



Partner:

STUTTGART



Fraunhofer
IBP



STADTWERKE
STUTTGART



Universität Stuttgart

IREES
research for future.

überlingen

BGU
Baugewissenschaft Überlingen eG

Fraunhofer
FIT
Projektgruppe
Wirtschaftsinformatik

STADTWERK
AM SEE

energieagentur

puren®

FWW
München

Assoziierte Partner:

SAINT-GOBAIN

SWSG
Städtisches Wasser- und
Sewerageamt Stuttgart
St. Christophorus-Str. 100-102

D3.2.1

Leitfaden für die Entwicklung von klimaneutralen Energieversorgungskonzepten für Wohnquartiere

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Erstellt im Verbundvorhaben STADTQUARTIER 2050
im Rahmen der Förderinitiative „Solares Bauen /
Energieeffiziente Stadt“ aus dem 6. Energieforschungs-
programm

Autoren:

Johannes Schrade
Micha Illner
Heike Erhorn-Kluttig
Hans Erhorn

Stuttgart, 30. Juni 2022

Inhalt

1	Zielsetzung und Anwendungsbereiche	4
2	Anwendung des Leitfadens	5
3	Versorgungskonzepte	8
3.1	Dezentrale (gebäudeweise) Versorgungskonzepte	8
3.2	Zentrale (quartiersbezogene) Versorgungskonzepte (Nahwärme)	13
3.3	Zentrale (quartiersübergreifende) Versorgungskonzepte (Fernwärme)	17
4	Methodik	19
4.1	Gebäudemodellierung	19
4.2	Nutzerstrom	22
4.3	Zentrale Wärmeerzeuger	23
4.4	Wärmenetze	25
4.5	Photovoltaik	26
4.6	Energiekosten und Klimabilanz	27
4.7	Investitionskosten	29
5	Bewertungskriterien	33
5.1	Monetäre Bewertung	33
5.2	Bewertung mit weichen Faktoren	36
6	Beispielhafte Anwendung	37
7	Ausblick	41
8	Literaturverzeichnis	43
9	Anhang	49
A.1	Beschreibung der betrachteten Siedlungstypologien	49
A.2	Bewertungstabellen für die monetäre Bewertung	54

A.3	Fragenkatalog zu limitierenden Faktoren	70
A.4	Ausschlusskriterien von Versorgungskonzepten	72
A.5	Bewertung mit weichen Faktoren	73
A.6	Gebäudekennwerte	78
A.7	Kostenkennwerte	79
A.8	Berechnungsmodelle für zentrale Wärmeerzeuger	80

1 Zielsetzung und Anwendungsbereiche

Die Auswahl geeigneter Lösungsansätze für eine klimaneutrale Energieversorgung von neuen oder bestehenden Wohnquartieren stellt die handelnden Personen und Entscheidungsträger vor unterschiedliche Herausforderungen mit teils gegensätzlichen Zielsetzungen. Dies liegt nicht nur an einer ganzen Fülle potenziell vielversprechender Technologien, sondern auch an siedlungsspezifischen und politischen Randbedingungen, welche die Entwicklung einer ganzheitlichen guten Lösung erschweren können.

In diesem bewusst kurz und übersichtlich gehaltenen Leitfaden sollen verschiedene Lösungsansätze für eine klimaneutrale Energieversorgung von Wohnquartieren vorgestellt und deren Eignung für unterschiedliche Siedlungsstrukturen geprüft werden.

Das Ziel der Klimaneutralität bezieht sich dabei auf eine ausgeglichene Jahresbilanz der Treibhausgasemissionen im Betrieb. Hierfür werden die Treibhausgase, die durch den Gebäudebetrieb (Wärme- und Stromversorgung) freigesetzt werden, in eine der Wirkung entsprechenden Menge CO₂ umgerechnet (CO₂-Äquivalent). Die Allokation der Treibhausgase erfolgt nach dem Verursacherprinzip. Nicht betrachtet werden Emissionen der Mobilität, des Konsums und aus der Erstellung von Gebäude- und Infrastruktur.

Die Betrachtung der Versorgungskonzepte erfolgt in diesem Leitfaden nicht rein auf monetärer Ebene, sondern es werden auch weiche Bewertungsfaktoren berücksichtigt, um den Bewertungsrahmen umfassender aufzuspannen und so einen möglichst ganzheitlichen und trotzdem leicht verständlichen Blick auf die Konzepte zu ermöglichen.

Als wichtigste Zielgruppe für diesen Leitfaden wurden Quartiersmanager und Stadtplanungsbüros im Auftrag öffentlicher Entscheidungsträger identifiziert. Die Informationstiefe und Ergebnisaufbereitung ist auf die Belange dieser Zielgruppe zugeschnitten. Aber auch interessierte Wohnbaugesellschaften und Energieversorger können auf Basis des Leitfadens eine erste Bewertung verschiedener Lösungsansätze für Wohnquartiere vornehmen.

2 Anwendung des Leitfadens

Der vorliegende Leitfaden ermöglicht einen schnellen, aber umfassenden Blick auf mögliche Versorgungskonzepte für unterschiedliche Siedlungsformen von Wohnquartieren. Das im Leitfaden beschriebene Vorgehen bis zur Identifizierung eines passenden Versorgungskonzepts lässt sich in fünf Teilschritte unterteilen, welche in Bild 1 dargestellt sind.



Bild 1:
Prozessschema zur Auswahl geeigneter Versorgungskonzepte für Wohnquartiere

Zu Beginn des Auswahlprozesses gibt der Nutzer die relevanten Randbedingungen des zu betrachtenden Quartiers an. Dazu wird das untersuchte Gebiet einem Siedlungstyp (ST) zugewiesen und für den Standort eine passende Klimazone ausgewählt. Die Eingabedaten sind bewusst geringgehalten, um einen schnellen Einstieg ohne große Vorkenntnisse zu ermöglichen.

Aus den Informationen zu Siedlungstyp und Klimazone kann in einem zweiten Schritt die Bewertungstabelle für den Variantenvergleich identifiziert werden. Die vorberechneten Bewertungstabellen stehen unterteilt nach Siedlungstyp und Klimazone im Anhang A.2 zur Verfügung und werden dem weiteren Auswahlprozess zugrunde gelegt.

Im dritten Schritt werden standortspezifische limitierende Faktoren erfasst, anhand derer die Auswahl geeigneter Konzepte am jeweiligen Standort eingeschränkt werden kann. Zur Erfassung der limitierenden Faktoren steht dem Nutzer im Anhang A.3 ein Fragenkatalog zur Verfügung.

Anschließend können die am jeweiligen Standort geeigneten Versorgungskonzepte mit Hilfe einer Bewertungstabelle anhand weicher Faktoren weiter eingeschränkt werden.

Abschließend besteht die Möglichkeit, eine Priorisierungsregel für die monetäre Bewertung der Versorgungskonzepte festzulegen. Hierfür kann die Perspektive des Investors, der Bewohner, der externen Kompensation oder der Volkswirtschaft eingenommen werden.

Aus den Bewertungstabellen im Anhang A.2 lassen sich schließlich die für den jeweiligen Standort am besten geeigneten Versorgungskonzepte unter Berücksichtigung weicher Faktoren und der gewählten Priorisierungsregel ermitteln.

Auswahl Siedlungstyp

Um einen einfachen Einstieg in das Thema zu ermöglichen, sind für die in Deutschland am häufigsten vorkommenden Siedlungsformen relevante Merkmale aus bestehenden Siedlungstypologien ([Roth 1980], [Blesl 2002]) zusammengestellt. Der Anwender des Leitfadens kann zwischen den folgenden fünf Siedlungstypen wählen:

- ST 2 – Einfamilienhaussiedlung
- ST 4 – Reihenhaussiedlung
- ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern
- ST 6 – Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern
- ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte

Die den Siedlungstypen zugrundeliegenden Datensätze umfassen Informationen zum vorherrschenden Typgebäude und zur mittleren Grundfläche, zur Siedlungsdichte (Anzahl Gebäude) sowie zur verkehrlichen Erschließung der Siedlung (Abstand der Gebäude zur Straße und Gesamtstraßenlänge im Wohnquartier). Eine Beschreibung der verwendeten Siedlungstypen mit Luftbildaufnahmen von beispielhaften Wohnquartieren kann dem Anhang A.1 entnommen werden.

Auswahl Klimazone

Zur Auswahl der Klimazone, in der sich der zu untersuchende Standort befindet, kann zwischen folgenden drei Klimazonen ausgewählt werden:

- Gemäßigtes Klima, mittlere Solarstrahlung: Potsdam (Klimazone 4)
- Kaltes Klima, geringe Solarstrahlung: Fichtelberg (Klimazone 11)
- Mildes Klima, hohe Solarstrahlung: Mannheim (Klimazone 12)

Die mögliche Auswahl wurde bewusst eingeschränkt und enthält neben dem Referenzklima Deutschland (Standort Potsdam) einen ungünstigen Standort mit kaltem Winter und geringer Solarstrahlung (Fichtelberg) und einen günstigen Standort mit mildem Winter und hohem Strahlungsangebot (Mannheim). Im Zweifelsfall sollte der Standort Potsdam gewählt werden.

Limitierende Faktoren

Nicht jedes Versorgungskonzept ist für jeden Siedlungstyp und jeden Standort in gleichem Maße geeignet. Zur Eingrenzung der Anzahl möglicher Versorgungskonzepte werden folgende limitierende Faktoren am jeweiligen Standort erfasst:

- Verfügbarkeit von Fernwärme und deren Zusammensetzung,
- Zugang zu einem Gasnetz,
- verfügbare Freiflächen in Quartiersnähe,
- geologische Eigenschaften des Untergrunds,
- Nutzbarkeit des Grundwassers,
- Nutzbarkeit von Abwasserwärme,
- Einschränkungen durch kommunale Satzungen (Verbrennungsverbot, Anschlusszwang, Solarpflicht, etc.),
- vorhandene Investoren und Betreiber für ein Quartiersnetz.

Eine Zusammenstellung der limitierenden Faktoren mit Angaben zu ihren Auswirkungen auf die Eignung von Versorgungskonzepten ist im Anhang A.4 dargestellt.

3 Versorgungskonzepte

Die Lösungsansätze für eine klimaneutrale Energieversorgung von Wohnquartieren sind vielfältig. Sie können als dezentrale gebäudeweise Versorgung, zentrale quartiersbezogene Versorgung oder quartiersübergreifende Versorgung (Fernwärme) angelegt sein. Für eine zukunftssichere und kostenstabile Versorgung ist die Erschließung von lokal verfügbaren erneuerbaren Ressourcen und der weitest gehende Verzicht auf klimaschädliche fossile Energieträger wie Steinkohle, Braunkohle oder Heizöl anzustreben. Der Einsatz von Erdgas ist möglichst auf die Spitzenlastdeckung oder auf Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung zu beschränken. Die verbleibenden Treibhausgasemissionen sind durch Gutschriften für PV-Stromeinspeisung oder Zertifikate auszugleichen. Alternativ sind biogene Brennstoffe einzusetzen.

Prinzipiell gibt es eine Vielzahl an möglichen Versorgungslösungen. Bei der getroffenen Auswahl wurden die gängigsten Lösungen berücksichtigt, deren Verfügbarkeit nicht zu stark eingeschränkt ist und bei denen keine zu großen technischen und rechtlichen Herausforderungen zu bewältigen sind.

3.1 Dezentrale (gebäudeweise) Versorgungskonzepte

Luft-Wasser-Wärmepumpe

Bei diesem Versorgungskonzept wird der Wärmebedarf durch Luft-Wasser-Wärmepumpen in den Gebäuden gedeckt. Als Wärmequelle dient die Außenluft, die Wärmeverteilung im Gebäude erfolgt durch ein wassergeführtes System. In der Regel werden Luft-Wasser-Wärmepumpen mit einer zusätzlichen elektrischen Heizpatrone ausgestattet. Für die Auslegung der Wärmepumpe wird hier eine Bivalenztemperatur von -5 °C angesetzt. Bei Unterschreiten dieser Temperatur erfolgt die Wärmebereitung im Parallelbetrieb von Wärmepumpe und elektrischem Heizstab. Um eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen, wird die Vorlauftemperatur im Heizkreis auf 35 °C begrenzt. Für die Trinkwarmwasserbereitung wird eine zentrale Verteilung mit Zirkulation und Trinkwarmwasserspeicher angesetzt.

Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden / Erdkollektoren

Sole-Wasser-Wärmepumpen nutzen in der Regel das Erdreich als Wärmequelle. Im Bestand bzw. bei geringer Freifläche wird das Erdreich über Erdsonden bzw. Erdlanzen erschlossen. Typischerweise reichen die Erdsonden bis zu 100 Meter tief in das Erdreich. Da in tieferen Schichten das Erdreich geringeren Temperaturschwankungen unterliegt, ergibt sich eine gleichmäßige Quellentemperatur von $10\text{ bis }12\text{ °C}$. Die mögliche Wärmeentzugsleistung ist stark von der Gesteinsart und dem Grundwassereinfluss abhängig

und kann zwischen 20 W/m² (sandig, trocken) und 40 W/m² (bindig, feucht) betragen. Bei starkem Grundwassereinfluss kann die Entzugsleistung im Einzelfall auch über 65 W/m² liegen. Aufgrund der gleichmäßigen Quellentemperatur kann die Wärmepumpe monovalent betrieben werden, d. h. es wird hier kein zusätzlicher Heizstab vorgesehen. Die Wärmeverteilung im Gebäude erfolgt, wie bei der Luft-Wasser-Wärmepumpe, durch ein wassergeführtes System. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt zentral mit Zirkulation.

Bei ausreichend großer Freifläche kann das Erdreich auch durch einen horizontal verlegten Kollektor erschlossen werden. Die Kunststoffrohre des Erdwärmekollektors werden typischerweise in einer Tiefe von 1 bis 1,5 m verlegt. Je nach Beschaffenheit des Untergrunds kann eine Entzugsleistung zwischen 10 W/m² (sandig, trocken) und 30 W/m² (bindig, feucht) erreicht werden. Im Grundwassereinflussbereich sind auch bis zu 35 W/m² erreichbar. Die Temperatur im oberflächennahen Boden unterliegt aufgrund Sonnenstrahlung, Außentemperatur und Niederschlag stärkeren Schwankungen. Trotz dieser stärkeren Temperaturschwankung kann auf einen zusätzlichen Heizstab verzichtet werden. Im Leitfaden werden die erdgekoppelten Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdsonden und Erdkollektoren gemeinsam behandelt.

Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren

Eine Alternative zu erdreichgekoppelten Systemen sind Sole-Wärmepumpen mit Photovoltaisch-Thermischen (PVT) Kollektoren. Diese Solarkollektoren vereinen das Wirkprinzip des thermischen Kollektors und der Photovoltaik (PV). Während die solare Wärmestrahlung mittels eines Luft-Wärmetauschers über ein flüssiges Wärmeträgermedium (Sole) abgeführt und der Wärmepumpe als Wärmequelle für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung zur Verfügung gestellt wird, erzeugt das PV-Modul elektrische Energie. Da der Wirkungsgrad von PV-Modulen stark temperaturabhängig ist, kann durch das Abführen der thermischen Energie eine Effizienzsteigerung bei der Stromerzeugung von bis zu 10 % erzielt werden. In Zeiten ohne Solarstrahlung kann der Luft-Wärmetauscher an der Rückseite des PVT-Kollektors aus der Umgebungsluft weiterhin Energie ziehen. Beim hier betrachteten PVT-System liegt die Einsatzgrenze bei einer Außentemperatur von -12 °C, die Betriebsgrenze der Sole-Wärmepumpe bei -15 °C. Wärmeverteilung und Trinkwarmwasserbereitung bleiben unverändert gegenüber den vorangegangenen Versorgungskonzepten.

Wasser-Wasser-Wärmepumpe

Wasser-Wasser-Wärmepumpen nutzen das Grundwasser als Wärmequelle. Das Grundwasser, das ganzjährig eine Temperatur zwischen 8 und 12 °C bietet, wird über eine Pumpe aus dem Ansaugbrunnen zur Wärmepumpe gefördert und dort über einen Wärmetauscher an das Wärmeträgermedium der Wärmepumpe übergeben. Das abgekühlte Grundwasser wird über einen Schluckbrunnen wieder dem Untergrund zugeführt. Die Wärmeverteilung im Gebäude erfolgt in Analogie zu den oben beschriebenen Wärmepumpensystemen. Voraussetzung für den Betrieb einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe ist einerseits eine ausreichende Grundwassermenge, andererseits eine möglichst hohe Reinheit des Grundwassers. Für die Bohrung der Grundwasserbrunnen ist eine Genehmigung bei der unteren Wasserbehörde einzuholen. Aufgrund des erhöhten Installationsaufwands liegt der Einsatzbereich von Wasser-Wasser-Wärmepumpen hauptsächlich bei größeren Gebäuden mit einem hohen Leistungsbedarf.

Gas-Brennwertkessel mit solarer Trinkwarmwasserbereitung

Eine weitverbreitete Variante der Wärmeerzeugung mit niedrigen Investitionskosten ist der Gas-Brennwertkessel mit solarer Trinkwarmwasserbereitung. Das System besteht aus einem Solarkollektor für die Brauchwassererwärmung, einem Gas-Brennwertkessel für die Heizung und einem solaren Trinkwarmwasserspeicher, der von beiden Wärmeerzeugern beheizt wird. Die Dimensionierung der thermischen Solaranlage erfolgt nach DIN V 18599-8 [DIN 2018]. Damit die Brennwerttechnik einen möglichst hohen Wirkungsgrad erreichen kann, werden die Systemtemperaturen im Heizkreis auf 55/45 °C begrenzt. Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt zentral mit Zirkulation.

Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizungsunterstützung

Um den solaren Deckungsanteil bei der Wärmeerzeugung zu erhöhen, kann die thermische Solaranlage auch zur Heizungsunterstützung eingesetzt werden. Die Komponenten des Versorgungskonzepts bestehen aus einem Gas-Brennwertkessel, einer thermischen Solaranlage sowie einem Wärmespeicher. Im Gegensatz zum System mit solarer Trinkwarmwasserbereitung wird die Solarwärme nicht direkt an das Trinkwarmwasser abgegeben, sondern in den Pufferspeicher eingespeist. Für die Dimensionierung der Kollektorfläche kann vereinfacht mit dem 2,0-fachen der für die reine Trinkwarmwasserbereitung benötigten Kollektorfläche gemäß DIN V 18599-8 gerechnet werden (vgl. [BDH 2019]). Um in den Übergangsmonaten einen möglichst hohen Ertrag zu erzielen, wird eine Südorientierung mit Neigungswinkel von 45° angesetzt. Die Systemtemperaturen für den Heizkreis orientieren sich an den

Anforderungen der Brennwerttechnik. Die Trinkwasserverteilung erfolgt zentral mit Zirkulation.

Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe

Eine Alternative zur Kombination von konventioneller Brennwerttechnik mit Solarthermie ist die Einbindung von Abluft-Wärmepumpen für die Trinkwarmwasserbereitung. In diesem Versorgungskonzept erfolgen Trinkwarmwasserbereitung und Heizung getrennt voneinander durch unterschiedliche Wärmeerzeuger. Für die Beheizung der Gebäude wird ausschließlich der Gas-Brennwertkessel eingesetzt, die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt wohnungsweise mittels Wärmepumpen. Als Wärmequelle wird die Abluft einer Wohnungslüftungsanlage verwendet. Aufgrund der konstant hohen Temperatur der Abluft ist ein besonders effizienter Wärmepumpenbetrieb möglich. Durch die dezentrale Anordnung der Trinkwarmwasserbereitung lassen sich zudem die Verteilverluste reduzieren. Die zur Verfügung stehende Wärmemenge und die damit erzielbare Wärmeleistung für die Warmwasserbereitung sind jedoch sehr begrenzt, so dass eine Trinkwarmwasserspeicherung notwendig wird und die Abluft-Wärmepumpe im Dauerbetrieb läuft.

Biomassekessel

Klimaschonender als ein Gas-Brennwertkessel ist die Wärmeherzeugung mit einem Biomassekessel. Als Festbrennstoffe werden in der Regel Hack-schnitzel oder Holzpellets eingesetzt. Aber auch bei der Verbrennung von Biomasse entstehen Schadstoffe wie beispielsweise Feinstaub. Für die Lagerung des Brennstoffes wird ausreichend Platz für ein Silo oder Tank benötigt. Die Beschickung des Biomassekessels erfolgt über eine Förderschnecke oder ein Ansaugen des Brennstoffes. Je nach Bauart des Biomassekessels sind thermische Wirkungsgrade von 92 % (Standardkessel) bis zu 103 % (Brennwertkessel für Holzpellets) erreichbar. Damit die Biomasseheizung in einem optimalen Leistungsbereich arbeiten kann und ein häufiges Ein- und Ausschalten des Wärmeherzeugers vermieden wird, sollte ein zusätzlicher Pufferspeicher vorgesehen werden. Da der Standardkessel auch mit Vorlauftemperaturen von 70 °C effizient arbeiten kann, ist das Versorgungssystem auch in unsanierten Bestandsbauten nutzbar. Für den Leit-faden wurde von einem Standardkessel mit Baujahr nach 1994 und einer Systemtemperatur von 70/55 °C ausgegangen.

Biomassekessel mit solarer Trinkwarmwasserbereitung

Vergleichbar zur Variante mit Gas-Brennwertkessel kann auch der Biomassekessel mit einer solaren Trinkwarmwasserbereitung kombiniert werden. Das Versorgungskonzept setzt sich zusammen aus einem Biomassekessel, einem Solarkollektor zur Brauchwasserbereitung und einem solaren Trinkwarmwasserspeicher. Die Dimensionierung der thermischen Solaranlage erfolgt nach den gleichen Ansätzen wie bei einer Kombination mit Gas-Brennwertkessel. Die Systemtemperatur im Heizkreis kann bei Verwendung eines Standardkessels mit 70/50 °C etwas höher angesetzt werden.

Biomassekessel mit solarer Heizungsunterstützung

Auch eine Kombination des Biomassekessels mit einer solaren Heizungsunterstützung ist denkbar. Hierfür wird der thermische Sonnenkollektor größer dimensioniert und die Solarwärme in den Pufferspeicher übergeben. Auf einen separaten solaren Trinkwarmwasserspeicher wird verzichtet, stattdessen erfolgt die Warmwasserbereitung im Durchflussprinzip im Pufferspeicher. Die Dimensionierung der thermischen Solaranlage erfolgt nach den gleichen Ansätzen wie bei der Variante mit Gas-Brennwertkessel. Bei Verwendung eines Standardkessels kann die Systemtemperatur im Heizkreis auf 70/50 °C festgelegt werden.

Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel für Spitzenlast

Eine besondere Form der Energieerzeugung ist die gekoppelte Kraft- und Wärmeerzeugung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW). Dabei wird primär Strom erzeugt und die bei der Verbrennung anfallende Abwärme für die Wärmeversorgung genutzt. Der große betriebliche Vorteil eines BHKW gegenüber erneuerbaren Energiesystemen ist dessen Grundlastfähigkeit, d. h., dass Strom zeitlich unabhängig zur Verfügung gestellt werden kann, vorausgesetzt die entstehende Wärme kann abgeführt oder in einem Pufferspeicher gespeichert werden. Für einen wirtschaftlichen Betrieb des BHKW sind Volllaststunden von über 5.000 Stunden erforderlich. Die Dimensionierung des BHKW orientiert sich daher an der thermischen Grundlast des Gebäudes zuzüglich der Speicherkapazität des Pufferspeichers. Die Spitzenlasten, die nicht durch das BHKW gedeckt sind, werden durch einen Gas-Brennwertkessel bereitgestellt.

Zur Berechnung des Stromertrags aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird für kleine BHKW mit einer thermischen Leistung bis 20 kW ein thermischer Wirkungsgrad von 60 % und eine Stromkennzahl von 0,35 angesetzt. Für die größeren BHKW ab einer thermischen Leistung von 20 kW wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 35 % und ein thermischer Wirkungsgrad von

50 % angenommen (vgl. [DIN 2018]). Der Anteil der KWK an der erforderlichen Heizleistung wird pauschal mit 35 % angesetzt.

Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel für Spitzenlast

Eine besondere Form der Kraft-Wärme-Kopplung stellt die Brennstoffzellenheizung dar. Sie erzeugt Strom und Wärme nicht wie klassische BHKW durch Verbrennung, sondern in Folge eines elektrochemischen Prozesses. Der Gesamtwirkungsgrad dieser sogenannten „kalten Verbrennung“ liegt bei ca. 90 %, wobei die Brennstoffzelle einen besonders hohen elektrischen Wirkungsgrad (ca. 40 %) aufweist. Um Wasserstoff zu erzeugen, wird der Brennstoffzelle Erdgas zugeführt. Im Reformier wird das Erdgas mit Wasserdampf gemischt und in die Brennstoffzelle geleitet. Dort reagiert der Wasserstoff mit Sauerstoff und erzeugt Strom und Wärme. Damit die Brennstoffzelle effektiv und wirtschaftlich arbeitet, ist ein kontinuierlicher Betrieb und ein hoher Eigenverbrauchsanteil notwendig. Um dies zu erreichen, wird ein Wärmespeicher in das System integriert und ein Zusatzheizer für die Spitzenlastabdeckung vorgesehen. Für die Potenzialabschätzung wird von einem KWK-Deckungsanteil von 10 % ausgegangen.

3.2 Zentrale (quartiersbezogene) Versorgungskonzepte (Nahwärme)

Zentrale, quartiersbezogene Versorgungskonzepte unterscheiden sich von den dezentralen Versorgungskonzepten darin, dass die Wärmeerzeugung an einem zentral im Wohnquartier gelegenen Ort geschieht und die Wärme über Wärmenetze an die einzelnen Gebäude verteilt wird. Die Wärmeübergabe in den Gebäuden erfolgt über einen Wärmetauscher in einer Übergabestation, welche das Gebäude hydraulisch vom Wärmenetz entkoppelt.

Nahwärmenetze können als Zwei-, Drei- und Vierleiternetze ausgeführt werden, wobei Drei- und Vierleiternetze den Vorteil bieten, dass Wärme auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus zum Abnehmer transportiert werden kann. Dies vereinfacht die Einbindung erneuerbarer Energien sowie die Versorgung von Neubauten und Bestandsgebäuden und trägt zu einem effizienten Netzbetrieb bei. Allerdings steigen die Investitionskosten von Wärmenetzen mit der Anzahl an Leitern.

Eine netzgebundene Wärmeversorgung bringt gegenüber dezentralen Lösungen weitere Vorteile. So sind beispielsweise positive Skaleneffekte bei den Investitionskosten zu erzielen, da mit steigender Anlagengröße die Kosten je installiertem Kilowatt Leistung rückläufig sind. Auch steigt mit der Anlagengröße häufig die Effizienz, was sich sowohl beim Energieverbrauch als auch bei den laufenden Kosten bemerkbar macht.

Aufgrund zeitlicher Streuung von individuellen Lastspitzen in den Gebäuden kommt es in Wärmenetzen zu einer Verringerung der maximalen Gesamtleistungsanforderung gegenüber der Summe der nominellen Nennleistungen der Einzelabnehmer. Durch Berücksichtigung dieses Gleichzeitigkeitseffekts bei der Anlagendimensionierung können die zu installierende Leistung und die damit verbundenen Investitionskosten reduziert werden. Durch die Zentralisierung der Wärmeerzeugung fallen zudem die Kosten für Wartung und Reparaturen geringer aus. Weitere positive Eigenschaften sind eine einfachere Einbindung von Abwärme und der reduzierte Platzbedarf für die Gebäudetechnik in den angeschlossenen Gebäuden.

Andererseits erfordert eine zentrale Wärmeerzeugung zusätzliche Investitionen in das Wärmenetz. Die Wärmeverteilung im Quartier ist zudem mit Verteilverlusten verbunden. Für die Zirkulation des Wärmeträgermediums im Wärmenetz wird eine nicht zu vernachlässigende Strommenge für die Netzpumpen benötigt.

Nicht alle Wohnquartiere eignen sich für die Integration von Wärmenetzen, insbesondere Bestandsquartiere sind aufgrund der heterogenen Eigentümerstruktur und Baualtersstruktur schwer zu erschließen. Für den Aufbau eines zentralen Versorgungskonzepts müssen zusätzliche Grundstücksflächen in unmittelbarer Nähe zum Quartier zur Verfügung stehen. Im Folgenden werden die gängigsten zentralen Versorgungskonzepte für Wohnquartiere vorgestellt, mit denen eine Klimaneutralität erreicht werden kann.

Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdsondenfeld

In diesem Versorgungskonzept nutzt die zentral aufgestellte Sole-Wasser-Wärmepumpe als Wärmequelle ein Erdsondenfeld, welches sich in räumlicher Nähe zur Quartiersheizzentrale befindet. Die Sole wird vom Erdsondenfeld über Soleleitungen durch Solepumpen zur Heizzentrale transportiert. Dort erfolgt der Wärmeentzug durch die Wärmepumpe. Anschließend wird die abgekühlte Sole zurück ins Erdsondenfeld gepumpt. Erdsondenfelder erzielen aufgrund der Erschließung tieferer Erdschichten (bis zu 100 m) konstant hohe Quellentemperaturen. Bei größeren Erdsondenfeldern ist die natürliche Regeneration des Erdreichs nicht ausreichend. Eine Möglichkeit, die Regeneration des Erdreichs zu unterstützen, ist die Anbindung von Kühlanlagen ans Erdreich.

Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Agrothermie

In diesem Versorgungskonzept dient ein Erdkollektor als Wärmequelle für die angeschlossene Wärmepumpe. Konventionelle Erdkollektoren werden häufig durch Grabenbau oder Aushub errichtet und eignen sich somit nicht

für den großflächigen Einsatz. Im Leitfaden werden Agrothermiefelder betrachtet, bei denen die Rohre des Erdkollektors über einen speziellen Pflug in rund 2 m Tiefe eingebracht werden. Aufgrund der Verlegetiefe können die Flächen weiter als landwirtschaftliche Ackerfläche genutzt werden. Die Regeneration des Erdkollektors erfolgt aufgrund der geringen Tiefe durch die Solarstrahlung und den Niederschlag.

Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Abwasserwärmerückgewinnung

Städtische Abwässer erreichen ganzjährig ein Temperaturniveau, welches sich gut als Wärmequelle für Wärmepumpen nutzen lässt. Aufgrund der Investitionskosten ist dieses Konzept eher für größere Liegenschaften und Wohnquartiere geeignet. Es gibt verschiedene Arten der Abwasserwärmenutzung, wobei im Leitfaden mit Edelstahl-Wärmetauschern gerechnet wird, welche innerhalb des Kanals am Boden angebracht werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die Wärmetauscher auch bei geringen Abflussmengen überströmt werden und somit ein Wärmeentzug ermöglicht wird.

Solarthermie mit saisonaler Speicherung und Gas-BHKW

Für dieses Versorgungskonzept werden großflächige Solarthermie-Kollektorfelder bestehend aus Flachkollektoren aufgebaut, deren Wärme in großen saisonalen Wärmespeichern gespeichert wird. Für die Betrachtung wird eine ambitionierte solare Deckung von 50 % angesetzt, woraus sich die Kollektorfläche und die Speichergröße für die jeweilige Siedlungstypologie ergeben. Die restliche benötigte Wärme wird über ein Gas-BHKW mit einem Gesamtwirkungsgrad von 90 % sowie einen Gas-Spitzenlastkessel ($\eta_{th} = 100 \%$) zur Verfügung gestellt. Die Stromkennzahl des BHKW wird gemäß DIN V 18599-9, Tabelle 6 in Abhängigkeit der elektrischen Leistung des BHKW berechnet. Der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung an der benötigten Wärmeleistung wird mit 25 % angenommen, was bei einem solaren Deckungsanteil von 50 % zu niedrigen Volllaststunden führt.

Hackschnitzel-BHKW und Hackschnitzelkessel

Bei diesem Versorgungskonzept werden ausschließlich Holzhackschnitzel als Energieträger eingesetzt. Die Grundlasterzeugung der Wärme erfolgt über ein Holzgas-BHKW mit einem Deckungsanteil von 25 %. Das dafür benötigte Holzgas wird von einem Holzvergaser bereitgestellt ($\eta_{Vergaser} = 88 \%$) und direkt dem Holzgas-BHKW zugeführt. Die sowohl im Holzvergaser als auch im Holzgas-BHKW entstehende Abwärme wird zur Bedarfsdeckung im

Wärmenetz eingesetzt. Die Spitzenlasten werden durch einen Holzhackschnitzkessel ($\eta_{th} = 93 \%$) abgedeckt. Der Gesamtnutzungsgrad des BHKW wird nach DIN V 18599-9, Tabelle 6 mit 87 % angesetzt. Die Stromkennzahl wird mit 0,5 abgeschätzt.

Solarthermie mit saisonaler Speicherung und Holzhackschnitzkessel

Für dieses Versorgungskonzept werden großflächige Solarthermie-Kollektorfelder bestehend aus Flachkollektoren aufgebaut, deren Wärme in großen saisonalen Wärmespeichern gespeichert wird. Im Leitfaden wird für die Bewertung eine solare Deckung von 50 % angesetzt, woraus sich die Kollektorfäche und die Speichergröße für den jeweiligen Siedlungstyp ableiten lassen. Die verbleibende zu deckende Wärme wird über einen Holzhackschnitzkessel ($\eta_{th} = 93 \%$) bereitgestellt.

Kalte Nahwärme gespeist aus Erdsonden

Bei der hier betrachteten kalten Nahwärme wird die Sole aus dem angeschlossenen Erdsondenfeld über ein ungedämmtes, im Erdreich verlegtes Nahwärmenetz an die Gebäude verteilt. Das Temperaturniveau im Vorlauf der kalten Nahwärme entspricht dabei der Soletemperatur, welche aus den Erdsonden entnommen wird. Die kalte Nahwärme wird im Gebäude direkt an die Sole-Wasser-Wärmepumpe angeschlossen und dient dieser als Wärmequelle. Die ungedämmten Erdleitungen können zusätzliche Wärme aus dem Erdreich aufnehmen. Es werden dezentrale Pumpen an den Wärmepumpen genutzt, um die Sole zu zirkulieren.

Kalte Nahwärme gespeist aus einem Agrothermiekollektor

Für dieses Versorgungskonzept dient ein Agrothermiekollektor als Wärmequelle für die kalte Nahwärme. Die gewonnene regenerative Wärme wird über ungedämmte, im Erdreich verlegte Nahwärmenetzleitungen an die Gebäude verteilt. Das Temperaturniveau im Vorlauf der kalten Nahwärme entspricht dabei der Soletemperatur, die aus dem Agrothermiekollektor entnommen wird. Die kalte Nahwärme wird im Gebäude direkt an die Sole-Wasser-Wärmepumpe angeschlossen und dient dieser als Wärmequelle. Die ungedämmten Erdleitungen können zusätzliche Wärme aus dem Erdreich aufnehmen. Es werden dezentrale Pumpen an den Wärmepumpen genutzt, um die Sole zu zirkulieren.

Kalte Nahwärme aus Abwasserwärme

Für die Versorgung der dezentral aufgestellten und an das kalte Nahwärmenetz direkt angeschlossenen Sole-Wasser-Wärmepumpen wird in diesem Versorgungskonzept die Abwasserwärmerückgewinnung verwendet. Dabei wird der Edelstahl-Wärmetauscher, welcher am Boden des Abwasserkanals installiert ist, mit einer Soleflüssigkeit durchströmt. Die Sole wird über die erdverlegten, ungedämmten Wärmenetzleitungen zu den einzelnen Gebäuden transportiert, wobei der Medientransport von den dezentral angeordneten Pumpen übernommen wird.

3.3 Zentrale (quartiersübergreifende) Versorgungskonzepte (Fernwärme)

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, neue oder bestehende Quartiere an die bereits vorhandene quartiersübergreifende Fernwärme anzuschließen. Dabei können die Gebäude entweder einzeln an die Fernwärme angeschlossen werden (dezentrales Versorgungskonzept) oder die Fernwärme dient als Wärmeerzeuger für ein Quartiersnetz. Die Wärmeübertragung vom Wärmenetz an das Gebäude erfolgt über einen Wärmetauscher in der Übergabestation. Die Wärmeverteilung im Gebäude ist vergleichbar mit Versorgungskonzepten mit lokalen Wärmeerzeugern.

Je nach Temperaturniveau der Fernwärme können auch Hochtemperaturprozesse mit Fernwärme versorgt werden. Um die Anschlussleistung in einem sinnvollen und kostengünstigen Rahmen zu halten, werden Anschlüsse an ein Wärmenetz in der Regel mit Pufferspeichern geplant. Für die Trinkwarmwasserbereitung wird eine zentrale Verteilung mit Zirkulation angesetzt.

Je nach Art der Wärmeerzeugung verursacht die Fernwärme unterschiedliche Treibhausgasemissionen. Bei Nutzung von erneuerbaren Energien (z. B. Biomasse, Solarthermie oder PV-Strom) kann Fernwärme auch nahezu bzw. vollständig klimaneutral erzeugt werden. Durch die räumliche Distanz der Wärmeerzeugung sind die Umweltbelastungen im Versorgungsgebiet minimiert.

Grundsätzlich ist ein Fernwärmeanschluss auch mit Solarthermie oder Abluft-Wärmepumpe kombinierbar. Hierbei werden wie in den Varianten mit Gas-Brennwertkessel Teile des Wärmebedarfs durch Solarthermie bzw. der Trinkwarmwasserbedarf vollständig durch wohnungsweise Abluft-Wärmepumpen gedeckt. In den Sommermonaten kann somit auf die Abnahme von Fernwärme verzichtet werden. Während die Abhängigkeit vom Energieversorger dadurch einerseits reduziert werden kann, verschlechtert sich andererseits die Wirtschaftlichkeit der Fernwärmeversorgung aufgrund fehlender Wärmeabnahme im Sommer. Je nach Art der Fernwärmeerzeugung ergibt sich bei diesen Versorgungskonzepten folglich ein Zielkonflikt, weshalb im

Leitfaden die oben benannten dezentralen erneuerbaren Wärmeerzeuger in Kombination mit Fernwärme nicht weiterbetrachtet werden.

Bei Neubauquartieren bzw. energetisch sanierten Quartieren besteht zudem die Möglichkeit, an den Rücklauf der Fernwärme anzuschließen. Dadurch können meist günstigere Wärmeversorgungspreise realisiert werden, da eine Reduzierung der Rücklauftemperatur zu einer Reduzierung der Wärmeverluste und einer Erhöhung des Wärmeerzeugerwirkungsgrades beiträgt, was sich im Wärmepreis des Energieversorgers niederschlägt. Im Leitfaden wird diesbezüglich keine Differenzierung vorgenommen.

4 Methodik

Um die Nutzung des Leitfadens möglichst einfach zu gestalten, wurden für die oben beschriebenen Versorgungskonzepte Berechnungen angestellt und dem Anwender in Form von Ergebnistabellen im Anhang A.2 zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse können als Basis für weiterführende Untersuchungen verwendet und als Entscheidungsgrundlage für handelnde Personen herangezogen werden. Im Folgenden werden die methodischen Grundlagen der Modellierung und der energetischen Bewertung näher vorgestellt.

4.1 Gebäudemodellierung

Gebäudegeometrie

Für die Erstellung geometrischer Modelle werden baualtersübergreifende Typgebäude gebildet. Basis hierfür ist die Gebäudetypologie nach [Loga 2015], die den deutschen Wohngebäudebestand in Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser (RH), kleine Mehrfamilienhäuser (MFH), große Mehrfamilienhäuser (GMH) und Hochhäuser (HH) einteilt und für unterschiedliche Baualtersklassen baualterstypische Beispielgebäude beschreibt.

Zur Bildung der baualtersübergreifenden Typgebäude wird die Baualtersverteilung in Deutschland nach [Loga 2015] angesetzt, ergänzt durch die Flächenanteile für den Neubau ab 2009 aus [destatis 2019]. Auf Basis der Wohnflächenanteile der baualterstypischen Beispielgebäude je Typgebäude werden mittlere geometrische Kennwerte für Nettogrundfläche, beheiztes Volumen, Dach, Außenwand und Fenster gebildet. Diese mittleren Kennwerte werden mit der IWU-Gebäudetypologie verglichen und das jeweilige baualterstypische Beispielgebäude mit den geringsten Abweichungen identifiziert.

Mit diesem methodischen Ansatz ergeben sich folgende Typgebäude aus der Gebäudetypologie nach [Loga 2015], die als baualtersübergreifende Typgebäude im Leitfaden zur Abbildung der Gebäudegeometrie Verwendung finden:

- Einfamilienhaus: EFH_F
- Reihenhäuser: RH_C
- Kleines Mehrfamilienhaus: MFH_G
- Großes Mehrfamilienhaus: GMH_F
- Hochhaus: NBL_HH_F

Die den Typgebäuden zugrundeliegenden geometrischen Grunddaten sind im Anhang A.6 zusammengestellt.

Wärmeschutz

Um die Auswirkungen von baulichen Maßnahmen an der Gebäudehülle zu berücksichtigen, werden im Leitfaden folgende vier Wärmeschutzniveaus betrachtet:

- **Bestand:** Mittleres Wärmeschutzniveau des unsanierten Gebäudebestands mit Bauteilkennwerten gemäß [BMWi 2015] für die Baualtersklasse 1969 bis 1978 (entspricht der Baualtersklasse mit der größten Wohnfläche in Deutschland (vgl. [Cischinsky 2018])).
- **GEG-Ref:** Energetischer Standard des Referenzgebäudes nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) [GEG 2020].
- **EH 55:** Anforderungsniveau gemäß Bundesförderung für effiziente Gebäude an das KfW-Effizienzhaus 55 zum Zeitpunkt der Leitfadenerstellung im November 2021 [KfW 2020].
- **EH 40:** Anforderungsniveau gemäß Bundesförderung für effiziente Gebäude an das KfW-Effizienzhaus 40 zum Zeitpunkt der Leitfadenerstellung im November 2021 [KfW 2020].

Während bei Sanierungsvorhaben grundsätzlich alle vier energetischen Niveaus auftreten bzw. erreicht werden können, sind bei Neubauvorhaben nur die ambitionierten Wärmeschutzniveaus EH 55 und EH 40 von Relevanz. Die angesetzten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) können dem Anhang A.6 entnommen werden.

Lüftungskonzept

Neben dem Wärmeschutzniveau der Gebäudehülle werden im Leitfaden folgende drei Lüftungskonzepte betrachtet:

- **Fensterlüftung (FL):** Alle Räume verfügen über einen Außenluftzugang über Fenster und werden ausschließlich über diese belüftet (Feuchteschutz und hygienischer Luftwechsel).
- **Abluftanlagen (AL):** Die Räume werden über Zuluftöffnungen in den Außenwänden belüftet, wobei die Abluftanlage in den Sanitärräumen für den notwendigen Antriebsdruck sorgt.

- **Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (ZL):** Die Räume werden mit Zu- und Abluft versorgt, wobei die Abluft im Lüftungsgerät über einen Wärmetauscher geführt wird und so die enthaltene Wärme auf die Zuluft übertragen wird. Der Rückwärmegrad wird mit 80 % angesetzt.

Um die Variantenzahl gering zu halten, werden die Lüftungskonzepte in Abhängigkeit des Typgebäudes dem jeweiligen Wärmeschutzniveau zugeordnet. Die Zuordnung basiert auf einer Einschätzung der statistischen Relevanz unterschiedlicher Kombinationen in der gebauten Realität. Die im Leitfaden verfügbaren Kombinationen sind in der nachstehenden Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1:
Zuordnung der Lüftungskonzepte zu den Wärmeschutzniveaus in Abhängigkeit des Typgebäudes.

Wärmeschutzniveau	Typgebäude				
	EFH	RH	MFH	GMH	HH
Bestand	FL	FL	FL	AL	AL
GEG-Ref	FL	FL	FL	AL	AL
EH 55	FL	FL	AL	AL	AL
EH 40	ZL	ZL	ZL	ZL	ZL

Energetische Bewertung

Die energetische Bewertung der Gebäude und der dezentralen Versorgungskonzepte erfolgt mittels Monatsbilanzverfahren nach DIN V 18599:2018-09 [DIN 2018] unter Verwendung von Standardnutzungsprofilen für Wohngebäude. Für die Variantenrechnung kommt das Fraunhofer IBP-eigene Batchtool zum Einsatz, das basierend auf dem am Fraunhofer IBP entwickelten Rechenkern zur DIN V 18599 eine leistungsstarke Reihenuntersuchung ermöglicht.

Für den Leitfaden werden die vom Batchtool berechneten jährlichen Endenergiebedarfe der Typgebäude unterteilt nach Energieträgern sowie die nach DIN V 18599-2, Anhang B berechnete Heizlast und die nach DIN V 18599-8 berechnete thermische Leistung für die Trinkwarmwasserbereitung verwendet. Die erforderliche Vorlauftemperatur für die Gebäudeheizung wird in Abhängigkeit der flächenspezifischen Heizlast des Gebäudes und der Art der Wärmeübertragung festgelegt (siehe Anhang A.8). Bei der Trinkwarmwasserbereitung mit zentralem Trinkwarmwasserspeicher wird eine Vorlauftemperatur von 67 °C angesetzt.

Wärmelastprofile

Um die prozentuale Verteilung der Wärmebereitstellung für unterschiedliche Wärmeerzeuger und die Anteile von Spitzenlastkesseln innerhalb eines Versorgungskonzepts bewerten zu können, müssen Wärmelastgänge für das jeweilige Wohnquartier angesetzt werden. Hierzu wurden für die Typgebäude Heizkurven in stündlicher Auflösung mittels thermischer Gebäudesimulation [TRNSYS2010] berechnet. Als Wetterdaten wurden die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Aus der Kombination der möglichen Variationen (5 Typgebäude, 4 Baualtersklassen und 15 Wetterdatensätze) ergeben sich insgesamt 300 stundengenaue Heizkurven. Für den Lastgang der Trinkwarmwasserbereitung wurden typische Trinkwarmwasserprofile für Wohngebäude nach [Jordan 2017] angesetzt.

Das Quartierslastprofil ergibt sich aus der Summe der einzelnen Heizlast- und Trinkwarmwasserprofile der verschiedenen Typgebäude im Wohnquartier. Die Zusammensetzung der Typgebäude wird durch den Siedlungstyp definiert.

4.2 Nutzerstrom

Der Nutzerstrom umfasst die elektrische Energie für Beleuchtung sowie für elektrische Haushaltsgeräte und ist in erster Linie abhängig von der Anzahl Personen, die in einem Haushalt leben (vgl. [co2online 2021] oder [Fronde 2015]). Auf Basis der Haushaltsgrößenverteilung je Typgebäude gemäß [Zensus 2011] lassen sich aus den mittleren Pro-Kopf-Stromverbräuchen mittlere flächenspezifische Nutzerstromverbräuche berechnen (siehe Tabelle 2). Demnach liegt der flächenspezifische Nutzerstrom in Einfamilienhäusern bei 20 kWh/(m²a) und bei den restlichen Typgebäuden bei 28 kWh/(m²a). Die Abweichung ergibt sich aus dem deutlich höheren Pro-Kopf-Flächenanteil in Einfamilienhäusern.

Tabelle 2:
Nutzerstromverbrauch nach Typgebäude.

Typgebäude	HH	GMH	MFH	RH	EFH
Mittlere Haushaltsgröße [Personen]	1,6	1,8	1,9	2,2	2,7
Stromverbrauch pro Wohneinheit [kWh/WE]	1.675	1.786	1.842	2.850	3.201
Flächenspezifischer Stromverbrauch [kWh/(m²a)]	28	28	28	28	20

4.3 Zentrale Wärmeerzeuger

Die Modellierung der zentralen Versorgungskonzepte setzt auf den Ergebnissen der Gebäudemodellierung auf. Für in der DIN V 18599 nicht hinterlegte Erzeuger werden eigene Berechnungsmodelle verwendet, die an die Berechnungsverfahren der Norm angelehnt sind. Die von der Norm abweichenden Berechnungsmodelle für die Bewertung der zentralen Wärmeerzeuger werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Gleichzeitigkeit

Die Dimensionierung der zentralen Wärmeerzeuger erfolgt unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit des Wärmebedarfs. Die Gleichzeitigkeitsfaktoren werden gemäß [Winter 2001] mit folgender Gleichung berechnet:

$$GLF(n) = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{n}{c}\right)^d}$$

Dabei entspricht die Variable n der Anzahl der Abnehmer im Wärmenetz und $a = 0,4497$, $b = 0,5512$, $c = 53,8438$ und $d = 1,7627$ Parametern der Näherungsfunktion. Eine graphische Darstellung der Näherungsfunktion kann Anhang A.8 entnommen werden.

Um zu verhindern, dass die Gleichzeitigkeit überbewertet wird, wenn ein Großwärmeverbraucher (z. B. Typgebäude HH) zusammen mit mehreren Kleinwärmeverbrauchern (z. B. Typgebäude EFH) an einem Nahwärmenetz angeschlossen ist, wird die Gleichzeitigkeit für unterschiedliche Gebäudekategorien separat bestimmt. Die Aufteilung der Gruppen erfolgt dabei anhand der erforderlichen Wärmeleistung der Gebäude (vgl. [Winter 2001]).

Großwärmepumpe

Für die Modellierung von Großwärmepumpen wird die Leistungszahl (COP) in Abhängigkeit des Temperaturhubes nach [Arpagaus 2019] gemäß folgender Gleichung berücksichtigt:

$$COP_H = 68,455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0,76}$$

COP_H : Leistungszahl im Heizfall

ΔT_{Hub} : Temperaturhub von Wärmequelle zu Wärmesenke [K]

Diese Berechnungsformel beruht auf Herstellerangaben, die unter Laborbedingungen gemessen wurden. Zur Anpassung an reale Betriebsbedingungen werden die mit der Formel ermittelten Leistungszahlen auf Basis der Wärmepumpen-Feldstudie nach [Miara 2011] im Vergleich zu Prüfstandsdaten korrigiert. Der Strombedarf für die Quellenpumpen wird als prozentualer Anteil am Strombedarf der Wärmepumpen mit 4,8 % für Sole-Wasser-Wärmepumpen und 11,4 % für Wasser-Wasser-Wärmepumpen angesetzt (vgl. [Miara 2011]).

Abwasserwärmerückgewinnung

Für die Berechnung der Abwasserwärmerückgewinnung wird das Berechnungsverfahren nach DIN V 18599-5 für Sole-Wasser-Wärmepumpen verwendet. Abweichend von der Norm werden Quellentemperatur und mittlere Sole-Temperatur auf Basis konkreter Messungen am Forschungsprojekt Neckarpark (vgl. [Görres 2017]) angesetzt. Die angesetzten monatlichen Temperaturen können dem Anhang A.8 entnommen werden.

Agrothermiefeld

Die Dimensionierung der Erdwärmekollektoren erfolgt auf Basis der Arbeiten von [Ramming 2007]. Dort werden die optimalen Verlegeabstände und damit erreichbaren Entzugsleistungen in Abhängigkeit vom Anlagenstandort und der Bodenart ermittelt. Im vorliegenden Leitfaden wird vereinfachend Lehm als Bodenart angesetzt, was einer mittleren Entzugsleistung entspricht. Die angesetzten Verlegeabstände und Entzugsleistungen und die sich daraus ergebenden Rohrleitungslängen je Quadratmeter Erdkollektor können Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3:

Optimaler Verlegeabstand, erreichbare Entzugsleistung und daraus resultierende Rohrlänge pro Quadratmeter Kollektorfläche in Abhängigkeit der Klimazone für die Bodenart Lehm.

Klimazone	Entzugsleistung [W/m ²]	Rohrabstand [m]	Rohrlänge [m/m ²]
4 – Potsdam	33	0,56	1,80
11 – Fichtelberg	9	1,00	1,01
12 – Mannheim	41	0,45	2,23

Solarthermiefeld

Die Auslegung des Solarthermiefelds erfolgt nach [Heidemann 2005] mit 1,6 m² Flachkollektor pro MWh/a Wärmebedarf und 1,2 m³ Wasserspeichervolumen pro m² Kollektorfläche. Die Kollektoren werden nach Süden orientiert und mit einer Neigung von 35° abgebildet. Als Wärmeträgermedium wird ein Wasser-Glykol-Gemisch angesetzt. Pro Kollektor wird eine oberirdische Verbindungsrohrleitungslänge von 0,3 m² angenommen. Die Grädigkeit des Solarkreis-Wärmetauschers wird mit 5 K modelliert.

Für die Ertragsberechnung wurde das Tool „ScenoCalc Fernwärme“ [Solites 2017] verwendet. Als Inputdaten dienten die Testreferenzjahrdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) [DWD 2011] sowie die vom Siedlungstyp abhängigen Wärmelastprofile (siehe Kapitel 4.1).

4.4 Wärmenetze

Die Modellierung des Wärmenetzes erfolgt auf Basis siedlungstypspezifischer Merkmale als Zweileiternetz. Die Trassenlänge der Hauptverteilung wird aus der Gesamtlänge der Straßen im Betrachtungsgebiet abgeleitet (vgl. [Fischedick 2007]), während die Trassenlänge der Hausanschlussleitungen über den mittleren Abstand zwischen Gebäude und Straße ermittelt wird. Die verwendeten siedlungstypspezifischen Merkmale nach [Blesl 2002] können dem Anhang A.1 entnommen werden.

Die Dimensionierung der Rohrdurchmesser erfolgt vereinfacht für ein dreistrahliges Wärmenetz mit einem Druckverlust von 100 Pa/m (vgl. [Dötsch 1998]). Für die Wahl des Rohrdurchmessers wird der erforderliche Massenstrom berechnet und unter Beachtung einer wirtschaftlichen Strömungsgeschwindigkeit eine geeignete Nennweite per Tabellenverfahren ermittelt (vgl. [Isoplus 2012], siehe Anhang A.8).

Die Druckverlustberechnung erfolgt am Schlechtpunkt des Nahwärmenetzes unter der Annahme, dass die Netzlänge bis zum Schlechtpunkt ein Drittel der Gesamtlänge beträgt, die notwendige Druckdifferenz in den Hausstationen 1 bar beträgt (vgl. [Nussbaumer 2017]) und die Druckverluste in den Hausstationen mit 200 mbar für Wärmetauscher und Regelventil angesetzt werden können.

Die elektrische Leistung für die Netzpumpe wird aus dem Druckverlust des Wärmenetzes und dem Wirkungsgrad der Pumpe ($\eta_{\text{Pumpe}} = 60 \%$) berechnet. Der Energiebedarf der Netzpumpe ergibt sich durch Multiplikation mit den Volllaststunden der angeschlossenen Wärmeverbraucher. Diese lassen sich aus dem jährlichen Wärmebedarf im Wärmenetz und der Auslegungsleistung der angeschlossenen Hausstationen ermitteln.

Die Wärmeverluste des Verteilnetzes werden in Abhängigkeit von Betriebstemperatur, Bodentemperatur, Netzlänge und längenbezogenem Wärmedurchgangskoeffizient der Rohrleitungen auf stündlicher Basis berechnet. Die Betriebstemperatur des Wärmenetzes wird vereinfachend aus den Temperaturanforderungen der angeschlossenen Gebäude in Abhängigkeit der flächenspezifischen Heizlast abgeleitet (siehe Kapitel 4.1). Die Vorlauftemperatur des Nahwärmenetzes wird unter der Annahme eines 3-gradigen Wärmetauschers in den Hausübergabestationen modelliert. Bei kalten Nahwärmenetzen wird die Vorlauftemperatur gemäß der monatlichen Quellentemperatur der angeschlossenen Wärmequelle angesetzt (siehe Anhang A.8).

Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ($U_{NWN,L}$) der Nahwärmeleitungen wird nach [Isoplus 2012] in Abhängigkeit von der Nennweite der Wärmeleitung ($DN_{NWN,L}$) gemäß folgender Regressionsgleichung bestimmt:

$$U_{NWN,L} = 0,000407 \cdot DN_{NWN,L} + 0,166917$$

Die Bodentemperatur wurde als monatlicher Mittelwert in einem Meter Tiefe für die untersuchten Klimazonen über ein Regressionsmodell ermittelt. Die verwendeten mittleren monatlichen Bodentemperaturen können Anhang A.8 entnommen werden.

4.5 Photovoltaik

Um die verursachten THG-Emissionen gering zu halten, sind die lokal vorhandenen PV-Potenziale möglichst umfassend zu erschließen. Für die Berechnung des PV-Potenzials wird davon ausgegangen, dass bei Einfamilienhäusern, Reihenhäusern und kleinen Mehrfamilienhäusern mit Satteldach 40 % und bei großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern mit Flachdach 50 % der Dachflächen für die Installation von Photovoltaik nutzbar sind (vgl. [Schmidt 2010], [Lödl 2010], [IWES 2012], [Wirth 2021]). Die spezifische Leistung der PV-Module wird mit $200 \text{ W}_p/\text{m}^2$ angesetzt (vgl. [Eggers 2020]).

Der spezifische Ertrag wird abhängig von Neigung und Orientierung der Anlage sowie vom solaren Strahlungsangebot am jeweiligen Standort berücksichtigt. Für den Referenzstandort Potsdam wird der spezifische Ertrag auf den Schrägdächern mit 950 kWh/kW_p (Südost-Orientierung, 30° Neigung) und für die Flachdächer mit 800 kWh/kW_p (Ost-West-Orientierung, 10° Neigung) angesetzt. In diesen Ertragskennzahlen bereits berücksichtigt sind Verluste durch erhöhte Betriebstemperatur, variable Einstrahlungsbedingungen, Verschmutzung, Leitungswiderstände und Wandlungsverluste.

Die Umrechnung des spezifischen Ertrags für Standorte mit einem abweichenden solaren Strahlungsangebot erfolgt vereinfachend durch einen Kor-

rekturfaktor. Für Standorte mit erhöhtem Strahlungsangebot wird der spezifische Ertrag mit dem Faktor 1,1 erhöht, während für Standorte mit geringerem Strahlungsangebot eine Reduzierung mit dem Faktor 0,9 erfolgt (vgl. Strahlungsintensitäten nach [DIN 2018]). Tabelle 4 zeigt die angesetzten PV-Kennwerte für unterschiedliche Typgebäude am Standort Potsdam.

Tabelle 4:
PV-Potenzial am Standort Potsdam.

Typgebäude	EFH	RH	MFH	GMH	HH
Dachfläche [m ²]	183,1	60,5	298,0	540,0	598,3
Kollektorfläche [m ²]	73,2	24,2	119,2	270,0	299,2
Leistung [kW _p]	14,6	4,8	23,8	54,0	59,8
Stromertrag [MWh/a]	13,9	4,6	22,6	43,2	47,9

4.6 Energiekosten und Klimabilanz

Die Ermittlung von Treibhausgasemissionen und Energiekosten erfolgt in einem separaten Berechnungsmodell. Die verwendeten Kostenkennwerte und Treibhausgasemissionsfaktoren können Tabelle 5 entnommen werden. Die dargestellten Energiepreise beziehen sich auf das Jahr 2020 (vgl. [BMWK 2022], [CARMEN 2022]). Für die Berechnung der Energiekosten wird eine mittlere jährliche Preissteigerung von 5 % angenommen. Die aufgelisteten Treibhausgasemissionsfaktoren, ausgenommen Fernwärme, entsprechen aktuellen Kennzahlen nach DIN V 18599-1 [DIN 2018].

Tabelle 5:
Verwendete Energiepreise und Treibhausgasemissionsfaktoren.

Energieträger	Preis (brutto, 2020) [Cent/kWh]	THG-Faktor (2019) [g/kWh]
Erdgas	6,8	240
Fernwärme (Kohle-HKW)	8,5	240
Fernwärme (Holz-HW)	9,5	60
Holzpellets	5,0	40
Hackschnitzel (20 % Feuchte)	3,1	40
Haushaltsstrom	31,2	550
Heizstrom	23,7	550

Bei Fernwärme werden im Leitfaden zwei extreme Ausprägungen betrachtet. Einerseits eine konventionelle Fernwärme aus einem Kohle-Heizkraftwerk (HKW) mit einem Treibhausgasemissionsfaktor von 240 g/kWh, andererseits ein Holz-Heizwerk (HW) mit einem Treibhausgasemissionsfaktor von 60 g/kWh (vgl. [Fritsche 2008]).

Die Art der Wärmeerzeugung wirkt sich auch auf den Preis der Fernwärme aus. Eine Auswertung der Fernwärmepreise aus dem Jahr 2017 [AGFW 2018] zeigt, dass Fernwärme aus Kohle-HKW im Mittel den günstigsten Preis aufweist (Preisindex 0,987), während bei Fernwärme aus Holz-HW die höchsten mittleren Preise entstehen (Preisindex 1,085).

Perspektivisch kann bei Strom davon ausgegangen werden, dass der Treibhausgasemissionsfaktor mit weiter fortschreitendem Ausbau der erneuerbaren Energien sukzessive abnimmt (vgl. [IINAS 2020]) und damit strombasierte Versorgungskonzepte klimafreundlicher werden. Diese vorteilhafte Entwicklung wird im Leitfaden im Bewertungskriterium „Zukunftsfähigkeit“ aufgegriffen (siehe Kapitel 5.2).

Vergütung PV-Strom

Der mittlere finanzielle Erlös des PV-Stroms wird aus dem jährlichen Stromertrag je Typgebäude für einen Eigenverbrauchsanteil von 15 %, einer Einspeisevergütung von 7,0 Cent/kWh (Stand Oktober 2021), einem Endkundenstrompreis von 31,2 Cent/kWh (vgl. [BMWK 2022]) und einer jährlichen Strompreissteigerung von 5 % ermittelt.

Vergütung KWK-Strom

Die Vergütung des eingespeisten Stroms aus Kraft-Wärme-Kopplung setzt sich zusammen aus dem Börsenpreis an der Leipziger Strombörse, der im Jahr 2020 im Mittel 3,04 Cent/kWh betrug (vgl. [EEX 2022]), und einem Zuschlag gemäß KWK-Gesetz [KWKG 2020] von 8 Cent/kWh für Anlagen mit maximal 50 kW elektrischer Leistung und 6 Cent/kWh für Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 50 bis 100 kW.

Kompensation

Für Emissionen, die bilanziell über das Jahr nicht durch lokale Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen kompensiert werden können, müssen externe Kompensationsmaßnahmen (z. B. durch Kauf von Emissionszertifikata-

ten) erfolgen. Im Rahmen des Leitfadens werden jährliche Kompensationszahlungen in Höhe von 220 € pro Tonne CO₂ angesetzt. Dies entspricht den Empfehlungen des Umweltbundesamtes zu den Klimakosten für das Jahr 2030 bei einer Höhergewichtung der Wohlfahrt der heutigen Generation gegenüber der Wohlfahrt künftiger Generationen (vgl. [UBA 2022]).

4.7 Investitionskosten

Die Berechnung der Investitionskosten erfolgt für das Bezugsjahr 2020. Zur Umrechnung der Kostenkennwerte aus unterschiedlichen Bezugsjahren wird der Baupreisindex des statistischen Bundesamtes [BPI 2022] verwendet. Die angesetzten Kostenkennwerte verstehen sich als Bruttokosten ohne Planungs- und Baunebenkosten. Kosten, die aufgrund ihrer Quelle im Folgenden als Nettokosten angegeben sind, wurden für die Vergleichsstudie in Bruttokosten umgerechnet.

Wärmeschutz

Die Bauteilkosten (brutto, Bezugsjahr 2011) für die baulichen Komponenten der opaken Gebäudehülle werden nach [Schlitzberger 2017] in Abhängigkeit des Wärmetransferkoeffizienten der Bauteile berechnet. Bei den Fenstern werden die Kostenfunktionen (brutto, Bezugsjahr 2015) nach [Hinz 2015] verwendet. Dabei wird zwischen Fenstern für kleine Wohngebäude (EFH, RH) und für große Wohngebäude (MFH, GMH und HH) unterschieden. Die angesetzten Kostenkennwerte können dem Anhang A.7 entnommen werden.

Lüftung

Die Kosten für Lüftungsanlagen werden nach [Hinz 2015] in Abhängigkeit der mittleren Wohnfläche je Wohneinheit berechnet (siehe Anhang A.6). Die sich daraus ergebenden Kostenkennwerte können dem Anhang A.7 entnommen werden.

Wärmeerzeuger

Die Investitionskosten für Wärmeerzeuger werden auf Basis von Kostenkennwerten aus der Literatur gebildet. Dabei wird zwischen unterschiedlichen Leistungsbereichen unterschieden. Die verwendeten Gleichungen zur

Abschätzung der Investitionskosten (brutto, Bezugsjahr 2015) können dem Anhang A.7 entnommen werden.

Für Luft-Wasser-Wärmepumpen bis 35 kW, erdreichgekoppelte Sole-Wasser-Wärmepumpen (B0) für eine Wärmequellentemperatur von 0 °C, Brennwertkessel und Biomassekessel erfolgt die Ermittlung der Investitionskosten auf Basis der installierten thermischen Leistung mit Kostenkennwerten nach [Schlitzberger 2017].

Für Luft-Wasser-Wärmepumpen ab einer thermischen Leistung von 35 kW sowie für Abluft-Wärmepumpen werden Ansätze aus [MODER 2018] übernommen. Kosten für Sole-Wasser-Wärmepumpen (B-15) für eine Wärmequellentemperatur von -15 °C mit PVT-Kollektoren als Wärmequelle werden anhand von Heizleistungskurven der Firma Waterkotte [Waterkotte 2020] aus den Kostenkennwerten nach [Schlitzberger 2017] umgerechnet.

Die Investitionskosten für Erdsonden werden auf Basis leistungsspezifischer Kostenkennwerte nach [Schlitzberger 2017] gebildet. Kosten für Erdkollektoren und PVT-Kollektoren können aus der Kostenkurve für Erdsonden abgeleitet werden. Dabei werden die Kostenverhältnisse zwischen Erdsonden und Erdkollektoren nach [Fichtner 2016] und für die PVT-Kollektoren Herstellerangaben von [SOLINK 2020] verwendet. Ebenso lassen sich die Kosten für Wasser-Wasser-Wärmepumpen aus einem Kostenvergleich nach [Fichtner 2016] mit den Kennwerten für Sole-Wasser-Wärmepumpen umrechnen.

Die Kosten für den Anschluss an die Fernwärme werden gemäß [Jagnow 2011] in Abhängigkeit der Anschlussleistung abgeschätzt. Die Kosten für die solare Trinkwarmwasserbereitung werden aus den Kostenkennwerten nach [Hinz 2015] abgeleitet. Für thermische Solaranlagen zur Heizungsunterstützung werden nach [MODER 2018] 5 % Mehrkosten für den Pufferspeicher angesetzt.

Die Investitionskosten für BHKW werden in Abhängigkeit der elektrischen Leistung bestimmt unter Verwendung der Kostenkennwerte nach [Schlitzberger 2017]. Kosten für Brennstoffzellen werden anhand von Festpreisangeboten [Ritz 2021] angesetzt.

Abwasserwärmerückgewinnung

Die Abschätzung der Investitionskosten für die Abwasserwärmerückgewinnung erfolgt auf Basis konkreter Angebote (netto, Bezugsjahr 2017), vgl. [Klinger 2011] für unterschiedliche Systeme mit folgender Gleichung:

$$K(kW)_{Abwasserwärme} = 5486,22361 \cdot P_{th}^{-0,30428}$$

Die leistungsspezifischen Investitionskosten sind in der Einheit [€/kW] angegeben und werden in Abhängigkeit der Wärmeentzugsleistung des Abwasserwärmekollektors P_{th} [kW] berechnet.

Agrothermie

Die Investitionskosten für Agrothermie (netto, Bezugsjahr 2020), werden nach [Frank 2020] gemäß folgender Gleichung ermittelt:

$$K(m) = 30,4267 \cdot L_m^{-0,08969}$$

Die längenspezifischen Investitionskosten sind in der Einheit [€/m] angegeben und werden in Abhängigkeit der Länge des Kollektorrohrs L_m [m] berechnet.

Solarthermiefeld

Die Investitionskosten für Freiflächenanlagen mit Flachkollektoren (netto, Bezugsjahr 2017) werden nach [Barckhausen 2017] (Kosten für die Flachkollektoren) und [Grimm 2018] (Kosten für Hydraulik und Mess- und Regelungstechnik) gemäß folgender Gleichung ermittelt:

$$K(m^2)_{Solarthermie} = 701,37 \cdot A_{Kollektor}^{-0,11233}$$

Die flächenspezifischen Investitionskosten sind in der Einheit [€/m²] angegeben und werden auf Basis der Gesamtfläche der Kollektoren $A_{Kollektor}$ [m²] berechnet.

Saisonaler Solarspeicher

Die Ermittlung der Investitionskosten für den (teil-)saisonalen Wärmespeicher (netto, Bezugsjahr 2020) erfolgt auf Basis von [Mangold 2007] gemäß folgender Gleichung:

$$K(m^3)_{Solarspeicher} = 4.992,2 \cdot V_{Speicher}^{0,417} \cdot 1,343$$

Dabei werden die volumenspezifischen Investitionskosten in der Einheit [€/m³] ausgewiesen und anhand des Gesamtspeichervolumens $V_{Speicher}$ [m³] berechnet.

Nahwärmenetz

Bei der Kostenberechnung von Nahwärmenetzen wird zwischen Bestands- und Neubauquartieren unterschieden, wobei in Neubauquartieren die Verlegung unter Freiflächen und bei Bestandsquartieren die Verlegung unter Asphaltflächen angenommen wird. In beiden Fällen wird von starren gedämmten Nahwärmeleitungen ausgegangen.

Im Neubauquartier werden die Kostenansätze aus [Dunkelberg 2018] übernommen. Die Investitionskosten pro Trassenmeter (netto, Bezugsjahr 2021) werden in Abhängigkeit der Nennweite DN der Nahwärmeleitung mit folgender Gleichung berechnet:

$$K(Tm)_{Freifläche} = 0,0030961 \cdot DN^2 + 1,4029436 \cdot DN + 238,2217936$$

Für die Bestandsquartiere bzw. für die Verlegung von Nahwärmeleitungen unter Asphalt werden die Investitionskosten (brutto, Bezugsjahr 2020) nach [Barckhausen 2017] in Abhängigkeit der Nennweite DN gemäß folgender Gleichung ermittelt.

$$K(Tm)_{Asphalt} = 295,119635 \cdot e^{(0,004983 \cdot DN)}$$

Die Kosten für die Verlegung eines kalten Nahwärmenetzes werden in Anlehnung an [Dunkelberg 2018] berechnet, abzüglich der Kostenanteile für Dämmung. Die sich daraus ergebende Gleichung für die Investitionskosten (netto, Bezugsjahr 2014) in Abhängigkeit der Nennweite DN für starre ungedämmte Nahwärmenetzleitungen lautet:

$$K(Tm)_{KalteNahwärme} = 0,001825 \cdot DN^2 + 1,284550 \cdot DN + 178,700287$$

Photovoltaik

Die Installationskosten für Photovoltaik werden mittels einer logarithmischen Kostenkennkurve (netto, Bezugsjahr 2019) nach [Kelm 2019] in Abhängigkeit der installierten Spitzenleistung ermittelt. Die verwendete Gleichung lautet:

$$K(kWp)_{Photovoltaik} = (-100,176 \times \ln P_{el} + 1416,038) \times P_{el}$$

5 Bewertungskriterien

5.1 Monetäre Bewertung

Die monetäre Bewertung der untersuchten Versorgungskonzepte basiert auf den Investitionskosten, Energiekosten, Kompensationskosten und dem Ertrag aus der Stromerzeugung (angesetzte Kosten siehe Kapitel 4). Das Ergebnis wird nicht in absoluten Zahlen dargestellt, sondern es wird eine vergleichende Betrachtung der untersuchten Versorgungskonzepte vorgenommen. Die Einordnung basiert auf dem folgenden Bewertungsschema, das einer Einteilung in Quintilen entspricht:

- 1**: sehr positiv (die besten 20 %)
- 2**: positiv (die 20 % zwischen sehr positiv und neutral)
- 3**: neutral (+/-10 % um den arithmetischen Mittelwert)
- 4**: negativ (die 20 % zwischen sehr negativ und neutral)
- 5**: sehr negativ (die schlechtesten 20 %)

Die Investitionskosten setzen sich zusammen aus den energetisch bedingten Kosten für bauliche Maßnahmen an der Gebäudehülle und für technische Maßnahmen an der Lüftungstechnik, aus den Kosten für den Aufbau einer zentralen oder dezentralen Wärmeversorgung sowie den Kosten für die Installation von Photovoltaik. Dies entspricht der Investorensicht.

Die Energiekosten umfassen alle Kosten, welche für die Deckung des Energiebedarfs in den Gebäuden des Wohnquartiers anfallen und durch die Bewohner zu tragen sind (Bewohnersicht). Hierzu zählen der Wärmebedarf für Heizung und Trinkwarmwasser sowie der Strombedarf für den Gebäudebetrieb und der Haushaltsstrom.

Die notwendigen externen Treibhausgaskompensationsmaßnahmen, die nach Abzug der vor Ort erzeugten regenerativen Energien übrigbleiben, werden durch den Bewertungsfaktor Kompensationskosten beschrieben. Versorgungskonzepte, die ohne externe Kompensationsmaßnahmen Klimaneutralität erreichen, werden mit 0 bewertet.

Die jährlichen Gesamtkosten verstehen sich als volkswirtschaftliche Betrachtung. Hierfür werden die Investitionskosten über die Nutzungsdauer der jeweiligen Bauteile linear abgeschrieben (baulich 40 Jahre, technisch 20 Jahre) und mit den Energie- und Kompensationskosten aufsummiert sowie die Erträge aus dem Stromverkauf (Eigenverbrauch und Einspeisung) abgezogen.

In Tabelle 6 ist die monetäre Bewertung der Lösungsansätze für den Siedlungstyp „Blockbebauung niedriger Dichte“ am Standort Potsdam dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Bewertungen farbig hervorgehoben. Die Farbskala orientiert sich am Farbstrahl des Gebäudeenergieausweises. Lösungen, die ohne Kompensationsmaßnahmen auskommen, sind **blau** markiert.

Tabelle 6:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte am Standort Potsdam.

Randbedingung	Klimazone	4 – Potsdam (gemäßigt)															
	Siedlungstyp	ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	4	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	3	4	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	3	3	4	5	2	3	4	5	4	3	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	3	2	1	1	1	2	5	2	4	5	5	3	2	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	3	2	1	1	1	2	5	3	4	5	5	3	2	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	4	2	3	5
	Biomassekessel	5	4	2	1	1	2	2	4	1	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	4	3	1	1	1	2	4	1	1	2	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	1	4	2	2	2	3	3	1	1	2
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	1	2	3	5	2	2	2	5	2	1	1	3
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	3	2	2	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	3	2	1	2	2	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Abwasserwärme	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	3	5	3	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	3	2	1	2	3	5	1	1	2	4	2	1	1	4
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	1	2	4	1	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	2	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	3	4	4	5	3	3	4	5	4	4	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	3	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	1	1	1	2	3	2	2	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

5.2 Bewertung mit weichen Faktoren

Für die Bewertung mit weichen Faktoren werden Kriterien herangezogen, welche nicht quantifizierbar sind, teilweise stark von politischen Entscheidungen abhängen können und durch standortspezifische Randbedingungen beeinflusst werden. Im Rahmen des Leitfadens werden die Bewertungskriterien Zukunftsfähigkeit, Umsetzbarkeit, Übertragbarkeit, Erweiterbarkeit, Klimaanpassung, Robustheit gegenüber Klimawandel und Netzdienlichkeit betrachtet.

Zukunftsfähigkeit

Das Bewertungskriterium „Zukunftsfähigkeit“ bewertet die Chancen, ob das Versorgungskonzept mittel- bis langfristig aus politischer und wirtschaftlicher Sicht weiter betrieben werden kann. Außerdem bezieht dieses Bewertungskriterium die Begrenztheit der verwendeten Ressourcen und die Wichtigkeit des Versorgungskonzepts für die Transformation des Energiesystems mit ein.

Umsetzbarkeit

Die Anwendbarkeit des Versorgungskonzepts bei heterogenen Eigentümerstrukturen und in der Quartierssanierung wird im Bewertungskriterium „Umsetzbarkeit“ bewertet. Außerdem fließt der Platzbedarf in den versorgten Gebäuden, der zusätzliche Aufwand rechtlicher (z. B. bei Genehmigungen) oder technischer Art (z. B. bei der Umsetzung) mit ein.

Übertragbarkeit

Anhand des Bewertungskriteriums „Übertragbarkeit“ wird bewertet, inwieweit das Versorgungskonzept von spezifischen Standortbedingungen abhängig ist, wodurch die Übertragbarkeit auf andere Gebiete innerhalb derselben Stadt oder Region eingeschränkt sein könnte. Dabei werden Platzbedarfe, geologische Randbedingungen und städtische Randbedingungen (wie z. B. Verbrennungsverbote) betrachtet.

Erweiterbarkeit

Die „Erweiterbarkeit“ beschreibt das Potenzial des Versorgungskonzeptes, weitere Versorgungsnehmer mit aufzunehmen, ohne dass größere Investitionen oder Platzbedarfe notwendig werden oder Abstriche bei der Klimafreundlichkeit auftreten.

Klimaanpassung

Bei der „Klimaanpassung“ wird bewertet, inwieweit das Versorgungskonzept das Potenzial hat, die angeschlossenen Gebäude zusätzlich, möglichst einfach und regenerativ mit Kälte zu versorgen. Dabei wird bewertet, ob die Dachflächen für PV-Strom und Kühltürme zur Verfügung stehen, Freikühlpotenziale vorhanden sind oder die Möglichkeit besteht, reversible Wärmepumpen oder Absorptionskältemaschinen einzubinden.

Robustheit gegenüber Klimawandel

Unter dem Bewertungskriterium „Robustheit gegenüber Klimawandel“ werden die negativen und positiven Folgen des Klimawandels auf die Versorgungskonzepte betrachtet (steigende Außenlufttemperaturen, sinkende Grundwasserspiegel, usw.).

Netzdienlichkeit

Das Bewertungskriterium „Netzdienlichkeit“ beschreibt das Potenzial des Versorgungskonzeptes, einen dem Stromnetz dienlichen Betrieb zu ermöglichen. Einen Sonderfall bilden hier Wärmepumpen, die sowohl netzdienlich als auch netzadvers betrieben werden können.

Die Bewertung der weichen Faktoren erfolgt qualitativ über die Nutzung eines dreistufigen Bewertungssystems, wobei + für positiv, o für neutral und - für negativ steht. Eine Übersicht zur Bewertung der Versorgungskonzepte mit weichen Faktoren kann dem Anhang A.5 entnommen werden.

6 Beispielhafte Anwendung

Als Anwendungsbeispiel wird das Bürgerhospital in Stuttgart herangezogen, für das im Rahmen des Forschungsprojekts „Stadtquartier 2050“ eine klima-

neutrale Energieversorgung aufgebaut wird. Im Folgenden wird das Wohnquartier kurz vorgestellt und unter Verwendung des Leitfadens werden geeignete Lösungsansätze für eine klimaneutrale Energieversorgung identifiziert.

Kurzbeschreibung des Quartiers

Im Wohnquartier Bürgerhospital in Stuttgart wird ein ehemaliges Krankenhausareal zu einem Wohnquartier umgewandelt. Das Quartiersareal befindet sich in einem hochverdichteten großstädtischen Kontext und erstreckt sich über eine Fläche von ca. 5 ha. Im als allgemeines Wohngebiet geplanten Quartier sollen mehr als 600 Wohneinheiten entstehen. Neben den Wohngebäuden sind auch Kindertagesstätten, Pflegeeinrichtungen, Einkaufsmöglichkeiten, Büroflächen und sonstige Kleingewerbeflächen vorgesehen. Die Bestandsgebäude werden im Zuge der Konversion mehrheitlich abgerissen und durch Neubauten ersetzt. Die neue Wohnfläche soll größtenteils als bezahlbarer Wohnraum entwickelt werden. Der städtebauliche Entwurf sieht eine Blockrandbebauung mit bis zu acht Vollgeschossen vor, die um innenliegende Freiflächen angeordnet sind.

Auswahl der Bewertungstabelle

Für die Auswahl der Bewertungstabelle sind in einem ersten Schritt der Siedlungstyp, dem das Wohnquartier entspricht, und die Klimazone, in der sich dieses befindet, festzulegen. Im Falle des Bürgerhospitals in Stuttgart handelt es sich um den Siedlungstyp „Blockbebauung niedriger Dichte“. Das Areal liegt in einer Region mit mildem Klima und hoher Solarstrahlung (Klimazone 12). Für diese Randbedingungen wird nun im Anhang A.2 die passende Bewertungstabelle ausgewählt. Für die Konstellation „Blockbebauung niedriger Dichte“ und Klimazone 12 wird Tabelle 28 verwendet.

In dieser Bewertungstabelle sind 92 Lösungsansätze für eine klimaneutrale Versorgung dargestellt, die sich aus 23 Versorgungskonzepten und 4 Wärmeschutzniveaus zusammensetzen. Die monetäre Bewertung der Lösungsansätze erfolgt auf Basis von Investitionskosten, Energiekosten, Kompensationskosten und volkswirtschaftlichen Kosten.

Eingrenzung der Lösungsansätze

Im nächsten Schritt wird die Anzahl betrachteter Lösungsansätze eingegrenzt. Hierzu werden die standortspezifischen limitierenden Faktoren mit Hilfe des Fragebogens zur Eingrenzung der Versorgungskonzepte (siehe

Anhang A.3) erhoben. Als besondere Herausforderung gibt es im Stuttgarter Bürgerhospital diverse rechtliche und technische Restriktionen. Die Beantwortung des Fragebogens ergibt für das Anwendungsbeispiel folgende limitierende Faktoren:

1. Fernwärmenetz im Quartier oder in Nachbarschaft: *Ja, konventionell*
2. Gasnetz im Quartier vorhanden: *Nein*
3. Nutzbare Freiflächen im Quartier oder in unmittelbarer Nähe: *Nein*
4. Abteufen von Erdsonden: *Ja (eingeschränkt)*
5. Nutzung von Grundwasser: *Nein*
6. Nutzung von Abwasserwärme: *Ja (eingeschränkt)*
7. Verbrennungsprozesse möglich: *Nein*
8. Investor für Quartiersnetz: *Ja*
9. Anschlusszwang: *Nein*
10. Neubauquartier: *Ja (überwiegend)*

Unter Zuhilfenahme der Übersichtstabelle zu den Ausschlusskriterien (siehe Anhang A.4) kann nun die Auswahl möglicher Versorgungskonzepte eingegrenzt werden. Gemäß Antwort 1 wird die klimaneutrale Fernwärme als Lösungsansatz gestrichen. Aus Antwort 2 ergibt sich ein Ausschluss sämtlicher Versorgungskonzepte mit Erdgas. Aufgrund der fehlenden Freiflächen (siehe Antwort 3) müssen die Versorgungskonzepte mit Agrothermie, Erdkollektoren und Solarthermiefeld gestrichen werden. Antwort 5 führt zum Ausschluss der Versorgungskonzepte mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe. Durch das Verbrennungsverbot (siehe Antwort 7) müssen neben den Versorgungskonzepten mit Erdgas auch solche mit Biomasseverbrennung ausgenommen werden. Somit bleiben von den ursprünglich 23 Versorgungskonzepten noch 8 Optionen übrig.

Da das Anwendungsbeispiel überwiegend ein Neubauquartier darstellt, können die Wärmeschutzniveaus „GEG-Referenzgebäude“ und „unsanierter Bestand“ gestrichen werden. Von den ursprünglich 92 Lösungsansätzen stehen damit noch 16 Optionen mit 8 Versorgungskonzepten und 2 Wärmeschutzniveaus zur Verfügung (siehe Tabelle 7). Die nicht geeigneten Versorgungskonzepte wurden gelöscht. Die nicht relevanten Wärmeschutzniveaus sind ausgegraut.

Tabelle 7:
Übersicht der geeigneten Lösungsansätze für das Anwendungsbeispiel Bürgerhospital Stuttgart nach Berücksichtigung der limitierenden Faktoren.

Randbedingung	Klimazone	12 – Mannheim (mild)															
	Siedlungstyp	ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dez. Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-WP mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	4	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Abwasserwärme	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	3	5	3	2	2	5
	Kalte Nahwärme Erdsonden mit WP	5	4	3	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme mit WP	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	4	2	3	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Berücksichtigung weicher Faktoren

Die verbleibenden Versorgungskonzepte werden anschließend anhand weicher Faktoren weiter eingeschränkt. Hierzu wird die Bewertungstabelle aus dem Anhang A.5 verwendet. Im Anwendungsfall könnte beispielsweise der Zukunftsfähigkeit des Versorgungskonzepts und dem Potenzial zur Klimaanpassung eine besondere Bedeutung beigemessen werden. Aufgrund dieser Prämisse würden die dezentrale Versorgung mit PVT-Kollektoren sowie das Versorgungskonzept mit Fernwärme (konventionell) aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Im vorliegenden Fallbeispiel gibt es jedoch seitens des Energieversorgers eine Entwicklungsplanung, die eine Decarbonisierung der Fernwärme bis 2030 vorsieht. Unter Berücksichtigung dieser Entwicklungsplanung ergibt sich eine positive Bewertung der Zukunftsfähigkeit, womit das Versorgungskonzept in der engeren Auswahl verbleiben kann.

Priorisierung

Abschließend wird festgelegt, aus welcher Perspektive die verbliebenen Versorgungskonzepte priorisiert werden sollen. Im Falle des Anwendungsbeispiels aus Stuttgart liegt der Fokus auf einer Minimierung der Kompensationskosten. Als am besten geeignet kristallisieren sich somit die beiden Nahwärmekonzepte mit Sole-Wasser-Wärmepumpe und Erdsonden bzw. Abwasserwärmenutzung heraus. Bei einer volkswirtschaftlichen Betrachtung würde auch der Lösungsansatz mit Fernwärme (konventionell) und einem EH 55-Wärmeschutzniveau in die nähere Auswahl kommen.

7 Ausblick

Eine Weiterentwicklung der im Leitfaden beschriebenen Ansätze stellt das webbasierte Software-Tool „Klimaneutral Easy“ dar. Das sich derzeit noch in der Entwicklung befindliche Software-Tool soll zusätzliche Funktionalitäten mitbringen, die zu einer höheren Nutzerfreundlichkeit beitragen und durch weitere Anpassungsmöglichkeiten auch eine größere Genauigkeit bei der Modellierung ermöglichen.

Für den Schnelleinstieg werden dem Nutzenden eine Auswahl von zehn Siedlungstypen mit überwiegender Wohnnutzung zur Verfügung gestellt. Zur Unterstützung bei der Auswahl des Siedlungstyps sind im Software-Tool Siedlungssteckbriefe mit Luftbildaufnahmen von typischen Siedlungsstrukturen eingebunden. Die im Steckbrief hinterlegten siedlungsspezifischen Daten zu Bebauung und Erschließung können bei Bedarf überschrieben werden, zum Beispiel mit Daten aus der kommunalen Wärmeplanung. Auch eine Kombination von unterschiedlichen Siedlungstypen ist im Software-Tool möglich, so dass heterogene Quartiere abbildbar werden. Ebenso sind unterschiedliche Wärmeschutzniveaus, Lüftungskonzepte und Bauweisen miteinander kombinierbar.

Die energetische Bewertung des Quartiers kann für alle Klimazonen der DIN V 18599-10 durchgeführt werden. Die Klimarandbedingungen finden Berücksichtigung bei der Energiebedarfsberechnung, Potenzialabschätzung und Grobdimensionierung. Bei der Erstellung der Klimabilanz kann der Bilanzierungsrahmen bei Bedarf um Emissionen aus grauer Energie, Mobilität und Konsum erweitert werden. Auch ist eine Ergebnisausgabe mit konkreten Werten für Kosten, Energiebedarf und Emissionen möglich, dabei kann zwischen flächenspezifischen Kennwerten und absoluten Werten hin und her geschaltet werden.

Insbesondere bei der Filterung und Priorisierung von Versorgungskonzepten bietet das Software-Tool eine erhöhte Nutzerfreundlichkeit. So wird die Auswahl möglicher Versorgungskonzepte automatisch an limitierende Faktoren angepasst. Ebenso können weiche Faktoren als Filterkriterien gewählt und

bei der Priorisierung der Varianten verschiedene Perspektiven miteinander kombiniert und gewichtet werden.

Perspektivisch ist eine Anbindung des Software-Tools an das Fraunhofer IBP-eigene Bewertungstool für Quartiere „District ECA“ [Erhorn-Kluttig 2013] geplant, mit dem auf Basis des Rechenkerns zur DIN V 18599 eine normkonforme energetische Bewertung von Gebäuden möglich ist. Das Software-Tool wird nach Fertigstellung auf der Webseite des Forschungsvorhabens „Stadtquartier 2050“ [Fraunhofer 2019] kostenfrei zur Verfügung gestellt.

8 Literaturverzeichnis

- [AGFW 2018] Wibera Wirtschaftsberatung: Fernwärmepreisübersicht Kurzumfrage. Im Auftrag des AGFW. 2018. Online verfügbar unter: <https://www.pwc.de/de/energiewirtschaft/ergebnisse-der-agfw-wibera-preisumfrage-10-2017.pdf>. Letzter Zugriff: Mai 2022.
- [Arpagaus 2019] Arpagaus, C.: Hochtemperatur-Wärmepumpen für industrielle Anwendungen. 4. Internationaler Großwärmepumpen-Kongress. 8. Mai 2019. Zürich. Online verfügbar unter: https://grosswaermepumpen-kongress.com/wp-content/uploads/2019/05/Cordin_Arpagaus.pdf. Letzter Zugriff: Mai 2022.
- [Barckhausen 2017] Wärmenetzsysteme 4.0 Endbericht – Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen“. Anton Barckhausen, David Schröder (adelphi consult GmbH), Rolf Miljes, Christian Pottbäcker, Henriette Breier (PricewaterhouseCoopers GmbH), Christian Nabe, Sigrid Lindner (Ecofys Germany GmbH), Benjamin Dannemann (Agentur für Erneuerbare Energien e. V.), Thomas Wenzel (Deutsche Energie-Agentur GmbH), Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln. April 2017.
- [BDH 2019] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH): Solare Heizungsunterstützung, Teil 2: Praxistipps zu Planung und Installation. Informationsblatt Nr. 27. März 2019.
- [Blesl 2002] Blesl, M.: Räumlich hoch aufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER). Universität Stuttgart. Stuttgart. 2002. ISSN 0938-1228.
- [BMWi 2015] Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand vom 7. April 2015. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin. 2015.
- [BMWK 2022] Energiedaten: Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWK. Stand 2022. Online verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>. Letzter Zugriff: Januar 2022.
- [BPI 2022] Statistisches Bundesamt Deutschland. Fachserie 17 Reihe 4. Preisindex für den Neubau von „Wohngebäude insgesamt“. Wiesbaden.
- [CARMEN 2022] C.A.R.M.E.N. e.V.: Marktpreis Energieholz. Online verfügbar unter: <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/>. Letzter Zugriff: Mai 2022.

- [Cischinsky 2018] Cischinsky, H.; Diefenbach, N.: Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 – Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. Bericht des Instituts für Wohnen und Umwelt. Darmstadt. 2018.
- [co2online 2021] Co2online (Hrsg.): Stromspiegel – Verbrauchen Sie zu viel Strom? 2021. Online verfügbar unter: <https://www.stromspiegel.de/fileadmin/ssi/stromspiegel/Broschuere/stromspiegel-2021.pdf>. Letzter Zugriff: März 2022.
- [destatis 2019] Fortschreibung Wohngebäude- und Wohnungsbestand: Wohngebäude, Wohnungen, Wohnfläche. Stand 25. Juli 2019. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. 2019.
- [DIN 2018] DIN V 18599:2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teile 1 bis 10. Beuth Verlag. Berlin. 2018.
- [Dötsch 1998] Dötsch, C.; Taschenberger, J.; Schönberg I.: Leitfaden Nahwärme. Fraunhofer UMSICHT. Oberhausen. 1998.
- [Dunkelberg 2018] Dunkelberg, E.; Gähns, S.; Weiß, J.; Salecki, S.: Wirtschaftlichkeit von Mehrleiter-Wärmenetzen – Ökonomische Bewertung von Mehrleiter-Wärmenetzen zur Nutzung von Niedertemperaturwärme. Schriftenreihe des IÖW 215/18. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung IÖW. Berlin. 2018.
- [DWD 2011] Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH. Deutscher Wetterdienst (DWD). Offenbach. 2011. Online verfügbar unter: https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/TRY2011/TRY2011Projekt/01_start.html?nn=743440¬First=true&docId=743442. Letzter Zugriff: März 2021.
- [EEX 2022] KWK Index: Marktüblicher Strompreis als Basis für die Einspeisevergütung von KWK-Anlagen. Online verfügbar unter: <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/kwk-index>. Letzter Zugriff: Februar 2022.
- [Eggers 2020] Eggers, J.-B. et al.: PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial: Ergebnis einer gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland. 35. PV-Symposium. Freiburg. 2020. ISBN 978-3-948176-09-9.
- [Erhorn-Kluttig 2013] Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn, H.; Weber J.; Wössner, S.; Budde, E.: Der Energiekonzept-Berater für Stadtquartiere. Ein Potenzialbewertungstool aus der Forschungsinitiative EnEff:Stadt. Schriftenreihe EnEff:Stadt. 2013. ISBN 978-3-8167-9139-3.

- [Fichtner 2016] Stuible, A. et al.: Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014. Ausarbeitung im Auftrag des BMWK. Stuttgart. 2016.
- [Fischedick 2007] Fischedick, M.; Schüwer, D.; Venjakob, J.; Merten, F.; Mitze, D.; Nast, M.; Schillings, C.; Krewitt, W.; Bohnenschäfer, W.; Lindner, K.: Anforderungen an Nah- und Fernwärmenetze sowie Strategien für Marktakteure in Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2020. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Stuttgart. 2007.
- [Frank 2020] Geothermiepreisliste der Frank GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.frank-gmbh.de/de/downloads/preise/index.php>. Abgerufen am 17. September 2020.
- [Fraunhofer 2019] Fraunhofer Gesellschaft: Stadtquartier 2050 – Herausforderungen gemeinsam lösen. Webseite des Forschungsvorhabens „Stadtquartier 2050“. 2019. Online verfügbar unter: www.stadtquartier2050.de. Letzter Zugriff: März 2022.
- [Fritsche 2008] Fritsche, U.; Rausch, L.: Bestimmung spezifischer Treibhausgasfaktoren für Fernwärme. Forschungsbericht 36016008, UBA-FB 001145. Umweltbundesamt. Dessau. 2008.
- [Fronde! 2015] Fronde!, M.; Andor, M.; Ritter, N.; Sommer, S.; Vance, C.; Matuschek, P.; Müller, U.: Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2011 bis 2013. Forschungsprojekt Nr. 54/09 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. 2015.
- [GEG 2020] Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 37. Bundesanzeiger Verlag GmbH. Bonn. 13. August 2020.
- [Görres 2017] Görres, J.; Schäfer, N.: Neues Stadtquartier „Neckarpark Stuttgart“: Nahwärme und -kälte aus Abwasser. Energiewendebauen Kongress. 2017.
- [Grimm 2018] Grimm, S. et al.: SDHp2m...from policy to market: Regulatorische und marktunterstützende Maßnahmen für die Mobilisierung von Investitionen in erneuerbare Wärmenetze in europäischen Regionen und Ländern. April 2018. Online verfügbar unter: https://www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2018/05/20180418-3-SDHp2m_SDH_Fernw%C3%A4rme.pdf. Letzter Zugriff: Mai 2022.
- [Heidemann 2005] Heidemann, W.; Dötsch, C.; Müller-Steinhagen, H.: Solare Nahwärme und saisonale Speicherung. FVS LZE Themen 2005. Köln. 2005.

- [Hinz 2015] Hinz, E.: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Endbericht. Darmstadt. 2015. ISBN-Nr.: 978-3-941140-50-9.
- [IINAS 2020] Fritsche, U.; Greß, H.-W.: Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2019 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050. Bericht für die HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V. Darmstadt. 2020.
- [Isoplus 2012] Isoplus Planungshandbuch Kapitel 2. Isoplus Fernwärmetechnik GmbH. Rosenheim. 2012.
- [IWES 2012] Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES: Vorstudie zur Integration großer Anteile Photovoltaik in die elektrische Energieversorgung. Studie im Auftrag des BSW – Bundesverband Solarwirtschaft e.V. Ergänzte Fassung vom 29. Mai 2012. Kassel. 2012.
- [Jagnow 2011] Wolff, D.; Jagnow, K.: Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung. Wolfenbüttel/Braunschweig. 2011. Online verfügbar unter www.delta-q.de. Letzter Zugriff: Mai 2022.
- [Jordan 2017] Jordan, U.; Vajen, K.; Braas, H.: DHWcalc – Werkzeug zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis. Version 2.02b. Universität Kassel. Institut für Thermische Energietechnik, Solar und Anlagentechnik. 2017.
- [Klinger 2011] Schuler, W.; Schmidt, C.; Reule, B.; Butz, J. (Klinger und Partner): Abwasserwärmennutzung im Neckarpark. Machbarkeitsstudie im Auftrag der Landeshauptstadt Stuttgart. nicht veröffentlicht. Bietigheim-Bissingen. 2011.
- [Kelm 2019] Kelm, T.; Metzger, J.; Jachmann, H.: Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Abschlussbericht. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. Stuttgart. 2019.
- [KfW 2020] Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW): Energieeffizient Sanieren – Kredit und Investitionszuschuss. Anlage zu den Merkblättern – Technische Mindestanforderungen. Stand 01/2020. Online verfügbar unter: [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000003612_M_151_152_430_Anlage_TMA_2018_04.PDF](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000003612_M_151_152_430_Anlage_TMA_2018_04.PDF). Letzter Zugriff: Mai 2022.
- [KWKG 2020] Bundesministerium der Justiz: Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

– KWKG 2020). Online verfügbar unter: http://www.gesetze-im-inter-net.de/kwkg_2016/7.html. Letzter Zugriff: Februar 2022.

- [LHS 2020] Landeshauptstadt Stuttgart (LHS): Satellitenaufnahmen. Zur Verfügung gestellt vom Stadtmessungsamt. 2020.
- [Lödl 2010] Lödl, M. et al.: Abschätzung des Photovoltaik-Potenzials auf Dachflächen in Deutschland. 11. Symposium Energieinnovation. 10.–12. Februar 2010. Graz (Österreich).
- [Loga 2015] Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R.: Deutsche Wohngebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweite erweiterte Auflage. Bericht des Instituts für Wohnen und Umwelt. Darmstadt. 2015.
- [Mangold 2007] Mangold, D.; Riegger, M.; Schmidt, T.: Solare Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher. Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme. Stuttgart. 2007.
- [Miara 2011] Miara, M.; Günther, D.; Kramer, T.; Oltersdorf, T.; Wapler, J.: Wärmepumpen Effizienz. Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg. 2011.
- [MODER 2018] Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: District Energy Concept Adviser. Online verfügbar unter: https://www.district-eca.de/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=192&lang=de. Letzter Zugriff: Mai 2022.
- [Nussbaumer 2017] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.; Jenni, A.; Ködel, J.: Planungshandbuch Fernwärme. Bundesamt für Energie BFE. Bern (Schweiz). 2017.
- [Ramming 2007] Ramming, K.: Bewertung und Optimierung oberflächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle. Dissertation TU Dresden. 2007.
- [Ritz 2021] Ritz Heizungstechnik GmbH: Festpreisangebot für Brennstoffzelle Viotvolar mit integriertem Gas-Brennwertgerät. Online verfügbar unter: <https://ritz-heiztechnik.de/Festpreisangebot-Brennstoffzelle-Vitovolar>. Letzter Zugriff: Mai 2022.
- [Roth 1980] Roth, U.; Häubi, F.; Albrecht, J.; Bischoff, M.; Deucher, A.; Harder, L.; Langgraf, B.; Pape, G.: Wechselwirkungen zwischen Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Schriftenreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Bonn. 1980.
- [Schlitzberger 2017] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): EnEV 2017 – Vorbereitende Untersuchungen. BBSR-Online-Publikation 16/2017. Bonn. September 2017.

- [Schmidt 2010] Schmidt, J.; Mühlenhoff, J.: Erneuerbare Energien 2020. Potenzialatlas Deutschland. Agentur für erneuerbare Energien e.V. Berlin. 2010.
- [SOLINK 2020] Consolar Solare Energiesysteme GmbH: Solare Wärmepumpe, PVT-Kollektor und solare Heizungsunterstützung. Preisliste 2020. Frankfurt. 2020.
- [Solites 2017] ScenoCalc Fernwärme V2.0 (Juni 2017) – Berechnungsprogramm zur Abschätzung des solaren Nutzwärmeertrags von in Wärmenetze eingebundenen Solarthermieanlagen. Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme. Stuttgart. 2007. Heruntergeladen unter <https://www.scfw.de/>.
- [TRNSYS 2010] Transsolar Energietechnik: TRNSYS 17 – a transient system simulation program. Volume 5 Multizone building modeling with Type 56 and TRNBuild. Transsolar Energietechnik GmbH. Stuttgart. 2010.
- [UBA 2022] Umweltbundesamt: UBA-Empfehlung zu den Klimakosten. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/tab-uba-empfehlung-zu-den-klimakosten>. Letzter Zugriff: Mai 2022.
- [Waterkotte 2020] Waterkotte: Preisliste für Wärmepumpen. Online verfügbar unter: <https://www.waterkotte.de/waermepumpen>. Letzter Zugriff: Mai 2020.
- [Winter 2001] Winter, W.; Haslauer, T.; Obernberger, I.: Untersuchung der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen. Euroheat & Power 09 & 10/2001. ISSN 0949-166X.
- [Wirth 2021] Wirth, H.: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter: www.pv-fakten.de. Letzter Zugriff: Dezember 2021.
- [Zensus 2011] Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hrsg.): Zensusdatenbank – Ergebnisse des Zensus 2011 zum Download. Tabelle 4000W-3021. 2011. Online verfügbar unter: <https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online/>. Letzter Zugriff: März 2022.

9 Anhang

A.1 Beschreibung der betrachteten Siedlungstypologien

Tabelle 8:

Charakteristische Eigenschaften der ST 2 Einfamilienhaussiedlung [Blesl 2002] und Satellitenaufnahme einer Beispielsiedlung [LHS 2020].

ST 2: Einfamilienhaussiedlung		
Dieser Siedlungstyp steht beispielhaft für Wohngebiete, welche überwiegend an Stadträndern und in Vorortgemeinden anzutreffen sind. Die anzutreffenden Gebäude sind 1,5- bis 2,5-geschossig und freistehend. Der Siedlungstyp ist durch ein regelmäßiges, dichtes Straßennetz erschlossen.		
Gebäudemerkmale	Typgebäude	100 % EFH
	Anzahl der Gebäude pro km ² Siedlungsfläche	1.257
	Ø Gebäudegrundfläche [m ²]	136,4
Erschließungsmerkmale	Ø Abstand zwischen Gebäude und Straße [m/Gebäude]	7
	Ø Gesamtlänge der Straßen [m/km ²]	21.839



Tabelle 9:
Charakteristische Eigenschaften der ST 4 Reihenhaussiedlung [Blesl 2002]
und Satellitenaufnahme einer Beispielsiedlung [LHS 2020].

ST 4: Reihenhaussiedlung

Der Siedlungstyp „Reihenhäuser“ befindet sich, meist in Verbindung mit Siedlungstyp 2 (Einfamilienhaus- und Doppelhaussiedlung), in Vororten und an Stadträndern. Im Siedlungsgebiet sind ausschließlich Reihenhäuser anzutreffen. Das Siedlungsgebiet ist engmaschig durch Straßen erschlossen und die Gebäudezeilen sind überwiegend parallel und dicht angeordnet.

Gebäudemerkmale	Typgebäude	100 % RH
	Anzahl der Gebäude pro km ² Siedlungsfläche	1.914
	Ø Gebäudegrundfläche [m ²]	90
Erschließungsmerkmale	Ø Abstand zwischen Gebäude und Straße [m/Gebäude]	9
	Ø Gesamtlänge der Straßen [m/km ²]	30.380



Tabelle 10:
Charakteristische Eigenschaften der ST 5b Zeilenbebauung mit kleinen und größeren Mehrfamilienhäusern [Blesl 2002] und Satellitenaufnahme einer Beispielsiedlung [LHS 2020].

ST 5b: Zeilenbebauung mit kleinen und größeren Mehrfamilienhäusern

Der Siedlungstyp „Zeilenbebauung mit kleinen und größeren Mehrfamilienhäusern“ wurde zumeist in der Nachkriegszeit gebaut und die dabei entstandenen Wohnblocks sind grobmaschig durch Straßen erschlossen. Die großen Mehrfamilienhäuser sind 3- bis 5-geschossig und als 2-, 3- oder 4-Spanner angeordnet.

Gebäudemerkmale	Typgebäude	50 % MFH 50 % GMH
	Anzahl der Gebäude pro km ² Siedlungsfläche	1.172
	Ø Gebäudegrundfläche [m ²]	156
Erschließungsmerkmale	Ø Abstand zwischen Gebäude und Straße [m/Gebäude]	9
	Ø Gesamtlänge der Straßen [m/km ²]	17.725



Tabelle 11:
Charakteristische Eigenschaften der ST 6 Zeilenbebauung mit großen hohen Mehrfamilienhäusern oder Hochhäusern [Blesl 2002] und Satellitenaufnahme einer Beispielsiedlung [LHS 2020].

ST 6: Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern oder Hochhäusern

Der Siedlungstyp 6 ist typischerweise in den Randlagen von Städten anzutreffen. Der Siedlungstyp ist meist über Sackgassen erschlossen, welche von einer das Siedlungsgebiet umgebenden Umgehungsstraße abzweigen.

Gebäudemerkmale	Typgebäude	100 % HH
	Anzahl der Gebäude pro km ² Siedlungsfläche	661
	Ø Gebäudegrundfläche [m ²]	323
Erschließungsmerkmale	Ø Abstand zwischen Gebäude und Straße [m/Gebäude]	17
	Ø Gesamtlänge der Straßen [m/km ²]	17.341



Tabelle 12:
Charakteristische Eigenschaften der ST 7a Blockbebauung niedriger Dichte
[Blesl 2002] und Satellitenaufnahme einer Beispielsiedlung [LHS 2020].

ST 7a: Blockbebauung niedriger Dichte

Der Siedlungstyp 7a ist fast ausschließlich in den Innenstädten von Großstädten anzutreffen. Typische Merkmale des Siedlungstyps sind in den Blöcken liegende große Freiflächen. Die Einzelgebäude sind meist 3-geschossig und teilweise aneinandergebaut. Die verkehrstechnische Erschließung erfolgt über nahezu quadratische Straßen.

Gebäudemerkmale	Typgebäude	30 % MFH 70 % GMH
	Anzahl der Gebäude pro km ² Siedlungsfläche	1.541
	Ø Gebäudegrundfläche [m ²]	276
Erschließungsmerkmale	Ø Abstand zwischen Gebäude und Straße [m/Gebäude]	4
	Ø Gesamtlänge der Straßen [m/km ²]	25.994



A.2 Bewertungstabellen für die monetäre Bewertung

Tabelle 13:
Übersicht zur Auswahl der Bewertungstabelle

Klimazone	Siedlungstyp	Bewertungstabelle
04 – Potsdam	ST 2 – Einfamilienhaussiedlung	Tabelle 14
04 – Potsdam	ST 4 – Reihenhaussiedlung	Tabelle 15
04 – Potsdam	ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen MFH	Tabelle 16
04 – Potsdam	ST 6 – Zeilenbebauung mit großen MFH und HH	Tabelle 17
04 – Potsdam	ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte	Tabelle 18
11 – Fichtelberg	ST 2 – Einfamilienhaussiedlung	Tabelle 19
11 – Fichtelberg	ST 4 – Reihenhaussiedlung	Tabelle 20
11 – Fichtelberg	ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen MFH	Tabelle 21
11 – Fichtelberg	ST 6 – Zeilenbebauung mit großen MFH und HH	Tabelle 22
11 – Fichtelberg	ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte	Tabelle 23
12 – Mannheim	ST 2 – Einfamilienhaussiedlung	Tabelle 24
12 – Mannheim	ST 4 – Reihenhaussiedlung	Tabelle 25
12 – Mannheim	ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen MFH	Tabelle 26
12 – Mannheim	ST 6 – Zeilenbebauung mit großen MFH und HH	Tabelle 27
12 – Mannheim	ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte	Tabelle 28

Tabelle 14:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 2 – Einfamilienhaussiedlung am Standort Potsdam (Klimazone 4).

Randbedingung	Klimazone	4 – Potsdam (gemäßigt)															
	Siedlungstyp	ST 2 – Einfamilienhaussiedlung															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	3	4	5	0	0	0	5	3	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	3	2	2	2	4	5	0	0	0	5	4	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	2	3	4	5	0	0	0	5	5	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	1	2	3	5	0	0	0	5	4	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	2	3	5	0	0	5	5	2	1	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	2	3	5	0	0	4	5	2	1	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	1	1	3	5	0	0	0	5	3	2	3	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	3	4	0	0	0	0	2	1	1	4
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	3	1	1	1	3	4	0	0	0	0	3	1	2	4
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	2	4	0	0	0	0	3	1	2	4
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	1	2	3	5	0	0	0	5	2	1	1	4
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	5	4	3	1	1	3	4	5	0	0	0	5	4	4	4	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	3	2	1	3	4	4	5	0	0	0	5	3	3	4	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	2	1	3	4	4	5	0	0	0	5	4	3	4	5
	Sole/Wasser-WP mit Abwasserwärme	5	3	3	1	3	3	4	5	0	0	0	5	3	2	3	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	2	3	5	0	0	0	5	2	1	2	5
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	1	3	4	0	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	2	0	0	0	0	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	2	2	2	4	5	0	0	0	5	4	2	3	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	2	3	4	5	0	0	0	5	4	2	3	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	2	2	4	5	0	0	0	5	4	2	3	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	0	0	0	5	2	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	0	0	0	0	2	1	2	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 15:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 4 – Reihenhaussiedlung
am Standort Potsdam (Klimazone 4).

Randbedingung	Klimazone	4 – Potsdam (gemäßigt)															
	Siedlungstyp	ST 4 – Reihenhaussiedlung															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	2	3	4	5	2	3	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	5	5	2	3	3	4	5	2	3	4	5	5	4	5	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	2	2	4	5	2	2	3	5	4	3	4	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	2	3	5	3	4	5	5	2	1	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	1	2	5	3	4	4	5	2	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	3	1	1	1	2	5	2	3	4	5	3	2	2	5
	Biomassekessel	5	3	3	1	1	2	3	5	0	0	0	2	3	2	2	3
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	4	3	1	1	2	3	4	1	1	1	2	3	2	2	3
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	2	4	2	1	2	2	4	2	3	3
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	4	2	2	1	1	2	3	5	2	2	3	5	2	1	1	3
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	5	4	4	2	1	2	3	5	3	4	4	5	5	4	4	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	4	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	3	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Ag-rothermie	4	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	3	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Abwasserwärme	5	3	2	1	2	3	4	5	3	3	4	5	3	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	3	2	1	2	3	4	2	2	2	5	2	1	1	4
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	3	3	1	1	1	2	4	0	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	3	2	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	4	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	3	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	4	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	3	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	2	1	2	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	3	2	2	1	2	4	4	5	0	0	1	2	1	1	1	4

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 16:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern am Standort Potsdam (Klimazone 4).

Randbedingung	Klimazone	4 – Potsdam (gemäßigt)															
	Siedlungstyp	ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	4	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	3	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	3	2	3	4	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	3	3	4	5	2	3	4	5	4	3	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	3	2	1	1	1	2	5	2	4	5	5	3	2	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	3	2	1	1	1	2	5	3	4	5	5	3	1	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	2	2	5	2	4	4	5	4	2	2	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	2	4	1	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	2	1	1	1	2	4	1	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	3	2	1	1	1	1	4	2	2	2	3	3	1	1	2
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	1	2	3	5	2	2	2	5	2	1	1	3
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	3	2	2	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	4	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	3	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	4	3	1	2	2	3	5	2	2	3	5	3	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	2	3	5	1	2	2	4	2	1	1	4
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	2	1	1	2	4	1	0	0	0	2	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	3	4	4	5	3	3	4	5	4	4	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	3	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	1	1	1	2	3	2	2	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 17:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 6 – Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern am Standort Potsdam (Klimazone 4).

Randbedingung	Klimazone	4 – Potsdam (gemäßigt)															
	Siedlungstyp	ST 6 – Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	4	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	3	4	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	3	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	1	2	5	2	4	5	5	3	1	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	1	2	5	3	4	5	5	3	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	4	2	3	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	2	4	1	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	3	1	1	1	2	4	2	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	3	2	1	1	1	1	4	2	2	2	2	3	1	1	2
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	2	5	3	1	1	2
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	3	2	2	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	4	3	1	2	2	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	4	3	1	2	2	3	5	2	2	3	5	3	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	1	3	5	1	2	1	4	2	1	2	4
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	2	1	1	2	4	1	1	1	0	2	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	3	4	4	5	3	3	4	5	5	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	4	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	1	1	1	2	3	2	2	4

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 18:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte am Standort Potsdam (Klimazone 4).

Randbedingung	Klimazone	4 – Potsdam (gemäßigt)															
	Siedlungstyp	ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	4	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	3	4	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	3	3	4	5	2	3	4	5	4	3	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	3	2	1	1	1	2	5	2	4	5	5	3	2	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	3	2	1	1	1	2	5	3	4	5	5	3	2	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	4	2	3	5
	Biomassekessel	5	4	2	1	1	2	2	4	1	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	4	3	1	1	1	2	4	1	1	2	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	1	4	2	2	2	3	3	1	1	2
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	1	2	3	5	2	2	2	5	2	1	1	3
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	3	2	2	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	3	2	1	2	2	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	3	5	3	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	3	2	1	2	3	5	1	1	2	4	2	1	1	4
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	1	2	4	1	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	2	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	3	4	4	5	3	3	4	5	4	4	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	3	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	1	1	1	2	3	2	2	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 19:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 2 – Einfamilienhaussiedlung am Standort Fichtelberg (Klimazone 11).

Randbedingung	Klimazone	11 – Fichtelberg (kalt)															
	Siedlungstyp	ST 2 – Einfamilienhaussiedlung															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	3	4	5	0	0	4	5	3	2	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	3	2	1	2	4	5	0	0	4	5	3	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	2	2	4	5	0	0	4	5	4	3	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	1	2	3	5	0	0	3	5	3	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	3	4	5	0	4	5	5	2	2	4	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	2	3	5	0	4	4	5	1	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	1	2	3	5	0	4	4	5	3	2	4	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	3	4	0	0	0	0	2	1	2	4
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	3	1	1	2	3	4	0	0	0	0	2	1	2	4
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	3	4	0	0	0	3	2	1	2	4
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	1	2	3	5	0	0	3	5	1	1	2	5
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	5	4	3	1	1	3	4	5	0	4	4	5	4	4	4	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	3	2	1	3	3	4	5	0	3	4	5	3	3	4	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	3	1	3	4	4	5	0	4	4	5	3	3	4	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	3	2	1	2	3	4	5	0	3	4	5	3	3	4	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	2	3	5	0	0	0	5	1	1	2	5
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	2	3	4	0	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	3	0	0	0	0	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	1	2	4	5	0	0	4	5	3	2	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	2	2	2	4	5	0	0	4	5	3	2	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	1	2	4	5	0	0	4	5	3	2	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	0	4	4	5	2	2	4	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	0	0	0	3	1	1	3	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 20:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 4 – Reihenaussiedlung am Standort Fichtelberg (Klimazone 11).

Randbedingung	Klimazone	11 – Fichtelberg (kalt)															
	Siedlungstyp	ST 4 – Reihenaussiedlung															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	2	3	4	5	2	3	4	5	4	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	5	4	2	2	3	4	5	2	3	4	5	4	4	5	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	1	2	3	5	2	2	3	5	4	3	4	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	2	3	5	3	4	5	5	2	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	1	3	5	3	4	4	5	1	1	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	1	2	3	5	3	4	4	5	3	2	3	5
	Biomassekessel	5	3	3	1	1	2	3	4	1	1	1	2	2	2	2	4
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	4	3	1	1	2	3	4	1	1	1	2	3	2	2	4
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	3	4	1	2	2	3	3	2	2	4
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	4	2	2	1	1	2	3	5	2	2	3	5	1	1	1	4
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	5	4	4	2	1	3	4	5	3	4	4	5	4	4	4	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	4	3	2	1	2	4	4	5	3	3	4	5	3	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	3	1	3	4	4	5	3	4	4	5	3	3	4	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	3	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	2	2	3	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	1	2	5	2	2	2	5	1	1	1	5
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	3	3	1	1	1	2	4	0	0	0	0	1	1	1	1
	Holzhackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	2	1	0	0	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	2	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	2	4	5
	Fernwärme (konventionell)	3	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	2	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	3	2	2	1	2	4	4	5	1	1	1	2	1	1	2	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 21:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern am Standort Fichtelberg (Klimazone 11).

Randbedingung	Klimazone	11 – Fichtelberg (kalt)															
	Siedlungstyp	ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	4	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	3	2	2	3	4	5	2	3	4	5	4	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	3	2	2	3	4	5	2	3	4	5	4	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	3	5	3	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	3	2	1	1	2	3	5	2	4	5	5	2	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	1	2	5	3	4	4	5	2	1	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	1	3	3	5	2	4	4	5	3	3	3	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	3	4	1	1	1	2	2	1	1	4
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	2	1	1	1	2	4	1	1	1	3	2	1	1	4
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	3	2	1	1	1	2	4	2	2	2	3	2	1	1	4
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	1	2	3	5	2	2	3	5	2	1	1	5
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	1	3	4	5	3	4	4	5	2	2	3	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	3	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	3	4	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	4	3	1	1	3	4	5	2	3	4	5	2	2	3	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	2	3	5	1	2	2	5	2	1	2	5
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	1	2	4	1	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	2	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	2	3	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	1	1	1	3	2	2	2	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 22:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 6 – Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern am Standort Fichtelberg (Klimazone 11).

Randbedingung	Klimazone	11 – Fichtelberg (kalt)															
	Siedlungstyp	ST 6 – Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	4	4	5	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	2	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	2	3	4	5	3	3	4	5	4	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	3	3	1	2	2	4	5	2	3	4	5	3	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	2	3	5	2	4	5	5	2	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	2	2	5	2	4	4	5	2	2	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	1	3	4	5	2	4	5	5	2	3	4	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	3	4	1	1	1	2	2	1	1	4
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	3	1	1	1	2	4	1	1	1	2	2	1	1	4
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	3	2	1	1	1	2	4	2	2	2	3	2	1	1	3
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	1	3	3	5	2	2	3	5	2	1	1	4
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	1	3	3	5	3	4	4	5	2	2	3	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	3	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	3	4	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	3	3	1	1	3	4	5	2	3	3	5	2	2	3	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	2	3	5	1	2	2	4	1	1	2	5
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	1	2	4	1	1	1	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	2	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	2	2	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	2	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	2	3	4	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	1	1	1	2	2	2	3	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 23:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte am Standort Fichtelberg (Klimazone 11).

Randbedingung	Klimazone	11 – Fichtelberg (kalt)															
	Siedlungstyp	ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	4	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	2	3	4	5	2	3	4	5	4	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	2	3	4	5	3	3	4	5	4	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	3	5	3	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	3	2	1	1	2	3	5	2	4	5	5	2	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	3	2	1	1	1	2	5	2	4	4	5	2	2	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	1	3	3	5	2	4	4	5	3	3	3	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	3	4	1	1	1	2	2	1	1	4
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	3	1	1	1	2	4	1	1	1	3	2	1	1	4
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	3	2	1	1	1	2	4	2	2	2	3	2	1	1	4
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	1	2	3	5	2	2	3	5	2	1	1	5
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	1	3	4	5	3	4	4	5	2	2	3	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	3	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	3	4	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	3	2	1	1	3	4	5	2	3	4	5	2	2	3	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	2	3	5	1	2	2	4	1	1	2	5
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	1	2	4	1	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	2	2	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	5	5	3	3	4	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	1	1	1	3	2	2	2	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 24:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 2 – Einfamilienhaussiedlung am Standort Mannheim (Klimazone 12).

Randbedingung	Klimazone	12 – Mannheim (mild)															
	Siedlungstyp	ST 2 – Einfamilienhaussiedlung															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	3	4	5	0	0	0	5	4	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	3	2	2	3	4	5	0	0	0	5	4	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	2	3	4	5	0	0	0	5	5	4	5	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	2	2	3	5	0	0	0	5	4	2	3	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	2	3	5	0	0	0	5	2	2	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	1	3	5	0	0	0	5	2	1	2	5
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	1	1	3	5	0	0	0	5	3	1	2	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	3	4	0	0	0	0	3	1	1	3
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	4	3	1	1	1	3	4	0	0	0	0	3	1	2	3
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	2	4	0	0	0	0	3	2	2	3
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	1	2	3	5	0	0	0	5	2	1	1	3
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	5	4	3	1	1	2	4	5	0	0	0	5	4	4	4	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	3	2	1	3	4	4	5	0	0	0	5	4	3	4	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	2	1	3	4	4	5	0	0	0	5	4	3	4	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	3	3	1	3	3	4	5	0	0	0	5	4	2	3	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	3	2	1	1	3	5	0	0	0	0	2	1	1	4
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	2	3	4	0	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	2	0	0	0	0	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	2	2	3	4	5	0	0	0	5	4	2	3	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	2	3	4	5	0	0	0	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	2	3	4	5	0	0	0	5	4	2	3	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	0	0	0	5	2	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	2	4	4	5	0	0	0	0	2	1	2	5

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 25:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 4 – Reihenhaussiedlung
am Standort Mannheim (Klimazone 12).

Randbedingung	Klimazone	12 – Mannheim (mild)															
	Siedlungstyp	ST 4 – Reihenhaussiedlung															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	3	3	4	5	2	3	4	5	5	4	5	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	5	5	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	5	5	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	4	1	2	2	4	5	2	2	3	5	4	3	4	5
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	2	3	5	3	4	5	5	2	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	1	2	5	3	4	5	5	2	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	3	1	1	1	2	5	2	3	4	5	4	1	2	4
	Biomassekessel	5	3	3	1	2	2	3	5	0	0	0	2	3	2	2	2
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	4	3	1	1	2	2	4	0	0	0	2	4	2	3	3
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	2	4	2	2	2	2	4	3	3	3
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	4	2	2	1	1	2	3	5	2	2	3	5	2	1	1	2
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	5	4	4	2	1	2	3	5	3	4	4	5	5	4	5	5
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	4	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	3	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	4	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	3	2	3	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	3	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	3	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	3	3	2	1	1	2	4	0	2	2	4	2	1	1	3
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	3	3	1	1	1	2	4	0	0	0	0	1	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	3	2	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	4	1	3	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	4	1	3	3	4	5	2	3	4	5	4	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	3	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	2	1	2	4
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	3	2	2	1	2	4	4	5	0	0	0	2	2	1	1	3

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 26:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern am Standort Mannheim (Klimazone 12).

Randbedingung	Klimazone	12 – Mannheim (mild)															
	Siedlungstyp	ST 5b – Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	5	3	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	3	2	4	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	3	4
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	3	2	1	1	1	2	5	2	4	5	5	3	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	3	2	1	1	1	2	5	3	4	5	5	3	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	2	2	5	2	3	4	5	4	2	2	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	1	2	2	4	1	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	2	1	1	1	2	4	2	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	3	2	1	1	1	1	4	2	2	2	3	3	1	1	2
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	2	5	3	1	1	2
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	3	2	2	4
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	4	3	1	2	3	4	5	2	2	4	5	4	3	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	4	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	4	3	1	2	2	3	5	2	2	3	5	4	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	3	2	1	1	2	5	1	1	2	4	2	1	1	3
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	2	1	1	2	4	1	0	0	0	3	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	4	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	3	2	2	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	3	3	4	5	1	1	1	2	3	2	2	4

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 27:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 6 – Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern am Standort Mannheim (Klimazone 12).

Randbedingung	Klimazone	12 – Mannheim (mild)															
	Siedlungstyp	ST 6 – Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	3	3	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	4	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	3	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	3	4
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	2	2	1	1	1	2	5	2	4	4	5	3	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	2	2	1	1	1	2	4	3	4	5	5	3	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	4	2	3	5
	Biomassekessel	5	3	2	1	2	2	2	5	1	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	3	3	1	1	1	1	4	2	1	2	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	3	2	1	1	1	1	4	2	2	2	2	3	1	1	2
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	2	5	3	1	1	2
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	3	2	2	4
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	4	3	1	2	3	3	5	2	3	3	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	3	1	2	2	3	5	2	3	3	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	4	3	1	2	2	3	5	2	2	3	5	4	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	4	2	1	1	2	5	1	1	1	3	2	1	1	3
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	2	1	1	2	4	1	1	1	0	2	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	1	3	3	4	5	3	4	4	5	5	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	4	4	4	5	3	4	4	5	5	3	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	3	3	4	5	3	4	4	5	5	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	5	5	4	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	3	4	4	5	1	1	1	2	3	2	2	4

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

Tabelle 28:
Monetäre Bewertung der Lösungsansätze für ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte am Standort Mannheim (Klimazone 12).

Randbedingung	Klimazone	12 – Mannheim (mild)															
	Siedlungstyp	ST 7a – Blockbebauung niedriger Dichte															
	Bewertungskriterium	Investitionen				Energiekosten				Kompensationskosten				Volkswirtschaftliche Betrachtung			
	Energiestandard	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand	EH 40	EH 55	GEG-Ref	Be-stand
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	5	3	2	1	3	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	5	4	4	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	4	4	5
	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren	5	4	4	2	4	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	3	4
	Gas-Brennwertkessel mit solarer TWW-Bereitung	4	3	2	1	1	1	2	5	2	4	5	5	3	1	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit solarer Heizung	4	3	2	1	1	1	2	5	3	4	5	5	3	2	2	4
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe	5	3	2	1	2	2	3	5	2	3	4	5	4	3	3	5
	Biomassekessel	5	4	2	1	1	2	2	4	1	1	1	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer TWW-Bereitung	5	4	3	1	1	1	2	4	2	1	2	2	3	1	1	2
	Biomassekessel mit solarer Heizung	5	4	3	1	1	1	1	4	2	2	2	3	3	1	1	2
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	2	5	3	1	1	2
	Brennstoffzelle mit Gas-Brennwertkessel	4	3	2	1	2	2	3	5	2	4	4	5	3	2	2	4
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	5	3	2	1	2	3	4	5	2	3	4	5	4	2	3	5
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	5	3	2	1	2	2	3	5	2	2	3	5	3	2	2	5
	Gas-BHKW und Solarthermie	5	4	3	2	1	1	2	5	1	1	1	3	2	1	1	2
	Hackschnitzel-BHKW mit Hackschnitzelkessel	5	4	3	1	1	1	2	4	1	0	0	0	2	1	1	1
	Holz hackschnitzelkessel mit Solarthermiefeld	5	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Kalte Nahwärme Erdsonden	5	4	3	2	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	4	5
	Kalte Nahwärme Erdkolektor	5	4	3	1	4	4	4	5	3	4	4	5	5	4	4	5
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	5	4	3	1	3	3	4	5	3	3	4	5	5	3	4	5
	Fernwärme (konventionell)	4	2	2	1	2	3	4	5	3	4	4	5	4	2	3	5
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	4	2	2	1	3	3	4	5	1	1	1	2	3	2	2	4

Legende: 1 = sehr positiv, 2 = positiv, 3 = neutral, 4 = negativ, 5 = sehr negativ, 0 = keine externe Kompensation erforderlich

A.3 Fragenkatalog zu limitierenden Faktoren

Die Auswahl möglicher Versorgungskonzepte kann durch die nachfolgenden Fragen eingegrenzt werden. Eine Zuordnung der Ausschlusskriterien zu den möglichen Versorgungskonzepten ist im Anhang A.4 dargestellt.

Frage 1: Gibt es im Projektgebiet bzw. in den benachbarten Quartieren ein Fernwärmenetz?

- ☐ Ja, konventionell
- ☐ Ja, (nahezu) klimaneutral
- ☐ Nein -> Versorgungskonzepte mit Fernwärme sind zu streichen

Frage 2: Gibt es im Projektgebiet ein Gasnetz bzw. ist die Verlegung eines Gasnetzes geplant?

- ☐ Ja
- ☐ Nein -> Versorgungskonzepte mit Gas-Verbrennung sind zu streichen

Frage 3: Gibt es im Projektgebiet oder in unmittelbarer Nähe größere nutzbare Freiflächen?

- ☐ Ja
- ☐ Nein -> Zentrale Versorgungskonzepte mit Agrothermiefeld oder Solarthermiefeld sind zu streichen

Frage 4: Ist das Abteufen von Erdsonden im Projektgebiet möglich? (Entsprechende Informationen stehen in den Geodatenportalen der Bundesländer zur Verfügung)

- ☐ Ja
- ☐ Nein -> Versorgungskonzepte mit Erdsonden sind zu streichen

Frage 5: Ist die Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle im Projektgebiet möglich? (Informationen beim Amt für Wasserwirtschaft verfügbar)

- ☐ Ja
- ☐ Nein -> Versorgungskonzepte mit Wasser-Wasser-Wärmepumpe ist zu streichen

Frage 6: Ist die Nutzung von Abwasserwärmerückgewinnung im Projektgebiet möglich? (Informationen dazu sind beim Amt für Stadtentwässerung verfügbar)

- ☐ Ja
- ☐ Nein -> Versorgungskonzepte mit Abwasserwärme sind zu streichen

Frage 7: Ist die Verbrennung von Energieträgern im Projektgebiet möglich?

- ☐ Ja
- ☐ Nein -> Versorgungskonzepte mit Gas- und Biomasseverbrennung sind zu streichen

Frage 8: Gibt es einen Investor und Betreiber für ein Wärmenetz?

- ☐ Ja

☐ Nein -> Sämtliche zentralen Versorgungskonzepte ausgenommen Fernwärme sind zu streichen

Frage 9: Gibt es im Projektgebiet einen Anschlusszwang?

☐ Ja -> Alle Versorgungskonzepte, die dem Anschlusszwang nicht genügen, sind zu streichen

☐ Nein

Frage 10: Handelt es sich um ein Neubauprojekt?

☐ Ja -> Die Energiestandards GEG-Referenzgebäude und unsanierter Bestand sind zu streichen

☐ Nein

A.4 Ausschlusskriterien von Versorgungskonzepten

Tabelle 29:

Übersichtstabelle zur Zuordnung der limitierenden Faktoren als Ausschlusskriterien zu den betrachteten Versorgungskonzepten.

	Kein Fernwärmenetz vorhanden	Kein Gasnetz vorhanden	Keine Freiflächen vorhanden	Kein Abteufen von Erdsonden möglich	Keine Nutzung des Grundwassers möglich	Keine Nutzung von Abwasserwärme möglich	Keine Verbrennung im Projektgebiet möglich	Kein Netzbetreiber vorhanden
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	+	+	+	+	+	+	+
	Sole-Wasser-WP mit Erdsonden	+	+	-	+	+	+	+
	Sole-Wasser-WP mit PVT-Kollektoren	+	+	+	+	+	+	+
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	+	+	+	-	+	+	+
	Gas-BW-Kessel mit solarer TWW	+	-	+	+	+	-	+
	Gas-BW-Kessel mit solarer Heizung	+	-	+	+	+	-	+
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-WP	+	-	+	+	+	-	+
	Biomassekessel	+	+	+	+	+	-	+
	Biomassekessel mit solarer TWW	+	+	+	+	+	-	+
	Biomassekessel mit solarer Heizung	+	+	+	+	+	-	+
Zentrale Versorgungskonzepte	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	+	+	+	+	+	-	+
	Brennstoffzelle mit Gas-BW-Kessel	+	-	+	+	+	-	+
	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	+	+	+	+	+	+	-
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	+	+	-	+	+	+	-
	Sole/Wasser-WP mit Abwasserwärme	+	+	+	+	-	+	-
	Gas-BHKW und Solarthermie	+	-	+	+	+	-	-
	Hackschnitzel-BHKW mit Spitzenlast	+	+	+	+	+	-	-
	Holzhackschnittel mit Solarthermie	+	+	+	+	+	-	-
	Kalte Nahwärme Erdsonden	+	+	-	+	+	+	-
	Kalte Nahwärme Erdkollektor	+	+	-	+	+	+	-
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	+	+	+	+	-	+	-
	Fernwärme (konventionell)	-	+	+	+	+	+	+
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	-	+	+	+	+	+	+

Legende: + = Versorgungskonzept ist umsetzbar, - = Versorgungskonzept ist nicht umsetzbar

A.5 Bewertung mit weichen Faktoren

Tabelle 30:
Übersichtstabelle zur Bewertung der Versorgungskonzepte anhand weicher Faktoren.

		Zukunfts- fähigkeit	Umsetz- barkeit	Übertrag- barkeit	Erweiter- barkeit	Klimaan- passung	Robust- heit	Netzdien- lichkeit
Dezentrale Versorgungskonzepte	Luft-Wasser-Wärmepumpe	+	+	+	+	+/-	+	+/-
	Sole-Wasser-WP mit Erdsonden	+	+	o	o	+	o	+/-
	Sole-Wasser-WP mit PVT-Kollektoren	+	o	o	o	-	+	+/-
	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	+	-	-	o	+	-	+/-
	Gas-BW-Kessel mit solarer TWW	-	+	+	+	-	o	o
	Gas-BW-Kessel mit solarer Heizung	-	+	+	+	-	o	o
	Gas-Brennwertkessel mit Abluft-WP	-	o	+	+	o	o	-
	Biomassekessel	-	o	-	o	o	-	o
	Biomassekessel mit solarer TWW	-	o	-	o	-	-	o
	Biomassekessel mit solarer Heizung	-	o	-	o	-	-	o
	Gas-BHKW mit Gas-Brennwertkessel	-	o	+	+	o	o	+
	Brennstoffzelle mit Gas-BW-Kessel	o	-	+	+	o	o	+
Zentrale Versorgungskonzepte	Sole/Wasser-WP mit Erdsonden	+	+	o	o	o	o	+/-
	Sole/Wasser-WP mit Agrothermie	+	+	-	-	o	o	+/-
	Sole/Wasser-WP Abwasserwärme	+	-	-	-	o	o	+/-
	Gas-BHKW und Solarthermie	-	+	-	+	o	o	+
	Hackschnitzel-BHKW mit Spitzenlast	-	+	-	+	o	-	+
	Holz hackschnitzel mit Solarthermie	-	+	-	+	o	-	o
	Kalte Nahwärme Erdsonden	+	-	o	o	+	o	+/-
	Kalte Nahwärme Erdkollektor	+	-	-	-	+	o	+/-
	Kalte Nahwärme Abwasserwärme	+	-	-	-	+	o	+/-
	Fernwärme (konventionell)	-	+	-	+	o	o	o
	Fernwärme (nahezu klimaneutral)	+	+	-	+	o	o	o

Legende: + = positiv, 0 = neutral, - = negativ

Begründung zur Bewertung der weichen Faktoren

- **Zukunftsfähigkeit**
 - Varianten mit Wärmepumpen: positiv (wichtiger Bestandteil der Klimaschutzstrategie, gewinnt an Bedeutung durch Ausbau der erneuerbaren Energien)
 - Varianten mit Gas-Brennwertkessel: negativ (unklare Randbedingungen für Weiterbetrieb, Kosten und Klimaneutralität)
 - Varianten mit Biomasse: negativ (endliche Ressource, Umweltbelastung durch Verbrennung, Verknappung durch stärkere Nutzung als Baustoff)
 - Varianten mit Kraft-Wärme-Kopplung: negativ (Brückentechnologie, verliert an Bedeutung durch weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien, Verteuerung durch CO₂-Steuer)

- Brennstoffzelle: neutral (könnte an Bedeutung gewinnen bei Verfolgung einer Wasserstoffstrategie, ggf. politische Einschränkung, um der Industrie den verfügbaren Wasserstoff möglichst günstig zur Verfügung zu stellen)
- Fernwärme (nahezu klimaneutral): positiv (wichtiger Bestandteil im Wärmemix, ermöglicht den Weiterbetrieb bestehender Anlagen)
- Fernwärme (konventionell): negativ (Umstellung auf klimaneutrale Fernwärme erforderlich)

• Umsetzbarkeit

- Luft-Wärmepumpe, Gas-Brennwertkessel mit Solarthermie, Fernwärme: positiv (keine technischen oder rechtlichen Hürden, gängige Technologie, geringer Platzbedarf im Gebäude, niedrige Investitionskosten)
- Sole-Wärmepumpe mit Erdsonden oder Erdkollektoren: positiv (geringe technische oder rechtliche Hürden, gängige Technologie, geringer Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Sole-Wärmepumpe mit PVT-Kollektor: neutral (keine technischen oder rechtlichen Hürden, neue Technologie, geringer Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Wasser-Wärmepumpe: negativ (erhöhte technische oder rechtliche Hürden, neue Technologie, geringer Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Varianten mit Biomassekessel oder Gas-BHKW sowie Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe: neutral (keine technischen oder rechtlichen Hürden, gängige Technologie, erhöhter Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Brennstoffzelle: negativ (erhöhte technische oder rechtliche Hürden, neue Technologie, erhöhter Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Nahwärme mit Sole-Wärmepumpe und Erdsonden / Erdkollektoren: positiv (geringe technische oder rechtliche Hürden, gängige Technologie, wenig Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Nahwärme mit Abwasserwärmenutzung: negativ (erhöhte technische und rechtliche Hürden, wenig erprobte Technologie, wenig Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Nahwärme mit Gas-BHKW und Solarthermie, mit Hackschnitzel-BHKW, mit Hackschnitzelkessel und Solarthermie: positiv (geringe technische oder rechtliche Hürden, gängige Technologie, wenig Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Kalte Nahwärme mit Erdkollektoren / Erdsonden: negativ (geringe technische oder rechtliche Hürden, wenig erprobte Technologie, erhöhter Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)
- Kalte Nahwärme mit Abwasserwärme: negativ (erhöhte technische oder rechtlichen Hürden, wenig erprobte Technologie, erhöhter Platzbedarf im Gebäude, erhöhte Investitionskosten)

• Übertragbarkeit

- Luft-Wärmepumpe: positiv (grundsätzlich überall einsetzbar in Verbindung mit Wärmeschutzmaßnahmen)

- Varianten mit Erdsonden: neutral (Bohrtiefe abhängig von Untergrundbeschaffenheit, bei hoher Bebauungsdichte ggf. aktive Regeneration notwendig)
- Varianten mit Erdkollektor: negativ (ohne größere Freiflächen nicht umsetzbar, eine Nachrüstung im Bestand sehr schwierig)
- Sole-Wärmepumpe mit PVT-Kollektor: neutral (grundsätzlich überall einsetzbar, allerdings kann bei hohen Gebäuden mit geringer Dachfläche die benötigte Wärmeleistung nicht bereitgestellt werden)
- Wasser-Wärmepumpe: negativ (Einsatz beschränkt auf Gebiete mit genügend Grundwasser, nicht im Einzugsbereich von Wasserschutzgebieten, Notwasserbrunnen, Thermalwasservorkommen, etc.)
- Varianten mit Gas-Brennwertkessel, Gas-BHKW, Brennstoffzelle: positiv (Gas ist in flüssiger Form grundsätzlich überall verfügbar, auch wenn kein Gasnetz vorhanden ist, ggf. Einschränkung durch Verbrennungsverbote)
- Varianten mit Biomassekessel: negativ (Nachrüstung im Bestand erfordert genügend Platz für die Lagerung der Biomasse, ggf. Einschränkung durch Verbrennungsverbote)
- Fernwärme: negativ (nur übertragbar auf Gebiete mit Fernwärme, Neuaufbau von Fernwärme in Städten schwierig und von Topographie abhängig)
- Varianten mit Abwasserwärme: negativ (abhängig von Durchflussmenge und Temperaturniveau)
- Varianten mit Solarthermiefeld: negativ (nur umsetzbar bei genügend Freiflächen in der Nähe zum Quartier)
- Varianten mit Hackschnitzelverbrennung: negativ (Verbrennung von Holz verursacht signifikante Emissionen von Feinstaub und Stickoxiden, ggf. Einschränkung durch Verbrennungsverbote, erhöhter Platzbedarf für Anlieferung und Lagerung von Biomasse)

• Erweiterbarkeit

- Luft-Wärmepumpe, Gas-Brennwertkessel: positiv (Erweiterung einfach, Austausch des Wärmeerzeugers erforderlich, kein großer zusätzlicher Platzbedarf, kostengünstige Investition)
- Varianten mit Erdsonden: neutral (Erweiterung aufwendig, zusätzliche Sonden müssen gebohrt und Wärmepumpe muss ausgetauscht werden)
- Varianten mit Erdkollektoren: negativ (Erweiterung nur bedingt möglich, Legen und Anbinden zusätzlicher Erdkollektoren sehr aufwendig, ggf. andere Wärmequelle nutzen)
- Sole-Wärmepumpe mit PVT-Kollektoren: neutral (Erweiterung theoretisch möglich, falls zusätzliche Kollektoren auf Dach montiert werden können, Wärmepumpe muss ausgetauscht werden)
- Wasser-Wärmepumpe: neutral (Erweiterung aufwendig, zusätzliche Brunnen müssen gebohrt und Erzeuger muss ausgetauscht werden)
- Varianten mit Biomassekessel: neutral (Erweiterung aufwändig, problematisch ist der zusätzliche Platzbedarf für die Lagerung der Biomasse bzw. der erhöhte Anlieferungszyklus)
- Varianten mit Gas-BHKW, Brennstoffzelle: positiv (Erweiterung einfach, Austausch des Spitzenlastkessels erforderlich, kein großer zusätzlicher Platzbedarf, kostengünstige Investition, jedoch Reduzierung des KWK-Anteils)

- Fernwärme: positiv (Erweiterung einfach, Austausch der Übergabestation erforderlich, kein großer zusätzlicher Platzbedarf, kostengünstige Investition)
 - Varianten mit Abwasserwärme: negativ (Erweiterung nur bedingt möglich falls Abflusswert ausreicht, kostenintensiv)
 - Nahwärme mit Hackschnitzelverbrennung: positiv (Erweiterbarkeit einfach, kann durch zusätzliche Hackschnitzel sichergestellt werden)
- **Klimaanpassung**
 - Varianten mit Wärmepumpen: positiv / negativ (reversible Wärmepumpen können zur aktiven Kühlung eingesetzt werden, bei nicht reversiblen Wärmepumpen ist eine Nachrüstung der hydraulischen Verschaltung erforderlich)
 - Varianten mit Erdsonden, Erdkollektoren, Grundwasser, Abwasser: positiv (das Erdreich / Grundwasser / Abwasser kann (zeitweise) zur freien Kühlung verwendet werden)
 - PVT-Kollektoren: negativ (nicht geeignet für Rückkühlung / freie Kühlung, Dachflächen sind bereits belegt)
 - Varianten mit Solarthermie: negativ (kein Beitrag zur Klimaanpassung, Dachflächen sind bereits belegt)
 - Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe, Biomassekessel, Fernwärme, Gas-BHKW, Brennstoffzelle: neutral (kein Beitrag zur Klimaanpassung, Dachflächen sind verfügbar für PV und Rückkühlwerk)
 - Varianten mit Nahwärme: neutral (grundsätzlich geeignet, für gleichzeitigen Heiz- und Kühlbetrieb ist ein separates Netz aufzubauen, was mit Mehrkosten verbunden ist)
 - Nahwärme mit Gas- oder Hackschnitzelverbrennung: neutral (Wärme kann bei ausreichendem Temperaturniveau für Absorptionskälte genutzt werden)
 - Kalte Nahwärme: positiv (Wärmenetz kann parallel zum Kühlen verwendet werden)
- **Robustheit gegen Klimawandel**
 - Luft-Wärmepumpe, PVT-Kollektoren: positiv (profitieren von höheren Außentemperaturen)
 - Varianten mit Erdsonden, Erdkollektoren: neutral (leichte Reduzierung der Entzugsleistung infolge sinkendem Grundwasserspiegel)
 - Wasser-Wärmepumpe: negativ (eingeschränkter Betrieb bei Grundwasserabsenkung)
 - Varianten mit Gas-Verbrennung, Fernwärme: neutral (keine Auswirkung auf Versorgungskonzept)
 - Varianten mit Biomasse: negativ (Verknappung von Biomasse durch Trockenheit)
 - Abwasserwärmenutzung: neutral (keine Auswirkung, da auf Basis des Trockenwetterabflusses ausgelegt)
- **Netzdienlichkeit**
 - Varianten mit Wärmepumpen: negativ (bei Standardstromtarif) / positiv (bei Wärmepumpenstromtarif, dieser wird zur Netzstabilisierung angeboten)
 - Varianten mit Gas-Brennwertkessel und Solarthermie, Biomassekessel, Fernwärme: neutral (keine Auswirkung auf die Netzstabilität)

- Gas-Brennwertkessel mit Abluft-Wärmepumpe: negativ (Erhöhung der Grundlast durch Trinkwarmwasserbereitung mit Wärmepumpe)
- Varianten mit BHKW, Brennstoffzelle: positiv (grundlastfähig bei stromgeführter Betriebsweise)

A.6 Gebäudekennwerte

Tabelle 31:
Geometrische Grunddaten der verwendeten Typgebäude.

Typbezeichnung	EFH_F	RH_C	MFH_G	GMH_F	NBL_HH_F
Anzahl Wohneinheiten	1	1	9	48	80
Anzahl Stockwerke	2	2	3	8	10
Nettoraumfläche [m ²]	173,3	112,8	654,0	3.322,0	5.275,6
Wohnfläche [m ²]	157,5	102,5	594,5	3.020,0	4.796,0
Außenwandfläche [m ²]	177,6	66,1	447,1	2.130,0	2.994,0
Dachfläche [m ²]	183,1	50,4	248,3	540,0	598,3
Fläche Kellerdecke [m ²]	152,3	50,4	248,3	540,0	598,3
Fensterfläche [m ²]	34,2	21,5	99,4	545,0	756,0
Hüllfläche gesamt [m ²]	547,2	188,4	1.043,1	3.755,0	4.946,6
Bruttovolumen [m ³]	606,0	426,0	2.040,0	9.805,0	18.405,0
Nettovolumen [m ³]	473,7	332,3	1.632,0	7.844,0	14.724,0
Mittlere Wohnfläche [m ²]	157,5	102,5	66,1	62,9	60,0
A-V-Verhältnis [m ² /m ³]	0,90	0,44	0,51	0,38	0,27

Tabelle 32:
Bauphysikalische Kennwerte der Gebäudehülle.

Kennwerte	Bestand	GEG-Ref	EH 55	EH 40
$U_{\text{Außenwand}}$ [W/(m ² K)]	1,0	0,28	0,20	0,13
U_{Dach} [W/(m ² K)]	0,80	0,20	0,15	0,11
U_{Boden} [W/(m ² K)]	1,0	0,35	0,25	0,20
U_{Fenster} [W/(m ² K)]	2,7	1,3	0,90	0,80
$g_{\text{senkrecht}}$ [-]	0,78	0,64	0,52	0,50
$\Delta U_{\text{Wärmebrücken}}$ [W/(m ² K)]	0,10	0,05	0,03	0,03
Luftdichtheit n_{50} [1/h]	4,0	2,0	1,5	1,0

A.7 Kostenkennwerte

Tabelle 33:
Kostenkennwerte [€/m²_{Btl.}] für opake Bauteile (brutto, Bezugsjahr 2015)
[Schlitzberger 2017] und Fenster (brutto, Bezugsjahr 2011) [Hinz 2015].

Bauteil	Kostenkennwert [€/m ² _{Btl.}]		
	GEG-Anforderung	EH 55-Anforderung	EH 40-Anforderung
Wand	162	174	199
Dach	201	218	238
Boden	121	131	142
Fenster (EFH, RH)	382	438	604
Fenster (MFH, GMH, HH)	366	420	575

Tabelle 34:
Kostenkennwerte [€] für Wärmeerzeuger (brutto, Bezugsjahr 2015).

Wärmeerzeuger	Leistungs- bereich	Kostenfunktion [€]	Quelle
Brennwertkessel	≤ 17 kW _{th}	$26,416 \times P_{th} + 3556$	[Schlitzberger 2017]
	> 17 kW _{th}	$581,96 \times P_{th}^{0,6813}$	[Schlitzberger 2017]
Biomassekessel	≤ 14 kW _{th}	$90,394 \times P_{th} + 17425$	[Schlitzberger 2017]
	> 14 kW _{th}	$2531,1 \times P_{th}^{0,7508}$	[Schlitzberger 2017]
Luft-Wasser- Wärmepumpe	≤ 35 kW _{th}	$-16,738 \times P_{th}^2 + 1478,2 \times P_{th} + 1383,9$	[Schlitzberger 2017]
	> 35 kW _{th}	$1787,1 \times P_{th}^{0,7873} \times 1,1$	[MODER 2018]
Abluft-Wärme- pumpe	≤ 35 kW _{th}	$(-16,738 \times P_{th}^2 + 1478,2 \times P_{th} + 1383,9) \times 0,8$	[MODER 2018]
	> 35 kW _{th}	$1787,1 \times P_{th}^{0,7873} \times 1,1 \times 0,8$	[MODER 2018]
Sole-Wasser- Wärmepumpe (B0)	≤ 40 kW _{th}	$665,82 \times P_{th} + 7803$	[Schlitzberger 2017]
	> 40 kW _{th}	$1787,1 \times P_{th}^{0,7873}$	[Schlitzberger 2017]
Sole-Wasser- Wärmepumpe (B-15)	≤ 40 kW _{th}	$(665,82 \times P_{th} + 7803) \times 1,8697 \times P_{th}^{-0,096}$	[Waterkotte 2018]
	> 40 kW _{th}	$(1787,1 \times P_{th}^{0,7873}) \times 1,8697 \times P_{th}^{-0,096}$	[Waterkotte 2018]
Erdsonden	≤ 45 kW _{th}	$1122,4 \times P_{th} + 914,4$	[Schlitzberger 2017]
	> 45 kW _{th}	$857,1 \times P_{th} + 13280$	[Schlitzberger 2017]
Erdkollektoren	≤ 45 kW _{th}	$(1122,4 \times P_{th} + 914,4) \times 0,6$	[Fichtner 2016]
	> 45 kW _{th}	$(857,1 \times P_{th} + 13280) \times 0,6$	[Fichtner 2016]
PVT-Kollektoren	≤ 45 kW _{th}	$1605,7 \times P_{th}^{-0,151}$	[SOLINK 2020]
	> 45 kW _{th}	$(857,1 \times P_{th} + 13280) \times 0,8$	[SOLINK 2020]
Wasser-Wasser- Wärmepumpe	-	$f(\text{Sole-WP (B0)+Erdsonden}) \times 1,2507 \times P_{th}^{-0,175}$	[Fichtner 2016]
Fernwärmean- schluss	-	$1239,4 \times P_{th}^{-0,6212}$	[Jagnow 2011]
Solare Trink- warmwasserbe- reitung	-	$2171,1 \times A_{Kollektor}^{-0,499}$	[Hinz 2015]
Solare Heizung	-	$2279,7 \times A_{Kollektor}^{-0,499}$	[MODER 2018]
BHKW	≤ 100 kW _{el}	$6574,8 \times P_{el}^{0,649}$	[Schlitzberger 2017]
	> 100 kW _{el}	$5932,8 \times P_{el}^{0,648}$	[Schlitzberger 2017]

Tabelle 35:
Kostenkennwerte [€/m²_{Wfl}] für Lüftungsanlagen (brutto, Bezugsjahr 2011)
[Hinz 2015].

Typgebäude	Kostenkennwerte [€/m ² _{Wfl}]				
	EFH	RH	MFH	GMH	HH
Abluftanlage	20,6	28,9	40,7	42,2	43,9
Zu-/Abluft-Anlage mit WRG	60,7	71,0	83,3	84,8	86,3

A.8 Berechnungsmodelle für zentrale Wärmeerzeuger

Tabelle 36:
Vorlauftemperatur für Gebäudeheizung in Abhängigkeit der Heizlast und der Art der Wärmeübergabe.

Heizlast [W/m ²]	Vorlauftemperatur [°C] bei		
	Radiatoren	Luftheizung	Flächenheizung
> 120	90	90	-
> 80	70	70	-
> 50	55	55	55
> 30	55	55	45
≤ 30	45	45	35

Tabelle 37:
Soletemperaturen für Abwasserwärmerückgewinnung (Messungen Neckar-park), Erdsonden, Erdkollektoren und Grundwasser (vgl. [DIN 2018]).

	Mittlere monatliche Quellentemperatur [°C]			
	Abwasser	Erdsonde	Erdkollektor	Grundwasser
Januar	4,3	1,7	-0,3	9,5
Februar	4	1,8	-0,2	9,6
März	4,9	2,2	0,2	10
April	7,7	2,9	0,9	10,6
Mai	9,4	3,6	1,6	11,2
Juni	11,2	4,0	2,0	11,6
Juli	12,7	4,4	2,4	11,9
August	12,7	4,3	2,3	11,8
September	12,5	3,6	1,6	11,2
Oktober	11,1	2,9	0,9	10,6
November	7,4	2,1	0,1	9,9
Dezember	5,3	1,6	-0,4	9,4

Tabelle 38:
Nennweitenermittlung des Nahwärmenetzes für 100 Pa/m Druckverlust
durch Rohre und Formstücke [Isoplus 2012].

Nennweite DN	Massestrom [t/h] bis
20	0,5
25	1,0
32	2,0
40	3,0
50	5,5
65	11,0
80	16,5
100	33,0
125	58,0
150	95,0
200	193
250	348
300	547
350	705
400	1.000
450	1.370
500	1.820
600	2.920
700	4.370
800	6.240
900	9.500
1000	ab 9.500

Tabelle 39:
Monatsmittelwert der Bodentemperatur in 1 m Tiefe für die verwendeten TRY-Regionen.

Monat	Bodentemperatur in 1 m Tiefe [°C]		
	Potsdam	Fichtelberg	Mannheim
Januar	3,5	2,8	6,1
Februar	2,8	2,5	5,4
März	4,6	1,8	6,7
April	8,4	2,7	9,4
Mai	13,4	5,6	13,8
Juni	17,1	8,4	17,2
Juli	20,1	10,9	19,8
August	20,1	11,7	20,4
September	16,6	10,4	18,3
Oktober	12,7	8,5	15,3
November	8,7	5,8	11,2
Dezember	4,3	3,9	7,8

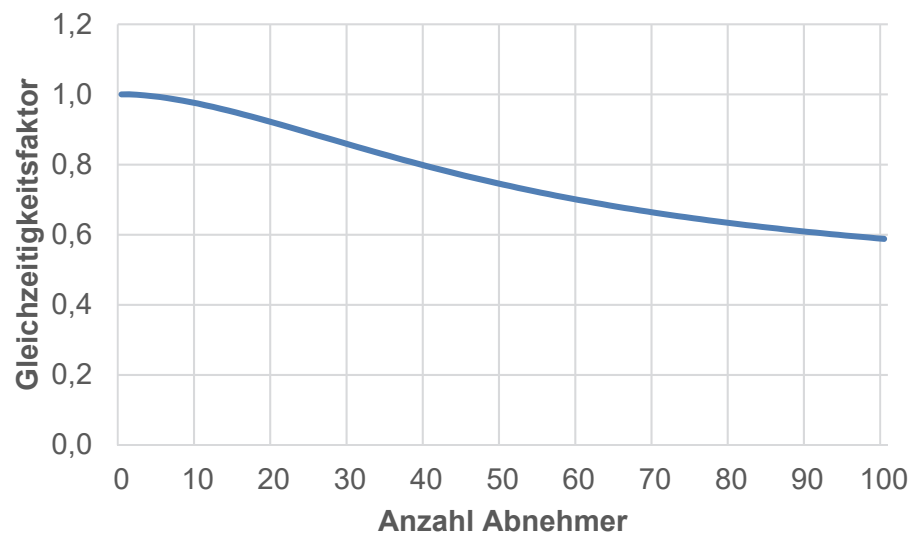


Bild 2:
Graphische Darstellung der Näherungsfunktion zur Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors.