

Dekarbonisierung der Wärmeversorgung des Gebäudebestands mit Kalter Nahwärme

Michel GROSS¹, Christine NOWAK², Valentin BERTSCH³

Kurzfassung: Um die Sektorziele zur Reduzierung des Treibhausgas-Ausstoßes im Bereich der Wohn- und Nichtwohngebäude zu erreichen, ist neben Energieeffizienzmaßnahmen und der Verbesserung der Gebäudehülle auch der Austausch konventioneller Heiztechnik ein zentraler Hebel. Auf Grund hoher CO₂-Emissionsfaktoren und steigender Kosten fossiler Energien soll beim Austausch auf lokal vorhandene Energiequellen zurückgegriffen werden. Für eine Gemeinde in Rheinland-Pfalz werden anhand von drei Gebäuden (Schule, Kindergarten und Gemeindehaus) vier regenerative Versorgungsszenarien mit unterschiedlichen Sanierungsmaßnahmen untersucht. Dabei steht die Umsetzbarkeit eines Kalten Nahwärmenetzes im Mittelpunkt, welches mit alternativen Versorgungen verglichen wird. Die Ergebnisse der Kostenbewertung zeigen, dass eine Versorgung der drei Liegenschaften mit Kalter Nahwärme zu höheren Kosten als eine auf Biomasse (Pellets) basierende Versorgung führt. Hierbei variieren die Kapitalwerte von –690 T€ bis –800 T€ für die Varianten mit Kalter Nahwärme (Wärmegestellungskosten: 17 und 23 ct/kWh_{th}). Für das betrachtete Referenzszenario mit Pelletkesseln ergibt sich ein Kapitalwert von –500 T€ (Wärmegestellungskosten: 9 ct/kWh_{th}). Die Wärmegestellungskosten der Referenzvariante beziehen sich auf die Wärmebedarfe der unsanierten Gebäude, die wesentlich höher sind als in den anderen Varianten, sodass das Verhältnis der Wärmegestellungskosten nicht vergleichbar mit dem Verhältnis der Kapitalwerte ist. Die untersuchten Versorgungsvarianten weisen Lebenszyklusemissionen (CO₂-Äquivalente) in Höhe von ca. 565 t_{CO2eq} für das Referenzszenario und für die netzgebundenen Varianten der Kalten Nahwärme mit Geothermie und Wärmepumpe zwischen 516 t_{CO2eq} und 561 t_{CO2eq} auf.

Keywords: Kalte Nahwärme, Bestandsgebäude, Wärmenetz, Wärmepumpe, Pelletkessel, PV

1 Einleitung

Ein Kaltes Wärmenetz hat Temperaturen unterhalb von etwa 40 °C – in der Regel in der Nähe der Umgebungstemperatur. Mit fallender Netztemperatur wird die Nutzung regenerativer Energien zunehmend ermöglicht. Potentielle regenerative Wärmequellen für Kalte Nahwärmenetze sind z. B. Oberflächennahe Geothermie (4 - 20 °C), Umgebungsluft (–15 - 35 °C), Solarthermie (20 - 80 °C), Gewässer (4 - 15 °C) oder Abwärme aus Industrieprozessen (Temp. prozessabhängig). Jede regenerative Wärmequelle hat ihre eigenen Besonderheiten bezogen auf ihre Verfügbarkeit oder ihr Temperaturniveau.

Weichen Temperaturanforderung des Heizsystems und Dargebot der Wärmequelle voneinander ab, werden in Kalten Nahwärmenetzen häufig Wärmepumpen eingesetzt, um das Heizmedium auf das im Gebäude benötigte Temperaturniveau anzuheben. Diese stehen in Kalten

¹ Michel.Gross@ruhr-uni-bochum.de

² Christine.J.Nowak@ruhr-uni-bochum.de

³ Valentin.Bertsch@ruhr-uni-bochum.de

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum, Deutschland, <https://www.ee.rub.de/> (Gilt für alle Autor*innen)

Netzen dezentral beim Wärmeabnehmer und heben dort bedarfsgerecht das Temperaturniveau für Heizung und Brauchwarmwassererwärmung an.

Kalte Nahwärme stellt für die Integration in Bestandsbauten vor allem aufgrund der niedrigeren Vorlauftemperatur der Heizsysteme eine Herausforderung dar. Faktoren, die dennoch zur erfolgreichen Umsetzung beitragen können, sind in Tabelle 1-1 aufgeführt.

Tabelle 1-1: Einflussfaktoren für die Umsetzung von Kalter Nahwärme in Bestandsgebäuden

Gebäude	Heizkörper	Wärmeerzeuger
<ul style="list-style-type: none">• Verbesserung der Gebäudedämmung• Durchführung von Fenster austausch• Einstellung der Raumzieltemperatur	<ul style="list-style-type: none">• Auswahl der Heizkörpertypen• Überdimensionierung von Heizkörpern• Optimierung des Heizbetriebs• Austausch von kritischen Heizkörpern• Einstellung der Heizvorlauftemperatur	<ul style="list-style-type: none">• Auswahl der Wärmequellen• Auswahl der Wärmeerzeugungstechnologien

Kommen bei der Umstellung auf Kalte Nahwärme für niedrigere Wärmequellentemperaturen besonders geeignete Flächenheizungen nicht in Frage, können an den vorhandenen Heizkörperanschlüssen größere konventionelle Heizkörpertypen verbaut, damit situativ als Niedrigtemperaturheizkörper aufgefasst und Heizvorlauftemperatursenkungen realisiert werden. Brand und Svendsen (2013) können bspw. durch den Austausch von Flachheizkörpern des Typs 21 durch die tieferen Modelle des Typs 33 bei ansonsten gleichen Längen- und Breitenabmessungen eine Reduzierung der maximalen Vorlauftemperatur um 10 °C erreichen.

Eine sehr effektive Maßnahme für die Ermöglichung einer merklichen Heizvorlauftemperaturreduzierung kann der Austausch von einzelnen kritischen Heizkörpern sein, worauf u. a. Lämmle et al. (2019), Hess et al. (2018), Østergaard und Svendsen (2016), Østergaard (2018) und Lund et al. (2018) verweisen. Räume mit vergleichsweise hohen thermischen Ansprüchen sind allerdings kritisch und schränken die Machbarkeit einer Vorlauftemperaturreduzierung möglicherweise ein (Østergaard und Svendsen 2016). Lämmle et al. (2019) zeigen für Untersuchungen im deutschsprachigen Raum, dass der Austausch von kritischen Heizkörpern in Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpen zu einer erheblichen Steigerung von Energieeffizienz und CO₂-Einsparungen führen kann. Im konkreten Beispiel werden bei geringem Investitions- und Umsetzungsaufwand die verbrauchsbedingten Betriebskosten des erdreichgekoppelten Wärmepumpensystems um 23 % reduziert und damit die Wirtschaftlichkeit erhöht. Gleichzeitig sinken die CO₂-Emissionen um ebenfalls 23 %.

Hess et al. (2018) weisen darauf hin, dass Wärmepumpenlösungen meist auf Neubauten von Einfamilienhäusern ausgerichtet sind. Eine von Günther et al. (2020) durchgeführte Feldstudie zu Bestandsgebäuden in Deutschland der Baujahre bis 1995 bestätigt allerdings die Eignung von Wärmepumpen ebenso in Bestandsgebäuden, auch ohne Komplettmodernisierung. Zu einem ähnlichen Ergebnis für Mehrfamilienhäuser kommt das Forschungsprojekt LowEx-Bestand (Bernd Ebert 2018). Die Literatur zeigt, dass eine Anpassung von Bestandsgebäuden an Kalte Nahwärmenetze erfolgreich vorgenommen werden kann.

Das Ziel dieser Studie ist daher eine Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit der Umsetzung eines Kalten Nahwärmenetzes in der Gemeinde Gödenroth, Rheinland-Pfalz. In der Studie werden verschiedene Szenarien der Wärmeversorgung untersucht und gegenübergestellt.



Abbildung 2-2: Vorgehen und Teilschritte der Studie

Die Grundlagen der zu untersuchenden Liegenschaften werden mittels einer Vor-Ort-Begehung ermittelt. Dabei werden der bauphysikalische Zustand, die Bestandsanlagentechnik und die verbauten Heizkörper aufgenommen. Zusätzlich können die Energieabrechnungen (Wärme und Strom) der letzten Jahre zur Validierung der Modelle verwendet werden.

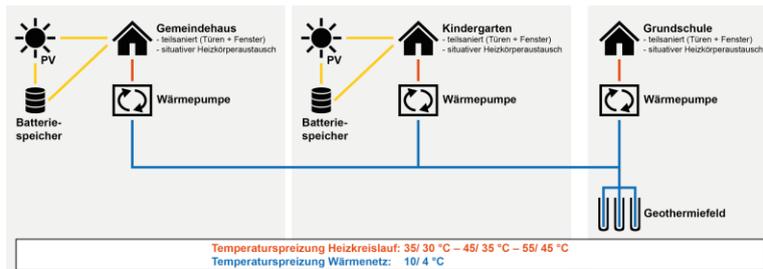
Die Informationen werden in ein digitales Gebäudemodell überführt und eine raumweise Heizlast nach der DIN EN 12831 berechnet. (DIN Norm Nationaler Anhang DIN/TS 12831-1:2020-04). Anschließend werden Gebäudesimulationen zur Berechnung der Wärmebedarfe durchgeführt. Um die raumweisen Heizlasten mit der zur Verfügung stehenden Heizleistung der Heizkörper vergleichen zu können, müssen für die verbauten Heizkörpertypen Heizleistungen für verschiedene Temperaturspreizungen berechnet werden. Dadurch lassen sich Räume mit möglichen Engpässen bestimmen. Aus der Gebäudegeometrie abgeleitete Dachflächen werden zur Auslegung der PV-Anlage und der Batteriespeicher verwendet. Anschließend können mit Hilfe einer Simulation die solaren Erträge ermittelt werden. Basierend auf den Wärmebedarfen und der maximalen Heizlasten kann die notwendige Erdwärmesondenanzahl einer geothermischen Anlage bestimmt werden. Dazu wird ein Auslegungstool von Altieri (2021) verwendet, welches auf der kommerziellen Berechnungssoftware EWS aufbaut. (Huber 2005; Kozak 2017).

Aufbauend auf die technischen Rahmenbedingungen werden zusammen mit dem Auftraggeber Szenarien entwickelt, siehe Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Definition der Szenarien Referenz, Orange, Schwarz und Grün

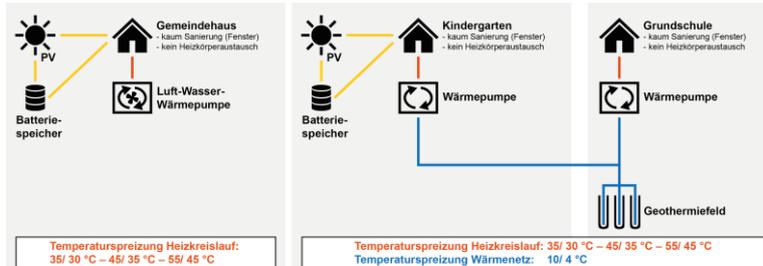
San	Status Quo bleibt erhalten	Referenzszenario (keinNetz-3Pellet-unsaniert)		
WN	nein			
WE	Biomassekessel (Pellet)	Holzpelletkessel		
ΔT_{HK}	70/ 55 °C	Temperaturspreizung Heizkreislauf: 70/ 55 °C		
ΔT_{WN}	–			
San	Teilsanierung (Fenster), situativer Heizkörperaustausch	Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)		
WN	ja			

WE Geothermie, WP sowie PV mit Stromspeicher (Kita und Gemeindehaus)
 ΔT_{HK} 35/ 30, 45/ 35 und 55/ 45 °C
 ΔT_{WN} 10/ 4 °C



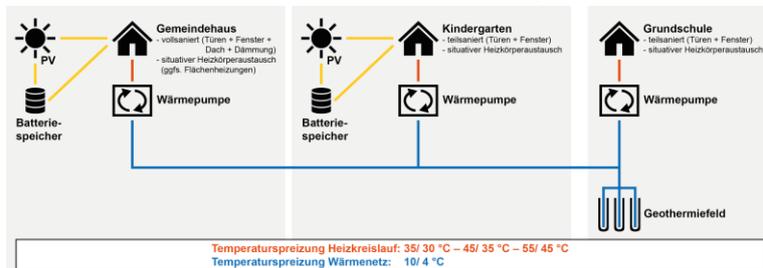
San kaum Sanierung (Fenster)
WN teilweise (Schule und Kita)
WE Geothermie, WP (Schule und Kita), LWP (Gemeindehaus), PV mit Stromspeicher (Kita und Gemeindehaus)
 ΔT_{HK} 35/ 30, 45/ 35 und 55/ 45 °C
 ΔT_{WN} 10/ 4 °C

Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.)



San Sanierung der Gebäudehüllen, Heizkörperaustausch (Gemeindehaus), Teilsanierung (Kita und Schule)
WN ja
WE Geothermie, WP, PV mit Stromspeicher (Kita und Gemeindehaus)
 ΔT_{HK} 35/ 30, 45/ 35 und 55/ 45 °C
 ΔT_{WN} 10/ 4 °C

Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)



Abkürzungen: Sanierung (San), Wärmenetz (WN), Wärmeerzeuger bzw. -quelle (WE), Temperaturspreizung im Heizkreislauf (ΔT_{HK}) bzw. im Wärmenetz (ΔT_{WN}), Wärmepumpe (WP), Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWP), Photovoltaikanlage (PV)

2.1 Wärmebedarfe und thermische Lasten der Liegenschaften

Die thermischen Lasten werden nach der DIN EN 12831-1 bei einer Auslegungstemperatur von $\theta_e = -10,1$ °C berechnet. Das Gebiet liegt in der Testreferenzjahrszone 6. Es werden nur Heizwärmebedarfe betrachtet, da es in Absprache mit dem Auftraggeber keine nennenswerten Brauchwarmwasserbedarfe zu betrachten gibt. Dies ermöglicht eine geringere Vorlauftemperatur des Gesamtsystems, was sich positiv auf den Einsatz von Wärmepumpen auswirkt. In Tabelle 2-2 sind die maximalen Heizlasten und Wärmebedarfe der Szenarien dargestellt.

Tabelle 2-2: Maximale Heizlasten und Wärmebedarfe der Szenarien

Szenario		Gemeindehaus	Kindergarten	Grundschule	Gesamt
Referenz	max. Heizlast	29,5 kW _{th}	48 kW _{th}	65,4 kW _{th}	143 kW _{th}
	Wärmebedarf	32.000 kWh _{th}	68.000 kWh _{th}	70.200 kWh _{th}	170.200 kWh _{th}
Orange	max. Heizlast	27,3 kW _{th}	40 kW _{th}	60,5 kW _{th}	127,8 kW _{th}
	Wärmebedarf	27.600 kWh _{th}	54.400 kWh _{th}	60.400 kWh _{th}	142.400 kWh _{th}
Schwarz	max. Heizlast	27,5 kW _{th}	40,5 kW _{th}	60,8 kW _{th}	128,8 kW _{th}
	Wärmebedarf	28.100 kWh _{th}	54.900 kWh _{th}	60.600 kWh _{th}	143.600 kWh _{th}
Grün	max. Heizlast	20 kW _{th}	40 kW _{th}	60,5 kW _{th}	120,5 kW _{th}
	Wärmebedarf	20.700 kWh _{th}	54.400 kWh _{th}	60.400 kWh _{th}	135.500 kWh _{th}

3 Ergebnisse der Untersuchung

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten technischen, ökonomischen und ökologischen Ergebnisse aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse ist in Bertsch et al. (2021) zu finden.

3.1 Raumweise Heizlast im Vergleich zur Heizkörperleistung

Der durchgeführte Vergleich von raumweiser Heizlast und Heizkörperleistung bei verschiedenen Temperaturspreizungen orientiert sich an einer Studie von Lämmle et al. (2019) aus dem Forschungsprojekt Low-Ex Bestand. Um Aussagen nach dieser Methodik treffen zu können, werden zunächst die in den Gebäuden Gemeindehaus, Kindergarten und Grundschule verbauten Heizkörper identifiziert und die jeweiligen Heizkörpereigenschaften recherchiert. Anschließend werden die raumweisen Normheizleistungen pro Heizkörperart berechnet. Diese werden in die raumweisen Heizleistungen bei Betriebsbedingungen überführt. Die Betriebsbedingungen werden dabei analog zu den festgelegten Szenarien bei Vor- und Rücklauftemperaturen von 35/ 30 °C, 45/ 35 °C und 55/ 45 °C (definierte Bedingungen für die hier betrachtete Kalte Nahwärme) sowie 70/ 55 °C (Biomasseheizwerk und aktueller Bestand) festgelegt. Eine beispielhafte Auswertung der Gegenüberstellung von raumweiser Heizlast und Nennheizleistung ist in Abbildung 3-1 aufgeführt.

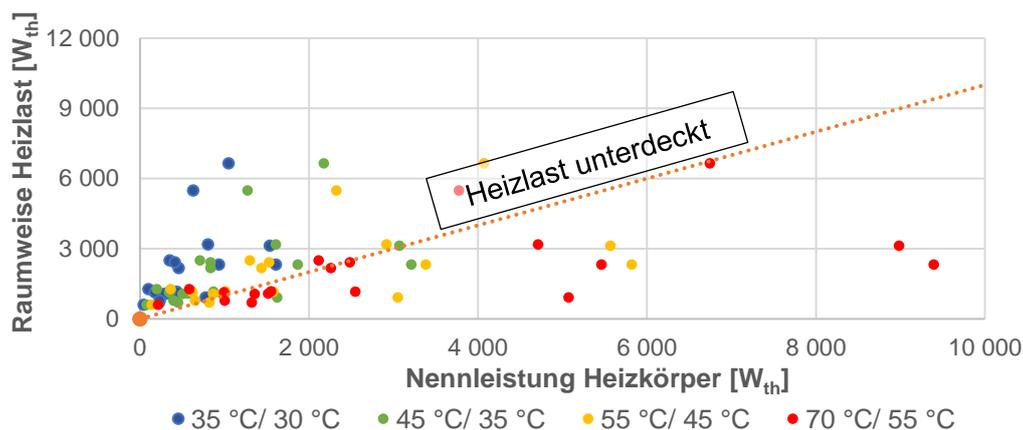


Abbildung 3-1: Raumweiser Vergleich von simulierten Heizlasten und Heizkörpernennleistungen bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen am Beispiel des Kindergartens

Durch diesen Vergleich können Mindesttemperaturanforderungen der jeweiligen Räume bestimmt und kritische Räume der Bestandsgebäude mit Bedarf zusätzlicher Heizflächen identifiziert werden.

3.2 Technische Ergebnisse der Geothermie

Die Wärmenetze der Szenarien Orange, Schwarz und Grün sollen geothermisch gespeist und die Netztemperatur soll bei den Abnehmern durch Wärmepumpen auf die notwendigen Heizvorlauftemperaturen gehoben werden. Dafür sind eine Geothermieauslegung und eine Überprüfung der energetischen Machbarkeit notwendig.

Für die Geothermieauslegung werden die Erdwärmesondenanzahl und die Fluidtemperaturen im Ein- und Austritt der Erdwärmesonden iterativ bestimmt, welche sich im Laufe der betrachteten Zeit bei einer vorgegebenen Wärmeabnahme einstellen. Des Weiteren wird die maximal

mögliche Entzugsenergie bei maximaler Flächenausnutzung bei sowohl 10 m als auch 6 m ermittelt, um zu quantifizieren, wie viel Potential das Erdwärmesondenfeld bei maximaler Ausnutzung hinsichtlich einer möglichen nachträglichen Wärmenetzerweiterung hat. Die Ergebnisse der simulativen Erdwärmesondenfeldauslegung sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Erdwärmesondenfeldauslegung

	Heizvorlauf- temperatur	Sonden- abstand	jährl. Entzugsenergie	Gesamt- sonden- anzahl	Anzahl Sonden- reihen	Anzahl Sonden pro Reihe	max. Temperatur- spreizung	Sonden- eintritts- temperatur nach 50 Jahren
Szenario Orange	35/30 °C	10 m	121,27 MWh _{th} /a	16	2	8	1,90 °C	-0,33 °C
	45/35 °C	10 m	115,28 MWh _{th} /a	16	2	8	1,81 °C	0,27 °C
	55/45 °C	10 m	106,06 MWh _{th} /a	14	2	7	1,90 °C	-0,17 °C
Szenario Schwarz	35/30 °C	10 m	98,66 MWh _{th} /a	14	2	7	1,80 °C	0,60 °C
	45/35 °C	10 m	93,86 MWh _{th} /a	12	2	6	2,00 °C	-0,44 °C
	55/45 °C	10 m	86,47 MWh _{th} /a	12	2	6	1,83 °C	0,54 °C
Szenario Grün	35/30 °C	10 m	115,45 MWh _{th} /a	16	2	8	1,83 °C	0,20 °C
	45/35 °C	10 m	109,77 MWh _{th} /a	16	2	8	1,74 °C	0,78 °C
	55/45 °C	10 m	101,01 MWh _{th} /a	14	2	7	1,83 °C	0,35 °C
max. Wärmeentzug		10 m	190,00 MWh_{th}/a	30	3	10	1,59 °C	0,06 °C
		6 m	300,00 MWh_{th}/a	85	5	17	0,89 °C	0,17 °C

Die Ergebnisse zeigen, dass für alle Szenarien 12 bis 16 Erdwärmesonden pro Sondenfeld bei 10 m Sondenabstand für die Deckung der jährlichen Entzugsenergien ausreichend sind.

3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Im Laufe der Studie werden verschiedene Temperaturniveaus betrachtet und bewertet. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird ein Temperaturniveau der Heizkreisläufe mit einem Vor-/ Rücklaufverhältnis von 55/ 45 °C festgelegt, um ein vergleichbares Ergebnis erzielen zu können. Dies ist das Temperaturniveau, welches mit den wenigsten Anpassungen der Gebäudephysik auskommt und auf welchem Standardwärmepumpen noch in der Lage sind, zu arbeiten. Hierbei ist anzumerken, dass die Temperatur des Heizungssystems einen großen Einfluss auf die verbrauchsgebundenen Kosten eines Heizsystems hat und gerade bei Wärmepumpen zu geringeren, also schlechteren COPs führt, je höher die Vorlauftemperatur des Heizsystems gewählt wird. Das Temperaturniveau des Heizsystems hat zusätzlich einen Einfluss auf die Anzahl der Erdwärmesonden, die eingesetzt werden müssen. Bei höherer Vorlauftemperatur des Heizsystems kann weniger Wärme dem Erdboden entzogen werden, der verbleibende Wärmebedarf wird über eine erhöhte Wärmebereitstellung durch die Umwandlung von elektrischem Strom in Wärme gedeckt und es werden folglich weniger Erdwärmesonden benötigt. Bei einer Heizvorlauftemperatur von 55 °C kommen im Vergleich zu 35 und 45 °C zwei Erdwärmesonden weniger zum Einsatz, siehe Kapitel 3.2.

Die Eingangsparameter der Untersuchung sind ausführlich in Bertsch et al. (2021) beschrieben. In Abbildung 3-2 sind die Kapitalwerte der Szenarien aufgetragen, welche die abgezinsten Gesamtkosten über 20 Jahre kumuliert darstellen.

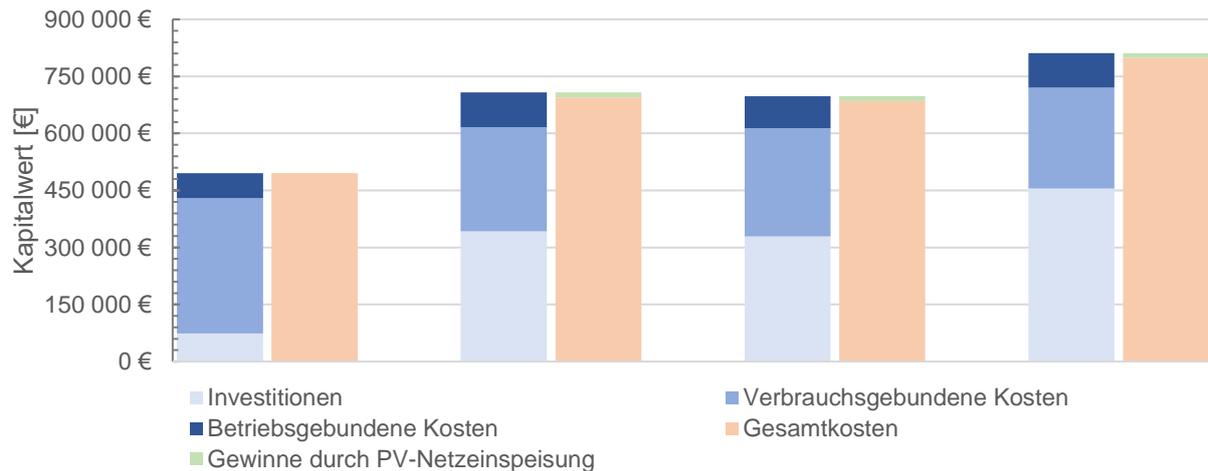


Abbildung 3-2: Absolute Kapitalwerte der Varianten und Erlöse durch PV-Erträge

In Tabelle 3-2 sind die Ergebnisse der wirtschaftlichen Auswertung dargestellt.

Tabelle 3-2: Notwendige Investitionen und Kosten für den Betrieb der Szenarien über einen Zeitraum von 20 Jahren

Szenario	Investitionen	Verbrauchsgebundene Kosten	Betriebsgebundene Kosten	Vergütung durch PV-Einspeisung	Gesamtkosten	Annuität	Wärmegebundene Kosten
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€/a]	[ct/kWh _{th}]
Referenzszenario (keinNetz-3Pellet-unsaniert)	73.500	356.065	66.101	-	495.665	30.313	9,08
Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)	342.713	273.600	91.216	12.758	694.771	42.490	17,91
Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.)	329.239	284.290	84.500	12.453	685.575	41.928	17,42
Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)	455.113	265.090	91.216	12.987	798.431	48.829	22,65

3.4 CO_{2eq}-Emissionen der Szenarien

Der Fokus der ökobilanziellen Untersuchung der Szenarien liegt auf der Wärmebereitstellung sowie der Stromnutzung. Analog zu Scharte et al. (2016) werden bei der Bewertung der verschiedenen Wärmebereitstellungstechnologien die Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase unterschieden, die vor- und nachgelagerten Prozesse betrachtet und Treibhausgasemissionen in Form von CO₂-Äquivalenten (CO_{2eq}) berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung der Eingangsparameter der Untersuchung ist in Bertsch et al. (2021) dargelegt.

Im Falle der Wärmepumpen fallen CO_{2eq}-Emissionen während der Nutzungsphase, abgesehen von Kältemittel-Leckagen, ausschließlich durch den Strombezug an. Aus diesem Grund variieren die Emissionen stark je nach Herkunft und Zeitbezug des Stroms. Holzpelletkessel setzen bei der Verbrennung der Holzpellets etwa die gleiche Menge CO_{2eq} frei wie bei einer gleichermaßen nachwachsenden Menge an Biomasse wieder gebunden würde und haben daher bilanziell gesehen eine CO_{2eq}-arme Nutzungsphase. Voraussetzung ist allerdings, dass die Holzpellets aus einer nachhaltigen Forstwirtschaft bezogen werden. Dennoch entstehen

Emissionen, beispielsweise durch den Transport der Pellets, die jedoch standortabhängig erheblich variieren (Umweltbundesamt 2020).

Die ökobilanzielle Untersuchung ergibt die Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen in Abbildung 3-3. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

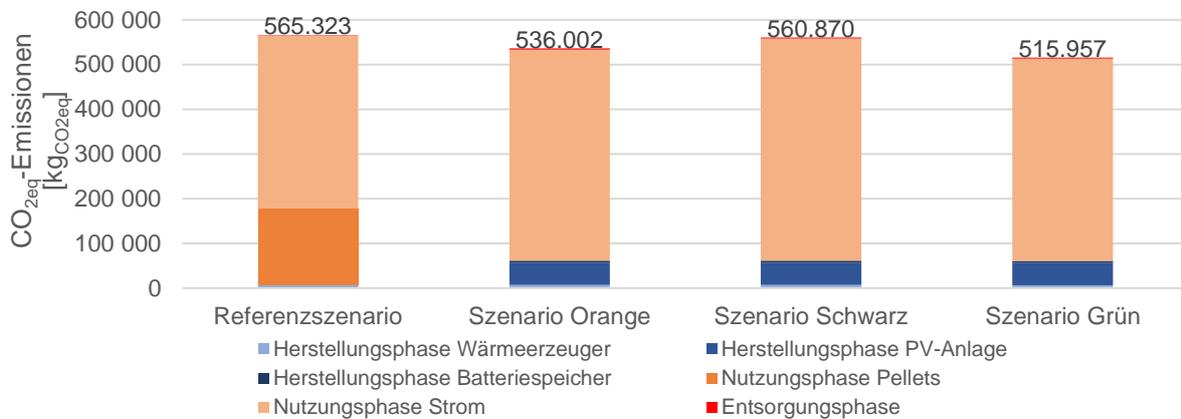


Abbildung 3-3: Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen der Szenarien aufgeteilt nach den Ökobilanzierungsphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren

Das Referenzszenario weist mit knapp 565 tCO_{2eq} die höchsten Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen auf. Szenario Orange verfügt über 536 tCO_{2eq}, also ca. 29 tCO_{2eq} weniger Emissionen. Die Szenarien Orange und Grün unterscheiden sich um 20 tCO_{2eq}. Die CO_{2eq}-Emissionen von Szenario Schwarz sind aufgrund der Verwendung der Luft-Wasser-Wärmepumpe und dem geringeren COP um knapp 25 tCO_{2eq}, also um 5 %, höher verglichen mit Szenario Orange.

Es wird deutlich, dass die Nutzungsphase den größten Einfluss auf die Ökobilanz der Wärmeversorgungsvarianten hat. In den wärmenetzgebundenen Szenarien werden etwa 88 % der Emissionen während der Nutzung verursacht, Gutschriften und Einsparungen durch die PV-Anlagen und Stromspeicher sind dabei mitberücksichtigt. Im Referenzszenario steigt dieser Anteil auf etwa 99 %, da die Emissionen der Herstellung von PV-Modulen entfallen. In den Szenarien mit PV-Anlagen beträgt der Anteil der CO_{2eq}-Emissionen der Herstellungsphase an den gesamten CO_{2eq}-Emissionen jeweils etwa 11 %, wovon ca. 80 % aus der Produktion der PV-Anlagen stammen. Den geringsten Anteil an den Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen hat die Entsorgungsphase mit lediglich bis zu 0,5 %.

4 Schlussfolgerungen und Limitationen

Nachfolgend sind die zentralen Erkenntnisse, unterteilt in technische, ökonomische und ökologische Ergebnisse, dargestellt.

4.1 Ergebnisse der technischen Untersuchung

Aus der Untersuchung lassen sich verschiedene Ergebnisse ableiten. Die Vorlauftemperatur des Heizsystems kann reduziert werden. Diese Reduzierung führt zu der Möglichkeit, Wärmepumpen in Verbindung mit Erdwärmesonden einzusetzen. Die Fläche hinter der Grundschule ist für eine geothermische Nutzung geeignet und bietet Platz für 14 bis 69 weitere Bohrungen (je nach Abstand der Sonden zueinander von 10 oder 6 m). Ergänzende Verbesserungen der Gebäudephysik (Dämmung, Fenstertausch) senken die Heizlast und daraus resultierend den

Wärmebedarf weiter, was zu Einsparungen im Betrieb des Heizsystems zu Lasten der kapitalgebundenen Kosten führt. Zusätzlich zum Heizsystem ist es sinnvoll, PV-Anlagen zu installieren und den selbsterzeugten Strom in den Wärmepumpen zu verbrauchen.

Die Ergebnisse deuten auf eine technische Machbarkeit eines kalten Nahwärmenetzes mit geothermischer Wärmequelle und Wärmepumpen hin.

4.2 Ergebnisse der ökonomischen Untersuchung

Wärmenetzbasierte Versorgungsvarianten haben bei geringer Wärmeabnahme in der Regel höhere spezifische Investitionen zur Folge als dezentrale Einzelversorgungslösungen. Geringere Kosten im Betrieb eines Wärmenetzes verglichen mit Einzellösungen zahlen sich erst nach sehr langen Zeiträumen aus. Im untersuchten Fall ergibt sich innerhalb von 20 Jahren kein Kostenvorteil der Versorgung durch Kalte Nahwärme gegenüber einer Versorgung mit Pelletkesseln. Die Annuitäten der Varianten mit kalter Nahwärme reichen von 42 T€/a bis 49 T€/a. Das Referenzszenario mit Pelletkesseln hat eine Annuität von 30 T€/a.

Die Gesamtkosten der Varianten mit kalter Nahwärme bewegen sich zwischen 685 T€ und 800 T€ und das Referenzszenario liegt bei 500 T€. Daraus ergeben sich Wärmegestehungskosten für die betrachteten regenerativen Wärmeversorgungsvarianten zwischen 9 und 22,5 ct/kWh_{th}. Zu Bedenken ist hier allerdings, dass die zugrundeliegenden Wärmebedarfe aufgrund der Sanierungen deutlich voneinander abweichen. Zum Vergleich: 1 L Heizöl liegt aktuell bei ca. 82 €/L (Stand Dezember 2021 (Statista 2022)), dies entspricht ungefähr 9 ct/kWh_{th} (bei einem Wirkungsgrad des Kessels von 90 %) für den laufenden Betrieb. Mit steigendem CO₂-Preis steigen auch die Kosten für den Betrieb.

Durch die PV-Anlagen können Einspeisevergütungen von bis zu 13 T€ über den Betrachtungszeitraum eingenommen werden. Hinzu kommen ökonomische Erleichterungen aufgrund des eigenverbrauchten Stroms, der nicht eingekauft werden muss.

4.3 Ergebnisse der ökologischen Untersuchung

Zur korrekten Bewertung des ökologischen Einflusses von Wärme- und Stromversorgungen sollte eine ganzheitliche Betrachtung der eingesetzten Technologien in Form einer Lebenszyklusanalyse durchgeführt werden. Die in der Nutzungsphase emittierten Emissionen dominieren den kumulierten Ausstoß von CO₂-Äquivalenten, lediglich die Erzeugungsphase hat noch einen erkennbaren Einfluss auf die Gesamtemissionen. Strombasierte Wärmeversorgungsvarianten werden langfristig zunehmend klimafreundlicher aufgrund eines steigenden Anteils an Erneuerbaren Energien in der Netzstromerzeugung.

Das Szenario mit den geringsten CO_{2eq}-Emissionen ist das wärmenetzbasierte Szenario mit der aufwendigsten Sanierung mit 516 t_{CO2eq}. Das Referenzszenario weist mit 565 t_{CO2eq} die höchsten Emissionen an CO_{2eq} aus.

Der Einsatz von PV ist auch unabhängig der Batteriespeichergröße ökologisch vorteilhaft, kann aber mit steigender Speichergröße eine zusätzliche Steigerung der Eigenverbrauchsdeckung bewirken. Dabei wiegt auch bei langen Betrachtungsperioden die sehr energieintensive Produktion (3.500 bis 7.500 kWh/kW_p) von PV-Modulen nicht mehr so schwer.

Die leistungsbezogene spezifische Flächennutzung von Windkraft (2,5 W/m²) oder PV (5-20 W/m²) ist im Vergleich zur Verwendung von Biomasse (0,5 W/m²) höher. Ebenfalls ist der Transport von elektrischem Strom über bestehende Netze wesentlich einfacher als der LKW-

basierte Transport von Biomasse. Je nach Herkunft ist es schwierig, die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen von Biomasse zu bewerten. Für diese Studie ist eine Bewertung von $50 \text{ g}_{\text{CO}_{2\text{eq}}}/\text{kWh}_{\text{th}}$ für Biomasse gewählt worden.

Die Gegenüberstellung der Gesamt- $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen und der Annuitäten je Szenario in Abbildung 4-1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** vereint ökologische und ökonomische Aspekte und verdeutlicht, wie viele $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen mit welchen jährlichen Zahlungen vermieden werden können.

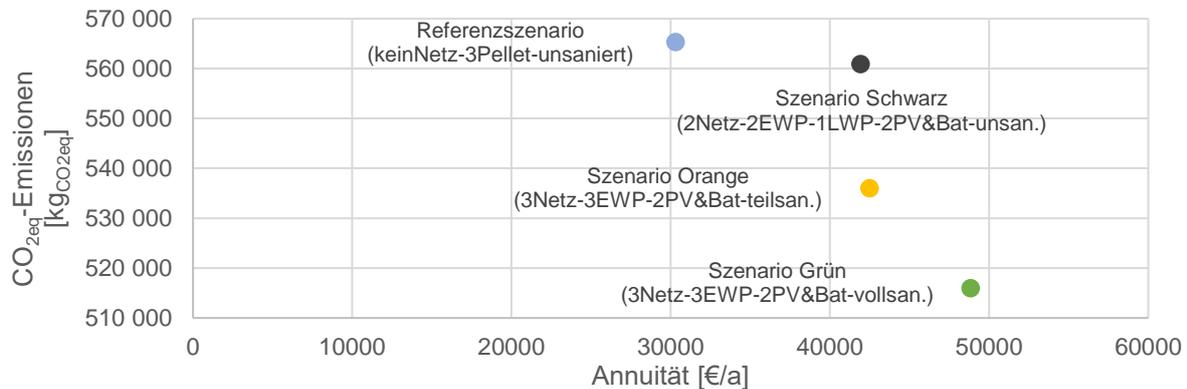


Abbildung 4-1: Gegenüberstellung der Gesamt- $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen und der Annuitäten der Szenarien

4.4 Limitationen

Die Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen interpretiert werden. Hierbei können insbesondere bei Bestandsgebäuden, deren Erbauung in ferner Vergangenheit liegt und schlecht dokumentiert ist, Ungenauigkeiten bei der Festlegung der Wärmedurchgangskoeffizienten auftreten. Bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden keine Planungskosten und Kosten für Versicherungen berücksichtigt. Kleinbauteile werden in den Kosten ebenfalls nicht berücksichtigt, werden aber durch eine konservative Annahme der weiteren Kosten sehr wahrscheinlich aufgefangen. Es werden keine Förderungen mitbetrachtet, was die Wirtschaftlichkeit aller betrachteten Varianten maßgeblich beeinflussen würde. In der ökologischen Bewertung werden nur $\text{CO}_{2\text{eq}}$ betrachtet. Andere Wirkungsindikatoren finden keine Berücksichtigung. Zur Bewertung der Emissionen von Biomasse und Strom werden durchschnittliche Emissionsfaktoren angesetzt und keine stündlich schwankenden Emissionsfaktoren.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie erarbeitet, welche von der Verbandsgemeinde Kastellaun und der Ortsgemeinde Gödenroth sowie durch Fördermittel des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten (MUEEF) des Landes Rheinland-Pfalz finanziert wurde.

Literaturverzeichnis

Altieri, Lisa (2021): Auslegung und Bewertung von Systemen zur Einbindung regenerativer Wärmequellen in kalten Nahwärmenetzen.

- Bernd Ebert (2018): LowEx-Bestand Abschlussbericht zu AP 1.1 Systematische Analyse von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden.
- Bertsch, Valentin; Gross, Michel; Nowak, Christine; Stolte, Marcel (2021): Schlussbericht Machbarkeitsstudie Gödenroth. Wärmeversorgung mehrerer Bestandsliegenschaften in der Gemeinde Gödenroth mit Kalter Nahwärme. Bochum. Online verfügbar unter https://www.ee.rub.de/webseiteics5/Aktuelles_Veranstaltungen/210922_EMU_Mach.Studie%20G%C3%B6denroth_Abschlussbericht_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 12.01.2022.
- Brand, Marek; Svendsen, Svend (2013): Renewable-based low-temperature district heating for existing buildings in various stages of refurbishment. In: *Energy* 62, S. 311–319. DOI: 10.1016/j.energy.2013.09.027.
- DIN Norm Nationaler Anhang DIN/TS 12831-1:2020-04, April 2020: DIN/TS 12831-1:2020-04, zuletzt geprüft am 29.06.2021.
- Günther, Danny; Wapler, Jeannette; Langner, Robert; Helmling, Sebastian; Miara, Marek; Fischer, David et al. (2020): Wärmepumpen in Bestandsgebäuden: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPsmart im Bestand" (Abschlussbericht). Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg, Germany, zuletzt geprüft am 25.03.2021.
- Hess, Stefan; Kleinstück, Martin; Ohr, Felix; Bongs, Constanze (Hg.) (2018): Wärmepumpen-Systeme im MFH-Bestand. DKV-Tagung.
- Huber, Arthur (2005): Erdwärmesonden für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation. Schlussbericht. Hg. v. Bundesamtes für Energie BFE. Zürich, zuletzt geprüft am 22.08.2021.
- Kozak, Wojciech (2017): Ein Beitrag zur Modellierung von Erdreichsonden. Dissertation. Fakultät Maschinenwesen, Dresden. Technische Universität Dresden, zuletzt geprüft am 22.08.2021.
- Lämmle, Manuel; Wapler, Jeanette; Kropp, Michael; Hess, Stefan; Hahn, Dennis; David, Gerhard; Herkel, Sebastian (Hg.) (2019): Gezielter Heizkörperaustausch in Wärmepumpen-Heizungsanlagen. DKV-Tagung, 2019.
- Lund, Henrik; Østergaard, Poul Alberg; Chang, Miguel; Werner, Sven; Svendsen, Svend; Sorknæs, Peter et al. (2018): The status of 4th generation district heating: Research and results. In: *Energy* 164, S. 147–159. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.206.
- OpenStreetMap (2021): Kartenausschnitt Gödenroth. Online verfügbar unter <https://www.openstreetmap.de/>, zuletzt geprüft am 16.08.2021.
- Østergaard, Dorte Skaarup (2018): Heating of existing buildings by low-temperature district heating. Dissertation, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Østergaard, Dorte Skaarup; Svendsen, Svend (2016): Replacing critical radiators to increase the potential to use low-temperature district heating – A case study of 4 Danish single-family houses from the 1930s. In: *Energy* 110, S. 75–84. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.140.
- Scharte, Katrin; Seefeldt, Hanna; Koch, Marco (2016): Ökobilanzierung von Wärmeerzeugern mit Leistung von 50kW bis 500kW. Online verfügbar unter

<https://omp.ub.rub.de/index.php/RUB/catalog/download/72/78/530-1?inline=1>, zuletzt geprüft am 09.04.2021.

Statista (2022): Monatlicher Heizölpreis bis Dezember 2021 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1692/umfrage/preis-fuer-einen-liter-leichtes-heizoel-monatsdurchschnittswerte/>, zuletzt aktualisiert am 31.01.2022, zuletzt geprüft am 31.01.2022.

Umweltbundesamt (2020): Pelletkessel. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/pelletkessel#gewusst-wie>, zuletzt aktualisiert am 06.08.2021, zuletzt geprüft am 06.08.2021.