Bericht zum DBU-Projekt:

Kommunale sektor- und spartenübergreifende Energieleitplanung (KSSE)

Arbeitspakete 9 und 10: Vollkostenanalyse und Emissionsbilanzierung - *Auswertung der Ergebnisse*

7/2024

Florian Anders

Wichtige Punkte zu den Berechnungen

- Hybride System sind meist komplizierter in der Installation und damit teurer als monovalente System. Durch eine Einsparung bei der Anschaffung mehrerer Systeme können diese Kosten gegebenenfalls eingespart werden.
- Für eine Vollkostenanalyse sind diese Kosten jedoch unabdingbar zu betrachten. Ebenso sind es die Kosten für die Sanierung der Gebäude, um den Verbrauch von den angenommenen 100 kWh/m²*a auf 50 kWh/m²*a zu reduzieren. Diese Kosten sind sehr individuell für jedes Gebäude zu ermitteln. Zur Bewertung einzelner Versorgungsvarianten bei den Fallbeispielen macht es jedoch keinen Unterschied.
- Der COP der Wärmepumpen wird vereinfacht als konstant angenommen. Diese Vereinfachung ist ausreichend, die Versorgungsvarianten zu vergleichen.

1 Wie sind die Tabellen zu lesen?

Grundsätzlich sind in den Fallbeispielen Wärmespeicher nicht bei der Berechnung betrachtet. Sie könnten zu einer weiteren Verbesserung der Wirtschaftlichkeit führen. Auch nicht betrachtet sind Stromspeicher. Der in einer PV-Anlage erzeugte Strom wird entweder in der Wärmepumpe genutzt oder in das Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist.

Emissionsfaktoren für das Jahr 2030 können entsprechend der Tabelle von solares bauen verwendet werden. Es ist aber nicht möglich, die zu erzeugende Wärme auf die einzelnen Stunden zu verteilen, hierfür fehlen die entsprechenden Außentemperaturen. Eine vereinfachte Berechnungsmöglichkeit ist, die Emissionsfaktoren auf die Außentemperaturen des Jahres 2022 zu beziehen, was in den Fallbeispielen angewandt wird.

Die folgenden Unterkapitel bezeichnen jeweils den Namen des Reiters in der Excel-Datei.

1.1 Rahmenbedingungen

Im Reiter „Rahmenbedingungen“ sind alle relevanten Punkte beschrieben, die zur Berechnung der Daten notwendig sind. Zur Berechnung der relevanten Werte (Kosten und Emissionen) müssen Annahmen und Vereinfachungen getroffen und vorgenommen werden, da hier keine Simulation erfolgt. In der ersten Spalte ist angegeben, aus welche Versorgungsvariante(n) sich der Kommentar bezieht. Ist keine Varianten-Nummer angegeben, handelt es sich um allgemeine Kommentare. Die Annahmen zur Berechnung sind die folgenden:

	Die Investitionskosten sind im Reiter „Fallbeispiel“ in den Spalten C, D, E und F 100% der Kosten. In Spalte G (Gesamt) sind jedoch nur 50% der Kosten aufgelistet. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Betrachtungszeitraum der Berechnungen nur 10 Jahre umfasst, die Kosten der Investition aber auf 20 Jahre Laufzeit ausgelegt sind.
	Bei der Berechnung der Fallbeispiele findet eine reine Wärmebetrachtung statt. Eine monetäre Bewertung des eingespeisten oder selbst verbrauchten Stroms erfolgt nicht.

	Die Investitionen von 150.000€ (im Fall Darmstadt) für den Anschluss an ein Fernwärmenetz sind sehr hoch. Eine Förderung über die **Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)** von bis zu 70% der Investitionskosten sind hier nicht einberechnet.
	Etwaige Verluste der Anlage wurden nicht betrachtet, machen für die grobe Betrachtung und den Vergleich keinen Unterschied
	Bei der Varianten, in denen die KWK Anlage eingebunden ist (1.61 und 1.62) schaltet die jeweilige KWK-Anlage ein, wenn CO_2-Emissionen im Netz 450 g/kWh überschreiten.
	Zur einfacheren Betrachtung wird eine Volleinspeisung des Überschussstroms aus der PV-Anlage angenommen, wenn in der Versorgungsvariante eine PV-Anlage dabei ist.
	Zur Berechnung des KWK-Zuschusses wird das Startjahr 2023 mit den Zuschlägen nach dem KWKG 2023 angenommen.
	Bei der Berechnung des KWK-Zuschusses wird zunächst betrachtet, wie viele Vollbenutzungsstunden die Anlage im Jahr läuft. Das ergibt sich aus der abzudeckenden Wärme, der thermischen und der elektrischen Leistung. Liegt die Anzahl der Vollbenutzungsstunden über den bezuschussbaren Vollbenutzungsstunden steht dem Betreiber nur ein Anteil der möglichen Gesamt-Bezuschussung zu.
1.2 1.3	Die Emissionen bei den Beispielen X.2 und X.3 ist der Mittelwert in dem jeweiligen Jahr, zu den Zeitpunkten, in denen Wärme benötigt wird, jeweils multipliziert mit dem Wärmebedarf.
1.4	Im Beispiel "*1.4 Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV 15 kWel., Kundenanlage*" verarbeitet die WP nur den Strom der PV-Anlage, der Rest an Wärme muss durch den Gaskessel bereitgestellt werden. Die Emissionen errechnen sich aus dem Emissionsfaktor des Stroms in den Monaten, in denen Wärme benötigt wird.
1.5	Im Beispiel "*1.5 Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%*" wird die Wärmemenge über die WP erzeugt. Der benötigte Strom kommt aus dem Netz. Die Emissionen errechnen sich aus dem Emissionsfaktor des Stroms in der jeweilige Stunde, in der Wärme benötigt wird.
1.6 1 1.6 2	Versorgungsvariante 1.62 entspricht Versorgungsvariante 1.61 mit dem Unterschied, dass die benötigte Wärme über die Wärmepumpe mit Strom aus dem Netz bereitgestellt wird, wenn die CO2-Emissionen im Stromnetz 450 g/kWh unterschreiten. Wird der Wert unterschritten, wird die Wärme aus dem Zusammenspiel von KWK-Anlage und Wärmepumpe bereitgestellt.
	Der elektrische Wirkungsgrad der KWK-Anlage ist dem Technikkatalog entnommen. Er stellt einen theoretischen (ungeraden) Wert dar.

	Die berechnete Wärmebereitstellung ist stundenbasiert und beruht auf folgenden Annahmen: - Die Emissionsfaktoren zur Berechnung sind der Tabelle von Jörg Lange, Klimaschutz im Bundestag, entnommen. - Die benötigte Wärme ist Außentemperatur-abhängig und wird auf die einzelnen Monate nach der Anzahl der Gradtagszahlen verteilt. Diese monatliche Wärme wird dann nach der Temperaturdifferenz zwischen aktueller Außentemperatur und Heizgrenze in jeder einzelnen Stunde aufgeteilt. Die Heizgrenze ist auf 15°C festgelegt.
	Für die Versorgungsvarianten "*1.61, 1.62, 1.63 PV 15 kWel., WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage*" werden die gleichen Berechnungen durchgeführt wie für die Versorgungsvariante "*1.4 Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV 15 kWel., Kundenanlage*". Die Wärme wird aber abweichend von der KWK-Anlage bereitgestellt statt vom Gaskessel. Die benötigte Restwärme wird in Wärme aus Wärmepumpe mit gegebener JAZ (diese wird als konstant angenommen) und Wärme aus der KWK-Anlage an sich aufgeteilt.
	Die Berechnung für die bereitgestellte Wärme aus der KWK-Anlage ergibt sich wie folgt (Beispielhaft mit 30% elektrischem Wirkungsgrad): - Die KWK Anlage hat einen thermischen Wirkungsgrad von 70%, damit wird aus einer kWh Gas 0,7 kWh Wärme - Die restlichen 0,3 kWh Strom werden in der Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3 zu 0,9 kWh Wärme - Somit werden aus 1 kWh Gas in der KWK-Anlage und der Wärmepumpe 1,6 kWh Wärme (Verluste in diesem Fall vernachlässigbar) - Auch wenn die Wärmepumpe nur 30% der Leistung aufweist, ist die maximale Stromaufnahme der Wärmepumpe noch größer als die ausgespeiste Stromleistung der KWK-Anlage.
1.7	Kosten für Fernwärme sind über die 10 Jahre Betrachtung konstant.
2.*	Für die Versorgungsvarianten 2.*, in denen bereits zu Beginn der Betrachtung der Heizwärmebedarf auf 50kWh/m2*a reduziert wird, wird die gleiche Größe/Leistung der Heizungsanlage angenommen wie in den Versorgungsvarianten 1.*.
	Version a nimmt statische Kosten für die Energieträger an, Version b rechnet mit dynamischen Kosten

1.2 Fallbeispiel

Im Reiter Fallbeispiel sind die wesentlichen Inhalte und Ergebnis-Tabellen zum Projektbeispiel dargestellt. In der ersten Tabelle in diesem Excel-Blatt (Zellen B8 bis G33) können die Werte angepasst werden, die Tabellen und Grafiken ändern sich entsprechend. Weitere Anpassungen sind in der Excel-Datei nur noch im Reiter „Fernwärme“ notwendig.

Als Berechnungsbeispiele werden betrachtet:

- *X.1x Referenzvariante Erdgaskessel*
  Die Wärme-Versorgung erfolgt über einen einfachen Gaskessel. Hier ist eine Investition zum Zeitpunkt der Betrachtung in einen neuen Kessel angenommen, damit die

Varianten vergleichbar sind. Nach aktueller Gesetzeslage (GEG) ist der Einsatz eines neuen Gaskessels jedoch nicht mehr ohne Weiteres zulässig.

- *X.2x Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug*
  Hier erfolgt die Wärme-Bereitstellung einzig über eine Wärmepumpe mit 100% der Heizleistung. Diese Leistung entspricht der Wärmeleistung des Erdgaskessels in der Referenzvariante.
- *X.3x Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV YY kWel., Kundenanlage*
  Diese Variante entspricht X.2x, es ist zudem eine PV-Anlage mit einer elektrischen Leistung entsprechend dem Projektbeispiel (YY) angeschlossen. Der bereitgestellte Strom geht komplett in die Wärmepumpe; wird mehr Strom benötigt, als die PV-Anlage bereitstellt, wird Strom aus dem Netz der allgemeinen Versorgung bezogen. Steht von der PV-Anlage mehr Strom zur Verfügung als benötigt wird, wird dieser in das Netz eingespeist.
- *X.4x Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV YY kWel., Kundenanlage*
  In dieser Variante ist eine Wärmepumpe verbaut, die 30% der benötigten Heizleistung liefert. Die restlichen 70% werden durch einen Erdgaskessel bereitgestellt. Zudem ist eine PV-Anlage mit YY kW_p installiert, deren Strom wie in Variante X.3x in die Wärmepumpe geht bzw. ins Netz der allgemeinen Versorgung.
- *X.5x Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%*
  Variante X.5x entspricht der Variante X.4x, es ist jedoch keine PV-Anlage verbaut; der Strom wird komplett aus dem Netz der allgemeinen Versorgung entnommen.
- *X.61x PV YY kWel., WP (30%), KWK (30%), Gaskessel (40%) Kundenanlage*
  In dieser Variante wird der von der PV-Anlage bereitgestellte Strom in der Wärmepumpe genutzt. Die restliche benötigte Wärme erzeugt die KWK-Anlage über die Wärmeauskopplung und durch Umwandlung des Stroms in Wärme über die WP. Stundenweise vorkommende Spitzen deckt der Gaskessel ab (im Beispiel nicht vorgekommen).
- *X.62x PV YY kWel., WP (30%), KWK (30%), Gaskessel (40%) Kundenanlage*
  Versorgungsvariante 1.62 entspricht Versorgungsvariante 1.61, nur dass die benötigte Wärme über die Wärmepumpe mit Strom aus dem Netz bereitgestellt wird, wenn die CO_2-Emissionen im Stromnetz 450 g/kWh unterschreiten. Wird der Wert unterschritten, wird die Wärme aus dem Zusammenspiel von KWK-Anlage und Wärmepumpe bereit-gestellt.
- *X.7x Reine Fernwärmeversorgung*
  In diesem Fall wird die ganze benötigte Wärme über ein Fernwärmenetz bereitgestellt.

Dabei sind zu unterscheiden:

- X.Xa: Die Heizkosten über den betrachteten Zeitraum werden statisch angenommen und ändern sich über die Zeit nicht.
- X.Xb: Die Heizkosten werden dynamisch angenommen, die Werte sind der Webseite des BMWK entnommen.

In den Fallbeispielen sind drei Versorgungsvarianten beschrieben:

- Referenz Grundannahme:
  hier ändert sich der Wärmebedarf im Betrachtungszeitraum (10 Jahre) nicht (1.Xx).
- Reduktion des Heizwärmebedarfs auf 50 kWh/m2*a im ersten Jahr:
  der ursprüngliche Wärmebedarf von 100 kWh/m²*a wird im ersten Jahr auf 50 kWh/m²*a reduziert (2.Xx). Eine solche Sanierung ist erfahrungsgemäß unwirtschaftlich.
- Reduktion des Heizwärmebedarfs auf 50 kWh/m2*a nach 5 Jahren (durch energetische Maßnahmen Gebäudehülle) (3.Xx).

In den Spalten der Tabelle ab Zeile 36 werden die Investitionskosten für die Versorgungsanlagen, die Heiz- und Betriebskosten während des Betriebs, die Einspeisevergütung für den PV-Strom, der KWK-Zuschuss und die Treibhausgasemissionen aufgelistet. Diese Werte werden in den folgenden Reitern der Excel-Datei ermittelt.

Die Investitionskosten für die Sanierung Reduzierung des Wärmebedarfs (Versorgungsvariante 2 und 3) sind nicht dargestellt, da sie nur schwer ermittel- und vergleichbar sind. Für eine Vollkostenanalyse sind sie jedoch unabdingbar.

1.3 Fernwärme

Im Reiter „Fernwärme“ sind die für das Projekt spezifischen Fernwärmedaten wie Kosten und Emissionen dargestellt. Die Daten wurden bei Versorgern exemplarisch abgefragt.

Die Fernwärmepreise und Emission sind nach Recherche für die Fallbeispiele auf folgende Grundlage ermittelt:

Fallbeispiel	*Grundlage Jahr*
01 Darmstadt	2024
02 Freiburg	2023
03 Heilbronn	2024
04 Karlsruhe	2024
05 Tübingen	

1.4 Gradtagszahlen Monat

In diesem Reiter wird der Wärmeverbrauch entsprechend den Außentemperaturen (siehe Reiter „Emissionsfakt h 2022“/„Emissionsfakt h 2030“) auf die Monate verteilt. Zudem wird der PV-Ertrag, den die PV-Anlage erreichen kann, dargestellt, die mögliche Wärmeerzeugung aus eigenem PV-Strom im jeweiligen Monat errechnet und ermittelt, welche Wärme dann noch zusätzlich von den Wärmeerzeugern bereitzustellen ist.

Durch die Einbindung der KWK wird an dieser Stelle auch die KWK-Vergütung berechnet, sowie die Emissionen der KWK und des Netzstroms. Des Weiteren erfolgt eine Bewertung des eingespeisten Stromes.

1.5 KWK-Vergütung

In diesem Reiter wird geprüft, ob aufgrund der Bedingungen des KWKG 2023 der komplette Zuschuss ausgeschüttet werden kann.

1.6 Emissionsfakt h 2022

Die Außentemperaturen der einzelnen Stunden für das entsprechende Fallbeispiel sind der Webseite des Deutschen Wetterdienstes entnommen. Dem gegenüber wird eine Heizgrenze (kann individuell angepasst werden) definiert. Die bereitzustellende Wärme im Jahr wird auf die Differenz der Außentemperatur zur Heizgrenze aufgeteilt. So ergibt sich die jeweils zur Stunde bereitzustellende Wärme. Eine Wärmespeicherung und dahingehende Optimierung wird nicht betrachtet; dies ist für den Detailgrad der Betrachtung auch nicht notwendig.

Die Daten in den Zellen A5 bis D22 sind in den Zellen A25 bis B36 beschrieben.

Spalte G, V und folgende geben den Zeitstempel an.

Spalte H, W und folgende geben die Außentemperatur im Jahr 2022 zu dem Zeitpunkt an.

Spalte I, X und folgende beschreiben die Temperaturdifferenz zwischen aktueller Temperatur und der Heizgrenze.

Spalte J, Y und folgende listen den Emissionsfaktor zu der jeweiligen Stunde auf. Die Daten sind der Excel-Datei „Strommix_2022.xlsx“ entnommen und in allen Fallvarianten gleich.

Spalte K, Z und folgende geben die zu erzeugende Wärme an dem Zeitpunkt an. Diese ergibt sich aus dem Anteil der Temperaturdifferenz zwischen aktueller Temperatur und der Heizgrenze an der Summe aller Differenzen der Temperaturen über das Jahr multipliziert mit der gesamt-abzudeckenden Wärme.

$$W_{aktuelle\ Stunde} = W_{gesamtes\ Jahr} * \frac{\Delta T_{aktuelle\ Stunde}}{\sum \Delta T_{gesamtes\ Jahr}}$$

Ist der Emissionsfaktor unter den definierten Wert (hier 450 g/kWh) wird die gesamte Wärme in der Wärmepumpe erzeugt (Spalten N und S sowie folgende) mit den sich daraus ergebenden Emissionen (L und Q sowie folgende). Liegt der Emissionsfaktor über dem definierten Wert, wird die Wärme in der KWK-Anlage und in der Wärmepumpe, die dann nur den aus der KWK-Anlage bereitgestellten Strom nutzt, erzeugt. Die Wärme (O und T sowie folgende) und Emissionen (M und R sowie folgende) verteilen sich dann entsprechend.

1.7 Emissionsfakt h 2023 – Emissionsfakt 2032

Hier werden die gleichen Berechnungen wie für 2022 durchgeführt. Die Außentemperaturen werden gleich angenommen wie für 2022, die Emissionsfaktoren im Jahr 2032 sind entsprechend der Liste von solares bauen angepasst. In den Jahren dazwischen ist eine lineare Entwicklung von den Werten im Jahr 2022 hin zu den Werten 2032 angenommen.

1.8 Daten für Grafik HeizEmission

Hier sind die Daten aus dem Blatt „Fallbeispiel“ so aufbereitet, dass sie sich in Grafiken in den Reitern „Dia Heiz Grund“, „Dia Heiz 0 San“ und „Dia Heiz 5 San“ einfacher darstellen lassen. Eine Berechnung findet hier nicht statt.

1.9 Dia Investition

Hier wird grafisch dargestellt, welche Investitionskosten bei welcher Variante entstehen.

1.10 Dia Heiz Grund

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich Betriebskosten und Emissionen über die 10 Jahre Betrachtungszeitraum bei der Grundvariante ohne Sanierung des Gebäudes entwickeln.

1.11 Dia Heiz 0 San

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich Betriebskosten und Emissionen über die 10 Jahre Betrachtungszeitraum bei der Variante, in der vor dem Beginn der Betrachtung mit Sanierung des Gebäudes der Wärmebedarf von 100 kWh/m²*a auf 50 kWh/m²*a reduziert wird, entwickeln.

1.12 Dia Heiz 5 San

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich Betriebskosten und Emissionen über die 10 Jahre Betrachtungszeitraum bei der Variante, in der nach 5 Jahren mit Sanierung des Gebäudes der Wärmebedarf von 100 kWh/m²*a auf 50 kWh/m²*a reduziert wird, entwickeln.

1.13 Dia Gesamtkosten stat. Grund

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich die Gesamtkosten bei den einzelnen Versorgungsvarianten ohne Sanierung über den Betrachtungszeitraum bei gleichbleibend angenommenen Energieträgerpreisen ergeben.

1.14 Dia Gesamtkosten stat. 0 San

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich die Gesamtkosten bei den einzelnen Versorgungsvarianten über den Betrachtungszeitraum bei gleichbleibend angenommenen Energieträgerpreisen ergeben. Zu Beginn der Betrachtung wird mit Sanierung des Gebäudes der Wärmebedarf von 100 kWh/m²*a auf 50 kWh/m²*a reduziert.

1.15 Dia Gesamtkosten stat. 5 San

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich die Gesamtkosten bei den einzelnen Versorgungsvarianten über den Betrachtungszeitraum bei gleichbleibend angenommenen Energieträgerpreisen ergeben. Nach 5 Jahren wird mit Sanierung des Gebäudes der Wärmebedarf von 100 kWh/m²*a auf 50 kWh/m²*a reduziert.

1.16 Dia Gesamtkosten dyn. Grund

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich die Gesamtkosten bei den einzelnen Versorgungsvarianten ohne Sanierung über den Betrachtungszeitraum bei dynamisch[1] angenommenen Energieträgerpreisen ergeben.

1.17 Dia Gesamtkosten dyn. 0

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich die Gesamtkosten bei den einzelnen Versorgungsvarianten über den Betrachtungszeitraum bei dynamisch angenommenen Energieträgerpreisen ergeben. Zu Beginn der Betrachtung wird mit Sanierung des Gebäudes der Wärmebedarf von 100 kWh/m²*a auf 50 kWh/m²*a reduziert.

1.18 Dia Gesamtkosten dyn. 10

Hier wird grafisch dargestellt, wie sich die Gesamtkosten bei den einzelnen Versorgungsvarianten über den Betrachtungszeitraum bei dynamisch angenommenen Energieträgerpreisen ergeben. Nach 5 Jahren wird mit Sanierung des Gebäudes der Wärmebedarf von 100 kWh/m²*a auf 50 kWh/m²*a reduziert.

2 Versorgungsvarianten

In den folgenden Unterkapiteln werden die untersuchten Fallbespiele beschrieben. Die Namen sind nach dem Standort des In den Grafiken im Verlauf des Berichts wird mit dem Namen

2.1 Darmstadt

Für das Projektbeispiel Darmstadt sind folgende Daten vom Projektleiter übermittelt worden:

*Gebäude einer Wohnungseigentümergemeinschaft (WEG) in Innenstadtlage mit 1400 m2 beheizte Wohnfläche, Baujahr Gebäude & Heizung 1994, 2 Vollgeschosse und ausgebautes Satteldach (Ziegel) mit Gauben (Süd-Nord-Ausrichtung), Heizwärmebedarf ohne Warmwasser etwa 100 kWh/m2 * a (140.000 kWh) Zentrale Gasheizung; Warmwasserbereitung erfolgt wohnungsweise elektrisch, Normaußentemperatur -10°C. Gasbezugskosten liegen aktuell bei ca. 10 Cent/kWh. Geringe Instandhaltungsrücklage der WEG. Anschlusskosten an das nächste Fernwärmenetz laut Angebot des Betreibenden 150.000 €.*

[1] Quelle: BMWK/ifeu; https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizen-mit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=8

2.2 Freiburg

Das Projektbeispiel Freiburg ist der PowerPoint-Präsentation „240112_BA_Dezentrale_Sektorenkopplung_he“ entnommen, die Bestandteil eines Austausches der Arbeitsgruppe war. Die relevanten Daten sind wie folgt:

MFH im Bestand (BJ 1994)

Fläche	3840 m²
Bewohner*innen	70
Wärmebedarf	465 MWh/a
Raumwärme	330 MWh/a
Warmwasser	135 MWh/a
Nutzenergie Warmwasser	45 MWh/a
Norm-Heizlast	180 kW
Haushaltsstrombedarf	76 MWh/a
PV	158 kWp
Pufferspeicher	200 kWh

2.3 Heilbronn

Das Projektbeispiel Heilbronn ist dem Leitfaden „KWK in der Wohnungswirtschaft“ der KEA-BW (Download, *7.10 Flein, Max & Moritz*) entnommen. Die Projektbeschreibung lautet wie folgt:

In zwei benachbarten neunstöckigen Hochhäusern im Wilhelm-Busch-Weg in Flein bei Heilbronn waren die Heizölkessel in die Jahre gekommen. Verschiedene Sanierungskonzepte wurden von der Eigentümergemeinschaft der beiden Gebäude aus den 70er Jahren geprüft.

Am Ende entschieden sich die 72 Eigentümer im Jahr 2012 für eine Contractinglösung mit Blockheizkraftwerk und Nahwärmenetz. Dabei werden einige der Bewohner mit Mieterstrom versorgt. Während der Strom für die Bewohner im Winterhalbjahr überwiegend vom hauseigenen Blockheizkraftwerk kommt, sorgt an sonnigen Tagen vor allem die auf dem Dach befindliche Photovoltaikanlage für einen hohen Eigenstromdeckungsanteil.

Aus dem Leitfaden sind die folgenden Inhalte bekannt:

Daten der Anlage

BHKW (50 kWel, 95 kWth), Gaskessel (630 kW), Photovoltaik-

anlage 20,4 kWp, Stromspeicher (118 kVA, 135 kWh)

Inbetriebnahme	2012
Wohneinheiten	72

Teilnehmer Mieterstrom	65
Betriebszeit BHKW	5.700 h pro Jahr
Stromproduktion	285.000 kWh (BHKW)
	22.000 kWh (PV) pro Jahr
Einspeisung	130.000 kWh pro Ja

Vom Projektleiter Max & Moritz wurden zudem folgende Inhalte übermittelt:

Wärmebedarf pro Jahr	800.000 kWh
Maximale Heizleistung der Anlage	725 kW (BHKW 95 kW, Kessel 630 kW)
Leistung PV Anlage	20,4 kW_{peak}

2.4 Karlsruhe

Das Projektbeispiel Karlsruhe befindet sich in Karlsruhe-Durlach mit dem Namen *Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach* (Link).

Die von Projektverantwortlichen übersandten Daten lauten wie folgt:

Wärmebedarf pro Jahr	952.000 kWh
Maximal benötigte Heizleistung	600 kW_{th}
Leistung PV Anlage	94 kW_{peak}

Alle weiteren Daten sind der Projektwebseite entnommen.

2.5 Tübingen

Das Projektbeispiel Tübingen ist dem Leitfaden „KWK in der Wohnungswirtschaft“ der KEA-BW (Download, 7.*8 Hirschau, Torstraße*) entnommen. Die Projektbeschreibung lautet wie folgt:

"In diesem Projekt wurden fünf Gebäude mit zusammen ungefähr 70 Wohnungen in fünf Bauabschnitten energetisch modernisiert. Zentrales Thema dabei war die Wärmeversorgung. Das neue Konzept besteht aus einem Blockheizkraftwerk und einem Wärmespeicher, über den mit einem kleinen Nahwärmenetz alle fünf Gebäude mit Wärme versorgt werden. Das BHKW wird durch Solarthermie und einen Gasspitzenlastkessel unterstützt.

Zudem wurden folgende Daten von den Projektbeteiligten übermittelt:

PV-Leistung

Standort	Bruttoleistung in kW
72070 Tübingen, Torstraße 8, Deutschland	29,68
72070 Tübingen; Torstraße 2; Deutschland	29,25
72070 Tübingen; Hakenweg 12; Deutschland	24,40
72070 Tübingen; Hakenweg 2; Deutschland	24,71

Der Wärmebedarf beträgt 466 MWh_{th}.

3 Übergeordnete Daten

Die Anschlusskosten für ein Wärmenetz sind, soweit nicht vorher bekannt, konservativ mit 20.000 € für Installation und Inbetriebnahme angenommen. Quelle dieser Annahme sind die konkreten Daten von Wärmenetzbetreibern und Erfahrungswerte aus dem Kompetenzzentrum Wärmewende der KEA-BW.

Die Versorgungsvarianten sind aufgrund einer Vergleichbarkeit in allen Fallbeispielen gleich gewählt. Die genaue Beschreibung der Versorgungsvariante kann dem Dokument „2024_Wie sind die Tabellen zu lesen.pdf“ entnommen werden. Die jeweilige Leistung der Anlagen sind dem Projektbeispiel angepasst. Die entsprechenden Außentemperaturen haben einen Einfluss auf die Wärmeerzeugung in Verbindung mit den Emissionskennwerten.

Die Emissionskennwerte (Gramm CO_2/kWh) sind der Tabellen von Solares Bauen/Klimaschutz im Bundestag entnommen. Es liegen Kennwerte für das Jahr 2022 und 2032 vor. Dazwischen die die Kennwerte über die Jahre linear interpoliert. So ergeben sich über die Jahre unterschiedliche Wärmeerzeugungswerte (für die Versorgungsvarianten *X.62x PV YY kWel., WP (30%), KWK (30%), Gaskessel (40%) Kundenanlage*).

Folgende Rahmenbedingungen wurden für die Berechnung der Fallbespiele angenommen:

Tabelle 1: Vergleich der Investitionskosten Fallbeispiele und Versorgungsvarianten

Grundannahmen		
Betrachtungszeitraum	10	Jahre
Wärmebedarf pro Jahr (100 kWh/m²*a)	Individueller Bedarf pro Fallbeispiel	kWh
Wärmebedarf pro Jahr (50 kWh/m²*a)	Individueller Bedarf pro Fallbeispiel	kWh
Heizleistung	Individuelle Leistung pro Fallbeispiel	kW_{th}
Gaspreis im Mittel	0,1	€/kWh
Stromkosten Bezug aus öffentlichem Netz	0,3	€/kWh
CO2-Emissionsfaktor Erdgas	0,000247	t/kWh
CO2-Emissionsfaktor Strom	Individueller Faktor nach Jahren	t/kWh
Investitionskosten Gasbrennwert Technikkatalog KEA-BW, XX kW	Individuelle Daten nach Technikkatalog und Anlagengröße	€/kW th
Investitionskosten Gasbrennwert Technikkatalog KEA-BW, XX kW (70%)	Individuelle Daten nach Technikkatalog und Anlagengröße	€/kW th
Investitionskosten Gasbrennwert Technikkatalog KEA-BW, XX kW (40%)	Individuelle Daten nach Technikkatalog und Anlagengröße	€/kW th
Investitionskosten Wärmepumpe (Luft-Wasser) Technikkatalog KEA-BW, XX kW	Individuelle Daten nach Technikkatalog und Anlagengröße	€/kW th
Investitionskosten Wärmepumpe (Luft-Wasser) Technikkatalog KEA-BW, XX kW	Individuelle Daten nach Technikkatalog und Anlagengröße	€/kW th
Investitionskosten Dach PV-Anlage Technikkatalog KEA-BW	Individuelle Daten nach Technikkatalog und Anlagengröße	€/kW el

Leistung PV Anlage	Individuelle Leistung pro Fallbeispiel	kW el peak
PV Ertrag PV Anlage	1048	kWh/kW peak
Angenommene JAZ Luft-Wasser-Wärmepumpe	3	
Investitionskosten KWK Anlage Technikkatalog KEA-BW, XX kW	Individuelle Daten nach Technikkatalog und Anlagengröße	€/kW el
elektrischer Wirkungsgrad ~XX kW th	Individueller Wirkungsgrad nach Technikkatalog und Anlagengröße	
thermischer Wirkungsgrad ~XX kW th	Individueller Wirkungsgrad nach Technikkatalog und Anlagengröße	
Grenzwert Emissionsfaktor	450	gr/kWh
Einspeisevergütung PV	8	ct/kWh
KWKG-Zuschlag	Individueller Wirkungsgrad nach KWKG und Anlagengröße	ct/kWh

4 Investitionskosten

Die relative Kostenbezüge der einzelnen Fallbespiele lassen sich wie folgt darstellen. Grundlage sind immer die Kosten der Referenzvariante Gaskessel, die laut GEG nicht mehr möglich ist.

Tabelle 2: Vergleich der Investitionskosten Fallbeispiele und Versorgungsvarianten

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Darmstadt	100%	579%	760%	482%	301%	754%	1208%
Freiburg	100%	630%	1666%	1357%	320%	1675%	87%
Heilbronn	100%	720%	770%	406%	355%	776%	33%
Karlsruhe	100%	707%	973%	617%	350%	976%	38%

Tübingen	100%	686%	1065%	721%	342%	1070%	35%
Ø	100%	664%	1047%	716%	334%	1050%	280%

Es zeigt sich in Tabelle 2, dass reine Wärmepumpenversorgungs-Varianten im Mittel rund 6,5 mal so teuer in der Anschaffung uns Installation sind, wie reine Gaskesselinstallation. Kommt noch eine PV-Anlage in passender Größe dazu ist mit 10-fachen Installationskosten zu rechnen. Wesentlicher Kostentreiber ist dabei die PV-Anlage. Sollten die Preise für PV-Module in absehbarer Zeit sinken, ist hier eine wesentliche Einsparung möglich. Bei Varianten mit kleinerer Wärmepumpe und zusätzlichem Gaskessel sind 6,5-fache Kosten zu erwarten. Entfällt die PV-Anlage reduziert sich die Investition auf das 3,3-fache. Bei der teuersten Variante mit einer KWK-Anlage sind die rund 10-fachen Investitionskosten zu erwarten.

Die Investitionskosten in eine reine Wärmeversorgung über Fernwärme sind sehr unterschiedlich. Nimmt man einen durchschnittlichen Investitionsbedarf von rund 20.000 € für Wärmeübergabestation und Hausanschlusskosten für jegliche Projektgröße ist die prozentuale Darstellung verzerrt. Da die Kosten nicht nur von der Anlagengröße sondern auch von den regionalen Gegebenheiten abhängt ist eine Annahme von 20.000 € möglich.

5 Betriebskosten und Emissionen

In den folgenden Kapiteln werden die Betriebskosten und Emissionen über einen Zeitraum von 10 Jahren verglichen. Dabei werden 3 Verbrauchsvarianten gezeigt. In Variante 1 wird keine Sanierung des/der Objekte/s vorgenommen. Der Verbrauch liegt über 10 Jahre konstant bei 100 kWh/m²*a. In Variante 2 wird/werden zu Beginn der Betrachtung das/die Objekt/e saniert, so dass ein Verbrauch von 50 kWh/m²*a erreicht wird. Die dritte Variante beschreibt eine Sanierung nach 5 Jahren Betriebszeit. Zu beachten ist, dass zur einfacheren Vergleichbarkeit die Versorgungsanlagen-Größe beibehalten wird, obwohl sie vor allem bei der Variante mit Sanierung zu Beginn des Betrachtungszeitraums verkleinert/angepasst werden müsste. Zudem werden die Kosten für die Sanierung nicht betrachtet, obwohl es bei einer Vollkostenanalyse zwingend notwendig wäre. Hier sind die entstehenden Kosten jedoch zu individuell und können für eine Vergleichbarkeit nicht herangezogen werden.

Die Energieträgerpreise wurden einmal statisch angenommen und einmal dynamisch auf Grundlage der Daten des BMWK/ifeu[2]. So ergeben sich 6 unterschiedliche Szenarien nach Tabelle 3.

Tabelle 3: Verglichene Versorgungs-Szenarien der Fallbeispiele, Kapitelverteilung

Jeweilige Kapitelzuordnung	Grundvariante ohne Sanierung	Variante mit Sanierung zu Beginn der Betrachtung	Variante mit Sanierung nach 10 Jahren Betrieb

[2] Ifeu: Heizen mit 65 % erneuerbaren Energien – Begleitende Analysen zur Ausgestaltung der Regelung aus dem Koalitionsvertrag 2021, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/heizen-mit-65-prozent-erneuerbaren-energien.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt abgerufen 08.05.2024

Statische Energieträger-preise	5.1	5.2	5.3
Dynamische Energieträger-preise	5.4	5.5	5.6

5.1 Betriebskosten und Emissionen der einzelnen Fallbeispiele – Grundvariante ohne Sanierung – statische Energieträgerpreise

Dargestellt sind die Betriebskosten und Emissionen der Projektbeispiele.

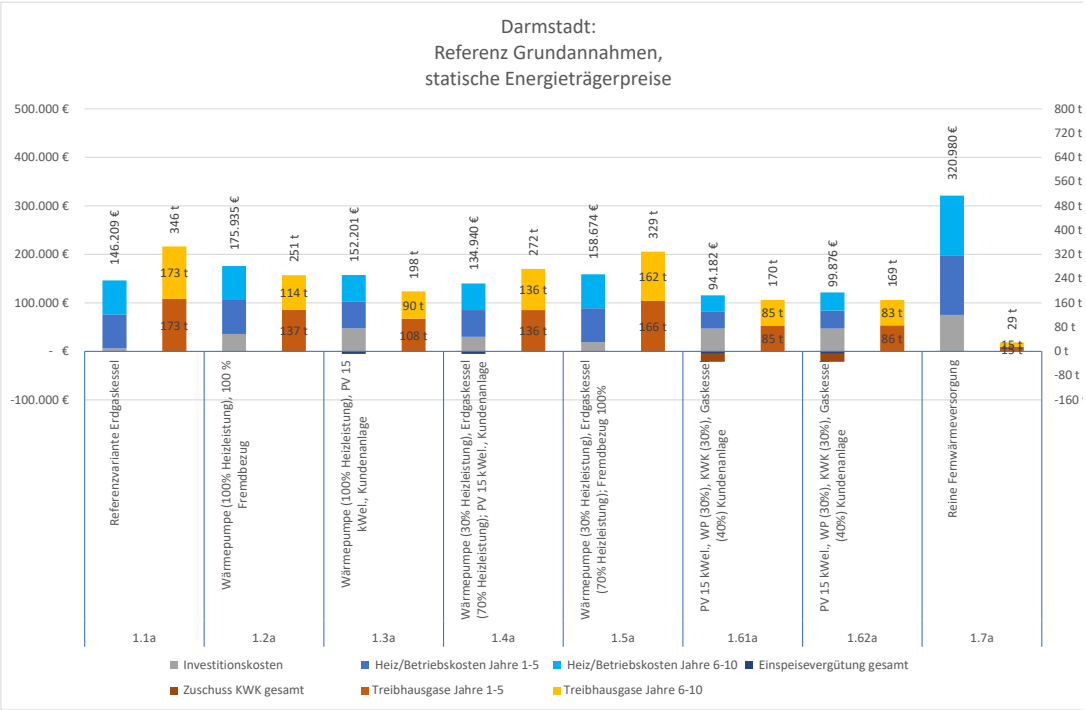

Abbildung 1: Betriebskosten und Emissionen Darmstadt – Grundvariante – statisch

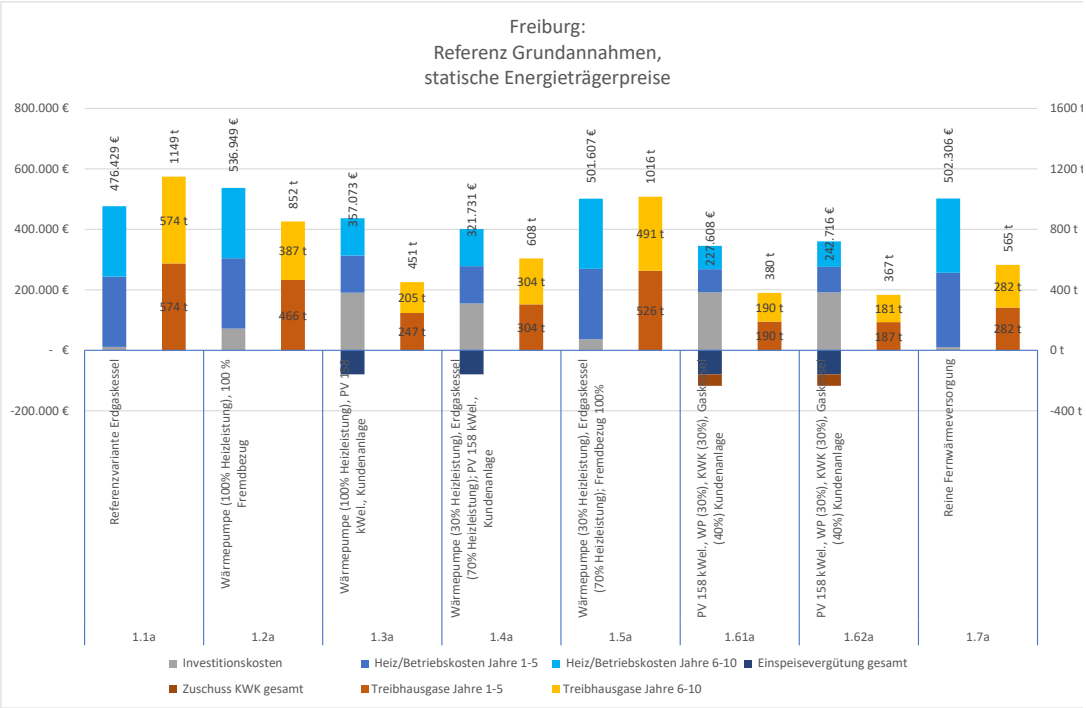

Abbildung 2: Betriebskosten und Emissionen Freiburg – Grundvariante – statisch

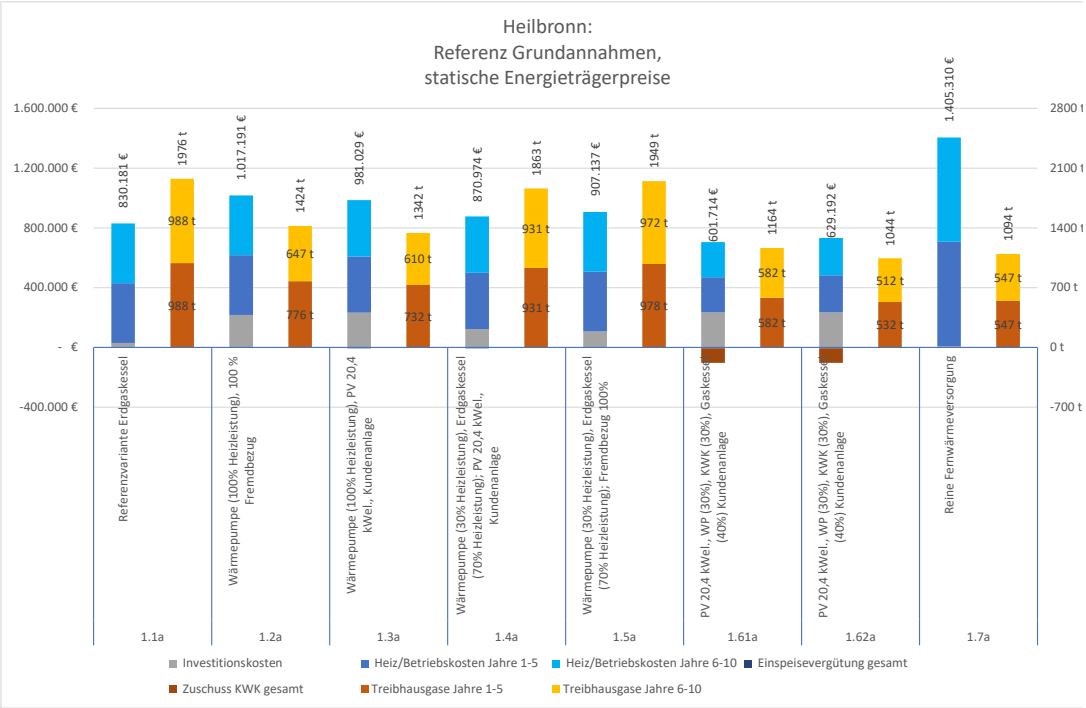

Abbildung 3: Betriebskosten und Emissionen Heilbronn – Grundvariante – statisch

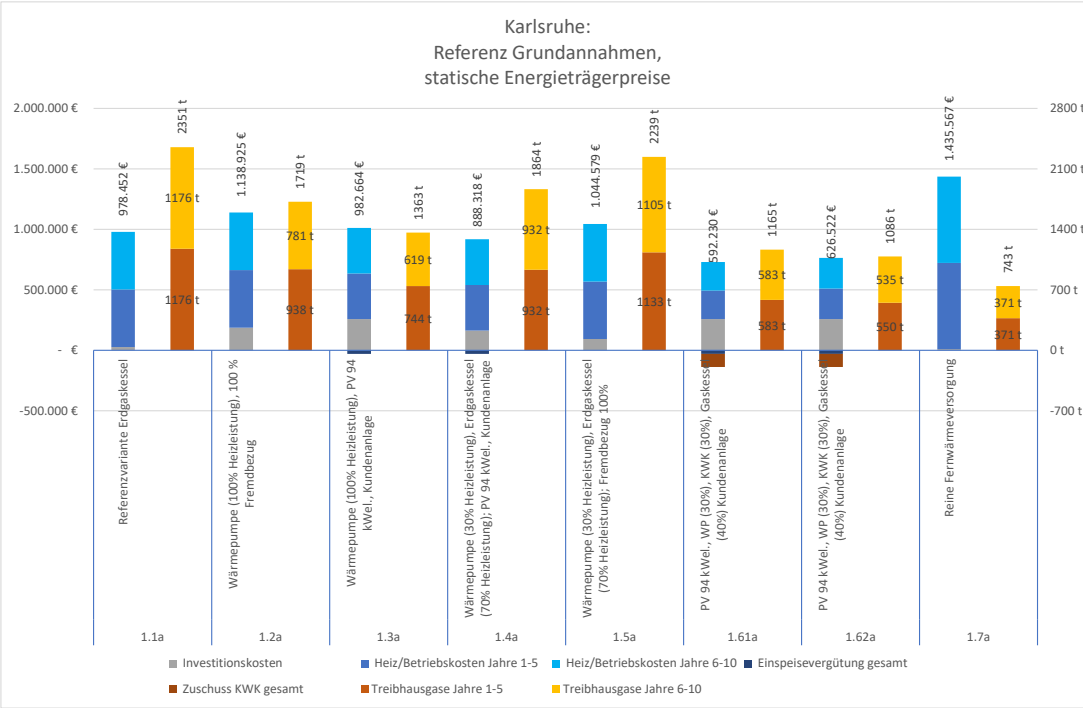

Abbildung 4: Betriebskosten und Emissionen Karlsruhe – Grundvariante – statisch

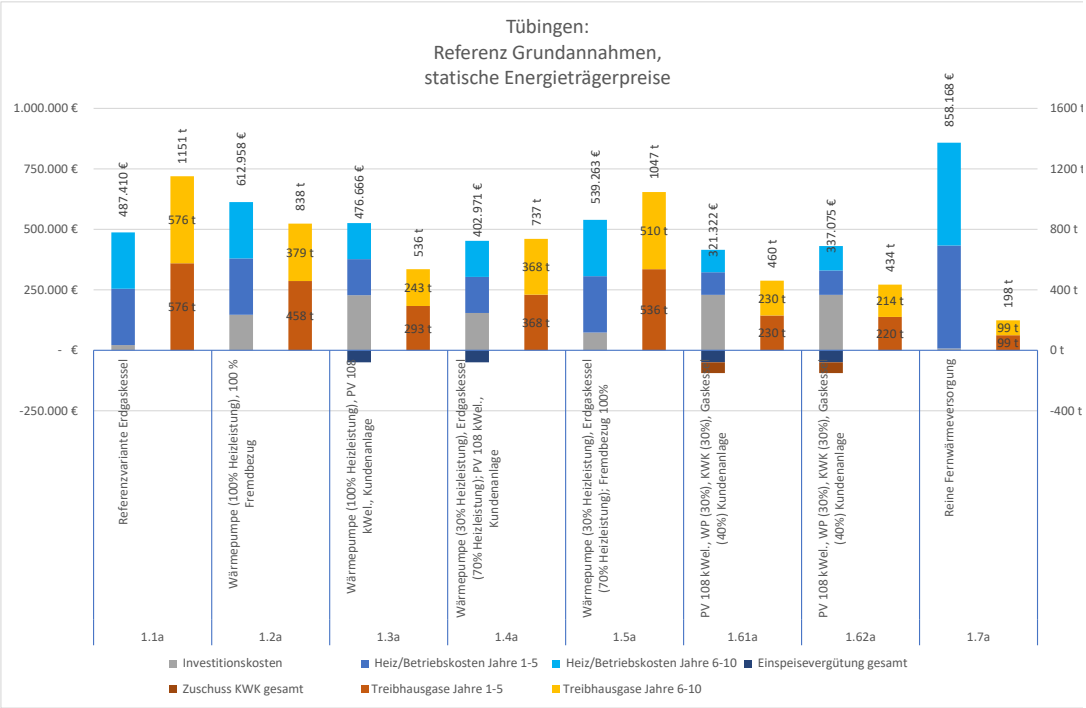

Abbildung 5: Betriebskosten und Emissionen Tübingen – Grundvariante – statisch

5.2 Betriebskosten und Emissionen der einzelnen Fallbeispiele – Sanierung zu Beginn der Betrachtung – statische Energieträgerpreise

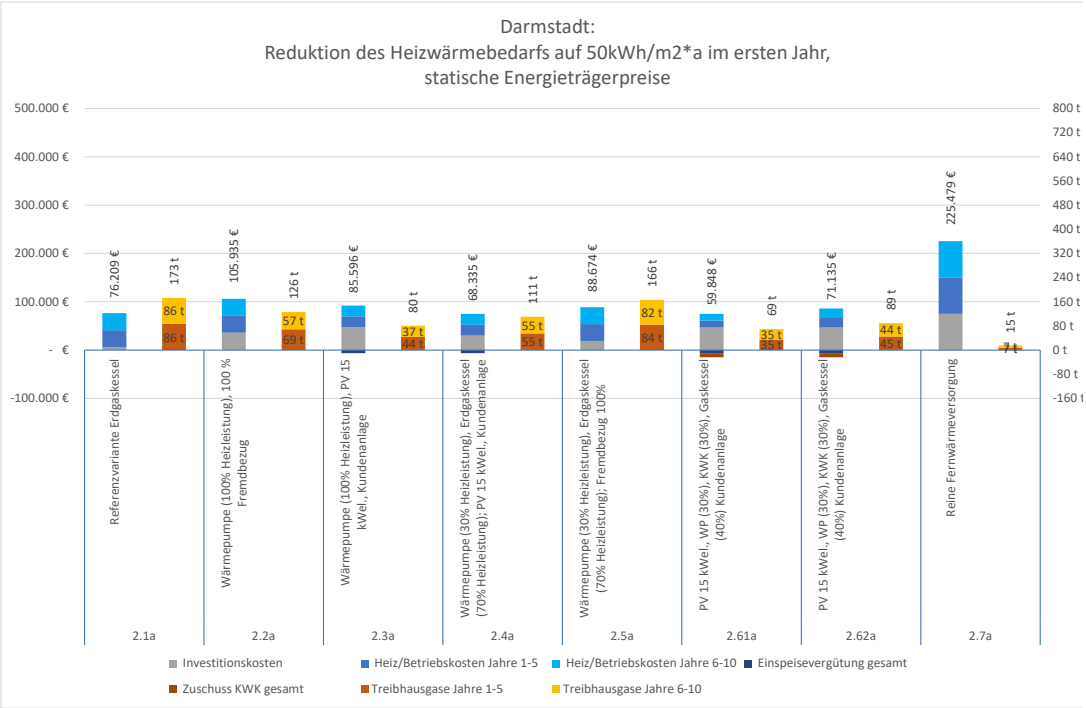

Abbildung 6: Betriebskosten und Emissionen Darmstadt – Sanierung Beginn – statisch

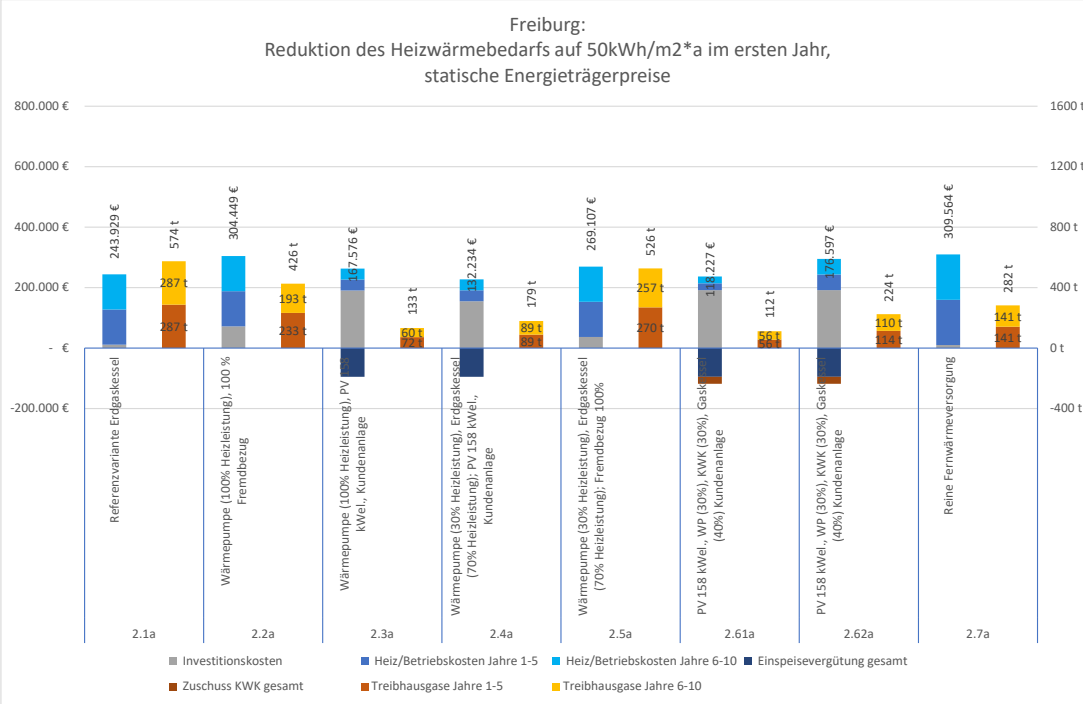

Abbildung 7: Betriebskosten und Emissionen Freiburg – Sanierung Beginn – statisch

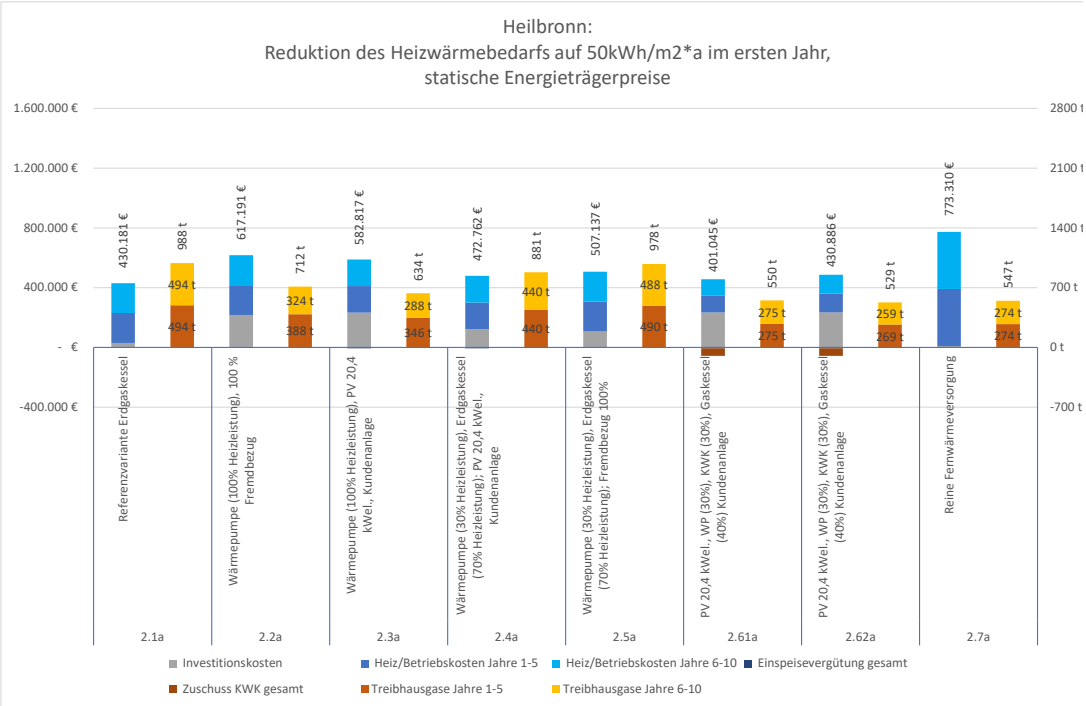

Abbildung 8: Betriebskosten und Emissionen Heilbronn – Sanierung Beginn – statisch

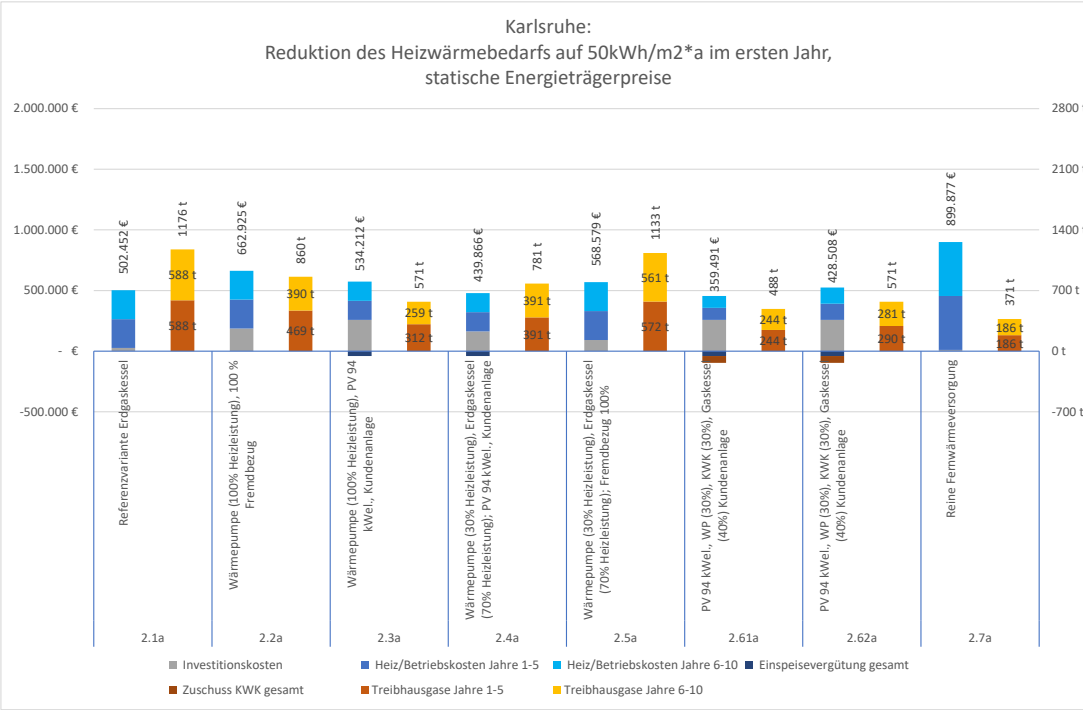

Abbildung 9: Betriebskosten und Emissionen Karlsruhe – Sanierung Beginn – statisch

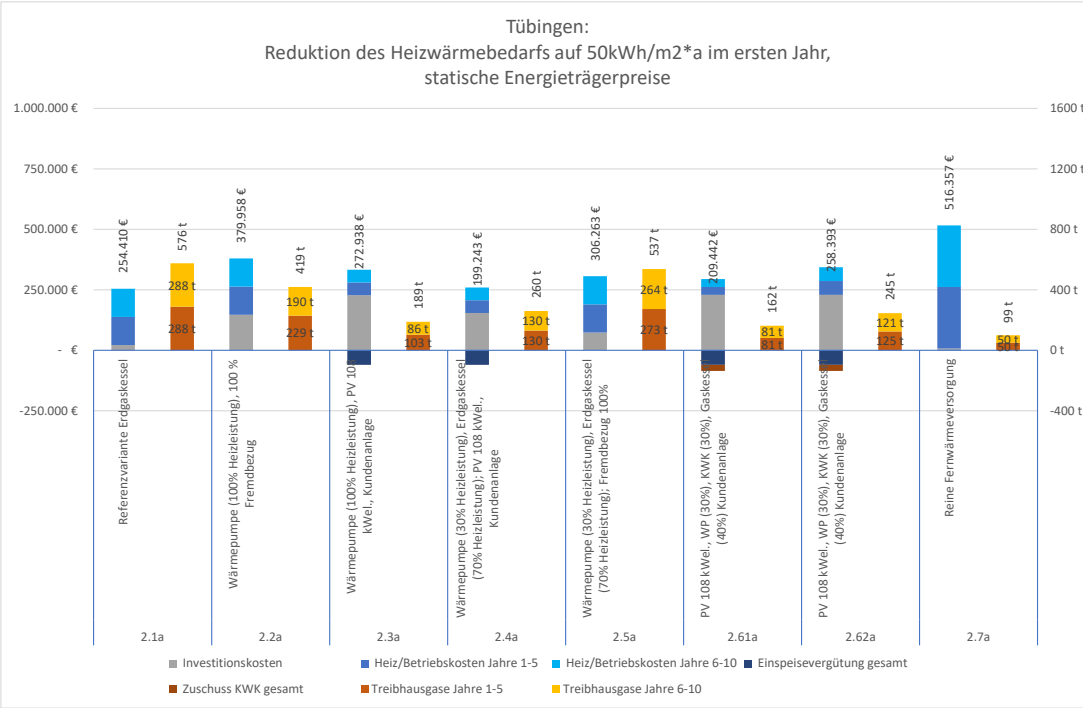

Abbildung 10: Betriebskosten und Emissionen Tübingen – Sanierung Beginn – statisch

5.3 Betriebskosten und Emissionen der einzelnen Fallbeispiele – Sanierung nach 5 Jahren Betrieb – statische Energieträgerpreise

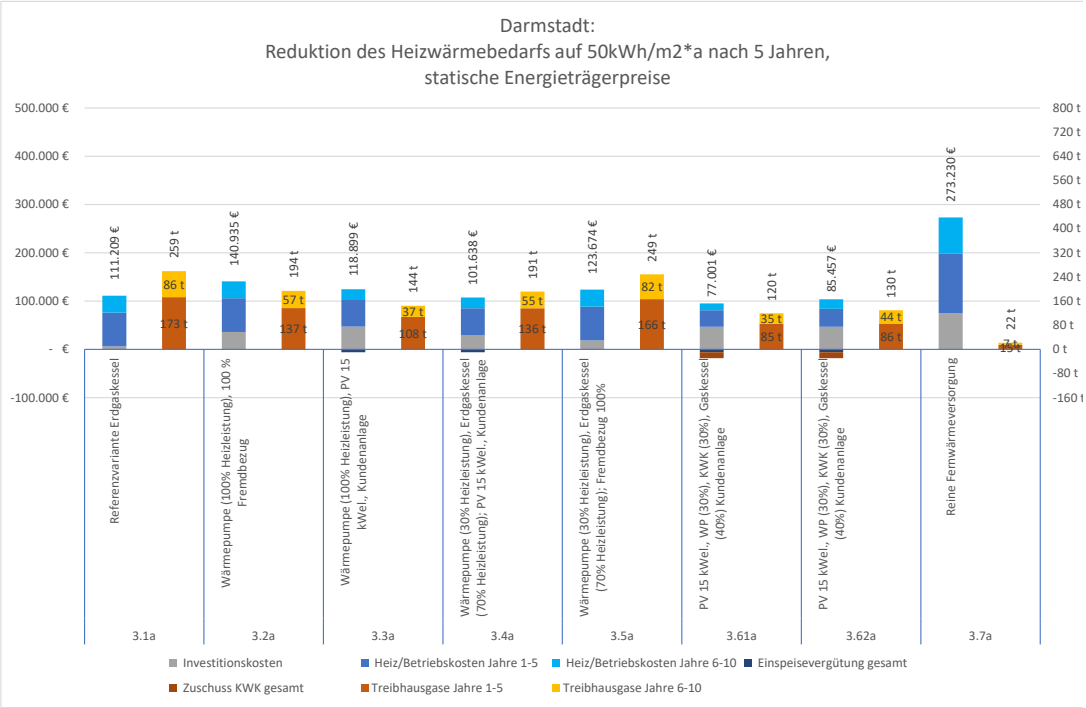

Abbildung 11: Betriebskosten und Emissionen Darmstadt – Sanierung nach 5 Jahren – statisch

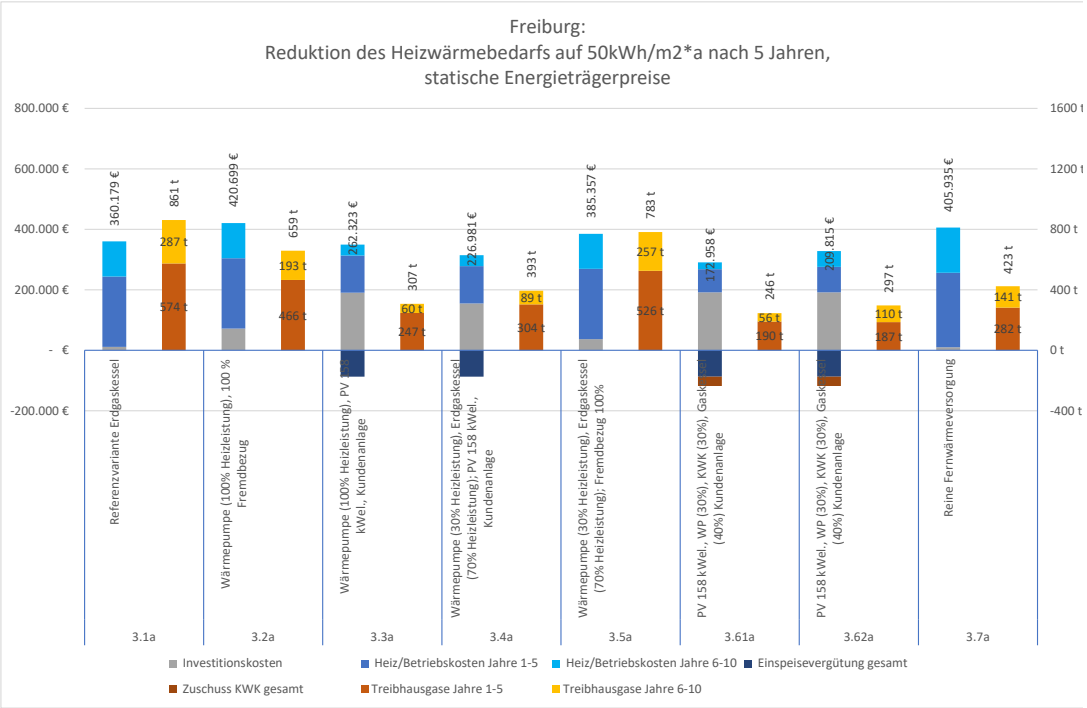

Abbildung 12: Betriebskosten und Emissionen Freiburg – Sanierung nach 5 Jahren – statisch

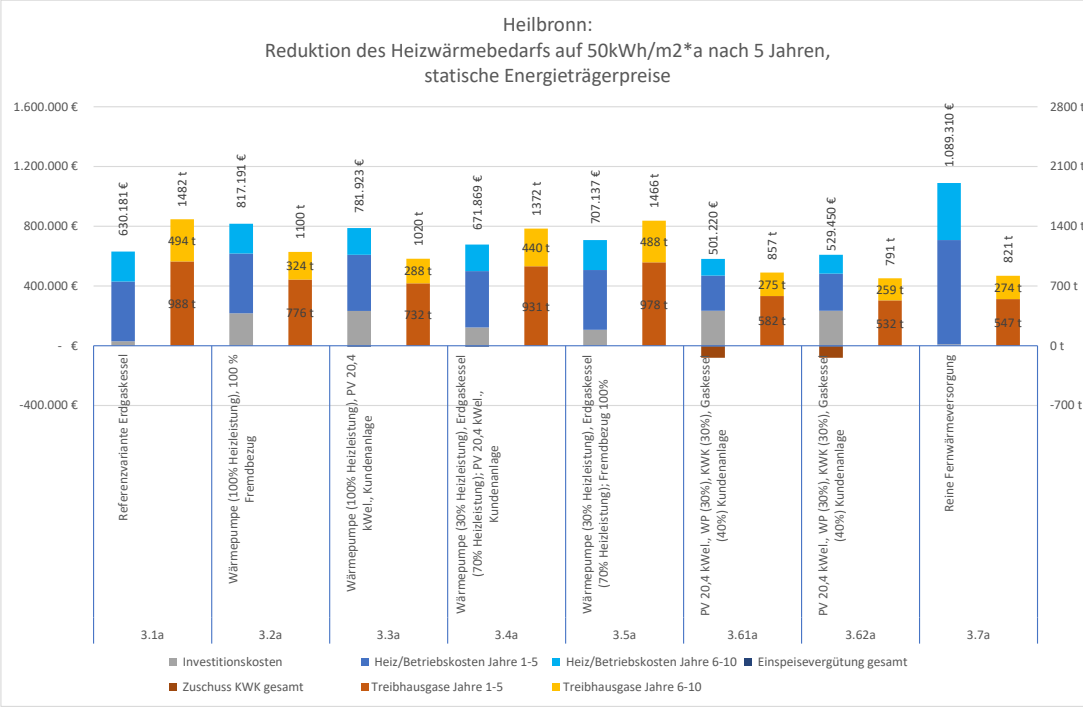

Abbildung 13: Betriebskosten und Emissionen Heilbronn – Sanierung nach 5 Jahren – statisch

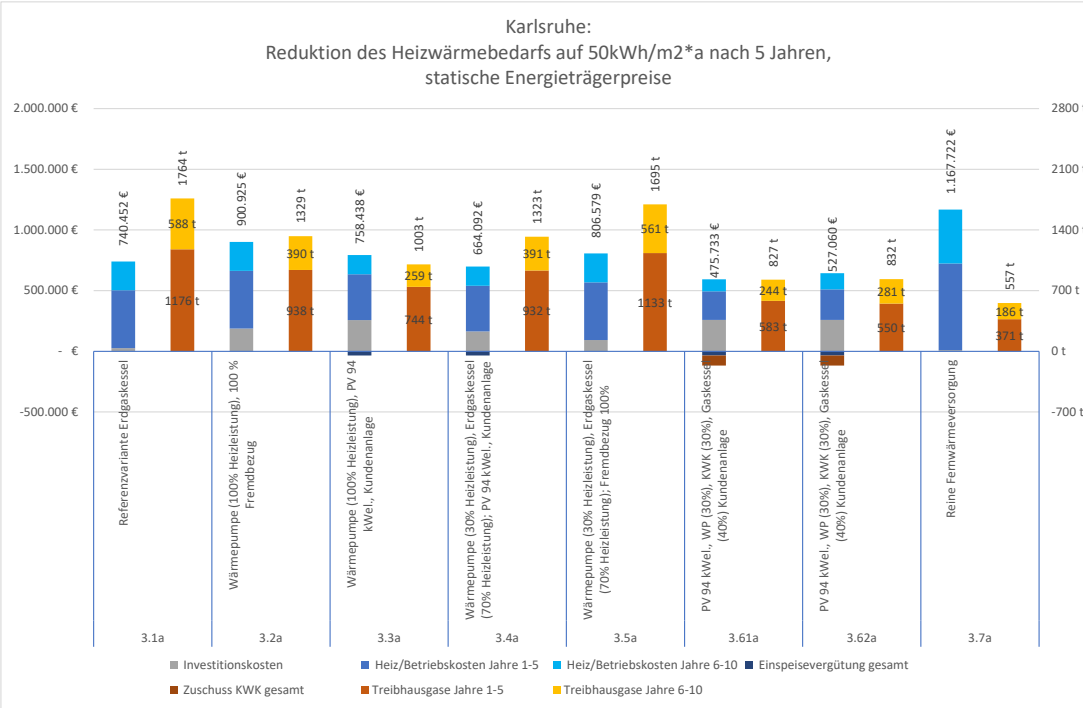

Abbildung 14: Betriebskosten und Emissionen Karlsruhe – Sanierung nach 5 Jahren – statisch

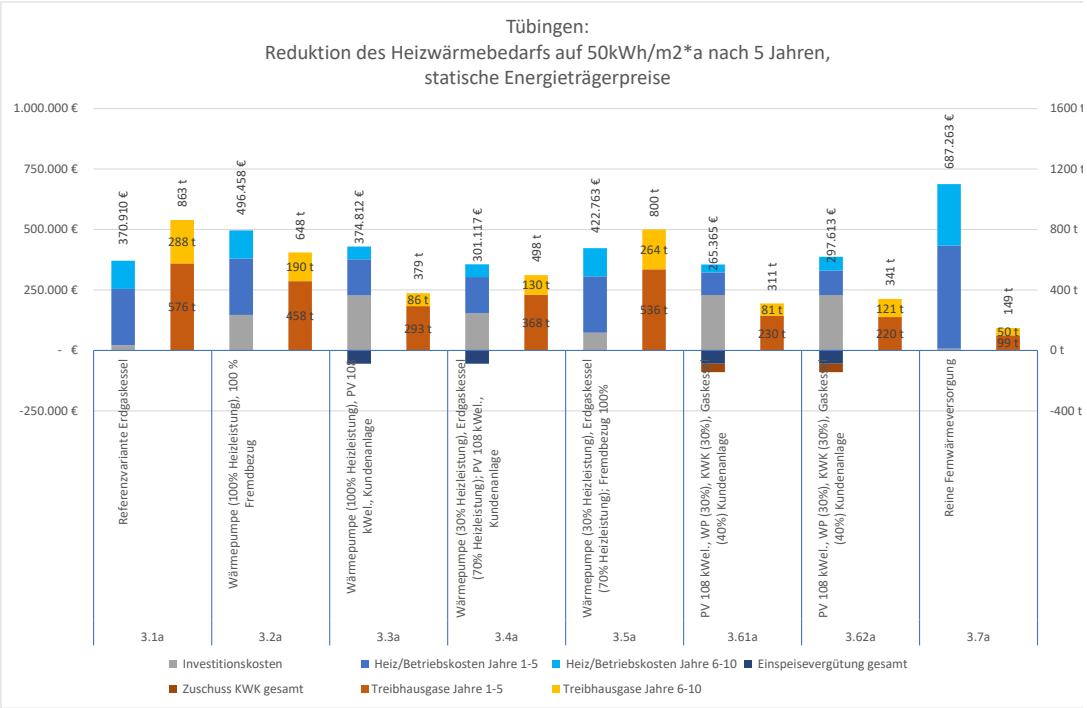

Abbildung 15: Betriebskosten und Emissionen Tübingen – Sanierung nach 5 Jahren – statisch

5.4 Betriebskosten und Emissionen der einzelnen Fallbeispiele – Grundvariante ohne Sanierung – dynamische Energieträgerpreise

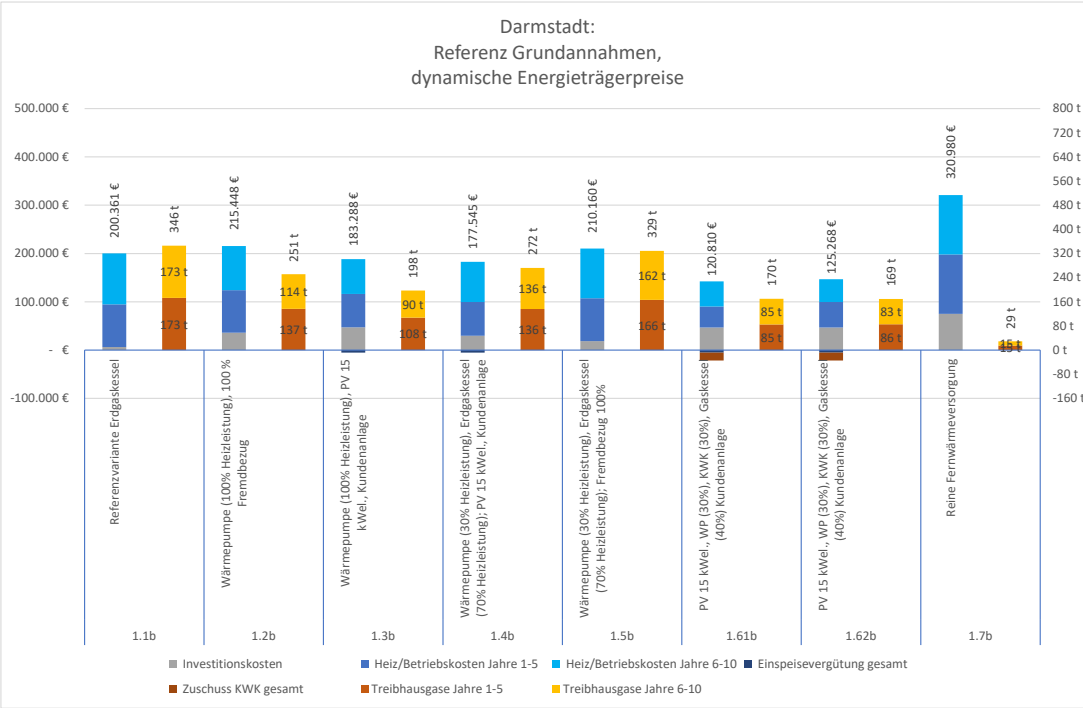

Abbildung 16: Betriebskosten und Emissionen Darmstadt – Grundvariante – dynamisch

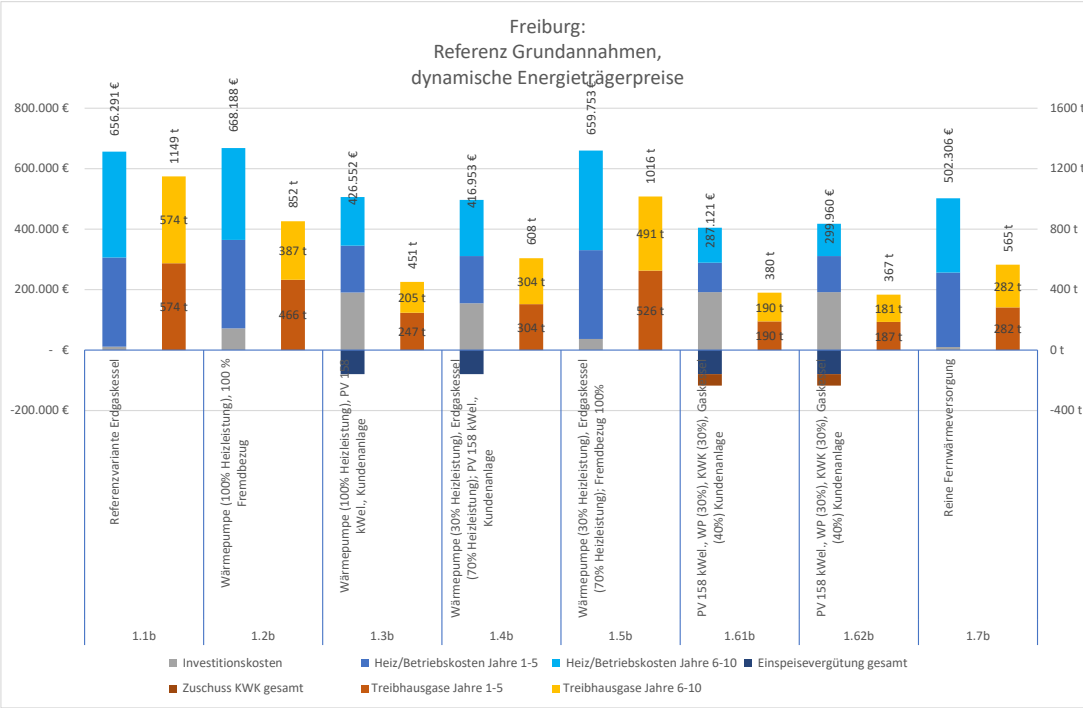

Abbildung 17: Betriebskosten und Emissionen Freiburg – Grundvariante – dynamisch

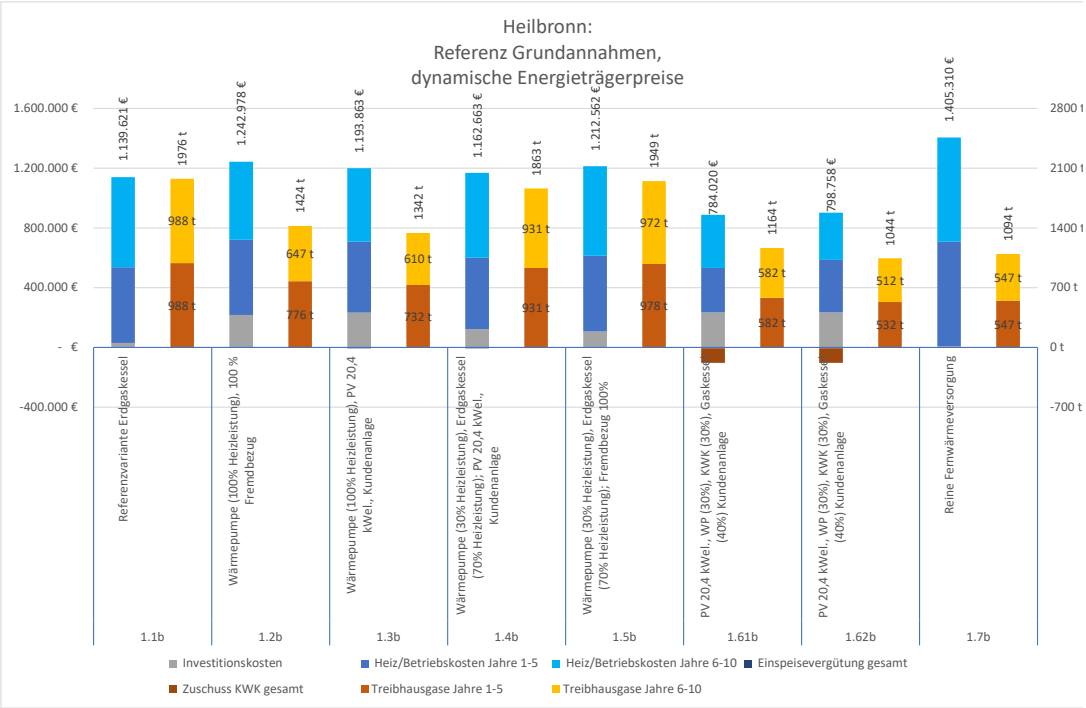

Abbildung 18: Betriebskosten und Emissionen Heilbronn – Grundvariante – dynamisch

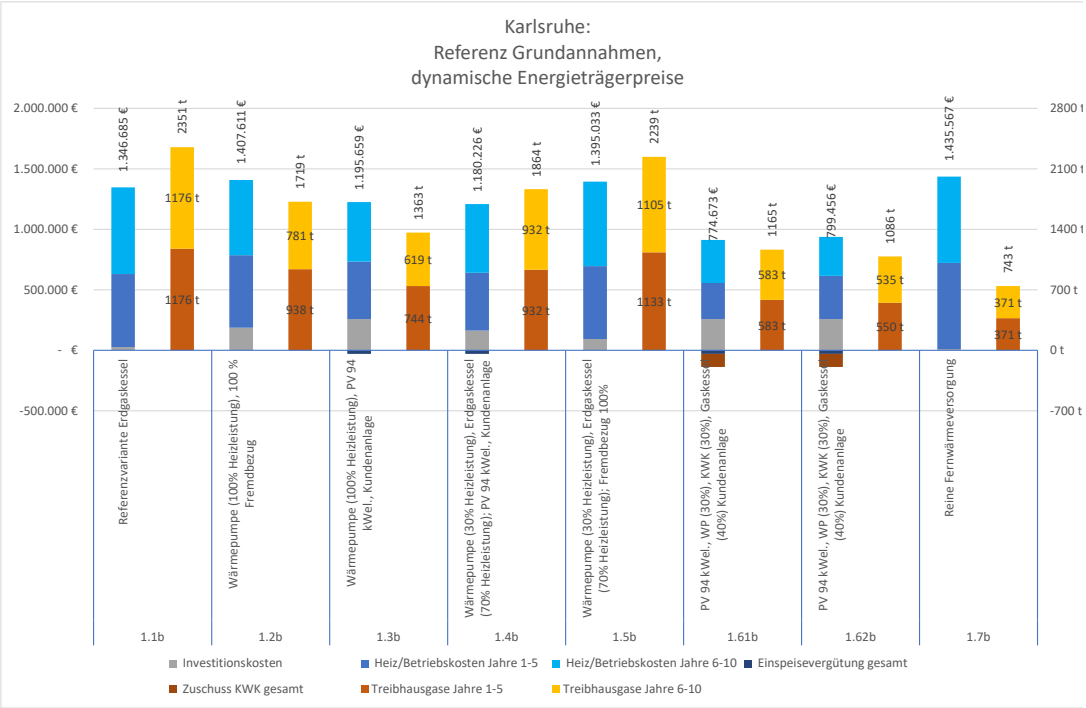

Abbildung 19: Betriebskosten und Emissionen Karlsruhe – Grundvariante – dynamisch

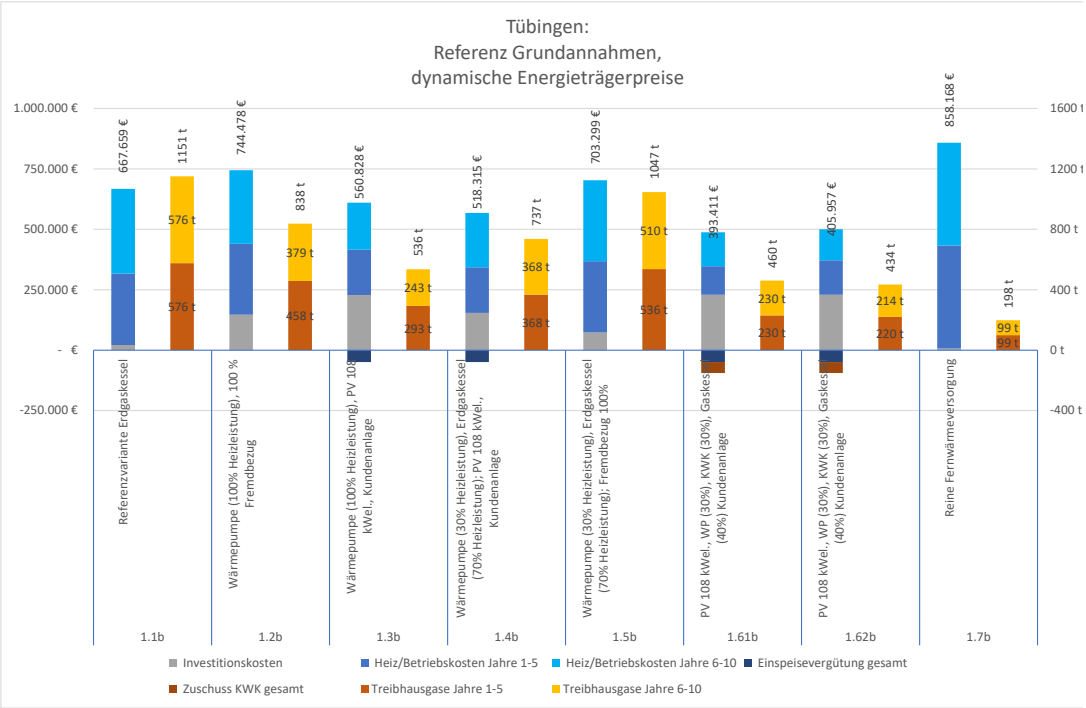

Abbildung 20: Betriebskosten und Emissionen Tübingen – Grundvariante – dynamisch

5.5 Betriebskosten und Emissionen der einzelnen Fallbeispiele – Sanierung zu Beginn der Betrachtung – dynamische Energieträgerpreise

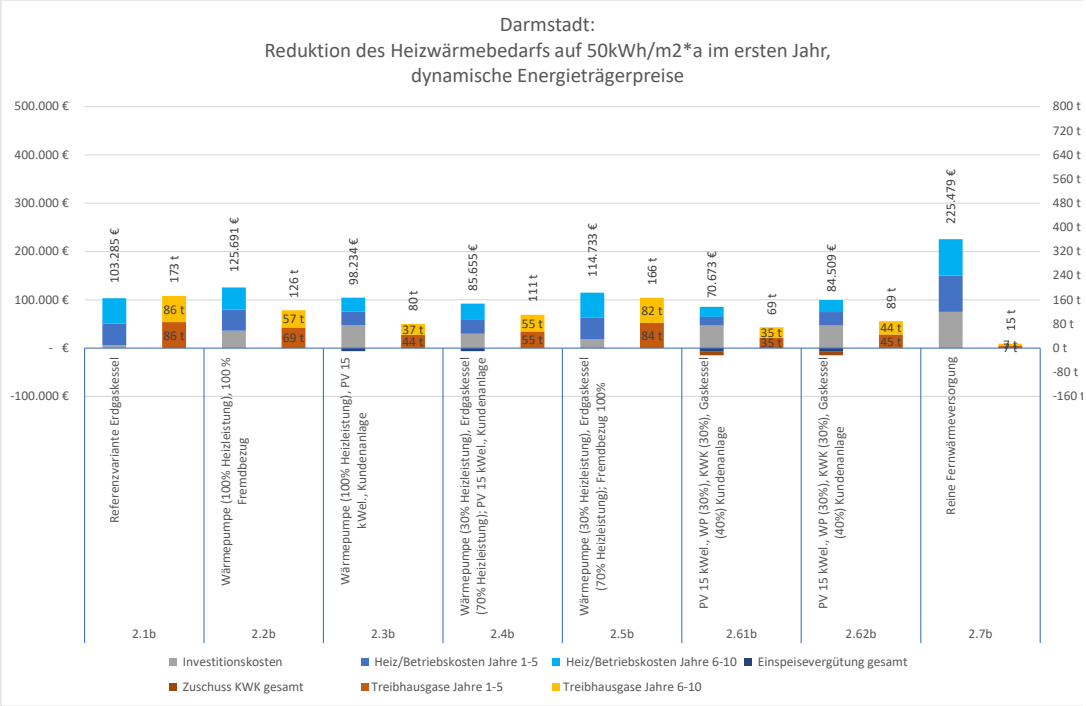

Abbildung 21: Betriebskosten und Emissionen Darmstadt – Sanierung Beginn – dynamisch

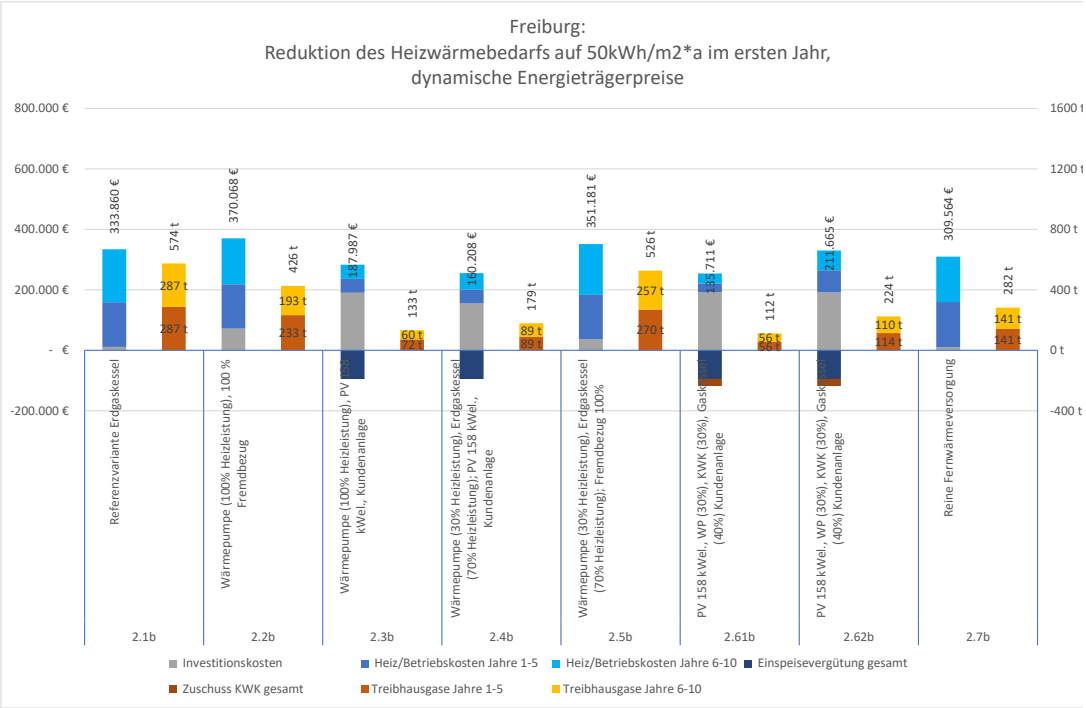

Abbildung 22: Betriebskosten und Emissionen Freiburg – Sanierung Beginn – dynamisch

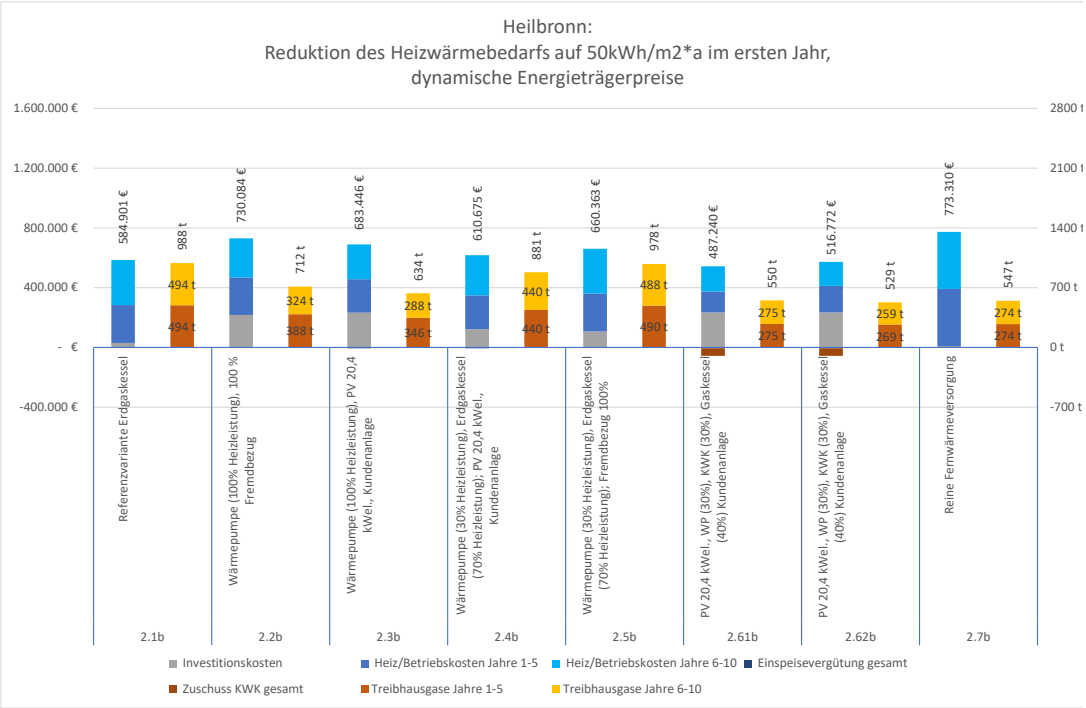

Abbildung 23: Betriebskosten und Emissionen Heilbronn – Sanierung Beginn – dynamisch

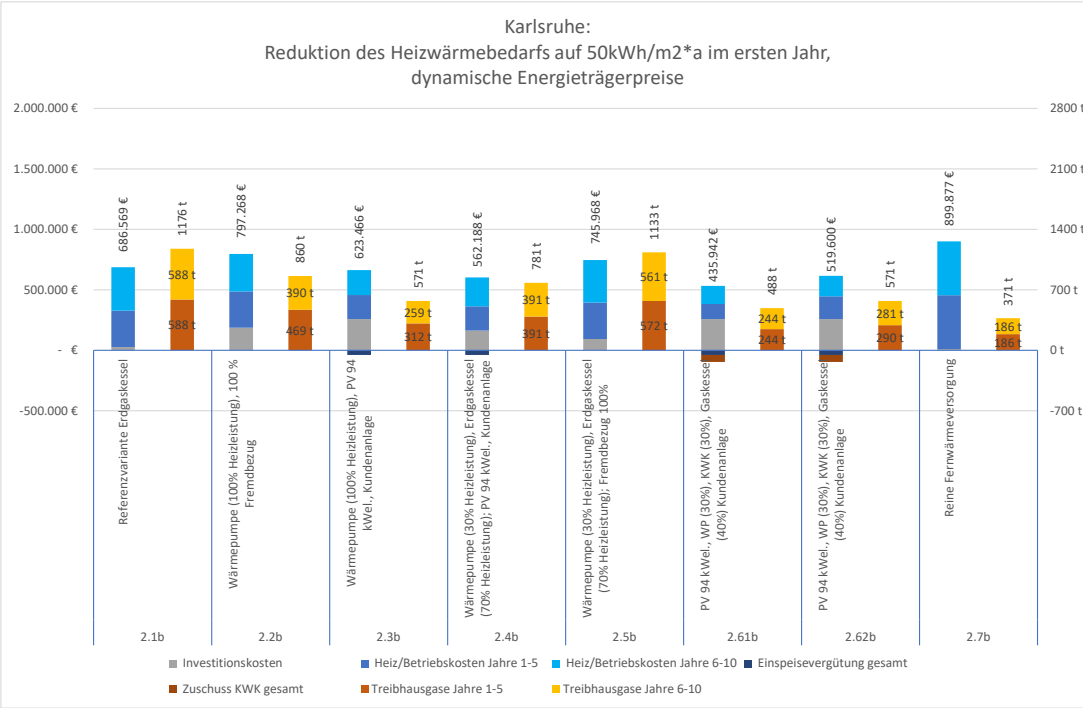

Abbildung 24: Betriebskosten und Emissionen Karlsruhe – Sanierung Beginn – dynamisch

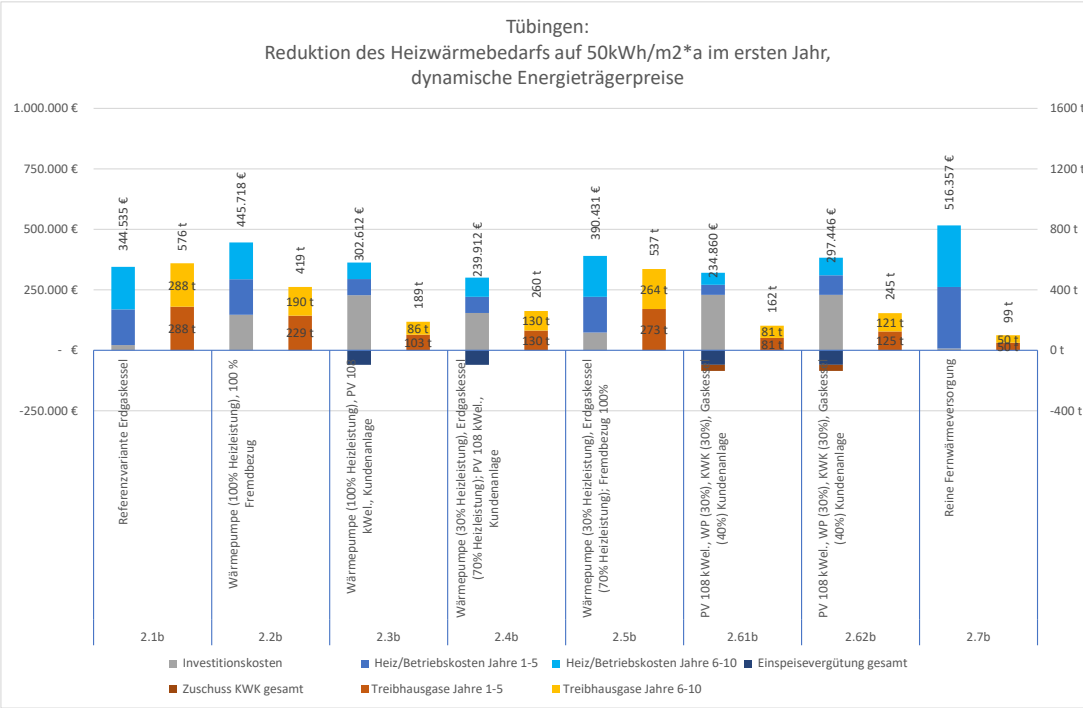

Abbildung 25: Betriebskosten und Emissionen Tübingen – Sanierung Beginn – dynamisch

5.6 Betriebskosten und Emissionen der einzelnen Fallbeispiele – Sanierung nach 5 Jahren Betrieb – dynamische Energieträgerpreise

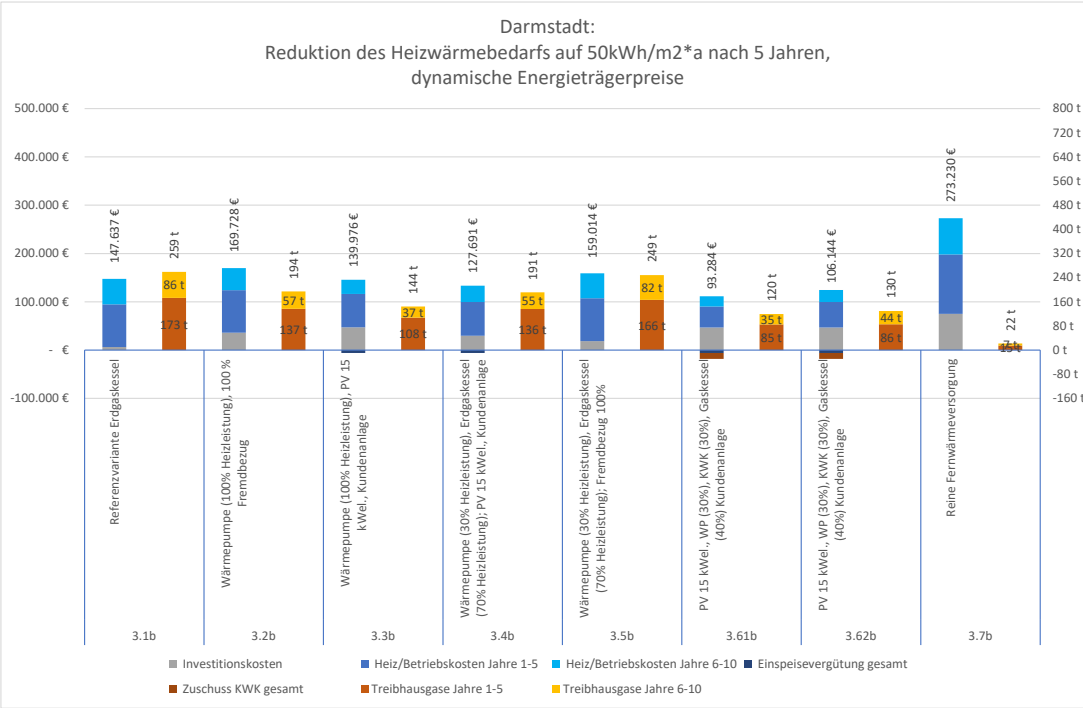

Abbildung 26: Betriebskosten und Emissionen Darmstadt – Sanierung nach 5 Jahren – dynamisch

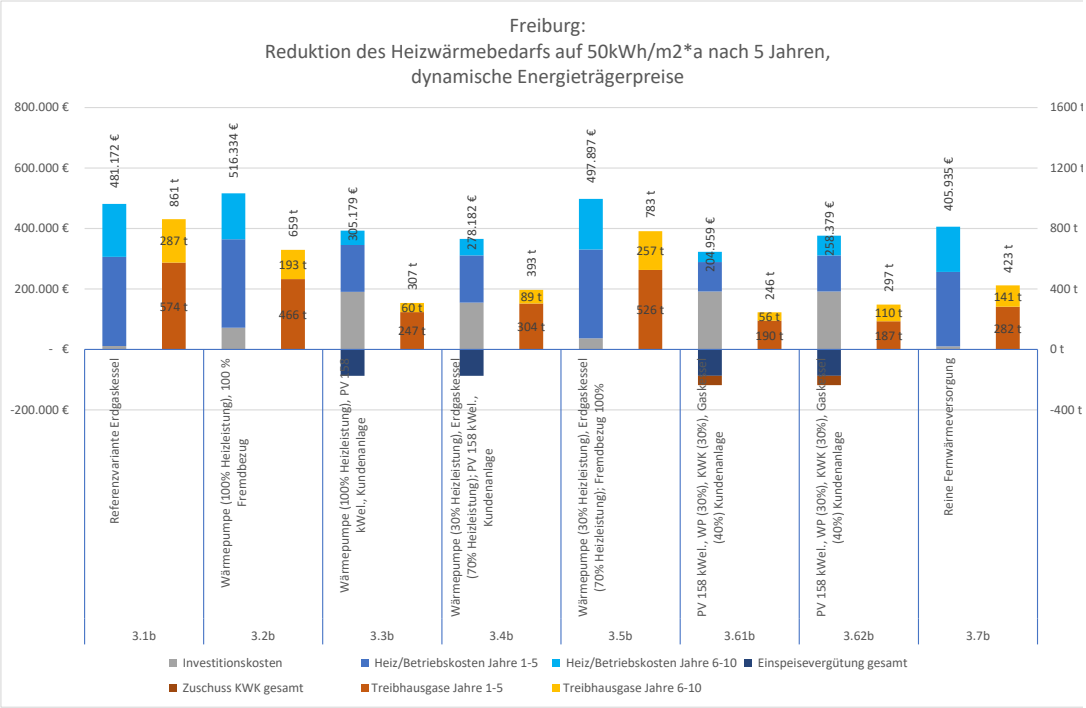

Abbildung 27: Betriebskosten und Emissionen Freiburg – Sanierung nach 5 Jahren – dynamisch

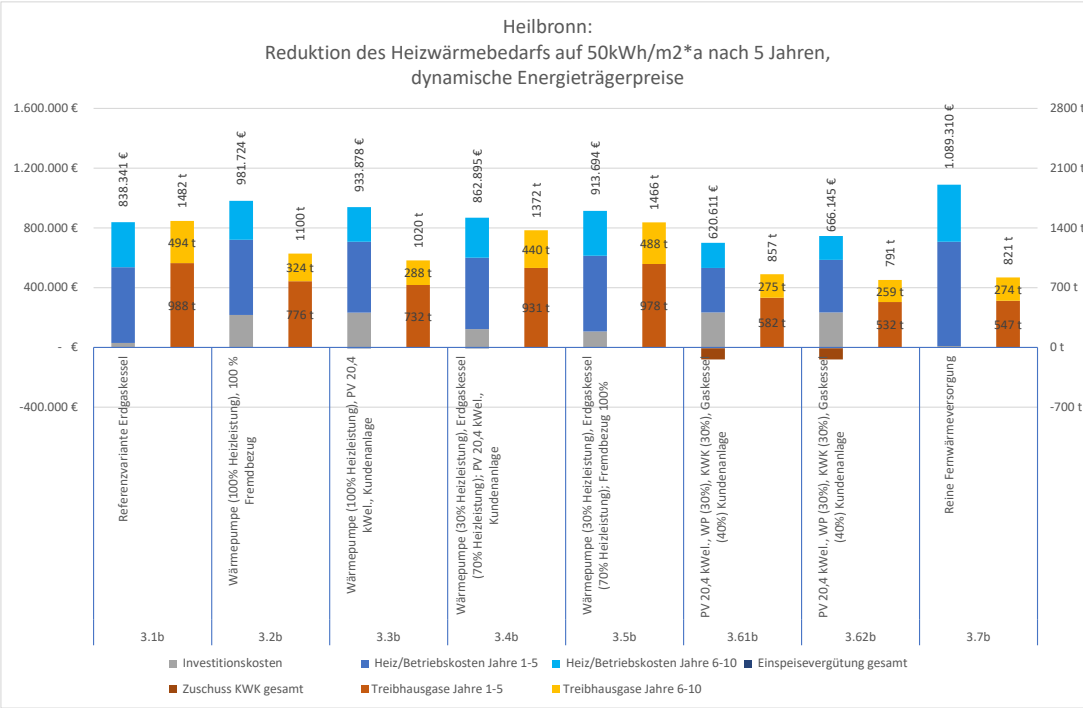

Abbildung 28: Betriebskosten und Emissionen Heilbronn – Sanierung nach 5 Jahren – dynamisch

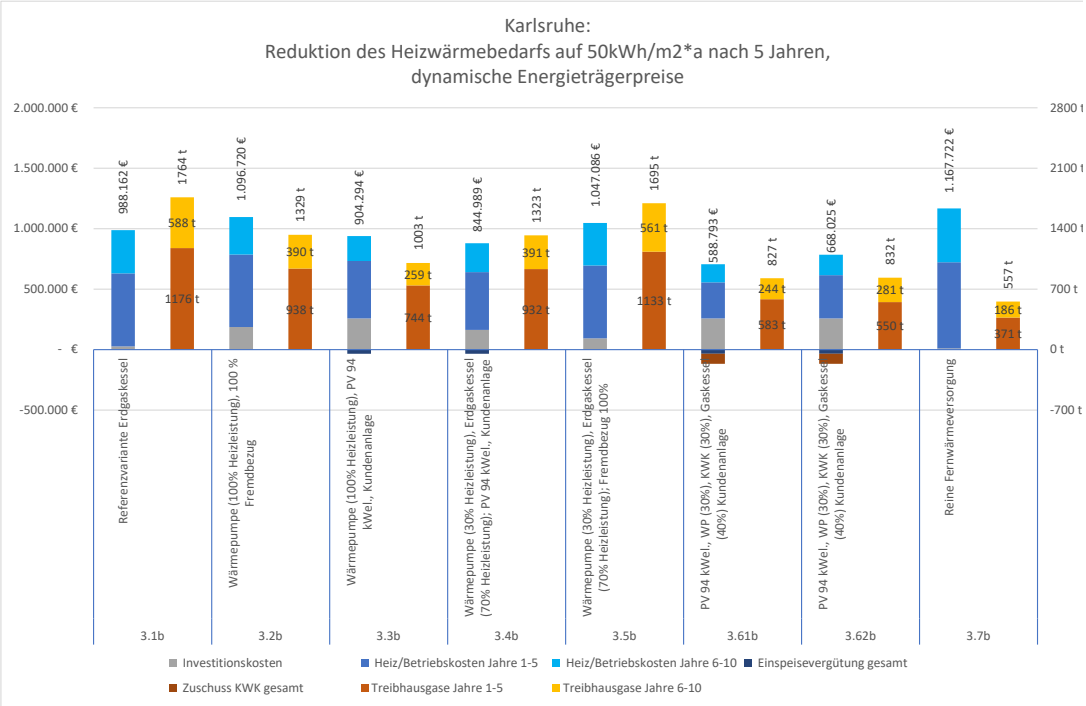

Abbildung 29: Betriebskosten und Emissionen Karlsruhe – Sanierung nach 5 Jahren – dynamisch

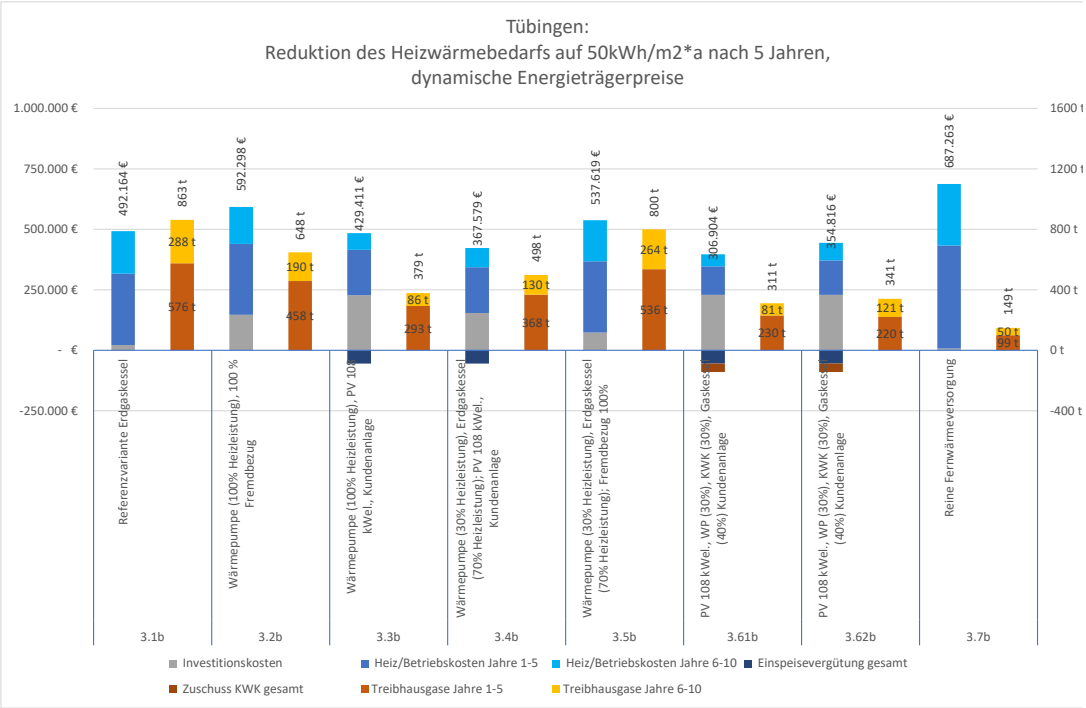

Abbildung 30: Betriebskosten und Emissionen Tübingen – Sanierung nach 5 Jahren – dynamisch

5.7 Auswertung der Betriebskosten in Verbindung mit Emissionen

Bei der Bewertung der Versorgungsvarianten ergeben sich die in Tabelle 4 bis Tabelle 8 dargestellten Kosten und Verbrauchswerte bei statischen Energieträgerpreisen. Tabelle 9 bis Tabelle 13 zeigen die Kosten und Emissionen bei dynamischen Energieträgerpreisen.

Erwartungsgemäß sind die Emissionen bei beiden Tabellen-Gruppen gleich.

Tabelle 4: Kosten und Emissionen Darmstadt, statisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	146.209 €	175.935 €	152.201 €	134.940 €	158.674 €	94.182 €	320.980 €
	346 t	251 t	198 t	272 t	329 t	170 t	29 t
Sanierung nach 0 Jahren	76.209 €	105.935 €	85.596 €	68.335 €	88.674 €	59.848 €	225.479 €
	173 t	126 t	80 t	111 t	166 t	69 t	15 t
Sanierung nach 5 Jahren	111.209 €	140.935 €	118.899 €	101.638 €	123.674 €	77.001 €	273.230 €

	259 t	194 t	144 t	191 t	249 t	120 t	22 t

Tabelle 5: Kosten und Emissionen Freiburg, statisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	476.429 €	536.949 €	357.073 €	321.731 €	501.607 €	227.608 €	502.306 €
	1149 t	852 t	451 t	608 t	1016 t	380 t	565 t
Sanierung nach 0 Jahren	243.929 €	304.449 €	167.576 €	132.234 €	269.107 €	118.227 €	309.564 €
	574 t	426 t	133 t	179 t	526 t	112 t	282 t
Sanierung nach 5 Jahren	360.179 €	420.699 €	262.323 €	226.981 €	385.357 €	172.958 €	405.935 €
	861 t	659 t	307 t	393 t	783 t	246 t	423 t

Tabelle 6: Kosten und Emissionen Heilbronn, statisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	830.181 €	1.017.191 €	981.029 €	870.974 €	907.137 €	601.714 €	1.405.310 €
	1976 t	1424 t	1342 t	1863 t	1949 t	1164 t	1.094 t
Sanierung nach 0 Jahren	430.181 €	617.191 €	582.817 €	472.762 €	507.137 €	401.045 €	773.310 €
	988 t	712 t	634 t	881 t	978 t	550 t	547 t
Sanierung nach 5 Jahren	630.181 €	817.191 €	781.923 €	671.869 €	707.137 €	501.220 €	1.089.310 €
	1482 t	1100 t	1020 t	1372 t	1466 t	857 t	821 t

Tabelle 7: Kosten und Emissionen Karlsruhe, statisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	978.452 €	1.138.925 €	982.664 €	888.318 €	1.044.579 €	592.230 €	1.435.567 €
	2351 t	1719 t	1363 t	1864 t	2239 t	1165 t	743 t
Sanierung nach 0 Jahren	502.452 €	662.925 €	534.212 €	439.866 €	568.579 €	359.491 €	899.877 €
	1176 t	860 t	571 t	781 t	1133 t	488 t	371 t
Sanierung nach 5 Jahren	740.452 €	900.925 €	758.438 €	664.092 €	806.579 €	475.733 €	1.167.722 €
	1764 t	1329 t	1003 t	1323 t	1695 t	827 t	557 t

Tabelle 8: Kosten und Emissionen Tübingen, statisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	487.410 €	612.958 €	476.666 €	402.971 €	539.263 €	321.322 €	858.168 €
	1151 t	838 t	536 t	737 t	1047 t	460 t	198 t
Sanierung nach 0 Jahren	254.410 €	379.958 €	272.938 €	199.243 €	306.263 €	209.442 €	516.357 €
	576 t	419 t	189 t	260 t	537 t	162 t	99 t
Sanierung nach 5 Jahren	370.910 €	496.458 €	374.812 €	301.117 €	422.763 €	265.365 €	687.263 €
	863 t	648 t	379 t	498 t	800 t	311 t	149 t

Die folgenden Tabellen stellen die Kosten und Emissionen bei dynamischen Energieträgerpreisen dar.

Tabelle 9: Kosten und Emissionen Darmstadt, dynamisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	200.361 €	215.448 €	183.288 €	177.545 €	210.160 €	120.810 €	320.980 €
	346 t	251 t	198 t	272 t	329 t	170 t	29 t
Sanierung nach 0 Jahren	103.285 €	125.691 €	98.234 €	85.655 €	114.733 €	70.673 €	225.479 €
	173 t	126 t	80 t	111 t	166 t	69 t	15 t
Sanierung nach 5 Jahren	147.637 €	169.728 €	139.976 €	127.691 €	159.014 €	93.284 €	273.230 €
	259 t	194 t	144 t	191 t	249 t	120 t	22 t

Tabelle 10: Kosten und Emissionen Freiburg, dynamisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	656.291 €	668.188 €	426.552 €	416.953 €	659.753 €	287.121 €	502.306 €
	1149 t	852 t	451 t	608 t	1016 t	380 t	565 t
Sanierung nach 0 Jahren	333.860 €	370.068 €	187.987 €	160.208 €	351.181 €	135.711 €	309.564 €
	574 t	426 t	133 t	179 t	526 t	112 t	282 t
Sanierung nach 5 Jahren	481.172 €	516.334 €	305.179 €	278.182 €	497.897 €	204.959 €	405.935 €
	861 t	659 t	307 t	393 t	783 t	246 t	423 t

Tabelle 11: Kosten und Emissionen Heilbronn, dynamisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	1.139.621 €	1.242.978 €	1.193.863 €	1.162.663 €	1.212.562 €	784.020 €	1.405.310 €

	1976 t	1424 t	1342 t	1863 t	1949 t	1164 t	1.094 t
Sanierung nach 0 Jahren	584.901 €	730.084 €	683.446 €	610.675 €	660.363 €	487.240 €	773.310 €
	988 t	712 t	634 t	881 t	978 t	550 t	547 t
Sanierung nach 5 Jahren	838.341 €	981.724 €	933.878 €	862.895 €	913.694 €	620.611 €	1.089.310 €
	1482 t	1100 t	1020 t	1372 t	1466 t	857 t	821 t

Tabelle 12: Kosten und Emissionen Karlsruhe, dynamisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	1.346.685 €	1.407.611 €	1.195.659 €	1.180.226 €	1.395.033 €	774.673 €	1.435.567 €
	2351 t	1719 t	1363 t	1864 t	2239 t	1165 t	743 t
Sanierung nach 0 Jahren	686.569 €	797.268 €	623.466 €	562.188 €	745.968 €	435.942 €	899.877 €
	1176 t	860 t	571 t	781 t	1133 t	488 t	371 t
Sanierung nach 5 Jahren	988.162 €	1.096.720 €	904.294 €	844.989 €	1.047.086 €	588.793 €	1.167.722 €
	1764 t	1329 t	1003 t	1323 t	1695 t	827 t	557 t

Tabelle 13: Kosten und Emissionen Tübingen, dynamisch

	Referenzvariante Erdgaskessel	Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug	Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV, Kundenanlage	Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%	PV, WP (30%), KWK (70%), Kundenanlage	Reine Fernwärmeversorgung
Grundvariante	667.659 €	744.478 €	560.828 €	518.315 €	703.299 €	393.411 €	858.168 €
	1151 t	838 t	536 t	737 t	1047 t	460 t	198 t
Sanierung nach 0 Jahren	344.535 €	445.718 €	302.612 €	239.912 €	390.431 €	234.860 €	516.357 €
	576 t	419 t	189 t	260 t	537 t	162 t	99 t
Sanierung nach 5 Jahren	492.164 €	592.298 €	429.411 €	367.579 €	537.619 €	306.904 €	687.263 €
	863 t	648 t	379 t	498 t	800 t	311 t	149 t

5.8 Vergleich der Emissionen für Fernwärme und Quellenangabe

Die Emissionen, die bei der Nutzung von Fernwärme entstehen, stehen in direktem Zusammenhang mit den Emissionen, die in der Fernwärmeproduktion entstehen.

Tabelle 14: Emissionsfaktoren Fallbeispiele

Fallbeispiel	*Emissionsfaktor laut Quellenangabe*[3]	
01 Darmstadt	21 g/kWh	FW-Netz Darmstadt Nord
02 Freiburg	121,4 g/kWh	Energiezentrale Staufen
03 Heilbronn	136,8 g/kWh	Heizwassernetz Heilbronn
04 Karlsruhe	78 g/kWh	Karlsruher Fernwärmenetz
05 Tübingen	42,5 g/kWh	Netzverbund Süd

6 Bewertung von Gesamtkosten und Emissionen

Auffällig ist, dass die Emissionen stark zurückgehen, wenn bei den versorgten Objekten eine PV-Anlage involviert ist, deren Strom in einer Wärmepumpe genutzt wird. Das zeigt sich im Vergleich der Varianten *„X.2x Wärmepumpe (100% Heizleistung), 100 % Fremdbezug*“ mit *„X.3x Wärmepumpe (100% Heizleistung), PV YY kWel., Kundenanlage*“ und beim Vergleich der Varianten *„X.4x Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); PV YY kWel., Kundenanlage*“ und *„X.5x Wärmepumpe (30% Heizleistung), Erdgaskessel (70% Heizleistung); Fremdbezug 100%*“.

Bei der Fernwärmeversorgung hat der Nutzer des Objektes keinen direkten Einfluss auf die Emissionen. Hier liegen die Emissionskennwerte zwischen 21 (bzw. 23,1) g/kWh und 136,8 (bzw. 150,48) g/kWh. Diese Diskrepanz führt dazu, dass die Emissionen im Beispiel Darmstadt nur 10% der Vergleichsvariante mit Erdgaskessel erreichen und mit Abstand den geringsten Wert der Varianten zeigen. Im Beispiel Heilbronn mit sehr hohen spezifischen Emissionen entsprechen die absoluten Emissionen etwa 60% der Vergleichsvariante mit Erdgaskessel.

Die in jedem Beispiel günstigste Variante ist *„X.61x PV YY kWel., WP (30%), KWK (30%), Gaskessel (40%) Kundenanlage*“. Hier sind im Betrieb geringen Emissionen nach der Fernwärmevariante (zwischen 19% und 56% der Vergleichsemissionen der Erdgaskessel-Variante) und die geringsten Gesamtkosten (Investition und Betrieb) zu erwarten (zwischen 48% und 93% verglichen mit der Erdgaskessel-Variante).

[3] Siehe jeweiliges Fallbeispiel