



Schlussbericht 20. Juli 2015

Möglichkeiten und Grenzen von grossen Nullenergiegebäuden (GRENZNUL)

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Institut Energie am Bau IEBau
St. Jakobs Strasse 84
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch/habg/iebau/

Autoren:

Dr. Monika Hall, IEBau, FHNW, monika.hall@fhnw.ch
Dr. Achim Geissler, IEBau, FHNW, achim.geissler@fhnw.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Rolf Moser

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500950-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Übersicht.....	6
1 Zusammenfassung.....	7
2 Ausgangslage	10
2.1 Hintergrund.....	10
2.2 Methodik.....	13
2.3 Verständigung	14
3 Berechnungsgrundlagen	15
3.1 Gebäudedaten.....	15
3.2 Klimadaten	16
3.3 Bedarf.....	17
3.3.1 Allgemeines.....	17
3.3.1.1 Heizwärmebedarf.....	17
3.3.1.2 Warmwasserbedarf.....	17
3.3.1.3 Nutzungsgrad/JAZ	17
3.3.2 Wohnen.....	17
3.3.2.1 Lüftung.....	17
3.3.2.2 Wohnungsgrösse und Belegungsdichte	17
3.3.2.3 Energiebezugsfläche	18
3.3.2.4 Haushaltsstrom.....	19
3.3.3 Verwaltung	19
3.4 PV-Ertrag.....	20
3.5 Verschattung durch Nachbargebäude.....	21
3.5.1 Basisvarianten.....	21
3.5.2 Varianten.....	22
3.5.3 Verschattungsfaktoren	23
3.6 Bilanzierung.....	25
4 Auswertung	27
4.1 Maximaler PV-Ertrag.....	27
4.2 Variante 1 - langgestrecktes MFH.....	29
4.2.1 Untersuchte Parameter - Variante 1	29
4.2.2 Allgemeine Daten - Variante 1	30
4.2.3 Resultate - Variante 1	31
4.2.3.1 Variante 1 "Basisvariante"	31
4.2.3.2 Variante 1 " $\eta_{PV}=14\%$ " und Variante 1a " $\eta_{PV}=22\%$ "	32
4.2.3.3 Variante 1b "Lugano" und Variante 1c "Davos"	37
4.2.3.4 Variante 1d "Brüstung Süd"	39
4.2.3.5 Variante 1e "Dämmstandard"	41
4.2.3.6 Variante 1f "Ost" und Variante 1g "West"	43

4.2.3.7	Variante 1h "Verteilverluste"	45
4.2.3.8	Variante i "Nachbar nah" und Variante j "Nachbar fern"	47
4.2.3.9	Variante 1k "Balkon"	48
4.2.4	Überblick - Variante 1.....	49
4.3	Variante 2 - quadratisches MFH.....	52
4.3.1	Untersuchte Parameter - Variante 2	52
4.3.2	Allgemeine Daten - Variante 2	53
4.3.3	Resultate - Variante 2	53
4.3.4	Überblick - Variante 2.....	57
4.4	Variante 3 - langgestreckter Verwaltungsbau	60
4.4.1	Untersuchte Parameter - Variante 3	60
4.4.2	Allgemeine Daten - Variante 3	61
4.4.3	Resultate - Variante 3	62
4.4.4	Überblick - Variante 3.....	65
4.5	Variante 4 - quadratischer Verwaltungsbau	68
4.5.1	Untersuchte Parameter - Variante 4	68
4.5.2	Allgemeine Daten - Variante 4	68
4.5.3	Resultate - Variante 4	69
4.5.4	Überblick - Variante 4.....	72
5	Praxisbeispiele	75
6	Eigendeckungsrate	79
7	Planungshinweise	80
8	Literatur	81
9	Anhang.....	83
9.1	Strombedarf von Verwaltungsbauten und Wohnen.....	83
9.2	Verteil- und Speicherverluste von Heizung und Warmwasser	84
9.3	Diagramme für Varianten 2-4	85
9.3.1	Variante 2.....	85
9.3.1.1	Variante 2a " $\eta_{PV} = 0.22$ "	85
9.3.1.2	Variante 2b "Lugano"	86
9.3.1.3	Variante 2c "Davos"	87
9.3.1.4	Variante 2d "Brüstung"	88
9.3.1.5	Variante 2e "Dämmstandard"	89
9.3.1.6	Variante 2f und 2g "Nachbar 15/20 St."	91
9.3.1.7	Variante 2h "Verteilverluste"	92
9.3.1.8	Variante 2i "Balkon"	93
9.3.2	Variante 3.....	94
9.3.2.1	Variante 3a " $\eta_{PV} = 0.22$ "	94
9.3.2.2	Variante 3b "Lugano"	95
9.3.2.3	Variante 3c "Davos"	96

9.3.2.4	Variante 3d "Dämmstandard"	97
9.3.2.5	Variante 3e "Ost/West"	99
9.3.2.6	Variante 3f "Verteilverluste"	100
9.3.2.7	Variante 3g "Nachbar nah" und Variante 3h "Nachbar fern"	101
9.3.2.8	Variante 3 - Überblick für einen "mittleren Bedarf".	102
9.3.3	Variante 4	103
9.3.3.1	Variante 4a " $\eta_{PV} = 0.22$ "	103
9.3.3.2	Variante 4b "Lugano"	104
9.3.3.3	Variante 4c "Davos"	105
9.3.3.4	Variante 4d "Dämmstandard"	106
9.3.3.5	Variante 4e "Verteilverluste"	108
9.3.3.6	Variante 4 - Überblick für einen "mittleren Bedarf".	109
9.4	PV-Flächen	110
9.5	Daten für Beispielgebäude	111

Übersicht

Im Rahmen des Projektes „Möglichkeiten und Grenzen von grossen Nullenergiegebäuden“ (BFE-SI/500950-01, GRENZNULL) wird untersucht, ob grosse Gebäude, d.h. Gebäude mit 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 dem gesamten Energiebedarf des Gebäudes (GEB-Nullbilanz "Nullenergiegebäude") im Jahr erreicht werden kann. Mit umfangreichen Untersuchungen an vier Basismodellen, je zwei Mehrfamilienhäuser und Verwaltungsbauten, werden die Auswirkungen verschiedener Parameter auf die Nullbilanz analysiert. Ausgangspunkt ist jeweils eine gute Gebäudehülle, eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und die Klimastation Bern-Liebelfeld.

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 gut gedämmten Gebäuden eine GEB-Nullbilanz zu erreichen, sind die vier wichtigsten Parameter
 - o die Effizienz von Geräten und Beleuchtung,
 - o die Art des Wärmeerzeugers,
 - o die tatsächlich verfügbare PV-Fläche
 - o sowie der effektive Systemwirkungsgrad der gesamten PV-Installation.

Die untersuchten Varianten zeigen, dass schon heute grosse Mehrfamilienhäuser und Verwaltungen 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 Bürobauten.

Abstract

The scope of the project "Potentials and limits of large zero energy buildings" (BFE-SI/500950-01) is to analyze 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. The evaluation includes multifamily dwellings and office buildings with square and stretched footprints. The four basic models are well insulated, equipped with a mechanical ventilation system including heat recovery and allocated with the climate of Bern-Liebelfeld. 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
 - o efficient electric devices and lighting,
 - o the type of heating system,
 - o the actually available area for PV and
 - o the overall efficiency of the PV-system.

The results show that large multifamily and offices buildings could be net zero up to 40 levels. To this end, electronic devices, lighting and PV systems with a very high efficiency are necessary. This is true particularly for office buildings.

1 Zusammenfassung

Der Hintergrund zu der vorliegenden Studie ist, dass bislang hauptsächlich Ein- und kleinere Mehrfamilienhäuser als Null- und Plusenergiegebäuden umgesetzt werden. Grosse Mehrfamilienhäuser, Schulen und Verwaltungsbauten bilden bislang die Ausnahmen. In der Regel reicht bei den realisierten Gebäuden die Dachfläche aus, um eine ausreichend grosse Photovoltaikanlage zu installieren, so dass während eines Jahres der PV-Ertrag grösser als der gesamte Energiebedarf des Gebäudes wird (bzw. das Verhältnis von Bedarf zu PV-Ertrag ≤ 1). Bei grossen Gebäuden reicht die Dachfläche nicht mehr aus und die Fassade muss ebenfalls mit Photovoltaik belegt werden. Ob diese Flächen für die Nullbilanz von grossen Gebäuden reichen, wurde bislang noch nicht untersucht.

Daher wird in dieser Studie geprüft, ob grosse Gebäude, d.h. Gebäude mit bis zu 40 Stockwerken und langgestrecktem bzw. quadratischem Grundriss, genügend PV-Fläche zur Verfügung stellen können. Ausgewertet wird jeweils die Bilanz für die gesamte Gebäudetechnik (HWLK-Nullbilanz - Nullwärmeenergiegebäude) sowie dem gesamten Bedarf des Gebäudes (GEB-Nullbilanz - Nullenergiegebäude).

Mit umfangreichen Parameteruntersuchungen an vier Basismodellen, je zwei Mehrfamilienhäuser und Verwaltungsbauten, werden die Auswirkungen auf die Nullbilanz analysiert. Ausgangspunkt ist für alle Modelle eine sehr gute Gebäudehülle (Fenster $U = 0.90 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, opake Bauteile inkl. Wärmebrücken $U = 0.20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$), eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und die Klimastation Bern-Liebfeld (mittlere Aussenlufttemperatur und Strahlung). Die Varianten berücksichtigen folgende Parameter:

- Klimastation (Bern, Davos, Lugano)
- Dämmstandard (zwei verschiedene Niveaus),
- 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/fern, hoch/tief)
- Ausrichtung des Gebäudes (nur langgestreckte Gebäude)
- Eigenverschattung durch vorgelagerte Balkone (nur Wohnen)
- Grösse der nutzbaren PV-Flächen (nur Wohnen) und
- Systemwirkungsgrad der Photovoltaikanlage (14%, 22%).

Es wird davon ausgegangen, dass stets die maximal möglichen Flächen auf dem Dach und an den Fassaden mit PV-Modulen belegt sind. Für alle betrachteten Varianten erfolgt eine Bilanzierung auf Basis der nationalen Gewichtungsfaktoren. Für die vier Basisvarianten werden die Bilanzen zum Vergleich auch ungewichtet bzw. gewichtet mit nicht erneuerbarer Primärenergie ausgewertet. Informativ wird zusätzlich für jede Variante die Anforderung der MuKE 2014 an den gewichteten Energiebedarf dargestellt.

Die Ergebnisse der Studie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei dem Vergleich der Bilanzen mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren zeigt sich, dass die Gewichtung mit den nationalen Gewichtungsfaktoren und mit nicht erneuerbarer Primärenergie zu sehr ähnlichen Ergebnissen führt. Eine Null-Bilanzierung ohne Gewichtung (Endenergie) ist schwieriger zu erreichen, als mit den oben genannten Gewichtungen. Bei Gebäuden, welche nur Elektrizität als Energieträger verwenden, ist die Gewichtung irrelevant, solange für exportierte und importierte Elektrizität dieselben Gewichtungsfaktoren verwendet werden.
- Der Grenzwert der MuKE 2014 für den gewichteten Endenergiebedarf wird bei den verschiedenen Varianten von "Mehrfamiliengebäude mit Gasfeuerung" nicht eingehalten. Bei allen anderen Varianten und Wärmeerzeugern wird der Grenzwert unterschritten, in einigen Fällen jedoch erst ab 3-4 Stockwerken.

- Je höher das Gebäude ist, desto geringer ist erwartungsgemäss der Einfluss durch die Verschattung durch tiefere Nachbargebäude.
- Mit zunehmender Anzahl an Stockwerken sinkt der Anteil des PV-Ertrags vom Dach gegenüber dem PV-Gesamtertrag. Die abflachende Ertragskurve hat zur Folge, dass die Erreichbarkeit der Nullbilanz mit zunehmender Anzahl an Stockwerken sensibler auf kleine Änderungen im Bedarf bzw. im PV-Ertrag wird. Die Anzahl der Stockwerke mit einer Nullbilanz wird dadurch stark beeinflusst.
- Infolge des sinkenden Anteils des PV-Ertrags vom Dach gegenüber dem PV-Gesamtertrag müssen höhere Gebäude effizienter betrieben werden, als tiefere.
- Bei niedrigen Gebäuden ist der PV-Ertrag vom Dach relevant, 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 Nullbilanz zu erreichen.
- Die HWLK-Nullbilanz kann bis auf eine Ausnahme für alle untersuchten Varianten für Gebäude bis zu 40 Stockwerken erreicht werden. Bei einer hohen Anzahl an Stockwerken ist im Fall Fernwärme/Wärmepumpe in der Regel hierzu nur Photovoltaik auf dem Dach und der Südfassade notwendig und nur in Einzelfällen noch an einer weiteren Fassade. Bei einer Gasfeuerung müssen Dach, Südfassade und noch Teile einer weiteren Fassade belegt werden.
- Ausgehend von einem sehr guten Dämmstandard 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 wichtige 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 Stockwerke für eine GEB-Nullbilanz mit einer Gasfeuerung geringer.

Der relative Einfluss der betrachteten Parameter auf die Erreichbarkeit von Nullbilanzen kann wie folgt zusammengefasst werden:

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

Damit ergeben sich folgende Prioritäten für die Planung:

1. Priorität
 - sehr hoher Dämmstandard
 - tiefer Bedarf von Haushaltsstrom/Lift bzw. Geräte/Beleuchtung
 - Wärmeerzeuger: Fernwärme oder Wärmepumpe
 - Grosse PV-Flächen an allen Fassaden mit hohem Systemwirkungsgrad
 - niedrige Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser
2. Priorität
 - Verschattung durch Nachbargebäude (meist nicht oder kaum beeinflussbar)
 - Vorgelagerte Balkone
 - Ost-West Ausrichtung für langgestreckte Gebäude gegenüber Süd-Nord Ausrichtung bevorzugen

Die hier vorgestellten Ergebnisse fallen recht positiv aus. Dies liegt daran, dass

- die Basismodelle schon sehr gut gedämmt sind und recht niedrige Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser aufweisen,
- der betrachtete Bedarf für Haushaltsstrom (Wohnen) bzw. für Geräte und Beleuchtung (Verwaltung) sehr niedrig ist,
- ein recht hoher PV-Systemwirkungsgrad zugrunde gelegt wird und
- alle opaken Flächen optimal für eine PV-Belegung genutzt werden.

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

Obwohl für die Untersuchungen ambitionierte Werte verwendet werden, zeigen die dargestellten Resultate deutlich, dass auch mit diesen die GEB-Nullbilanz nicht für jede Variante bis zu 40 Stockwerken erreichbar ist. Eine GEB-Nullbilanz für Gebäude mit den üblichen 5-6 Stockwerken ist aber in vielen Fällen möglich. Ohne eine gute Planung, einen sehr effizienten Betrieb und grosse PV-Flächen mit hohem PV-Ertrag 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 MuKE 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". Anzumerken ist hier, dass eine Klimatisierung nicht betrachtet wird.

2 Ausgangslage

2.1 Hintergrund

Standards wie Minergie-A, Nullenergie- und Plusenergiegebäude fordern eine Netto-Nulljahresbilanz bzw. negative Netto-Jahresbilanz für unterschiedliche Bilanzgrenzen. Für Einfamilienhäuser und kleine Mehrfamiliengebäude reicht i.d.R. der Platz für eine entsprechend grosse Photovoltaikanlage auf dem Dach aus, um die Netto-Jahresbilanz oder mehr zu decken z.B. EFH in Riehen, MFH Bennau "Kraftwerk B", Schulhaus Kreuzlingen und Werkstatt/Büro Heizplan AG (Bild 1). Weitere Beispiele können z.B. der Webseite der Schweizer Solaragentur [1] und des energie-clusters [2] entnommen werden.



Bild 1: Verschiedene Plusenergiegebäude [3]: EFH in Riehen, MFH "Kraftwerk B" Bennau, Schulhaus in Kreuzlingen und Werkstatt/Büro Heizplan AG, Gams.

Üblicherweise sind Gebäude mit einer Netto-Nulljahresbilanz ca. zwei Stockwerke hoch (Bild 1). 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.

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

Grenzen und Möglichkeiten sowie sinnvolle Kombinationen der genannten Parameter sollen auf der Grundlage von Parameterstudien erarbeitet werden. Für grosse Gebäude werden die Randbedingungen und Grenzen für den Umfang der Nullbilanz "Nullwärmeenergiegebäude" (HWLK-Bilanz) und „Nullenergiegebäude“ (GEB-Bilanz) erarbeitet (Bild 2).

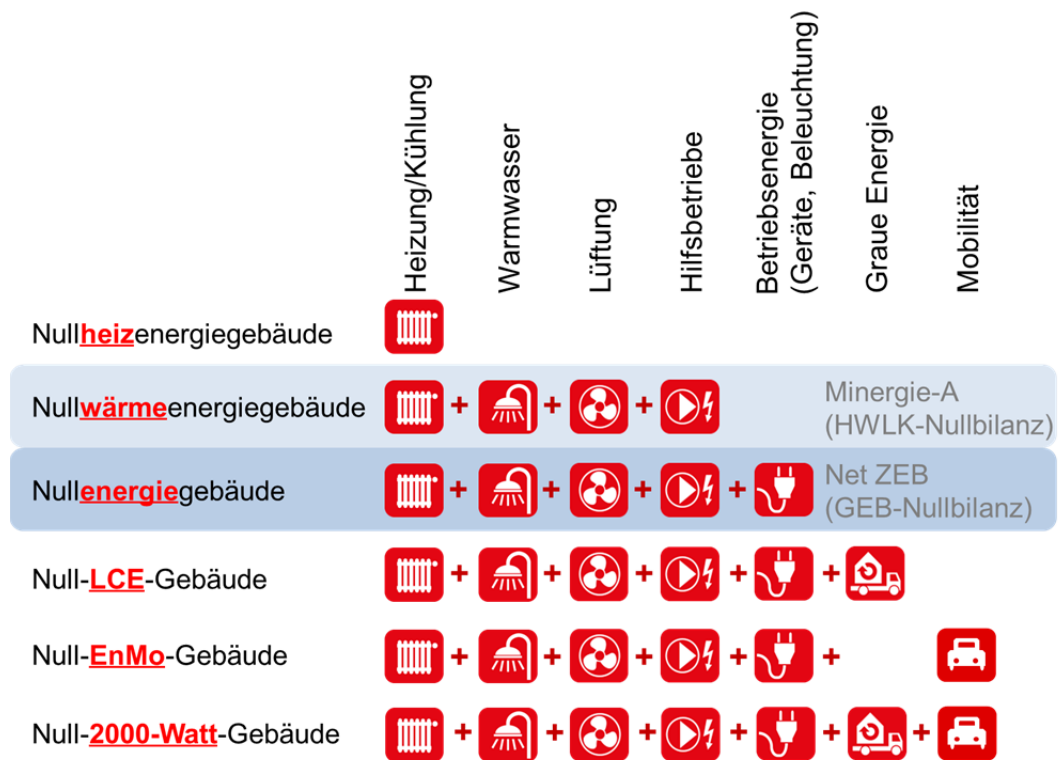


Bild 2: Umfang von verschiedenen Nullenergiestandards ([4]).

Einige grössere Gebäude wurden schon vollflächig mit Photovoltaikfassaden ausgestattet und können z.T. die ungewichtete GEB-Nullbilanz erreichen (Bild 3 - Bild 5). In der Schweiz bekannt sind das Palazzo Positivo Gasser in Chiasso (TUOR Baumanagement, Plusenergiegebäude Schweizer Solarpreis 2014 und Norman Forster Solar Award-Diplom, GEB Deckungsgrad ungewichtet 114% [1]), ein MFH in Romanshorn (Viridién+Partner, Norman Forster Solar Award 2013, 107% [1]) sowie ein MFH in der Sihlweidstrasse in Zürich (Harder Haas Architekten). In Frankfurt am Main entsteht ein Stadthaus mit 74 Wohnungen (HHS Planer+Architekten, >100%) welches ebenfalls eine PV-Fassade aufweist sowie mit einer Batterie ausgestattet werden soll.

Verwaltungsbauten mit PV-Fassade sind z.B. der Verwaltungsbau der Firma Flumroc (Norman Forster Solar Award 2014, 115% [1]), ein Anbau der Firma Bracher+Schaub AG (Plusenergiegebäude Schweizer Solarpreis-Diplom 2014, 96% [1]), ein Campusgebäude der Universität in Wien sowie in Planung der "Grosspeter Tower" (Büro und Hotel) in Basel (PSP real Estate). Ein weiterer Bürobau mit PV-Fassade entsteht für das Amt für Umwelt und Energie in Basel (Jessen+Vollenweider).



Bild 3: MFH-Sanierung Sihlweidstrasse in Zürich, MFH-Sanierung Palazzo Positivo in Chiasso, MFH-Sanierung in Romanshorn, (Quelle: Internet, Solarpreis [1])



Bild 4: Neubau Aktiv-Stadthaus in Wien, Sanierung des Verwaltungsbaus Flumroc in Flums, Anbau Bracher+Schaub AG in Ormingen (Quelle: www.agb-fh.com, Solarpreis [1])



Bild 5: Sanierung Technische Universität Wien Campusgebäude am Getreidemarkt, Planung: Neubau Bürogebäude und Hotel Grosspeter Tower Basel; Planung: Neubau Amt für Umwelt und Energie Basel (Quelle: www.tuwien.ac.at, www.burckhardtpartner.ch, www.hochbauamt.bs.ch)

2.2 Methodik

Zur Erarbeitung der Grenzen und Möglichkeiten werden verschiedene Gebäudegeometrien und -grössen sowie unterschiedliche Parameterkombinationen betrachtet. Die Parameterstudie wird für die Gebäudekategorie I Wohnen MFH und die Gebäudekategorie III Verwaltung (Bürobauten) gemäss SIA 380/1 an je zwei typischen Basismodellen durchgeführt (Bild 6):

- 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

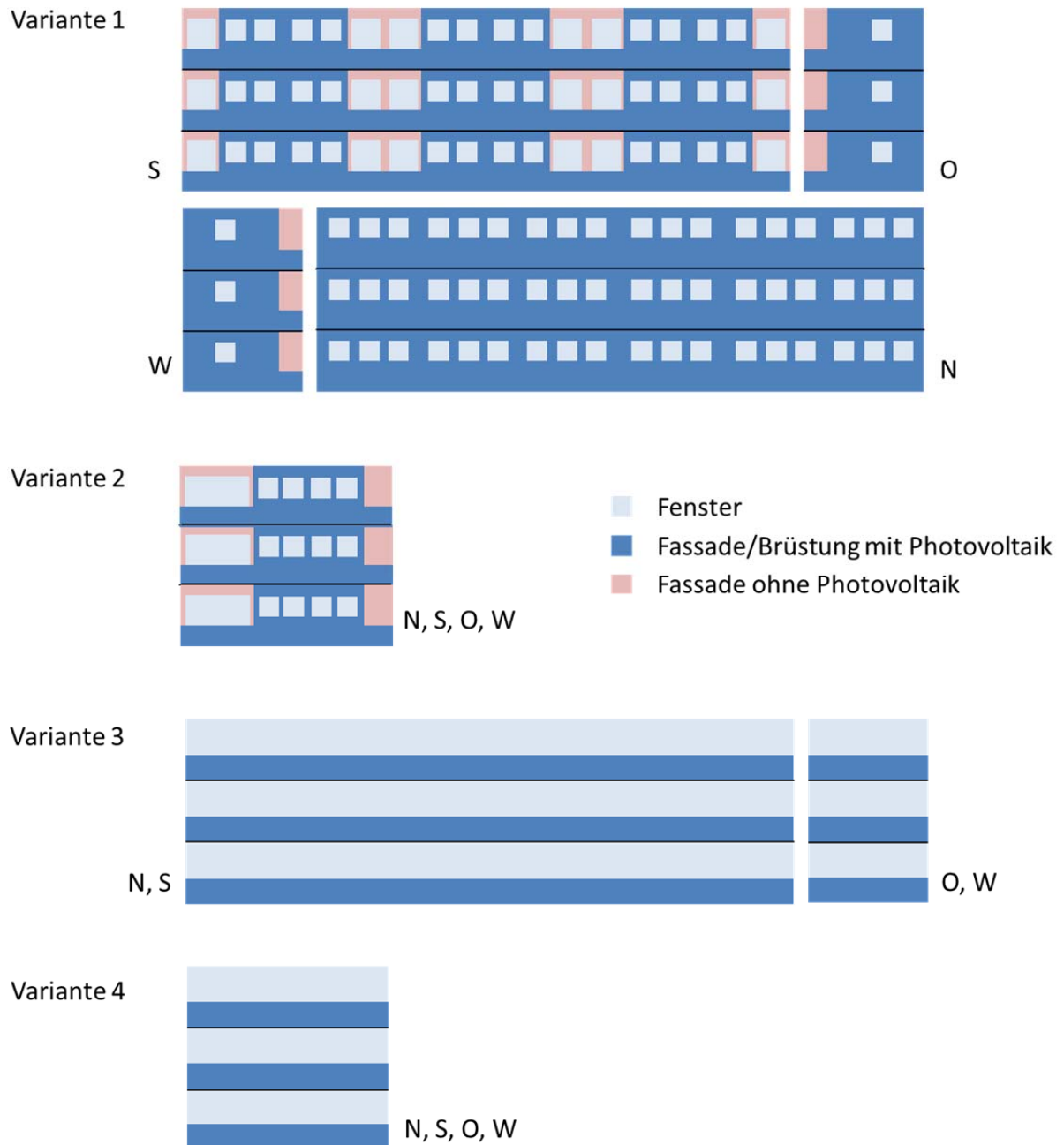


Bild 6: Schematische Darstellung der Fassadenansichten der vier betrachteten Varianten.

Bei diesen vier Basisvarianten werden folgende Parameter variiert:

- Klimastation (Bern, Davos, Lugano)
- Dämmstandard (zwei verschiedene Niveaus),
- 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/fern, hoch/tief)
- Ausrichtung des Gebäudes (nur langgestreckte Gebäude)
- Eigenverschattung durch Balkone (nur Wohnen)
- Grösse der nutzbaren PV-Flächen (nur Wohnen) 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. Bei den Fassaden werden 8% für konstruktiv bedingte Gegebenheiten ausgeschlossen.

2.3 Verständigung

HWLK	Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung (Der Begriff HWLK wird verwendet, auch wenn in diesem Bericht keine Klimatisierung berücksichtigt wird)
GEB Gesamtenergiebedarf	HWLK, Haushaltsstrom, Geräte, Beleuchtung, Lift
HB (hoher Gesamtenergiebedarf)	Wohnen - Effizienzklasse C [5] für Haushaltsstrom, Lift und Lüftungsanlage, Belegungsdichte 2.23 Verwaltung - Geräte, Beleuchtung (nach [6] Einzel-/Gruppenbüro)
TB (tiefer Gesamtenergiebedarf)	Wohnen - Effizienzklasse A [5] für Haushaltsstrom, Lift und Lüftungsanlage, Belegungsdichte 1.78 Verwaltung - Geräte, Beleuchtung (nach [6] Einzel-/Gruppenbüro)
WP	Wärmepumpe mit Erdwärmesonde
FW	Fernwärme
HWLK-Nullbilanz	Die Jahressumme des PV-Ertrags muss höher sein als der Jahresbedarf für HWLK
GEB-Nullbilanz	Die Jahressumme des PV-Ertrags muss höher sein als der Jahresbedarf für GEB
nat. GF	Schweizer nationale Gewichtungsfaktoren der Energieträger
ECH	Gewichtet mit nationalen Gewichtungsfaktoren
E_{hwk}	gewichteter (End-)Energiebedarf für HWLK mit nationalen Gewichtungsfaktoren nach MuKE 2014
EE	Endenergie
nrenPE	nicht erneuerbare Primärenergie
HH	Haushalt
η_{PV}	Systemwirkungsgrad der Photovoltaikanlage: Module und Verluste (PV-Systemwirkungsgrad)
Eigendeckungsrate	Anteil vom gesamten Energiebedarf, der von der PV-Anlage zeitgleich gedeckt wird. Die Berechnung beruht auf Stundenwerten.

3 Berechnungsgrundlagen

3.1 Gebäudedaten

Alle Gebäude haben einen rechteckigen Grundriss und weisen ein Flachdach auf. In Tabelle 1 bis Tabelle 3 sind die Basisdaten für die Geometrie und die energetischen Eigenschaften zusammengestellt.

Tabelle 1: Daten der Gebäudegeometrie für das MFH (Variante 1 und 2).

Parameter	Einheit	Grundriss	
		langgestreckt (Variante 1)	quadratisch (Variante 2)
Gebäudetiefe	m	11.5	21.8
Gebäudebreite	m	63.7	21.8
Etagenhöhe	m	2.85	2.85
Netto-Wohnungsfläche	m ²	87	87
Anzahl Wohnungen pro Geschoss	-	6	4
Betrachtete Anzahl Geschosse	-	2 ... 40	2 ... 40
Energiebezugsfläche pro Geschoss	m ²	684	441
Fensteranteil N	%	21	24
Fensteranteil S	%	35	24
Fensteranteil O	%	7	24
Fensteranteil W	%	7	24
Standardfenster	m	1.6 x 1.3	1.6 x 1.3
Anzahl pro Etage	-	O/W: je 1	O/W: je 4
	-	N: 18	N: 4
	-	S: 12	S: 4
Balkonfenster/-türe	m	3 x 2.1	3 x 2.1
Anzahl pro Etage	-	S: 6	N/S/O/W: je 1

Es wird davon ausgegangen, dass die Fassade des Verwaltungsbaus nicht raumhoch verglast ist, sondern ein durchgängiges Fensterband und einen Brüstungsbereich aufweist (siehe Skizze in Bild 6). Damit können die 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 von ca. 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.

Tabelle 2: Daten der Gebäudegeometrie für das Verwaltungsgebäude (Variante 3 und 4).

Parameter	Einheit	Grundriss	
		langgestreckt (Variante 3)	quadratisch (Variante 4)
Gebäudetiefe	m	11.5	21.8
Gebäudebreite	m	63.7	21.8
Etagenhöhe	m	3.3	3.3
Betrachtete Anzahl Geschosse	-	2 ... 40	2 ... 40
Energiebezugsfläche pro Geschoss	m ²	732	473
Fensteranteil N	%	58	58
Fensteranteil S	%	58	58
Fensteranteil O	%	58	58
Fensteranteil W	%	58	58

Tabelle 3: Energetische Daten der Basisvarianten und dem zusätzlich untersuchten, tieferen Dämmstandard (Variante 1-4).

Parameter	Basis	Variante für "Dämmstandard"
Bauweise	massiv	massiv
U opakte Bauteile, 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 des Fensters	0.80	0.80
Reduktionsfaktor für Erdgeschoss zu unbeheizten Kellergeschoss	0.73	0.73

*U-Wert = 0.15 W/(m² K) + 30% Wärmebrückenzuschlag

**U-Wert = 0.40 W/(m² K) + 20% Wärmebrückenzuschlag

3.2 Klimadaten

Die Auswertungen basierend hauptsächlich auf den Daten der Klimastation Bern-Liebelfeld - 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. Die verwendete Klimastation ist jeweils im Diagramm aufgeführt. Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1:2009 beruhen die Klimadaten auf dem Merkblatt SIA 2028 [7]. Die Strahlungsdaten zur Berechnung des PV-Ertrags werden aus dem Programm Meteonorm 6.1, mit der Einstellung "Standard", entnommen.

3.3 Bedarf

3.3.1 Allgemeines

3.3.1.1 Heizwärmebedarf

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgt nach SIA 380/1:2009.

3.3.1.2 Warmwasserbedarf

Es werden die Standardwerte aus SIA 380/1:2009 verwendet:

Mehrfamilienhaus: 75 MJ/(m²a), Verwaltung 25 MJ/(m²a)

3.3.1.3 Nutzungsgrad/JAZ

Tabelle 4 zeigt die verwendeten Nutzungsgrade und Jahresarbeitszahlen der verwendeten Wärmeerzeuger. Für die Verteilung und Speicherung werden folgende Verluste angenommen: Heizung: 10%, Warmwasser 40% [8] (vgl. Anhang 9.2, Tabelle 27).

Tabelle 4: Nutzungsgrad/JAZ

Wärmeerzeuger	Nutzungsgrad/JAZ	
	Heizung	Warmwasser
Gasfeuerung, kondensierend (Gas)*	0.95	0.92
Fernwärme (CH-Durchs.) (FW) [8]	0.98	1.0
Wärmepumpe, Erdwärme (WP) [8]	4.3	2.8

*Minergie: NachweisVers2015P.xlsx, gültig bis 31.12.2015

3.3.2 Wohnen

3.3.2.1 Lüftung

Der Stromverbrauch der Lüftung wird pro Haushalt nach [5] berechnet (Kap. 3.3.2.4, Tabelle 7). Die Komfortlüftung wird bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs durch den flächenbezogene Aussenluftvolumenstrom von 0.3 m³/(m²h) berücksichtigt.

3.3.2.2 Wohnungsgrösse und Belegungsdichte

Die Modellierung der Wohnungsgrösse und -belegung beruht auf einer durchschnittlichen Wohnungsgrösse bzw. Belegungsdichte. Diese betragen im Jahr 2012 99 m² mit durchschnittlich 2.3 Bewohnern pro Wohnung [9]. Diese Durchschnittswerte beziehen sich auf Ein- und Mehrfamilienhäuser. Bild 7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Wohnungsgrössen von Mehrfamilienhäusern der letzten Jahre. Mit einem Anteil von rund 37% ist die Wohnfläche zwischen 70-99 m² am meisten vertreten. In [5] wird eine durchschnittliche Netto-Wohnfläche von 87 m² für Mehrfamilienhäuser genannt. Da dies gut mit der Statistik von Bild 7 übereinstimmt, wird diese Fläche als Grundlage für die Untersuchungen herangezogen.

In [10] wird die durchschnittliche Wohnungsbelegung mit 2.23 Personen für das Jahr 2005 angegeben und im Szenario 2030 mit 2.02. In städtischen Gebieten liegt die durchschnittliche Belegungsdichte schon heute bei zwei Personen und weniger [10]. Für Basel-Stadt wird eine Belegungsdichte von 1.78 für 2030 prognostiziert. Daher werden verschiedene Szenarien betrachtet. Die in [10] gegebene Verteilung der Personenbelegung auf verschiedenen grosse Haushalte für 2005 und 2030 ist in Tabelle 5 wiedergegeben.

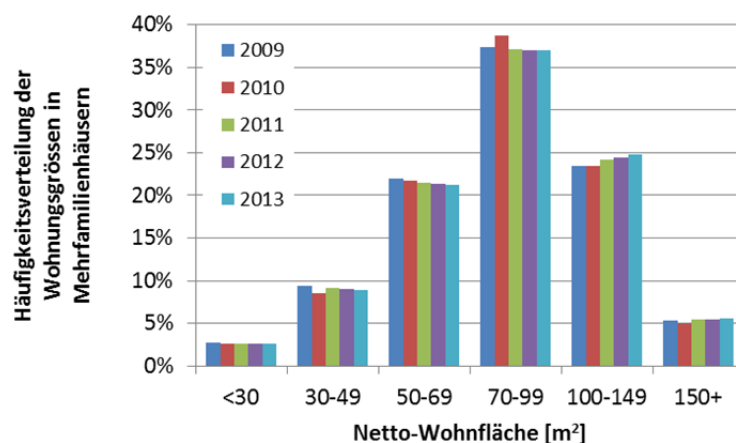


Bild 7: Häufigkeitsverteilung der netto Fläche pro Wohnung in Mehrfamilienhäusern [11].

Tabelle 5: Anteil der Personenbelegung von verschiedenen Haushaltsgrössen [10].

Anzahl der Personen im Haushalt	Schweizer Durchschnitt		Basel-Stadt
	2005	2030	2030
1	36%	41%	54%
2	32%	36%	29%
3	13%	10%	7%
4	13%	10%	7%
5+	6%	4%	3%
Durchschnitt	2.23	2.02	1.78

3.3.2.3 Energiebezugsfläche

Die Wohnungsfläche ist als Nettofläche angegeben, so dass zur Berechnung der Energiebezugsfläche diese in die Bruttofläche umgerechnet werden muss. Die Umrechnung von Netto auf Bruttofläche erfolgt mit dem Faktor 1.2. Zusätzlich muss noch eine Fläche für das Treppenhaus und den Lift berücksichtigt werden (siehe Tabelle 6), da diese i.d.R. mit zur Energiebezugsfläche zählt. Diese wird anteilmässig den Wohnungen zugeschlagen. Mit diesen Annahmen betragen die Brutto-Flächen je Wohnung inklusive Anteil Treppenhaus/Lift 114 m² bzw. 110 m². Diese Flächen bilden die Grundlage zur Berechnung der Energiebezugsfläche.

Tabelle 6: Anzahlwohnungen pro Treppenhaus und Nettoflächen für Treppenhaus inkl. Lift.

	Anzahl Wohnungen pro Treppenhaus [-]	Nettofläche Treppenhaus/Lift [m²]
MFH langgestreckt (Variante 1)	2	16
MFH quadratisch (Variante 2)	4	20

3.3.2.4 Haushaltsstrom

Der Stromverbrauch pro Haushalt wird nach [5] bestimmt. Der Standard Stromverbrauch entspricht Effizienzklasse C (Tabelle 7). In den Effizienzklassen ist der Allgemeinstrom enthalten. Klasse C entspricht in etwa dem heutigen Haushaltstromverbrauch nach [12], wenn in [12] ebenfalls der Allgemeinstrom berücksichtigt würde. Daher wird Klasse C als Standard und Klasse A (70% von Klasse C) für einen effizienten Haushalt verwendet. Da hohe Gebäude untersucht werden, wird davon ausgegangen, dass Lifte vorhanden sind.

Tabelle 7: Maximale Stromverbräuche nach Effizienzklassen für ein Mehrfamilienhaus [5].

		Effizienzklasse [kWh/HH]		
		A	B	C
Anzahl Personen im Haushalt	1	1'400	1'700	2'000
	2	1'850	2'250	2'650
	3	2'300	2'800	3'300
	4	2'750	3'350	3'900
	5+	3'200	3'900	4'600
Zuschlag für Lift pro Haushalt		40	70	100
Zuschlag für Lüftung pro Haushalt		250	310	360

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 entsprechen der verwendeten Effizienzklasse übernommen. Daraus ergeben sich die Werte, wie sie in Tabelle 8 dargestellt sind. 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 (Anhang 9.1, Tabelle 26)

Tabelle 8: Hoher und tiefer Bedarf für Haushaltsstrom, Lift und Lüftung pro Energiebezugsfläche.

	Langgest. MFH [kWh/(m²a)]		Quadrat. MFH [kWh/(m²a)]	
Bedarf	tief	hoch	tief	hoch
Haushaltsstrom	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

3.3.3 Verwaltung

Der minimale und maximale Strombedarf für Geräte und Beleuchtung wird nach Merkblatt SIA 2024 [6] "Einzel-, Gruppenbüro" bestimmt. Diese Werte entsprechen in etwa den Werten aus der Literatur [13], [14] (s. Anhang 9.1).

Tabelle 9: Strombedarf für Verwaltungsbauten. Werte für Einzel- und Gruppenbüro aus [6].

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

3.4 PV-Ertrag

Der PV-Ertrag setzt sich aus dem Ertrag vom Dach und von den Fassaden zusammen. Es wird davon ausgegangen, dass immer die gesamte mögliche Fläche für PV genutzt wird. Bei der Dachanlage gibt es die Möglichkeit, die Module mit verschiedenen Neigungswinkeln aufzuständern. Übliche Neigungswinkel sind ca. 30° nach Süden bzw. ca. 10° nach Ost/West (Bild 8). Um die Eigenverschattung zu reduzieren, müssen die aufgeständerten Module mit einem Abstand montiert werden. Die verwendeten Abstände sind in Tabelle 10 genannt. Das gesamte Dach wird mit der maximal möglichen Anzahl an PV-Modulen belegt.

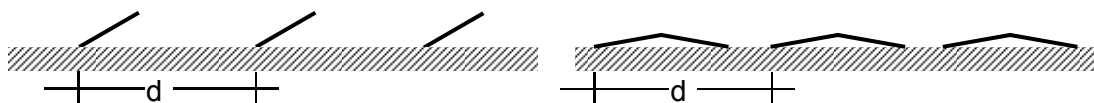


Bild 8: Abstände von PV-Modulen, bei unterschiedlichen Neigungswinkeln: links 30° "Süd", rechts 10° "Ost/West" bzw. "Süd/Nord".

Tabelle 10: Abstand der Module und PV-Modulgröße auf dem Dach.

Neigungswinkel/Orientierung	Abstands d [m]	Modulgröße [m]
30° Süd	2.20	1.046 x 1.559
10° Ost/West bzw. Süd/Nord [15]	2.35	1.000 x 1.660

Der Systemwirkungsgrad der PV-Module wird wie in Tabelle 11 beschrieben verwendet. Die Daten entsprechen in etwa denjenigen in [16]. Wobei in [16] die Verluste mit 15% angegeben und hier mit ca. 20% berücksichtigt werden. Zum Vergleich wird in einer Variante der Einfluss eines "zukünftigen" Modulwirkungsgrads von 28% betrachtet.

Tabelle 11: Daten zum PV-Systemwirkungsgrad [16], [17], [18].

	heute	Zukunft
Zellenwirkungsgrad	0.18	0.28
Verluste Wechselrichter	0.03	0.03
Kabel	0.01	0.01
Alterung	0.03	0.03
Mismatch	0.02	0.02
Verschmutzung	0.05	0.05
Modulauslastung	0.90	0.90
PV-Gesamtwirkungsgrad	0.14	0.22

Für die Fassade wird keine fixe Modulgrösse verwendet, da davon ausgegangen wird, dass die Module an das Gebäude angepasst werden. In der Fassade wird die gesamte Fläche genutzt, die abzüglich der Fensterflächen und einem konstruktiv nicht nutzbaren Anteil von 8% zur Verfügung steht. Bei Gebäuden mit Balkonen wird die Fassade im Bereich der Balkon nicht für einen möglichen PV-Ertrag berücksichtigt, jedoch die Flächen der Balkonbrüstung inkl. Höhe der Balkonplatte. 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.

3.5 Verschattung durch Nachbargebäude

3.5.1 Basisvarianten

Für die Verschattung wird angenommen, dass das betrachtete Gebäude in alle vier Himmelsrichtungen von Nachbargebäuden umgeben ist. Die Höhe der Nachbargebäude variiert je nach Variante (Tabelle 12). Die Anzahl von sechs Stockwerken wird gewählt, weil dies typisch ist für Mehrfamilienhäuser und Verwaltungsbauten.

Tabelle 12: Anzahl Stockwerke der Nachbargebäude.

	Anzahl Stockwerke der Nachbargebäude
Variante 1 und 3	6
Variante 2 und 4	6 (langgestr. Geb.) und 10 (quad. Geb.)

Eine Recherche mit Hilfe von geoview Baselland [19] zeigt, dass es keine einheitlichen Abstände von Gebäude zu Gebäude gibt. Die Bandbreite reicht von ca. 10 bis zu rund 75 m. Auch die Ausrichtung mehrerer Gebäude zueinander ist sehr variable (z.B. parallel, versetzt, gedreht, Blockrandbebauung). Aus diesem Grund müssen Annahmen getroffen werden. Da bei einem geringen Abstand zwischen den Gebäuden die Verschattung durch die Nachbargebäude grösser wird, werden für eine worst-case Betrachtung Abstände gewählt, die am unteren Ende der bei o.a. Analyse ermittelten Bandbreite liegen.

Die gewählten Abstände der Basisvarianten 1 und 3 bzw. 2 und 4 sind in Bild 9 und Bild 10 dargestellt.

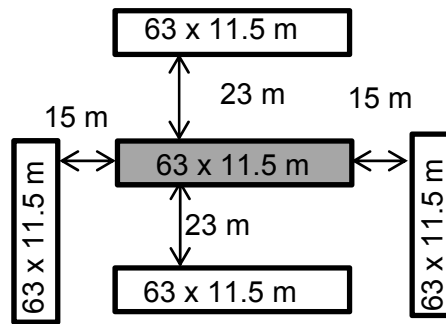


Bild 9: Verschattungssituation für Variante 1 und 3, Basisvariante: Abstände und Lage der Nachbargebäude zum betrachteten Gebäude.

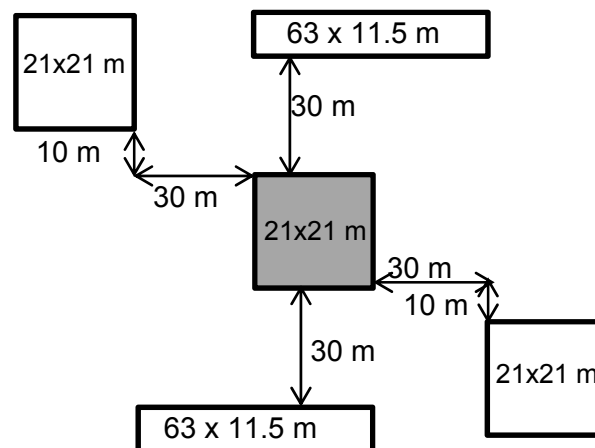


Bild 10: Verschattungssituation für Variante 2 und 4, Basisvariante: Abstände und Lage der Nachbargebäude zum betrachteten Gebäude.

3.5.2 Varianten

Bei den langgezogenen Gebäuden (Varianten 1 und 3) werden die Abstände wie folgt variiert:

- i. alle Nachbargebäude weisen einen Abstand von 15 m auf (dichte Bebauung)
- j. die Nachbargebäude weisen jeweils einen doppelt so grossen Abstand auf, wie bei der Basisvariante (lockere Bebauung)

Die Gebäudehöhe wird hier nicht variiert.

Bei den quadratischen Gebäuden (Varianten 2 und 4) wird die Höhe der quadratischen Nachbarbauten auf 15 bzw. 20 Stockwerke erhöht. Die Höhe der langgestreckten Nachbarbauten bleibt konstant bei sechs Stockwerken. Der Gebäudeabstand wird hier nicht verändert.

3.5.3 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 Dach mit ESP-r [20] bestimmt und bei der Bestimmung des Heizwärmebedarfs (solare Gewinne) und für den PV-Ertrag verwendet.

Die Auswirkung der Nachbargebäude auf den PV-Ertrag für Variante 1 ist in Bild 11 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:

- Für die Basisvariante mit 15/23m weist ein zweistöckiges Gebäude durch die Verschattung eine PV-Ertragsreduktion um knapp 30% auf, ab einem zehnstöckigen Gebäude ist die Reduktion kleiner als 10%.
- Die enge Nachbarbebauung (15/15m) wirkt sich insbesondere auf Gebäude mit wenigen Stockwerke aus: ca. 35% Reduktion bei zwei Stockwerken, ab 14 Stockwerken beträgt die Reduktion $\leq 10\%$
- Bei einer lockeren Bebauung (30/46m) werden auch die unteren Stockwerke kaum beschattet. Auch bei zwei Stockwerken ist die PV-Ertragsreduktion kleiner als 10%.
- Je höher das betrachtete Gebäude wird, desto geringer ist erwartungsgemäss der Einfluss der Verschattung von niedrigeren Nachbargebäuden.

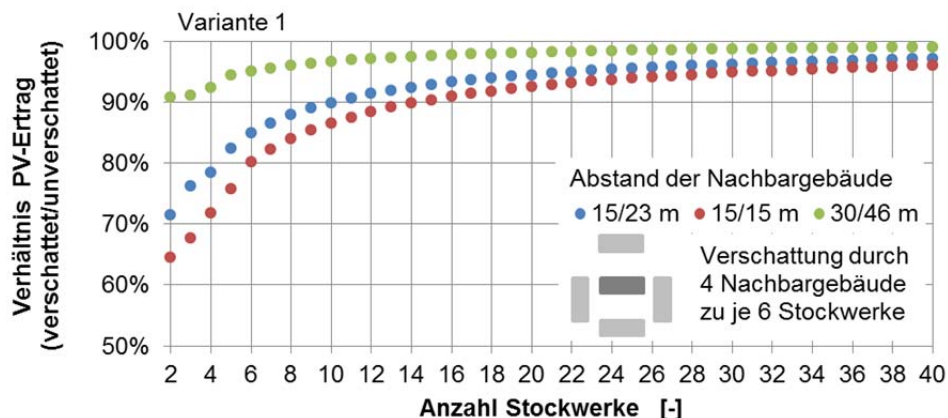


Bild 11: Verhältnis des PV-Ertrags von verschattet/unverschattet durch Nachbargebäude in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke und dem Abstand der Nachbargebäude. Die erste Zahl gibt den Abstand der Gebäude vor Kopf (Ost/West) und die zweite Zahl den Abstand der Gebäude die parallel stehen (Nord/Süd) an.

Der Einfluss auf den PV-Ertrag durch die Verschattung, die sich durch unterschiedlich hohe Nachbargebäude der Variante 2 ergibt, ist in Bild 12 dargestellt. Es werden die Höhen der quadratischen Nachbargebäude variiert, da Hochhäuser oft aus einem Ensemble aus drei Gebäuden bestehen. Die Gebäude nach Süden und Norden bleiben konstant bei sechs Stockwerken. Der Sprung in der Verschattung zwischen dem sechsten und siebten Stockwerk ist mit dem Wegfall der Verschattung der 6-stöckigen Nachbargebäude zu erklären. Ab sieben Stockwerken ist der Einfluss der 10-stöckigen Nachbargebäuden kleiner als 10%, bei den 15-stöckigen Nachbargebäuden ist diese Grenze bei 12 Stockwerken und bei den 20-stöckigen Nachbargebäuden bei 20 Stockwerken erreicht.

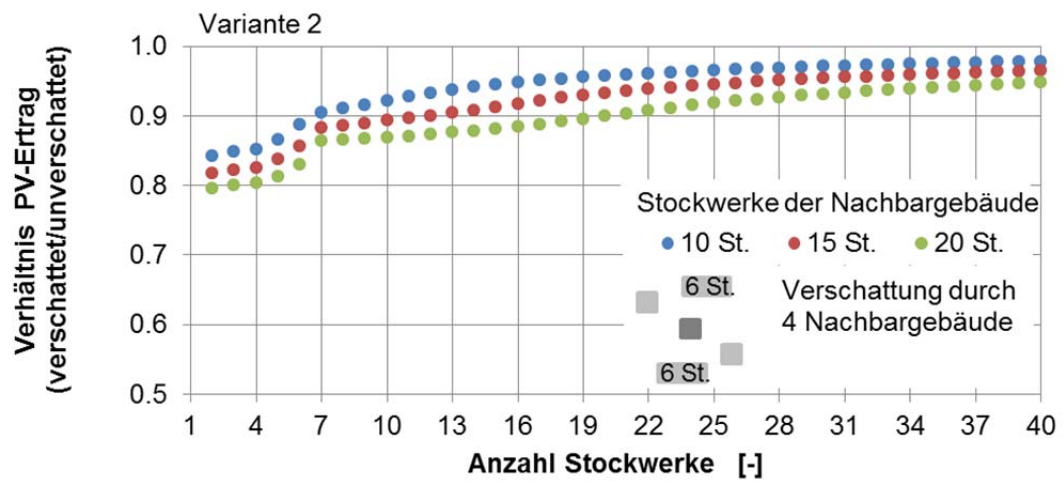


Bild 12: Verhältnis von PV-Ertrag verschattet zu unverschattet für Variante 2. Die Höhe der quadratischen Nachbargebäude wird variiert.

3.6 Bilanzierung

Für die Nullbilanz werden zwei Bilanzgrenzen untersucht (Bild 2):

- Nullwärmeenergie (HWLK-Bilanz): Der Energiebedarf für Wärme, Warmwasser und Lüftung muss durch den PV-Ertrag im Jahr gedeckt werden.
- Nullenergiegebäude (GEB-Bilanz): Neben dem Bedarf für HWLK muss auch die restliche Betriebsenergie (z.B. Haushaltsstrom, Geräte, Beleuchtung etc.) aus dem PV-Ertrag gedeckt werden.

Die Nullbilanzen werden für verschiedene Labels mit unterschiedlicher Bewertung der Energieträger berechnet (Tabelle 13). Ob und wie die Energieträger gewichtet werden, spielt eine wichtige Rolle bei der Bilanzierung. Daher können die Labels aus Tabelle 13 schlecht miteinander verglichen werden, ausser das Gebäude hat als einzigen Energieträger Elektrizität, z.B. wenn eine Wärmepumpe vorhanden ist. Der Gewichtungsfaktor ist in diesem Fall irrelevant, solange für im- und exportierte Elektrizität derselbe Faktor verwendet wird.

In diesem Projekt liegt der Schwerpunkt bei der Gewichtung mit den Schweizer nationalen Gewichtungsfaktoren. Vergleichend wird jedoch auch die Bilanz in Endenergie und gewichtet mit nicht erneuerbarer Primärenergie dargestellt (Tabelle 14). Für den Elektrizitätsbedarf und den PV-Ertrag wird jeweils der Strom-Gewichtungsfaktor verwendet.

Zur Information werden bei den Varianten jeweils die Grenzwerte des gewichteten Energiebedarfs nach MuKEN 2014 dargestellt [21]: Wohnen: $E_{hwk} = 35 \text{ kWh}_{CH}/(\text{m}^2 \text{ a})$, Verwaltung $E_{hwk} = 40 \text{ kWh}_{CH}/(\text{m}^2 \text{ a})$.

Tabelle 13: Umfang der Nullbilanz und Gewichtung der Energieträger für verschiedene Labels.

Label	Nullbilanz		Gewichtung der Energieträger			
	HWLK	GEB	End-energie	nat. GF	Primärenergie	
					nicht ern.	total
Minergie-A	x			x		
Nullenergie*		x		x	oder x	oder x
Plusenergie (Kanton Bern) [22]		x		x		
Plusenergie Solaragentur [1]		x	x			
Plusenergie 1** energie-cluster [23]		x	x	(x)		
Effizienzhaus-Plus*** (Deutschland) [24]		x	x			und x

*verschiedene Gewichtungen der Energieträger sind möglich [25]

** Vorschlag: Nachweis mit nat. Gewichtungsfaktoren [2], online-Datenbank: Endenergie [23]

*** beide Nullbilanzen - Endenergie und Primärenergie - müssen erfüllt werden

Tabelle 14: Verwendete Gewichtungsfaktoren.

	Primärenergiefaktor nicht erneuerbar [8]	nat. GF
	$f_{\text{nrenPE}} [-]$	$f_{\text{CH}} [-]$
Erdgas	1.06	1.0
Fernwärme mit Nutzung Kehrleiswärme Durchschnitt Netz CH	0.45	0.6
Photovoltaik am Ausgang des Energie- wandlers	2.69*	2.0
Strom CH-Verbrauchermix am Eingang des Gebäudes	2.69	2.0

* dieser Wert weicht von SIA 380 [8] ab, da in diesem Bericht mit symmetrischen Faktoren gerechnet wird.

4 Auswertung

4.1 Maximaler PV-Ertrag

Der PV-Ertrag für Variante 1 (langgestreckter Grundriss) ist für die einzelnen Fassaden und verschiedenen PV-Ausrichtungen und Neigungen auf dem Dach mit einem Systemwirkungsgrad von $\eta_{PV} = 14\%$ in Bild 13 oben dargestellt. Bis vier Stockwerke ist der Ertrag von der Dachanlage grösser als der der einzelnen Fassaden. Ab mehr als vier Stockwerken bringt die Südfassade den grössten Ertrag, ab ca. 30 Stockwerken ist der PV-Ertrag der einzelnen Fassaden höher als der Ertrag der Dachanlage. Eine Süd/Nord ausgerichtete PV-Dachanlage mit einem Neigungswinkel von 10° ergibt einen um 12% höheren PV-Ertrag und eine Ost/West ausgerichtete Anlage mit dem gleichen Neigungswinkel ergibt einen um 17% höheren PV-Ertrag als eine nach Süden ausgerichtete PV-Dachanlage mit einem Neigungswinkel von 30° . Bei flachem Neigungswinkel werden oft Module in zwei Orientierungen verbaut. Dies ergibt mehr Module, als bei einer einseitigen Modulorientierung. Daher führt die beidseitige Anordnung mit einem flachen Neigungswinkel zu einem höheren Ertrag gegenüber einer nur nach Süden ausgerichteten Anlage mit grösserem Neigungswinkel. Diese Ergebnisse stimmen gut mit Aussagen in [26] überein.

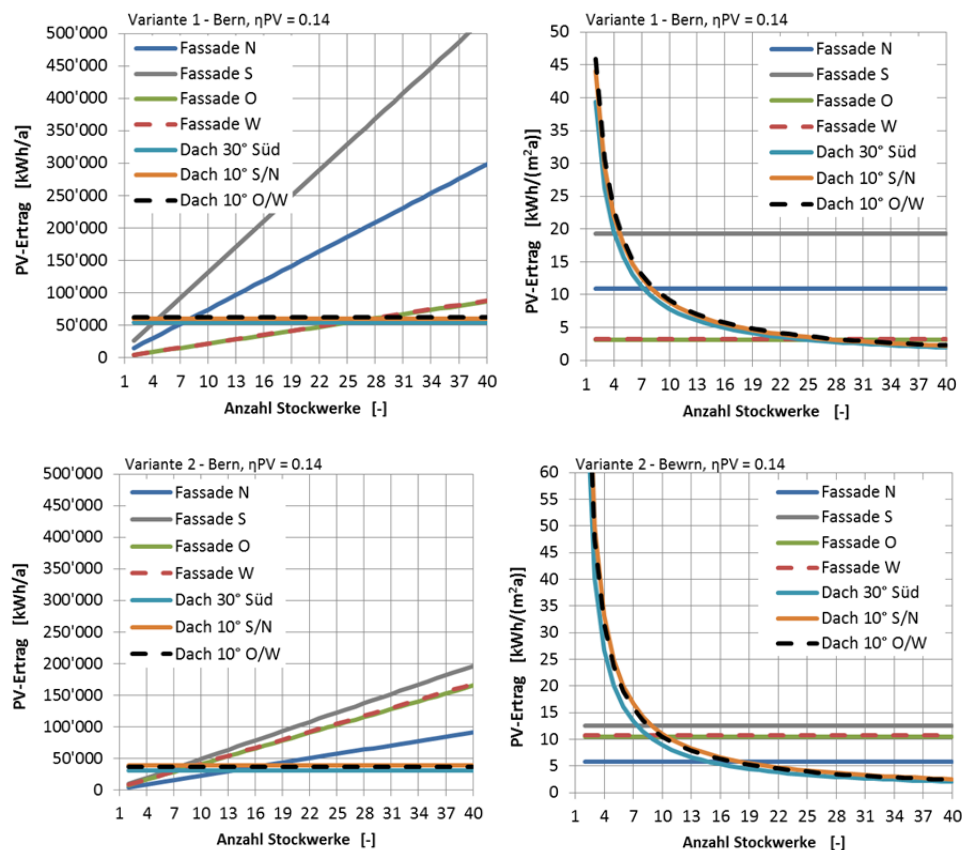


Bild 13: PV-Ertrag für langgestreckte (Variante 1, oben) und für quadratische (Variante 2, unten) Gebäude. links: Absolutwerte, rechts: PV-Ertrag bezogen auf die Energiebezugsfläche (unverschattet).

Da in vorliegendem Projekt die Möglichkeiten und Grenzen von grossen Nullenergiegebäuden untersucht werden, ist es notwendig, den maximal möglichen PV-Ertrag zu erzielen. Aus diesem Grund werden alle Berechnungen für Variante 1 und 3 mit einer Ost/West ausgerichteten PV-Dachanlage mit einem Neigungswinkel von 10° durchgeführt.

Der PV-Ertrag in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke für Variante 2 (quadratischer Grundriss) ist in Bild 13 unten dargestellt. Die Süd-/Nordausrichtung der PV-Anlage ergibt den höchsten Ertrag. Somit wird für Variante 2 und 4 eine Süd-/Nord ausgerichteten PV-Anlage und ein Neigungswinkel von 10° berücksichtigt.

Die Anteile des PV-Ertrags von Dach und Fassade am gesamten PV-Ertrag für alle 4 Varianten ist in Bild 14 abgebildet. Deutlich ist zu erkennen, wie der PV-Ertragsanteil vom Dach mit zunehmender Anzahl an Stockwerken stark abnimmt. Dabei ist der Verlauf nicht abhängig von der Form des Gebäudes sondern von der Fläche, die für PV zur Verfügung steht. Während bei dem Mehrfamilienhaus ca. 57% der Fassade für PV genutzt werden kann, sind es bei der Verwaltung nur 42%. Damit ist bei der Verwaltung der Anteil des PV-Ertrags vom Dach am Gesamtertrag höher als bei dem Mehrfamilienhaus.

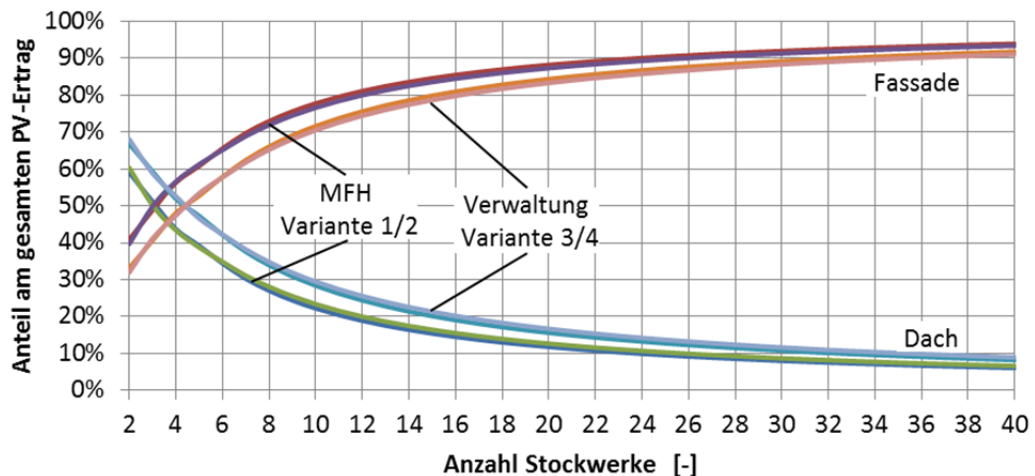


Bild 14: Anteile des PV-Ertrags von Dach und Fassade am gesamten PV-Ertrag für alle 4 Varianten.

Bei niedrigen Gebäuden ist der PV-Ertrag vom Dach relevant, 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 Nullbilanz zu erreichen.

4.2 Variante 1 - langgestrecktes MFH

4.2.1 Untersuchte Parameter - Variante 1

Variante 1 ist ein langgestrecktes Mehrfamilienhaus mit sechs Wohnungen pro Etage. Je zwei Wohnungen teilen sich einen Eingang und einen Lift. „Variante 1“ entspricht der Basisvariante. In den Varianten 1a – 1k ist jeweils ein Parameter gegenüber der Basisvariante verändert, um den Einfluss zu ermitteln. Es werden folgende Varianten untersucht (Tabelle 15):

- Variante 1: Basisvariante: Systemwirkungsgrad der PV-Anlage von 14%. Klimastation Bern-Liebelfeld, Orientierung der Hauptfassade nach Süden, Verteil- und Speicherverluste Heizung/Warmwasser 10%/40%, Zielwert SIA 380/1:2009 bei 4 Stockwerken erreicht
- Variante 1a: Der Systemwirkungsgrad der PV-Anlage beträgt 22% (Parameter: PV-Systemwirkungsgrad - $\eta_{PV} = 0.22$)
- Variante 1b: Klimastation Lugano: höhere Temperaturen und ähnliche Einstrahlung wie bei der Klimastation Bern (Parameter: Klimastation - Lugano)
- Variante 1c: Klimastation Davos: tiefere Temperaturen und höher Einstrahlung wie bei der Klimastation Bern (Parameter: Klimastation - Davos)
- Variante 1d: Auf der Südseite kann nur der Brüstungsbereich für PV-Module genutzt werden. D.h. der PV-Ertrag von der Südfassade reduziert sich (Parameter: PV-Fläche - Brüstung Süd)
- Variante 1e: Der Heizwärmebedarf ist so gewählt, dass der Grenzwert für 20 Stockwerke für den Fall mit Verschattung eingehalten wird (Tabelle 3, Parameter: Dämmstandard)
- Variante 1f: Das Gebäude wird so gedreht, dass die Hauptfassade nach Osten orientiert ist (Parameter: Ausrichtung - Ost)
- Variante 1g: Das Gebäude wird so gedreht, dass die Hauptfassade nach Westen orientiert ist (Parameter: Ausrichtung - West)
- Variante 1h: Die Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser werden erhöht (Parameter: Verteilverluste)
- Variante 1i: Alle Nachbargebäude sind 15 m entfernt (verdichtete Bebauung - 15/15m, Parameter: Verschattung - Nachbar nah)
- Variante 1j: Nachbargebäude sind doppelt so weit entfernt, wie bei der Basisvariante (lockere Bebauung - 30/46m, Parameter: Verschattung - Nachbar fern)
- Variante 1k: Balkone werden so erweitert, dass sie 2m aus der Fassade herauskragen (Parameter: Balkon)

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, auf welchen Parameter die Nullbilanz bezüglich der Anzahl Stockwerke besonders sensibel reagiert.

Tabelle 15: Zusammenfassung der Varianten 1, 1a - 1k.

Var. Nr.	Kurzbegriff	Klimastation	η_{PV} [%]	PV-Anteil Südfassade [%]	Orientierung Hauptfassade	Verteilungsverluste HZ/WW [%]/[%]	Abstand Nachbargebäude
1	Basisvariante	Bern	14	100	Süd	10/40	15/23m
1a	$\eta_{PV} = 0.22$	Bern	22	100	Süd	10/40	15/23m
1b	Lugano	Lugano	14	100	Süd	10/40	15/23m
1c	Davos	Davos	14	100	Süd	10/40	15/23m
1d	Brüstung Süd	Bern	14	57	Süd	10/40	15/23m
1e	Dämmstandard	Bern	14	100	Süd	10/40	15/23m
1f	Ost	Bern	14	100	Ost	10/40	15/23m
1g	West	Bern	14	100	West	10/40	15/23m
1h	Verteilverluste	Bern	14	100	Süd	50/60	15/23m
1i	Nachbar nah	Bern	14	100	Süd	10/40	15/15m
1j	Nachbar fern	Bern	14	100	Süd	10/40	30/46m
1k	Balkon	Bern	14	100	Süd	10/40	15/23m

4.2.2 Allgemeine Daten - Variante 1

Allgemeine Daten zum Gebäude der Variante 1 mit der Klimastation Bern zeigen Bild 15 und Bild 16. Es wird jeweils in unverschattet und verschattet unterschieden. Der Heizwärmebedarf für ein drei- bis vierstöckiges Gebäude mit Verschattung durch die Nachbargebäude entspricht ungefähr dem Zielwert der SIA 380/1:2009. Diese Anzahl an Stockwerken kann für Mehrfamilienhäuser als typisch angesehen werden. Je höher das Gebäude wird, desto geringer ist der Einfluss der Verschattung durch niedrigere Nachbargebäude.

Ab ca. 11 Stockwerke kann der Bedarf für HWLK pro Energiebezugsfläche als konstant angenommen werden. D.h. die Wärmeverluste über Dach und Boden haben auf den Heizwärmebedarf kaum noch Einfluss. Der Einfluss der Verschattung auf den HWLK-Bedarf ist sehr gering.

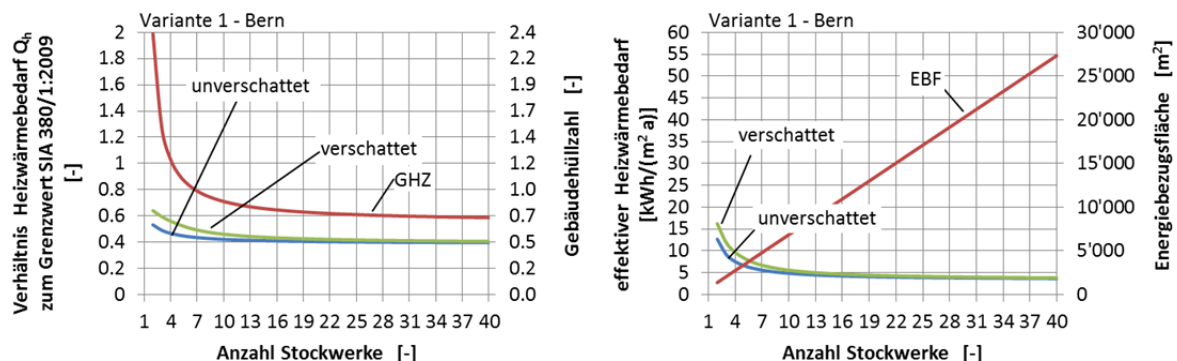


Bild 15: Verhältnis aus Heizwärmebedarf/Grenzwert nach SIA 380/1:2009 und Gebäudehüllzahl (links), effektiver Heizwärmebedarf und Energiebezugsfläche (rechts).

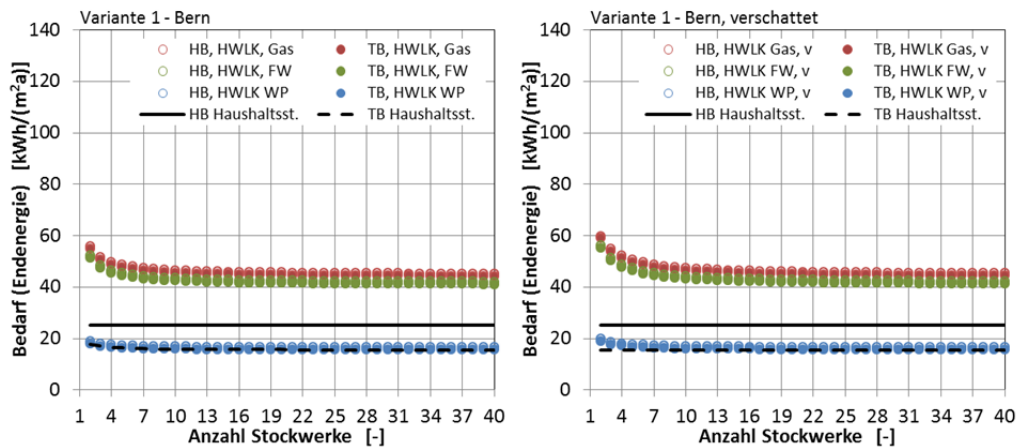


Bild 16: Ungewichtete Endenergie in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet, tiefer/hoher (Haushaltsstrom+Lift) Bedarf: 16/25 kWh_{EE}/(m²a))

4.2.3 Resultate - Variante 1

4.2.3.1 Variante 1 "Basisvariante"

Das Verhältnis von Bedarf und PV-Ertrag zeigt Bild 17 (Klimastation Bern). Ist das Verhältnis ≤ 1 , ist die entsprechende Nullbilanz erreicht. Folgende Aussagen können für Variante 1 getroffen werden:

- Eine Nullbilanz mit Endenergie ist für Gebäude mit Gasfeuerung und Fernwärme nur schwer zu erreichen.
- Die Gewichtung mit nicht erneuerbarer Primärenergie und mit den nationalen Gewichtungsfaktoren führt zu sehr ähnlichen Resultaten.
- Die Verschattung hat zwar auf den Bedarf des Gebäudes kaum einen Einfluss (Bild 16), aber auf den PV-Ertrag (Bild 11). Weil der PV-Ertrag durch die Verschattung reduziert wird, wird es mit zunehmender Verschattung erwartungsgemäss schwieriger, die Nullbilanz zu erreichen.

Alle Bilanzen in Bild 17 zeigen, dass das Verhältnis von Bedarf und PV-Ertrag bis ungefähr zum zehnten Stockwerk stärker von Stockwerk zu Stockwerk zu nimmt als bei einer höheren Anzahl von Stockwerken. Dies ist einerseits eine Folge von dem immer kleiner werdenden Anteil des Wärmeverlustes über das Dach und der untersten Bodenfläche am Heizwärmebedarf und andererseits des kleiner werdenden Anteils des PV-Ertrags vom Dach am Gesamtertrag. Ungefähr ab dem 20. Stockwerk ist der anteilige PV-Ertrag vom Dach gegenüber dem PV-Ertrag der Fassaden so gering, dass er für das Verhältnis keine Rolle mehr spielt ($< 10\%$, Bild 14). Das Verhältnis von Bedarf und PV-Ertrag der Fassade ist für jedes (unverschattete) Stockwerk gleich und das Gesamtverhältnis verändert sich daher kaum noch.

Auffällig ist der leicht Knick in der Kurve zwischen dem vierten und fünften Stockwerk bei verschatteten Gebäuden. Die genaue Ursache ist unklar. Da die Abweichungen jedoch nur gering sind und keinen Einfluss auf das Ergebnis haben, wird dies nicht weiter verfolgt.

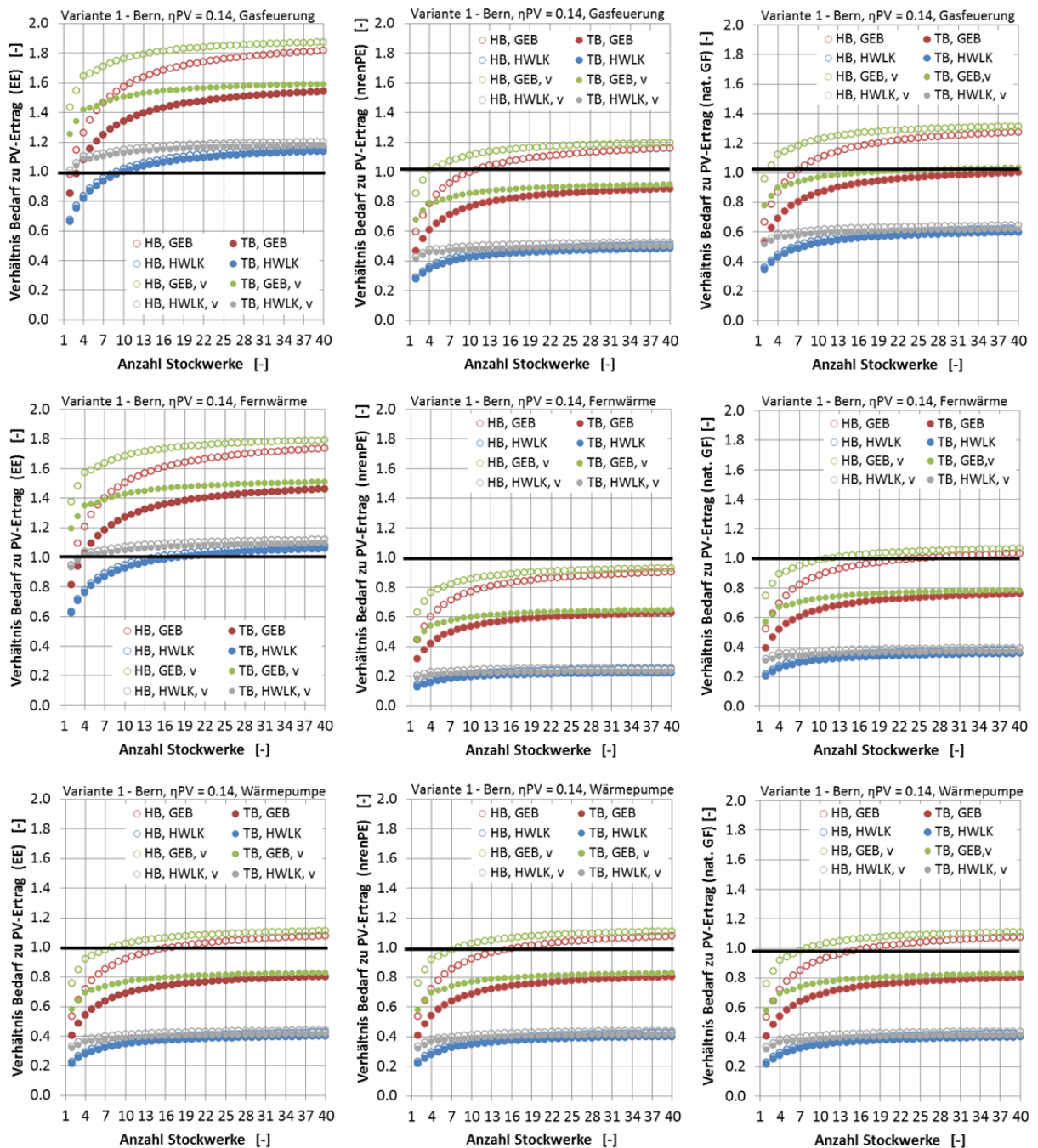


Bild 17: Gewichtete Verhältnisse von Bedarf zu PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1 in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke. Ist das Verhältnis von Bedarf zu PV-Ertrag ≤ 1 ist die entsprechende Nullbilanz erreicht.

4.2.3.2 Variante 1 " $\eta_{PV}=14\%$ " und Variante 1a " $\eta_{PV}=22\%$ "

Welche Flächen mit welchem Anteil PV-Module belegt werden müssen, um die verschiedenen Nullbilanzen zu erreichen, zeigt Bild 19 für die Bilanzierung mit nationalen Gewichtungsfaktoren für den Systemwirkungsgrad der PV-Anlagen von 14% (Variante 1). Zum Vergleich sind die Resultate für einen Systemwirkungsgrad der PV-Anlagen von 22 % in Bild 20 gegenübergestellt (Variante 1a). Je nach Anzahl Stockwerke, Wärmeerzeuger und Effizienz

werden unterschiedliche PV-Flächen zur Erreichung der Nullbilanz benötigt. Diese können unterschiedlich kombiniert werden. Bild 19 und Bild 20 zeigen mögliche Kombinationen.

Lesehilfe für die folgenden Ergebnisdarstellungen (siehe Bild 18):

Ein Gebäude in Bern mit 10 Stockwerken, $\eta_{PV} = 14\%$ und einer Gasfeuerung kann sowohl für einen hohen (schwarze, durchgezogene Linie, „HB, HWLK“) als auch für einen tiefen (schwarze gestrichelte Linie, „TB, HWLK“) Strombedarf die HWLK-Nullbilanz erreichen, wenn das komplette Dach und fast die komplette Südfassade mit PV belegt ist (roter Kreis im rechten Ausschnitt, die Linien „HB, HWLK“ und „TB, HWLK“ liegen sehr dicht beieinander).

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- und Nordfassade noch ein Teil der West- oder Ostfassade für PV genutzt wird (blauer Kreis im rechten Ausschnitt). 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 PV-Ertrags). Der Haushaltsstrombedarf könnte auf ca. $21 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$ ansteigen, damit eine GEB-Nullbilanz gerade noch erfüllt werden kann („TB, GEB“ + Differenz aus PV-Ertrag und „TB, GEB“ dividiert durch zwei, rotes Rechteck im rechten Ausschnitt).

Der Grenzwert für die gewichtete HWLK-Endenergie nach MuKEn 2014 wird nicht eingehalten (rote Linie liegt unter der gestrichelten schwarzen „TB, HWLK“ Linie).

Die Pfeile zeigen jeweils die maximale Anzahl an Stockwerken an, für die eine GEB-Nullbilanz erreicht werden kann: z.B. wird für ein unverschattetes Gebäude mit Gasfeuerung die Bilanz „HB, GEB“ maximal mit 6 Stockwerken erreicht. Im Lesebeispiel in Bild 18 ist noch ein Pfeil für die Bilanz „TB, GEB“ eingezeichnet der anzeigt, dass hier maximal ca. 39 Stockwerke möglich sind.

In diesem Bild kann ebenfalls abgelesen werden, dass wenn z.B. der PV-Systemwirkungsgrad nur 7% beträgt (Halbierung des PV-Ertrags), immernoch die HWLK-Nullbilanz erreicht wird.

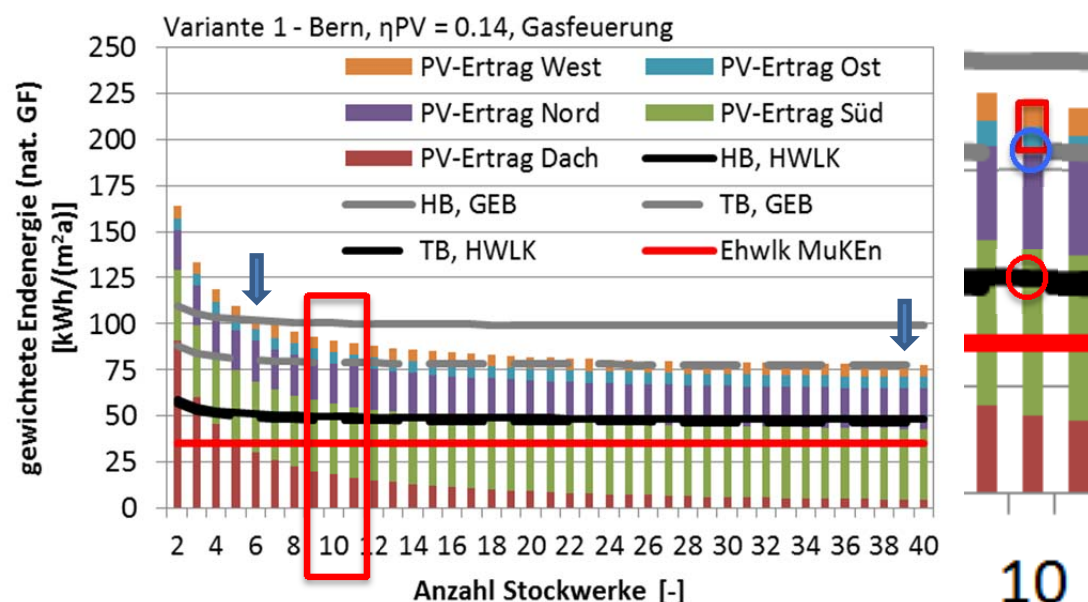


Bild 18: Lesebeispiel zu den Ergebnisdarstellungen.

- $\eta_{PV} = 0.14$ (Bild 19)
 - o HWLK-Bilanz: Je nach Stockwerkszahl wird im Fall der Gasfeuerung der PV-Ertrag von Dach, Südfassade und einem kleinen Teil der Nordfassade unabhängig von der Verschattung benötigt. Für ein Gebäude mit Fernwärme bzw. Wärmepumpe ist der PV-Ertrag vom Dach und einem Grossteil der Südfassade ausreichend.
 - o GEB-Bilanz: Bei hohem Bedarf wird bei einer Gasfeuerung die GEB-Nullbilanz nur bis zu sechs unverschatteten Stockwerken erreicht. In diesem Fall müssen alle verfügbaren Flächen mit PV belegt sein. Bei einem tiefen Bedarf kann die GEB-Nullbilanz noch bis ca. 39 Stockwerke (unverschattet) bzw. 31 Stockwerke (verschattet) erreicht werden.

 Im Fall von Fernwärme/Wärmepumpe ist die GEB-Nullbilanz bei hohem Bedarf für 15 bzw. 24 Stockwerke (Fernwärme) und neun bzw. 16 Stockwerke (Wärmepumpe) möglich. Es müssen alle Flächen mit PV belegt werden. Bei tiefem Bedarf kann die GEB-Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken erreicht werden, wobei die Flächen von Dach, Süd- und Nordfassade für PV-Ertrag genutzt werden müssen.
 - o Der MuKE-Grenzwert des gewichteten Energiebedarfs von $E_{hwk} = 35 \text{ kWh}_{CH}/(\text{m}^2\text{a})$ wird für den Fall Fernwärme und Wärmepumpe ab ca. 3-4 Stockwerken eingehalten. Mit einer Gasfeuerung kann der Grenzwert nicht unterschritten werden.
 - o Durch die mit zunehmender Anzahl an Stockwerken abflachende PV-Ertragskurve führt eine geringe Erhöhung bzw. Reduktion des Bedarfs oder des PV-Ertrags zu einer grossen Änderung in der Anzahl von Stockwerken für die die GEB-Nullbilanz noch erreicht wird oder nicht. Dies betrifft insbesondere den Fall mit hohem Bedarf.
- $\eta_{PV} = 0.22$ (Bild 20)
 - o HWLK-Bilanz: Unabhängig vom Wärmerzeuger reichen die Dachfläche und Teile der Südfassade für die Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken aus.
 - o GEB-Bilanz: Unabhängig vom Wärmerzeuger reichen die Dachfläche und die Süd- und Teile der Nordfassade für die GEB-Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken aus. Je nach Effizienz und Wärmeerzeuger muss die Nordfassade nur zum Teil belegt werden.

Ein hoher Systemwirkungsgrad der PV-Anlage kann erwartungsgemäss einen höheren Bedarf kompensieren und vereinfacht es deutlich, eine Nullbilanz zu erreichen.

Für das untersuchte Gebäude mit dem Standort Bern kann sie mit ca. $0.15 \text{ m}^2_{PV}/\text{m}^2_{EBF}$ bei $\eta_{PV} = 0.14$ bzw. ca. $0.10 \text{ m}^2_{PV}/\text{m}^2_{EBF}$ bei $\eta_{PV} = 0.22$ im Jahresmittel durch den PV-Ertrag gedeckt werden

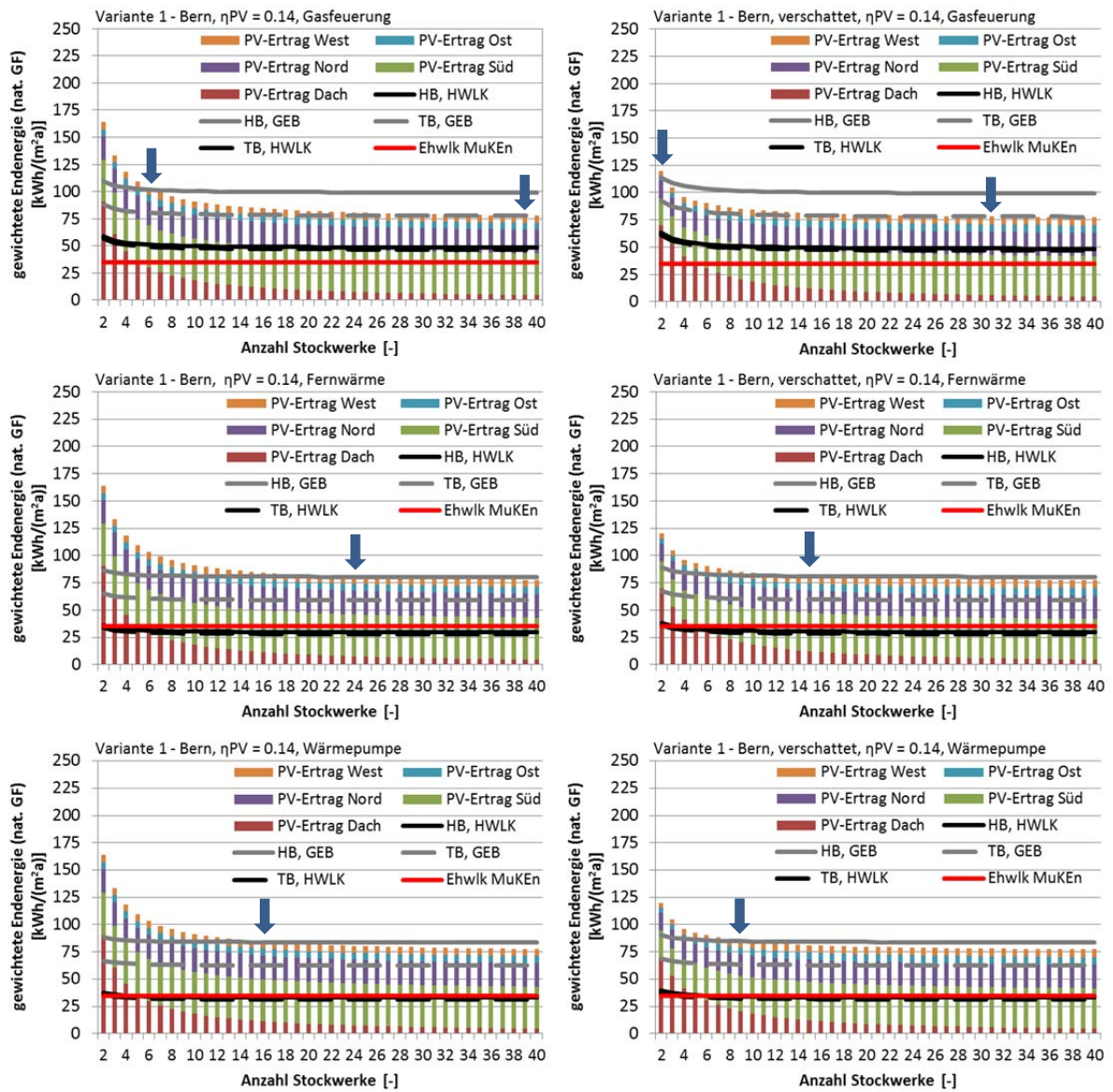


Bild 19: Variante 1 "Basisvariante": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1 in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

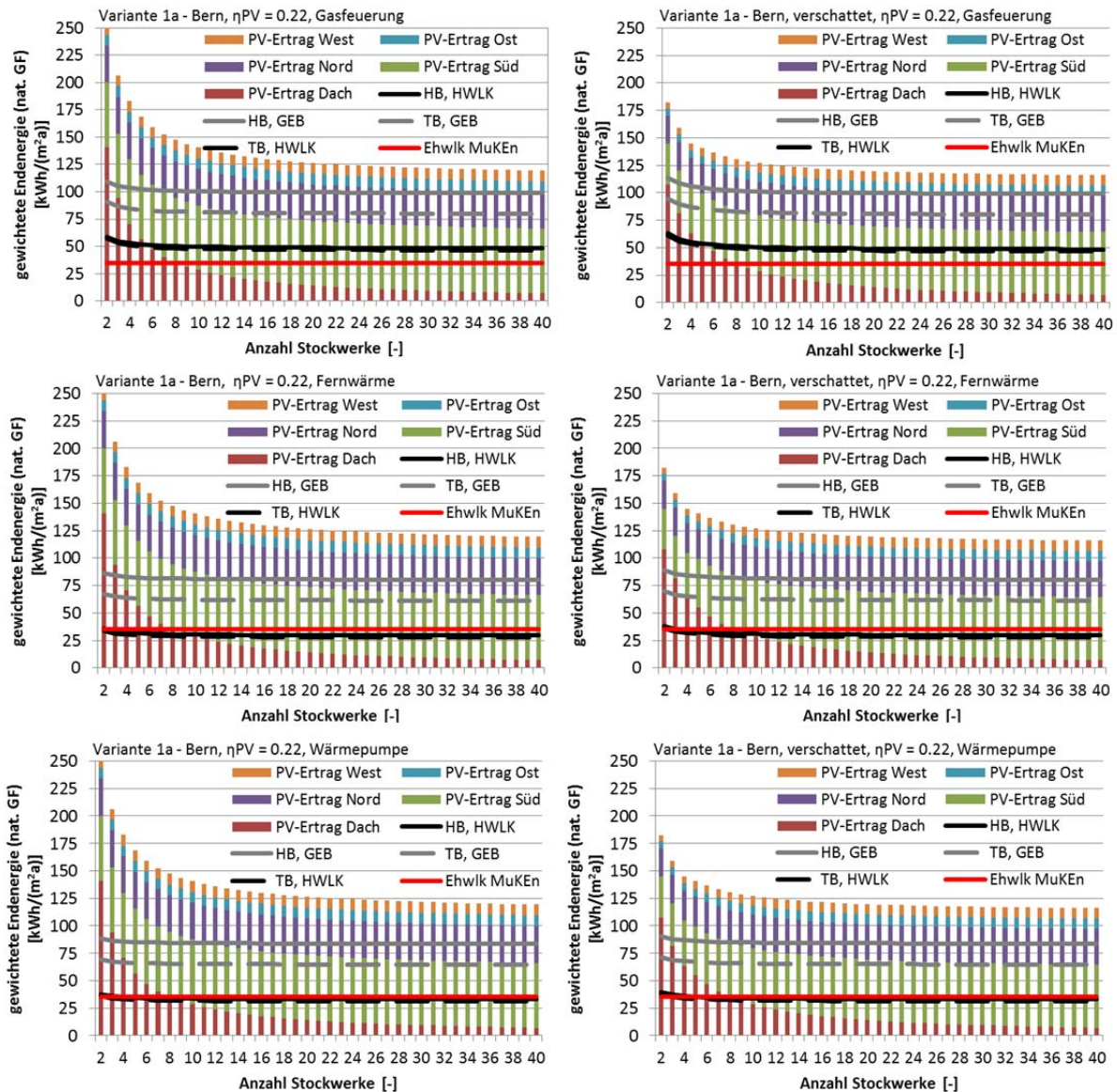


Bild 20: Variante 1a " $\eta_{PV} = 0.22$ ": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1 in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

Für Variante 1 ist in Bild 21 dargestellt, wie hoch der Bedarf für Haushaltsstrom inkl. Lift unter Berücksichtigung des Systemwirkungsgrades der PV-Anlage maximal sein darf, um bei sechs bzw. 40 Stockwerken eine mit den nationalen Gewichtungsfaktoren gewichtete GEB-Nullbilanz zu erreichen (verschatteter Fall). Der HWLK-Bedarf entspricht Bild 16 bei sechs bzw. 40 Stockwerken und bildet die Differenz zwischen Gesamtenergiebedarf GEB und Haushaltsstrom/Lift. 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.

Der maximale Bedarf für Haushaltsstrom inkl. Lift liegt zwischen einer GEB-Nullbilanz für sechs und 40 Stockwerke bei $\eta_{PV} = 0.14$ ca. $5 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$ auseinander. Je höher der Systemwirkungsgrad der PV-Anlage wird, desto höher kann der Bedarf für Haushaltsstrom inkl. Lift sein.

Lift ausfallen, mit dem noch eine GEB-Nullbilanz erreicht wird. Der "erlaubte" Bedarf für Haushaltsstrom inkl. Lift ist abhängig vom Wärmeerzeuger.

Das betrachtete langgezogene MFH kann mit Fernwärme oder einer Wärmepumpe und einem Systemwirkungsgrad der PV-Anlage von ca. 16 % bei einem Bedarf für Haushaltsstrom inkl. Lift von ca. 30 kWh_{EE}/(m² a) für alle untersuchten Stockwerkszahlen die GEB-Nullbilanz erfüllen.

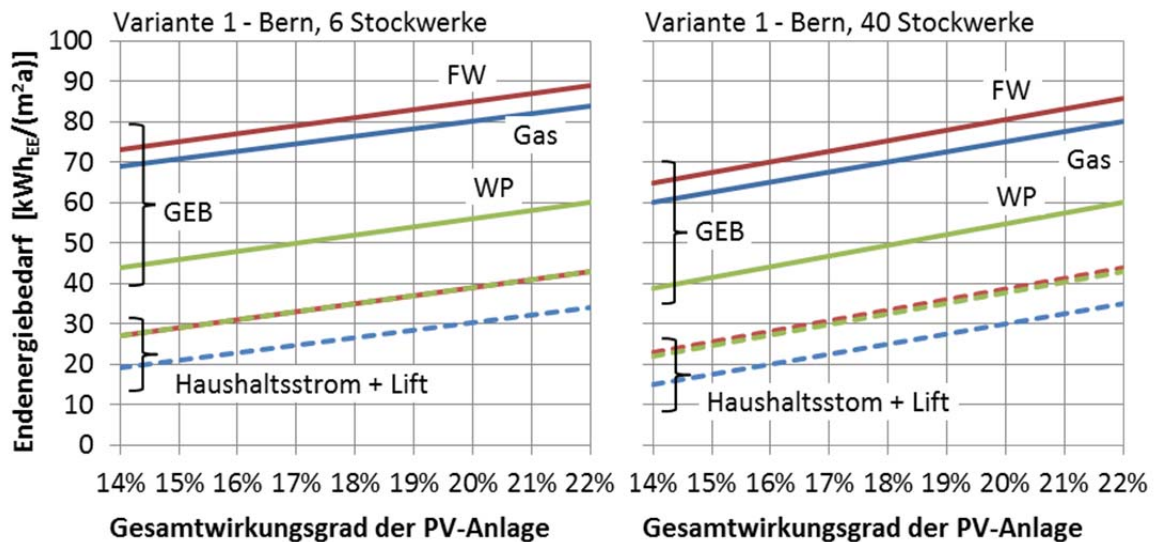


Bild 21: Zusammenhang von Bedarf für Haushaltsstrom + Lift und Systemwirkungsgrad der PV-Anlage, um die GEB-Nullbilanz für Variante 1 inkl. Verschattung zu erreichen (links: 6 Stockwerke, rechts 40 Stockwerke, GEB = HS + Lift + HWLK, HWLK Bedarf für Gas/FW/WP: 50/46/17 kWh_{EE}/(m²a), 6 St. bzw. 45/42/17 kWh_{EE}/(m²a), 40 St.).

4.2.3.3 Variante 1b "Lugano" und Variante 1c "Davos"

Die Auswirkung von verschiedenen Klimastationen wird in Bild 22 (Klimastation Lugano, Variante 1b) und Bild 23 (Klimastation Davos, Variante 1c) gezeigt. Der PV-Ertrag ist in Lugano leicht höher als in Bern, der Bedarf etwas geringer. Somit muss prinzipiell weniger Fläche mit PV-Modulen belegt werden, um eine HWLK- bzw. GEB-Nullbilanz zu erfüllen. Entsprechend können auch Gebäude mit einer höheren Anzahl an Stockwerken als Nullenergiegebäude gebaut werden, als bei der Klimastation Bern. Eine Kühlung wird nicht berücksichtigt.

Bei der Klimastation Davos ist der PV-Ertrag, trotz Horizontverschattung durch die Berge, deutlich höher als bei Bern, der Bedarf steigt jedoch nur leicht an. Folglich können mit jedem Wärmeerzeuger für alle Stockwerkszahlen sowohl die HWLK- als auch die GEB-Nullbilanz erreicht werden. Selbst bei einem hohen Bedarf ist es nicht notwendig, alle Flächen mit PV zu belegen. Sind alle Flächen belegt, ist eine GEB-Nullbilanz bei einer Gasfeuerung mit einem Haushaltsstrombedarf von 28 kWh_{EE}/(m²a) und bei Fernwärme/Wärmepumpe von 37 kWh_{EE}/(m²a) möglich.

Es zeigt sich, dass der Einfluss der hohen Einstrahlung grösser auf das Ergebnis ist, als die höheren bzw. tieferen Aussentemperaturen. Da aber in der Regel der Standort nicht gewählt werden kann, kann darauf kein Einfluss genommen werden.

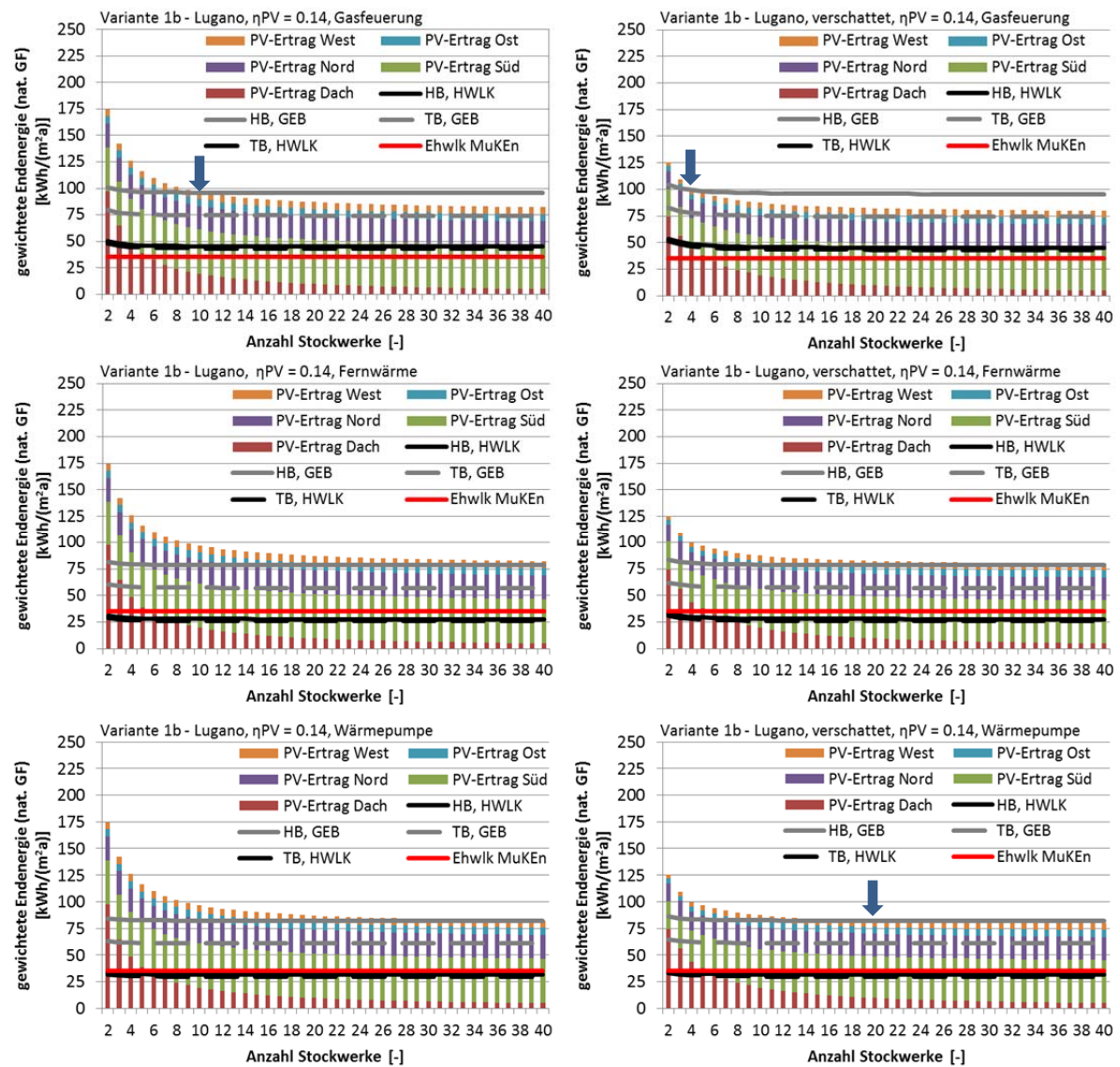


Bild 22: Variante 1b "Lugano": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1b in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

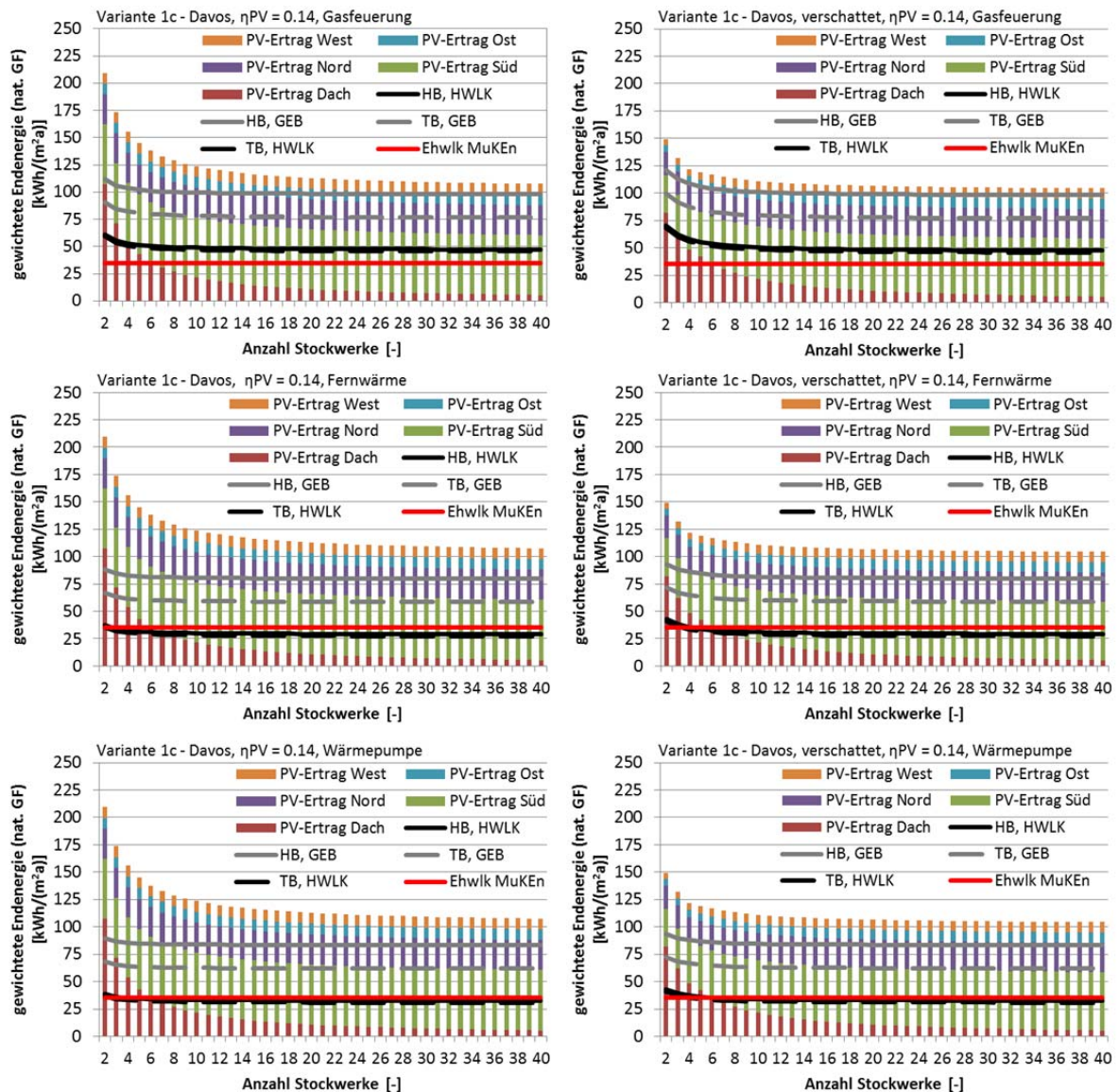


Bild 23: Variante 1c "Davos": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1c in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

4.2.3.4 Variante 1d "Brüstung Süd"

Die dargestellten Ergebnisse von Varianten 1 sowie 1a-1c können auch auf andere Flächen, die für PV-Module zur Verfügung stehen, extrapoliert werden. Ist es z.B. auf der Südfassade nur im Brüstungsbereich möglich, PV-Module zu installieren (Annahme für Brüstungsbereich: Höhe 1 m, Fassadenlänge 63.65 m), dann reduziert sich die zur Verfügung stehende PV-Fläche an der Südfassade um 43%, was einer Reduktion des PV-Ertrags ebenfalls um 43 % entspricht. Was dies für die Nullbilanzen bedeutet, kann aus Bild 19 bis Bild 23 abgeleitet werden. In Bild 24 wird dies exemplarisch als Variante 1d dargestellt.

Im Vergleich zur Basisvariante (Bild 19) ist zu erkennen, dass durch den deutlich reduzierten PV-Ertrag von der Südfassade die GEB-Nullbilanz bei tiefem Bedarf nicht mehr für 40 Stockwerke erreicht werden kann. Je nach Wärmeerzeuger und Verschattung sind noch 3

bis 25 Stockwerke möglich. Bei einem hohen Bedarf reduziert sich ebenfalls die Anzahl an Stockwerken, für die eine GEB-Nullbilanz erreicht werden kann. Für die HWLK-Bilanzen muss in vielen Fällen neben Dach und Südfassade auch die Nordfassade mit PV belegt werden.

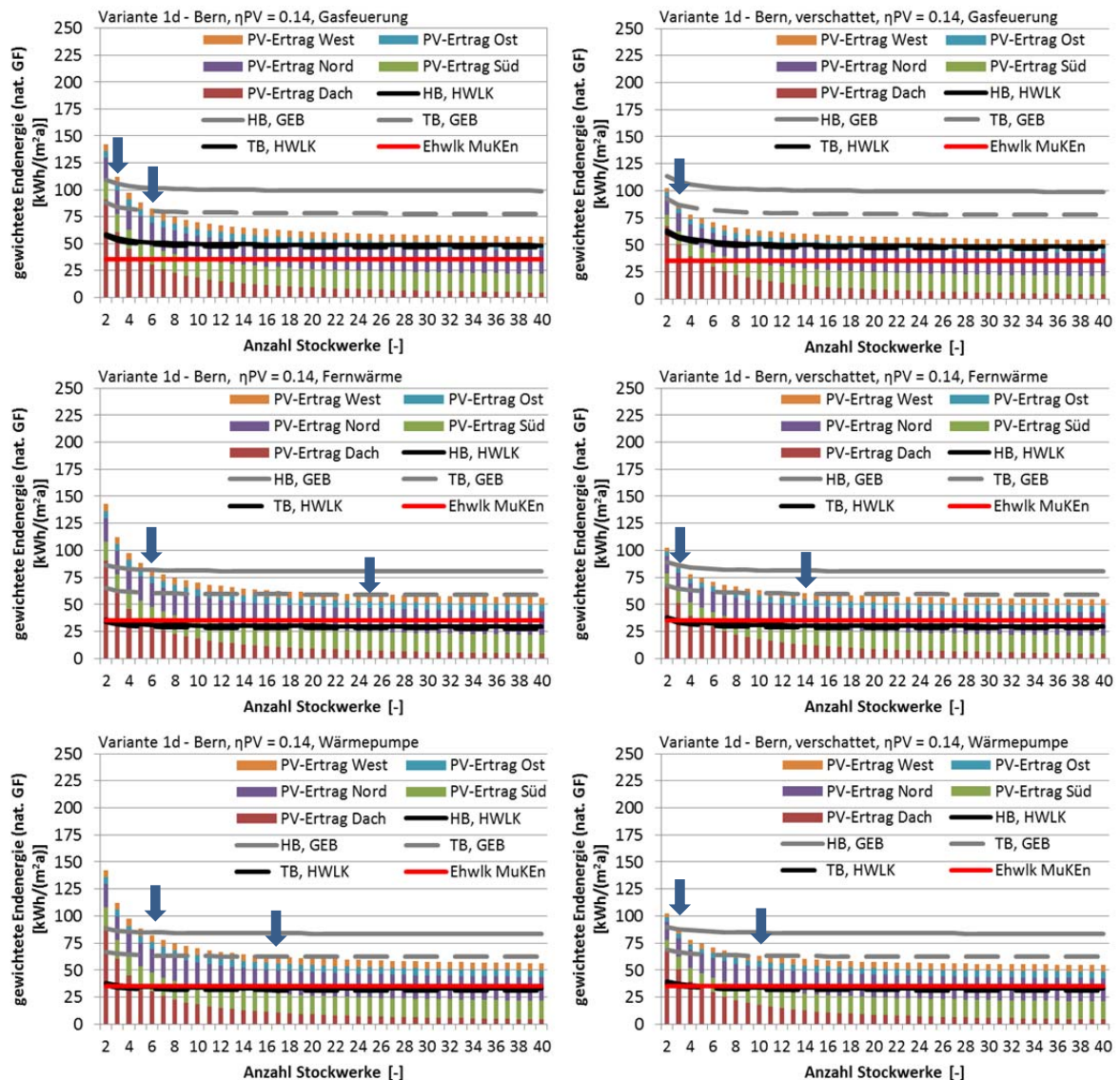


Bild 24: Variante 1d "Brüstung Süd": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1d in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

4.2.3.5 Variante 1e "Dämmstandard"

Alle vorhergehenden Betrachtungen von Variante 1 wurden für ein sehr gut gedämmtes Gebäude durchgeführt. Zum Vergleich wird ein Gebäude, welches weniger gut gedämmt ist, untersucht (Variante 1e, Dämmniveau gemäss Tabelle 3). Der Grenzwert für Neubauten der SIA 380/1:2009 wird für ein Gebäude ab 16 Stockwerken und Verschattung durch Nachbargebäude eingehalten (Bild 25). Der effektive Heizwärmebedarf steigt um den Faktor von rund 3 - 4 gegenüber der Basisvariante. Der HWLK-Bedarf (EE) bei vier Stockwerken erhöht sich je nach Wärmeerzeuger um ca. 50% (Wärmepumpe) bzw. rund 80% (Gas/Fernwärme) und bei 40 Stockwerken um 35% bzw. ca. 60% (Bild 26).

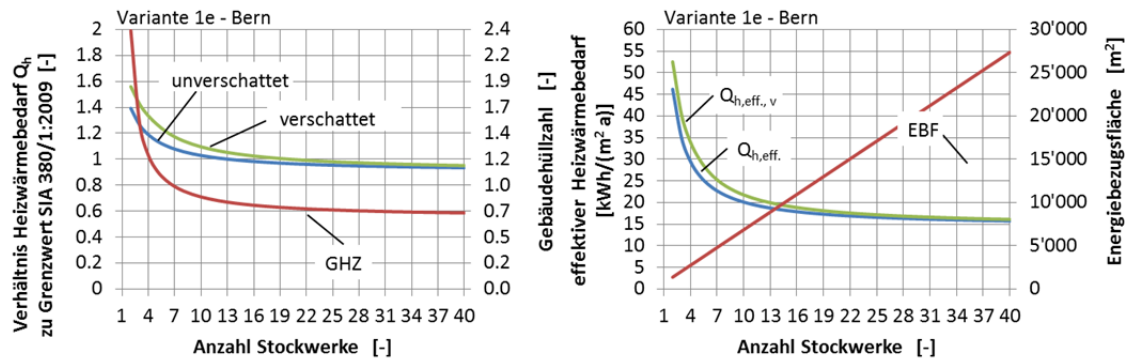


Bild 25: Variante 1e: Verhältnis Heizwärmebedarf zu Grenzwert nach SIA 380/1:2009 und Effektiver Heizwärmebedarf in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

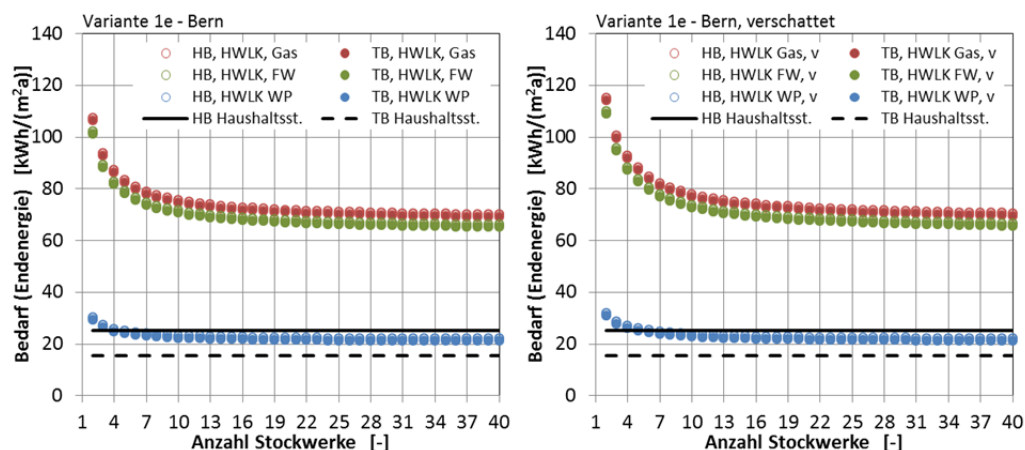


Bild 26: Variante 1e: Ungewichtete Endenergie in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

Trotz des deutlich höheren Heizwärmebedarfs kann die HWLK-Nullbilanz für alle Wärmeerzeuger für Gebäude mit bis zu 40 Stockwerken erreicht werden (Bild 27). Die GEB-Nullbilanz für tiefen Bedarf kann in den Fällen Fernwärme bzw. Wärmepumpe ebenfalls bis zu 40 Stockwerken erreicht werden. Mit einer Gasfeuerung ist nur für zwei bis drei unverschattete Stockwerke ein Nullenergiegebäude möglich.

Da der PV-Ertrag nicht steigt, muss infolge des erhöhten HWLK-Bedarfs der Bedarf für Haushaltsstrom sinken, um die GEB-Nullbilanz einzuhalten.

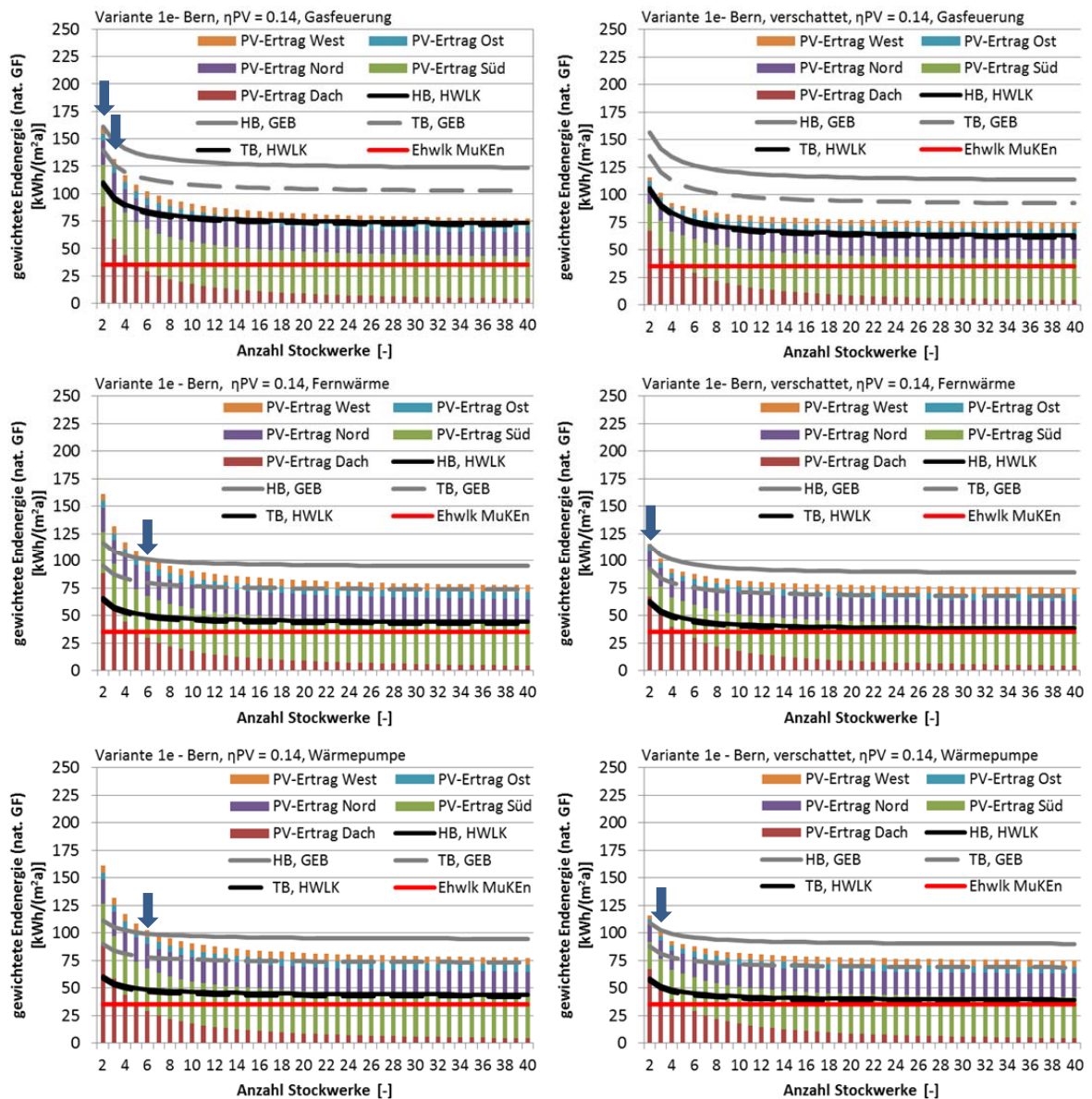


Bild 27: Variante 1e "Dämmstandard": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1e in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

4.2.3.6 Variante 1f "Ost" und Variante 1g "West"

Bild 28 und Bild 29 zeigen die Ergebnisse für den Fall, dass die Hauptfassade des Gebäudes nach Osten (Variante 1f) bzw. nach Westen (Variante 1g) ausgerichtet ist (die Fensteranteile gemäss Basisvariante werden hierbei nicht verändert, genannt ist jeweils die Ausrichtung der ursprünglichen Südfassade). Bis auf den Fall "Wärmepumpe, verschattet" zeigen beide Varianten dasselbe Ergebnis. Gegenüber Variante 1 kann durch die Ost- bzw. Westausrichtung die GEB-Nullbilanz für mehr Stockwerke erreicht werden, da ein leicht höherer PV-Ertrag erzielt wird. Dadurch ist für alle Wärmeerzeuger bis zu 40 Stockwerken eine GEB-Nullbilanz mit tiefem Bedarf möglich. Bei hohem Bedarf sind es im Fall der Gasfeuerung nur wenige Stockwerke mehr als bei der Basisvariante, bei Fernwärme und Wärmepumpe kann eine GEB-Nullbilanz fast immer für Gebäude mit bis zu 40 Stockwerken GEB-Nullbilanz erzielt werden.

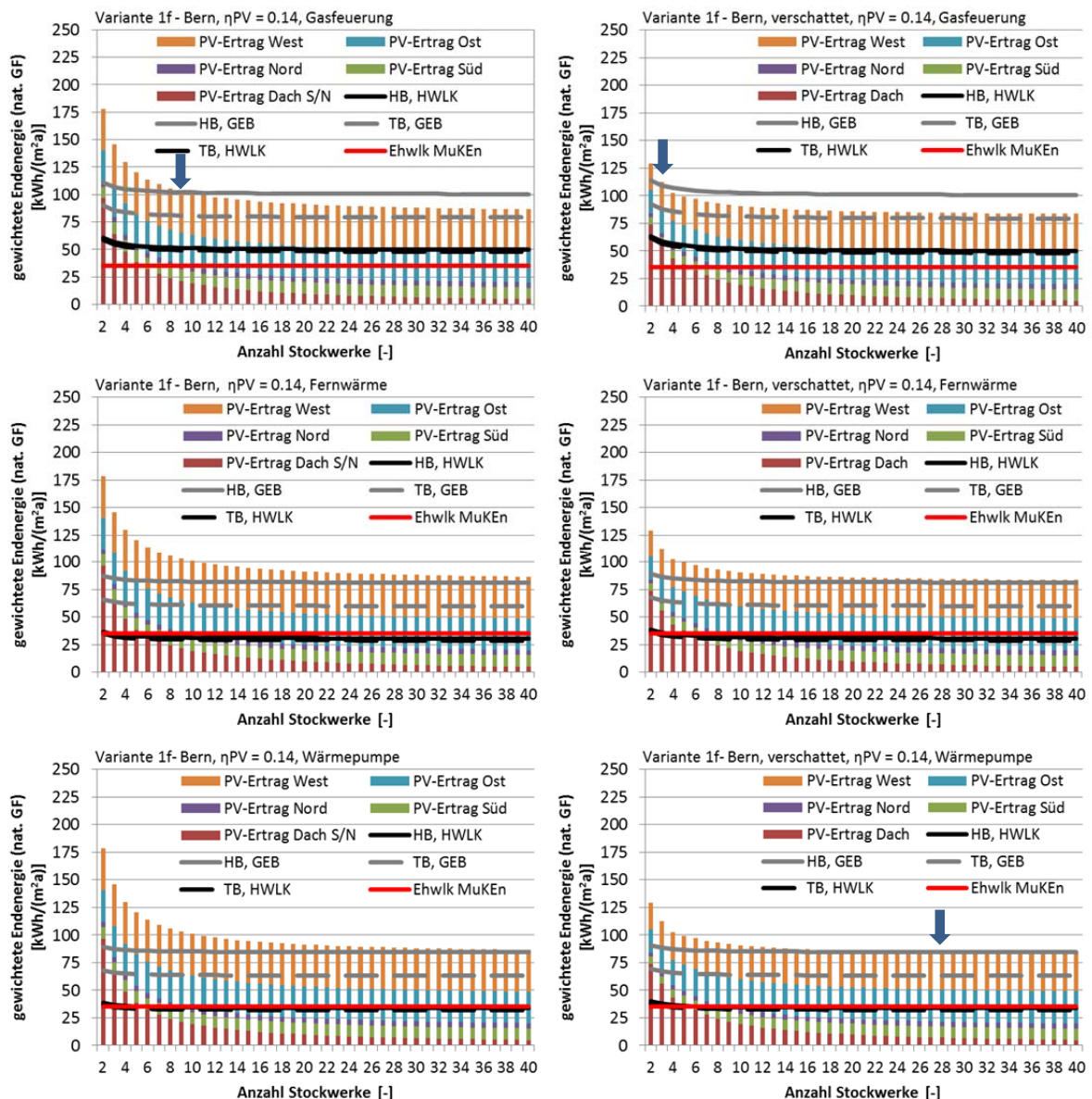


Bild 28: Variante 1f "Ost": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1f in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

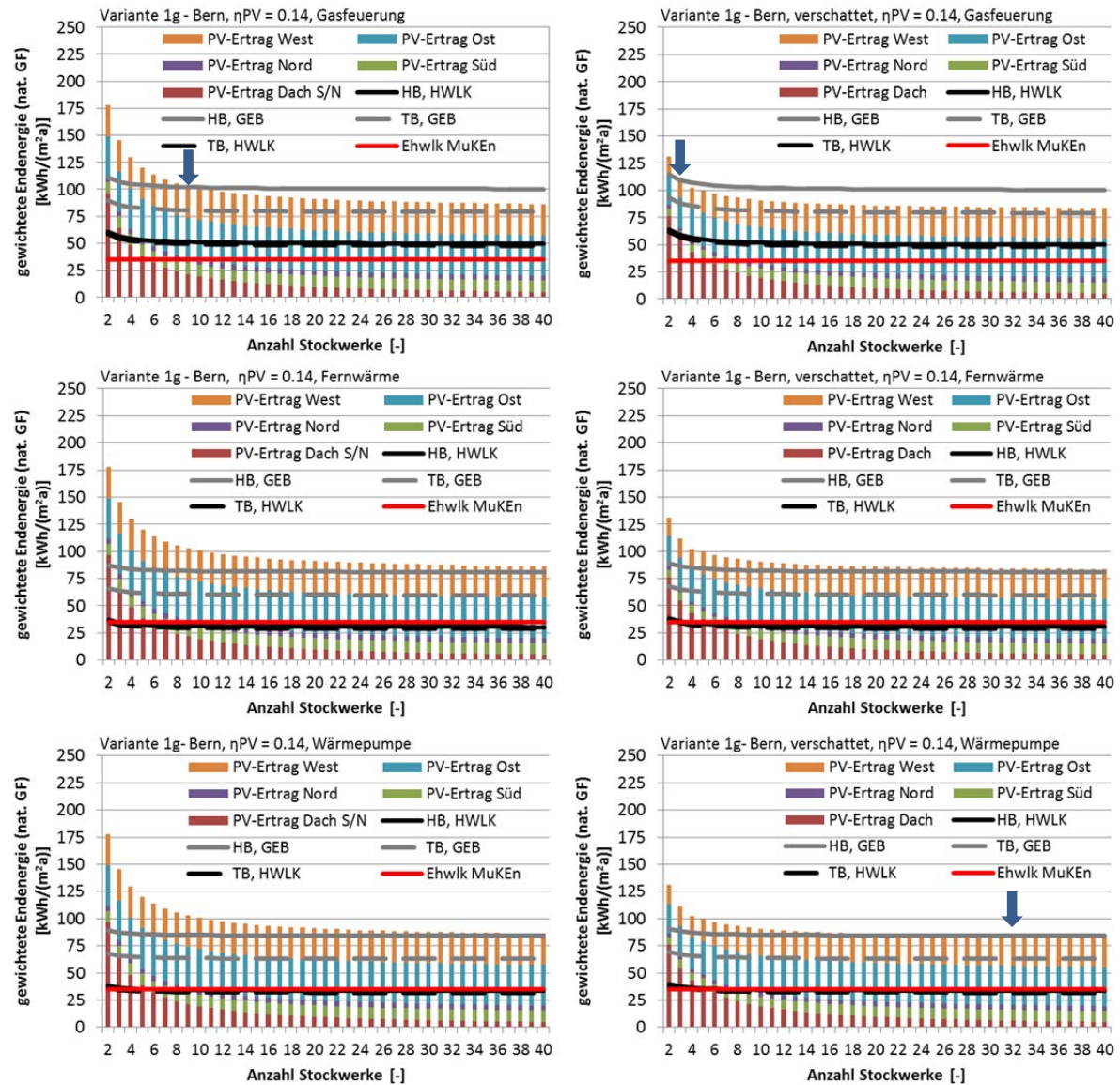


Bild 29: Variante 1g "West": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1g in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

4.2.3.7 Variante 1h "Verteilverluste"

In der Basisvariante sind die Verteil- und Speicherverluste für die Heizung zu 10 % und für Warmwasser zu 40 % festgelegt. Bild 30 zeigt die Auswirkungen auf den HWLK-Bedarf, wenn die Verteil- und Speicherverluste von Warmwasser bzw. der Heizung variiert werden. Die Verluste werden für Warmwasser zwischen 20-60% variiert (vgl. Anhang 9.2, Tabelle 27). Die Verluste von 20% sind sehr optimistisch und die von 60% recht hoch. Der Bereich soll den Einfluss der Verluste auf den HWLK-Bedarf aufzeigen. Es zeigt sich, dass die Verteil- und Speicherverluste für Warmwasser einen hohen Einfluss auf den HWLK-Bedarf haben (Bild 30 links).

Bei der Heizung werden die Verteil- und Speicherverluste auf 20% und 50% erhöht. Der Wert von 50% ist sehr hoch, aber auch er soll nur die Tendenz verdeutlichen, wie sich die Verteil- und Speicherverluste auf den HWLK-Bedarf auswirken. Es zeigt sich, dass die Verteil- und Speicherverluste der Heizung sich weniger stark auf den HWLK-Bedarf auswirken, als die Verteil- und Speicherverluste von Warmwasser (Bild 30 rechts).

Sowohl die Verluste für Warmwasser als auch die für Heizung spielen bei Gebäuden mit wenigen Stockwerken eine grössere Rolle, als bei höheren Gebäuden [27].

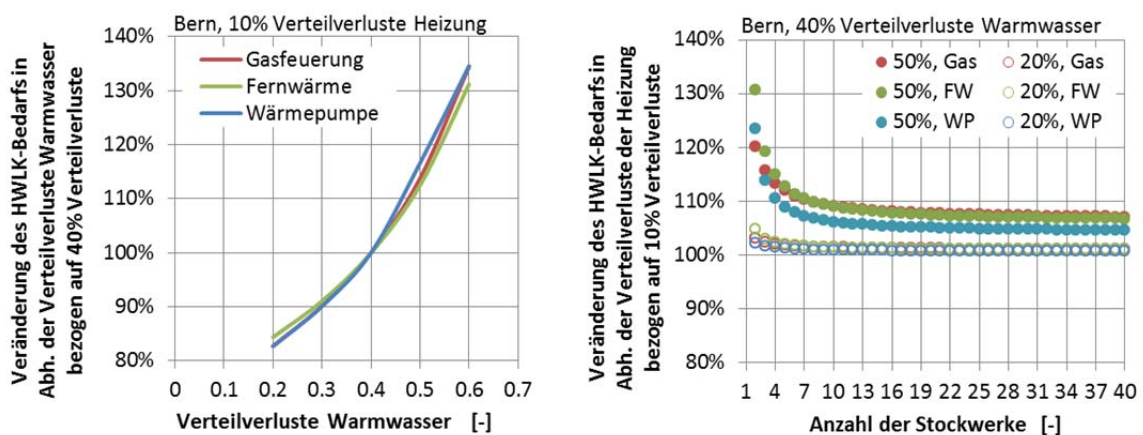


Bild 30: Veränderungen des HWLK-Bedarfs in Abhängigkeit von den Verteil- und Speicherverlusten für Warmwasser (links) bzw. der Verteil- und Speicherverluste für die Heizung (rechts). 100% entsprechen entweder 40% Verteil- und Speicherverluste für Warmwasser bzw. 10% Verteil- und Speicherverluste bei der Heizung. Die Auswertung basiert auf der Gewichtung mit nationalen Gewichtungsfaktoren und der Klimastation Bern.

Wie Bild 19 bis Bild 24 zeigen, beträgt der HWLK-Bedarf für die Basisannahme der Verteil- und Speicherverluste von 10/40 (H/WW) rund 30-50 % des Gesamtenergiebedarfs (Verhältnis HB/TB, HWLK zu HB/TB, GEB). In Bild 31 sind die entsprechenden Ergebnisse für Verteil- und Speicherverluste von 50 % für Heizung und 60 % für Warmwasser als eine worst case Betrachtung wiedergegeben (Variante 1h). Folgende Aussagen können abgeleitet werden:

- Der Bedarf für HWLK steigt durch die erhöhten Verteil- und Speicherverluste, je nach Stockwerkanzahl um 40-50 %, an. Trotzdem kann die HWLK-Nullbilanz für alle Wärmeerzeuger erfüllt werden. Gegenüber Variante 1 ist jedoch natürlich ein grösserer PV-Ertrag notwendig. Insbesondere bei der Gasfeuerung müssen neben der Nordfassade auch die West- und Ostfassade zusätzlich mit PV belegt werden.

- Durch den erhöhten HWLK-Bedarf steigt auch der Gesamtenergiebedarf. Dadurch reduziert sich bei der Gasfeuerung die mögliche Anzahl der Stockwerke, für die eine GEB-Nullbilanz erzielbar ist, deutlich. Für Fernwärme und Wärmepumpe gilt dies nur, wenn ein hoher Bedarf vorliegt. Bei niedrigem Bedarf sind weiterhin z.T. bis 40 Stockwerke mit einer GEB-Nullbilanz möglich. Jedoch müssen neben dem Dach auch alle Fassaden mit PV belegt werden.
- Die Reduktion von hohem zu tiefem Bedarf hat bei Fernwärme und Wärmepumpe auf den Gesamtenergiebedarf einen grösseren Einfluss, als die Erhöhung der Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser (vgl. Bild 19).

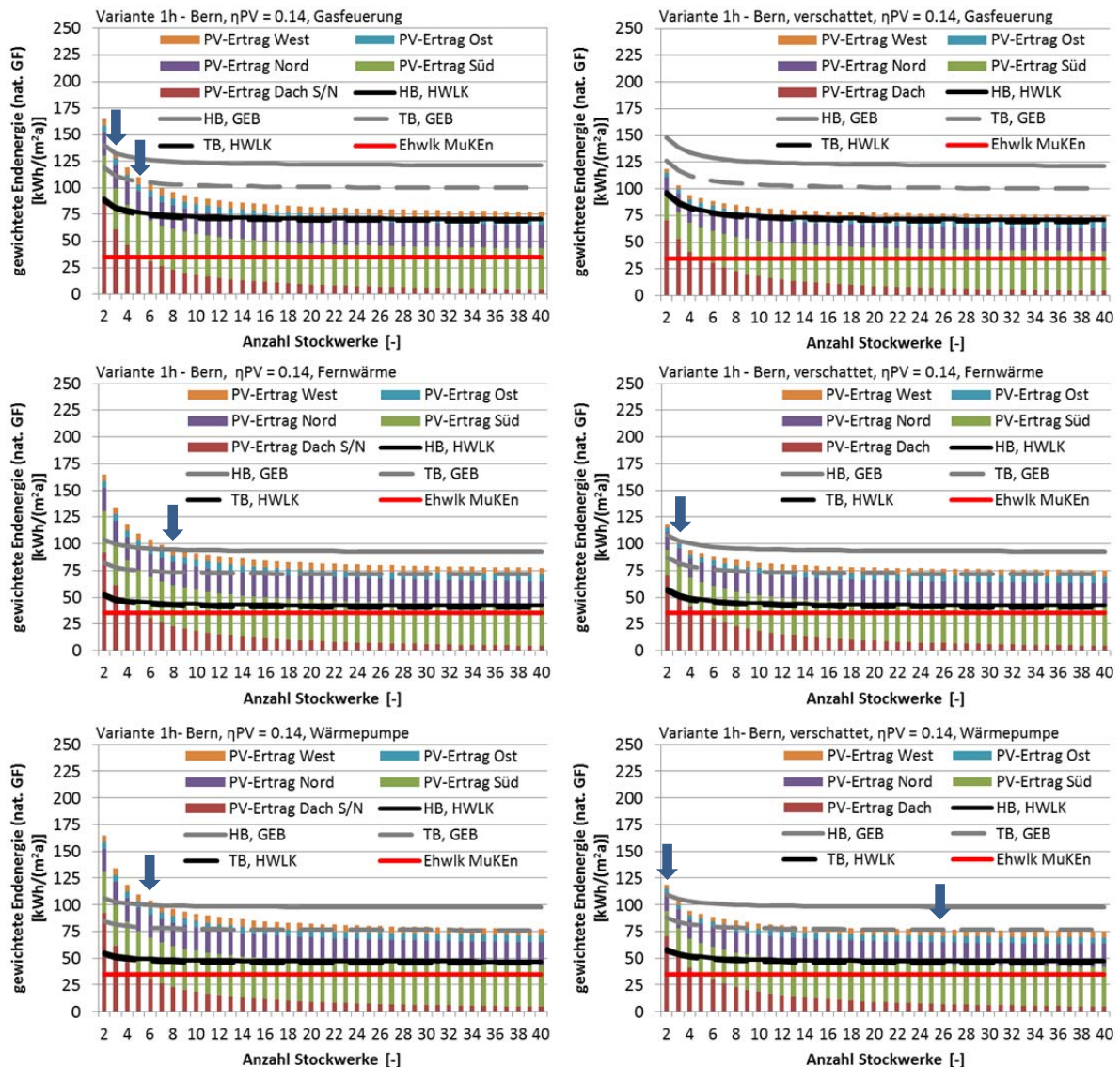


Bild 31: Variante 1h "Verteilverluste": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1h in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

4.2.3.8 Variante i "Nachbar nah" und Variante j "Nachbar fern"

Der Abstand zu den Nachbargebäuden wird in den Varianten i und j variiert. Der Einfluss auf die gewichtete Endenergie ist in Bild 32 dargestellt. Links weisen alle Nachbargebäude den Abstand von 15 m auf (Nachbar nah, 15/15m) und rechts ist der Abstand zu den Nachbarn gegenüber Variante 1 verdoppelt (Nachbar fern, 30/46m). Die in Bild 11 gezeigte Abhängigkeit des PV-Ertrages von der Verschattungssituation ist hier gut zu erkennen. Mit grösserem Abstand der Nachbarn nimmt die Verschattung ab und daher der PV-Ertrag zu; eine Nullbilanz wird für eine grössere Anzahl an Stockwerken möglich. Dies gilt – bei der hier betrachteten Höhe der umliegenden Gebäude von sechs Stockwerken – insbesondere für die unteren 10 Stockwerke.

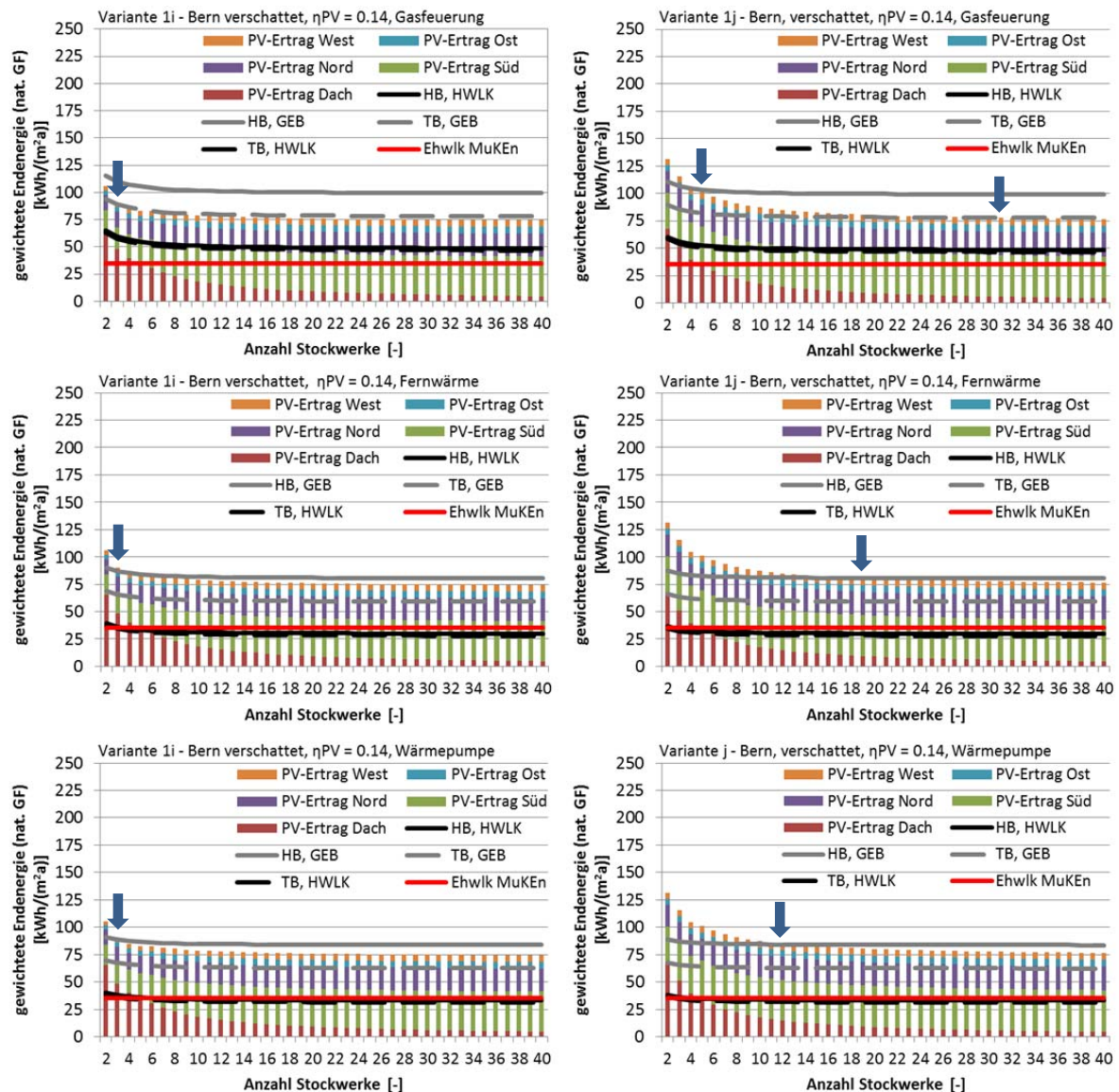


Bild 32: Variante 1i und 1j "Nachbar nah/fern": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1i/j in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: Variante i - 15/15m, rechts: Variante j - 30/46m).

4.2.3.9 Variante 1k "Balkon"

Der Einfluss von auskragenden Balkonen ist in Variante 1k untersucht (Bild 33). Die Balkone ragen 2 m aus der Fassade hervor. Dadurch wird die Südfassade zwar etwas mehr verschattet, jedoch erhöht sich die PV-Fläche um die Balkonbrüstungen, die nach Osten und Westen ausgerichtet sind. Der PV-Ertrag erhöht sich leicht, der Ertrag durch die Flächenvergrößerung ist demnach höher als die Reduktion des PV-Ertrags durch die Eigenverschattung. Für die meisten Fälle erhöht sich dadurch gegenüber der Basisvariante die Anzahl der Stockwerke leicht, für die eine HWLK- und GEB-Nullbilanz möglich ist.

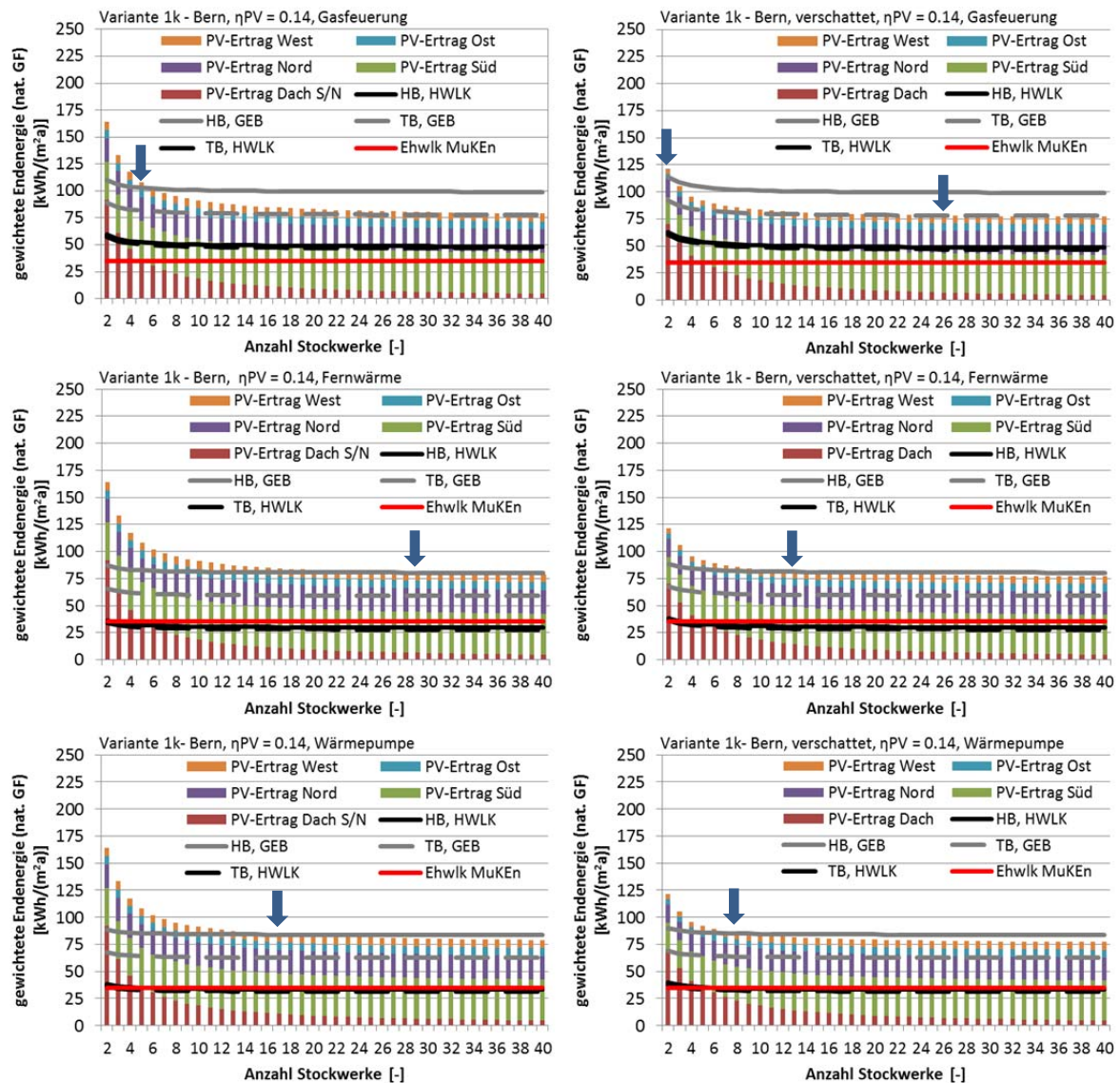


Bild 33: Variante 1k "Balkon": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 1h in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

4.2.4 Überblick - Variante 1

In Bild 34 ist die mögliche Anzahl der Stockwerke mit einer HWLK- bzw. GEB-Nullbilanz für die betrachteten Parameter für Variante 1 zusammengefasst:

- Die HWLK-Nullbilanz kann für alle Varianten bis zu 40 Stockwerken erreicht werden, wobei in vielen Fällen nur das Dach und die Südfassade mit PV belegt werden müssen.
- Hat das Gebäude einen tiefen Gesamtenergiebedarf, kann bei den meisten Varianten die GEB-Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken ebenfalls erreicht werden. Kann die Südfassade nur teilweise für PV genutzt werden (Variante 1d "Brüstung Süd"), ist die GEB-Nullbilanz auch mit tiefem Bedarf für alle Wärmeerzeuger nicht bis 40 Stockwerke möglich.
- Mit einer Gasfeuerung kann bei der Basisvariante (Variante 1), einem niedrigen Dämmstandard (Variante 1e) und mit hohen Verteil- und Speicherverlusten (Variante 1h) die GEB-Nullbilanz auch mit tiefem Gesamtenergiebedarf nur bis zu wenigen Stockwerken erreicht werden.
- 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% (Variante 1a) und für den Standort Davos (Variante 1c) möglich. Für Fernwärme sind 40 Stockwerke auch in Lugano bzw. mit Ost/West-Ausrichtung möglich.

Die Parameter, die einen positiven oder negativen Einfluss auf eine Nullbilanz der Basisvariante 1 haben, sind in Tabelle 16 genannt.

Tabelle 16: Einfluss auf die Nullbilanz gegenüber der Basisvariante 1.

Nullbilanz	vorteilhaft	nachteilig
GEB	• Hoher Systemwirkungsgrad der PV-Anlage • Andere Klimaregion als Bern • Ost/Westausrichtung • Verschattung durch ferne Nachbargebäude • Fernwärme oder Wärmepumpe	• Hoher Bedarf von Haushaltsstrom/Lift • Niedriger Dämmstandard • Hohe Verteil- und Speicherverluste • Geringe PV-Flächen • Verschattung durch nahe Nachbargebäude • Eigenverschattung durch vorgelagerte Balkone
HWLK	Bilanz kann für 40 Stockwerke erreicht werden	

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

1. Priorität
 - sehr hoher Dämmstandard
 - tiefer Bedarf von Haushaltsstrom/Lift
 - Wärmeerzeuger: Fernwärme oder Wärmepumpe
 - Grosse PV-Flächen an allen Fassaden mit einem hohen PV-Ertrag
 - niedrige Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser
2. Priorität
 - Verschattung durch Nachbargebäude (meist nicht oder

kaum beeinflussbar)

- Vorgelagerte Balkone
- Ost-West Ausrichtung für langgestreckte Gebäude gegenüber Süd-Nord Ausrichtung bevorzugen. falls die beeinflussbar ist.

Insgesamt schneidet die Fernwärme bei diesem Vergleich 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, kann infolge der abflachenden PV-Ertragskurve mit zunehmender Anzahl an Stockwerken bei manchen Varianten mit der Fernwärme für eine grössere Anzahl an Stockwerken die GEB-Nullbilanz erreicht werden, während es mit einer Wärmepumpe gerade nicht mehr möglich ist.

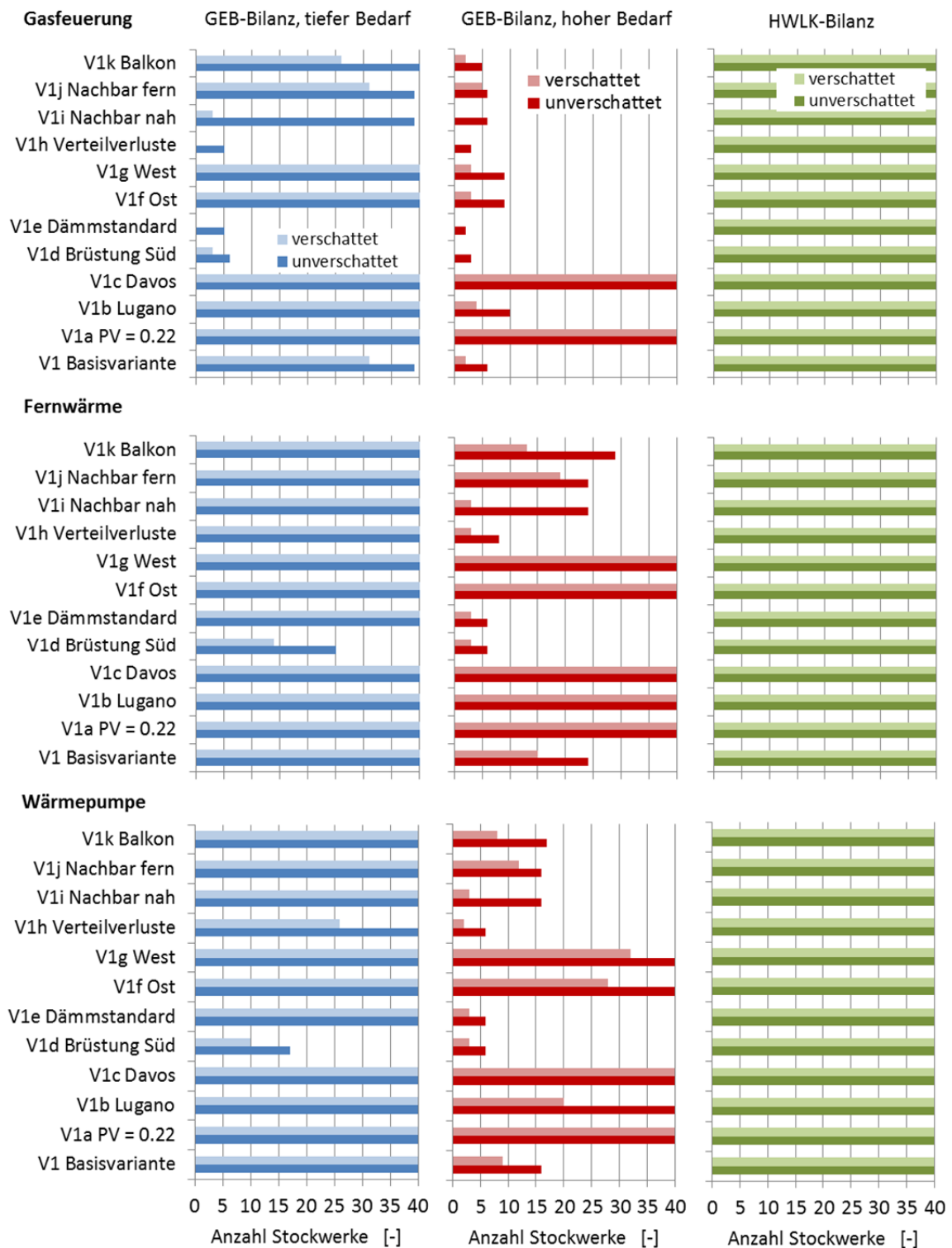


Bild 34: Anzahl Stockwerke, für die eine GEB- bzw. HWLK-Nullbilanz von Variante 1 (langgestreckter Grundriss eines Mehrfamilienhauses) unter Berücksichtigung verschiedener Parameter erreicht werden kann. Die Bilanzen sind mit nationalen Gewichtungsfaktoren bewertet (tiefer/höher (Haushaltsstrom+Lift) Bedarf: 16/25 kWh_{EE}/(m²a)).

4.3 Variante 2 - quadratisches MFH

4.3.1 Untersuchte Parameter - Variante 2

Variante 2 ist ein quadratisches Mehrfamilienhaus mit 4 Wohnungen pro Stockwerk. Die untersuchten Parameter sind Tabelle 17 zu entnehmen. Um den Bericht übersichtlicher zu halten, befinden sich die Diagramme für die Varianten 2a-i im Anhang. Es werden folgende Varianten untersucht (Tabelle 17):

- Variante 2: Basisvariante: Systemwirkungsgrad der PV-Anlage 14%. Klimastation Bern-Liebfeld, Verteil- und Speicherverluste Heizung/Warmwasser 10%/40%, Zielwert SIA 380/1:2009 bei 3-4 Stockwerken erreicht
- Variante 2a: Der Systemwirkungsgrad der PV-Anlage beträgt 22%. (Parameter: PV-Systemwirkungsgrad - $\eta_{PV} = 0.22$)
- Variante 2b: Klimastation Lugano: höhere Temperaturen und ähnliche Einstrahlung wie bei der Klimastation Bern (Parameter: Klimastation - Lugano)
- Variante 2c: Klimastation Davos: tiefere Temperaturen und höher Einstrahlung wie bei der Klimastation Bern (Parameter: Klimastation - Davos)
- Variante 2d: Auf allen Fassaden kann nur der Brüstungsbereich (1m hoch) für PV-Module genutzt werden (Parameter: PV-Fläche - Brüstung)
- Variante 2e: Der Heizwärmebedarf ist so gewählt, dass der Grenzwert für 20 Stockwerke für den Fall mit Verschattung eingehalten wird (Parameter: Dämmstandard)
- Variante 2f: Die beiden quadratischen Nachbarhochhäuser sind 15 Stockwerke hoch (Parameter: Verschattung - Nachbar 15 St.)
- Variante 2g: Die beiden quadratischen Nachbarhochhäuser sind 20 Stockwerke hoch (Parameter: Verschattung - Nachbar 20 St.)
- Variante 2h: Die Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser werden erhöht (Parameter: Verteilverluste)
- Variante 2i: Balkone werden so erweitert, dass sie 2m aus der Fassade herauskragen (Parameter: Balkon)

Tabelle 17: Veränderungen der Varianten 2a - 2i zur Basisvariante 2.

Var. Nr.	Kurzbegriff	Klimastation	η_{PV} [%]	PV-Anteil an Fassade [%]	Verteilverluste HZ/WW [%]/[%]	Stockwerke der Nachbargebäude
2	Basisvariante	Bern	14	100	10/40	6/10 m
2a	$\eta_{PV} = 0.22$	Bern	22	100	10/40	6/10 m
2b	Lugano	Lugano	14	100	10/40	6/10 m
2c	Davos	Davos	14	100	10/40	6/10 m
2d	Brüstung	Bern	14	47	10/40	6/10 m
2e	Dämmstandard	Bern	14	100	10/40	6/10 m
2f	Nachbar 15 St.	Bern	14	100	10/40	6/15 m
2g	Nachbar 20 St.	Bern	14	100	10/40	6/20 m
2h	Verteilverluste	Bern	14	100	50/60	6/10 m
2i	Balkon	Bern	14	100	10/40	6/10 m

4.3.2 Allgemeine Daten - Variante 2

Bild 35 zeigt den Heizwärmebedarf für Variante 2. Dieser ist dem Heizwärmebedarf von Variante 1 sehr ähnlich. Bild 37 zeigt den Endenergiebedarf von Variante 2. Die Verschattung durch die Nachbargebäude hat einen sehr geringen Einfluss auf den Heizwärmebedarf.

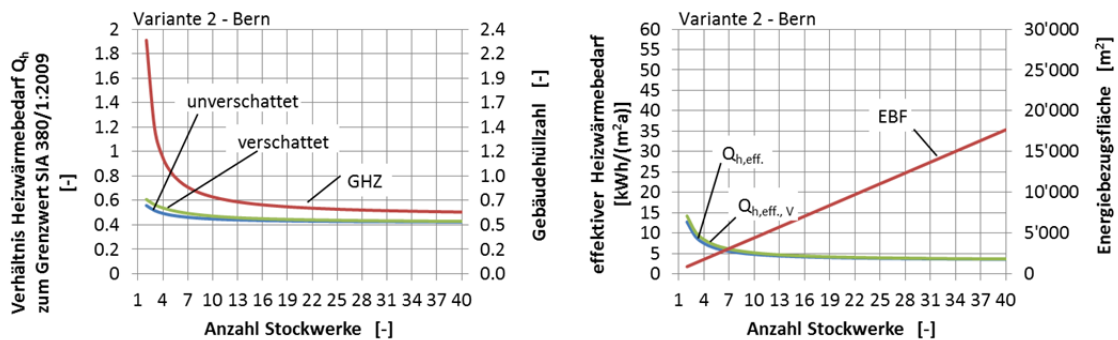


Bild 35: Variante 2: Verhältnis Heizwärmebedarf zum Grenzwert nach SIA 380/1:2009 sowie der effektive Heizwärmebedarf in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (Nachbargebäude 6/10 Stockwerke hoch).

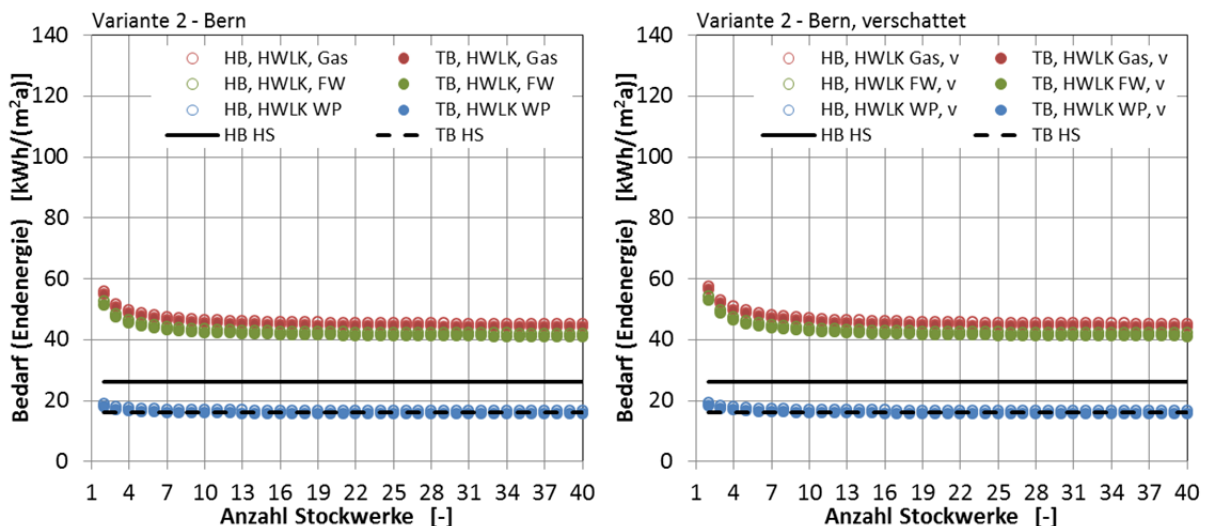


Bild 36: Variante 2: Ungewichtete Endenergie in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet, Nachbargebäude 6/10 Stockwerke hoch, tiefer/hoher (Haushaltsstrom+Lift) Bedarf: 16/26 kWh_{EE}/(m²a)).

4.3.3 Resultate - Variante 2

In Bild 37 ist das Verhältnis des Netto-Jahresbedarfs zum Netto-Jahresertrag für HWLK und GEB mit unterschiedlicher Gewichtung der Energieträger für Variante 2 (Basisfall) dargestellt. Ist das Verhältnis ≤ 1 , ist die entsprechend Nullbilanz erreicht. Das Ergebnis ist sehr ähnlich wie für Variante 1 (Bild 17):

- Wird die Endenergie betrachtet (linke Spalte), kann nur mit einem tiefen Gesamtenergiebedarf die HWLK- und GEB-Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken im Fall Wärmepumpe erreicht werden. Bei hohem Gesamtenergiebedarf sind im Fall Wärmepumpe 6-8 Stockwerke mit einer GEB-Nullbilanz möglich. Bei Gasfeuerung und Fernwärme

kann die GEB-Nullbilanz nur für 2-3 Stockwerke erreicht werden, während die HWLK-Nullbilanz für 5-8 Stockwerke (Gasfeuerung) bzw. für 8-14 Stockwerke (Fernwärme) je nach Verschattungssituation möglich ist.

- Bei einer Gewichtung der Energieträger mit nicht erneuerbarer Primärenergie (mittlere Spalte) bzw. den nationalen Gewichtungsfaktoren (rechte Spalte) kann bei einem tiefen Gesamtenergiebedarf die HWLK- und die GEB-Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken erreicht werden. Bei einem hohen Gesamtenergiebedarf ist dies nur bei der Gewichtung mit nicht erneuerbarer Primärenergie für den Fall Fernwärme möglich. In den anderen Fällen ist eine Nullbilanz nur für wenige Stockwerke möglich. Im unverschatteten Fall ist die Nullbilanz natürlich jeweils für eine grössere Anzahl an Stockwerke erreichbar, als im verschatteten Fall.

Für die Bilanzierung mit den nationalen Gewichtungsfaktoren ist in Bild 38 eine mögliche Kombination der notwendigen Flächenbelegung mit PV-Modulen dargestellt.

- Bei der HWLK-Nullbilanz ist es für Fernwärme und Wärmepumpe nur notwendig, die Fläche von Dach und der Südfassade mit PV zu belegen. Im Fall Gasfeuerung werden ab ca. sechs Stockwerken noch weitere Flächen benötigt, z.B. die Westfassade.
- Für die GEB-Nullbilanz mit tiefem Gesamtenergiebedarf und Fernwärme/Wärmepumpe müssen je nach Anzahl der Stockwerke fast alle Flächen komplett mit PV belegt werden. Für Fernwärme/Wärmepumpe ist ein maximaler Bedarf von $20/19 \text{ kWh}_{\text{EE}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ für eine GEB-Nullbilanz möglich. Mit einer Gasfeuerung ist die GEB-Nullbilanz nur für wenige Stockwerke erreichbar, auch bei kompletter Belegung aller Flächen mit PVGEB-Nullbilanz.
- Bei einem hohen Gesamtenergiebedarf kann die GEB-Nullbilanz nur für eine einstellige Stockwerksanzahl erfüllt werden – auch bei einer kompletten Belegung der Fassaden und des Dachs mit PV.
- Der gewichtete Energiebedarf nach MuKE n 2014 kann mit einer Gasfeuerung nicht eingehalten werden.

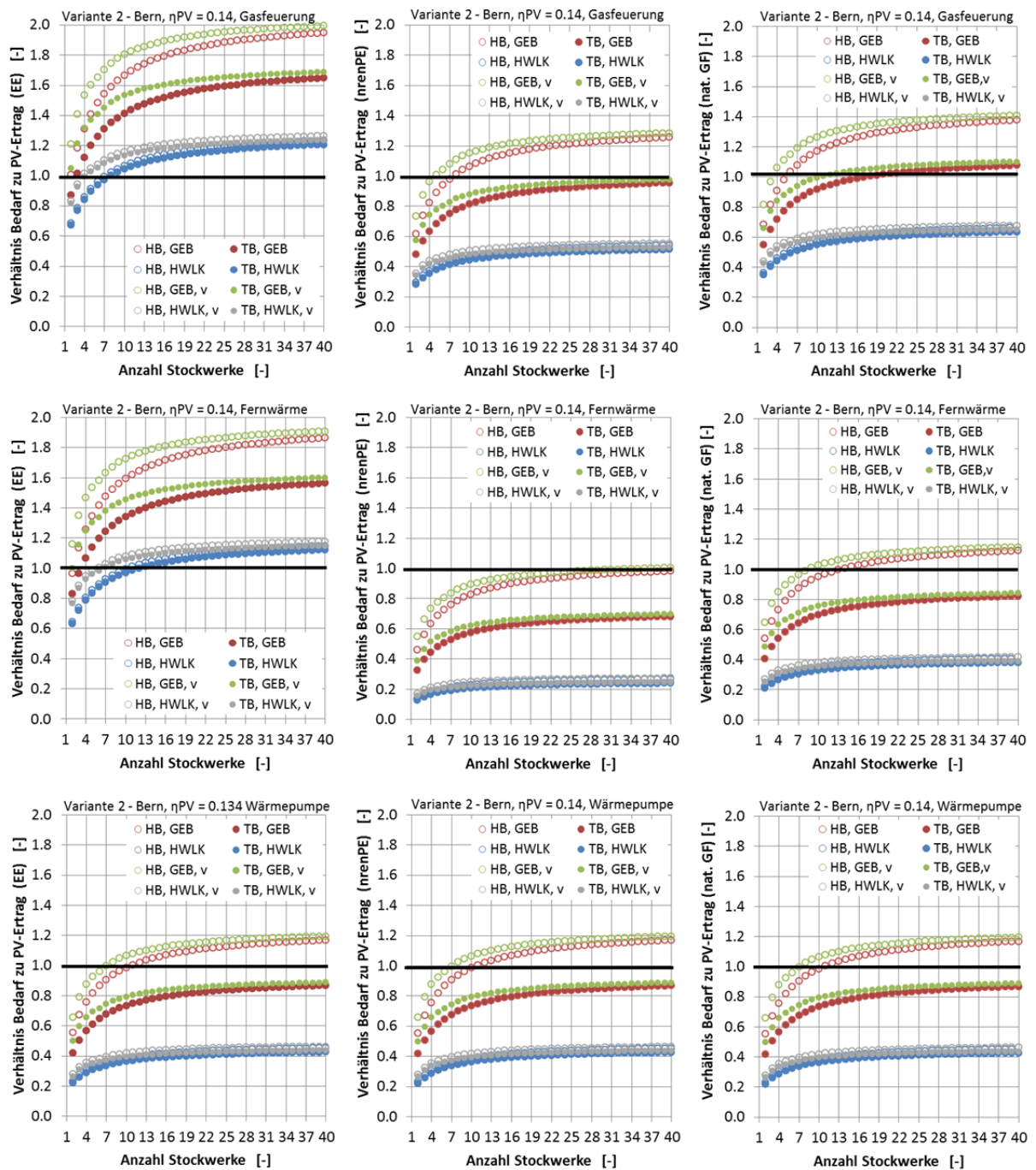


Bild 37: Variante 2 "Basisvariante": Gewichtete Verhältnisse von Bedarf zu PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 2 in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke. Ist das Verhältnis von Bedarf zu PV-Ertrag ≤ 1 ist die entsprechende Nullbilanz erreicht.

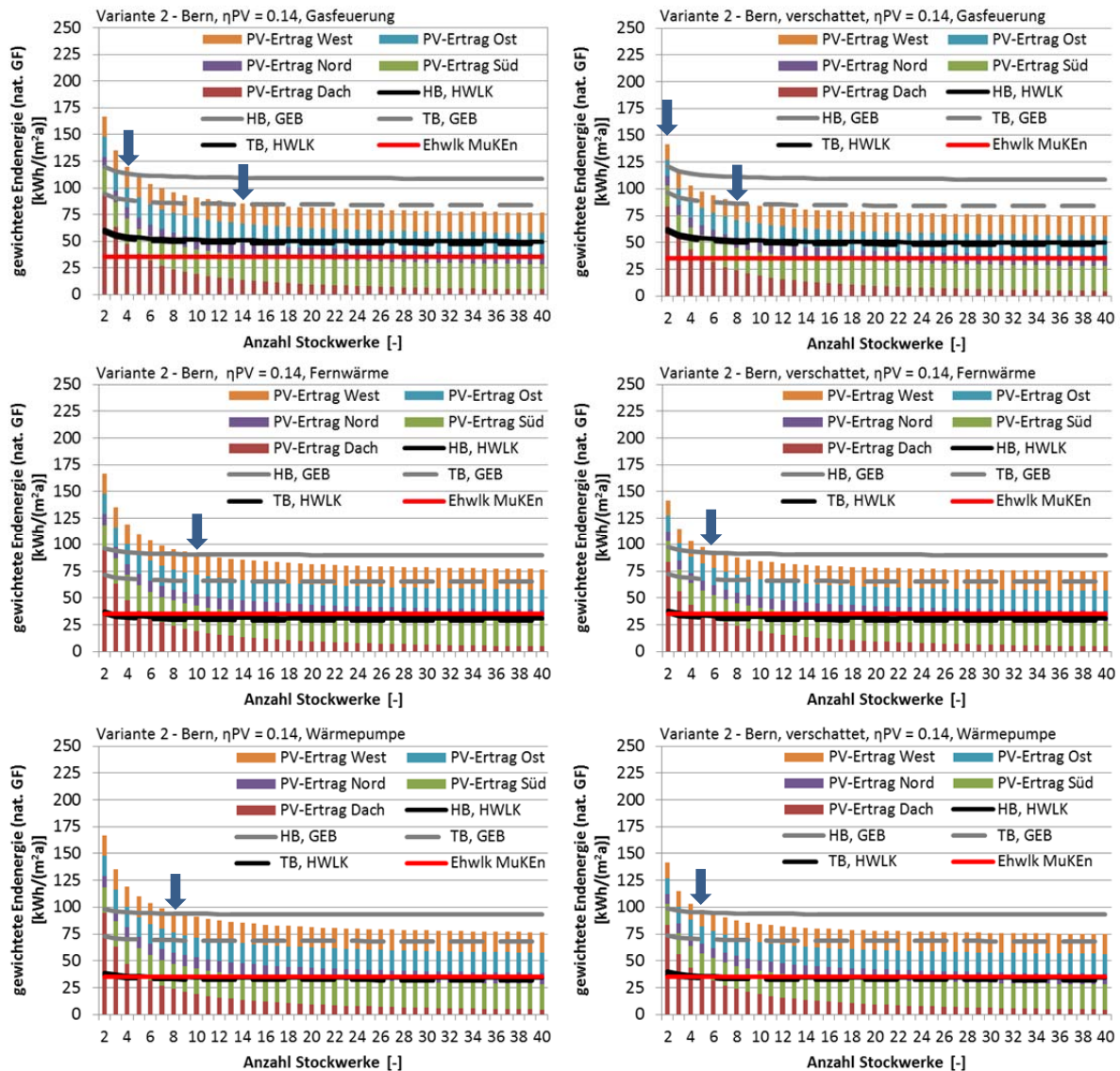


Bild 38: Variante 2 "Basisvariante": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

Für Variante 2 ist in Bild 39 dargestellt, wie hoch der Bedarf für Haushaltsstrom inkl. Lift unter Berücksichtigung des Systemwirkungsgrades der PV-Anlage maximal sein darf, um bei sechs und 40 Stockwerken eine GEB-Nullbilanz zu erreichen (verschatteter Fall). Der HWLK-Bedarf entspricht dem von sechs bzw. 40 Stockwerken aus Bild 36 und ist im dargestellten Gesamtenergiebedarf GEB enthalten. Bei einer GEB-Nullbilanz für ein Gebäude mit sechs Stockwerken ist ein um rund $10 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$ höherer Bedarf für Haushaltsstrom/Lift möglich, als bei einem Gebäude mit 40 Stockwerken.

Gebäude mit sechs Stockwerken können selbst bei einem Bedarf für Haushaltsstrom/Lift von $30 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2 \text{ a})$ die GEB-Nullbilanz bei einem PV-Systemwirkungsgrad von 14% erfüllen, wenn sie Fernwärme oder Wärmepumpe als Wärmeerzeuger verwenden. Für Gebäude mit 40 Stockwerken ist dafür ein PV-Systemwirkungsgrad von ca. 17% notwendig.

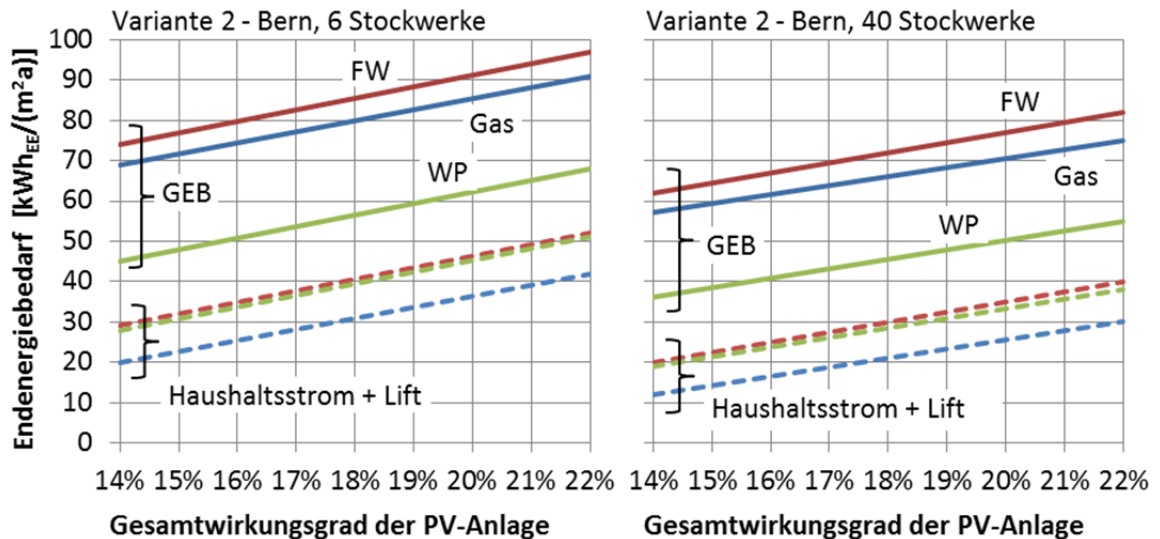


Bild 39: Zusammenhang von Bedarf für Haushaltsstrom/Lift und Systemwirkungsgrad der PV-Anlage, um die GEB-Nullbilanz für Variante 2 für 6 und 40 Stockwerken inkl. Verschattung zu erreichen (GEB = Haushaltsstrom/Lift + HWLK, HWLK für Gas/FW/WP: 47/45/17 $\text{kWh}_{\text{EE}}/(\text{m}^2\text{a})$ bei 6 Stockwerken und 45/42/17 $\text{kWh}_{\text{EE}}/(\text{m}^2\text{a})$ bei 40 Stockwerken).

4.3.4 Überblick - Variante 2

Bild 40 fasst für die Varianten 2 - 2i die Anzahl an Stockwerken, für die eine Nullbilanz erreicht werden kann, zusammen:

- Die HWLK-Nullbilanz kann bis auf die Variante 2d "Brüstung (Gasfeuerung)" immer bis zu 40 Stockwerken erreicht werden. Hierfür reicht die Belegung des Dachs, der Südfassade und zum Teil die Westfassade.
- Die GEB-Nullbilanz fällt ähnlich wie bei dem langgestreckten Gebäude aus. Für die Fälle Fernwärme und Wärmepumpe kann bei einem tiefen Gesamtenergiebedarf fast bei allen Varianten, bis auf Variante 2b "Brüstung" und Variante 2h " ", die Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken erreicht werden. Bei einem hohen Gesamtenergiebedarf ist dies nur für die Varianten 2a " $\eta_{\text{PV}} = 0.22$ " und 2c "Davos" möglich.
- Die GEB-Nullbilanz bis 40 Stockwerke ist mit einer Gasfeuerung auch bei einem tiefen Bedarf nur für die Standorte Lugano und Davos sowie mit einem hohen PV-Systemwirkungsgrad erreichbar.
- Ist das Gebäude durch hohe Nachbargebäude verschattet, muss mehr Fläche mit PV-belegt werden, um dasselbe Ergebnis wie im unverschatteten Fall zu erreichen.
- Den grössten negativen Einfluss auf die Nullbilanz haben für alle Wärmeerzeuger die Varianten 2d "Brüstung" und 2h "Verteilverluste". Für Gasfeuerung hat auch Variante 2e "Dämmstandard" einen grossen negativen Einfluss.

Die Parameter, die einen positiven oder negativen Einfluss auf die Nullbilanz der Basisvariante 2 haben, sind in Tabelle 18 genannt.

Tabelle 18: Einfluss auf die Nullbilanz gegenüber der Basisvariante 2.

Bilanz	vorteilhaft	nachteilig
GEB	• Hoher Systemwirkungsgrad der PV-Anlage • Andere Klimaregion als Bern • Fernwärme bzw. Wärmepumpe	• Niedriger Dämmstandard • Hohe Verteil- und Speicherverluste • Geringe PV-Flächen • Vorgesetzte Balkone • Verschattung durch Nachbargebäude
HWLK	Bilanz wird bis 40 Stockwerke erreicht	• Geringe PV-Flächen (nur bei Gas)

Damit ergeben sich folgende Prioritäten für eine GEB-Bilanz:

1. Priorität
 - sehr hoher Dämmstandard
 - tiefer Bedarf für Haushaltsstrom und Lift
 - Wärmeerzeuger: Fernwärme oder Wärmepumpe
 - niedrige Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser
 - Grosse PV-Flächen an allen Fassaden
2. Priorität
 - Verschattung durch Nachbargebäude (meist nicht oder kaum beeinflussbar)
 - Vorgesetzte Balkone

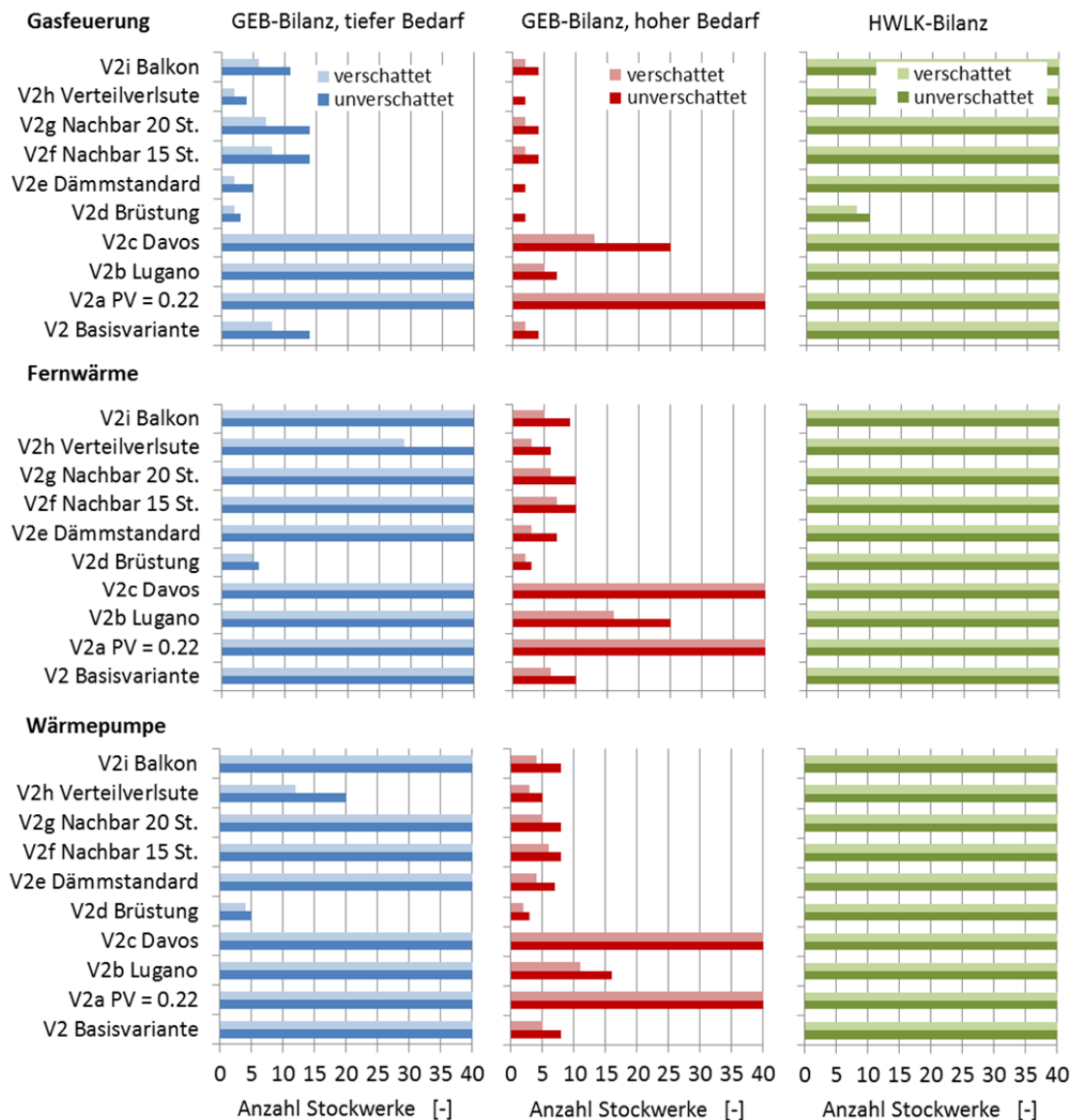


Bild 40: Anzahl Stockwerke, für die eine GEB- bzw. HWLK-Nullbilanz von Variante 2 (quadratischer Grundriss eines Mehrfamilienhauses) unter Berücksichtigung der verschiedenen Parameter erreicht werden kann. Die Bilanzen sind mit nationalen Gewichtungsfaktoren bewertet (tiefer/höher (Haushaltsstrom, Lift) Bedarf: 16/26 kWh_{EE}/(m²a)).

4.4 Variante 3 - langgestreckter Verwaltungsbau

4.4.1 Untersuchte Parameter - Variante 3

Variante 3 ist ein langgestreckter Verwaltungsbau. Er hat dieselbe Aussenmasse wie das langgestreckte Mehrfamiliengebäude (Variante 1) jedoch weist er keine Balkone auf und es wird davon ausgegangen, dass die Fassade ein durchgängiges Fensterband hat. Damit können die PV-Module nur im Bereich der Fensterbrüstung platziert werden. Dieser Bereich ist 1.4 m hoch und geht pro Stockwerk über den vollen Umfang des Gebäudes.

Die Parametervariationen von Variante 3 sind Tabelle 19 zu entnehmen. In den Varianten 3a - 3h ist jeweils ein Parameter gegenüber der Basisvariante verändert, um den Einfluss zu ermitteln. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die detaillierten Daten für die Varianten 3a-3h im Anhang in Kapitel 9.3.2 dargestellt.

Es werden folgende Varianten untersucht (Tabelle 19):

- Variante 3: Basisvariante: Systemwirkungsgrad der PV-Anlage 14%. Klimastation Bern-Liebefeld, Orientierung der Hauptfassade nach Süden, Verteil- und Speicher- verluste Heizung/Warmwasser 10%/40%, Zielwert SIA 380/1:2009 bei 4 Stockwerken erreicht
- Variante 3a: Der Systemwirkungsgrad der PV-Anlage beträgt 22%. Dies ist ein Ausblick in die Zukunft (Parameter: PV-Systemwirkungsgrad - $\eta_{PV} = 0.22$)
- Variante 3b: Klimastation Lugano: höhere Temperaturen und ähnliche Einstrahlung wie bei der Klimastation Bern (Parameter: Klimastation - Lugano)
- Variante 3c: Klimastation Davos: tiefere Temperaturen und höher Einstrahlung wie bei der Klimastation Bern (Parameter: Klimastation - Davos)
- Variante 3d: Der Heizwärmebedarf ist so gewählt, dass der Grenzwert für 20 Stockwerke für den Fall mit Verschattung eingehalten wird (Parameter: Dämmstandard)
- Variante 3e: Das Gebäude wird um 90° gedreht, dass die lange Seite des Gebäudes nach Osten und Westen schaut (Parameter: Ausrichtung - Ost/West)
- Variante 3f: Die Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser werden erhöht (Parameter: Verteilverluste)
- Variante 3g: Alle Nachbargebäude sind 15 m entfernt (verdichtete Bebauung - 15/15m, Parameter: Verschattung - Nachbar nah)
- Variante 3h: Nachbargebäude sind doppelt so weit entfernt, wie bei der Basisvariante (lockere Bebauung - 30/46m, Parameter: Verschattung - Nachbar fern)

Tabelle 19: Veränderungen der Varianten 3a - 3h zur Basisvariante 3.

Var. Nr.	Kurzbegriff	Klima- station	η_{PV} [%]	PV-Anteil Südfas- sade [%]	Orien- tierung Haupt- fassade	Verteil- verluste HZ/WW [%]/[%]	Abstand Nach- barge- bäude
3	Basisvariante	Bern	14	100	Süd	10/40	15/23m
3a	$\eta_{PV} = 0.22$	Bern	22	100	Süd	10/40	15/23m
3b	Lugano	Lugano	14	100	Süd	10/40	15/23m
3c	Davos	Davos	14	100	Süd	10/40	15/23m
3d	Dämmstandard	Bern	14	100	Süd	10/40	15/23m
3e	Ost/West	Bern	14	100	Ost	10/40	15/23m

3f	Verteilverluste	Bern	14	100	Süd	50/60	15/23m
3g	Nachbar nah	Bern	14	100	Süd	10/40	15/15m
3h	Nachbar fern	Bern	14	100	Süd	10/40	30/46m

4.4.2 Allgemeine Daten - Variante 3

Der Heizwärmebedarf, die Energiebezugsfläche und die Gebäudehüllzahl sind für die Basisvariante 3 in Bild 41 dargestellt. Auch bei dieser Variante wird der Zielwert der SIA 380/1:2009 schon bei 3-4 Stockwerken unterschritten. Den Endenergiebedarf zeigt Bild 42.

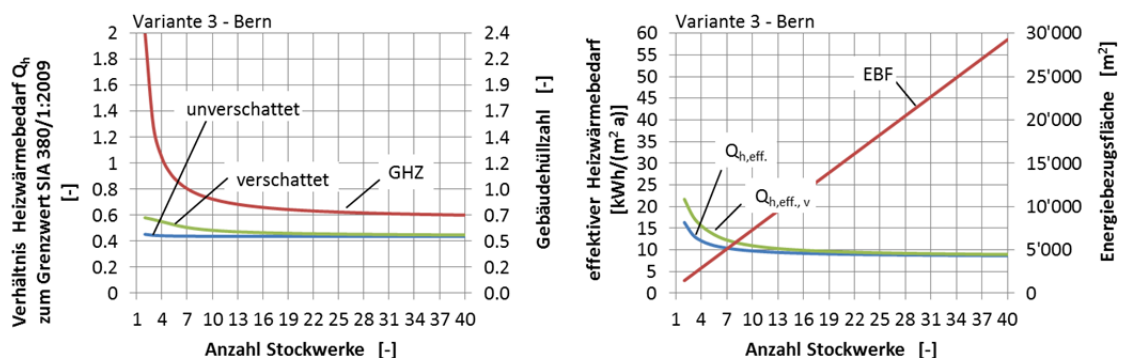


Bild 41: Variante 3: Effektiver Heizwärmebedarf und Anteil am Grenzwert nach SIA 380/1:2009. Energiebezugsfläche und Gebäudehüllzahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (Nachbargebäude 6 Stockwerke hoch).

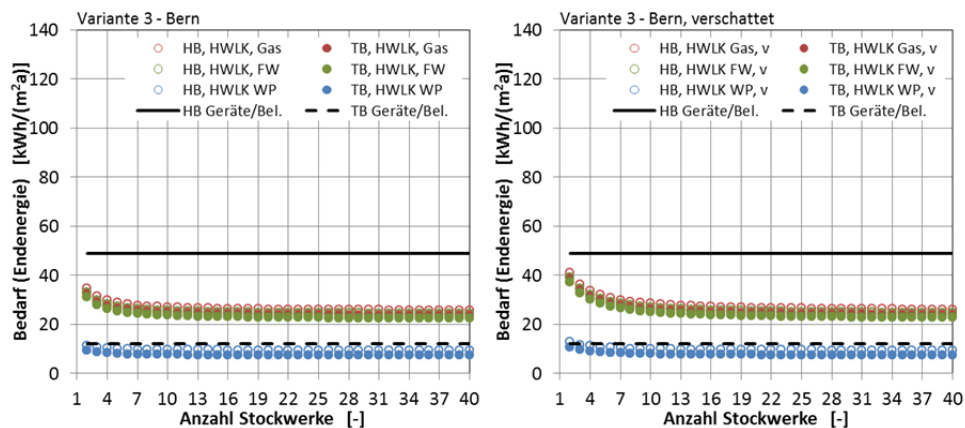


Bild 42: Variante 3: Ungewichtete Endenergie in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet, Nachbargebäude 6 Stockwerke hoch, tiefer/hoher (Strom-) Bedarf: 12/49 kWh_{EE}/(m² a)).

4.4.3 Resultate - Variante 3

In Bild 43 sind die verschieden gewichteten HWLK- und GEB-Nullbilanzen zusammengestellt:

- Die HWLK-Nullbilanz kann für alle Wärmeerzeuger und für alle Gewichtungen für alle Gebäudehöhen eingehalten werden.
- Für alle Wärmeerzeuger ist im Fall Endenergie keine GEB-Nullbilanz mit hohem Gesamtenergiebedarf möglich. Mit tiefem Bedarf ist die GEB-Nullbilanz nur bis zu sieben unverschatteten Stockwerken bei Gasfeuerung und Fernwärme möglich, bei Wärmepumpe bis zu 40 Stockwerken.
- Bei den gewichteten Bilanzen ist die GEB-Nullbilanz mit hohem Gesamtenergiebedarf unabhängig vom Wärmeerzeuger nur bis zwei Stockwerke möglich. Die Nullbilanz mit tiefem Bedarf ist für alle Wärmeerzeuger bis 40 Stockwerke erreichbar

Bild 44 zeigt die gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag mit/ohne Verschattung durch 6-stöckige Nachbargebäude in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke und der Wärmeerzeuger. Es ist eine Möglichkeit dargestellt, wie die Flächen mit PV belegt werden können:

- Die HWLK-Nullbilanz und die GEB-Nullbilanz mit tiefem Gesamtenergiebedarf kann für alle betrachteten Gebäudehöhen erreicht werden. Dabei müssen für die HWLK-Nullbilanz nur das Dach und die Südfassade HWLK-Nullbilanz mit PV belegt werden, während für die GEB-Nullbilanz zusätzlich noch die Nordfassade und bei einer Gasfeuerung auch noch ein Teil der Westfassade belegt werden müssen.
- Mit einem hohen Gesamtenergiebedarf wird die GEB-Nullbilanz im unverschatteten Fall für maximal 2 Stockwerke erzielt. Im verschatteten Fall kann keine GEB-Nullbilanz erreicht werden.
- Bei einer kompletten Belegung aller möglichen Flächen mit PV kann die GEB-Nullbilanz im Fall Fernwärme und Wärmepumpe für alle betrachteten Gebäudehöhen mit einem Strombedarf inkl. Lüftung von bis zu $18 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ GEB-Nullbilanz erfüllt werden.
- Der MuKEN-Grenzwert des gewichteten Energiebedarfs von $E_{\text{hwlk}} = 40 \text{ kWh}_{\text{CH}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ wird für den Fall Fernwärme und Wärmepumpe eingehalten. Mit einer Gasfeuerung wird der Grenzwert erst bei vier und mehr Stockwerken unterschritten.

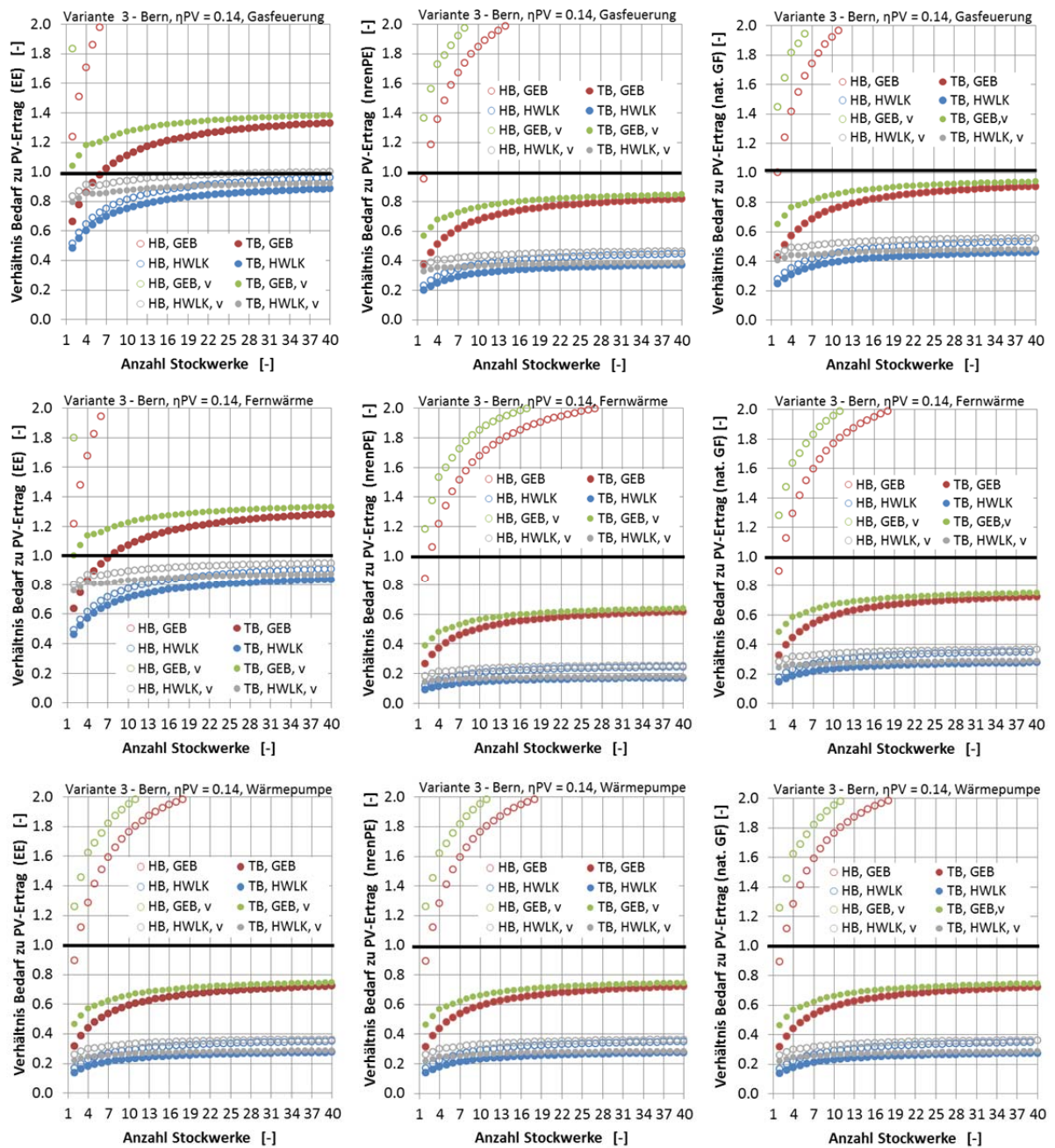


Bild 43: Variante 3 "Basisvariante": Gewichtete Verhältnisse von Bedarf zu PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 3 in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke. Ist das Verhältnis von Bedarf zu PV-Ertrag ≤ 1 ist die entsprechende Nullbilanz erreicht

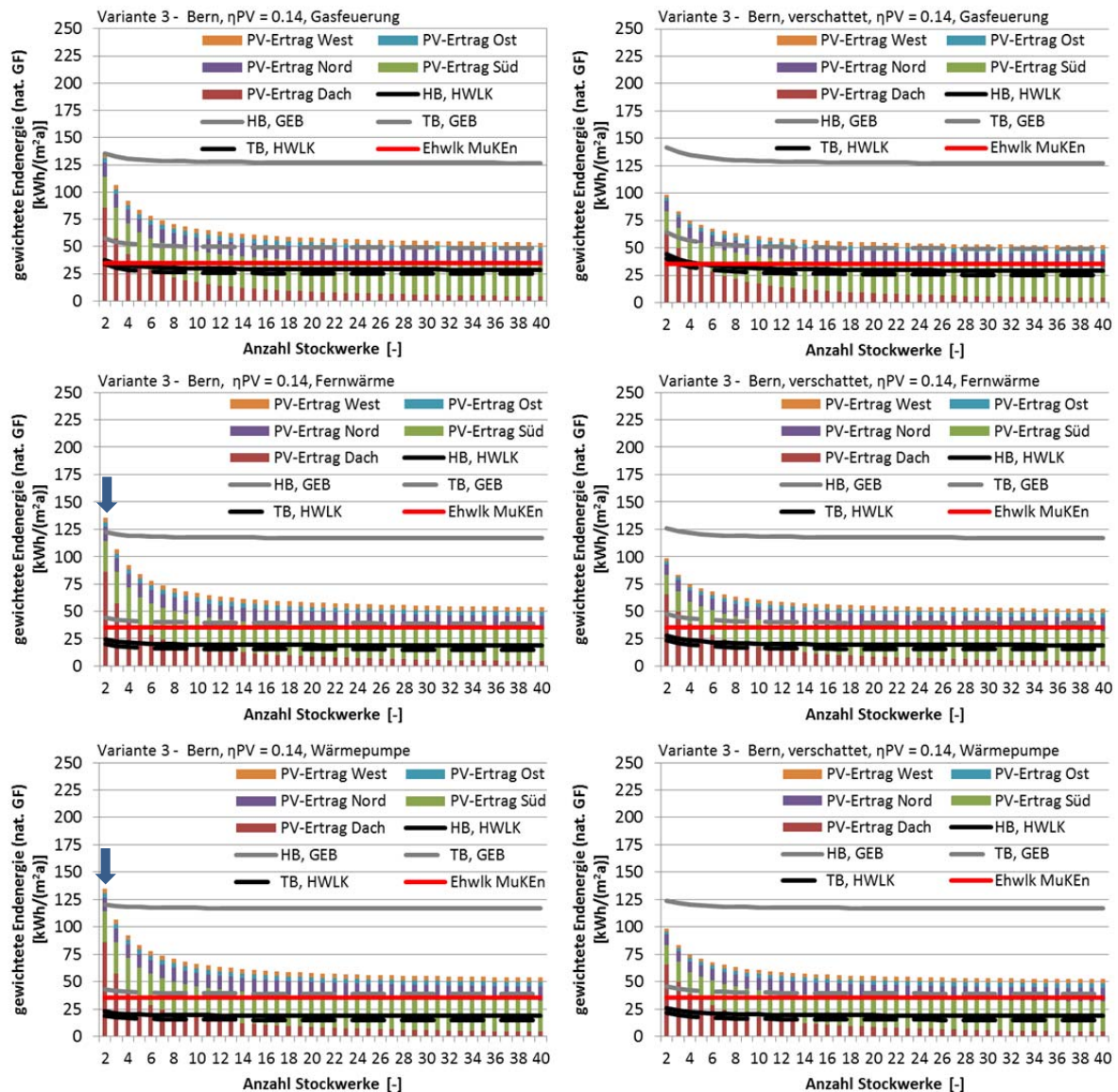


Bild 44: Variante 3 "Basisvariante": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 6-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

Für Variante 3 ist in Bild 45 dargestellt, wie hoch der Bedarf für Geräte und Beleuchtung unter Berücksichtigung des Systemwirkungsgrades der PV-Anlage maximal sein darf, um bei sechs bzw. 40 Stockwerken eine GEB-Nullbilanz zu erreichen (verschatteter Fall). Der HWLK-Bedarf entspricht Bild 42 bei sechs und 40 Stockwerken und ist im dargestellten Gesamtenergiebedarf GEB enthalten. Insgesamt ist der mögliche Bedarf für Geräte und Beleuchtung für eine GEB-Nullbilanz bei 40 Stockwerken etwas geringer als bei sechs Stockwerken. Dies liegt wiederum am geringer werdenden Anteil des PV-Ertrags vom Dach am Gesamtertrag mit zunehmender Anzahl an Stockwerken.

Die in Bild 45 dargestellten Werte sind, trotz Einsatz von einem hohen PV-Systemwirkungsgrad, nur für Gebäude mit sehr effizienten Geräten und Beleuchtung erreichbar. Auch bei dieser Variante ist bei 6 Stockwerken ein etwas höherer Bedarf für Haushaltsstrom/Lift "erlaubt" als bei 40 Stockwerken um die GEB-Nullbilanz zu erreichen.

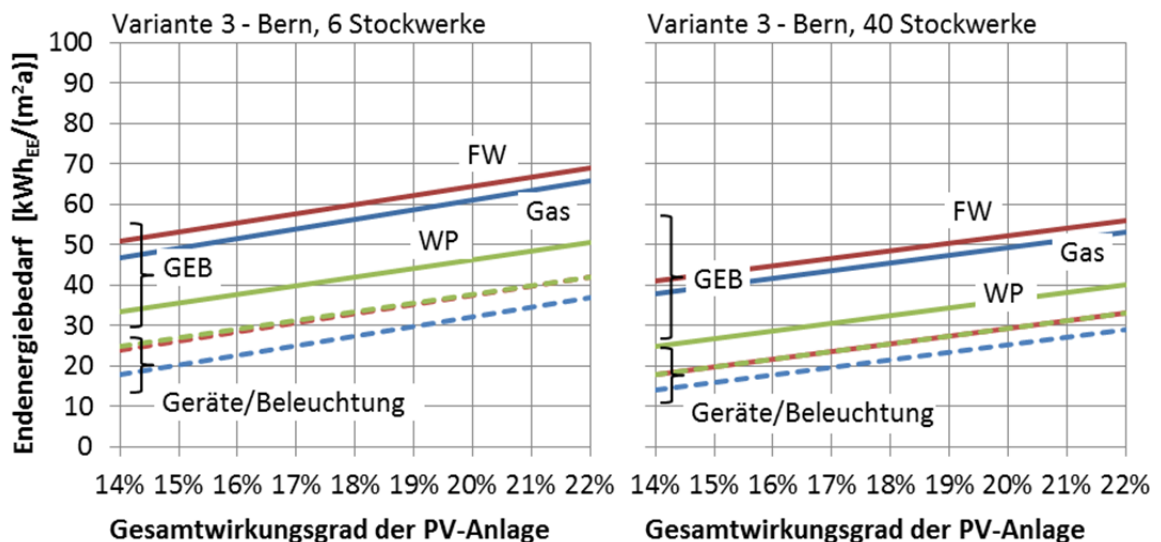


Bild 45: Zusammenhang von Bedarf für Geräte/Beleuchtung und Systemwirkungsgrad der PV-Anlage, um die GEB-Nullbilanz für Variante 3 für 6 bzw. 40 Stockwerken inkl. Verschattung zu erreichen (GEB = Geräte/Beleuchtung + HWLK, HWLK-Bedarf für Gas/FW/WP: 29/27/9 kWh_{EE}/(m²a)) bei 6 Stockwerken und 32/30/9 kWh_{EE}/(m²a) für 40 Stockwerke).

4.4.4 Überblick - Variante 3

Bild 46 fasst für die Varianten 3 - 3h die Anzahl an Stockwerken, für die eine Nullbilanz erreicht werden kann, zusammen:

- Die HWLK-Nullbilanz ist für alle Wärmeerzeuger bis zu 40 Stockwerken möglich.
- Die GEB-Nullbilanz kann bei einem tiefen Gesamtenergiebedarf bis auf zwei Varianten bis zu 40 Stockwerken erreicht werden. Nur bei einer Gasfeuerung sind die Varianten 3d "Dämmstandard" und 3f "Verteilverluste" für eine GEB-Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken nicht möglich.
- Den grössten negativen Einfluss auf die Nullbilanz haben für alle Wärmeerzeuger die Variante 3d "Dämmstandard".

Die Parameter, die einen positiven oder negativen Einfluss auf die Nullbilanz von Basisvariante 3 haben, sind in Tabelle 20 genannt.

Tabelle 20: Einfluss auf die Nullbilanz gegenüber der Basisvariante 3.

Bilanz	vorteilhaft	nachteilig
GEB	• Hoher Systemwirkungsgrad der PV-Anlage • Andere Klimaregion als Bern	• Niedriger Dämmstandard • Hohe Verteil- und Speicherverluste (Gas) • Hoher Bedarf für Geräte und Beleuchtung
HWLK	Bilanz wird bis zu 40 Stockwerken erreicht	

Damit ergeben sich folgende Prioritäten für Variante 3, um eine GEB-Nullbilanz zu erzielen:

1. Priorität
 - hoher Dämmstandard (mindestens wie Basisvariante)
 - tiefer Bedarf für Geräte und Beleuchtung
 - Wärmeerzeuger: Fernwärme oder Wärmepumpe
 - niedrige Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser
2. Priorität
 - Verschattung durch Nachbargebäude (nicht immer beeinflussbar)

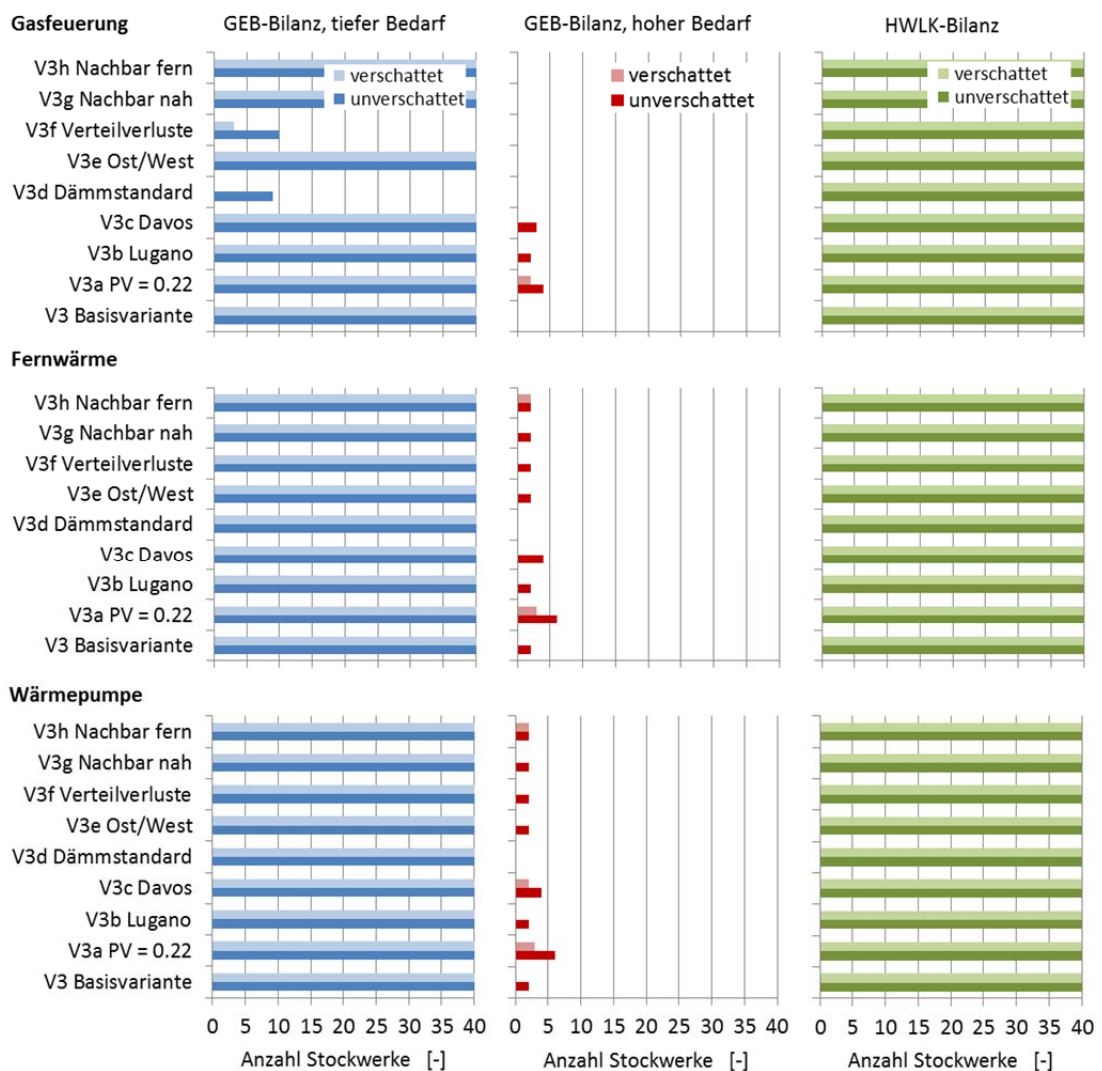


Bild 46: Anzahl Stockwerke, für die eine GEB- bzw. HWLK-Nullbilanz von Variante 3 (langgestreckter Grundriss eines Verwaltungsbaus) erreicht werden kann. Die Bilanzen sind mit nationalen Gewichtungsfaktoren bewertet (tiefer/hocher (Strom-)Bedarf: 12/49 kWh_{EE}/(m²a)).

Da die Ergebnisse, aufgrund der grossen Differenz zwischen dem tiefen und hohen (Strom-) Bedarf sehr weit auseinander liegen, wurde zusätzlich ein mittlerer (Strom-)Bedarf mit 30 kWh_{EE}/(m² a) betrachtet. Die Ergebnisse sind in Anhang 9.3.2.8 in Bild 77 dargestellt. Sie unterstreichen oben aufgeführte Aussagen.

4.5 Variante 4 - quadratischer Verwaltungsbau

4.5.1 Untersuchte Parameter - Variante 4

Variante 4 bildet die Basisvariante für einen quadratischen Verwaltungsbau. Es wird angenommen, dass in allen Fassaden nur der Geschossdecken- und Brüstungsbereich mit PV belegt werden kann. Dieser Bereich ist, wie bei Variante 3, 1.4 m hoch. Es werden folgende Varianten untersucht (Tabelle 21):

- Variante 4: Basisvariante: Systemwirkungsgrad der PV-Anlage 14%. Klimastation Bern-Liebfeld, Verteil- und Speicherverluste Heizung/Warmwasser 10%/40%, Zielwert SIA 380/1:2009 bei 4 Stockwerken unterschritten.
- Variante 4a: Der Systemwirkungsgrad der PV-Anlage beträgt 22%. Dies ist ein Ausblick in die Zukunft (Parameter: PV-Systemwirkungsgrad - $\eta_{PV} = 0.22$)
- Variante 4b: Klimastation Lugano: höhere Temperaturen und ähnliche Einstrahlung wie bei der Klimastation Bern (Parameter: Klimastation - Lugano)
- Variante 4c: Klimastation Davos: tiefere Temperaturen und höher Einstrahlung wie bei der Klimastation Bern (Parameter: Klimastation - Davos)
- Variante 4d: Veränderung des Dämmstandards analog Tabelle 3. Der Grenzwert nach SIA 380/1 wird dadurch für ein Gebäude mit sechs Stockwerke eingehalten (Parameter: Dämmstärke, Anhang 9.3.3, Bild 81)
- Variante 4e: Die Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser werden erhöht (Parameter: Verteilverluste)

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die detaillierten Daten für die Varianten 4a-4e im Anhang in Kapitel 9.3.3 dargestellt.

Tabelle 21: Veränderungen der Varianten 4a - 4e zur Basisvariante 4.

Var. Nr.	Kurzbegriff	Klima-station	η_{PV} [%]	Verteilverluste HZ/WW [%]/[%]
4	Basisvariante	Bern	14	10/40
4a	$\eta_{PV} = 0.22$	Bern	22	10/40
4b	Lugano	Lugano	14	10/40
4c	Davos	Davos	14	10/40
4d	Dämmstandard	Bern	14	10/40
4e	Verteilverluste	Bern	14	50/60

4.5.2 Allgemeine Daten - Variante 4

Zur Orientierung sind der Heizwärmebedarf für die Variante 4 in Bild 47 und der Endenergiebedarf in Bild 48 dargestellt. Durch den hohen Glasflächenanteil reduziert sich der Heizwärmebedarf leicht gegenüber dem Gebäude aus Variante 3. Der Zielwert der SIA 380/1 wird unterschritten.

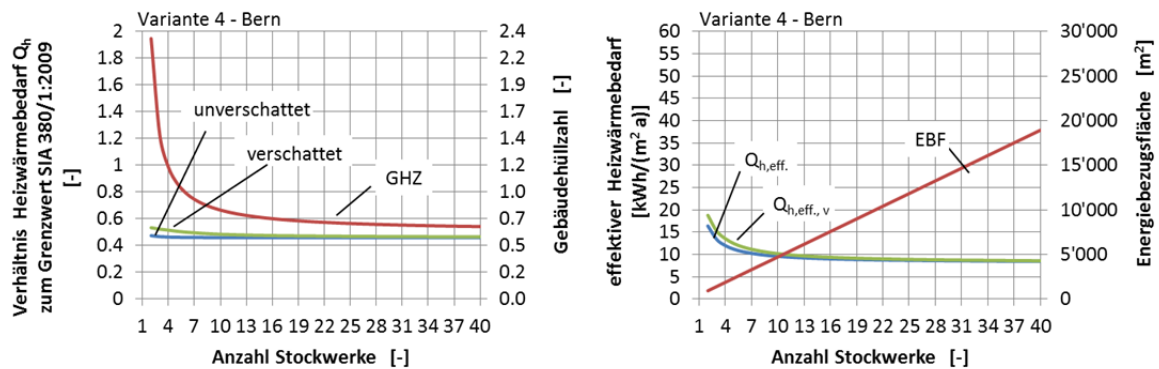


Bild 47: Variante 4: Verhältnis des Heizwärmebedarfs zum Grenzwert nach SIA 380/1:2009 sowie der effektive Heizwärmebedarf in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (Nachbargebäude 6/10 Stockwerke hoch).

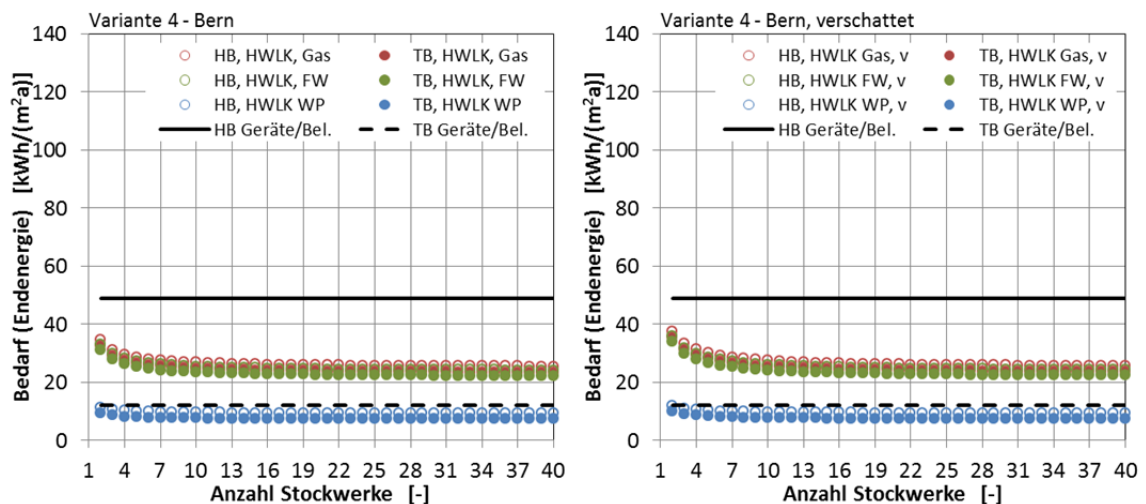


Bild 48: Variante 4: Ungewichtete Endenergie in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet, Nachbargebäude 6/10 Stockwerke hoch, tiefer/hoher (Geräte, Beleuchtung, Lift) Bedarf 12/49 kWh_{EE}/(m²a)).

4.5.3 Resultate - Variante 4

Bild 49 stellt das gewichtete Verhältnis von Bedarf zu PV-Ertrag ohne/mit Verschattung für Variante 4 in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke einander gegenüber. Ist das Verhältnis ≤ 1 ist die entsprechende Nullbilanz erreicht.

- Die HWLK-Nullbilanz wird fast immer mit allen Wärmeerzeuger und Gewichtung erreicht.
- Die GEB-Nullbilanz mit tiefem Gesamtenergiebedarf ist im Fall Endenergie nur mit einer Wärmepumpe bis zu 40 Stockwerken möglich, für Gebäude mit Fernwärme oder Gasfeuerung wird die GEB-Nullbilanz nur bei Gebäuden mit ca. vier bis zehn Stockwerken erfüllt. Im Fall der gewichteten Bilanz kann die GEB-Nullbilanz bis zu 40 Stockwerken immer erreicht werden. Die Bilanz in Endenergie ist somit strenger als die gewichtete Bilanz.

- Bei einem hohen Gesamtenergiebedarf kann die GEB-Nullbilanz mit max. zwei Stockwerken im unverschatteten Fall erfüllt werden.

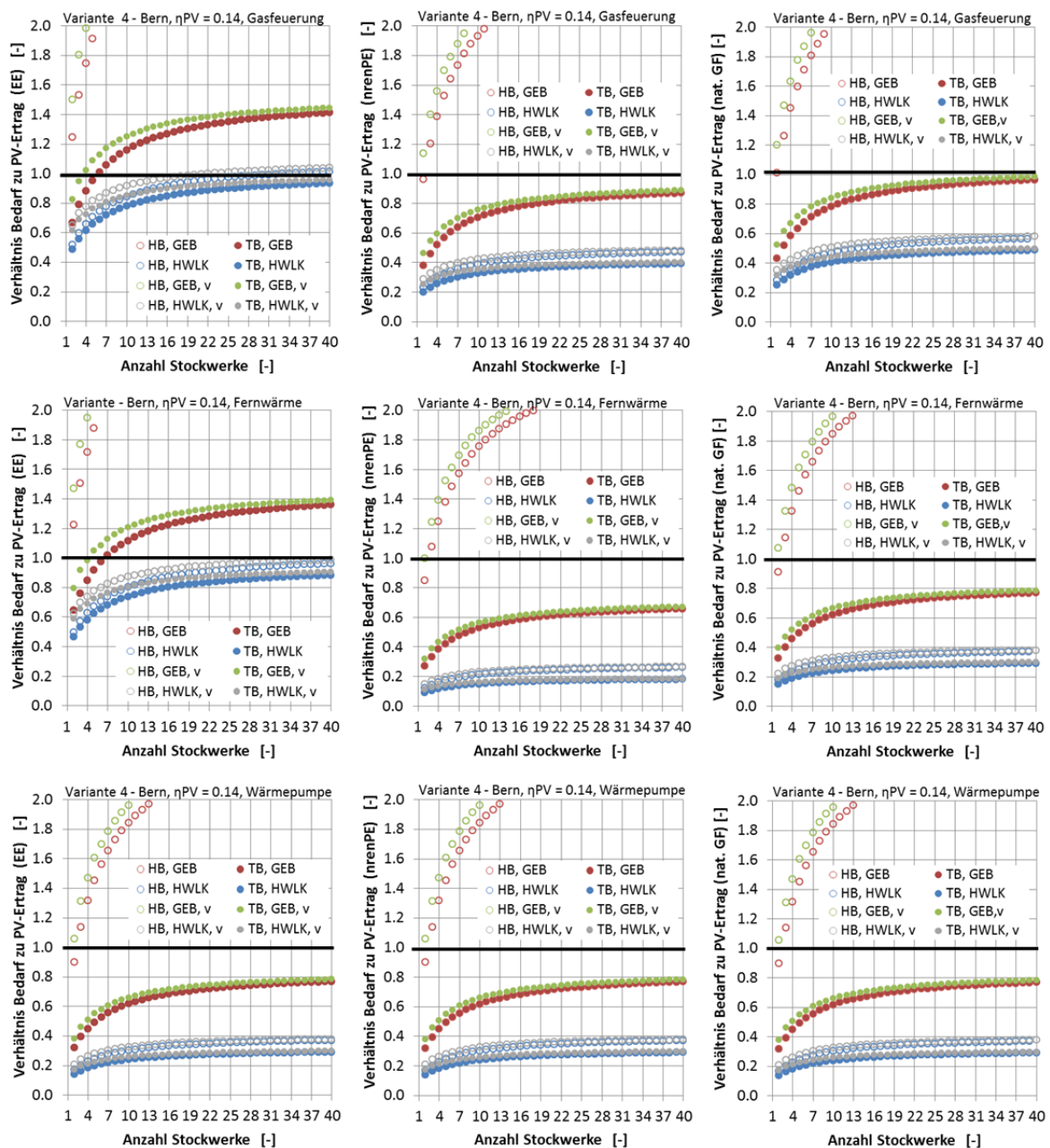


Bild 49: Variante 4 "Basisvariante": Gewichtete Verhältnisse von Bedarf zu PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 4 in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke. Ist das Verhältnis von Bedarf zu PV-Ertrag ≤ 1 ist die entsprechende Nullbilanz erreicht.

Für Variante 4 ist in Bild 50 dargestellt, wie hoch der Bedarf für Geräte und Beleuchtung unter Berücksichtigung des Systemwirkungsgrades der PV-Anlage maximal sein darf, um sechs und 40 Stockwerke eine GEB-Nullbilanz, gewichtet mit den nationalen Gewichtungsfaktoren, zu erreichen (verschatteter Fall). Der HWLK-Bedarf entspricht Bild 48 bei sechs

bzw. 40 Stockwerken und ist im dargestellten Gesamtenergiebedarf GEB enthalten. Aufgrund des sinkenden Anteils der PV-Ertrags vom Dach am Gesamtertrags ist bei einem Gebäude mit 40 Stockwerken ein geringerer Bedarf von Geräte/Beleuchtung für eine GEB-Nullbilanz möglich als bei 6 Stockwerken. Wie bei Variante 3 muss eine hohe Effizienz von Geräten und Beleuchtung und ein hoher PV-Systemwirkungsgrad vorhanden sein, um eine GEB-Nullbilanz zu erfüllen.

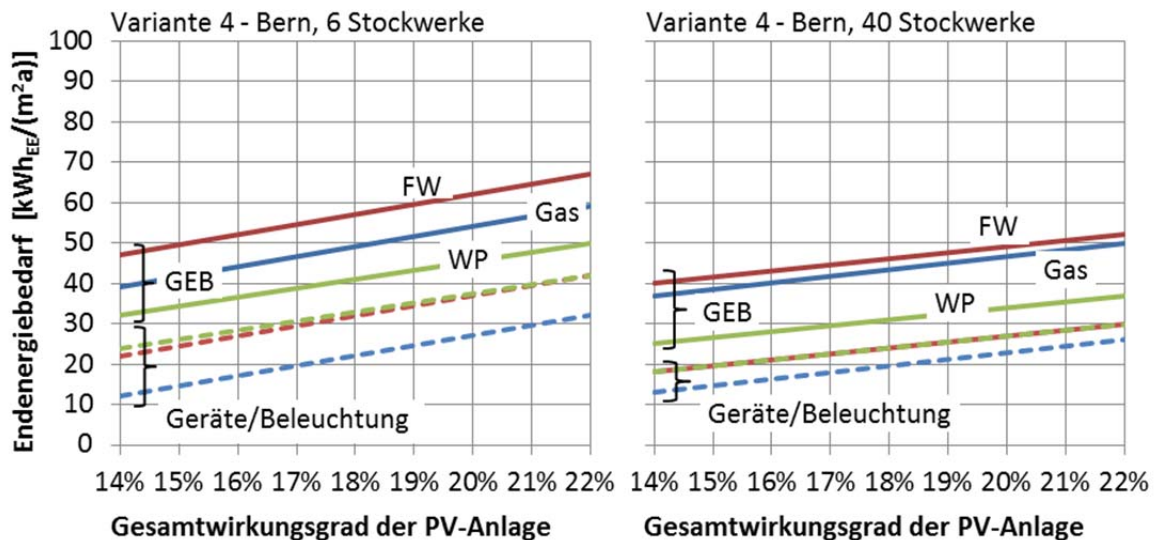


Bild 50: Zusammenhang von Bedarf für Haushaltsstrom/Lift und Systemwirkungsgrad der PV-Anlage, um die GEB-Nullbilanz mit nat. GF für Variante 4 von 6 und 40 Stockwerken inkl. Verschattung zu erreichen (GEB = Geräte/Beleuchtung + HWLK, HWLK-Bedarf für Gas/FW/WP: 47/45/13 kWh_{EE}/(m²a) für 6 Stockwerke und 24/22/7 kWh_{EE}/(m²a) für 40 Stockwerke).

Bild 51 zeigt die Resultate für die Basisvariante 4:

- Die HWLK-Nullbilanz wird für Gebäude mit bis zu 40 Stockwerken mit allen Wärmeerzeugern erreicht. Hierzu ist nur der PV-Ertrag von Dach und Südfassade notwendig.
- Bei einem tiefen Gesamtenergiebedarf kann die GEB-Nullbilanz für Gebäude mit bis zu 40 Stockwerken erfüllt werden. Bei einem hohen Gesamtenergiebedarf kann die GEB-Nullbilanz nur für maximal zwei verschattete Stockwerke erreicht werden.
- Die Anforderung an den gewichteten Endenergiebedarf der MuKE 2014 ist fast immer eingehalten.

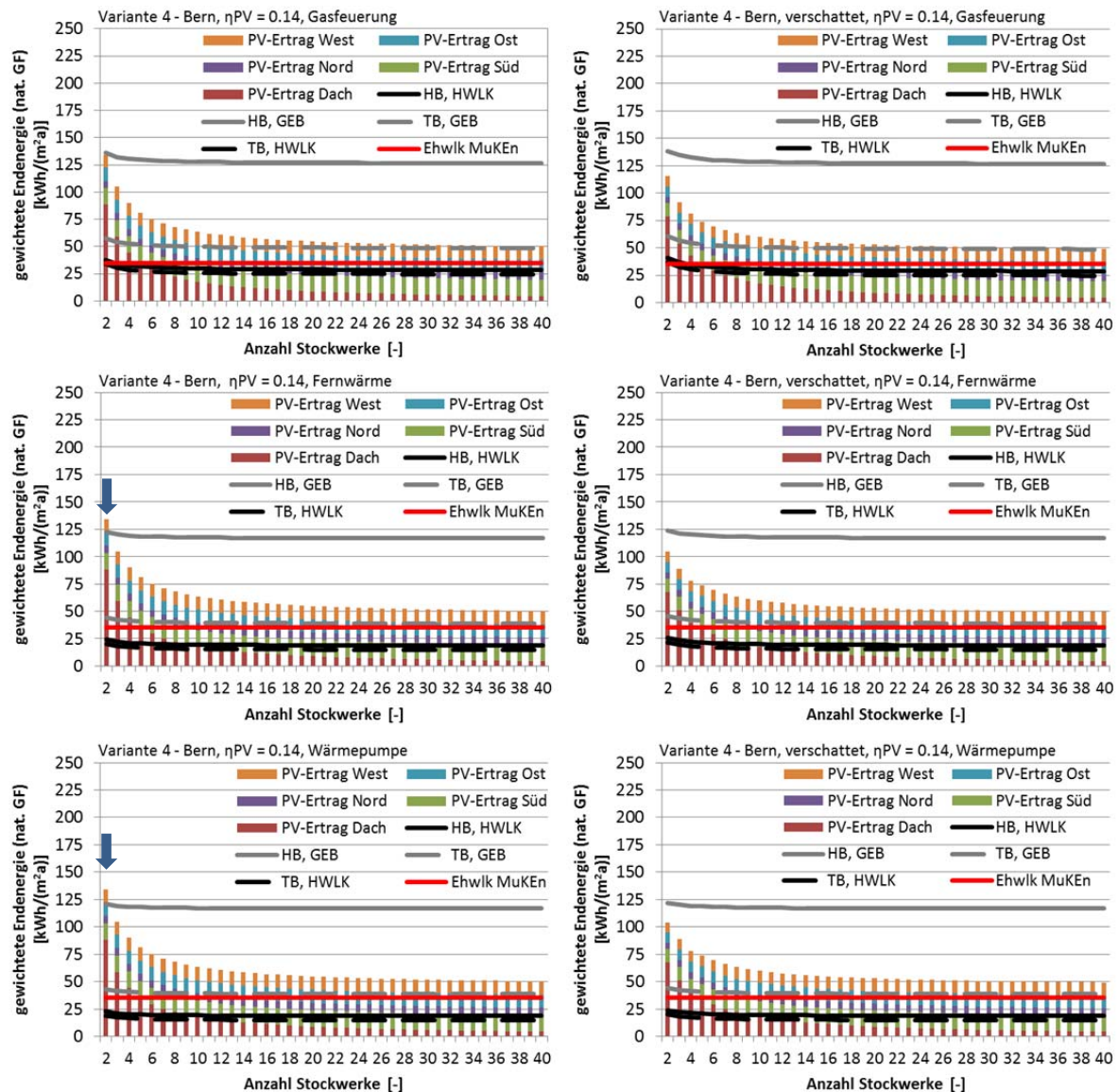


Bild 51: Variante 4 "Basisvariante": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

4.5.4 Überblick - Variante 4

Bild 52 fasst für die Varianten 4 - 4e die Anzahl an Stockwerken, für die eine Nullbilanz erreicht werden kann, zusammen:

- Die HWLK-Nullbilanz kann mit jedem Wärmeerzeuger und bei jeder Variante von Gebäuden mit bis zu 40 Stockwerken erreicht werden.
- Die GEB-Nullbilanz kann bei einem tiefen Gesamtenergiebedarf ebenfalls von Gebäuden mit bis zu 40 Stockwerken erreicht werden; ausgenommen sind damit Gebäude mit tiefem Dämmniveau (siehe Variante 4d "Dämmstandard (Gasheizung)").
- Bei einem hohen Gesamtenergiebedarf ist je nach Wärmeerzeuger und Verschattung eine GEB-Nullbilanz für Gebäude mit maximal fünf Stockwerken möglich.

Die Parameter, die sich positiven oder negativen auf die Nullbilanz von Basisvariante 4 auswirken, sind in Tabelle 22 genannt.

Tabelle 22: Einfluss auf die Nullbilanz gegenüber der Basisvariante 4.

Bilanz	vorteilhaft	nachteilig
GEB	• Hoher Systemwirkungsgrad der PV-Anlage • Andere Klimaregion als Bern	• Niedriger Dämmstandard • Hoher Strombedarf für Geräte und Beleuchtung • Hohe Verteil- und Speicherverluste (Gas)
HWLK	Bilanz wird bis zu 40 Stockwerken erreicht	

Damit ergeben sich für Variante 4 folgende Prioritäten um eine GEB-Nullbilanz für eine grosse Anzahl von Stockwerken zu erreichen:

1. Priorität
 - sehr hoher Dämmstandard
 - sehr hohe Energieeffizienz
 - Wärmeerzeuger: Fernwärme oder Wärmepumpe
 - hoher Systemwirkungsgrad der PV-Anlage
2. Priorität
 - niedrige Verteil- und Speicherverluste für Heizung und Warmwasser

Da die Ergebnisse, aufgrund der grossen Differenz zwischen dem tiefen und hohen (Strom-) Bedarf sehr weit auseinander liegen, wurde zusätzlich ein mittlerer (Strom-)Bedarf mit 30 kWh_{EE}/(m² a) betrachtet. Die Ergebnisse sind in Anhang 9.3.3.6 in Bild 85 dargestellt. Sie unterstreichen oben aufgeführte Aussagen.

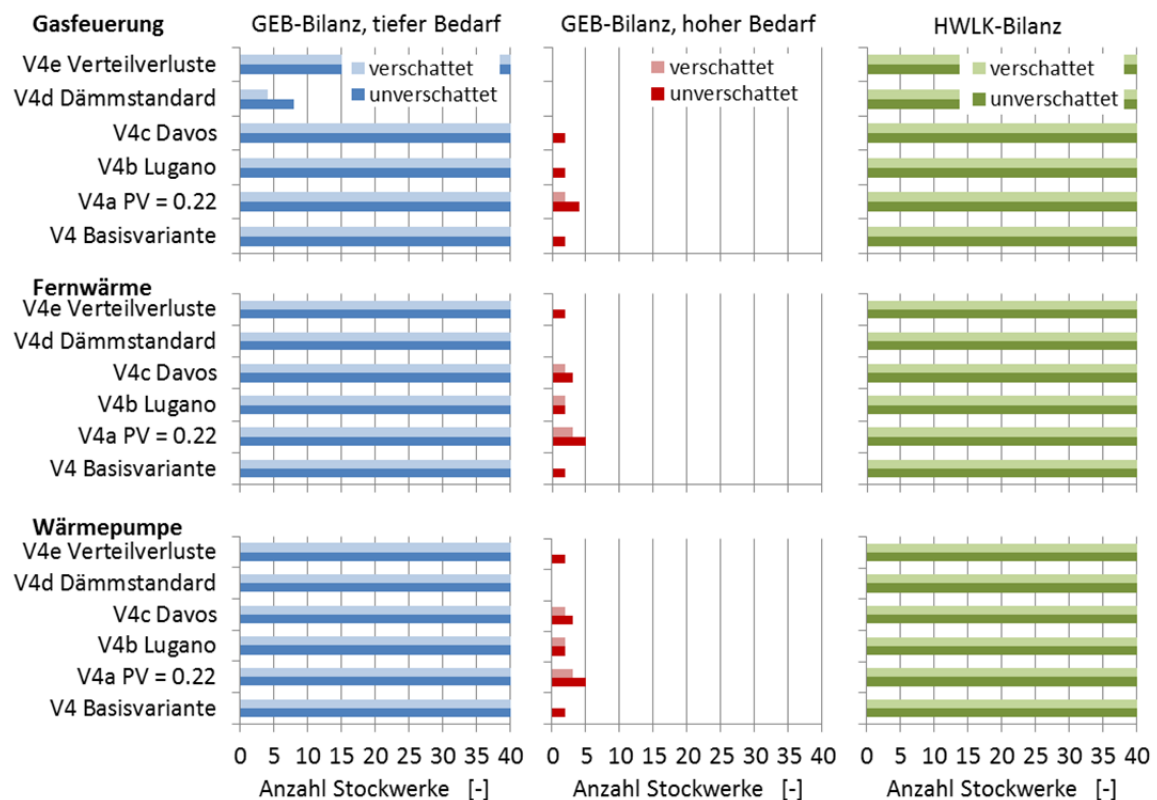


Bild 52: Anzahl Stockwerke, für die eine GEB- bzw. HWLK-Nullbilanz von Variante 4 (quadratischer Grundriss eines Verwaltungsbaus) erreicht werden kann. Die Bilanzen sind mit nationalen Gewichtungsfaktoren bewertet (tiefer/hoher (Strom-)Bedarf: 12/49 kWh_{EE}/(m² a)).

5 Praxisbeispiele

Für drei modernisierte Mehrfamilienhäuser in Zürich (17 Stockwerke), Romanshorn (6 Stockwerke) und Chiasso (8 Stockwerke) mit einer PV-Fassade werden verschiedene Kennwerte betrachtet (Tabelle 23, Bild 3). Weitere Details zu den Gebäuden sind im Anhang in Kapitel 9.5, Tabelle 28 zu finden. Die Mehrfamilienhäuser in Romanshorn und Chiasso verfügen neben der fassadenintegrierten PV-Anlage zusätzlich über eine PV-Anlage auf dem Dach sowie über thermische Solarkollektoren.

Tabelle 23: Kennwerte für drei MFH in Zürich, Romanshorn und Chiasso.

	Bedarf [kWh _{EE} /(m ² a)]/ [kWh _{ECH} /(m ² a)]	PV-Ertrag/EBF [kWh _{EE} /(m ² _{EBF} a)]/ [kWh _{ECH} /(m ² _{EBF} a)]	PV-Ertrag/Bedarf [%EE]/ [%ECH]
Zürich	61.2/62.7	5.7/11.4	9/18**
Romanshorn	19.5*/39*	21.9/43.8	107/112***
Chiasso	28.4*/56.8*	34.7/69.4	114/122***

* Ertrag vom thermischen Solarkollektor ist schon berücksichtigt

** weder HWLK- noch GEB-Nullbilanz wird erreicht

*** GEB-Nullbilanz wird erreicht

Bild 53 zeigt den PV-Ertrag bzw. die PV-Fläche bezogen auf die Energiebezugsfläche für die vier Basisvarianten und die drei Beispielgebäude. Die drei Beispielgebäude entsprechen in etwa dem Grundriss von Variante 2 (quadr. MFH).

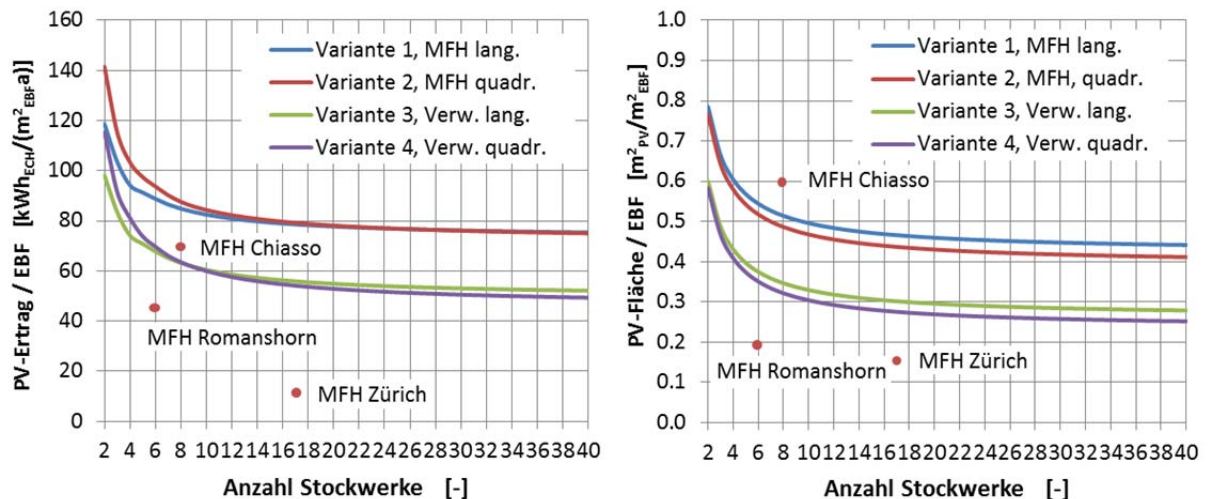


Bild 53: PV-Ertrag bzw. PV-Fläche zu Energiebezugsfläche; Vergleich der vier Varianten und der drei Beispielgebäude.

Der PV-Ertrag pro PV-Fläche von Zürich ist um 67% geringer als in Romanshorn und um 33% geringer als in Chiasso. Von den Solarstrahlungsdaten sind alle 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 Romanshorn und Zürich am grössten zu sein.

Obwohl schon fast die komplette Fassade ab dem 1. Obergeschoss von dem MFH in Zürich mit PV-Modulen belegt ist, könnten noch mehr Flächen genutzt werden: Die Balkonbrüstungen und das Dach. Zusätzlich hätte mit anderen Modulen die Fassadenfläche besser genutzt werden können, da die Abstände zwischen den verwendeten Modulen recht gross sind. Im Verhältnis zu den anderen beiden Gebäuden ist der PV-Ertrag bezogen auf die Energiebezugsfläche deutlich geringer. Es werden die Solarmodule Sharp NA-F128(G5) mit einem Modulwirkungsgrad von 9% verwendet [28], [29].

Das MFH Zürich mit Pelletfeuerung kann am ehesten mit der Basisvariante 2 "Klimastation Bern, Gasfeuerung, 17 Stockwerke, verschattet und einem tiefen Gesamtenergiebedarf" aus Bild 38 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 angenommen. Werden diese Randbedingungen berücksichtigt, ist die grosse Differenz des PV-Ertrags von Zürich und der Basisvariante 2 zu erklären (Bild 54).

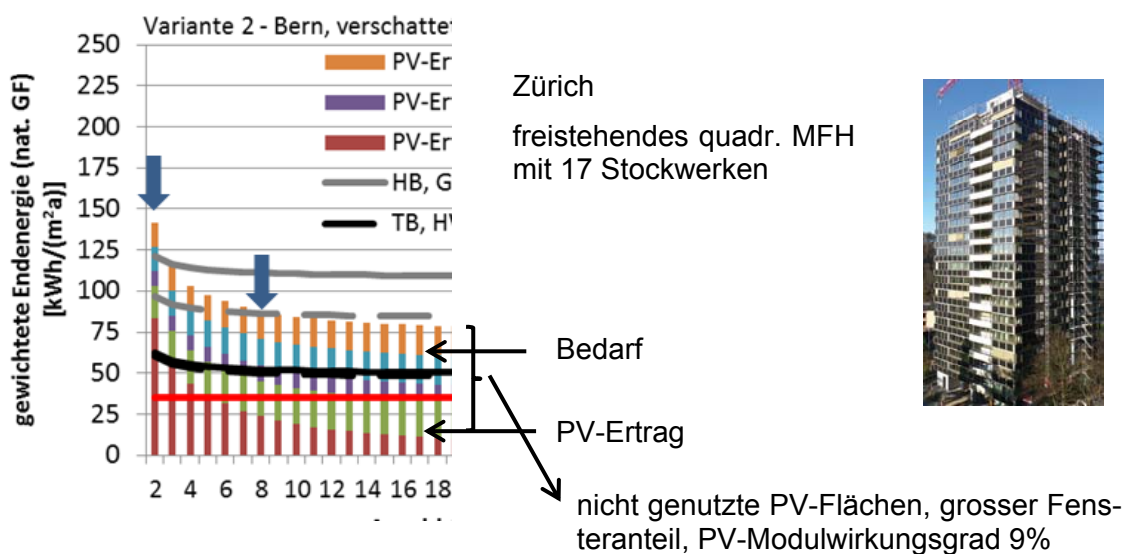


Bild 54: Einordnung des MFH Zürich zur Basisvariante 2.

Das MFH Romanshorn hat einen L-förmigen Grundriss und ist an den beiden Stirnseiten an die Nachbargebäude angebaut. Nur die zur 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 Energiebedarfs (GEB = 35.6 kWh_{EE}/(m²a)) des Gebäudes nicht notwendig, um die GEB-Nullbilanz zu erreichen (Modulwirkungsgrad: 18%, Kapitel 9.5).

Das MFH Romanshorn ist grob mit der Basisvariante 2 "Klimastation Bern, Wärmepumpe, sechs Stockwerke und einem tiefen Gesamtenergiebedarf" aus Bild 38 zu vergleichen. Die PV nimmt bei dem MFH Romanshorn nicht die gesamte Fassaden- und Dachfläche ein. Die Dachfläche ist zudem noch durch das Attikageschoss kleiner als die Geschossfläche und kann infolge der thermischen Solarkollektoren nicht voll genutzt werden (Bild 55).

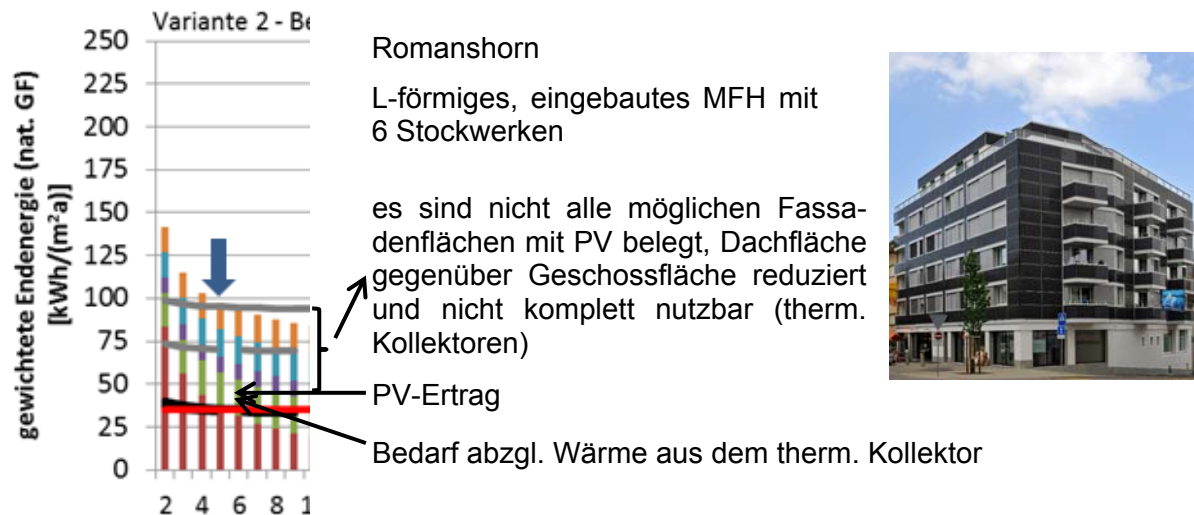


Bild 55: Einordnung des MFH Romanshorn zur Basisvariante 2.

Bei dem MFH in 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 (Kapitel 9.5). Damit liegt er unterhalb des Modulwirkungsgrads von den Beispielvarianten, was den PV-Ertrag pro EBF vermindert. Auch dieses Gebäude hat einen niedrigen Gesamtenergiebedarf (GEB = $45.5 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2\text{a})$).

Berücksichtigt man bei dem MFH-Chiasso den geringeren Modulertrag und die nicht komplett genutzte Fassadenfläche, entspricht es sehr gut der Variante 2b "quadratischer Grundriss, Klimastation Lugano", mit dem verschatteten Fall "Wärmepumpe mit acht Stockwerken und einem tiefen Gesamtenergiebedarf" in Bild 59.

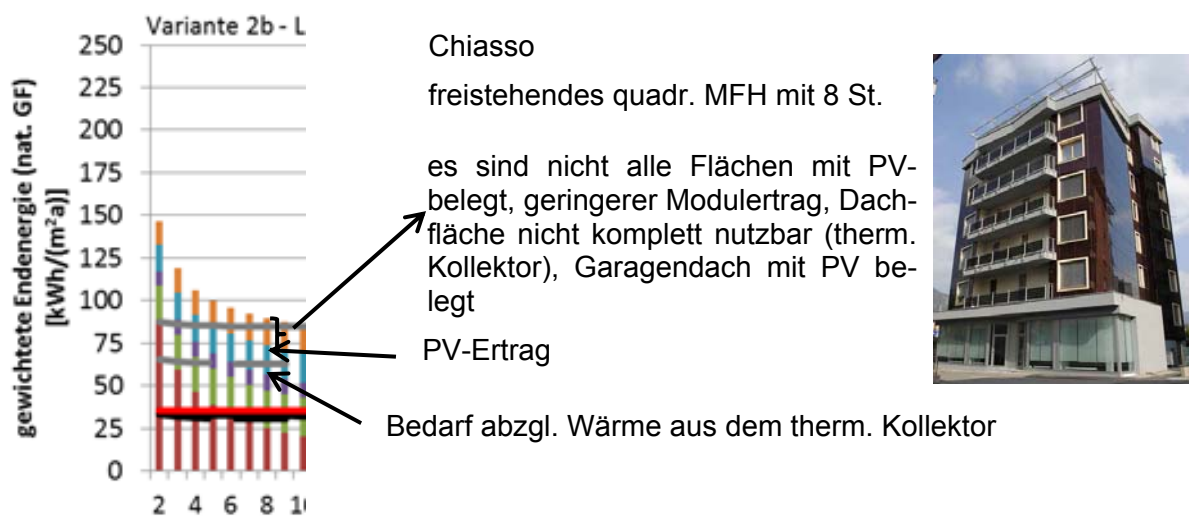


Bild 56: Einordnung des MFH Chiasso zu Variante 2b.

Der Vergleich der Beispielgebäude mit der Basisvariante 2 und 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 (tiefer Bedarf), eine grosse PV-Fläche und ein hoher PV-Ertrag wichtig sind. Damit unterstreichen die realisierten Gebäude die Aussagen, die durch die vorgängige Variantenstudie erarbeitet wurde.

6 Eigendeckungsrate

Bei Gebäuden mit PV-Anlagen ist immer öfters auch die Eigendeckungsrate ein 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 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 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 57).

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 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 6-19 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 günstiger 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 [30], [31]).

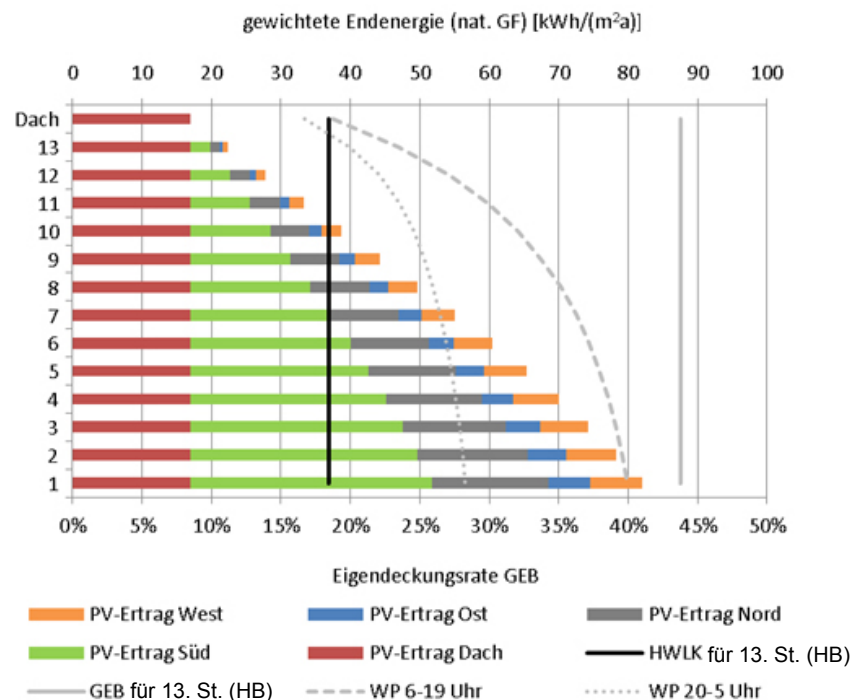


Bild 57: Gewichtete Endenergie und Eigendeckungsrate infolge stockwerksweiser Flächenbelegung mit PV (Basis: Variante 1 mit hohem Bedarf und Wärmepumpe, Klimastation Bern).

Die Berechnung beruht auf den Lastprofile für Warmwasser: MFH Katalog Nr. 6 (Polysun), für Haushaltsstrom: MFH 5 Haushalte (Polysun) und für Lüftung: 2-Stufen-Modell nach MB 2024 (Menn C., IEBau).

7 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 hochverglasten Gebäude** möglich.
- Ein **sehr hoher Dämmstandard** ist wichtig; d.h. 3-fachverglaster 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**.
- Es sollte ein möglichst **grosser Abstand zu den Nachbargebäuden** gewählt werden, um die Verschattung durch die Nachbarn gering zu halten.
- Die **Verschattung von vorgelagerten Balkonen** auf der Fassade 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.

Die in diese Studie ermittelten Resultate zeigen den Einfluss verschiedener Parameter auf die Erreichbarkeit von Nullbilanzen auf. 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.

8 Literatur

- [1] "Schweizer Solarpreis." [Online]. Available: www.solaragentur.ch.
- [2] "Strategie zum Plusenergie-Gebäude," energie-cluster IPG, www.energie-cluster.ch, 2014.
- [3] A. Eckmanns, "Was ist ein Plusenergie-Gebäude - Definition in der Schweiz und in Europa." Energie-Apero, Bern, www.energie-cluster.ch, 2012.
- [4] M. Hall, "Nullenergiegebäude - die nächste Generation energieeffizienter Bauten. IEA EBC Annex 52/SHC Task 40," Schlussbericht, BFE 103324/154384, www.fhnw.ch/habg/iebau, 2014.
- [5] S. Gasser, "Revision SIA 380/4, Teilprojekt 8: Strombilanzmodell für Wohnbauten," SIA und Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2014.
- [6] "Merkblatt SIA 2024 Standardnutzungsbedingungen für Energie – und Gebäudetechnik." 2006.
- [7] "Merkblatt SIA 2028 Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik." 2008.
- [8] "SIA 380 Grundlagen für energetische Berechnungen von Gebäuden." 2015.
- [9] "Bau- und Wohnungswesen 2012," Bundesamt für Statistik, 2014.
- [10] "Haushaltsszenarien - Entwicklung der Privathaushalte zwischen 2005 und 2030," Bundesamt für Statistik, 2008.
- [11] "Bundesamt für Statistik." [Online]. Available: www.admin.ch/bfs.
- [12] J. Nipkow, "Der typische Haushalt-Stromverbrauch sinkt," S.A.F.E, Zürich, 2013.
- [13] J. Knissel, "Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude," Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt (D), 1999.
- [14] D. Aiulfi, I. Maschio, V. Dellsperer, 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.
- [15] "Montagesystem Ost-West - Infomappe." Knubix GmbH, Bodnegg/Rotheidlen (D), www.knubix.com, 2014.
- [16] "Photovoltaik, Solarstrom für Ihr Zuhause," Regionalkonferenz Bern-Mittelland, www.bernmittelland.ch, 2013.
- [17] H. Wirth, "Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland," Fraunhofer ISE, www.pv-fakten.de, 2015.
- [18] "Photovoltaik." [Online]. Available: www.photovoltaik.org.
- [19] "Geoview Baselland." [Online]. Available: <http://geoview.bl.ch/>. [Accessed: 25-Feb-2015].
- [20] "ESRU, ESP-r (open source): A Building and Plant Energy Simulation Environment. Uni-versity of Strathclyde, Glasgow; <http://www.esru.strath.ac.uk>. Programm Version 2013."
- [21] "Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEEn) 2014." EnDK, www.endk.ch.
- [22] "Förderprogramme Energie des Kantons Bern," www.bve.be.ch.
- [23] "Plusenergie-Definition vom energie-cluster," www.energie-cluster.ch.
- [24] "Wege zum Effizienzhaus Plus," Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, www.bmub.bund.de, 2014.

- [25] K. Voss and E. Mushall, *Nullenergiegebäude*. Detail Green Books, 2011.
- [26] M. Schaede and M. Grossklos, "Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E) - Endbericht," Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, www.iwu.de, 2014.
- [27] TWW, "Kennwerte - Verteilnetze 1. Kurzinfo - Energieberater TGA," www.energieberaterkurs.de.
- [28] U. Muntwyler, D. Joss, N. Reber, D. Bützer, and D. Gfeller, "PV-Fassadenelemente auf allen vier Seiten eines Hochhauses: Beispiel für einen Markt für PV-Dünnschicht-Elemente," www.pvtest.ch, 2011.
- [29] Sharp Electronics, "Technische Daten Sharp NA-F128(G5)," www.sharp.de.
- [30] M. Hall, F. Dorusch, and A. Geissler, "Optimierung des Eigenverbrauchs, der Eigendeckungsrate und der Netzbelastung von einem Mehrfamiliengebäude mit Elektromobilität," *Bauphysik*, vol. 36, no. 3, pp. 117–129, Jun. 2014.
- [31] M. Hall and A. Geissler, "Netzbelastung durch Nullenergiegebäude," BFE 810000723, SI/500217-02, Zwischenbericht, 2013.
- [32] "Merkblatt SIA 2040 SIA-Effizienzpfad Energie." 2011.
- [33] "SIA 380/1 Thermische Energie im Hochbau." 2009.
- [34] "Energieagentur NRW." [Online]. Available: <http://www.energieagentur.nrw.de/unternehmen/verwaltungsgebaeude-auf-dem-weg-zum-niedrigenergiebuero-4051.asp>. [Accessed: 04-Feb-2015].
- [35] Energieagentur NRW, "Auf dem Weg zum energieeffizienten Bürogebäude - Ein Leitfaden." Wuppertal (D), www.energieagentur.nrw.de, 1998.
- [36] H. Huber, C. Schmid, J. Nipkow, N. Lederle, and C. Hauri, "Ermittlung der Wärmeerzeugerleistung," in *Leitungsgarantie Haustechnik*, Bundesamt für Energie und Verein Minergie, www.bfe.admin.ch, 2010.
- [37] K. Pfäffli, "Hochhäuser Sihlweid - Schlussbericht Zielerreichung 2000-Watt-Gesellschaft basierend auf dem SIA-Effizienzpfad Energie," Architekturbüro Preisig Pfäffli, 2014.

9 Anhang

9.1 Strombedarf von Verwaltungsbauten und Wohnen

Tabelle 24 zeigt Werte für den Strombedarf für Verwaltungsbauten aus verschiedenen Literaturstellen. Differenzierte Zielwerte für den Strombedarf von Verwaltungsbauten zeigt Tabelle 25. Aus den beiden Tabellen wurden die Werte für den im Projekt verwendeten Strombedarf für Verwaltungsbauten abgeleitet.

Tabelle 24: Vergleich des Strombedarfs für Verwaltungsbauten (ohne Wärmeerzeugung) aus verschiedenen Literaturstellen.

	Strombedarf [kWh/(m ² a)]
SIA 2024 [6]: tiefer/hocher Wert	13/52
SIA 2040 [32] (ohne 3611 kWh/Lift, keine Klimatisierung)	20
SIA 380/1 [33] (Standardwert)	22
Energieagentur NRW [34], [35]: einfache, gehobene und umfangreiche technische Ausstattung	16/25/61
BFE [14]: Median/Mittelwert: Minergie zertifizierte Gebäude	50/58
BFE [14]: Median ohne/mit Standard Server	48/66
BFE [14]: Mittelwert ohne/mit Standard Server	69/83
BFE [14]: Median: Öffentliche Verwaltung / Industrie bzw. Gewerbe / übrige Dienstleister / Bank bzw. Versicherung	48/60/96/118
IWU [13]: Passivhaus nicht klimatisiert, klimatisiert: Passivhaus/Niedrigenergie/Standard	14/18/32/54
[14] Messwerte, [13] Rechenwerte mit Messwerten verifiziert	

Tabelle 25: Differenzierte Zielwerte für Strombedarf von Verwaltungsbauten von der Energieagentur NRW. Diese Werte wurden in Anlehnung an SIA 380/4:1995 ermittelt [34], [35].

	Zielwerte für den Strombedarf mit unterschiedlicher technischer Ausstattung [kWh/(m ² a)]		
	einfach	gehoben	umfangreich
Arbeitshilfen	3	4	4
Zentrale Dienste	2	4	32
Beleuchtung	4	7	7
Lüftung/Klima	3	6	14
Diverse Technik	4	4	4
Total	16	25	61

Tabelle 26: Vergleich des Strombedarfs für Wohnen (Geräte und Beleuchtung, ohne HWLK) pro Energiebezugsfläche aus verschiedenen Literaturstellen.

	Strombedarf [kWh/(m ² a)]
SIA 2024 [6] (Wohnen/Schlafen) tiefer/hoher Wert	22/48
SIA 2040 [32] (ohne 833 kWh/Lift, keine Klimatisierung)	12.5
SIA 380/1 [33] (Standardwert)	28
Durchschnitt Deutschland [24] (ca. 2'650 kWh pro HH, 30 kWh/(m ² a) Netto-Wohnfläche)	~25
Anforderung für Effizienzhaus-Plus [24] (20 kWh/(m ² a) Netto-Wohnfläche, aber max. 2500 kWh/HH)	~17

9.2 Verteil- und Speicherverluste von Heizung und Warmwasser

Für die Verluste der Heizung gibt es verschiedene Aussagen in der Literatur:

- Die Verluste für die Wärmeverteilung können bei einer guten Wärmedämmung meist vernachlässigt werden [36].
- In den Nutzungsgraden und Jahresarbeitszahlen nach SIA 380 sind die Verluste von typischen Heizungsspeicher einhalten.

Um auf der sicheren Seite zu liegen, werden aufgrund der o.g. Aussagen 10% Verteil- und Speicherverluste für die Heizung angenommen.

Der flächenbezogene Wärmeverlust der Verteilung für Trinkwarmwasser und Zirkulationsleitungen nimmt mit zunehmender Nettofläche ab. Die Verluste reduzieren sich zwischen 750 m² und 2'500 m² um knapp 5 % und bleiben dann bis 10'000 m² konstant [27]. Grössere Flächen werden in [27] nicht genannt. Es wird davon ausgegangen, dass der flächenbezogene Wärmeverlust auch bei grösseren Flächen konstant bleibt. Da in dieser Studie die Verteil- und Speicherverluste unabhängig von der Anzahl der Stockwerke verwendet werden, werden Gebäude mit zwei bis vier Stockwerke etwas zu positiv dargestellt.

Tabelle 27: Verluste der Warmwasserbereitung für Wohnbauten.

	Verluste [kWh/(m ² a)]*	entspricht einem Verlust am Standardwert Q _{ww} nach SIA 380/1 [%]
Kleine MFH [27] (Verluste im beh./unbeh. Bereich)	10.2 - 19.1	40 - 76
Grosse MFH [27] (Verluste im beh./unbeh. Bereich)	9.8 - 15.7	39 - 62
Hochhäuser [27] (Verluste im beh./unbeh. Bereich)	6.5 - 12.5	26 - 50
SIA 380 [8] (Verluste von Speicher und Verteilung)		40

*Nettofläche, Umrechnung in Bruttofläche mit dem Faktor 1.2

9.3 Diagramme für Varianten 2-4

9.3.1 Variante 2

9.3.1.1 Variante 2a " $\eta_{PV} = 0.22$ "

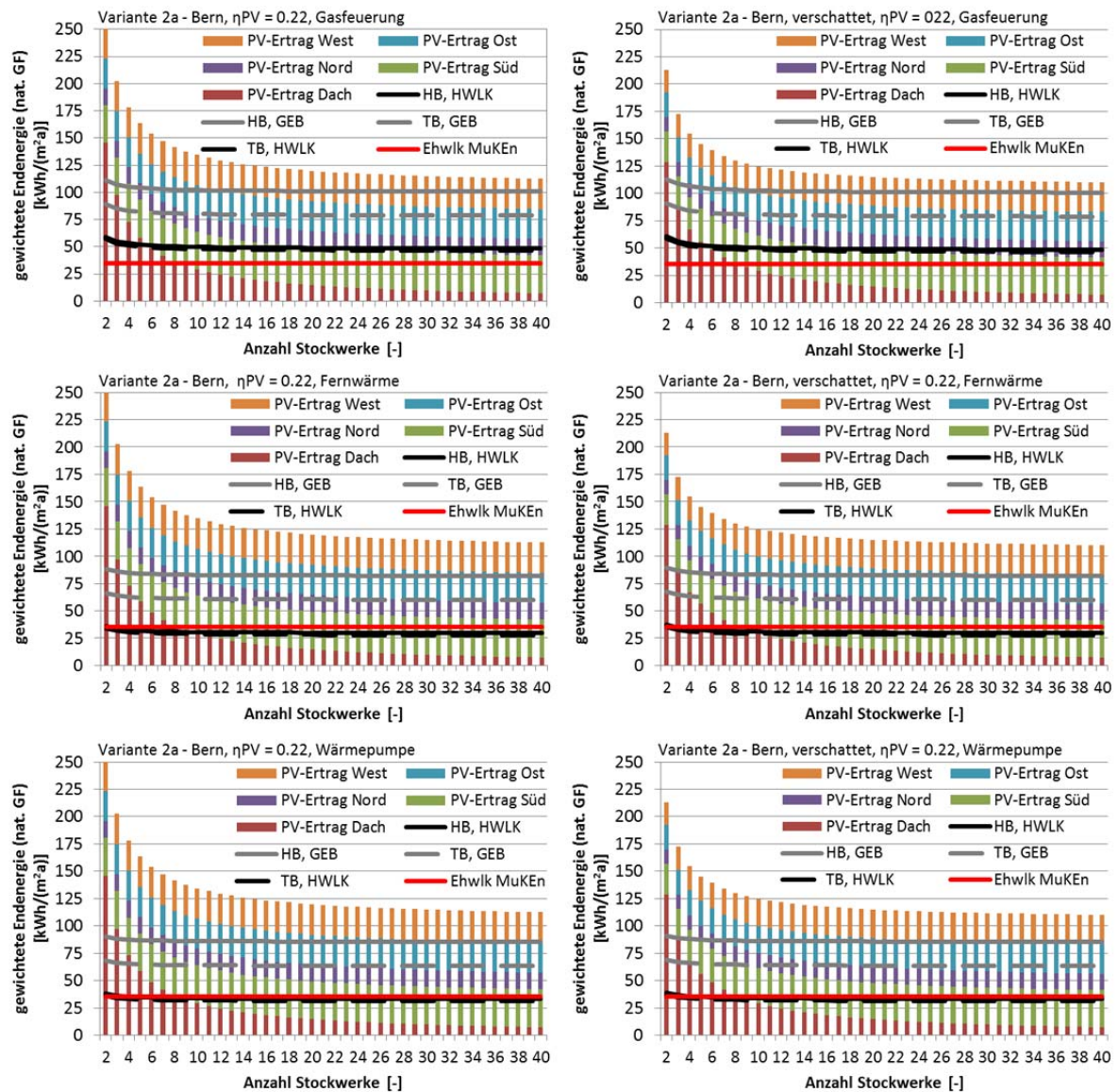


Bild 58: Variante 2a " $\eta_{PV} = 0.22$ ": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 2a in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

9.3.1.2 Variante 2b "Lugano"

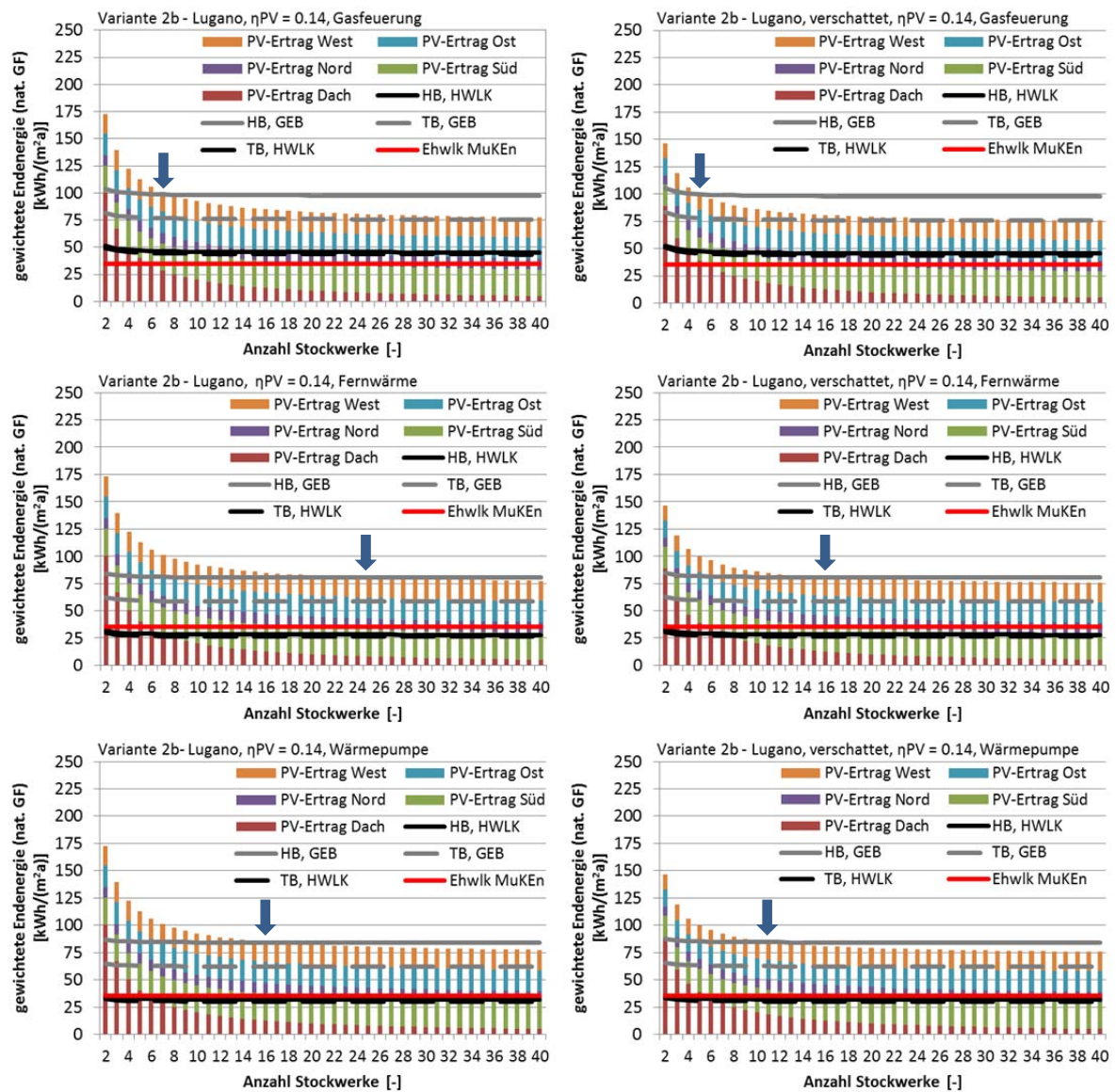


Bild 59: Variante 2b "Lugano": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 2b in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

9.3.1.3 Variante 2c "Davos"

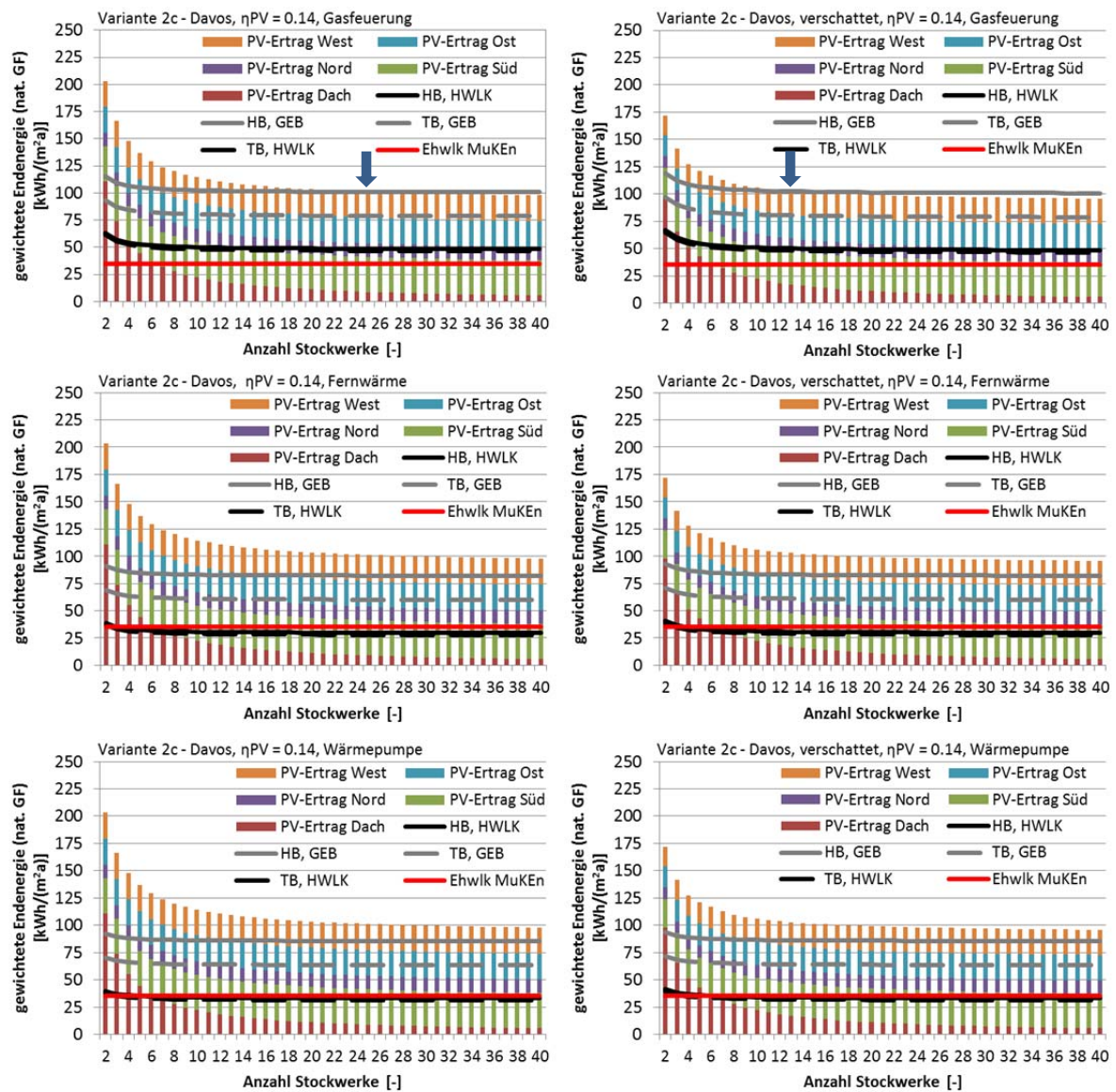


Bild 60: Variante 2c "Davos": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 2c in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

9.3.1.4 Variante 2d "Brüstung"

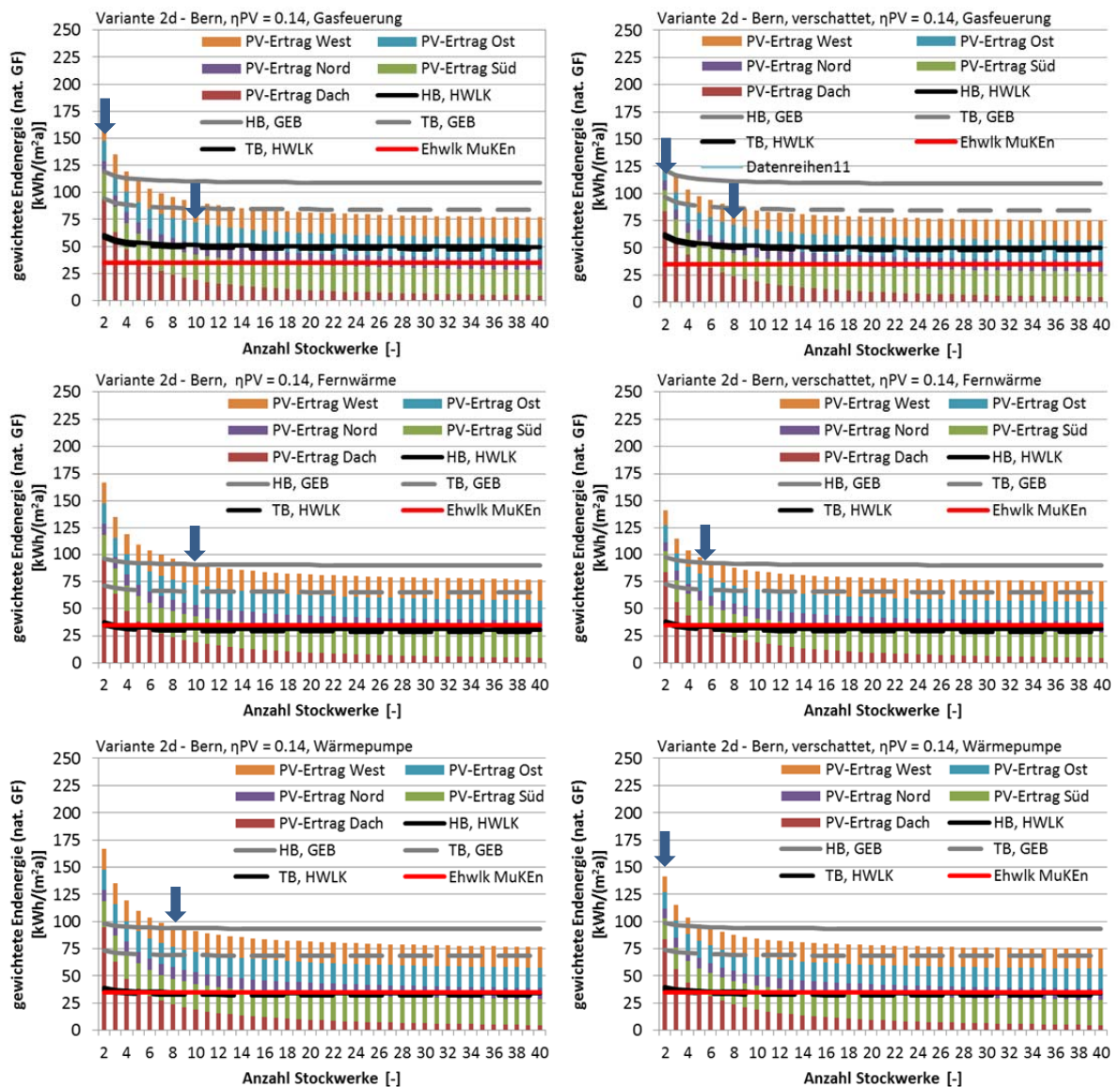


Bild 61: Variante 2d "Brüstung": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 2d in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

9.3.1.5 Variante 2e "Dämmstandard"

Die Basisdaten für Variante 2e Dämmstandard sind in Tabelle 3 enthalten. Der Grenzwert für Neubauten der SIA 380/1:2009 wird für ein Gebäude ab 25 Stockwerken und Verschattung durch Nachbargebäude eingehalten (Bild 62).

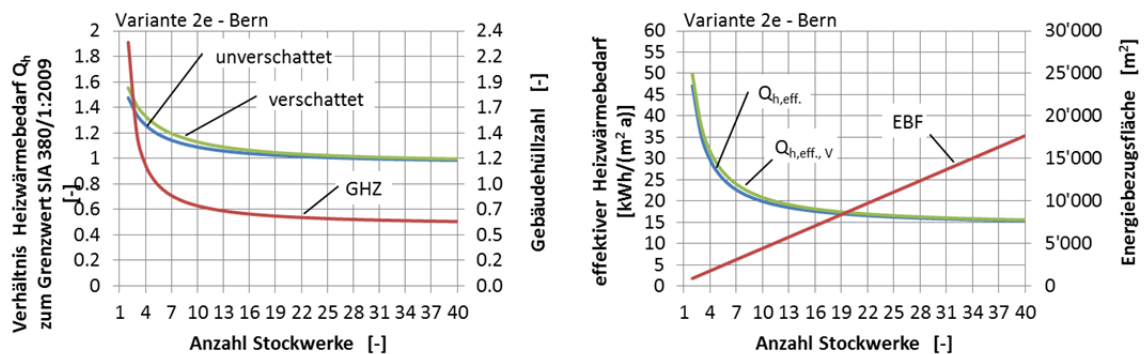


Bild 62: Variante 2e: Effektiver Heizwärmebedarf und Anteil am Grenzwert nach SIA 380/1:2009. Energiebezugsfläche und Gebäudehüllzahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

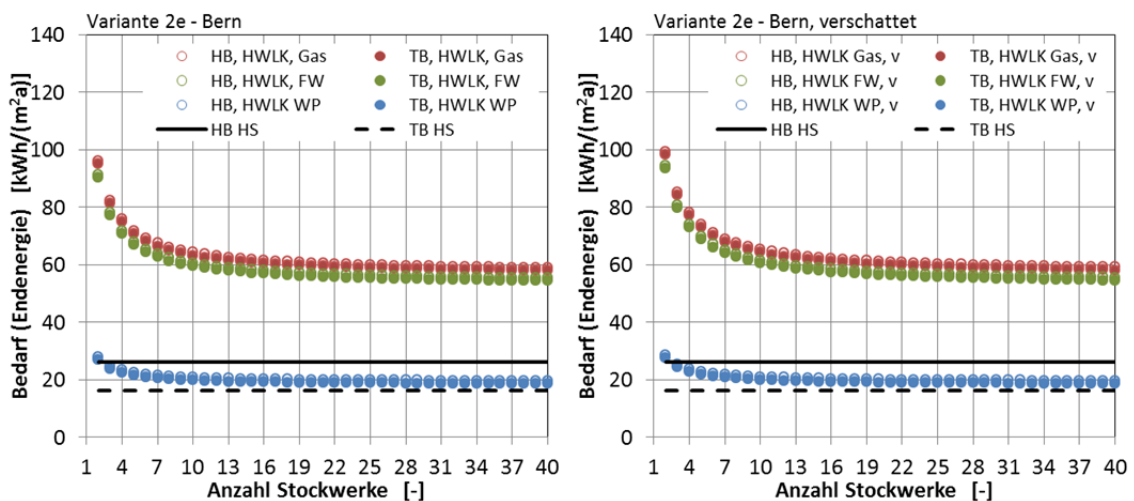


Bild 63: Variante 2e: ungewichtete Endenergie in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet, tiefer/hoher (Haushaltsstrom+Lift) Bedarf: 16/26 kWh_{EE}/(m²a)).

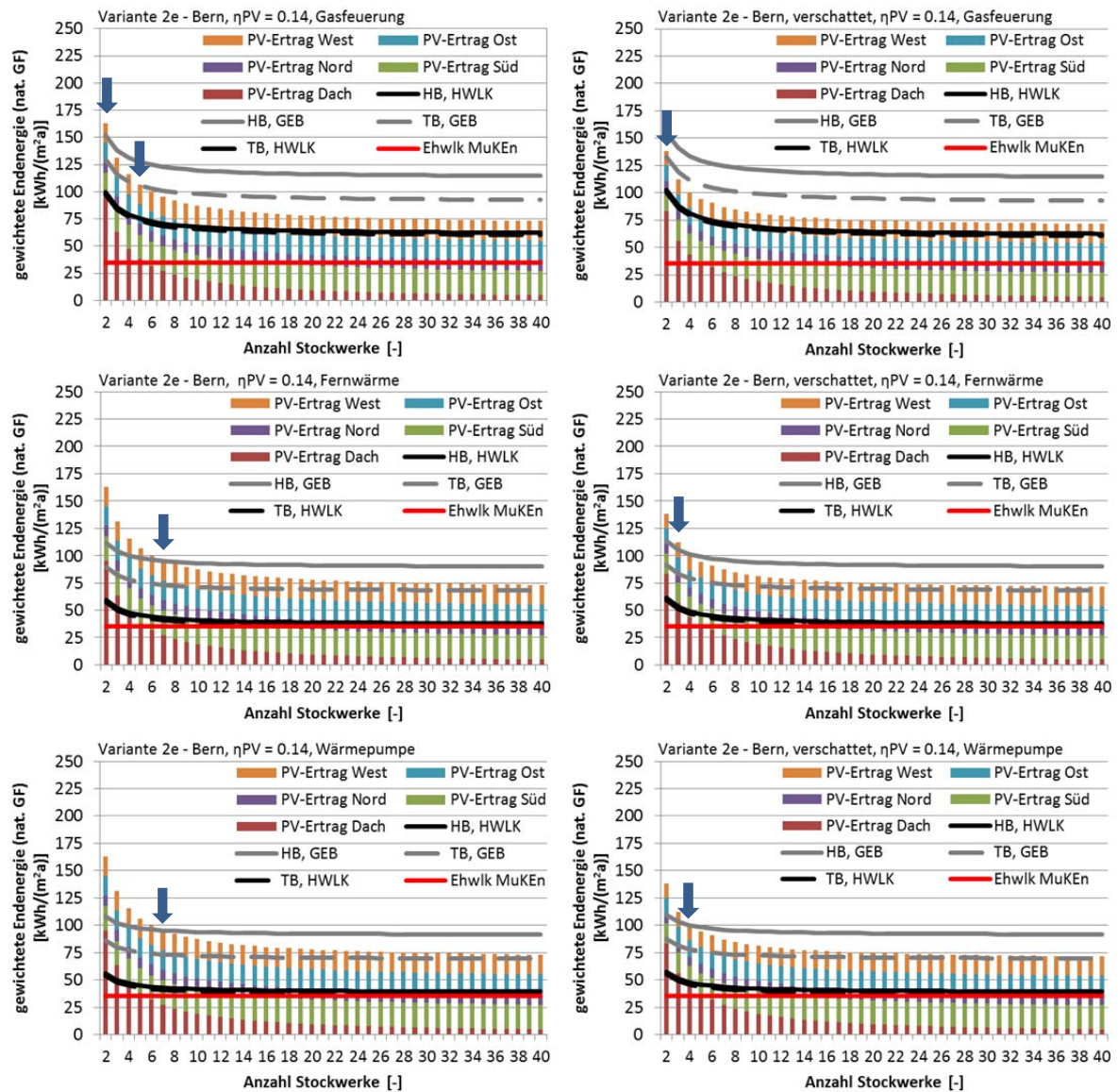


Bild 64: Variante 2e "Dämmstandard": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.1.6 Variante 2f und 2g "Nachbar 15/20 St."

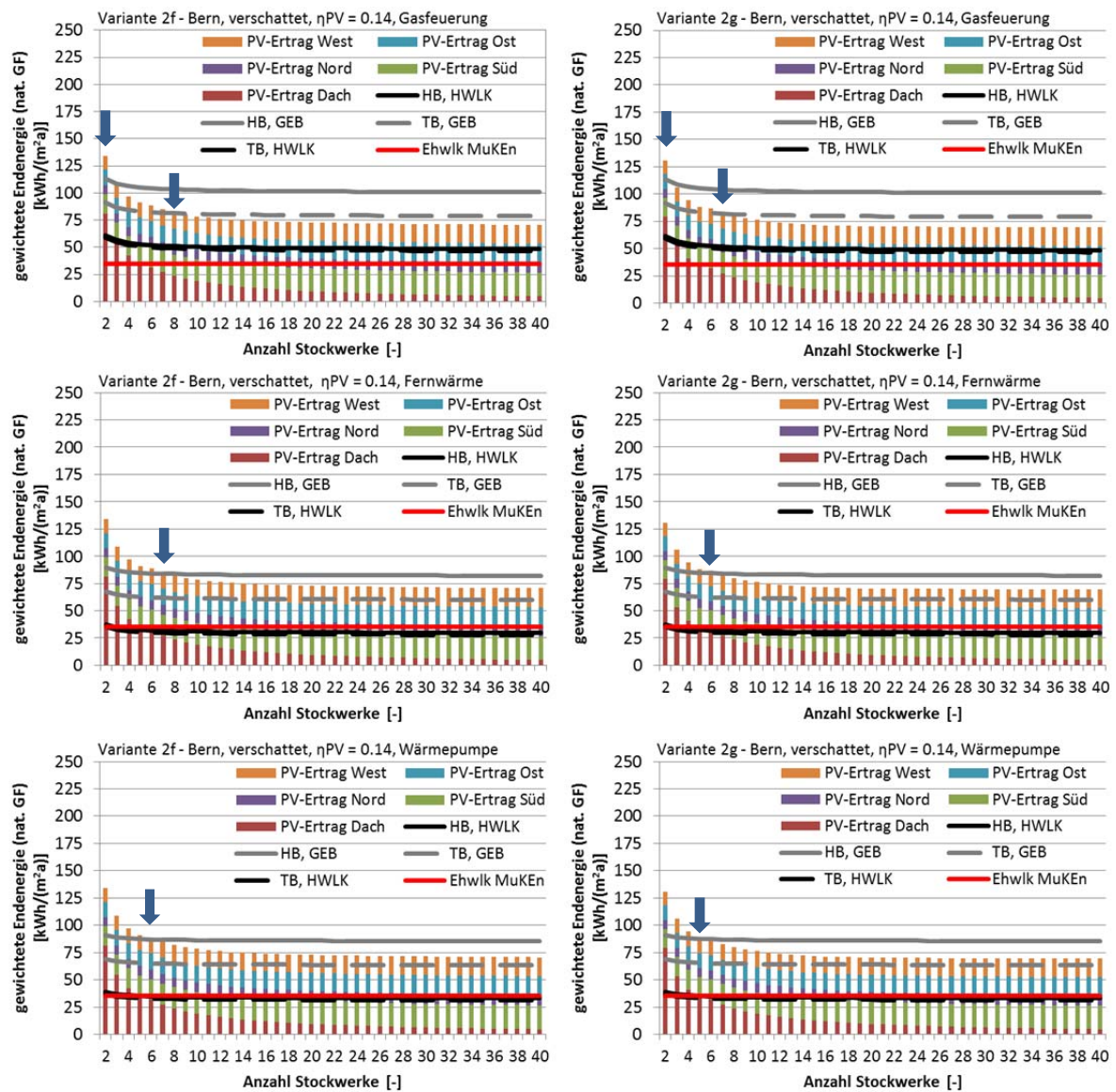


Bild 65: Variante 2f/2g "Nachbar 15 St./20 St.": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: Nachbargebäude 6/15 Stockwerke, rechts: Nachbargebäude 6/20 Stockwerke).

9.3.1.7 Variante 2h "Verteilverluste"

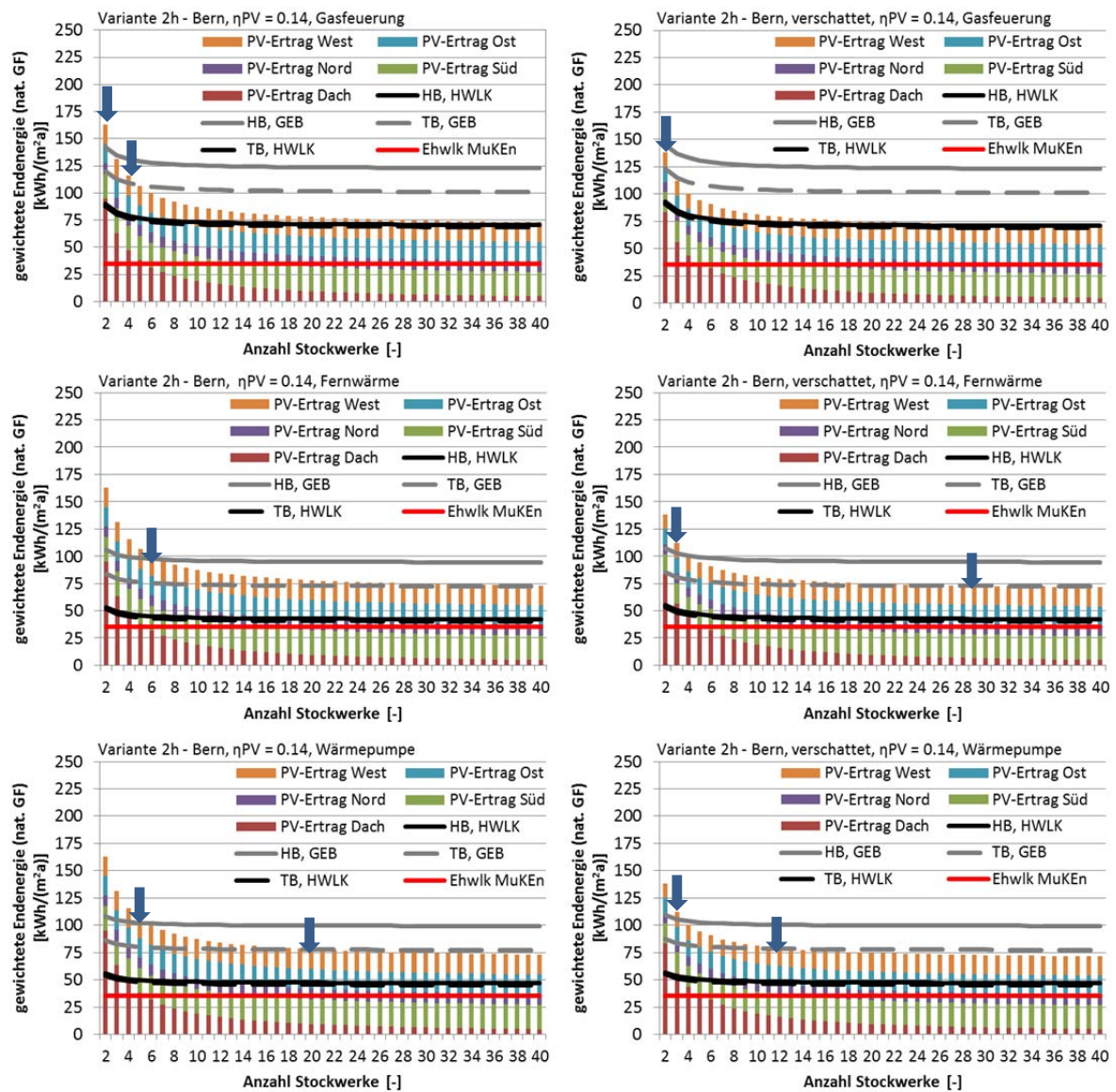


Bild 66: Variante 2h "Verteilverluste": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.1.8 Variante 2i "Balkon"

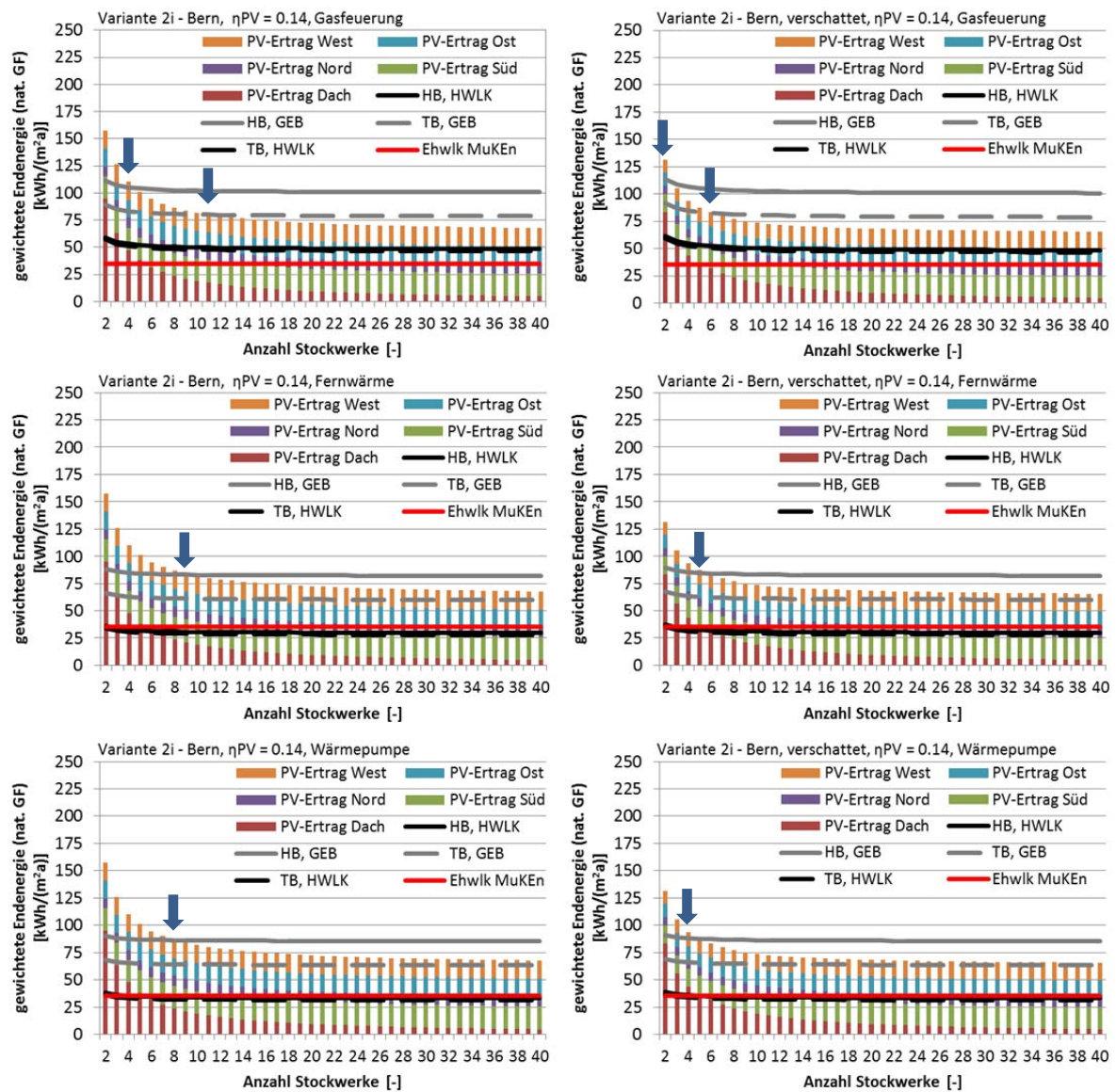


Bild 67: Variante 2i "Balkon": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.2 Variante 3

9.3.2.1 Variante 3a " $\eta_{PV} = 0.22$ "

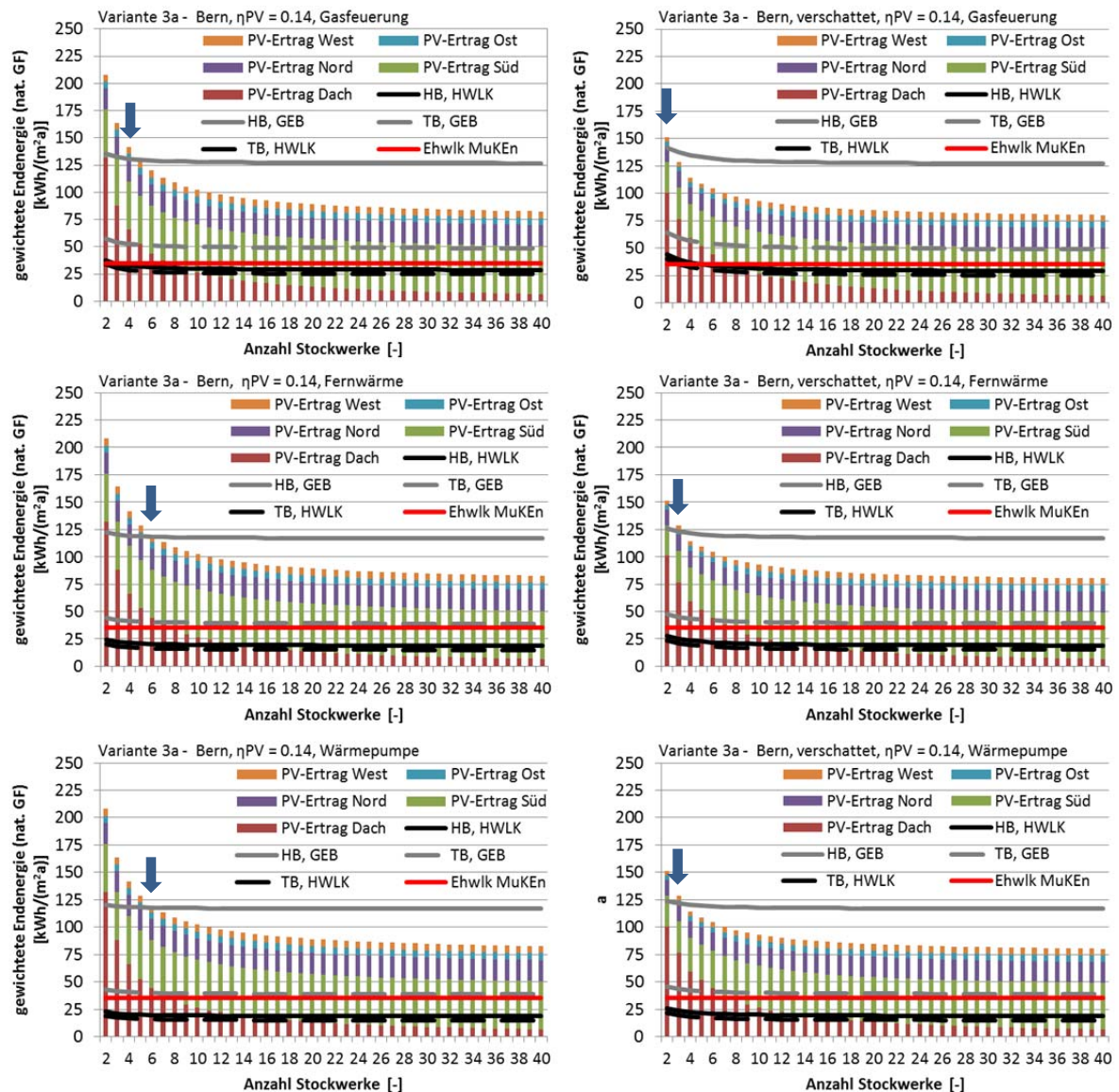


Bild 68: Variante 3a " $\eta_{PV} = 0.22$ ": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

9.3.2.2 Variante 3b "Lugano"

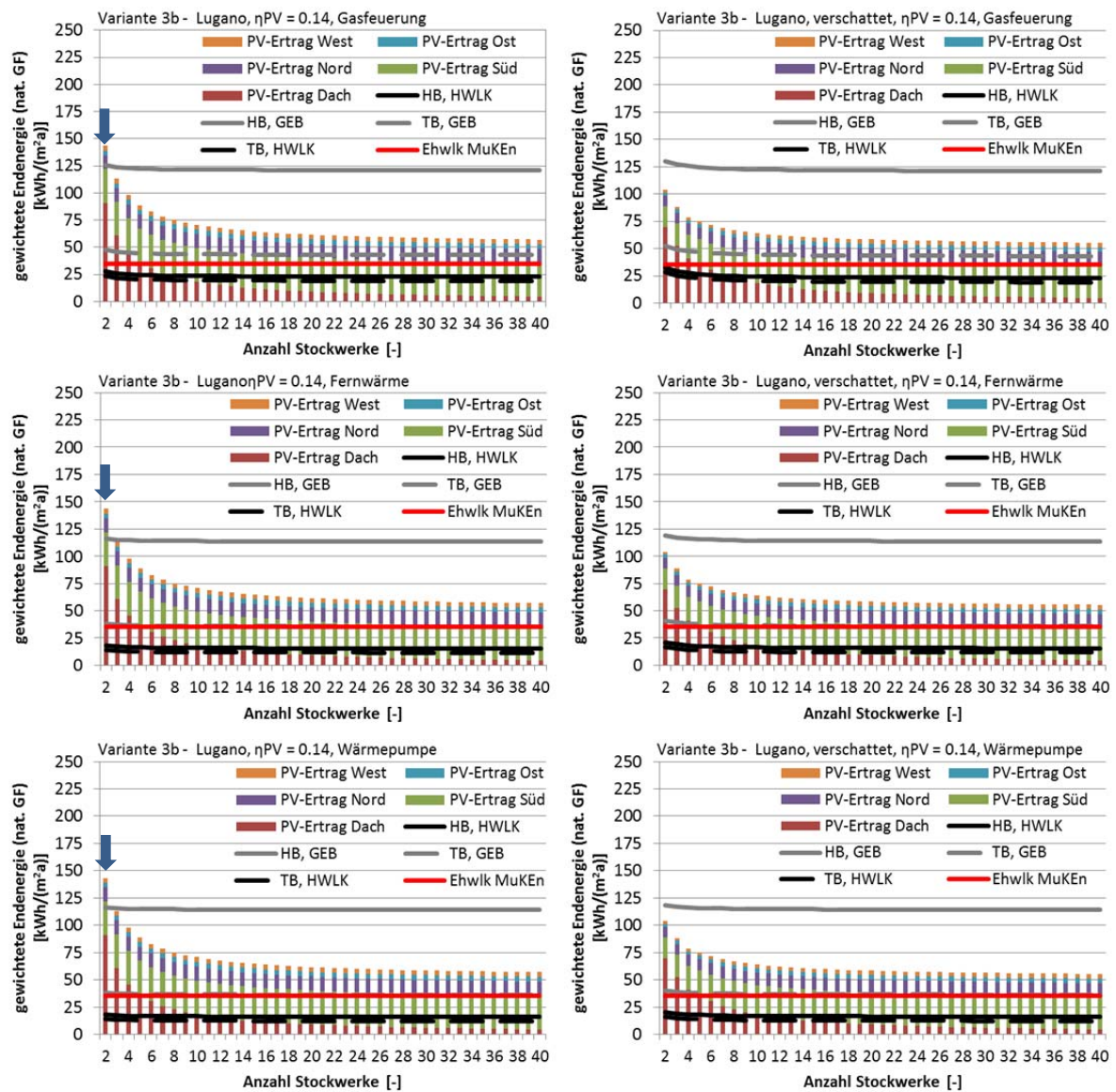


Bild 69: Variante 3b "Lugano": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 2a in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

9.3.2.3 Variante 3c "Davos"

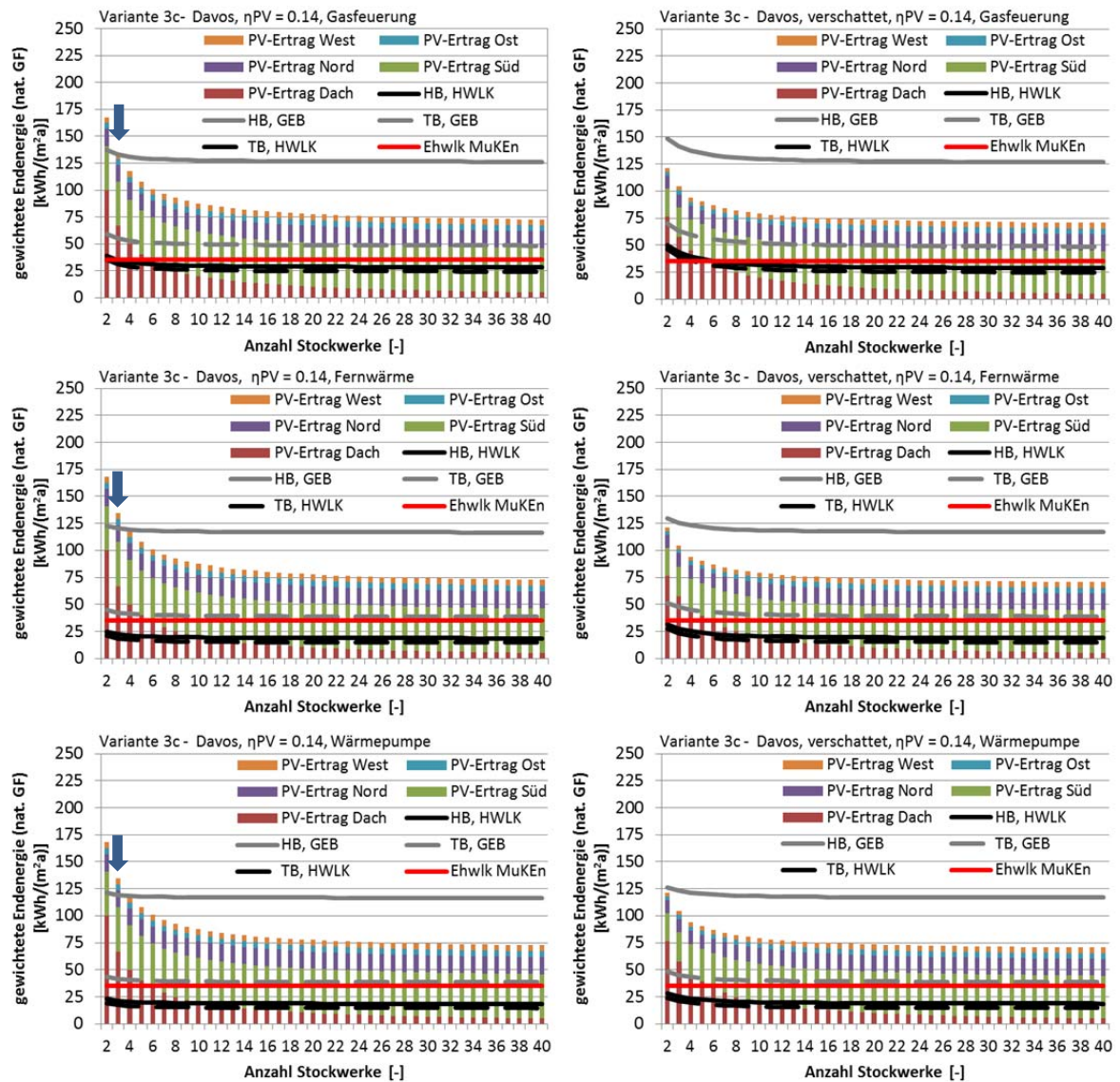


Bild 70: Variante 3c "Davos": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung für Variante 2a in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

9.3.2.4 Variante 3d "Dämmstandard"

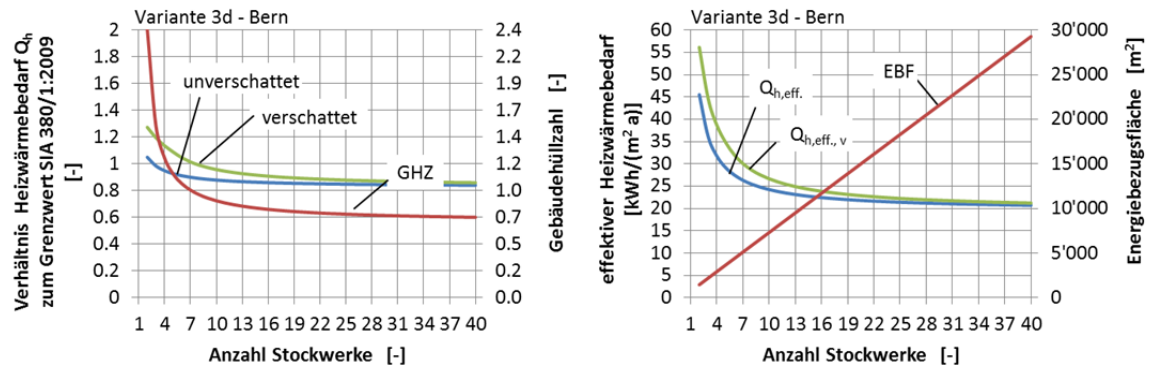


Bild 71: Variante 3d: Effektiver Heizwärmebedarf und Anteil am Grenzwert nach SIA 380/1:2009. Energiebezugsfläche und Gebäudehüllzahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

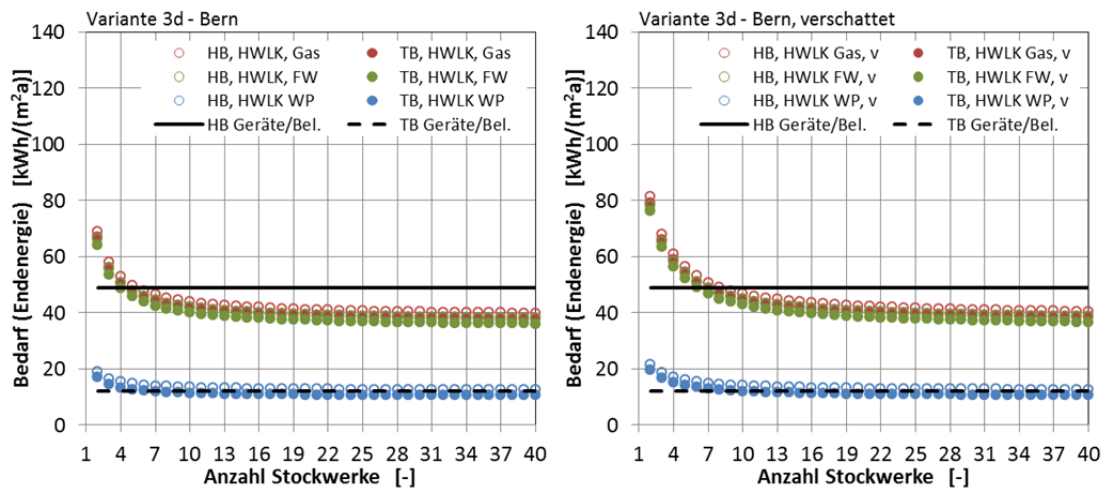


Bild 72: Variante 3d: ungewichtete Endenergie in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet).

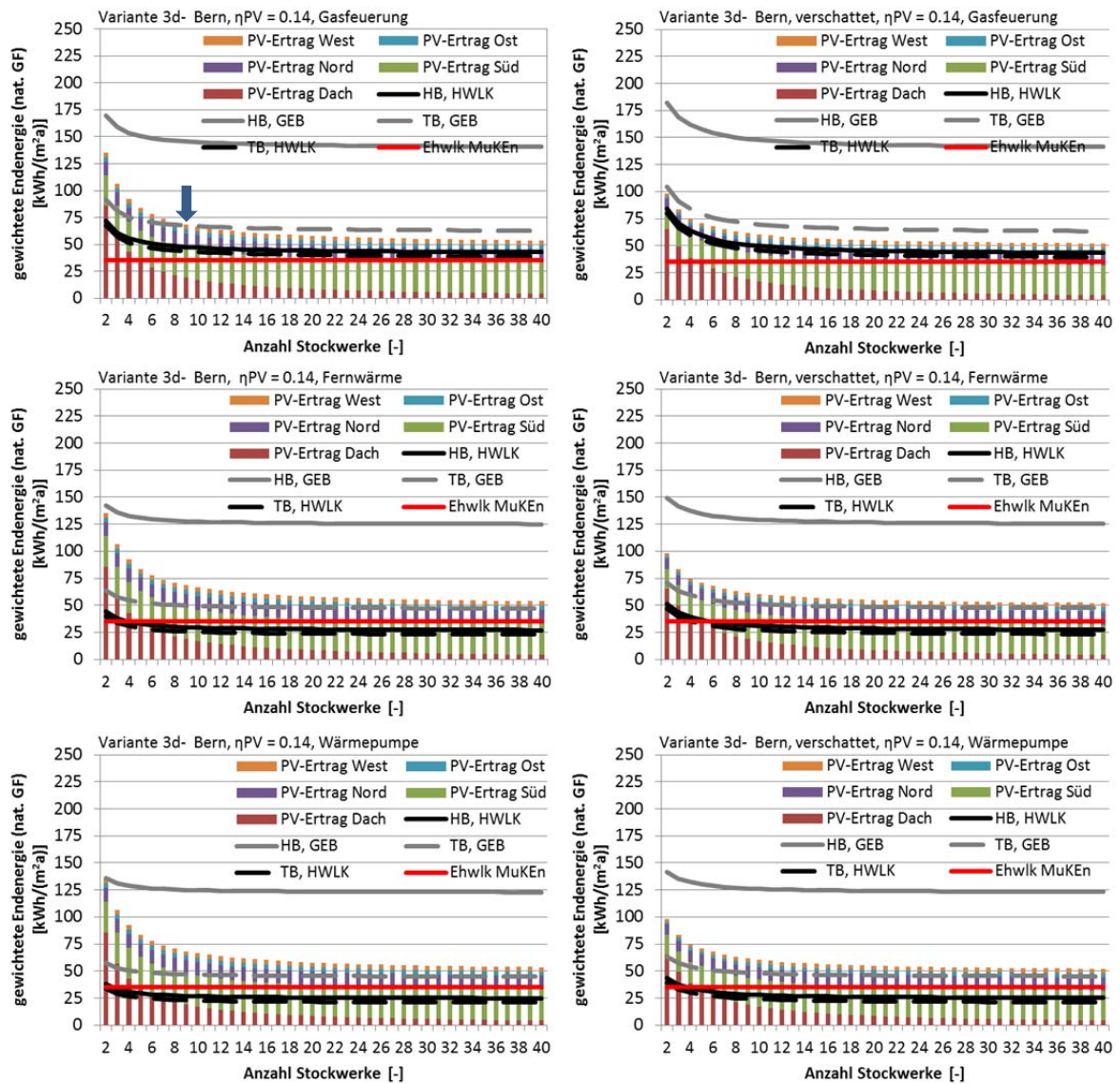


Bild 73: Variante 3d "Dämmstandard": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.2.5 Variante 3e "Ost/West"

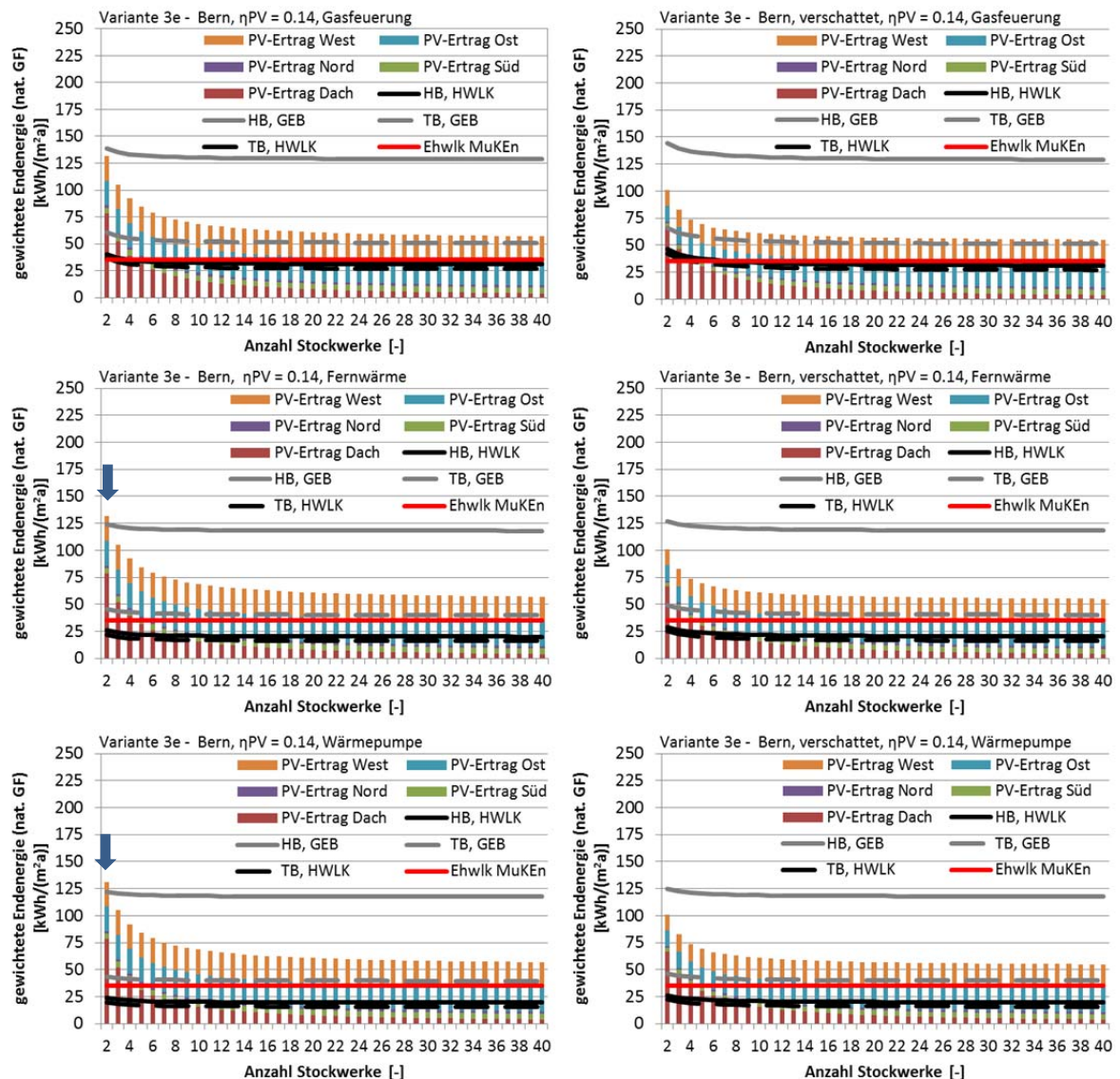


Bild 74: Variante 3e "Ost/West": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 6-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

Der Grenzwert der MuKE-Energiekennzahl ist als rote Linie dargestellt. (HB: hoher Bedarf, TB: tiefer Bedarf, GEB: Gesamtenergiebedarf, HWLK: Bedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Kälte). Die Pfeile markieren die Anzahl an Stockwerken < 40, für die eine Nullbilanz möglich ist.

9.3.2.6 Variante 3f "Verteilverluste"

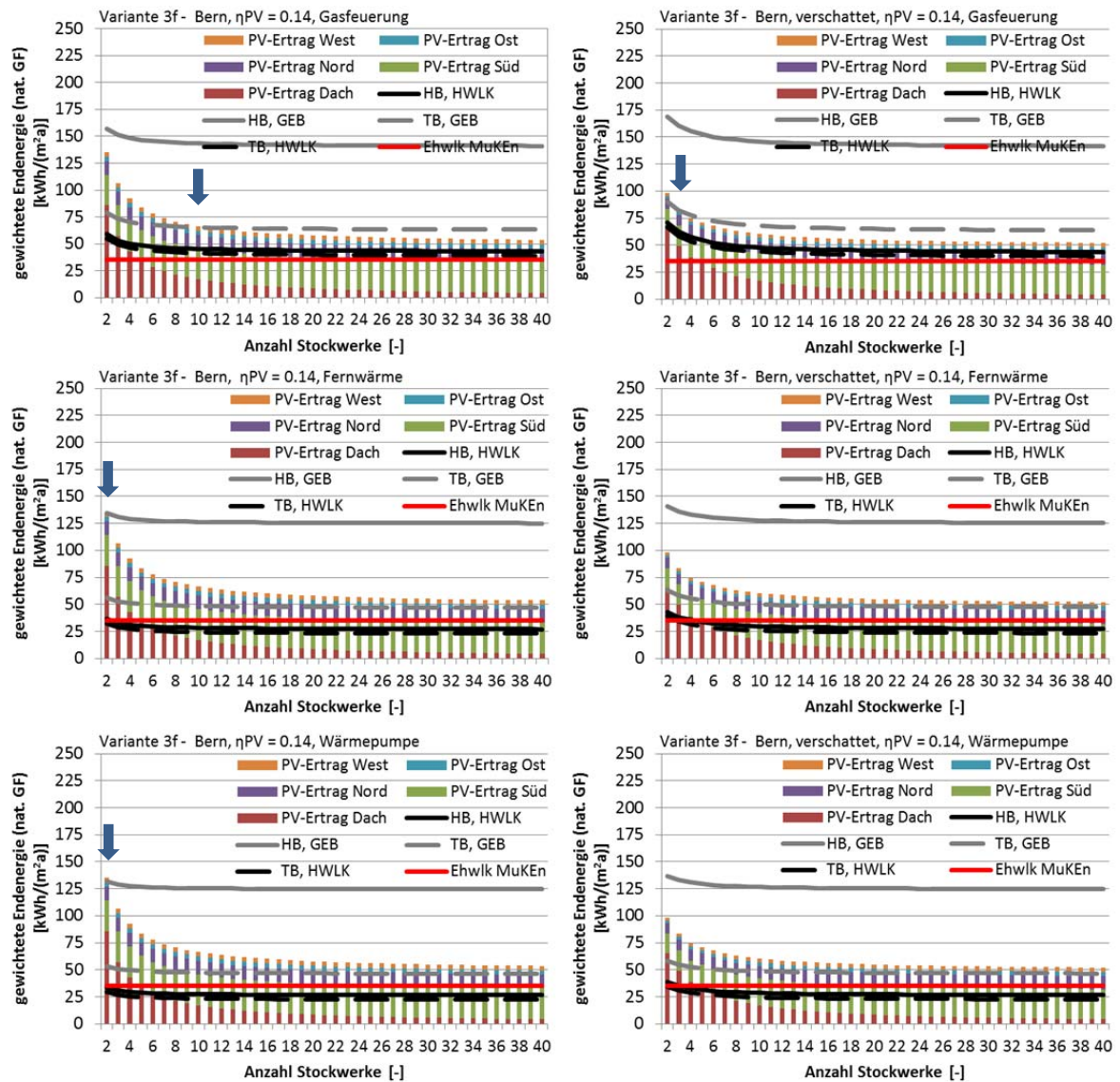


Bild 75: Variante 3f "Verteilverluste": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 6-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: Nachbar 15/15m, rechts: Nachbar 30/46m).

9.3.2.7 Variante 3g "Nachbar nah" und Variante 3h "Nachbar fern"

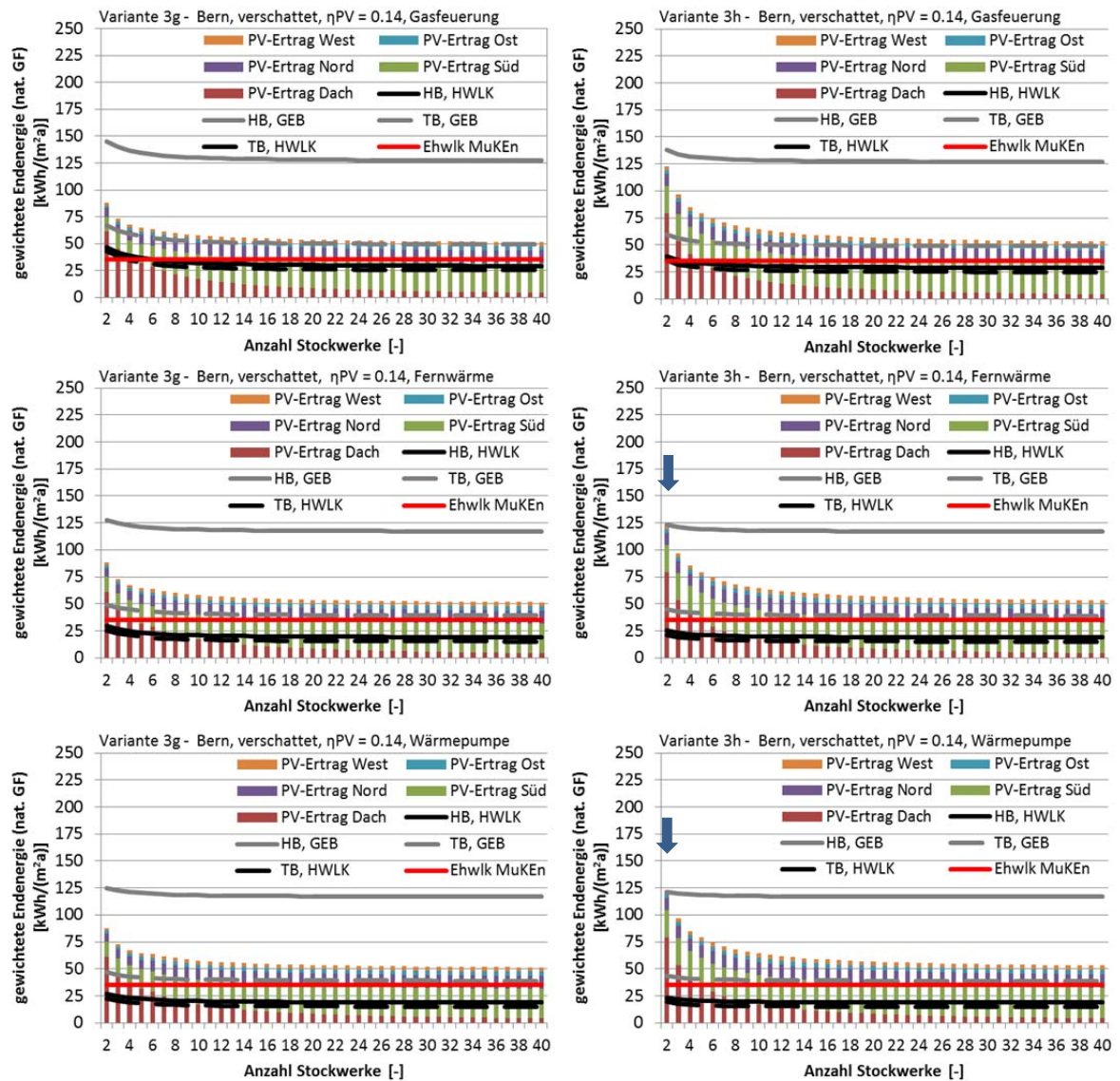


Bild 76: Variante 3g/h "Nachbarn nah/fern": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 6-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: Nachbar 15/15m, rechts: Nachbar 30/46m).

9.3.2.8 Variante 3 - Überblick für einen "mittleren Bedarf".

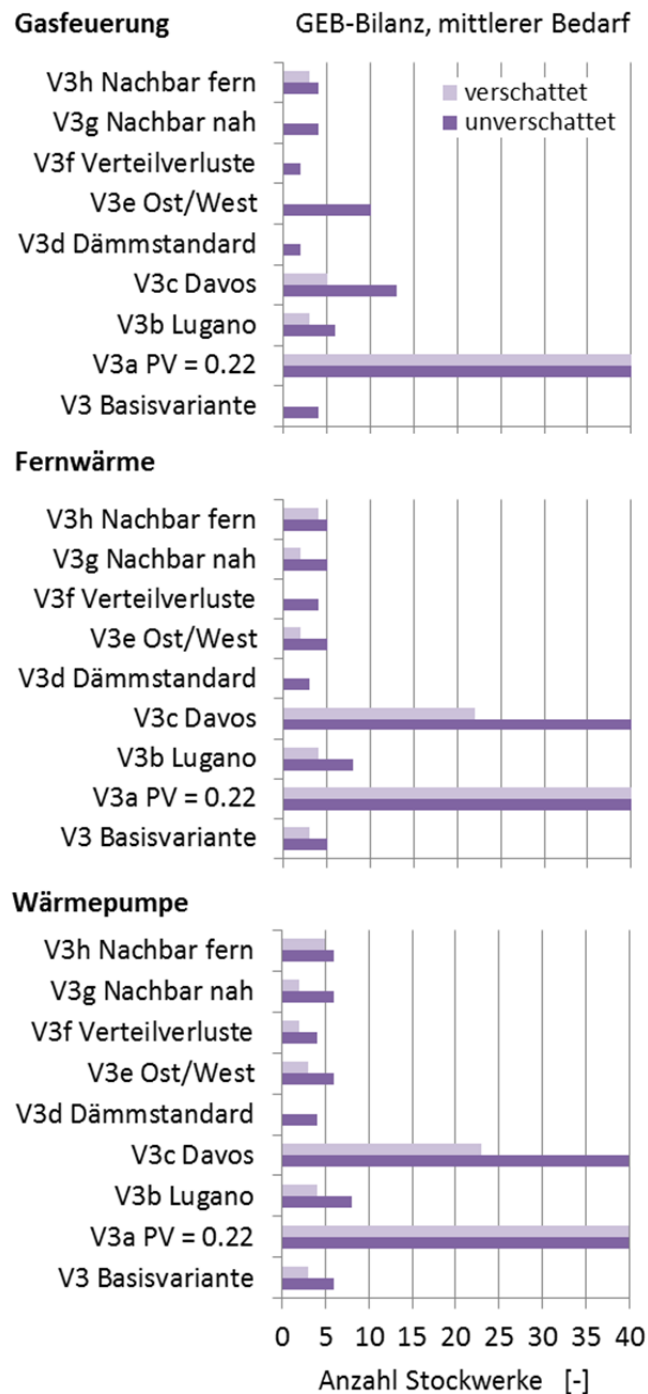


Bild 77: Anzahl Stockwerke, für die eine GEB-Nullbilanz von Variante 3 (quadratischer Grundriss eines Verwaltungsbaus) erreicht werden kann. Die Bilanzen sind mit nationalen Gewichtungsfaktoren bewertet (mittlerer (Strom-)Bedarf: $30 \text{ kWh}_{\text{EE}}/(\text{m}^2 \text{ a})$, Lüftung $2 \text{ kWh}_{\text{EE}}/(\text{m}^2 \text{ a})$).

Für den mittleren Bedarf gibt es keine einzelnen Diagramme.

9.3.3 Variante 4

9.3.3.1 Variante 4a " $\eta_{PV} = 0.22$ "

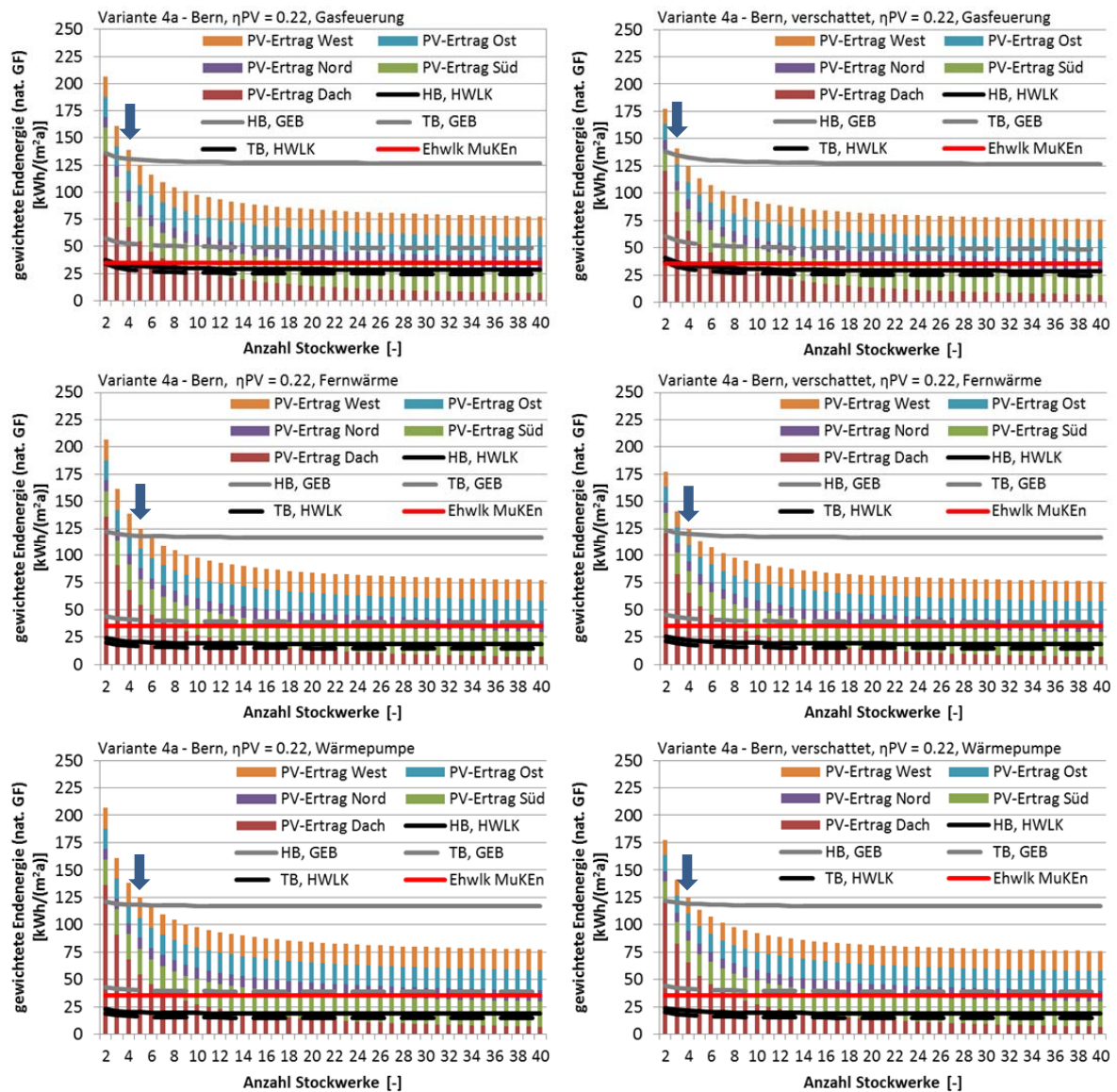


Bild 78: Variante 4a " $\eta_{PV} = 0.22$ ": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.3.2 Variante 4b "Lugano"

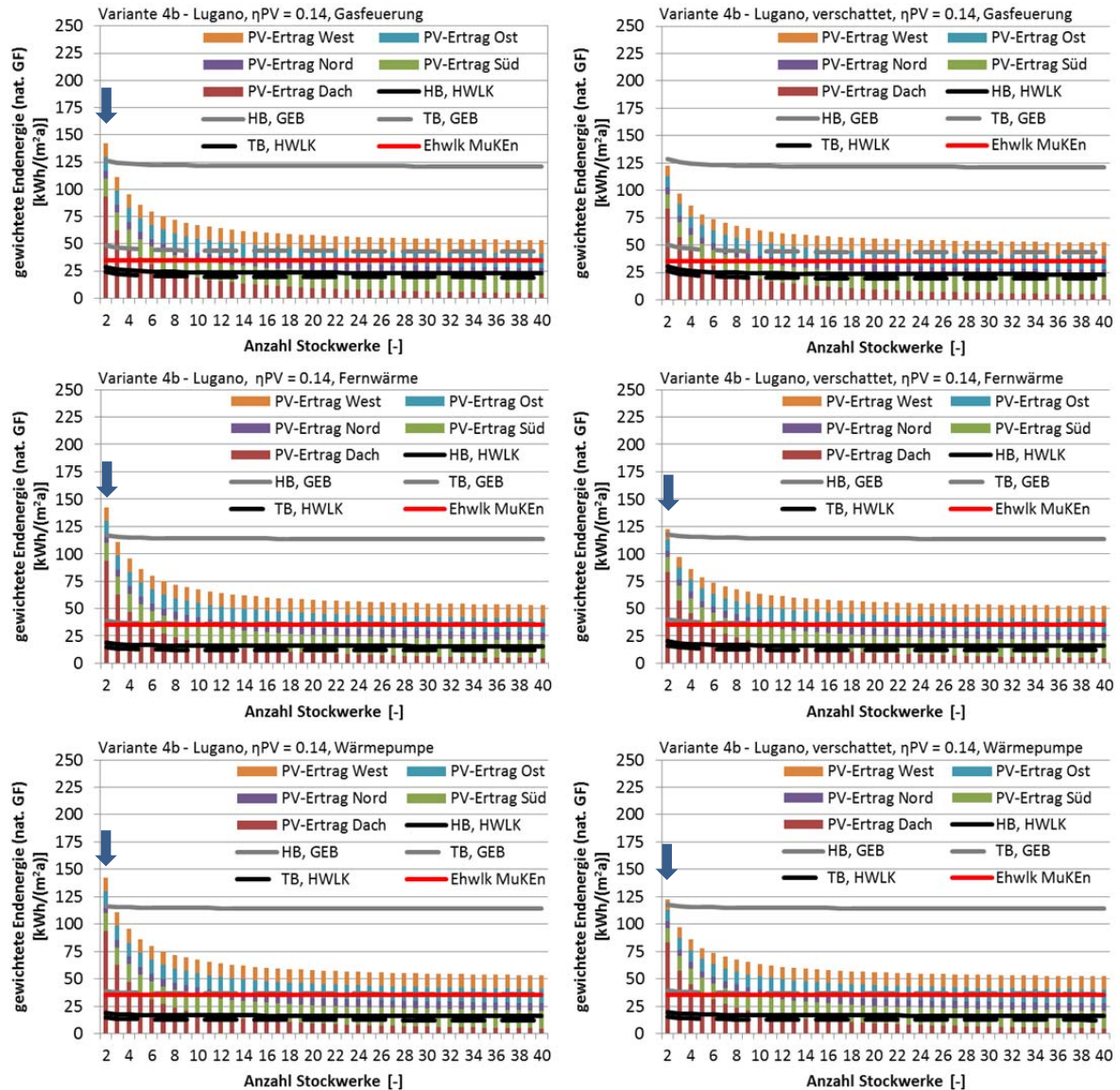


Bild 79: Variante 4b "Lugano": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.3.3 Variante 4c "Davos"

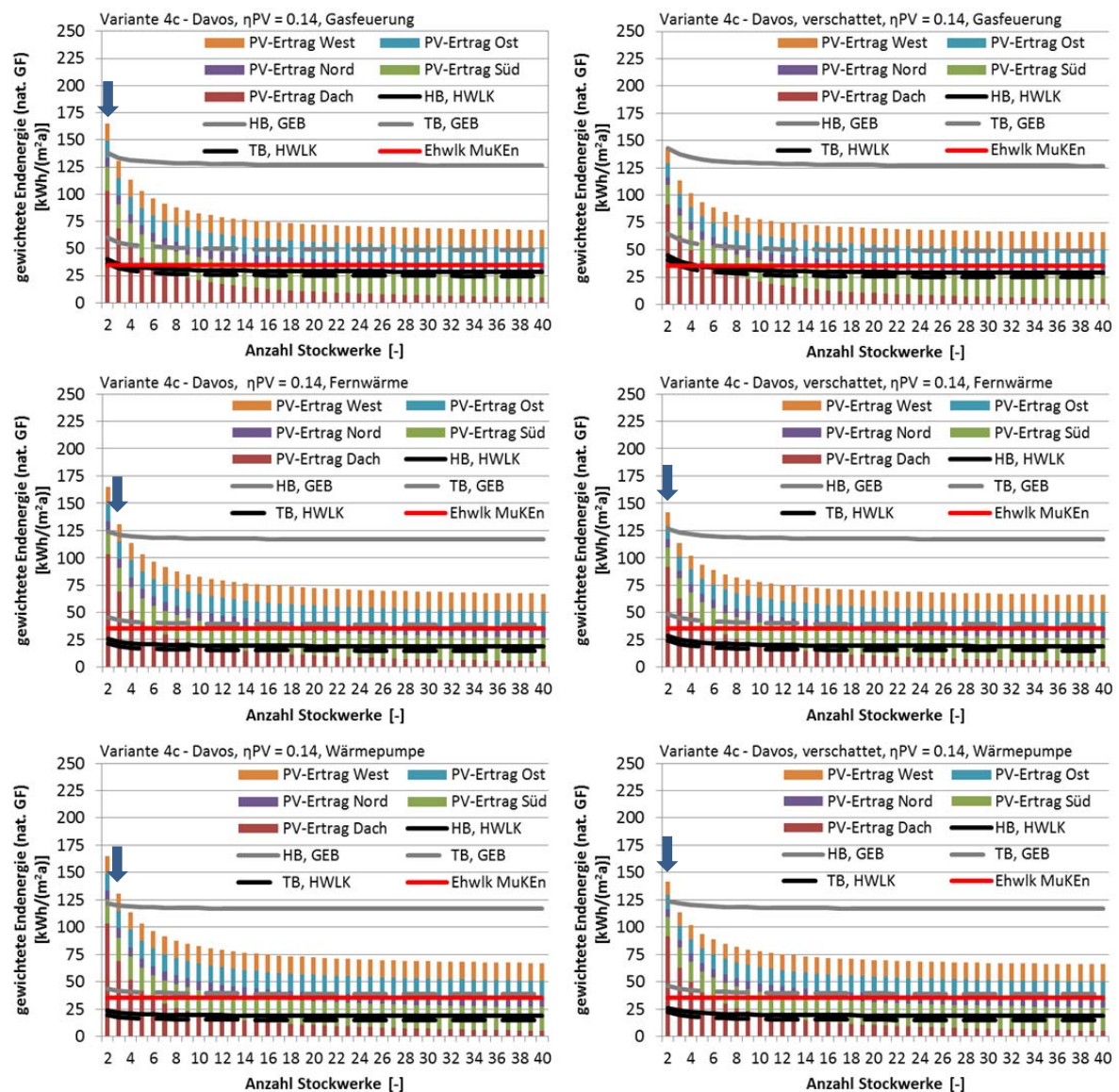


Bild 80: Variante 4c "Davos": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.3.4 Variante 4d "Dämmstandard"

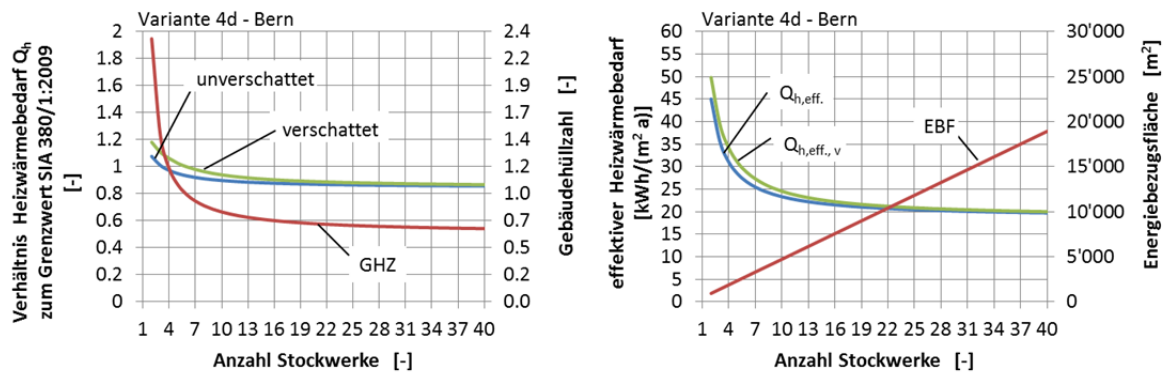


Bild 81: Variante 4d: Effektiver Heizwärmebedarf und Anteil am Grenzwert nach SIA 380/1:2009. Energiebezugsfläche und Gebäudehüllzahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (Dämmstandard: Tabelle 3).

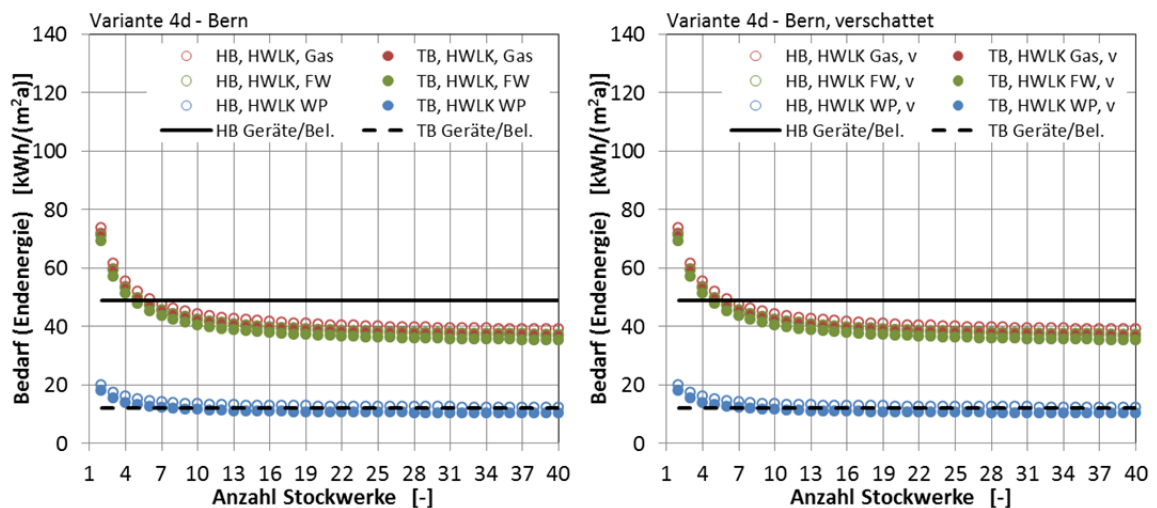


Bild 82: Variante 4d: ungewichtete Endenergie in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke (links: unverschattet, rechts: verschattet, tiefer/hoher Bedarf (Geräte/Beleuchtung) 12/49 kWh_{EE}/(m²a).

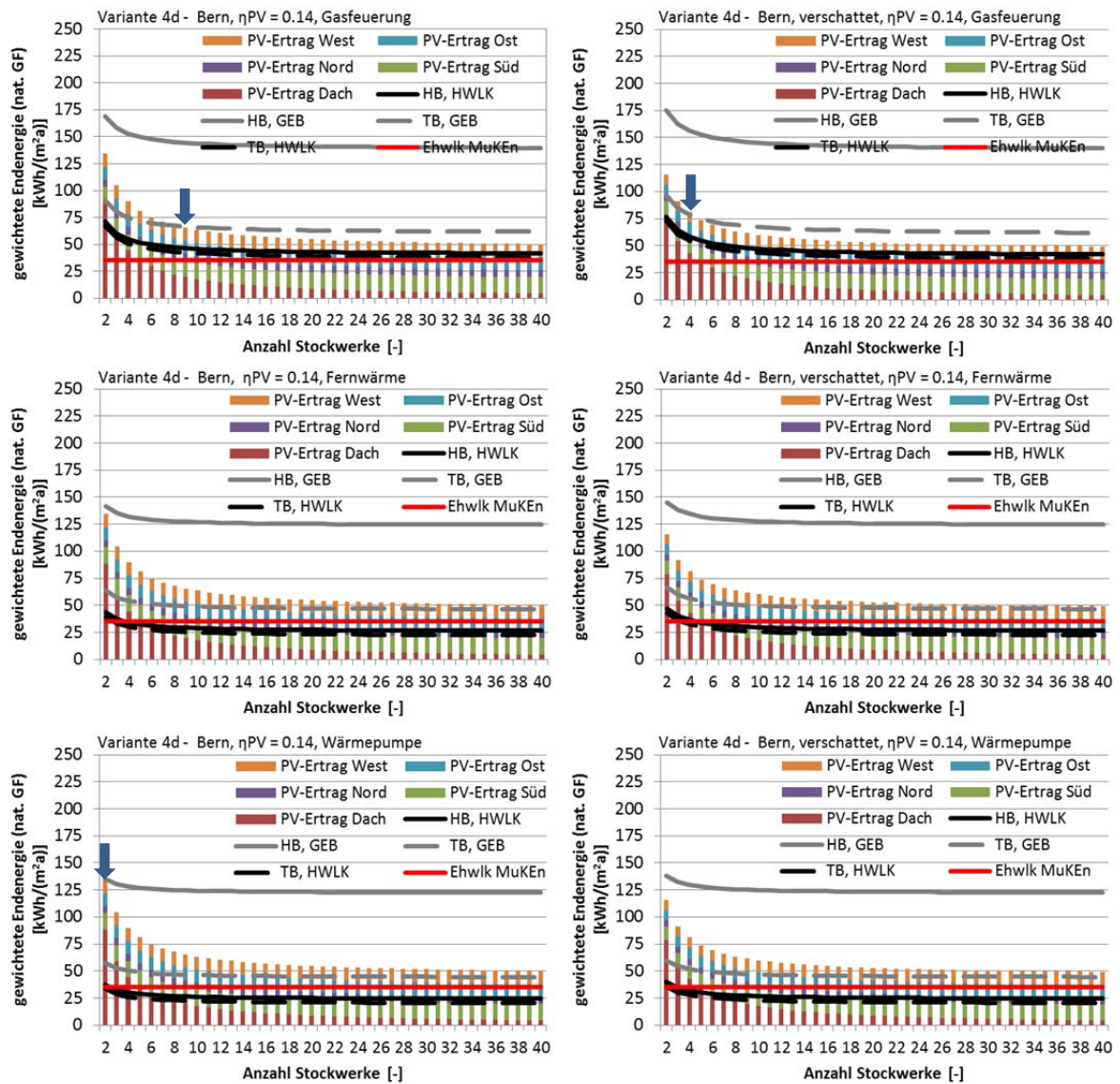


Bild 83: Variante 4d "Dämmstandard": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.3.5 Variante 4e "Verteilverluste"

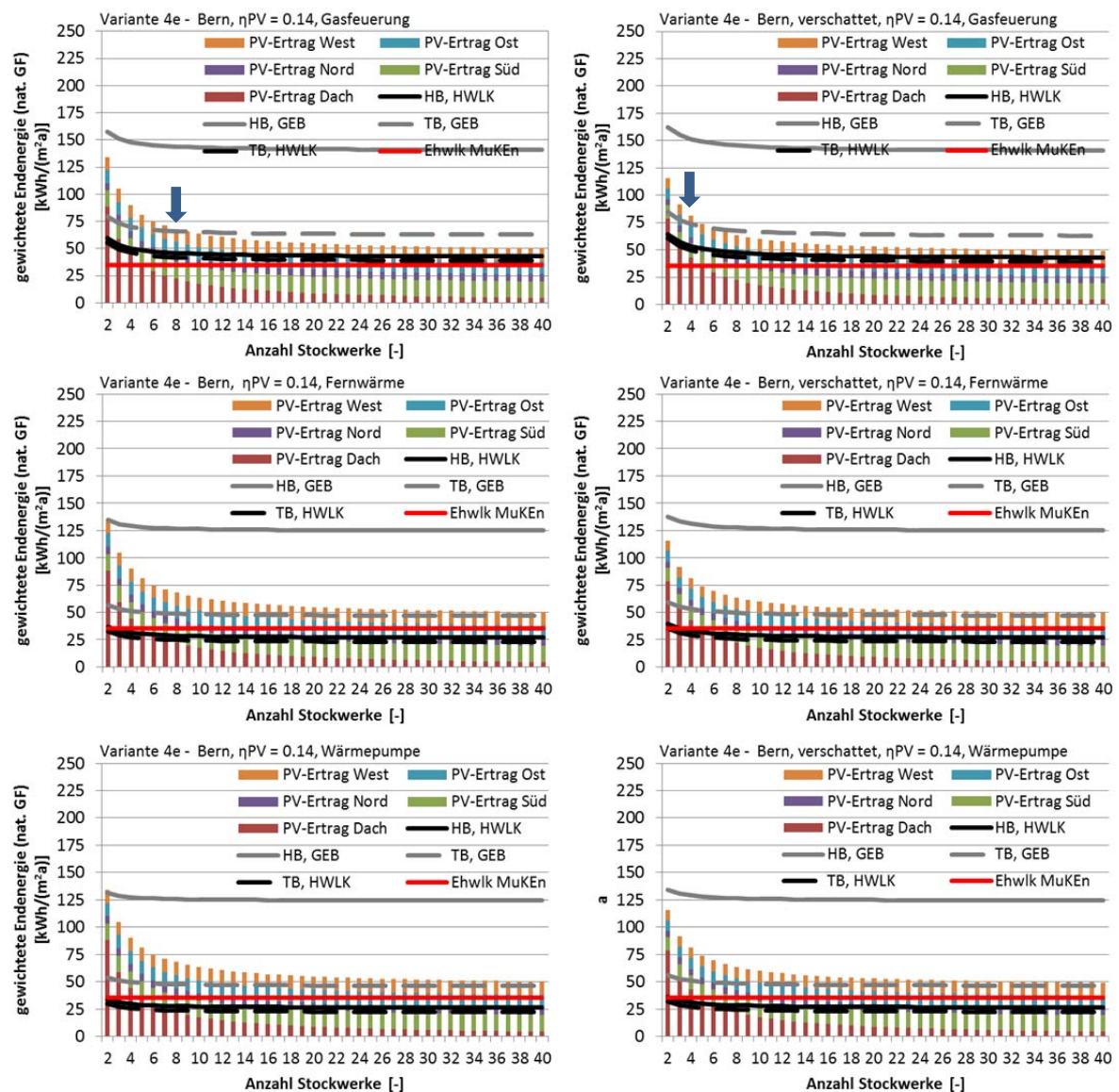


Bild 84: Variante 4e "Verteilverluste": Gewichtete Endenergie von Bedarf und PV-Ertrag unter Berücksichtigung mit/ohne Verschattung von 10-stöckigen Nachbargebäuden in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke.

9.3.3.6 Variante 4 - Überblick für einen "mittleren Bedarf".

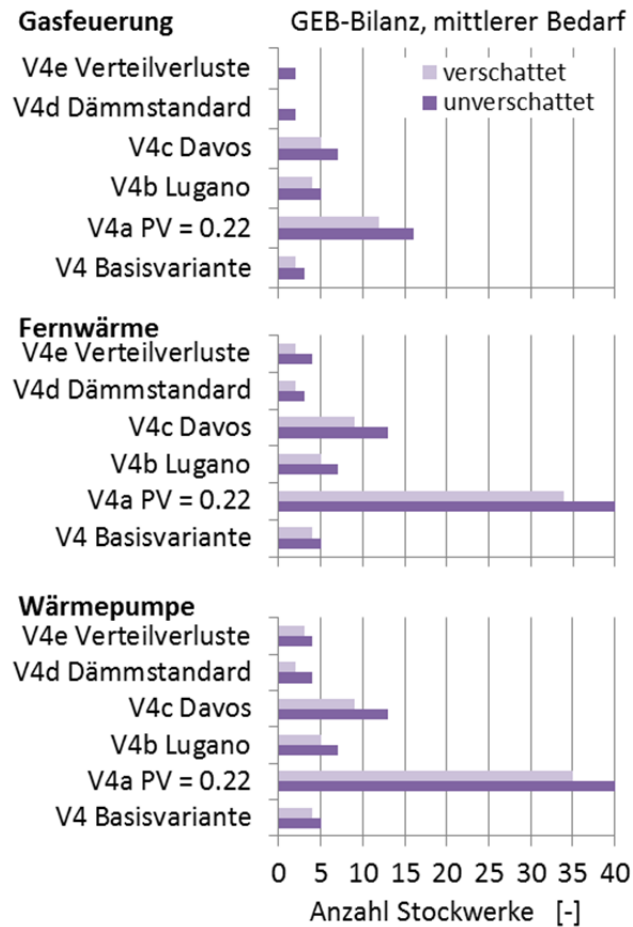


Bild 85: Anzahl Stockwerke, für die eine GEB-Nullbilanz von Variante 4 (quadratischer Grundriss eines Verwaltungsbaus) erreicht werden kann. Die Bilanzen sind mit nationalen Gewichtungsfaktoren bewertet (mittlerer(Strom-)Bedarf: 30 kWh_{EE}/(m² a), Lüftung 2 kWh_{EE}/(m² a)).

Für den mittleren Bedarf gibt es keine einzelnen Diagramme.

9.4 PV-Flächen

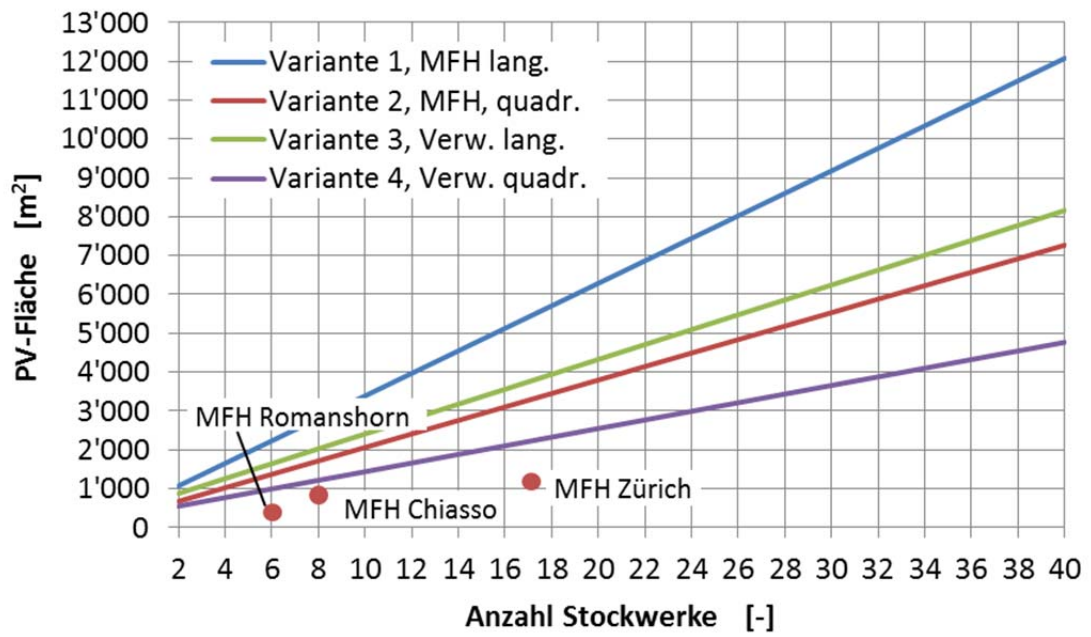


Bild 86: PV-Fläche in Abhängigkeit von der Anzahl der Stockwerke. Dach und Fassaden sind komplett belegt.

9.5 Daten für Beispielgebäude

Tabelle 28: Daten für MFH Sihlweidstrasse 1 in Zürich [37], MFH in Romanshorn [1] und MFH in Chiasso [1].

EBF	8'434 m ²	PV-FI./EBF	0.15 m ² _{PV} /(m ² _{EBF} a)
PV-Fläche	1'234 m ²	PV-Ertrag/PV-FI.	38.9 kWh/(m ² _{PV} a)
Peak	108 kWp	Peak/EBF	12.8 Wp/m ² _{EBF}
		Peak/PV-FI.	87.8 Wp/m ² _{PV}

	Nutzenergie [kWh/(m ² a)]	Wirkungs- grad [-]	Endenergie [kWh/(m ² a)]	nat. GF	gew. Endenergie [kWh/(m ² a)]
Raumwärme	13.6	0.75	18.1	0.7	12.7
Warmwasser	13.9	0.5	27.8	0.7	19.4
Hilfsenergie			0.6	2	1.1
Lüftung			2.8	2	5.6
Beleuchtung			5.0	2	10.0
Betriebsenergie			6.9	2	13.9
Total			61.2		62.7
PV-Ertrag			5.7	2	11.4
PV-Ertrag/Bedarf			9%		18%

	Romanshorn	Chiasso	
EBF	2'361	1'373	m ²
PV-Fläche	442	827	m ²
SK-Fläche	69	46	m ²
Peak Dach	26.3	36	kWp
Peak Fassade	53	52.6	kWp
Peak / EBF	33.6	64.5	Wp/m ² _{EBF}
Peak / PV-Fläche	119.9	63.6	Wp/m ² _{PV}
Wärmeerzeuger	Luft-Wasser WP		WP
Bedarf, Wärme		28.5	kWh _{EE} /(m ² _{EBF} a)
Bedarf, Elektrizität	35.6	17.0	kWh _{EE} /(m ² _{EBF} a)
PV-Ertrag	21.9	34.7	kWh _{EE} /(m ² _{EBF} a)
SK-Ertrag	16.1	17.1	kWh _{EE} /(m ² _{EBF} a)
PV-FI./EBF	0.19	0.60	m ² _{PV} /m ² _{EBF}
PV-Ertrag/PV-FI.	116.7	57.7	kWh _{EE} /(m ² _{PV} a)
SK-FI./EBF	0.03	0.03	m ² _{SK} /m ² _{EBF}
Ertrag/Bedarf	107%	114%	
Bedarf abzügl. SK	39.0	56.9	kWh _{ECH} /(m ² _{EBF} a)
PV-Ertrag	43.7	69.5	kWh _{ECH} /(m ² _{EBF} a)

PV-Module

Zürich: Sharp NA-F128(G5) Modulwirkungsgrad 9% [28], [29]

Romanshorn: Panasonic, Modulwirkungsgrad 18% (www.hollinger-solar.ch)

Chiasso: Dünnschichtmodule (beschattete Seiten) und monokristalline Module (unverschattete Seite) an der Fassade und den Brüstungselemente, Hochleistungszellen auf dem Dach, Garage und Pergola im obersten Geschoss, Sunpower-Module (www.gasserbaumaterialien.ch); eigene Annahmen: Sunpower-Module: 20% (Internet), Dünnschicht: 9%; Annahme: 50% der Peakleistung je Modultyp: ca. 14% im Mittel

Wärmeerzeuger

Zürich: Pellets

Romanshorn: Luft-Wasser-Wärmepumpe, therm. Solarkollektor

Chiasso: Erdsonde-Wärmepumpe, therm. Solarkollektor