

## Hochhäuser als Nullenergiegebäude - ist das möglich?

Monika Hall, Achim Geissler

Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, St. Jakob Strasse 84, 4132  
Muttenz, [www.fhnw.ch/habg/iebau](http://www.fhnw.ch/habg/iebau)

### Zusammenfassung

### Résumé

### Abstract

Dieser Beitrag befasst sich mit der Frage, ob Gebäude mit bis zu 40 Stockwerken eine Nullbilanz für die gesamte Gebäudetechnik (HWLK-Nullbilanz "Nullwärmeenergiegebäude") oder dem gesamten Energiebedarf des Gebäudes (GEB-Nullbilanz "Nullenergiegebäude") im Jahr erreichen können. Mit umfangreichen, simulationsbasierten Untersuchungen an je zwei Mehrfamilienhäusern und Verwaltungsbauten werden die Auswirkungen verschiedener Parameter auf die Nullbilanz analysiert. Die Hauptergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die HWLK-Nullbilanz kann bis auf eine Ausnahme für alle Varianten mit bis zu 40 Stockwerken erreicht werden.
- Für eine GEB-Nullbilanz sind die vier wichtigsten Parameter:
  - hohe Effizienz von Geräten und Beleuchtung,
  - Wärmeerzeuger: Wärmepumpe oder Fernwärme,
  - grosse verfügbare PV-Fläche und
  - hoher effektiver Systemwirkungsgrad der gesamten PV-Installation.

The potential for large buildings of up to 40 levels to achieve a net zero balance for HVAC only and/or achieving net zero energy building status is analyzed. The simulation based study includes multifamily dwellings and office buildings. A wide range of parameters is investigated in regard to their impact on the zero energy balance. The main results can be summarized as:

- the net zero HVAC balance can be achieved for up to 40 levels for all variants studied but one
- the four main parameters regarding a net zero energy balance are
  - highly efficient electric devices and lighting,
  - heating system: district heating or heat pump
  - high actually available area for PV and
  - high overall efficiency of the PV-system.

# 1. Ausgangslage

Für Einfamilienhäuser und kleine Mehrfamiliengebäude reicht in der Regel der Platz für eine entsprechend grosse Photovoltaikanlage auf dem Dach aus, um in der Jahresbilanz den Gesamtenergiebedarf durch den Photovoltaikertrag zu decken. Es stellt sich die Frage, ob grosse Gebäude, d.h. Gebäude mit bis zu 40 Stockwerken, mit langgestrecktem bzw. quadratischem Grundriss genügend Fläche für Photovoltaik auf dem Dach und an den Fassaden 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. Für vier Basismodelle, je zwei Mehrfamilienhäuser und Verwaltungsbauten, werden die Auswirkungen verschiedener Parameter auf die beiden Nullbilanzen analysiert. Es wird davon ausgegangen, dass stets die maximal möglichen Flächen auf dem Dach und an den Fassaden mit PV-Modulen belegt sind.

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

- Klimastation (**Bern**, Davos, Lugano)
- Heizwärmebedarf (**60%** (Minergie-P) bzw. 110% der Neubauanforderung bei 4 Stockwerken)
- Wärmeerzeuger (**Gasfeuerung**, Fernwärme, Erdsonden-Wärmepumpe)
- Verteil- und Speicherverluste von Heizung/Warmwasser (**10%/40%**, 50%/60%),
- Energiebedarf für Geräte und Beleuchtung (hoher/**tiefer** 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** bzw. nur 1.0 m hohes Brüstungsband, alle anderen Fassaden komplett mit PV belegt) und
- Systemwirkungsgrad der Photovoltaikanlage (**14%**, 22%).

## Verständigung

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 GEB) Wohnen - Effizienzklasse C [1] für Haushaltsstrom, Lift und Lüftungsanlage, Belegungsdichte 2.23  
Verwaltung - Geräte, Beleuchtung nach [2] „hoch“ (Einzel-/Gruppenbüro)

TB (tiefer GEB) Wohnen - Effizienzklasse A [1] für Haushaltsstrom, Lift und Lüftungsanlage, Belegungsdichte 1.78  
Verwaltung - Geräte, Beleuchtung nach [2] „tief“ (Einzel-/Gruppenbüro)

ECH Energieträger mit Schweizer nationalen Gewichtungsfaktoren gewichtet

$E_{hwk}$  Grenzwert des gewichteten Endenergiebedarfs für HWLK nach MuKE [3], gewichtet mit Schweizer nationalen Gewichtungsfaktoren, Wohnen:  $E_{hwk} = 35 \text{ kWh}_{ECH}/(\text{m}^2 \text{ a})$

EE Endenergiebedarf

HH Haushalt

$\eta_{PV}$  Systemwirkungsgrad der Photovoltaikanlage: Module und Verluste (PV-Systemwirkungsgrad)

## 2. Randbedingung

### 2.1 Gebäudedaten

Die Fassadenansichten der Basismodelle mit exemplarisch vier Stockwerken zeigt Abbildung 1:

- 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

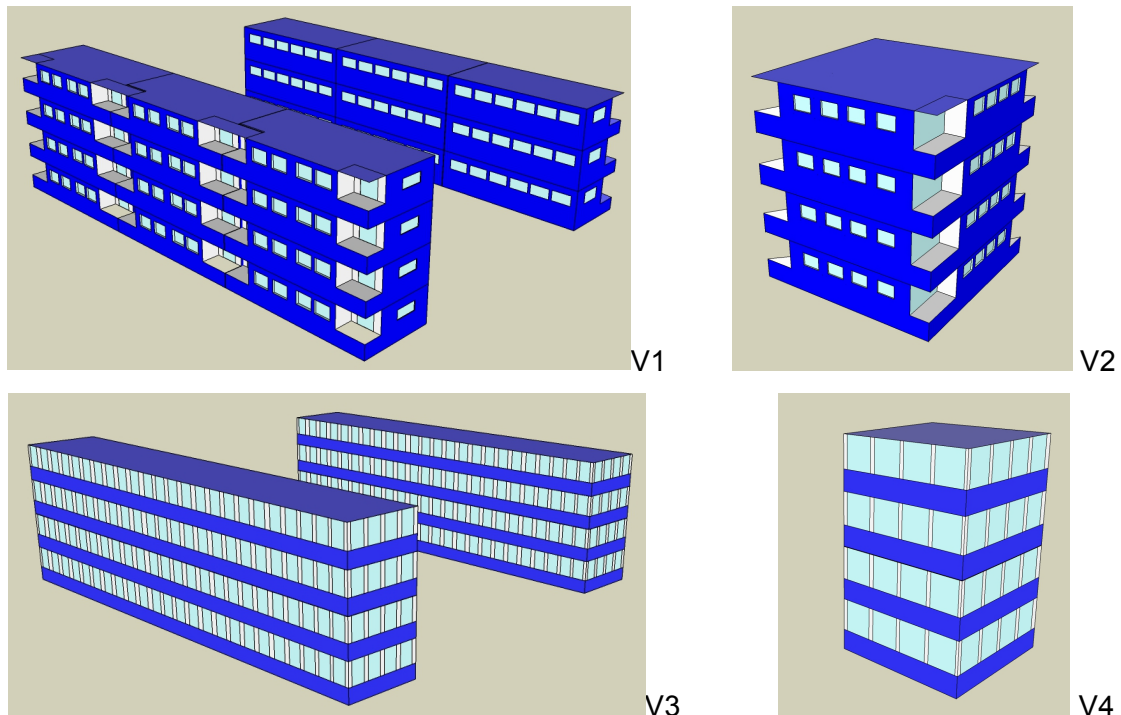


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Fassadenansichten der vier betrachteten Varianten. Das Dach und die dunkelblauen Flächen der Fassaden sind mit Photovoltaik bedeckt.

In Tabelle 1 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 mit den identischen Bauteilen einen etwas geringeren Heizwärmebedarf auf.

Die Fassade des Verwaltungsbau (V3, V4) weist ein durchgängiges Fensterband und einen Brüstungsbereich auf. Damit können PV-Module im Bereich der Fensterbrüstung/Geschosdecke 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 beträgt die Höhe des Fensterbands 1.9 m. Der Fensterflächenanteil der Fassade ergibt sich damit zu knapp 58 %. Es wird kein hochverglaster Verwaltungsbau gewählt, da in diesem Fall die nutzbare Fassadenfläche, die für PV zur Verfügung steht, gegen Null geht.

Tabelle 1 Daten der Gebäudegeometrie für die Variante 1 - 4 (links) und energetische Daten der Basisvariante und die zusätzlich untersuchte Variante "Heizwärme" (rechts) [4].

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 <sup>2</sup>	87	-
Anzahl Wohnungen pro Geschoss, -	6/4	-
Betrachtete Anzahl Geschosse, -	2 ... 40	2 ... 40
Energiebezugsfläche pro Geschoss, m <sup>2</sup>	684/441	732/473
Fensteranteil N, %	21/24	58
Fensteranteil S, %	35/24	58
Fensteranteil O/W, %	7/24	58
Standardfenster, m <sup>2</sup>	1.6 x 1.3	Fensterband
Anzahl pro Etage, - O/W	1/4	-
N	18/4	-
S	12/4	-
Balkontüre, m <sup>2</sup>	3 x 2.1	-
Anzahl pro Etage, - S N/S/O/W	6 je 1	-

Parameter	Basis	Variante "Heizwärme 110%"
U <sub>opak</sub> , W/(m <sup>2</sup> K)	0.20*	0.48**
U <sub>Fenster</sub> , W/(m <sup>2</sup> K)	0.90	1.4
g-value, -	0.50	0.60
Glasanteil Fenster, -	0.80	
Reduktionsfaktor für EG zu unbeheizten Kellergeschoss, -	0.73	
Bauweise, -	massiv	
* U-value = 0.15 W/(m <sup>2</sup> K) + 30% Wärmebrücke		
** U-value = 0.40 W/(m <sup>2</sup> K) + 20% Wärmebrücke		

## 2.2 Klimadaten

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgt mit Klimadaten gemäss Merkblatt SIA 2028 [5]. Der PV-Ertrag wird mit den Strahlungsdaten aus dem Programm Meteonorm 6.1, mit der Einstellung "Standard", berechnet. Es werden die Klimastationen Bern-Liebefeld "Bern", Lugano und Davos betrachtet.

## 2.3 Heizung und Warmwasser

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgt gemäss SIA 380/1:2009. Der Warmwasserbedarf beruht auf den Standardwerten aus SIA 380/1:2009: Mehrfamilienhaus: 75 MJ/(m<sup>2</sup> a), Verwaltung 25 MJ/(m<sup>2</sup> a). Tabelle 2 zeigt die verwendeten Nutzungsgrade und Jahresarbeitszahlen der

Wärmeerzeuger. Für die Verteilung und Speicherung werden folgende Verluste angenommen: Heizung: 10%, Warmwasser 40% [6].

Tabelle 2 Nutzungsgrad/JAZ

Wärmeerzeuger	Nutzungsgrad/JAZ	
	HZ	WW
Gasfeuerung, kondensierend*	0.95	0.92
Fernwärme (CH-Durchs.) [6]	0.98	1.0
Wärmepumpe, Erdwärme [6]	4.3	2.8

\*Minergie: NachweisVers2015P.xlsx, gültig bis 31.12.2015

## 2.4 Strombedarf

Die durchschnittliche Netto-Wohnfläche beträgt für Mehrfamilienhäuser 87 m<sup>2</sup> [1], [7]. Diese Fläche wird mit einem Anteil für das Treppenhaus ergänzt und mit dem Faktor 1.2 auf die Bruttofläche umgerechnet. Bei sechs Wohnungen pro Etage wird angenommen, dass es drei Eingänge, d.h. drei Treppenhäuser und drei Lifte gibt. Damit beträgt die Brutto-Flächen je Wohnung inklusive Anteil Treppenhaus/Lift 114 m<sup>2</sup> (V1) bzw. 110 m<sup>2</sup> (V2). Diese Flächen bilden die Grundlage zur Berechnung der Energiebezugsfläche.

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 [8].

Der Haushaltsstrombedarf wird nach [1] 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 3 sind die resultierenden Bedarfswerte gegeben. Diese entsprechen einem Haushaltsstrombedarf inkl. Lift pro Wohnung von 2'886 kWh/a bzw. 1'782 kWh/a. Diese Werte liegen in einem Bereich wie sie in der Literatur zu finden sind [2], [9], [10], [11].

Für die Verwaltung wird der minimale und maximale Strombedarf für Geräte und Beleuchtung nach Merkblatt SIA 2024 [2] "Einzel-, Gruppenbüro" bestimmt. Diese Werte entsprechen in etwa den Werten aus der Literatur [12], [13].

Tabelle 3 Hoher und tiefer Bedarf für Strom für das Mehrfamilienhaus und die Verwaltung pro Energiebezugsfläche.

	Mehrfamilienhaus [kWh/(m <sup>2</sup> a)]				Verwaltung [kWh/(m <sup>2</sup> a)]		
	langgestreckt		quadratisch		Bedarf	tief	hoch
Bedarf	tief	hoch	tief	hoch			
Strom pro HH	15.3	24.5	15.8	25.3	Beleuchtung	7	24
Lift	0.35	0.88	0.36	0.90	Betriebseinrichtungen	3	25
mech. Lüftung mit Wärmerückgew. 0.3 m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> )	2.2	3.1	2.3	3.4	mech. Lüftung mit Wärmerückgew. 0.3 m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> )	1	3

## 2.5 PV-Ertrag

Es werden PV-Gesamtsystemwirkungsgrade von 14 % bzw. 22 % betrachtet. Die Fassade ist ab dem ersten Stockwerk mit PV belegt. Auf dem Dach wird die PV-Anlage mit einer Neigung von  $10^\circ$  in Ost- und Westrichtung aufgeständert. Diese Anordnung ergibt einen höheren Ertrag als eine südliche Aufständerung mit einem Neigungsgrad von  $30^\circ$  [14].

## 2.6 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 langgestreckten Nachbargebäude wird gewählt, weil dies typisch ist. Das quadratische Gebäude wird mit zwei quadratischen Gebäuden ergänzt, da diese oft als Ensemble von drei Gebäuden gebaut werden. Die gewählten Abstände der Basisvarianten 1 und 3 bzw. 2 und 4 sind in Abbildung 2 dargestellt.

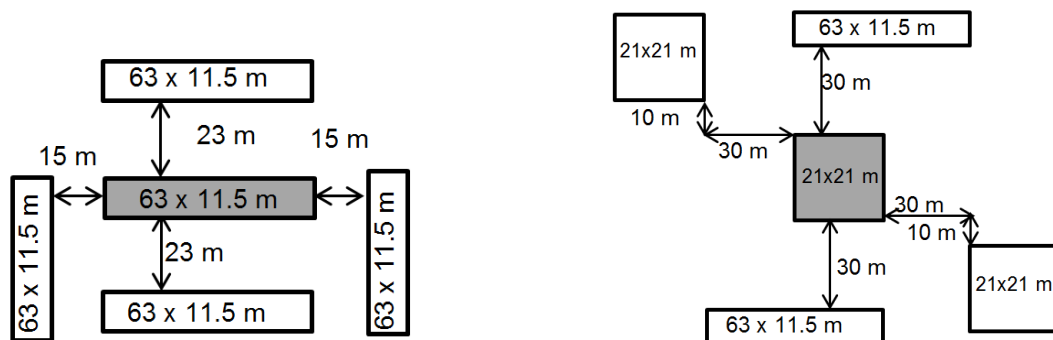


Abbildung 2 Verschattungssituation für die Basisvariante, Abstände und Lage der Nachbargebäude zum betrachteten Gebäude (links V1, V3, rechts: V2, V4).

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 [15] bestimmt und bei der Bestimmung des Heizwärmebedarfs (solare Gewinne) und für den PV-Ertrag verwendet.

Die Auswirkung der Verschattung auf den PV-Ertrag ist in Abbildung 3 dargestellt. Je höher das betrachtete Gebäude und je grösser die Abstände zu den Nachbargebäuden werden, desto geringer ist erwartungsgemäss der Einfluss der Verschattung durch niedrigere Nachbargebäude. Der Sprung in der Verschattung zwischen dem sechsten und siebten Stockwerk bei V2 ist mit dem Wegfall der Verschattung der 6-stöckigen Nachbargebäude zu erklären.

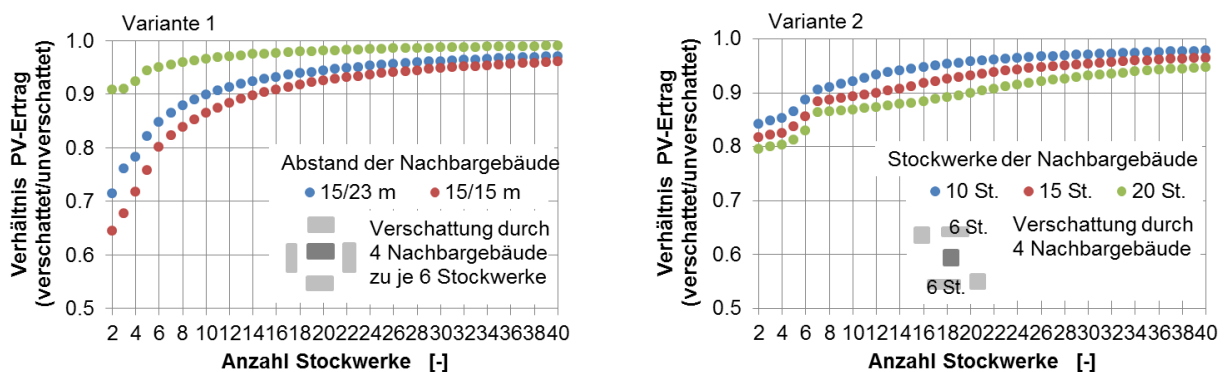


Abbildung 3 Verhältnis des PV-Ertrags verschattet/unverschattet durch Nachbargebäude in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke und dem Abstand der Nachbargebäude für V1 links und V2 rechts. V1: Die erste Zahl gibt den Abstand der Gebäude vor Kopf (Ost/West) und die zweite Zahl den Abstand der Gebäude die parallel stehen (Nord/Süd) an. V2: Die Höhe der quadratischen Nachbargebäude wird variiert.

## 2.7 Bilanzierung

Es werden die HWLK- und die GEB-Nullbilanz untersucht. Alle Auswertungen basieren auf einer Gewichtung mit den Schweizer nationalen Gewichtungsfaktoren (Erdgas 1, Fernwärme 0.6, Strom 2 [16]). 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 MuKEn 2014 dargestellt [3].

## 3. Resultate

### 3.1 Parameterstudie

Für die Varianten wird jeweils ein Parameter gegenüber der Basisvariante geändert. In vorliegendem Beitrag wird exemplarisch gezeigt, wie sich die Parameter auswirken. Alle Resultate des zugrundeliegenden Forschungsprojektes können [17] entnommen werden. Abbildung 4 zeigt auf der linken Seite die Ergebnisse für die Basisvariante 1 mit drei unterschiedlichen Wärmeerzeugern für 2-40 Stockwerke. Auf der rechten Seite sind die Ergebnisse für die Basisvariante 2 dargestellt. Um die HWLK- bzw. GEB-Nullbilanz zu erreichen müssen unterschiedlich grosse PV-Flächen belegt werden.

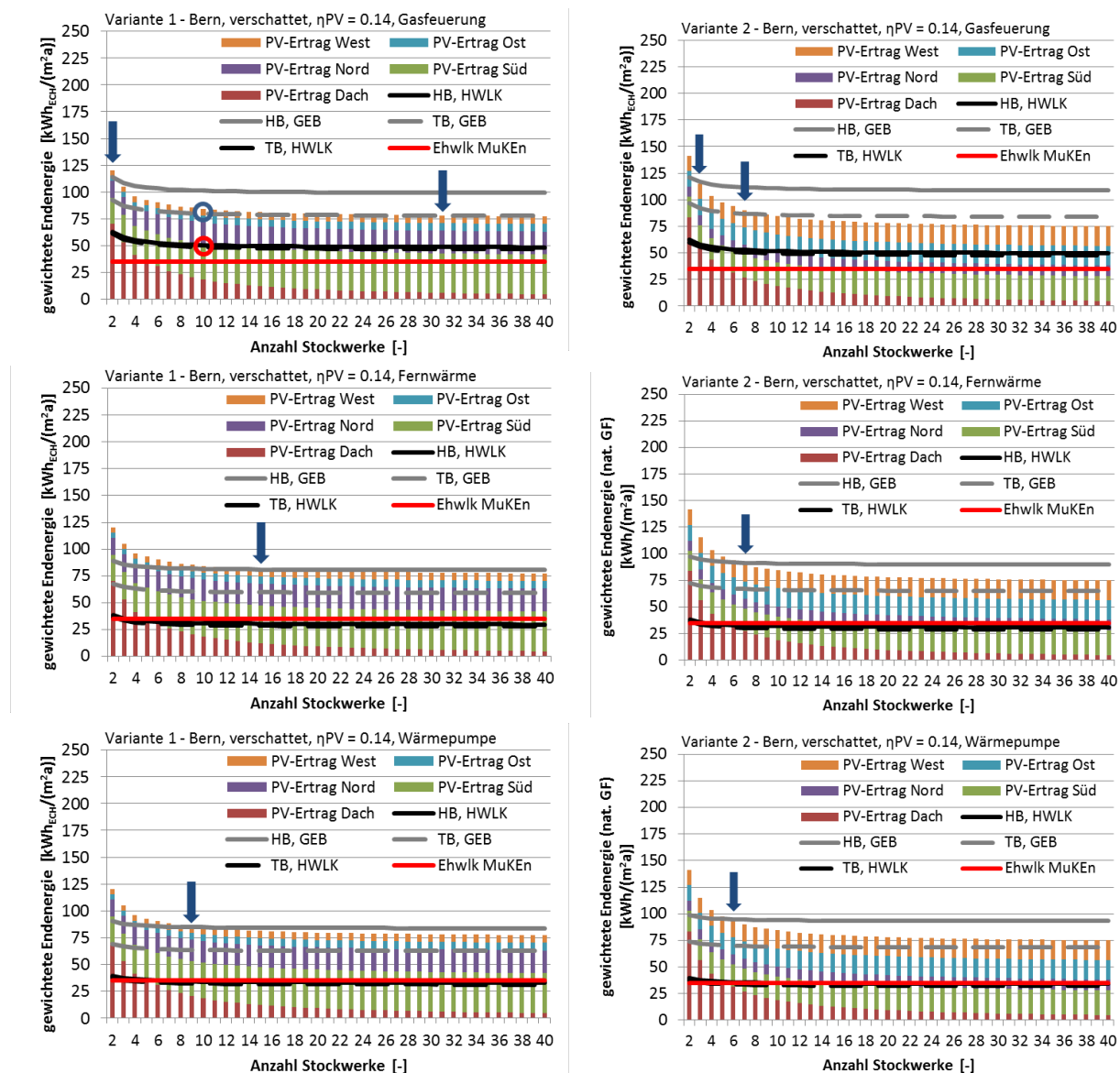


Abbildung 4 Gewichtete Endenergie von Bedarf / PV-Ertrag unter Berücksichtigung der Verschattung in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: Basisvariante 1, rechts Basisvariante 2).

Lesebeispiel für V1: Ein Gebäude in Bern mit 10 Stockwerken,  $\eta_{PV} = 14\%$  und einer Gasfeuerung kann für einen hohen Strombedarf die HWLK-Nullbilanz erreichen (schwarze, durchgezogene Linie, „HB, HWLK“), wenn das komplette Dach und die komplette Südfassade mit PV belegt sind (roter Kreis). Eine GEB-Nullbilanz kann bei einem tiefen Haushaltsstrombedarf von  $16 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$  (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 ( $25 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$ ) 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 neun bzw. 15 Stockwerken erreicht werden. Würde eine Wärmepumpe mit  $JAZ = 3.0/2.6$  für Heizung/Warmwasser eingesetzt, ist die GEB-Bilanz nur noch für ein Gebäude mit sieben Stockwerke möglich. Alle Kurven rutschen um eine Linienstärke nach oben. Der Grenzwert für die gewichtete HWLK-Endenergie nach MuKE 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.

Die maximal erreichbare Anzahl an Stockwerken mit einer GEB-Nullbilanz zeigt für alle Varianten 1 und 2 Abbildung 5. Die HWLK-Nullbilanz wird für alle Varianten bis auf eine Ausnahme (Gasfeuerung V2 "Brüstung") bis 40 Stockwerke erreicht und daher nicht dargestellt.

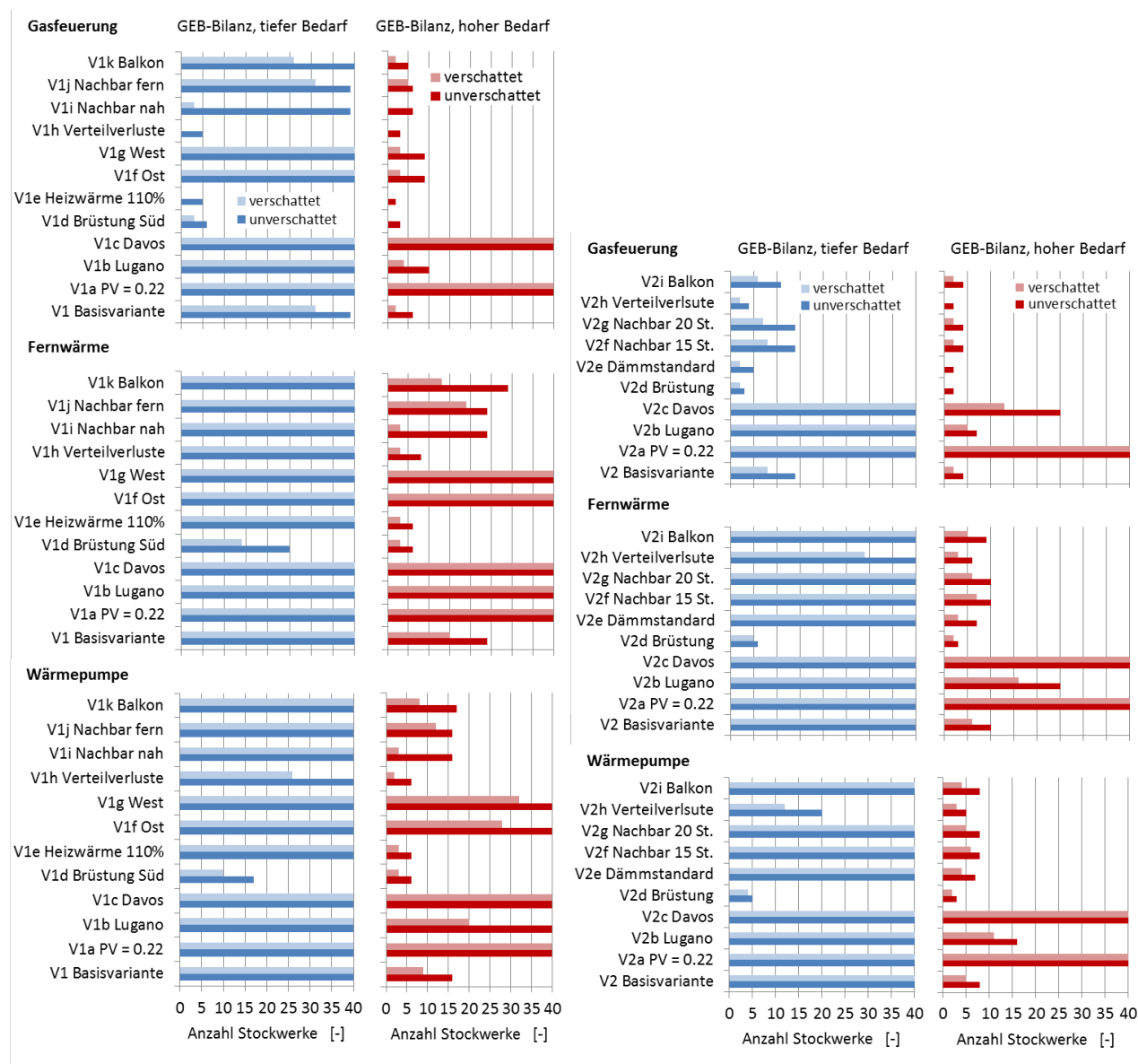


Abbildung 5 Die maximal erreichbare Anzahl an Stockwerken mit einer GEB-Nullbilanz für das Mehrfamilienhaus, links: V 1, rechts V 2.



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 z.T. nur für eine geringere Anzahl an Stockwerken möglich ist.

Für die Varianten V3 und V4 sind die maximal erreichbare Anzahl an Stockwerken mit einer GEB-Nullbilanz in Abbildung 6 zusammengefasst. Da bei einem tiefen Bedarf die GEB-Nullbilanz bis auf drei Ausnahmen (Gasfeuerung: V3/4 "Heizwärme 110 %", V4 "Verteilverluste") bis zu 40 Stockwerken erreicht wird, wird der tiefe Bedarf nicht dargestellt, sondern ein mittlerer Bedarf von 30 kWh<sub>EE</sub>/(m<sup>2</sup> a) für Beleuchtung/Geräte und 2 kWh<sub>EE</sub>/(m<sup>2</sup> a) für die Lüftung abgebildet. Die HWLK-Nullbilanz kann von allen Varianten bis zu 40 Stockwerken eingehalten werden.

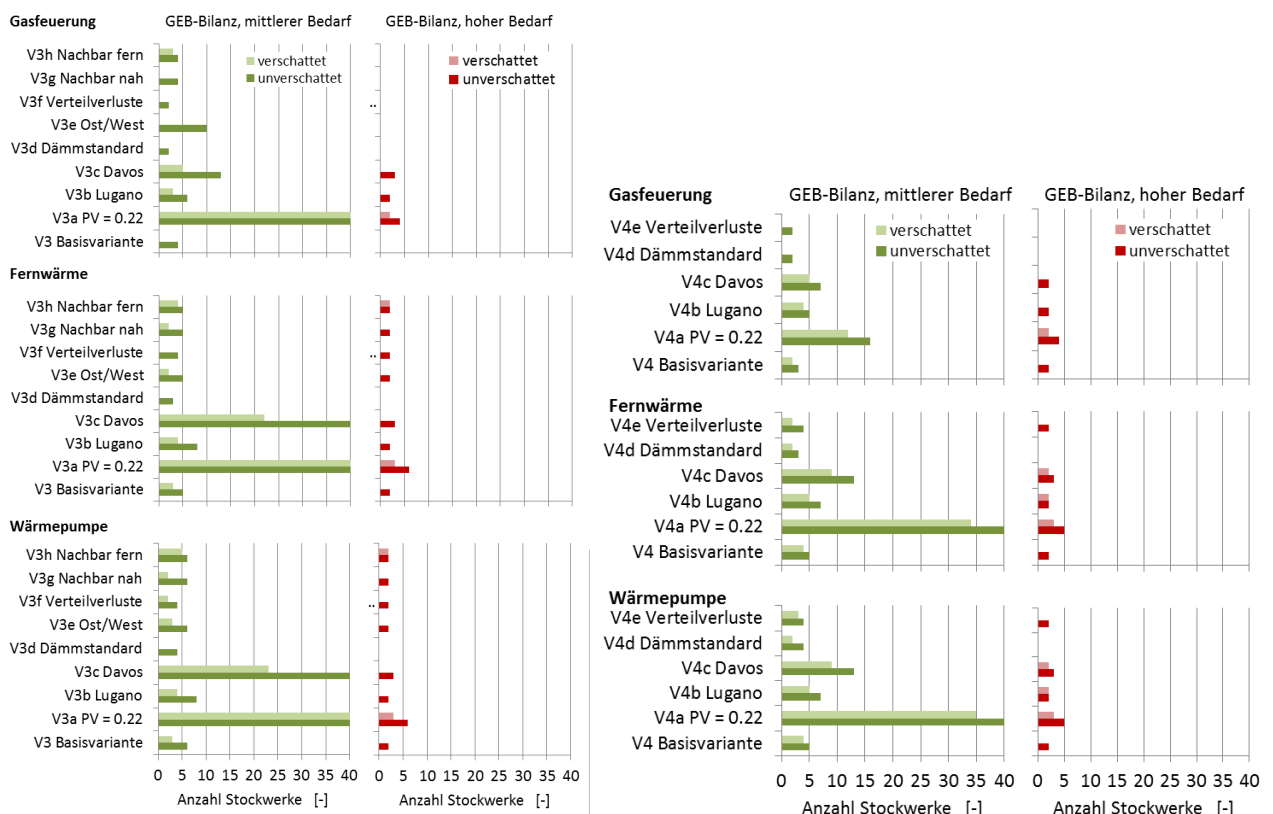


Abbildung 6 Die maximal erreichbare Anzahl an Stockwerken mit einer GEB-Nullbilanz für ein Verwaltungsbau, links: V 3, rechts V 4.

Alle Varianten zeigen auf, dass ein tiefer Gesamtbedarf, eine grosse PV-Fläche und ein hoher PV-Systemwirkungsgrad zur Erreichung der GEB-Bilanz wichtig sind. Die HWLK-Nullbilanz ist praktisch immer möglich.

### 3.2 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, Basisvariante 1 mit Wärmepumpe und für ein Gebäude mit 13 Stockwerken, soll die Eigendeckungsrate 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 (Abbildung 7).

Um die HWLK-Nullbilanz zu erreichen müssen nur das Dach und die obersten vier Stockwerke mit PV belegt werden (schwarze Line, der Ertrag mit Belegung des Dachs und der Stockwerke 11-13 liegt noch leicht unter dem HWLK Bedarf). Die GEB-Nullbilanz kann auch bei einer kompletten Belegung aller 13 Stockwerke nicht erfüllt werden (graue Linie).

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 6-19 Uhr, also überwiegend zeitgleich mit dem PV-Ertrag (gestrichelte Linie), betrieben, ergibt sich eine höhere Eigendeckungsrate, als wenn die Wärmepumpe nur in den Nachtstunden betrieben wird (gepunktete Linie, 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 (siehe z.B. auch [18]).

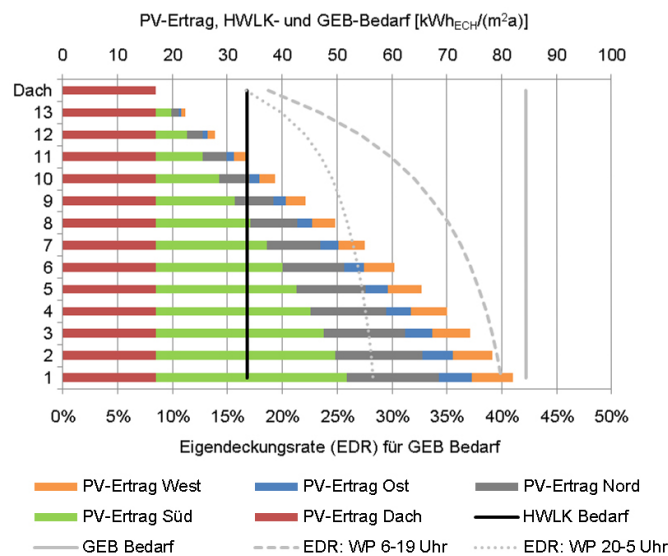


Abbildung 7 Gewichtete Endenergie und Eigendeckungsrate infolge stockwerksweiser Flächenbelegung mit PV (Basis: Variante 1 mit hohem Bedarf und Wärmepumpe, Klimastation Bern) [4].

### 3.3 Praxisbeispiele

In der Praxis wurden bereits Mehrfamilienhäuser mit PV-Fassaden als Null- bzw. als Plusenergiegebäude ausgeführt. Ein bekanntes Beispiel ist z.B. das MFH in Chiasso (Gasser Gebäude AG) [19].

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, 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 vermindert. Der Gesamtenergiebedarf mit GEB = 46 kWh<sub>EE</sub>/(m<sup>2</sup> a) ist sehr niedrig.

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" (Abbildung 8).

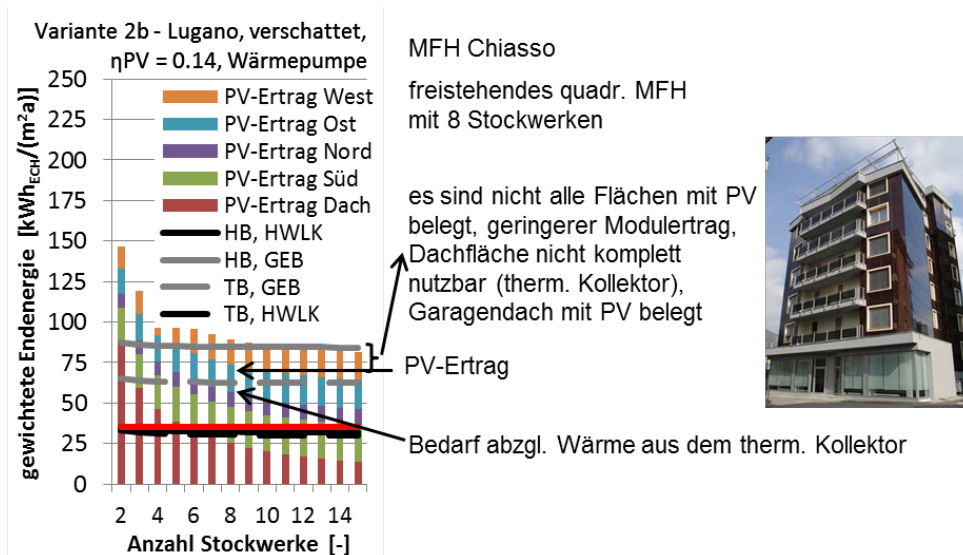


Abbildung 8 Einordnung des MFH Chiasso zu Variante 2b [4].

Der Vergleich des Beispielgebäudes mit der Variante 2b zeigt, dass die Grundannahmen für die Variantenstudie gut getroffen und die Ergebnisse auf reale Gebäude übertragbar sind. Weiter bestätigt das Beispielgebäude, dass eine hohe Effizienz (tiefer Bedarf), eine grosse PV-Fläche und ein hoher PV-Systemwirkungsgrad wichtig sind. Damit unterstreicht das realisierte Gebäude die Aussagen, die durch die vorgängige Variantenstudie erarbeitet wurden.

#### 4. Fazit

Aus den erzielten Resultaten kann der relative Einfluss der betrachteten Parameter auf die Erreichbarkeit von GEB-Nullbilanzen abgeleitet und wie folgt zusammengefasst werden:

- |        |   |
|--------|---|
| hoch   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieeffizienz von Geräten und Beleuchtung</li> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Heizwärmebedarf</li> <li>• Solarstrahlung am Standort</li> <li>• Grösse und Systemwirkungsgrad der PV-Anlage</li> <li>• Verteil- und Speicherverluste für Heizung/Warmwasser</li> </ul> |
| mittel | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aussentemperatur</li> <li>• Verschattung durch Nachbargebäude nah/fern</li> <li>• Verschattung durch Nachbargebäude hoch/tief</li> </ul>   |
| tief   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ost-West Ausrichtung (langgestreckter) Gebäude statt Süd-Nord</li> <li>• Vorgelagerte Balkone</li> <li>• Grundriss der Gebäude</li> </ul>  |

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 Gerätestrom/Beleuchtung/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.

## 5. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass auch grosse Gebäude die HWLK- bzw. die GEB-Nullbilanz erreichen können. Auf Grundlage umfangreicher Parameteruntersuchungen wird der Einfluss verschiedener Parameter auf die Erreichbarkeit von Nullbilanzen dargestellt. Die wichtigsten Parameter sind

- ein hoher Dämmstandard,
- effiziente Geräte und Beleuchtung,
- Wärmepumpe oder Fernwärme als Wärmeerzeuger
- grosse PV-Flächen und
- ein hoher PV-Gesamtwirkungsgrad.

Bei hohen Gebäuden wird der Anteil des PV-Ertrags vom Dach gegenüber dem Gesamtertrag sehr gering. Aus diesem Grund muss bei hohen Gebäuden bei der PV-Ertrag der Fassaden pro Geschoss in etwa dem Bedarf des Geschosses entsprechen.

Die gewonnenen Erkenntnisse unterstützen Planer dabei, Nullenergiegebäude zu realisieren. Zwar können im Planungsprozess nicht alle hier untersuchten Parameter beeinflusst, jedoch kann das Bewusstsein für die Möglichkeiten und Grenzen einzelner Parameter gestärkt werden.

## Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekts "Möglichkeiten und Grenzen von Nullenergiegebäuden" erarbeitet, welches das Bundesamt für Energie BFE (Schweiz) unter dem Kennzeichen SI/500950-01 gefördert hat.

Der Inhalt dieses Beitrags wurde zum grossen Teil in [4] veröffentlicht.

## 6. Literatur

- [1] S. Gasser, "Revision SIA 380/4, Teilprojekt 8: Strombilanzmodell für Wohnbauten," SIA und Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2014.
- [2] Merkblatt SIA 2024, "Standardnutzungsbedingungen für Energie – und Gebäudetechnik." 2006.
- [3] MuKE n 2014, "Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n) 2014." EnDK, [www.endk.ch](http://www.endk.ch).
- [4] M. Hall and A. Geissler, "Möglichkeiten und Grenzen von grossen Nullenergiegebäuden,"

*Bauphysik*, vol. 38, no. 1, pp. 38–49, 2016.

- [5] Merkblatt SIA 2028, “Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik.” 2008.
- [6] SIA 380, “Grundlagen für energetische Berechnungen von Gebäuden.” 2015.
- [7] “Bundesamt für Statistik.” [Online]. Available: [www.admin.ch/bfs](http://www.admin.ch/bfs).
- [8] “Haushaltsszenarien - Entwicklung der Privathaushalte zwischen 2005 und 2030,” Bundesamt für Statistik, 2008.
- [9] Merkblatt SIA 2040, “SIA-Effizienzpfad Energie.” 2011.
- [10] SIA 380/1, “Thermische Energie im Hochbau.” 2009.
- [11] “Wege zum Effizienzhaus Plus,” Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, [www.bmub.bund.de](http://www.bmub.bund.de), 2014.
- [12] J. Knissel, “Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude,” Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt (D), 1999.
- [13] D. Aiulfi, I. Maschio, V. Dellspere, L. Brunet, A. Primas, H. M., P. Benz-Karlström, M. Jakob, A. Honegger-Ott, and B. Grodofzig, “Energieverbrauch von Bürobauten und Grossverteilern,” Bericht im Auftrag für das Bundesamt für Energie, Projekt Nr. 101727, 2010.
- [14] M. Schaede and M. Grossklos, “Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E) - Endbericht,” Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, [www.iwu.de](http://www.iwu.de), 2014.
- [15] “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.” .
- [16] “Nationale Gewichtungsfaktoren der Schweiz,” 2009. [Online]. Available: [www.endk.ch](http://www.endk.ch).
- [17] M. Hall and A. Geissler, “Möglichkeiten und Grenzen von grossen Nullenergiegebäuden,” Schlussbericht BFE SI/500950-01, [www.fhnw.ch/habg/iebau](http://www.fhnw.ch/habg/iebau), 2015.
- [18] M. Hall and A. Geissler, “Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf die energetische Flexibilität von Gebäudem,” *Bauphysik*, vol. 37, no. 2, pp. 115–123, 2015.
- [19] “Schweizer Solarpreis.” [Online]. Available: [www.solaragentur.ch](http://www.solaragentur.ch).