

# **Erstellung einer Machbarkeitsstudie für die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler**

mit den Hauptbezugsthemen klimaneutrale  
Energieerzeugung und Energieeinsparung

**Im Rahmen des Lokalen Energiemanagements**

**an der Technischen Hochschule Köln**

Modulleiter / in: Prof. Dr. Ulf Blieske und Eva-Maria Grommes

Auftraggeber:innen: Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler



i.A. von Bürgermeister Guido Orthen

Ansprechpartnerin: Angela Amatulli

Abgabedatum: 15.01.2023

## Erklärung

Wir versichern, dass wir die vorliegende Hausarbeit-einschließlich eventueller beigefügter Zeichnungen, Kartenskizzen und Darstellungen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt haben. Alle Stellen der Arbeit, die mit dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, haben wir in jedem Fall unter Angabe der Quellen als Entlehnung deutlich gemacht.

<b>Vorname</b>	<b>Nachname</b>	<b>Matrikel Nummer</b>	<b>Unterschrift Köln, 15.01.2023</b>
Jonas	Büche	11130210	
Fares	Dejoui	11120993	
Maximilian	Koch	11125098	
Lukas	Masullo	11113950	
Mariem	Mekki	11127633	
Michael	Nolde	11134309	
Philipp	Otten	11134213	

## **Keywords**

Photovoltaik

Wärme

Energieeffizienz

Wirtschaftlichkeit

Energiesystemmodellierung

Ökobilanz

## Abstract

Die nachfolgende Machbarkeitsstudie umfasst das Potential für eine Umstellung von fossilen Energieträgern auf eine regenerative Energieversorgung für die städtischen Liegenschaften der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler. Nach der Flutkatastrophe 2021 sind weite Teile der Gebäude und Energietechnologien in dem betrachteten Gebiet zerstört. Im Rahmen des Wiederaufbaus der öffentlichen Liegenschaften zielt die Stadt auf eine Energieversorgung unabhängig von fossilen Energieträgern ab. Aktuell werden die 36 betrachteten energierelevanten Liegenschaften hauptsächlich mit fossilen Energieträgern versorgt.

Das gesamte PV-Potential bei maximaler Dachbelegung wird mit der Simulationssoftware *PV\*Sol* bestimmt und mit 2.176 kWp ausgelegt. Insgesamt können jährlich etwa 2.000 MWh Solarstrom erzeugt werden. Das Investitionsvolumen der PV-Anlagen beläuft sich auf rund 3 Mio. €. Des Weiteren wird ein innovatives *semi-mobiles plug & play Eigenstromkraftwerk* vorgestellt, welches insbesondere den Hochwasserschutz integriert. Die Wärmeversorgung der Gebäude kann durch die Anbindung an das Fernwärmenetz oder den Einsatz von Wärmepumpen gewährleistet werden. Insgesamt können 19 Gebäude an das Fernwärmenetz angeschlossen und bis zu 21 Wärmepumpen genutzt werden. Zudem wird ein Energieeffizienzmaßnahmenplan vorgestellt, welcher Gebäudesanierungen und ein Energiemanagementsystem für Kommunen beinhaltet. Alle gewählten Modernisierungsmaßnahmen basieren auf einer erstellten Python-Simulation mittels *PyPSA*. Weiterhin werden die vorgestellten Maßnahmen in einer Ökobilanz sowie einer Wirtschaftlichkeitsrechnung auf die Erreichung der vorher festgelegten Ziele geprüft. Sollten alle Modernisierungsmaßnahmen durchgeführt werden, kann nach den ermittelten Werten der Ökobilanz eine klimaneutrale Energieversorgung erreicht werden. Als Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegen die gesamten Investitionskosten im teilsanierten Zustand bei rund 8,25 Mio. €. Die Förderhöhe beläuft sich dabei auf rund 760.000 €. Die jährlichen Betriebskosten können um etwa 70 % gesenkt werden. Die durchschnittliche Amortisationszeit bei neuen Energieverträgen beträgt 15 Jahre. Alle Ergebnisse werden in einem Datentool für die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler zusammengefasst.

The following feasibility study covers the potential for a conversion from fossil energy sources to a regenerative energy supply for the municipal properties of the city of Bad Neuenahr-Ahrweiler. After the flood disaster in 2021, large parts of the buildings and energy technologies in the area under consideration were destroyed. In the context of the reconstruction of the public properties, the city aims at an energy supply independent of fossil energy sources. Currently, the 36 considered energy-relevant properties are mainly supplied with fossil energy sources.

The total PV potential at maximum roof occupancy is determined with the simulation software *PV\*Sol* and designed with 2,176 kWp. In total, about 2,000 MWh of solar electricity can be

generated annually. The investment volume of the PV systems amounts to about 3 million €. Furthermore, an innovative *semi-mobile plug & play* own power plant is presented, which integrates flood protection in particular. The heat supply of the buildings can be ensured by connecting them to the district heating network or by using heat pumps. A total of 19 buildings can be connected to the district heating network and up to 21 heat pumps can be used. In addition, an energy efficiency plan is presented, which includes building renovations and an energy management system for municipalities. All selected modernization measures are based on a created Python simulation using *PyPSA*. Furthermore, the presented measures are tested in a life cycle assessment as well as in an economic efficiency calculation for the achievement of the previously defined goals. If all modernization measures are implemented, a climate-neutral energy supply can be achieved according to the values determined in the life cycle assessment. As a result of the economic feasibility study, the total investment costs in the partially refurbished state are around 8.25 million €. The subsidy amounts to about 760,000 €. The annual operating costs can be reduced by around 70 %. The average payback period for new energy contracts is 15 years. All results are summarized in a data tool for the city of Bad Neuenahr-Ahrweiler.

## Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
Formelverzeichnis .....	XI
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1 Einleitung .....	1
2 Rahmenbedingungen .....	2
2.1 Problemstellung und Zielsetzung .....	2
2.2 Datengrundlage und Stand der Technik.....	3
2.3 Vorgehensweise .....	5
2.3.1 PV*Sol.....	6
2.3.2 Energiesystemmodellierung mit PyPSA .....	7
2.3.3 Ökobilanz .....	7
2.3.4 Dynamische Amortisationsberechnung .....	8
2.3.5 Ranking-Methode.....	8
3 Energieerzeugung .....	8
3.1 Photovoltaik .....	9
3.1.1 Lokale Voraussetzungen .....	9
3.1.2 Auswahl der Komponenten .....	9
3.1.3 Verwendete Programme .....	10
3.1.4 Lastgang .....	11
3.1.5 Ergebnisse .....	12
3.1.6 Fehlerbetrachtung .....	15
3.2 Innovatives Solar-Eigenstrom-Kraftwerk .....	15
3.2.1 Firmenportrait.....	16
3.2.2 Hintergrund und Beschreibung des Konzeptes.....	16
3.2.3 Beschreibung der Komponenten .....	17
3.2.4 Spezifischer Beitrag im Ahrtal .....	19

3.3	Wärmeerzeugung .....	22
3.3.1	Allgemeine Daten und Randbedingungen .....	22
3.3.2	Wärmepumpe.....	24
3.3.3	Fernwärme.....	26
3.3.4	Wärmespeicher .....	30
3.3.5	Heizungsperipherie .....	30
3.3.6	Ergebnisse .....	31
3.3.7	Fehlerbetrachtung .....	32
4	Energieeffizienz-Maßnahmenplan .....	32
4.1	Kommunales Energiemanagement.....	32
4.1.1	Nicht-investives Einsparpotential.....	33
4.1.2	Energiemanagementsoftware und Messstellenkonzept.....	35
4.2	Energetische Gebäudesanierung.....	37
4.2.1	Außenwände.....	40
4.2.2	Fenster.....	42
4.2.3	Kellerdecke / Bodenplatte .....	44
4.2.4	Oberste Geschossdecke .....	46
4.2.5	Dach .....	48
4.2.6	Ergebnisse .....	50
4.2.7	Fehlerbetrachtung .....	51
5	Energiesystemmodellierung .....	52
5.1	Vorgehen.....	52
5.1.1	Annahmen.....	53
5.1.2	Simulation mit automatischer Kostenoptimierung.....	58
5.1.4	Simulation mit definierten Komponenten .....	60
5.2	Dimensionierung der Komponenten der Energiesysteme .....	60
5.3	Ergebnisse.....	64
5.4	Fehlerbetrachtung.....	67
7	Ökobilanz .....	70
7.1	Emissionspotentiale.....	70

7.2	Lebenszyklus/Nutzung.....	71
7.3	Betrachtung der Komponenten .....	72
7.4	Ergebnisse.....	74
7.4.2	Treibhauspotential.....	75
7.4.3	Eutrophierungspotential .....	76
7.4.5	Versauerungspotential .....	78
7.5	Fehlerbetrachtung.....	79
8	Wirtschaftlichkeit .....	79
8.1	Methodik.....	79
8.2	Annahmen .....	80
8.3	Förderungsmöglichkeiten.....	80
8.5	Ergebnisse.....	82
8.5.1	Investitionskosten.....	82
8.5.2	Jährliche Kosten bei steigenden Energiepreisen .....	83
8.5.3	Amortisation und Gewinn nach 20 Jahren .....	84
8.6	Fehlerbetrachtung.....	85
9	Vorstellung des Datentools.....	86
10	Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlung.....	88
10.1	Photovoltaik .....	90
10.2	Wärmeversorgung .....	90
10.3	Kommunales Energiemanagement.....	91
10.4	Gebäudesanierungen .....	92
10.5	Ökobilanz.....	93
10.6	Leitfaden.....	94
11	Fazit.....	96
	Literaturverzeichnis .....	XIV
	Anhang.....	XXII



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leistung, Ertrag und Stromverbrauch mit den zehn größten PV-Systemen.....	12
Abbildung 2: Leistung, Ertrag und Investitionskosten der zehn größten PV-Systeme .....	14
Abbildung 3: Ballastmodule .....	17
Abbildung 4: Steuerschrank.....	18
Abbildung 5: Batteriezellen.....	19
Abbildung 6: Nutzung der PV-Energie .....	21
Abbildung 7: Deckung des Stromverbrauchs.....	21
Abbildung 8: aktuelle Heizsysteme der Liegenschaften .....	23
Abbildung 9: Fernwärmenetz der Stadt Bad Neuenahr.....	27
Abbildung 10: energetische Bewertung des Fernwärmenetzes .....	28
Abbildung 11: Anteil der Fernwärmeverteilung der Liegenschaften .....	29
Abbildung 12: Gesamte Wärmeverteilung aller Liegenschaften nach Modernisierung.....	31
Abbildung 13: Wärmedurchgangskoeffizienten nicht opaker Bauteile im Urzustand.....	39
Abbildung 14: Ausschnitt aus dem Tool für die Gebäudesanierung.....	40
Abbildung 15: Ergebnisse der Außenwandsanierungen .....	41
Abbildung 16: Ergebnisse der Fenstersanierungen .....	43
Abbildung 17: Ergebnisse der Boden und Kellerdeckensanierung.....	45
Abbildung 18: Ergebnisse der obersten Geschossdeckensanierungen .....	47
Abbildung 19: Ergebnisse der Dachsanierungen.....	49
Abbildung 20: Leistungszahlprofile der Wärmepumpen .....	58
Abbildung 21: Schema der PyPSA-Simulation mit automatischer Dimensionierung .....	59
Abbildung 22: Schemazeichnung der PyPSA-Simulation mit definierten Komponenten .....	60
Abbildung 23: Simulationsergebnis der automatischen Kostenoptimierung für das Rathaus	62
Abbildung 24: Dimensionierung der Energiesysteme.....	63
Abbildung 25: Dimensionierung der Energiespeicher .....	64
Abbildung 26: Dimensionierung - PV-Belegung.....	64
Abbildung 27: Energiebedarf aller Liegenschaften.....	65

Abbildung 28: Energiebezug aller Liegenschaften .....	66
Abbildung 29: Nutzungsgrade der Photovoltaiksysteme .....	67
Abbildung 30: Berechnungsausschnitt aus der Ökobilanz .....	73
Abbildung 31: Vergleich der gesamten Treibhauspotentiale .....	75
Abbildung 32: Ergebnisse der LC-Emissionen des Treibhauspotentials .....	76
Abbildung 33: Jährliches Eutrophierungspotential aus Nutzung / Betrieb .....	76
Abbildung 34: Ergebnisse der LC-Emissionen des Eutrophierungspotentials .....	77
Abbildung 35: Jährliches Versauerungspotential aus Nutzung / Betrieb .....	78
Abbildung 36: Ergebnisse der LC-Emissionen des Versauerungspotentials .....	78
Abbildung 37: Vergleich der gesamten Investitionskosten .....	82
Abbildung 38: Anteile der jährlichen Kosten .....	83
Abbildung 39: Vergleich der durchschnittlichen Amortisationszeiten.....	84
Abbildung 40: Kumulierte Gewinne nach 20 Jahren .....	85
Abbildung 41: Boxplot der durchschnittlichen Amortisationszeit [eigene Darstellung] .....	86
Abbildung 42: Suchfunktion des Datentools .....	87
Abbildung 43: Leitfaden der Machbarkeitsstudie .....	95

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Ausgeschlossene Gebäude für Photovoltaikanlagen .....	9
Tabelle 2: Verwendete Lastprofile (Strom).....	11
Tabelle 3: Maximale Belegung, Ertrag und Investitionskosten der PV-Systeme .....	13
Tabelle 4: Gebäudeliste für die PV-Auslegung durch die abc GmbH.....	19
Tabelle 5: Übersicht der Wärmepumpenauslegung .....	24
Tabelle 6: Übersicht der Wärmepumpentypen.....	25
Tabelle 7: Fernwärmeversorgung nach der gesamten Modernisierung .....	29
Tabelle 8: nicht-investive Einsparpotentiale.....	33
Tabelle 9: Priorisierungsliste der Liegenschaften.....	35
Tabelle 10: Durch Kommunalrichtlinie für Energiemanagement geförderte Software .....	36
Tabelle 11: Die gesamten Sanierungsergebnisse.....	50

Tabelle 12: Simulationsannahmen.....	53
Tabelle 13: Bereitschaftsverluste nach Speichergröße .....	54
Tabelle 14: Einspeisevergütung EEG 2023 (Anlagenanmeldung ab 01.01.2023) .....	55
Tabelle 15: Betrachtete Komponenten der Energiesysteme .....	56
Tabelle 16: Gebäude mit potentieller Eignung für Abwasserwärmepumpen .....	57
Tabelle 17: Überprüfung der minimalen Energie der Wärmespeicherdimensionierung .....	69
Tabelle 18: Überprüfung der Bereitschaftsverluste der Wärmespeicherdimensionierung .....	69
Tabelle 19: Ergebnis der Simulation zur Überprüfung der Wärmespeicherdimensionierung .....	69
Tabelle 20: Durchschnittspreise der Technologien .....	80
Tabelle 21: BAFA-Fördersätze für die Modernisierung von Nichtwohngebäuden .....	81
Tabelle 22: priorisierte Empfehlungstabelle .....	88
Tabelle 23: Erläuterung der Empfehlungstabelle .....	89

## Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Kapitalwertes eines Investitionsvorhabens.....	8
Formel 2: Berechnung des energetischen Einsparpotentials in Anlehnung an VDI 3807 .....	34
Formel 3: Formeln zur Berechnung des jährlichen Wärmeverlustes .....	38
Formel 4: Beispielhafte Berechnung der Einspeisevergütung.....	55

## Abkürzungsverzeichnis

€ .....	<i>Euro</i>
€ pro m <sup>2</sup> .....	<i>Euro pro Quadratmeter</i>
€/kWh.....	<i>Euro Pro Kilowattstunde</i>
€/kWp.....	<i>Euro pro Kilowatt-Peak</i>
€/m <sup>2</sup> .....	<i>Euro Pro Quadratmeter</i>
°C.....	<i>Grad Celsius</i>
3D .....	<i>dreidimensional</i>
A .....	<i>Fläche des Bauteils</i>
AB .....	<i>Abwasser</i>
abc.....	<i>advanced biomass concepts</i>
AG.....	<i>Aktiengesellschaft</i>
App.....	<i>Application</i>
BAFA.....	<i>Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle</i>
BDEW .....	<i>Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V</i>
BEG .....	<i>Bundesförderung für effiziente Gebäude</i>
BMWi .....	<i>Bundeswirtschaftsministerium</i>
bzw.....	<i>Beziehungsweise</i>
C .....	<i>Kapitalwert</i>
cm .....	<i>Zentimeter</i>

ct/kWh	cent pro Kilowattstunde
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EN	Europäischen Normen
ES	Eigenstromerzeugungseinheit
fCO <sub>2</sub> eq	Kohlenstoffdioxid-Emissionsfaktor
F <sub>x</sub>	Temperaturkorrekturfaktor eines Bauteils
g/kWh	Gramm pro Kilowattstunde
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GWh/a	Gigawattstunde pro Jahr
H <sub>T</sub>	Flächenbezogener Transmissionswärmeverlust
Hbj	Halbjahr
HLWP	Hochleistungswärmepumpe
InBiS	Bidirektionale Nutzung von industriellen Batteriespeichern
INM	Institut für Nachhaltigkeitsmanagement
IoT	Internet of Things
iSFP	individuellen Sanierungsfahrplanes
ISO	the International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
JAZ	Jahresarbeitszahl
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm
kg/a	Kilogramm pro Jahr
Kom.EMS	Kommunales Energiemanagement-System
kWh/a	Kilowattstunde pro Jahr
kWh/m <sup>2</sup>	Kilowattstunde pro Quadratmeter
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kWp	Kilowatt-Peak
l/a	Liter pro Jahr
LC	Lebenszyklus
LCA	Life Cycle Assessment
LE	Leistungselektronikeinheit
LED	Licht emittierende Diode
LOP	Leistungsoptimierer
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup> /a	Kubikmeter pro Jahr
Mio	Millionen
MPP	Maximum Power Point Tracking
MWh	Megawattstunde
MWh/a	Megawattstunde Pro Jahr
MWp	Megawatt-Peak
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
Nr	Nummer
NRW	Nordrhein-Westfalen
OGD	Oberste Geschossdecke
OMS	Open Metering System
PV	Photovoltaik
PV*Sol	Dynamisches Simulationsprogramm für Photovoltaik-Anlagen mit Batteriesystemen
PyPSA	Python for Power System Analysis
QR	Quick Response
Q <sub>T</sub>	Wärmeverlust
RLM	Registrierende Leistungsmessung
SEK	semi-mobiles plug & play Eigenstromkraftwerk
SG	Smart Grid
SMA	System-, Mess- und Anlagentechnik

SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SSV	Stromspeicherversorgungseinheit
STC	Standardtestbedingungen
THG	Treibhausgas
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung
U <sub>WB</sub>	Wärmebrückenzuschlag
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VK	Virtuelles Kraftwerk
W	Watt
W/m <sup>2</sup>	Watt pro Quadratmeter
W/m <sup>2</sup> *K	Watt pro Kubikmeter Kelvin
WDVS	Wärmedämm-Verbundsystem
Web	World Wide Web
Wh	wattstunde
Wp	Watt-Peak
WP	Wärmepumpe
WR	Wechselrichter
XPS	Extrudierter Polystyrol-Hartschaum

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Studiengangs der erneuerbaren Energien an der *Technischen Hochschule Köln* wird im Modul *Lokales Energiemanagement* eine Machbarkeitsstudie durchgeführt.

Die nachfolgende Studie befasst sich mit Modernisierungen im Bereich Energie und Versorgungssicherheit für die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler. Aufgrund der verheerenden Flut im Ahrtal 2021 ist der Klimaschutz ein wichtiger Bestandteil im Wiederaufbau der Stadt. Zerstörte Gebäude sollen mit einer effizienten und klimaneutralen Energieversorgung wieder aufgebaut werden. Zudem bieten effizientere Managementsysteme und nachhaltige Sanierungen ein zusätzliches Einsparpotential für die Stadt an. Durch diese Maßnahmen sollen die festgelegten Klimaziele der Stadt und des Kreis Ahrweiler erreicht werden.

In der durchgeführten Studie werden insgesamt 36 verschiedene Liegenschaften der Stadt betrachtet. Dafür werden individuelle Energiesysteme für jede Liegenschaft mittels einer erstellten Python-Simulation ausgelegt. Für die Erzeugung von elektrischer Energie wird zusätzlich eine Firma vorgestellt, welche semi-mobile Photovoltaiksysteme anbietet. Der örtliche Energieversorger hat außerdem den Ausbau von Fernwärme avanciert und konkrete Pläne beschlossen, wodurch für einige Liegenschaften neue Versorgungsmöglichkeiten bereitstehen. Alle geplanten Maßnahmen werden in einer Ökobilanz betrachtet, sowie im Hinblick auf die vorgegebenen Klimaziele der Stadt bewertet. Darüber hinaus sind die Maßnahmen in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse bilanziert, worin mögliche Förderprogramme berücksichtigt sind. Am Ende der Studie ist ein erstelltes und verwendetes Datentool ausführlich dokumentiert, welches alle ermittelten Datensätze übersichtlich darstellt. Abschließend werden eine Handlungsempfehlung und ein Fazit für die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler ausgesprochen.

## 2 Rahmenbedingungen

In dem nachfolgenden Kapitel wird die in dieser Machbarkeitsstudie begutachtete Problemstellung sowie die damit verbundene Zielsetzung erläutert. Darüber hinaus werden die Datengrundlage und der Stand der Technik, auf welchen diese Studie basiert, vorgestellt. Abschließend wird die Vorgehensweise und Methodik genauer betrachtet.

### 2.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Herausforderung der Energieversorgung der Stadt liegt in ihrer Abhängigkeit von fossilen Energieträgern. Beispielsweise wird die Wärmeerzeugung größtenteils durch Gasheizungen gedeckt. Eintretende Krisensituationen können somit nicht abgefangen werden, da eine Abhängigkeit von den benötigten Energieträgern besteht. Um die Abhängigkeit zu verringern und die Versorgungssicherheit zu erhöhen, strebt die Stadt eine lokale und regenerative Energieversorgung an. Zusätzlich sollen die jährlichen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verringert werden, sodass die angestrebten Klimaziele eingehalten werden können. Im Jahr 2016 setzte sich Bad Neuenahr-Ahrweiler als Ziel, die THG-Emissionen bis 2050 um 80 % zum Referenzjahr 1990 zu senken [1]. Darüber hinaus strebt die Bundesregierungen ebenfalls zusätzliche Klimaziele an, welche nachfolgend zitiert sind:

---

*„Deutschland strebt die Treibhausgasneutralität der Stromerzeugung bis zum Jahr 2045 an. Außerdem soll der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix bis 2030 auf 80 % steigen. Einen maßgeblichen Beitrag dazu können Photovoltaik-Anlagen leisten, die in größerem Umfang als bisher aufgestellt werden sollen.“ [2]*

---

Diese Machbarkeitsstudie hat sich als Ziel gesetzt, die Anforderungen der Energiewende in den betrachteten Liegenschaften umzusetzen. Dabei wird der Fokus auf die Eigenstromversorgung durch Photovoltaik, sowie die klimaneutrale Wärmeversorgung der Gebäude gelegt. Ein weiteres Ziel ist es, die Energieeffizienz der Gebäude zu steigern. Dies soll durch mögliche Gebäudesanierungen und die Einführung eines kommunalen Energiemanagements in der Stadt gelingen.

Der lokale Energieerzeuger und Verwalter des Fernwärmenetzes sind die *ahr-tal-werke GmbH*. Zu Beginn der Studie wurden Optimierungen an der Infrastruktur des Stromnetzes als betrachteter Aspekt vorgesehen. Die Netze sind allerdings Eigentum der rechtlich eigenständigen *ahr-tal-werke GmbH*, weshalb das Thema nicht weiter betrachtet werden kann. Außerdem wird die Erzeugung der Fernwärme für das bestehende Fernwärmenetz nicht weiter berücksichtigt, da

nach Angaben der Stadtverwaltung Planungen für die Erzeugung bereits stattfinden. Für die Planungen der Wärmeversorgung über Fernwärme wurden verfügbaren Netzausbaupläne der *ahrtaI-werke GmbH* genutzt. Die beschriebenen Änderungen an den betrachteten Themen der Machbarkeitsstudie erfolgen in Rücksprache mit der Stadtverwaltung.

Aufgrund der Flut 2021 ist der Hochwasserschutz ein wichtiger Bestandteil des Wiederaufbauplans der Stadt geworden, weshalb hochwasserbeständige Lösungen zur Energieversorgung angestrebt werden müssen. Deshalb werden mobile Technologien zur Stromerzeugung aufgeführt und Dämmstoffe eingeplant, welche an den anfälligen Stellen hochwasserresistenter sind.

## 2.2 Datengrundlage und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die vorliegenden Gegebenheiten und die zugrundeliegende Datengrundlage in der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler aufgeführt. Zudem werden die Potentiale von betrachteten regenerativen Energieerzeugern dargelegt.

Die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler ist eine talgelegene Kurstadt im Norden von Rheinland-Pfalz. Im Juli 2021 wurde der größte Teil der Stadt aufgrund von starken Regenfällen mit Hochwasser überflutet. Bei diesem Hochwasser wurden viele Gebäude nahe der Ahr zerstört oder geflutet. Insgesamt wurden etwa 5.000 Häuser und das Wärme-, Strom- und Kanalisationsnetz beschädigt [3]. Mehr als ein Jahr später sind Beseitigungen der Flutschäden nur zum Teil erfolgt. Der Wiederaufbau, sowie die vollständige Beseitigung, werden nach Angaben des Maßnahmenplanes zum Wiederaufbau der Stadt noch mehrere Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch nehmen [4].

Seit 2017 werden von der Stadt bereits Maßnahmen für Klimaschutzmanagement durchgeführt. So wurde in den Grundschulen in Heimersheim und Ahrweiler, sowie der Erich-Kästner Realschule die Beleuchtung teils durch LED-Lampen ersetzt. 2019 wurden zudem 190 alte Straßenlaternen mit neuen Leuchtmitteln ausgestattet. Außerdem wurde 2022 ein Förderprogramm für Lastenfahräder erstellt, was den Gebrauch von Autos senken soll. [1]

Die Hauptdatengrundlage für diese Machbarkeitsstudie ist der Energiebericht der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler aus dem Jahr 2018. Die Daten für den Strom- und Wärmeverbrauch wurden als Ausgangswert für alle Berechnungen angenommen. Die Angaben bezüglich der jeweiligen Wärmeerzeuger in den Liegenschaften werden als noch aktuell angenommen. Der Bau- und Sanierungsstand der flutbetroffenen Gebäude wurde unter Berücksichtigung der Ereignisse durch das Hochwasser ergänzt. Der Energiebericht aus dem Jahr 2018 wurde in den letzten Jahren nicht aktualisiert, weshalb wichtige Datensätze für Berechnungen und Annahmen fehlen. Daher wurde eine eigens erstellte Umfrage an die zuständigen Gebäudemanager:innen gesendet, um fehlende Informationen einzuholen. (Siehe *Anhang 1.5*)



Die im Energiebericht angegebenen Heizwärmebedarfe pro m<sup>2</sup> können teilweise aus Plausibilitätsgründen nicht mit der jeweiligen Bezugsfläche der Liegenschaften übereinstimmen. Da für die beheizte Fläche der Gebäude derzeit keine genaueren Daten angegeben werden können, kann der spezifische Heizwärmebedarf pro m<sup>2</sup> nicht neu berechnet werden.

Bei der Flutkatastrophe wurde ein Großteil der archivierten Daten und Baupläne zerstört. Aufgrund dessen konnte bei zehn der betrachteten Liegenschaften kein Bauplan von der Stadtverwaltung zur Verfügung gestellt werden. Zudem sind wenige der bereitgestellten Pläne lückenhaft oder veraltet, wodurch die Planungen erschwert sind. Im Rahmen der Ökobilanz und der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden Emissionen und Energiepreise durch die Verwaltung aktualisiert. Diese bilden die Grundlage für die späteren Berechnungen.

Im Jahr 2014 wurde bereits ein „Integriertes Klimaschutzkonzept“ vom *Institut für angewandtes Stoffstrommanagement* für die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler erstellt. In diesem wurden unter anderem die Potentiale für den Ausbau von regenerativen Energien wie Biomasse, Photovoltaik und Geothermie im Ahrtal untersucht. Die Ergebnisse des Klimaschutzkonzeptes dienen als eine weitere Informationsquelle für die vorliegende Machbarkeitsstudie. [5]

Die Geothermie, welche auch als Erdwärme bezeichnet wird, wurde als Wärmequelle für Erdwärmepumpen untersucht. Allerdings müssen bei der Installation und dem Betrieb dieser Wärmepumpen vorgegebene Gesetze eingehalten werden, welche Grundwasser und die allgemeine Wasserversorgung schützen. Aus dem Klimaschutzkonzept von 2014 geht hervor, dass kein nutzbares Potential für Geothermie ausgewiesen werden kann, da die betrachteten Gebäude im städtischen Raum und in Heilquellenschutzgebieten liegen. Im Bereich der Tiefengeothermie ist ebenfalls kein Potential aufzuweisen, da im Gebiet der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler keine tiefen Aquifere vorhanden sind. Daher wurden weitere Analysen zur Machbarkeit von Geothermie im betrachteten Gebiet nicht durchgeführt. [5]

Ein weiteres Potential für die Erzeugung nachhaltiger Energie ist die vorhandene Biomasse der Stadt. Dabei werden bereits Holzhackschnitzel aus dem vorhandenen Energieholz des kommunalen öffentlichen Waldes erfasst. Die Analyse aus dem Klimaschutzkonzept ergab, dass die energetische Nutzung des Waldes um 2.070 MWh/a erhöht werden kann, ohne den Vorrat des Waldes zu minimieren [5]. Die Nutzung von Holzhackschnitzel zur Wärmeerzeugung, speziell durch Holzhackschnitzelheizungen, wurde in der Machbarkeitsstudie untersucht. Nach Gesprächen mit der Stadtverwaltung wurden diese Energieträger nicht weiter betrachtet, da Holzhackschnitzelheizungen aufgrund der Schadstoffbilanz beim Betrieb von der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler nicht in Erwägung gezogen werden.

Im Folgenden wird auf den technischen Stand der untersuchten Liegenschaften eingegangen. Die Informationen dafür stammen aus dem Energiebericht von 2018, sowie von der Stadtverwaltung. Bisher wurde auf einem Gebäude eine Photovoltaikanlage installiert, die für die

Eigenstromerzeugung genutzt wird. Diese befindet sich seit 2020 auf dem *Mehrzweckgebäude Ramersbach* und hat eine Leistung von 14,75 kWp. Teile der Dachflächen der *Erich-Kästner-Realschule* werden bis 2027 als Pachtflächen vermietet. [6]

Im Bezugsjahr 2018 wurden 27 verschiedene Liegenschaften über Gasheizungen versorgt, jeweils zwei Liegenschaften wurden über Öl und Holzhackschnitzel mit Wärme versorgt, sowie vier Gebäude über einen Fernwärmeanschluss. Bei der Flut wurden die Holzhackschnitzelanlagen zerstört und durch Fernwärmestationen ersetzt. Eine Liegenschaft ist mit einer Wärmepumpe ausgestattet. Der Plan der Stadtwerke ist es, in den kommenden Jahren das Fernwärmenetz weiter auszubauen und die Zahl der Fernwärmeabnehmer im Stadtgebiet zu erhöhen [7]. Laut der gestellten Umfrage läuft die Versorgung von Warmwasser hauptsächlich über dezentrale Durchlauferhitzer, sowie bei sechs Liegenschaften zentral über die Warmwasserboiler. [6]

Vor den Ereignissen der Flut wurden bei einigen Gebäuden bereits Einzelmaßnahmen zur Gebäudesanierung durchgeführt. Bei vielen Liegenschaften, hauptsächlich bei den älteren Gebäuden mit einem Baujahr vor 1985, besteht Sanierungsbedarf und energetisches Einsparpotential. Zudem wurden kommunale Energiesparmaßnahmen wie beispielsweise die Umrüstung von alten Glühbirnen auf LED-Technologie nur vereinzelt vorgenommen. Durch die Flutkatastrophe konnte das kommunale Energiemanagement nicht weiter ausgebaut werden. Zudem müssen vor der Flut geplante Maßnahmen nach den Schadensbeseitigungen neu aufgenommen werden. Durch die Flutkatastrophe wurden viele der betrachteten Liegenschaften stark sanierungsbedürftig, besonders die Kellerbereiche und Haustechnik musste vielerorts wiederhergestellt werden. Manche Liegenschaften wie das *TWIN-Schwimmbad* oder das *Feuerwehrhaus Ahrweiler* müssen komplett neu gebaut werden. Die Pläne für das Schwimmbad sind zum aktuellen Zeitpunkt noch in der Bearbeitung und die Maße des neuen Gebäudes können von der Stadt noch nicht angenommen werden. Daher wird diese Liegenschaft nicht in der Machbarkeitsstudie betrachtet. Für alle anderen Liegenschaften, welche neu gebaut werden müssen, werden die Maße des alten Gebäudes verwendet. Bei diesen wird angenommen, dass sich die Nutzfläche und Maße der Neubauten nur marginal ändern wird. [6]

### 2.3 Vorgehensweise

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Auslegung der kommunalen Liegenschaften mit erneuerbaren Energiekonzepten und die Bestimmung der Einsparpotentiale vorgestellt. Auf Grund des Umfangs von 36 betrachteten und energierelevanten Liegenschaften ist es im Rahmen dieses Projektes nicht möglich, für jedes Gebäude eine detaillierte Analyse vor Ort durchzuführen. Die Anlagen werden auf Basis der in der Datengrundlage beschriebenen verfügbaren Informationen ausgelegt.

Zunächst wird in *Kapitel 3.1* das maximale Potential für Photovoltaikanlagen bestimmt, wobei jede Liegenschaft mit maximaler Dachbelegung unter Beachtung von Verschattungen in *PV\*Sol* simuliert wird. Zudem wird für jede simulierte Anlage ein Kostenvoranschlag erstellt. Anschließend wird das Potential und die Realisierbarkeit von möglichen Wärmeerzeugern analysiert, sowie ein passendes Erzeugungssystem für jede Liegenschaft bestimmt. Das darauffolgende *Kapitel 4.1* behandelt die Abschätzung von Energieeinsparungen durch nicht-investives Energiemanagement unter Anlehnung an *VDI 3807*. Zur Abschätzung des investiven Einsparpotentials wird der Sanierungsstand der Gebäude analysiert und ein Sanierungsplan erstellt.

Auf Basis dieser Daten wird eine Energiesystemmodellierung mit der Open-Source-Toolbox *PyPSA* erstellt, mit welcher die Energiesysteme kostenoptimiert ausgelegt werden. Jede Liegenschaft wird in 500 Iterationsdurchläufen unter variierenden Eingangsparametern wie Energiepreisen und Investitionskosten simuliert. Die Energiepreise variieren im Wertebereich der aktuellen Verträge und Preise bei Neuverträgen im zweiten Quartal 2022. Damit soll eine kostenoptimierte Auslegung aller Systeme bestimmt werden, welche zukünftig steigende Energiepreise berücksichtigt. Unter Betrachtung der Simulationsergebnisse wird ein Energiesystem für jede Liegenschaft bestimmt und die Investitionskosten auf Basis der definierten Leistungen angepasst. In weiteren 500 Simulationsiterationen wird der optimale Energiebezug unter variierenden Annahmen mit definierten Energiesystemen geprüft.

Auf Basis dieser Ergebnisse wird eine dynamische Amortisationsberechnung und eine Ökobilanz in Anlehnung an *DIN EN ISO 14040* durchgeführt, um die Auslegungen auf ihren wirtschaftlichen und ökologischen Nutzen zu prüfen und eine Empfehlung für alle betrachteten Liegenschaften auszusprechen. Mit Hilfe einer Ranking-Methode werden die Liegenschaftsvarianten unter Betrachtung der Ökonomie und Ökologie priorisiert.

Angaben zum Projektmanagement und der Kommunikation mit den Ansprechpartner:innen kann dem

**Anhang 5** entnommen werden. Die Ergebnisse aller Kapitel werden in einem Excel-Datentool aufgelistet, welches der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler als Entscheidungshilfe dienen kann.

### 2.3.1 PV\*Sol

Die Auslegung der Photovoltaikanlagen wird mit der Simulationssoftware *PV\*Sol* der *Valentin Software GmbH* durchgeführt. Mit dieser können PV-Systeme in graphischer 3D-Darstellung ausgelegt und simuliert werden. Dazu verwendet das Programm vordefinierte Standardlastprofile mit Minutenwerten und berechnet den Solarertrag unter Berücksichtigung von Faktoren wie Standort, Solareinstrahlung, Dachneigung, Ausrichtung, Modulkonfiguration und Verschaltung. Außerdem wurde das Designtool *Mounting Systems* für die Auslegung der Unterkonstruktionen verwendet. Damit kann speziell für Flachdächer die Unterkonstruktion passend ausgelegt werden, sodass diese eine optimale Dachneigung und Ausrichtung aufweisen. Darüber hinaus können mit der Software Wind- und Schneelastberechnungen durchgeführt werden.

### 2.3.2 Energiesystemmodellierung mit PyPSA

*PyPSA* ist eine Open-Source-Toolbox für die Simulation und Optimierung moderner Strom- und Energiesysteme mit der Programmiersprache Python. Mit dieser können komplexe Energiesysteme bestehend aus konventionellen Generatoren mit Blockbindung, variabler Wind- und Solarstromerzeugung, Speichereinheiten, Kopplung mit anderen Energiesektoren und gemischte Wechsel- und Gleichstromnetze simuliert werden. *PyPSA* ist so konzipiert, dass es sich mit großen Netzen und langen Zeitreihen skalieren lässt und kann zum Beispiel für die Simulation des europäischen Verbundsystems, bestehend aus den nationalen Übertragungsnetzen und Generatoren, genutzt werden. [8, 9]

Neben der Simulation von Energiesystemen ermöglicht der Funktionsumfang von *PyPSA* die Kostenoptimierung eines Systems. Dabei werden Faktoren wie Investitionskosten, laufende Kosten, Betriebszeitraum und Effizienz der Komponenten des Energiesystems betrachtet, sowie Generatorleistung und Speicherkapazität linear optimiert. [9]

Die Entwicklung des Programms wird vom Fachbereich *Digitale Transformation in Energiesystemen* an der Technischen Universität Berlin betreut. Frühere Versionen wurden von der Gruppe Energiesystemmodellierung am *Institut für Automation und Angewandte Informatik* am Karlsruher Institut für Technologie entwickelt. [10]

### 2.3.3 Ökobilanz

Die Ökobilanz, im deutschen auch Lebenszyklusanalyse und im englischen als Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet, ist ein Werkzeug zur Bilanzierung von Umweltauswirkungen eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung entlang ihres Lebensweges. Dazu gehören sämtliche Umwelteinwirkungen, die während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung sowie den damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozessen entstehen. Dazu gehört beispielsweise die Herstellung von Roh- und Betriebsstoffen. Somit wird nicht nur die Auswirkung auf das Klima, beziehungsweise der Treibhauseffekt betrachtet, sondern auch jegliche Auswirkungen auf die Umwelt, wie zum Beispiel Eutrophierung oder Versauerung. Die generelle Methodik ist durch die Normen *DIN EN ISO 14040*, *14044*, *14067* und *15804* geregelt [11]. Für die Umsetzung dieser Normen werden die Daten aus der *ÖKOBAUDAT* entnommen, einer Emissionsdatenbank des *Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen* [12].

### 2.3.4 Dynamische Amortisationsberechnung

Die dynamische Amortisationsberechnung gehört zu den klassischen Partialmodellen der dynamischen Investitionsrechnung. Die Bestimmung der Amortisationszeit basiert auf der Methodik der Kapitalwertmethode. Sie gibt den Zeitraum an, in dem die eingesetzten Investitionen durch die Einsparungen oder Gewinne wiedergewonnen werden. Die im Zeitablauf  $t$  anfallenden Einzahlungen  $E_t$  sowie Auszahlungen  $A_t$  werden mit dem Kalkulationszins  $i$  abgezinst und so lange kumuliert, bis der Kapitalwert  $C(t)$  positiv ist. Der Kapitalwert  $C$  in einem bestimmten Jahr  $t$  ist in *Formel 1* formal beschrieben. [13]

*Formel 1: Berechnung des Kapitalwertes eines Investitionsvorhabens [13]*

$$C(t) = \sum_{t=0}^t (E_t - A_t) * \frac{1}{(1+i)^t}$$

Eine Investition ist vorteilhaft, wenn ihre Amortisationsdauer geringer ist als ein vorzugebener Grenzwert. Im Falle von Energiesystemen wird geläufig ein Betriebszeitraum von 20 Jahren angesetzt. Dieser richtet sich nach der Lebensdauer der Komponenten und der Förderdauer von Photovoltaiksystemen. Es ist jedoch möglich, dass eine Variante mit höherer Rentabilität eine längere Amortisationszeit aufweist. Aus diesem Grund wird zusätzlich der Kapitalwert nach 20 Jahren betrachtet, um die Vergleichbarkeit der Varianten zu erhöhen.

### 2.3.5 Ranking-Methode

Zur Priorisierung der finalen Ergebnisse und dem Vergleich der Modernisierungsvarianten wird eine Abwandlung der Ranking-Methode verwendet. Mit dieser werden die Modernisierungen

mit Hilfe der Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung der Amortisationszeit, der Gewinne nach 20 Jahren und des Einflusses auf den Treibhauseffekt priorisiert. Die Modernisierungsvorschläge erhalten für jedes Kriterium einen Rang entsprechend ihrer Position im Vergleich zu allen Varianten. Der Durchschnitt bestimmt den finalen Rang in der Priorisierungsliste.

### 3 Energieerzeugung

In diesem Kapitel wird auf das PV-Potential und die klimaneutrale Wärmeversorgung der Liegenschaften eingegangen. Des Weiteren werden die Potentiale untereinander verglichen und bewertet, um die effizienteste Energieversorgung für die betrachteten Gebäude zu ermöglichen. Technologische Innovationen wie Wasserstoffspeicher und Wasserstoff-Blockheizkraftwerke wurden untersucht, jedoch auf Grund von nicht vorhandener Langzeittests und Erfahrungswerten ausgeschlossen.

#### 3.1 Photovoltaik

Im folgenden Kapitel werden die technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen für die Installation einer PV-Anlage auf den untersuchten Liegenschaften betrachtet. Zudem werden mithilfe verschiedener Simulationsprogramme die PV-Anlagen für jedes Gebäude ausgelegt und die Ergebnisse dargestellt.

##### 3.1.1 Lokale Voraussetzungen

Photovoltaikanlagen sind auf Gebäuden laut §4 und §5 der Landesbauverordnung für Rheinland-Pfalz ohne eine spezielle Baugenehmigung installierbar. Dennoch muss darauf geachtet werden, dass die Anlagen nicht auf oder nahe an Natur- und Kulturdenkmälern gebaut werden dürfen. [14] Bei PV-Anlagen ist hinsichtlich des Brandschutzes auf gegebene Gebäudebrandschutzkonzepte zu achten. Durch das Brandschutzkonzept sind unter anderem die Punkte Vorbeugung der Brandentstehung, Verhinderung von Brandausbreitung und Brandweiterleitung festgelegt. Bei der Vorbeugung der Brandentstehung ist bei PV-Anlagen auf Installationsvorschriften und den Blitzschutz nach der Norm *DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3)* zu achten [15]. Durch Prüfung von Richtlinien und Standortbedingungen werden in der *Tabelle 1* die von den PV-Auslegungen ausgeschlossen Liegenschaften aufgelistet.

Tabelle 1: Ausgeschlossene Gebäude für Photovoltaikanlagen

Liegenschaft	Grund des Ausschlusses
Feuerwehrhaus Heppingen	Hohe Verschattung – kein Blitzschutz möglich
Helmut-Gies-Bürgerzentrum Ahrweiler	Dach nicht geeignet für eine PV-Anlage (Dachneigung)
Weißer Turm	Denkmalschutz
Sportplatzgebäude Ahrstadion	Keine Baupläne vorhanden und Gebäudezuordnung per Kartendienst nicht möglich
Betriebshof	Hohe Verschattung durch Bäume
Feuerwehrhaus Gimmingen	Nutzbare Dachfläche zu gering
Stadtbibliothek	Blitzschutz - Dachbedeckung
Sportplatzgebäude Walporzheim	Nutzbare Dachfläche zu gering
Twin-Schwimmbad	Abriss (PV-Planung für das alte Dach erstellt)

### 3.1.2 Auswahl der Komponenten

Für die Auswahl geeigneter Solarmodule wurden verschiedene Hersteller und deren Paneele miteinander verglichen. Bei der Auswahl wurde hauptsächlich auf deutsche Solarmodulhersteller, sowie eine hohe Leistungsgarantie des Produktes geachtet. Für die Planungen werden Module des Herstellers *Luxor SOLAR GmbH* verwendet. Eingesetzt werden monokristalline Module des Typs *ECO LINE HALF CELL M108/400 W*. Die Module haben Leistungsklassen von 400 bis 445 Wp unter Standardtestbedingungen (STC) mit einer Leistungsgarantie von 25 Jahren und sind auf allen Dachformen anwendbar. Alternativ werden ebenfalls die monokristallinen Module *ECO LINE HALF CELL M120 /385 W* genutzt. Bei diesen Modulen liegen Leistungsklassen von 365 bis 385 Wp unter STC-Bedingungen vor. Diese eignen sich besonders für Flachdächer mit großer Aufstellfläche. Die Module zeichnen sich durch eine geringe Verlustleistung bei der Zellverschaltung und einer guten Verschattungstoleranz aus. Dazu bieten die Module ein gutes Schwachlichtverhalten bei Einstrahlungen zwischen 200 und 1000 W/m<sup>2</sup>. [16, 17]

Die Auswahl des Wechselrichters (WR) erfolgt nach Vergleich und Beurteilung der jeweiligen technischen Kennzahlen. Hier wird der Wirkungsgrad, die Lebensdauer, Anzahl der betriebsfähigen Strings und das Preis - Leistungsverhältnis betrachtet [18]. Final werden die WR der deutschen Firma *SMA Solar Technology AG* in den Simulationen verwendet. Beim Anschluss des WR liegt der Fokus auf *Core1*- und *Core2*-Wechselrichtern, die 12 MPP-Tracker und bis zu 24 Strings verwalten können.

Die von der amerikanischen Firma *Tigo Energy* entwickelten Leistungsoptimierer (LOP) *Smart-Modul-Technik TS4* erhöhen die Effizienz von Solarmodulen. Mithilfe dieser können teilverschattete Solarmodule mit einer Optimierungsfunktion ergänzt werden, wodurch sich der Stromertrag erhöht. So kann der Energieertrag der gesamten Solarstromanlage gesteigert werden. Die *TIGO-LOP* sind mit allen Modulen kombinierbar und können bei Modulen im Bestand nachgerüstet werden. Außerdem ermöglichen *TIGO-LOP* eine Zusammenschaltung mehrerer Dachausrichtungen mittels eines MPP-Trackers, um die Erträge weiter zu erhöhen. [19] Genauere Informationen für alle Komponenten sind den Datenblättern in *Anhang 2.3* zu entnehmen.

### 3.1.3 Verwendete Programme

Mit dem Programm *PV\*Sol* lassen sich sämtliche Dachformen als 3D-Objekte simulieren, sowie die technische Simulation und Verschaltung von Wechselrichtern und Modulen planen. Zur schnelleren Berechnung der Dachbemaßung wird ein Excel-Kalkulationstool verwendet, welches *Anhang 2* zu entnehmen ist. Bei Betrachtungen der PV-Auslegungen auf Flachdächern sind zusätzlich Maßnahmen zur Gewährleistung von Wind- und Schneelasten zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird für die Belegung von Flachdächern die Auslegungssoftware der *Mounting Systems GmbH* genutzt.

### 3.1.4 Lastgang

Die Festlegung des Verbrauchsverhaltens und eines Lastprofils ist die Voraussetzung für die Eigenverbrauchsprognose und Auslegung einer geplanten Photovoltaikanlage. Die objektspezifischen Lastprofile sind bei einem Verbrauch von mehr als 100.000 kWh/a bei dem zuständigen Energieversorger einzuholen. Auf Anfrage konnte der Netzbetreiber für die betrachteten Liegenschaften keine Daten angeben, da keine registrierten Leistungsmessungen vorliegen. Aus diesem Grund sind für alle Liegenschaften entsprechende Standardlastprofile verwendet worden. Diese Standardlastprofile dienen dazu, die nicht vorhandenen Lastkurven der Endverbraucher durch eine berechnete und ausreichend genaue Prognose des Stromverbrauchs im Viertelstundentakt zu ersetzen. Die Zuordnung der Lastprofile erfolgte mit Absprache eines externen Unternehmens *Priogo AG* [20]. In der nachfolgenden *Tabelle 2* sind die ausgewählten Lastprofile aller Liegenschaften aufgeführt.

*Tabelle 2: Verwendete Lastprofile (Strom) [eigene Darstellung]*

Gebäudebezeichnung	Lastprofil
Feuerwehrhaus Ahrweiler	Lastgang mit konstantem Stromverbrauch über das gesamte Jahr
Grundschule Bad Neuenahr	Schule 18.500 m <sup>2</sup>



Gebäudebezeichnung	Lastprofil
Grundschule Ahrweiler	Schule 18.500 m <sup>2</sup>
Feuerwehrhaus Heimersheim	Last mit konstanter Last
Turnhalle / Gymnastikhalle, Grundschule Bad Neuenahr	Schule 18.500 m <sup>2</sup>
Turnhalle, Grundschule Ahrweiler	Schule 10.000 m <sup>2</sup>
Kindertagesstätte Heimersheim (Sterntaler)	Lastprofil mit niedrigem Sommeranteil
Erich-Kästner-Realschule plus	Schule 18.500 m <sup>2</sup>
Kindertagesstätte Bachem (Rappelkiste)	Lastprofil mit niedrigem Sommeranteil
Ehemaliges Haus der Jugend	Forschungszentrum
Grundschule Heimersheim mit Turnhalle und Mehrzweckhalle	Schule 10.000 m <sup>2</sup>
Kindertagesstätte Ramersbach (Sausewind)	Lastprofil mit niedrigem Sommeranteil
Alte Schule Walporzheim	Lastprofil mit niedrigem Sommeranteil
Bürgerhaus Heppingen	Gewerbe G0
Mehrgenerationenhaus	Gewerbe G0
Sportplatzgebäude Apollinarisstadion	Gewerbe G2
Kindertagesstätte Bad Neuenahr (Arche Noah)	Lastprofil mit niedrigem Sommeranteil
Sportplatzgebäude Heimersheim	Gewerbe G2
Bürgerhaus Gimmigen	Gewerbe G0
Alte Schule Bachem	Schule 10.000 m <sup>2</sup>
Dorfgemeinschaftshaus Lohrsdorf	Gewerbe G1
Feuerwehrhaus Bad Neuenahr	Lastgang mit konstantem Stromverbrauch über das gesamte Jahr
Dorfgemeinschaftshaus Kirchdaun	Gewerbe G0
Freiwillige Feuerwehr Ramersbach	Lastgang mit konstantem Stromverbrauch über das gesamte Jahr
Bürgerhaus Ehlingen	Gewerbe G0
Rathaus	Gewerbe G0
Feuerwehrhaus Kirchdaun	Lastprofil mit konstanter Last
Mehrzweckgebäude Ramersbach	Lastgang mit konstantem Stromverbrauch über das gesamte Jahr

### 3.1.5 Ergebnisse

Werden alle Dachflächen maximal ausgelegt, können 25 PV-Systeme mit insgesamt 2.176 kWp installiert, sowie jährlich etwa 2.000 MWh Solarstrom erzeugt werden. Somit könnte bis zu 150 % mehr Strom erzeugt werden als im Bezugsjahr 2018 in den betrachteten Liegenschaften verbraucht wurde (Stromverbrauch: 818 MWh). Die Auslegung der zehn größten

Photovoltaikanlagen ist in der folgenden *Abbildung 1* dargestellt. Eine vollständige Übersicht kann *Tabelle 3* entnommen werden.

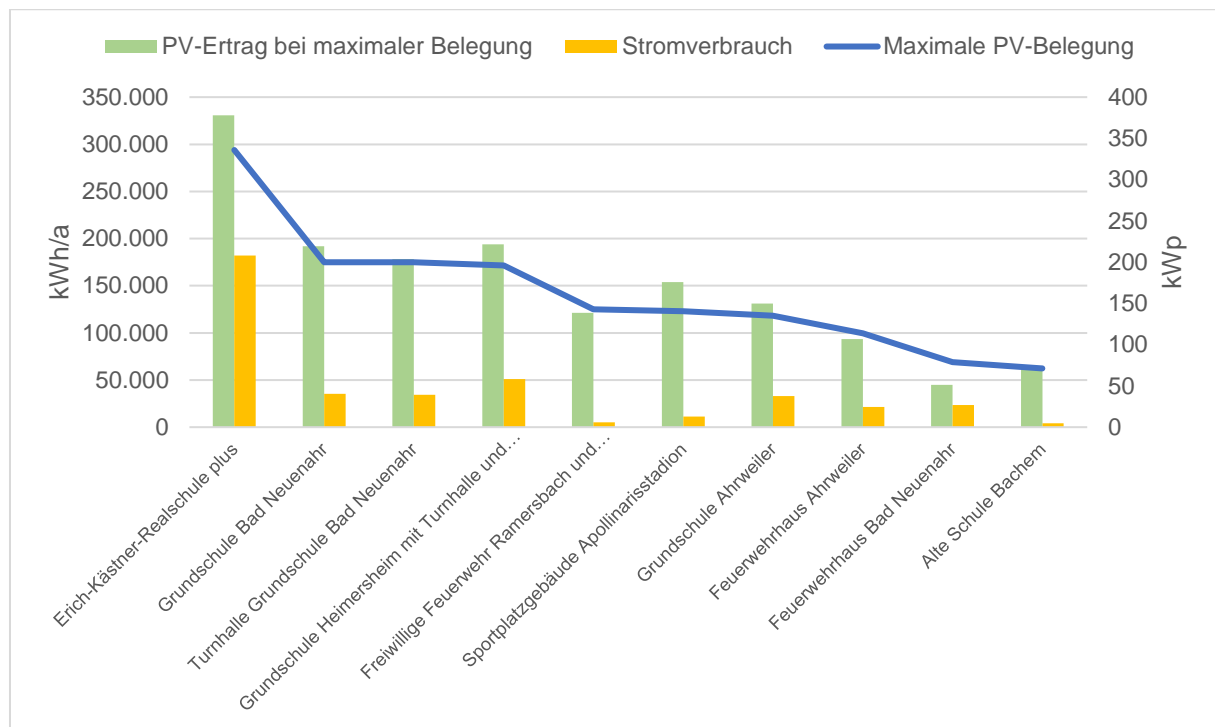


Abbildung 1: Leistung, Ertrag und Stromverbrauch mit den zehn größten PV-Systemen [eigene Darstellung]

Das größte Potential bieten Schulen und Hallen (Turnhallen/Mehrzweckhallen) mit großen Dachflächen. Der Stromertrag übersteigt bei allen betrachteten Liegenschaften den jährlichen Stromverbrauch. Die einzige Ausnahme ist das *Rathaus*, hier können nur 17 % des jährlichen Stromverbrauchs mit der PV-Anlage gedeckt werden. Im Falle des *Mehrzweckgebäudes* und *freiwilligen Feuerwehr Ramersbach* übersteigt der Stromertrag den Stromverbrauch um den Faktor 23. Um die Überproduktion an Strom im kommunalen Rahmen nutzen zu können, empfiehlt sich die Integration der ausgelegten Anlagen in ein virtuelles Kraftwerk (VK). Mit einem VK werden elektrische Erzeuger, Verbraucher und Speichereinheiten vieler Gebäude miteinander gekoppelt. Zu viel produzierter Strom aus einer PV-Anlage in Teileinspeisung kann direkt an einen Verbraucher oder einen Speicher innerhalb des Netzwerkes weitergeleitet werden. Der PV-Eigennutzungsgrad der Anlagen wird somit gesteigert und der Netzbezug reduziert. VK können zusätzlich dazu genutzt werden, die Stromnetze zu entlasten, indem eingespeicherter Strom lokal gespeichert und bei Bedarf abgerufen wird. Große Netzwerke könnten zukünftig zusätzliche Gewinne durch Netzdienstleistungen wie die Bereitstellung von Regenergie erwirtschaften. Die Auslegung eines virtuellen Kraftwerkes sollte für die dimensionierten Anlagen zukünftig geprüft werden. Aufgrund der technologischen und regulatorischen Neuheiten wird ein VK in dieser Studie nicht geprüft. [21]

Eine wirtschaftliche Auslegung muss unter Betrachtung der Investitions- und Energiekosten erfolgen, weshalb Kostenvoranschläge bei der *Priogo AG* eingeholt wurden. Die Angebote enthalten alle PV-Anlagenkomponenten, sowie Kosten für die vollständige Installation. Die spezifischen Angebote sind in *Tabelle 3* aufgelistet.

*Tabelle 3: Maximale Belegung, Ertrag und Investitionskosten der PV-Systeme [eigene Darstellung]*

Bezeichnung	Maximale PV-Belegung [kWp]	PV-Ertrag [kWh/a]	Investitionskosten	Stromverbrauch [kWh/a]
Erich-Kästner-Realschule plus	335,92	330.868	354.027 €	182.062
Grundschule Bad Neuenahr	200	191.880	239.133 €	35.523
Turnhalle Grundschule Bad Neuenahr	200	178.324	239.133 €	34.502
Grundschule Heimersheim mit Turnhalle und Mehrzweckhalle	196,08	193.813	219.730 €	50.996
Freiwillige Feuerwehr Ramersbach und Mehrzweckgebäude Ramersbach	142,8	121.421	127.246 €	5.145
Sportplatzgebäude Apollinarisstadion	140,4	153.907	172.357 €	11.227
Grundschule Ahrweiler	135,2	130.999	208.816 €	33.115
Feuerwehrhaus Ahrweiler	113,6	93.415	219.729 €	21.450
Feuerwehrhaus Bad Neuenahr	78,8	44.715	133.558 €	23.541
Alte Schule Bachem	71,2	64.955	123.598 €	4.236
Turnhalle Grundschule Ahrweiler	69,6	66.358	101.158 €	7.814
Kindertagesstätte Bad Neuenahr und Mehrgenerationenhaus	63,6	62.018	97.242 €	61.896
Kindertagesstätte Bachem - Rappelkiste	59,28	58.747	85.411 €	10.164
Bürgerhaus Heppingen	54	52.449	87.644 €	7.234
Kindertagesstätte Ramersbach Sausewind	45,2	44.715	68.423 €	4.768
Kindertagesstätte Heimersheim Sterntaler	44,8	44.044	77.619 €	9.755
Sportplatzgebäude Heimersheim	42	35.870	93.715 €	13.989
Alte Schule Walporzheim	32,4	30.193	56.473 €	3.281
Rathaus	30,8	26.329	69.415 €	156.291
Feuerwehrhaus Heimersheim	25,6	21.741	47.831 €	6.103
Ehemaliges Haus der Jugend	22,8	16.900	43.950 €	10.302
Bürgerhaus Gimmigen	22,8	21.070	42.489 €	4.306
Dorfgemeinschaftshaus Lohrsdorf	19,6	17.959	38.155 €	2.939
Bürgerhaus Ehlingen	18,4	17.896	36.188 €	3.750
Feuerwehrhaus Kirchdaun	11,2	8.056	25.188 €	2.195

Eine grafische Darstellung der zehn größten Anlagen mit den Investitionskosten ist *Abbildung 2* zu entnehmen.

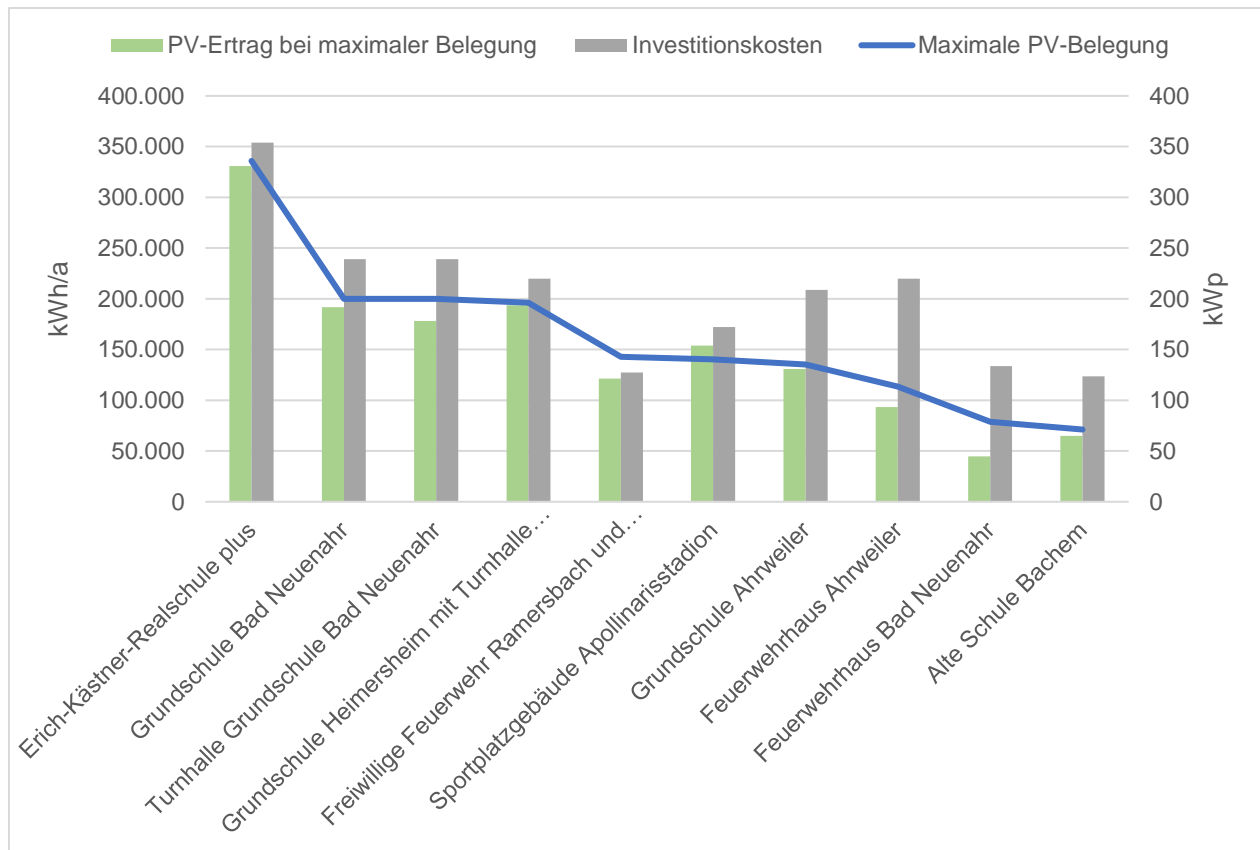


Abbildung 2: Leistung, Ertrag und Investitionskosten der zehn größten PV-Systeme [eigene Darstellung]

Das Verhältnis aus Stromertrag und Investitionskosten weist teilweise große Differenzen auf, zum Beispiel beim *Feuerwehrhaus Ahrweiler*. Aus diesem Grund wird in *Kapitel 5* im weiteren Verlauf detaillierter auf die bedarfsgerechte Auslegung eingegangen. Alle *PV\*Sol*-Berichte, sowie die Angebote für alle Anlagen, sind dem *Anhang 2.1* zu entnehmen.

### 3.1.6 Fehlerbetrachtung

Aufgrund der vorliegenden Datengrundlage fallen die Ergebnisse der Simulationen ungenau aus. Zum einen ist bei der Flut ein Teil der benötigten Baupläne zerstört worden, sodass Informationen zur Dachbeschaffenheit und den Bemaßungen nicht eindeutig ersichtlich sind. Die entsprechenden Liegenschaften wurden mit Hilfe von Online-Kartendiensten bemaßt, wodurch Ungenauigkeiten und Abweichungen zu tatsächlichen Längen auftreten können. Des Weiteren sind bei der Belegung Abstände zu Rändern und Vorrichtungen für den Blitzschutz einzuhalten. Diese sind bei Verwendung von Online-Kartendiensten nicht zu erkennen. Infolgedessen sind Maßnahmen bezüglich des Blitzschutzes bei der PV-Auslegung nach Absprache mit der Stadtverwaltung nicht berücksichtigt worden. Dadurch sind Überdimensionierungen beziehungsweise eine zu hohe Anzahl von geplanten Modulen nicht auszuschließen. Für die benötigten Lastgänge wird bei allen Anlagen ein Standardlastprofil verwendet. Somit können individuelle Verbrauchsprofile der Liegenschaften nicht berücksichtigt werden und die

berechneten Stromerträge von den tatsächlichen Erträgen abweichen. Auf Grund der unklaren Dachbedeckung jedes Gebäudes kann im Einzelnen nicht geprüft werden, ob die passenden Unterkonstruktionen für die Module am Markt verfügbar sind. Daher werden in den erstellten Angeboten standardisierte Unterkonstruktionen verwendet, welche auf jeder Dachform eingesetzt werden können. Hierbei ist zusätzlich die Gültigkeit der vorgelegten Angebote nicht gewährleistet, da diese bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Machbarkeitsstudie angefertigt worden sind. Bei den aktuellen Preisschwankungen können die Preise der Komponenten am Markt höher sein.

## 3.2 Innovatives Solar-Eigenstrom-Kraftwerk

In diesem Abschnitt erfolgt die Darstellung eines innovativem Solar-Eigenstrom-Kraftwerkes. Es folgt die Kurzvorstellung eines Unternehmens, welche diese Kraftwerke plant und umsetzt, sowie der anschließenden Erläuterung zur möglichen Bedeutung für die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler an einem Beispielobjekt. Sowohl in der energetischen Simulation als auch in der wirtschaftlichen Betrachtung dieses Projektes ist das nachfolgende Konzept nicht berücksichtigt.

### 3.2.1 Firmenportrait

Die *abc GmbH*, kurz für *advanced biomass concepts GmbH* (übersetzt: fortschrittliche Energie- & Recyclingkonzepte), ist ein international tätiger technischer Projektentwickler mit Sitz in Köln. Das Ingenieurbüro entwickelt gemeinsam mit Partner:innen Umwelttechnikanlagen und projiziert und betreibt eigenverantwortlich komplette Anlagensysteme im In- und Ausland. Die GmbH ist eine Ausgründung von Bioenergie-, Reststoff- und Solar-Experten des gemeinnützigen *Technologie-Transfer-Zentrums Bremerhaven*. Das Ziel des Unternehmens ist es, wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen für Firmenkunden anzubieten. Die Haupttätigkeitsfelder umfassen die Projektentwicklung für Energieeffizienz- & Recyclingprodukte, Entwicklung von Umwelttechnologien und Auslandmarkterschließung. Als offiziell autorisiertes Beratungsunternehmen des *Bundeswirtschaftsministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)* im Programm „go-innovativ“ ist das Unternehmen dazu berechtigt, Fördermittel zu vergeben. Darüber hinaus handelt die Firma koordinatorisch für verschiedene thematische Leitnetzwerke, beispielsweise im Auftrag des *BMWKS* oder für gesamte Unternehmensverbände. [22]

### 3.2.2 Hintergrund und Beschreibung des Konzeptes

Um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen, wurde vom *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)* das Förderprogramm „*Seriell Sanieren*“ einberufen. Serielles Sanieren bedeutet die energetische Sanierung von bestehenden Gebäuden unter Verwendung von vorgefertigten Fassaden- und Dachelementen einschließlich der damit

verbundenen Anlagentechnik. Das Ziel ist eine Reduktion des Zeitaufwandes im Vergleich zur herkömmlichen Sanierung. [23] Hierfür startete die *abc GmbH* die Konzeptionierung eines Solar-Eigenstrom-Kraftwerkes für Flachdachanlagen mit dem Namen „*semi-mobiles plug & play Eigenstromkraftwerk*“ (*SEK*) unter Berücksichtigung der geltenden Auflagen des Förderprogrammes. [24]

Das *SEK* gliedert sich in die drei Einheiten *plug & play Eigenstromerzeugungseinheit (ES)*, *Leistungselektronikeinheit (LE)* und in die optionale *plug & play (SSV)*. Das System kombiniert die Plug & Play-Fähigkeit und das Handling kleinerer Systeme mit einer modularen Bauweise und Leistungskennzahlen von herkömmlichen Dachanlagen. Am Markt etablierte PV-Systeme in den anvisierten Größenordnungen bestehen aus mindestens 30 Einzelteilen und müssen durch einen Elektrikerfachbetrieb installiert werden. Im Vergleich dazu besteht das *SEK* aus zwei Einzelteilen, sowie den einfach verbindbaren Solarmodulen. Durch die vorgefertigten Anschlüsse an den Modulen kann die Installation durch eine Fachfirma schnell durchgeführt werden, ohne mit der internen Verkabelung der Speicher oder der PV-Module interagieren zu müssen. Zusätzlich wirkt der Wechselrichter im Zusammenspiel mit dem Batteriespeicher netzbildend und gewährleistet eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV). Im Falle eines Stromausfalles bildet das System eine Notstromversorgung, wodurch angeschlossene elektrische Verbraucher weiter versorgt werden. [24]

Ein weiterer Vorteil des *SEK* ist die semi-Mobilität. Durch die Verschaltung aller Komponenten der *SSV*-Einheit in Form einer Box ist die Leistungselektronik mit wenig Aufwand standortveränderlich. In Notfällen, beispielsweise bei einem Risiko von Hochwasser oder Renovierungsarbeiten, kann die Elektronikeinheit problemlos entkoppelt und an einen sicheren Ort untergebracht werden. Bei der Konstruktion wird auch darauf geachtet, gängige Maße für Durchgänge und Türen zu berücksichtigen, damit die nötige Standortflexibilität gewährleistet werden kann. [24]

Zusammenfassend zeichnet sich eine *SEK*-Einheit durch die schnelle Installation von kompletten Anlagen inklusive Elektronik und Stromspeicher, sowie einer simplen Einbindung in ein Energiemanagementsystem bei geringem Zeitaufwand aus.

### 3.2.3 Beschreibung der Komponenten

Wie bereits im oberen Abschnitt beschrieben, kann das System in drei Einheiten gegliedert werden. Die Erzeugungseinheit wird durch das Montagesystem und die Solarmodule gebildet. Dafür werden vorgefertigte Betonblöcke aneinandergereiht, in welchen sämtliche Gewinde für die Solarmodulklemmen bereits eingearbeitet sind. Die Montagesysteme sind dargestellt in *Abbildung 3*.



Abbildung 3: Ballastmodule [24]

Durch das Eigengewicht der Ballastmodule werden alle Vorgaben bezüglich Wind- und Schneelasten, welche von Montagesystemen erfüllt werden müssen, bereits eingehalten. Daher müssen die Module nicht zusätzlich in der Dachhaut verschraubt werden, wodurch die rechtliche Pflicht zur Eintragung ins Grundbuch entfällt, da die Anlagen nicht direkt mit dem Gebäude verbunden sind. Zusätzlich wird die Installationszeit um bis zu 70 % reduziert. Je nach Bedarf können unterschiedliche Varianten der Betonmodule vom Hersteller bezogen werden, abhängig vom benötigten Aufstellwinkel. Sollten die Module aus jeglichem Grund wieder abgebaut werden müssen, kann dies mit geringem Arbeitsaufwand geschehen. [24]

Die gesamte Elektronik, die zur Nutzung des produzierten PV-Stromes und Batteriespeichers benötigt wird, wird in einem kompakten Schaltschrank geliefert. Der Hersteller verspricht damit eine Einbindung des Systems ohne aufwendige Erweiterung und Neuverdrahtung des vorhandenen Verteilerschranks. Der Schrank ist befestigt auf einer Kunststoffpalette, welche bei Hochwassergefahr eine semi-Mobilität durch einfache Hubwagenfähigkeit ermöglicht. Am Gehäuse sind Buchsen vorhanden, an welchen die Solarmodule, der Batteriespeicher und die Verbindung zum Hausnetz angeschlossen wird. Zwischen dem Schrank und den weiteren externen Einheiten wird ein Trennschalter eingebunden, um ein spannungsfreies Entfernen der Kabel und somit den Personenschutz zu gewährleisten. In der folgenden *Abbildung 4* ist der geöffnete Schrank mit Blick auf die Elektronik abgebildet. [24]



Abbildung 4: Steuerschrank [24]

Je nach Bedarf und Anwendung kann die Leistung des Systems frei skaliert beziehungsweise erweitert werden. Zusätzlich erlaubt die integrierte Software eine einfache Systemsteuerung. Bei der Speichereinheit erfolgt eine bedarfsorientierte Dimensionierung durch die Bereitstellung von mehreren 2 kWh- und 3 kWh-Speicherzellen. Mehrere Speicherzellen werden in einem Modul mit bis zu 8 dieser Zellen zusammengefügt, sodass ein Modul maximal 16 kWh oder 24 kWh erreichen kann. Je nach Anforderung können diese Module kombiniert und bis zu einer Speicherkapazität von 220 kWh erweitert werden. Die Module sind in der folgenden *Abbildung 5* dargestellt. [24]



Abbildung 5: Batteriezellen [25]



Darüber hinaus bietet die *abc-GmbH* das *InBiS*-Konzept, kurz für „Bidirektionale Nutzung von industriellen Batteriespeichern“, an. Mit diesem Konzept kann ein virtuelles Kraftwerk für Grünstromerzeuger und Speicherbesitzer umgesetzt werden. [26]

### 3.2.4 Spezifischer Beitrag im Ahrtal

In Zusammenarbeit mit dem Unternehmen wurde eine Liste erarbeitet, welche Gebäude vorrangig für die Umsetzung eines *SEK*-Projektes in Betracht gezogen werden sollen. Der entscheidende Faktor ist die verfügbare Dachfläche und die Dachform des Gebäudes. Anhand der Fläche kann die potentielle PV-Anlagenleistung bestimmt werden. Für das Unternehmen sind zunächst alle Anlagen ab einer Leistung von 100 kWp von Interesse, da bei diesen Objekten der größte wirtschaftliche Nutzen zu erwarten ist. Ergebnisse und Werte sind der Ergebnispräsentation des Unternehmens im *Anhang 2.4* zu entnehmen. In der nachfolgenden *Tabelle 4* ist die Gebäudeliste abgebildet, welche von der *abc GmbH* betrachtet wurde.

*Tabelle 4: Gebäudeliste für die PV-Auslegung durch die abc GmbH [eigene Darstellung]*

Gebäudebezeichnung	Adresse	Dachform	Verbrauch [kWh/a]	PV Anlage Leistung [kWp]
Feuerwehrhaus Ahrweiler	Ramersbacher Straße 2	Satteldach	21.450	113,6
Grundschule Bad Neuenahr	Weststraße 25+27	Satteldach + Flachdach	35.523	200
Turnhalle / Gymnastikhalle, Grundschule Bad Neuenahr	Weststraße 25	Satteldach + Flachdach	34.502	200
Erich-Kästner-Realschule plus	St.-Pius-Str. 29	Flachdach	182.062	335,92
Grundschule Heimersheim mit Turnhalle und Mehrzweckhalle	Vehner Weg 31, Im Bülland 12	Flachdach	50.996	196,08
TWIN-Schwimmbad	Am Gartenschwimmbad 21	Flachdach	1.070.288	170,24
Sportplatzgebäude Apollinarisstadion	Kreuzstraße 110	Pulldach	11.227	140,4
Kindertagesstätte Bad Neuenahr (Arche Noah)	Weststraße 6a	Walmdach	16.693	142,8
FFW und Mehrzweckgebäude Ramersbach	Auf der Höhe 2a	Satteldach	4.650	142,8
			Summe	1641,84

Bei Realisierung aller dargestellten Anlagen kann eine gesamte PV-Leistung von 1,6 MWp erreicht werden. Bei Gebäuden, die bereits abgerissen wurden oder bei welchen der Abriss bevorsteht, wird hier von einem Neubau mit vergleichbarer Dachfläche ausgegangen.

Es folgt die Darstellung der Berechnungsergebnisse der *abc GmbH* am Beispiel der *Grundschule Heimersheim*. Die Simulation erfolgte unter Verwendung des Lastprofils, bereitgestellt von *Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW)*, Haushalt mit 51.000 kWh/a mit einem Strompreis von 27,75 ct/kWh netto, gemäß Strompreisanalyse des *BDEW*. Es wurde zusätzlich ein linearer Leistungsabfall der PV-Module auf 90 % über 20 Jahre Nutzungsdauer berücksichtigt. Die Ergebnisse gelten repräsentativ für andere kommunale, tagsüber genutzte Liegenschaften mit ähnlich großer Dachfläche. [25]

Simuliert wurde eine PV-Anlage mit einer Leistung von 196 kWp, welche im Folgenden genauer betrachtet wird. Im ersten Jahr liegt die erzeugte Leistung bei 184.403 kWh/a, nach 20 Jahren werden durch den Leistungsabfall noch 166.839 kWh/a generiert.

Bezüglich der Eigenverbrauchsanteile der Anlage können die Ergebnisse der nachfolgenden *Abbildung 6* entnommen werden.

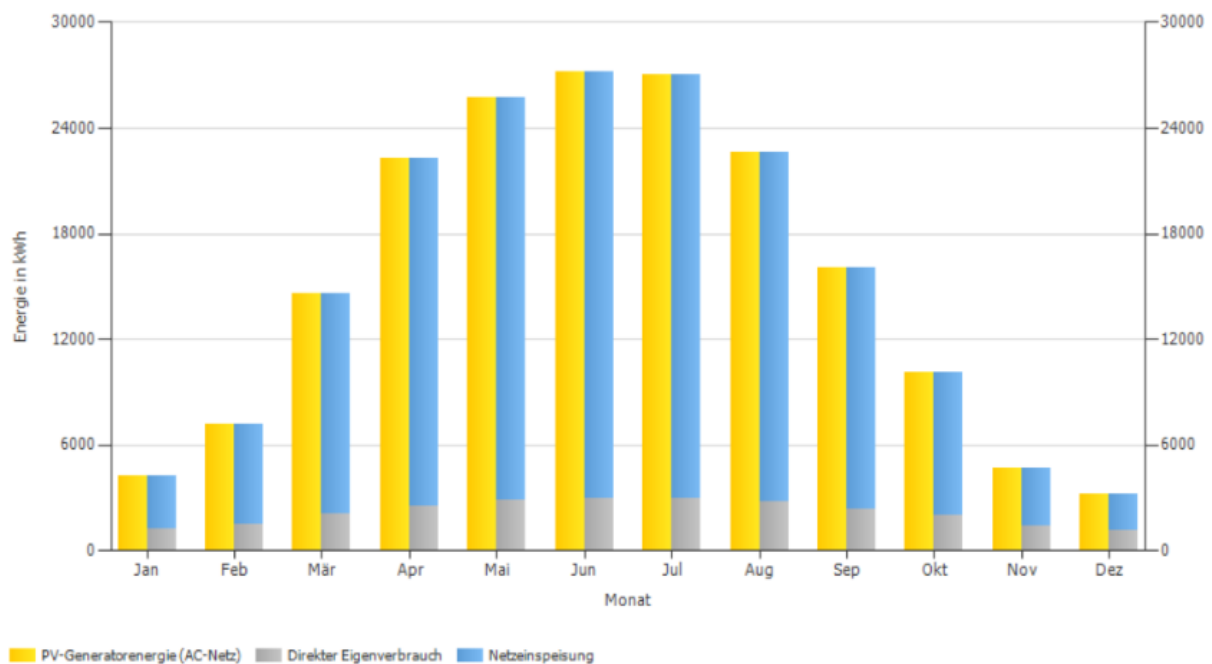


Abbildung 6: Nutzung der PV-Energie [25]

Mit den angenommenen Werten wird der erzeugte PV-Strom zu 13,9 % (grau) direkt vor Ort verbraucht. An dieser Stelle empfiehlt das Unternehmen die Verwendung der *InBiS*-Software. Somit könnte der übrige Sonnenstrom in den anderen kommunalen Liegenschaften verbraucht werden und so 100 % Eigenverbrauchsanteil bilanziell erreicht werden.

In *Abbildung 7* ist der Anteil des gedeckten Verbrauches dargestellt.

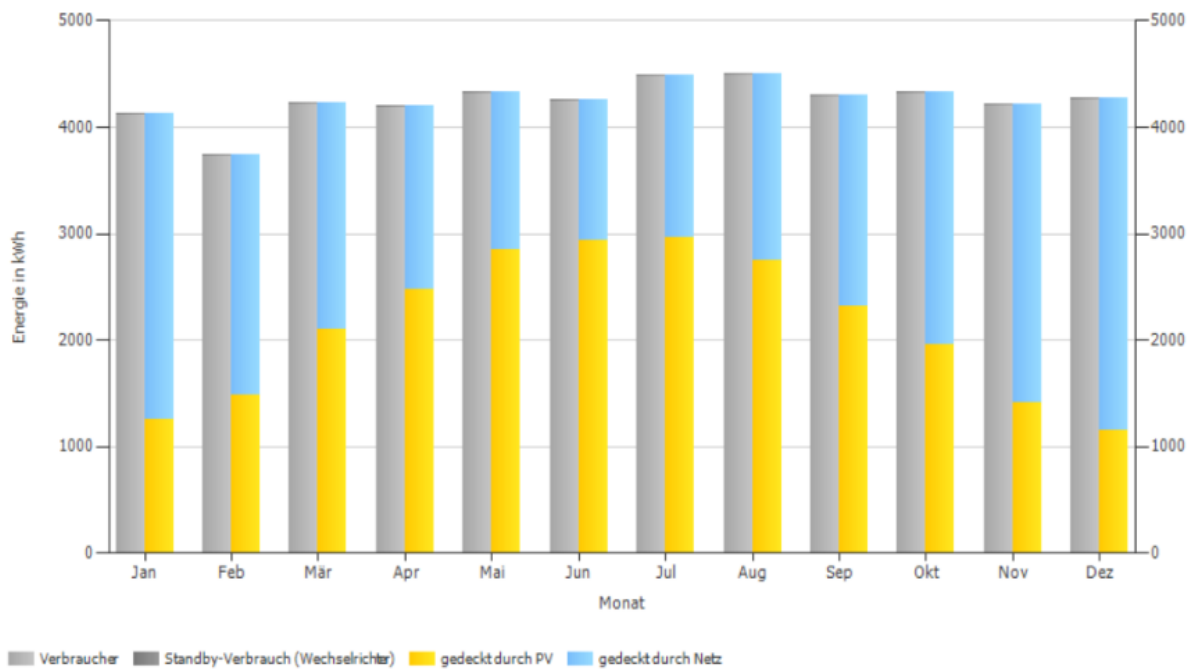


Abbildung 7: Deckung des Stromverbrauchs [25]

Aus der *Abbildung 7* ist zu entnehmen, dass 50,3 % des Stromverbrauches von angenommenen 51.000 kWh/a durch die Solarstromerzeugung gedeckt werden kann. Nach Angaben des Unternehmens belaufen sich die Investitionskosten der Anlage auf 900 – 1.000 €/kWp netto. Im Zuge der Installation fallen jedoch weitere Kosten an, welche von der Installationsfirma erst nach einer detaillierten Vorort-Begehung genau berechnet werden können. Die detaillierte Kostenaufschlüsselung und damit verbundene Leistungen sind der bereitgestellten Ergebnispräsentation des Unternehmens in dem *Anhang 2.4* zu entnehmen. In der Wirtschaftlichkeitsberechnung haben die Investitionskosten des hier vorgestellten Konzepts keinen Einfluss, da das Konzept voraussichtlich nur vereinzelt zu realisieren ist.

### 3.3 Wärmeerzeugung

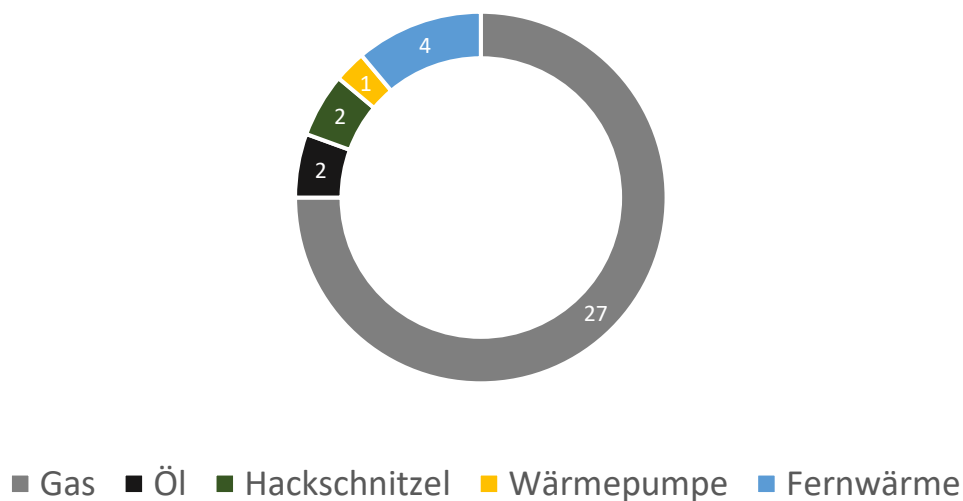
Das Kapitel der Wärmeerzeugung stellt die unterschiedlichen Technologien im Bereich Wärmeversorgung detailliert vor. Dabei werden unter anderem Randbedingungen, Erzeugungseinheiten, Speicherkomponenten und Ergebnisse erläutert.

#### 3.3.1 Allgemeine Daten und Randbedingungen

In diesem Kapitel werden die Randbedingungen für die Wärmeerzeugung der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler, sowie die Aufteilung der aktuellen Versorger dargestellt. Das Ziel der Stadt ist es, eine klimaneutrale Erzeugung zu gewährleisten und den Bedarf an Emissionen zu verringern. Des Weiteren befindet sich die Stadt im Wiederaufbau nach der Flutkatastrophe im Jahr 2021, in der viele Gebäude überflutet und deren Heizsysteme teilweise bis vollständig zerstört wurden. Unter diesen Aspekten ist die Wärmeversorgung eine essenzielle

Komponente für eine klimaneutrale Energieversorgung. Um die Klimabilanz der Stadt zu verbessern, soll künftig auf fossile Energieträger verzichtet werden. Durch Optimierung vorhandener Heizsysteme und Komponenten, Einführung eines Klimamanagements und den Einbau von effizienteren und klimaneutralen Energieerzeuger sollen die Ziele zukünftig erreicht werden. Die *Abbildung 8* beschreibt den Stand des Energieberichtes im Bereich der Wärmeerzeugung der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler.

### Anzahl der vorhandenen Heizsysteme



*Abbildung 8: aktuelle Heizsysteme der Liegenschaften [eigene Darstellung]*

Die Wärmeversorgung besteht zum größten Teil aus Gasheizungen (219.078 m<sup>3</sup>/a Gas). Die restlichen Liegenschaften wurden mit einer Wärmepumpe (12.878 kWh/a therm. Energie), Fernwärme (1.301.909 kWh/a Fernwärme) und Heizöl (36.236 Liter/a Öl), sowie durch Holzhackschnitzelheizungen (129.192 kWh/a Heizwert) versorgt.[6] Durch Flutschäden an den Holzhackschnitzelheizungen wurden diese 2021 durch Fernwärme ersetzt.

In dieser Machbarkeitsstudie wurde der Ausbau von Holzhackschnitzelheizungen nicht in Betracht gezogen, da der Einsatz von Holzhackschnitzel als klimaneutraler Energieträger unterschiedlichen Definitionen obliegt, weshalb Holzhackschnitzelheizungen kritisch zu bewerten sind. Holz als regenerativer Energieträger erzeugt nachweislich Emissionen bei der Verbrennung. Allerdings wird Holzhackschnitzel derzeit als klimaneutral bezeichnet, da die Bäume beim Wachstum genauso viel Kohlenstoff binden, wie bei der Verbrennung ausgestoßen wird [27]. Bei dieser Studie werden ausschließlich Emissionen bei der Verbrennung beachtet, weshalb Holzhackschnitzel nicht als klimaneutrales Versorgungsmedium gelten. Wenn Heizalternativen im individuellen Fall nicht in Betracht kommen, ist die Holzfeuerung nur dann eine vertretbare Lösung, wenn es sich um Brennholz aus nachhaltiger Forstwirtschaft oder Restholz handelt und ein Filtersystem oder ein Staubabscheider eingesetzt wird [27].

Aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen sind in der Machbarkeitsstudie nur ausgewählte Wärmeerzeuger und mögliche zusätzliche Komponenten über die Simulation ausgelegt. Dabei ist die Installation von unterschiedlichen Wärmepumpen und die Steigerung der Fernwärme Mittelpunkt der Auslegung.

### 3.3.2 Wärmepumpe

Im nachfolgenden Unterkapitel werden verschiedene Wärmepumpentypen vorgestellt, welche in den Liegenschaften eingesetzt werden können. Die Wärmepumpe ist ein Wärmeerzeuger, welche unter Aufwendung von elektrischer Energie thermische Energie in Form von Wärme erzeugen kann. Diese Art der Wärmeerzeugung fällt unter den Oberbegriff *Power-to-Heat*. Dabei wird mithilfe des *Carnot-Prozesses*, unter Einsatz von elektrischer Energie, die Wärme aus der allgemeinen Umwelt entzogen und auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Die Wärme wird dem Heizkreislauf zugeführt und über die Heizungsperipherie als Raumwärme abgegeben. [28] Bei der Auslegung der Wärmepumpen wurden die Wärmeträger Luft und Abwasser berücksichtigt. Weitere Wärmeträger wurden aufgrund der begrenzten Potentiale und nicht kalkulierbaren Vor-Ort Bedingungen nicht berücksichtigt. Ein bivalenter Betrieb der Wärmepumpen wurde bei der Simulation vorausgesetzt. Die Effizienz und der Wirkungsgrad, welche durch eine richtige Betriebsweise erhöht werden, sollten individuell für jede Liegenschaft ermittelt werden. Dies wurde in dieser Machbarkeitsstudie aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt. Die vorliegende Auslegung wurde im Allgemeinen und unter Berücksichtigung von Simulationen und Annahmen durchgeführt.

Bei 36 betrachteten Liegenschaften werden insgesamt 21 neue Luft/Wasser-Wärmepumpen und 5 Abwasser/Wasser-Wärmepumpen dimensioniert. Zu sehen in der nachfolgenden *Tabelle 5* ist die Anzahl der Wärmepumpen, sowie deren gesamte Leistung. Die Werte in den Klammern stellen die Anzahl der Liegenschaften dar, bei denen sich beide Wärmepumpentypen anbieten.

*Tabelle 5: Übersicht der Wärmepumpenauslegung [eigene Darstellung]*

	Anzahl Wärmepumpen	Wärmepumpenleistung [kW]
Energiebericht 2018 Luft-WP	1	9
Modernisierungen ohne Sanierungen Luft-WP (nur die Abwasser-WP)	21 (5)	370,5 (235)
Modernisierungen mit Sanierungen Luft-WP (nur die Abwasser-WP)	18 (5)	291 (135)

Die Abwasser/Wasser-Wärmepumpen weisen einen höheren COP (Coefficient of Performance) im Vergleich zu den Luft/Wasser-Wärmepumpen auf, da die Abwassertemperatur

auch in den kalten Jahreszeiten meist nicht unter 10 °C fällt. Allerdings ist die Installation aufwendiger, da diese an das Abwasser-Kanalsystem der Stadt angeschlossen werden müssen. Diese Option der Wärmepumpe ist nur dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn gleichzeitig Arbeiten oder Erneuerungen am Kanalsystem stattfinden.

Alternativ können die Abwasser/Wasser-Wärmepumpen auch durch Luft/Wasser-Wärmepumpen ersetzt werden. Beide Arten der Wärmepumpen sind ausgelegt und als Ergebnis im Datentool dargestellt. [29]

Für die Liegenschaften ohne Sanierung und ohne Flächenheizung sind Hochleistungswärmepumpen vorgesehen, da diese eine höhere Vorlauftemperatur erreichen und standardisierte Heizkörper mit einer ausreichenden Temperatur versorgen können. Diese sind jedoch kostenintensiver und ineffizienter, was die Wirtschaftlichkeit beeinflussen würde. Bei Gebäuden, dessen Charakteristik einen hohen Wärmebedarf aufweisen oder bei denen eine hohe Vorlauftemperatur nötig ist, ist die Installation einer Hochleistungswärmepumpe zu empfehlen [30]. Zu diesen Gebäuden zählen beispielweise Turn- und Sporthallen. Aufgrund der mangelnden Datenlage bezüglich der Heizungsumgebung wurden keine Hochleistungswärmepumpen simuliert und wirtschaftlich betrachtet. In der nachfolgenden -Tabelle 6 werden die unterschiedlichen Wärmepumpentypen mit deren Vor- und Nachteilen aufgeführt und untereinander verglichen.

-Tabelle 6: Übersicht der Wärmepumpentypen [29–31]

Wärmepumpentyp	JAZ	COP	Vorlauftemperatur [C°]	Vorteile	Nachteile
Luft/Wasser (A2/W35)	2,6	3,10	35-55	günstigste Alternative, einfachste Installation	geringere Effizienz, unwirtschaftlich bei hohen Vorlauftemperaturen
Abwasser/Wasser (W10/W35)	4,4	5,10	35-55	effizienter als Luft-WP und HLWP, Abwasser hat geringere Temperaturschwankungen	Aufwändige Planung, teure Umsetzung, Kanalsystem muss kompatibel sein mit WP
Hochleistungs-Luft/Wasser (A10/W85)	k.A	2,5	60-85	Hohe Vorlauftemperaturen möglich, für Altbaugebäude geeignet, Einsatz in Industrie oder großen Gebäuden	Geringste Effizienz, teure Anschaffung, am unwirtschaftlichsten

Für das bessere Verständnis werden die beiden oben aufgeführten Begriffe COP und JAZ genauer erklärt. COP ist die gemessene Leistungszahl unter Laborbedingungen. Diese gibt die Effizienz einer Wärmepumpe unter optimalen Bedingungen an. Die JAZ hingegen, auch Jahresarbeitszahl genannt, ist die tatsächliche Leistungszahl im realen Betrieb der Wärmepumpe. [32]

Für eine optimale Betriebsweise der Wärmepumpe ist der Zustand der jeweiligen Liegenschaft von Bedeutung. Ein geringer Heizwärmebedarf, sowie eine ausreichende Sanierung des Gebäudes, verbessern den Betrieb einer Wärmepumpe. Zusätzlich können Flächenheizungen den Wirkungsgrad weiterhin positiv beeinflussen und ermöglichen einen Heizkreislauf auf Niedertemperatur. Eine Wärmepumpe sollte im Auslegungsfall eine Vorlauftemperatur von 35 °C aufweisen, jedoch aufgrund der Effizienz und Wirtschaftlichkeit mit maximal 55 °C betrieben werden. [33]

### 3.3.3 Fernwärme

In diesem Unterkapitel wird das Potential der Fernwärme in der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler betrachtet und erläutert. Damit der Umstieg auf eine erneuerbare Wärmeversorgung der Liegenschaften funktionieren kann, müssen Dekarbonisierungsmaßnahmen durch die Einbindung von klimaneutralen Wärmequellen stattfinden. Die Fernwärme entspricht dieser Technologie, da durch hohe Wirkungsgrade von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) und der Auswahl an verschiedenen klimaneutralen Wärmequellen, wie zum Beispiel Biogas, Biomasse und Abwärme klimaneutral Wärme erzeugt werden kann. [5]

In der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler befindet sich ein Fernwärmenetz, welches in *Abbildung 9* bildlich dargestellt ist. Das Fernwärmenetz wird von der *ahrtaI-werke GmbH* betrieben. Zu erkennen ist das großflächig ausgebaute Fernwärmenetz, welches durch insgesamt drei KWK-Anlagen versorgt wird. Die *ahrtaI-werke GmbH* lieferten im Jahr 2019 nach eigenen Angaben rund 35.045 MWh Wärme durch das gesamte Fernwärmenetz der Stadt Bad Neuenahr. [34]

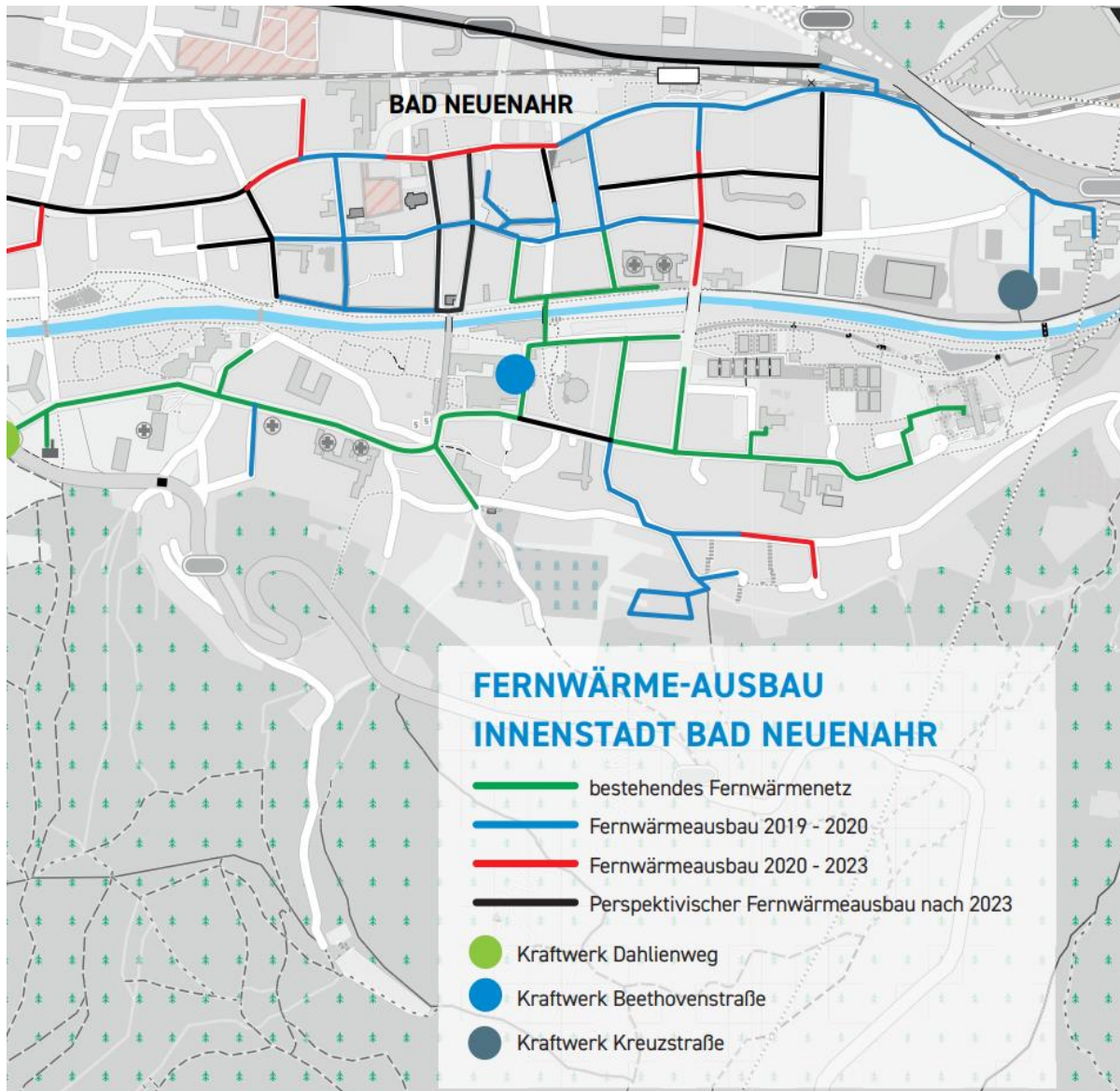


Abbildung 9: Fernwärmenetz der Stadt Bad Neuenahr [34]

Die Fernwärmeerzeugung der *ahrtaI-werke GmbH* setzt sich aus 38 % Biogas und 62 % Erdgas zusammen, wodurch ein Emissionsfaktor CO<sup>2</sup>-Äquivalent fCO<sub>2</sub>eq. nach Anlage 9 Nr.



1c,cGEG 2020 von 0 g/kWh erreicht wird, zu sehen in der *Abbildung 10*. Das tatsächliche CO<sup>2</sup>-Äquivalent wird im Kapitel Ökobilanz näher betrachtet und umfassend diskutiert. [35]

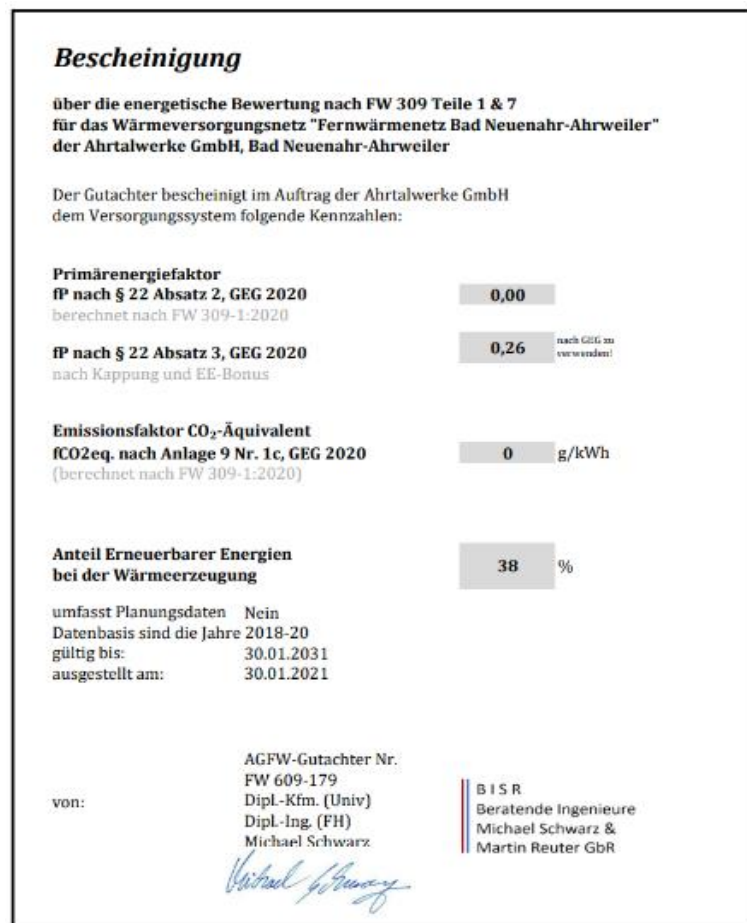


Abbildung 10: energetische Bewertung des Fernwärmenetzes [35]

Für den Anschluss an das Fernwärmenetz ist eine Installation von Fernwärmeübergabestationen notwendig. Diese Station stellt den Anschluss und die regulierte Übergabe der Wärme aus dem Fernwärmenetz an den vorhandenen Heizkreislauf dar. Des Weiteren hat sich die Stadt den Anschluss kommunaler Liegenschaften an das Fernwärmenetz als vorrangiges Ziel gesetzt. Eine gesetzliche Anschlusspflicht der Stadt ist nicht vorhanden. Die Ziele der Stadt wurden in dieser Machbarkeitsstudie berücksichtigt, weshalb Fernwärme als bevorzugtes Versorgungsmedium eingesetzt wird. Da der Ausbau des Fernwärmenetzes durch die *Ahrtalwerke GmbH* bereits geplant ist, werden die betrachteten Liegenschaften auf einen Anschluss geprüft. Sollte dieser realisierbar sein, wird dies in der Auslegungen der Wärmeerzeuger berücksichtigt. In der folgenden *Abbildung 11* ist der Vergleich der Fernwärmeversorgung aus 2018 zu den modernisierten Varianten dargestellt.

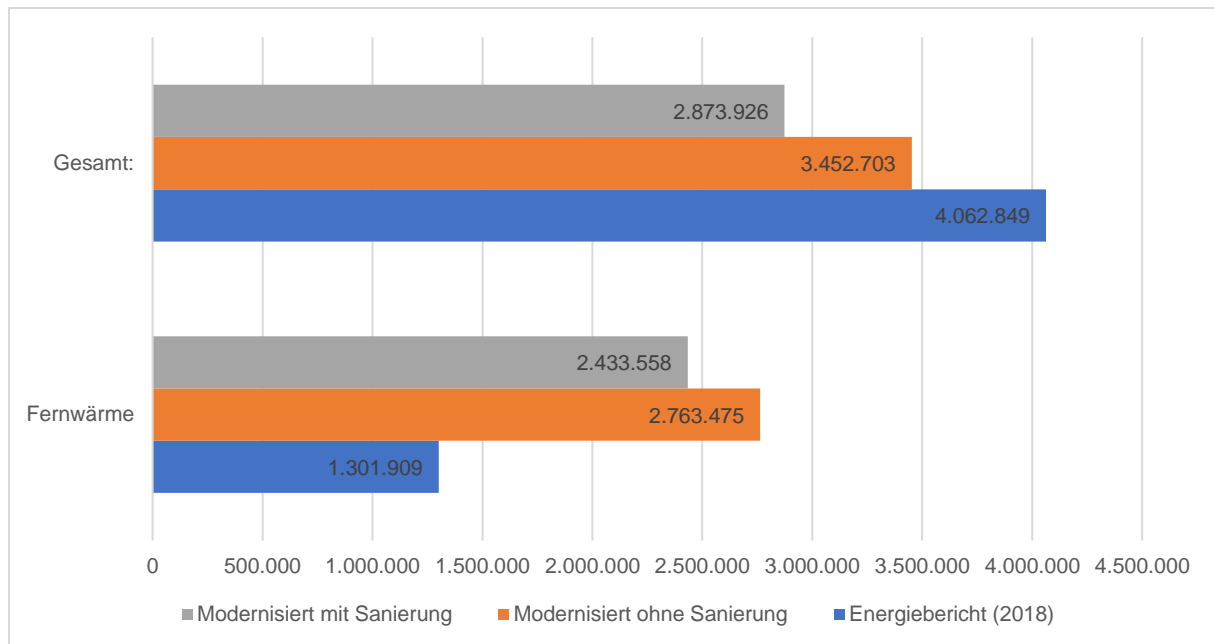


Abbildung 11: Anteil der Fernwärmeverteilung der Liegenschaften [eigene Darstellung]

Die Abbildung 11 zeigt, dass der prozentuale Anteil der Fernwärme am Gesamtwärmebedarf von etwa 30 % auf mehr als 80 % ansteigt. Außerdem hat sich der Fernwärmeanteil nach der Modernisierung mit Sanierung im Vergleich zum Bezugsjahr 2018 auf über 85 % erhöht. Dabei wurden fossile Energieträger durch Fernwärme ersetzt.

Im Fall einer Modernisierung aller betrachteten Liegenschaften ohne Sanierung würde der Fernwärmebezug um 110 % steigen. Dennoch ist der Fernwärmeanteil, gemessen am gesamten Fernwärmebedarf der *ahrtaI-werke GmbH* gering, weshalb davon auszugehen ist, dass der gestiegene Bedarf gedeckt werden kann. Zudem ist der weitere Ausbau des Fernwärmenetzes bereits in Planung. Da die *ahrtaI-werke GmbH* rechtlich eigenständig sind, wurde eine Planung von zusätzlichen Fernwärmeerzeugern nicht weiter berücksichtigt. In der folgenden Tabelle 7 werden die Fernwärmeübergabestationen mit deren Anschlussleistungen und die verschiedenen Modernisierungsmaßnahmen verglichen.

Tabelle 7: Fernwärmeversorgung nach der gesamten Modernisierung [eigene Darstellung]

	Anzahl Fernwärmeübergabestationen	Fernwärmeleistung [kW]
Energiebericht 2018	4	Ca. 670
Modernisierungen ohne Sanierungen (Luft-WP)	19	1610
Modernisierungen ohne Sanierungen (AB-WP)	19	1400
Modernisierungen mit Sanierungen (Luft-WP)	19	1270
Modernisierungen mit Sanierungen (AB-WP)	19	1200

Die Übergabestationen können dabei von insgesamt 4 Stationen auf 19 Stationen aufgestockt werden und somit 15 weitere Liegenschaften mit Fernwärme versorgen. Nach der Modernisierung kann die Gesamtleistung der Fernwärme im Vergleich zum unsanierten Zustand um bis zu 140 % erhöht werden. Die geplante Leistung der Anlagen variiert je nach Sanierungszustand, da der Wärmeenergiebedarf nach einer Sanierung sinkt. Liegenschaften mit Fernwärmestationen können auch nachträglich saniert werden, da der Bezug vom Energieversorger nach einer Sanierung reduziert werden kann.

### **3.3.4 Wärmespeicher**

In diesem Unterkapitel werden Wärmespeicher genauer beschrieben und erläutert. Die Funktion eines Wärmespeichers ist, kurzfristige Differenzen zwischen Wärmeerzeuger und Wärmebedarf auszugleichen. Somit können Spitzenlasten schnellstmöglich ausgeglichen und die Wärmeerzeuger mit thermischer Energie unterstützt werden. Dies verbessert nicht nur die Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz, sondern verringert ebenfalls den Verschleiß der Anlage. [36]

Dabei kann erzeugte Wärme kurzfristig in einem Pufferspeicher gespeichert werden. Die Größe und das Volumen ist abhängig von der Auslegung, Heiztechnologie und dem Wärmebedarf. Der überschüssige Strom aus der Photovoltaikanlage kann über Heizstäbe oder Wärmepumpen das Wasser in dem Pufferspeicher auf ein gewisses Temperaturniveau erhitzen und damit Solarstrom speichern. Bei der Simulation der Liegenschaften wurden insgesamt 36 Wärmespeicher in unterschiedlichen Größen vorgesehen. [36]

Für Liegenschaften, welche mit einer Wärmepumpe versorgt werden, empfiehlt sich ein Pufferspeicher zusätzlich aus Sicherheitsgründen. Bei einer Überlastung des Stromnetzes kann der zuständige Netzbetreiber Wärmepumpen kurzzeitig vom Netz nehmen. Sollte in dieser Zeit keine elektrische Energie über eine vorhandene Photovoltaikanlage verfügbar sein, kann der Pufferspeicher diese überbrücken und weiterhin das Gebäude mit Wärme versorgen. [37]

Bei der Warmwassererzeugung sind in den Liegenschaften unterschiedliche Technologien vorzufinden. Laut den Umfrageergebnissen sind bei 15 Liegenschaften dezentrale Durchlauf-erhitzer, sowie zwei Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 130 Liter bzw. 160 Liter und sechs zentrale Boiler notiert. Über fünf Liegenschaften sind keine Informationen bekannt. Die Auslegung der Warmwasserversorgung ist abhängig von dem aktuellen Verbrauch und wird in der Machbarkeitsstudie aus Gründen des Datenmangels nicht berücksichtigt.

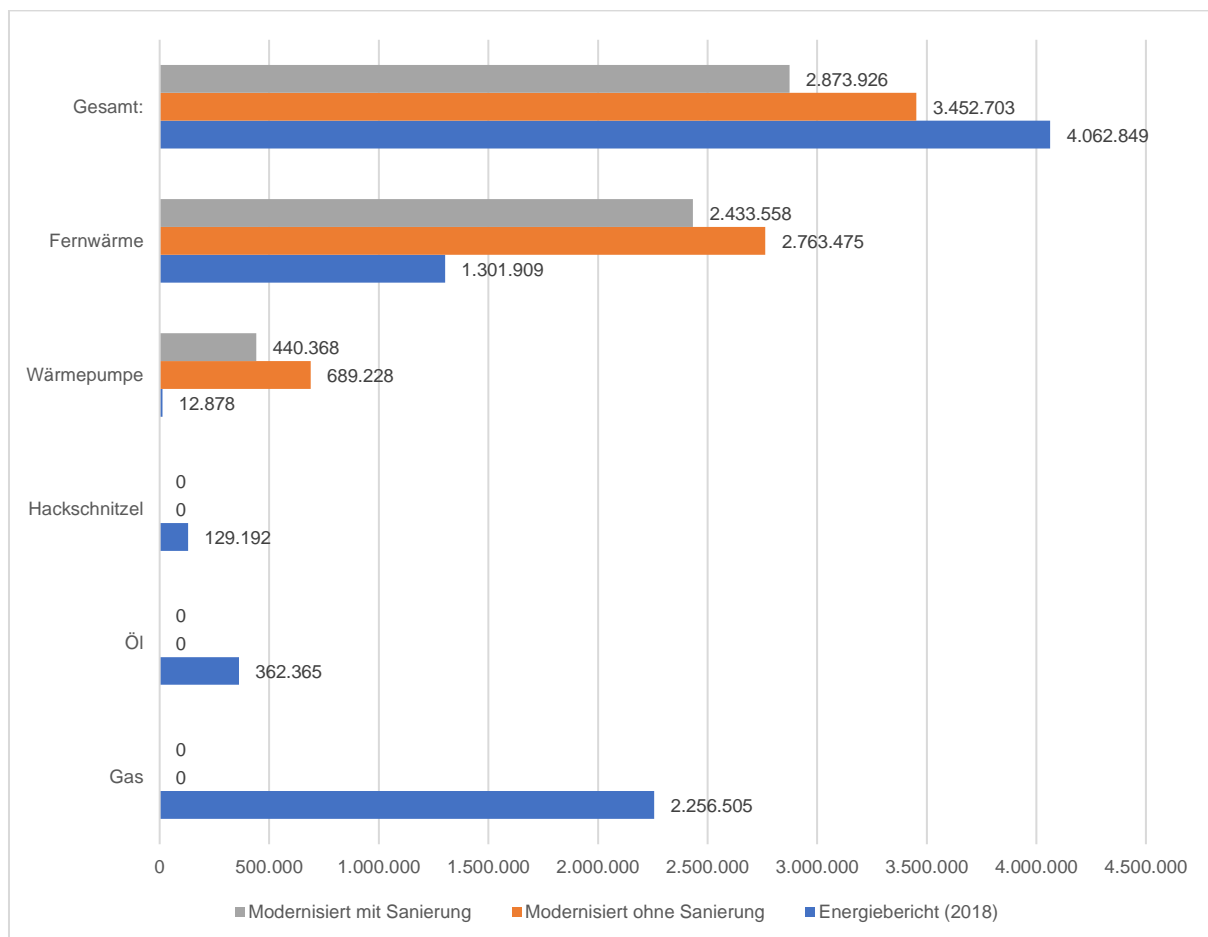
### **3.3.5 Heizungsperipherie**

Ein Großteil der Liegenschaften ist mit alten Heizkörpern ausgestattet und nur zu einem geringen Teil sind Fußboden- oder Flächenheizungen verbaut. Solche Heizungen eignen sich aufgrund der Umstellung auf einen Niedertemperatur-Kreislauf, da die verbauten

Wärmepumpen möglichst wirtschaftlich und effizient betrieben werden sollen. Bei einem Heizungsaustausch wird grundsätzlich ein hydraulischer Abgleich vorgenommen.

### 3.3.6 Ergebnisse

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Simulation der Wärmeerzeuger erläutert. Alle simulierten und berechneten Werte sind detailliert im Datentool wiederzufinden. (Siehe *Anhang 7*). In der Ergebnisdarstellung werden die Modernisierungen in zwei Varianten dargestellt. In der „unsanierten“ Variante werden alle Liegenschaften ohne die Sanierungsplanungen betrachtet. In der „sanierten“ Variante werden die Gebäude mit Sanierungsmaßnahmen betrachtet, sowie die restlichen Liegenschaften, bei denen keine Sanierung durchgeführt wurde. Die Grundlage aller Berechnungen und Simulationen der Wärmeerzeugung ist der Energiebericht 2018. Die nachfolgende *Abbildung 12* zeigt die Neuverteilung der Wärmeversorgung für die betrachteten Liegenschaften.



*Abbildung 12: Gesamte Wärmeverteilung aller Liegenschaften nach Modernisierung [eigene Darstellung]*

Um das Ziel der Studie zu erreichen, wird die Versorgung durch Fernwärme und Wärmepumpen bevorzugt ausgebaut. Somit kann eine Fernwärmesteigerung von 1.131.649 kWh/a (saniert) beziehungsweise 1.461.566 kWh/a (unsaniert) erreicht werden. Auch der Einsatz von

Wärmepumpen kann auf 689.228 kWh/a erhöht werden. Fossile Energieträger und Holzhackschnitzel werden in der Auslegung reduziert und durch regenerative Energieträger ersetzt. Zudem wird der Energiebedarf durch energiesparende Maßnahmen generell gesenkt, sodass die Wärmeerzeuger kleiner dimensioniert werden können. Zusätzlich sind alle 36 Liegenschaften mit Wärmespeichern ausgelegt, um Lastspitzen auszugleichen und eine mögliche Versorgungssicherheit kurzfristig zu gewährleisten. Maßnahmen an der Heizungsperipherie sind bei der Simulation und den Ergebnissen nicht berücksichtigt.

### **3.3.7 Fehlerbetrachtung**

Die Dimensionierungen der ausgelegten Wärmeerzeuger und Wärmespeicher sind nicht als final anzunehmen, da auf Basis der Datengrundlage die Energiesysteme nur theoretisch betrachtet werden. Eine Einzelfallbetrachtung vor Ort ist bei allen Anlagen nötig, um lokale Anforderungen oder Rahmenbedingungen für Heiztechnologien in den Liegenschaften zu überprüfen. Zudem wurde bei der Auslegung der Wärmepumpe ausschließlich die Niedertemperaturwärmepumpen simuliert. Die Gebäude, welche einen hohen Wärmebedarf haben oder eine hohe Vorlauftemperatur benötigen, sollten mit Hochleistungswärmepumpen oder einer Niedertemperatur-Heizungsperipherie ausgelegt werden.

Die Mehrkosten für diese Fälle werden in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen nicht betrachtet. Zusätzlich sind die Kosten für nötige Maßnahmen an der Heizungsperipherie oder an lokalen Bauteilveränderungen nicht in der Wirtschaftlichkeit aufgeführt, da die benötigten Daten für eine Berechnung dieser Kosten nicht in der Datengrundlage vorhanden sind und nur vor Ort aufgenommen werden können. Im Rahmen der Fernwärmeanschlüsse wurden bereits installierte Fernwärmeübergabestationen in den Simulationen aufgenommen und als funktionsfähig angenommen. Zudem wird vorausgesetzt, dass an den vorhandenen Stationen eine Leistungssteigerung vorgenommen werden kann, ohne zusätzliche Maßnahmen anwenden zu müssen. Des Weiteren wird für jede Liegenschaft ein Wärmespeicher ausgelegt. Dabei wird davon ausgegangen, dass in den Liegenschaften ausreichend Platz vorhanden ist.

## **4 Energieeffizienz-Maßnahmenplan**

Das nachfolgende Kapitel stellt das Kommunale Energiemanagement und mögliche Sanierungsmaßnahmen, sowie deren Einsparpotentiale vor.

### **4.1 Kommunales Energiemanagement**

Kommunales Energiemanagement ist eine kosteneffektive Methode zur Reduzierung von Energiekosten und Emissionen. Durch nicht-investive Einsparpotentiale können nach

Auswertung von Projekten in Baden-Württemberg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen zwischen 10 und 20 % des Verbrauchs und der Kosten für Energie und Wasser eingespart werden. [38]

Die Einführung eines kommunalen Energiemanagementsystems wird derzeit durch die Kommunalrichtlinie mit dem Förderschwerpunkt 4.1.2 *IMPLEMENTIERUNG U. ERWEITERUNG EINES ENERGIEMANAGEMENTS* mit 70 % (90 % für finanzschwache Kommunen) gefördert. Gefördert werden die Stellen von Energiemanager:innen, einer Energiemanagementsoftware und Messstellentechnik.

Die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler hat die Ausschreibung für die Stelle einer kommunalen Energiemanager:in gestartet und erfasst die jährlichen Energieverbräuche von 36 kommunalen Liegenschaften mit der Energiemanagementsoftware EKOMM 4.6 seit 2018. Die Zählerstände werden größtenteils manuell in die Software eingepflegt.

Ein Maßnahmenplan zur Einführung eines kommunalen Energiemanagementsystems, basierend auf *Kom.EMS (Kommunales Energiemanagement-System)*, kann dem *Anhang 3* entnommen werden. *Kom.EMS* ist eine Entwicklung der Energieagenturen Baden-Württembergs, Sachsens, Sachsen-Anhalts und Thüringens und ist ein Werkzeug für den systematischen Aufbau und die Verstetigung eines kommunalen Energiemanagement-Systems. [39]

Zur Priorisierung der Liegenschaften wird ein energetisches Einsparpotential auf Basis des Energieberichts von 2018 abgeschätzt. Darauffolgend werden Möglichkeiten zur Optimierung des softwaregestützten Energiemanagements erläutert.

#### 4.1.1 Nicht-investives Einsparpotential

Bei der systematischen Erschließung von Einsparpotentialen werden Maßnahmen priorisiert behandelt, die keine oder nur geringe Investitionen erfordern. Dazu gehören Energiecontrolling, Betriebsoptimierung bestehender Anlagentechnik, Hausmeisterschulungen und die Ansprache und Motivation von Gebäudenutzenden zu energiesparendem Nutzungsverhalten. In der *Tabelle 8* sind einige Einsparpotentiale aufgeführt, welche mit minimalem Investitionsaufwand umgesetzt werden können.

*Tabelle 8: nicht-investive Einsparpotentiale [40]*

Maßnahme	Einsparpotential
Zeitpläne anpassen	5 -10 %
Absenkung der Vorlauftemperatur	5 -10 %
Überprüfung von Heizungsparametern	3 -10 %
Heizkörper entlüften	< 1 %

Maßnahme	Einsparpotential
Heizkörper freihalten	< 1 %
Veränderte Raumnutzung	< 10 %
Absenkung der Raumtemperatur	< 6 %/°C
Zonenweises Heizen	1 - 3 %
Ansprache von Nutzenden	1 - 6 %
Hydraulischer Abgleich	<15 %[41]

Am Beispiel der *Kindertagesstätte Heimersheim – Sterntaler*, welche bei einer Vor-Ort Besichtigung untersucht wurde, sind Optimierungspotentiale ersichtlich. Zum Zeitpunkt der Besichtigung, während einer zweiwöchigen Ferienzeit, ist die Heizung nicht reguliert worden. Somit wird durchgehend eine Raumtemperatur von 24 °C gehalten. Durch eine Anpassung der Heizpläne, unter Berücksichtigung von Ferien, Feiertagen und täglichen Öffnungszeiten, könnten bis zu 10 % des Wärmeverbrauchs eingespart werden. Für Kleinkinder wird eine Raumtemperatur von 21 - 22 °C [42] empfohlen, weshalb durch eine Reduzierung der Raumtemperatur auf 21 °C bis zu 18 % des Wärmeverbrauchs eingespart werden könnte.

Durch den breiten Einsatz von Durchlauferhitzern in den Liegenschaften bietet die Optimierung dieser ein weiteres Einsparpotential. Grundsätzlich sollte auf eine regelmäßige Entkalkung geachtet und die Betriebstemperatur möglichst reduziert werden. Eine Betriebstemperatur von 39 - 40 °C kann als Richtwert dienen. Bei Durchlauferhitzern mit einer Kaltwasserversorgung können niedrigere Temperaturen eingestellt werden, ohne eine gesundheitliche Gefährdung durch Legionellen zu erzeugen [43].

Das Einsparpotential für Strom und Wärme der Liegenschaften wird in Anlehnung an *VDI 3807* abgeschätzt. Dazu wird in der *Formel 2* der witterungsbereinigte spezifische Verbrauch mit dem Zielwert berechnet. Die Datengrundlage bildet der Energiebericht 2018. [44]

*Formel 2: Berechnung des energetischen Einsparpotentials in Anlehnung an VDI 3807 [44]*

$$\text{Energieeinsparpotenzial [kWh]} = \text{Energiebezugsfläche [m}^2\text{]} * \\ (\text{Energieverbrauchskennwert } [\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}] - \text{Zielwert } [\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}])$$

Die Ergebnisse der Berechnung sind für jedes betrachtete Gebäude in *Anhang 3* aufgeführt. Werden alle Liegenschaften betrachtet, ergibt sich ein energetisches Einsparpotential für Strom von 35 % und für Wärme von 45 %. Die jährlichen Energiekosten könnten um 40 % reduziert werden. [44]

Die Liegenschaften werden nach jährlicher Energieeinsparung, prozentualer Energieeinsparung, jährlicher Kostenersparnis und prozentualer Kostenersparnis sortiert und mit einem

Rang bewertet. Die Priorisierung der Liegenschaften erfolgt über den durchschnittlichen Rang. Auf diese Weise soll eine Priorisierungsliste erstellt werden, die große Energie- und Kosteneinsparpotentiale und die Umsetzbarkeit durch Gewichtung der prozentualen Anteile berücksichtigt. Eine Priorisierungsliste der Liegenschaften für die Integration in ein Energiemanagementsystem ist der *Tabelle 9* zu entnehmen. Die vollständige Tabelle befindet sich im *Anhang 3*.

*Tabelle 9: Priorisierungsliste der Liegenschaften [eigene Darstellung]*

Gebäudebezeichnung	Energetisches Einsparpotential	Kostenersparnis	Durchschnittlicher Rang
Stadtbibliothek	74 %	68 %	4
Mehrgenerationenhaus	68 %	72 %	4.75
Feuerwehrhaus Ahrweiler	66 %	59 %	6.25
Turnhalle, Grundschule Ahrweiler	70 %	56 %	7.75
Erich-Kästner-Realschule plus	51 %	49 %	7.75
Kindertagesstätte Heimersheim (Stern-taler)	68 %	59 %	8.25
Turnhalle/Gymnastikhalle, Grundschule Bad Neuenahr	57 %	57 %	8.25
Sportplatzgebäude Heimersheim	56 %	67 %	11.5
Grundschule Bad Neuenahr	42 %	33 %	12
Grundschule Heimersheim mit Turn-halle und Mehrzweckhalle	41 %	30 %	12.75

Durch die Verwendung der spezifischen Verbräuche und Zielwerte aus dem Energiebericht ist die Potentialabschätzung abhängig von den im Jahr 2018 definierten Parametern. Berechnete Einsparpotentiale weisen daher eine hohe Unsicherheit auf und sollen nur einer ersten Priorisierung dienen.

#### **4.1.2 Energiemanagementsoftware und Messstellenkonzept**

Die Grundlage eines Energiemanagementsystems ist die Energie- und Kostenbilanz. Durch die Nutzung einer Energiemanagementsoftware, kombiniert mit einer automatischen Anbindung von Zählern und Unterzählern, kann die Datengrundlage verbessert werden.

Die Industrie- oder Konzernlösungen, wie zum Beispiel von *Bosch* [45] oder *Siemens* [46], bieten ein ganzheitliches, fehlererprobtes Konzept mit großem Funktionsumfang. Software und Messtechnik können von dem gleichen Hersteller bezogen und ein Messkonzept in Auftrag gegeben werden. Anlagen können detailliert dargestellt und Prozessparameter durch Software und Hardware gesteuert werden. Eine Anbindung der Zähler und Regler ist über Energiemanagementstandards wie *SG-Ready* [47], *Open Metering System (OMS)* [48] und



mit Industriestandards und IoT-Geräten (Mobilfunknetz) zu realisieren. Industrielösungen erfordern auf Grund des hohen Funktionsumfangs eine eigene IT-Infrastruktur oder Serviceverträge mit hohen laufenden Kosten.

Auch für Kommunen bestehen einige Softwarelösungen mit angepasstem Funktionsumfang, wie beispielsweise *INM-Management* [49], *InterWatt* [50] oder *Optenda* [51]. Durch die zugeschnittene Web-Softwareumgebung besteht eine höhere Nutzerfreundlichkeit und geringerer Kostenaufwand im Vergleich zu Industrie- oder Konzernlösungen. Die Zähler können automatisiert über gängige Energiemanagement Standards angebunden werden oder mit Hilfe einer Smartphone-App manuell eingebunden werden. Die Softwareanbieter bieten zudem Dienstleistungen zur Erstellung eines Messkonzeptes an.

Laut einer Ansprechpartnerin für *Kom.EMS* in NRW werden bundesweit am häufigsten die Softwarelösungen der *Infoma GmbH* [52] oder *INM-Management* eingesetzt [53]. Die *Infoma GmbH* bietet Softwarelösungen für eine ganzheitliche digitale, kommunale Verwaltung an.

Der Förderkatalog des Bundes gibt Auskunft über bewilligte Förderungen im Rahmen der Kommunalrichtlinie für Energiemanagement [54]. Mit fünf geförderten Kommunen konnte telefonisch Kontakt aufgenommen werden, um Erfahrungen zu den verwendeten Software- und Messstellen einzuholen. Die verwendeten Softwarelösungen sind in der *Tabelle 10* dargestellt.

*Tabelle 10: Durch Kommunalrichtlinie für Energiemanagement geförderte Software [eigene Darstellung]*

Stadt Erkelenz	Infoma Software Consulting GmbH - newsystem
Stadt Rabenau	INM Institut für Nachhaltigkeitsmanagement GmbH – INM Management
Samtgemeinde Radolfshausen	INM Institut für Nachhaltigkeitsmanagement GmbH – INM Management
Stadt Ebersbach-Neugersdorf	INM Institut für Nachhaltigkeitsmanagement GmbH – INM Management
Amt Horst-Herzhorn	IngSoft GmbH - InterWatt

Die Erfahrungsberichte zu den verwendeten Softwarepaketen sind aus allen Kommunen positiv. Die Städte befinden sich noch im Aufbau eines Messsystems, integrieren die Zählerstände monatlich per App und nutzen die Anbindung der Zähler mit registrierender Leistungsmessung (RLM) durch den Messstellenbetreiber. Schrittweise soll der Zählerbestand bei anstehenden Modernisierungen automatisiert werden. Die Samtgemeinde *Radolfshausen* und das Amt *Horst-Herzhorn* pflegen die Zählerstände manuell in die Software ein.

## 4.2 Energetische Gebäudesanierung

Durch die Flutkatastrophe sind viele Gebäude sanierungsbedürftig geworden. Die Flutsanierungen können mit energetischen Sanierungen kombiniert werden, wodurch die Liegenschaften nicht nur wiederhergestellt, sondern auch energetisch verbessert werden können. Sanierungen sind besonders sinnvoll in Kombination mit einem Heizungs austausch, da nach der Sanierung der Heizenergiebedarf sinkt, wodurch die Anlagen kleiner dimensioniert werden können.

Sanierungsmaßnahmen müssen nach den Vorgaben der *Bundesförderung für effiziente Gebäude* (BEG) durchgeführt werden [55]. Darin wird für jede sanierbare Fläche ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) definiert, welchen die Fläche nach einer Sanierung mindestens erreichen muss. Die behandelten Sanierungen werden nach dem BEG von 2020 durchgeführt [55]. In den Sanierungsplanungen des Projektes wurden die Bauteilgruppen Außenwände, Bodenplatten / Kellerdecken, Fenster, Oberste Geschossdecke (OGD) und Dächer betrachtet. Für die Baustoffe der Sanierungsplanungen wurden zwei Hauptgruppen verwendet. Extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS) ist ein Kunststoffdämmstoff, welcher für die Außenwände und Kellerdecken eingesetzt werden kann. Durch die Zellstruktur von XPS ist der Dämmstoff wasserabweisend, weshalb sich der Einsatz in den durch Hochwasser betroffenen Flächen anbietet. XPS ist allerdings nicht komplett resistent gegen Schimmel, sollte der Dämmstoff über längere Zeit Dampf ausgesetzt sein [56]. Für die Fensterflächen wurden Fenster mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung eingeplant, da nur mit dieser Maßnahme die Anforderungen des BEG realistisch erreicht werden können [57]. Für die oberste Geschossdecke und das Dach wird der ökologische Dämmstoff Holzwolle verwendet. Im Gegensatz zu XPS ist Holzwolle ökologischer in der Herstellung [58].

Der Sanierungsstand der 36 Liegenschaften wurde basierend auf dem Energiebericht von 2018 und in Rücksprache mit den jeweiligen Gebäudemanager:innen ermittelt. Für 25 der 36 Gebäude konnten außerdem Baupläne zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich waren bei keiner der Liegenschaften die jeweiligen Bauteilaufbauten dokumentiert, was eine detaillierte Analyse durch ein Energieberaterprogramm erschwert. Nach Rücksprache mit der Stadtverwaltung wurde beschlossen, dass keine Komplettsanierungen geplant werden. Stattdessen wird ein jeweiliges Einsparpotential für jedes sanierungsbedürftige Bauteil berechnet, welches mit der gegebenen Datenlage ermittelt werden kann.

Das Einsparpotential wird über den Wärmeverlust  $Q_T$  des Bauteils berechnet. Dieser errechnet sich mithilfe folgender *Formel 3*:

*Formel 3: Formel zur Berechnung des jährlichen Wärmeverlustes [59]*

$$Q_T = H'_T * G * 24[h] * 10^{-3}$$

$$H'_T = F_x * A * U + U_{WB}$$

$Q_T \left[ \frac{kWh}{a} \right]$ : Jährlicher Wärmeverlust eines Bauteils

$H'_T \left[ \frac{W}{K} \right]$ : Flächenbezogener Transmissionswärmeverlust

G: Heizgradtage pro Jahr [60]

$F_x$ : Temperaturkorrekturfaktor eines Bauteils

A [ $m^2$ ]: Fläche des Bauteils

U  $\left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$ : Wärmedurchgangswert / U-Wert eines Bauteils

$U_{WB} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$ : Wärmebrückenzuschlag

Die Heizgradtage G geben an, an wie vielen Tagen im Jahr die Durchschnittstemperatur bei 12 °C oder niedriger liegt. Jede Temperatur, welche diese Vorgabe erfüllt, wird von der durchschnittlichen Raumtemperatur 20 °C abgezogen und zu einer Gesamtsumme G zusammengerechnet [60]. Für Bad Neuenahr-Ahrweiler lagen keine Daten zu den durchschnittlichen Heizgradtagen vor, weshalb diese selbstständig über das tägliche gemittelte Temperaturprofil von 2021 berechnet wurden [61].

Für das Einsparpotential wird der Wärmeverlust des Bauteils nach Datenlage mit dem Wärmeverlust eines Bauteils mit den Mindestanforderungen des BEG verglichen. Der prozentuale Unterschied der beiden Werte bildet das Einsparpotential. Die genauen U-Werte der aktuellen Bauteile konnten nicht aus Bauplänen oder durch die Gebäudemanager:innen ermittelt werden, weshalb die benötigten U-Werte mithilfe der folgenden *Abbildung 13* berechnet werden mussten.

Bauteil	Konstruktion	Baualtersklasse									
			1919	1949	1958	1969	1979	1984	1995	2002	2007
		bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis
		1918	1948	1957	1968	1978	1983	1994	2001	2006	
Pauschalwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten in W/(m <sup>2</sup> ·K)											
Dach (auch Wände zwischen beheiztem und unbeheiztem Dachgeschoss)	massive Konstruktion (insbes. Flachdächer)	2,1	2,1	2,1	2,1	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
	Holzkonstruktion (insbes. Steildächer)	2,6	1,4	1,4	1,4	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
oberste Geschossdecke	massive Decke	2,1	2,1	2,1	2,1	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
(auch Fußboden gegen Außen, z.B. über Durchfahrten)	Holzbalkendecke	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
Außenwand (auch Wände zum Erdreich oder zu unbeheizten (Keller-) Räumen)	massive Konstruktion (Mauerwerk, Beton oder ähnlich)	1,7	1,7	1,4	1,4	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
	2-schaliges Mauerwerk	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2
	Plattenbau (WBS 70 etc.)	-	-	-	1,8	0,7	0,7	0,7	-	-	-
	vorgehängte Platten, typisch 70'er Jahre	-	-	2,5	1,4	1,0	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3
	Holzkonstruktion (Fachwerk, Fertighaus oder ähnlich)	2,0	2,0	1,4	1,4	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2
	Wand gegen Erdreich	2,4	2,3	2,3	2,3	1,2	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4
sonstige Bauteile gegen Erdreich oder zu unbeheizten (Keller-) Räumen)	massive Bauteile	1,2	1,2	1,5	1,0	1,0	0,8	0,6	0,6	0,5	0,4
	Holzbalkendecke	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4
	Decke gegen Tiefgarage massive Bauteile	-	-	4,1	4,1	4,1	1,4	1,2	0,4	0,4	0,4
Rollladenkasten	neu, gedämmt	1,8									
	alt, ungedämmt	3,0									
Türen		3,5									

Abbildung 13: Wärmedurchgangskoeffizienten nicht opaker Bauteile im Urzustand [62]

In der verwendeten Quelle ist für die Kellerdecken ein Pauschalwert von 2,0 W/m<sup>2</sup>·K für Bauteile mit einem Baujahr vor 1960 und 1,5 W/m<sup>2</sup>·K für Bauteile mit einem Baujahr nach 1960 angegeben [62]. Für die Ermittlung der Kosten der einzelnen Bauteilmaßnahmen wurde ein Kostentool für Energieberatungen genutzt. Dieses Tool wird für die Ermittlung von Sanierungspreisen basierend auf aktuellen Kostenvariablen verwendet. Die ermittelten Kosten aus dem Tool sind Pauschalpreise, die einen Richtwert für Sanierungskosten wiedergeben. Auf die genauen Kosten für jedes Bauteil wird in den einzelnen Unterkapiteln eingegangen [63]. Für die Ermittlung des jeweiligen Einsparpotentials wird ein selbst erstelltes Excel-Tool verwendet. Mithilfe dieses Tools können die gesuchten Ergebnisse berechnet und übersichtlich dargestellt werden. Die *Abbildung 14* zeigt einen Ausschnitt des erstellten Berechnungstools. Die kompletten Berechnungen sind im Datentool eingetragen.

Fenster										
Baustoff	Kosten des Baustoffs pro m <sup>2</sup> in €	Fläche des Bauteils in m <sup>2</sup>	Aktueller U-Wert + WBZ in W/m <sup>2</sup> *K	Neuer U-Wert (BEG 2020) + WBZ in W/m <sup>2</sup> *K	Flächenbezogener Transmissionswärmeverlust alt in W/K	Flächenbezogener Transmissionswärmeverlust saniert in W/K	Aktuelle Wärmeverluste in kWh/Jahr	Neue Wärmeverluste in kWh/Jahr	Einsparungspotenzial in %	Kosten der Einzelmaßnahme mit Baunebenkosten in €
3-Fach WSV	950 €	190,92	1,60	1,05	305,47	200,47	23.108,35	15.164,85	34,38%	217649

Abbildung 14: Ausschnitt aus dem Tool für die Gebäudesanierung [eigene Darstellung]

Für den Gebrauch des Tools müssen die Felder „Fläche des Bauteils“ und „Aktueller U-Wert + Wärmebrückenzuschlag“ ausgefüllt werden. Die restlichen Felder werden automatisch durch die hinterlegten Formeln berechnet. Sollten die richtigen U-Werte bei der Aufnahme von Daten vor Ort in Erfahrung gebracht werden, können diese im Tool nachträglich eingegeben werden. Somit würden sich die Werte bezüglich des Einsparungspotentiales und der Kosten anpassen. Mittlerweile wurde das BEG auf eine neue Version von 2023 aktualisiert. Die Änderungen haben keine Auswirkungen auf die in der Machbarkeitsstudie betrachteten Einzelmaßnahmen [64].

#### 4.2.1 Außenwände

Für die Außenwandsanierungen werden nur Sanierungen mit einem Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) geplant. Dafür wird auf der Außenseite der bestehenden Wand eine Schicht aus Dämmstoff überklebt oder verschraubt. Das Dämmmaterial und die Dicke des Dämmstoffes hängen dabei von der bestehenden Außenwand ab. Als Dämmmaterial wurde hier XPS mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,032 W/m<sup>2</sup>\*K verwendet. Die Dämmstoffstärke hat einen Durchschnittswert von 20 cm [56]. Mit der aufgetragenen Dämmung muss nach den Vorgaben des BEG für die Außenwand ein U-Wert von maximal 0,20 W/m<sup>2</sup>\*K erreicht werden [55]. Für die Bestandsgebäude wird nach den Angaben des Fraunhofer Instituts ein U-Wert zwischen 1,5 W/m<sup>2</sup>\*K und 0,5 W/m<sup>2</sup>\*K angenommen, abhängig vom Baujahr der Liegenschaft [62]. Die Ergebnisse der Außenwandsanierungsplanungen sind in der folgenden *Abbildung 15* dargestellt.

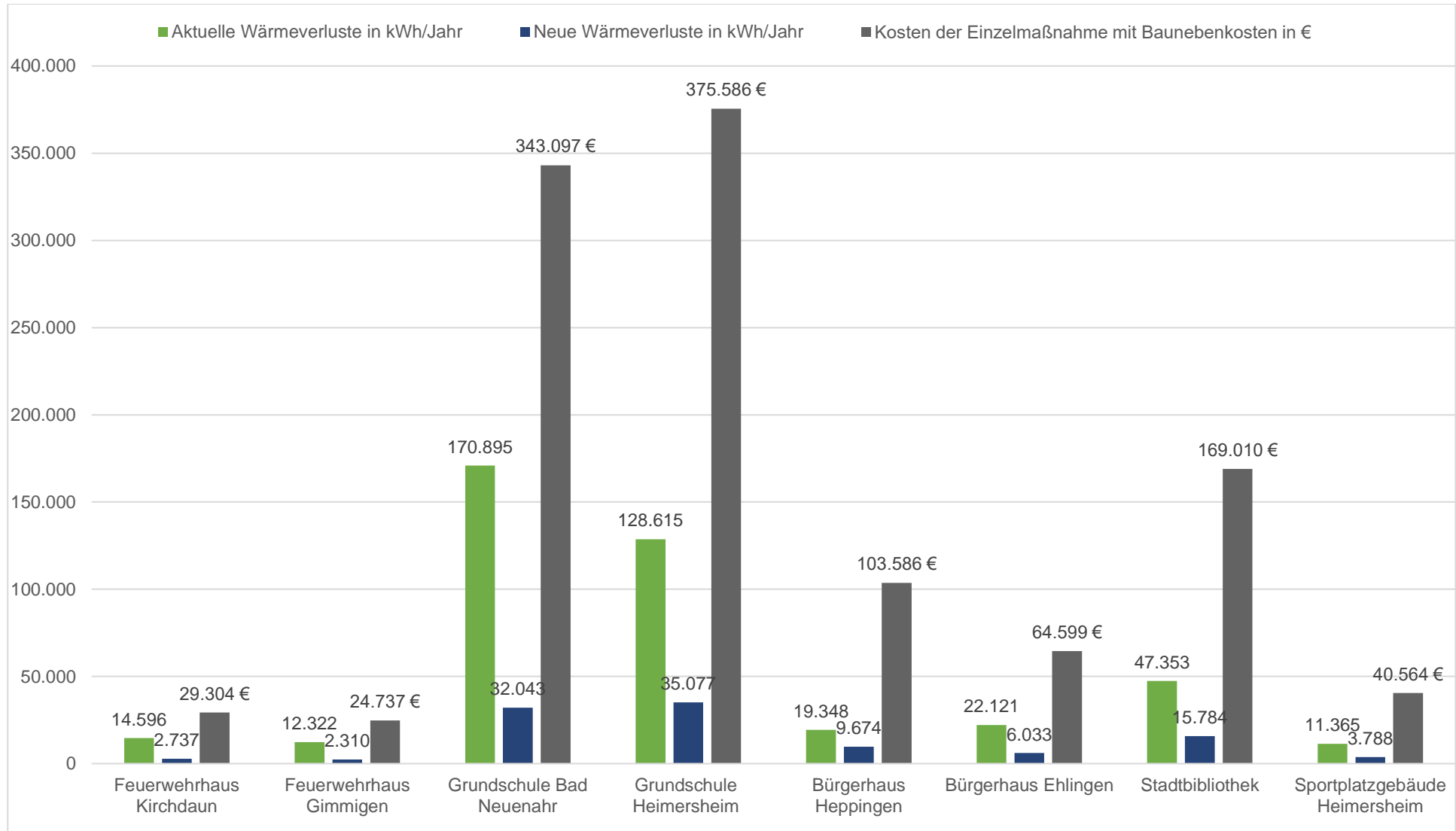


Abbildung 15: Ergebnisse der Außenwandsanierungen [eigene Darstellung]

Hier werden die jährlichen Wärmeverluste aus dem Referenzjahr (grün) mit den jährlichen Wärmeverlusten nach der Sanierung (blau) über die Außenwände verglichen. Die größte prozentuale Einsparung liegt bei den Feuerwehrhäusern *Kirchdaun* und *Gimmingen*, sowie der *Grundschule Bad Neuenahr* mit 81 % an eingespartem Wärmeverlust vor. Insgesamt können 74,81 % der Wärmeverluste über die Außenwand bei den betrachteten Flächen eingespart werden. Neben den Einsparungen werden im Diagramm auch die Investitionskosten für die Einzelmaßnahme dargestellt (grau). Die Kosten für die Sanierungsmaßnahmen wurden hier mit 250 €/m<sup>2</sup> des WDVS berechnet. Zusätzlich werden 20 % der Kosten als Baunebenkosten addiert. Die gesamten Kosten belaufen sich auf 1.150.483 € [63].

Die Kosten für benötigte Gerüste werden bei dieser Ergebnissumme nicht mit eingerechnet. Dies liegt daran, dass Gerüstkosten abhängig von der Größe und der Verwendungsdauer stark variieren. Nach Angaben des Kostentools liegen diese zwischen 10 € und 40 € pro m<sup>2</sup> Bezugsfläche, jedoch ist dies nur eine grobe Schätzung für Wohngebäude. [63]

#### 4.2.2 Fenster

Bei Fenstersanierungen werden die alten Fenster gegen eine neue Konstruktion ausgetauscht. Die Vorgabe des BEG an den U-Wert für neue Fenster liegt bei maximal 0,95 W/m<sup>2</sup>\*K für das gesamte Fenster inklusive Rahmen [55]. Damit dieser Wert realistisch erreicht werden kann, müssen Fenster mit einer Dreifach-Wärmeschutzverglasung eingebaut werden. In dieser Bauweise bestehen die Fenster aus drei Glasscheiben, zwischen welchen sich zwei Wärmeschutzschichten befinden. Die Schutzschichten senken den Temperaturaustausch zwischen der Außenluft und der Raumluft zu Großteilen, wodurch der Wärmeverlust während der Heizperiode sinkt. Als Rahmen wurden klassische Kunststoffrahmen angenommen. Bezüglich der Kosten haben diese einen Vorteil gegenüber ökologischen Holzrahmen. [57] Die Bestandsfenster werden nach den Werten des *Fraunhofer Instituts* zwischen 1,3 W/m<sup>2</sup>\*K und 3,0 W/m<sup>2</sup>\*K angenommen, abhängig vom Baujahr [62]. In der *Abbildung 16* sind die Ergebnisse der Sanierungsplanungen für die Fensterflächen dargestellt.

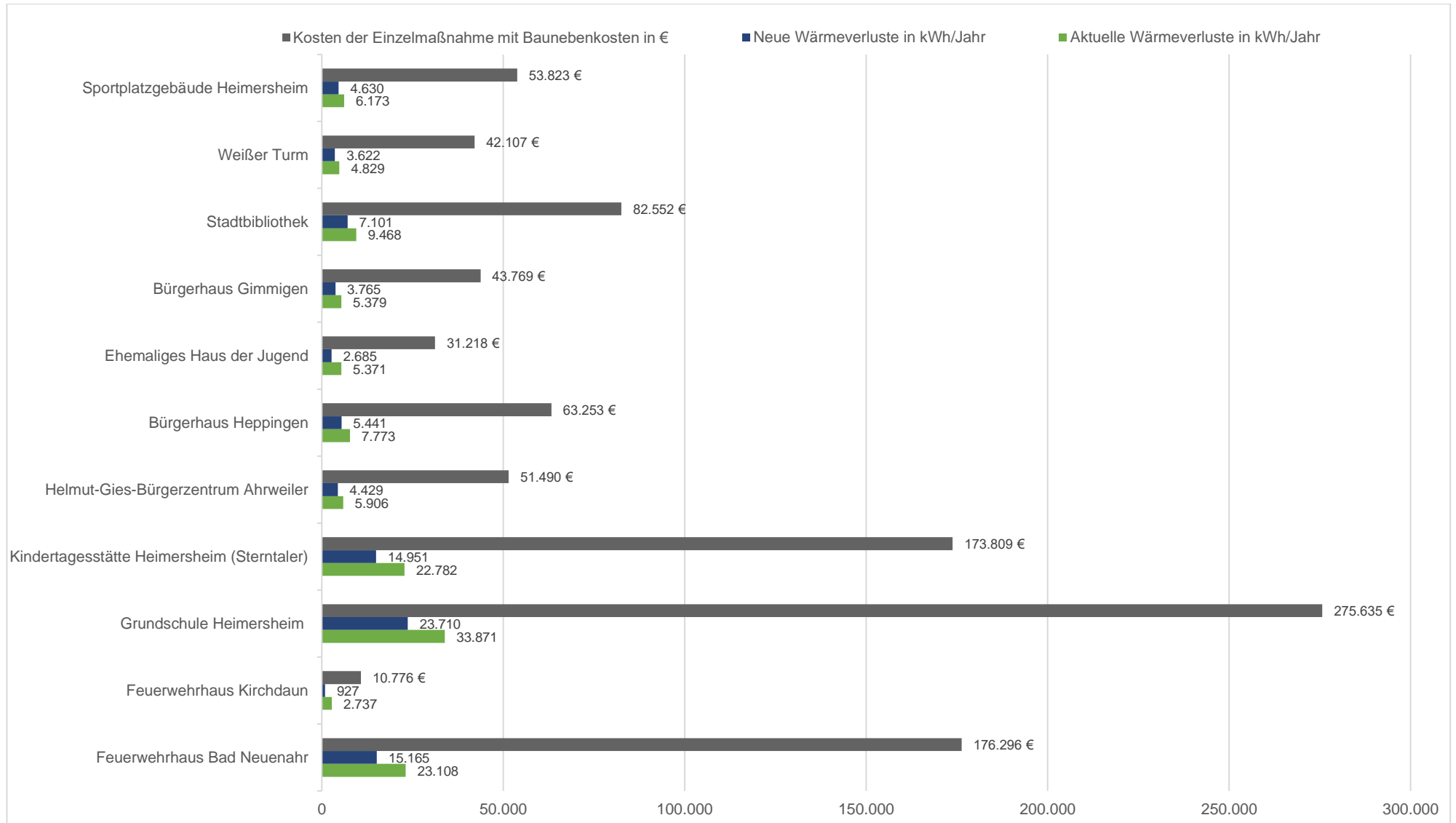


Abbildung 16: Ergebnisse der Fenstersanierungen [eigene Darstellung]



Bei den dargestellten Ergebnissen ist auffällig, dass auch bei Gebäuden mit großen Fensterflächen, wie der *Grundschule Heimersheim*, die Einsparungen durch einen Fenstertausch gering ausfallen. Dies liegt hauptsächlich an den geringen Unterschieden zwischen dem aktuellen U-Wert von durchschnittlich  $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  und dem U-Wert nach BEG-Vorschriften von  $0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$  [55, 62]. Hier ist im Vergleich zu anderen Sanierungsmaßnahmen eine geringere Einsparung zu erwarten. Insgesamt kann 32,16 % der Wärmeverluste über die Fensterflächen eingespart werden. Im Gegensatz zu den Einsparungen sind die Investitionskosten der Fenstersanierungen sehr hoch. Hierbei wurden mit 900 – 1.000 € pro  $\text{m}^2$  an Fensterfläche gerechnet, zuzüglich 20 % Baunebenkosten. Die gesamten Investitionskosten für die Fenstersanierungen liegen bei 1.004.727 € [63].

Viele der Liegenschaften haben speziell angefertigte Fenster in Bezug auf normierte Außenmaße. Vorwiegend bei den älteren und denkmalgeschützten Gebäuden, wie beispielsweise den Bürgerhäusern, sollte bei einer Sanierung das Gebäudebild erhalten bleiben. Daher müssten bei einer Fenstersanierung die Gläser und Rahmen als Sonderanfertigungen bestellt werden. Dies ist in den dargestellten Preiskalkulationen nicht mit einberechnet, da es für solche Anfertigungen keine Pauschalpreise gibt.

#### 4.2.3 Kellerdecke / Bodenplatte

Kellerdeckensanierungen sollen die thermische Trennung zwischen einem meist unbeheizten Keller und dem beheizten Erdgeschoss verbessern. Dafür wird, ähnlich dem WDVS, unterhalb der Kellerdecke eine Schicht aus Dämmstoff angebracht und anschließend verputzt. Die Dämmstoffstärke und Dicke sind dabei abhängig von der Situation vor Ort. Als Dämmstoff wurde XPS mit einem U-Wert von  $0,035 \text{ W/m}^2\text{K}$  und einer durchschnittlichen Dämmstoffdicke von 20 cm eingeplant [56]. Der zu erreichende U-Wert nach BEG-Vorgaben liegt bei  $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$  [55]. Die Pauschalwerte vom *Fraunhofer Institut* liegen zwischen  $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  und  $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , abhängig vom Baujahr [62].

Bei der Kellerdeckendämmung muss zudem auf einige Faktoren geachtet werden. Sämtliche Bauteile wie Türen und Fenster müssen nach der Sanierung weiterhin nutzbar sein. Zusätzlich müssen Rohre unter der Decke separat gedämmt werden. Diese Faktoren müssen bei jeder Liegenschaft vor Ort geprüft werden. In der folgenden *Abbildung 17* sind die Ergebnisse der Sanierungsplanungen für die Kellerdecken dargestellt.

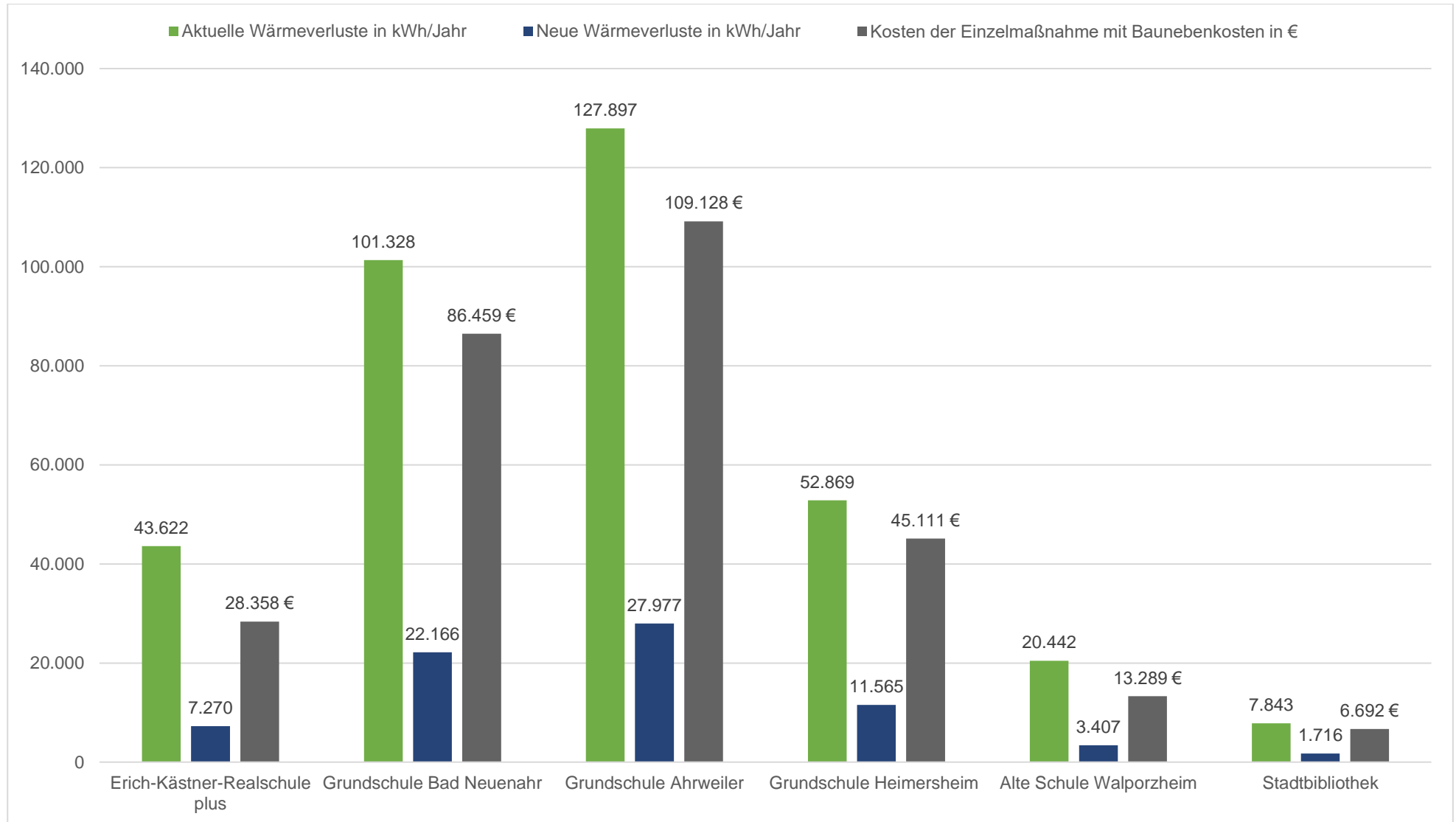


Abbildung 17: Ergebnisse der Boden und Kellerdeckensanierung [eigene Darstellung]

Bei dem Vergleich der Liegenschaften fallen die hohen individuellen Einsparungen auf, welche bei jedem der sechs Gebäude zwischen 78 % und 83 % liegen. Hier besteht ein hohes Einsparungspotential, da in jedem der Gebäude von einer unsanierten Betondecke ausgegangen werden kann. Das gesamte Einsparungspotential liegt bei 79,07 %. Die Investitionskosten liegen für die Kellerdeckensanierung bei 80 - 130 €/m<sup>2</sup>, zuzüglich der Baunebenkosten. Die Gesamtinvestitionen für alle Maßnahmen betragen 289.036 € [63].

#### 4.2.4 Oberste Geschossdecke

Die Sanierung der obersten Geschossdecke ist eine Pflichtmaßnahme des BEG. Somit muss für jedes Gebäude, bei welchem mindestens 10 % der Gebäudehülle durch eine Sanierung verändert werden, ebenfalls die oberste Geschossdecke auf den BEG-Standard nachsaniert werden [55]. Dies konnte hier aufgrund der unvollständigen Datenlage nicht immer berücksichtigt werden, weshalb nur die sanierungsbedürftigen Geschossdecken betrachtet werden. Der einzuhaltende Standard des BEG liegt bei einem U-Wert von 0,14 W/m<sup>2</sup>\*K und die Bestandsbauten liegen zwischen 0,6 W/m<sup>2</sup>\*K und 0,4 W/m<sup>2</sup>\*K [55, 62].

Die Sanierungsmethode ist dabei abhängig von der Nutzungsweise des Dachgeschosses. Sollte das Dachgeschoss genutzt werden, beispielsweise als Stauraum, können begehbare Platten aus XPS verlegt werden. Sollte der Bereich nicht genutzt werden, können auch nur begehbare Sparren mit Dämmungen im Zwischenraum verlegt werden. So kann bei Bedarf das Dachgeschoss noch betreten werden. Besteht kein Bedarf den Dachraum zu betreten, so kann auch eine komplette Dämmschicht ohne Sparren verlegt werden. Für die vorliegenden Sanierungen wird von begehbaren Sparren, sowie einer Holzwolledämmung von 20 cm mit einem U-Wert von 0,035 W/m<sup>2</sup>\*K ausgegangen [65]. In der *Abbildung 18* sind die Ergebnisse der Sanierungsplanungen für die oberste Geschossdecken dargestellt.

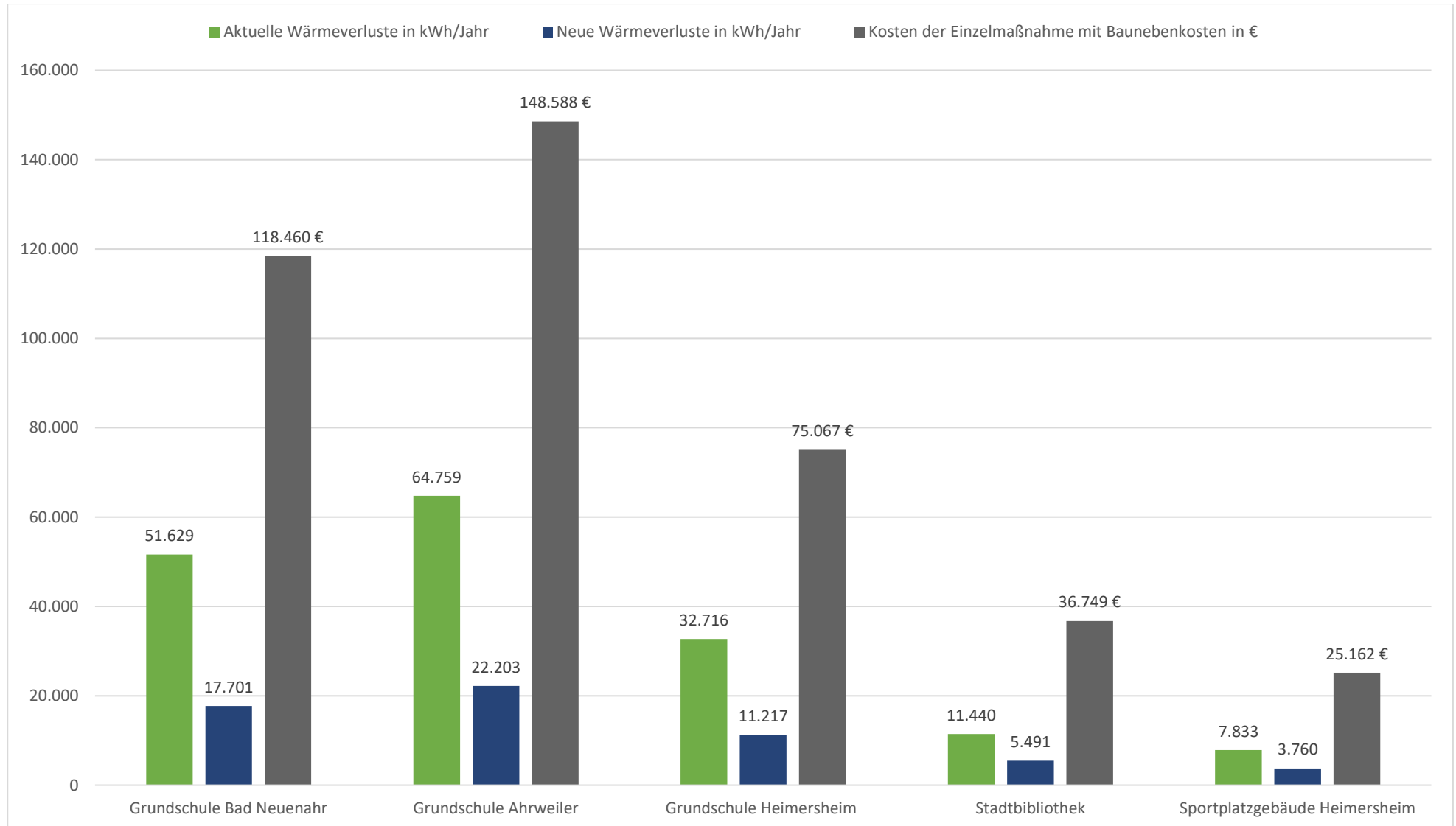


Abbildung 18: Ergebnisse der obersten Geschossdeckensanierungen [eigene Darstellung]

Hohe Einsparungen liegen hier bei den Grundschulen vor, da diese eine große OGD-Fläche haben und seit dem Bau nicht saniert wurden. Die gesamten Einsparungen liegen bei 64,14 %. Die Kosten für eine Sanierung mit begehbaren Sparren sind nach dem Energieberatertool 100 €/m<sup>2</sup>. Die gesamten Kosten liegen bei 404.025 €. Sollten begehbare XPS-Platten verbaut werden, steigen die Investitionskosten auf 300 €/m<sup>2</sup> [63].

#### 4.2.5 Dach

Die Dachsanierungen können auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden, abhängig vom Zustand des Daches. Sollten die Dachkomponenten wie Sparren, Ziegel, Dampfsperren und ähnliche noch intakt sein, so kann das Dach von innen mit einer Zwischensparrendämmung saniert werden. Dabei werden zwischen den bestehenden Dachsparren Dämmstoffblöcke eingesetzt. Sollte das Dach eine komplette Sanierung benötigen, bietet sich eine Aufsparrendämmung an. Dafür werden die Dämmstoffplatten auf den Sparren und vor der Dampfbremse befestigt. Diese Dämmmethode ist effektiver als die Zwischensparrendämmung, allerdings auch wesentlich aufwendiger und teurer, da das komplette Dach neu gedeckt werden muss. [66] Für die geplanten Sanierungen wurden ausschließlich Zwischensparrendämmungen mit Holz- wolle angenommen [65]. Die Dachfläche muss nach BEG-Vorgaben einen U-Wert von maximal 0,14 W/m<sup>2</sup>\*K erreichen [55]. Für die vorliegenden Dächer wurde ein pauschaler U-Wert von 0,4 W/m<sup>2</sup>\*K bis 2,6 W/m<sup>2</sup>\*K angenommen [62]. In der folgenden *Abbildung 19* sind die Ergebnisse der Sanierungsplanungen für die Dächer dargestellt.

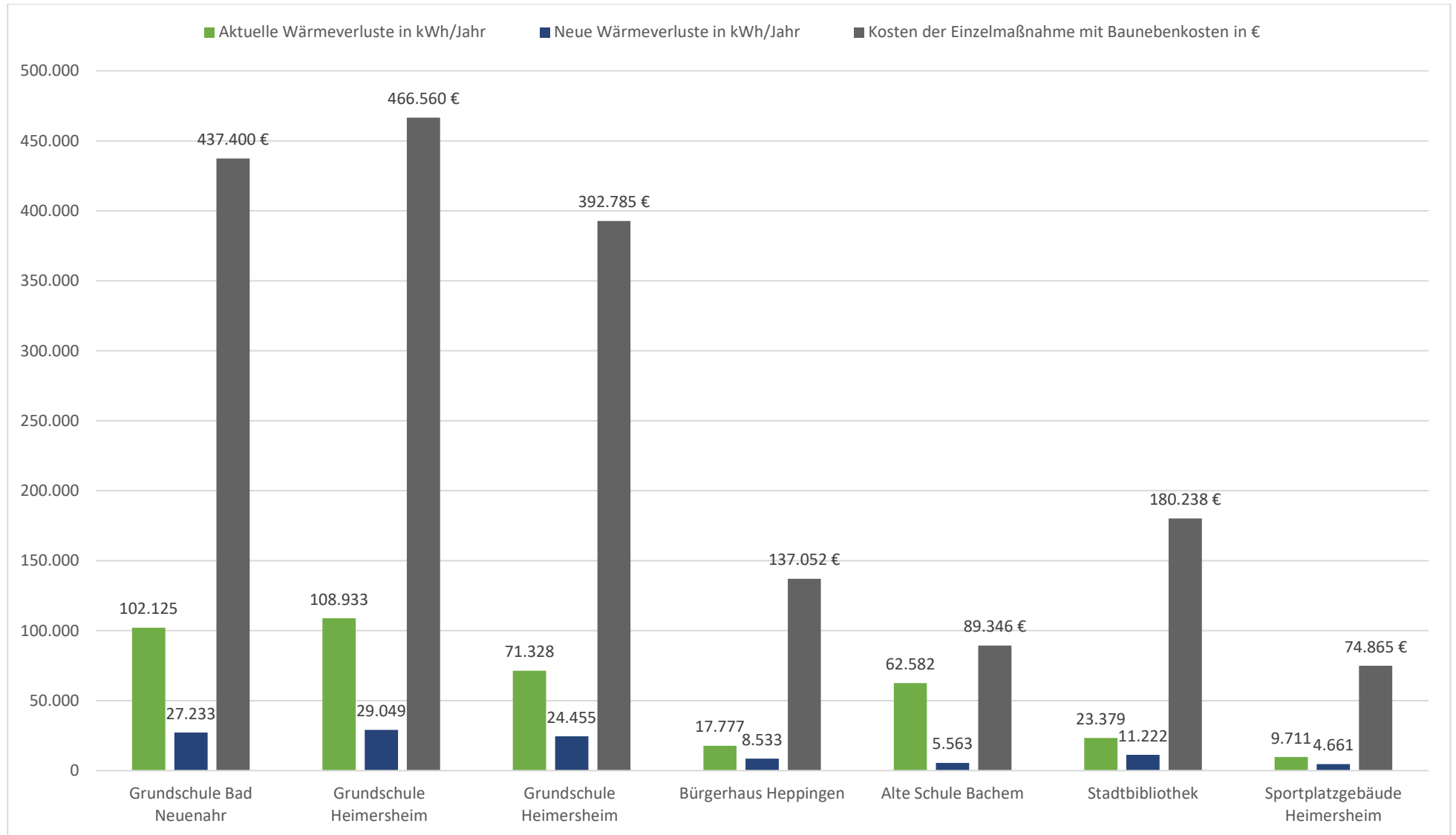


Abbildung 19: Ergebnisse der Dachsanierungen [eigene Darstellung]

Durch die große Dachfläche haben die *Grundschulen Ahrweiler, Bad Neuenahr* und *Heimersheim* das größte Einsparpotential, da diese Flächen seit dem Bau nicht saniert wurden. Insgesamt besteht bei den Dachflächen ein Einsparpotential von 72,03 % im Vergleich zum Referenzjahr 2018. Auch bei den Dachsanierungen fallen hohe Investitionskosten an. Hier wurden 300 €/m<sup>2</sup> Dachfläche berechnet, zuzüglich der Baunebenkosten. Die meisten der betrachteten Liegenschaften haben ein Steildach verbaut. Sollte wie bei der Grundschule Heimersheim die Sanierung eines Flachdaches geplant werden, ist mit etwa 270 €/m<sup>2</sup> zu rechnen. Insgesamt werden für die Sanierungen 1.778.246 € angesetzt. In den angegebenen Kosten sind keine Kosten für anfallende Gerüstarbeiten mit eingerechnet. Diese müssten bei einer Umsetzung zusätzlich kalkuliert werden. [63]

#### 4.2.6 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Sanierungen im Gesamten betrachtet. In der nachfolgenden *Tabelle 11* sind alle Liegenschaften mit den Sanierungsplanungen aufgeführt.

*Tabelle 11: Die gesamten Sanierungsergebnisse [eigene Darstellung]*

Name	Aktueller Endenergiebedarf in [kWh/a]	Neuer Endenergiebedarf in [kWh/a]	Gesamtes Einsparpotential	Gesamte Sanierungskosten
Sportplatzgebäude Heimersheim	80.104	61.861	22,77 %	194.414 €
Weißer Turm	125.291	124.084	0,96 %	42.107 €
Stadtbibliothek	214.685	156.516	27,10 %	475.241 €
Bürgerhaus Gimmigen	50.503	48.889	3,20 %	43.769 €
Ehemaliges Haus der Jugend	101.827	99.142	2,64 %	31.218 €
Alte Schule Walporzheim	85.976	68.941	19,81 %	13.289 €
Alte Schule Bachem	101.897	44.878	55,96 %	89.346 €
Bürgerhaus Ehlingen	27.080	10.992	59,41 %	64.599 €
Bürgerhaus Heppingen	41.409	20.159	51,32 %	303.891 €
Helmut-Gies-Bürgerzentrum Ahrweiler	27.748	26.272	5,32 %	51.490 €
Kindertagesstätte Heimersheim (Sterntaler)	138.321	130.490	5,66 %	173.809 €

Name	Aktueller Endenergiebedarf in [kWh/a]	Neuer Endenergiebedarf in [kWh/a]	Gesamtes Einsparpotential	Gesamte Sanierungskosten
Grundschule Heimersheim	567.713	354.337	37,59 %	1.164.183 €
Grundschule Ahrweiler	409.176	186.816	54,34 %	724.276 €
Grundschule Bad Neuenahr	545.593	218.760	59,90 %	985.415 €
Erich-Kästner-Realschule plus	1.515.410	1.479.059	2,40 %	28.358 €
Feuerwehrhaus Gimmigen	26.654	16.643	37,56 %	24.737 €
Feuerwehrhaus Kirchdaun	16.234	2.565	84,20 %	40.080 €
Feuerwehrhaus Bad Neuenahr	123.492	115.549	6,43 %	176.296 €
Gesamt	4.199.113	3.165.950	24,60 %	4.626.519 €

Für die Ergebnisse der Spalte „neuer Endenergiebedarf“ werden die errechneten Einsparungen an Wärmeverlusten von dem vorherigen Endenergiebedarf abgezogen, welcher aus dem Energiebericht 2018 stammt. Die Differenz der beiden Werte bildet das Einsparungspotential. Alle Kosten der Einzelmaßnahmen werden zusammengerechnet und unter den gesamten Sanierungskosten zusammengefasst. Bei der Gesamtbetrachtung können die Energieverbräuche der Liegenschaften von 4,2 Mio. kWh/a an Wärmebedarf auf 3,1 Mio. kWh/a um etwa 25 % gesenkt werden. Insgesamt wurden Sanierungskosten von 4,6 Mio. € berechnet. Auf Basis dieser errechneten Werte werden die folgende Energiesystemmodellierung, sowie Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz berechnet.

#### 4.2.7 Fehlerbetrachtung

Bei 11 der 36 Liegenschaften konnte der dazugehörige Bauplan aufgrund von Flutschäden nicht zur Verfügung gestellt werden, weshalb für die Bestimmung der Bauteilflächen teilweise auf eine Gebäudeansicht über Online-Kartendienste zurückgegriffen wurde. Darüber aufgenommene Werte können von realen Längen abweichen, was zu Fehlern bei Berechnungen führen kann.

Da die Rechnungen basierend auf pauschal angenommenen U-Werten durchgeführt wurden, können die genauen Daten von den Annahmen abweichen. Sanierungsplanungen werden üblicherweise als Komplettsanierung über ein Energieberatungsprogramm durchgeführt. Aufgrund der lückenhaften Datenlage wurde die Berechnung der Einsparungswerte nach Absprache mit der Stadtverwaltung per Hand über ein *Excel*-Tool durchgeführt, mit welchem die



Flächen nur einzeln betrachtet werden können. In den vorliegenden Sanierungsplanungen werden zudem nur die identifizierbaren Flächen mit Sanierungsbedarf betrachtet, weshalb die ermittelten Einsparungspotentiale für die Liegenschaften unvollständig sein können.

Ein weiterer möglicher Fehler ist, dass die Angaben für bereits durchgeführte Sanierungen im Energiebericht 2018 teilweise lückenhaft sind. Zudem wurde an vielen Gebäuden, welche von der Flut beeinträchtigt sind, bereits flutbedingte Sanierungs- und Wiederaufbaumaßnahmen durchgeführt. Die Dokumentation dieser bereits geplanten oder durchgeführten Maßnahmen ist allerdings kaum erfolgt, weshalb hier ebenfalls keine Sanierungs- oder Baupläne zur Verfügung gestellt werden konnten. Somit können als sanierungsbedürftig angenommene Flächen bereits saniert worden sein.

Bei zwei Gebäuden halten die ermittelten Einsparwerte einer Plausibilitätsprüfung nicht stand. Diese sind das *Feuerwehrhaus Kirchdaun* und das *Bürgerhaus Ehlingen*. Die Fehlerquelle liegt an den angenommenen Heizgrenztagen, da der angenommene Wert von einem konstanten Heizen der Gebäude bei Außentemperaturen von 12 °C oder weniger ausgeht. Vermutlich werden diese Gebäude nicht kontinuierlich geheizt, weshalb anzunehmen ist, dass die realen Einsparungspotentiale deutlich niedriger sind.

Bei zwei Liegenschaften besteht ein Einsparpotential an der Außenwand, jedoch ist durch die Beschaffenheit der Wand ein WDVS nicht umsetzbar. Dies trifft auf beide Schulen in *Walporzheim* und *Bachem* zu. Beide Gebäude haben ein altes Ziegelmauerwerk und unterstehen dem Denkmalschutz. Eine Außenwandsanierung wäre bei beiden Gebäuden sinnvoll, da diese seit dem Baujahr um 1900 nicht verändert wurden, allerdings kann dies nicht über ein übliches WDVS realisiert werden. Hierbei muss entweder eine Innendämmung oder eine Dämmung hinter den Außenziegeln genutzt werden. Beide Sanierungsvarianten lassen sich bezüglich der Einsparungen und Kosten nicht über Pauschalwerte errechnen, weshalb diese Sanierungsmaßnahmen nicht berücksichtigt wurden.

## 5 Energiesystemmodellierung

Um die Auswirkungen der Modernisierungsmaßnahmen auf den Energiehaushalt der Liegenschaften zu untersuchen und die vorgeschlagenen Komponenten zu dimensionieren, wird eine Energiesystemmodellierung mit *PyPSA* (*Python for Power System Analysis*) durchgeführt.

### 5.1 Vorgehen

Im folgenden Kapitel wird erläutert, wie die Simulation der Liegenschaften in *PyPSA* aufgebaut und durchgeführt wird.

Für eine erste Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von unterschiedlichen Energiesystemen und Auslegungen werden die gewählten Komponenten mit Kosten in 500 Simulationen pro Liegenschaft automatisch optimiert. Die Annahmen werden über die Simulationsiterationen in einem Wertebereich variiert. So soll eine optimale Auslegung bestimmt werden, welche zukünftig steigende Energiepreise und variierende Investitionskosten berücksichtigt. Die Liegenschaften mit einer Eignung für Sanierung oder einer Abwasser/Wasser-Wärmepumpe werden in zusätzlichen Varianten geprüft. (Siehe *Kapitel 4.2*) Mit diesen Simulationsergebnissen werden daraufhin die Energiesysteme für jede Liegenschaft gewählt und in Bezug auf Wirtschaftlichkeit optimal dimensioniert. (Siehe *Kapitel 5.2*)

Final werden weitere 500 Simulationsdurchgänge pro Liegenschaft in der gewählten Dimensionierung mit variierenden Annahmen durchgeführt, um die Energieflüsse und die Wirtschaftlichkeit in verschiedenen Szenarien zu untersuchen.

### 5.1.1 Annahmen

Die Datengrundlage bildet der Energiebericht von 2018 und Auswertungen einer Umfrage an die zuständigen Gebäudemanager:innen (Siehe *Anhang 1*). Jahresverbräuche für Strom und Wärme werden aus dem Energiebericht entnommen und der jährlicher Heizenergiebedarf mit 95 % des Wärmeverbrauchs aus 2018 angenommen. Das nicht-investive Einsparpotential wird in jeder Simulationsiteration zwischen 0 % und dem geschätzten maximalen Einsparpotential variiert. Die Maximalwerte ergeben sich aus den Erfahrungsberichten von Kommunen mit eingeführtem Energiemanagementsystem. Gebäude mit Sanierungspotential werden in zwei Varianten (saniert; unsaniert) simuliert, wobei sich der angenommene Heizenergiebedarf um die errechnete Einsparung reduziert.

In *Tabelle 12* sind die Eingangsvariablen der Simulation dargestellt. Diese werden in jeder Simulationsiteration zufällig zwischen Minimal- und Maximalwert variiert. Die verwendete Zufallsfunktion („random“) nutzt die Gaußsche Normalverteilung.

*Tabelle 12: Simulationsannahmen [6, 35, 63]*

Annahme	Minimum	Maximum	Einheit
Energieeinsparung Wärme nicht-investiv	0 %	20 %	
Energieeinsparung Strom nicht-investiv	0 %	5 %	
Energieeinsparung durch Sanierung	Siehe Sanierungsplanungen		
Sanierungskosten			
Speicherverluste Batterie	0,0042 %		pro Stunde
Speicherverluste Wärmespeicher	0,35 %		pro Stunde
Investitionskosten PV-Anlage	Aus Kostenerstellung (siehe Kapitel PV*Sol)		

Annahme	Minimum	Maximum	Einheit
Investitionskosten Wärmepumpe	4.500 €	6.000 €	pro kW elektrisch
Aufschlag für Wärmepumpen mit Abwasserwärmerückgewinnung	20 %		Investitionskosten
Investitionskosten Batteriespeicher[67, 68]	800 €	1.300 €	pro kWh
Investitionskosten Wärmespeicher (Wasser)	200 €	300 €	pro kWh
Zusätzlicher Anteil für Installation und Wartung	20 %	30 %	Investitionskosten
Betriebszeitraum	20		Jahre
Arbeitspreis Strom	0,252 €		pro kWh
Arbeitspreis Fernwärme	0,058 €		pro kWh
Arbeitspreis Heizöl	0,080 €		pro kWh
Arbeitspreis Gas	0,108 €		pro kWh
Arbeitspreis Holzhackschnitzel	0,053 €		pro kWh
Preissteigerung Strom	0 %	70 %	-
Preissteigerung Gas	0 %	200 %	-
Preissteigerung Öl	0 %	200 %	-
Preissteigerung Fernwärme	0 %	50 %	-
Preissteigerung Holzhackschnitzel	0 %	80 %	-
Jahresmarktwert Solar	0,03 €	0,165 €	Ø 2020 – Ø 1. Hbj. 2022

Spezifische Investitionskosten wurden aus Marktrecherchen entnommen (Siehe *Kapitel 7*). Auf diese wird zusätzlich ein Aufschlag von 20 - 30 % für Installation und Wartung erhoben. Für die Installation von Abwasserwärmetauschern und die Leitungsverlegung im Falle einer Abwasserwärmepumpe wird eine Erhöhung der spezifischen Investitionskosten der Wärmepumpe von weiteren 20 % angenommen. Speicherverluste der Batteriespeicher werden aus Erfahrungswerten auf 1 % Speicherverlust in 10 Tagen abgeschätzt. Die Betriebsenergie des Batteriemagementsystems wird vernachlässigt. Die Verluste der Wärmespeicher werden mit folgenden Annahmen aus *Tabelle 13* abgeschätzt. Variierende Bereitschaftsverluste nach Speichergöße werden vernachlässigt.

*Tabelle 13: Bereitschaftsverluste nach Speichergöße [eigene Darstellung]*

Mindesttemperatur im Speicher	35 °C
Maximaltemperatur	55 °C
Energieinhalt 1.000 l (Temperaturdelta 20°C)	20 kWh
Bereitschaftsverluste Pufferspeicher	70 W bei 1000 Liter Speichervolumen[69]
Prozentuale Bereitschaftsverluste	70 Wh / 20 kWh ~ 0,35 %

Für alle Anlagenkomponenten wird ein Betriebszeitraum von 20 Jahren angenommen. Ausgangswert der Energiepreise sind die aktuellen Verträge der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler, diese werden in jeder Iteration um einen Faktor aus dem Wertebereich für den jeweiligen Energieträger erhöht. Die Maximalwerte richten sich nach den Preisen für Neuverträge im zweiten Quartal von 2022.

Mit Inkrafttreten am 30. Juli 2022 ermöglicht das *Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023* erstmalig die getrennte Anmeldung einer PV-Anlage zur Volleinspeisung und Überschusseinspeisung. Der erzeugte Strom kann im Fall der Volleinspeisung nicht selbst genutzt werden und wird direkt ins Netz eingespeist. Die Einspeisevergütung wird dementsprechend erhöht. Mit dieser Änderung des *EEG* können PV-Systeme auch auf Gebäuden mit geringem Stromverbrauch wirtschaftlich sein. Es können zudem beide Anlagentypen installiert werden, dies setzt allerdings zwei getrennte Systeme mit eigenen Zählern voraus.

Die Einspeisevergütung ist abhängig von der Anlagengröße gestaffelt und anteilig gemittelt. Ab einer Anlagengröße von 100 kWp besteht weiterhin die Pflicht zur Direktvermarktung im Marktprämienmodell, wie in *Tabelle 14* zu erkennen ist.

*Tabelle 14: Einspeisevergütung EEG 2023 (Anlagenanmeldung ab 01.01.2023) [70]*

Anlagentyp	Leistungsklasse	Direktvermarktung Marktprämie	Festvergütung
Gebäudeanlagen mit Volleinspeisung	≤ 10 kWp	13,4 ct/kWh	13,0 ct/kWh
	≤ 40 kWp	11,3 ct/kWh	10,9 ct/kWh
	≤ 100 kWp	11,3 ct/kWh	10,9 ct/kWh
	≤ 400 kWp	9,4 ct/kWh	Direktvermarktung
	≤ 1000 kWp	8,1 ct/kWh	Direktvermarktung
Gebäudeanlagen mit Überschusseinspeisung	≤ 10 kWp	8,6 ct/kWh	8,2 ct/kWh
	≤ 40 kWp	7,5 ct/kWh	7,1 ct/kWh
	≤ 100 kWp	6,2 ct/kWh	5,8 ct/kWh
	≤ 1000 kWp	6,2 ct/kWh	Direktvermarktung

Für eine Anlage mit 50 kWp und Überschusseinspeisung berechnet sich die Einspeisevergütung mithilfe der *Formel 4*.

*Formel 4: Beispielhafte Berechnung der Einspeisevergütung [70]*

$$\frac{10 \text{ kWp} * 0,086 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 30 \text{ kWp} * 0,075 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 10 \text{ kWp} * 0,062 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}{50 \text{ kWp}} = 7,46 \text{ ct€/kWh}$$

Der Jahresmarktwert Solar variiert im Bereich der Durchschnittswerte für 2020 und des 1. Halbjahres 2022. Das Jahr 2020 weist seit der Erstellung des Energieberichts im Jahr 2018 den geringsten durchschnittlichen Jahresmarktwert für Solar auf und wird als Bezugsjahr für den Minimalwert gewählt. Liegt der variierte Wert in einer Iteration über der Mindestvergütung der Marktprämie, wird dieser als Einspeisevergütung für Anlagen größer 100 kWp gewählt.

Die maximale PV-Belegung und das Ertragsprofil für jedes Gebäude werden aus der *PV\*Sol*-Simulation entnommen. Aus den jeweiligen Kostenabschätzungen werden für jede Anlage spezifische Kosten berechnet. Unter Berücksichtigung des Maximalwerts, der spezifischen Kosten, des spezifischen Ertrags und der jeweiligen Einspeisevergütung werden die Generatorleistungen der Anlagen mit Voll- und Überschusseinspeisung und der Solarthermieanlage optimiert. Da mit dem PV-Ertragsprofil gerechnet wird und Solarthermieanlagen eine höhere Effizienz aufweisen, wird für diese eine Ertragssteigerung um den Faktor 2 angenommen (Effizienz PV: ~25 %; Effizienz Solarthermie: ~50 %). Diese Kopplung ist nötig, um die maximale Belegungsfläche der Gebäude zu berücksichtigen. In *Tabelle 15* sind die in der Simulation geprüften möglichen Komponenten der Energiesysteme dargestellt. Die Wärmeerzeuger basieren auf den in *Kapitel Wärme* vorgestellten Annahmen.

*Tabelle 15: Betrachtete Komponenten der Energiesysteme [eigene Darstellung]*

Komponente	Kommentar
PV-Anlage Teileinspeisung	Maximale Dachbelegung aus PV*Sol
PV-Anlage Volleinspeisung	
Solarthermie	Effizienzumrechnung für Solarthermie mit Faktor 2
Batteriespeicher	Alle Liegenschaften mit PV-Anlage
Wärmespeicher (Wasser)	Alle Liegenschaften mit Wärmepumpe
Luft-Wärmepumpe	Alle Liegenschaften ohne möglichen Fernwärmeanschluss und Liegenschaften mit PV-Anlage
Abwasser-Wärmepumpe	Liegenschaften mit hohem Wärmebedarf, PV-Anlage und anstehender Kanalerneuerung
Fernwärme	Liegenschaften mit zukünftig potentiell möglichem Fernwärmeanschluss (vgl. Kapitel Wärme)

Abwasserwärmepumpen weisen auf Grund der nötigen Anbindung an einen Hauptabwasserkanal inklusive Kanalwärmetauscher hohe Investitions- und Installationskosten auf, weshalb diese in Bestandsgebäuden meist nur in Verbindung mit hohen Wärmeverbräuchen, einer

direkten Anbindung an einen Hauptkanal und einer anstehenden Kanalsanierung wirtschaftliche Vorteile bieten. [29]

Ein Kanalsanierungsplan konnte nicht bereitgestellt werden, allerdings müssen nach Aussage der Stadtverwaltung große Teil des Kanalsystems im Überflutungsgebiet in den nächsten Jahren erneuert werden [71]. Zur Auswahl geeigneter Liegenschaften werden Adressen von Gebäuden mit hohem Wärmebedarf mit dem aktuellen Kanalplan (Siehe *Anhang 1.6*) und dem Überschwemmungsgebiet verglichen. Die potentiellen Gebäude sind in *Tabelle 16* aufgezeigt. Für drei der Gebäude werden keine Sanierungsmaßnahmen empfohlen, weshalb diese nur im unsanierten Zustand geprüft werden.

*Tabelle 16: Gebäude mit potentieller Eignung für Abwasserwärmepumpen [eigene Darstellung]*

Variante mit Abwasser-WP: unsaniert	Variante mit Abwasser-WP: saniert
Rathaus	-
Erich Kästner Realschule	Erich Kästner Realschule
Grundschule Bad Neuenahr	Grundschule Bad Neuenahr
Turnhalle Grundschule Bad Neuenahr	-
Grundschule Ahrweiler	Grundschule Ahrweiler
Turnhalle Grundschule Ahrweiler	-

Die im Energiebericht getrennten Gebäude der *Freiwilligen Feuerwehr Ramersbach* und *Mehrzweckhalle Ramersbach* teilen sich ein Gebäude, weshalb diese als ein gekoppeltes Energiesystem betrachtet werden. Die vorhandene 14,75 kWp Anlage wird in der Simulation berücksichtigt. Das *Mehrgenerationenhaus* und die *Kindertagesstätte Bad Neuenahr* liegen ebenfalls im gleichen Gebäude und werden als ein Energiesystem betrachtet. [6]

Die Verpachtung des Daches der *Erich Kästner Realschule* läuft laut Aussage der Ansprechpartnerin im Jahr 2027 aus, weshalb die vorhandene PV-Anlage nicht betrachtet und das Dach zur Neuauslegung nach Ablauf des Pachtzeitraumes untersucht wird.

Aus Gründen des Simulationsumfangs wird eine stündliche Auflösung für die Lastprofile gewählt, welche *PV\*Sol* entnommen werden. Das thermische Lastprofil wird mit einem Lastprofilgenerator erstellt [72]. Basis ist eine Heizlast mit einem Temperaturprofil für das Jahr 2018 [73]. Schulferien und Ferientage werden nicht berücksichtigt. Laut den Umfrageergebnissen wird in sechs von 36 Liegenschaften die Warmwasserversorgung nicht durch Durchlauferhitzer bereitgestellt. Bei diesen wird ein kombiniertes und auf 1.000 kWh/a normiertes Lastprofil für Heizwärme und Warmwasserbereitung erstellt. Das Warmwasser beansprucht in diesem Fall einen Anteil von 15 % des jährlichen thermischen Energiebedarfs.

Das Leistungszahlprofil für Luft/Wasser-Wärmepumpen wird mit dem Tagesmittel der Temperatur von 2018 in Bad Neuenahr-Ahrweiler und einer Vorlauftemperatur von 55 °C bestimmt. Die Kennlinie der Leistungszahl wird unter den Annahmen einer Leistungszahl von 2 bei – 5 °C und 3 bei 15 °C Lufttemperatur linearisiert [74]. Die so bestimmte JAZ beträgt 2,6. Die Basis für das Profil der Abwasserwärmepumpe bildet das Profil einer Erdwärmepumpe, unter der Annahme, dass die Abwassertemperatur im Winter durchgängig 10 °C, im Sommer 20 °C und in den Wechseljahreszeiten 15 °C beträgt. Unter dieser Berücksichtigung wird eine JAZ von 4,8 erreicht [29]. Eine Darstellung der Temperaturverläufe und Leistungszahlprofile ist *Abbildung 20* zu entnehmen. (Siehe *Anhang 4.2*)

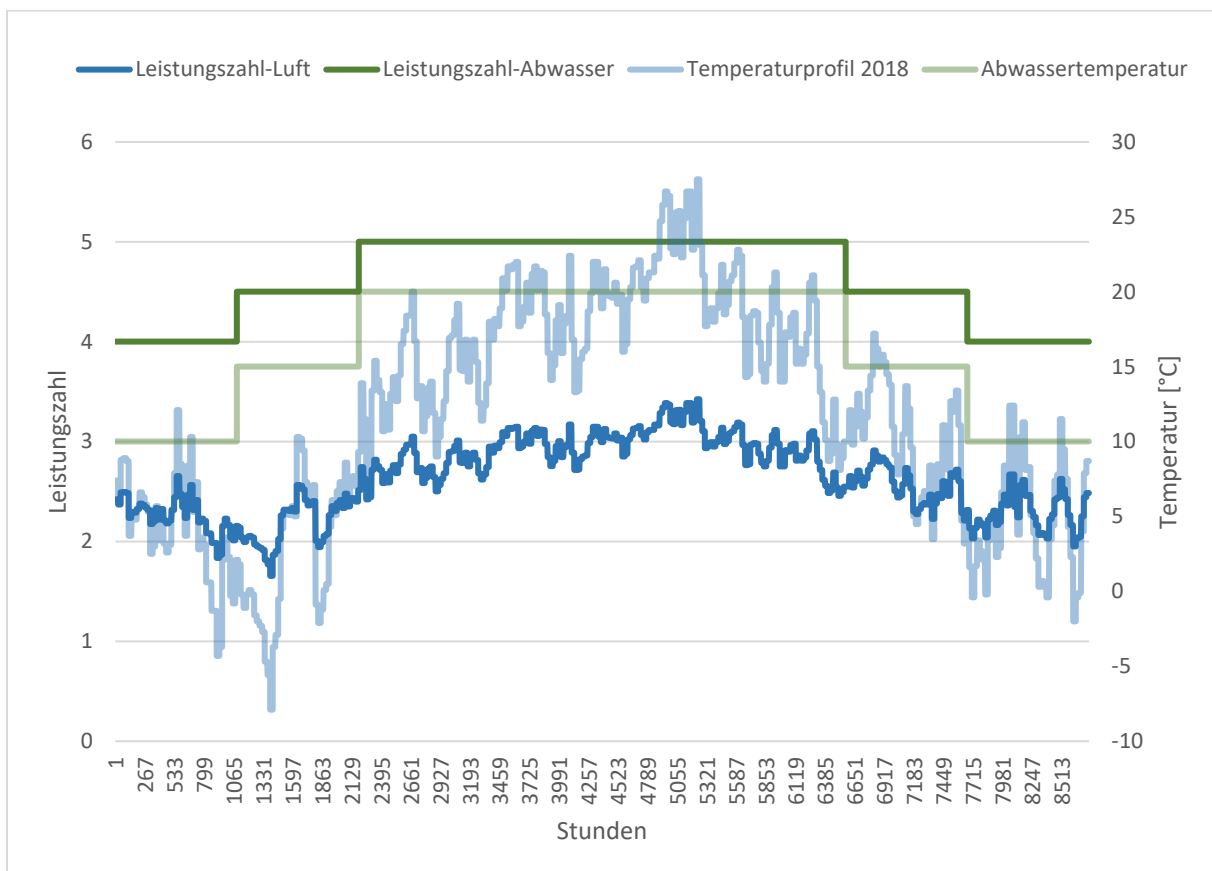


Abbildung 20: Leistungszahlprofile der Wärmepumpen [eigene Darstellung]

### 5.1.2 Simulation mit automatischer Kostenoptimierung

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Komponenten in Kombination miteinander, wird zunächst das PyPSA Modul „lin.opt“ genutzt, um diese unter ändernden Annahmen wirtschaftlich zu optimieren. Jede Liegenschaft wird nacheinander mit 500 Iterationen simuliert. Die Simulation betrachtet dabei alle für das Gebäude möglichen Komponenten. Eine Schemazeichnung des Simulationsaufbaus ist *Abbildung 21* zu entnehmen.

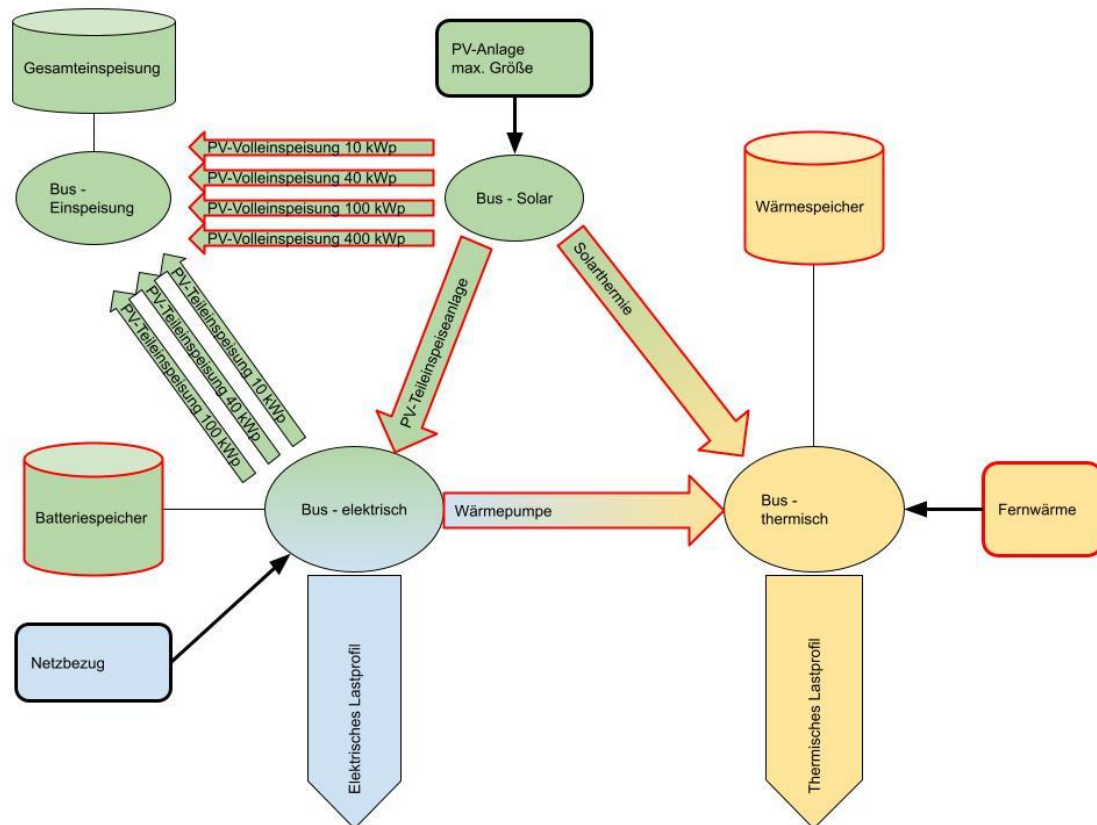


Abbildung 21: Schema der PyPSA-Simulation mit automatischer Dimensionierung [eigene Darstellung]

Ein „Bus“ stellt einen Anschlusspunkt/Ankerpunkt für ein Teilsystem oder Energieträger dar. Stark umrandete Rechtecke symbolisieren Generatoren, Zylinder Speichersysteme („Stores“) und Pfeile („Links“) Energiewandler oder richtungsabhängige Verbindungsglieder. Rot umrandete Systeme werden unter Berücksichtigung der Annahmen automatisch dimensioniert.

Es ist keine direkte Integration der gestaffelten Einspeisevergütung in die *PyPSA* Logik gelungen, weshalb diese durch einen „Link“ pro Einspeisegruppe realisiert wurde. Diese übernehmen Ertragsprofile und Investitionskosten pro Kilowatt der PV-Anlage, sind durch die maximale Leistungsbegrenzung pro Einspeisegruppe limitiert und übernehmen die jeweilige Einspeisevergütung der Gruppe. Das Problem dieses Aufbaus ist die Teileinspeisung, da die Vergütung nur über die Größe der Einspeiseverbindung und nicht über die Größe der gesamten Solaranlage bestimmt wird. In einigen Testdurchläufen mit angepassten Einspeisevergütungen konnte allerdings keine regelmäßige oder gravierende Abweichung der Auslegungen festgestellt werden, weshalb die theoretische Tendenz zur Überdimensionierung vernachlässigt wird. Der Programmcode ist in *Anhang 4.2* einsehbar.



### 5.1.4 Simulation mit definierten Komponenten

Nach Dimensionierung der Energiesysteme mit den Ergebnissen der ersten 500 Simulationen werden weitere 500 Iterationen pro Liegenschaft in der gewählten Auslegung durchgeführt. Es werden die optimalen Generatorgänge und Speicherlasten unter variierenden Energiepreisen geprüft. Zur Beschleunigung der Berechnungszeit und genaueren Betrachtung der Energiebezüge der Wärmepumpe wird der Simulationsaufbau wie folgt in der *Abbildung 22* geändert. Der Programmcode ist dem *Anhang 4.2* zu entnehmen.

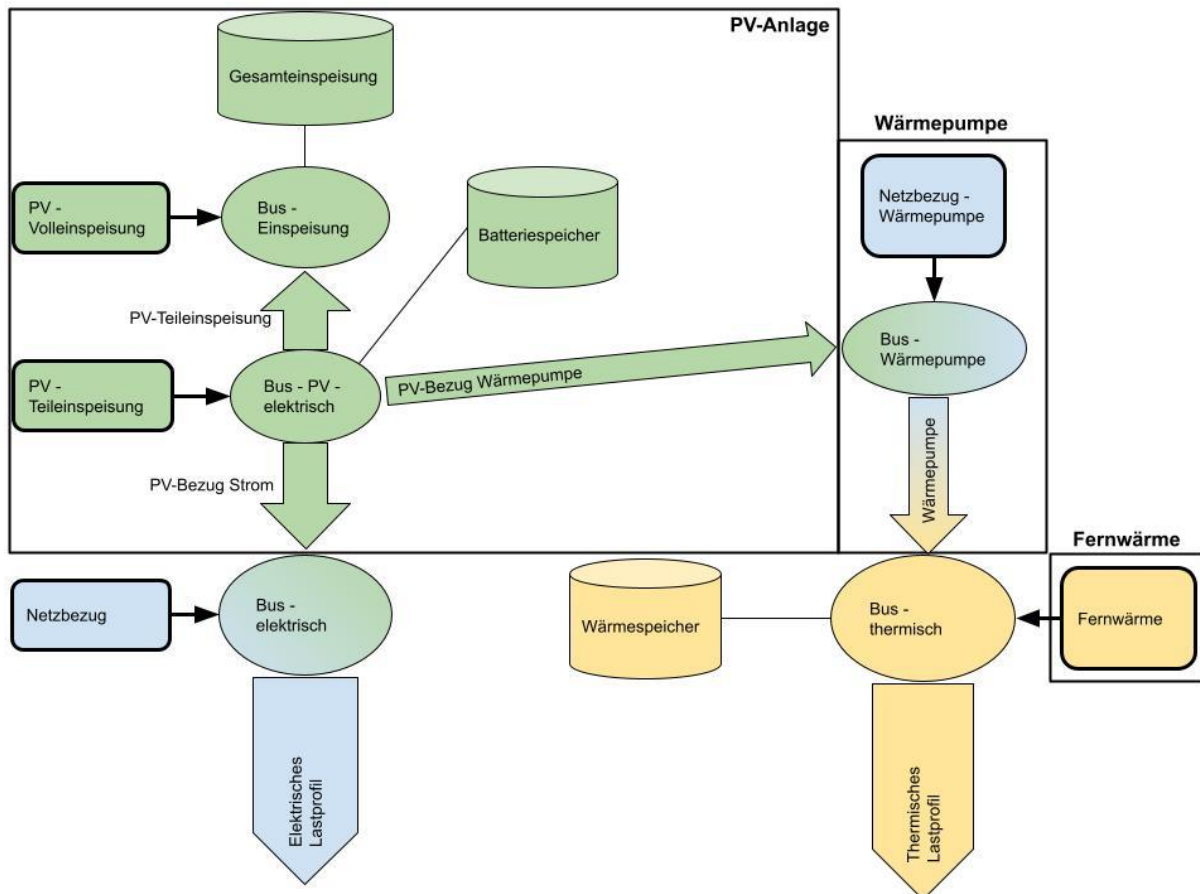


Abbildung 22: Schemazeichnung der PyPSA-Simulation mit definierten Komponenten [eigene Darstellung]

### 5.2 Dimensionierung der Komponenten der Energiesysteme

Mit den 500 Simulationsergebnissen der automatischen Kostenoptimierung werden die Teile des Energiesystems bestimmt und ausgelegt. Richtwert für die Auslegung bilden der Mittelwert, Median und Interquartilsabstand der Ergebnisse. Mit diesen wird eine optimale Dimensionierung unter Berücksichtigung von marktgängigen Leistungsklassen abgeschätzt. Besitzt eine Liegenschaft nur einen Zugang zum Fernwärmenetz, wird die Leistungsklasse mit dem jährlichen Heizenergiebedarf und durchschnittlich 2.000 Betriebsstunden ausgelegt. Wird eine Wärmepumpe mit Pufferspeicher eingesetzt, wird ein Auslegungstool von *Vaillant* zur

Dimensionierung beider genutzt [75]. Ist zusätzlich eine PV-Anlage verbaut, wird der Pufferspeicher zusätzlich über die Simulation ausgelegt. Ist der simulierte Speicher größer als die Auslegung des *Vaillant*-Tools, wird der simulierte Speicher bevorzugt. Werden beide Wärmeversorgungsoptionen eingesetzt, wird die Leistungsklasse der Wärmepumpe mit den Simulationsergebnissen bestimmt. Der Fernwärmeanschluss wird in diesem Fall mit dem maximalen Generatorertrag der Simulation und 2.000 Betriebsstunden ausgelegt. Diese Unterscheidung ist nötig, da Spitzenlasten mit der stündlichen Auflösung der Lastprofile nicht dargestellt werden können. Aus diesem Grund können zudem keine Pufferspeicher dimensioniert werden, sondern nur Speicher mit einer Speicherzeit von mindestens einer Stunde.

Die Batteriespeicher werden erst eingesetzt, wenn Median und Mittelwert der Simulationsergebnisse über 10 kWh Speicherkapazität liegen. Kleinere Batteriespeicher werden nicht eingesetzt, da angenommen wird, dass der Mehraufwand für die Installation und Integration des Speichersystems in diesen Fällen nicht wirtschaftlich ist.

Für die Auslegung der Abwasserwärmepumpen wird angenommen, dass die Kanäle im Überflutungsgebiet erneuert werden müssen und deshalb keine Kosten für die reinen Kanalarbeiten anfallen. Zudem wird angenommen, dass sich anliegende Gebäude wie Turnhallen und Schulen die Kosten zur Anbindung an den Kanal und den Wärmetauscher teilen. Aus diesem Grund können auch kleine Wärmepumpen einen wirtschaftlichen Vorteil bieten.

Die Solarthermieanlagen werden in den Simulationsergebnissen ausschließlich bei zwei Liegenschaften mit Wärmepumpen und in Leistungen unter 2 kW eingesetzt. Aus diesem Grund wird auf den Einsatz von Solarthermie verzichtet.

In *Abbildung 23* sind die Ergebnisdiagramme der ersten Simulation für das *Rathaus* mit Abwasserwärmepumpe zusätzlich zur bestehenden Fernwärmestation beispielhaft dargestellt. Alle Diagramme und Simulationsergebnisse sind in dem *Anhang 4.3* dargestellt. Die Auslegung der einzelnen Liegenschaften können dem *Anhang 7* entnommen werden.

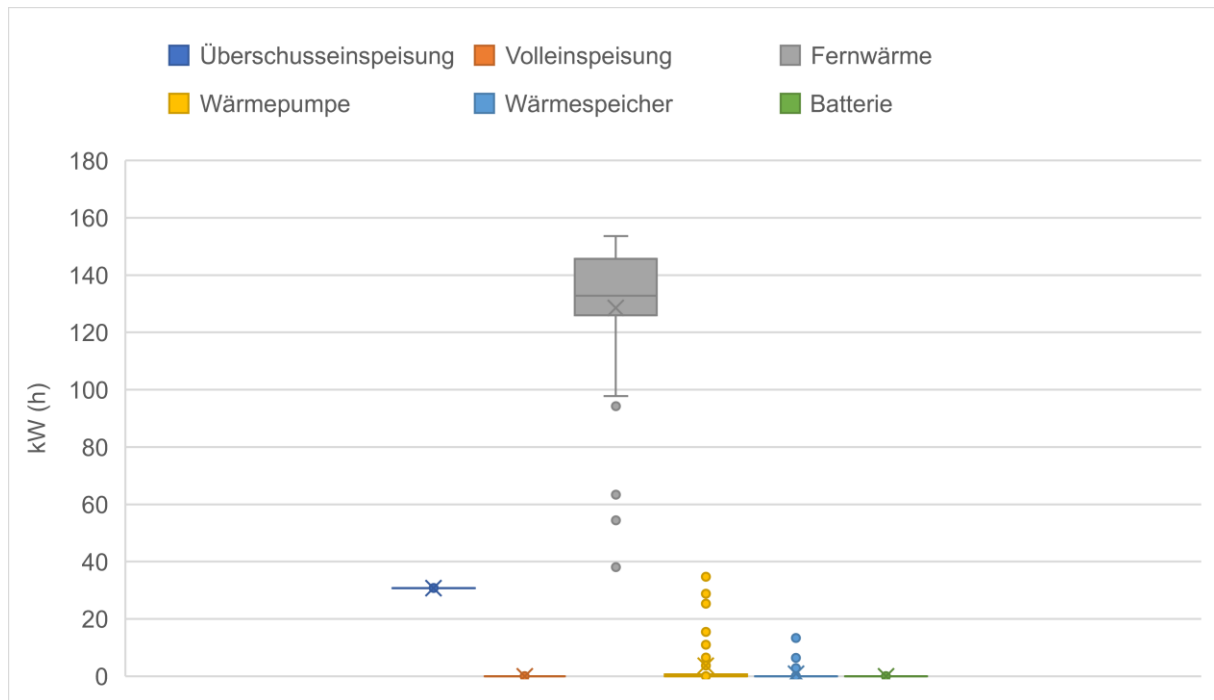


Abbildung 23: Simulationsergebnis der automatischen Kostenoptimierung für das Rathaus [eigene Darstellung]

In diesem Fall wird die PV-Anlage mit Überschusseinspeisung in allen Iterationen mit 30,8 kWp maximal dimensioniert. Ein PV-System mit Volleinspeisung entfällt. Außerdem wird Fernwärme als einziger Wärmeversorger eingesetzt. Das obere Quartil des Fernwärmebedarfs liegt bei circa 290.000 kWh/a. Der Fernwärmeanschluss wird mit 2.000 Betriebsstunden zu 150 kW ausgelegt. Eine Wärmepumpe wird in diesem Fall nicht eingesetzt, da die PV-Anlage im Vergleich zum Strombedarf zu gering dimensioniert ist.

In *Abbildung 24* sind die summierten Auslegungen der Komponenten der Varianten aufgeführt. Die Liegenschaften werden mit bis zu 21 Wärmepumpen, 19 PV-Anlagen mit Volleinspeisung, 25 PV-Anlagen mit Überschusseinspeisung und 19 Fernwärmeanschlüssen versorgt.

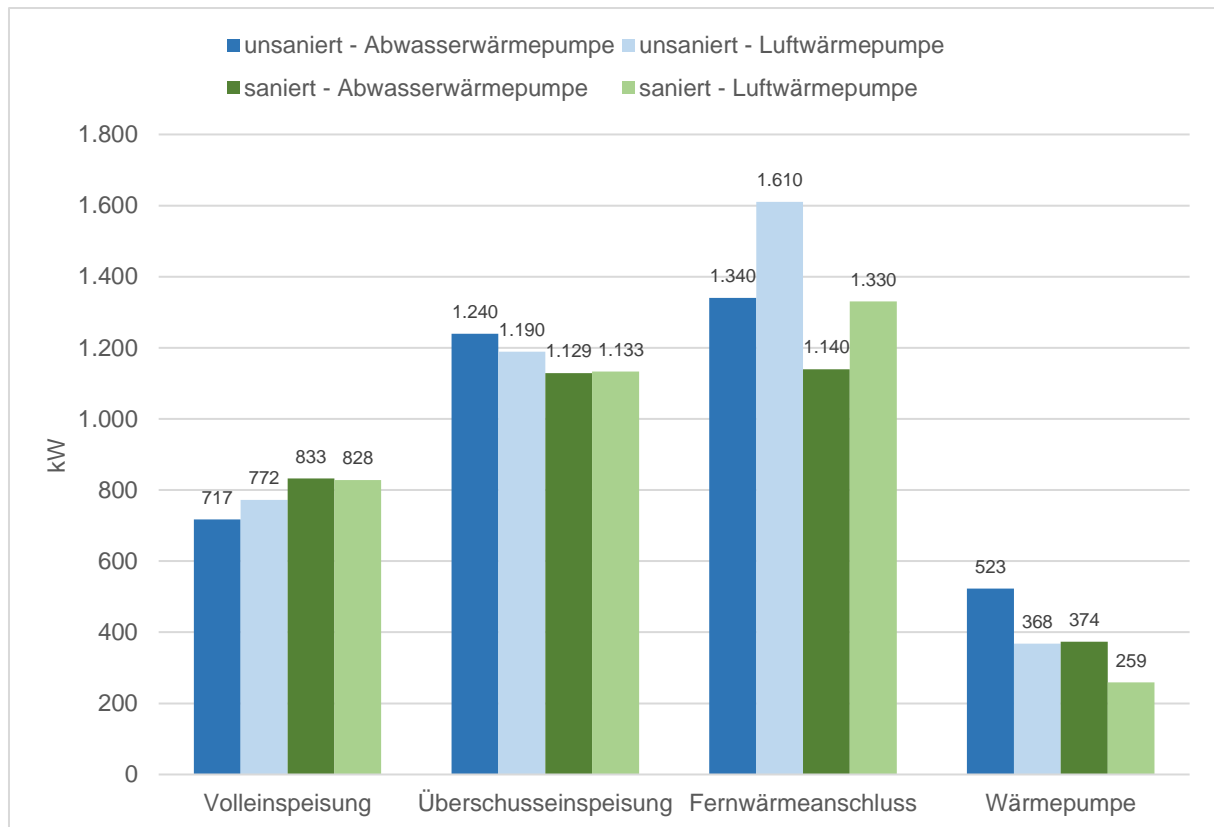


Abbildung 24: Dimensionierung der Energiesysteme [eigene Darstellung]

Im unsanierten Zustand werden die Fernwärmeanschlüsse, Wärmepumpen und PV-Anlagen mit Überschusseinspeisung größer ausgelegt, um den höheren Energiebedarf zu decken. Die Anlagen mit Volleinspeisung werden dementsprechend kleiner dimensioniert.

Werden bei den fünf Liegenschaften Abwasserwärmepumpen eingesetzt, können die entsprechenden Wärmepumpen größer und die Fernwärmeanschlüsse kleiner dimensioniert werden. Zur Deckung des Strombedarfs der Wärmepumpe werden die PV-Anlagen mit Überschusseinspeisung im Vergleich größer ausgelegt. Die Abbildung 25 zeigt die Dimensionierung der Energiespeicher in den Varianten. Es werden 7-8 Batteriespeicher und 21 Wärmespeicher ausgelegt. Die summierte Speicherkapazität der Wärmespeicher ist durchschnittlich 140 % höher als die Kapazität der Batteriespeicher.

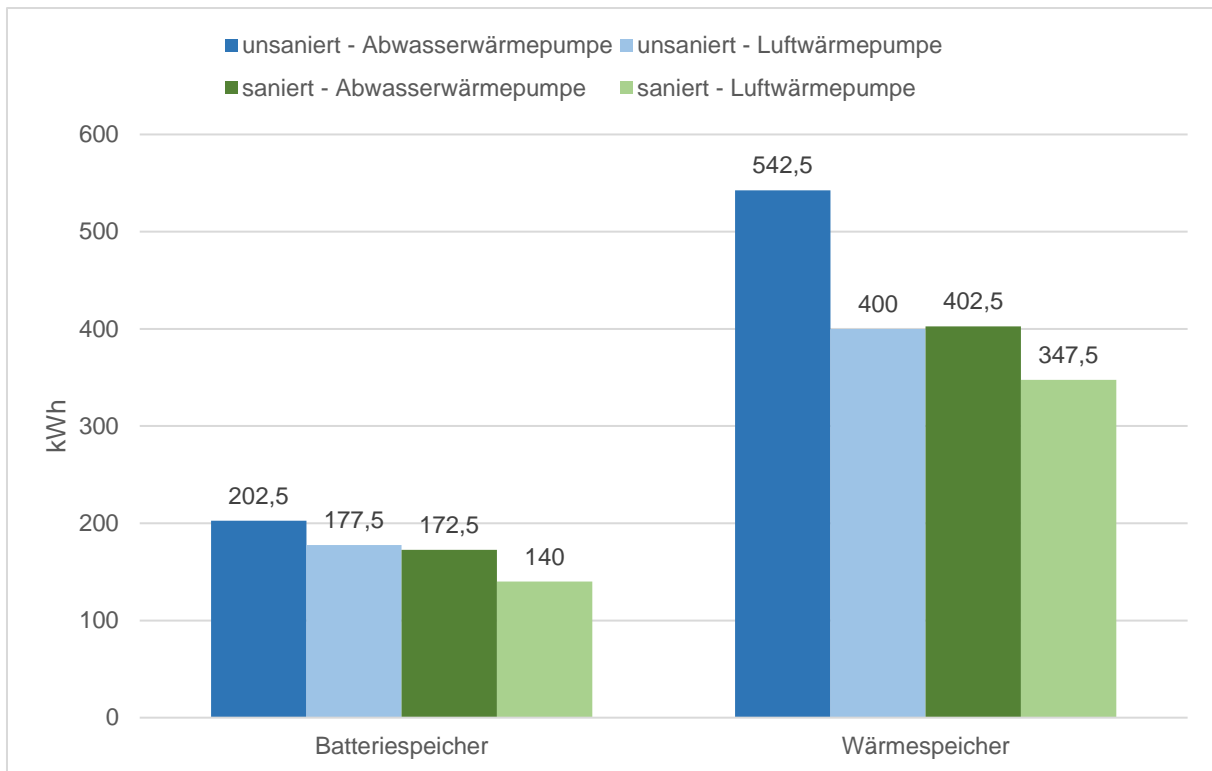


Abbildung 25: Dimensionierung der Energiespeicher [eigene Darstellung]

Die optimierte PV-Belegung der einzelnen Varianten kann der folgenden *Abbildung 26* entnommen werden. In allen Varianten werden circa 90 % der maximalen PV-Belegung von 2.176 kWp genutzt.

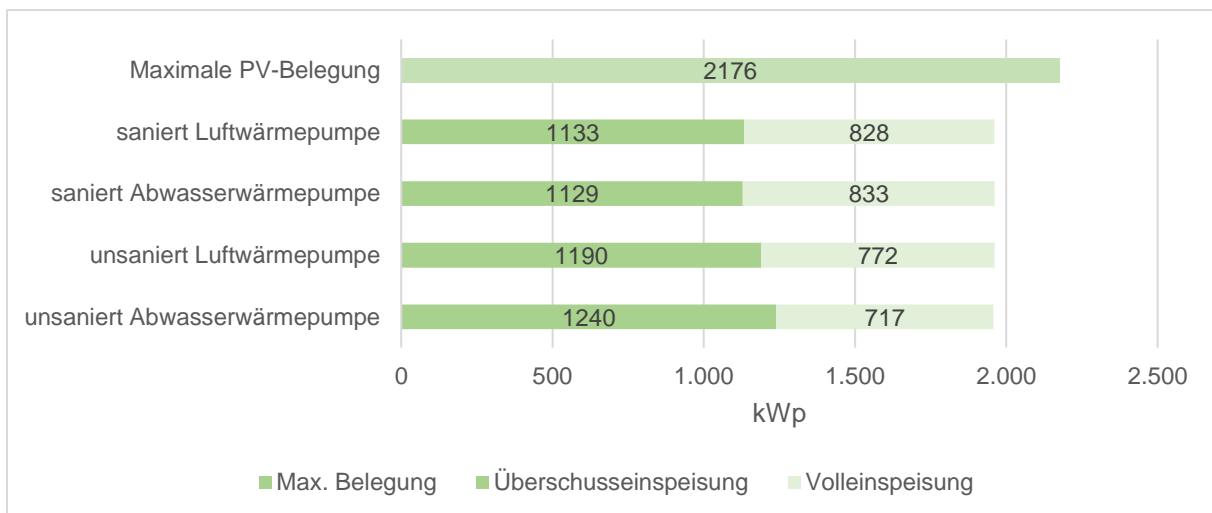


Abbildung 26: Dimensionierung - PV-Belegung [eigene Darstellung]

### 5.3 Ergebnisse

Folgend werden die Simulationsergebnisse dargestellt und untersucht. Die *Abbildung 27* zeigt den gesamten Energiebedarf der untersuchten 36 Liegenschaften.

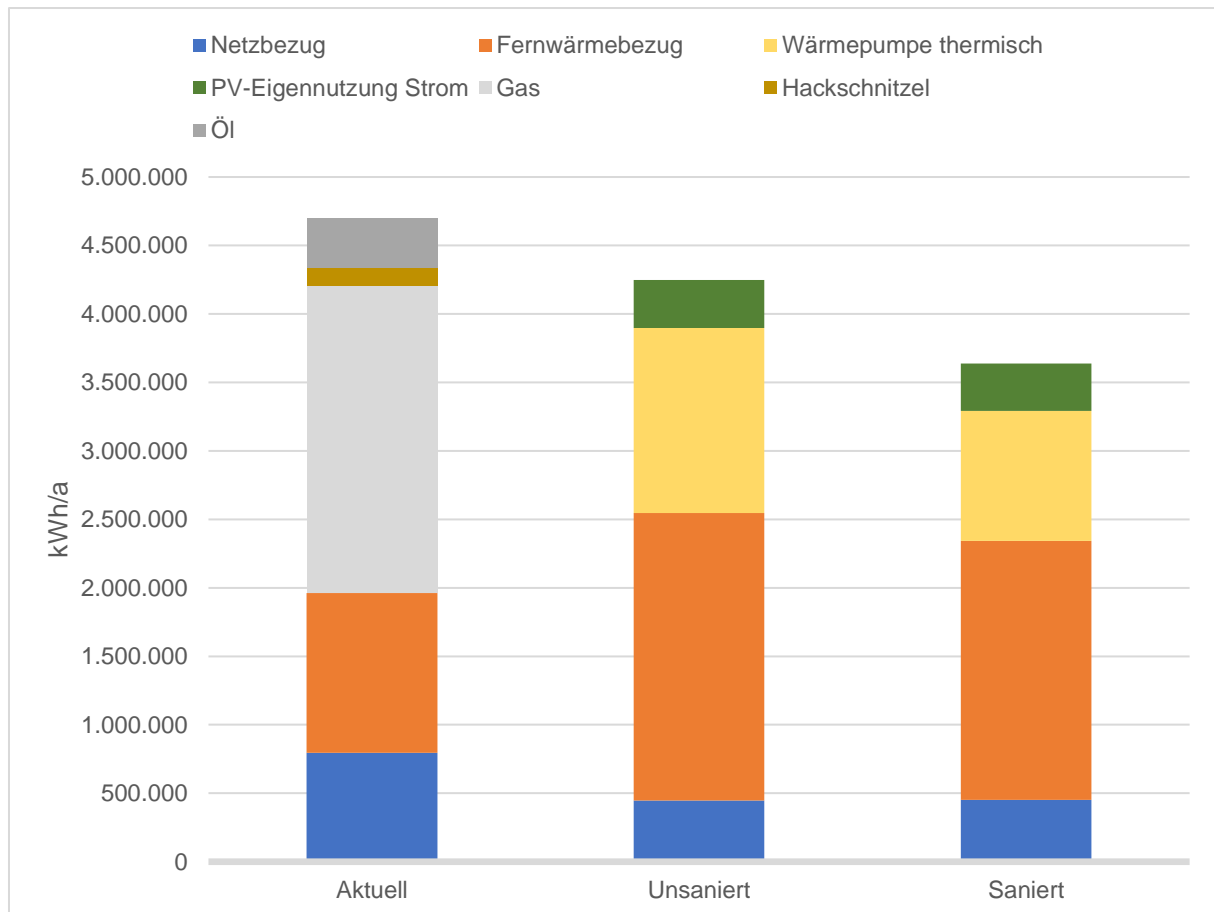


Abbildung 27: Energiebedarf aller Liegenschaften [eigene Darstellung]

Durch Umsetzung nicht-investiver Einsparmaßnahmen sinkt der gesamte Energiebedarf um durchschnittlich 12 %. Werden Sanierungsmaßnahmen an den vorgeschlagenen Gebäuden umgesetzt, sinkt der Energiebedarf um weitere 13 % auf durchschnittlich 75 % des aktuellen Energiebedarfs.

In *Abbildung 28* ist der Energiebezug der Liegenschaften dargestellt. Für jede Variante werden alle 36 Liegenschaften betrachtet. Fossile Energieträger (Gas; Heizöl) und Holzhackschnitzel entfallen in den neuen Auslegungen.

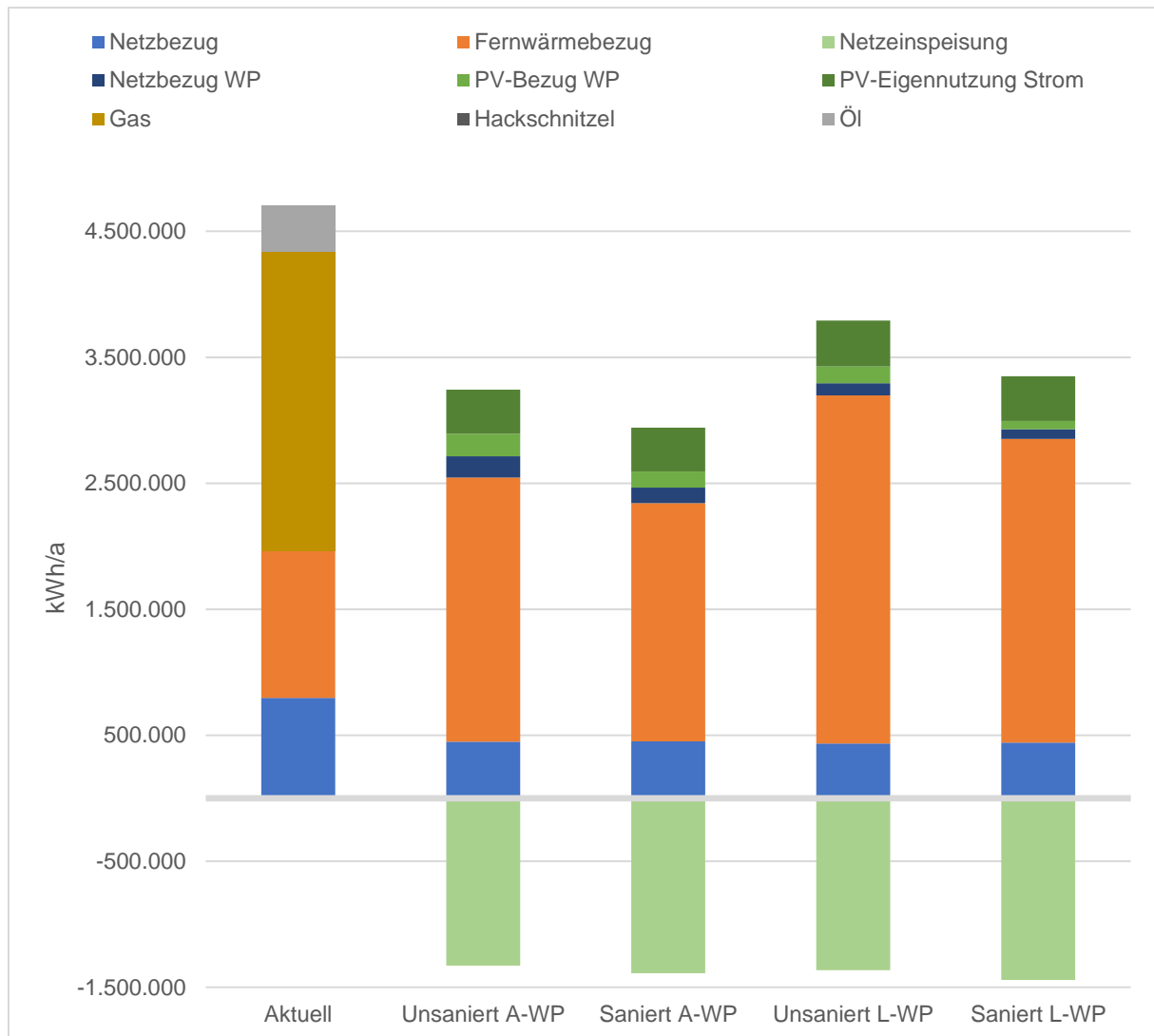


Abbildung 28: Energiebezug aller Liegenschaften [eigene Darstellung]

Der Fernwärmebezug steigt in allen Varianten um 60 % bis 135 %, der Netzbezug inklusive Wärmepumpenbezug sinkt in allen Varianten um 22 % bis 35 %. Der gesamte Energiebezug sinkt durch den Einsatz von Photovoltaik und Wärmepumpen im Vergleich zum Bezugsjahr 2018 um 22 % (unsaniert und Luft/Wasser-Wärmepumpe) bis 40 % (saniert und Abwasser/Wasser-Wärmepumpe). Durch den Einsatz von fünf Abwasser/Wasser-Wärmepumpen anstatt der fünf Luft/Wasser-Wärmepumpen kann der Energiebezug um 16 % bis 18 % reduziert werden. In *Abbildung 29* werden die Nutzungsgrade der PV-Anlage in den verschiedenen Auslegungen betrachtet.

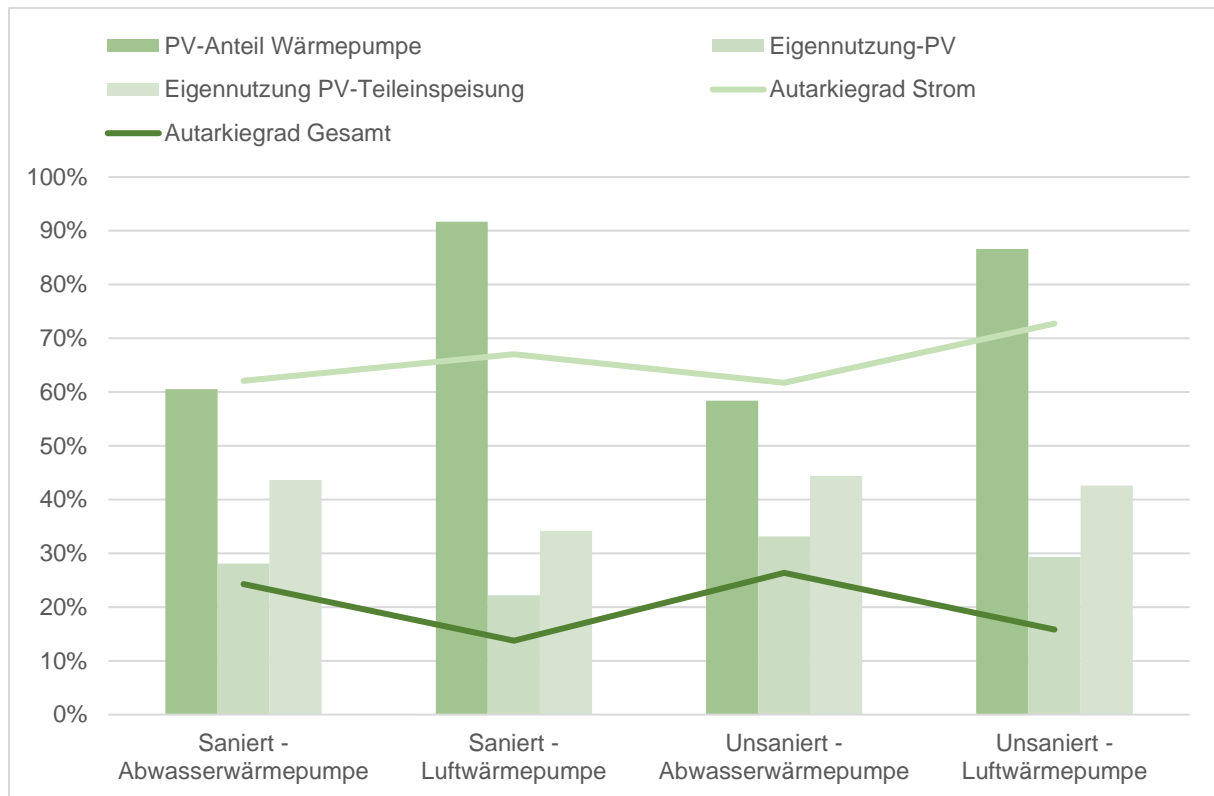


Abbildung 29: Nutzungsgrade der Photovoltaiksysteme [eigene Darstellung]

Insgesamt können zwischen 60 % bis 70 % des Strombedarfs durch die PV-Anlagen gedeckt werden. Wird die Wärmeversorgung mitbetrachtet, verringert sich der Autarkiegrad auf 10 % (Luft/Wasser-Wärmepumpe) bis 25 % (Abwasser/Wasser-Wärmepumpe).

Werden ausschließlich Luft/Wasser-Wärmepumpen verwendet, kann die PV-Anlage bis zu 90 % des Energiebedarfs der Wärmepumpe decken. Durch die größere Dimensionierung der Abwasser/Wasser-Wärmepumpen verringert sich der PV-Deckungsgrad der Wärmepumpe in diesen Varianten von 90 % auf 60 %.

#### 5.4 Fehlerbetrachtung

Die Simulationsergebnisse stellen eine optimale Nutzung der ausgewählten Komponenten dar. In der Praxis könnten ähnliche Ergebnisse nur ansatzweise erreicht werden, wenn die Energiesysteme intelligent geregelt werden und genaue Prognosedaten für Last und Ertrag vorliegen.

Durch die Verwendung von Last- und Ertragsprofilen in stündlicher Auflösung sind Spitzenlasten nicht darstellbar, weshalb die Spitzenlastkomponente mit jährlichen Betriebsstunden dimensioniert werden muss. Zudem werden Lastprofile für Strom und Wärme angenommen. Die spezifischen Lastprofile der Liegenschaften könnten sich in der Realität deutlich unterscheiden, weshalb eine optimale Auslegung nicht berechnet werden kann. Dies könnte durch die



Verwendung von ausgelesenen Lastprofilen in einer minutengenauen Auflösung optimiert werden. Auf Grund des Projektumfangs und des Zeitrahmens konnte dies nicht realisiert werden.

Die *PyPSA* Simulation rechnet mit Kosten pro Kilowatt, um die Komponenten zu dimensionieren. Einmalig anfallende Kosten, wie zum Beispiel Installationskosten, können deshalb nur linear dargestellt werden. So können die Investitionskosten bei sehr kleinen und sehr großen Anlagen verfälscht werden. Sehr kleine Anlagen werden deshalb in der Auslegung nicht berücksichtigt. Die PV-Systeme sind durchschnittlich mit 90 % der maximalen Belegung ausgelegt, weshalb nur eine geringe Abweichung der Investitionskosten zu erwarten ist. Auch Mehrkosten, die durch die Trennung der PV-Anlage in Voll- und Überschusseinspeisung entstehen, sind im Verhältnis zu den Gesamtkosten der hier betrachteten PV-Anlagen vernachlässigbar. Durch eine Annäherung der spezifischen Kosten jeder Komponente einer Liegenschaft in mehreren Simulationsdurchgängen könnte durch die Dimensionierung weiter optimiert werden. Auf Grund der Datenlage und Anzahl der Gebäude werden die Energiesysteme nur in ihren Grundkomponenten dargestellt, wodurch die Energieflüsse und die resultierende Wirtschaftlichkeit beeinflusst werden.

Die Datenlage verhindert die Bestimmung der spezifischen Heizlasten der Gebäude, weshalb der Einsatz einer Wärmepumpe wahrscheinlich nicht in allen Gebäuden sinnvoll ist. Die JAZ sind konservativ angenommen worden, um einen Betrieb mit vorhandener Heizungsperipherie darzustellen. Wenn die Wärmepumpe optimal betrieben werden kann, steigt die JAZ und die Dimensionierung könnte angepasst werden. Die Auslegung der Wärmepumpen sollte deshalb in Einzelfallprüfung vor Ort, unter Berücksichtigung des Wärmebedarfs, der Heizungsperipherie und des vorhandenen Energiesystems legitimiert werden.

Die Simulation berücksichtigt Bereitschaftsverluste der Speicher in Form von prozentualen Energieverlusten pro Stunde. Die Speicher können im gewählten Simulationsaufbau vollständig entleert werden und verlieren in diesem Zustand keine Energie. Die eingesetzten Wärmespeicher dienen als Pufferspeicher des Heizsystems, weshalb immer eine Mindesttemperatur über Raumtemperatur gehalten werden muss und Bereitschaftsverluste auftreten. Zur Überprüfung der Dimensionierung wird der Simulationsansatz für die Wärmespeicher leicht verändert und ein Minimum für den Speicherinhalt definiert. Dazu wird die Gesamtkapazität und die nutzbare Speicherkapazität berechnet, die spezifischen Investitionskosten angepasst und die Liegenschaften mit den drei größten Wärmespeichern in 50 Iterationen neu simuliert.

In folgender *Tabelle 17* ist die Bestimmung der minimalen Energie im Speicher dargestellt, mit welcher die Mindesttemperatur im Pufferspeicher einer Wärmepumpenheizung dargestellt werden soll.

*Tabelle 17: Überprüfung der minimalen Energie der Wärmespeicherdimensionierung [eigene Darstellung]*

Min. Raumtemperatur im Speicher- raum	10 °C
Max. Speichertemperatur	55 °C
Max. Speicherkapazität (Temperatur- delta 45 °C)	50 kWh bei 1000 Liter Speichervolumen
Speicherinhalt bei Erhaltung einer Mindesttemperatur von 35 °C	30 kWh bei 1000 Liter Speichervolumen
Minimale Energie im Speicher	60 %

Die prozentualen stündlichen Bereitschaftsverluste werden in der *Tabelle 18* berechnet.

*Tabelle 18: Überprüfung der Bereitschaftsverluste der Wärmespeicherdimensionierung [eigene Darstellung]*

Bereitschaftsverluste Pufferspeicher	70 W bei 1000 Liter Speichervolumen[69]
Spezifische Bereitschaftsverluste	70 W / 50 kWh ~ 1,4 W / kWh
Prozentuale stündliche Verluste	0,14 % bei 1000 Liter Speichervolumen

Die neue Dimensionierung ist der *Tabelle 19* zu entnehmen.

*Tabelle 19: Ergebnis der Simulation zur Überprüfung der Wärmespeicherdimensionierung [eigene Darstellung]*

Liegenschaft	Wärmespei- cher	Nutzbare Kapazität	Auslegung 1. Simula- tion	Differenz
Erich-Kästner-Realschule plus mit Abwasserwärmepumpe	270 kWh	108 kWh	120 kWh	-10 %
Alte Schule Walporzheim	110 kWh	44 kWh	45 kWh	-2 %
Kindertagesstätte Bachem	90 kWh	36 kWh	40 kWh	-10 %

Im angepassten Simulationsaufbau werden die Speicher aller Liegenschaften zwischen 2 % bis 10 % kleiner dimensioniert. Die angepassten Bereitschaftsverluste scheinen allerdings nur einen marginalen Einfluss auf die Dimensionierung zu haben. Dies ist auf die hohen Nutzungsgrade der Wärmespeicher in Kombination mit einer Wärmepumpe und PV-Anlage zurückzuführen.

Für alle Liegenschaften wird ein durchschnittliches nicht-investives Einsparpotential (Wärme-sektor 10 %; Stromsektor 2,5 %) angenommen, welches unter Umständen nicht erreicht werden kann. Der jährliche Heizenergiebedarf wird mit 95 % des Jahresverbrauchs zudem hoch angenommen. Alte Gas- und Ölheizungen erreichen meist nur eine Effizienz zwischen 75 % und 85 % (Stand 1980) [76]. Dies könnte die Dimensionierung der Wärmeerzeuger beeinflussen.

## 6 Ökobilanz

In den nachfolgenden Kapiteln wird das Thema Ökobilanz und die Ergebnisse der durchgeführten Ökobilanzstudie betrachtet. In dieser Ökobilanz werden drei unterschiedliche Emissionen untersucht, das Globale Erwärmungspotential, das Versauerungspotential und das Eutrophierungspotential.

Um die Umweltauswirkungen zu bestimmen, werden für die vorliegende Ökobilanzstudie die Kennwerte der *ÖKOBAUDAT* verwendet, einer Datenbank mit Emissionswerten vom *Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen*. In der Datenbank sind für die untersuchten Bauteile die Emissionen aus der Herstellung, dem Transport, der Abfallbehandlung, der Beseitigung und dem Recyclingpotential für eine erwartete Lebensdauer von 20 Jahren angegeben. Die Werte sind in Kilogramm Äquivalente angegeben. [12]

Die ermittelten Emissionswerte aus der *ÖKOBAUDAT* können für die neu geplanten Anlagen nicht mit den Emissionswerten aus dem Energiebericht 2018 verglichen werden, weshalb diese in der Ökobilanz neu berechnet werden. Im Energiebericht sind für jede Liegenschaft die jährlichen Ausstoße an Kohlenstoffdioxid (CO<sup>2</sup>), Schwefeldioxid (SO<sup>2</sup>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Staub aufgelistet, jedoch nicht die jeweiligen Äquivalente. Zusätzlich werden aufgrund der Vergleichbarkeit Werte für 2018 neu ermittelt, da im Energiebericht die bestehenden Fernwärmanlagen nach GEG 2020 Anlage 9 Nr. 1c als emissionsfrei angenommen wurden [77]. Ob Fernwärme als emissionsfrei angenommen werden kann, ist nicht eindeutig definiert. Deshalb werden beide Sichtweisen in den Ergebnissen im *Anhang 7* dargestellt.

### 6.1 Emissionspotentiale

Die für die Modernisierung geplanten Komponenten und Nutzungsvorgänge werden auf ihr jeweiliges globales Erwärmungspotential, Versauerungspotential und Eutrophierungspotential untersucht. Diese Potentiale geben unterschiedliche Umwelteinwirkungen an.

Das globale Erwärmungspotential gibt Auskunft darüber, wie klimawirksam ein Stoff ist und welches Treibhauspotential er besitzt. Das globale Treibhauspotential ist der mögliche Einfluss von Gasen auf die Erwärmung der Atmosphäre. Dafür wird jedem Stoff ein dimensionsloses CO<sup>2</sup>-Äquivalent zugewiesen. Dieses gibt den durchschnittlichen Beitrag von 1 kg der untersuchten Emission zum Treibhauseffekt über einen Zeitraum von 100 Jahren an. Reines CO<sup>2</sup> hat dabei ein Äquivalent von 1. Emissionen mit einem Äquivalent von über 1 haben ein höheres Treibhauspotential als CO<sup>2</sup>, beispielsweise Methan, mit einem Äquivalent von 28. Dementsprechend hat 1 kg Methan ein 28-mal höheres Treibhauspotential als 1 kg CO<sup>2</sup> [78, 79]. In den Angaben der *ÖKOBAUDAT* sind alle Emissionen des Lebenszyklus einer Komponente angegeben. Für den Betrieb einer Komponente ist ebenfalls ein Emissionswert für ein Jahr Nutzung zusammengefasst. Beide Werte sind jeweils als Kilogrammwert angegeben. Dafür

werden die Einzelemissionen in ihrer anfallenden Masse mit dem jeweiligen CO<sup>2</sup>-Äquivalent verrechnet und am Ende addiert.[79]

Durch das Versauerungspotential werden Emissionen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Bodenversauerung untersucht. Durch Versauerung werden Tonminerale innerhalb der obersten Erdschichten zerstört, welche für das Binden von Schwermetallen und Speichern von Regenwasser zuständig ist. Wird ein Boden zu sauer, können Pflanzen schwieriger Nährstoffe aufnehmen und Kleinstlebewesen nicht überleben. Ist ein Boden zu lange übersäuert, wird er schneller anfällig für Verschlämmung und Austrocknung. Zudem können ungebundene Schwermetalle ins Grundwasser gelangen [80]. Ähnlich dem CO<sup>2</sup>-Äquivalent wird hierbei ein SO<sup>2</sup>-Äquivalent zugewiesen. Dabei entspricht reines SO<sup>2</sup> einem SO<sup>2</sup>-Äquivalent von 1, und anderen Stoffen mit einem höheren Versauerungspotential wird der entsprechende Faktor zugewiesen. Die Einzelemissionen aus Lebenszyklus und Nutzung werden jeweils als SO<sup>2</sup>-Äquivalent in Kilogramm zusammengefasst.

Das letzte untersuchte Emissionspotential der Ökobilanz ist das Eutrophierungspotential. Eutrophierung beschreibt die Überdüngung und Nährstoffübersorgung von Wald- und Wasserflächen. Durch die Versorgung mit zu vielen Nährstoffen kann es zu massivem Biomassewachstum kommen, wodurch das Gleichgewicht im Ökosystem gestört wird. Das Eutrophierungspotential wird über das Phosphat (Ph)-Äquivalent ausgedrückt. Reines Phosphat hat ein Äquivalent von 1, während andere Stoffe mit höheren Auswirkungen ein höheres Äquivalent haben. Auch hierbei wird der Wert in Kilogramm angegeben und die Zusammensetzung des Wertes entspricht der vorangegangenen Potentiale. [81]

## 6.2 Lebenszyklus / Nutzung

In der Ökobilanz werden zwei verschiedene Parameter betrachtet. Ein Parameter setzt sich aus allen Emissionen zusammen, welche bei dem Lebenszyklus einer geplanten Komponente entstehen. Der zweite Parameter umfasst die Emissionen, welche durch den Betrieb beziehungsweise die Nutzung der Komponenten entstehen.

Für die Dauer eines Lebenszyklus nimmt die ÖKOBAUDAT pauschal 20 Jahre an. Die dabei entstehenden Lebenszyklusemissionen (LC-Emissionen) sind in fünf Kategorien eingeteilt. In der ersten Kategorie sind die Emissionen, welche bei den Herstellungsprozessen der Komponenten anfallen, beispielsweise durch die Produktion der Einzelteile oder das Zusammensetzen zum fertigen Bauteil. Danach folgen die Transportemissionen, welche durch den Transport der Komponenten zum Empfänger entstehen. Als dritte Kategorie ist die Abfallbehandlung angegeben. Darunter fallen Emissionen, welche durch die Beseitigung von entstehenden Abfällen, beispielsweise beim Einbau des Bauteiles, erzeugt werden. Die Emissionen, welche bei dem Ausbau und Transport der Komponenten zu einem jeweiligen Wertstoffhof entstehen,

sind unter den Beseitigungsemissionen zusammengefasst. Die letzte Kategorie, das Recyclingpotential, ist in negative Emissionen angegeben. Sollten Einzelteile eines Altgerätes wiederverwendet werden können, werden die Emissionen für eine Neuproduktion eingespart. Die Emissionen, welche bei der Nutzung der Komponenten entstehen, sind immer als Jahreswert angegeben. Es werden hierbei nur die Emissionen einberechnet, welche für den reinen Betrieb der Anlage anfallen würden. Emissionen durch beispielsweise Instandhaltung werden hierbei nicht berücksichtigt. [12]

### 6.3 Betrachtung der Komponenten

In diesem Kapitel werden die neu eingebauten, sowie die bereits verwendeten Energieversorger genauer erläutert. Außerdem werden unterschiedliche Stromkomponenten und die Dämmstoffe für die geplanten Sanierungen näher betrachtet.

Zu den bereits verwendeten Energieerzeuger zählen die Gasversorgung mittels mehrerer Gaskessel, zwei Ölkessel und zwei Holzhackschnitzelheizungen. Zusätzlich wurden bereits vier Fernwärmeübergabestation und eine Luft/Wasser-Wärmepumpe betrieben. Bei der Neugestaltung der Liegenschaften werden weitere Technologien eingeplant. Darunter ist eine zweite Alternative der Wärmepumpe zu nennen, nämlich eine Abwasser/Wasser-Wärmepumpe. Außerdem wurden Wärmespeicher, Photovoltaiksysteme und Batteriespeicher untersucht, sowie die Dämmstoffe XPS, Holzwole und dreifachverglaste Fensterscheiben. Für den benötigten Strom aus dem Netz wurde der deutsche Strommix angenommen. Das CO<sup>2</sup>-Äquivalent des Strommixes der *ahrtaI-werke GmbH* wurde nicht verwendet, da seitens der *ahrtaI-werke GmbH* nur die CO<sup>2</sup>-Emissionen pro kWh Strom angegeben sind und kein Äquivalent. Da alle Berechnungen auf Basis der jeweiligen Äquivalente stattfinden sollen, wurde der deutsche Strommix verwendet, um eine einheitliche Ökobilanz ausgeben zu können. Die nachfolgende *Abbildung 30* zeigt einen Ausschnitt aus den Ökobilanzberechnungen.

Treibhauspotential (kg CO2 Äquiv.)

Komponenten	Lebenszyklus (20 Jahre)							Nutzung / Betrieb	
	Fläche/ Anzahl/ Größe	Herstellung	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Recyclingpotential	Gesamt in kg	Nutzung/Betrieb	Emissionen pro Jahr
Luft-Wasser Wärmepumpe	1	918	2,5929	60,1714	8,5629	-483	506,33	0,166	2.613,97
Abwasser-Wasser-Wärmepumpe	0	553,7	1,9880	13,6600	0,0300	-307,5	0,00	0,1419	0,00
Fernwärmeübergangsstation in kW	0	4,771	0,009735	0,207	0,009179	-1,23	0,000	-	-
Fernwärme Biogas (38%) in kg/kW	0	-	-	-	-	-	-	0,05629	0,00
Fernwärme Erdgasgas (62%) in kg/kW	0	-	-	-	-	-	-	0,1478	0,00
Pufferspeicher in kg	210,5	4,058	0,009295	0,6634	0	-1,203	742,58	-	-
Photovoltaiksystem in m²	148,20	296,7	0,2164	0	12,14	-36,2	40.437,32	-0,5894	-13.339,73
Strombezug in kWh	-	-	-	-	-	-	-	0,5894	1.152,13
Batteriespeicher in kWh	0	241,5	0,07143	0	22,59	-35,29	0,00	-	-
XPS Wert in m²	160,8446	96,34	0,0817	118,2	0	-49,51	5.311,47	-	-
Holzwohle Wert in m²	0	-29,37	1,003	317,5	0	-113,8	0,00	-	-
Glasscheiben Wert in m²	0	57,77	0,1074	3,035	0,4911	-1,405	0,00	-	-
Strombezug in kWh	-	-	-	-	-	-	-	0,532	1.745,49
Fernwärmeübergangsstation in kW	0	4,771	0,009735	0,207	0,009179	-1,23	0,00	-	-
Fernwärme Biogas (38%) in kg/kW	0	-	-	-	-	-	-	0,05629	0,00
Fernwärme Erdgasgas (62%) in kg/kW	0	-	-	-	-	-	-	0,1478	0,00
Niedertemperatur Gaskessel in kWh	1	1.104	2,884	22,65	15,79	-157,7	987,62	0,2339	12.645,10
Niedertemperatur Ölkessel in kWh	0	1.287	3,504	19,08	1,596	-223	0,00	0,2996	0,00
LC-Emissionen (20 Jahre)							46.997,69	Gesamtnutzung Neu	-9.573,63
LC-Emissionen pro Jahr							2.349,88	Gesamtnutzung 2018	14.390,59
LC-Emissionen 2018 (20 Jahre)							987,62	Einsparungen (kg)	23.964,22
LC-Emissionen 2018 pro Jahr							49,38	Einsparungen in %	166,53%

Abbildung 30: Berechnungsausschnitt aus der Ökobilanz [eigene Darstellung]

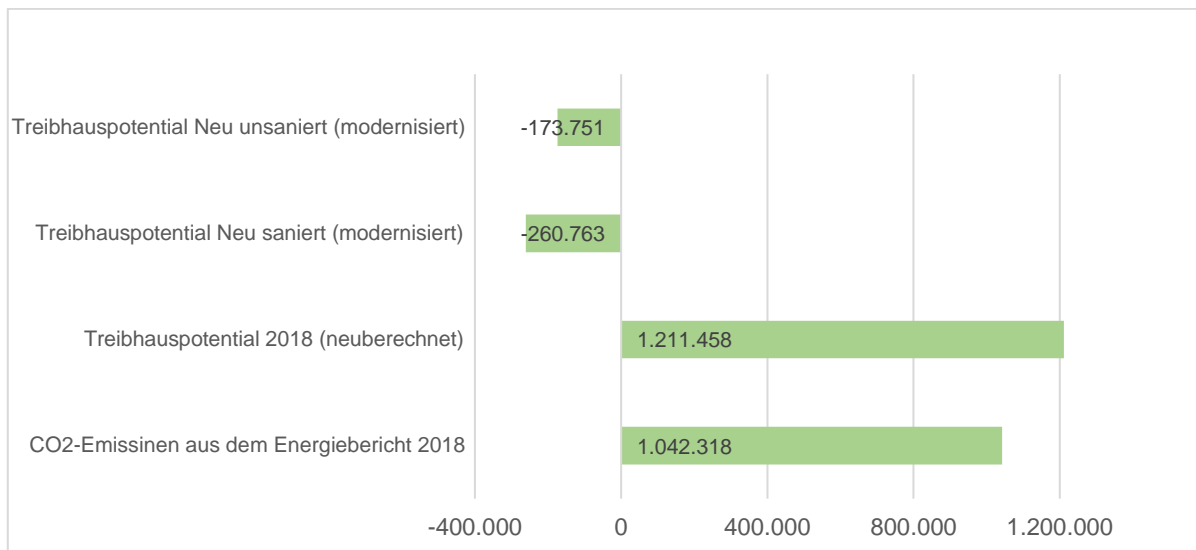
Für jede Liegenschaft wurden drei dieser Einzeltabellen angefertigt, jeweils eine für das Treibhauspotential, das Eutrophierungspotential und das Versauerungspotential. Die einzelnen Werte für die Emissionen sind aus der *ÖKOBAUDAT* entnommen [82]. Für die Ergebniszellen der Tabelle werden die berechneten Werte der neu geplanten Anlagen (Rot, Gelb, Grün) mit den neu berechneten Werten von 2018 (Grau) verglichen. Über den prozentualen Unterschied zwischen den Nutzungs- und Betriebsemissionen von 2018 und den neu berechneten Werten werden die Einsparungen in Prozent angegeben. Hierbei ist zu beachten, dass der durch die Energiesimulation berechnete eingespeiste PV-Strom in der Rechnung als negative Emissionen über eine Stromgutschrift angesehen wird. Die Emissionen für eine Kilowattstunde aus dem deutschen Strommix werden durch die Einspeisung eingespart. Eine detaillierte Beschreibung zur Funktionsweise für die Ökobilanzberechnung ist in dem *Anhang 7* vorhanden.

## 6.4 Ergebnisse

In dem nachfolgenden Unterkapitel sind die Ergebnisse aus der Ökobilanz aufgeführt. Ausführliche Berechnungen und Daten sind im Datentool ersichtlich und nachzuvollziehen. Alle nachfolgende Ergebnisse und Diagramme basieren auf einem errechneten Emissionswert für Fernwärme und Holzhackschnitzel. Im Datentool können die Berechnungen, Grafiken und Ergebnisse auch mit emissionsfreier Fernwärme durchgeführt und angezeigt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, dass die Stromgutschrift durch PV-Anlagen manuell deaktiviert werden kann, wodurch diese in den Ergebnissen nicht weiter bilanziert wird. Bezeichnungen, die ein „korrigiert“ oder „neuberechnet“ beinhalten, wurden auf der Basis des Energieberichtes von 2018 neu ausgewertet und gegebenenfalls angepasst. Die Bezeichnung „modernisiert“ bezieht sich auf alle neu errechneten Werte nach der Simulation und der vollständigen Modernisierung der Liegenschaften. Zudem wird in den Ergebnisgrafiken zwischen saniert und unsaniert unterschieden, da im sanierten Zustand teilweise Änderungen an der Auslegung einzelner Technologien vorgenommen worden sind. Darüber hinaus sind für die Übersichtlichkeit des Berichtes alle unten aufgeführten Abbildungen mit den Emissionswerten einer Luft/Wasser-Wärmepumpe berechnet worden. Für eine genauere Betrachtung aller Emissionsvarianten sind diese dem Datentool zu entnehmen.

## 6.4.2 Treibhauspotential

In der nachfolgenden *Abbildung 31* sind die unterschiedlichen Treibhauspotentiale der Liegen-schaften graphisch dargestellt.



*Abbildung 31: Vergleich der gesamten Treibhauspotentiale [eigene Darstellung]*

Unter Berücksichtigung der berechneten Fernwärmeemissionen steigen die nachgerechneten THG-Emissionen für 2018 auf 1.211.458 kg/a an. Dabei ist ein Unterschied zu den Werten aus dem Energiebericht von 169.107 kg/a festzustellen. Das Treibhauspotential kann durch die Implementierung von allen Modernisierungen auf eine jährliche negative Bilanz gesenkt werden. Die jährlichen THG-Emissionen fallen aufgrund der Stromgutschrift der PV-Anlage negativ aus. Somit kann das THG-Potential gegenüber dem Referenzjahr 2018 um bis zu 1.472.220 kWh/a gesenkt werden. Die *Abbildung 32* zeigt auf, welche CO<sub>2</sub>-Emissionen die neu geplanten Komponenten der Modernisierungen über den kompletten Lebenszyklus erzeugen.



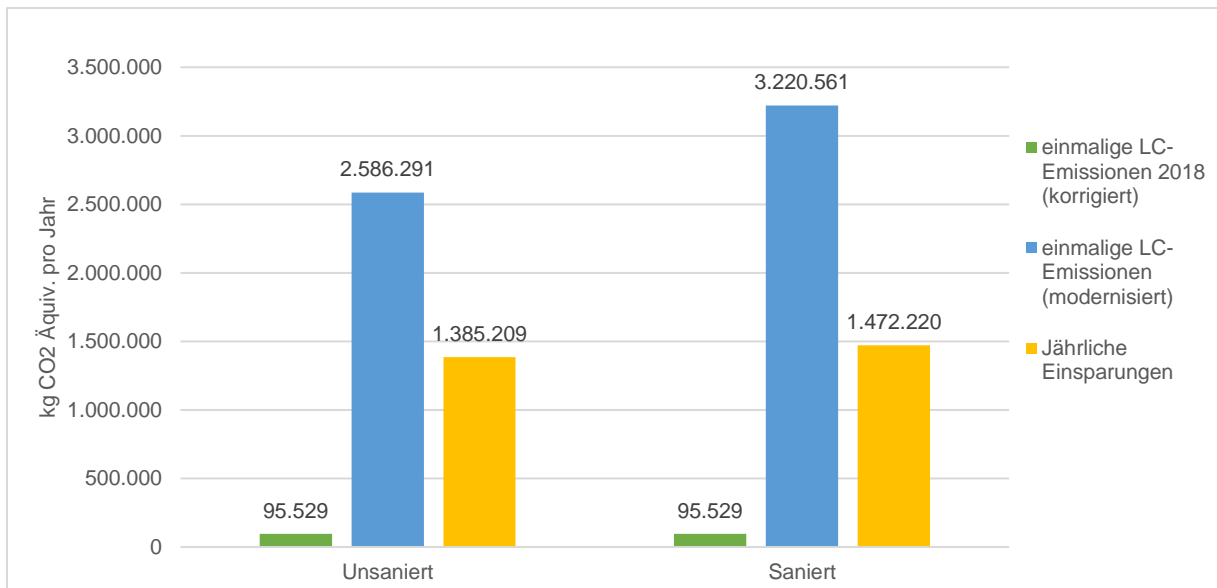


Abbildung 32: Ergebnisse der LC-Emissionen des Treibhauspotentials [eigene Darstellung]

Die Lebenszyklusemissionen der eingeplanten Komponenten (Blau und Grün) sind über einen Zeitraum von 20 Jahren gerechnet, während die Einsparungen (Gelb) jedes Jahr eingespart werden. Somit hätten sich alle Modernisierungen nach etwa zwei Jahren im sanierten und unsanierten Zustand amortisiert. Um einen Vergleich zwischen den LC-Emissionen aus dem Jahr 2018 und den Modernisierungen darzustellen, wurde diese mit aufgenommen.

### 6.4.3 Eutrophierungspotential

Des Weiteren werden die Ergebnisse für das Eutrophierungspotential graphisch in *Abbildung 33* dargestellt.

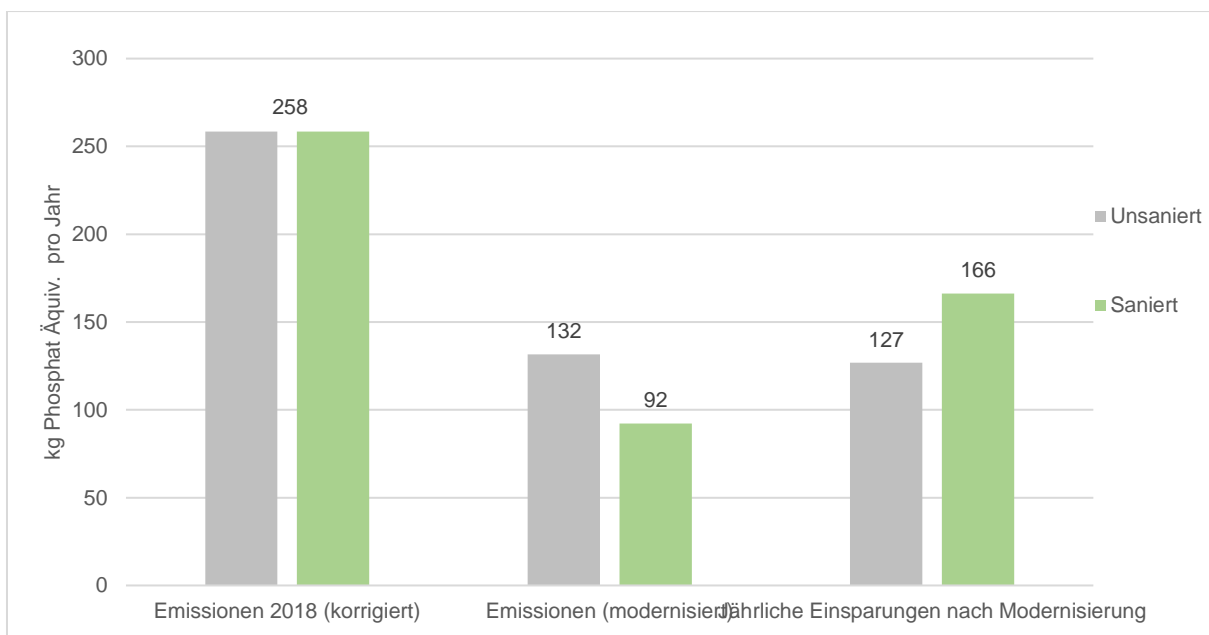
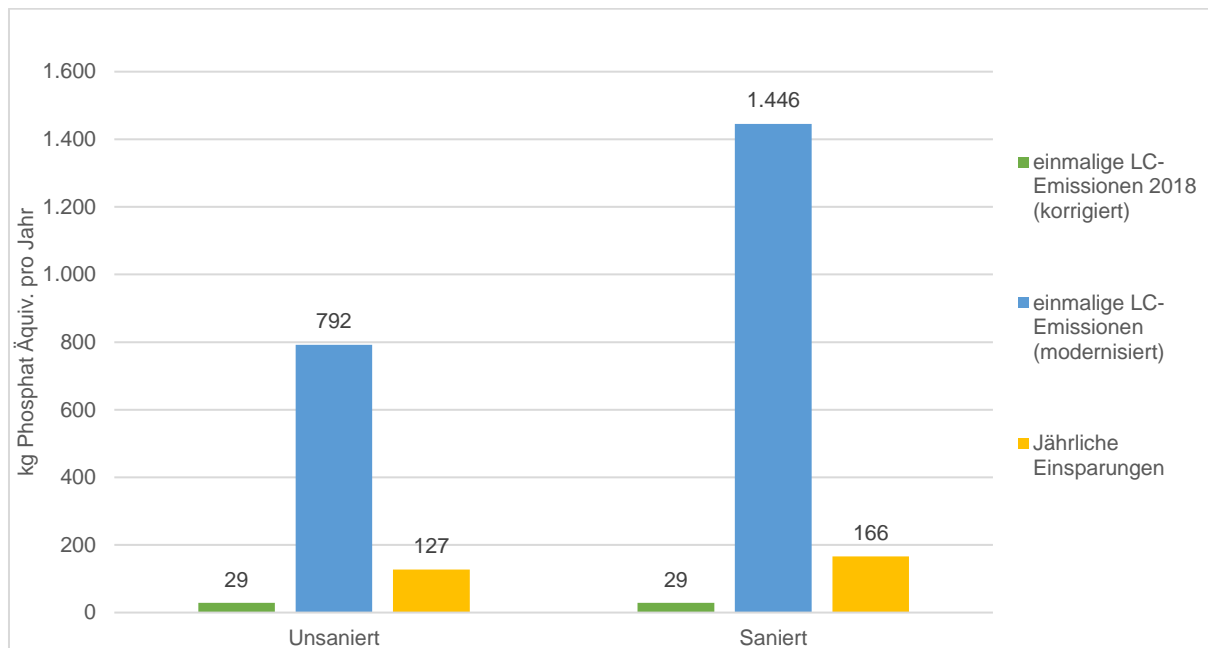


Abbildung 33: Jährliches Eutrophierungspotential aus Nutzung / Betrieb [eigene Darstellung]

Aus *Abbildung 33* ist zu entnehmen, dass das jährliche Ph-Äquivalent 2018 bei 258 kg/a liegt. Nach den Modernisierungsmaßnahmen können fast die Hälfte der Emissionen im unsanierten Zustand eingespart werden. Im sanierten Zustand können durch Sanierungsmaßnahmen 40 kg/a zusätzlich vermieden werden.

In *Abbildung 34* werden die Auswirkungen der LC-Emissionen bezüglich des Eutrophierungspotentials verglichen.

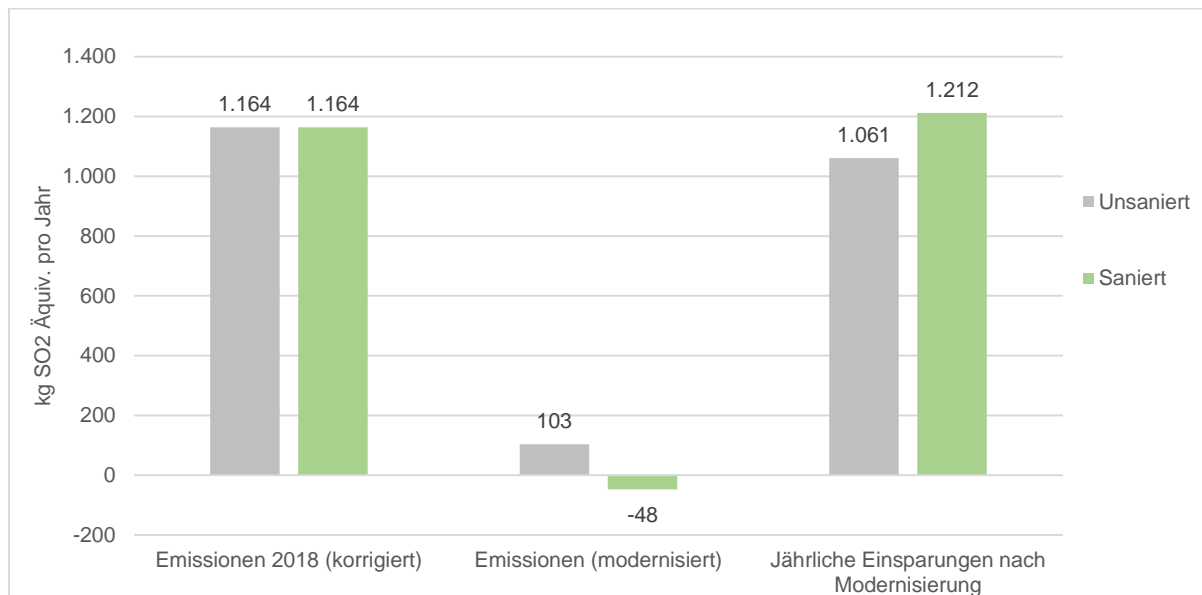


*Abbildung 34: Ergebnisse der LC-Emissionen des Eutrophierungspotentials [eigene Darstellung]*

Insbesondere die Herstellung von PV-Anlagen und Holzwole als Dämmstoff emittieren große Mengen Ph-Äquivalent. Dies führt zu berechneten Werten von bis zu 1.446 kg Ph-Äquivalent für die LC-Emissionen aller Modernisierungen. Die errechneten Emissionen und Einsparungen würden sich durch die Modernisierungen nach sechs Jahren amortisieren, beziehungsweise nach acht Jahren im sanierten Zustand.

### 6.4.5 Versauerungspotential

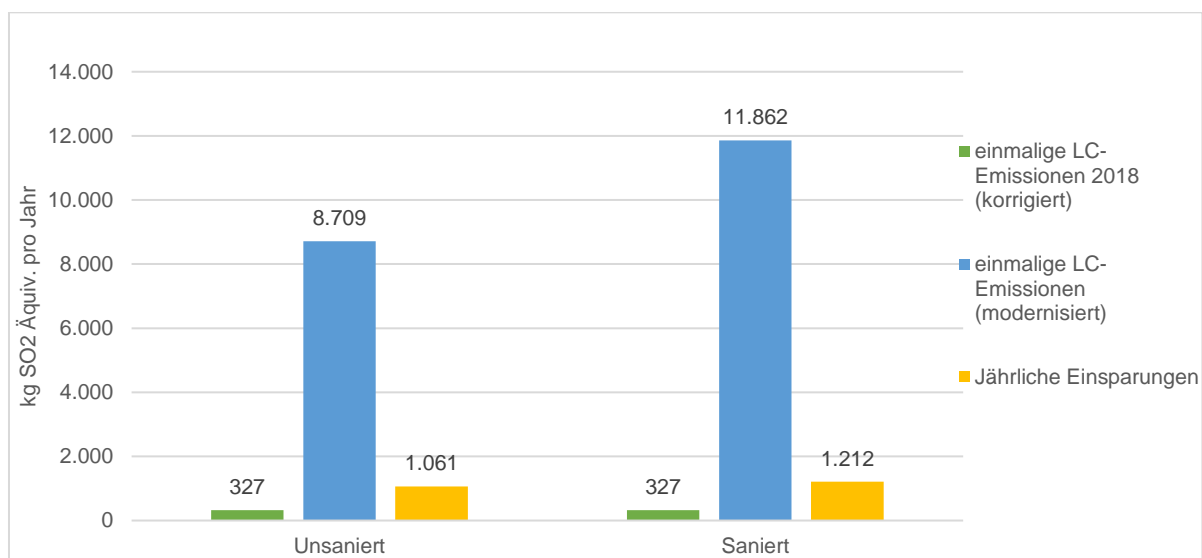
In dem nachfolgenden Unterkapitel wird das Versauerungspotential näher untersucht. *Abbildung 35* zeigt die jährlichen Nutzungsemissionen durch Schwefeldioxid-Äquivalent (SO<sup>2</sup>-Äquivalent).



*Abbildung 35: Jährliches Versauerungspotential aus Nutzung / Betrieb [eigene Darstellung]*

Das korrigierte jährliche SO<sup>2</sup>-Äquivalent beläuft sich auf 1.164 kg/a. Aufgrund der Einspeisung von Strom durch die PV-Anlagen können die jährlichen SO<sup>2</sup>-Äquivalent um bis zu 1.212 kg reduziert werden. Ähnlich den THG-Emissionen können die Versauerungsemissionen einen bilanziellen negativen Einsparungswert aufweisen.

In *Abbildung 36* werden die Lebenszyklusemissionen in Bezug auf das Versauerungspotential untersucht.



*Abbildung 36: Ergebnisse der LC-Emissionen des Versauerungspotentials [eigene Darstellung]*

Die emittierten SO<sup>2</sup>-Äquivalente der Modernisierungsmaßnahmen amortisieren sich zwischen acht und zehn Jahren. Dabei werden durch die Modernisierungen einmalige LC-Emissionen in Höhe von bis zu 11.862 kg SO<sup>2</sup>-Äquivalent erzeugt.

## 6.5 Fehlerbetrachtung

In diesem Unterkapitel werden mögliche Fehler und entsprechende Auswirkungen näher betrachtet. Die durchgeführte Ökobilanz basiert auf den aktuell ausgegeben Werten der ÖKO-BAUDAT. Eine Aktualisierung der Werte in den nächsten Jahren führt zu einer Veränderung der Ökobilanz, weshalb bei einer Umsetzung verschiedener Projekte die Einsparungen von den angegebenen Werten abweichen können. Zudem weisen einige Komponenten unterschiedliche Wirkungsgrade oder Herstellungsprozesse auf, weshalb die realen Werte von den Pauschalwerten der ÖKOBAUDAT leicht abweichen können. Außerdem wurden die verbauten Anlagen aufgrund fehlender Daten pauschalisiert und nicht spezifisch berechnet. Des Weiteren sind örtliche Veränderung ebenfalls ausschlaggebend für mögliche Differenzen zwischen den verwendeten Werten. Die verwendeten Emissionen sind deutschlandweit anzunehmen, weshalb regionale Änderungen, wie zum Beispiel das CO<sup>2</sup>-Äquivalent des Stromes des örtlichen Netzbetreibers oder Transportemissionen über längere Strecken, nicht berücksichtigt werden können. Der verwendete CO<sup>2</sup>-Äquivalent Wert ist im Vergleich zu den lokalen CO<sup>2</sup>-Werten erhöht. Wenn für die Stromemissionen die CO<sup>2</sup>-Äquivalente der *ahrtaI-werke GmbH* verwendet werden, hätte dies Auswirkungen auf die Ergebnisse der Ökobilanz. Die Ökobilanz zielt darauf ab, die vorgeschlagenen Modernisierungen im Vergleich zum Referenzjahr 2018 darzustellen. Deshalb wird der seit 2022 bezogene Ökostrom der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler nicht betrachtet. [12]

## 7 Wirtschaftlichkeit

In diesem Teil des Berichtes werden zunächst die verwendete Berechnungsmethode, die dynamische Amortisationsberechnung und die definierten Rahmenbedingungen beschrieben. Darüber hinaus werden Herleitungen, Annahmen und Festlegungen dargestellt und erläutert. Anschließend folgt die Ergebnisdarstellung mit Erklärung und Einschätzung der berechneten Simulationsvarianten. Zudem werden verfügbare Fördermittel für die Maßnahmen vorgestellt.

### 7.1 Methodik

Um alle Investitionen einheitlich miteinander vergleichen zu können, wird im Folgenden die dynamische Amortisationsrechnung angewandt. Alle in dieser Studie verwendeten Technologien waren im Jahr 2022 nach KfW förderfähig, daher richtet sich der angenommene Zinssatz nach dem KfW-Förderzinssatz für erneuerbare Energien von 3,9 % [83]. Zusätzlich wird ein jährlicher Gewinnverlust auf alle technischen Komponenten aufgrund von technischer

Degradierung gerechnet. Da die größten Kosteneinsparungen anteilig durch die PV-Einspeisung erzeugt werden, wird eine jährliche Degradierungsrate von 0,5 % für alle jährlichen Einsparungen angenommen [84].

Mit der Betrachtung der Amortisationszeit, beziehungsweise dem Gewinn nach 20 Jahren für jede Liegenschaft, kann jedes Investitionsobjekt aussagekräftig bewertet werden.

## 7.2 Annahmen

Für die Berechnung sind jeder Liegenschaft alle individuellen Investitionskosten zugeordnet. Um die Daten übersichtlich darzustellen, sind in *Tabelle 20* die spezifischen Investitionskosten je Technologie aufgeführt. Diese ergeben sich aus Marktrecherchen marktgängiger Produkte (Batteriespeicher, Wärmespeicher, Wärmepumpe), den Angeboten der *Priogo AG* (PV-Systeme) und einer Kostenabschätzung mit einem Tool für Energieberatung (Sanierungsmaßnahmen, Wärmepumpen).

*Tabelle 20: Durchschnittspreise der Technologien [63, 68]*

Technologie	Photovoltaik	Wärmepumpe	Wärmespeicher	Batteriespeicher	Sanierung
Investitionskosten	1580 €/kWp Min. 890 €/kWp Max. 2250 €/kWp Siehe Anhang PV-Angebote	Pauschalpreise über das Energieberater Kostentool	200 - 300 €/kWh	800 - 1300 €/kWh BYD + Fronius - Senec	Pauschalpreise über das Energieberater Kostentool

Den Investitionskosten der technischen Komponenten sind in der Berechnung die einmaligen Installationskosten prozentual angerechnet. Sowohl bei den PV-Anlagen, als auch bei den Wärmepumpen, werden diese Kosten den jeweiligen Angeboten entnommen. Allen weiteren Technologien wird in der Simulation ein Anteil von durchschnittlich 25 % Investitionskosten zugerechnet. Zusätzlich werden für Objekte, welche noch nicht an das Fernwärmenetz angeschlossen sind, eine zusätzliche pauschale Anschlussgebühr inklusive Technik von 11.000 € berechnet [35].

## 7.3 Förderungsmöglichkeiten

Nachfolgend werden mögliche Fördermöglichkeiten für die Modernisierungsvarianten betrachtet. Die Priorität liegt auf Fördergeldern, die nicht zurückgezahlt werden müssen. Das

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) bietet Förderungen für die Modernisierung von Nichtwohngebäuden, welche folgend erläutert werden. Zu beachten ist die Deckelung aller Förderungen auf jährlich 1.000 €/m<sup>2</sup> Nettogrundfläche und auf insgesamt jährlich maximal 5 Mio. € pro Gebäude. Für alle Förderungen gilt ein Mindestinvestitionsvolumen von 2.000 €. Installationskosten und Wartungskosten werden nicht gefördert. Die anwendbaren Fördermaßnahmen und Fördersätze sind *Abbildung 21* zu entnehmen. [85]

*Tabelle 21: BAFA-Fördersätze für die Modernisierung von Nichtwohngebäuden [85]*

Fördergegenstand	Fördersatz	Zusatz
Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle	15 %	
Wärmepumpe	25 %	5 % Bonus bei Wärmequelle Wasser, Erdreich oder Abwasser
Anschluss an ein Wärmenetz	30 %	
Heizungstausch Bonus (Gas-, Öl-, Kohle- oder Nachtspeicherheizung)	10 %	
Anlagentechnik zur Optimierung der Energieeffizienz	15 %	
Optimierung der Heizungsanlage	15 %	

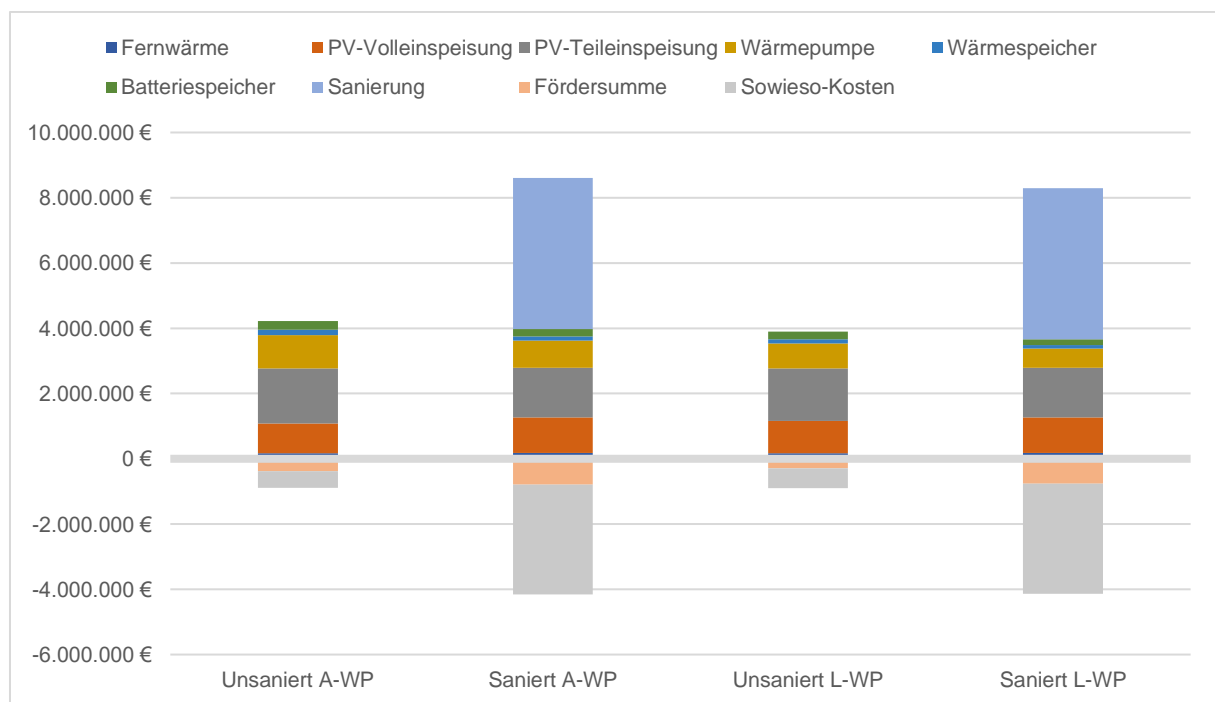
Die Förderungen für Einzelmaßnahmen an der Gebäudehülle betreffen die Dämmung der Gebäudebauteile (Außenwänden, Dachflächen, Geschossdecken und Bodenflächen, Vorhangfassaden) und den Austausch von Fenstern, Außentüren und -toren. Die Wärmepumpen werden mit 25 % der Investitionskosten gefördert. Sollte als Wärmequelle Wasser, Erdreich oder Abwasser erschlossen werden, steigt der Fördersatz auf 30 %. Der Anschluss an ein Wärmenetz wird mit 30 % gefördert. Wenn die alten Gas-, Öl-, Kohle- oder Nachtspeicherheizungen ausgetauscht werden, steigt der Fördersatz um weitere 10 %. Die Gasheizungen müssen zur Erhaltung der Förderberechtigung mindestens 20 Jahre im Einsatz sein. Eine vollständige Auflistung aller Förderungen für jede Modernisierungsvariante ist *Anhang 4.4* zu entnehmen. [85]

## 7.5 Ergebnisse

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Simulationsberechnungen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit dargestellt.

### 7.5.1 Investitionskosten

In *Abbildung 37* sind die gesamten Investitionskosten für jede untersuchte Modernisierungsmaßnahme der Studie grafisch dargestellt. Dabei wird zwischen den Varianten saniert und unsaniert, sowie mit Luft/Wasser- und Abwasser/Wasser-Wärmepumpe unterschieden.



*Abbildung 37: Vergleich der gesamten Investitionskosten [eigene Darstellung]*

Hierbei wird ersichtlich, dass die Investitionskosten beider unsanierten Varianten bei etwa 4 Mio. € liegen. Bei den Varianten mit Sanierung liegen die Kosten bei etwa dem Doppelten, 8,25 Mio. €. Es wird deutlich, dass die Sanierungskosten (Hellblau) in der Rechnung den größten Anteil darstellen. Dies wird dadurch relativiert, dass die Mehrzahl der Gebäude in jedem Fall erneuert werden müssen und die Kosten zwingend anstehen. Sofern beispielsweise das Heizungssystem aufgrund von Flutschäden oder energetisch notwendiger Sanierung ersetzt wird, werden diese Kosten als *Sowieso-Kosten* (Hellgrau) bezeichnet. Sowieso-Kosten stellen die Investitionskosten dar, welche bei einer Instandsetzung der aktuell verbauten Komponenten sowieso aufgewandt werden müssten [86]. In den Berechnungen werden diese Kosten von der Gesamtinvestitionssumme abgezogen. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der einzelnen Liegenschaften werden somit ausschließlich energetisch bedingte Mehrkosten verwendet. Hierbei handelt es sich um Kosten, die der reinen energetischen Maßnahme

zugeschrieben werden können. Von der Gesamtinvestitionssumme für jedes Gebäude werden zusätzlich anwendbare Fördersummen (Orange) abgezogen.

### 7.5.2 Jährliche Kosten bei steigenden Energiepreisen

Als Bezugspreise mit künftiger Preissteigerung der jeweiligen Ressourcen werden für die durchschnittliche Wirtschaftlichkeitsberechnung die Energiepreise in Anlehnung an das zweite Quartal 2022 angenommen: Strom aus Netzbezug: 34 ct/kWh; Bezug aus dem Fernwärmenetz: 7,5 ct/kWh; Gas: 21,5 ct/kWh; Holzhackschnitzel: 7,5 ct/kWh und Öl: 16 ct/kWh. Da davon auszugehen ist, dass die fossilen Energieträger durch weitere Preissteigerungen beeinflusst werden (zum Beispiel die CO<sup>2</sup>-Bepreisung). Diese Anteile werden in *Abbildung 38* grafisch erkennbar. [35, 87]

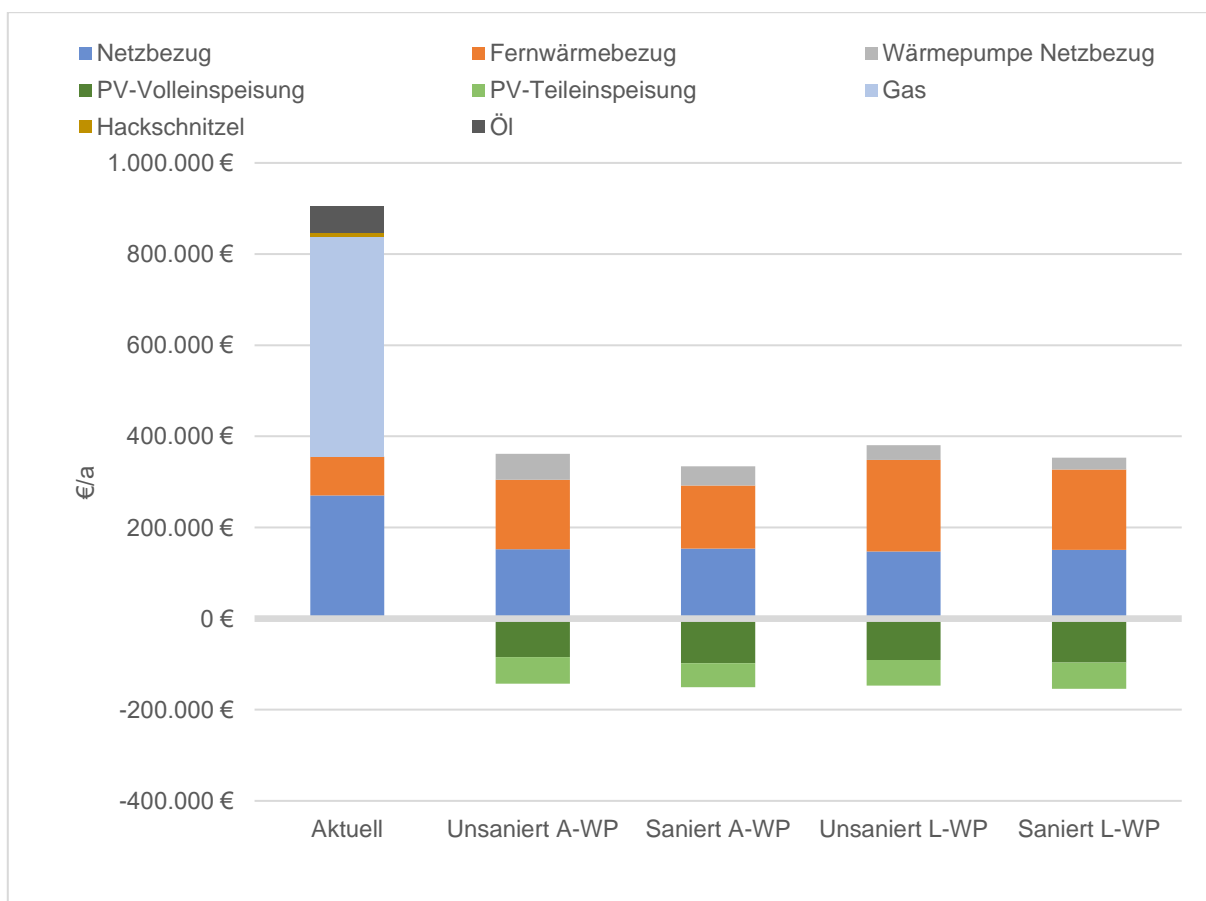


Abbildung 38: Anteile der jährlichen Kosten [eigene Darstellung]

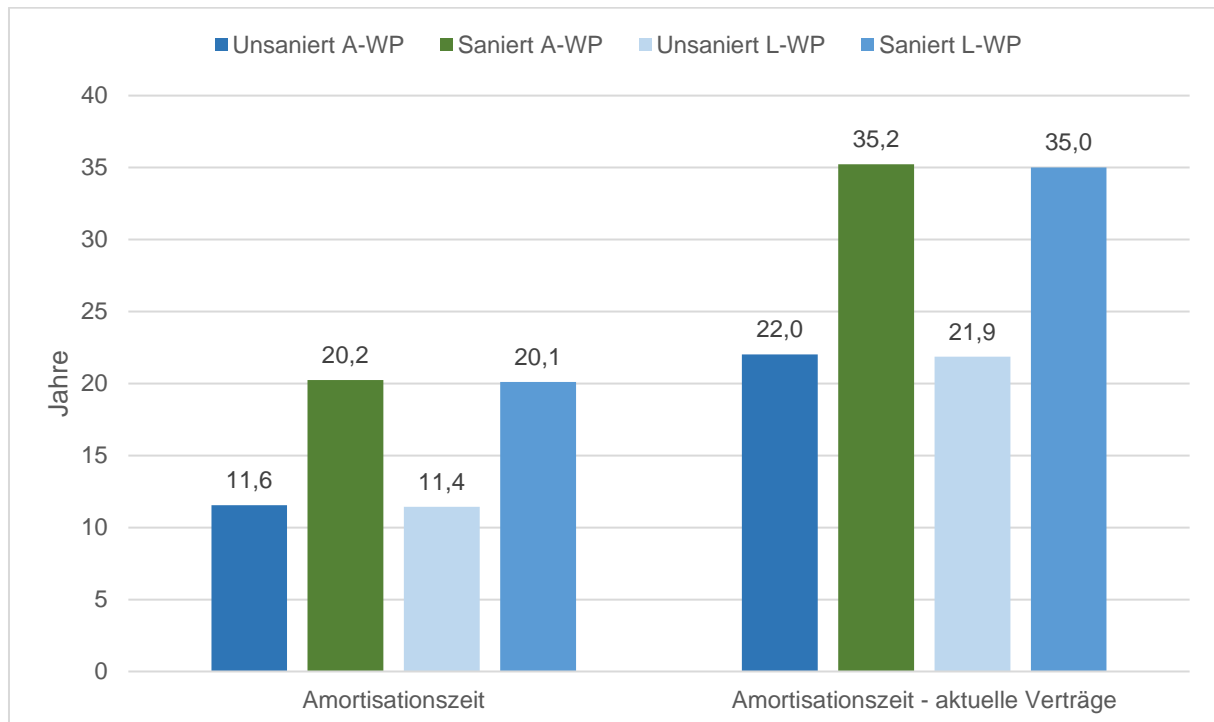
Hieraus wird ersichtlich, dass mit Anwendung der Maßnahmen die jährlichen Kosten von 900.000 € um 70 % auf rund 350.000 € reduziert werden können. Hinzu kommen zusätzlich Einnahmen durch PV-Einspeisung in Höhe von etwa 170.000 €/a. Zudem kann durch den erhöhten Anteil von erneuerbaren Energien auf den Bezug von Gas, Öl und Holzhackschnitzel vollständig verzichtet werden.



### 7.5.3 Amortisation und Gewinn nach 20 Jahren

An dieser Stelle werden die Gesamtergebnisse der Simulation mit allen Objekten dargestellt. Objektspezifische Ergebnisse sind *Anhang 4.4* beigefügt.

In *Abbildung 39* sind die durchschnittlichen Amortisationszeiten nach erfolgten Maßnahmen bei aktuell laufenden Verträgen den durchschnittlichen Amortisationen bei gestiegenen Energieskosten gegenübergestellt.



*Abbildung 39: Vergleich der durchschnittlichen Amortisationszeiten [eigene Darstellung]*

Es wird deutlich, dass sich die Investitionen bei steigenden Energiekosten jeweils um etwa 50 % schneller amortisieren. Durch die Einsparung werden analog dazu höhere Gewinne nach 20 Jahren erzielt. In *Abbildung 40* sind die kumulierten Einsparungen nachzuvollziehen.

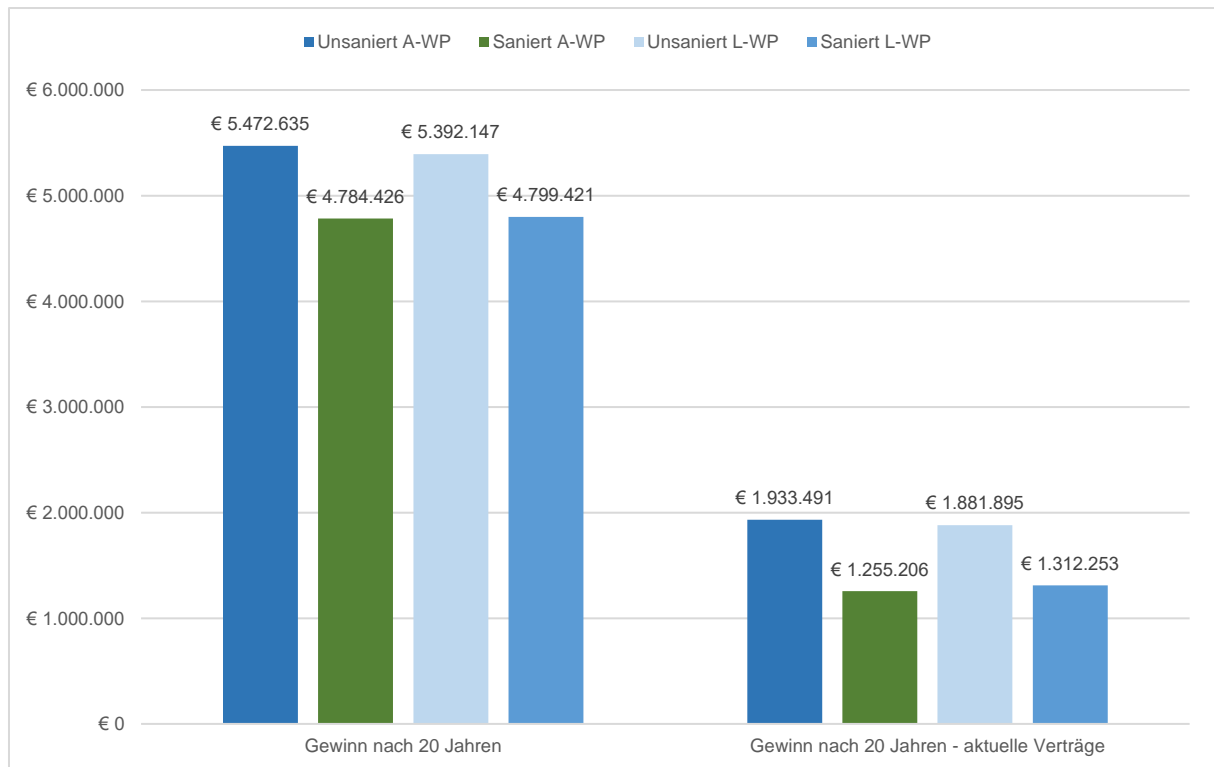


Abbildung 40: Kumulierte Gewinne nach 20 Jahren [eigene Darstellung]

Sowohl in der Darstellung der Amortisationszeit, als auch in der Gewinndarstellung ist erkennbar, dass in der Gesamtbetrachtung ein Gewinnunterschied zwischen den Abwasser/Wasser-Wärmepumpen und den Luft/Wasser-Wärmepumpen nur geringfügig vorhanden ist. Durch die geplanten Maßnahmen werden bereits bei Verwendung der aktuellen Energieverträge Gewinne erzielt. Bei Berücksichtigung der heutigen Preisentwicklung der Energiepreise, fallen die bilanziellen Gewinne durch das erhöhte Einsparpotential gegenüber der konstant bleibenden Energiepreise höher aus. Die Gewinnsteigerung liegt bei etwa 180 %.

## 7.6 Fehlerbetrachtung

Im nachfolgenden Kapitel werden mögliche Fehler der Wirtschaftlichkeitsberechnungen genauer betrachtet. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse aller vorangestellten Themengebiete in die Betrachtung und Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit einfließen. Somit werden die bereits beschriebenen themenbezogenen Fehler mitgeführt und können eine Abweichung der Wirtschaftlichkeit bewirken. Außerdem können nicht alle investiven Maßnahmen in der Berechnung betrachtet werden. Beispielsweise werden keine Kosten bezüglich der Heizungperipherie betrachtet, da die spezifischen Kosten der Neuausstattung im einzelnen Vorort ermittelt werden müssen. Darüber hinaus muss davon ausgegangen werden, dass die Investitionskosten bei Angeboten vor Ort von den theoretischen Kosten abweichen können. Werden die jährlichen Einsparungen mit den Energiebezugspreisen der aktuellen Verträge

berechnet, kann in etwa eine Verdopplung der Amortisationszeiten und eine Halbierung des Gewinns nach 20 Jahren beobachtet werden. Die durchschnittlichen Amortisationszeiten aller Liegenschaften kann *Abbildung 41* entnommen werden. Dabei sind die Amortisationszeiten mit aktuellen Verträgen (Orange) und den Amortisationszeiten aus der Wirtschaftlichkeitsberechnungen (Blau) graphisch dargestellt.

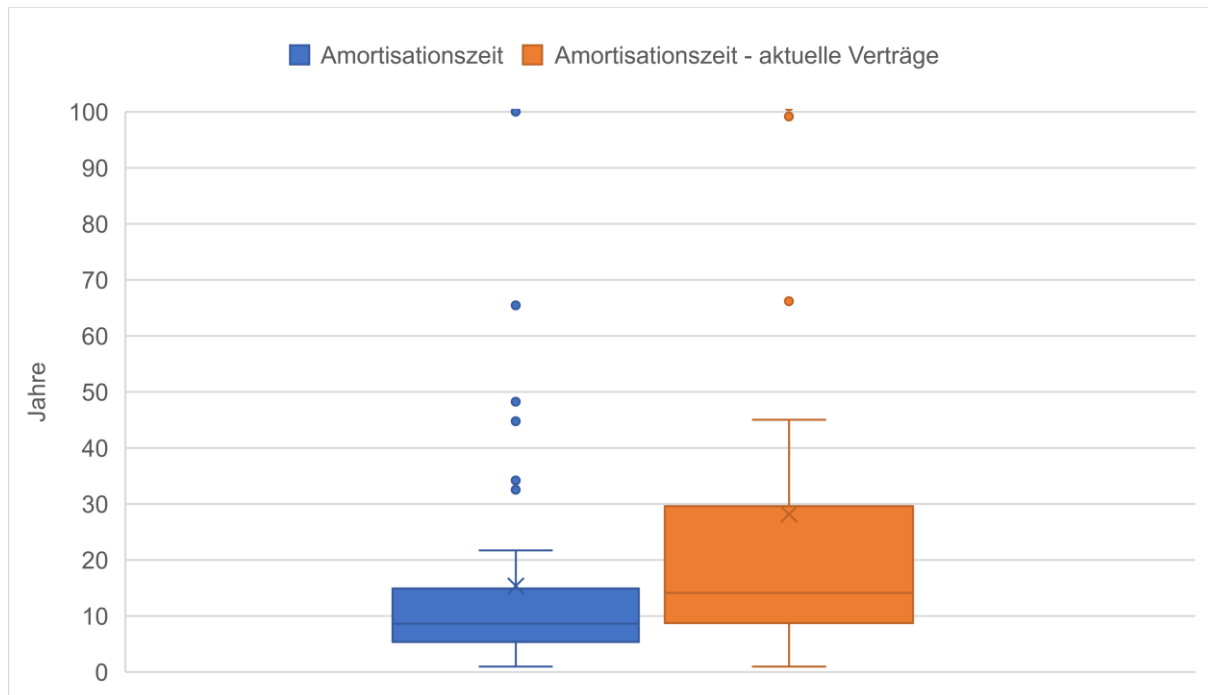


Abbildung 41: Boxplot der durchschnittlichen Amortisationszeit [eigene Darstellung]

Die Boxplots zeigen Ausreißer bis zu einer Amortisationszeit von 101 Jahren auf. Dies ist der Maximalwert der Berechnung. Die hohen Amortisationszeiten sind teilweise auf Fehler in der Abschätzung der sanierungsbedingten Kosten und der Einsparpotentiale zurückzuführen. Auch die Installation von Wärmepumpen in den Liegenschaften ohne Photovoltaiksystem erwirkt nicht in allen Fällen eine positive Kostenbilanz. Der Median stellt sich hierbei bei 15 Jahren (Blaues Kreuz) beziehungsweise bei 28 Jahren (Orangenes Kreuz) ein.

## 8 Vorstellung des Datentools

Für die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler sind die Ergebnisse in einem Datentool zusammengefasst. Ziel des erstellten Datentools ist es, die ermittelten und simulierten Datensätze vereinfacht und verständlich darzustellen. Die genaue Funktionsweise und das Einsatzgebiet werden im nachfolgenden Kapitel genauer beschrieben. Außerdem sind dem erstellten Datentool Beschreibungen beigelegt, welche die einzelnen Bereiche genauer erläutern.

Das Datentool ist mithilfe von *Microsoft Excel* erstellt. Für die Übersichtlichkeit sind verschiedene Arbeitsmappen für die einzelnen Funktionen angefertigt. Das Tool beginnt auf der ersten

Arbeitsmappe „Eingabe“ mit einer Suchfunktion, wodurch gezielte Ergebnisse ausgegeben werden können. Dabei kann nach bestimmten Kriterien gefiltert werden, wie beispielsweise in *Abbildung 42* zu erkennen ist.

Suche nach einer Liegenschaft	Grundschule Ahrweiler (AB-WP)
Suche nach einem Thema	Wärmepotenzial ohne Sanierung
Suche nach bestimmten Datensätzen	(Alle) <input type="button" value="v"/>
<b>SUCHEN</b>	

*Abbildung 42: Suchfunktion des Datentools [eigene Darstellung]*

Die Suchfunktion ermöglicht eine gezielte Suche mithilfe von Drop-Down-Listen nach bestimmten Liegenschaften oder einem Thema. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden in der Arbeitsmappe „Ergebnis“ angezeigt. Zusätzlich können auf der ersten Mappe die aktuellen Energiekosten eingetragen oder aktualisiert werden, sodass nachfolgende Ergebnisdiagramme automatisch angepasst werden. Des Weiteren können Benutzer:innen über einen Button genaue Themen im Datensatz ansteuern.

Auf der zweiten Arbeitsmappe „Ergebnis“ sind die ermittelten Ergebnisse graphisch dargestellt. In dieser Arbeitsmappe werden die gewünschten Ergebnisse durch die Suchfunktion aufgezeigt und unterschiedliche Ergebnisdiagramme, welche den Berechnungen und Simulationen zugrunde liegen, aufgezeigt. Für die vereinfachte Übersichtlichkeit ist ebenfalls eine Verknüpfungstabelle beigefügt. Dadurch werden Benutzer:innen des Tools direkt zu dem ausgewählten Diagramm geleitet. Die dargestellten Ergebnisse passen sich automatisch an Änderungen im Datentool an, sodass die Ergebnisse immer dem Stand der eingegebenen Werte entsprechen.

Die nächste Mappe „Datensatz“ umfasst sämtliche gesammelten und simulierten Daten in einer umfassenden Tabelle. Hierbei werden alle durchgeführten Modernisierungen mithilfe von berechneten Werten aufgeführt. Aufgrund der Komplexität der Simulationen, ist der Großteil der Daten per Hand eingetragen und ist nicht mit Verknüpfungen versehen wurden.

Die Mappe „Ökobilanz“ beinhaltet die gesamten Bilanzierungen der unterschiedlichen Emissionspotentiale. Diese sind für alle 36 verschiedenen Liegenschaften angewendet und erstellt. Einige Liegenschaften umfassen mehrere Bilanzierungen, da unterschiedliche Wärmepumpentechnologien und Sanierungsmaßnahmen simuliert sind. Alle detaillierten Ergebnisse sind in dieser Mappe „Ökobilanz“ vorzufinden.

Die letzte Mappe „Sanierung“ umfasst das Berechnungstool für die Einsparmaßnahmen durch die Sanierungen. Hier können im Nachgang des Projektes vor Ort ermittelte U-Werte den Liegenschaften ergänzt und somit präzisere Ergebnisse für die Einsparungen berechnet werden.

Das Datentool wird den Auftraggeber:innen bei Übergabe der Machbarkeitsstudie zur Verfügung gestellt. Zur Nachvollziehbarkeit der ermittelten Daten sollte das Tool mit dem Bericht der Machbarkeitsstudie zusammen betrachtet werden. Außerdem kann dieses Tool in Zukunft von den Auftraggeber:innen selbst verwendet und angepasst werden.

## 9 Ergebnisdiskussion und Handlungsempfehlung

In diesem Abschnitt werden alle vorgestellten Ergebnisse interpretiert, eingeordnet und in einem kritischen Kontext betrachtet. Einleitend erfolgt dazu *Tabelle 22* mit einer priorisierten Darstellung von Gebäuden. Die gesamte Tabelle mit Priorisierungsrang ist in *Anhang 8* wiederzufinden. Anschließend werden die einzelnen behandelten Themen der Studie untersucht, sowie eine jeweilige Handlungsempfehlung ausgesprochen. Abschließend wird ein Leitfaden bezüglich des empfohlenen weiteren Vorgehens der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler beschrieben.

*Tabelle 22: priorisierte Empfehlungstabelle [eigene Darstellung]*

Liegenschaft	Volleinspeisung [kWp]	Teileinspeisung [kWp]	Wärmeerzeuger [kW]	Jährliche Einsparungen [kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent]	Gesamtinvestitionen	Amortisationszeit [a]	Priorisierungsrang
Grundschule Ahrweiler (saniert, Abwasser-WP)	80	55,2	Fernwärme 50 kW Wärmepumpe 10 kW	128.046,25	917.138 €	4,4	1
Grundschule Heimersheim mit Turnhalle und Mehrzweckhalle	100	96,08	Fernwärme 175 kW	161.079,08	253.717 €	4,3	2
Erich-Kästner-Realschule plus (Luft-WP)	20	315,9	Fernwärme 400 kW Wärmepumpe 20 kW	207.071,58	400.893 €	6,9	3
Grundschule Bad Neuenahr (Abwasser-WP)	65	135	Fernwärme 85 kW Wärmepumpe 45 kW	179.306,06	345.996 €	5,8	4
Erich-Kästner-Realschule plus (saniert, Abwasser-WP)	10	325,9	Fernwärme 250 kW Wärmepumpe 80 kW	201.662,63	515.060 €	6,9	5
Turnhalle / Gymnastikhalle, Grundschule Bad Neuenahr (Abwasser-WP)	100	100	Fernwärme 35 kW Wärmepumpe 20 kW	123.002,53	317.296 €	6,9	6

Liegenschaft	Volleinspeisung [kWp]	Teileinspeisung [kWp]	Wärmeerzeuger [kW]	Jährliche Einsparungen [kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent]	Gesamtinvestitionen	Amortisationszeit [a]	Priorisierungsrang
Sportplatzgebäude Apollinarisstadion	100	40,4	Fernwärme 50 kW Wärmepumpe 7,5 kW	108.016,50	218.736 €	6,3	7
Turnhalle, Grundschule Ahrweiler (Abwasser-WP)	49,6	20	Fernwärme 40 kW Wärmepumpe 15 kW	39.628,30	163.641 €	6,9	8
Feuerwehrhaus Ahrweiler	10	50	Fernwärme 65 kW	65.460,47	149.717 €	5,5	9
Mehrzweckgebäude und Freiwillige Feuerwehr Ramersbach	103	39,8 (vorhanden)	Wärmepumpe 18,6 kW	38.475,21	156.903 €	11,5	10
Alte Schule Bachem (saniert)	10	10	Fernwärme 15 kW	22.847,50	121.178 €	4,8	11

Die *Tabelle 22* mit den priorisierten Gebäuden umfasst die optimierten Auslegungen für mögliche PV-Anlagen, die geplanten Wärmeerzeuger und die berechneten Amortisationszeiten bei steigenden Energiepreisen, sowie Gesamtinvestitionen und Treibhausgaseinsparungen durch die Maßnahmen. Zusätzlich wurde eine Farbmatrix verwendet, wodurch die Handlungsempfehlung erläutert wird. Die Bedeutung der Farben ist in *Tabelle 23* dargestellt und dient der Verständlichkeit, der in *Anhang 7* zu findenden Gesamttabelle.

*Tabelle 23: Erläuterung der Empfehlungstabelle [eigene Darstellung]*

Empfohlene Maßnahmen	Überprüfung notwendig
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amortisation unter 20 Jahren</li> <li>• Energetisch am Sinnvollsten</li> <li>• Schnelle Umsetzung empfohlen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amortisation über 20 Jahre</li> <li>• Möglicher Fehler bei Annahmen oder der Simulation</li> <li>• Maßnahme unwirtschaftlich</li> </ul>

Die Empfehlung beinhaltet alle Maßnahmen auf Basis der simulierten Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz. Ab einer Amortisationszeit von weniger als 20 Jahren werden die Maßnahmen als empfehlenswert angesehen und können nach einer Kontrolle der angegebenen und berechneten Werte umgesetzt werden. Liegt die Amortisationszeit bei über 20 Jahren werden die ausgelegten Maßnahmen als nicht wirtschaftlich angesehen. Dies kann unter anderem an Berechnungs- und Annahmefehlern liegen, weshalb diese Einzelfälle von der Stadt genauer untersucht werden müssen. Wenn die unsanierten und sanierten Varianten beide empfohlen werden, ist die sanierte Variante vorzuziehen.

Unabhängig von den jeweiligen Handlungsempfehlungen sind bei allen Liegenschaften die folgenden Hinweise zu beachten. Bei allen Liegenschaften mit PV-Potential ist der Einbau

einer Photovoltaikanlage zu empfehlen. Auch ohne Durchführung anderer Maßnahmen sind die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile der Eigenstromproduktion bei jedem Gebäude als sinnvoll anzusehen.

## 9.1 Photovoltaik

Im Rahmen der Photovoltaikplanung konnte anhand von baurechtlichen Kriterien die Gebäude ausgewählt werden, welche potentiell mit einer PV-Anlage ausgestattet werden können. Zusammengefasst kann durch diese 25 Anlagen somit ein gesamter Stromertrag von 2 Mio. kWh bei einer Investitionssumme von 3 Mio. € benannt werden.

Bedingt durch das hohe Energieeinsparungspotential, gute Wirtschaftlichkeit, Überschusseinspeisung und das hohe Potential in der Betrachtung der Ökobilanz ist eine zeitnahe Umsetzung möglichst vieler Objekte mit maximaler Dachbelegung zu empfehlen. Diese Arbeiten sollten mit empfohlenen oder anstehenden Dacharbeiten und -sanierungen kombiniert werden. Die *PV\*Sol*-Simulationen aller Liegenschaften liegen dieser Arbeit bei und können als Grundlage für weitere Auslegungsplanungen verwendet werden. Eine kostenoptimierte Belegung unter Betrachtung von Überschuss-, Volleinspeisung und Wärmesystem muss im Weiteren von der Stadt geprüft werden. Bei nicht absehbarer Realisierung mangels ausreichendem Investitionsvermögen ist eine Verpachtung der Dachfläche an beispielsweise die *ahrtaI-werke GmbH* zur Ausschöpfung des PV-Potentials zu empfehlen. So kann der Stromertrag der Volleinspeisung und die damit verbundenen finanziellen und ökologischen Einsparungen bilanziell verwertet werden. Des Weiteren wird empfohlen, ein anlagenverknüpfendes bilanzielles Energiemanagement einzuführen. Durch ein virtuelles Kraftwerk lassen sich die produzierten Überströme der PV-Anlagen effizienter nutzen und der städtische Eigenverbrauch steigt. Ergänzend hierzu bietet das vorgestellte Unternehmen *abc GmbH* eine Lösung durch die *In-BiS*-Software (Siehe Kapitel 3.2).

## 9.2 Wärmeversorgung

Der Ausbau des Fernwärmenetzes ermöglicht den Anschluss von 15 weiteren Liegenschaften im betrachteten Gebiet. Dadurch kann die gesamte Fernwärmeversorgung der Liegenschaften von 30 % auf mehr als 80 % erhöht werden. Diese erweiterten Anschlüsse ermöglichen, die fossilen Energieerzeuger teilweise zu ersetzen und die klimaneutrale Energieversorgung zu steigern. Für die Studie wurde nach Absprache mit der Stadtverwaltung alle Voraussetzungen für den Einbau der jeweiligen Heizungssysteme als erfüllt angenommen. Die Dimensionierung der ausgelegten Wärmeerzeuger und -speicher ist nicht als final anzunehmen, da auf Basis der Datengrundlage die Energiesysteme nur theoretisch betrachtet wurden. Die Mehrkosten können aufgrund von möglichen Zusatzmaßnahmen nicht in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen betrachtet werden. Auch die Kosten für nötige Maßnahmen an der Heizungsperipherie

werden in der Wirtschaftlichkeit nicht aufgeführt, da die benötigten Daten für eine Berechnung dieser Kosten nicht in der Datengrundlage vorhanden sind. Somit dienen die angegebenen Kosten nur als Richtwert und können von den realen Kosten abweichen. Alle beschriebenen Maßnahmen führen zu einer verbesserten Ökobilanz der Stadt und können zum Erreichen der Klimaziele eingesetzt werden.

Im Rahmen der Empfehlung ist ausdrücklich zu erwähnen, den Fernwärmenetzausbau umfänglich umzusetzen und die Wärmeversorgung vorrangig hierdurch zu realisieren. Die Liegenschaften, die vom Anschluss an das Fernwärmenetz ausgeschlossen sind, wurden mit Wärmepumpen ausgelegt. Hierbei ist bei der Auswahl der Wärmepumpen stets die Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist jedoch die Abwasser/Wasser-Wärmepumpe der Luft/Wasser-Wärmepumpe vorzuziehen. Neben den technischen Vorzügen durch bessere Leistungskennzahlen ist zudem anhand der Simulationsergebnissen von einem wirtschaftlich und ökologisch erhöhten Nutzen auszugehen. Die Umstellung der Heizungsanlage auf eine Abwasser-Wärmepumpe ist vor allem dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn gleichzeitig Arbeiten oder Erneuerungen am Kanalsystem stattfinden. Darüber hinaus wird bei Gebäuden, welche einen hohen Wärmebedarf aufweisen oder bei denen eine hohe Vorlauftemperatur nötig ist, die Installation einer Hochleistungswärmepumpe empfohlen. Zur Effizienzsteigerung und Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz sind der Austausch der verbauten Technologien mit effizienteren Warmwassererzeugern sinnvoll. Bezüglich der Heizungsperipherie ist zu erwähnen, dass ein hydraulischer Abgleich der Heizungsanlage auch dann sinnvoll ist, wenn die Modernisierungen nicht durchgeführt werden sollten. Dieses Verfahren passt die Wassermassenströme und Druckdifferenzen an den Regeleinrichtungen der Heizflächen an und reguliert die Heizlast der verschiedenen Räume an das Heizsystem. Nach dem hydraulischen Abgleich lassen sich bis zu 15 % Energie einsparen [41]. Eine Einzelfallbetrachtung vor Ort ist bei allen Anlagen nötig, um lokale Anforderungen für Heiztechnologien in den Liegenschaften zu überprüfen.

### **9.3 Kommunales Energiemanagement**

Das Unterkapitel Kommunales Energiemanagement behandelt die energetischen Einsparungen durch nicht-investive Maßnahmen. Dazu wird ein Überblick über bevorzugte Maßnahmen gegeben und spezifische Einsparpotentiale mit Hilfe der Kennzahlen aus dem Energiebericht 2018 abgeschätzt. Dabei wurde festgestellt, dass sich bei der Betrachtung aller Liegenschaften ein energetisches Einsparpotential für Strom von 35 % und für Wärme von 45 % ergibt. Die Liegenschaften werden auf Basis ihres energetischen und wirtschaftlichen Einsparpotentials priorisiert und die Erfahrungen anderer Kommunen mit Energiemanagementsoftwares und Messstellentechnik erläutert. Auf dieser Basis wird ein Maßnahmenplan für die Einführung eines kommunalen Energiemanagementsystems erstellt. Die erarbeitete Priorisierungsliste



und der erstellte Maßnahmenplan sollte als Grundlage für eine Einführung des Energiemanagementsystems genutzt werden. Aufgrund der geringen Anzahl und des Aufbaus der Energiesysteme der Liegenschaften werden keine Softwarelösungen mit großem Funktionsumfang oder Regelungsmöglichkeiten benötigt. Daher kommt die Nutzung einer für Kommunen optimierten Software mit Webumgebung in Frage. Sollte die Stadt eine Digitalisierung der Verwaltung anstreben, bieten Komplettsysteme für die kommunale Verwaltung eine Effizienz- und Nutzerfreundlichkeitssteigerung durch Bündelung aller Schnittstellen. Eigene IT-Infrastrukturen sollten vermieden werden.

Alle verfügbaren "registrierenden Leistungsmessungs"-Zähler (z.B. *Rathaus, Erich-Kästner Realschule*) sollten über den Messstellenbetreiber in die Energiemanagementsoftware eingebunden werden. Die Zähler von kleinen Anlagen sollten monatlich, etwa mittels Smartphone-App und QR-Code auf den Zählern an die Software übermittelt werden, damit diese über Auffälligkeiten und Einsparpotentiale informieren kann. Modernisierungen sollten genutzt werden, um intelligente Zähler und Energiemanagementsysteme zu verbauen. Mit diesen können Wärmepumpen und PV-Wechselrichter geregelt und in die Software eingebunden werden. Bei großen Verbrauchern, wie Schulen oder dem Rathaus, können zusätzlich weitere Zähler verbaut oder angebunden werden, um unterschiedliche Heiz- und Stromkreise detaillierter betrachten zu können. Auf Grund des minimalen Material- und Investitionseinsatzes ist die Einführung und stetige Optimierung eines kommunalen Energiemanagementsystems priorisiert zu behandeln. Auf dieser Basis können Investitionen geplant werden. Die Priorisierungsliste der Liegenschaften kann genutzt werden, um die Gebäude in Einzelfallprüfungen zu untersuchen und Einsparpotentiale zu identifizieren. Die aufgeführten nicht-investiven Einsparpotentiale sollten in jedem Fall überprüft werden.

#### **9.4 Gebäudesanierungen**

Aus den aufgezeigten Einsparpotentialen geht hervor, dass bei den Liegenschaften ein hoher Sanierungsbedarf besteht. Durch die vorgestellten Maßnahmen kann der Wärmebedarf aus dem Referenzjahr um 1.033.163 kWh/a gesenkt werden. Dies entspricht einer Senkung um 25 % des Gesamtwärmebedarfes. Die Investitionskosten aller Maßnahmen belaufen sich auf 4.6 Mio. €. Die angegebenen Sanierungsmaßnahmen sind zudem unvollständig, weshalb noch weiteres Einsparpotential bei den Gebäuden ermittelt werden könnte.

Aus den dargestellten Ergebnissen lassen sich Empfehlungen zur Priorisierung von Sanierungsmaßnahmen für die einzelnen Liegenschaften ableiten. Im Rahmen der notwendigen Wiederaufbaumaßnahmen stellen Sanierungen eine Chance dar, den Gebäudestandard durch eine Erweiterung der aktuellen Wiederaufbauprojekte weiter anzuheben. Die Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz stellen dar, dass die sanierten Liegenschaften zwar

eine höhere Amortisationszeit, aber auch erhöhte jährliche energetische Einsparungen zur Folge haben.

Für die Sanierungsplanungen wird eine Validierung der ermittelten Werte über eine Fachfirma für Energieberatungen empfohlen. Durch Standortbegehungen können noch nicht erschlossene sanierungsbedürftige Flächen, sowie fehlende Daten für die Erstellung eines individuellen Sanierungsfahrplanes (iSFP) aufgenommen werden. Dadurch können die Sanierungsmaßnahmen präziser angepasst und genauere Einsparungswerte durch Betrachtung aller Flächen einer Liegenschaft ermittelt werden. Eine weitere Empfehlung ist die Kombination von Sanierungsmaßnahmen mit anderen Maßnahmen an den Gebäuden. Dazu zählen Flutschäden-Beseitigungen und die Installation einer Photovoltaikanlage nach einer Dachsanierung. Abschließend sind Sanierungen bei allen Gebäuden aus ökologischer Sicht zu empfehlen, allerdings sind die Gebäudesanierungen meist nur bei bilanzieller Betrachtung der Sowieso-Kosten wirtschaftlich.

## 9.5 Ökobilanz

Die Ergebnisse der Ökobilanz wurden mithilfe von Berechnungen und Daten aus der *ÖKOBAUDAT* erstellt. Aufgrund von unterschiedlichen Definitionen für Energieerzeuger sind verschiedene Ergebnisse zu erwarten, weshalb keine einheitliche Ökobilanz erstellt werden konnte. Um Aussagekraft und Plausibilität der Ergebnisse gewährleisten zu können, erfolgte die Neuberechnung der Datengrundlage bezüglich Nutzungs- und Betriebsemissionen für 2018. Für die Einsparungen bezüglich des jährlichen Treibhauspotentials aus Nutzung und Betrieb, können je nach Definition jährlich zwischen 1.400 und 1.500 Tonnen an CO<sup>2</sup>-Äquivalent eingespart werden (Siehe *Kapitel 6*). Somit würden sich die geplanten Maßnahmen nach etwa 2 Jahren ökologisch amortisieren. In Bezug auf das Treibhauspotential ist zudem zu beachten, dass der durch die Energiesimulationen berechnete, eingespeiste PV-Strom in der Rechnung als negative Emissionen angesehen wird (Stromgutschrift). Die Einberechnung der Stromgutschrift von PV-Anlagen kann im Datentool manuell angepasst werden. Einige Komponenten weisen unterschiedliche Wirkungsgrade oder Herstellungsprozesse auf, weshalb die realen Werte von den Pauschalwerten der *ÖKOBAUDAT* leicht abweichen können. Außerdem wurden manche der verbauten Anlagen aufgrund fehlender Daten pauschalisiert und nicht individuell berechnet.

Es ist eine zeitnahe Umsetzung aller Maßnahmen zu empfehlen, um schnellstmöglich die ausgestoßenen Emissionen langfristig zu verringern. Da die Betrachtung der Ökobilanz auf eine sofortige Umsetzung aller Maßnahmen setzt, kann sich die Amortisationszeit bei Verzögerung der Umsetzungen verlängern. Zudem wird ersichtlich, dass bei der bilanziellen Betrachtung der Ökobilanz die Selbstversorgung über Photovoltaik und die Stromgutschrift den höchsten Anteil der Einsparungen ausmachen. Bei der Umsetzung aller Maßnahmen können die

ausgeschriebenen Klimaziele der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler und die der Bundesregierung erreicht werden.

## 9.6 Leitfaden

In diesem Kapitel wird schematisch der Leitfaden der Machbarkeitsstudie dargestellt. Dieser dient zur visuellen Anleitung für die Durchführung der vorgeschlagenen Maßnahmen. Dabei wurden die Themenbereiche in vier Kategorien aufgeteilt. Die genauen Bezeichnungen sind der Legende in *Abbildung 43* zu entnehmen.

Die Kategorien dienen nur der systematischen Anordnung und sind unabhängig von den anderen Kategorien zu betrachten. Der Zeitrahmen dient der Orientierung und soll als Anhaltspunkt zu Erreichung der Klimaziele bis zum Jahre 2050 dienen. Die Maßnahmen können zeitgleich oder in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt werden. Dennoch ist es sinnvoll, die Maßnahmen zeitnah umzusetzen, da die Stadt durch jede Modernisierung dem Ziel der klimaneutralen Energieversorgung näherkommt.

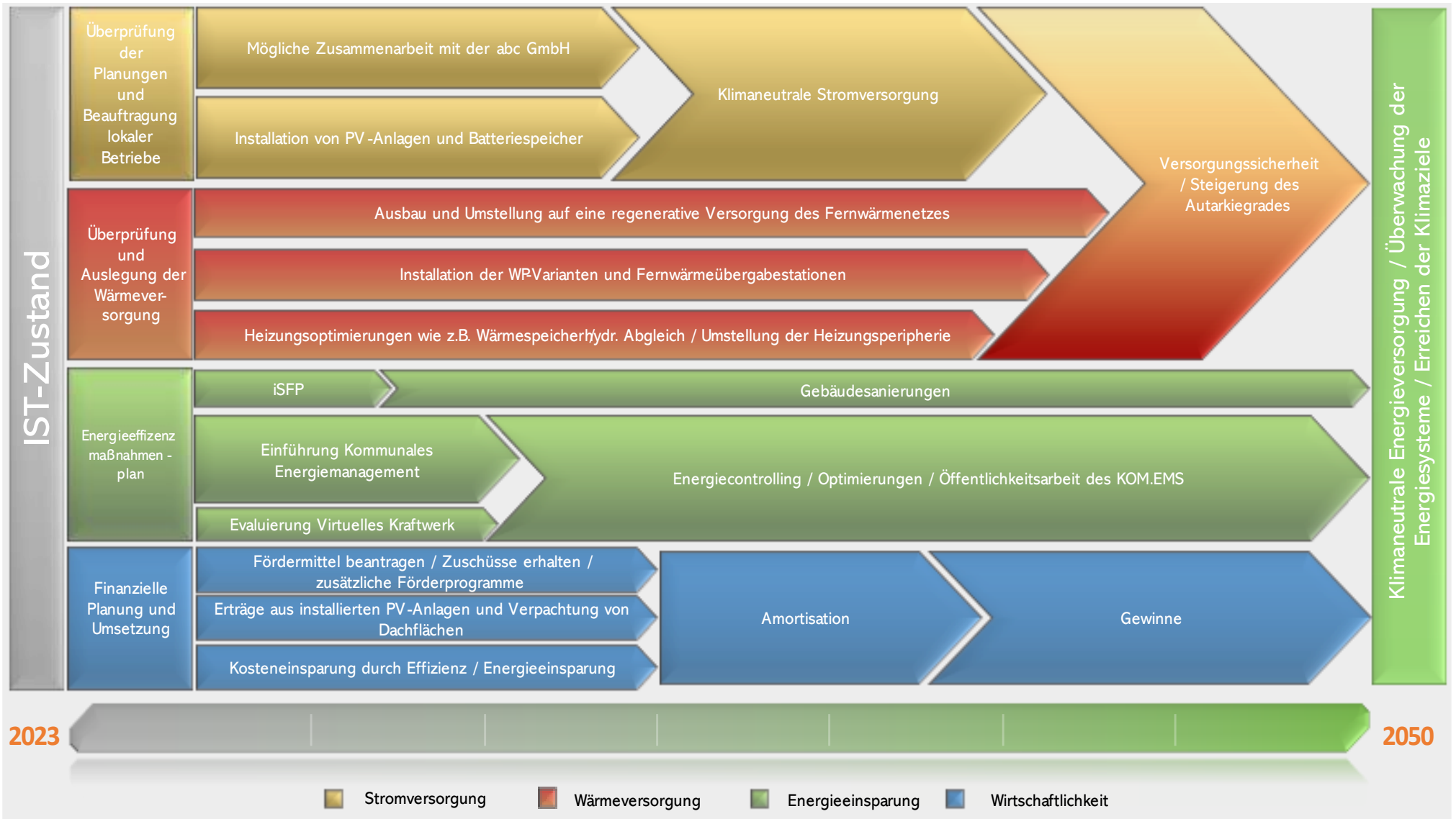


Abbildung 43: Leitfaden der Machbarkeitsstudie [eigene Darstellung]

## 10 Fazit

Diese Machbarkeitsstudie wurde im Rahmen des Modules *Lokales Energiemanagement* an der *Technischen Hochschule Köln* mit dem Ziel erstellt, eine klimaneutrale Energieerzeugung in den Bereichen Strom und Wärme, sowie Möglichkeiten für ein kommunales Energiemanagement und Energieeinsparungen für 36 Liegenschaften der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler zu entwickeln. Dafür wurden für jede Liegenschaft auf Basis der Informationen des Energieberichtes der Stadt aus dem Jahr 2018 und einer Umfrage an die Ansprechpartner:innen, Modernisierungsplanungen durchgeführt.

Für die Stromerzeugung wurden PV-Anlagen für alle Gebäude mit einer maximalen Auslegung simuliert und kalkuliert. Das ermittelte Potential für Photovoltaik liegt bei 2.176 kWp, bei einer jährlichen Erzeugung von circa 2 GWh/a. Durch die Anlagen kann ein Großteil des Strombedarfes der Liegenschaften emissionsfrei gedeckt werden. Der Wärmesektor teilt sich auf in zentrale Versorgung über Fernwärme, sowie dezentrale Versorgung der Liegenschaften über Wärmepumpen. Zusätzlich wurden Wärmespeicher für die Versorgungssicherheit der Wärmepumpen und zur Effizienzsteigerung dimensioniert. Mit objektspezifischen Sanierungsmaßnahmen und Optimierungen des kommunalen Energiemanagements kann der Energiebedarf an Strom um 35 % und Wärme um 45 % gesenkt werden. Alle geplanten Maßnahmen wurden in eine Energiesystemmodellierung mit *PyPSA* integriert. Durch die Simulation wurden die Strom- und Wärmeerzeuger kostenoptimiert dimensioniert. Das Thema Hochwasserschutz wurde durch die Betrachtung eines semi-mobilen Stromversorgungssystems, sowie Sanierungsplanungen mit wasserabweisenden Dämmstoffen berücksichtigt.

Die angefertigte Ökobilanz der Liegenschaften spiegelt je nach Betrachtungsweise eine Reduzierung der zugrundliegenden Emissionen wider. Dabei obliegt die Auslegung unterschiedlichen Definitionen, weshalb der Anteil an ausgestoßenen Emissionen variieren kann. Die Zielsetzung der Stadt, die THG-Emissionen der betrachteten Liegenschaften aus dem Referenzjahr 1990 gegenüber dem Jahre 2050 um über 80 % zu reduzieren, kann künftig mit der Umsetzung der Maßnahmen erreicht werden. Langfristig kann der gesamte Energiebedarf bilanziell aus erneuerbaren Energieträgern bereitgestellt werden, sofern die vorgeschlagenen Maßnahmen erfolgen und die Fernwärme regenerativ erzeugt wird. Unter Berücksichtigung der Stromgutschrift der PV-Anlagen in der Ökobilanz können bilanziell 114 – 121 % der THG-Emissionen aller Liegenschaften jährlich eingespart werden. In der Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde für jedes der einzelnen Gebäude eine umfassende Berechnung mit Angaben der jeweiligen Amortisationszeit und Gewinnerzielung nach 20 Jahren erstellt. Für die Umsetzung aller vorgestellten Maßnahmen bedarf es Investitionen von rund 8,25 Mio. €.

Dabei liegt eine durchschnittliche Amortisationszeit von 22 - 35 Jahren bei aktuell gültigen Energieverträgen und 11 - 20 Jahre bei Energieverträgen mit neuen Preisen vor. Nach Umsetzung aller Maßnahmen kann ein bilanzieller Gewinn von 1,3 Mio. € bei aktuellen Vertragspreisen und ein Gewinn von 4,8 Mio. € nach 20 Jahren bei steigenden Preisen erreicht werden. Hierbei ist in der Gesamtbetrachtung der Studie von wirtschaftlichen und gewinnbringenden Investitionen auszugehen. Abschließend dienen die Simulation und das Datentool als Hilfestellung und Grundlage zur energetischen Modernisierung der Liegenschaften.

Auf Grundlage der Machbarkeitsstudie kann ein klimaneutrales energetisches Konzept für die betrachteten Gebäude umgesetzt werden. Die Maßnahmen und die daraus resultierende Klimaneutralität unterstützen nicht nur die lokalen Klimaziele, sondern helfen auch der Bundesregierung beim Erreichen der bundesweiten Klimavorgaben. Die Stadt kann den Wiederaufbau nach der Flut als Chance nutzen, um als Vorbild im Bereich Klimaneutralität zu agieren und Anreize für die Gesellschaft zu setzen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Stadtverwaltung Bad Neuenahr-Ahrweiler: Klimaschutzmanagement der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler. URL <https://www.bad-neuenahr-ahrweiler.de/buergerservice/klimaschutzmanagement/> – Überprüfungsdatum 2023-01-13
- [2] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Zeitalter der Erneuerbaren Energien. Energiewende. URL <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/erneuerbare-energien-317608> – Überprüfungsdatum 2023-01-10
- [3] Stern, Niels: Die Zerstörung im Ahrtal auf einer interaktiven Karte: Daten und Fakten rund um die Flutnacht. In: Rhein-Zeitung (2022-07-11)
- [4] Stadtverwaltung Bad Neuenahr-Ahrweiler: Massnahmenplan. 31.01.2022
- [5] Beck, Sven ; Conrad, Markus ; Faller, Christian ; Frank, Jens ; Fritz, Robert ; Hahn, Kevin ; Jost, Jasmin ; Koch, Christian ; Klingenberger, Wiebke ; Meisberger, Jochen ; Monreal, Theresa ; Orlando, Caterina ; Schierz, Sara ; Wilhelm, Karsten ; Zender, Elke ; Heck, Peter (Mitarb.); Gruben, Tobias (Mitarb.); Oßwald, Daniel (Mitarb.) : Integriertes Klimaschutzkonzept. Abschlussbericht. Version 4.0. Birkenfeld, 27.02.2014
- [6] Stadtverwaltung Bad Neuenahr-Ahrweiler: Energiebericht : Städtische Liegenschaften. 2018. 2018
- [7] Schmitz, Daniela: Angebot zur Wärmeversorgung in Bad Neuenahr. URL <https://ahrtaelwerke.de/aktuelles/angebot-zur-waermeversorgung-in-bad-neuenahr/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-01-20 – Überprüfungsdatum 2022-10-19
- [8] Neumann, Fabian: An Open Optimisation Model of the European Transmission System. URL <https://github.com/PyPSA/pypsa-eur>. – Aktualisierungsdatum: 2022-09-20 – Überprüfungsdatum 2023-01-02
- [9] Brown, Thomas ; Hörsch, Jonas ; Schlachtberger, David: PyPSA: Python for Power System Analysis. 16.01.2018 (1)
- [10] Technical University of Berlin ; Karlsruhe Institute of Technology: Website PyPSA. URL <https://pypsa.org/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-12-01 – Überprüfungsdatum 2023-12-12
- [11] langhoff ; VDI Zentrum Ressourceneffizienz: Ökobilanz - DIN EN ISO 14040/44. 13.05.2019
- [12] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: ÖKOBAUDAT : Informationsportal Nachhaltiges Bauen. URL <https://www.oekobaudat.de/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-08-17 – Überprüfungsdatum 2023-01-09

- [13] Wirtschaftslexikon24: Dynamische Amortisationsrechnung. URL <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/dynamische-amortisationsrechnung/dynamische-amortisationsrechnung.htm>. – Aktualisierungsdatum: 2017-05-13 – Überprüfungsdatum 2023-12-23
- [14] Ministerium der Justiz Rheinland-Pfalz: Landesgesetz zu Installation von Solaranlagen (Landessolargesetz- LSolarG). URL <https://www.landesrecht.rlp.de/bsrp/document/jlr-SolarGRPpP6>. – Aktualisierungsdatum: 2021-09-30 – Überprüfungsdatum 2023-01-12
- [15] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: Blitzschutz DIN EN 62305-3 Beiblatt 5 (VDE 0185-305-3 Beiblatt 5) : Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen; Beiblatt 5: Blitz- und Überspannungsschutz für PV-Stromversorgungssysteme. URL <https://www.dke.de/de/normen-standards/dokument?id=7035078&type=dke|dokument>. – Aktualisierungsdatum: 2014-02-01 – Überprüfungsdatum 2023-01-15
- [16] LUXOR Solar GmbH: LUXOR Solar - ECO Line HC M108 - 390-410W. URL [https://www.luxor.solar/files/luxor/download/datasheets/LX\\_EL\\_HC\\_BW\\_M108\\_400-420W\\_182\\_DE.pdf](https://www.luxor.solar/files/luxor/download/datasheets/LX_EL_HC_BW_M108_400-420W_182_DE.pdf) – Überprüfungsdatum 2022-09-30
- [17] LUXOR Solar GmbH: LUXOR Solar ECO Line HC BF M120 365-385W Solarmodul. URL [https://www.mg-solar-shop.de/media/pdf/3c/73/57/datenblatt\\_luxor\\_eco\\_line\\_hc\\_m120\\_fb\\_365-385w\\_166cs.pdf](https://www.mg-solar-shop.de/media/pdf/3c/73/57/datenblatt_luxor_eco_line_hc_m120_fb_365-385w_166cs.pdf) – Überprüfungsdatum 2022-09-30
- [18] Kümpel, Nadine: Wechselrichter im Test 2023. URL <https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/planung-und-installation/wechselrichter-test/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-12-29 – Überprüfungsdatum 0501.2023
- [19] Tigo Energy: Tigo TS4-A-O : Optimierung. URL <https://de.tigoenergy.com/product/ts4-a-o> – Überprüfungsdatum 2022-12-17
- [20] PRIOGO AG: Über uns. URL <https://priogo.biz/> – Überprüfungsdatum 2022-11-22
- [21] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Das virtuelle Kraftwerk: erneuerbarer Strom zu jeder Zeit. URL <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Hightechlight/das-virtuelle-kraftwerk-erneuerbarer-strom-zu-jeder-zeit.html> – Überprüfungsdatum 2023-01-10
- [22] abc - advanced biomass concepts: Mehr zu unserem Unternehmen : Herkunft, Ziele und Mission der abc GmbH zur Realisierung nachhaltiger Umwelttechnikprojekte. URL <https://abc-loesung.de/unternehmen/> – Überprüfungsdatum 2022-12-05



- [23] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Bundesförderung Serielles Sanieren : Energieeffizienz. URL [https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Seriell\\_Sanieren/serielles\\_sanieren\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Seriell_Sanieren/serielles_sanieren_node.html) – Überprüfungsdatum 2022-12-29
- [24] Solarloader+: Mehr über unsere Solar-Eigenstrom-Kraftwerke : Semi-mobiles plug & play EigenstromKraftwerk. URL <https://solarloader.de/de/produkte/semi-mobiles-plug-play-eigenstromkraftwerk>. – Aktualisierungsdatum: 2022-12-02 – Überprüfungsdatum 2022-12-22
- [25] Schank, Alexander ; Loosen, Florian: E-Ladeinfrastruktur & plug&play Solaranlagen für Gewerbe & Kommunen
- [26] Schneiders, Thorsten ; Birk, Sascha ; Rehm, Tobias: InBiS – Bidirektionale Nutzung von industriellen Batteriespeichern. URL [https://www.th-koeln.de/anlagen-energie-und-maschinensysteme/inbis--bidirektionale-nutzung-von-industriellen-batteriespeichern\\_93215.php](https://www.th-koeln.de/anlagen-energie-und-maschinensysteme/inbis--bidirektionale-nutzung-von-industriellen-batteriespeichern_93215.php) – Überprüfungsdatum 2023-01-10
- [27] Zimmer, Bernhard: Ökobilanz Waldhackschnitzel : Ergebnisse aus der ökologischen Bewertung belegen: Energie aus Hackschnitzeln ist umweltfreundlich. 2010
- [28] Dohmann, Joachim: Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen : Grundlagen und Anwendungen der Kältetechnik. 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016
- [29] Buri, Rene ; Kobel, Beat: Wärmenutzung aus Abwasser : Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen. Bern/Zürich, 2004
- [30] Rosenkranz, Alexander: Hochtemperatur-Wärmepumpe: Funktion und Einsatz. URL <https://www.heizung.de/waermepumpe/wissen/hochtemperatur-waermepumpe-funktion-und-einsatz.html>. – Aktualisierungsdatum: 2022-12-28 – Überprüfungsdatum 2023-01-04
- [31] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Wärmepumpen mit Prüf-/ Effizienznachweis : Heizen mit Erneuerbaren Energien. 14.12.2020
- [32] Bergmann, Antje ; Erhorn, Hans: Energieeffizienz elektrisch angetriebener Wärmepumpen : PRAXISERGEBNISSE AUS DEM MONITORING. IBP-Mitteilung. 2017
- [33] Bosch Thermotechnik: Wärmepumpe und Heizkörper kombinieren. URL <https://www.bosch-thermotechnology.com/de/de/wohngebaeude/wissen/heizungsratgeber/waermepumpe/waermepumpe-heizkoerper-kombinieren/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-01-13 – Überprüfungsdatum 2023-01-14
- [34] Ahrtal-Werke GmbH: Geschaeftsbericht 2019. Bad Neuenahr-Ahrweiler, 2019

- [35] ahrtal-werke: Fernwärme. URL <https://ahrtal-werke.de/fernwaerme/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-01-10 – Überprüfungsdatum 2023-01-14
- [36] Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltung; Obmann, Klaus (Mitarb.); Exner, Adolf (Mitarb.); Gandyra, Stephan (Mitarb.); Hoffmann Henning (Mitarb.); Holeck, Stefan (Mitarb.); Krone, Uta (Mitarb.) : Wärmeversorgungsanlagen (WVA) - Teil 1: Planung und Bau 2021 : Hinweise zum Planen und Bauen von Wärmeversorgungsanlagen für öffentliche Gebäude. Berlin, 2021
- [37] Verbraucherzentrale: Wärmepumpe – Alles was Sie wissen müssen im Überblick. URL <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/heizen-und-warmwasser/waerme-pumpe-alles-was-sie-wissen-muessen-im-ueberblick-5439>. – Aktualisierungsdatum: 2022-06-09 – Überprüfungsdatum 2022-12-06
- [38] KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH ; Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH ; Sächsische Energieagentur ; Thüringer Energie- und GreenTech-Agentur GmbH: Energiemanagement in Kommunen. Eine Praxishilfe. : Kom.EMS Leitfaden
- [39] Landesenergieagentur Sachsen-Anhalt GmbH: Website Kom.EMS : Kommunales Energiemanagement-System. URL <https://www.komems.de/> – Überprüfungsdatum 2023-01-11
- [40] Rehmann, Felix ; Streblow, Rita ; Müller, Dirk; Technische Universität Berlin (Mitarb.): Kurzfristig umzusetzende Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden und Quartieren. 2022
- [41] Viessmann: Hydraulischer Abgleich der Heizung senkt Energieverbrauch. URL <https://www.viessmann.de/de/wissen/anleitungen-und-tipps/hydraulischer-abgleich.html>. – Aktualisierungsdatum: 2023-01-14 – Überprüfungsdatum 2023-01-08
- [42] Sichere Kita: Raumklima. URL <https://www.sichere-kita.de/allgemeine-anforderungen/allgemeine-anforderungen/raumklima> – Überprüfungsdatum 2023-01-09
- [43] Hausjournal.net: Legionellengefahr durch Durchlauferhitzer? URL <https://www.hausjournal.net/durchlauferhitzer-legionellen>. – Aktualisierungsdatum: 2021-01-19 – Überprüfungsdatum 2023-01-13
- [44] Daube, Dirk ; Metzner, Steffen: Priorisierung von energetischen Maßnahmen in heterogenen Immobilienportfolios – Am Beispiel eines Bestandes der öffentlichen Hand. In: Immobilienökonomie (Zeitschrift für Immobilienökonomie) 2 (2016), Nr. 1, S. 53–79. URL <https://link.springer.com/article/10.1365/s41056-016-0011-4> – Überprüfungsdatum 2023-01-12

- [45] Bosch Global: Die Software für besseres Energiemanagement. URL <https://www.bosch.com/de/stories/energiemanagement-software/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-01-13 – Überprüfungsdatum 2023-01-11
- [46] Siemens Deutschland: Unternehmensweites Energiemanagement mit SIMATIC Energy Manager. URL <https://new.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrie-software/automatisierungs-software/energiemanagement/simatic-energy-manager-pro.html> – Überprüfungsdatum 2023-01-11
- [47] Bundesverband Wärmepumpe e.V.: Wärmepumpen im Smart Grid Ready. URL <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/sg-ready/> – Überprüfungsdatum 2023-01-10
- [48] OMS-Group e.V.: Open Metering System. URL <https://oms-group.org/> – Überprüfungsdatum 2022-12-29
- [49] INM Management Klimastrategie: Software für kommunales Energiemanagement und -controlling in Liegenschaften. URL <https://management.klimastrategie.de/index> – Überprüfungsdatum 2022-12-20
- [50] IngSoft GmbH: Energiemanagementsoftware - Energiemanagement - IngSoft GmbH. URL <https://energiemanagement.ingsoft.de/de/energiemanagementsoftware.html> – Überprüfungsdatum 2023-01-08
- [51] OPTENDA GmbH: Softwarebasiertes Energiedatenmanagement - Startseite. URL <https://www.optenda.de/>. – Aktualisierungsdatum: 2023-01-13 – Überprüfungsdatum 2023-01-02
- [52] Axians Infoma GmbH: Software und Dienstleistungen für öffentliche Verwaltung : Ganzheitliche Software-Lösungen für die smarte Verwaltung. URL <https://www.axians-infoma.de/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-12-29 – Überprüfungsdatum 2023-01-15
- [53] Pantiou, Maria: Ansprechpartnerin für Kom.EMS (Energy4Climate). Onlinemeeting. 2022-07-19. Koch, Maximilian (Adressat)
- [54] Die Bundesregierung: Förderkatalog : Suchfunktion. URL <https://foerderportal.bund.de/foekat/jsp/SucheAction.do?actionMode=searchmask> – Überprüfungsdatum 2023-01-04
- [55] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM). 20.05.2021
- [56] Fachvereinigung Extruderschäum e.V.: XPS Vorteile : Die Vorteile des erfolgreichsten Wärmedämmstoffs Deutschlands. URL <https://xps-spezialdaemmstoff.de/eigenschaften/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-05-04 – Überprüfungsdatum 2023-01-15

- [57] Tackmann, Undine: Dreifachverglasung bringt Ihren Wärmeschutz auf das nächste Level. URL <https://www.aroundhome.de/fenster/dreifachverglasung/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-05-20 – Überprüfungsdatum 2023-01-07
- [58] daemmstoff.org: Holzwole Dämmung. URL <http://www.daemmstoff.org/daemmstoff-holzwole.php> – Überprüfungsdatum 2023-01-04
- [59] energie-experten.org: Transmissionswärmeverluste: Berechnung & Grenzwerte. URL <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/daemmung/waermedaemmung/transmissionswaermeverlust> – Überprüfungsdatum 2023-01-06
- [60] Statistisches Bundesamt: Was sind Heizgradtage? : Umweltökonomische Gesamtrechnungen. URL <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Glossar/was-sind-heizgradtage.html>. – Aktualisierungsdatum: 2020-07-02 – Überprüfungsdatum 2023-01-07
- [61] Weather Spark: Klima und durchschnittliches Wetter das ganze Jahr über in Bad Neuenahr-Ahrweiler – Überprüfungsdatum 2023-01-09
- [62] Thiel, Dieter ; Riedel, Dirk: Typisierte Bauteilaufbauten - Präzisierung der Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand : Endbericht. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2011 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 2793)
- [63] Lambrecht, Klaus ; Jungmann, Uli: Excel-Kostentool. URL <http://www.solaroffice.de/downloads/> – Überprüfungsdatum 2022-12-22
- [64] Öko Zentrum NRW: BEG-Reform zum 1.1.2023 : Alle Neuerungen bei Effizienzhäusern und Einzelmaßnahmen im Überblick. URL <https://oekozentrum.nrw/aktuelles/detail/news/beg-reform-zum-112023/> – Überprüfungsdatum 2023-01-06
- [65] Fibrolith Dämmstoffe GmbH: Mehrschichtplatten mit Holzwole. URL <https://www.fibrolith.de/mehrschichtplatten> – Überprüfungsdatum 2023-01-03
- [66] Dach.de: Projekt Dachsanierung : Dachsanierung- Heizkosten sparen, Wert erhöhen. URL <https://www.dach.de/dach/dachsanierung/> – Überprüfungsdatum 2023-01-02
- [67] SENEK GmbH: SENEK.Home: Der smarte Stromspeicher für Ihr Zuhause. URL <https://senec.com/de/produkte/senec-home>. – Aktualisierungsdatum: 2023-01-09 – Überprüfungsdatum 2023-01-11
- [68] Solarspeicher24: BYD Premium HVS 10.2 Battery Box 10,24kWh Solarspeicher. URL <https://solarspeicher24.de/a/byd-premium-hvs-10.2-battery-box-10-24kwh-solarspeicher/9885700/?gclid=CjwKCAiAqt-dBhBcEiwATw-ggE4Z-wJ->

fbwB9DnzFTKCWVWYk4t1vIS-TyGOH9JyEzbLgTGljO2b-xoCr00QAvD\_BwE – Überprüfungsdatum 2022-12-22

- [69] Seifert, J. ; Knorr, M. ; Oschatz, B.: Thermische Verlustbestimmung bei Speichern. URL <https://www.ingenieur.de/fachmedien/hlh/wissen/thermische-verlustbestimmung-bei-speichern/>. – Aktualisierungsdatum: 2022-11-22 – Überprüfungsdatum 2022-12-26
- [70] Boateng, Erika: Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor : Gesetzentwurf der Bundesregierung. 05.04.2022
- [71] Wasserwirtschaftsverwaltung Rheinland-Pfalz: Ueberschwemmungsgebiet der Ahr : Übersichts- und Detailkarten. 24.09.2021
- [72] Noah Daniel Pflugradt: Modellierung von Wasser und Energieverbräuchen in Haushalten. 26.08.2016
- [73] WetterKontor: Wetterrückblick für Bad Neuenahr-Ahrweiler. URL <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp?id=K038&datum0=02.12.2022&datum1=29.12.2022&jr=2022&mo=12&datum=31.12.2021&t=8&part=2#tabelle> – Überprüfungsdatum 2023-12-15
- [74] Ingenieurbüro Junge: Energieberatung Wärmepumpe: Prüfung der Voraussetzungen, Planung Dimensionierung, Ertragskalkulation, Wirtschaftlichkeit. URL <https://www.xn--ing-bro-junge-0ob.de/html/waermepumpe.html>. – Aktualisierungsdatum: 2017-12-27 – Überprüfungsdatum 2022-11-25
- [75] Vaillant: Wärmepumpen einfach & schnell auslegen. URL <https://www.vaillant.de/fach-partnernet/schnellauslegung-demo/> – Überprüfungsdatum 2022-11-29
- [76] Hake, Bruno: Heizen mit Öl, Gas, Nachtstrom, Solarkollektor oder Wärmepumpe? In: Hake, Bruno (Hrsg.): Ölkrisenprogramm für Hausbesitzer. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1981, S. 103–112
- [77] Bundesministerium der Justiz: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden\* (Gebäudeenergiegesetz - GEG) Anlage 9 (zu § 85 Absatz 6) Umrechnung in Treibhausgasemissionen. URL [https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage\\_9.html](https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_9.html). – Aktualisierungsdatum: 2023-01-14 – Überprüfungsdatum 2022-12-28
- [78] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (2011). URL [https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v\\_2013/BNB\\_UN2013\\_111.pdf](https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_111.pdf) – Überprüfungsdatum 2023-01-06

- [79] Myhre, Gunnae ; Shindell, Drew: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing
- [80] Brockhaus, Sarah: Bodenversauerung: Ursachen und Folgen des sauren Bodens. In: Utopia (2019-04-27)
- [81] Umwelt Bundesamt: Eutrophierung. URL <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/eutrophierung#eutrophierung-was-bedeutet-das> – Überprüfungsdatum 2022-12-16
- [82] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Datenbanksuche. URL [https://www.oekobaudat.de/no\\_cache/datenbank/suche.html](https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html). – Aktualisierungsdatum: 2021-06-25 – Überprüfungsdatum 2023-01-06
- [83] KfW: Erneuerbare Energien – Standard (270). URL [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Eneuerbare-Energien-Standard-\(270\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Eneuerbare-Energien-Standard-(270)/) – Überprüfungsdatum 2022-11-26
- [84] Wirth, Harry; Bächle, Sophia Judith (Mitarb.): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. 30.10.2022
- [85] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Sanierung Nichtwohngebäude : Bundesförderung für effiziente Gebäude. URL [https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente\\_Gebaeude/Sanierung\\_Nichtwohngebaeude/sanierung\\_nichtwohngebaeude\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Sanierung_Nichtwohngebaeude/sanierung_nichtwohngebaeude_node.html) – Überprüfungsdatum 2022-12-29
- [86] baurechtsuche.de: Sowiesokosten. URL <https://baurechtsuche.de/glossar/sowiesokosten/>. – Aktualisierungsdatum: 2020-01-29 – Überprüfungsdatum 2023-01-13
- [87] Verivox: Verivox Energie- Preisvergleich. URL [https://www.verivox.de/lp/sea/energie/?etcc\\_med=cpc&etcc\\_ori=google&etcc\\_cmp=%5ba:strom%5d%5bn:search%5d%5bc:strom-generic%5d%5b2022%5d&etcc\\_grp=3&etcc\\_key=&etcc\\_mty=&etcc\\_bde=c&etcc\\_var=CjwKCAiA5Y6eBhAbEiwA\\_2ZWIYtRk-7EXtACmxTgijhINfyDJ3IA73O4W5sQDwJEIZ-HqWhEawtAPhoChwkQAvD\\_BwE&etcc\\_par=google&campaignid=16400105738&gclid=CjwKCAiA5Y6eBhAbEiwA\\_2ZWIYtRk-7EXtACmxTgijhINfyDJ3IA73O4W5sQDwJEIZHqWhEawtAPhoChwkQAvD\\_BwE](https://www.verivox.de/lp/sea/energie/?etcc_med=cpc&etcc_ori=google&etcc_cmp=%5ba:strom%5d%5bn:search%5d%5bc:strom-generic%5d%5b2022%5d&etcc_grp=3&etcc_key=&etcc_mty=&etcc_bde=c&etcc_var=CjwKCAiA5Y6eBhAbEiwA_2ZWIYtRk-7EXtACmxTgijhINfyDJ3IA73O4W5sQDwJEIZ-HqWhEawtAPhoChwkQAvD_BwE&etcc_par=google&campaignid=16400105738&gclid=CjwKCAiA5Y6eBhAbEiwA_2ZWIYtRk-7EXtACmxTgijhINfyDJ3IA73O4W5sQDwJEIZHqWhEawtAPhoChwkQAvD_BwE) – Überprüfungsdatum 2022-12-04

## **Anhang**

Folgend werden die verwendeten Anhänge aufgelistet. Diese werden auf der Hochschul-Cloud-Sharing Plattform *sciebo* gehostet. Die entsprechenden Hyperlinks verweisen auf Ordner oder Dateien.

### **Anhang 1: Datengrundlage Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler**

Alle verwendeten Informationsquellen der Datenlage befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%201%3A%20Datengrundlage>

#### **Anhang 1.1: Energiebericht 2018**

Der bereitgestellte Energiebericht der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler befindet sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%201%3A%20Datengrundlage%2FA1.1%20-%20Energiebericht%202018>

#### **Anhang 1.2: Baupläne**

Die verfügbaren Baupläne befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%201%3A%20Datengrundlage%2FA1.2%20-%20Baupl%C3%A4ne>

#### **Anhang 1.3: Fernwärmeausbauplan**

Der Fernwärmeausbauplan der *ahrtaal-werke GmbH* befindet sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%201%3A%20Datengrundlage%2FA1.3%20-%20Fernw%C3%A4rmeausbauplan>

#### **Anhang 1.4: Maßnahmenplan zum Wiederaufbau**

Der Maßnahmenplan zum Wiederaufbau der Stadt befindet sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%201%3A%20Datengrundlage%2FA1.4%20-%20Ma%C3%9Fnahmenplan%20zum%20Wiederaufbau>

#### **Anhang 1.5: Umfrage Liegenschaften**

Die Ergebnisse der gestellten Umfrage befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/apps/onlyoffice/s/kH0xfmoEYErxdLD?fileId=735258920>

#### **Anhang 1.6: Kanalnetz**

Der Kanalnetzplan befindet sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%201%3A%20Datengrundlage%2FA1.6%20-%20Kanalnetz%20-%20Stadt%20Bad%20Neuenahr-Ahrweiler>

## **Anhang 2: Photovoltaik-Auslegung**

Alle Daten zu den ausgelegten PV-Anlagen befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%202%3A%20Photovoltaik-Auslegung>

### **Anhang 2.1: PV-Sol Berichte**

Die PV\*Sol Berichte für alle Anlagen befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%202%3A%20Photovoltaik-Auslegung%2FA2.1%20-%20PV-Sol-Berichte>

### **Anhang 2.2: Angebote Priogo AG**

Die erstellten Angebote für die PV-Anlagen befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%202%3A%20Photovoltaik-Auslegung%2FA2.2%20-%20Kostenangebote%20-%20Priogo%20AG>

### **Anhang 2.3: Datenblätter**

Die Datenblätter für alle eingeplanten Komponenten befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%202%3A%20Photovoltaik-Auslegung%2FA2.3%20-%20Datenbl%C3%A4tter>

### **Anhang 2.4: abc GmbH Präsentation**

Die Präsentation mit Ergebnissen der *abc GmbH* befindet sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%202%3A%20Photovoltaik-Auslegung%2FA2.4%20-%20Ergebnispr%C3%A4sentation%20-%20abc%20GmbH>

## **Anhang 3: Kommunales Energiemanagementsystem**

Eine empfohlene Erweiterung des bestehenden Maßnahmenplanes für kommunales Energiemanagement befindet sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%203%3A%20Kommunales%20Energiemanagementsystem>



## Anhang 4: Energiesystemmodellierung

Die Daten für die erstellte Energiesystems simulation befinden sich unter folgendem Link:  
<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%204%3A%20Energiesystemmodellierung>

### Anhang 4.1: Lastprofilgenerator

Der genutzte Lastprofilgenerator befindet sich unter folgendem Link:  
<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%204%3A%20Energiesystemmodellierung%2FA4.1%20-%20Lastprofilgenerator>

### Anhang 4.2: Programmcode

Der geschriebene PyPSA-Programmcode mit angefügten Annahmen und Lastprofilen befindet sich unter folgendem Link:  
<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%204%3A%20Energiesystemmodellierung%2FA4.2%20-%20Programmcode%20-%20Energiesystemmodellierung>

### Anhang 4.3: Simulationsergebnisse

Eine Zip-Datei mit allen Iterationsergebnissen aller Liegenschaften befindet sich unter folgendem Link:  
<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD/download?path=%2FAnhang%204%3A%20Energiesystemmodellierung&files=A4.3%20-%20Energiesystemmodellierung%20-%20Simulationsergebnisse.zip>

### Anhang 4.4: Energiesystemmodellierung - Gesamtergebnisse

Die zusammengefassten Ergebnisse der Energiesystems simulation befinden sich unter folgendem Link:  
<https://th-koeln.sciebo.de/apps/onlyoffice/s/kH0xfmoEYErxdLD?fileId=735246719>

## **Anhang 5: Projektmanagement**

Angaben zum Projektmanagement befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%205%3A%20Projektmanagement>

### **Anhang 5.1: Projektplan / Gantt-Chart**

Die genutzten Projektplanungstools befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/apps/onlyoffice/s/kH0xfmoEYErxdLD?fileId=735372173>

### **Anhang 5.2: Bericht zum Projektmanagement**

Ein Kurzbericht zum Projektmanagement befindet sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%205%3A%20Projektmanagement>

## **Anhang 6: Quellenverzeichnis**

Alle Quellen des Berichtes befinden sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/s/kH0xfmoEYErxdLD?path=%2FAnhang%206%3A%20Quellenverzeichnis>

## **Anhang 7: Ergebnisdarstellung - Datentool**

Das Datentool befindet sich unter folgendem Link:

<https://th-koeln.sciebo.de/apps/onlyoffice/s/kH0xfmoEYErxdLD?fileId=735372926>

## Anhang 8: Priorisierungsliste der Modernisierungsmaßnahmen

Variante	Autarkie- grad Wärme	Autarkie- grad Strom	Amortisa- tionszeit	Gewinn nach 20 Jahren	Jährliche Kostener- sparnis	Einspa- rung GWP	Ø Rang
12 - Grundschule Ahrweiler-A-WP-saniert	32.6%	66.4%	4.4	662,120 €	40,741 €	128,046	11.2
12 - Grundschule Ahrweiler-A-WP-unsaniert	37.0%	75.2%	4.8	593,176 €	35,643 €	109,164	11.9
14 - Grundschule Heimersheim mit Turnhalle und Mehrzweckhalle-unsaniert	0.0%	73.4%	4.3	799,310 €	40,846 €	161,079	12.0
9 - Erich-Kästner-Realschule plus-L-WP-un- saniert	7.5%	64.8%	6.9	651,262 €	64,233 €	207,072	12.2
10 - Grundschule Bad Neuenahr-A-WP-unsaniert	38.1%	69.9%	5.8	571,586 €	38,450 €	179,306	12.6
9 - Erich-Kästner-Realschule plus-A-WP-sa- niert	25.5%	56.7%	6.9	691,577 €	72,580 €	201,663	12.8
9 - Erich-Kästner-Realschule plus-A-WP-un- saniert	31.3%	54.8%	6.9	682,276 €	73,871 €	198,268	12.8
10 - Grundschule Bad Neuenahr-L-WP-unsaniert	22.9%	84.7%	5.4	547,697 €	34,799 €	175,005	12.9
9 - Erich-Kästner-Realschule plus-L-WP-sa- niert	0.0%	60.8%	5.8	687,040 €	64,153 €	207,072	13.3
10 - Grundschule Bad Neuenahr-A-WP-sa- niert	29.1%	74.8%	8.1	520,397 €	47,439 €	202,534	13.4
12 - Grundschule Ahrweiler-L-WP-saniert	0.0%	64.5%	3.8	667,012 €	39,417 €	126,916	13.8
10 - Grundschule Bad Neuenahr-L-WP-sa- niert	0.0%	78.8%	7.9	524,682 €	44,329 €	202,993	14.4
12 - Grundschule Ahrweiler-L-WP-unsaniert	20.5%	80.6%	5.0	557,237 €	31,113 €	111,178	14.6
11 - Turnhalle Grundschule Bad Neuenahr-A- WP-unsaniert	40.0%	70.5%	6.9	406,902 €	34,194 €	123,003	14.8
11 - Turnhalle Grundschule Bad Neuenahr-L- WP-unsaniert	24.8%	85.0%	7.1	377,256 €	32,036 €	121,514	16.2
36 - Sportplatzgebäude Apollinarisstadion- unsaniert	19.3%	85.4%	6.3	328,285 €	26,527 €	108,017	16.3

Variante	Autarkie- grad Wärme	Autarkie- grad Strom	Amortisa- tionszeit	Gewinn nach 20 Jahren	Jährliche Kostener- sparnis	Einspa- rung GWP	Ø Rang
14 - Grundschule Heimersheim mit Turnhalle und Mehrzweckhalle-saniert	0.0%	73.4%	10.3	526,641 €	51,174 €	174,880	18.0
13 - Turnhalle Grundschule Ahrweiler-A-WP-unsaniert	28.9%	71.7%	6.9	208,431 €	15,244 €	39,628	19.6
2 - Feuerwehrhaus Ahrweiler-unsaniert	0.0%	73.2%	5.5	274,332 €	13,837 €	65,460	20.1
13 - Turnhalle Grundschule Ahrweiler-L-WP-unsaniert	0.0%	63.2%	4.1	248,432 €	12,746 €	38,974	20.4
7 - Freiwillige Feuerwehr Ramersbach und Mehrzweckgebäude Ramersbach-unsaniert	53.4%	49.7%	11.5	86,348 €	15,783 €	38,475	23.5
23 - Alte Schule Bachem-saniert	0.0%	62.7%	4.8	140,808 €	7,964 €	22,848	25.5
16 - Kindertagesstätte Heimersheim - Stern-taler-unsaniert	24.3%	59.0%	9.2	122,511 €	9,672 €	35,802	26.5
24 - Alte Schule Walporzheim-saniert	54.7%	51.2%	9.3	79,269 €	7,147 €	23,964	26.7
17 - Kindertagesstätte Bachem - Rappelkiste-unsaniert	50.5%	45.9%	11.7	89,123 €	10,434 €	39,417	27.2
20 - Bürgerhaus Heppingen-unsaniert	56.7%	53.8%	12.2	45,075 €	7,824 €	32,659	27.4
23 - Alte Schule Bachem-unsaniert	0.0%	62.7%	5.3	113,428 €	5,403 €	19,383	28.2
1 - Rathaus-unsaniert	0.0%	17.1%	5.8	138,304 €	11,531 €	53,863	28.5
18 - Kindertagesstätte Bad Neuenahr und Mehrgenerationenhaus-unsaniert	0.0%	64.0%	11.6	73,027 €	10,243 €	23,273	29.8
24 - Alte Schule Walporzheim-unsaniert	50.4%	47.9%	10.6	66,879 €	6,243 €	20,746	29.8
15 - Kindertagesstätte Ramersbach - Sause-wind-unsaniert	47.8%	44.8%	13.8	50,257 €	7,902 €	30,281	31.7
20 - Bürgerhaus Heppingen-saniert	57.4%	52.1%	32.6	-31,681 €	8,676 €	34,702	32.5
25 - Ehemaliges Haus der Jugend-unsaniert	36.6%	34.4%	7.6	92,962 €	5,227 €	13,614	32.8
35 - Sportplatzgebäude Heimersheim-unsaniert	0.0%	37.5%	4.7	98,178 €	4,057 €	12,463	33.4
25 - Ehemaliges Haus der Jugend-saniert	38.5%	36.1%	12.8	60,563 €	5,507 €	14,733	34.9

Variante	Autarkie- grad Wärme	Autarkie- grad Strom	Amortisa- tionszeit	Gewinn nach 20 Jahren	Jährliche Kostener- sparnis	Einspa- rung GWP	Ø Rang
27 - Dorfgemeinschaftshaus Lohrsdorf-unsaniert	54.2%	56.9%	15.3	12,612 €	2,963 €	10,151	35.3
28 - Bürgerhaus Gimmigen-saniert	47.8%	47.5%	16.7	22,357 €	4,516 €	14,898	35.3
28 - Bürgerhaus Gimmigen-unsaniert	47.1%	46.9%	15.5	25,945 €	4,446 €	14,857	35.7
22 - Bürgerhaus Ehlingen-unsaniert	60.5%	55.7%	21.7	3,275 €	3,359 €	11,650	35.9
22 - Bürgerhaus Ehlingen-saniert	66.9%	56.5%	33.2	-13,949 €	3,894 €	13,280	36.1
4 - Feuerwehrhaus Heimersheim-unsaniert	38.3%	35.7%	7.9	49,374 €	3,047 €	8,557	36.3
33 - Betriebshof-unsaniert	0.0%	0.0%	1.2	239,249 €	6,149 €	6,328	36.8
31 - Weißer Turm-unsaniert	0.0%	0.0%	1.0	157,664 €	3,077 €	10,622	37.2
16 - Kindertagesstätte Heimersheim - Stern- taler-saniert	0.0%	37.4%	15.4	76,677 €	9,723 €	38,076	37.2
31 - Weißer Turm-saniert	0.0%	0.0%	1.0	146,085 €	3,579 €	10,696	37.5
35 - Sportplatzgebäude Heimersheim-saniert	0.0%	37.5%	12.9	57,303 €	5,196 €	13,871	40.2
19 - Helmut-Gies-Bürgerzentrum Ahrweiler- unsaniert	0.0%	0.0%	1.0	35,331 €	731 €	1,569	42.3
30 - Stadtbibliothek-unsaniert	0.0%	0.0%	1.0	31,943 €	1,572 €	1,598	42.4
3 - Feuerwehrhaus Bad Neuenahr-unsaniert	0.0%	27.5%	9.5	22,656 €	2,761 €	5,279	44.0
5 - Feuerwehrhaus Kirchdaun-unsaniert	0.0%	36.7%	32.6	-1,515 €	1,322 €	6,057	47.7
5 - Feuerwehrhaus Kirchdaun-saniert	0.0%	36.7%	44.8	-11,986 €	2,117 €	6,889	48.7
8 - Feuerwehrhaus Heppingen-unsaniert	0.0%	0.0%	10.7	11,737 €	341 €	718	48.8
3 - Feuerwehrhaus Bad Neuenahr-saniert	0.0%	27.6%	100.0	-58,653 €	3,030 €	5,279	50.8
37 - Sportplatzgebäude Ahrstadion-unsaniert	0.0%	0.0%	13.3	31,794 €	1,126 €	2,346	52.0
19 - Helmut-Gies-Bürgerzentrum Ahrweiler- saniert	0.0%	0.0%	21.3	10,966 €	808 €	1,662	52.1
6 - Feuerwehrhaus Gimmigen-unsaniert	0.0%	0.0%	34.2	3,900 €	608 €	1,540	52.7

Variante	Autarkie- grad Wärme	Autarkie- grad Strom	Amortisa- tionszeit	Gewinn nach 20 Jahren	Jährliche Kostener- sparnis	Einspa- rung GWP	Ø Rang
34 - Sportplatzgebäude Walporzheim-unsaniert	0.0%	0.0%	11.1	17,960 €	654 €	1,423	52.8
6 - Feuerwehrhaus Gimmigen-saniert	0.0%	0.0%	48.3	-8,424 €	1,072 €	2,403	52.8
30 - Stadtbibliothek-saniert	0.0%	0.0%	101.0	-93,698 €	3,788 €	5,382	53.5
21 - Dorfgemeinschaftshaus Kirchdaun-unsaniert	0.0%	0.0%	65.4	-9,681 €	190 €	2,879	55.0