floors for which a GEB zero balance can be achieved for office buildings (variant 2, mid/high load for lighting and devices: 30/49 kWh_{EE}/(m² a))

stellt, da sie auch hier in allen Fällen bis zu 40 Stockwerke erreicht wird. Auch die GEB-Bilanz mit niedrigem Gesamtenergiebedarf wird nicht dargestellt. Sie kann bis auf die Varianten „Heizwärme 110 %“ und „Verteilverluste“ mit einer Gasfeuerung für alle Varianten mit 40 Stockwerken erzielt werden. Um den Einfluss der Parameter zu verdeutlichen, wird anstatt des niedrigen ein mittlerer Gesamtenergiebedarf von $30 \text{ kWh}_{\text{EE}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ für Geräte/Beleuchtung und $2 \text{ kWh}_{\text{EE}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ für die Lüftung abgebildet. Folgende Aussagen für langgestreckte Verwaltungsbauten können Bild 13 entnommen werden:

- Die GEB-Nullbilanz kann mit mittlerem Gesamtenergiebedarf für alle Varianten nur mit einem PV-Systemwirkungsgrad von 22 % bis 40 Stockwerke erreicht werden.
- Ohne Verschattung durch umliegende Gebäude ist die GEB-Nullbilanz mit Fernwärme und Wärmepumpe auch für den Standort Davos bis 40 Stockwerke möglich.
- Bei allen anderen Parametern reduziert sich die Anzahl der Stockwerke, für die mit mittlerem Bedarf eine GEB-Nullbilanz möglich ist, deutlich.
- Bei einem hohen Gesamtenergiebedarf ist die GEB-Nullbilanz nicht oder nur für sehr wenige Stockwerke möglich.

Variante 4 zeigt ähnliche Ergebnisse wie Variante 3 (s. [17]). Aus den erzielten Resultaten kann der relative Einfluss der betrachteten Parameter auf die Erreichbarkeit von GEB-Nullbilanzen abgeleitet und wie folgt zusammengefasst werden:

hoch

- Energieeffizienz von Geräten und Beleuchtung
- Wärmeerzeuger
- Heizwärmebedarf
- Solarstrahlung am Standort
- Größe und Systemwirkungsgrad der PV-Anlage
- Verteil- und Speicherverluste für Heizung/Warmwasser

mittel

- Außentemperatur
- Verschattung durch Nachbargebäude nah/fern
- Verschattung durch Nachbargebäude hoch/niedrig

niedrig

- Ost-West-Ausrichtung (langgestreckter) Gebäude statt Süd-Nord
- vorgelagerte Balkone
- Grundriss der Gebäude

Damit ergeben sich folgende Prioritäten bei der Planung mit dem Ziel, eine GEB-Nullbilanz mit einer PV-Anlage zu erreichen:

1. Priorität

- niedriger Heizwärmebedarf
- tiefer Bedarf von Haushaltsstrom/Lift
- Wärmeerzeuger: Fernwärme oder Wärmepumpe
- große PV-Flächen an allen Fassaden mit einem hohen PV-Systemwirkungsgrad
- niedrige Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser

2. Priorität

- Verschattung durch Nachbargebäude minimieren (meist nicht oder kaum beeinflussbar)
- Vermeidung von vorgelagerten Balkonen

- Ost-West-Ausrichtung für langgestreckte Gebäude gegenüber Süd-Nord Ausrichtung bevorzugen, falls möglich.

4 Praxisbeispiele

Drei modernisierte Mehrfamilienhäuser in Zürich (17 Stockwerke), Romanshorn (6 Stockwerke) und Chiasso (8 Stockwerke) mit PV-Fassade werden mit den untersuchten Varianten verglichen. Die Mehrfamilienhäuser in Romanshorn und Chiasso verfügen neben der fassadenintegrierten PV-Anlage zusätzlich über eine PV-Anlage sowie thermische Solarkollektoren auf dem Dach.

Bild 14 zeigt den PV-Ertrag bzw. die PV-Fläche bezogen auf die Energiebezugsfläche für die vier untersuchten Basisvarianten und die drei Beispielgebäude. Die drei Beispielgebäude entsprechen in etwa dem Grundriss von Variante 2 (MFH, quadr., rote Linie).

Der PV-Ertrag pro PV-Fläche ist bei dem MFH Zürich um 67 % geringer als beim MFH Romanshorn und um 33 % geringer als bei dem MFH in Chiasso. Hinsichtlich des Strahlungsangebotes sind alle drei Standorte sehr ähnlich, wobei die Strahlungswerte in Chiasso auf senkrechte Flächen ca. 10 % höher sind als in Romanshorn und Zürich. Die Verschattung der Gebäude durch umliegende Nachbargebäude ist nicht bekannt und schwer abzuschätzen. Aufgrund der Lage scheint aber für das MFH Chiasso die Verschattung gegenüber MFH Romanshorn und MFH Zürich am größten zu sein.

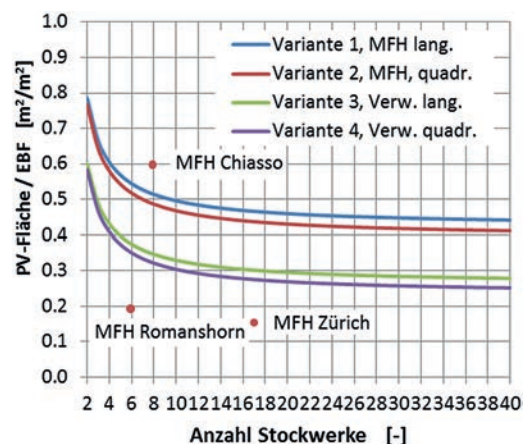
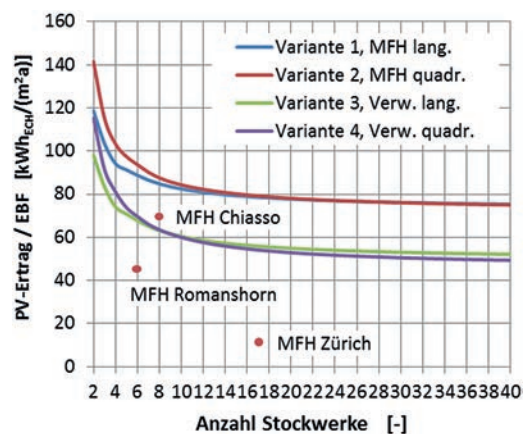


Bild 14. PV-Ertrag bzw. PV-Fläche pro Energiebezugsfläche; Vergleich der vier Varianten und der drei Beispielgebäude
Fig. 14. PV generation and area per heated floor area; comparison of the four variants and the three example buildings

Obwohl bei dem MFH Zürich fast die komplette Fassade ab dem 1. Obergeschoss mit PV-Modulen belegt ist, könnten noch mehr Flächen genutzt werden: die Balkonbrüstungen und das Dach. Zusätzlich ist die Fassadenfläche nicht komplett genutzt, da die Abstände zwischen den Modulen recht groß sind. Im Verhältnis zu den anderen beiden Gebäuden ist der PV-Ertrag bezogen auf die Energiebezugsfläche deutlich geringer. Es werden Solarmodule vom Typ Sharp NA-F128 (G5) mit einem Modulwirkungsgrad von 9 % verwendet [18], [19]. Der Gesamtenergiebedarf beträgt $61 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$ [20].

Das MFH Zürich mit Pelletfeuerung kann am ehesten mit der Basisvariante 2 „Klimastation Bern, Gasfeuerung, 17 Stockwerke, verschattet und einem niedrigen Gesamtenergiebedarf“ verglichen werden. Zu berücksichtigen sind der Modulwirkungsgrad, der nur halb so hoch ist wie bei der Basisvariante, und die geringere Flächenbelegung mit PV als bei der Basisvariante. Der Fensteranteil bei dem realen Gebäude in Zürich erscheint etwas höher als bei der Basisvariante. Werden diese Randbedingungen berücksichtigt, ist die große Differenz des PV-Ertrags von Zürich und der Basisvariante 2 zu erklären (Bild 15).

Das MFH Romanshorn hat einen L-förmigen Grundriss und ist an den beiden Stirnseiten an Nachbargebäude angebaut. Nur die der Straße zugewandte Süd- bzw. Westfassade sind ab dem ersten Obergeschoss mit PV belegt. Weitere PV-Module befinden sich an den Balkonbrüstungen und auf dem Dach. Auf dem Dach sind zusätzlich thermische Solarkollektoren montiert. An der Fassade wäre zwischen den Fenstern noch Platz für weitere PV-Module. Diese Flächen zu nutzen ist jedoch infolge des sehr niedrigen Gesamtenergiebedarfs des Gebäudes von $36 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$ [1] nicht notwendig, um die GEB-Nullbilanz zu erreichen. Es werden PV-Module mit einem Wirkungsgrad von 18 % verwendet.

Das MFH Romanshorn ist grob mit der Basisvariante 2 „Klimastation Bern, Wärmepumpe, sechs Stockwerke und einem niedrigen Gesamtenergiebedarf“ zu vergleichen (Bild 16). Unter Berücksichtigung der o. g. Randbedingungen ist die Differenz des PV-Ertrags zwischen MFH Romanshorn und Variante 2 als realistisch einzuschätzen.

Bei dem MFH Chiasso ist neben dem Dach, den Fassaden (ab 1. OG) und Balkonbrüstungen auch das Dach der Garagen mit PV belegt. Die aufgeständerte PV-Fläche auf dem Garagendach (5 Einzelgaragen) ist nicht bekannt,

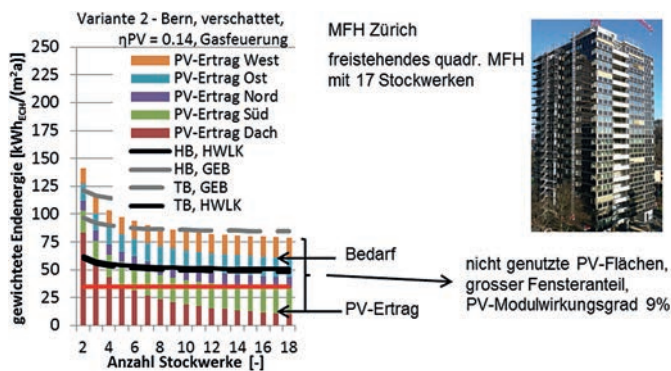


Bild 15. Einordnung des MFH Zürich zur Basisvariante 2
Fig. 15. Comparison MFH Zürich and basic variant 2

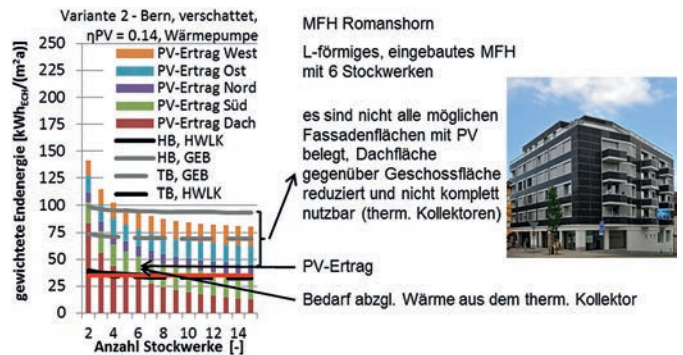


Bild 16. Einordnung des MFH Romanshorn zu Variante 2
Fig. 16. Comparison MFH Romanshorn and basic variant 2

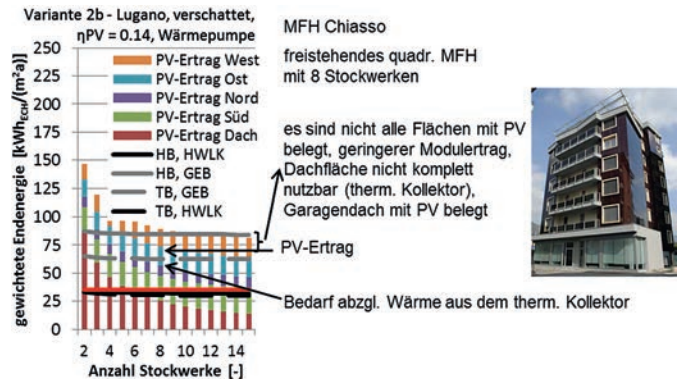


Bild 17. Einordnung des MFH Chiasso zu Variante 2b
Fig. 17. Comparison MFH Chiasso and basic variant 2b

diese erhöht jedoch den PV-Ertrag bzw. die PV-Fläche pro Energiebezugsfläche. Auf dem Dach sind auch bei diesem Gebäude zusätzlich thermische Solarkollektoren installiert. Da verschiedene PV-Module zum Einsatz kommen, wird der mittlere Modulwirkungsgrad auf ca. 14 % geschätzt. Damit liegt er unterhalb des Modulwirkungsgrads von den Beispielvarianten, was den PV-Ertrag pro EBF vermindert. Auch dieses Gebäude hat einen niedrigen Gesamtenergiebedarf ($GEB = 46 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$) [1].

Das MFH Chiasso entspricht sehr gut der Variante 2b „quadratischer Grundriss, Klimastation Lugano“, mit dem verschatteten Fall „Wärmepumpe mit acht Stockwerken und einem tiefen Gesamtenergiebedarf“ (Bild 17).

Der Vergleich der Beispielgebäude mit der Basisvariante 2 bzw. Variante 2b zeigt, dass die Grundannahmen für die Variantenstudie gut getroffen und die Ergebnisse auf reale Gebäude übertragbar sind. Weiter bestätigen die Beispielgebäude, dass eine hohe Effizienz (niedriger Bedarf), eine große PV-Fläche und ein hoher PV-Systemwirkungsgrad wichtig sind. Damit unterstreichen die realisierten Gebäude die Aussagen, die durch die vorgängige Variantenstudie erarbeitet wurden.

5 Eigendeckungsrate

Bei Gebäuden mit PV-Anlagen ist die Eigendeckungsrate ein wichtiges Thema. Diese gibt an, welcher Anteil des Gesamtbedarfs zeitgleich von dem PV-Ertrag gedeckt werden kann. An einem Beispiel für Variante 1 mit Wärmepumpe und für ein Gebäude mit 13 Stockwerken soll die Eigen-

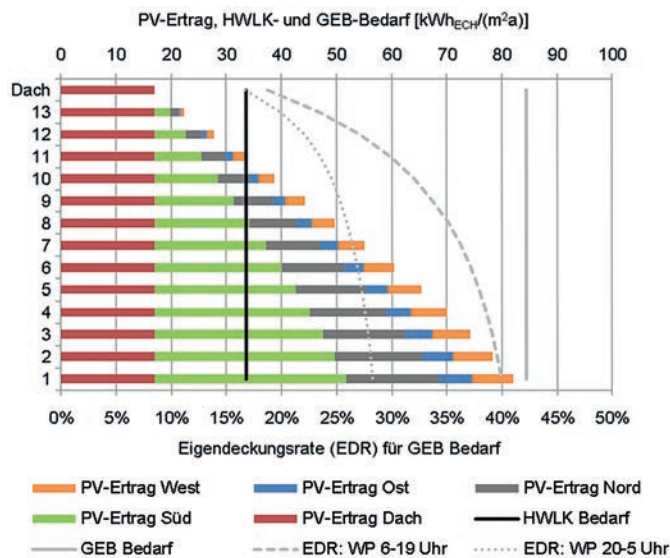


Bild 18. Gewichtete Endenergie und Eigendeckungsrate infolge stockwerksweiser Flächenbelegung mit PV (Basis: Variante 1 mit hohem Bedarf und Wärmepumpe, Klimastation Bern). Die Berechnung beruht auf folgenden Lastprofilen: Warmwasser: MFH Katalog Nr. 6 (Polysun), Haushaltsstrom: MFH 5 Haushalte (Polysun) und für Lüftung: 2-Stufen-Modell [3]

Fig. 18. Weighted energy and self-consumption rate due to PV configuration floor by floor (basis variant 1 with high load and heat pump, climat Bern). The calculations are based on load profiles for hot water: multifamily building no. 6 (Polysun), lighting/devices: multifamily building 5 households (Polysun), ventilation: 2-step model [3]

deckungsrate betrachtet werden. Es werden 13 Stockwerke gewählt, weil hier der Anteil des PV-Ertrages des Dachs am Gesamtertrag bereits relativ gering ist. Da das Gebäude mit sechsstöckigen Nachbargebäuden umgeben ist, wird vom Dach aus ausgehend die Fassade stockwerksweise von oben nach unten mit PV belegt, damit zuerst die unverschatteten Flächen genutzt werden. Es wird untersucht, wie sich die sukzessive zunehmende PV-Fläche jeweils auf die HWLK- und GEB-Nullbilanz sowie auf die Eigendeckungsrate auswirkt (Bild 18).

Für Variante 1 mit 13 Stockwerken und einem sehr gutem Wärmeschutz und hohem Bedarf brauchen nur das Dach und die obersten vier Stockwerke mit PV belegt zu werden, um die HWLK-Nullbilanz zu erreichen. Die GEB-Nullbilanz kann auch bei einer kompletten Belegung aller 13 Stockwerke nicht erfüllt werden.

Ausgehend von einer PV-Anlage auf dem Dach steigt die Eigendeckungsrate mit zunehmender Fassadenbelegung der Stockwerke von ca. 17 % auf 28–40 % an. Dabei ist entscheidend, wann die Wärmepumpe zum Betrieb freigegeben ist. Wird die Wärmepumpe am Tag zwischen 6 und 19 Uhr, also überwiegend zeitgleich mit dem PV-Ertrag, betrieben, ergibt sich eine höhere Eigendeckungsrate, als wenn die Wärmepumpe nur in den Nachtstunden betrieben wird (derzeit i. d. R. noch günstigerer Stromtarif). Reicht der PV-Ertrag nur für die HWLK-Nullbilanz (PV auf Dach und obersten vier Etagen), ergibt sich eine Eigendeckungsrate für den Gesamtenergiebedarf von ca. 25 % bzw. 32 % je nach Laufzeitfenster für die Wärmepumpe. Die Resultate zeigen, dass die Eigendeckungsrate durch

einen optimierten Zeitplan für die Wärmepumpe deutlich gesteigert werden kann (s. z. B. auch [21]).

6 Planungshinweise

Aus den Untersuchungen an den vier Basisvarianten lassen sich einige Planungshinweise für Gebäude, die eine HWLK- bzw. GEB-Nullbilanz erzielen sollen, ableiten:

- Um genügend PV-Fläche zur Verfügung zu stellen, sind keine hochverglaste Gebäude möglich.
- Ein niedriger Heizwärmebedarf ist wichtig; d. h. 3-fach-verglaste Fenster und sehr gute U-Werte für opake Bauteile.
- Einen sehr großen Einfluss auf die GEB-Nullbilanz hat die Effizienz von Geräten und Beleuchtung. Daher ist ein sehr geringer Bedarf für Geräte und Beleuchtung wichtig.
- Mit einem hohen PV-Systemwirkungsgrad kann z. T. ein hoher Bedarf kompensiert werden.
- Geringe Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser reduzieren den Bedarf.
- Der Einfluss des Grundrisses spielt bei den untersuchten Gebäuden eine untergeordnete Rolle.
- Wenn möglich, sollte ein möglichst großer Abstand zu Nachbargebäuden gewählt werden, um die Verschattung gering zu halten.
- Die Verschattung der Fassade durch vorgelagerte Balkone kann durch zusätzliche PV-Module an der Balkonbrüstung kompensiert werden.
- Bei den heutigen nationalen Gewichtungsfaktoren sollten Nullenergiegebäude mit Fernwärme oder einer Erdsonden-Wärmepumpe realisiert werden. Mit der vermehrten Nutzung von Biogas bzw. Power-to-Gas-Anlagen könnte in Zukunft auch eine Gasfeuerung interessant werden.
- Die HWLK-Nullbilanz kann in vielen Fällen durch den PV-Ertrag vom Dach und Teilen der Südfassade gedeckt werden. In diesen Fällen ist es auch möglich, eine andere Kombination zu wählen: z. B. nur die obersten Stockwerke mit PV-Modulen belegen, dafür aber auf allen Fassaden. Hierbei bleibt allerdings zu berücksichtigen, dass nicht belegte Flächen für den PV-Ertrag wegfallen – auch wenn das betrachtete Gebäude selbst bereits den eigenen Bedarf decken kann, ist im Sinne der Energiewende eventuell die Ausweitung auf eine Betrachtung des Quartiers insgesamt sinnvoll.

7 Zusammenfassung

Die umfangreichen Parameteruntersuchungen zeigen, dass auch große Gebäude die HWLK- bzw. die GEB-Nullbilanz erreichen können. Der Einfluss verschiedener Parameter auf die Erreichbarkeit von Nullbilanzen wird dargestellt. Diese Kenntnisse sollen Planern dabei helfen, Nullenergiegebäude zu realisieren. Zwar können im Planungsprozess nicht alle hier untersuchten Parameter beeinflusst werden, jedoch kann das Bewusstsein für die Möglichkeiten und Grenzen einzelner Parameter gestärkt werden.

Die getroffenen Basisannahmen sind ambitioniert, aber nicht unrealistisch, wie der Vergleich mit realisierten Mehrfamilienhäusern in Zürich, Romanshorn und Chiasso zeigt.

Die Ergebnisse der Studie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die HWLK-Nullbilanz kann bis auf eine Ausnahme für alle untersuchten Varianten für Gebäude mit bis zu 40 Stockwerken erreicht werden. In der Regel ist hierzu nur Photovoltaik auf dem Dach, der Südfassade und ggf. noch in Teilbereichen an einer weiteren Fassade notwendig.
- Ausgehend von einem niedrigen Heizwärmebedarf ist der Haushaltsstrombedarf bzw. die Effizienz von Geräten und Beleuchtung in Kombination mit der Höhe des erzielbaren PV-Ertrags entscheidend dafür, ob eine GEB-Nullbilanz eingehalten werden kann.
- Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Wärmeerzeuger. Mit den aktuell gültigen nationalen Gewichtungsfaktoren und typischen Nutzungsgraden/Jahresarbeitszahlen kann die GEB-Nullbilanz für die größte Anzahl an Stockwerken mit Fernwärme erreicht werden. Bei einer Erdsonden-Wärmepumpe führt die Kombination aus niedriger Jahresarbeitszahl für Warmwasser und einem hohen Warmwasserbedarf bei Wohngebäuden zu einer ungünstigeren Bilanz. Im Vergleich zu Fernwärme und Wärmepumpe ist die mögliche Anzahl an Stockwerken, für die eine GEB-Nullbilanz mit einer Gasfeuerung erzielt werden kann, deutlich geringer.
- Je höher das Gebäude ist, desto geringer ist erwartungsgemäß der Einfluss durch die Verschattung durch tiefere Nachbargebäude.
- Die Kompaktheit des Gebäudes spielt eine untergeordnete Rolle.
- Mit zunehmender Anzahl an Stockwerken sinkt der Anteil des PV-Ertrags vom Dach gegenüber dem PV-Gesamtertrag. Dies hat zur Folge, dass
 - die Ertragskurve mit zunehmender Anzahl an Stockwerken abflacht und die Erreichbarkeit der Nullbilanz sensibler auf kleine Änderungen im Bedarf bzw. im PV-Ertrag wird. Die Anzahl Stockwerke, für die eine Nullbilanz erreichbar ist, wird dadurch stark beeinflusst.
 - höhere Gebäude effizienter betrieben werden müssen, als niedrige.
 - bei niedrigen Gebäuden der PV-Ertrag vom Dach relevant ist. Bei hohen Gebäuden spielt er eher eine untergeordnete Rolle und die Fassaden bringen den größten Anteil. Dies hat zur Folge, dass bei sehr hohen Gebäuden der PV-Ertrag eines Stockwerks ungefähr dem Bedarf eines Stockwerks entsprechen muss, um eine GEB-Nullbilanz zu erreichen.

Ohne eine gute Planung, einen sehr effizienten Betrieb und große PV-Flächen mit hohem PV-Systemwirkungsgrad wird die Realisierung von großen Nullenergiegebäuden schwierig. Dagegen ist die Realisierung von Nullwärmeenergiegebäuden, d. h. die Erfüllung der HWLK-Nullbilanz wie sie auch durch die MuKen auf Grundlage der EPBD angestrebt bzw. von Minergie-A verlangt wird, für große Gebäude nicht unrealistisch. Künftige Fortschritte in der PV-Technik vereinfachen das Erreichen einer „Null“.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts „Möglichkeiten und Grenzen von Nullenergiegebäu-

den“ erarbeitet, welches das Bundesamt für Energie BFE (Schweiz) unter dem Kennzeichen SI/500950-01 gefördert hat.

Literatur

- [1] Solaragentur Schweiz: Schweizer Solarpreis 2013, 2014; Zürich. www.solaragentur.ch.
- [2] Gasser, S.: Revision SIA 380/4, Teilprojekt 8: Strombilanzmodell für Wohnbauten. SIA und Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2014.
- [3] Merkblatt SIA 2024, Standardnutzungsbedingungen für Energie- und Gebäudetechnik. 2006.
- [4] Nationale Gewichtungsfaktoren der Schweiz, 2009. www.endk.ch
- [5] MuKen 2014, Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKen) 2014. EnDK. www.endk.ch
- [6] Merkblatt SIA 2028, Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik. 2008.
- [7] SIA 380, Grundlagen für energetische Berechnungen von Gebäuden. 2015.
- [8] Bundesamt für Statistik. www.admin.ch/bfs
- [9] Haushaltsszenarien – Entwicklung der Privathaushalte zwischen 2005 und 2030. Bundesamt für Statistik, 2008.
- [10] Merkblatt SIA 2040, SIA-Effizienzpfad Energie. 2011.
- [11] SIA 380/1, Thermische Energie im Hochbau. 2009.
- [12] Wege zum Effizienzhaus Plus. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2014. www.bmub.bund.de
- [13] Knissel, J.: Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1999.
- [14] Aiulfi, D., Maschio, I., Dellspere, V., Brunet, L., Primas, A., Benz-Karlström, P., Jakob, M., Honegger-Ott, A., Grodofzig, B.: Energieverbrauch von Bürobauten und Grossverteilern, Bericht im Auftrag für das Bundesamt für Energie, Projekt Nr. 101727, 2010.
- [15] Schaede, M., Grossklos, M.: Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E) – Endbericht. Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt. www.iwu.de, 2014
- [16] ESRU, ESP-r (open source): A Building and Plant Energy Simulation Environment. University of Strathclyde, Glasgow; <http://www.esru.strath.ac.uk>. Programm Version 2013.
- [17] Hall, M., Geissler, A.: Möglichkeiten und Grenzen von grossen Nullenergiegebäuden. Schlussbericht BFE SI/500950-01, 2015. www.fhnw.ch/habg/iebau
- [18] Muntwyl, U., Joss, D., Reber, N., Bützer, D., Gfeller, D.: PV-Fassadenelemente auf allen vier Seiten eines Hochhauses: Beispiel für einen Markt für PV-Dünnschicht-Elemente, 2011. www.pvtest.ch
- [19] Sharp Electronics, Technische Daten Sharp NA-F128(G5). www.sharp.de.
- [20] Pfäffli, K.: Hochhäuser Sihlweid – Schlussbericht Zielerreichung 2000-Watt-Gesellschaft basierend auf dem SIA-Effizienzpfad Energie. Architekturbüro Preisig Pfäffli, 2014.
- [21] Hall, M., Geissler, A.: Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die energetische Flexibilität von Gebäuden. Bauphysik, 37 (2015), H. 2, S. 115–123.
- [22] European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC): Proceedings. www.eupvsec-proceedings.com.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Monika Hall
wissenschaftliche Mitarbeiterin
Prof. Dr.-Ing. Achim Geissler
Leiter Gruppe Bau
Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau
St. Jakobs Strasse 84, CH-4132 Muttenz

MAS FHNW Energie am Bau

www.fhnw.ch/wbbau



Photo: Claire Morin, Matthias Indermaur

Das Institut Energie am Bau der FHNW bietet in Olten 5 CAS zum Thema Energie am Bau an, welche mit einer Master Thesis zu einem MAS FHNW Energie (60 ECTS) abgeschlossen werden können. Alle CAS sind inhaltlich und zeitlich aufeinander abgestimmt und sorgfältig koordiniert.

CAS Energie am Bau

Der Lehrgang vermittelt das Basiswissen zum nachhaltigen Bauen und Erneuern. Im Zentrum stehen bauphysikalische Zusammenhänge, Standards und Instrumente zur Energieeffizienz und zu erneuerbaren Energien in Gebäuden und Systemen – sowohl der Gebäudehülle als auch der Gebäudetechnik.

Leitung: Manfred Huber, dipl. Architekt ETH/SIA

CAS Management Skills

Der Lehrgang thematisiert das Management, die Kommunikation und die Führung in komplexen Bauvorhaben. Neben der Wissensvermittlung geht es vor allem um praktische Einübung von Inhalten mit ausgeprägtem Trainingscharakter.

Leitung: Dr. Klaus Heidler, Transaktionsanalytiker CTA

CAS Energie in der Gebäudetechnik

In diesem Lehrgang sind geeignete Technologien und deren adäquater Einsatz für die Effizienzsteigerung und für die Nutzung erneuerbarer Energien in Neubau- und Erneuerungsprojekten wesentliche Lerninhalte. Im Zentrum steht die integrale Lösung.

Leitung: Dieter Többen, dipl. HLK-Ingenieur

CAS Elektrische Energie am Bau

Der Lehrgang vermittelt Grundlagen und Technologien der auf Elektrizität basierenden Gebäudetechnik bis hin zum All-electric House und zum Plusenergiehaus mit den Schwerpunkten Vernetzung, Optimierung und Gebäudeautomation.

Leitung: Prof. Dr. Jürg Bichsel, Leiter IEBau

CAS Energie in der Gebäudeerneuerung

Der Lehrgang zeigt Lösungen und geeignete Technologien zur Verbesserung der Energieeffizienz im Bestand – baulich-technische Konzepte des Weiterbaus zur Wahrung der architektonischen Qualität.

Leitung: Andreas Baumgartner, dipl. Bauingenieur FH

Master Thesis

Die selbstständige Erarbeitung eines Projektes für Neubau oder Erneuerung belegt, dass die Studierenden komplexe Themen auf wissenschaftlicher Basis bearbeiten können. Die Masterarbeit ist integraler Teil des Studienganges MAS FHNW Energie am Bau und hat in der Gesamtwertung das gleiche Gewicht wie ein CAS.

Das FHNW Modulprogramm Energie am Bau

CAS Energie am Bau (Frühjahr)

Basiswissen zum nachhaltigen Bauen und Erneuern

CAS Management Skills (Sommer)

Projektmanagement, Kommunikation und Führung

CAS Energie in der Gebäudetechnik (Herbst)

Erneuerbare Energien und Energieeffizienz

CAS Elektrische Energie am Bau (Frühling)

Konzepte und Bausteine zum All-electric-house

CAS Energie in der Gebäudeerneuerung (Sommer)

Strategien des energieeffizienten Weiterbaus

Master Thesis (Frühjahr und Herbst)

Masterarbeit mit baupraktischem Inhalt

Alle Detailprogramme mit Anmeldeformular können unter www.fhnw.ch/wbbau als PDF heruntergeladen werden.



Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Fachhochschule Nordwestschweiz

Institut Energie am Bau
St. Jakob-Strasse 84
CH-4132 Muttenz

T: +41 61 467 45 45

F: +41 61 467 45 43

iebau.habg@fhnw.ch
www.fhnw.ch/habg/iebau/