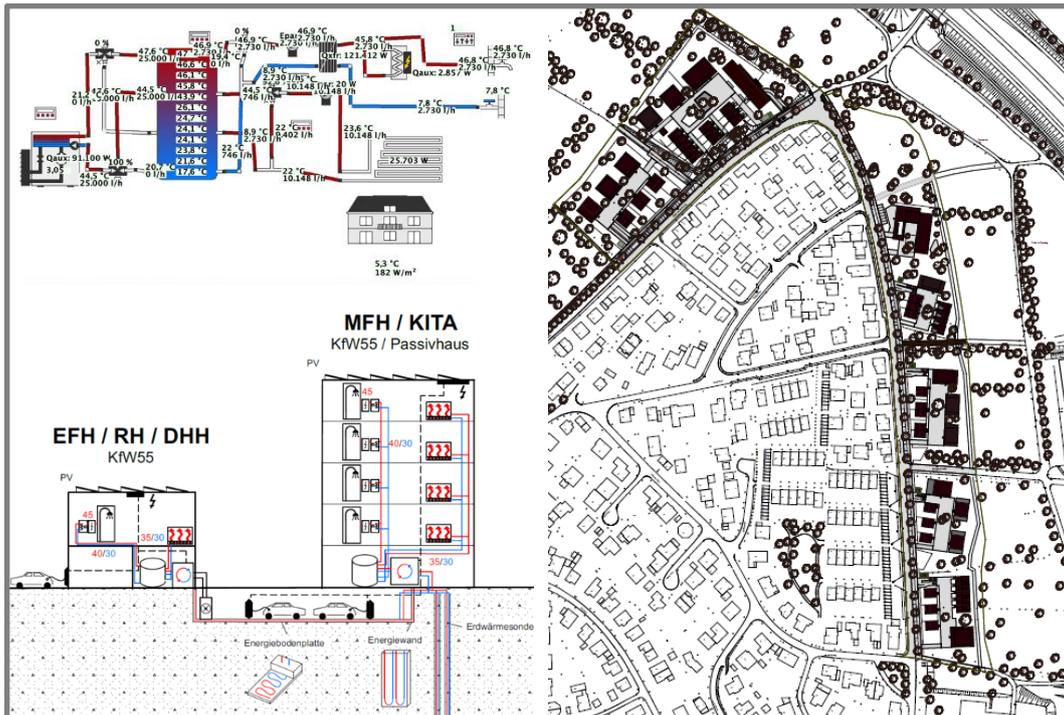


# Abschlussbericht Energiekonzept Esslinger Str. / Heidenheimer Str.



**Projekt:** Energiekonzept Esslinger Straße

**Auftraggeber:** Stadt Karlsruhe,  
Umwelt- und Arbeitsschutz  
Karl-Friedrich-Str. 10, 76133 Karlsruhe

**Erstellt:** Team für Technik GmbH  
Büro Karlsruhe  
Zunftstraße 11  
76227 Karlsruhe  
Tel. 0721.60 32 00-56  
Email karlsruhe@ftgmbh.de

**Datum:** 28.09.2021

**Version:** Abschlussbericht

## Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>2</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>3</b>
<b>2 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE</b>	<b>4</b>
<b>3 ERGEBNISSE DER QUARTIERSBETRACHTUNG</b>	<b>5</b>
3.1 DARSTELLUNG DER VARIANTEN	5
3.1.1 VARIANTE 1	5
3.1.2 VARIANTE 2	7
3.1.3 VARIANTE 3	9
3.1.4 GEG-REFERENZGEBÄUDE	11
3.2 WIRTSCHAFTLICHKEIT	13
3.3 PRIMÄRENERGIEBEDARF UND CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN	16
3.4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE AUF QUARTIERSEBENE	19
<b>4 ERGEBNISSE DES BEISPIELGEBÄUDES EINFAMILIENHAUS (EFH)</b>	<b>20</b>
4.1 DARSTELLUNG DER VARIANTEN	20
4.1.1 VARIANTE 1	20
4.1.2 VARIANTE 2	21
4.1.3 VARIANTE 3	22
4.1.4 GEG-REFERENZGEBÄUDE	22
4.2 WIRTSCHAFTLICHKEIT	23
4.3 PRIMÄRENERGIEBEDARF UND CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN	25
4.4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DES BEISPIELGEBÄUDES EFH	28
<b>5 ERGEBNISSE DES BEISPIELGEBÄUDES MEHRFAMILIENHAUS (MFH)</b>	<b>29</b>
5.1 DARSTELLUNG DER VARIANTEN	29
5.1.1 VARIANTE 1	29
5.1.2 VARIANTE 2	30
5.1.3 VARIANTE 3	31
5.1.4 GEG-REFERENZGEBÄUDE	32
5.2 WIRTSCHAFTLICHKEIT	33
5.3 PRIMÄRENERGIEBEDARF UND CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN	35
5.4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DES BEISPIELGEBÄUDES MFH	38
<b>6 WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN ZUR ERSTELLUNG DES ENERGIEKONZEPTES</b>	<b>39</b>
6.1 TECHNISCHE ANALYSEN	39
6.1.1 ANALYSE EINES NAHWÄRMENETZES	39
6.1.2 ANALYSE DER TRINKWARMWASSERBEREITUNG	43
6.1.3 ANALYSE DER WÄRMEQUELLEN	45
6.1.4 ANALYSE PHOTOVOLTAIK UND E-MOBILITÄT	48
6.2 ANALYSE DER WIRTSCHAFTLICHKEIT	55
6.3 ANALYSE DER GRAUEN ENERGIE	57
6.4 SIMULATION	58
6.4.1 SIMULATIONSMODELL	58
6.4.2 SIMULATION DER JAHRESARBEITSAHLEN DER WÄRMEPUMPEN	59
6.4.3 SIMULATION STROM FÜR PHOTOVOLTAIK UND E-MOBILITÄT	59
<b>7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>62</b>
<b>8 TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>64</b>
<b>9 LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>65</b>

## 1 Einleitung

Das Ziel des Energiekonzeptes Esslinger Straße ist die Erreichung eines klimaneutralen Neubaugebietes hinsichtlich der Strom- und Wärmeversorgung. Mit dem vorliegenden Konzept sollen der Stadt oder zukünftigen Bauträgern/Investoren Empfehlungen mitgegeben werden, wie eine CO<sub>2</sub>-arme Versorgung möglich ist, die gleichzeitig auch wirtschaftlich Sinn macht.

Für die Untersuchung wurden sowohl verschiedene Wärmeschutzstandards von Gebäuden, als auch die Wärme- und Stromversorgung im Quartier analysiert. In Zusammenarbeit mit dem Amt für Umwelt- und Arbeitsschutz der Stadt Karlsruhe, dem Stadtplanungsamt Karlsruhe und den Stadtwerken Karlsruhe wurden drei zu betrachtende Varianten von Energiekonzepten festgelegt.

Nach der Konzipierung der drei Varianten wurden die festgelegten Konzepte in einer computergestützten Simulation abgebildet und es wurden ausführliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt.

Kapitel 2 bietet eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Betrachtungen. Ausführliche Ergebnisse zu Wirtschaftlichkeit und zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß für das Quartier sind in Kapitel 3 dargestellt. In Kapitel 4 und 5 folgen die ausführlichen Ergebnisse für die Beispielgebäude des Typs Einfamilienhaus und des Typs Mehrfamilienhaus. Im letzten Kapitel 6 sind dann weiterführende Informationen zur Analyse und den Zwischenergebnissen der Untersuchungen veranschaulicht.

## 2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit den Energiekonzepten kann für das Quartier mit Fokus auf den Wärmeschutzstandard der Gebäude sowie der Wärme- und Stromversorgung ein CO<sub>2</sub>-neutrales Quartier sichergestellt werden, das auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine sinnvolle Lösung darstellt.

Für die empfohlenen Varianten werden ausschließlich Wärmepumpen eingesetzt. Eine Gasversorgung kann wirtschaftlich nicht empfohlen werden und würde gegenüber der Varianten mit Wärmepumpen zu einem deutlich höheren Ausschuss von CO<sub>2</sub> im Quartier führen.

Mit den anschließenden Empfehlungen werden die wirtschaftlichen und ökologischen Ergebnisse der Untersuchungen berücksichtigt.

### **Empfehlungen für die Bauträger:**

#### **Gebäudetyp EFH**

- Wärmeschutzstandard KfW40
- Wärmeerzeugung über Luft-Wasser-Wärmepumpe oder Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Wärmequelle thermoaktive Bauteile
- Trinkwarmwasserbereitung über Frischwasserstationen und nachgeschaltete Durchlauferhitzer
- Großflächige Installation von PV-Modulen auf dem Flachdach

#### **Gebäudetyp MFH**

- Wärmeschutzstandard KfW40
- Wärmeerzeugung über Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Wärmequelle thermoaktive Bauteile und/oder Erdsonden
- Trinkwarmwasserbereitung pro Wohnung über Frischwasserstationen und nachgeschaltete Durchlauferhitzer
- Großflächige Installation von PV-Modulen auf dem Flachdach

### **Empfehlungen für die Stadt:**

- Alle Gebäude im Quartier mindestens in Wärmeschutzstandard KfW40
- Wärmeversorgung der Gebäude ausschließlich über Wärmepumpen
- Kein Gasnetz im Quartier, sowohl aus wirtschaftlicher als auch ökologischer Sicht
- Großflächiger Einsatz von PV-Anlagen auf den Flachdächern

### 3 Ergebnisse der Quartiersbetrachtung

#### 3.1 Darstellung der Varianten

##### 3.1.1 Variante 1

In Variante 1 haben alle Gebäude den Wärmeschutzstandard Passivhaus.

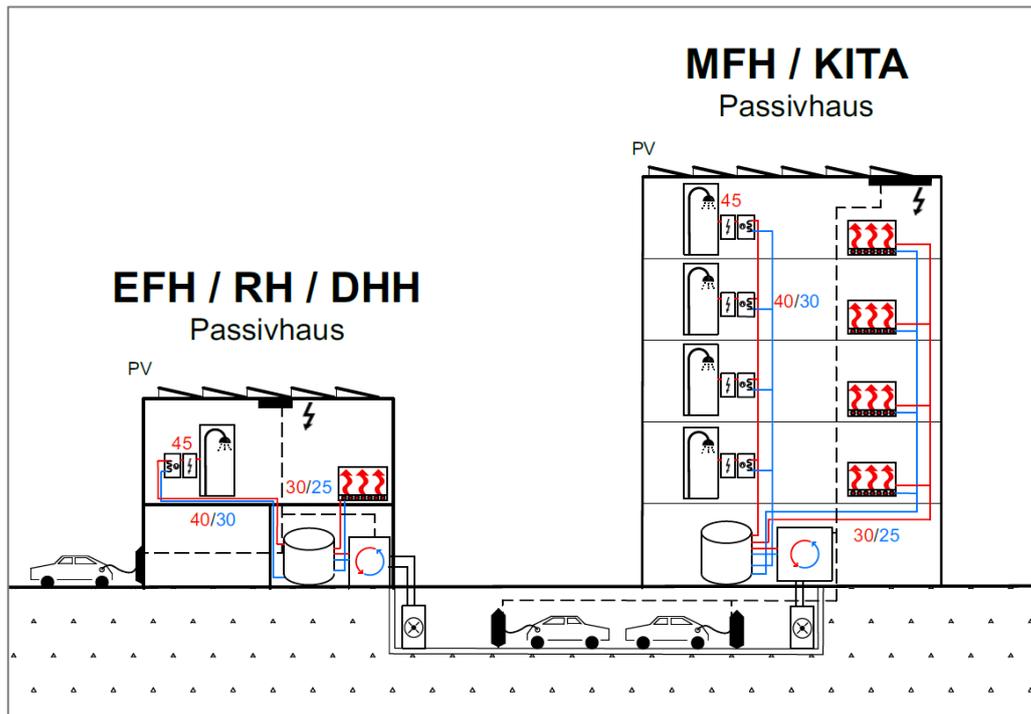


Abbildung 1: Energiekonzept in Variante 1 mit den Gebäudetypen EFH/RH/DH und MFH/KITA auf Quartierebene

Die Wärmeversorgung der Gebäude findet in Variante 1 ausschließlich über Luft-Wasser-Wärmepumpen statt. Die Trinkwarmwasserbereitung wird, wie bei allen Varianten mit Wärmepumpen, über dezentrale Frischwasserstationen und nachgeschaltete Durchlauferhitzer sichergestellt.

Die Stromerzeugung findet über den großflächigen Einsatz von PV-Anlagen mit flacher Anbringung auf den Flachdächern der Gebäude statt.



Abbildung 2: Lageplan des Energiekonzeptes im Quartier bei Variante 1

### 3.1.2 Variante 2

In Variante 2 haben alle Gebäude, außer der KITA, den Wärmeschutzstandard KfW 40. Die KITA hat als öffentliches Gebäude den Passivhaus-Standard.

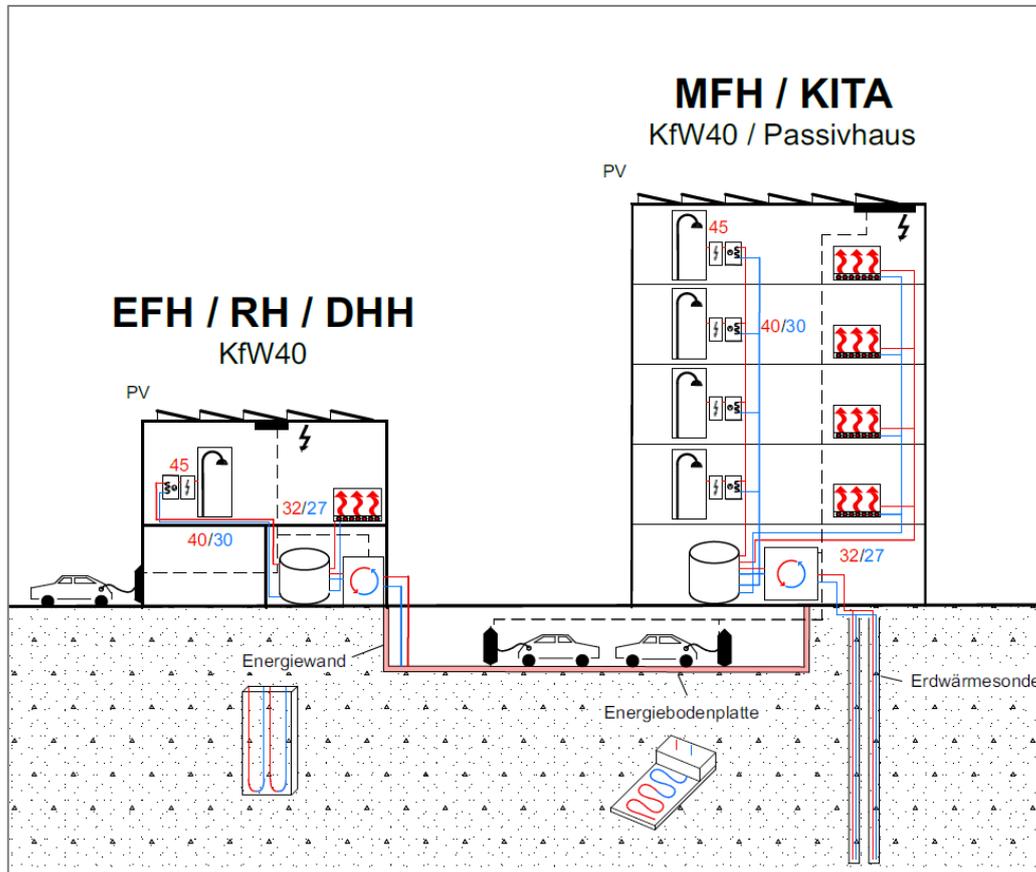


Abbildung 3: Energiekonzept in Variante 2 mit den Gebäudetypen EFH/RH/DH und MFH/KITA auf Quartiersebene

Die Wärmeversorgung der Gebäude findet in Variante 2 ausschließlich über Wasser-Wasser-Wärmepumpen bzw. Sole-Wasser-Wärmepumpen statt.

Als Wärmequelle dienen die thermoaktiven Bauteile (Energiewand + Energiebodenplatte) sowie zusätzlich die Erdwärmesonden.

Die Trinkwarmwasserbereitung wird, wie bei allen Varianten mit Wärmepumpen, über dezentrale Frischwasserstationen und nachgeschaltete Durchlauferhitzer sichergestellt.

Die Stromerzeugung findet über den großflächigen Einsatz von PV-Anlagen mit flacher Anbringung auf den Flachdächern der Gebäude statt.



Abbildung 4: Lageplan des Energiekonzeptes im Quartier bei Variante 2

### 3.1.3 Variante 3

In Variante 3 haben alle Gebäude, außer der KITA, den Wärmeschutzstandard KfW 55. Die KITA hat als öffentliches Gebäude den Passivhaus-Standard.

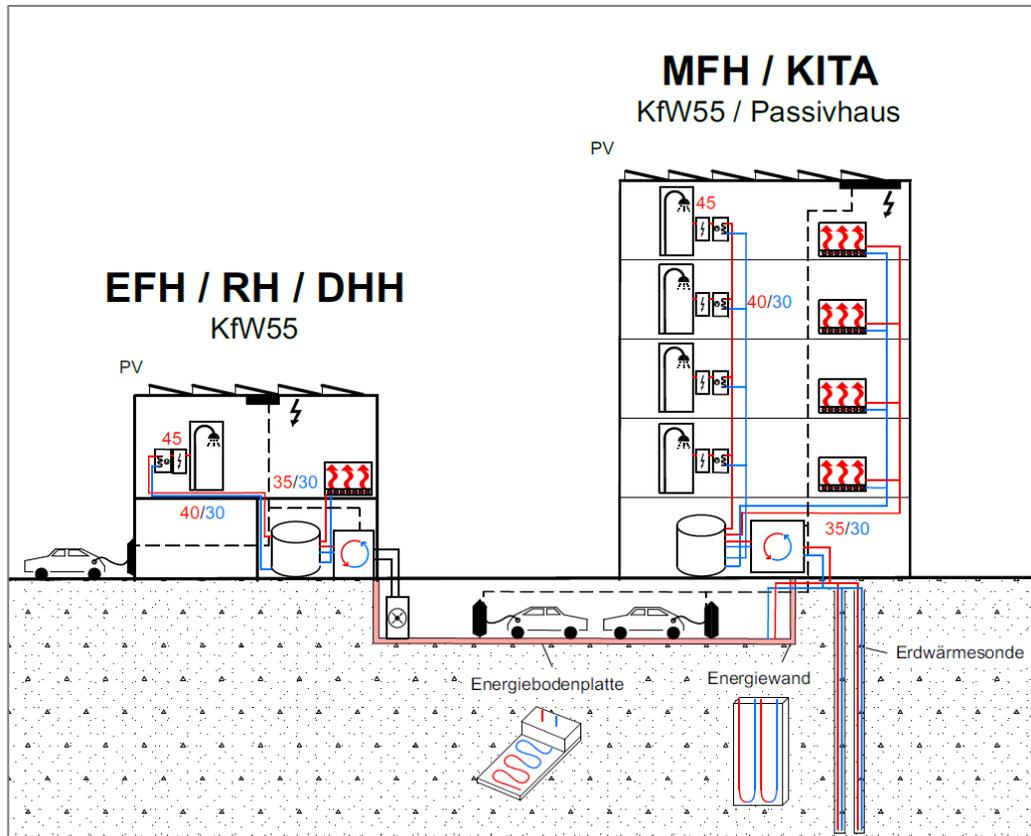


Abbildung 5: Energiekonzept in Variante 3 mit den Gebäudetypen EFH/RH/DH und MFH/KITA auf Quartiersebene

In Variante 3 teilt sich die die Wärmeversorgung in Luft-Wasser-Wärmepumpen bei den Gebäudetypen EFH/RH/DH und Wasser-Wasser-Wärmepumpen bzw. Sole-Wasser-Wärmepumpen bei den Gebäudetypen MFH/KITA auf.

Als Wärmequelle für die Wasser-Wasser-Wärmepumpen bzw. Sole-Wasser-Wärmepumpen dienen wiederum die thermoaktiven Bauteile (Energiewand + Energiebodenplatte) sowie zusätzlich die Erdwärmesonden.

Die Trinkwarmwasserbereitung wird, wie bei allen Varianten mit Wärmepumpen, über dezentrale Frischwasserstationen und nachgeschaltete Durchlauferhitzer sichergestellt.

Die Stromerzeugung findet über den großflächigen Einsatz von PV-Anlagen mit flacher Anbringung auf den Flachdächern der Gebäude statt.



Abbildung 6: Lageplan des Energiekonzeptes in Variante 3 auf Quartiersebene

### 3.1.4 GEG-Referenzgebäude

Beim GEG-Referenzgebäude haben alle Gebäudetypen den Mindestwärmeschutzstandard sowie die Anlagentechnik des Referenzgebäudes des GEG2020.

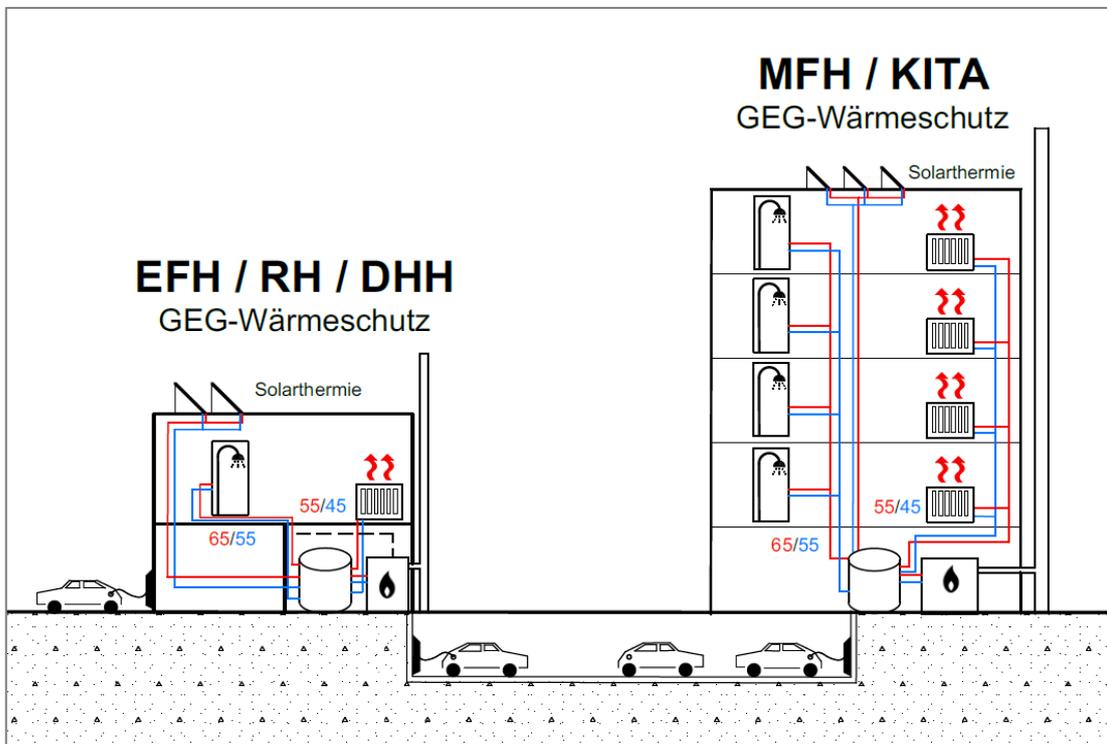


Abbildung 7: Variante mit GEG-Referenzgebäuden mit den Gebäudetypen EFH/RH/DH und MFH/KITA auf Quartierebene

Beim GEG-Referenzgebäude wird bei allen Gebäudetypen die Wärmeversorgung über einen Gas-Brennwertkessel mit Solarthermie-Anlage sichergestellt. Die Solarthermie-Anlage dient dabei ausschließlich zur Trinkwarmwasserbereitung (TWW) und deckt einen Anteil von 15% des kompletten Wärmebedarfs des Gebäudes.

Beim GEG-Referenzgebäude gibt es eine zentrale Trinkwarmwasserbereitung und keine PV-Anlage auf den Dächern der Gebäude.



Abbildung 8: Lageplan der Variante mit GEG -Referenzgebäuden auf Quartiersebene

### 3.2 Wirtschaftlichkeit

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die wichtigsten Kenndaten zur Wirtschaftlichkeit der Varianten der Energiekonzepte im Quartier dargestellt.

Bei der Förderung wurden die Fördersätze des KfW Programms 461 - Zuschuss für KfW-Effizienzhäuser angesetzt. Je nach Effizienzhaus-Standard (z.B. KfW40 oder KfW 55) gibt es unterschiedlich hohe Fördersätze. Die Förderung besteht aus einem Zuschuss, der pro Wohneinheit bzw. prozentual nach den maximalen Kosten gewährt wird. Für den Effizienzhaus-Standard gibt es zwei Kriterien, den Transmissionswärmeverlust (baulicher Wärmeschutz des Gebäudes) und den Primärenergiebedarf, der beispielsweise von der Auswahl der Wärmeerzeugung abhängig ist.

<b>Wirtschaftlichkeit der Energiekonzepte auf Quartiersebene</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
Investitionskosten ohne Wärmeerzeugung <sup>1</sup>	35.941 T€	32.357 T€	31.769 T€	28.744 T€
Investitionskosten der Wärmeerzeugung	1.545 T€	2.410 T€	2.483 T€	1.736 T€
Summe der Investitionskosten	37.486 T€	34.766 T€	34.252 T€	30.480 T€
Förderung	5.400 T€	5.400 T€	4.200 T€	-
<b>Investitionskosten mit Förderung</b>	<b>32.086 T€</b>	<b>29.366 T€</b>	<b>30.052 T€</b>	<b>30.480 T€</b>
Jährliche Energiekosten der Wärmeerzeugung <sup>2</sup>	44 T€/a	50 T€/a	62 T€/a	125 T€/a
Jährliche Betriebs- und Instandhaltungskosten der Wärmeerzeugung <sup>3</sup>	51 T€/a	56 T€/a	66 T€/a	40 T€/a
<b>Gesamtkosten nach 30 Jahren</b>	<b>34.954 T€</b>	<b>32.534 T€</b>	<b>33.912 T€</b>	<b>35.429 T€</b>

Tabelle 1: Wirtschaftlichkeit der Energiekonzepte auf Quartiersebene

<sup>1</sup> Brutto-Investitionskosten des Gebäudetyps Einfamilienhaus (Kostengruppen 300-700), ohne die Investitionskosten der Wärmeerzeugung und der PV-Anlagen – Hochgerechnet auf Februar 2020 und einschließlich Regionalfaktor Landkreis Karlsruhe

<sup>2</sup> Inkl. Berücksichtigung der erwarteten CO<sub>2</sub>-Kosten für den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren in Höhe von 120 €/t

<sup>3</sup> inkl. Berücksichtigung der Ersatzinvestitionen und der Restwerte der Anlagenteile der Wärmeerzeugung

Betrachtet man die Investitionskosten mit Berücksichtigung der Förderung fällt auf, dass die Varianten 2 und 3 der Energiekonzepte mit KfW40 bzw. KfW55-Standard bereits günstiger sind als die GEG-Variante. Die günstigsten Investitionskosten bei Berücksichtigung der Förderungen hat dabei das Energiekonzept der Variante 2 mit den Gebäuden in KfW40-Standard.

Die jährlichen Betriebskosten mit Energie- und Instandhaltungskosten sind bei den Varianten 1 bis 3 der Energiekonzepte gegenüber der GEG-Variante deutlich geringer.

Bei den Betriebskosten wurden auch die zukünftig zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Kosten berücksichtigt, die für den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren im Mittel mit 120 € je Tonne berechnet wurden. Für die Berechnung des Mittelwertes des CO<sub>2</sub>-Preises wurde der bereits festgelegte Wert je Tonne CO<sub>2</sub>, der vom Jahr 2021 bis zum Jahr 2025 jeweils um 5 € pro Jahr steigt, mit der gleichen Steigerung von 5 € pro Jahr bis zum Jahr 2053 fortgeführt. Bei dieser Annahme würde der Mittelwert des CO<sub>2</sub>-Preises vom Jahr 2023 bis zum Jahr 2053 120 € je Tonne betragen.

Bei Betrachtung der Gesamtkosten aus den Investitions- und Betriebskosten nach 30 Jahren schneiden die drei erstellten Energiekonzepte jeweils besser ab als die GEG-Variante. Das Energiekonzept der Variante 2 mit den Gebäuden in KfW40-Standard bleibt bei den Gesamtkosten nach 30 Jahren die günstigste Alternative.

Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich der Varianten in Tabelle 1 wurden PV-Anlagen noch nicht berücksichtigt, da diese bei der GEG-Variante nicht vorkommt und somit die Investitions- und Betriebskosten verfälscht hätte.

Für die Darstellung der Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen dient daher die nachfolgende Tabelle 2.

<b>Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen mit und ohne E-Autos auf Quartiersebene</b>	
Investitionskosten der PV-Anlagen im Quartier	755.603 €
Spezifische mittlere Kosten des produzierten Stroms aus den PV-Anlagen	0,12 €/kWh
Jährlicher Gewinn durch die PV-Anlagen im Quartier <sup>4</sup>	65.798 €/a
Durchschnittlicher Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlagen ohne E-Auto	59%
<b>Durchschnittliche Amortisation der PV-Anlagen ohne Berücksichtigung E-Autos</b>	<b>11 a</b>
Jährlicher Gewinn durch die PV-Anlagen im Quartier mit E-Autos <sup>5</sup>	79.233 €/a
Durchschnittlicher Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlagen mit E-Autos	77%
<b>Durchschnittliche Amortisation der PV-Anlagen mit Berücksichtigung E-Autos</b>	<b>10 a</b>

Tabelle 2: Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen im Quartier

In der Tabelle 2 ist zu erkennen, dass die PV-Anlagen im Quartier eine gute Wirtschaftlichkeit erzielen. Betrachtet man die PV-Anlagen ohne Berücksichtigung von E-Autos kann eine mittlere Amortisation von 11 Jahren erreicht werden.

Die spezifischen mittleren Kosten des produzierten Stroms sind mit 12 ct/kWh deutlich unter den Kosten des Stroms aus dem Netz mit 23 ct/kWh (Wärmepumpentarif) bzw. 30 ct/kWh (Standard-Tarif).

Die Förderung für den ins Netz eingespeisten Strom beträgt im Mittel knapp unter 8 ct/kWh und ist damit niedriger als die Kosten des produzierten Stroms. Somit wird der Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlagen für den Strom entscheidend für die Wirtschaftlichkeit. Werden E-Autos im Quartier berücksichtigt, können höhere Eigenverbrauchsanteile erreicht werden und die PV-Anlagen amortisieren sich mit einer Amortisationszeit von 10 Jahren.

Für weitergehende Informationen zu Annahmen über die E-Autos oder zur Verteilung des Eigenverbrauchs der Beispielgebäude im Jahresverlauf siehe Kapitel 6.1.4 und 6.4.3.

<sup>4</sup> Inkl. Abzug der jährlichen Betriebskosten der PV-Anlage

<sup>5</sup> mit Berücksichtigung von einem E-Auto pro Gebäudetyp EFH und zwei E-Autos pro Gebäudetyp MFH für die direkte Stromnutzung

### 3.3 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen

In den anschließenden Tabellen werden der Primärenergiefaktor und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Varianten miteinander verglichen.

Beim Primärenergiefaktor wurde je nach Energieträger der vorgegebene Wert aus der DIN V 18599 verwendet.

Bei Erdgas wurde ein CO<sub>2</sub>-Faktor von 240 g/kWh <sup>6</sup> und bei Strom aus dem Netz (allgemeiner Strommix) ein Faktor von 544 g/kWh <sup>7</sup> verwendet.

<b>Primärenergiefaktoren auf Quartiersebene</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
Primärenergiefaktor Wärme ohne PV <sup>8</sup>	0,50	0,40	0,43	1,10
Primärenergiefaktor Wärme mit PV <sup>9</sup>	0,38	0,31	0,33	-

Tabelle 3: Primärenergiefaktoren auf Quartiersebene

Wie in Tabelle 3 zu sehen, ist der Primärenergiefaktor der Variante 2 am niedrigsten, da hier ausschließlich effiziente Sole-Wasser-Wärmepumpen bei allen Gebäuden verwendet werden. Bei Variante 1 und 3 ist der Primärenergiefaktor geringfügig höher.

Gegenüber der GEG-Variante haben die Varianten 1 bis 3 der Energiekonzepte deutlich niedrige Primärenergiefaktoren.

Rechnet man die anteilige Stromnutzung der PV-Anlagen nach GEG2020 für die Wärmepumpen im Quartier mit ein, wird für alle Varianten der Energiekonzepte ein Primärenergiefaktor von unter 0,4 erreicht.

Beim jährlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf Quartiersebene ist neben dem Ausstoß von CO<sub>2</sub> für die Wärmeerzeugung noch der Ausstoß von CO<sub>2</sub> durch den Stromverbrauch von weiteren gebäudetechnische Anlagen (TGA) berücksichtigt (z.B. Beleuchtung, RLT, Heizungspumpen).

Der Ausstoß von CO<sub>2</sub> durch den Stromverbrauch für technische Gebäudeausrüstung (TGA) beträgt für das Beispielgebäude EFH 7,5 kWh/m<sup>2</sup>a NGF und für das Beispielgebäude MFH 5,9 kWh/m<sup>2</sup>a NGF. <sup>10</sup>

<sup>6</sup> CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwerte nach Gemis 4.9

<sup>7</sup> CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwert nach IFEU 2020

<sup>8</sup> Der spezifische Wert bezieht sich immer auf den Wärmeverbrauch der jeweiligen Variante. Der Wärmeverbrauch ist je nach Variante durch die verschiedenen Wärmeschutzstandards der Gebäude unterschiedlich

<sup>9</sup> Mittelwert berechnet nach den Vorgaben §23 GEG2020 – Anrechnung von Strom aus erneuerbaren Energien aus den Beispielgebäuden

<sup>10</sup> Die Stromverbrauchskennwerte ergeben sich aus der Studie „Energieverbrauchskennwerte energetisch hocheffizienter Gebäude“ von AGES, siehe S.32. Der Anteil der TGA und Beleuchtung ergibt sich aus der Studie „Der typische Haushalt-Stromverbrauch“ der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E., siehe S. 3.

<b>Gesamter CO<sub>2</sub>-Ausstoß inkl. grauer Energie auf Quartiersebene</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch die graue Energie beim Bau der Gebäude <sup>11</sup>	183 t/a			
CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch den Stromverbrauch der TGA <sup>12</sup>	67 t/a			
CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch die Wärmeversorgung	95 t/a	106 t/a	133 t/a	319 t/a

Tabelle 4: Jahresbilanz des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für die graue Energie, Nutzerstrom und Wärmeversorgung auf Quartiersebene

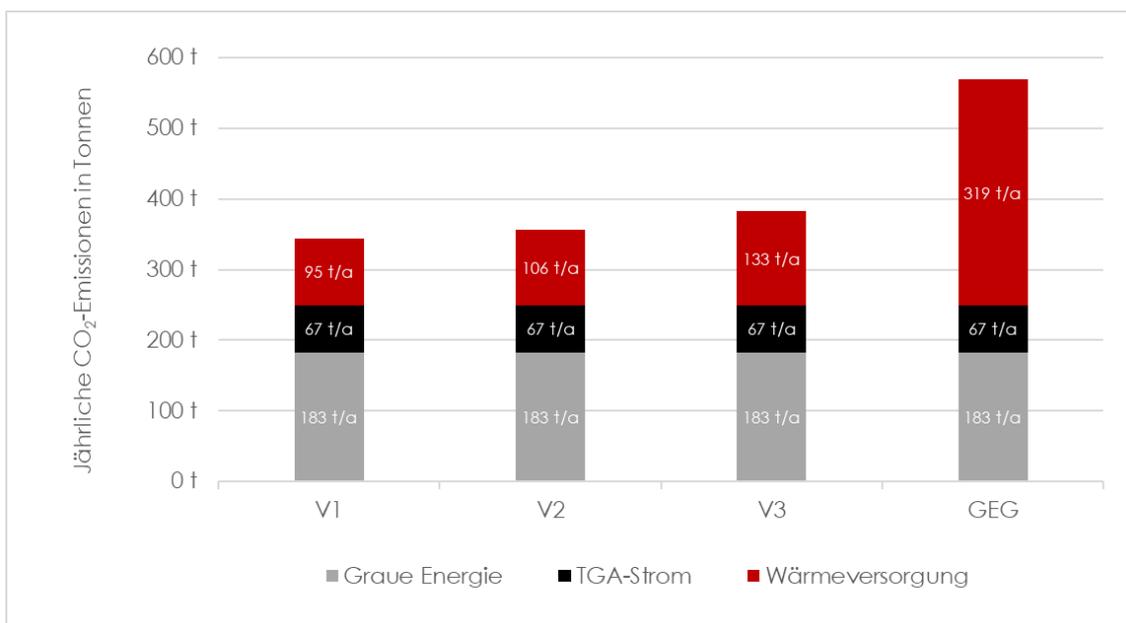


Abbildung 9: Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Varianten nach grauer Energie, Nutzerstrom und Wärmeversorgung auf Quartiersebene

Wie in der oberen Grafik deutlich wird, ist der Anteil des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der Wärmeerzeugung am gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoß inkl. grauer Energie bei den Varianten 1 bis 3 relativ gering und beträgt nur etwa 30%. Bei der GEG-Variante beträgt der Anteil dagegen fast 60%.

<sup>11</sup> Für die Ermittlung der grauen Energie wurde ein Mix der Gebäude aus 50% Holzbau und 50% Massivbau angenommen

<sup>12</sup> Stromverbrauch für die technische Gebäudeausrüstung (TGA), z.B. Beleuchtung, Heizpumpen, Lüftung, Kühlung

<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch Energieverbrauch im Betrieb auf Quartiersebene</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch Energieverbrauch im Betrieb <sup>13</sup>	161 t/a	173 t/a	200 t/a	386 t/a
CO <sub>2</sub> - Reduktion durch erzeugten Strom der PV-Anlagen	207 t/a			-
CO <sub>2</sub> -Ausstoß für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen	-45 t/a	-34 t/a	-7 t/a	-

Tabelle 5: Jahresbilanz des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für den Energieverbrauch im Betrieb auf Quartiersebene

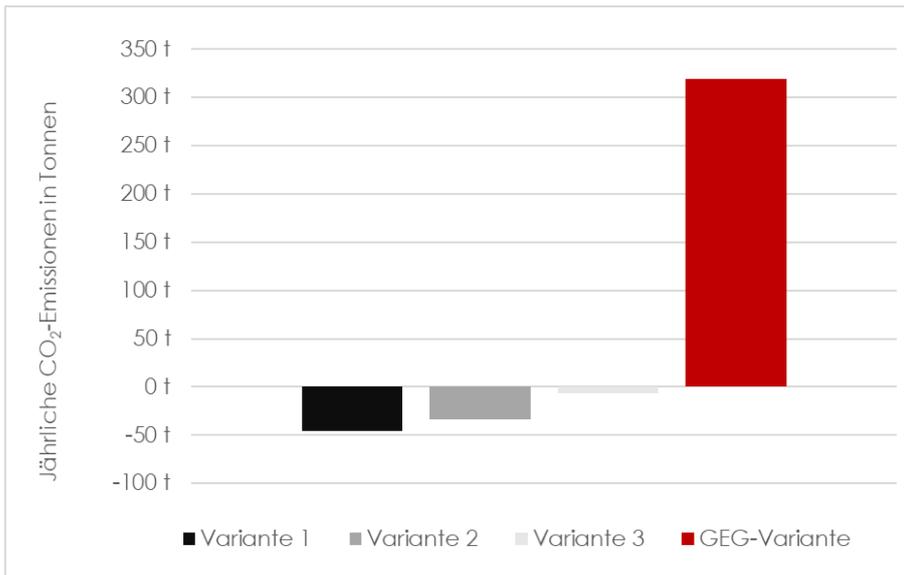


Abbildung 10: Darstellung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für das Quartier für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen

Wie in der oberen Grafik deutlich wird, ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit Berücksichtigung der PV-Anlagen in Ost-West-Richtung auf einem Gründach bei den Energiekonzepten der Varianten 1 bis 3 jeweils negativ.

Somit kann bei allen Varianten der Energiekonzepte eine Klimaneutralität erreicht werden.

<sup>13</sup> Beim Energieverbrauch im Betrieb ist neben dem Stromverbrauch der Wärmepumpen noch der Stromverbrauch weiterer gebäudetechnischer Anlagen berücksichtigt (z.B. Beleuchtung, Heizungspumpen, RLT)

In der nachfolgenden Tabelle 6 ist die notwendige PV-Fläche je Variante zur Erreichung der Klimaneutralität im Quartier dargestellt.

<b>Klimaneutralität im Quartier</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
Notwendige PV-Fläche zur Erreichung der Klimaneutralität des Quartiers hinsichtlich des Energieverbrauchs im Betrieb	2.498 m <sup>2</sup>	2.674 m <sup>2</sup>	3.096 m <sup>2</sup>	5.970 m <sup>2</sup>
Anteil der PV-Fläche an der Dachfläche bei Klimaneutralität des Quartiers hinsichtlich des Energieverbrauchs im Betrieb	39%	42%	48%	93%

Tabelle 6: Notwendige PV-Fläche im Quartier zur Erreichung der Klimaneutralität des Energieverbrauchs im Betrieb

Wie in der Tabelle 6 zu sehen, würde für eine Klimaneutralität des Quartiers hinsichtlich des Energieverbrauchs im Betrieb in den Varianten 1 bis 3 eine Belegung von etwa 40-50 % der vorhandenen Dachflächen mit Modulflächen für PV-Anlagen ausreichen.

### 3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse auf Quartiersebene

Die Varianten 1 bis 3 der Energiekonzepte schneiden aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht gegenüber der GEG-Variante deutlich besser ab. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Variante 2 mit den Gebäuden in KfW40-Standard die beste Option. Diese ist aus ökologischer Sicht allerdings geringfügig schlechter zu bewerten als Variante 1 mit Passivhaus-Standard.

Die großflächige Anbringung von PV-Anlagen auf allen Dächern der Gebäude des Quartiers ist zu empfehlen. Bei einem hohen Anteil an PV-Anlagen kann für das Quartier die Klimaneutralität erreicht werden.

Die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen bewegt sich bei einer statischen Amortisation von 10 bis 15 Jahren. Mit steigender Anzahl an E-Autos oder dezentralen Batteriespeichern verschiebt sich die optimale Wirtschaftlichkeit hin zu größeren PV-Anlagen, weshalb die maximale Ausnutzung der Dachflächen für PV-Anlagen empfohlen wird.

## 4 Ergebnisse des Beispielgebäudes Einfamilienhaus (EFH)

### Randbedingungen Beispielgebäude Einfamilienhaus:

Nettogrundfläche (NGF): 150 m<sup>2</sup>

1 Wohneinheit nach KfW-Förderrichtlinien

Dachfläche: 75 m<sup>2</sup>

Für das Beispielgebäude wurde eine Konstruktion für die PV-Anlage gewählt, die auf einem begrünten Flachdach installiert werden kann (siehe Kapitel 6.1.4). Bei einer hohen Ausnutzung des Daches könnten beim Beispielgebäude EFH bei einem begrünten Flachdach etwa 36 m<sup>2</sup> reine PV-Modulfläche installiert werden. Dies würde einer Leistung der PV-Anlage von etwa 5 kWp entsprechen.

### 4.1 Darstellung der Varianten

#### 4.1.1 Variante 1

Für Variante 1 des Beispielgebäudes EFH mit Wärmeschutzstandard Passivhaus wurde eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit 2 kW thermischer Leistung als Wärmeerzeuger eingesetzt.

Die Trinkwarmwasserbereitung findet dezentral über Frischwasserstation und nachgeschaltetem Durchlauferhitzer statt.

Die PV-Anlage auf dem Dach hat eine elektrische Leistung von 5 kWp.

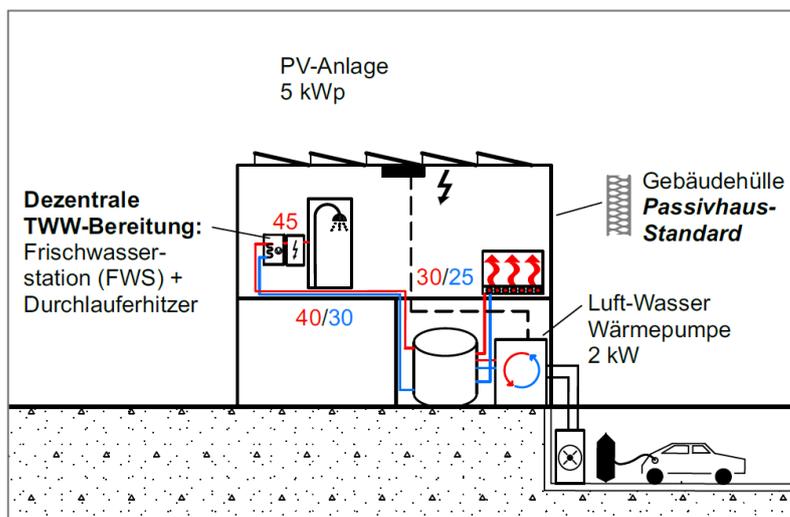


Abbildung 11: Variante 1 des Beispielgebäudes EFH

#### 4.1.2 Variante 2

Bei Variante 2 ist der Wärmeschutzstandard des Gebäudes KfW40 und eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit 3 kW thermischer Leistung dient als Wärmeerzeuger.

Als Wärmequelle für die Sole-Wasser-Wärmepumpe dienen die thermoaktiven Bauteile (Energiewand + Energiebodenplatte).

Die Trinkwarmwasserbereitung findet dezentral über Frischwasserstation und nachgeschaltetem Durchlauferhitzer statt.

Die PV-Anlage auf dem Dach hat eine elektrische Leistung von 5 kWp.

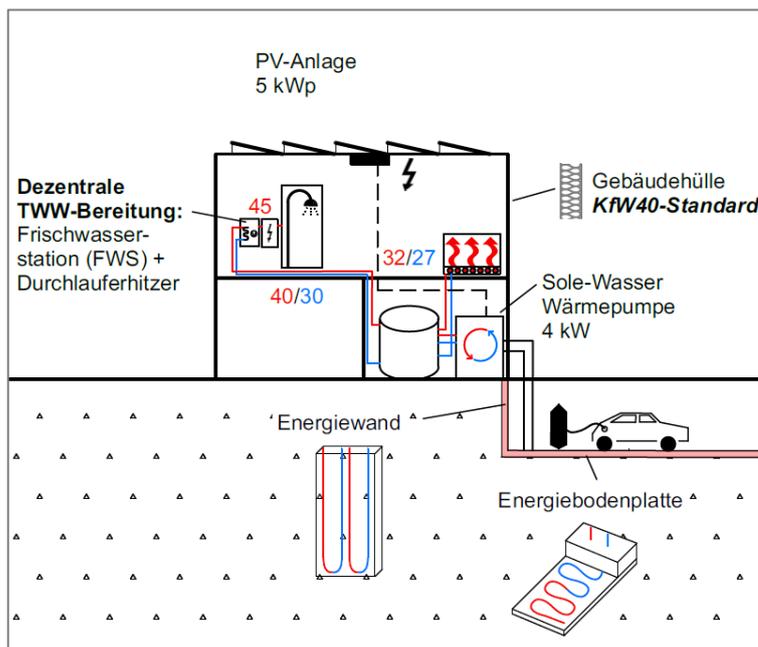


Abbildung 12: Variante 2 des Beispielgebäudes EFH

### 4.1.3 Variante 3

Bei Variante 3 ist der Wärmeschutzstandard des Gebäudes KfW 55. Als Wärmeerzeuger dient eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 4 kW.

Die Trinkwarmwasserbereitung findet dezentral über Frischwasserstation und nachgeschaltetem Durchlauferhitzer statt.

Die PV-Anlage auf dem Dach hat eine elektrische Leistung von 5 kWp.

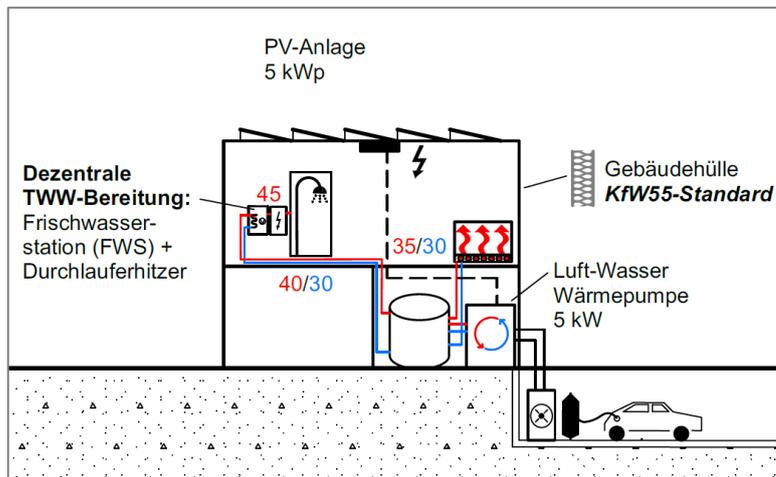


Abbildung 13: Variante 3 des Beispielgebäudes EFH

### 4.1.4 GEG-Referenzgebäude

Das GEG-Referenzgebäude hat den Mindestwärmeschutzstandard des GEG2020.

Als Wärmeerzeuger dient der Gas-Brennwertkessel mit einer thermischen Leistung von 6 kW und eine Solarthermie-Anlage. Die Solarthermie-Anlage hat eine Brutto-Kollektorfläche von 4,5 m<sup>2</sup> und dient als zusätzlicher Wärmeerzeuger für die zentrale Trinkwarmwasserbereitung.

Eine PV-Anlage gibt es beim GEG-Referenzgebäude nicht.

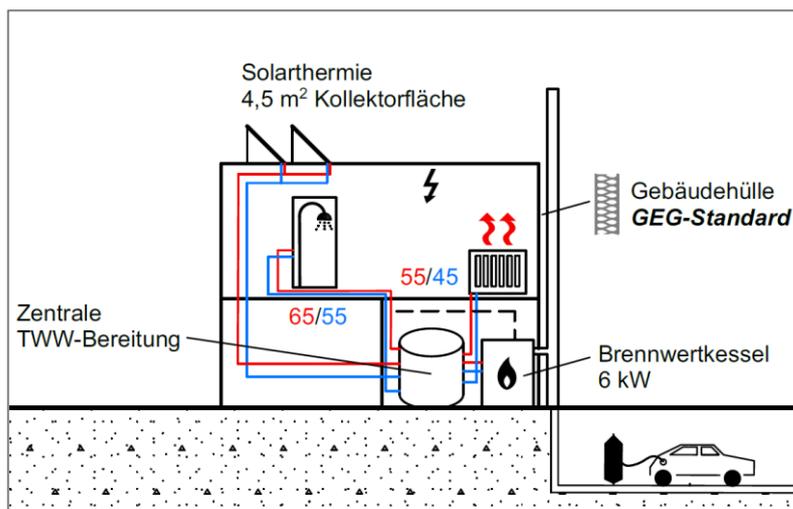


Abbildung 14: GEG-Variante des Beispielgebäudes EFH

## 4.2 Wirtschaftlichkeit

In der folgenden Tabelle 7 sind die wichtigsten Kenndaten zur Wirtschaftlichkeit der Varianten der Energiekonzepte des Beispielgebäudes Einfamilienhaus dargestellt.

Bei der Förderung wurden die Fördersätze des KfW Programms 461 - Zuschuss für KfW-Effizienzhäuser angesetzt. Je nach Effizienzhaus-Standard (z.B. KfW40 oder KfW 55) gibt es unterschiedlich hohe Fördersätze. Die Förderung besteht aus einem Zuschuss, der pro Wohneinheit bzw. prozentual nach den maximalen Kosten gewährt wird. Für den Effizienzhaus-Standard gibt es zwei Kriterien, den Transmissionswärmeverlust (baulicher Wärmeschutz des Gebäudes) und den Primärenergiebedarf, der beispielsweise von der Auswahl der Wärmeerzeugung abhängig ist.

<b>Wirtschaftlichkeit beim Beispielgebäude Einfamilienhaus (EFH)</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
Investitionskosten ohne Wärmeerzeugung <sup>14</sup>	268.390 €	253.677 €	248.581 €	228.309 €
Investitionskosten der Wärmeerzeugung	19.764 €	27.448 €	24.710 €	21.726 €
Summe der Investitionskosten	288.154 €	281.125 €	273.291 €	250.035 €
Förderung	33.750 €	33.750 €	26.250 €	-
<b>Investitionskosten mit Förderung</b>	<b>254.404 €</b>	<b>247.375 €</b>	<b>247.041 €</b>	<b>250.035 €</b>
Jährliche Energiekosten der Wärmeerzeugung <sup>15</sup>	337 €/a	414 €/a	569 €/a	819 €/a
Jährliche Betriebs- und Instandhaltungskosten der Wärmeerzeugung <sup>16</sup>	580 €/a	614 €/a	780 €/a	533 €/a
<b>Gesamtkosten nach 30 Jahren</b>	<b>281.918 €</b>	<b>278.235 €</b>	<b>287.523 €</b>	<b>290.583 €</b>

Tabelle 7: Wirtschaftlichkeit beim Beispielgebäude Einfamilienhaus

<sup>14</sup> Brutto-Investitionskosten des Gebäudetyps Einfamilienhaus (Kostengruppen 300-700), ohne die Investitionskosten der Wärmeerzeugung – Hochgerechnet auf Februar 2020 und einschließlich Regionalfaktor Landkreis Karlsruhe

<sup>15</sup> inkl. Berücksichtigung der erwarteten CO<sub>2</sub>-Kosten für den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren in Höhe von 120 €/t

<sup>16</sup> inkl. Berücksichtigung der Ersatzinvestitionen und der Restwerte der Anlagenteile der Wärmeerzeugung

Wie in der oberen Tabelle 7 zu sehen, sind von den Investitionskosten inklusive Förderung die Variante 2 mit KfW40-Standard und die Variante 3 mit KfW55-Standard etwa gleich günstig. Danach folgt die Variante mit GEG-Standard. Von den Investitionskosten inklusive Förderung am teuersten ist die Variante 1 mit Passivhaus-Standard.

Bei den Betriebskosten aus Energie- und Instandhaltungskosten ist die Variante 1 mit Passivhaus die günstigste Alternative, Variante 2 und 3 haben etwas höhere Betriebskosten.

Betrachtet man die Gesamtkosten nach 30 Jahren, ist die Variante 2 mit KfW40-Standard die günstigste Alternative.

Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich der Varianten in der Tabelle 7 wurde die PV-Anlage noch nicht berücksichtigt, da diese bei der GEG-Variante nicht vorkommt und somit die Investitions- und Betriebskosten verfälscht hätte.

Für die Darstellung der Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage beim Beispielgebäude Einfamilienhaus dient die nachfolgende Tabelle.

<b>Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage beim Beispielgebäude Einfamilienhaus mit und ohne E-Auto</b>	
Investitionskosten der PV-Anlage <sup>17</sup>	8.178 €
Spezifische Kosten des produzierten Stroms aus der PV-Anlage	0,13 €/kWh
Jährlicher Gewinn durch die PV-Anlage <sup>18</sup>	554 €/a
Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage ohne E-Auto	47%
<b>Amortisation der PV-Anlage ohne E-Auto</b>	<b>15 a</b>
Jährlicher Gewinn durch die PV-Anlage mit E-Auto <sup>19</sup>	787 €/a
Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage mit E-Auto	75%
<b>Amortisation der PV-Anlage mit E-Auto</b>	<b>10 a</b>

Tabelle 8: Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage beim Beispielgebäude Einfamilienhaus

<sup>17</sup> PV-Anlage mit einer Leistung von unter 10 kWp, da eine PV-Anlage mit einer Leistung bis maximal 10 kWp beim Eigenstromverbrauch aus der EEG-Umlage befreit ist

<sup>18</sup> Inkl. Abzug der jährlichen Betriebskosten der PV-Anlage

<sup>19</sup> mit Berücksichtigung von einem E-Auto für die direkte Stromnutzung des überschüssigen Stromes der PV-Anlage

In der Tabelle 8 zeigt sich eine gute Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage, vor allem bei Berücksichtigung eines E-Autos.

Selbst ohne E-Auto kann eine Amortisation innerhalb der Lebensdauer der PV-Anlage mit 15 Jahren erreicht werden, der Eigenverbrauchsanteil beträgt fast 50%.

Mit einem höheren Eigenverbrauchsanteil durch das E-Auto kann eine Amortisation der PV-Anlage von etwa 10 Jahren erreicht werden.

Für weitergehende Informationen zu Annahmen über die E-Autos oder zur Verteilung des Eigenverbrauchs im Jahresverlauf siehe Kapitel 6.1.4 und Kapitel 6.4.3.

### 4.3 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen

In den anschließenden Tabellen wird der Primärenergiefaktor und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Varianten des Beispielgebäudes Einfamilienhaus miteinander verglichen.

<b>Primärenergiefaktoren beim Beispielgebäude EFH</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
Primärenergiefaktor Wärme ohne PV <sup>20</sup>	0,51	0,45	0,51	1,10
Primärenergiefaktor Wärme mit PV <sup>21</sup>	0,37	0,33	0,37	-

Tabelle 9: Primärenergiefaktoren beim Beispielgebäude Einfamilienhaus

Wie in der oberen Tabelle zu sehen, ist der Primärenergiefaktor der Variante 2 am niedrigsten, da hier eine effiziente Sole-Wasser-Wärmepumpe mit der Wärmequelle thermoaktive Bauteile im Beispielgebäude eingesetzt wird. Bei Variante 1 und 3 ist der Primärenergiefaktor durch den Einsatz der Luft-Wasser-Wärmepumpen geringfügig höher.

Gegenüber der GEG-Variante haben die Varianten 1 bis 3 der Energiekonzepte deutlich niedrige Primärenergiefaktoren.

Berücksichtigt man die Stromnutzung der PV-Anlage für die Wärmepumpe im Beispielgebäude mit, wird für die Varianten 1 bis 3 jeweils ein Primärenergiefaktor von unter 0,37 erreicht.

<sup>20</sup> Der spezifische Wert bezieht sich immer auf den Wärmeverbrauch der jeweiligen Variante. Der Wärmeverbrauch ist je nach Variante durch die verschiedenen Wärmeschutzstandards der Gebäude unterschiedlich

<sup>21</sup> Berechnet nach den Vorgaben §23 GEG2020 – Anrechnung von Strom aus erneuerbaren Energien

Beim jährlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß für den Betrieb beim Beispielgebäude EFH ist neben dem Ausstoß von CO<sub>2</sub> für die Wärmeerzeugung noch der Ausstoß von CO<sub>2</sub> durch den Stromverbrauch von weiteren gebäudetechnische Anlagen berücksichtigt (z.B. Beleuchtung, Heizungspumpen, RLT).

Der Ausstoß von CO<sub>2</sub> durch den Stromverbrauch für weitere gebäudetechnische Anlagen beträgt für das Beispielgebäude EFH 7,5 kWh/m<sup>2</sup>a NGF. <sup>22</sup>

<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch Energieverbrauch im Betrieb beim Beispielgebäude EFH</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch Energieverbrauch im Betrieb <sup>23</sup>	1,33 t/a	1,50 t/a	1,83 t/a	2,71 t/a
CO <sub>2</sub> - Reduktion durch erzeugten Strom der PV-Anlagen	2,07 t/a			-
CO <sub>2</sub> -Ausstoß für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen	-0,73 t/a	-0,57 t/a	-0,24 t/a	-

Tabelle 10: Jahresbilanz des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für den Energieverbrauch im Betrieb beim Beispielgebäude EFH

<sup>22</sup> Die Stromverbrauchskennwerte ergeben sich aus der Studie „Energieverbrauchskennwerte energetisch hocheffizienter Gebäude“ von AGES, siehe S.32. Der Anteil der TGA und Beleuchtung ergibt sich aus der Studie „Der typische Haushalt-Stromverbrauch“ der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E., siehe S. 3.

<sup>23</sup> Beim Energieverbrauch im Betrieb ist neben dem Stromverbrauch der Wärmepumpe noch der Stromverbrauch weiterer gebäudetechnischer Anlagen berücksichtigt (z.B. Beleuchtung, Heizungspumpen, RLT)

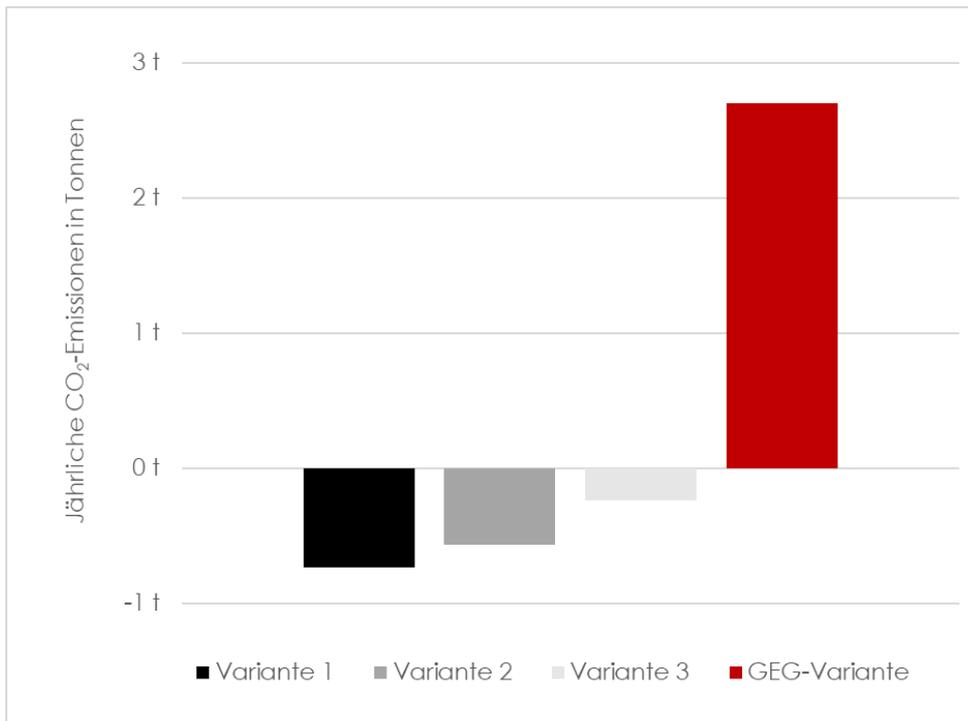


Abbildung 15: Darstellung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für das Beispielgebäude EFH für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen

Wie in der oberen Grafik zu sehen, ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Varianten der Energiekonzepte jeweils negativ. Dies bedeutet, dass beim Beispielgebäudes EFH durch die Varianten bereits eine Klimaneutralität bzw. sogar ein negativer CO<sub>2</sub>-Ausstoß erreicht werden kann.

Bei der GEG-Variante betragen die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen dagegen fast 3 Tonnen.

Für die Erreichung der Klimaneutralität des Beispielgebäudes EFH würde je nach Variante sogar eine PV-Anlage mit einem Anteil Modulfläche gegenüber der Dachfläche von 31% bis 43% ausreichen (siehe Tabelle 11).

<b>Klimaneutralität beim Beispielgebäude EFH</b>			
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>
Notwendige PV-Fläche zur Erreichung der Klimaneutralität des Gebäudes	23 m <sup>2</sup>	26 m <sup>2</sup>	32 m <sup>2</sup>
Anteil der PV-Fläche an der Dachfläche bei Klimaneutralität des Gebäudes	31%	35%	43%

Tabelle 11: Notwendige PV-Fläche beim Beispielgebäude EFH zur Erreichung der Klimaneutralität des Energieverbrauchs im Betrieb

#### 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Beispielgebäudes EFH

Die Ergebnisse des Beispielgebäudes EFH zeigen, dass ein höherer Gebäudestandard wie KfW40 und Wärmelösungen mit Erneuerbaren Energien wie Wärmepumpen deutlich vorteilhafter sind als die gesetzlichen Mindeststandards des GEG-Referenzgebäudes.

Beim Beispielgebäude EFH ist aus wirtschaftlicher Sicht der Wärmeschutzstandard KfW40 zu empfehlen. Von der Wärmeerzeugung sind Luft-Wasser-Wärmepumpe und Sole-Wasser-Wärmepumpe mit thermoaktiven Bauteilen gleichwertig zu bewerten. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe mit der Wärmequelle der thermoaktiven Bauteile hat höhere Investitionen zu Beginn, dann aber etwas geringere Energiekosten als die Luft-Wasser-Wärmepumpe.

Wie die Ergebnisse der GEG-Variante zeigen, stellt die Wärmeversorgung über einen Gas-Brennwertkessel mit Solarthermie die unwirtschaftlichste Lösung im Vergleich mit den anderen Varianten dar. Zusätzlich ist diese Variante auch hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht zu empfehlen.

Für den Gebäudetyp EFH wird der großflächige Einsatz von PV-Anlagen mit flacher Anbringung empfohlen. Wie die Ergebnisse zeigen, lässt sich eine PV-Anlage wirtschaftlich darstellen, vor allem bei zukünftiger Nutzung von E-Autos. Je nach Gebäudegröße und Verbraucherprofil unterscheidet sich die optimale Größe der PV-Anlage zur Erreichung der bestmöglichen Wirtschaftlichkeit.

## 5 Ergebnisse des Beispielgebäudes Mehrfamilienhaus (MFH)

### Randbedingungen Beispielgebäude Mehrfamilienhaus:

Nettogrundfläche (NGF): 800 m<sup>2</sup>

8 Wohneinheiten nach KfW-Förderrichtlinien

Dachfläche: 200 m<sup>2</sup>

Für das Beispielgebäude wurde eine Konstruktion für die PV-Anlage gewählt, die auf einem begrünten Flachdach installiert werden kann (siehe Kapitel 6.1.4). Bei einer hohen Ausnutzung des Daches könnten beim Beispielgebäude MFH bei einem begrünten Flachdach etwa 100 m<sup>2</sup> reine PV-Modulfläche installiert werden. Dies würde einer Leistung der PV-Anlage von etwa 13 kWp entsprechen.

### 5.1 Darstellung der Varianten

#### 5.1.1 Variante 1

Für Variante 1 des Beispielgebäudes MFH ist der Wärmeschutzstandard Passivhaus.

Als Wärmeerzeuger dient eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit 11 kW thermischer Leistung.

Die Trinkwarmwasserbereitung findet dezentral pro Wohnung über Frischwasserstation und nachgeschaltetem Durchlauferhitzer statt.

Die PV-Anlage auf dem Dach hat eine elektrische Leistung von 13 kWp.

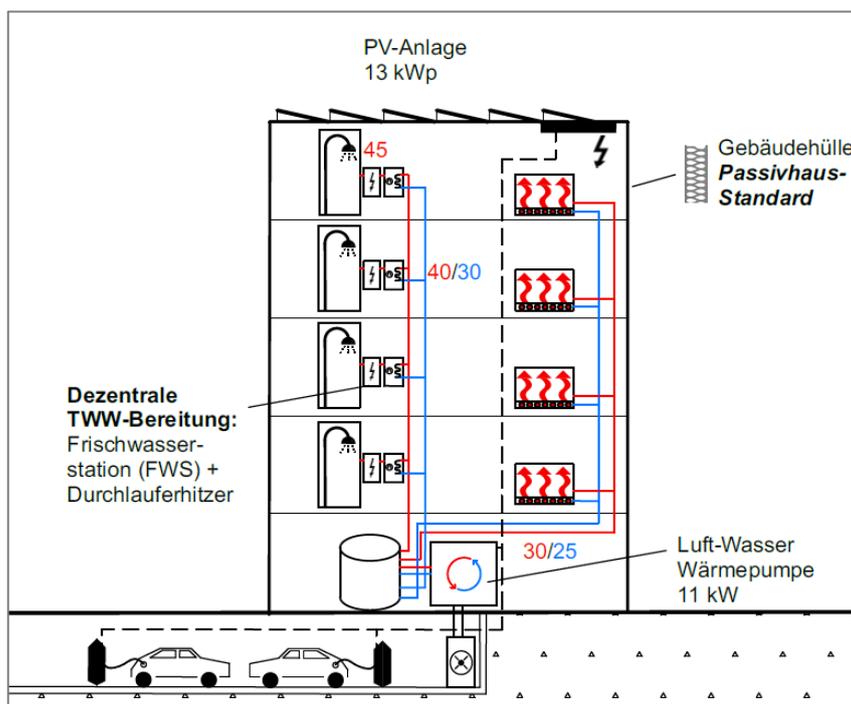


Abbildung 16: Variante 1 des Beispielgebäudes MFH

### 5.1.2 Variante 2

Für Variante 2 des Beispielgebäudes MFH ist der Wärmeschutzstandard KfW40.

Als Wärmeerzeuger dient eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit 21 kW thermischer Leistung. Als Wärmequelle für die Sole-Wasser-Wärmepumpe in Variante 2 werden Erdwärmesonden eingesetzt.

Die Trinkwarmwasserbereitung findet dezentral pro Wohnung über Frischwasserstation und nachgeschaltetem Durchlauferhitzer statt.

Die PV-Anlage auf dem Dach hat eine elektrische Leistung von 13 kWp.

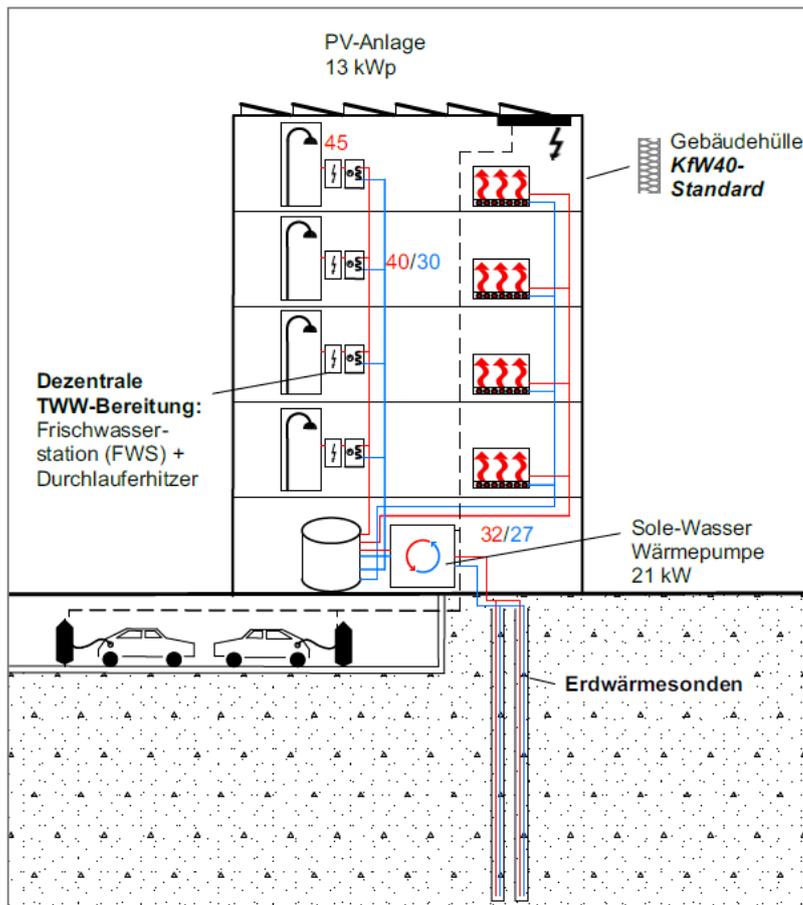


Abbildung 17: Variante 2 des Beispielgebäudes MFH

### 5.1.3 Variante 3

Für Variante 3 des Beispielgebäudes MFH ist der Wärmeschutzstandard KfW55.

Als Wärmeerzeuger dient wie in Variante 2 eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit 21 kW thermischer Leistung. Als Wärmequelle für die Sole-Wasser-Wärmepumpe werden thermoaktive Bauteile und zusätzlich Erdwärmesonden eingesetzt.

Die Trinkwarmwasserbereitung findet dezentral pro Wohnung über Frischwasserstation und nachgeschaltetem Durchlauferhitzer statt.

Die PV-Anlage auf dem Dach hat eine elektrische Leistung von 13 kWp.

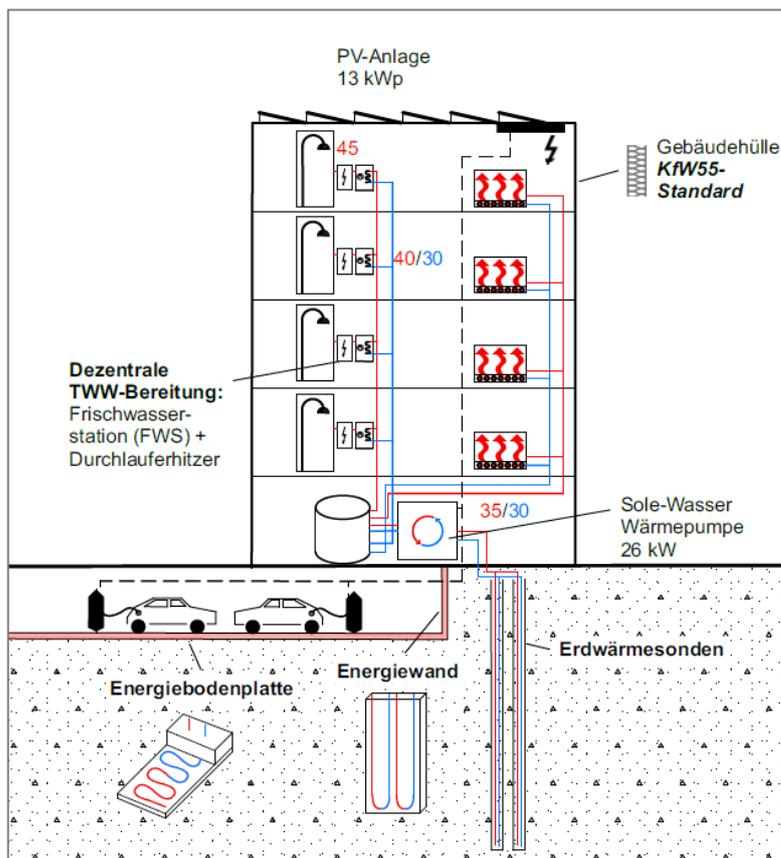


Abbildung 18: Variante 3 des Beispielgebäudes MFH

### 5.1.4 GEG-Referenzgebäude

Das GEG-Referenzgebäude hat den Mindestwärmeschutzstandard des GEG2020.

Zur Wärmeerzeugung gibt es einen Gas-Brennwertkessel mit einer thermischen Leistung von 35 kW und die Solarthermie-Anlage. Die Solarthermie-Anlage hat eine Brutto-Kollektorfläche von 24 m<sup>2</sup> und dient als zusätzlicher Wärmeerzeuger für die zentrale Trinkwarmwasserbereitung.

Eine PV-Anlage gibt es beim GEG-Referenzgebäude nicht.

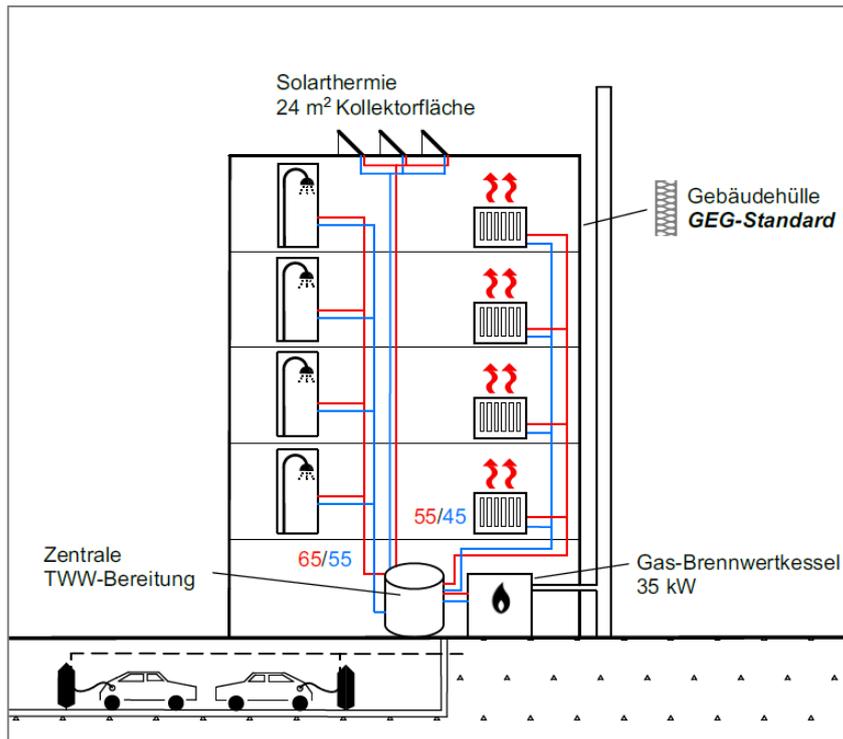


Abbildung 19: GEG-Variante des Beispielgebäudes MFH

## 5.2 Wirtschaftlichkeit

In der folgenden Tabelle 12 sind die wichtigsten Kenndaten zur Wirtschaftlichkeit der Varianten der Energiekonzepte des Beispielgebäudes Mehrfamilienhaus dargestellt.

Bei der Förderung wurden die Fördersätze des KfW Programms 461 - Zuschuss für KfW-Effizienzhäuser angesetzt. Je nach Effizienzhaus-Standard (z.B. KfW40 oder KfW 55) gibt es unterschiedlich hohe Fördersätze. Die Förderung besteht aus einem Zuschuss, der pro Wohneinheit bzw. prozentual nach den maximalen Kosten gewährt wird. Für den Effizienzhaus-Standard gibt es zwei Kriterien, den Transmissionswärmeverlust (baulicher Wärmeschutz des Gebäudes) und den Primärenergiebedarf, der beispielsweise von der Auswahl der Wärmeerzeugung abhängig ist.

<b>Wirtschaftlichkeit beim Beispielgebäude Mehrfamilienhaus (MFH)</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
Investitionskosten ohne Wärmeerzeugung <sup>24</sup>	1.349.291 €	1.167.137 €	1.143.691 €	1.050.423 €
Investitionskosten der Wärmeerzeugung	32.240 €	91.012 €	91.151 €	54.483 €
Summe der Investitionskosten	1.381.531 €	1.258.148 €	1.234.842 €	1.104.907 €
Förderung	270.000 €	270.000 €	210.000 €	
<b>Investitionskosten mit Förderung</b>	<b>1.111.531 €</b>	<b>988.148 €</b>	<b>1.024.842 €</b>	<b>1.104.907 €</b>
Jährliche Energiekosten der Wärmeerzeugung <sup>25</sup>	1.729 €/a	1.900 €/a	2.296 €/a	4.366 €/a
Jährliche Betriebs- und Instandhaltungskosten der Wärmeerzeugung <sup>26</sup>	1.447 €/a	1.770 €/a	2.004 €/a	1.301 €/a
<b>Gesamtkosten nach 30 Jahren</b>	<b>1.206.815 €</b>	<b>1.098.243 €</b>	<b>1.153.860 €</b>	<b>1.274.905 €</b>

Tabelle 12: Wirtschaftlichkeit beim Beispielgebäude Mehrfamilienhaus

<sup>24</sup> Brutto-Investitionskosten des Gebäudetyps Einfamilienhaus (Kostengruppen 300-700), ohne die Investitionskosten der Wärmeerzeugung – Hochgerechnet auf Februar 2020 und einschließlich Regionalfaktor Landkreis Karlsruhe

<sup>25</sup> inkl. Berücksichtigung der erwarteten CO<sub>2</sub>-Kosten für den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren

<sup>26</sup> inkl. Berücksichtigung der Ersatzinvestitionen und der Restwerte der Anlagenteile der Wärmeerzeugung

Wie in der Tabelle 12 zu sehen, ist von den Investitionskosten inklusive Förderung die Variante 2 des Beispielgebäudes MFH mit dem KfW40-Standard die günstigste Alternative.

Bei den Betriebskosten aus Energie- und Instandhaltungskosten ist die Variante 1 mit Passivhaus-Standard die günstigste. Danach folgen Variante 2 mit KfW40-Standard und Variante 3 mit KfW55-Standard.

Für die Betrachtung der Gesamtkosten aus Investitions- und Betriebskosten ist nach 30 Jahren die Variante 2 mit dem KfW40-Standard die wirtschaftlichste Option. Danach folgt Variante 3 mit dem KfW55-Standard mit einer etwas schlechteren Wirtschaftlichkeit.

Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich der Varianten in Tabelle 12 wurde die PV-Anlage noch nicht berücksichtigt, da diese bei der GEG-Variante nicht vorkommt und somit die Investitions- und Betriebskosten verfälscht hätte.

Für die Darstellung der Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage des Beispielgebäudes dient die nachfolgende Tabelle.

<b>Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage beim Beispielgebäude Mehrfamilienhaus mit und ohne E-Autos</b>	
Investitionskosten der PV-Anlage	17.940 €
Spezifische Kosten des produzierten Stroms aus der PV-Anlage	0,10 €/kWh
Jährlicher Gewinn durch die PV-Anlage <sup>27</sup>	1.772 €/a
Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage ohne E-Autos	64%
<b>Amortisation der PV-Anlage ohne E-Autos</b>	<b>10 a</b>
Jährlicher Gewinn durch die PV-Anlage mit zwei E-Autos <sup>28</sup>	2.065 €/a
Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage mit zwei E-Autos	78%
<b>Amortisation der PV-Anlage mit zwei E-Autos</b>	<b>9 a</b>

Tabelle 13: Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage beim Beispielgebäude Mehrfamilienhaus

Tabelle 13 zeigt eine sehr gute Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage beim Beispielgebäude MFH. Ohne E-Autos kann die PV-Anlage nach 10 Jahren amortisiert werden.

<sup>27</sup> Inkl. Abzug der jährlichen Betriebskosten der PV-Anlage

<sup>28</sup> mit Berücksichtigung von zwei E-Autos für die direkte Stromnutzung des überschüssigen Stromes der PV-Anlage

Mit höherem Eigenverbrauch durch die Berücksichtigung der beiden E-Autos kann der Eigenverbrauchsanteil nochmal erhöht werden und eine Amortisation der PV-Anlage erfolgt bereits nach 9 Jahren.

Für weitergehende Informationen zu Annahmen über die E-Autos oder zur Verteilung des Eigenverbrauchs im Jahresverlauf siehe Kapitel 6.1.4 und Kapitel 6.4.3.

### 5.3 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen

In den anschließenden Tabellen werden der Primärenergiefaktor und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Varianten des Beispielgebäudes Mehrfamilienhaus miteinander verglichen.

<b>Primärenergiefaktoren beim Beispielgebäude MFH</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
Primärenergiefaktor Wärme ohne PV <sup>29</sup>	0,49	0,39	0,40	1,10
Primärenergiefaktor Wärme mit PV <sup>30</sup>	0,38	0,30	0,31	-

Tabelle 14: Primärenergiefaktoren beim Beispielgebäude MFH

Wie in der oberen Tabelle zu sehen, sind die Primärenergiefaktoren der Varianten 2 und 3 etwa gleich niedrig. Bei Variante 1 ist der Primärenergiefaktor durch den Einsatz der Luft-Wasser-Wärmepumpe gegenüber den Varianten 2 und 3 etwas höher. Die GEG-Variante des Beispielgebäudes hat mit 1,1 dagegen einen deutlich höheren Primärenergiefaktor.

Berücksichtigt man die Stromnutzung der PV-Anlagen nach GEG, wird für die Varianten 1 bis 3 jeweils ein Primärenergiefaktor von unter 0,4 erreicht.

<sup>29</sup> Der spezifische Wert bezieht sich immer auf den Wärmeverbrauch der jeweiligen Variante. Der Wärmeverbrauch ist je nach Variante durch die verschiedenen Wärmeschutzstandards der Gebäude unterschiedlich

<sup>30</sup> Berechnet nach den Vorgaben §23 GEG2020 – Anrechnung von Strom aus erneuerbaren Energien

Beim jährlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß für den Betrieb beim Beispielgebäude MFH ist neben dem Ausstoß von CO<sub>2</sub> für die Wärmeerzeugung noch der Ausstoß von CO<sub>2</sub> durch den Stromverbrauch von weiteren gebäudetechnischen Anlagen berücksichtigt (z.B. Beleuchtung, Heizungspumpen, RLT).

Der Ausstoß von CO<sub>2</sub> durch den Stromverbrauch für weitere gebäudetechnische Anlagen beträgt für das Beispielgebäude MFH 5,9 kWh/m<sup>2</sup>a NGF.<sup>31</sup>

<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch Energieverbrauch im Betrieb beim Beispielgebäude MFH</b>				
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>GEG-Gebäude</b>
CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch Energieverbrauch im Betrieb <sup>32</sup>	6,31 t/a	6,67 t/a	7,52 t/a	13,77 t/a
CO <sub>2</sub> - Reduktion durch erzeugten Strom der PV-Anlagen	5,71 t/a			-
CO <sub>2</sub> -Ausstoß für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen	0,59 t/a	0,96 t/a	1,81 t/a	-

Tabelle 15: Jahresbilanz des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für den Energieverbrauch im Betrieb beim Beispielgebäude MFH

<sup>31</sup> Die Stromverbrauchskennwerte ergeben sich aus der Studie „Energieverbrauchskennwerte energetisch hocheffizienter Gebäude“ von AGES, siehe S.32. Der Anteil der TGA und Beleuchtung ergibt sich aus der Studie „Der typische Haushalt-Stromverbrauch“ der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E., siehe S. 3.

<sup>32</sup> Beim Energieverbrauch im Betrieb ist neben dem Stromverbrauch der Wärmepumpe noch der Stromverbrauch weiterer gebäudetechnischer Anlagen berücksichtigt (z.B. Beleuchtung, Heizungspumpen, RLT)

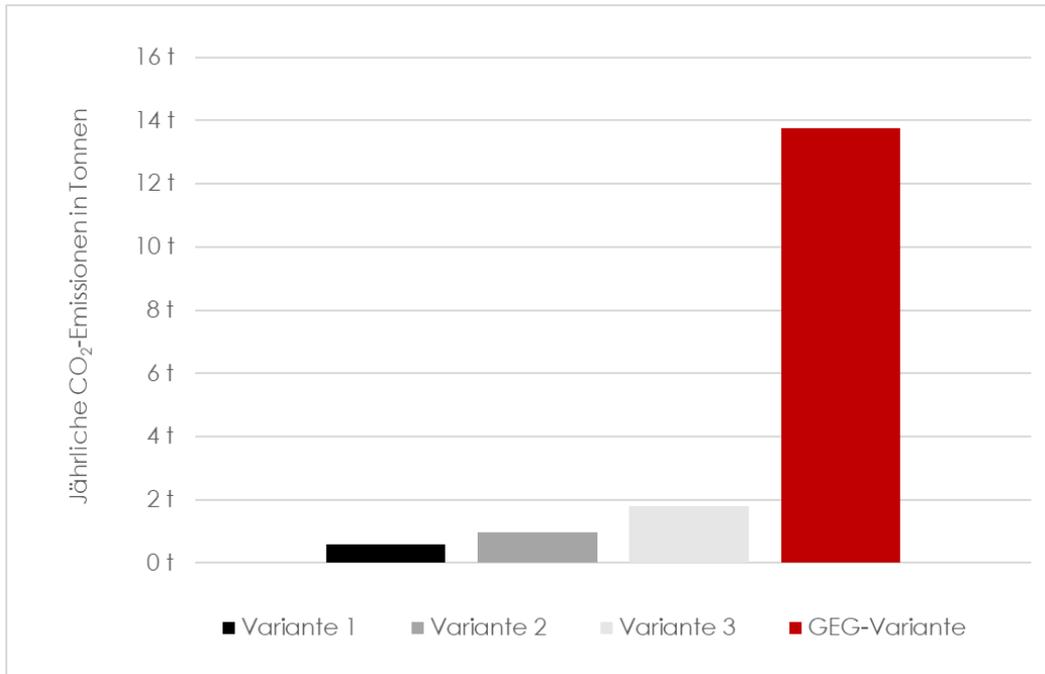


Abbildung 20: Darstellung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes für das Beispielgebäude MFH für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen

Wie in der oberen Grafik zu sehen, wird mit Berücksichtigung der installierten PV-Anlage in Ost-West-Richtung auf einem Gründach bei den Varianten 1 bis 3 des Beispielgebäudes MFH ein jährlicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß zwischen 0,5 bis 2 Tonnen ausgegeben. Die Klimaneutralität für den Betrieb kann mit dem Beispielgebäude MFH also nicht erreicht werden. Im Gegensatz zur GEG-Variante ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß allerdings bei den Varianten der Energiekonzepte deutlich geringer.

Wie in der nachfolgenden Tabelle 16 zu sehen, müsste der Anteil der Modulfläche gegenüber der Dachfläche bei Ausrichtung Ost-West mit 15° Neigung sogar knapp 60% betragen, um die Klimaneutralität des Energieverbrauchs im Betrieb zu erreichen.

Bei einem Flachdach mit Ausführung als Gründach kann bei dem Beispielgebäude MFH knapp keine Klimaneutralität im Betrieb erreicht werden, da bei marktüblichen Systemen nur etwa ein Anteil der PV-Fläche an der Dachfläche von etwa 50% erreicht werden kann (siehe Kapitel 6.1.4).

<b>Klimaneutralität beim Beispielgebäude MFH</b>			
	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>
Notwendige PV-Fläche zur Erreichung der Klimaneutralität des Gebäudes	110 m <sup>2</sup>	117 m <sup>2</sup>	132 m <sup>2</sup>
Anteil der PV-Fläche an der Dachfläche bei Klimaneutralität des Gebäudes	55%	58%	66%

Tabelle 16: Notwendige PV-Fläche beim Beispielgebäude MFH zur Erreichung der Klimaneutralität des Energieverbrauchs im Betrieb

#### 5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Beispielgebäudes MFH

Die Ergebnisse des Beispielgebäudes MFH zeigen, dass ein höherer Gebäudestandard wie KfW40 und Wärmelösungen mit Erneuerbaren Energien wie Wärmepumpen ökologisch und wirtschaftlich vorteilhaft sind.

Beim Beispielgebäude MFH ist aus wirtschaftlicher Sicht die Variante 2 des Energiekonzeptes mit Wärmeschutzstandard KfW40 zu empfehlen. Von der Wärmeerzeugung ist eine Sole-Wasser-Wärmepumpe zu empfehlen. Als Wärmequelle sind thermoaktive Bauteile und/oder Erdsonden zu empfehlen.

Wie die Ergebnisse der GEG-Variante zeigen, ist eine Gasversorgung der Gebäude aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht nicht zu empfehlen.

Für den Gebäudetyp MFH wird der großflächige Einsatz von PV-Anlagen auf dem Gründach empfohlen. Wie die Ergebnisse zeigen, lässt sich eine PV-Anlage wirtschaftlich darstellen, vor allem bei zukünftiger Nutzung von E-Autos. Je nach Gebäudegröße und Verbraucherprofil unterscheidet sich die optimale Größe der PV-Anlage zur Erreichung der bestmöglichen Wirtschaftlichkeit.

## 6 Weiterführende Informationen zur Erstellung des Energiekonzeptes

### 6.1 Technische Analysen

#### 6.1.1 Analyse eines Nahwärmenetzes

Zunächst wurden Möglichkeiten für die Umsetzung eines Nahwärmenetzes analysiert.

Die erste untersuchte Variante ist ein komplettes Nahwärmenetz für das ganze Gebiet (siehe nachfolgende Abbildung).



Abbildung 21: Darstellung des Lageplans mit einem kompletten Nahwärmenetz für das Gebiet

Bei einem kompletten Nahwärmenetz für das ganze Gebiet würden die Wärmeverluste bei allen Wärmeschutzstandards der Gebäude deutlich über 10% betragen (siehe nachfolgende Grafik). „Für neue Netze sollten jedoch Netzverluste von maximal 10 % angestrebt werden.“<sup>33</sup>

<sup>33</sup> Studie ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden (Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz u.a.); Dezentrale vs. Zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt; Darmstadt, Dresden, 04. August 2016

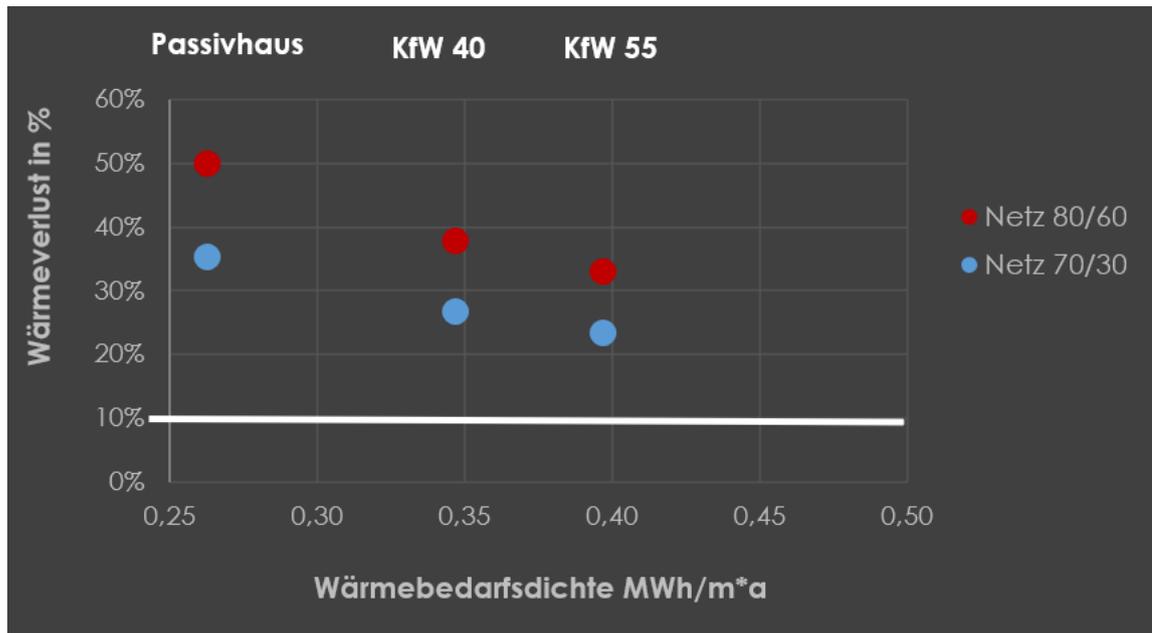


Abbildung 22: Nahwärmeverluste eines kompletten Nahwärmenetzes bei verschiedenen Wärmeschutzstandards der Gebäude im Quartier

Bei den oben dargestellten Wärmeverlusten wurden zwei Temperaturniveaus von Netzen verglichen.

Die Netzvariante mit dem Temperaturniveau von 80°C/60°C könnte klassische Wärmeerzeuger wie Pelletheizung oder BHKW beinhalten.

Die Netzvariante mit dem Temperaturniveau 70°C/30°C könnte neben klassischen Wärmeerzeugern wie dem BHKW weitere Wärmeerzeuger wie eine zentrale Großwärmepumpe oder Solarthermie enthalten. Für die Wärmeerzeuger Großwärmepumpe oder Solarthermie sind niedrige Rücklauftemperaturen entscheidend, um effektiv Wärme zu erzeugen.

Ein komplettes Nahwärmenetz für das Gebiet ist durch die hohen Wärmeverluste allerdings bei beiden Temperaturniveaus aus wirtschaftlicher Sicht nicht zu empfehlen.

Als weitere Option wurde überprüft, inwieweit eine Art Nahwärmenetz mit zentraler Wärmeversorgung pro Wohnblock wirtschaftlich sinnvoll sein könnte. Solch ein „Mini-Nahwärmenetz“ mit einer zentralen Wärmeversorgung pro Wohnblock wird in der nachfolgenden Abbildung im Lageplan dargestellt.

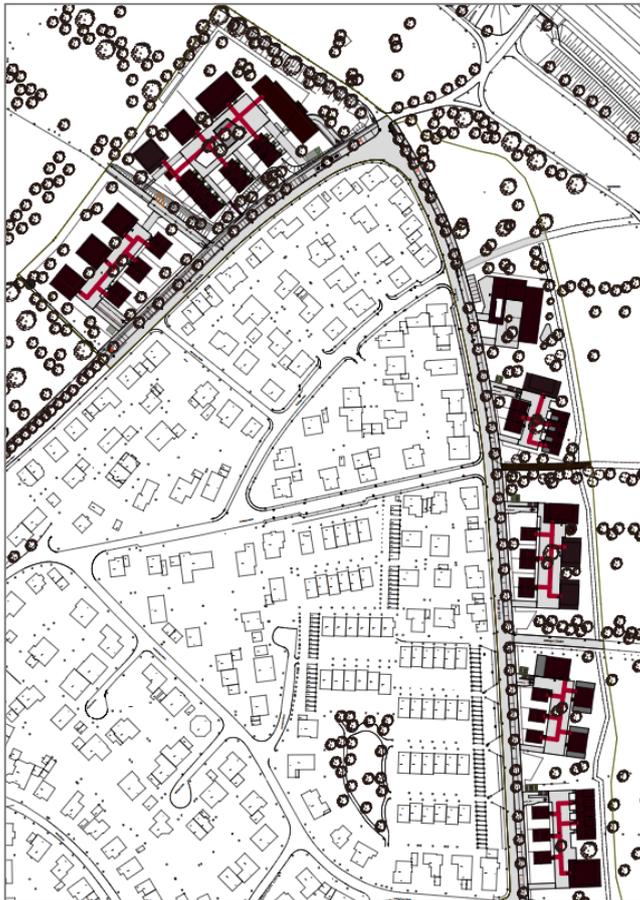


Abbildung 23: Darstellung des Lageplans mit einer Art „Mini-Nahwärme“ pro Wohnblock

In der nachfolgenden Grafik ist zu sehen, dass die Wärmeverluste bei einer Art „Mini-Nahwärme“ pro Wohnblock bei einem Temperaturniveau von 70°C/30°C nur beim KfW55-Standard knapp unter den Schwellenwert von 10% sinken würden.

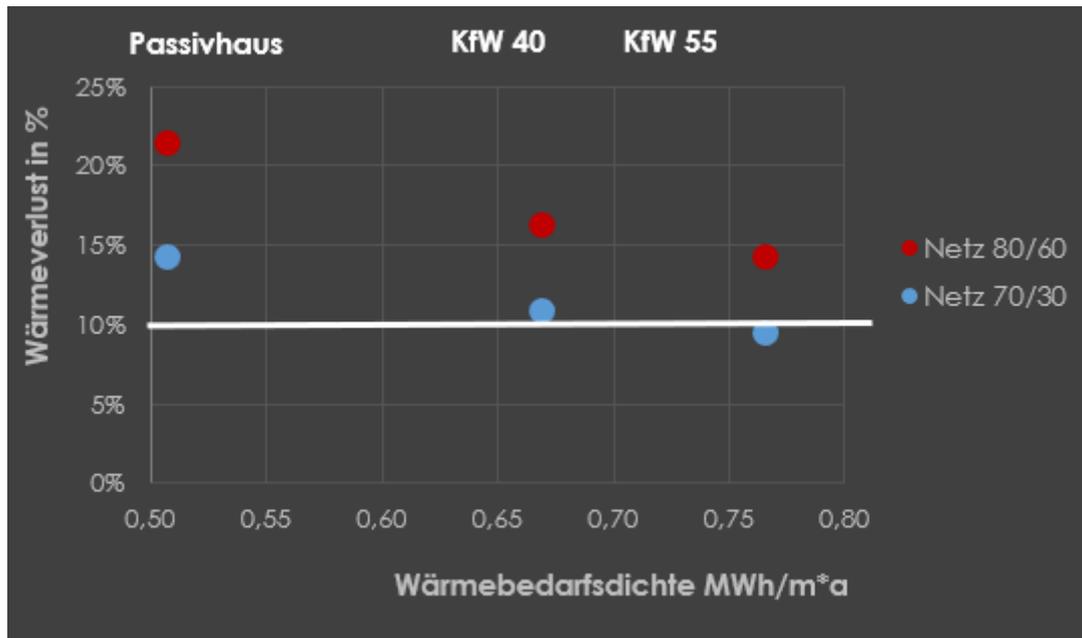


Abbildung 24: Nahwärmeverluste eines „Mini-Nahwärmenetzes“ pro Wohnblock bei verschiedenen Wärmeschutzstandards der Gebäude im Quartier

Da die Wärmeverluste auch bei dem KfW55-Standard und einem Temperaturniveau des Netzes von 70°C/30°C mit fast 10% noch sehr hoch sind, ist die Wirtschaftlichkeit einer Nahwärmelösung mit „Mini-Nahwärmenetz“ als grenzwertig zu betrachten.

Berücksichtigt man neben der grenzwertigen Wirtschaftlichkeit noch den organisatorischen Aufwand einer „Nahwärmelösung“ bezüglich Anschlusszwang, Betriebsaufwand (z.B. Abrechnungsaufwand etc.), ist auch ein „Mini-Nahwärmenetz“ für das Quartier nicht zu empfehlen.

Für andere Temperaturniveaus des Nahwärmenetzes wie „Kaltnetze“ (Temperaturniveau z.B. 12°C/8°C) gibt es keine passenden Wärmequellen, wie beispielsweise eine Abwasserwärmenutzung über einen größeren Abwassersammler. Daher werden „Kaltnetze“ nicht weiter betrachtet.

## 6.1.2 Analyse der Trinkwarmwasserbereitung

Wie in der unteren Abbildung deutlich wird, ist bei einem Gebäude nach GEG2020-Standard der Verbrauch etwa doppelt so hoch wie bei einem Gebäude nach Passivhaus-Standard. Eine weitere wichtige Aussage der unteren Grafik betrifft den Anteil des Wärmeverbrauchs im Verhältnis zu Trinkwarmwasser (TWW) und Heizenergie.

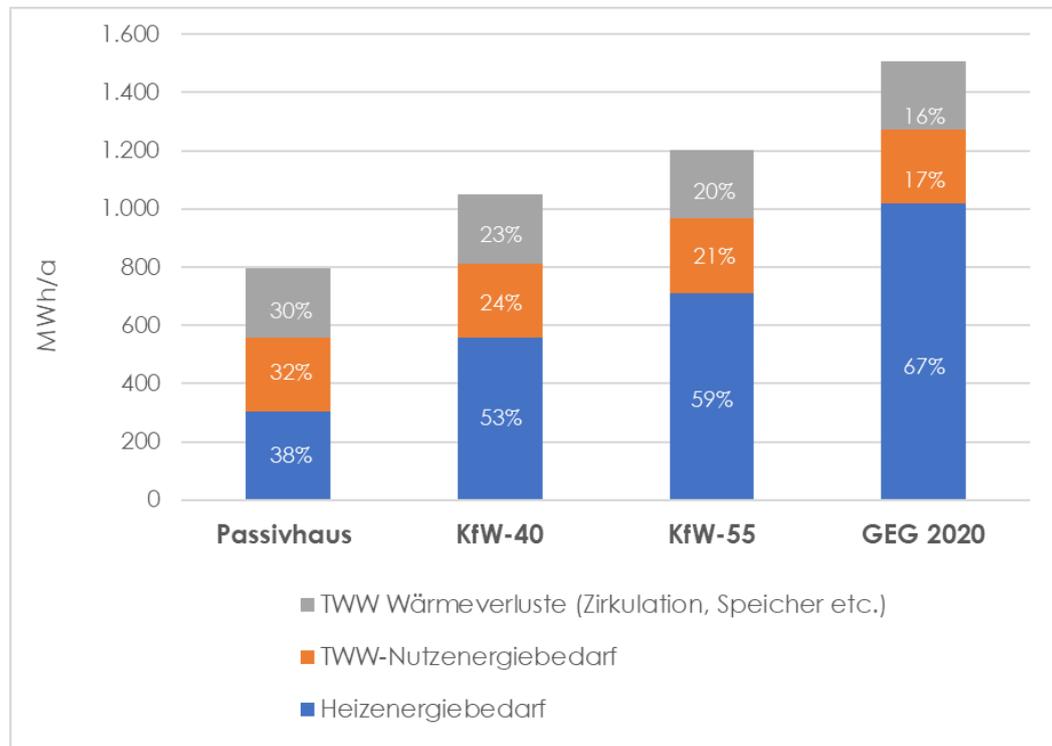


Abbildung 25: Einfluss des Wärmeschutzstandards der Gebäude auf den Wärmeverbrauch im Quartier

Bei einem Passivhaus wird bei einer zentralen Trinkwarmwasserbereitung ein größerer Anteil von etwa 62% für die Erzeugung von Trinkwarmwasser benötigt. Der Anteil zum Heizen des Gebäudes ist bei einem Passivhaus mit ca. 38% geringer als der TWW-Verbrauch. Umso höher also der Wärmeschutzstandard eines Gebäudes, umso höher ist der Anteil des TWW-Verbrauches am gesamten Wärmeverbrauch. Für die Analyse der Wärmeerzeugung ist daher bei einem hohen Wärmeschutzstandard die Beachtung der TWW-Erzeugung ganz entscheidend für die Effizienz der Wärmeerzeugung.

Um eine hohe Effizienz der Wärmepumpe sicherzustellen ist es wichtig, dass die Wärmepumpe keine hohen Temperaturen fahren muss. Durch Flächenheizungen und den sehr guten Wärmeschutzstandards der Gebäude können die Heizflächen mit geringen Temperaturen (z.B. Vorlauf max. 35°C) angefahren werden.

Um die TWW-Bereitung ebenfalls nicht mit hohen Temperaturen von der Wärmepumpe zu versorgen, wurde sich für eine Lösung mit Frischwasserstationen entschieden. Hier fährt das Heizungswasser beispielsweise mit einem Temperaturniveau von etwa 40°C/30°C dezentral im Haus Frischwasserstationen an (z.B. pro Wohneinheit). Das Trinkwarmwasser kann dann mit der Frischwasserstation auf ca. 38°C vorerwärmt werden und wenn nötig noch mit einem Durchlauferhitzer auf die gewünschte Temperatur von beispielsweise 45°C weiter hoch erwärmt werden.

Vorteile sind neben der hohen Effizienz der Wärmepumpe der Wegfall von TWW-Speichern, Zirkulationsleitungen und ein großer Teil der TWW-Leitungen. Durch den Wegfall von Zirkulationsleitungen und TWW-Speicher fällt ein Großteil der zusätzlichen Wärmeverluste bei der TWW-Bereitung weg. Wie in Abbildung 25 dargestellt wurde, ist beispielsweise bei einem Passivhaus ca. 30% des Wärmeverbrauchs auf die TWW-Verluste zurückzuführen.

Dadurch, dass keine Wärmespeicher vorhanden sind und kurze Leitungslängen vorherrschen, handelt es sich außerdem um eine sehr hygienische TWW-Bereitung und man fällt aus der Legionellen-Verordnung. Dies bedeutet, dass bei Mehrfamilienhäusern beispielsweise die Pflicht zur Legionellen-Prüfung wegfallen kann.

Nachteil der Frischwasserstationen ist bei hoher Wasserhärte, vor allem bei kupfergelöteten Wärmetauschern, die kurze Lebensdauer durch Verkalkung. Hier ist bei der Planung darauf zu achten, dass beispielsweise buntmetallfrei gelötete Wärmetauscher in den Frischwasserstationen verwendet werden, um einen frühzeitigen Ausfall entgegen zu wirken.

Für die Varianten zur Wärmeerzeugung in den Gebäuden wird durch die überwiegenden Vorteile bei allen Varianten, bei der die TWW-Bereitung über eine Wärmepumpe erfolgt, eine Frischwasserstation mit nachgeschaltetem Durchlauferhitzer angewandt.

### 6.1.3 Analyse der Wärmequellen

Für den Einsatz von Wasser-Wasser- bzw. Sole-Wasser-Wärmepumpen gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Versorgung mit einer Wärmequelle.

#### **Abwasserwärme**

Für eine ausreichende Nutzung von Abwasserwärme zur Wärmeversorgung für das Gebiet muss eine ausreichende Durchflussmenge im Abwasserkanal vorhanden sein. Für die Versorgung mit Abwasser wurde daher überprüft, inwieweit ein Abwassersammler in der näheren Umgebung des Gebietes vorhanden ist, der eine hohe Durchflussmenge sicherstellt. Da kein Abwassersammler in der näheren Umgebung des Neubaugebietes liegt, wurde diese Wärmequelle zur Versorgung des Gebietes nicht weiter berücksichtigt.

#### **Grundwassernutzung**

Die Nutzung von Grundwasser ist aufgrund der Geologie in dem Gebiet nicht möglich.

#### **Geothermie**

Oberflächennahe Geothermie ist in dem Gebiet möglich. Sowohl Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren oder thermoaktiven Bauteile (z.B. Energiepfähle) sind möglich.

Erdwärmekollektoren können durch den benötigten hohen Anteil an einer nicht überbaubaren Freifläche nicht großflächig im Gebiet eingesetzt werden und werden daher in den Konzeptvarianten nicht weiter betrachtet.

Bohrungen für Erdwärmesonden (Sole/Wasser-Wärmepumpen) sind in dem Gebiet laut Informationssystem des LGRB ohne Bohrtiefenbegrenzung möglich. Das Neubaugebiet befindet sich in keinem Wasserschutzgebiet, wodurch keine Einschränkungen bezüglich des Wärmeträgermediums des Sondenkreislaufes bestehen.

Die thermoaktiven Bauteile lassen sich bei erdberührenden Bauteilen einsetzen, bei diesem Quartier beispielsweise bei der Bodenplatte und der erdberührenden Wände der Tiefgarage. Thermoaktive Bauteile zeichnen sich dadurch aus, dass ohnehin erforderliche Bauteile mit der Einbindung von Absorberrohren thermisch aktiviert werden können. Dies hat den Vorteil, dass zusätzlichen Kosten der Integration der Rohre in sowieso anfallende Bauteile relativ gering sind. Weiterhin wird kein zusätzlicher Platzbedarf benötigt, wie dies beispielsweise beim Einsatz von Erdkollektoren notwendig wäre.

Nachteile der thermoaktiven Bauteile ist die große benötigte Fläche sowie die geringe Erfahrung mit dieser Technologie. Da sie nur selten eingesetzt wird, haben viele Baufirmen keine Erfahrung mit dieser Technologie. Es wird daher davon ausgegangen, dass es sich für die Umsetzung als schwierig gestalten kann geeignete Firmen zu finden.

In der nachfolgenden Abbildung 26 ist die Einbindung der Absorberrohre in eine Bodenplatte und in einen Bewehrungskorb einer erdberührenden Außenwand dargestellt.



Abbildung 26: Darstellung einer Energiebodenplatte (links) und eines Bewehrungskorbs einer Energieschlitzwand (rechts) mit Einbindung der Absorberrohre<sup>34</sup>

Auch wenn der Energiepfahl das am weitesten verbreitete Beispiel für thermoaktive Bauteile darstellt, finden sich auch für den Einsatz von Energieschlitzwänden und Energiebodenplatten einige Beispiele. So wurde beim Strabag Office Tower in Wien (BJ 2002) neben 242 Energiepfählen auch 6.000 m<sup>2</sup> Energiebodenplatte verwendet. Ebenfalls in Wien wurde das Columbus Center im gleichen Jahr mit 12.400 m<sup>2</sup> Energieschlitzwänden versehen. Weitere Beispiele für thermoaktive Bauteile mit Bohrpfahlwand gibt es mit dem Maintower oder dem Palais Quartier in Frankfurt.

Daneben wurde beim Neubau des Büro- und Verwaltungsgebäudes ABI-Beton in Andernach neben Erdwärmesonden Wandabsorber in der Kellerwand und Bodenabsorber unter der Bodenplatte des Kellers angebracht (siehe nachfolgende Abbildung).

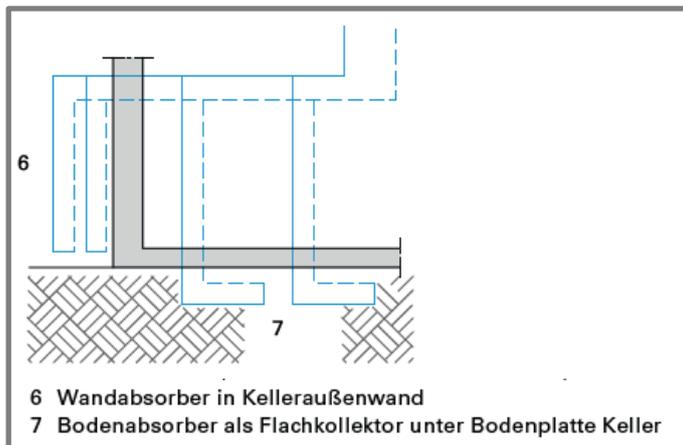


Abbildung 27: Beispiel von Wand- und Bodenabsorber bei einem Büro- und Verwaltungsgebäude<sup>35</sup>

<sup>34</sup> Quelle Bilder: H.Hofinger/R.Markiewicz/D.Adam/W.Unterberger –Geothermal energy systems for mayor projects – design and construction

<sup>35</sup> Quelle: Deutsche Bauzeitschrift (DBZ) – Energie Spezial 6/2017, S. 91

Trotz der Beispiele handelt es sich im Vergleich mit Erdwärmesonden um eine selten eingesetzte Wärmequelle, weshalb vermutlich wenig Erfahrung von Bauträgern mit dieser Technik vorhanden ist.

Von den spezifischen Investitionskosten und dem Genehmigungsaufwand sind die thermoaktiven Bauteile besser zu bewerten als die Erdwärmesonden. Die thermoaktiven Bauteile haben allerdings den Nachteil, dass sie ausreichend Fläche benötigen, um den Wärmebedarf der Gebäude zu decken.

Für die Varianten der Energiekonzepte bedeutet dies, dass zunächst, soweit dies die Flächen der Tiefgarage zulässt, die thermoaktiven Bauteile eingesetzt werden. Wenn die Flächen für die thermoaktiven Bauteile zur Wärmeversorgung nicht ausreichend sind, werden Erdsonden als weitere Wärmequelle verwendet.

## 6.1.4 Analyse Photovoltaik und E-Mobilität

### **Photovoltaik – Vergleich Flachdach mit Satteldach**

Bei der Analyse der Photovoltaik wurden zunächst die Erträge im Quartier bei Nutzung von Satteldächern bzw. Flachdächern gegenübergestellt.

Für die Anbringung einer PV-Anlage auf einem Flachdach wird die flache Montage empfohlen, da bei einer Aufständerung mit großen Neigungswinkeln sonst nur ein Bruchteil des Daches mit PV-Modulen belegt werden kann.

Bei einer Aufständerung mit einem Winkel von 30° Richtung Süden wird beispielsweise nur 33% der Dachfläche mit Modulfläche belegt und 66% ist durch den benötigten Platzbedarf wegen Eigenverschattung unbelegt. Mit einer flachen Montage der PV-Module kann also fast das 3-fache an Strom erzeugt werden als bei einer Aufständerung mit großen Neigungswinkeln.

Für den Vergleich zwischen Flach- und Satteldach wird daher ausschließlich die flache Montage von PV-Modulen in Ost-West-Richtung angenommen (siehe nachfolgende Abbildung).

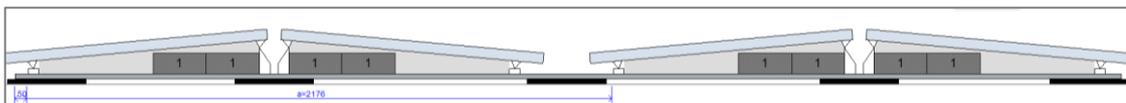


Abbildung 28: Solaraufständerung „FixGrid“ für Flachdächer <sup>36</sup>

Durch Wartungsgänge zwischen den Aufständerungen und notwendigen Abständen zum Rand des Daches bzw. zur Attika, kann nicht das komplette Flachdach mit Modulen belegt werden. In der nachfolgenden Abbildung sind anhand der Beispielgebäude Belegungsmöglichkeiten für PV-Anlagen auf deinem Flachdach dargestellt (siehe Abbildung 29).

Der Abstand zwischen den Aufständerungen für die Wartungsgänge beträgt bei der dargestellten Konstruktion 150 mm.

<sup>36</sup> Quelle: Schletter GmbH

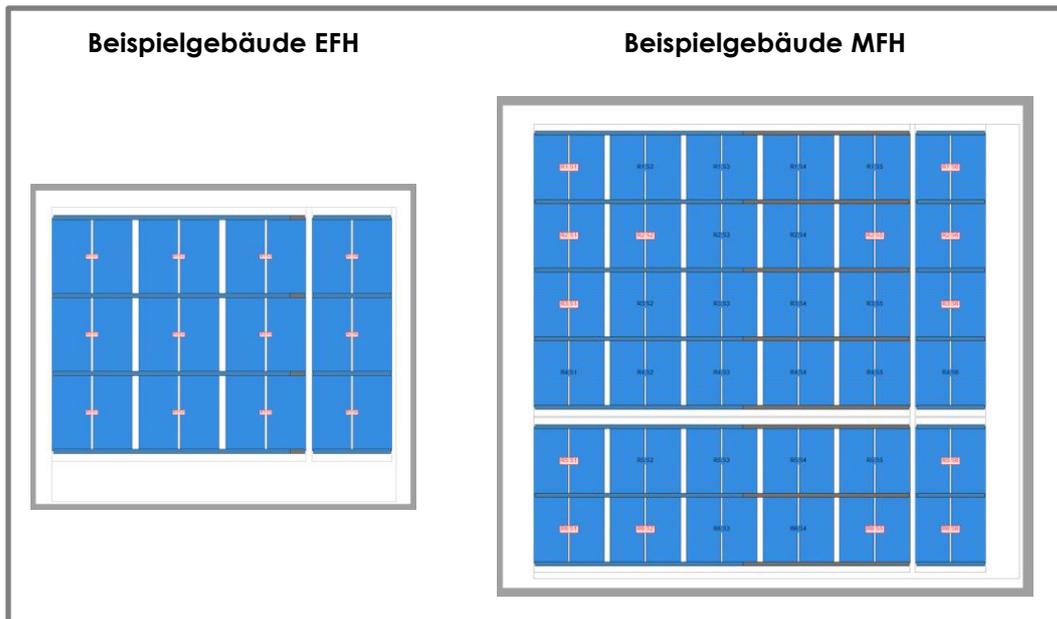


Abbildung 29: Belegung mit PV-Modulen bei hoher Ausnutzung auf den Flachdächern

Wie in der oberen Abbildung dargestellt, können beim Beispielgebäude EFH bei einer hohen Ausnutzung des Daches etwa 50 m<sup>2</sup> reine PV-Modulfläche auf dem 75 m<sup>2</sup> großen Flachdach installiert werden. Dies würde einer prozentualen Belegung der Dachfläche mit reiner Modulfläche von etwa 70% entsprechen. Beim Beispielgebäude MFH ist der Anteil der PV-Modulfläche gegenüber der Dachfläche ähnlich hoch. Hier können bei hoher Ausnutzung des Daches etwa 150 m<sup>2</sup> Modulfläche auf dem 200 m<sup>2</sup> großen Flachdach installiert werden.

Für die PV-Anlagen wird durch die Ergebnisse bei den Beispielgebäuden daher bei einem Flachdach von einem Anteil von 70% Modulfläche gegenüber der Dachfläche ausgegangen. Die PV-Module werden in Doppelaufständerung mit 6° Neigung Richtung Ost-West installiert.

<b>PV-Übersichtstabelle bei Flachdachbebauung</b>	
Annahme zu vorhandener Dachfläche im Quartier beim Flachdach (ohne KITA)	5.900 m <sup>2</sup>
Prozentuale Belegung der Dachflächen beim Flachdach mit PV-Modulen	70%
PV-Modulfläche der PV-Anlagen beim Flachdach	4.130 m <sup>2</sup>
Summe Nennleistung (DC) der PV-Anlagen beim Flachdach	531 kWp
Summe Stromertrag (AC) der PV-Anlagen im Quartier beim Flachdach	450 MWh/a

Tabelle 17: Übersichtstabelle zur Nutzung von PV-Anlagen im Quartier bei Flachdachbebauung

Werden anstatt der Flachdächer im gesamten Gebiet Satteldächer geplant, verändert sich mit der Fläche, die für die PV-Anlagen genutzt werden kann, auch der Stromertrag des Quartiers.

Bei den Satteldächern wird bei der Montage der PV-Module eine Neigung von 35° angenommen. Die Dachflächen sind mit unterschiedlichen verfügbaren Flächen in verschiedene Himmelsrichtungen ausgerichtet (siehe Tabelle 18).

Beim Satteldach ist davon auszugehen, dass ein größerer Teil der Fläche des Daches nicht für die Installation von PV-Modulen genutzt werden kann, da beispielsweise Dachfenster vorhanden sind.

Für die reine PV-Modulfläche im Quartier wurde für die Satteldächer durch den Anteil der Dachfenster eine Verwendung von 60% der geplanten Dachfläche angenommen.

<b>PV-Übersichtstabelle bei Bebauung mit Satteldach</b>	
Annahme zu vorhandener Dachfläche nach Norden	1.187 m <sup>2</sup>
Annahme zu vorhandener Dachfläche nach Süden	1.187 m <sup>2</sup>
Annahme zu vorhandener Dachfläche nach Osten	2.037 m <sup>2</sup>
Annahme zu vorhandener Dachfläche nach Westen	2.037 m <sup>2</sup>
Prozentuale Belegung der Dachflächen beim Satteldach mit PV-Modulen	60%
PV-Modulfläche der PV-Anlagen beim Satteldach	4.513 m <sup>2</sup>
Summe Nennleistung (DC) der PV-Anlagen beim Satteldach	500 kWp
Summe Stromertrag (AC) der PV-Anlagen im Quartier beim Satteldach	386 MWh/a

Tabelle 18: Übersichtstabelle zur Nutzung von PV-Anlagen im Quartier bei Bebauung mit Satteldach

Beim Vergleich der Stromerträge zwischen einer Bebauung mit Flachdach und Satteldach im Quartier zeigt sich, dass bei den getroffenen Annahmen bei der Flachdachbebauung etwa 15% höhere Stromerträge zu erwarten sind. Zieht man hierbei noch die Erträge der Satteldächer Richtung Norden von etwa 50 MWh/a ab, da die Installation von PV-Modulen nach Norden nicht wirtschaftlich ist, können mit der Flachdachbebauung sogar 25% höhere Stromerträge als mit der Bebauung von Satteldächern erzielt werden.

Durch die höheren Erträge der PV-Anlagen bei Flachdächern wird für die Varianten der Energiekonzepte empfohlen, dass alle Gebäude im Quartier mit Flachdächern ausgestattet werden.

### Photovoltaik – Anbringung auf Gründach

Da die Flachdächer im Quartier als Gründach ausgeführt werden sollen, muss eine Unterkonstruktion für die PV-Module gewählt werden, die auf einem Gründach möglich ist.

Bei der Belegung von PV-Modulen auf Gründächern ist zu beachten, dass die Rahmen für die PV-Module eine ausreichende Höhe gewährleisten und die Reihenabstände zwischen den Konstruktionsrahmen groß genug sind (siehe nachfolgende Abbildung).

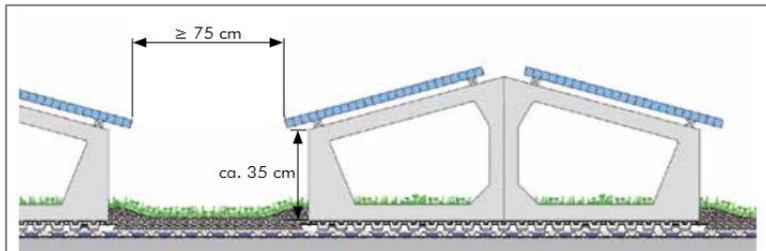


Abbildung 30: Solaraufständerung „Sattel“ für Gründächer <sup>37</sup>

Durch die notwendigen Reihenabstände der Solaraufständerung für Gründächer können beim Beispielgebäude EFH bei einer hohen Ausnutzung des Daches nur etwa 36 m<sup>2</sup> reine PV-Modulfläche auf dem 75 m<sup>2</sup> großen Flachdach installiert werden (siehe Abbildung 31). Dies würde einer prozentualen Belegung der Dachfläche mit reiner Modulfläche von etwa 50% entsprechen.

Beim Beispielgebäude MFH ist der Anteil der PV-Modulfläche gegenüber der Dachfläche ähnlich hoch. Hier können bei hoher Ausnutzung des Daches etwa 100 m<sup>2</sup> Modulfläche auf dem 200 m<sup>2</sup> großen Flachdach installiert werden (siehe Abbildung 31).

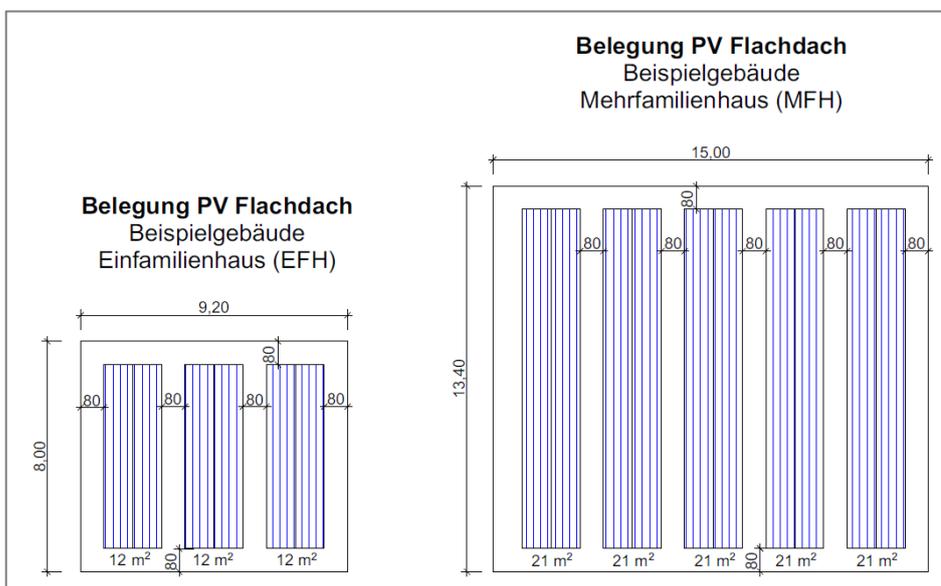


Abbildung 31: Belegung der Gründächer mit PV-Modulen bei hoher Ausnutzung auf den Flachdächern

<sup>37</sup> Quelle: Zinco

Für die PV-Anlagen wird durch die Platzierung auf den Gründächern bei den Beispielgebäuden daher für das Konzept von einem Anteil von 50% Modulfläche gegenüber der Dachfläche ausgegangen. Die PV-Module werden in Doppelaufständerung mit 15° Neigung Richtung Ost-West installiert (siehe Abbildung 30).

<b>PV-Übersichtstabelle bei Flachdachbebauung mit Gründach</b>	
Annahme zu vorhandener Dachfläche im Quartier beim Flachdach inkl. KITA	6.400 m <sup>2</sup>
Prozentuale Belegung der Dachflächen beim Gründach mit PV-Modulen	50%
PV-Modulfläche der PV-Anlagen beim Gründach	3.200 m <sup>2</sup>
Summe Nennleistung (DC) der PV-Anlagen beim Gründach	410 kWp
Summe Stromertrag (AC) der PV-Anlagen im Quartier beim Gründach	380 MWh/a

Tabelle 19: Übersichtstabelle zur Nutzung von PV-Anlagen im Quartier bei Flachdachbebauung mit Gründach

## E-Mobilität

Bei der Nutzung des regenerativ erzeugten Stroms der PV-Anlagen im Quartier wird E-Mobilität als Abnehmer von Strom berücksichtigt, da die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen durch einen höheren Eigenverbrauch beim Einsatz von E-Autos beeinflusst wird.

Bidirektionale Ladestationen, die einen Energiefluss in beide Richtungen ermöglichen, wurden für das Konzept nicht betrachtet, da es aktuell kaum Elektroautos gibt, die diese Technologie unterstützen.

Bei den Annahmen zu der Anzahl der E-Autos wurden Ergebnisse aus der Studie zur Ladeinfrastruktur verwendet, die für das Jahr 2030 von 9,6 Millionen batterieelektrischen Fahrzeugen in Deutschland ausgeht.<sup>38</sup>

Heruntergerechnet auf die Anzahl der Bewohner des Quartiers von 406,5 Personen würde die Anzahl der E-Autos im Jahr 2030 im Quartier 47 Stück betragen. Für die Elektroautos wurden weitere Annahmen zu Batteriekapazität sowie Lade- und Entladeleistung getroffen und für das Quartier hochgerechnet (siehe Tabelle 20).

	Anzahl E-Autos	Durchschnittliche Batteriekapazität pro Auto	Batteriekapazität im Quartier	Durchschnittliche Lade- und Entladeleistung pro Auto	Lade- und Entladeleistung im Quartier
Neubauquartier Esslinger Str. / Heidenheimer Str.	47	50 kWh	2.351 kWh	50 kW	2.351 kW

Tabelle 20: Annahmen für Anzahl E-Autos, Speicherkapazitäten und Leistungen im Quartier

Bei den verwendeten Ladestationen ist nach der Studie zur Ladeinfrastruktur für Ein- und Mehrfamilienhäuser von einer maximal bereitgestellten Ladeleistung von 11 kW elektrischer Leistung ausgegangen worden.<sup>24</sup>

Nach heutigen Erfahrungen sind für private Stellplätze auch geringere Ladeleistungen ausreichend. Es wird dabei von 3,7 kW pro Stellplatz in Wohnanlagen ausgegangen, in Kombination mit einem Lademanagement. Grund hierfür ist unter anderem, dass die Fahrzeuge über Nacht geladen werden, mit Standzeiten von meist mind. 10 - 14 Std. Damit könnten mind. 37 kWh nachgeladen werden, was für Kleinwagen fast schon einer vollen Batterie (max. 40-50 kWh) entspricht. Bei einem Verbrauch von durchschnittlich 20 kWh auf 100 km und einer durchschnittlichen Pendelstrecke von 40 km pro Tag, müsste die tägliche Strecke in den meisten Fällen abgedeckt sein.

Nach §6 des GEIG ist für jedes neu errichtete Wohngebäude mit mehr als fünf Stellplätzen jeder Stellplatz mit einer Leitungsinfrastruktur für die Elektromobilität auszustatten. Für die Mehrfamilienhäuser wird es für das Quartier etwa 180 Stellplätze geben, die mit einer Leitungsinfrastruktur (z.B. Leerkabel) versehen sind.

Für das Quartier wird für das Jahr 2030 von insgesamt 47 Ladestationen ausgegangen.

---

<sup>38</sup>, Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf, Studie im Auftrag des BMV, Herausgeber: Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, Berlin 2020

Für die Energieversorgung von Elektrofahrzeugen gilt nach DIN VDE 0100-722, soweit kein Lastmanagement vorhanden ist, ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 1. Bei Einsatz eines Lastmanagements kann der Gleichzeitigkeitsfaktor reduziert werden.

Beim Worst-Case-Szenario, also einer Gleichzeitigkeit von 1 und einer Ladeleistung von 11 kW pro Stellplatz, muss man für das Quartier für die E-Mobilität im Jahr 2030 von einer zusätzlichen elektrischen Leistung von etwa 500 kW ausgehen. Mit Lademanagement liegt die Gleichzeitigkeit bei 0,5 – 0,8, was bei einer Ladeleistung von 11 kW einer zusätzlichen elektrischen Leistung von etwa 250 - 400 kW für das Quartier entsprechen würde.

Bei Berücksichtigung der Erfahrungswerte von 3,7 kW Ladeleistung pro Stellplatz und einer Gleichzeitigkeit von 0,5 – 0,8 wäre die zusätzliche elektrische Leistung für das Quartier 90 – 140 kW.

Durch die zusätzliche Leistung der E-Mobilität werden Trafostationen notwendig, die privat von den Eigentümern der Ladesäulen finanziert werden müssen. Für diese zukünftigen Trafostationen sind bereits Räume in der Tiefgarage vorgesehen.

Laut der Studie zur Ladeinfrastruktur beträgt die mittlere Fahrstrecke bei einem Pkw nach MiD-Daten 30 Kilometer pro Tag.<sup>24</sup>

Anhand der angenommenen Daten für die E-Mobilität wurden mit der Software Polysun die Nutzung der E-Mobilität als Stromverbraucher für das Quartier und die einzelnen Gebäudetypen simuliert. Die Ergebnisse der Simulation werden in Kapitel 6.4.3 aufgezeigt.

## 6.2 Analyse der Wirtschaftlichkeit

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden verschiedene Randbedingungen festgelegt. Die wichtigsten sind in der nachfolgenden Tabelle 21 dargestellt.

<b>Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	
Betrachtungszeitraum	30 a
Strom WP Tarif	0,23 €/kWh
Strom Normaltarif	0,30 €/kWh
Erdgas Tarif	0,065 €/kWh
Betriebs- und Instandhaltungskosten	VDI 2067

Tabelle 21: Auswahl an Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Betriebs- und Instandhaltungskosten wurden je nach Anlage bzw. Bauteil die prozentualen Werte aus der VDI 2067 verwendet. Für die Restwerte bzw. Ersatzinvestitionen der Anlagen wurden die Daten zu den Lebensdauern aus der VDI 2067 verwendet. Der Stand für die ermittelten Kosten (z.B. BKI Baukosten) ist Februar 2021.

Für die Baukosten der Gebäude (KG 300 – 700) wurden die BKI Baukosten für den jeweiligen Gebäudetyp Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus oder KITA verwendet.

Als Grundlage der BKI Baukosten dienen die Kostenkennwerte von 2016. Diese Kostenkennwerte wurden mit einem Preisindex auf den Kostenstand von Februar 2021 hochgerechnet. Zusätzlich wurde der Regionalfaktor für die Kosten vom Landkreis Karlsruhe eingerechnet.

Die berechneten spezifischen Kosten je Wohnfläche (WF) sind für die verschiedenen Gebäudetypen für den Wärmeschutzstandard GEG2020 in der nachfolgenden Tabelle 22 dargestellt.

<b>Spezifische Kosten GEG-Gebäude - ohne Wärmeerzeugung</b>	
Einfamilienhaus, Doppelhaushälfte, Reihenhaus	1.384 €/m <sup>2</sup> WF
Mehrfamilienhaus	1.194 €/m <sup>2</sup> WF
KITA	1.782 €/m <sup>2</sup> WF

Tabelle 22: Spezifische Kosten des GEG-Gebäudes (KG300-700) - ohne Berücksichtigung der Wärmeerzeugung

Die prozentualen Unterschiede der Kosten zwischen KfW40, KfW55, Passivhaus und GEG-Gebäude wurden aus der Studie des Fraunhofer IRB zur „Wirtschaftlichkeit baulicher Investitionen bei Erhöhung energetischer gesetzlicher Anforderungen“ und aus der Studie des Instituts für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS) zum „Leben im Passivhaus“ abgeleitet.

In der nachfolgenden Tabelle 23 sind die prozentualen Mehrkosten der Investition der höheren Wärmeschutzstandards für die Gebäudetypen EFH (Einfamilienhaus, Doppelhaushälften, Reihenhaus) und MFH (Mehrfamilienhaus, Pflegeheim, KITA) dargestellt.

<b>Mehrpreis der Investition für den jeweiligen Wärmeschutzstandard gegenüber GEG2020</b>		
	Gebäudetyp EFH	Gebäudetyp MFH
Wärmeschutzstandard KfW 55	+ 8%	+ 8%
Wärmeschutzstandard KfW 40	+ 10%	+ 10%
Wärmeschutzstandard Passivhaus	+ 16%	+ 22%

Tabelle 23: Mehrpreis der Investition für höheren Wärmeschutzstandard gegenüber GEG2020

Für die PV-Anlagen wurden für die Einspeisung ins Netz die Vergütungssätze ab 01.04.2021 verwendet. Diese betragen für PV-Dachanlagen mit einer Leistung unter 10 kWp 7,80 ct/kWh und für PV-Dachanlagen über 10 kWp und unter 40 kWp 7,59 ct/kWh.

Für PV-Anlagen über 10 kWp muss auf den eigenverbrauchten Strom die EEG-Umlage in Höhe von 40% bezahlt werden. Als EEG-Umlage wurde die EEG-Umlage von 2021 in Höhe von 6,5 ct/kWh angenommen.

Für die KfW-Fördersätze werden die Zuschussätze des Programms KfW-Wohngebäude Zuschuss Nr. 461 verwendet, welche ab 01.07.2021 gelten. Durch den Einsatz der Gebäudetechnik wurde angenommen, dass bei den Energiestandards jeweils die Erneuerbaren-Energie-Klasse nach der KfW-Förderung erreicht wird.

### 6.3 Analyse der grauen Energie

Bei einer vom Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) in Auftrag gegebenen Studie von 2015 wurde die graue Energie zweier Bauweisen, des Holzbbaus und des Massivbaus, miteinander verglichen.<sup>39</sup>

Für die beiden Vergleichsgebäude wurden die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Annahmen bezüglich der verwendeten Bauteile getroffen:

	Holzbau	Massivbau
<b>Untergeschoss</b>	Beton / Kalksandstein	Beton / Kalksandstein
<b>Außenwand</b>	Holzrahmenbau	Backstein / Beton
<b>Geschossdecken</b>	Holzbeton-Verbund	Beton
<b>Innenwände</b>	Holzrahmenbau	Backstein / Trockenwand
<b>Treppenhaus</b>	Beton	Beton
<b>Dach</b>	Brettstapel	Beton

Tabelle 24: Annahme der verwendeten Bauteile für den Vergleich der grauen Energie von Holz- und Massivbau

Als Ergebnis der Studie konnten mit dem Holzbau etwa 20% niedrigere Emissionen von grauer Energie gegenüber dem Massivbau erreicht werden. Beim Holzbau betrug die graue Energie etwa 8 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>a gegenüber dem Massivbau mit 10 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>a.

Wie sich an den Ergebnissen zeigt, gibt es durchaus einen Einfluss auf die Reduzierung der grauen Energie, der allerdings als mäßig bis gering einzustufen ist. Dies bestätigt auch eine weitere Studie, in der aufgezeigt wird, dass der Einfluss auf die Reduzierung der grauen Energie deutlich geringer ist, als der Einfluss auf den Energieaufwand des Gebäudebetriebs mit Heizwärme, Warmwasser und Strom.<sup>40</sup>

Über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren werden über alle Gebäude folgende CO<sub>2</sub>-Emissionen bezüglich der grauen Energie je nach Bauweise emittiert (siehe nachfolgende Tabelle).

	Holzbau	Massivbau
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen durch graue Energie im Quartier</b>	4.882 t	6.103 t

Tabelle 25: CO<sub>2</sub>-Emissionen im Quartier durch graue Energie beim Bauprozess

<sup>39</sup> Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald; Holzbau vs. Massivbau – Ein umfassender Vergleich zweier Bauweisen im Zusammenhang mit dem SNBS Standard; Bern 2015

<sup>40</sup> Graue Energie von Einfamilienhäusern in Niedrigenergie-Gebäudestandard; Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, 2019



### 6.4.2 Simulation der Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen

Je nach Temperaturspreizung zwischen Wärmequelle und Wärmeabnahme erreicht die Wärmepumpe eine unterschiedliche Jahresarbeitszahl. Umso höher die Jahresarbeitszahl, desto mehr Wärme kann die Wärmepumpe mit dem ihr zur Verfügung stehenden Strom produzieren. Durch die Verwendung von Flächenheizungen (z.B. Fußbodenheizung) und den Frischwasserstationen in den Gebäuden wurden die erforderlichen Temperaturen der Abnehmer von Wärme sehr gering gehalten. Wie in Tabelle 26 zu sehen, können dadurch bei den verschiedenen Varianten der Wärmepumpen hohe Jahresarbeitszahlen erreicht werden.

	Luft-Wasser Wärmepumpe	Sole-Wasser Wärmepumpe mit thermoaktiven Bauteilen	Sole-Wasser Wärmepumpe mit Erdsonden
<b>Simulierte Jahresarbeitszahl (JAZ)</b>	3,6	4,6	4,8

Tabelle 26: Simulierte Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen bei verschiedenen Wärmequellen

### 6.4.3 Simulation Strom für Photovoltaik und E-Mobilität

In den folgenden Grafiken wird dargestellt, wie sich die Stromproduktion der PV-Anlage gegenüber dem Stromverbrauch von Haushaltsstrom, Wärmepumpen und E-Autos über den Jahresverlauf verhält.

Für die Untersuchungen wurden die Beispielgebäude EFH und MFH simuliert, jeweils mit und ohne die Berücksichtigung von E-Autos. Die Ergebnisse wurden dann auf das Quartier hochgerechnet.

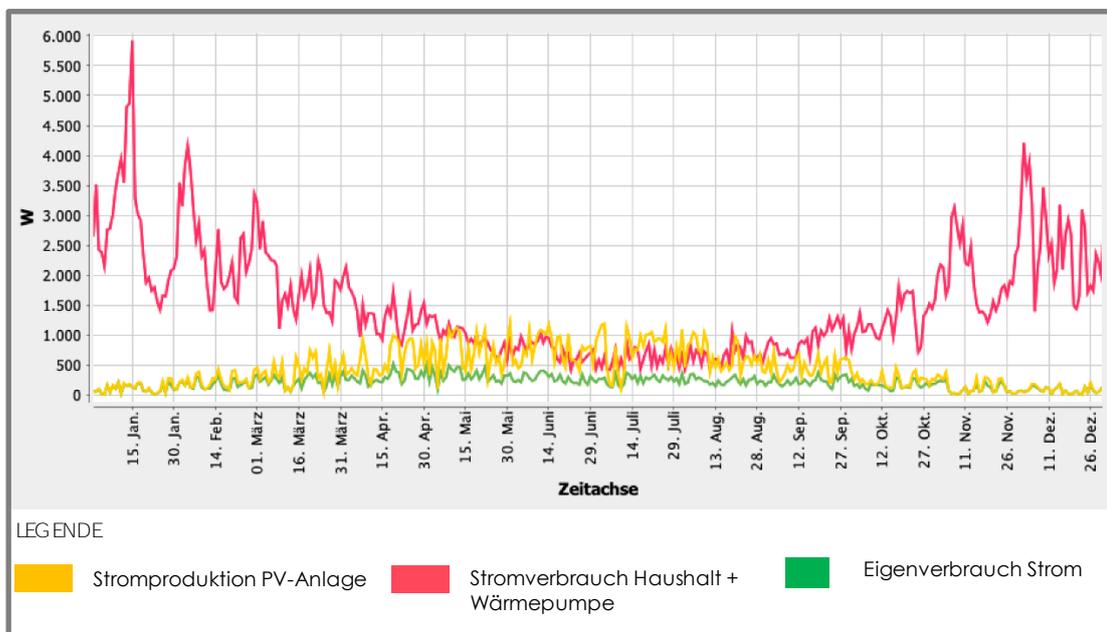


Abbildung 33: Gegenüberstellung der Stromproduktion der PV-Anlage mit dem Stromverbrauch des Gebäudes (Wärmepumpe + Haushaltsstrom) beim Beispielgebäude EFH – ohne E-Auto

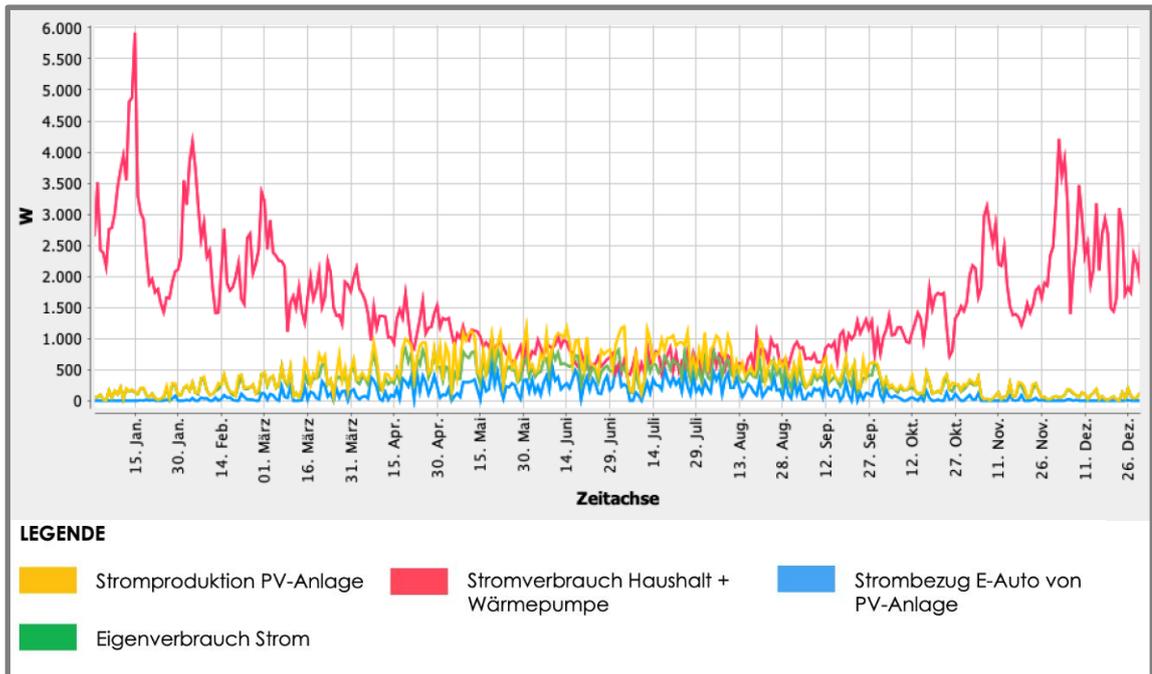


Abbildung 34: Gegenüberstellung der Stromproduktion der PV-Anlage mit dem Stromverbrauch des Gebäudes (Wärmepumpe + Haushaltsstrom) beim Beispielgebäude EFH – mit E-Auto

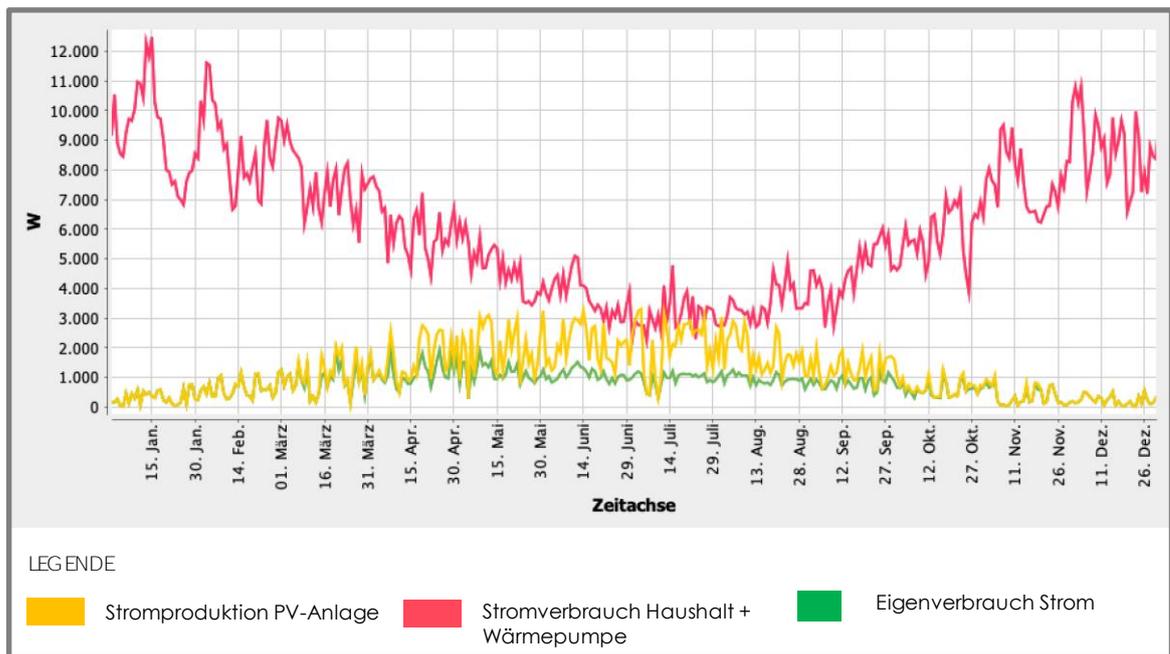


Abbildung 35: Gegenüberstellung der Stromproduktion der PV-Anlage mit dem Stromverbrauch des Gebäudes (Wärmepumpe + Haushaltsstrom) beim Beispielgebäude MFH – ohne E-Auto

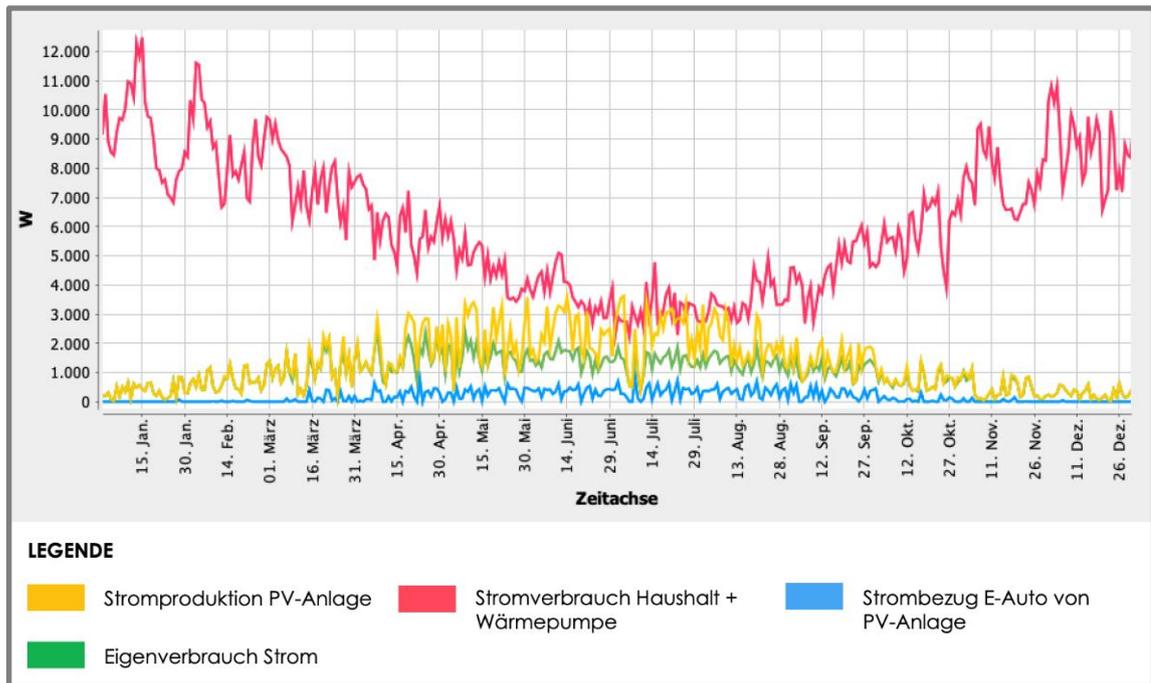


Abbildung 36: Gegenüberstellung der Stromproduktion der PV-Anlage mit dem Stromverbrauch des Gebäudes (Wärmepumpe + Haushaltsstrom) beim Beispielgebäude MFH – mit E-Auto

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiekonzept in Variante 1 mit den Gebäudetypen EFH/RH/DH und MFH/KITA auf Quartiersebene .....	5
Abbildung 2: Lageplan des Energiekonzeptes im Quartier bei Variante 1 .....	6
Abbildung 3: Energiekonzept in Variante 2 mit den Gebäudetypen EFH/RH/DH und MFH/KITA auf Quartiersebene .....	7
Abbildung 4: Lageplan des Energiekonzeptes im Quartier bei Variante 2 .....	8
Abbildung 5: Energiekonzept in Variante 3 mit den Gebäudetypen EFH/RH/DH und MFH/KITA auf Quartiersebene .....	9
Abbildung 6: Lageplan des Energiekonzeptes in Variante 3 auf Quartiersebene .....	10
Abbildung 7: Variante mit GEG-Referenzgebäuden mit den Gebäudetypen EFH/RH/DH und MFH/KITA auf Quartiersebene .....	11
Abbildung 8: Lageplan der Variante mit GEG -Referenzgebäuden auf Quartiersebene .....	12
Abbildung 9: Aufteilung der CO <sub>2</sub> -Emissionen der Varianten nach grauer Energie, Nutzerstrom und Wärmeversorgung auf Quartiersebene .....	17
Abbildung 10: Darstellung des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes für das Quartier für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen .....	18
Abbildung 11: Variante 1 des Beispielgebäudes EFH .....	20
Abbildung 12: Variante 2 des Beispielgebäudes EFH .....	21
Abbildung 13: Variante 3 des Beispielgebäudes EFH .....	22
Abbildung 14: GEG-Variante des Beispielgebäudes EFH .....	22
Abbildung 15: Darstellung des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes für das Beispielgebäude EFH für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen .....	27
Abbildung 16: Variante 1 des Beispielgebäudes MFH .....	29
Abbildung 17: Variante 2 des Beispielgebäudes MFH .....	30
Abbildung 18: Variante 3 des Beispielgebäudes MFH .....	31
Abbildung 19: GEG-Variante des Beispielgebäudes MFH .....	32
Abbildung 20: Darstellung des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes für das Beispielgebäude MFH für den Energieverbrauch im Betrieb mit Berücksichtigung der PV-Anlagen .....	37
Abbildung 21: Darstellung des Lageplans mit einem kompletten Nahwärmenetz für das Gebiet ..	39
Abbildung 22: Nahwärmeverluste eines kompletten Nahwärmenetzes bei verschiedenen Wärmeschutzstandards der Gebäude im Quartier .....	40
Abbildung 23: Darstellung des Lageplans mit einer Art „Mini-Nahwärme“ pro Wohnblock .....	41
Abbildung 24: Nahwärmeverluste eines „Mini-Nahwärmenetzes“ pro Wohnblock bei verschiedenen Wärmeschutzstandards der Gebäude im Quartier .....	42
Abbildung 25: Einfluss des Wärmeschutzstandards der Gebäude auf den Wärmeverbrauch im Quartier .....	43
Abbildung 26: Darstellung einer Energiebodenplatte (links) und eines Bewehrungskorbs einer Energieschlitzwand (rechts) mit Einbindung der Absorberrohre .....	46
Abbildung 27: Beispiel von Wand- und Bodenabsorber bei einem Büro- und Verwaltungsgebäude .....	46
Abbildung 28: Solaraufständerung „FixGrid“ für Flachdächer .....	48
Abbildung 29: Belegung mit PV-Modulen bei hoher Ausnutzung auf den Flachdächern .....	49
Abbildung 30: Solaraufständerung „Sattel“ für Gründächer .....	51
Abbildung 31: Belegung der Gründächer mit PV-Modulen bei hoher Ausnutzung auf den Flachdächern .....	51
Abbildung 32: Simulationsmodell für Passivhaus-Gebäude mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ...	58
Abbildung 33: Gegenüberstellung der Stromproduktion der PV-Anlage mit dem Stromverbrauch des Gebäudes (Wärmepumpe + Haushaltsstrom) beim Beispielgebäude EFH – ohne E-Auto .....	59
Abbildung 34: Gegenüberstellung der Stromproduktion der PV-Anlage mit dem Stromverbrauch des Gebäudes (Wärmepumpe + Haushaltsstrom) beim Beispielgebäude EFH – mit E-Auto .....	60

- Abbildung 35: Gegenüberstellung der Stromproduktion der PV-Anlage mit dem Stromverbrauch des Gebäudes (Wärmepumpe + Haushaltsstrom) beim Beispielgebäude MFH – ohne E-Auto.....60
- Abbildung 36: Gegenüberstellung der Stromproduktion der PV-Anlage mit dem Stromverbrauch des Gebäudes (Wärmepumpe + Haushaltsstrom) beim Beispielgebäude MFH – mit E-Auto.....61

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirtschaftlichkeit der Energiekonzepte auf Quartiersebene .....	13
Tabelle 2: Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen im Quartier .....	15
Tabelle 3: Primärenergiefaktoren auf Quartiersebene .....	16
Tabelle 4: Jahresbilanz des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes für die graue Energie, Nutzerstrom und Wärmeversorgung auf Quartiersebene .....	17
Tabelle 5: Jahresbilanz des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes für den Energieverbrauch im Betrieb auf Quartiersebene .....	18
Tabelle 6: Notwendige PV-Fläche im Quartier zur Erreichung der Klimaneutralität des Energieverbrauchs im Betrieb .....	19
Tabelle 7: Wirtschaftlichkeit beim Beispielgebäude Einfamilienhaus .....	23
Tabelle 8: Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage beim Beispielgebäude Einfamilienhaus .....	24
Tabelle 9: Primärenergiefaktoren beim Beispielgebäude Einfamilienhaus .....	25
Tabelle 10: Jahresbilanz des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes für den Energieverbrauch im Betrieb beim Beispielgebäude EFH .....	26
Tabelle 11: Notwendige PV-Fläche beim Beispielgebäude EFH zur Erreichung der Klimaneutralität des Energieverbrauchs im Betrieb .....	28
Tabelle 12: Wirtschaftlichkeit beim Beispielgebäude Mehrfamilienhaus .....	33
Tabelle 13: Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage beim Beispielgebäude Mehrfamilienhaus .....	34
Tabelle 14: Primärenergiefaktoren beim Beispielgebäude MFH .....	35
Tabelle 15: Jahresbilanz des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes für den Energieverbrauch im Betrieb beim Beispielgebäude MFH .....	36
Tabelle 16: Notwendige PV-Fläche beim Beispielgebäude MFH zur Erreichung der Klimaneutralität des Energieverbrauchs im Betrieb .....	38
Tabelle 17: Übersichtstabelle zur Nutzung von PV-Anlagen im Quartier bei Flachdachbebauung	49
Tabelle 18: Übersichtstabelle zur Nutzung von PV-Anlagen im Quartier bei Bebauung mit Satteldach .....	50
Tabelle 19: Übersichtstabelle zur Nutzung von PV-Anlagen im Quartier bei Flachdachbebauung mit Gründach .....	52
Tabelle 20: Annahmen für Anzahl E-Autos, Speicherkapazitäten und Leistungen im Quartier .....	53
Tabelle 21: Auswahl an Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	55
Tabelle 22: Spezifische Kosten des GEG-Gebäudes (KG300-700) - ohne Berücksichtigung der Wärmeerzeugung .....	55
Tabelle 23: Mehrpreis der Investition für höheren Wärmeschutzstandard gegenüber GEG2020 .....	56
Tabelle 24: Annahme der verwendeten Bauteile für den Vergleich der grauen Energie von Holz- und Massivbau .....	57
Tabelle 25: CO <sub>2</sub> -Emissionen im Quartier durch graue Energie beim Bauprozess .....	57
Tabelle 26: Simulierte Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen bei verschiedenen Wärmequellen .....	59

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, IAB Forschungsbericht - Elektromobilität 2035, Nürnberg, 5.Dezember 2018
- [2] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Freiburg, Fassung vom 31.7.2019
- [3] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien, „GEMIS,“ [Online]. Available: <http://iinas.org/gemis-de.html> [Zugriff am 05.05.2020].
- [4] Fraunhofer IRB, Wirtschaftlichkeit baulicher Investitionen bei Erhöhung energetischer gesetzlicher Anforderungen, Berlin, 2018
- [5] Sylvia Kürten - RWTH Aachen, Doktorarbeit: Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen, Aachen, 09.12.2014
- [6] Umweltbundesamt, Klimaschutz im Stromsektor 2030 – Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung, Dessau-Roßlau, Januar 2017
- [7] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Oberflächennahe Geothermie, München, Juli 2005
- [8] Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS), Leben im Passivhaus Baukonstruktion, Baukosten, Energieverbrauch, Bewohnererfahrungen, Dortmund, 2007
- [9] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Wärmenetze in Kommunen Leitfaden - In zehn Schritten zum Wärmenetz, Augsburg, Dezember 2017
- [10] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017) Online unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/BJNR106610014.html](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html) [Zugriff am 02.01.2020].
- [11] ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Wärmenetzsysteme 4.0 Endbericht –Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen“, Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln, April 2017
- [12] ages GmbH, Energieverbrauchskennwerte energetisch hocheffizienter Gebäude, Münster, September 2015
- [13] Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur; Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf, Studie im Auftrag des BMVI; Berlin 2020
- [14] Studie ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden (Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz u.a.); Dezentrale vs. Zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt; Darmstadt, Dresden, 04. August 2016
- [15] Deutsche Bauzeitschrift (DBZ) – Energie Spezial 6/2017
- [16] H.Hofinger/R.Markiewicz/D.Adam/W.Unterberger –Geothermal energy systems for major projects – design and construction
- [17] Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Wald; Holzbau vs. Massivbau – Ein umfassender Vergleich zweier Bauweisen im Zusammenhang mit dem SNBS Standard; Bern 2015
- [18] PLANUNGSHILFE Solarenergie und Dachbegrünung online unter [https://www.zinco.de/sites/default/files/2021-03/ZinCo\\_Gruendach\\_Solar.pdf](https://www.zinco.de/sites/default/files/2021-03/ZinCo_Gruendach_Solar.pdf), aufgerufen am 11.07.2021
- [19] <https://schletter-group.com/>, aufgerufen am 11.07.2021

- [20] Schweizerische Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E., Der typische Haushalt-Stromverbrauch, Zürich, Dez. 2013