

Schlussbericht

**Machbarkeitsstudie:
Wärmeversorgung mehrerer Bestandsliegenschaften in der Gemeinde
Gödenroth mit „Kalter Nahwärme“**



Autoren

Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft

Laufzeit

März 2021 – August 2021

Veröffentlichung

September 2021

Impressum

Projektmitarbeiter und Autoren:



Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft

Prof. Dr. Valentin Bertsch

M. Sc. Michel Gross

M. Sc. Christine Nowak

B. Sc. Marcel Stolte

Haftungsausschluss (Disclaimer)

Der Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft hat hier alle dargestellten Informationen nach bestem Wissen und Gewissen erarbeitet und geprüft. Es wird über den heutigen Tag hinaus jedoch keinerlei Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder Qualität und jederzeitige Verfügbarkeit der bereitgestellten Informationen übernommen.

Soweit Gesetze, Normen, Verordnungen o. ä. zitiert werden, übernimmt der Herausgeber keine Gewähr für die Richtigkeit bzw. Aktualität der Angaben. In Zweifelsfällen sind die Originalquellen heranzuziehen.

Der Herausgeber übernimmt keine Haftung, die auf irgendeine Art aus der Benutzung in dieser Machbarkeitsstudie enthaltener Informationen oder Teilen davon entsteht. Die Machbarkeitsstudie ersetzt keine individuelle Fachplanung nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI).

EMU e.V. – Institut für Energiesysteme, Material- und Umwelttechnik e.V.

Das Institut hat als gemeinnütziges Satzungsziel, die Forschung an der Ruhr-Universität Bochum zu unterstützen. Das Institut ist mit der Ruhr-Universität durch einen Kooperationsvertrag verbunden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Kurzfassung	1
1. Einleitung	3
1.2 Motivation	3
1.3 Ziele und Zeitplan des Vorhabens	4
2. Rahmenbedingungen und Stand der Technik	5
2.2 "Kalte Nahwärme" – Was ist das?.....	6
2.3 Umsetzung von Kalter Nahwärme in Bestandsgebäuden	7
3. Vorgehen und Methodik	17
3.2 Vorgehen zur Bewertung der Machbarkeit.....	17
3.3 Definition der untersuchten Szenarien	18
4. Projektergebnisse.....	23
4.2 Technische Bewertung	23
4.2.1 Wärmebedarfe und thermische Lasten der Liegenschaften	23
4.2.2 Untersuchung der raumweisen Heizlasten und Heizkörperheizleistungen ..	26
4.2.3 Steigerung der Wärmeleistung von Heizkörpern im Bestand	34
4.2.4 Entwicklung des Wärmenetzes	35
4.2.5 Auslegung der Geothermie	37
4.2.6 Auslegung der Luft-Wasser-Wärmepumpe	43
4.2.7 Auslegung der Photovoltaikanlagen	44
4.3 Ökonomische Bewertung.....	47
4.3.1 Tools und Daten	48
4.3.2 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	48
4.4 Ökologische Bewertung.....	52
4.4.1 Herstellungsphase	53
4.4.2 Nutzungsphase.....	54
4.4.3 Entsorgungsphase.....	56
4.4.4 Gesamt-CO _{2eq} -Emissionen der Szenarien	57
5. Schlussfolgerungen, Limitationen und Handlungsempfehlungen.....	59
5.2 Limitationen und Interpretationshilfe.....	61
5.3 Empfehlungen	61
Literaturverzeichnis	63
Anhang.....	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Intensität der Treibhausgasemissionen des Energieverbrauchs für Deutschland nach Sektoren bis 2020	3
Abbildung 1-2: Arbeits- und Zeitplanung Ruhr-Universität Bochum (RUB)	4
Abbildung 2-1: Kartenausschnitt Gemeinde Gödenroth und zu untersuchende Liegenschaften.....	5
Abbildung 2-2: Zentrale Elemente eines Energieversorgungssystems (im untersuchten Fall einer Wärmeversorgung)	5
Abbildung 2-3: Einfluss von Modernisierungsmaßen und Raumzieltemperaturen auf mögliche Heizvorlauftemperaturen.....	10
Abbildung 2-4: Maßnahmen zur Ermöglichung von reduzierten Wärmenetz- bzw. Heizvorlauftemperaturen.....	13
Abbildung 2-5: Wärmenetzvorlauftemperaturen und damit Heizvorlauftemperaturen für unterschiedliche Wärmenetzarten und dazugehörige Limitationen sowie Anforderungen	13
Abbildung 3-1: Vorgehen der Machbarkeitsstudie.....	17
Abbildung 3-2: Im Workshop (30.03.2021) entwickelte Szenarien	18
Abbildung 4-1: 3D-Ansicht des Gebäudemodells der Kita.....	24
Abbildung 4-2: 3D-Ansicht des Gebäudemodells der Grundschule	24
Abbildung 4-3: 3D-Ansicht des Gebäudemodells des Gemeindehauses.....	25
Abbildung 4-4: Raumweiser Vergleich von berechneter Heizlast und Leistung der Heizkörpernennleistung bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen eines Gebäudes	26
Abbildung 4-5: Raumweiser Vergleich von simulierten Heizlasten und Heizkörpernennleistungen bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen für das Gemeindehaus	28
Abbildung 4-6: Raumweiser Vergleich von simulierten Heizlasten und Heizkörpernennleistungen bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen für den Kindergarten	29
Abbildung 4-7: Raumweiser Vergleich von simulierten Heizlasten und Heizkörpernennleistungen bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen für die Grundschule	30
Abbildung 4-8: Raumplan des EG Grundschule mit Markierung Klassenraum 1	31
Abbildung 4-9: Vergleich von Nennleistung der Heizkörper zur raumweisen Heizlast bei verschiedenen Vor-/ Rücklauftemperaturen im Referenzszenario Blau für die Grundschule (ohne Flur).....	32
Abbildung 4-10: Vergleich von Nennleistung der Heizkörper zur raumweisen Heizlast bei verschiedenen Vor-/ Rücklauftemperaturen für Szenario Schwarz (Fenstertausch + keine Dämmung) für die Grundschule (ohne Flur)	33
Abbildung 4-11: Vergleich von Nennleistung der Heizkörper zur raumweisen Heizlast bei verschiedenen Vor-/ Rücklauftemperaturen für Szenario Schwarz (Fenstertausch + keine Dämmung) und verbesserte Heizkörper (19 – 23 % bessere Heizleistung) für die Grundschule (ohne Flur).....	34
Abbildung 4-12: Ausführungsbeispiel eines Heizungsventilators.....	35

Abbildung 4-13: Effekt eines Ventilators auf ein Heizsystem mit niedriger Vorlauf- temperatur	35
Abbildung 4-14: Rohrleitungsführung des Nahwärmenetzes.....	36
Abbildung 4-15: Verfügbare Fläche und Abmessungen für ein Erdwärmesondenfeld auf dem Grundschulgelände in Gödenroth.....	39
Abbildung 4-16: Monatliche Verteilung der Entzugsenergie für Szenario Orange und eine Heizvorlauftemperatur von 35 °C	41
Abbildung 4-17: Sondenfluideintritts- und -austrittstemperaturen für Szenario Orange bei einer Heizvorlauftemperatur von 35 °C.....	41
Abbildung 4-18: Variabler COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe in Abhängigkeit der Außentemperatur im Februar des Testreferenzjahres für das Gemeindehaus des Szenarios Schwarz.....	44
Abbildung 4-19: Eigenstromverbrauch in Abhängigkeit von verschiedenen Batteriespeicherkapazitäten im Gemeindehaus für ein Testreferenzjahr für Szenario Orange.....	46
Abbildung 4-20: Eigenstromverbrauch in Abhängigkeit von verschiedenen Batteriespeicherkapazitäten im Kindergarten für ein Referenzjahr für Szenario Orange.....	46
Abbildung 4-21: Kurzübersicht über die Szenarien der Machbarkeitsstudie.....	49
Abbildung 4-22: Absolute Kapitalwerte der Varianten und Erlöse durch PV-Erträge	49
Abbildung 4-23: Kumulierte Barwerte der Gesamtkosten über 20 Jahre	50
Abbildung 4-24: Vergleich der verbrauchsgebundenen Kosten bei verschiedenen Vorlauftemperaturen (ohne PV) für das erste Betrachtungsjahr	51
Abbildung 4-25: Gesamt-CO _{2eq} -Emissionen der Szenarien aufgeteilt nach den Ökobilanzierungsphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung über den Gesamtlebenszyklus bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren	57
Abbildung 5-1: Gegenüberstellung der Gesamt-CO _{2eq} -Emissionen und der Annuitäten für die betrachteten Szenarien	60
Abbildung A-1: Gebäudemodelle Kita (erstellt mit mh-Software)	69
Abbildung A-2: Kita Erdgeschoss (erstellt mit mh-Software).....	70
Abbildung A-3: Kita Obergeschoss (erstellt mit mh-Software)	70
Abbildung A-4: Gebäudemodelle Grundschule (erstellt mit mh-Software)	71
Abbildung A-5: Plan Hauptgebäude Schule (erstellt mit mh-Software)	72
Abbildung A-6: Plan Obergeschoss Anbau Schule (erstellt mit mh-Software)	72
Abbildung A-7: Gebäudemodell Gemeindehaus (erstellt mit mh-Software)	74
Abbildung A-8: Plan Erdgeschoss Gemeindehaus	74
Abbildung A-9: Plan Obergeschoss Gemeindehaus (erstellt mit mh-Software)	75
Abbildung A-10: Plan Dachgeschoss Gemeindehaus (erstellt mit mh-Software)	75
Abbildung B-11: Gebäudeweise Heizlastprofile der Szenarien	77
Abbildung C-12: In den Gebäuden Gemeindehaus, Kindergarten und Grundschule identifizierte Heizkörpertypen. Typenbezeichnung für Flachheizkörper (links oben), Konvektoren (rechts oben), Stahlradiator (links unten), Stahlrohr radiator (rechts unten).....	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Entwicklung der Wärmenetzgenerationen nach	6
Tabelle 2-2:	Thematische Einteilung der Recherche für die Umsetzung Kalter Nahwärme in Bestandsgebäuden	7
Tabelle 3-1:	Definition von Szenario Blau	18
Tabelle 3-2:	Definition von Szenario Orange.....	19
Tabelle 3-3:	Definition von Szenario Schwarz.....	20
Tabelle 3-4:	Definition von Szenario Grün	20
Tabelle 4-1:	Ergebnisse der Gebäudesimulation der Kita	24
Tabelle 4-2:	Ergebnisse der Gebäudesimulation der Grundschule	25
Tabelle 4-3:	Ergebnisse der Gebäudesimulation des Gemeindehauses	25
Tabelle 4-4:	Maximale Heizlasten und Wärmebedarfe der Szenarien	26
Tabelle 4-5:	Anzahl an Stunden im Jahr, in denen eine Abweichung von der benötigten Heizleistung bei unterschiedlichen Vor-/ Rücklauftemperaturen auftritt. Heizlast Klassenraum 1 Referenzszenario Blau: $5.818 W_{th}$	32
Tabelle 4-6:	Anzahl an Stunden im Jahr, in denen eine Abweichung von der benötigten Heizleistung bei unterschiedlichen Vor-/ Rücklauftemperaturen auftritt. Heizlast Klassenraum 1 Szenario Schwarz: $4.939 W_{th}$	33
Tabelle 4-7:	Anzahl an Stunden im Jahr, in denen eine Abweichung von der benötigten Heizleistung bei unterschiedlichen Vor-/ Rücklauftemperaturen auftritt. Heizlast Klassenraum 1 Szenario Schwarz: $4.939 W_{th}$	34
Tabelle 4-8:	Eigenschaften der Abschnitte des Wärmenetzes	36
Tabelle 4-9:	Eingangsdaten der simulativen Auslegung des Erdwärmesondenfeldes ...	37
Tabelle 4-10:	Berechnete maximale Gesamtanzahlen an Erdwärmesonden bei 10 m bzw. 6 m Sondenabstand.....	40
Tabelle 4-11:	Berechnete jährl. Entzugsenergien je Szenario und Heizvorlauf-temperatur	40
Tabelle 4-12:	Ergebnisse der Erdwärmesondenfeldauslegung	42
Tabelle 4-13:	Kennwerte der Luft-Wasser-Wärmepumpenauslegung für das Gemeindehaus des Szenarios Schwarz bei einer jährl. bereitgestellten thermischen Energie von $28.100 kWh_{th}$	43
Tabelle 4-14:	Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	47
Tabelle 4-15:	Notwendige Investitionen und Kosten für den Betrieb der Szenarien	51
Tabelle 4-16:	CO_{2eq} -Emissionen und Primärenergieverbrauch von Wärmeerzeugern während der Herstellungsphase.....	53
Tabelle 4-17:	CO_{2eq} -Emissionen der Szenarien während der Herstellungsphase	53
Tabelle 4-18:	Spezifische CO_{2eq} -Emissionen und Primärenergieverbrauch während der Nutzungsphase	54
Tabelle 4-19:	CO_{2eq} -Emissionsfaktoren von elektrischem Strom.....	55
Tabelle 4-20:	CO_{2eq} -Emissionen der Szenarien während der Nutzungsphase	55
Tabelle 4-21:	CO_{2eq} -Emissionen während der Entsorgungsphase	56
Tabelle 4-22:	CO_{2eq} -Emissionen der Wärmeerzeuger der Szenarien der Entsorgungsphase	56

Tabelle A-1:	Raumliste und Raumsolltemperaturen Kita	71
Tabelle A-2:	Raumliste und Raumsolltemperaturen Schule.....	72
Tabelle A-3:	Raumliste und Raumsolltemperaturen Gemeindehaus	75
Tabelle D-4:	Übersicht über kritische Heizkörper der Szenarien für das Gemeindehaus.....	80
Tabelle D-5:	Übersicht über kritische Heizkörper der Szenarien für den Kindergarten...81	
Tabelle D-6:	Übersicht über kritische Heizkörper der Szenarien für die Grundschule82	
Tabelle E-7:	Kunststoffmediumrohr PMR: Abmessungen und spezifischer Wärmever- lust für die Nennweiten von DN20- DN150. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von folgenden Herstellern berücksichtigt: Brugg Pipesystems und Isoplus.....	85
Tabelle E-8:	Kunststoffmediumrohr PMR-Duo: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20-DN50. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von folgenden Herstellern berücksichtigt: Brugg Pipesystems und Isoplus	85
Tabelle F-9:	Bodenbeschaffenheit einer Erdbohrung in Gödenroth.....	86
Tabelle G-10:	Eingangsparameter zur Auslegung der PV-Anlagen Gemeindehaus	87
Tabelle G-11:	Eingangsparameter zur Auslegung der PV-Anlagen Kindergarten	87
Tabelle H-12:	Mengen und Kosten für das Szenario Orange.....	88
Tabelle H-13:	Mengen und Kosten für das Szenario Schwarz.....	88
Tabelle H-14:	Mengen und Kosten für das Szenario Grün	89
Tabelle H-15:	Mengen und Kosten für das Referenzszenario Blau.....	89

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AGFW	Effizienzverband für Wärme, Kälte und KWK
AG	Auftraggeber
BAFA	Bundesamt für Einfuhrkontrolle
BDEW	Bundesverband Energie- und Wasserwirtschaft
BEG	Bundesförderung effiziente Gebäude
BEW	Bundesförderung effiziente Wärmenetze
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2e}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
COP	Leistungszahl (Coefficient of Performance)
DN	Nenndurchmesser
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EE	Erneuerbare Energien
HL	Heizlast
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
LGB-RLP	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
LWP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
üNN	Meter über Normalnull
PERT	Energetisch und stofflich verwendete erneuerbare Primärenergie
PENRT	Energetisch und stofflich verwendete nicht erneuerbare Primärenergie
PV	Photovoltaik
RL	Rücklauf
RLP	Rheinland-Pfalz
RUB	Ruhr-Universität Bochum
VL	Vorlauf
ZEIS	Zukunftsfähige Energieinfrastrukturen

Kurzfassung

In dieser Machbarkeitsstudie wird die Fragestellung nach einer Versorgung von drei Liegenschaften der Gemeinde Gödenroth mit Kalter Nahwärme durch Geothermie unter technischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten untersucht und ausgewertet. Dabei ist festzuhalten, dass das Ergebnis nur so gut sein kann, wie die getroffenen Annahmen und dass dieses deshalb nur unter Beachtung dieser zu interpretieren ist.

Da bestehende Gebäude hohe Wärmeverluste über die Gebäudehülle aufweisen, werden in solchen Gebäuden hohe Heizvorlauftemperaturen benötigt, um Räume ausreichend beheizen zu können. Durch eine umfangreiche Recherche kann gezeigt werden, dass bestehende Heizsysteme auch für Bestandsgebäude zumeist überdimensioniert sind und sich daraus Vorlauftemperatursenkungen in vielen Bestandsgebäuden ohne große Anpassungen realisieren lassen. Um dies qualifiziert bewerten zu können, werden für die Gebäude digitale Gebäudemodelle erstellt, die auf Annahmen der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Gebäude bestehen und so einen Realzustand simulieren. Sind die raumweisen Heizlasten bekannt, kann ein dazugehöriges Wärmequell- und Heizungssystem analysiert werden.

Regenerative Wärmequellen allein bieten i. d. R. nicht direkt das erforderliche Temperaturniveau oder die Verfügbarkeit, um den auftretenden Wärmebedarf in den Gebäuden zum Zeitpunkt der Wärmeabfrage zu decken. Das heißt, es müssen weitere Technologien zur Anhebung der Temperatur (z. B. Wärmepumpe) oder zur Speicherung von Wärme (z. B. (saisonal) Wärmespeicher) in das Wärmesystem integriert werden. Befindet sich die Wärmequelle nicht direkt beim Abnehmer, muss die gewonnene Wärme zusätzlich über ein Wärmenetz zu diesem transportiert werden.

Untersucht werden vier Energieversorgungsvarianten. Ein Referenzszenario mit Pelletkesseln in den drei untersuchten Gebäuden, ein Szenario mit Wärmenetz + Geothermie + dezentralen Wärmepumpen in den Gebäuden + PV + Batteriespeicher, ein Szenario mit Teilwärmenetz + Geothermie + dezentrale Wärmepumpen + Luft-Wasser-Wärmepumpe im nicht angeschlossenen Gemeindehaus + PV + Batteriespeicher und ein letztes Szenario in dem ebenfalls ein Wärmenetz + Geothermie + dezentrale Wärmepumpen in den Gebäuden + PV + Batteriespeicher + Sanierung des Gemeindehauses betrachtet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass es technisch realisierbar ist, auch Bestandsgebäude mit regenerativen Wärmequellen in Verbindung mit Standardwärmepumpen zu beheizen. Die Wärme des geothermischen Erdwärmesondenfeldes steht mit kleinen Schwankungen ganzjährig stabil zur Verfügung. Nach 50 Jahren ist die Quelle im Mittel voraussichtlich um ca. 5 °C (7 °C (Winter im 0. Betriebsjahr) → 1,8 °C (Winter im 50. Betriebsjahr)) kälter als zu Beginn des Wärmeentzugs. Dies ließe sich über eine Regeneration im Sommer zusätzlich abfangen. Auf Grund der hohen Temperaturspreizung von Quelltemperatur zur Heizungstemperatur, geht dies zu Lasten einer guten Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe, da diese hohe Temperaturen für den Heizungsvorlauf (je nach Energieversorgungsvariante bis zu 55 °C) bereitstellen muss.

Die Ergebnisse der Kostenbewertung zeigen wie zu erwarten, 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 (Wärmegestehungskosten: 17 und 23 ct/kWh_{th}). Für das betrachtete Referenzszenario mit Pelletkesseln ergibt sich ein Kapitalwert von –500 T€ (Wärmegestehungskosten: 9 ct/kWh_{th}). Die untersuchten Versorgungsvarianten weisen Emissionen (CO₂-Äquivalente) in Höhe von ca. 565 t_{CO2eq} für das Referenzszenario und für die netzgebundenen Varianten zwischen 516 t_{CO2eq} und 561 t_{CO2eq} auf.

1. Einleitung

Neue Energieversorgungskonzepte für bestehende Gebäude bergen besondere Herausforderungen. Die Energieversorgung mithilfe von regenerativen Energiequellen und neuen Technologien passt nicht immer ohne Anpassungen zum Gebäudebestand. Die von der Europäischen Kommission ausgerufene Renovierungswelle (Europäische Kommission 2021) im Kontext des Europäischen Green Deals (Europäische Kommission 2019) ist ein bedeutendes Indiz für die Relevanz des Gebäudesektors. Energieeffizienzsteigerungen und der Einsatz regenerativer Wärmequellen in einem Sektor, in dem die Haushaltswärme zu fast 80 % aus der Verbrennung nicht regenerativer Rohstoffe gedeckt wird, sind zur Umsetzung der Wärmewende von besonderer Bedeutung. Abbildung 1-1 stellt die aus dem Energieverbrauch resultierenden Emissionen in CO₂-Äquivalenten für Deutschland dar.

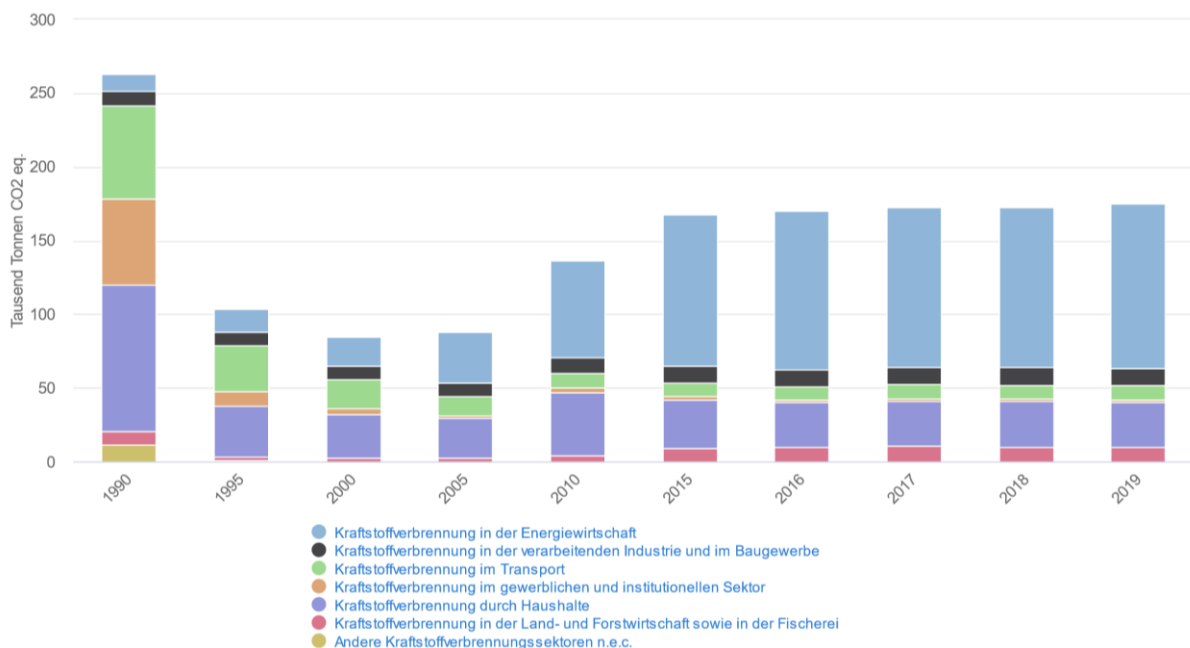


Abbildung 1-1: Intensität der Treibhausgasemissionen des Energieverbrauchs für Deutschland nach Sektoren bis 2020 (Eurostat 2021)

In den folgenden Kapiteln werden neben der Motivation und den Zielen der Untersuchung auch der Stand der Literatur diskutiert und die Grundlagen zu Kalten Nahwärmenetzen und der regenerativen Wärmeversorgung in Bestandsgebäuden dargelegt.

1.2 Motivation

Steigende Anforderungen an die Energieversorgung von Bestandsgebäuden erfordern die Umsetzung innovativer und regenerativ versorgter Konzepte. Immer anspruchsvollere Klimaziele der Europäischen Union und der Bundesregierung machen es notwendig, schnell und effektiv das Emittieren von Treibhausgasen zu reduzieren. Das bedeutet, dass keine fossilen Energieträger mehr verbrannt werden sollten. Eine besondere Herausforderung ist dies im Gebäudebereich, da die Bereitstellung von Raumwärme zu ca. 75 % (Stand 2019) mit fossilen Energieträgern durchgeführt wird. Für die Bereitstellung von Raumheizwärme und Brauchwarmwasser sind dies überwiegend Erdgas (48 %) und Heizöl (26 %). (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW e.V. 2019)

1.3 Ziele und Zeitplan des Vorhabens

Das Ziel der Studie ist eine Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit der Umsetzung eines Kalten Nahwärmenetzes in der Gemeinde Gödenroth, Rheinland-Pfalz. Konkret handelt es sich dabei um drei öffentliche Liegenschaften der Gemeinde, die mit einem, nach Möglichkeit regenerativen, Wärmesystem ausgestattet werden sollen. Dazu zählen ein Kindergarten (auch Kita genannt), eine Grundschule und ein Gemeindehaus mit angrenzendem Dorfladen. In dieser Studie werden dazu verschiedene Szenarien der Wärmeversorgung untersucht und gegenübergestellt. Es soll eine Aussage dazu getroffen werden, ob es technisch möglich und wirtschaftlich realisierbar ist, für diese drei Gebäude ein sogenanntes „Kaltes Nahwärmenetz“ zu installieren. Das genaue Vorgehen und der dazugehörige Arbeitsplan entsprechend dem Angebot der RUB vom 12.02.2021 sind in Abbildung 1-2 zu sehen.

Arbeitsplan		März 21				Apr 21				Mai 21				Jun 21				Jul 21			
Nr.	Arbeitspaket	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	Woche																				
1	Grundlagenermittlung																				
a	Auftragsworkshop																				
b	Klärung der Randbedingungen																				
c	Übergabe des Grundlagenberichts und Bestätigung durch Auftraggeber																				
2	Recherche (und Studienvergleich)																				
a	Kalte Nahwärme																				
b	Senkung der Heizungstemperaturen im Bestand																				
c	Kostenrecherche der Systemkomponenten																				
3	Datenbeschaffung																				
a	Bewertung der Energiebedarfe der Liegenschaften																				
b	Abschätzung verfügb. Energiequellen																				
4	Untersuchung verschiedener Energieversorgungsvarianten																				
a	Definition alternativer Szenarien																				
b	Bewertung der energetischen Effizienz																				
c	Bewertung der ökonomischen Effizienz																				
5	Übergabe des Schlussberichts an Auftraggeber																				
a	Abschlussworkshop (Präsentation)																				

Abbildung 1-2: Arbeits- und Zeitplanung Ruhr-Universität Bochum (RUB)

Folgende Kernfrage soll mit Hilfe der Machbarkeitsstudie beantwortet werden:

Ist es technisch machbar und ökonomisch darstellbar, die Heizwärmebedarfe der drei Liegenschaften durch Kalte Nahwärme in Verbindung mit Geothermie zu decken?

2. Rahmenbedingungen und Stand der Technik

Das untersuchte Gebiet liegt im Bundesland Rheinland-Pfalz in der Gemeinde Gödenroth und befindet sich etwa 45 km südlich von Koblenz. Untersucht werden drei Bestandsgebäude (Grundschule, Kindergarten und Gemeindehaus + Dorfladen). Die Verortung der jeweiligen Liegenschaften ist in Abbildung 2-1 zu sehen.

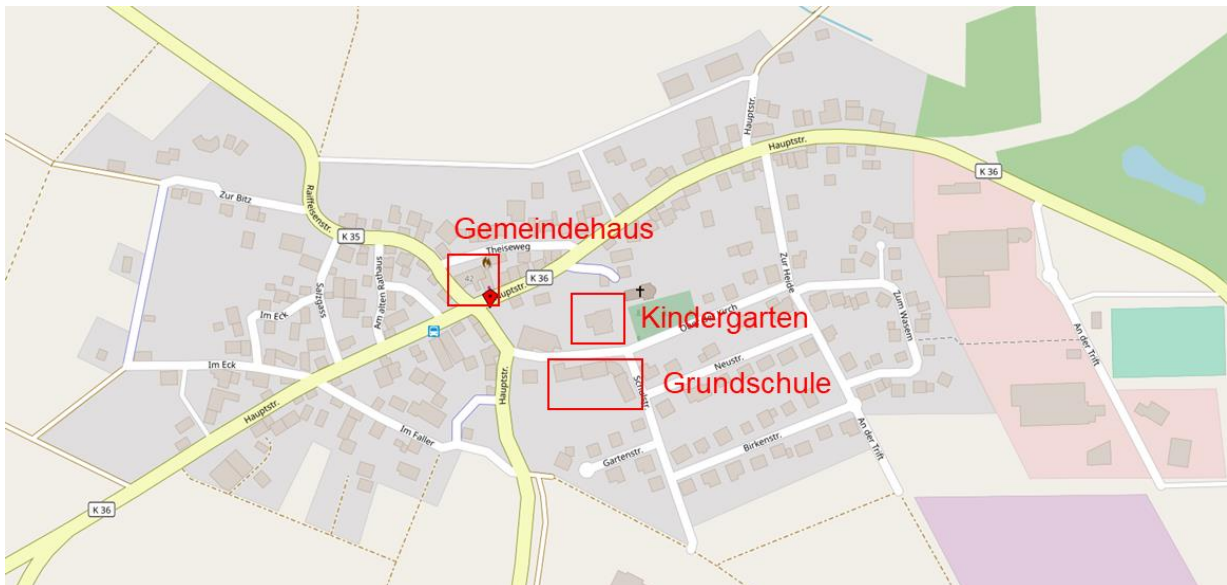


Abbildung 2-1: Kartenausschnitt Gemeinde Gödenroth und zu untersuchende Liegenschaften (hinterlegtes Kartenmaterial aus OpenStreetMap (2021))

Grundlagen der Wärmeversorgung

Jedes Wärmeversorgungssystem lässt sich in die drei folgenden großen Bilanzräume unterteilen:

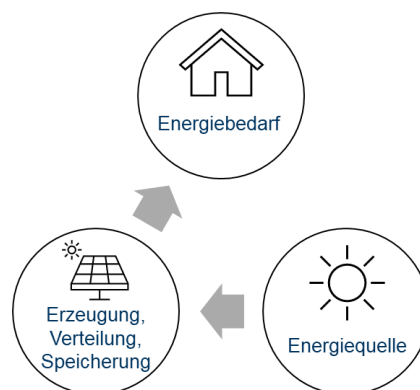


Abbildung 2-2: Zentrale Elemente eines Energieversorgungssystems (im untersuchten Fall einer Wärmeversorgung)

Ausgehend von dem Energiebedarf, wird das restliche System zur Versorgung mit Wärme und elektrischem Strom ausgelegt und bewertet. Es muss eine zum Energiebedarf passende Wärmequelle gefunden werden. Aktuell werden dabei noch überwiegend fossile Energieträger wie z.B. Öl und Gas eingesetzt. Aber auch regenerative Wärmequellen wie z.B. die Nutzung von Umgebungswärme mit Hilfe von Wärmepumpen wird sowohl technisch, als auch wirtschaftlich immer attraktiver im Vergleich zu konventionellen Energieträgern. Um Energiebedarf und Energieangebot der Quelle in Einklang zu bringen, bedarf es meistens einer Netzstruktur, wenn die Quelle/ Erzeugung örtlich vom Bedarf abweicht. Ebenfalls notwendig werden kann

eine Speicherung von Wärmeenergie, da Angebot und Nachfrage zeitlich voneinander abweichen können.

2.2 “Kalte Nahwärme” – Was ist das?

Wärmenetze zur Versorgung von Kunden mit Wärme werden typischerweise als Fernwärmenetze bezeichnet. Als Wärmeträgermedium wird zumeist Dampf oder Heißwasser eingesetzt. Der Effizienzverband für Wärme, Kälte und KWK (AGFW) definiert allgemeingültig, dass Fernwärme Wärme beliebiger Herkunft ist, die mit Hilfe eines Trägermediums gewerblich aufgrund eines Vertrages gegen Entgelt geliefert wird und mit deren Lieferungen keine eigenen mietrechtlichen Nebenverpflichtungen erfüllt werden. (AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. 2021)

Je nach Ausmaß und Anschlussleistung werden Wärmenetze in Nah- und Fernwärmenetze unterteilt, wobei die Definition an dieser Stelle nicht ganz trennscharf ist. Fernwärmenetze umfassen in der Regel ein mehrere Kilometer langes Rohrleitungssystem und es werden Heizwerke mit mehreren Megawatt (MW_{th}) Wärmeleistung angeschlossen. Nahwärmenetze hingegen verbinden häufig einzelne Abnehmer in unmittelbarer Nachbarschaft oder Umgebung. Das Verteilprinzip der Wärme bleibt allerdings das Gleiche: Mit Hilfe eines Trägermediums (meistens Wasser) wird Wärme von einer Quelle durch Rohrleitungen hin zu einem Abnehmer transportiert. Der Begriff der Fernwärme ist historisch gewachsen, wohingegen der Begriff der Nahwärme erst in jüngerer Zeit Einzug in den Sprachgebrauch erhalten hat. In Tabelle 2-1 sind die verschiedenen Netzgenerationen von Wärmenetzen mit den dazugehörigen Temperaturniveaus des Wärmeträgermediums dargestellt. Heutzutage werden überwiegend nur noch Wärmenetze der 3. und 4. Generation betrieben. Vereinzelt entstehen aber bereits Wärmenetze der 5. Generation, sogenannte „Kalte Wärmenetze“. Dieser Begriff scheint sich durchzusetzen, auch wenn er physikalisch nicht ganz korrekt ist. Weitere Bezeichnungen für Wärmenetze der 5. Generation sind „Niedertemperaturwärmenetze“ oder „Low-Ex Netze“ (engl. für Niederexergie). Im Weiteren werden Netze der 5. Generation mit „Kalter Nahwärme“ bezeichnet.

Tabelle 2-1: Entwicklung der Wärmenetzgenerationen nach (Pehnt 2017)

Generation	Charakteristik	Netztemperatur	Zeitraum
1.	Hochtemperatur-Dampfnetze	>200 °C	Bis 1930
2.	Kraft-Wärme-Kopplung	>100 °C	1930 - 1980
3.	Vielzahl an Wärmequellen	>100 °C	1980 - 2020
4.	Niedertemperaturwärmenetze	<95 °C	Ab 2020
5.	Kalte Wärmenetze	<30 °C	Ab 2020

Mit fallender Netztemperatur wird die Nutzung regenerativer Energien zunehmend ermöglicht. Potentielle regenerative Wärmequellen für Kalte Nahwärmenetze sind:

- Oberflächennahe Geothermie (4 – 20 °C)
- Tiefe Geothermie (30 – 300 °C)
- Solarthermie (20 – 80 °C)
- Umgebungsluft (-15 – 35 °C)
- Gewässer (4 – 15 °C)
- Abwasser (8 – 20 °C)
- Abwärme (z.B. aus der Industrie) (Temperaturen prozessabhängig >100 °C)

Jede regenerative Wärmequelle hat ihre eigene Besonderheit, sei es die, über das Jahr betrachtet, fluktuierende Verfügbarkeit von solarer Wärme durch eine Solarthermieanlage oder

die relativ stark schwankenden Temperaturen der Außenluft. Da das Dargebot der regenerativen Wärmequelle meistens nicht die ganzjährigen Anforderungen des Heizverhaltens eines Abnehmers trifft, muss der Wärmequelle nachgeschaltet noch eine Aufwertung geschehen, wie die Speicherung oder das Anheben des Temperaturniveaus für die Beheizung von Gebäuden oder für die Bereitstellung von Brauchwarmwasser ($>60\text{ °C}$). Bei der Temperaturanforderung des Heizsystems kommt es im Vergleich zur Brauchwarmwasserbereitstellung zudem noch darauf an, was für eine Art Gebäude beheizt werden soll. Ist die Bereitstellung von Brauchwarmwasser vom Gebäude weitestgehend unabhängig, wird der Wärmebedarf des Heizsystems sehr stark von der Gebäudehülle beeinflusst. Die Höhe der über die Gebäudehülle verlorenen Wärme bestimmt, wie viel Wärme über eine Erzeugungseinheit in das Gebäude eingebracht werden muss. Die Verluste über die Gebäudehülle variieren je nach Wärmedurchgangskoeffizient der verbauten Bauteile. Vereinfachend lässt sich sagen, dass ein altes Gebäude, auf Grund steigender Dämmstandards, mehr Wärme über seine Hülle verliert als neuere Gebäude.

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

2.3 Umsetzung von Kalter Nahwärme in Bestandsgebäuden

Kalte Nahwärme, bereits in Neubauten erfolgreich umgesetzt, stellt für die Integration in Bestandsbauten vor allem aufgrund der niedrigeren Vorlauftemperatur der Heizsysteme eine Herausforderung dar. Eine technisch, ökonomisch und ökologisch sinnvolle Umsetzung in Bestandsgebäuden kann dennoch möglich sein, wie die nachfolgenden Ergebnisse einer Literaturrecherche zeigen.

Die Integration von regenerativen Wärmequellen in Bestandsgebäude ist abhängig von mehreren Faktoren, wie der Gebäudephysik, der Heizkörper und der Wärmeerzeuger. Eine Übersicht der Faktoren, die zusammenspielen müssen, ist in Tabelle 2-2 aufgeführt und werden im Folgenden weiter erläutert. Die Tabelle stellt dabei keine Zusammenstellung trennscharfer Gruppen dar und ist mehr als Übersicht für die Recherche zu verstehen. Jeder betrachtete Fall bleibt ein sehr individueller und sollte dementsprechend als solcher behandelt werden. Die folgenden Ergebnisse der Literatur sind vor diesem Hintergrund zu verstehen.

Tabelle 2-2: Thematische Einteilung der Recherche für die Umsetzung Kalter Nahwärme in Bestandsgebäuden

Gebäude	Heizkörper	Wärmeerzeuger
Gebäudedämmung	Heizkörpertypen	Wärmequellen
Fensteraustausch	Überdimensionierung von Heizkörpern	Wärmeerzeugungstechnologien
Raumzieltemperatur	Heizbetrieb	
	Austausch von kritischen Heizkörpern	
	Heizvorlauftemperatur	

Gebäude

Auf der Seite des Gebäudes hat die Gebäudedämmung, die Eigenschaften der Fenster und die eingestellte Raumzieltemperatur einen großen Einfluss auf den Wärmebedarf. Diese Parameter beeinflussen ebenfalls die Realisierbarkeit Kalter Nahwärme. Was dies genau bedeutet, wird im Folgenden erläutert.

Gebäudedämmung

Eine Wärmedämmung des Gebäudes ist über die Realisierung einer Fassadenisolierung, einer Dachisolierung sowie einer Bodenisolierung denkbar. Die Fassadenisolierung kann als innenliegende oder außenliegende Isolierung der Außenwände durchgeführt werden, aber auch als Zwischenwanddämmung mithilfe des Auffüllens von Zwischenräumen der Außenwände. Die Auswahl zwischen den Dämmvarianten der Fassade hängt auch davon ab, ob bei der Außendämmung die optische Veränderung der Fassade oder bei der Innendämmung eine Verkleinerung des Wohnraumes präferiert wird oder möglich ist (Millar et al. 2019, S. 4). Bei der Betrachtung einer Zwischenwanddämmung ist entscheidend, ob Zwischenräume in den Außenwänden baulich vorliegen.

Infolge einer vorgenommenen Wärmedämmung verändern sich die U-Werte, also die Wärmedurchgangskoeffizienten der gedämmten Bauteile. Je geringer der U-Wert, desto geringere Wärmeverluste liegen vor. Hess et al. (2018) führen für eine Betrachtung von bestehenden Mehrfamilienhäusern der Baujahre 1959 bis 1978 U-Werte von $1,13 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ für einen unsanierten Zustand von Außenwänden, $0,23 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ für einen konventionell sanierten und $0,13 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ für einen ambitioniert sanierten Zustand an. Åberg et al. (2018) betrachten die Modernisierung von schwedischen Wohnungskomplexen aus den 1970ern und verwenden für lange Außenwände einen U-Wert von $0,321 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ im unsanierten Zustand und $0,138 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ für einen sanierten Zustand. Die üblicherweise kostenintensive Wärmedämmung des Gebäudes hat also Einfluss auf den Wärmedurchgang durch die Außenwände und angesichts der großen Wärmeübertragungsfläche einen großen Einfluss auf die Gesamtwärmeverluste. Allerdings können neben einer Fassadendämmung auch andere, kostengünstigere Modernisierungsmaßnahmen zwar geringere, aber dennoch effektive Wärmeenergieeinsparungen zur Folge haben, wie Harrestrup und Svendsen (2015) bei ihren Untersuchungen einer Modernisierung dänischer mehrstöckiger Bestandsgebäude in Verbindung eines Kalten Nahwärmenetzes hinsichtlich in ihrem Fall Fensteraustausch, Ventilation, Bodenplattendämmung, Dachdämmung und Fassadendämmung analysieren. Hierbei konnte ein Wärmeenergieeinsparungspotential von 30 % – 50 % ermittelt werden, abhängig von der Raumzieltemperatur der Gebäude (Harrestrup und Svendsen 2015).

Fensteraustausch

Neben der Dämmung eines Gebäudes ist der Austausch von alten, gegebenenfalls sogar nur einfachverglasten, mit mehrfachverglasten Fenstern oder sogar Wärmeschutzfenstern eine im Vergleich kostengünstige Möglichkeit, den Wärmebedarf zu senken.

Bei einem Fensteraustausch können deutlich geringere U-Werte für den Wärmedurchgang angesetzt werden. In der IWU-Wohngebäudetypologie sind für Mehrfamilienhäuser aus den 1960er Jahren typische U-Werte angegeben. Für zweifachverglaste Fenster ohne Wärmeschutzverglasung betragen diese $3,0 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$, für zweifachverglaste Fenster mit Wärmeschutzverglasung $1,3 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ und für dreifachverglaste Fenster mit gedämmtem Rahmen $0,8 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ (Loga et al. 2015). Andere Studien berücksichtigen ähnliche U-Werte, wie Hess et al. (2018) mit $3,25 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ bei unsanierten, $1,30 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^2\text{K}$ bei konventionell sanierten und

0,70 W_{th}/m^2K bei ambitioniert sanierten Gebäuden. Brand und Svendsen (2013) setzen einen U-Wert von 3,2 W_{th}/m^2K für Fenster aus den 1970er Jahren an, welcher durch einen Austausch durch energieverglaste Fenster auf 1,2 W_{th}/m^2K verringert werden kann.

Die Wärmeverluste und die möglichen Wärmeenergieeinsparungspotentiale eines Gebäudes werden neben der Gebäudedämmung stark von den verbauten Fenstern und deren Größen beeinflusst. Welchen Anteil Außenwanddämmung und Fenster an den Wärmeverlusten und Wärmeenergieeinsparungen haben, hängt maßgeblich davon ab, wie viel Fensterfläche im Vergleich zur Außenwandfläche vorliegt. Werden allein die Wärmeverluste betrachtet, dann zeigen Safizadeh et al. (2019), dass bei ihrer Untersuchung von Bestandsgebäuden die höchsten Verluste über die Fensterflächen auftreten. Werden die Wärmeenergieeinsparungen betrachtet, dann kommen Millar et al. (2019) bei ihren Betrachtungen zum Anschluss von bestehenden, vor 1982 gebauten Mietshäusern an ein Niedertemperaturnetz in Schottland zu dem Schluss, dass sich die Dämmung wesentlich deutlicher als ein Fensteraustausch auf Energieeinsparungen auswirkt, weisen aber darauf hin, dass der Einfluss der Fenster bei größeren Fensterflächen zunehmen könnte. Die besten Ergebnisse bezüglich Energieeinsparungen werden erwartungsgemäß bei der Berücksichtigung von sowohl Dämmmaßnahmen als auch Fensteraustausch erzielt (Millar et al. 2019).

Millar et al. (2019, S. 14) finden für nicht modernisierte Gebäude mit Einfachverglasung, also bei einer sehr gering vorliegenden Wärmedämmung, in ihren Untersuchungen keine Eignung der Bestandsgebäude für den Anschluss an ein Niedertemperaturnetz. Im Falle einer vorgenommenen Doppelverglasung können allerdings schon Heizungsvorlauftemperaturen von 75 °C und eine Jahresabdeckung von 78 %, und im Falle einer Dämmung mit Einzelverglasung Vorlauftemperaturen von 70 °C und eine Jahresabdeckung von 80 % erreicht werden. Die Kombination aus vorgenommener Wanddämmung und doppelverglasten Fenstern ist die Variante, aus der die höchste Reduzierung des Wärmebedarfs resultiert und es können hier Vorlauftemperaturen von 65 °C und eine Jahresabdeckung von 79 % erzielt werden. Die Veröffentlichung zeigt also den großen Einfluss einer vorgenommenen Außenwanddämmung auf und auch wenn die Auswirkungen einer Doppelverglasung hier im Vergleich dazu geringer ausfallen, so ermöglicht ein Fensteraustausch dennoch eine entscheidende Reduzierung der Wärmeverluste. So wird in diesem Beispiel allein durch die Maßnahme des Einbaus von doppelverglasten Fenstern der Anschluss an ein Niedertemperaturnetz bereits möglich.

In einer Studie zur Umsetzung von Niedertemperaturnetzen in unrenovierten Einfamilienhäusern des Baujahres 1970 in Dänemark konnten Brand und Svendsen (2013, S. 316) herausfinden, dass im Fallbeispiel der Austausch der Fenster aus den 1970er Jahren eine Reduzierung der maximalen Heizungsvorlauftemperatur von 78 auf 67 °C um 11 °C ermöglicht. In Kombination mit Niedrigtemperaturheizkörpern wird für 98 % des Jahres überdies eine Vorlauftemperatur von unter 60 °C erreicht, was einer Reduzierung um mehr als 18 °C entspricht.

Brand und Svendsen (2013) haben untersucht, wie sich Modernisierungsmaßnahmen am Gebäude auf die Heizvorlauftemperaturen in ihren Untersuchungen auswirken. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Dass die Heizvorlauftemperatur stark vom Gebäudezustand abhängt, schlussfolgern auch Millar et al. (2019) in ihrer Veröffentlichung. Erste Anhaltspunkte, welche Heizvorlauftemperaturreduzierungen mit welchen Maßnahmen bei welchen Raumzieltemperaturen erreichbar sein könnten, sind in Abbildung 2-3 dargestellt.

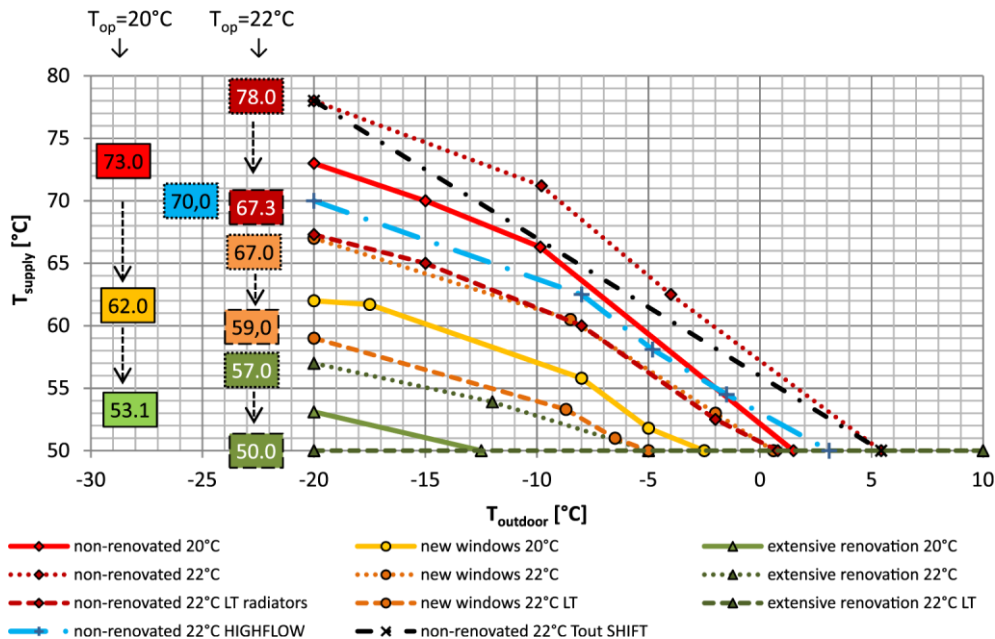


Abbildung 2-3: Einfluss von Modernisierungsmaßen und Raumzieltemperaturen auf mögliche Heizvorlauftemperaturen (Brand und Svendsen 2013)

Raumzieltemperaturen

Wie bereits erwähnt und auch in Abbildung 2-3 zu sehen, ist die Festlegung der Raumzieltemperatur ein Faktor, welcher den Wärmebedarf direkt beeinflusst. Es gilt: Je höher die Raumzieltemperatur, desto höher der Wärmebedarf. Dabei wird für die Komforttemperatur in Innenräumen oft ein Temperaturband von 19 – 22 °C angegeben. Harrestrup und Svendsen (2015) weisen darauf hin, dass in ihren Untersuchungen eine Verringerung der Raumzieltemperatur von 22 °C auf 20 °C eine Erhöhung der Wärmeenergieeinsparungen von 30 % auf 50 % zur Folge hat. Rønneseth et al. (2019) setzen die Raumzieltemperatur in ihren Simulationen sogar auf 19 °C. Østergaard und Svendsen (2017) verdeutlichen allerdings auch, dass die Festsetzung der Raumzieltemperatur in Berechnungen mit Unsicherheiten behaftet ist, da die tatsächliche bevorzugte Komfortraumtemperatur der Nutzer und Nutzerinnen abweichen kann und von weiteren Faktoren, wie der Luftfeuchte, abhängt.

Heizkörper

Hinsichtlich der Heizkörper sind Parameter zur Anpassung von Bestandgebäuden an Kalte Nahwärmenetze die Heizkörpertypen, die Ausnutzung von Überdimensionierung von Heizkörpern, der Heizbetrieb und der Austausch von kritischen Heizkörpern. Darüber hinaus ist auch die beabsichtigte Heizvorlauftemperatur ausschlaggebend.

Heizkörpertypen

Der verbaute Heizkörpertyp ist in einem Gebäude, welches auf ein Wärmenetz mit Kalter Nahwärme umgestellt werden soll, essentiell. Traditionell sind beispielsweise Radiatoren, Konvektoren oder Flachheizkörper verbaut, welche den Wärmebedarf mit geringer Wärmeübertragungsfläche und dafür hoher Heizvorlauftemperatur decken. Soll die Heizvorlauftemperatur aufgrund der niedrigeren Wärmequellentemperaturen gesenkt werden, ist es üblich, Flächenheizkörper zu verbauen. So kann der Wärmebedarf trotz niedrigerer Heizvorlauftemperatur aufgrund der Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche bereitgestellt werden. Flächenheiz-

körper können Fußboden-, Wand- oder Deckenheizungen sein. Fußbodenheizungen garantieren eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Raum, wogegen der Vorteil von Wand- und Deckenheizungen steht, dass diese nachträglich angebracht werden können, ohne die Bausubstanz übermäßig ändern zu müssen.

Safizadeh et al. (2019) untersuchen aufgrund von Literaturhinweisen über Temperaturasymmetrien die Temperaturverteilung im Raum bei Deckenheizungen. Aufbauend auf ihren Simulationen schlussfolgern sie, dass die Deckenheizungen in ihren Betrachtungen geeignet sind, um die gewünschten Raumtemperaturen bereitzustellen. Eine Erhöhung der Heizvorlauftemperatur führt allerdings zu höheren Fluktuationen der Raumtemperatur und der thermische Komfort wird beeinträchtigt. Insgesamt sind die in ihren Berechnungen resultierenden ungleichmäßigen Temperaturverteilungen vor allem bei sehr gut bis gut gedämmten Gebäudehüllen aufgrund der Wärmeabstrahlung der Gebäudesubstanz vernachlässigbar klein. Ausnahmen zeigt die Untersuchungen bei sehr wenig wärmegeprägten Gebäudehüllen oder bei besonders niedrigen Außentemperaturen. (Safizadeh et al. 2019)

Kommen Flächenheizungen nicht in Frage, können an den vorhandenen Heizkörperanschlüssen größere konventionelle Heizkörpertypen verbaut, damit situativ als Niedrigtemperaturheizkörper aufgefasst und in einem gewissen Rahmen Heizvorlauftemperatursenkungen realisiert werden. Brand und Svendsen (2013) können beispielsweise 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 (siehe Anhang C für eine genauere Darstellung der konventionellen Heizkörpertypen). Eine weitere Möglichkeit einer gewissen Heizvorlauftemperaturreduzierung stellen an Heizkörpern angebrachte Ventilatoren dar, welche erzwungene Konvektion bewirken und dadurch die Wärmeübertragung verbessern und in Kapitel 4.2.3 näher behandelt werden (van der Ploeg et al. 2019; Ploskić et al. 2019).

Überdimensionierung von Heizkörpern

In der Literatur wird vermehrt auf die Überdimensionierung von Heizungssystemen hingewiesen, welche bei der Umstellung auf niedrigere Heizvorlauftemperaturen ausgenutzt werden kann. Gründe für die Überdimensionierung der Heizkörper sind nach Østergaard und Svendsen (2016b) die Auslegung auf sehr niedrige und fast nie auftretende Außentemperaturen, die Zunahme von internen Wärmequellen wie elektrischer Geräte, die aufgrund von wenigen Standardheizkörpergrößen oft zu großen Heizkörperdimensionen und der verringerte Wärmebedarf durch bereits durchgeführte energetische Modernisierungsmaßnahmen der Gebäudehülle. Rønneseth et al. (2019) merken überdies an, dass gerade die bisherigen Auslegungstemperaturen in Folge des Klimawandels zukünftig nicht mehr repräsentativ sein und stattdessen voraussichtlich steigen werden. Für den skandinavischen Raum gehen Rønneseth et al. (2019) von einer bisherigen Überdimensionierung der Heizkörper von 20 – 25 % aus. In einer Studie aus dem deutschsprachigen Raum setzen Hess et al. (2018) eine Überdimensionierung von 15 % an und gehen daraufhin von einer möglichen Reduzierung der Heizvorlauftemperatur um 8 °C aus.

Heizbetrieb

Auch der Heizbetrieb birgt weitere kostengünstige Stellschrauben, die Heizvorlauftemperaturen zu Teilen zu verringern. Lämmle et al. (2019) führen aus, dass unter anderem der hydraulische Abgleich eine solche Möglichkeit darstellt. Tunzi et al. (2016) als auch Østergaard (2018) geben stellenweise noch nicht ausgenutzte Potentiale durch Fehlbedienung bei der

manuellen Regelung von Heizkörperthermostatventilen durch Nutzer und Nutzerinnen in ihren Studien an. Zusätzlich beschreibt Østergaard (2018) vermehrt auftretende einfach zu behebbende, aber möglicherweise unentdeckte hydraulische Fehlregelungen wie hydraulische Kurzschlüsse oder fehlerhafte Thermostate. Lund et al. (2018) schlagen darüber hinaus eine kombinierte Regelung für Heizkörperthermostatventile mit Sensoren für sowohl die Raumtemperatur als auch die Heizrücklaufemperatur vor.

Austausch von kritischen Heizkörpern

Eine unter Umständen sehr effektive und ökonomisch günstigere Maßnahme als der Einbau von Fußbodenheizungen für die Ermöglichung einer merklichen Heizvorlauftemperaturreduzierung ist der Austausch von einzelnen kritischen Heizkörpern, worauf in der Literatur vermehrt hingewiesen wird, unter anderem von Lämmle et al. (2019), Hess et al. (2018), Østergaard und Svendsen (2016a), Østergaard (2018) und Lund et al. (2018). Hier sind sowohl Heizkörpertypen mit einer größeren Wärmeübertragungsfläche, wie beispielsweise Rippen statt einfachen Platten, als auch gesamt größer dimensionierte Heizkörper denkbar.

Østergaard und Svendsen (2019) konnten für den dänischen Gebäudebestand ermitteln, dass der Austausch von lediglich bis zu 40 % der Heizkörper ausreicht, um ein Gebäude mit Kalter Nahwärme zu versorgen. Auch wenn die Studie aufgrund der örtlichen Betrachtung und der damit einhergehenden Wetter- und auch Gebäudebauartunterschiede nicht direkt auf den deutschen Gebäudebestand zu übertragen ist, gibt sie dennoch eine erste Einschätzung über die Quantifizierung des Austauschs von kritischen Heizkörpern in Bestandsgebäuden. Lund et al. (2018) berichten, dass in Untersuchungen aus der von ihnen gesichteten Literatur allein durch den Austausch der kritischen Heizkörper Vorlauftemperaturen von 50 °C erreicht werden konnten.

Lämmle et al. (2019) zeigen für Untersuchungen im deutschsprachigen Raum, dass der selektive Austausch von 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. Gleichzeitig sinken die CO₂-Emissionen um ebenfalls 23 %. Die Maßnahme weist damit eine hohe Wirtschaftlichkeit auf und ist sowohl unter ökonomischen, energetischen als auch ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll. (Lämmle et al. 2019)

Østergaard (2018) zeigt in Abbildung 2-4 die Auswirkungen von Maßnahmen am Heizungsbetrieb, Austausch von kritischen Heizkörpern sowie Gebäudemodernisierungen auf die dadurch ermöglichte Reduzierung von Wärmenetz- bzw. Heizvorlauftemperaturen, welche in ihren Simulationen resultieren.

Insgesamt ist für die Parameter der Heizkörper festzuhalten, dass mindestens eine Kombination aus mehreren der vorgestellten Maßnahmen wesentlich dazu beitragen kann, eine Reduzierung der Heizvorlauftemperaturen für Kalte Nahwärme zu realisieren. Räume mit vergleichsweise hohen thermischen Ansprüchen sind allerdings kritisch und schränken die Machbarkeit dieser geplanten Vorlauftemperaturreduzierung möglicherweise ein (Østergaard und Svendsen 2016a).

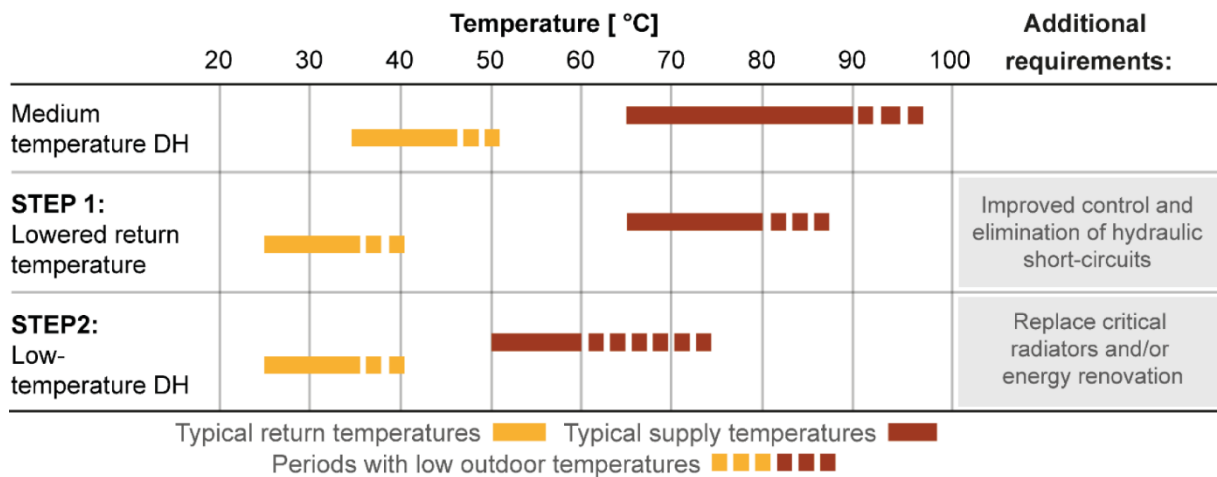


Abbildung 2-4: Maßnahmen zur Ermöglichung von reduzierten Wärmenetz- bzw. Heizvorlauftemperaturen (Østergaard 2018)

Heizvorlauftemperaturen

All die bisher genannten Maßnahmen führen im optimalen Fall dazu, dass die Heizvorlauftemperatur gesenkt werden kann. Welche Heizvorlauftemperaturen abhängig von der Wahl der Wärmenetzart anvisiert werden können und welche Limitationen und zusätzlichen Anforderungen berücksichtigt werden sollten, stellen Østergaard und Svendsen (2017) in Abbildung 2-5 dar. Die abgebildeten Vorlauftemperaturen des Wärmenetzes stehen in diesem Falle synonym für die Heizvorlauftemperaturen in den Gebäuden.

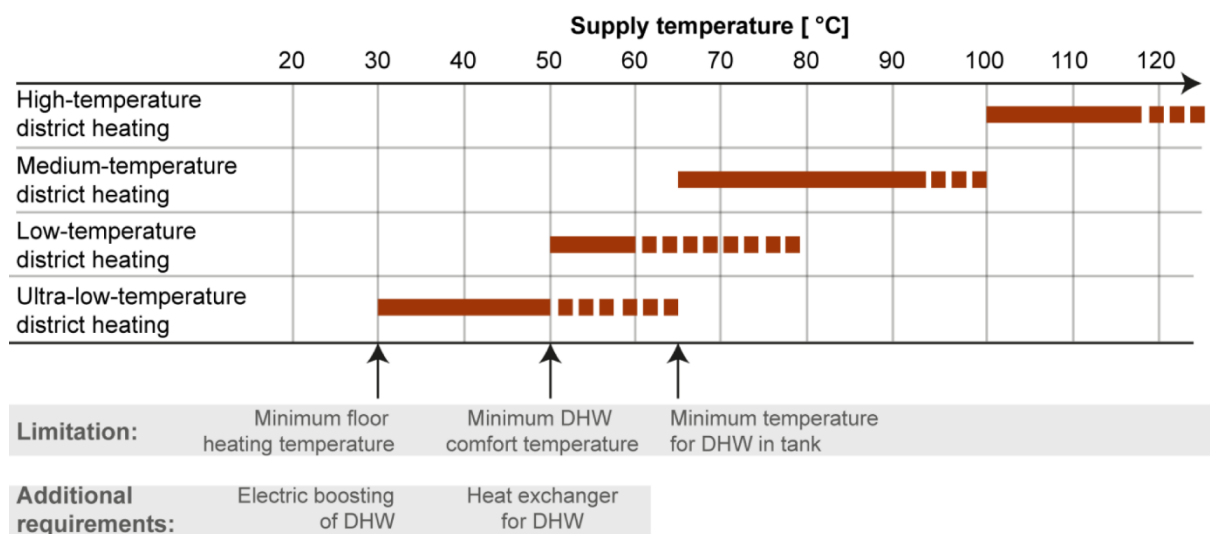


Abbildung 2-5: Wärmenetzvorlauftemperaturen und damit Heizvorlauftemperaturen für unterschiedliche Wärmenetzarten und dazugehörige Limitationen sowie Anforderungen (Østergaard und Svendsen 2017)

Østergaard und Svendsen (2017) zeigen, dass Brauchwarmwasser, in der Abbildung DHW, also Domestic Hot Water genannt, ein großer Faktor für die Umsetzung von niedrigen Heizvorlauftemperaturen ist. Rønneseth et al. (2019) nennen das Brauchwarmwasser sogar als kritische Barriere bei der Umsetzung von Kalter Nahwärme. Hintergrund ist, dass das Brauchwasser üblicherweise bei über 60 °C bereitgestellt wird, um ein Risiko von Legionellenwachstum auszuschließen. Legionellen treten bei Fluidtemperaturen von unter 60 °C auf und können stark gesundheitsgefährdend sein (Østergaard und Svendsen 2017). Wenn sowohl Brauchwarm- als auch Heizwasser durch das Kalte Nahwärmenetz bereitgestellt werden sollen, kann

die Legionellenproblematik, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, beispielsweise durch einen Durchlauferhitzer für das Brauchwarmwasser gelöst werden.

Wärmeerzeuger

Als Parameter für die Umsetzung von Kalter Nahwärme sind auf der Wärmeerzeugerseite die Wärmequellen sowie die Wärmeerzeugungstechnologien entscheidend.

Wärmequellen

Die Wahl der Wärmequelle, welche in Kapitel 2.2 bereits angesprochen wurde, bestimmt die verfügbare Quellentemperatur, mit der das Kalte Nahwärmenetz versorgt werden kann. Soll das Wärmenetz regenerativ gespeist werden, was den größten Vorteil von Kalter Nahwärme darstellt, kommt vor allem die Geothermie in Frage, denkbar wären aber auch Solarthermie und eingeschränkt auch Umweltwärme. Die Umweltwärme bezieht ihre Wärme aus der Außenluft, welche damit tages- und jahreszeitlich stark volatil ist. Die Solarthermie kann vergleichsweise hohe Quellentemperaturen bereitstellen, allerdings ist das Angebot der Sonnenenergie vor allem im Sommer und nur tagsüber vorhanden. Eine Umsetzung eines Nahwärmenetzes mit Solarthermie kann nur durch die Installation eines saisonalen Wärmespeichers erfolgen, welcher die gewonnene Wärme im Sommer bis zur Wärmeabnahme, welche hauptsächlich im Winter erfolgt, speichert. Die Geothermie dagegen ist, abhängig von der Ausführung als beispielsweise Erdwärmekollektor, Erdwärmesonde oder Brunnensystem, wesentlich weniger bis gar nicht von der Sonnenenergie abhängig. Sie kann im Vergleich zur Solarthermie allerdings nur deutlich geringere Quelltemperaturen bereitstellen, welche von der genauen Ausführung der geothermischen Anlage abhängen. Die Geothermie bezieht ihre Wärme aus dem Erdreich, welche daher auch nachts und im Winter zur Verfügung steht, und ist damit grundlastfähig.

Wärmeerzeugungstechnologien

Die Geothermie wird aufgrund der niedrigeren Quellentemperatur mit Wärmepumpen gekoppelt, um die notwendige Heizvorlauftemperatur zu erreichen. Die Quellentemperatur wird dabei mithilfe elektrischer Energie in einem Kompressor innerhalb der Wärmepumpe angehoben. Dies bedeutet auch, dass eine Lösung mittels Wärmepumpe ökologisch gesehen zu einem gewissen Teil auch von dem CO₂-Emissionsfaktor des örtlichen Strommix abhängig ist. Je regenerativer der örtliche Strom erzeugt wird, desto weniger CO₂-Emissionen fallen bei der Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen an. Hess et al. (2018) weisen überdies 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.

Rein technisch gesehen könnten neben Wärmepumpen genauso alle konventionellen Wärmeerzeugungstechnologien wie Gas-Kessel in Betracht kommen, welche allerdings ökologische Nachteile durch einen hohen Ausstoß von CO₂-Emissionen aufweisen.

Eine Ausnahme aus der Brennwertechnik stellen Biomassekessel dar. Durch den Einsatz von Biomasse wie Pellets wird meist bilanziell davon ausgegangen, dass bei der thermischen Verwertung von Biomasse keine CO₂-Emissionen ausgestoßen werden. Ein tatsächlich nachhaltiger Betrieb von Biomassekesseln ist allerdings nur dann gegeben, wenn durch Maßnahmen wie Wiederaufforstung sichergestellt wird, dass sich Kohlenstoffentnahme und -abgabe durch

Wachstum und energetische Nutzung der Pflanzen ausgleichen oder im Falle von beispielsweise Biomasse durch Maisanbau auf Feldern Flächenkonkurrenzen mit Nahrungsmittelanbau in Betracht gezogen wurden. Weiteres zur Ökologie von Biomasse wird in Kapitel 4.4 diskutiert.

Die in Tabelle 2-2 aufgeführten und darauffolgend genauer dargestellten Parameter aus der Literaturrecherche zeigen, dass es vielfältige Gelegenheiten gibt, um eine Anpassung von Bestandsgebäuden an Kalte Nahwärmenetze erfolgreich vorzunehmen. Aufbauend auf den Literaturergebnissen wird in den nachfolgenden Kapiteln die in Kapitel 1.3 definierte Fragestellung untersucht, ob Kalte Nahwärme mit den Bestandsgebäuden Gemeindehaus, Kindergarten und Grundschule in Gödenroth machbar ist.

3. Vorgehen und Methodik

Im folgenden Kapitel wird das methodische Vorgehen der Machbarkeitsstudie beschrieben.

3.2 Vorgehen zur Bewertung der Machbarkeit

Das allgemeine Vorgehen der Analyse lässt sich in drei Teilschritte unterteilen.

1. Bestimmung der Grundlagen/ Input-Daten + Definition der zu untersuchenden Szenarien
2. Auslegung und Berechnung der technischen Komponenten der Szenarien
3. Auswertung der Kosten und resultierenden Emissionen der Szenarien



Abbildung 3-1: Vorgehen der Machbarkeitsstudie

Um eine Aussage über die betrachteten Gebäude treffen zu können, müssen diese bezüglich ihres bauphysikalischen Zustands, der Bestandsanlagentechnik und der verbauten Heizkörper bewertet werden. Dazu werden die drei Gebäude und die Fläche für das mögliche Erdwärmesondenfeld am 10.05.2021 besichtigt und die Grundlagen zur Bewertung ermittelt. Zusätzlich zum Besichtigungstermin stellen die Auftraggeber Pläne und Informationen zu den zu untersuchenden Gebäuden zur Verfügung. Erhaltene Daten sind zum Beispiel die Energieverbräuche der Liegenschaften der letzten 5 Jahre, mit denen die erzielten Ergebnisse überprüft werden können.

- 1) Mit Hilfe der gewonnenen Informationen werden im Anschluss die Gebäude modelliert und die Heizlast nach der DIN EN 12831 berechnet. Diese wird raumweise berechnet, um zu einem späteren Zeitpunkt Aussagen zu den in den Räumen verbauten Heizkörpern treffen zu können (DIN Norm Nationaler Anhang DIN/TS 12831-1:2020-04).
- 2) Zusätzlich zur Heizlast wird eine Gebäudesimulation durchgeführt, um die über das Jahr verteilten Wärmebedarfe erfassen zu können. Die Ergebnisse können mit den Abrechnungen der letzten Jahre verglichen werden und wurden daraufhin überprüft und angepasst.
- 3) Für die aufgenommenen Heizkörper werden die verschiedenen Heizkörpertypen und Abmaße ermittelt und daraus die jeweiligen Heizkörperleistungen berechnet. Diese werden für verschiedene Temperaturspreizungen dargestellt, um einen Indikator zu erhalten, welche Mindesttemperatur das Heizsystem (bei unveränderter/ wenig veränderter Bausubstanz) erreichen muss. Mit diesen Erkenntnissen lassen sich ebenfalls Aussagen treffen, in welchen Räumen sich bei verringerter Vorlauftemperatur des Heizsystems u. U. Engpässe ergeben könnten.
- 4) Auf Basis der ermittelten Dachflächen wird mit Hilfe eines Simulationsprogrammes der solare Energieertrag der Liegenschaften ermittelt (Gemeindehaus und Kita).

- 5) Auf Grundlage der monatlichen Wärmebedarfe und der maximalen Heizlast wird das Potential für eine geothermische Nutzung der Fläche hinter der Grundschule bestimmt. Diese Bewertung wird mit Hilfe eines in von Altieri (2021) entwickelten Auslegungstools, aufbauend auf von Huber, dem Entwickler der kommerziellen Berechnungssoftware EWS, durchgeführt (Huber 2005; Kozak 2017).
- 6) Aufbauend auf die technischen Rahmenbedingungen werden zusammen mit dem Auftraggeber Szenarien entwickelt, die in der weiteren Bewertung betrachtet werden sollen. Diese Szenarien werden ökonomisch und ökologisch ausgewertet. Die Szenarien werden im folgenden Kapitel genauer vorgestellt.
- 7) Aufbauend auf den Ergebnissen werden Empfehlungen und Hinweise zu der möglichen Umsetzung von Kalter Nahwärme in den betrachteten Liegenschaften gegeben.

3.3 Definition der untersuchten Szenarien

Zur Festlegung der Untersuchungsvarianten werden der in Abbildung 3-2 dargestellte morphologische Kasten verwendet und die Einflussgrößen Sanierungszustand, Heizkörperaustausch, Art des Netzes, Wärmequelle, Photovoltaik (PV) und Speicher bewertet.

Ideenentwicklung für Szenarienbetrachtung (Referenzszenario Biomassekessel (Pellet))

Einflussgröße	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Sanierungszustand	Unsaniert	Wenig (Fenster)	Mittel (Fenster + Türen + krit. Stellen)	Viel (Mittel + Außendämmung + Dach)
Heizkörperaustausch	Keine	Situativ	Großflächig (Deckenheizung)	Großflächig (Fußbodenheizung)
Art des Netzes	Kein Netz	Wärmenetz	Mischvariante	
Wärmequellen	Geothermie	Solarthermie	Umgebungswärme	Strom
PV	Keine	Aufdachanlagen	Agro-Photovoltaik	
Speicher	Kein	Wärmespeicher	Stromspeicher	
	Ergebnis 1	Ergebnis 2	Ergebnis 3	

Abbildung 3-2: Im Workshop (30.03.2021) entwickelte Szenarien

Als Ergebnis des Workshops sind **drei Szenarien** plus **Referenzszenario** festgelegt worden. Das Referenzszenario stellt ein Biomassekessel (Pelletkessel) dar. Innerhalb der Szenarien der kalten Nahwärme (Szenarien Orange, Schwarz und Grün) werden verschiedene Temperaturspreizungen auf der Heizungsseite untersucht, um darzustellen, wie sich der Einfluss der Vorlauftemperatur des Heizungssystems auf die Machbarkeit von Kalter Nahwärme in Gördenroth innerhalb der Szenarien ausübt.

Die Steckbriefe der jeweiligen Szenarien werden im Folgenden in Tabelle 3-1 bis Tabelle 3-4 dargestellt.

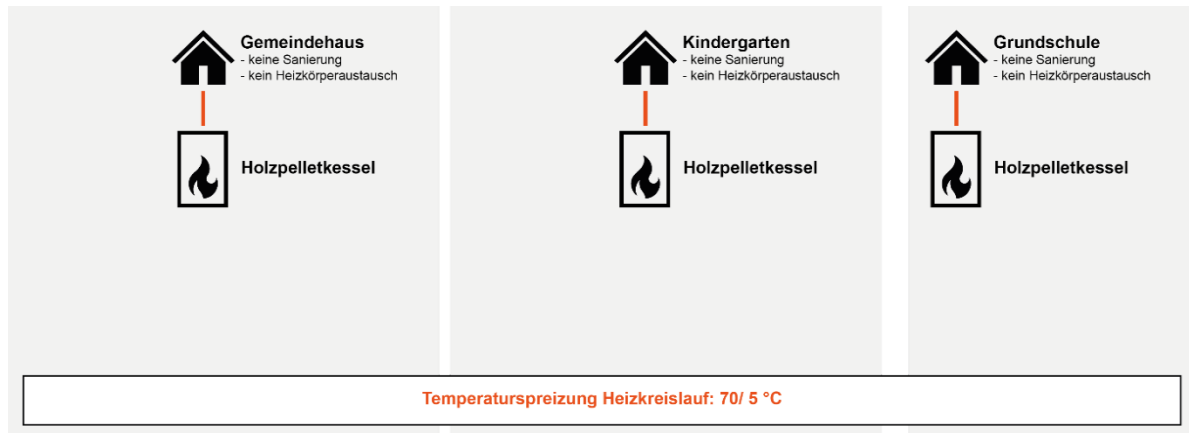
Tabelle 3-1: Definition von Szenario Blau

Referenzszenario Blau	
Gebäude	Status Quo bleibt erhalten
Wärmenetz	nein
Wärmeerzeuger/ -quelle	Biomassekessel (Pellet)

Referenzszenario Blau

Temperaturspreizung Heizkreislauf 70/ 55 °C

Schematische Darstellung



Codierung

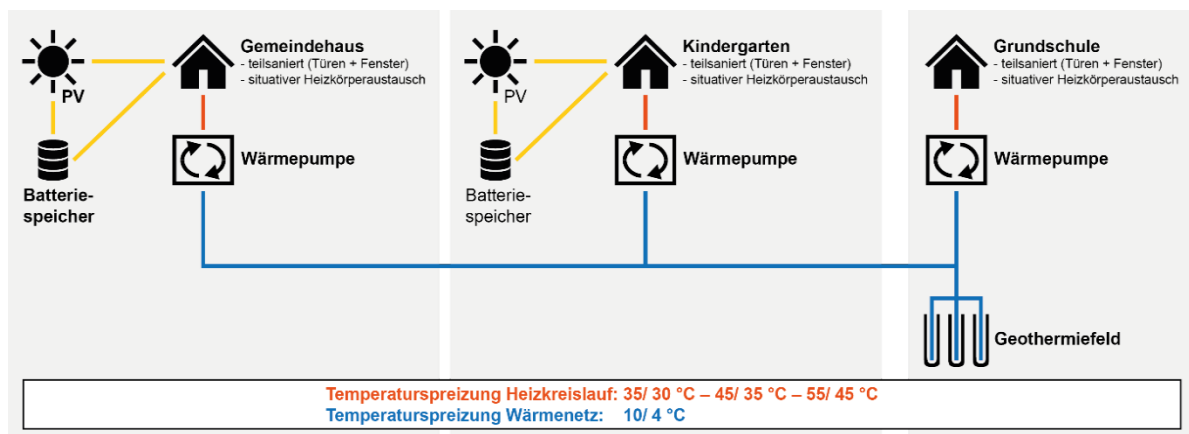
keinNetz-3Pellet-unsaniert

Tabelle 3-2: Definition von Szenario Orange

Szenario Orange

Gebäude	Teilsanierung von Türen und Fenstern, situativer Heizkörperaustausch
Wärmenetz	Anbindung aller drei Gebäude an ein Wärmenetz
Wärmeerzeuger/ -quelle	Geothermie als Wärmequelle des Netzes, Wärmepumpen in den Liegenschaften, PV Anlagen (Kindergarten + Gemeindehaus) mit Stromspeicher
Temperaturspreizung Heizkreislauf	10/ 4 °C
Temperaturspreizung Wärmenetz	35/ 30 °C – 45/ 35°C – 55/ 45 °C

Schematische Darstellung



Codierung

3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.

Tabelle 3-3: Definition von Szenario Schwarz

Szenario Schwarz	
Gebäude	kaum Sanierung (Fenster), kein Heizkörperaustausch
Wärmenetz	Mischvariante aus Netzanbindung von Schule und Kindergarten und individueller Wärmeversorgung des Gemeindehauses
Wärmeerzeuger/ -quelle	Geothermie als Wärmequelle des Netzes, Wärmepumpen in den Liegenschaften (Schule + Kindergarten), Umgebungswärme für Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWP) im Gemeindehaus, PV Anlagen mit Stromspeicher (Kindergarten + Gemeindehaus)
<i>Schule + Kindergarten</i>	
Temperaturspreizung Heizkreislauf	10/ 4 °C
Temperaturspreizung Wärmenetz	35/ 30 °C – 45/ 35°C – 55/ 45 °C
<i>Gemeindehaus (Pelletkessel/ LWP)</i>	
Temperaturspreizung LWP	35/ 30 °C – 45/ 35°C – 55/ 45 °C
Schematische Darstellung	
Codierung	2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.

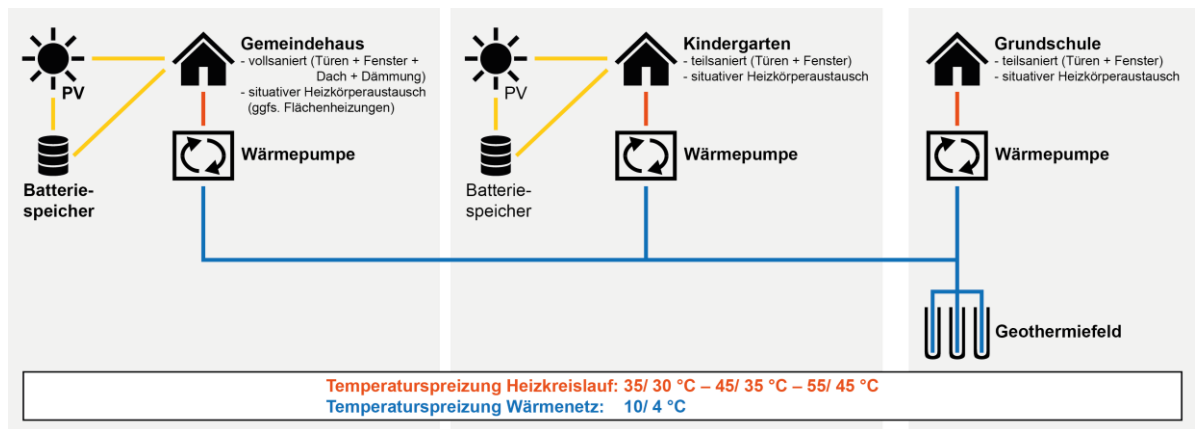
Tabelle 3-4: Definition von Szenario Grün

Szenario Grün	
Gebäude	Umfangreiche Sanierung der Gebäudehüllen und Austausch der Heizflächen im Gemeindehaus, Teilsanierung in Kindergarten und Schule
Wärmenetz	Anschluss der drei Gebäude an ein Wärmenetz
Wärmeerzeuger/ -quelle	Geothermie als Wärmequelle, Wärmepumpen in den Liegenschaften, PV Anlagen mit Stromspeicher
Temperaturspreizung Heizkreislauf	10/ 4 °C

Szenario Grün

Temperaturspreizung Wärmenetz 35/ 30 °C – 45/ 35°C – 55/ 45 °C

Schematische Darstellung



Codierung

3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.

4. Projektergebnisse

Im Folgenden werden die Projektergebnisse der technischen, ökologischen und ökonomischen Analyse dargestellt.

4.2 Technische Bewertung

In den folgenden Kapiteln werden die technischen Konzepte und Auslegungen zur Beheizung der Liegenschaften vorgestellt. Dazu gehören die Betrachtung der Wärmebedarfe der einzelnen Gebäude, die Verteilung der Wärme über ein Nahwärmenetz, die Betrachtung des Potentials der Geothermie sowie die Auslegung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und der Photovoltaik inklusive Batteriespeichern.

4.2.1 Wärmebedarfe und thermische Lasten der Liegenschaften

Die thermischen Lasten werden nach der DIN EN 12831-1 berechnet und haben die folgenden Rahmenbedingungen zur Grundlage:

Auslegungspostleitzahl: 56290 Beltheim, 413 m üNN Auslegungstemperatur θ_e : -10,1 °C

Testreferenzjahr: Zone 6 (TRY 6) Jahresmitteltemperatur $\theta_{e,m}$: 9,4 °C

Es werden nur Heizwärmebedarfe betrachtet, da es in Absprache mit dem Auftraggeber keine Brauchwarmwasserbedarfe zu betrachten gibt. Dies ermöglicht eine geringere Vorlauftemperatur des Gesamtsystems, was sich positiv auf den Einsatz von Wärmepumpen auswirkt.

Zur Berechnung der raumweisen Heizlasten, der Gebäudeheizlasten sowie der Wärmebedarfssimulation wird das Gebäudesimulationsprogramm mh-Software benutzt. Die Gebäudesimulation erfolgt stündlich mit Außentemperaturen aus dem oben definierten Testreferenzjahr. Zugrunde liegen außerdem die Gebäudemodelle und Raumlisten im Anhang. Die Raumsolltemperaturen der jeweiligen Räume sind von der Raumnutzung abhängig und reichen bis zu 22 °C, was einer konservativen Auslegung entspricht und einer tatsächlichen Umsetzung hinsichtlich des Nutzerkomforts zuträglich wäre. Darüber hinaus werden szenarienspezifisch je nach definierten Modernisierungsmaßnahmen am Gebäude unterschiedliche Wärmedurchgangskoeffizienten für die Wände, Dächer, Böden, Türen und Fenster angesetzt. Bei der Simulation fällt auf, dass der in den Szenarien Orange und Grün angedachte Türenaustausch einen nur sehr geringen Einfluss auf die Wärmebedarfe hat, weshalb der Türenaustausch in der Betrachtung der Ökonomie vernachlässigt wird.

Die aus der Gebäudesimulation resultierenden Gebäudemodelle und Ergebnisse der Berechnungen sind im Folgenden dargestellt und die Wärmelastprofile der Liegenschaften sind im Anhang aufgeführt.

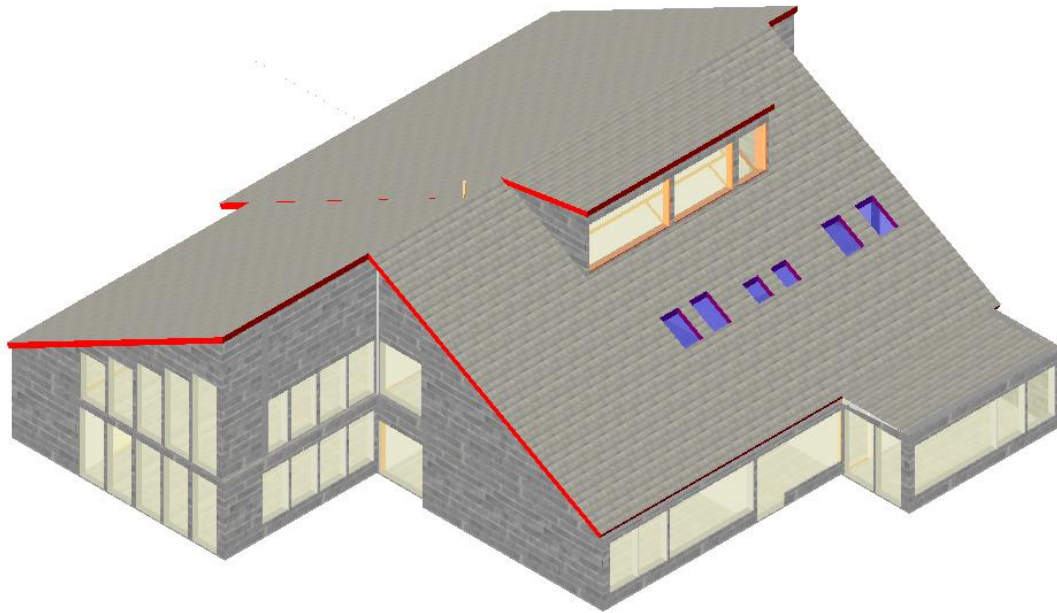


Abbildung 4-1: 3D-Ansicht des Gebäudemodells der Kita (erstellt mit mh-Software)

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Gebäudesimulation der Kita

Szenario	Wärmeleistung	Wärmebedarf
Referenzszenario Blau (keinNetz-3Pellet-unsaniert)	48,0 kW _{th}	68.900 kWh _{th}
Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)	40,0 kW _{th}	54.400 kWh _{th}
Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.)	40,5 kW _{th}	54.900 kWh _{th}
Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)	40,0 kW _{th}	54.400 kWh _{th}

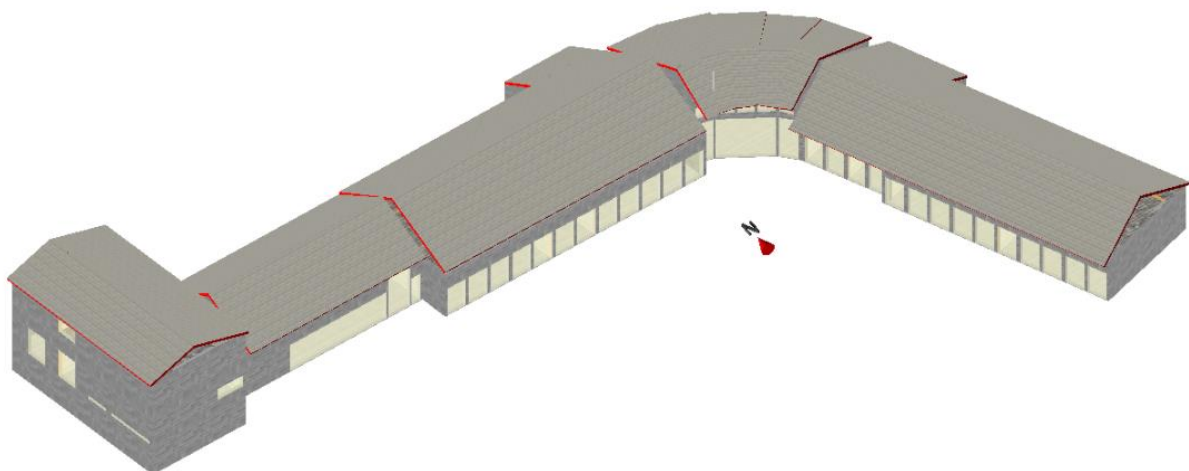


Abbildung 4-2: 3D-Ansicht des Gebäudemodells der Grundschule (erstellt mit mh-Software)

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Gebäudesimulation der Grundschule

Szenario	Wärmeleistung	Wärmebedarf
Referenzszenario Blau (keinNetz-3Pellet-unsaniert)	65,4 kW _{th}	70.200 kWh _{th}
Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)	60,5 kW _{th}	60.400 kWh _{th}
Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.)	60,8 kW _{th}	60.600 kWh _{th}
Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)	60,5 kW _{th}	60.400 kWh _{th}

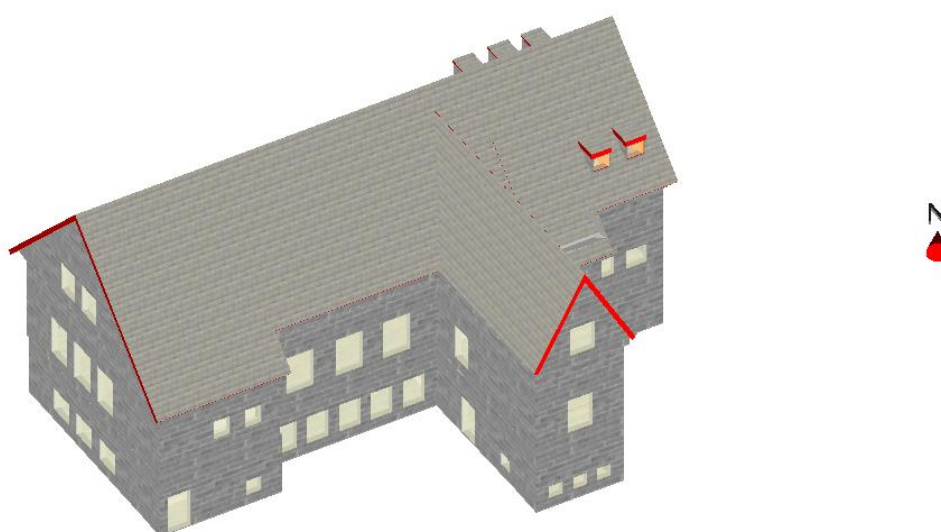


Abbildung 4-3: 3D-Ansicht des Gebäudemodells des Gemeindehauses (erstellt mit mh-Software)

Tabelle 4-3: Ergebnisse der Gebäudesimulation des Gemeindehauses

Szenario	Wärmeleistung	Wärmebedarf
Referenzszenario Blau (keinNetz-3Pellet-unsaniert)	29,5 kW _{th}	32.000 kWh _{th}
Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)	27,3 kW _{th}	27.600 kWh _{th}
Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.)	27,5 kW _{th}	28.100 kWh _{th}
Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)	20,0 kW _{th}	20.700 kWh _{th}

Die aus den Gebäudesimulationen gewonnen Erkenntnisse werden in die jeweiligen Szenarien überführt. Die maximalen Heizlasten und Wärmebedarfe nach Szenarien aufgeteilt sind in der folgenden Tabelle 4-4 zu sehen.

Tabelle 4-4: Maximale Heizlasten und Wärmebedarfe der Szenarien

Szenario		Gemeindehaus	Kindergarten	Grundschule	Gesamt
Referenz Blau	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}

4.2.2 Untersuchung der raumweisen Heizlasten und Heizkörperheizleistungen

In der Literatur gibt es Hinweise darauf, dass durch überdimensionierte Heiztechnik in Bestandsgebäuden die Vorlauftemperaturen des Heizsystems reduziert werden können, ohne Komfortanforderungen zu unterschreiten (Østergaard und Svendsen 2016a). Um diesen Umstand zu überprüfen, werden im Anschluss nach dem Beispiel von Lämmle et al. (2019) die einzelnen Raumheizlasten mit den Nennleistungen der Heizkörper verglichen. In Abbildung 4-4 ist zur Veranschaulichung eine Auswertung aus Lämmle et al. dargestellt.

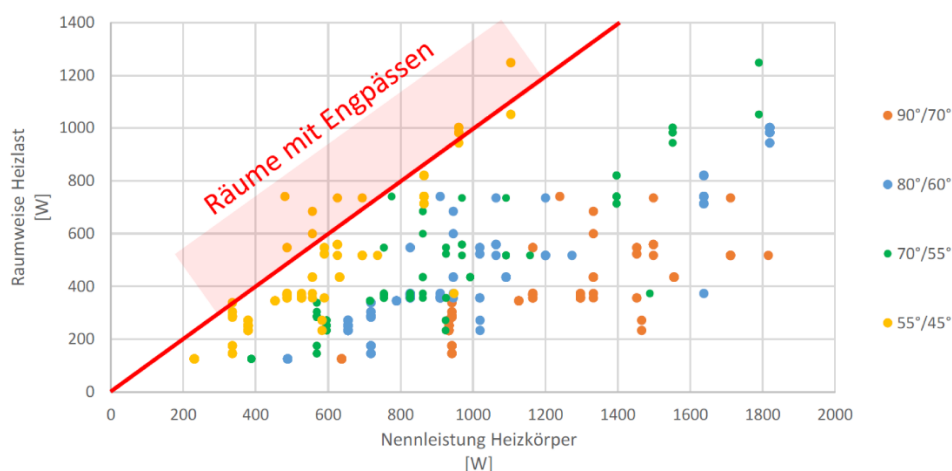


Abbildung 4-4: Raumweiser Vergleich von berechneter Heizlast und Leistung der Heizkörpernennleistung bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen eines Gebäudes (Lämmle et al. 2019)

Jeder Punkt im Diagramm stellt einen Raumzustand bei einem spezifischen Vorlauf (VL)-/Rücklauf (RL)-Verhältnis dar, z.B. 90/70°C. Auf der Abszisse (X-Achse) werden die Leistungen der in den Räumen verbauten Heizkörper und auf der Ordinate (Y-Achse) die berechneten raumweisen Heizlasten aufgetragen. Wird nun eine Winkelhalbierende (in Rot) in das Diagramm gelegt, ist grafisch leicht erkennbar, in welchen Räumen eine Reduzierung der Vorlauftemperaturen ohne weiteres möglich ist. Räume rechts/ unterhalb der roten Geraden werden mit einer ausreichenden Wärmeleistung über die Bestandsheizkörper versorgt. Räume,

deren Punkte links/ oberhalb der roten Geraden liegen, werden nicht mit ausreichend Heizleistung versorgt und sollten nach einer solchen Analyse im Detail angeschaut werden.

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 in Kapitel 3.3 festgelegten Szenarien bei VL- /RL-Temperaturen von 35/ 30 °C, 45/ 35 °C und 55/ 45 °C (definierte Bedingungen für die hier betrachtete Kalte Nahwärme) sowie 70/ 55 °C (Biomassekessel und aktueller Bestand) festgelegt. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnung der raumweisen Heizleistungen ist in Anhang C aufgeführt.

Abschließend können nun die raumweisen Heizleistungen bei den jeweiligen Betriebsbedingungen mit den in mh-software modellierten raumweisen Heizlasten pro Szenario verglichen werden. Dabei ist zu beachten, dass sich die raumweisen Heizlasten von den Gebäudeheizlasten unterscheiden. Die tatsächlichen Raumheizlasten sind auf Grund von im Gebäude stattfindenden Wärmetransportprozessen geringer als die untersuchten Raumheizlasten. Dies ist auf das in der Norm DIN EN 12831 festgelegte Berechnungsverfahren zurückzuführen. Der Wärmefluss innerhalb der thermischen Hülle (zwischen den beheizten Räumen) für Transmission und Lüftung wird nicht berücksichtigt. Bei der Berechnung des Normalfalls (natürliche Lüftung, keine zusätzliche Aufheizleistung) ist die Gebäudeheizlast kleiner als die Summe der Raumheizlasten, weil nur der Transmissionswärmeverlust nach außen durch die Gebäudehülle und nur 50 % der Lüftungswärmeverluste berücksichtigt werden.

Das Ergebnis der raumweisen Heizlastberechnung ist maßgeblich von den in der Gebäudephysik eingetragenen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) abhängig. Da diese anhand des Gebäudealters und in Absprache mit dem Auftraggeber geschätzt wurden, kann es in der Realität durchaus zu anderen raumweisen Heizlasten kommen als in der Simulation berechnet. Die Norm sieht in der Berechnung der raumweisen Heizlastberechnung keine internen Gewinne, wie z. B. anwesende Personen oder Beleuchtung, vor. Ebenfalls nicht bewertet werden solare Gewinne durch Sonneneinstrahlung. Auch dies hat einen Einfluss auf die tatsächliche Raumtemperatur.

Unter all den beschriebenen Unsicherheiten lässt sich dennoch ableiten, dass, unter der Annahme weitestgehend zutreffender U-Werte, alle im Folgenden abgeleiteten Aussagen die tatsächlich benötigten Heizleistungen überschätzen. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich im Zweifel eher vorteilhaftere Temperaturverhältnisse in den Räumen einstellen, was aber mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist.

Die Ergebnisse der raumweisen Heizlast- und Heizkörperheizleistungsberechnung sind in Abbildung 4-5, Abbildung 4-6 und Abbildung 4-7 dargestellt. In den Diagrammen der Abbildung 4-7 ist der Datenpunkt für den Flur der Grundschule zur besseren visuellen Übersicht nicht inbegriffen, die Differenz zwischen Heizkörpernennleistung und raumweiser Heizlast kann in Tabelle D-6 in Anhang D eingesehen werden.

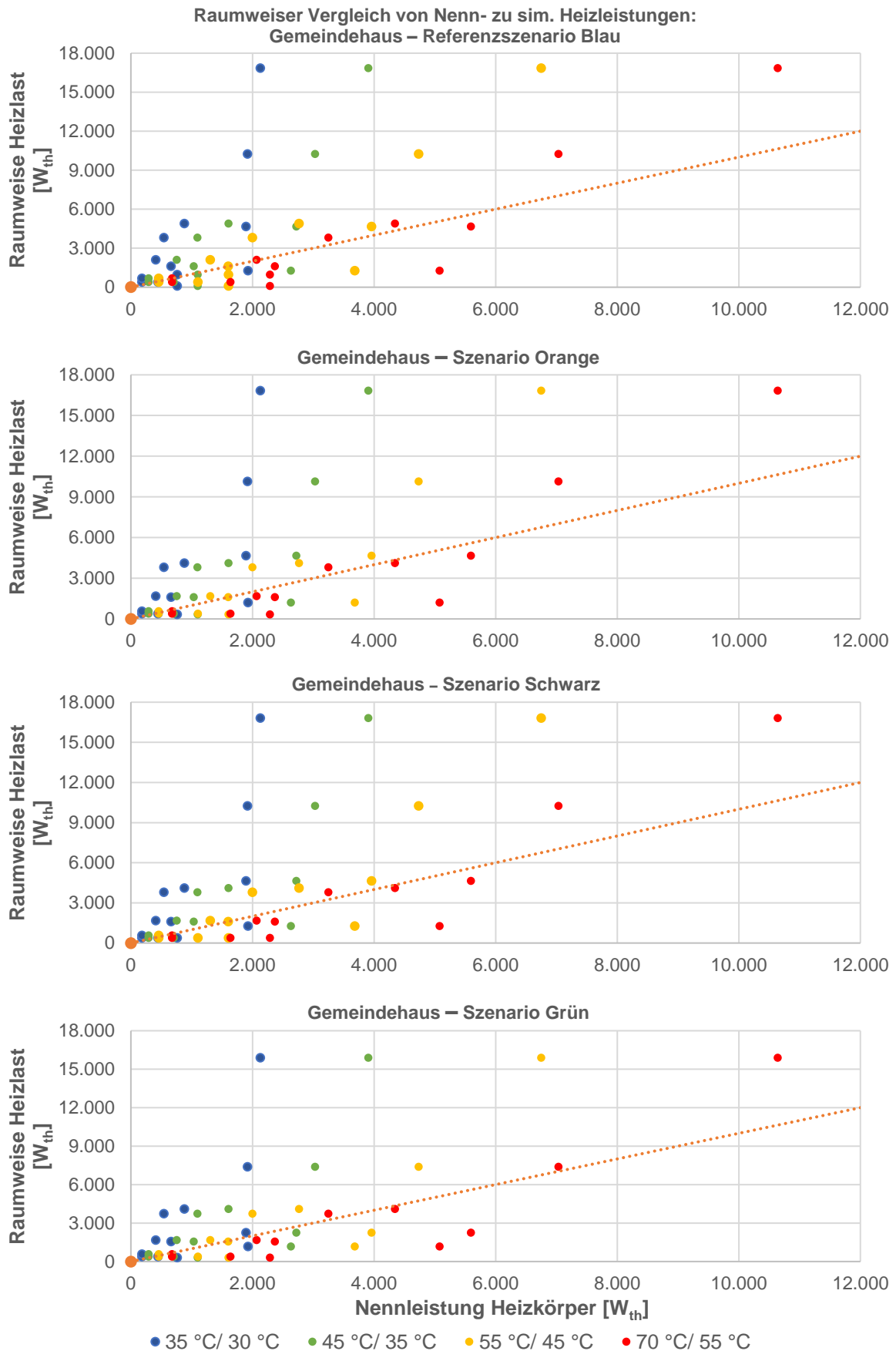


Abbildung 4-5: Raumweiser Vergleich von simulierten Heizlasten und Heizkörpernennleistungen bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen für das Gemeindehaus

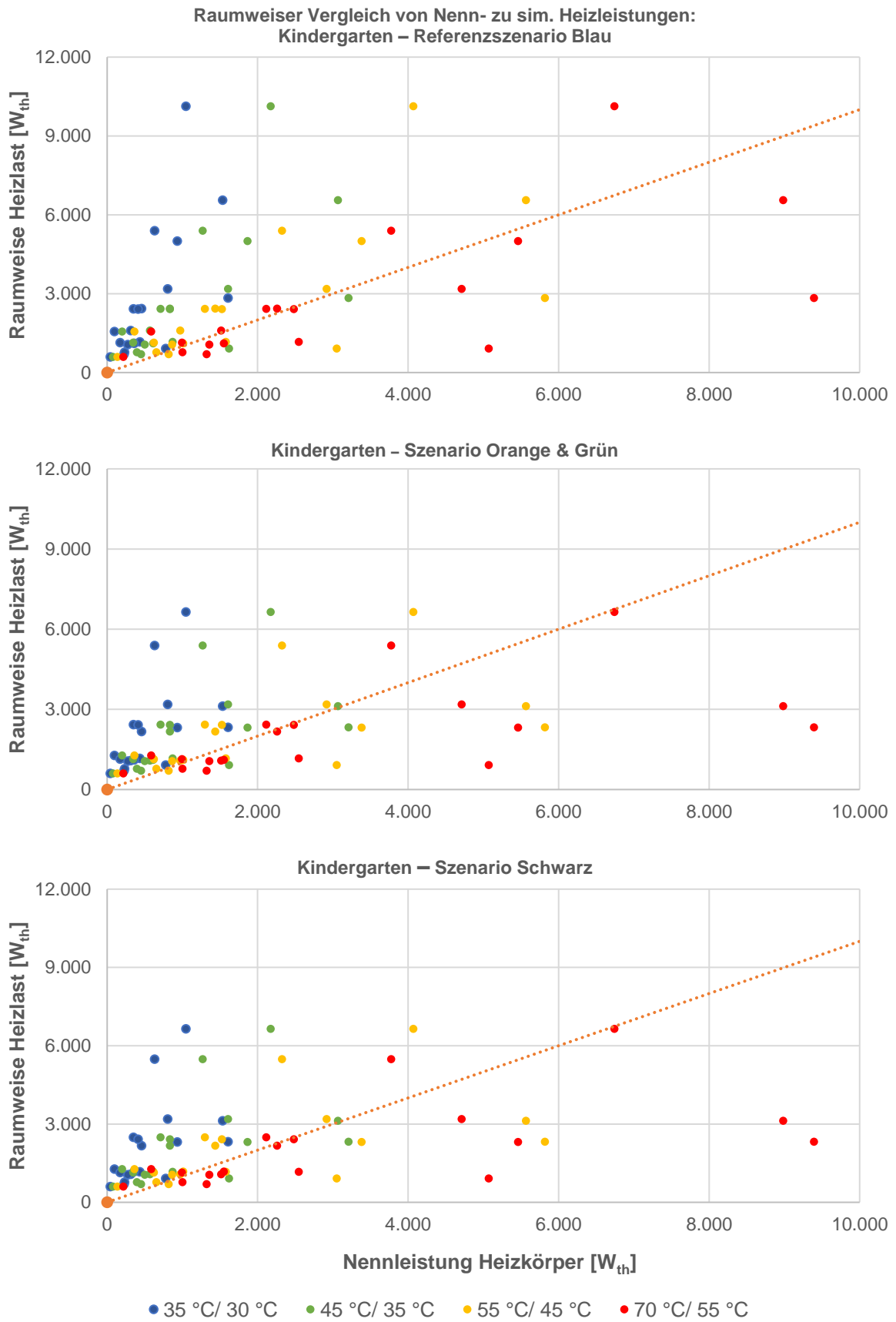


Abbildung 4-6: Raumweiser Vergleich von simulierten Heizlasten und Heizkörpernennleistungen bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen für den Kindergarten

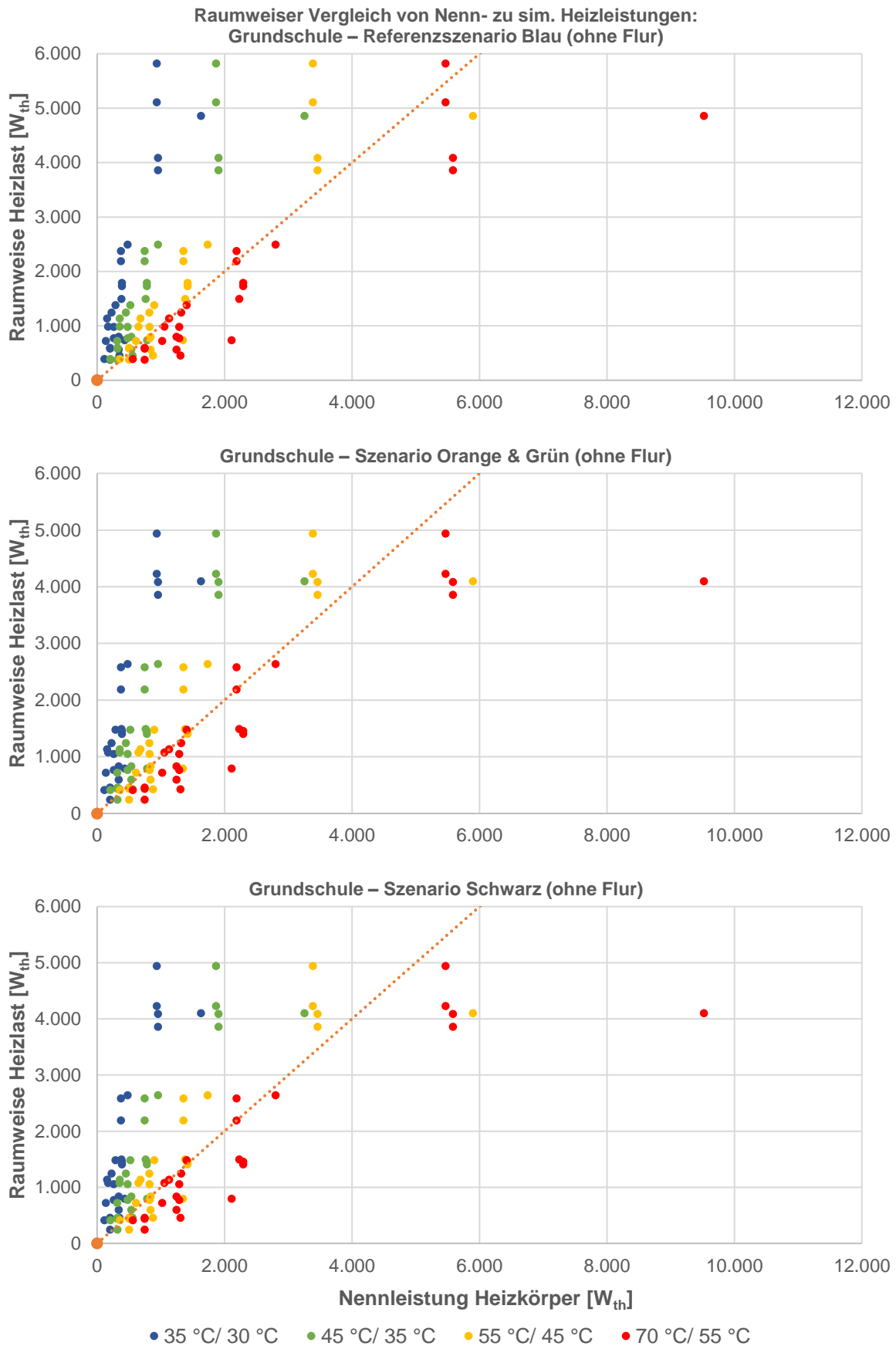


Abbildung 4-7: Raumweiser Vergleich von simulierten Heizlasten und Heizkörpernennleistungen bei unterschiedlichen Vor- und Rücklauf-Nenntemperaturen für die Grundschule

Es fällt auf, dass sich unter den getroffenen Annahmen in allen Szenarien der Großteil der Räume oberhalb der Winkelhalbierenden befinden und die Reduzierung der Vorlauftemperaturen damit nicht ohne weitere Maßnahmen erfolgen kann. Eine detailliertere Interpretation anhand eines beispielhaften Raumes wird nachfolgend vorgenommen. In den weiteren Berechnungen wird davon ausgegangen, dass der Wärmebedarf innerhalb der Szenarien durch noch vorzunehmende ausreichende Maßnahmen bereitgestellt werden kann. Mögliche Maßnahmen werden im Folgenden und in Kapitel 2.3 erläutert.

Beispielhafte Auswertung des Klassenraum 1 in der Grundschule

Um zu verdeutlichen, wie die Ergebnisse der untersuchten Varianten interpretiert werden können, werden diese anhand des Klassenraums 1 in der Grundschule etwas genauer dargestellt. In Abbildung 4-8 sind alle Räume der Grundschule dargestellt und Klassenraum 1 in Rot hervorgehoben.

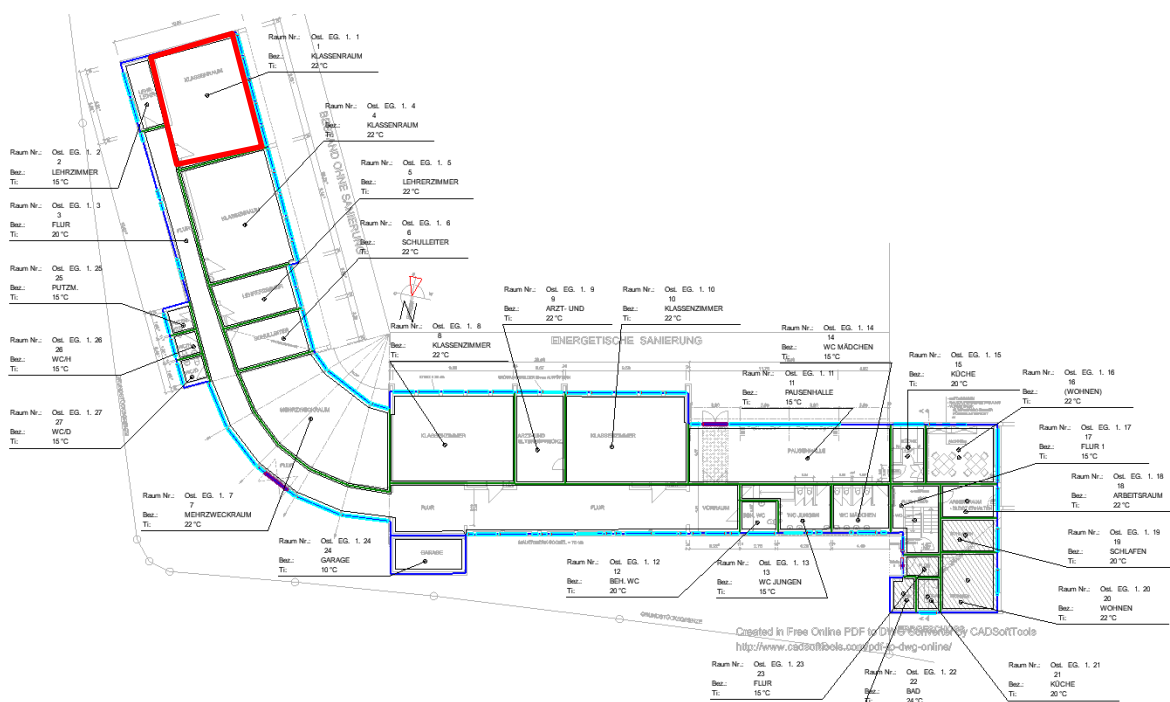


Abbildung 4-8: Raumplan des EG Grundschule mit Markierung Klassenraum 1

Der Klassenraum 1 befindet sich am Rand der Schule und besitzt zwei Außenwände. Das macht ihn, verglichen mit den anderen Räumen, welche überwiegend nur eine Außenwand besitzen, zu einem Raum mit einer eher höheren spezifischen Heizlast. Diskutiert wird das Ergebnis anhand des Referenzszenarios Blau. Der Klassenraum 1 hat eine Heizlast von $5.818 W_{th}$.

In Abbildung 4-9 sind die raumweisen Heizlasten über den Nennleistungen der Heizkörper bei verschiedenen Temperaturspreizungen für alle Räume der Grundschule dargestellt. Die winkelhalbierende Gerade stellt das Gleichgewicht in einem Raum dar, in dem die Heizlast durch die Nennleistung der Heizkörper gedeckt ist.

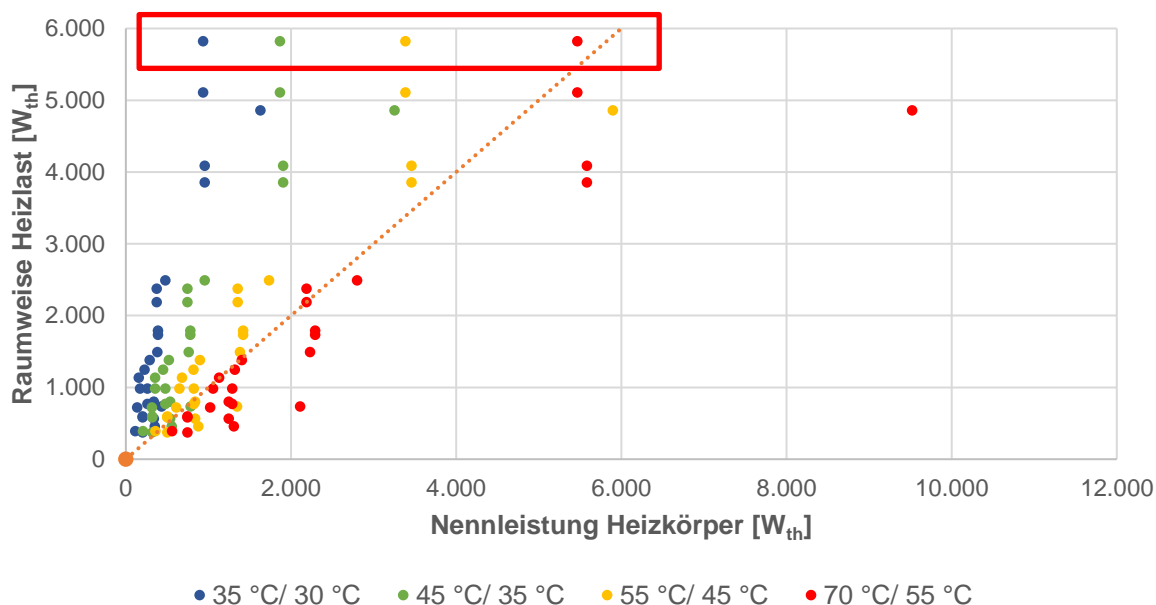


Abbildung 4-9: Vergleich von Nennleistung der Heizkörper zur raumweisen Heizlast bei verschiedenen Vor-/ Rücklauftemperaturen im Referenzszenario Blau für die Grundschule (ohne Flur)

Mit sinkender Vorlauftemperatur nimmt die Nennleistung der Heizkörper ab. In Abbildung 4-9 ist der Klassenraum 1 der Grundschule in Rot markiert. Alle Punkte links der Geraden bedeuten eine Unterdeckung der Heizlast. Was das für die Anzahl der Stunden im Jahr bedeutet, in denen nicht genug Wärme bereitgestellt werden kann, ist in Tabelle 4-5 dargestellt.

Tabelle 4-5: Anzahl an Stunden im Jahr, in denen eine Abweichung von der benötigten Heizleistung bei unterschiedlichen Vor-/ Rücklauftemperaturen auftritt.
Heizlast Klassenraum 1 Referenzszenario Blau: 5.818 W_{th}

VL-/ RL-Temp.	Heizleistung der Heizkörper	Stunden des Jahres mit Unterdeckung der Heizlast	Anteil an Gesamtheizstunden
55/ 45 °C	3.389 W_{th}	29 h	1 %
45/ 35 °C	1.870 W_{th}	1.698 h	47 %

Anmerkung: Die raumweise Heizlast wird nach der DIN 12831 berechnet und stellt die maximale Heizlast eines Raumes dar. Für die Jahressimulation wird ein Testreferenzjahr für die Außentemperatur verwendet und ein stündlicher Abgleich zwischen der Temperaturanforderung im Gebäude und der Außentemperatur berücksichtigt. Das bedeutet, dass die in den Diagrammen der Heizlast und der Nennleistung der Heizkörper dargestellten Winkelhalbierenden den Worst-Case darstellen. Im Realfall ist die Winkelhalbierende nicht starr, sondern in Abhängigkeit der Außentemperatur nach links verschoben. Dadurch, dass sich der Auslegungsfall nur am kältesten Tag einstellen würde, wird die Heizlast des Raums, welcher durch die Winkelhalbierende hier dargestellt wird weiter links liegen.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Klassenraums 1 zeigen, dass bei VL-/ RL-Temperaturen von 55/ 45 °C die Heizkörper eine Heizleistung von 3.389 W_{th} besitzen. Im stündlichen Vergleich eines Jahres wird untersucht, wie viele Stunden im Jahr die geforderte Heizleistung

erreicht wird. Bei diesen Temperaturen würden 29 Stunden eines Jahres die Heizleistung nicht erfüllt und die geforderte Raumtemperatur von 22 °C nicht erreicht werden.

Durch die Anpassung der Gebäudephysik können die Heizlasten der jeweiligen Räume gesenkt werden. Werden die Fenster (vgl. Szenario Schwarz) ausgetauscht, ergeben sich die Heizlasten wie in Abbildung 4-10 dargestellt.

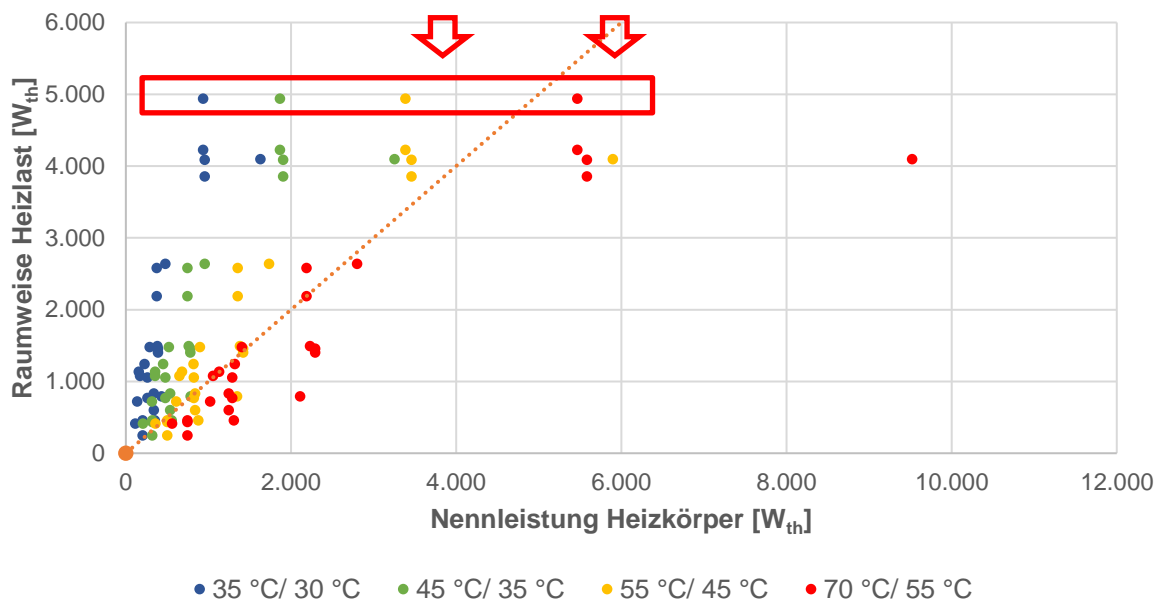


Abbildung 4-10: Vergleich von Nennleistung der Heizkörper zur raumweisen Heizlast bei verschiedenen Vor-/ Rücklauftemperaturen für Szenario Schwarz (Fenster-tausch + keine Dämmung) für die Grundschule (ohne Flur)

Durch die Anpassung der Gebäudephysik ergeben sich dementsprechende Veränderungen bei der Unterschreitung der geforderten Heizleistung. Bei einer VL-/ RL-Temperatur von 45/ 35 °C verringern sich die Stunden, in denen nicht genug Wärme bereitgestellt werden kann, von knapp 50 % auf 30 % der Heizstunden eines Jahres.

Tabelle 4-6: Anzahl an Stunden im Jahr, in denen eine Abweichung von der benötigten Heizleistung bei unterschiedlichen Vor-/ Rücklauftemperaturen auftritt.
Heizlast Klassenraum 1 Szenario Schwarz: 4.939 W_{th}

VL-/ RL-Temp.	Heizleistung der Heizkörper	Stunden des Jahres mit Unterdeckung der Heizlast	Anteil an Gesamtheizstunden
55/ 45 °C	3.389 W _{th}	0 h	0 %
45/ 35 °C	1.870 W _{th}	993 h	30 %

Neben der Anpassung der Gebäudephysik (Dämmung, Fenstertausch etc.) können die Temperaturen des Heizungssystems, die Heizflächen oder die Art der Wärmeübertragung an den Raum angepasst werden. Wird zusätzlich zum Szenario Schwarz noch die Heizleistung der Heizkörper um 20 % verbessert, verringert sich die Anzahl der Stunden, in denen die Anforderungen des Raumes durch die bereitgestellte Heizleistung des Heizsystems nicht erfüllt werden können. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Abbildung 4-11 und in Tabelle 4-7 aufgeführt.

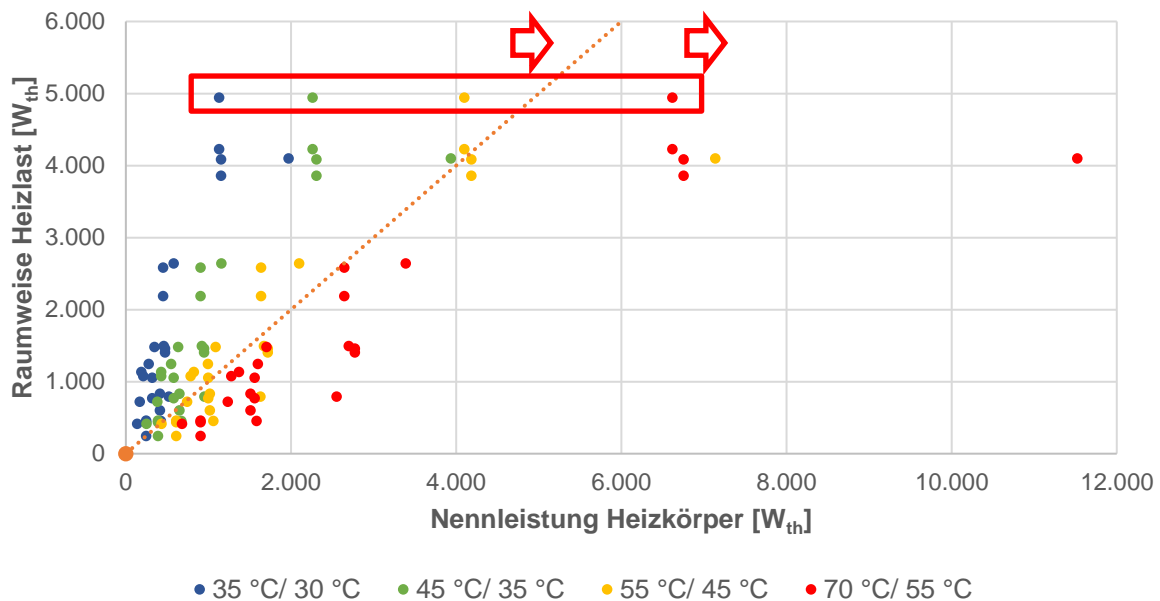


Abbildung 4-11: Vergleich von Nennleistung der Heizkörper zur raumweisen Heizlast bei verschiedenen Vor-/ Rücklauftemperaturen für Szenario Schwarz (Fenster-tausch + keine Dämmung) und verbesserte Heizkörper (19 – 23 % bessere Heizleistung) für die Grundschule (ohne Flur)

Tabelle 4-7: Anzahl an Stunden im Jahr, in denen eine Abweichung von der benötigten Heizleistung bei unterschiedlichen Vor-/ Rücklauftemperaturen auftritt. Heizlast Klassenraum 1 Szenario Schwarz: 4.939 W_{th}

VL-/ RL-Temp.	Heizleistung der Heizkörper	Stunden des Jahres mit Unterdeckung der Heizlast	Anteil an Gesamtheizstunden
55/ 45 °C	3.999 W _{th}	0 h	0 %
45/ 35 °C	2.280 W _{th}	339 h	10 %

4.2.3 Steigerung der Wärmeleistung von Heizkörpern im Bestand

In dem Fall, dass bei einem Absenken der Vorlauftemperatur des Heizsystems die zur Verfügung stehende Wärmeleistung nicht ausreicht, existieren verschiedene Möglichkeiten, diese durch geringinvestive Maßnahmen zu erhöhen. Dazu werden, wie zuvor bereits beschrieben, die jeweiligen Raumheizlasten mit den Wärmeleistungen der Heizkörper verglichen und bewertet, ob der Bedarf gedeckt wird. Ist dies nicht der Fall, können Maßnahmen zur Wärmeleistungssteigerung oder Wärmebedarfsverminderung ergriffen werden.

Durch die Vergrößerung von Heizflächen können geringere Vorlauftemperaturen ausgeglichen werden. Klassischerweise werden in Neubauten große Flächenheizungen in die Bausubstanz eingebracht. Für Bestandsgebäude sollte im Einzelfall der entstehende Aufwand bewertet werden. Bei einer kleinen Differenz zwischen Angebot und Bedarf kann es ausreichend sein, z.B. **einen weiteren Heizkörper** in einem Raum, der eine Bedarfslücke aufweist, zu **installieren**.

In Räumen, in denen kein verfügbarer Platz für neue Heizkörper ist, kann die Leistung dennoch innerhalb einer gewissen Spannbreite gesteigert werden. Eine Möglichkeit ist der Austausch

von kritischen Heizkörpern mit **Niedertemperaturheizkörpern**, welche in Kapitel 2.3 angesprochen werden. Eine weitere Möglichkeit sind **Ventilatoren**, die unterhalb der Heizkörper angebracht werden, können je nach Temperatur des Heizkörpers die Heizleistungen bis zu 20 % gesteigert werden. Die Ventilatoren haben eine Leistungsaufnahme von $1,6 \text{ W}_{\text{el}}$ je Einheit. Ein Ausführungsbeispiel der Firma SpeedComfort ist in Abbildung 4-12 zu sehen.



Abbildung 4-12: Ausführungsbeispiel eines Heizungsventilators (van der Ploeg et al. 2019)

Die Ventilatoren lassen sich auf Standard Plattenheizkörper der Typen 20/ 21/ 22 und auch an die Typen 10/ 11 und an Konvektoren anbringen. In Abbildung 4-13 ist der Effekt eines solchen Ventilators auf die Heizleistung bei einer Vorlauftemperatur von ca. 47 °C zu sehen.

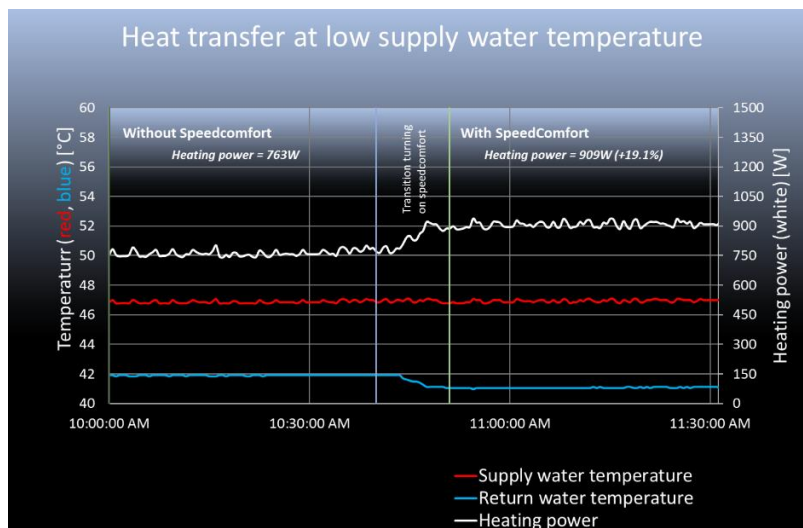


Abbildung 4-13: Effekt eines Ventilators auf ein Heizsystem mit niedriger Vorlauftemperatur (van der Ploeg et al. 2019)

Mit Einschalten des Ventilators auf Höhe der blauen Senkrechten steigt die Wärmeleistung bei weiterer Absenkung der Rücklauftemperatur des Heizkörpers.

4.2.4 Entwicklung des Wärmenetzes

Grundsätzlich stellt die durchgeführte Wärmenetzberechnung keine technische Auslegung des Netzes dar, sondern dient nur der Bestimmung der notwendigen Investitionen.

Die Längen der jeweiligen Rohrleitungsabschnitte werden mit Hilfe des Geo-Portals des Bundeslandes Rheinland-Pfalz ermittelt (Zentrale Stelle Geodateninfrastruktur Rheinland-Pfalz 2021). Die Berechnung der Netzdimensionen wird mit Hilfe des Excel-basierten Softwaretools Thena (Thermal Network Analysis) durchgeführt. Ein grobes Konzept der Leitungsführung ist Abbildung 4-14 zu entnehmen.

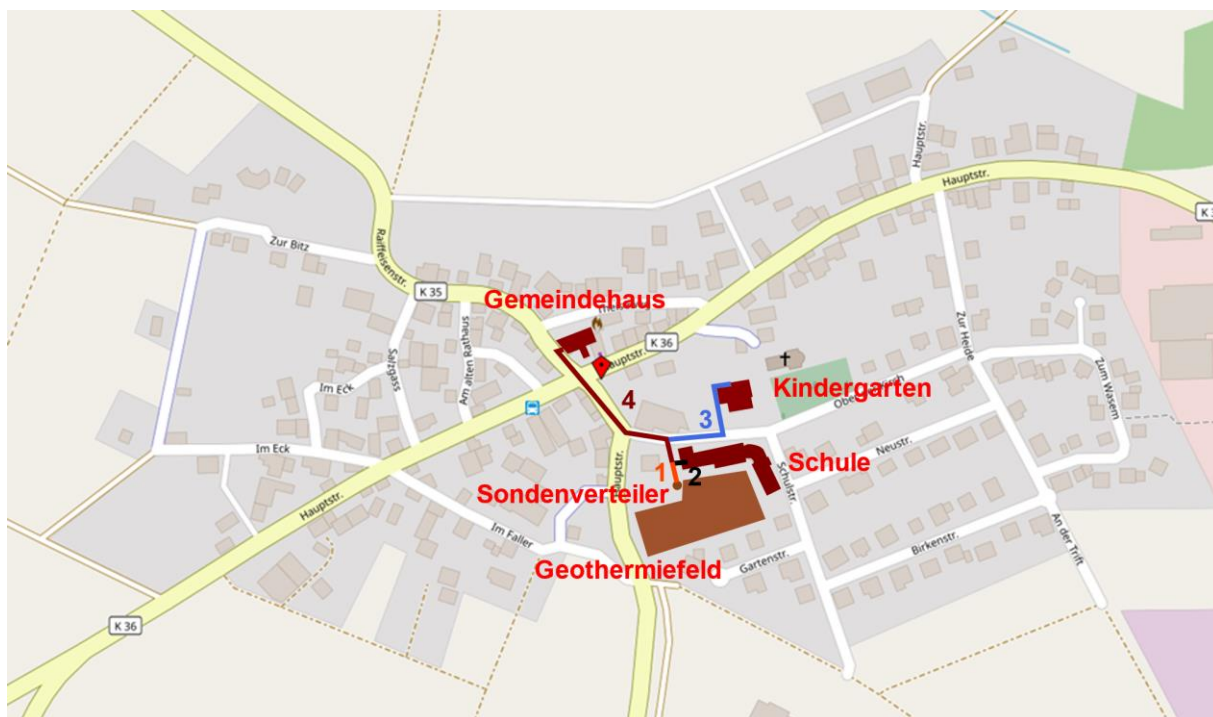


Abbildung 4-14: Rohrleitungsführung des Nahwärmenetzes (hinterlegtes Kartenmaterial aus OpenStreetMap (2021))

In Tabelle 4-8 sind die Parameter des Wärmenetzes inklusive der Längen und Durchmesser zusammengefasst.

Tabelle 4-8: Eigenschaften der Abschnitte des Wärmenetzes

	Teilstrang	1	2	3	4
Thermische Übertragungsleistung	kW _{th}	130	60	40	30
Länge	m	20	20	90	130
Nenndurchmesser	DN	DN65	DN50	DN40	DN32
Druckverlust pro Trassenmeter	Pa/m	422	316	252	306
Hydraulischer Ausnutzungsgrad	%	141	105	84	102

Die Druckverluste pro Meter Trassenlänge erscheinen im Vergleich mit anderen Literaturwerten für Kalte Nahwärmenetze (100 – 300 Pa/m (Nussbaumer et al. 2017)) als etwas zu hoch und müssen in einer detaillierten Planung optimiert werden. Die gewählten Durchmesser werden für die Berechnung der Investitionen für das Wärmenetz herangezogen.

Auch wenn bei einem kalten Wärmenetz mit Temperaturen um die 10 °C wenig Verluste zu erwarten sind, werden Wärmeverluste über das Wärmenetz dennoch mitberücksichtigt. Da nur drei Abnehmer an das Wärmenetz angeschlossen würden, ist nicht davon auszugehen, dass das Netz die gesamte Zeit umgewälzt wird, sich also dadurch für dieses Temperaturniveau höhere Verluste ergeben würden. Reiners diskutiert in seiner Promotion Wärmeverluste von Netzen mit einem Temperaturniveau von 20 °C. Für Wärmenetze mit geringer Abnahme werden Netzverluste von 4 – 5 % angesetzt und bei höherer Abnahme von 2 %. (Reiners 2021) Für die Machbarkeitsstudie werden Wärmeverluste über das Netz in Höhe von 5 % festgelegt. Dies wird in der Realität etwas zu hoch sein entspricht daher einer konservativen Annahme.

4.2.5 Auslegung 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.

Eine vorhergehende Überprüfung der wasserwirtschaftlichen Genehmigungsfähigkeit ergibt, dass der Standort Gödenroth, im Speziellen das Grundstück der betrachteten Grundschule, Stand August 2021 laut der wasserwirtschaftlichen und hydrogeologischen Standortbewertung des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RLP) für die Installation von Erdwärmesondenanlagen geeignet ist (LGB-RLP 2013). Für eine genauere Einschätzung ist eine nachträgliche Beurteilung vonnöten.

Für die Geothermieauslegung wird das von Altieri (2021) entwickelte Simulationstool zur Auslegung von Erdwärmesondenfeldern verwendet, welches auf den Berechnungsansätzen von Huber, dem Entwickler der kommerziellen Berechnungssoftware EWS, beruht (Huber 2005; Kozak 2017). Mithilfe des Simulationstools von Altieri können die Fluidtemperaturen im Ein- und Austritt der Erdwärmesonden, welche sich im Laufe der betrachteten Zeit bei einer vorgegebenen Wärmeabnahme einstellen, ermittelt werden. Die Simulation erfolgt iterativ, sodass sichergestellt werden kann, dass Temperaturgrenzvorgaben eingehalten werden. Es können Aussagen zur energetischen Machbarkeit getroffen werden und überdies Schlussfolgerungen zu der notwendigen Erdwärmesondenanzahl pro Szenario und pro Heizvorlauftemperatur gezogen werden, welche in der ökonomischen Betrachtung berücksichtigt werden.

Die Betrachtung der Geothermie ergibt, dass der verfügbare Platz für ein Erdwärmesondenfeld auf dem Gelände der Grundschule unter den getroffenen Annahmen ausreichend ist, um die Wärmenetze der Szenarien Orange, Schwarz und Grün geothermisch zu speisen.

Das genaue Vorgehen der Betrachtung und die detaillierten Ergebnisse der Geothermieauslegung werden im Folgenden dargelegt. Die Eingangsdaten für das Simulationstool zur Auslegung der Erdwärmesondenfelder sind in Tabelle 4-9 aufgeführt.

Tabelle 4-9: Eingangsdaten der simulativen Auslegung des Erdwärmesondenfeldes

	Parameter	Wert	Einheit	Anmerkungen/ Referenzen
Erdreichparameter	Wärmeleitfähigkeit	3,3	W_{th}/mK	berechnet, basierend auf (LGB-RLP 2021; VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 1)
	Wärmekapazität	861	J/kgK	berechnet, basierend auf (LGB-RLP 2021; VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 1)
	Dichte	2.504	kg/m^3	berechnet, basierend auf (LGB-RLP 2021; VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 1)
	Temperaturgradient	0,03	K/m	(Koenigsdorff 2011)
Sondenfluidparameter	Massenstrom	0,29	kg/s	berechnet, für turbulente Strömung, nach Altieri (2021)
	Wärmeleitfähigkeit	0,5	W_{th}/mK	(WITTIG Umweltchemie GmbH 2018)
	Wärmekapazität	3.940	J/kgK	(WITTIG Umweltchemie GmbH 2018)
	Dichte	1.034	kg/m^3	(WITTIG Umweltchemie GmbH 2018)
	dynamische Viskosität	0,003	kg/ms	(WITTIG Umweltchemie GmbH 2018)

	Parameter	Wert	Einheit	Anmerkungen/ Referenzen
	untere Temperaturgrenze	270,15 (-3)	K (°C)	(Eisele und Rapp 2019)
Bohrlochparameter (Doppel-U-Rohr-Sonden)	Wärmeleitfähigkeit der Verfüllung	2	W_{th}/mK	(Bracke et al. 2015)
	Wärmeleitfähigkeit der Rohre	0,24	W_{th}/mK	(Bracke et al. 2015)
	Bohrlochradius	0,075	m	(Bracke et al. 2015)
	Rohrinnenradius	0,0131	m	(Bracke et al. 2015)
	Rohraußenradius	0,016	m	(Bracke et al. 2015)
	Sondenrohrabstand	0,065	m	(Bracke et al. 2015)
Sondenfeldparameter	Gesamtanzahl Sonden, Anzahl Sondenreihen und Anzahl Sonden pro Reihe	iterativ	-	iterativ, pro Szenario und Heizvorlauf-temperatur und unter Berücksichtigung der verfügbaren Fläche auf dem Gelände der Grundschule Gödenroth
	Sondenabstand	10	m	(Wesselak et al. 2017)
	Sondenlänge	100	m	(Wesselak et al. 2017)
Energiebedarf	jährl. Entzugsenergie	situativ	MWh_{th}/a	berechnet, je Szenario und je Heizvorlauf-temperatur
	monatl. Verteilung der jährl. Entzugsenergie	situativ	-	berechnet, je Szenario und je Heizvorlauf-temperatur
Simulationsparameter	Simulationsjahre	50	a	Betriebszeitraum von Erdwärmesonden (VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 2)
	Temperatur der Erdoberfläche	283,63 (10,48)	K (°C)	berechnet, Messstation Blankenrath aufgrund von örtlicher Nähe und ähnlicher Höhenlage zu Gödenroth, Mittelwert der Erdbodentemperatur in 5 cm Tiefe der letzten 10 Jahre für 2011-2020, Daten von (Deutscher Wetterdienst 2021)

Die Erdbodeneigenschaften haben einen großen Einfluss auf den möglichen Wärmeentzug der Erdwärmesonden aus dem Erdreich und sind darüber hinaus stark gebietsabhängig. In der Machbarkeitsstudie werden daher standortspezifische Erdbodendaten zu Gesteinstypen und deren Tiefe sowie Mächtigkeit berücksichtigt, welche auf Bohrungen in Gödenroth beruhen und auf Anfrage durch das LGB-RLP bereitgestellt wurden (LGB-RLP 2021). Anhand der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1 können in der Richtlinie aufgeführten Gesteinstypen zugeordnet werden (VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 1). Die für die Geothermieauslegung notwendigen Angaben zu Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte werden als anteilige Mittelwerte pro Mächtigkeit und pro Gesteinstyp berechnet, in Berücksichtigung der Längen in gewichteten Gesamtmittelwerten zusammengefasst und in Tabelle 4-9 dargestellt. Eine genauere Übersicht über die eingehenden Daten zur Bodenbeschaffenheit ist in Anhang F in Tabelle F-9 aufgeführt.

Ein weiterer entscheidender Faktor der Geothermieauslegung ist, wie viel Fläche für das Erdwärmesondenfeld zur Verfügung steht. Das nichtbebaute Gelände der Gödenrother Grundschule ist für ein Sondenfeld geeignet, da große Bereiche offene Grünflächen sind. Die für das Erdwärmesondenfeld in Frage kommende Fläche wird über OpenStreetMap abgeschätzt und ist in Abbildung 4-15 dargestellt.

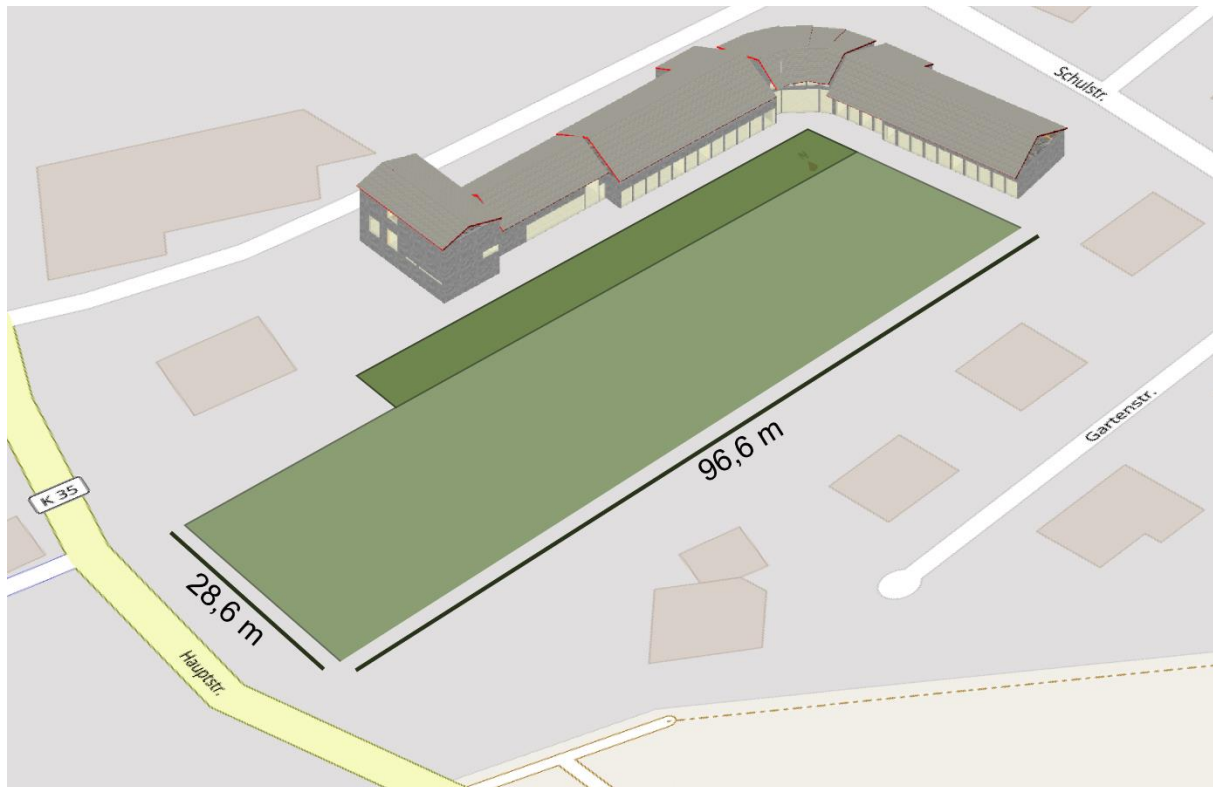


Abbildung 4-15: Verfügbare Fläche und Abmessungen für ein Erdwärmesondenfeld auf dem Grundschulgelände in Gödenroth (hinterlegtes Kartenmaterial aus OpenStreetMap (2021))

Die verfügbare Fläche für ein Erdwärmesondenfeld setzt sich aus den in Dunkelgrün (oben) und Hellgrün (unten) eingezeichneten Flächen zusammen. Da einerseits örtliche Einschränkungen im kleineren oberen dunkelgrünen Rechteck in Form einer asphaltierten Spielfläche und eines aufgeschütteten Hügels vorliegen und im Simulationstool zur Erdwärmesondenfeldauslegung andererseits lediglich Einzelsonden, Reihen und Rechtecke als Geometrien berücksichtigt werden können, wird im Weiteren ausschließlich die größere untere hellgrüne Fläche betrachtet. Die Abmessung über OpenStreetMap (2021) ergibt eine Breite von 28,6 m und eine Länge von 96,6 m, also eine Fläche von rund 2.763 m^2 . Für eine Detailauslegung des Erdwärmesondenfeldes, welche die Machbarkeitsstudie an dieser Stelle nicht leisten kann, müssten diese Abmessungen vor Ort präziser ermittelt werden.

Bei maximaler Flächenausnutzung kann also ein rechteckiges Erdwärmesondenfeld ausgelegt werden. Da es innerhalb eines Sondenfeldes zwischen den Einzelsonden bei zu kleinen Abständen zueinander zu Beeinflussungen der Entzugsleistungen kommen kann, werden Mindestabstände berücksichtigt. Es werden Sondenabstände von mindestens 6 m angegeben, allerdings bei ausreichender Fläche mindestens 10 m empfohlen, da ab diesem Abstand keine gegenseitige Beeinflussung der Erdwärmesonden mehr vorliegt (Wesselak et al. 2017). Die maximal mögliche Gesamtanzahl an Erdwärmesonden wird bei beiden Mindestabstandsvorgaben ermittelt und ergibt sich bei 10 m Sondenabstand zu 30 Sonden und bei 6 m zu 85 Sonden, siehe Tabelle 4-10.

Tabelle 4-10: Berechnete maximale Gesamtanzahlen an Erdwärmesonden bei 10 m bzw. 6 m Sondenabstand

Mindestabstand zw. Sonden	Anzahl Reihen	Anzahl Sonden pro Reihe	max. Gesamtanzahl an Sonden
min. 10 m	max. 3 Reihen	max. 10 Sonden	max. 30 Sonden
min. 6 m	max. 5 Reihen	max. 17 Sonden	max. 85 Sonden

Die Erdwärmesondenlänge wird zu 100 m betrachtet, was der üblichen Auslegungslänge bei Erdwärmesonden entspricht, da bei Erdbohrungen von mehr als 100 m Tiefe das Bergrecht berührt wird und eine gesonderte Genehmigung erforderlich wird (Wesselak et al. 2017).

Ein ausgelegtes Erdwärmesondenfeld entzieht dem Erdreich die Energiemenge, die durch den Wärmebedarf bei den Abnehmern abzüglich der elektrischen Energie der Wärmepumpen aber plus der Wärmenetzverluste vorgegeben wird. Somit wird die jährliche Wärmeentzugsenergie am Erdwärmesondenfeld und dessen monatliche Verteilung berechnet und dem Simulationstool zur Auslegung des Erdwärmesondenfeldes als Eingabeparameter übergeben. Um die jährliche Wärmeentzugsenergie zu erhalten, werden zunächst spezifische Coefficients of Performance (COP) je Heizleistung der Wärmepumpen pro Gebäude und je Heizvorlauftemperatur (55 °C, 45 °C und 35 °C) mittels der Korrelationsgleichungen von Kemmler und Thomas (2020) für Sole-Wasser-Wärmepumpen errechnet. Der COP gibt das Verhältnis von bereitgestellter Heizleistung zu hinzugefügter elektrischer Leistung an (Wesselak et al. 2017). Bei der Berechnung der COPs wird überdies eine Wärmenetztemperatur von 6 °C berücksichtigt. Anschließend werden die für die Wärmepumpen benötigte elektrischen Energien berechnet, indem die in Anhang B simulierten und zeitlich aufgelösten Wärmebedarfe pro Gebäude durch die jeweiligen COPs dividiert werden. Der Wärmebedarf der Wärmeabnehmern durch das Wärmenetz ergibt sich demnach durch die Subtraktion der elektrischen Wärmepumpenbedarfe von den Wärmebedarfen der Gebäude. Darüber hinaus werden die in Kapitel 4.2.4 dargelegten Netzverluste von 5 % beaufschlagt. Die Aufsummierung der bisher stündlich berechneten Wärmeentzugsenergien am Erdwärmesondenfeld ergibt die jährliche Entzugsenergie und die prozentuale Entzugsenergie pro Monat die monatliche Verteilung ebendieser. Die Ergebnisse der Berechnung der jährlichen Entzugsenergie sind in Tabelle 4-11 dargestellt.

Tabelle 4-11: Berechnete jährl. Entzugsenergien je Szenario und Heizvorlauftemperatur

Heizvorlauf- temperatur	Szenario Orange 3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.	Szenario Schwarz 2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.	Szenario Grün 3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.
35 °C	121,27 MWh _{th} /a	98,66 MWh _{th} /a	115,45 MWh _{th} /a
45 °C	115,28 MWh _{th} /a	93,86 MWh _{th} /a	109,77 MWh _{th} /a
55 °C	106,06 MWh _{th} /a	86,47 MWh _{th} /a	101,01 MWh _{th} /a

Die monatliche Verteilung der Entzugsenergie ist über die betrachteten Szenarien und Heizvorlauftemperaturen hinweg sehr ähnlich, weswegen sie für Szenario Orange und für eine Heizvorlauftemperatur von 35 °C beispielhaft in Abbildung 4-16 aufgeführt wird.

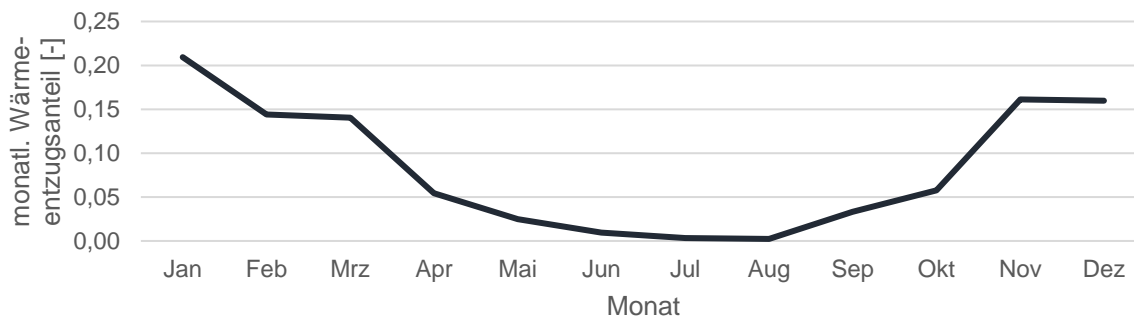


Abbildung 4-16: Monatliche Verteilung der Entzugsenergie für Szenario Orange und eine Heizvorlauftemperatur von 35 °C

Die Erdwärmesondenauslegung wird für den Simulationszeitraum von 50 Jahren vorgenommen, da dies dem üblichen Betriebszeitraum von Erdwärmesonden entspricht (VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 2). Die Auslegung wird je Szenario und je Heizvorlauftemperatur durchgeführt. Die zuvor berechneten jährlichen Entzugsenergien und deren monatliche Verteilung werden fallspezifisch berücksichtigt und die Gesamtanzahl der Sonden, Anzahl der Sondenreihen und Anzahl der Sonden pro Reihe unter Berücksichtigung des Flächenangebotes iterativ angepasst. Als Sondengeometrie wird in jedem Simulationsfall passend zur verfügbaren Außenfläche der Grundschule eine Rechtecksform gewählt. Da die Sondenfluideintrittstemperatur nach Eisele und Rapp (2019) nach 50 Jahren -3 °C nicht unterschreiten sollte und in dem Simulationsprogramm monatliche und nicht stündliche Entzugsenergien berücksichtigt werden, wird analog zu Altieri (2021) eine Auslegung dann als abgeschlossen betrachtet, wenn eingehalten wird, dass die minimale Fluidtemperatur über den Simulationszeitraum hinweg möglichst nahe 0 °C , in jedem Falle aber über $-0,5\text{ °C}$ ist. So wird davon ausgegangen, dass auch Spitzenlasten, die in den monatlichen Entzugsenergien nicht dargestellt werden können, abgedeckt werden (Altieri 2021). Das Ergebnis der Erdwärmesondenauslegung für die Sondenfluideintritts- und -austrittstemperaturen ist in beispielhaft für Szenario Orange und 35 °C Heizvorlauf-temperatur aufgeführt.

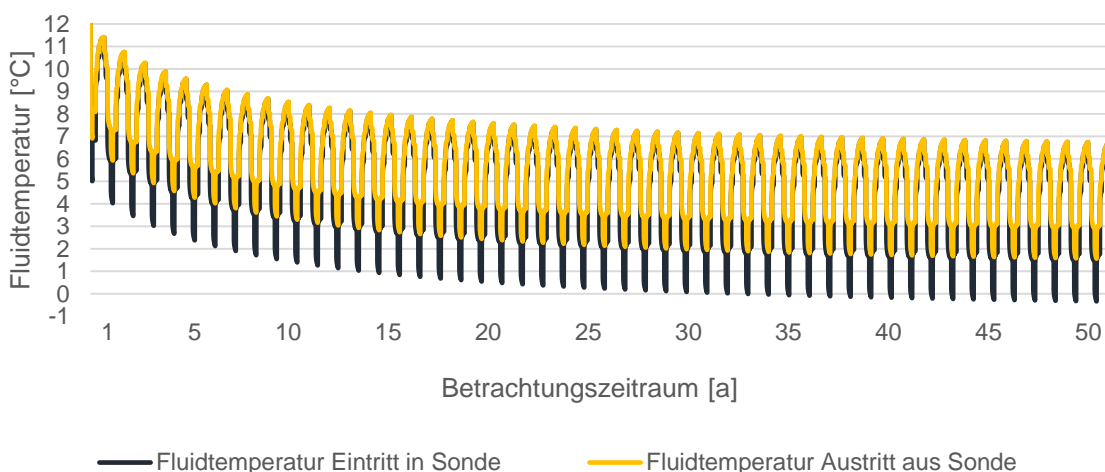


Abbildung 4-17: Sondenfluideintritts- und -austrittstemperaturen für Szenario Orange bei einer Heizvorlauftemperatur von 35 °C

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 Erdwärme-

sondenfeld bei maximaler Ausnutzung hinsichtlich einer möglichen nachträglichen Wärmenetzerweiterung hat. Die Ergebnisse der simulativen Erdwärmesondenfeldauslegung sind in Tabelle 4-12 dargestellt.

Tabelle 4-12: Ergebnisse der Erdwärmesondenfeldauslegung

	Heizvorlauf- temperatur	Sondenabstand	jährl. Entzugsenergie	Gesamt- sondenanzahl	Anzahl Sondenreihen	Anzahl Sonden pro Reihe	max. Temperatur- spreizung	Sondeneintritts- temperatur nach 50 Jahren
Szenario Orange (3Netz-3EWP- 2PV&Bat-teilsan.)	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 (2Netz-2EWP-1LWP- 2PV&Bat-ursan.)	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 (3Netz-3EWP- 2PV&Bat-vollsan.)	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 maximalen Temperaturspreizungen werden bei tatsächlichem Betrieb deutlich größer ausfallen, da die jährlichen Entzugsenergien in der durchgeführten Simulation lediglich monatlich, also durchschnittlich, berücksichtigt sind (Altieri 2021). Des Weiteren fällt auf, dass die Anzahl der notwendigen Erdwärmesonden bei höher werdender Heizvorlauftemperatur sinkt, was darauf zurückzuführen ist, dass die Wärmepumpen bei den Abnehmern zunehmend mehr elektrische Energie hinzufügen müssen, um die höheren Temperaturen zu erreichen. Damit liegen innerhalb der Wärmepumpe höhere Temperaturen vor und es kann umso weniger Wärme aus dem Wärmenetz und damit aus dem Erdwärmesondenfeld entzogen werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass über die Szenarien hinweg Sondenanzahlen von 12 bis 16 Erdwärmesonden pro Sondenfeld bei 10 m Sondenabstand ausreichend sind, um die vorgegebenen jährlichen Entzugsenergien zu decken. Die Sondenanzahlen unterschreiten also die maximal möglichen Sondenanzahlen von 30 bzw. 85 Sonden bei 10 m bzw. 6 m Sondenabstand deutlich. Überdies zeigt die Betrachtung des maximal möglichen Wärmeentzugs von 190 MWh_{th}/a Entzugsenergie bei 10 m Sondenabstand und 300 MWh_{th}/a bei 6 m deutliche Potentiale für mögliche Wärmenetzerweiterungen.

Von Seiten der Geothermie ist die Außenfläche der Grundschule Gödenroth also, basierend auf den in dieser Machbarkeitsstudie getroffenen Annahmen, ausreichend, um die Wärmebedarfe der drei Liegenschaften in allen drei Szenarien und bei allen Heizvorlauftemperaturen zu decken.

Für eine detailliertere Erdwärmesondenfeldauslegung wird empfohlen, zeitlich variierende COPs der Wärmepumpen zu betrachten, sowie Bohrlochmessung direkt an der Fläche des Erdwärmesondenfeldes vorzunehmen, um die örtlich stark abhängigen Erdbodeneigenschaften noch genauer einzuschätzen.

4.2.6 Auslegung der Luft-Wasser-Wärmepumpe

In Szenario Schwarz wird die Wärme für das Gemeindehauses mithilfe einer Luft-Wasser-Wärmepumpe bereitgestellt. Um die bereitzustellende Wärmeenergie der Wärmepumpe zu berechnen, werden erneut die Korrelationsgleichungen von Kemmler und Thomas (2020) für diesen Fall für Luft-Wasser-Wärmepumpen verwendet. Als Heizvorlauftemperaturen werden die Temperaturniveaus 55 °C, 45 °C und 35 °C der Szenarien und als Quellentemperaturen die variablen Außentemperaturen, welche auf den Wetterdaten des Testreferenzjahres, welches bereits für die Gebäudesimulation eingesetzt wurde, zugrunde gelegt. Mittels der Korrelationsgleichungen können die COPs und die jährlichen elektrischen Stromverbräuche pro Heizvorlauftemperatur berechnet werden. Die Ergebnisse der Korrelationsberechnungen sind für die Bereitstellung einer jährlich bereitgestellten thermischen Gesamtwärmeenergien der Luft-Wasser-Wärmepumpe in Tabelle 4-13 aufgeführt.

Tabelle 4-13: Kennwerte der Luft-Wasser-Wärmepumpenauslegung für das Gemeindehaus des Szenarios Schwarz bei einer jährl. bereitgestellten thermischen Energie von 28.100 kWh_{th}

Größe	VL-/ RL-Temp. von 55/ 45 °C	VL-/ RL-Temp. von 45/ 35 °C	VL-/ RL-Temp. von 35/ 30 °C
COP	2,96	3,43	3,93
jährl. Stromverbrauch	10.770 kWh _{el}	9.266 kWh _{el}	8.107 kWh _{el}

Generell sollten die Heizvorlauftemperaturen möglichst niedrig gewählt werden, sodass die Luft-Wasser-Wärmepumpe einen hohen COP und eine große thermische Leistung erreichen kann. Wirtschaftlich vorteilhaft wirken sich die im Vergleich zu Sole-Wasser-Wärmepumpen geringeren Investitionskosten von Luft-Wasser-Wärmepumpen aus. Weiterhin fallen für die jederzeit verfügbare Wärmequelle der Außenluft keine weiteren Erschließungskosten an. Analog zur Sole-Wasser-Wärmepumpe entstehen nur für den elektrischen Stromverbrauch verbrauchsgebundene Kosten. Nachteilig sind die zu den Zeiten des höchsten Wärmebedarfs im Vergleich zu den Erdbodentemperaturen bei Sole-Wasser-Wärmepumpen deutlich niedrigeren Außentemperaturen, welche überdies stark schwanken und sich in geringeren COPs für Luft-Wasser-Wärmepumpen und damit höheren elektrischen Strombedarfen niederschlagen.

Die Schwankung der Außentemperatur wird in den verwendeten Korrelationsgleichungen berücksichtigt und spiegelt sich ebenso in den COPs wider. In Abbildung 4-18 ist der Einfluss der Außentemperatur auf die temperaturabhängigen COPs für die Heizvorlauftemperatur von 55 °C dargestellt.

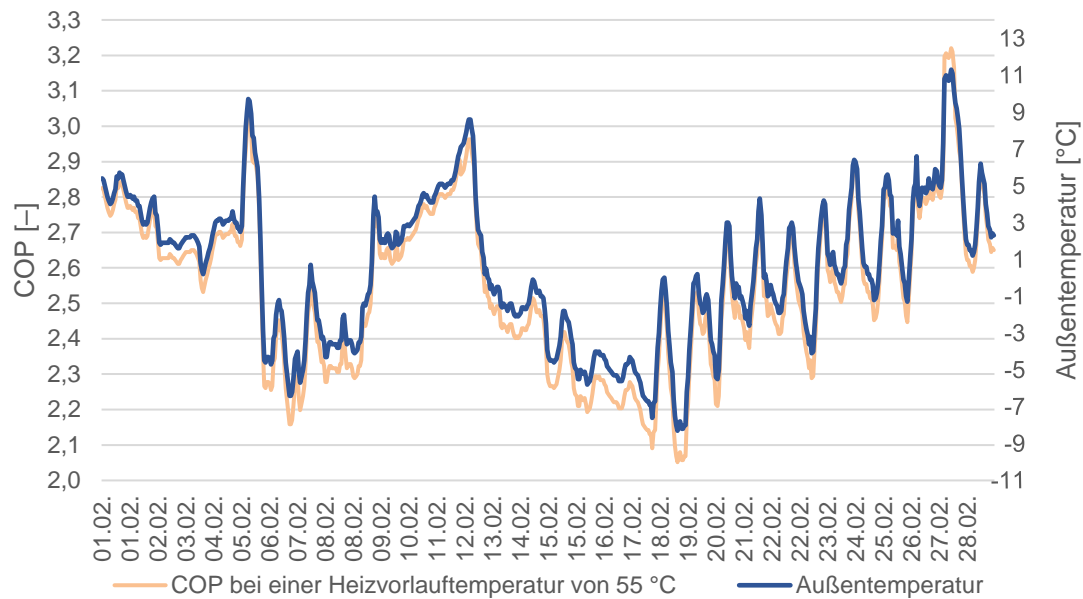


Abbildung 4-18: Variabler COP der Luft-Wasser-Wärmepumpe in Abhängigkeit der Außentemperatur im Februar des Testreferenzjahres für das Gemeindehaus des Szenarios Schwarz

Insgesamt erreicht die Luft-Wasser-Wärmepumpe für eine Heizvorlauftemperatur von 55 °C einen COP von 2,96. Dieser schwankt im Februar um 1,1 Einheiten zwischen 3,2 und 2,1. Über das ganze Testreferenzjahr hinweg schwankt der COP deutlich um 2,1 Einheiten zwischen 4,1 in den Sommermonaten und 2,0 in den Wintermonaten.

4.2.7 Auslegung der Photovoltaikanlagen

Zur anteiligen Deckung des Strombedarfs werden in den Szenarien Orange, Schwarz und Grün PV-Aufdachanlagen auf dem Gemeindehaus und auf dem Kindergarten betrachtet. Das Dach der Grundschule wird aufgrund der Information durch die Auftraggeber von nicht ausreichender Statik ausgeschlossen. Die Auslegung der Anlagen wird mithilfe einer Photovoltaik-Planungs-Software durchgeführt. Die Software berechnet auf Basis von ortsspezifischen meteorologischen Daten Ertragsvorhersagen und ermöglicht zudem die Integration von Batteriespeichern und Stromverbrauchsdaten. Somit kann der Eigenstromverbrauch simuliert und Rückschlüsse auf die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des Photovoltaiksystems gezogen werden. Die Simulationen erfordern die Bestimmung einiger Eingangsparameter sowie das Treffen von Annahmen. Diese sind in Tabelle G-10 und Tabelle G-11 im Anhang G dargestellt.

Die Dachflächen und -ausrichtungen werden auf Basis der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Daten sowie Luftbildaufnahmen abgeschätzt. Vereinfachend wird angenommen, dass 70 % der südgeneigten Dachfläche durch PV-Module belegt werden kann. Zur Simulation wird ein Monokristallines Modul eines großen Herstellers mit 335 W_p pro Modul verwendet und ein zur Anlagengröße passender Wechselrichter ausgewählt. Es werden Leitungsverluste pauschal mit 2 % berücksichtigt und Verschattungen vernachlässigt. Aus diesen Eingangsparametern ergibt sich eine PV-Anlagengröße von 21,77 kW_p, woraus ein Wechselstromertrag von 20.917 kWh_{el} im Testreferenzjahr resultiert.

Die Modellierung der Stromabnahme erfolgt über Standardlastprofile des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e.V (BDEW). Für die Simulation der PV-Anlage auf dem Dach des Gemeindehauses fließt der Stromverbrauch des Gemeindehauses sowie der des

Dorfladens ein. Der Stromverbrauch wird über die genutzte Gebäudefläche auf 6.000 kWh_{el} geschätzt. Für den Stromverbrauch des Dorfladens liegt die Angabe von 13.500 kWh_{el} vor und setzt sich aus dem Bedarf einer bereits existierenden Luft-Wasser-Wärmepumpe sowie dem von weiteren elektrischen Verbrauchern zusammen, für die jedoch keine gesonderten Daten vorliegen. Daher wird auf eine separate Betrachtung des Luft-Wasser-Wärmepumpenstroms des Dorfladens verzichtet und für den Dorfladen ein Standardlastprofil verwendet. Zusätzlich kommen im Gemeindehaus Wärmepumpen zum Einsatz, die sich je nach Szenario unterscheiden. In Szenario Schwarz wird eine Luft-Wasser-Wärmepumpe verwendet, wozu die bereits simulierten stündlichen Verbrauchsprofile verwendet werden. In Szenario Orange und Szenario Grün ersetzen die geothermisch gespeisten Wärmepumpen mit Wärmenetzbezug die Luft-Wasser-Wärmepumpe. Für das Referenzszenario Blau gibt es keinen zusätzlichen Stromabnehmer zur Wärmeversorgung.

Im Kindergarten wird analog zum Gemeindehaus vorgegangen und angenommen, dass 70 % der Dachfläche mit Modulen belegt werden kann. Daraus ergibt sich eine Peakleistung von 11 kW_p, die in einem Wechselstromertrag von 11.400 kWh_{el} für ein Testreferenzjahr resultiert. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird die Deckung des Stromverbrauchs des Kindergartens von 12.663 kWh_{el} sowie je nach Szenario auch die Wärmebereitstellung mithilfe der geothermisch gespeisten Wärmepumpe mit Wärmenetzbezug einbezogen. Wie im Gemeindehaus kommen für den Stromverbrauch der sonstigen Stromabnahmegeräte Standardlastprofile des BDEW und die Simulationsergebnisse der betrachteten Wärmepumpen zum Einsatz. Auf Basis dieser Annahmen werden für beide Gebäude der Eigenstromverbrauch sowie die Stromnetzeinspeisung berechnet.

Sensitivitätsanalyse Batteriespeicher

Aufgrund der niedrigen Einspeisevergütungen im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) von aktuell 7,25 ct/kWh_{el} für PV-Anlagen von 10 bis 40 kW_p basiert deren Wirtschaftlichkeit vor allem auf der Verwendung für den Eigenbedarf. Je höher die zeitliche Überschneidung von Stromerzeugung und Stromverbrauch, desto positiver wirkt sich dies auf die Wirtschaftlichkeit aus. Batteriespeicher können eine Möglichkeit bieten, die Eigenstromverbrauchsquote zu erhöhen, verursachen jedoch höhere Investitionskosten. Um den Einfluss eines Batteriespeichers zu untersuchen, wird eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich verschiedener Speicherkapazität durchgeführt, um zu untersuchen, wie sich ein Batteriespeicher auf den Eigenstromverbrauch auswirkt, und wird im Folgenden in Abbildung 4-19 und in Abbildung 4-21 dargestellt.

Hierbei zeigt sich, dass sich ein Batteriespeicher für das Gemeindehaus sehr positiv auf die Eigenstromverbrauchsquote auswirkt. Beispielsweise erhöht ein Stromspeicher mit einer Kapazität von 20 kWh_{el} die Eigenstromverbrauchsquote von 45 % auf 67 % und den Autarkiegrad von 35 % auf 47 % gegenüber einer PV-Anlage ohne Stromspeicher. Dies führt dazu, dass ca. 3.500 kWh_{el}/a weniger Strom aus dem Netz bezogen werden müssen.

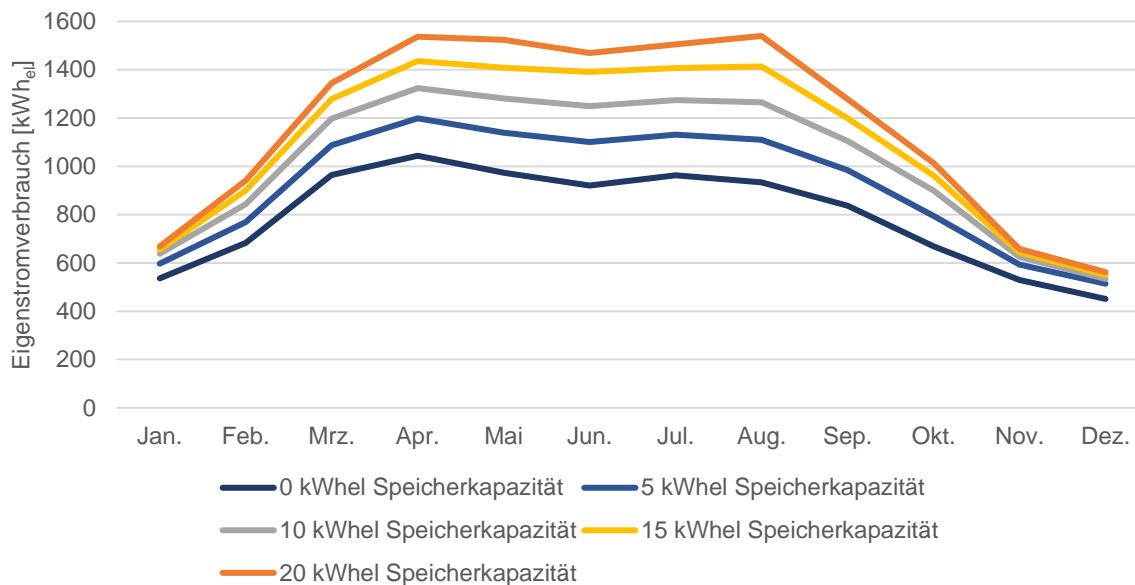


Abbildung 4-19: Eigenstromverbrauch in Abhängigkeit von verschiedenen Batteriespeicherkapazitäten im Gemeindehaus für ein Testreferenzjahr für Szenario Orange

Wie für die PV-Anlage auf dem Gemeindehaus wird auch für die PV-Anlage auf dem Kindergarten ein Batteriespeicher simuliert, um den Eigenstromverbrauchsanteil zu erhöhen. Die Sensitivitätsanalyse ist im Folgenden dargestellt und zeigt Ergebnisse für Batteriespeichergrößen zwischen 2,5 und 10 kWh_{el}.

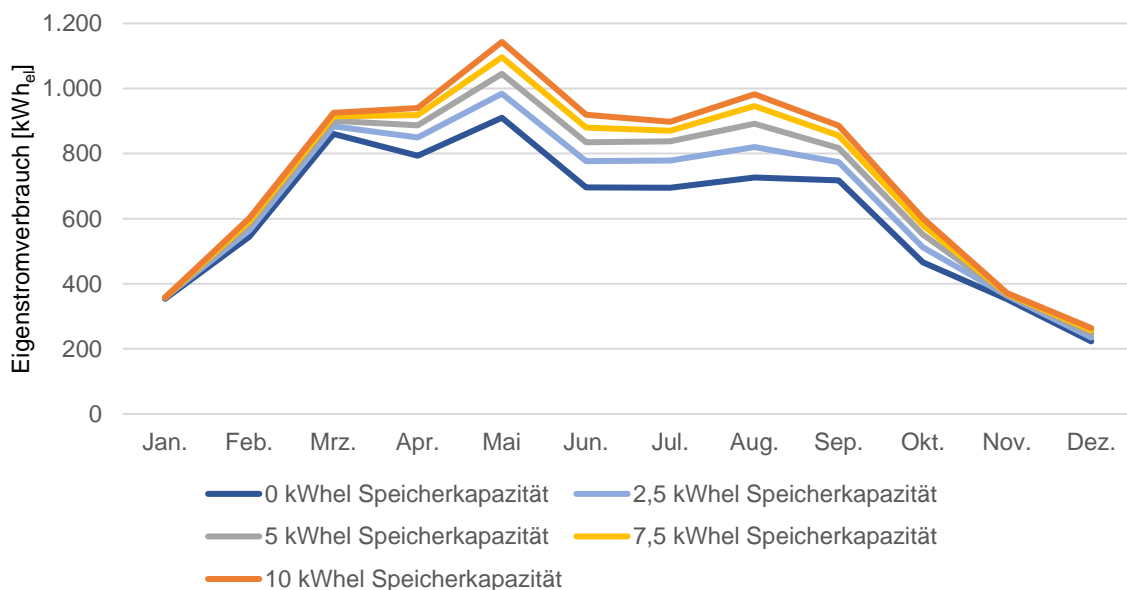


Abbildung 4-20: Eigenstromverbrauch in Abhängigkeit von verschiedenen Batteriespeicherkapazitäten im Kindergarten für ein Referenzjahr für Szenario Orange

Die Betrachtung der Sensitivitätsanalyse eines Batteriespeichers im Kindergarten ergibt ähnliche Schlussfolgerungen wie für einen Batteriespeicher im Gemeindehaus. Eine Stromspeicherkapazität von 10 kWh_{el} erhöht die Eigenstromverbrauchsquote im Vergleich zu einer Kapazität von 0 kWh_{el}, also keinem Batteriespeicher, um 14 % von 7.300 auf 8.900 kWh_{el}/a. Aufgrund des höheren Strombedarfs und der kleineren PV-Anlagengröße ist ein Stromspeicher jedoch weniger rentabel als im Gemeindehaus, da auch ohne Speicher bereits 64 % des

produzierten Stroms selbst verbraucht werden. Generell sollte die Installation eines Batteriespeichers in den Liegenschaften sorgfältig untersucht werden, da der zusätzliche Eigenstromverbrauch die höheren Investitionskosten für den Batteriespeicher ökonomisch betrachtet nicht in jedem Fall rechtfertigen kann.

4.3 Ökonomische Bewertung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird nach der Methodik der VDI 2067 aufgebaut. Diese unterteilt die Kostengruppen in **kapitalgebundene Kosten** (Investitionen), **verbrauchsgebundene Kosten** (z.B. Kosten für Brennstoffe und Strom) und **betriebsgebundene Kosten** (z.B. Wartung und Instandsetzungen). Anhand des dynamischen Kostenberechnungsverfahrens für den **Kapitalwert** werden anhand der drei Kostengruppen zu den jeweiligen Szenarien Kapitalwerte berechnet und miteinander verglichen. Mit Hilfe des Kapitalwertes können Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten berücksichtigt werden. Der Kapitalwert ist ein Indikator dafür, ob sich eine Investition über einen definierten Zeitraum rentiert. Ist der Kapitalwert ≥ 0 , sind die Einnahmen einer Investition über eine bestimmte Zeit größer als die Ausgaben. In der Konstellation der Machbarkeitsstudie werden keine Einnahmen durch den Verkauf von Wärme betrachtet, da es sich um eine Selbstversorgung handelt. Mit Ausnahme der PV-Einspeisung existieren also keine Einnahmen und die Kapitalwerte werden alle negativ werden. Der in dieser Betrachtung höchste, also absolut gesehen kleinste Kapitalwert indiziert das kostengünstigste Wärmeversorgungsszenario. Anders formuliert, der am wenigsten negative Wert hat die geringsten Aufwendungen zur Folge.

Ebenfalls werden die **Wärmegestehungskosten** (Wie teuer ist eine kWh_{th} erzeugte Wärmeinheit eines Systems?) berechnet. Dies ermöglicht einen Vergleich mit anderen Wärmeversorgungsoptionen. Berechnet werden die Wärmegestehungskosten über die kumulierten Barwerte der jeweiligen Szenarien. Die PV-Module (mit Kosten und Einspeisevergütung) werden ebenfalls mitbetrachtet und als Komponente zur Wärmeerzeugung dazugezählt. Der Haushaltsstrombedarf wird bei der Betrachtung der Wärmegestehungskosten, im Gegensatz zur Berechnung des Kapitalwertes, allerdings herausgerechnet. Die Summe der Barwerte wird abschließend durch den szenarienspezifischen Wärmebedarf pro Jahr geteilt, sodass ein Betrag in ct/kWh_{th} resultiert.

Nachfolgend werden die Randbedingungen und Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung dargestellt.

Tabelle 4-14: Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Betrachtungszeitraum	Startjahr	Kalkulatorischer Zinssatz	Einspeisevergütung	Betriebsgebundene Kosten	Energiepreis Strom	Energiepreis Pellets	Preissteigerungsrate für Energie
[a]	[-]	[%]	[ct/kWh _{el}]	[% d. Invest.]	[ct/kWh _{el}]	[ct/kWh _{th}]	[%]
Referenz							
20	2021	2	7,25	1 – 3	22,435	5	2
RUB	RUB	AG ¹	EEG21 bis 40 kW _{el}	VDI 2067	AG ¹		RUB/ EZB

¹Auftraggeber

- Innerhalb des Betrachtungszeitraums wird davon ausgegangen, dass die installierte Technologie auch eine Nutzungszeit besitzt. Es ist durchaus möglich, dass eine der Technologien vor Ablauf der 20 Jahre ausgetauscht werden muss. Da in allen Szenarien aber eine große Menge an Technologie, wie z. B. das Netz etc., verbaut ist, welche wesentlich längere Nutzungszeiten als 20 Jahre haben, wird ein vorzeitiger Austausch der Heizungstechnologie nicht betrachtet.
- Die Preissteigerungsrate für Energie wird an der Inflationsrate in Europa ausgerichtet. Die von der EZB angestrebte Inflation beträgt 2 % (Europäische Zentralbank 08.07.2021).
- Es werden keine Förderungen betrachtet. Alle Förderungen bevorteilen Szenarien mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien und eine Auflistung möglicher Förderprogramme ist daher in Kapitel 5 gegeben.
- Es werden ebenfalls keine möglichen politischen Eingriffe bewertet. Besonderes Augenmerk gilt hier dem Umgang mit biomassebasierten Versorgungsvarianten. Es ist schwierig vorherzusagen, wie sich die Politik in Zukunft zur Biomasseverwendung positionieren wird. Auf Grund von Flächenkonkurrenzen im Anbau dieser ist hier für die Zukunft besondere Aufmerksamkeit geboten.

4.3.1 Tools und Daten

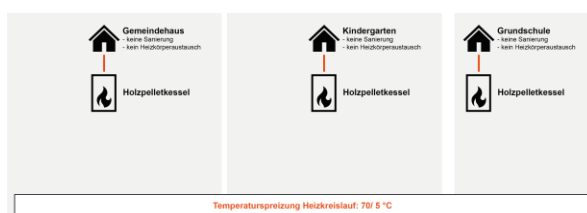
Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird ein Excel-Tool der Energieagentur.NRW weiterentwickelt, so dass es den Auswertungsbedürfnissen für dieses Projekt entspricht. Mit Hilfe des Tools ist es möglich, verschiedene Energieversorgungsvarianten miteinander zu vergleichen und die Ergebnisse grafisch auszugeben.

Die Daten der Inputgrößen basieren auf den mit dem AG abgestimmten Größen, wie Wärme- und Stromverbrauch der letzten Jahre, sowie auf Informationen zum Baualter der Gebäude und deren Aufbau. Mit der Definition der verschiedenen Szenarien und der darauf aufbauenden technischen Auslegung der Komponenten wird ein Materialgerüst definiert. Den jeweiligen Materialkosten wird nach einer Recherche ein Kostenpunkt hinzugefügt und es werden die jeweiligen Installationskosten bestimmt und ebenfalls in der Analyse mit eingerechnet.

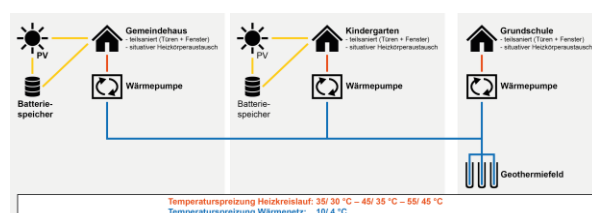
Die Auswertung der einzelnen Szenarien erfolgt nach der Festlegung auf ein definiertes Temperaturniveau der Systeme, von welchem ausgegangen wird, dass eine Wärmeversorgung mit diesem Temperaturniveau gewährleistet werden kann. Die Szenarien werden daher für die VL-/ RL-Temperatur von 55/ 45 °C bewertet. Die für dieses Temperaturniveau fehlende Heizleistung wird über die Bewertung der Kosten von zusätzlichen Heizkörpern mitberücksichtigt. Eine ausführliche Auflistung der angenommenen Kosten für jedes Szenario ist in Anhang H zu finden.

4.3.2 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

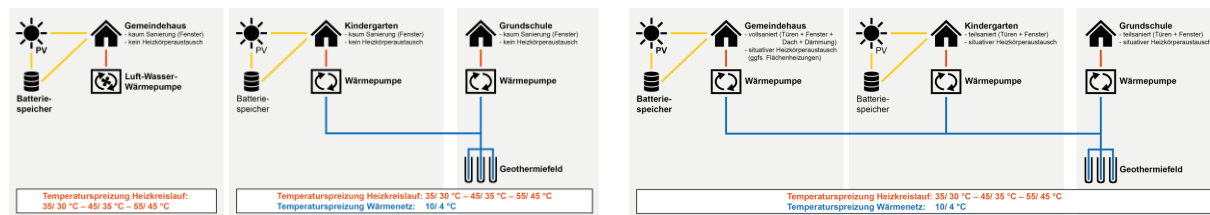
Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der ökonomischen Auswertung der Wärmeversorgungsvarianten dargestellt. Zu Visualisierungszwecken sind die einzelnen Varianten im Folgenden dargestellt.



Referenzszenario Blau (keinNetz-3Pellet-unsaniert)



Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)



Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.) Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)

Abbildung 4-21: Kurzübersicht über die Szenarien der Machbarkeitsstudie

Im Laufe der Studie werden verschiedene Temperaturniveaus betrachtet und bewertet. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird ein Temperaturniveau der Heizkreisläufe festgelegt, um ein vergleichbares Ergebnis erzielen zu können. Es wird das Szenario mit einem VL-/ RL-Verhältnis von 55/ 45 °C im Heizkreislauf festgelegt. 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. Eine Auswertung hierzu ist im weiteren Verlauf in Abbildung 4-24 dargestellt. 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 4.2.5.

In Abbildung 4-22 sind die Kapitalwerte der Szenarien aufgetragen, welche die abgezinsten Gesamtkosten über 20 Jahre kumuliert darstellen.

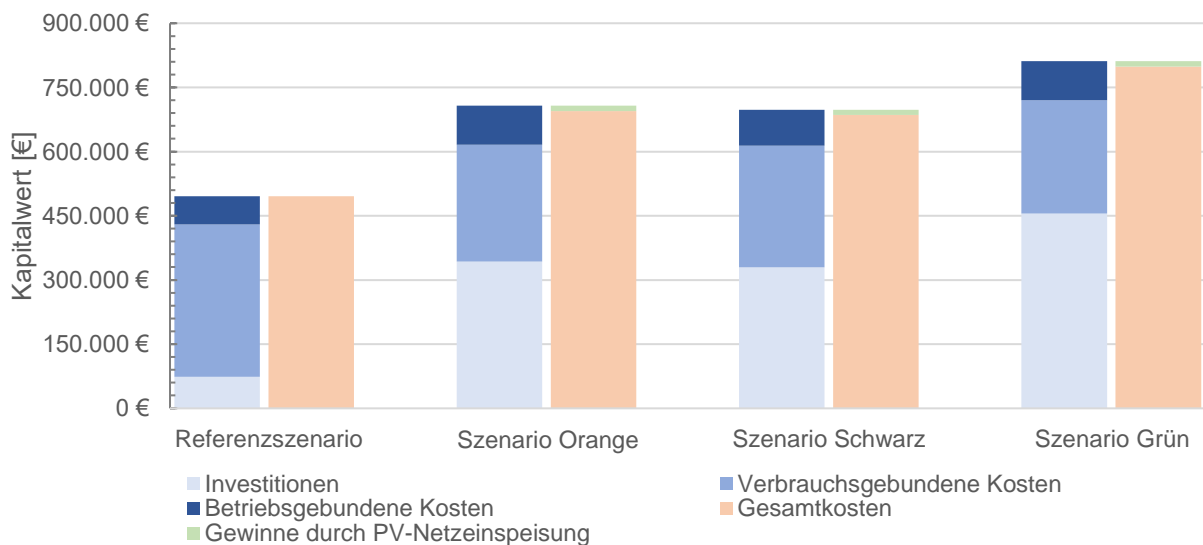


Abbildung 4-22: Absolute Kapitalwerte der Varianten und Erlöse durch PV-Erträge

Die jeweils linken Balken stellen die Kapitalwerte aufgeteilt nach Investitionen, verbrauchsgebundenen Kosten und betriebsgebundenen Kosten dar. In diesen Balken sind die Ersparnisse durch eigenverbrauchten PV-Strom sowie die Investition in die PV-Anlagen enthalten, allerdings keine Erlöse durch PV-Netzeinspeisung. Diese PV-Einspeiseerlöse werden in den Balken rechts der aufgeteilten Säulen in Grün veranschaulicht. Die um die PV-Netzeinspeisung

reduzierten Investitionskosten und verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten resultieren in den Gesamtkosten in Hellrot.

Das Referenzszenario Blau mit dem absolut gesehen kleinsten Kapitalwert stellt die kostengünstigste Versorgungsvariante dar, wohingegen das Szenario Grün mit den intensiven Dämmungsmaßnahmen am Gemeindehaus die teuerste Variante darstellt.

In Abbildung 4-23 dargestellt ist der jährliche Verlauf der Kapitalwerte. Berücksichtigt sind alle Kosten und Erlöse der Szenarien.

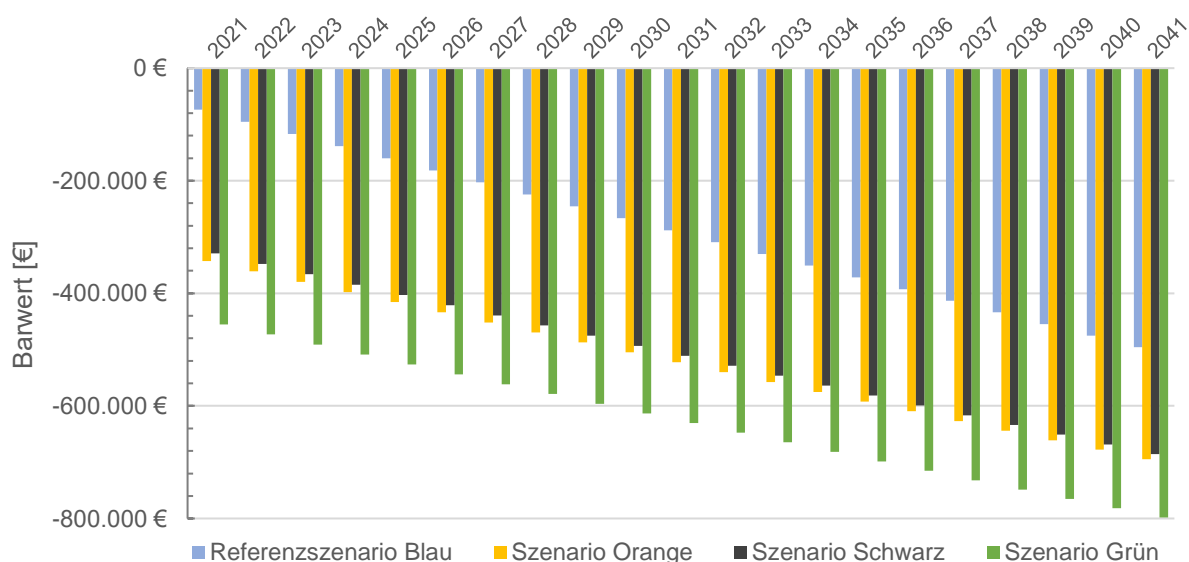


Abbildung 4-23: Kumulierte Barwerte der Gesamtkosten über 20 Jahre

Die jeweiligen Investitionen zum Start des Projektes werden in der Betrachtung der Wirtschaftlichkeitsberechnung im Jahr 2021 getätigt. Ab dem Jahr 2022 gehen nur noch die verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten in die Rechnung ein, sowie die Erlöse und Einsparungen durch die PV-Anlage. Im Jahr 2041 lässt sich ablesen, wie viel die jeweiligen Szenarien über die 20 Jahre Betrachtungszeitraum kosten. Die Kapitalwerte berücksichtigen Energiepreissteigerungsraten von 2 % und einen kalkulatorischen Zinssatz von 2 %.

Um den Einfluss verschiedener Temperaturniveaus zu verdeutlichen, sind die verbrauchsgebundenen Kosten bei verschiedenen Heizvorlauftemperaturen in Abbildung 4-24 für das erste Betrachtungsjahr dargestellt. Die sinkenden verbrauchsgebundenen Kosten bei sinkenden Heizvorlauftemperaturen der Wärmenetzszenarien sind darauf zurückzuführen, dass die Wärmepumpen bei höheren Temperaturen, also bei großen Temperaturdifferenzen zwischen Wärmequelle und Zieltemperatur in den Heizkörpern, einen schlechteren COP besitzen, da sie mehr Arbeit am Verdichter verrichten müssen und somit mehr Strom als bei kleineren Zieltemperaturen (oder kleinen Temperaturdifferenzen) verbrauchen.

Wird dann noch der für die Wärmepumpe benötigte Strom über eine PV-Anlage selber erzeugt, verbessert sich die Bilanz des Verbrauchs. Die Einspeisung von PV und die eingesparten Kosten für Strom durch Eigenverbrauch sind in der Abbildung 4-24 allerdings nicht enthalten und es werden nur die Kosten ohne PV-Anlage bewertet. In der Bewertung der Gesamtsysteme sind diese Punkte wie oben beschrieben aber dennoch mit eingeflossen.

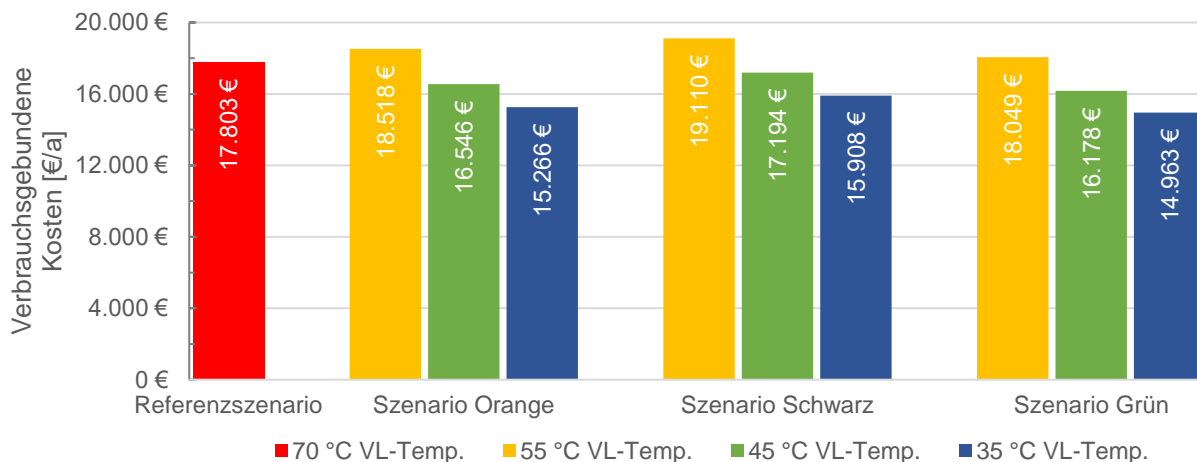


Abbildung 4-24: Vergleich der verbrauchsgebundenen Kosten bei verschiedenen Vorlauftemperaturen (ohne PV) für das erste Betrachtungsjahr

Eine Reduzierung der Vorlauftemperatur des Heizungssystems ist mit umfangreichen Sanierungsmaßnahmen und Heizflächenvergrößerungen verbunden. Wird allerdings z. B. eine Temperaturreduzierung des Heizungssystems auf 35 °C erreicht, können im Jahr rund 3.000 € Energiekosten eingespart werden.

Eine Übersicht der notwendigen Investitionen und Aufwendungen für den Betrieb sind in Tabelle 4-15 zusammengefasst. Dabei sind alle laufenden Kosten sowie auch die Gesamtkosten dynamisch berechnet worden. Um eine Vorstellung der jährlichen Zahlungen zu erhalten, lässt sich eine Annuität berechnen. Diese bildet nach Zusammenstellen aller Kosten und Erlöse eine über den Betrachtungsraum gleichbleibende Zahlung dar, in der alle dynamischen Effekte, wie kalkulatorische Zinsen, ebenfalls mit abgebildet sind.

Tabelle 4-15: Notwendige Investitionen und Kosten für den Betrieb der Szenarien

Szenario	Investitionen	Verbrauchsgebundene Kosten	Betriebsgebundene Kosten	Vergütung durch PV-Einspeisung	Gesamtkosten	Annuität	Wärmegestehungskosten
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€/a]	[ct/kWh _{th}]
Referenzszenario Blau (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

Das Ergebnis der Auswertung zeigt, dass in der Betrachtung über 20 Jahre für das Referenzszenario Blau mit etwa 73.500 € die geringsten Investitionen und für das Szenario Grün, mit

der intensiven Sanierung des Gemeindehauses, die höchsten Investitionen mit etwa 455.000 € notwendig sind. Den hohen Investitionen in Szenario Grün stehen erwartungsgemäß geringere Kosten für den Betrieb dieses Szenarios als im Referenzszenario gegenüber. Nach Abzug der Erlöse durch PV-Einspeisungen ergeben sich Gesamtkosten von 495.665 € für das Referenzszenario, 694.771 € für Szenario Orange, 685.575 € für das Szenario Schwarz und 798.431 € für das Szenario Grün.

Die Betrachtung aller aufgeführten Kosten resultiert in Wärmegestehungskosten von ca. 9 ct/kWh_{th} für das Referenzszenario Blau, 18 ct/kWh_{th} für das Szenario Orange, 17 ct/kWh_{th} für das Szenario Schwarz und 23 ct/kWh_{th} für das Szenario Grün. Die Ergebnisse sind im Einklang mit Ergebnissen von Altieri (2021), welche ähnliche Systeme in etwas größerem Maßstab betrachtet. Die Betrachtung der Wärmegestehungskosten ist allerdings nicht universal vergleichbar, da die unterschiedlichen Szenarien voneinander abweichende Wärmebedarfe haben. Dies erklärt auch, warum die Annuitäten zueinander nur um ca. 30 – 40 % abweichen, die Wärmegestehungskosten aber um mehr als 100 %. Da bei der Berechnung der Wärmegestehungskosten der Wärmebedarf im Nenner steht, wird bei einem höheren Wärmebedarf und bei ansonsten gleichen Kosten im Zähler ein wesentlich kleinerer Wärmegestehungspreis herauskommen.

4.4 Ökologische Bewertung

Im Folgenden werden die verschiedenen Szenarien zur Wärmeversorgung hinsichtlich der CO_{2eq}-Bilanz analysiert. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Wärmebereitstellung sowie der Stromnutzung. Als Technologien zur Wärmeerzeugung kommen entsprechend der Szenariendefinition Wärmepumpen und Holzpelletkessel zum Einsatz.

In einer Ökobilanzierung wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktes sowie vor- und nachgelagerte Prozesse betrachtet. Daher ist es von großer Bedeutung, Systemgrenzen zu ziehen, die eine Übersichtlichkeit in der Bilanzierung gewährleisten. Im Allgemeinen wird ein Ansatz gewählt, bei welchem die betrachteten Emissionen verschiedenen Kategorien zugeordnet werden. Konkret werden analog zu Scharte et al. (2016) bei der nachfolgenden Bewertung der verschiedenen Wärmebereitstellungstechnologien drei verschiedene Phasen unterschieden:

1. Herstellungsphase
2. Nutzungsphase
3. Entsorgungsphase

In jeder dieser Phasen fallen je nach eingesetzter Technologie unterschiedliche CO₂-Emissionen an. In der Bilanzierung der Treibhausgasemissionen werden neben CO₂ auch weitere klimawirksame Gase wie Methan oder Lachgas berücksichtigt. Zur besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Treibhausgase werden diese auf Basis ihrer Klimawirkung in CO₂-Äquivalente (CO_{2eq}) umgerechnet, sodass eine umfassendere ökologische Bilanzierung erfolgen kann.

Das Hauptaugenmerk liegt auf den durch die Nutzung der Wärmeerzeuger erzeugten Emissionen, da hier der größte Einfluss besteht. Für Emissionen, die während der Herstellungsphase und Abfallbehandlung entstehen, ist die Definition der Betrachtungsgrenzen von zentraler Bedeutung. Die Systemgrenzen werden an den Wärmeerzeugern gezogen, welche auf Basis der Arbeit von Scharte et al. (2016) berücksichtigt werden. Andere Komponenten wie Erdwärmesonden sowie Bestandteile des Wärmenetzes werden nicht berücksichtigt.

4.4.1 Herstellungsphase

Die Untersuchung von Scharte et al. (2016) zeigt, dass in der Herstellungsphase einer Wärmepumpe 77 % bzw. 56 % mehr CO₂-Äquivalente emittiert werden als bei der Herstellung eines fossilen Heizkessels bzw. Pelletkessels, siehe Tabelle 4-16. Die Wärmepumpen starten somit mit einer CO_{2eq}-Hypothek, die während der Nutzungsphase ausgeglichen werden muss. Die energieaufwendigere Herstellung von Wärmepumpen zeigt sich auch im Verbrauch der Primärenergie, in der Tabelle unterteilt in PERT (total use of renewable primary energy resources) sowie PENRT (total use of non-renewable primary energy resources), also in energetisch und stofflich verwendete erneuerbare sowie nicht erneuerbare Primärenergie.

Tabelle 4-16: CO_{2eq}-Emissionen und Primärenergieverbrauch von Wärmeerzeugern während der Herstellungsphase (Scharte et al. 2016) auf Basis von (BMI 2015)

Wärmeerzeuger	Leistung [kW]	Referenzfluss	CO ₂ -Äquivalent [kg]	PERT [MJ]	PENRT [MJ]	PERT + PENRT [MJ]
Gas-Niedertemperaturkessel	70	1 Heizkessel	1.827	1.573	24.400	25.973
Gas-Niedertemperaturkessel	260	1 Heizkessel	5.169	4.564	68.420	72.984
Gas-Brennwertkessel	70	1 Heizkessel	1.999	3.258	27.140	30.398
Gas-Brennwertkessel	260	1 Heizkessel	5.948	10.590	80.130	90.720
Öl-Niedertemperaturkessel	70	1 Heizkessel	2.167	2.076	28.780	30.856
Öl-Niedertemperaturkessel	260	1 Heizkessel	5.507	5.423	72.580	78.003
Öl-Brennwertkessel	70	1 Heizkessel	2.890	4.913	39.110	44.023
Öl-Brennwertkessel	260	1 Heizkessel	8.978	16.210	120.800	137.010
Holz-Hackschnitzelkessel	70	1 Heizkessel	2.172	888	29.600	30.488
Holz-Hackschnitzelkessel	260	1 Heizkessel	6.972	2.535	94.340	96.875
Holz-Pelletkessel	70	1 Heizkessel	2.474	1.034	33.360	34.394
Wärmepumpe	70	1 Wärmepumpe	3.851	3.196	116.900	120.096
Fernwärme Übergabestation		1 kg Masse (≈ 1 kW P _N)	6	5	86	90

P_N = Nennleistung

Die Emissionen in der Herstellungsphase der PV-Anlage werden mit 290 kg_{CO2eq} pro m² Modulfläche bilanziert und stammen hauptsächlich aus der Silizium-Gewinnung und der Wafer-Herstellung (Eichmann 2018; thinkstep AG 2018a). Die Produktion der Batteriespeicher wird mit 241 kg_{CO2eq} pro kWh_{el} Speicherkapazität berücksichtigt (thinkstep AG 2018b).

Auf Basis dieser Daten werden die CO_{2eq}-Emissionen während der Herstellungsphase der vier Szenarien näherungsweise berechnet und in Tabelle 4-17 dargestellt. Bei den angegebenen Emissionen handelt es sich um Gesamtemissionen der jeweiligen Technologieportfolios, sodass auch vorgelagerte Prozessketten und Stoffströme berücksichtigt werden. Dabei zeigt sich, dass die Szenarien mit PV-Anlage mit einer CO_{2eq}-Hypothek von ca. 60 t_{CO2eq} starten.

Tabelle 4-17: CO_{2eq}-Emissionen der Szenarien während der Herstellungsphase

Szenario	CO _{2eq} -Emissionen der Herstellungsphase [kg _{CO2eq}]
Referenzszenario Blau (keinNetz-3Pellet-unsaniert)	6.733
Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)	61.439

Szenario	CO _{2eq} -Emissionen der Herstellungsphase [kg _{CO2eq}]
Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.)	61.496
Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)	61.039

4.4.2 Nutzungsphase

Zur Nutzungsphase zählen CO_{2eq}-Emissionen, die durch den Betrieb der Wärmeerzeuger sowie des Stromverbrauchs verursacht werden.

Wärmepumpen entziehen der Umgebung Wärme und bringen diese unter Einsatz von Strom (Exergie) auf ein höheres Temperaturniveau. Je niedriger der Temperaturhub ist, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe. Abgesehen von Kältemittel-Leckagen entstehen die CO_{2eq}-Emissionen während der Nutzungsphase ausschließlich durch den Strombezug. Aus diesem Grund variieren die Emissionen stark je nach Herkunft des Stroms. Um die Ökobilanz einer Wärmepumpe zu verbessern, sollte ein möglichst großer Anteil der eingesetzten elektrischen Energie aus erneuerbaren Quellen stammen.

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

Die CO_{2eq}-Emissionen für die Wärmeerzeuger sind in Tabelle 4-18 aufgeführt. Hier zeigt sich der klare ökologische Vorteil von Wärmepumpen und Pelletkesseln gegenüber fossilen Wärmeerzeugern.

Tabelle 4-18: Spezifische CO_{2eq}-Emissionen und Primärenergieverbrauch während der Nutzungsphase (Scharte et al. 2016) auf Basis von (BMI 2015)

Wärmeerzeuger	Leistung [kW]	CO ₂ -Äquivalent [kg/kWh]	PERT [MJ/kWh]	PENRT [MJ/kWh]	PERT + PENRT [MJ/kWh]
Gas-Niedertemperaturkessel	70	0,27	0,02	4,46	4,48
Gas-Niedertemperaturkessel	260	0,26	0,01	4,36	4,37
Gas-Brennwertkessel	70	0,24	0,02	3,99	4,01
Gas-Brennwertkessel	260	0,24	0,01	3,90	3,91
Öl-Niedertemperaturkessel	70	0,34	0,02	4,77	4,79
Öl-Niedertemperaturkessel	260	0,33	0,01	4,66	4,67
Öl-Brennwertkessel	70	0,30	0,02	4,27	4,29
Öl-Brennwertkessel	260	0,29	0,01	4,18	4,19
Holz-Hackschnitzelkessel	70	0,05	5,45	0,49	5,94
Holz-Hackschnitzelkessel	260	0,04	5,37	0,48	5,85
Holz-Pelletkessel	70	0,05	4,84	0,47	5,31
Wärmepumpe	70	0,17	4,00	2,34	6,34
Fernwärme	70	0,25	0,01	3,88	3,88
Fernwärme	260	0,25	0,01	3,84	3,85

Referenzfluss: 1 kWh thermische Energie

Zur Bilanzierung der Wärmepumpen in der Nutzungsphase werden die bereits berechneten COPs verwendet, um den Stromverbrauch zu berechnen. Hiervon abgezogen werden die Einspeisung der PV-Anlagen in das Stromnetz sowie der Eigenverbrauch des PV-Stroms.

Die ökologische Bewertung des gesamten Strombezugs erfolgt mithilfe von CO_{2eq}-Emissionsfaktoren, die sich je nach Stromerzeugungsart erheblich unterscheiden, siehe Tabelle 4-19.

Tabelle 4-19: CO_{2eq}-Emissionsfaktoren von elektrischem Strom (Wernet et al. 2016; Umweltbundesamt 2021)

Energiequelle/ Energieumwandlungssystem	CO ₂ -Emissionsfaktor [g _{CO2eq} /kWh _{el}]
Braunkohle	1.220
Steinkohle	1.053
Erdgas	534
Photovoltaik	99
Windenergie, onshore	18
Dt. Strommix (2019)	470

Für die weiteren Berechnungen wird angenommen, dass der aus dem Netz bezogene elektrische Strom dem deutschen Strommix entspricht und es wird der Emissionsfaktor des Umweltbundesamtes für das Jahr 2019, ebenfalls in Tabelle 4-19 aufgeführt, verwendet. Dieser verwendet analog zu Scharte et al. (2016) die CO₂-Äquivalente der Vorketten. Die Auswahl des Jahres des verwendeten Stromemissionsfaktors hat aufgrund des hohen Einflusses der Nutzungsphase auf die Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen und des gleichzeitig hohen Anteils des Strombedarfs für die Wärmeversorgung der betrachteten Szenarien einen großen Einfluss auf die Ergebnisse dieser ökobilanziellen Betrachtung. Für das Jahr 2020 zum Zeitpunkt der Machbarkeitsstudie stehen noch keine belastbaren Stromemissionsfaktoren in Form von CO₂-Äquivalenten zur Verfügung. Zudem ist das Jahr 2020 aufgrund der Folgen der Coronapandemie ein Jahr mit vergleichsweise niedrigem Strombedarf bei nach wie vor gleichzeitigem Einspeisevorrang der erneuerbaren Energien. Dadurch wird für das Jahr 2020 ein vergleichsweise niedriger CO_{2eq}-Emissionsfaktor erwartet, der für die nahe Zukunft voraussichtlich nicht repräsentativ sein wird, weshalb das Jahr 2019 als Referenzjahr verwendet wird. Für die mittlere bis fernere Zukunft sind entsprechend der Klimaziele sinkende CO_{2eq}-Emissionsfaktoren zu erwarten, wie am Ende der ökologischen Bewertung weiter diskutiert wird. Die Ergebnisse der CO_{2eq}-Emissionsberechnung der Nutzungsphase sind in Tabelle 4-20 dargestellt.

Tabelle 4-20: CO_{2eq}-Emissionen der Szenarien während der Nutzungsphase

Szenario	CO _{2eq} -Emissionen der Nutzungsphase [kg _{CO2eq}]
Referenzszenario Blau (keinNetz-3Pellet-unsaniert)	558.554
Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)	472.013
Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.)	496.824
Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)	452.370

4.4.3 Entsorgungsphase

Die Untersuchung von Scharte et al. (2016) zeigt, dass bei der Entsorgungsphase von Wärmeerzeugern größere CO_{2eq}-Emissionen von fossilen Heizkesseln und Pelletkesseln im Vergleich zu Wärmepumpen anfallen, siehe Tabelle 4-21.

Tabelle 4-21: CO_{2eq}-Emissionen während der Entsorgungsphase (Scharte et al. 2016) auf Basis von (BMI 2015)

Wärmeerzeuger	Leistung [kW]	Referenzfluss	CO ₂ -Äquivalent [kg]	PERT [MJ]	PENRT [MJ]	PERT + PENRT [MJ]
Gas-Niedertemperaturkessel	70	1 Heizkessel	20,4	0,9	21,1	22,0
Gas-Niedertemperaturkessel	260	1 Heizkessel	62,6	3,3	67,8	71,1
Gas-Brennwertkessel	70	1 Heizkessel	40,3	1,8	40,1	41,8
Gas-Brennwertkessel	260	1 Heizkessel	136,5	6,8	139,4	146,2
Öl-Niedertemperaturkessel	70	1 Heizkessel	17,7	0,8	19,3	20,1
Öl-Niedertemperaturkessel	260	1 Heizkessel	48,3	2,7	54,7	57,4
Öl-Brennwertkessel	70	1 Heizkessel	62,0	2,9	62,5	65,4
Öl-Brennwertkessel	260	1 Heizkessel	210,4	10,6	215,3	225,9
Holz-Hackschnitzelkessel	70	1 Heizkessel	19,9	4,2	60,3	64,5
Holz-Hackschnitzelkessel	260	1 Heizkessel	70,6	16,4	223,8	240,2
Holz-Pelletkessel	70	1 Heizkessel	13,3	2,7	39,0	41,7
Wärmepumpe	70	1 Wärmepumpe	11,8	0,5	8,3	8,7
Fernwärme Übergabestation		1 kg Masse (≈ 1 kW P _N)	0,2	0,0	0,2	0,2

Einen in der Entsorgungsphase vergleichsweise größeren Einfluss auf die CO_{2eq}-Emissionen hat die Entsorgung der in den wärmepumpenbasierten Wärmenetzscenarien enthaltenen Batteriespeicher und PV-Anlagen. Es werden 22,59 kg CO_{2eq} pro kWh_{el} Speicherkapazität für den Batteriespeicher und 12,14 kg CO_{2eq} pro m² Modulfläche für die PV-Module angesetzt (thinkstep AG 2018a, 2018b).

Auf Basis dieser Daten und der festgelegten Systemgrenzen werden die CO_{2eq}-Emissionen während der Entsorgungsphase der vier Szenarien näherungsweise berechnet und in Tabelle 4-22 dargelegt.

Tabelle 4-22: CO_{2eq}-Emissionen der Wärmeerzeuger der Szenarien der Entsorgungsphase

Szenario	CO _{2eq} -Emissionen der Entsorgungsphase [kg _{CO2eq}]
Referenzszenario Blau (keinNetz-3Pellet-unsaniert)	36
Szenario Orange (3Netz-3EWP-2PV&Bat-teilsan.)	2.550
Szenario Schwarz (2Netz-2EWP-1LWP-2PV&Bat-unsan.)	2.550
Szenario Grün (3Netz-3EWP-2PV&Bat-vollsan.)	2.548

Die höheren CO_{2eq}-Emissionen in den wärmenetzbasierten Szenarien Orange, Schwarz und Grün ist auf die Verwendung der PV-Anlagen und Batteriespeicher zurückzuführen. Die insgesamt in der Entsorgungsphase entstehenden CO_{2eq}-Äquivalente sind im Vergleich zur Nutzungsphase allerdings vernachlässigbar klein.

4.4.4 Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen der Szenarien

Werden die Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase zusammen betrachtet, ergeben sich abschließend die folgenden Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen in Abbildung 4-25.

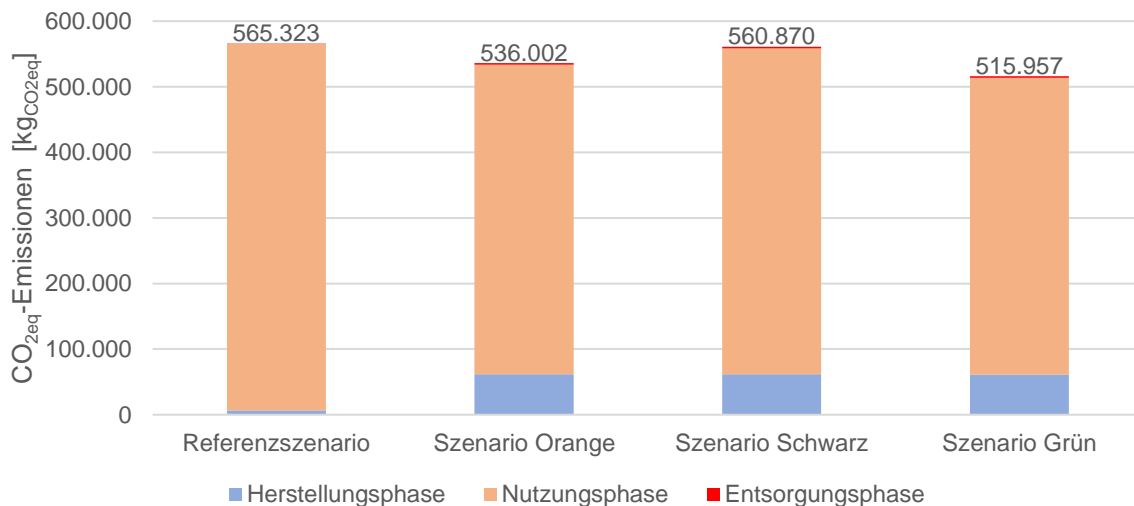


Abbildung 4-25: Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen der Szenarien aufgeteilt nach den Ökobilanzierungsphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung über den Gesamtlebenszyklus bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren

Das Referenzszenario weist mit knapp 565 t_{CO2eq} die höchsten Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen auf. Szenario Orange verfügt über 536 t_{CO2eq}, also ca. 29 t_{CO2eq} weniger Emissionen. Die Szenarien Orange und Grün unterscheiden sich um 20 t_{CO2eq}. Die CO_{2eq}-Emissionen von Szenario Schwarz sind aufgrund der Verwendung der Luft-Wasser-Wärmepumpe und dem geringeren COP um knapp 25 t_{CO2eq}, also um 5 %, höher verglichen mit Szenario Orange.

Aus der Darstellung 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. Im Referenzszenario steigt dieser Anteil auf etwa 99 %, da die Herstellung von PV-Modulen entfällt. 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. Die CO_{2eq}-Hypothek aus der Modul- und Batteriespeicherherstellung wird während der Nutzung nach einer energetischen Amortisationszeit von ca. zwei Jahren kompensiert (Quaschnig 2020). Den geringsten Anteil an den Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen hat die Entsorgungsphase mit lediglich bis zu 0,5 %.

Alle Szenarien werden unter der Annahme von konstanten Emissionsfaktoren berechnet. Zukünftig ist jedoch mit dem weiteren Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten eine Verbesserung des deutschen Strommix mit geringeren spezifischen CO_{2eq}-Emissionen zu erwarten. Somit wird sich die CO_{2eq}-Bilanz der Szenarien mit Wärmenetz verbessern. Dieser Prozess kann durch den gezielten Bezug von CO_{2eq}-emissionsarmem Strom sowie durch einen hohen Eigenverbrauch der PV-Anlage erheblich beschleunigt werden.

5. Schlussfolgerungen, Limitationen und Handlungsempfehlungen

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der Studie mit nachfolgender Fragestellung vorgestellt und darauf basierende Handlungsempfehlungen gegeben. Da die Ergebnisse im Bericht sehr ausführlich dargestellt werden, wird in diesem Kapitel eine sehr reduzierte Übersicht der Ergebnisse gegeben.

Zunächst wird auf die Fragestellung der technischen Machbarkeit dargestellt, um darauf basierend die Ergebnisse des ökonomischen Vergleichs diskutieren zu können.

Fragestellung: Ist es technisch machbar und ökonomisch darstellbar, die Heizwärmebedarfe der drei Liegenschaften durch Kalte Nahwärme in Verbindung mit Geothermie zu decken?

Ergebnisse der technischen Untersuchung

- Die Vorlauftemperatur des Heizsystems kann reduziert werden.
 - Eine VL-/ RL-Temperatur von 55/ 45 °C führt zu wenigen Stunden im Jahr, in denen die Heizlast bei der angenommenen Auslegungstemperatur von –8,7 °C nicht in allen Räumen gedeckt werden kann.
 - Diese Reduzierung führt zu der Möglichkeit, Wärmepumpen in Verbindung mit Erdwärmesonden einzusetzen.
 - Die Fläche hinter der Grundschule ist für eine geothermische Nutzung geeignet.
 - Der Platz für die Erdwärmesondenanlage ist ausreichend und bietet Platz für weitere 14 bis 59 Bohrungen (je nach Abstand der Sonden zueinander von 10 oder 6 m).
 - Bei Anschluss weiterer Abnehmer müssen die Rohrleitungsdimensionen direkt mit ausgelegt werden.
 - Die immer noch hohen Vorlauftemperaturen führen allerdings zu geringen COPs, also Leistungszahlen, der Wärmepumpen und zu einem hohen Stromverbrauch.
 - Zusätzliche Verbesserungen der Gebäudephysik (Dämmung, Fenstertausch) senken die Heizlast und daraus resultierend den Wärmebedarf.
 - Zusätzlich zum Heizsystem ist es sinnvoll, PV-Anlagen zu installieren und den selbst-erzeugten Strom in den Wärmepumpen zu verbrauchen.
- Die Ergebnisse deuten auf eine technische Machbarkeit eines kalten Nahwärmenetzes mit geothermischer Wärmequelle und Wärmepumpen hin.

Ergebnisse der ökonomischen Untersuchung

- Wärmenetzbasierte Versorgungsvarianten haben bei geringer Wärmeabnahme in der Regel höhere Investitionen zur Folge als dezentrale Einzelversorgungslösungen.
- Geringere Kosten im Betrieb eines Wärmenetzes 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 verfügt über 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€.
- Es ergeben sich Wärmegestehungskosten für die betrachteten regenerativen Wärmeversorgungsvarianten zwischen 9 und 22,5 ct/kWh_{th}. Zum Vergleich: 1 L Heizöl liegt aktuell bei ca. 70 €/L (Stand Juli 2021 (Statista 2021)), dies entspricht ungefähr

8 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.

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 tCO_{2eq}. Das Referenzszenario weist mit 565 tCO_{2eq} 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.
- 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 CO_{2eq}-Emissionen von Biomasse zu bewerten. Für die Machbarkeitsstudie ist eine Bewertung von 50 gCO_{2eq}/kWh_{th} für Biomasse gewählt worden.
- Die Gegenüberstellung der Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen und der Annuitäten je Szenario in Abbildung 5-1 vereint ökologische und ökonomische Aspekte und verdeutlicht, wie viele CO_{2eq}-Emissionen mit welchen jährlichen Zahlungen vermieden werden können.

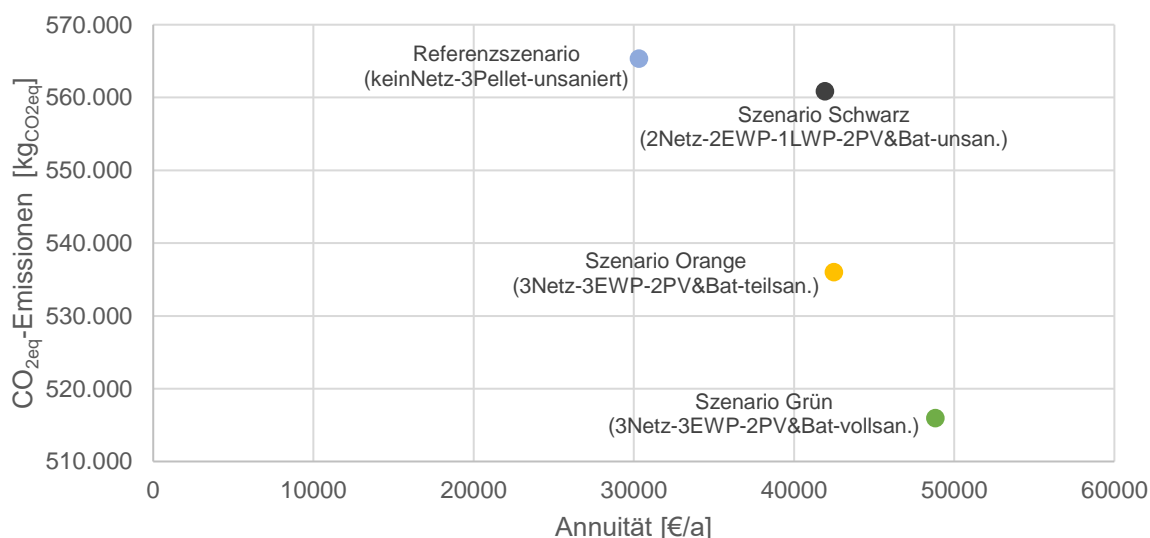


Abbildung 5-1: Gegenüberstellung der Gesamt-CO_{2eq}-Emissionen und der Annuitäten für die betrachteten Szenarien

5.2 Limitationen und Interpretationshilfe der Ergebnisse

Da alle Grundannahmen auf gebäudetypischen Werten für die Gebäudephysik aufbauen und keine genaue Untersuchung der Wandaufbauten vorgenommen wurde, sind die Ergebnisse immer **im Kontext der angesetzten Grundannahmen zu interpretieren**. Diese sind nach bestem Wissen und Gewissen gewählt und abgestimmt. Diese **Unsicherheit in den Grundannahmen** kann in der Realität zu abweichenden Heizlasten führen als in den Simulationen berechnet, was wiederum zu abweichenden Ergebnissen führen würde.

Die Ergebnisse dieser Machbarkeitsstudie ersetzen keine detaillierte Fachplanung und müssen als Hinweise, bezogen auf die **Möglichkeiten der Umsetzung**, verstanden werden.

In der Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden sonstige Kosten, wie beispielsweise **Versicherungen und Kosten für eine Fachplanung, nicht berücksichtigt**. Diese fallen für alle betrachteten Versorgungslösungen an, müssen aber für den jeweiligen Fall individuell angefragt werden. Für die Planung können in etwa 15 – 20 % der Gesamtinvestitionen veranschlagt werden.

Ebenfalls **nicht betrachtet** sind **Kleineinbauteile** der jeweiligen Versorgungsvarianten. Dazu kommen eventuell notwendige **Umwälzpumpen** zum Betreiben des Netzes. Dies kann erst eine detaillierte Netzauslegung vollständig berücksichtigen.

Die ökologische Bewertung bezieht sich rein auf die in **CO₂Äq** umgerechnete Emissionen. **Andere Wirkungsindikatoren**, wie Flächennutzung etc. sind **nicht in die Analyse** eingegangen.

In der ökologischen Betrachtung werden sowohl für Biomasse als auch für den Strommix **örtlich** sowie im Falle des Strommix auch **zeitlich durchschnittliche aktuelle Emissionsfaktoren** angesetzt. Der Emissionsfaktor kann sich im Falle der Biomasse je nach örtlichem Bezug mit Berücksichtigung von nachhaltigem oder nicht-nachhaltigem Anbau ändern. Im Falle des Emissionsfaktors des Strommix ist zu erwarten, dass dieser in Zukunft aufgrund des fortschreitenden Zubaus von Stromerzeugungstechnologien mit Erneuerbaren Energiequellen sinken wird. Welchen Emissionsfaktor der Strommix vor Ort allerdings tatsächlich hat, ist physikalisch gesehen hauptsächlich von den örtlich nächsten Stromerzeugungstechnologien abhängig.

In der Betrachtung der Kosten werden **keine Förderungen mitberücksichtigt**. Für umweltschonende und wenig CO₂ intensive Versorgungsvarianten stehen Förderprogramme zur Verfügung (Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG), Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW), Zukunftsfähige Energieinfrastrukturen (ZEIS), weitere landesspezifische Förderungen des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz (RLP)). Die größten Fördermöglichkeiten bestehen über das Bundesamt für Einfuhrkontrolle (BAFA) und die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW).

5.3 Empfehlungen

Im Folgenden werden die aus der Machbarkeitsstudie gesammelten Erkenntnisse in Empfehlungen übersetzt. Alle Empfehlungen sind unter den oben genannten Limitationen und Annahmen zu interpretieren.

Die geothermischen Potentiale sind technisch nutzbar und können verhältnismäßig einfach erschlossen werden. Der Bereich hinter der Schule stellt einen Bereich mit einer guten geothermischen Ergiebigkeit dar und kann durch die Einbringung von Erdwärmesonden weiterhin als Aufenthaltsraum für die Schüler genutzt werden.

Die Installation von PV-Modulen ist auch unter den aktuellen Einspeisetarifen wirtschaftlich, wenn der meiste erzeugte Strom selber verbraucht wird. Zusätzlich zu ökonomischen Vorteilen bietet die Installation von PV-Modulen einen ökologischen Vorteil. Eine Installation von PV-Modulen auf Gemeindehaus und Kindergarten erscheint daher sinnvoll.

Bezogen auf die Heizsysteme der einzelnen Gebäude wird unabhängig vom Versorgungssystem eine Senkung der Vorlauftemperatur der Heizkörper empfohlen. Hierfür müssen für jeden Raum individuelle Untersuchungen durchgeführt werden. Die ersten Analysen zeigen allerdings, dass Anpassungen der Vorlauftemperaturen von bis zu 15 °C durchaus für den Großteil der betrachteten Räume darstellbar sind. Dies bedeutet für den betrachteten Fall eine Anpassung auf ca. 55 °C Vorlauftemperatur. Eine Reduzierung der Vorlauftemperaturen führt zu Energieeinsparungen, was zu einer Kostenreduktion im Betrieb und zu Einsparungen von CO₂-Emissionen führt.

Mit gesenkten Vorlauftemperaturen ist es möglich, die Wärmeversorgung auf eine Wärmepumpe umzustellen. Wird der Strom über PV-Anlagen selber erzeugt, wird der Vorteil eines Wärmepumpensystems erhöht und die Unabhängigkeit vom Netzstrom gesteigert.

Gesenkte Vorlauftemperaturen können dazu führen, dass die zur Verfügung stehende Heizlast des Raumes nicht mehr über das vorhandene Heizungssystem gedeckt werden können. Für die dadurch entstehende Differenz müssen Lösungen gefunden werden, ansonsten wird in den Räumen nicht die Raumsolltemperatur erreicht. Maßnahmen können sein: Ergänzung von weiteren Heizkörpern, Austausch von bestehenden Heizkörpern mit Heizkörpern größeren Volumens und damit größerer Austauschfläche, Installation einer Flächenheizung, Installation von Ventilatoren unter den Heizkörpern oder aber das Installieren eines Lüftungssystems, in welchem die Zuluft vorgewärmt wird und somit die fehlende Heizleistung in den jeweiligen Räumen gedeckt werden kann.

Gerade im Bereich der Schule und des Kindergartens kann es technisch von Vorteil sein, eine mechanische Lüftungsanlage zu installieren, mit welcher die Differenz zur benötigten Heizlast gedeckt werden kann. Ein zusätzlicher Vorteil einer Lüftungsanlage ist die Steigerung der hygienischen Luftbedingungen in den Räumen und würde somit einen Doppelnutzen erzielen.

Der Einsatz von nachwachsender Biomasse ohne Flächenkonkurrenz mit anderen Agrarprodukten stellt eine attraktive Versorgungsmöglichkeit zur Bereitstellung von Wärme dar. Die Bewertung von Biomasse hinsichtlich ihrer Emissionen, Flächenkonkurrenzen und Nachhaltigkeit durch z. B. nachhaltiger Forstwirtschaft ist sehr stark abhängig vom jeweiligen Standort und kann nicht pauschal als positiv oder negativ bewertet werden.

Eine Auseinandersetzung mit aktuellen Förderprogrammen wird empfohlen, da die untersuchten Technologien und Umstellungen zurzeit gute Förderquoten erhalten. Ein Ausschnitt der möglichen Förderprogramme ist in Kapitel 5.1 gegeben. Besonders interessant erscheint das Förderprogramm „Bundesförderung effiziente Wärmenetze“ (BEW), in welchem Förderungen für den Betrieb von Wärmenetzen mit hohem Anteil regenerativer Energien angedacht werden. Höhere Wärmegestehungskosten sollen nicht dazu führen, eine Investition in eine klimafreundliche Technologie, die etwas teurer ist, nicht zu tätigen. Eine Veröffentlichung der Förderrichtlinie wird im Herbst 2021 erwartet.

Darüber hinaus wird eine wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung und ein Monitoring des Betriebs nahegelegt, um Messdaten zu erheben, diese kontinuierlich wissenschaftlich auszuwerten und eine kontinuierliche Betriebsoptimierung durchzuführen.

Literaturverzeichnis

Åberg, Magnus; Carlsson, Jonas; Nilsson, Annica M. (2018): Improved efficiency for distribution and use of district heating: A simulation study of retrofitting a Swedish apartment complex from the 1970's. In: *Journal of Building Engineering* 20, S. 559–568. DOI: 10.1016/j.job.2018.09.005.

AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (2021): Der Begriff der Fernwärme. Online verfügbar unter <https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/recht/avbfernwaermev/der-begriff-der-fernwaerme/>, zuletzt geprüft am 30.04.2021.

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

BMI (2015): ÖKOBAUDAT. Hg. v. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. Online verfügbar unter https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db1.html#bereich1, zuletzt aktualisiert am 14.07.2021, zuletzt geprüft am 14.07.2021.

Bracke, Rolf; Rocholl, Walter; Schmidt, Benno; Bussmann, Gregor; Eicker, Timm; Kelz, Bettina (2015): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. LANUV-Fachbericht 40. Teil 4 - Geothermie. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). Recklinghausen, zuletzt geprüft am 16.08.2021.

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.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW e.V. (Hg.) (2019): Wie heizt Deutschland 2019? BDEW-Studie zum Heizungsmarkt. Berlin, zuletzt geprüft am 25.06.2021.

Deutscher Wetterdienst (2021): Climate Data Center. Stündlich aufgelöste historische Bodentemperaturen in Deutschland. Offenbach. Online verfügbar unter https://open-data.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/soil_temperature/historical/, zuletzt geprüft am 22.08.2021.

DIN Norm Nationaler Anhang DIN/TS 12831-1:2020-04, April 2020: DIN/TS 12831-1:2020-04, zuletzt geprüft am 29.06.2021.

Eichmann, Eugen (2018): Klimabilanz Photovoltaik: Wie groß ist der CO₂-Fußabdruck von Solarstrom? Hg. v. Energieagentur NRW. Online verfügbar unter https://www.energieagentur.nrw/mediathek/Praesentation/klimabilanz_photovoltaik_wie_gross_ist_der_co2-fussabdruck_von_solarstrom, zuletzt geprüft am 16.08.2021.

Eisele, Michael; Rapp, Christoph (2019): Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme. LANUV-Arbeitsblatt 39. Hg. v. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). Recklinghausen, zuletzt geprüft am 22.08.2021.

Europäische Kommission (2019): A European Green Deal. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, zuletzt aktualisiert am 25.08.2021, zuletzt geprüft am 29.08.2021.

- Europäische Kommission (2021): A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2021, zuletzt geprüft am 29.08.2021.
- Europäische Zentralbank (08.07.2021): EZB-Rat verabschiedet neue geldpolitische Strategie. Online verfügbar unter <https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2021/html/ecb.pr210708~dc78cc4b0d.de.html>, zuletzt geprüft am 20.08.2021.
- Eurostat (2021): Energy Dashboard. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_dashboard/endash.html?geo=DE&year=2019&language=DE&detail=1&nrg_bal=&unit=MTOE&chart=chart_1,chart_2,chart_3,chart_4,chart_5,chart_8&modal=0, zuletzt aktualisiert am 20.05.2021, zuletzt geprüft am 29.08.2021.
- 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-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg, Germany, zuletzt geprüft am 25.03.2021.
- Harrestrup, Maria; Svendsen, Svend (2015): Changes in heat load profile of typical Danish multi-storey buildings when energy-renovated and supplied with low-temperature district heating. In: *International Journal of Sustainable Energy* 34 (3-4), S. 232–247. DOI: 10.1080/14786451.2013.848863.
- 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.
- Kemmler, Thomas; Thomas, Bernd (2020): Simulation von Wärmepumpensystemen auf der Grundlage von Korrelationsfunktionen für die Leistungsdaten der Wärmepumpe. In: 16. Symposium Energieinnovation, 12.-14.02.2020, Graz/ Austria, S. 1–12, zuletzt geprüft am 10.06.2021.
- Koenigsdorff, Roland (2011): Oberflächennahe Geothermie für Gebäude. Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- 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.
- LGB-RLP (2013): Wasserwirtschaftliche und hydrogeologische Standortbewertung zur wasserrechtlichen Genehmigungsfähigkeit von Erdwärmesonden. Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz. Online verfügbar unter https://mapclient.lgb-rlp.de/?app=lgb&view_id=12), zuletzt geprüft am 16.08.2021.

- LGB-RLP (2021): Bohrlochdaten für den Standort Gödenroth, bereitgestellt durch das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz von Herrn Dipl.-Geol. Christian Heinz. Bochum, 10.06.2021 an Christine Nowak. E-Mail.
- Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks". 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU. Online verfügbar unter https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebäudebestand/episcope/2015_IWU_LogaEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3%A4udetypologie.pdf, zuletzt geprüft am 07.08.2021.
- 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.
- Millar; Burnside; Yu (2019): An Investigation into the Limitations of Low Temperature District Heating on Traditional Tenement Buildings in Scotland. In: *Energies* 12 (13), S. 1–17. DOI: 10.3390/en12132603.
- Nussbaumer, Thomas; Thalmann, Stefan; Jenni, Andres; Ködel, Joachim (2017): Planungshandbuch Fernwärme. Hg. v. EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE. Bern. Online verfügbar unter http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-px-521820.pdf.
- OpenStreetMap (2021): Kartenausschnitt Gödenroth. Online verfügbar unter <https://www.openstreetmap.de/>, zuletzt geprüft am 16.08.2021.
- Østergaard, Dorte; Svendsen, Svend (2017): Space heating with ultra-low-temperature district heating – a case study of four single-family houses from the 1980s. In: *Energy Procedia* 116, S. 226–235. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.070.
- 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 (2016a): 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.
- Østergaard, Dorte Skaarup; Svendsen, Svend (2016b): Theoretical overview of heating power and necessary heating supply temperatures in typical Danish single-family houses from the 1900s. In: *Energy and Buildings* 126, S. 375–383. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.034.
- Østergaard, Dorte Skaarup; Svendsen, Svend (2019): Costs and benefits of preparing existing Danish buildings for low-temperature district heating. In: *Energy* 176, S. 718–727. DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.186.
- Pehnt, Martin (2017): Wärmenetzsysteme 4.0. Endbericht - Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme "Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen". Heidelberg, Berlin, Düsseldorf, Köln, zuletzt geprüft am 30.04.2021.
- Ploskić, Adnan; Wang, Qian; Sadrizadeh, Sasan (2019): A holistic performance evaluation of ventilation radiators – An assessment according to EN 442-2 using numerical simulations. In: *Journal of Building Engineering* 25, S. 100818. DOI: 10.1016/j.jobee.2019.100818.

Quaschnig, Volker (2020): Energieaufwand zur Herstellung von Photovoltaikanlagen. Online verfügbar unter <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.php>, zuletzt aktualisiert am 27.08.2021, zuletzt geprüft am 27.08.2021.

Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Albers, Karl-Josef (Hg.) (2020): Taschenbuch für HEIZUNG+KLIMATECHNIK. Einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. 80. Aufl. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH, zuletzt geprüft am 29.06.2021.

Reiners, Tobias (2021): Wärmeversorgung eines Quartiers mit einem kalten Wärmenetz am Beispiel der Wärmenutzung aus Grubenwasser in der Wasserstadt Aden. Bochum (Schriftenreihe des Lehrstuhls Energiesysteme und Energiewirtschaft, 42).

Rønneseth, Øystein; Holck Sandberg, Nina; Sartori, Igor (2019): Is It Possible to Supply Norwegian Apartment Blocks with 4th Generation District Heating? In: *Energies* 12 (5), S. 1–19. DOI: 10.3390/en12050941.

Safizadeh, M. Reza; Watly, Lukasz; Wagner, Andreas (2019): Evaluation of Radiant Heating Ceiling Based on Energy and Thermal Comfort Criteria, Part II: A Numerical Study. In: *Energies* 12 (18), S. 1–23. DOI: 10.3390/en12183437.

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 (2021): Monatlicher Heizölpreis bis Juli 2021 | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1692/umfrage/preis-fuer-einen-liter-leichtes-heizoel-monatsdurchschnittswerte/>, zuletzt aktualisiert am 01.09.2021, zuletzt geprüft am 01.09.2021.

VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 2, 2019: Thermische Nutzung des Untergrunds. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, zuletzt geprüft am 29.06.2021.

VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 1, 2010: Thermische Nutzung des Untergrunds. Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, zuletzt geprüft am 10.06.2021.

thinkstep AG (2018a): Photovoltaiksystem 1000 kWh/m²*a. Hg. v. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, zuletzt aktualisiert am 16.08.2021, zuletzt geprüft am 16.08.2021.

thinkstep AG (2018b): Prozess-Datensatz: Lithium Eisenphosphat (LFP) Batterie (pro 1kWh Speicherkapazität) (de). Hg. v. Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, zuletzt aktualisiert am 16.08.2021, zuletzt geprüft am 16.08.2021.

Tunzi, Michele; Østergaard, Dorte Skaarup; Svendsen, Svend; Boukhanouf, Rabah; Cooper, Edward (2016): Method to investigate and plan the application of low temperature district heating to existing hydraulic radiator systems in existing buildings. In: *Energy* 113, S. 413–421. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.033.

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.

Umweltbundesamt (2021): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021_0.pdf, zuletzt geprüft am 14.07.2021.

van der Ploeg, Pieter; Ghani, Sarfraz; Bosscher René (2019): Test report SpeedComfort. Unter Mitarbeit von Pieter van der Ploeg, Sarfraz Ghani und Bosscher René. Hg. v. JOA Projects B.V. Den Dolder, Netherlands.

Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.

Wesselak, Viktor; Schabbach, Thomas; Link, Thomas; Fischer, Joachim (2017): Handbuch Regenerative Energietechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, zuletzt geprüft am 22.08.2021.

WITTIG Umweltchemie GmbH (2018): Glysofor TERRA – Spezifikation. Produktinformationen. Hg. v. WITTIG Umweltchemie GmbH. Online verfügbar unter <https://www.glysofor.de/pdf/Glysofor-TERRA-Spezifikation-D.pdf>, zuletzt geprüft am 22.08.2021.

Zentrale Stelle Geodateninfrastruktur Rheinland-Pfalz (2021): Geoportal RLP. Online verfügbar unter <https://www.geoportal.rlp.de/>, zuletzt aktualisiert am 29.06.2021, zuletzt geprüft am 29.06.2021.

Anhang

Anhang A Gebäudemodelle und Raumlisten.....	69
Anhang B Wärmelastprofile der Liegenschaften und Szenarien.....	77
Anhang C Berechnung der Heizkörperleistungen	78
Anhang D Kritische Heizkörper	80
Anhang E Rohrdimensionen Wärmenetz	85
Anhang F Daten zur Bodenbeschaffenheit Gödenroth	86
Anhang G Annahmen PV-Module	87
Anhang H Mengen und Kostengerüst der jeweiligen Szenarien	88

Anhang A Gebäudemodelle und Raumlisten

A.1 Kita

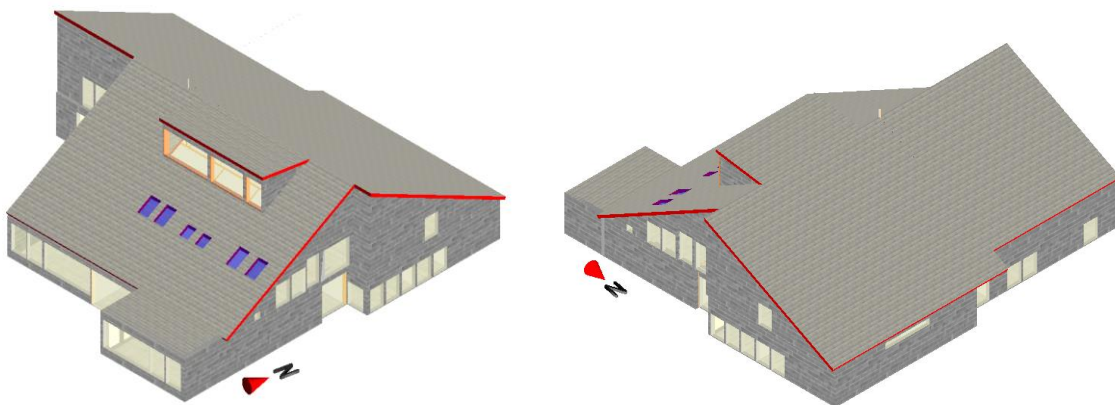


Abbildung A-1: Gebäudemodelle Kita (erstellt mit mh-Software)

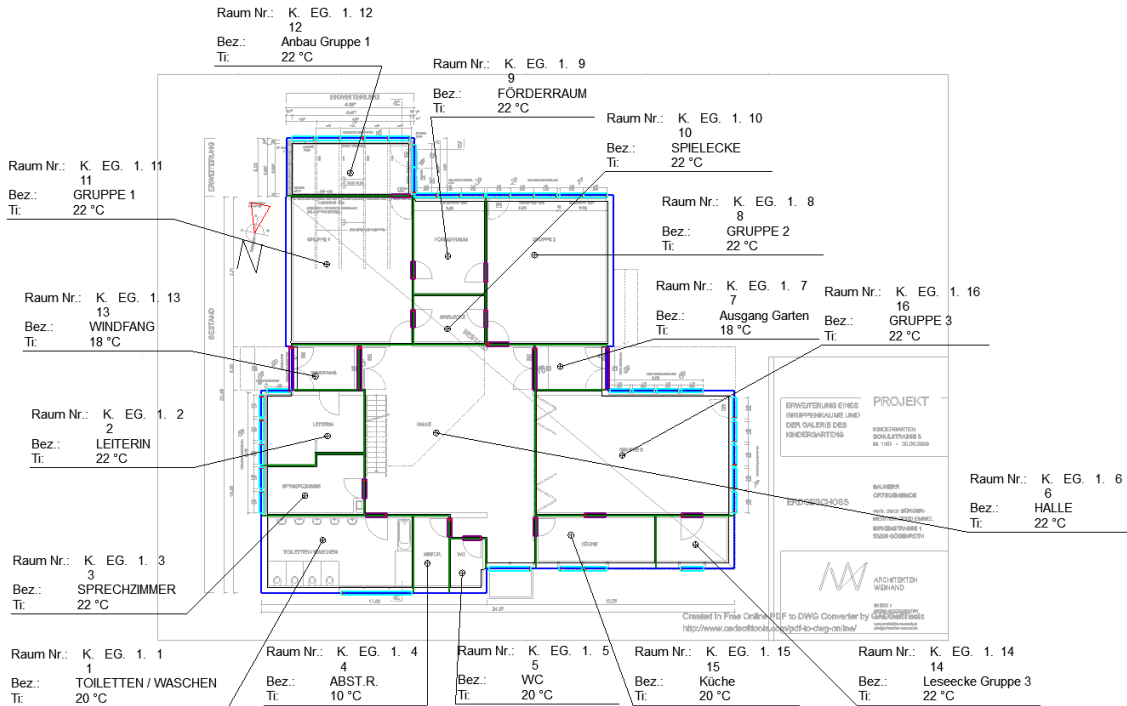


Abbildung A-2: Kita Erdgeschoss (erstellt mit mh-Software)

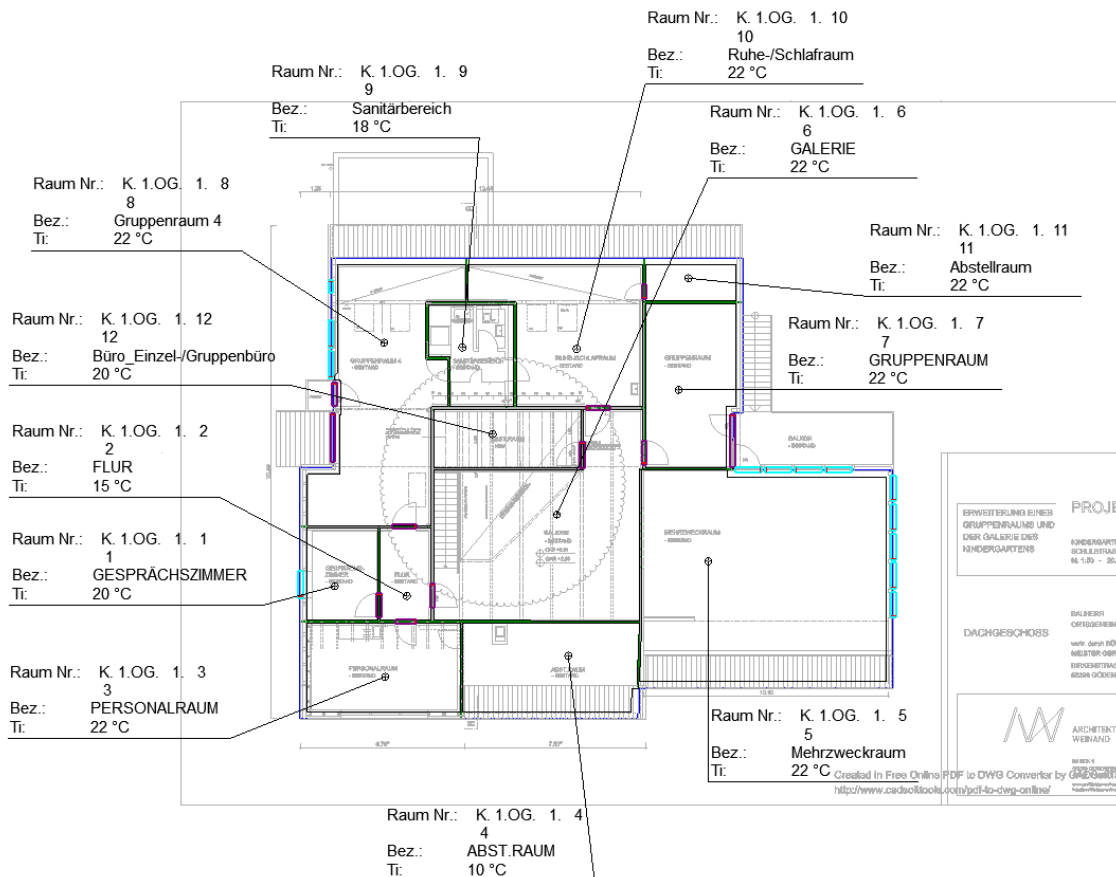
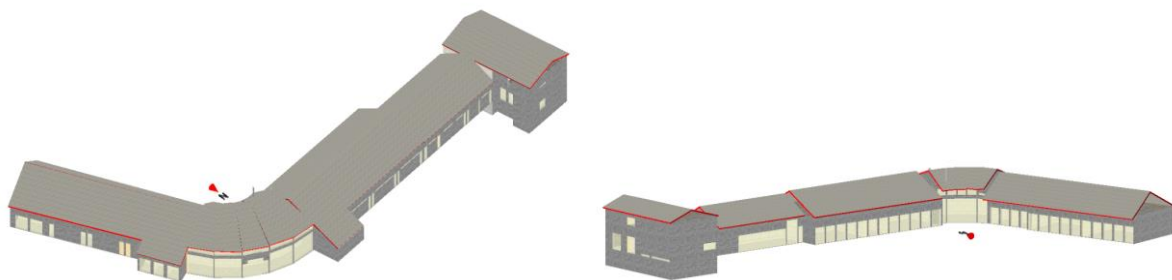


Abbildung A-3: Kita Obergeschoss (erstellt mit mh-Software)

Tabelle A-1: Raumliste und Raumsolltemperaturen Kita

Stock	Raum	Bezeichnung	Raumtemperatur [°C]
EG	1	TOILETTEN/ WASCHEN	20
EG	2	LEITERIN	22
EG	3	SPRECHZIMMER	22
EG	4	ABST.R.	10
EG	5	WC	20
EG	6	HALLE	22
EG	7	Ausgang Garten	18
EG	8	GRUPPE 2	22
EG	9	FÖRDERRAUM	22
EG	10	SPIELECKE	22
EG	11	GRUPPE 1	22
EG	12	Anbau Gruppe 1	22
EG	13	WINDFANG	18
EG	14	Lesecke Gruppe 3	22
EG	15	Küche	20
EG	16	GRUPPE 3	22
1.OG	1	GESPRÄCHSZIMMER	20
1.OG	2	FLUR	15
1.OG	3	PERSONALRAUM	22
1.OG	4	ABST.RAUM	10
1.OG	5	Mehrzweckraum	22
1.OG	6	GALERIE	22
1.OG	7	GRUPPENRAUM	22
1.OG	8	Gruppenraum 4	22
1.OG	9	Sanitärbereich	18
1.OG	10	Ruhe-/ Schlafrum	22
1.OG	11	Abstellraum	10
1.OG	12	Büro_Einzel-/ Gruppenbüro	20

A.2 Grundschule

**Abbildung A-4:** Gebäudemodelle Grundschule (erstellt mit mh-Software)

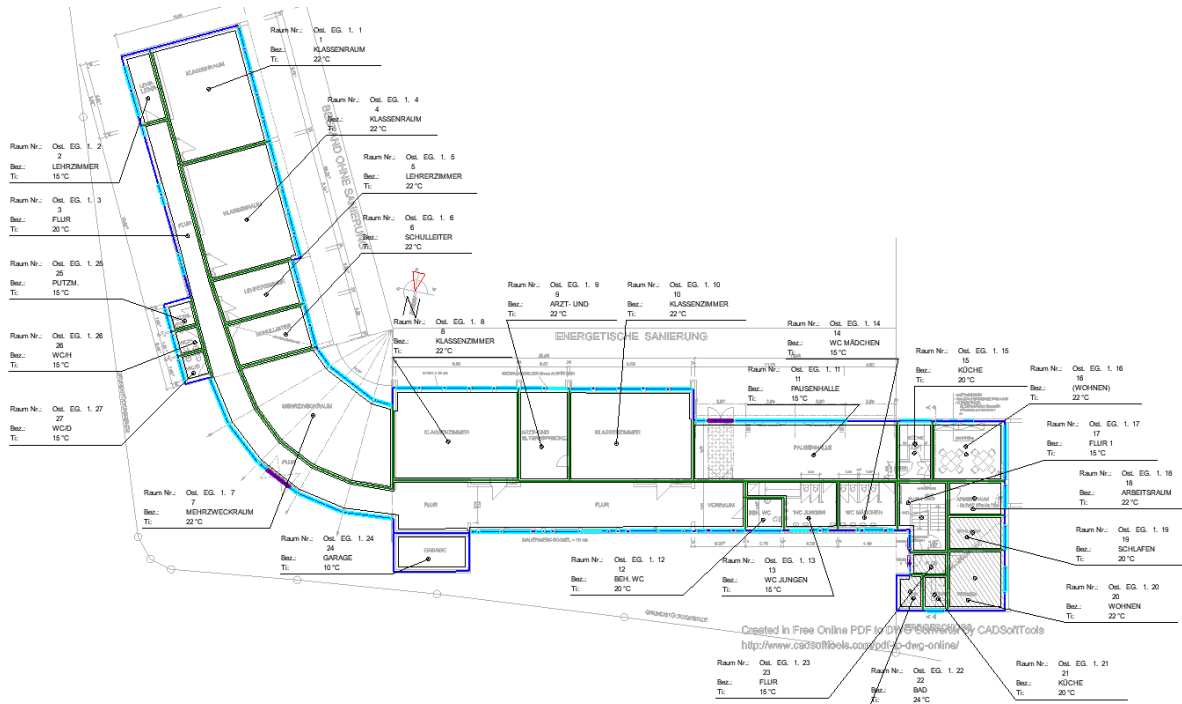


Abbildung A-5: Plan Hauptgebäude Schule (erstellt mit mh-Software)

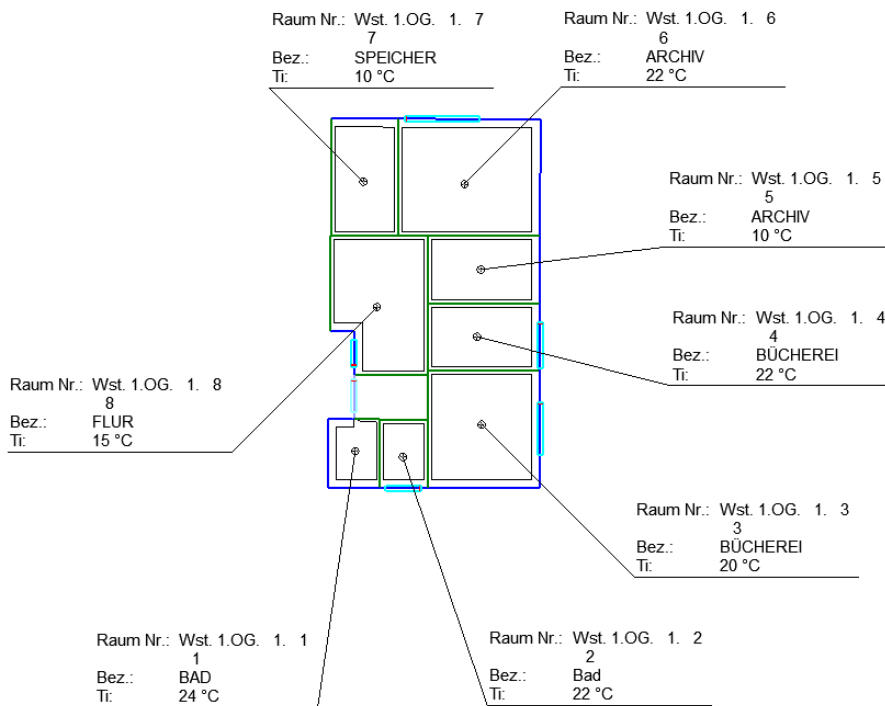


Abbildung A-6: Plan Obergeschoss Anbau Schule (erstellt mit mh-Software)

Tabelle A-2: Raumliste und Raumsolltemperaturen Schule

Gebäude	Stock	Raum	Bezeichnung	Raumtemperatur [°C]
Ost	EG	1	KLASSENRAUM	22

Gebäude	Stock	Raum	Bezeichnung	Raumtemperatur [°C]
Ost	EG	2	LEHRZIMMER	15
Ost	EG	3	FLUR	20
Ost	EG	4	KLASSENRAUM	22
Ost	EG	5	LEHRERZIMMER	22
Ost	EG	6	SCHULLEITER	22
Ost	EG	7	MEHRZWECKRAUM	22
Ost	EG	8	KLASSENZIMMER	22
Ost	EG	9	ARZT- UND	22
Ost	EG	10	KLASSENZIMMER	22
Ost	EG	11	PAUSENHALLE	15
Ost	EG	12	BEH. WC	20
Ost	EG	13	WC JUNGEN	15
Ost	EG	14	WC MÄDCHEN	15
Ost	EG	15	KÜCHE	20
Ost	EG	16	(WOHNEN)	22
Ost	EG	17	FLUR 1	15
Ost	EG	18	ARBEITSRAUM	22
Ost	EG	19	SCHLAFEN	20
Ost	EG	20	WOHNEN	22
Ost	EG	21	KÜCHE	20
Ost	EG	22	BAD	24
Ost	EG	23	FLUR	15
Ost	EG	24	GARAGE	10
Ost	EG	25	PUTZM.	15
Ost	EG	26	WC H	15
Ost	EG	27	WC D	15
Ost	1 OG	1	Decke Eingangsbereich	15
Wst	1.OG	1	BAD	24
Wst	1.OG	2	Bad	22
Wst	1.OG	3	BÜCHEREI	20
Wst	1.OG	4	BÜCHEREI	22
Wst	1.OG	5	ARCHIV	10
Wst	1.OG	6	ARCHIV	22
Wst	1.OG	7	SPEICHER	10
Wst	1.OG	8	FLUR	15
Wst	1.UG	1	KELLER	22

A.3 Gemeindehaus

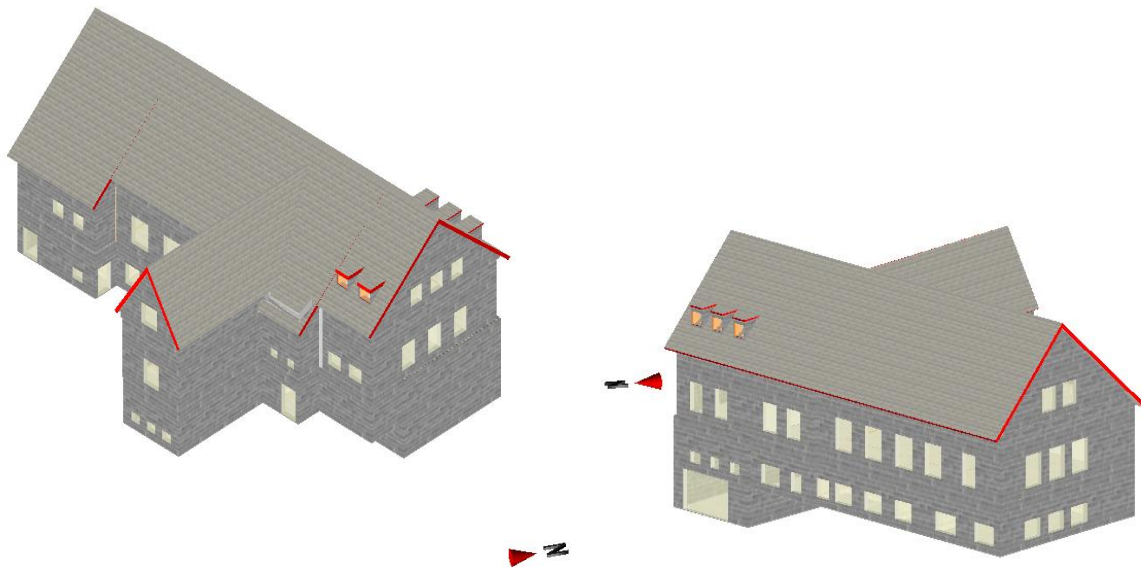


Abbildung A-7: Gebäudemodell Gemeindehaus (erstellt mit mh-Software)

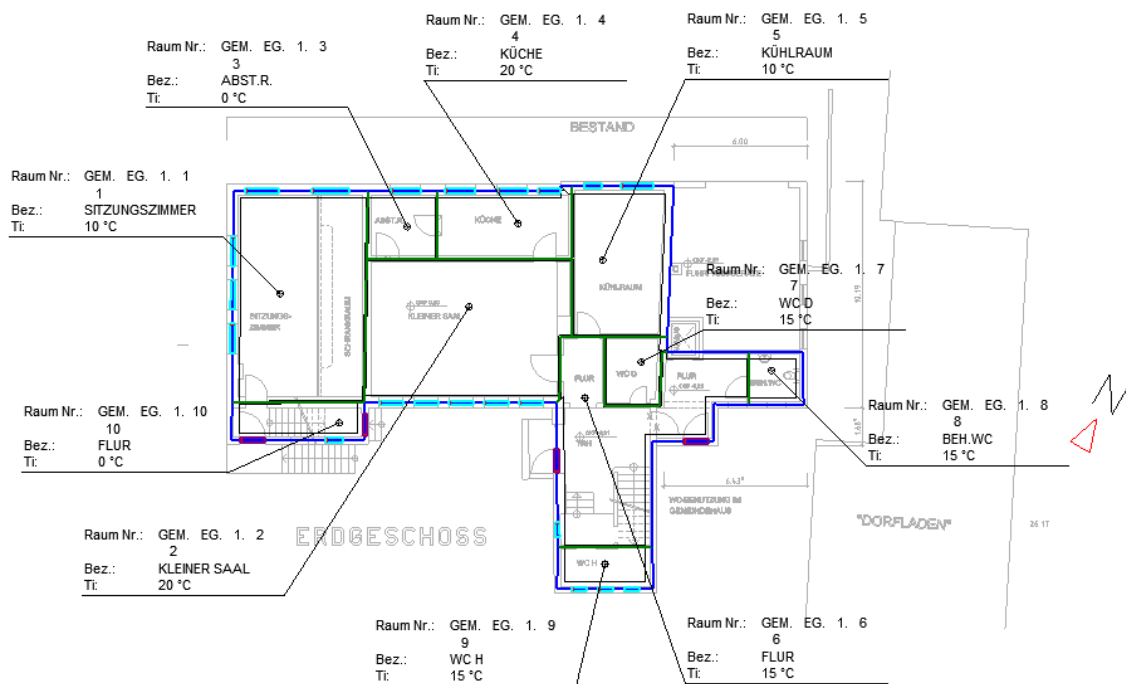


Abbildung A-8: Plan Erdgeschoss Gemeindehaus (erstellt mit mh-Software)

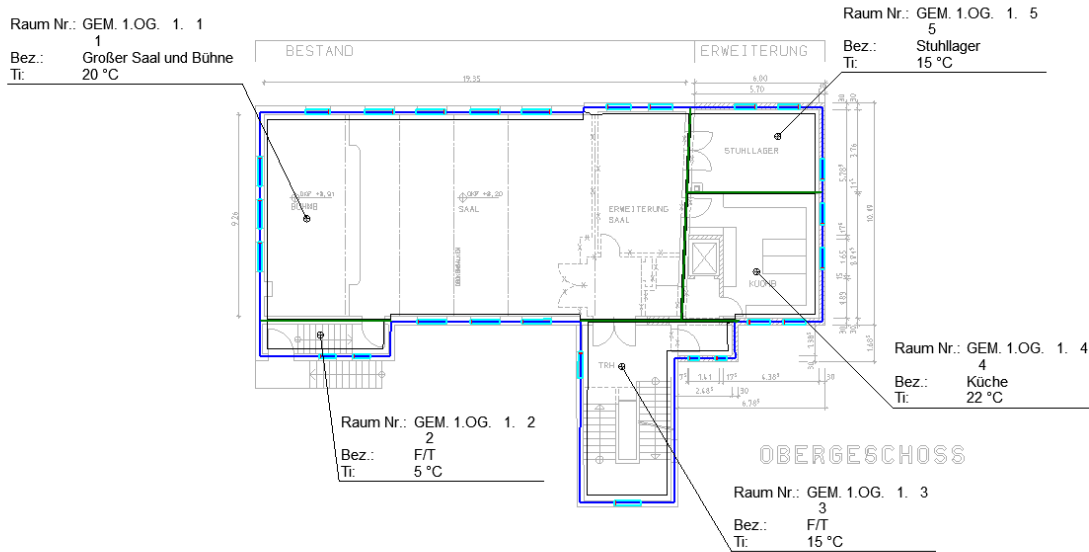


Abbildung A-9: Plan Obergeschoss Gemeindehaus (erstellt mit mh-Software)

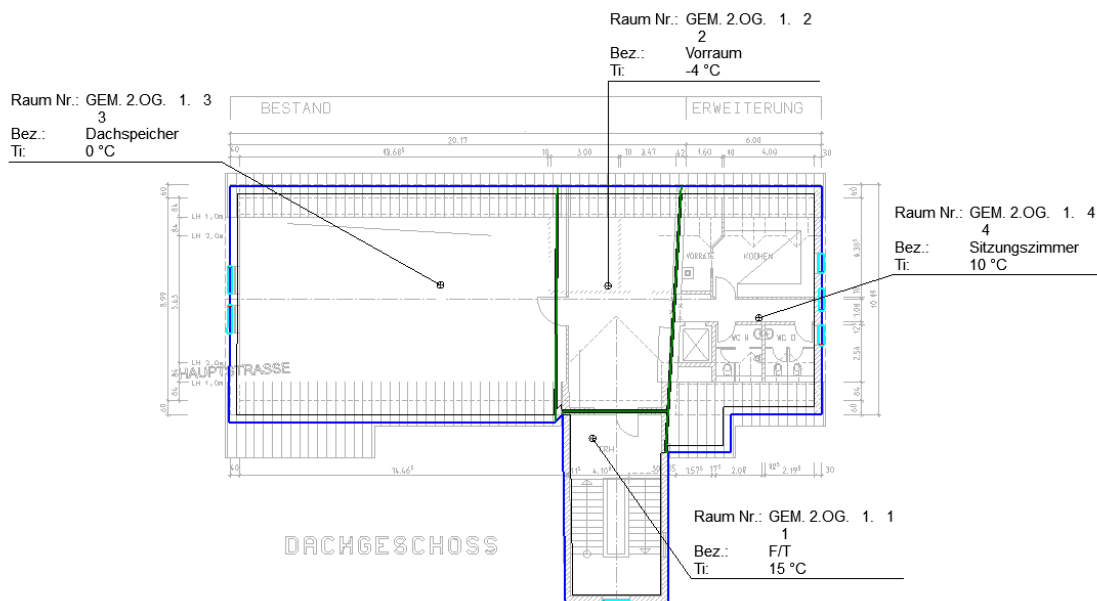


Abbildung A-10: Plan Dachgeschoss Gemeindehaus (erstellt mit mh-Software)

Tabelle A-3: Raumliste und Raumsolltemperaturen Gemeindehaus

Stock	Raum	Bezeichnung	Raumtemperatur [°C]
EG	1	FUHRPARK/ GERÄTE	5
EG	1	SITZUNGSZIMMER	10
EG	2	KLEINER SAAL	20
EG	3	ABST.R.	0
EG	4	KÜCHE	20
EG	5	KÜHLRAUM	10
EG	6	FLUR	15
EG	7	WC D	15

Stock	Raum	Bezeichnung	Raumtemperatur [°C]
EG		8 BEH.WC	15
EG		9 WC H	15
EG		10 FLUR	0
1.OG		1 Großer Saal und Bühne	20
1.OG		2 F/ T	5
1.OG		3 F/ T	15
1.OG		4 Küche	22
1.OG		5 Stuhllager	15
2.OG		1 F/ T	15
2.OG		2 Vorraum	-4
2.OG		3 Dachspeicher	0
2.OG		4 Sitzungszimmer	10

Anhang B Wärmelastprofile der Liegenschaften und Szenarien

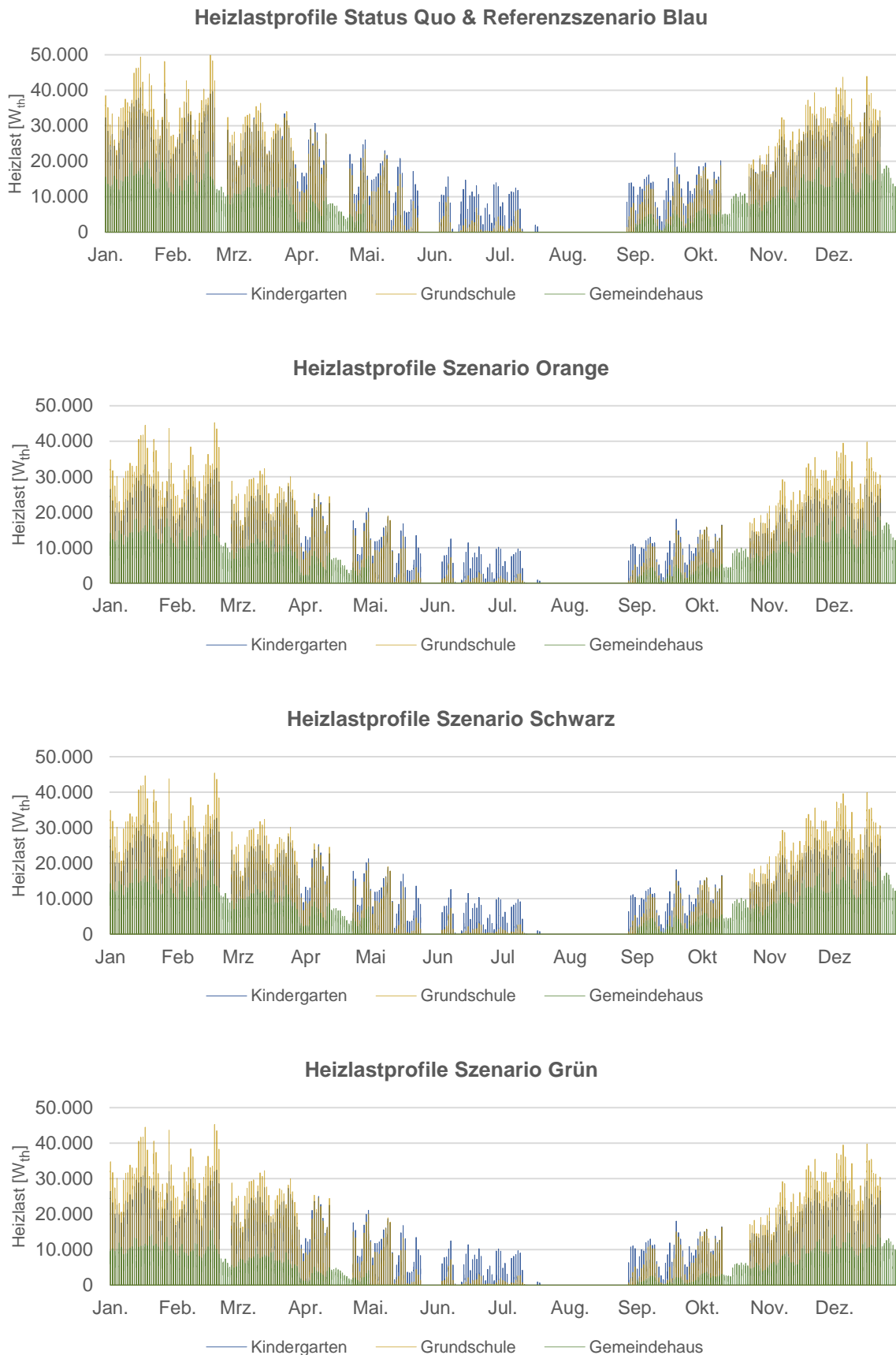


Abbildung B-11: Gebäudeweise Heizlastprofile der Szenarien

Anhang C Berechnung der Heizkörperleistungen

Ziel bei der Betrachtung der aktuell installierten Heizkörper ist, Aussagen über die Ausnutzung von Heizkörperüberdimensionierungen und die Identifizierung von kritischen Heizkörpern treffen zu können. Dafür sollen die raumweisen Heizlasten bei den jeweiligen Betriebsbedingungen mit den in mh-software modellierten Wärmebedarfen pro Raum, also den Nennheizleistungen der Heizkörper, pro Szenario verglichen werden.

Um die raumweisen Heizlasten zu bestimmen, wird die nachfolgende Gleichung (0-1) nach Recknagel et al. (2020) verwendet:

$$\dot{Q}_{\text{Betrieb}} = \dot{Q}_{\text{Norm}} \cdot \left[\frac{\frac{t_{V,\text{Betrieb}} - t_{R,\text{Betrieb}}}{\ln\left(\frac{t_{V,\text{Betrieb}} - t_{L,\text{Betrieb}}}{t_{R,\text{Betrieb}} - t_{L,\text{Betrieb}}}\right)}}{\frac{75\text{ °C} - 65\text{ °C}}{\ln\left(\frac{75\text{ °C} - 20\text{ °C}}{65\text{ °C} - 20\text{ °C}}\right)}} \right]^n \quad (0-1)$$

\dot{Q}_{Betrieb} [W_{th}] bezeichnet die Heizleistung des betrachteten Heizkörpers bei Betriebsbedingungen, \dot{Q}_{Norm} [W_{th}] die Heizleistung bei Normbedingungen, $t_{V,\text{Betrieb}}$ [$^{\circ}\text{C}$] für die Vorlauftemperatur im Betrieb, $t_{R,\text{Betrieb}}$ [$^{\circ}\text{C}$] für die Rücklauftemperatur im Betrieb, $t_{L,\text{Betrieb}}$ [$^{\circ}\text{C}$] für die Raumtemperatur und n [-] für den Heizkörperexponenten.

Um Gleichung (0-1) anwenden zu können, werden zunächst die in den betrachteten Gebäuden verbauten Heizkörpertypen identifiziert. Die Typeneinteilung orientiert sich dabei anhand der im Recknagel vorgestellten Heizkörpertypen, siehe Abbildung C-12.

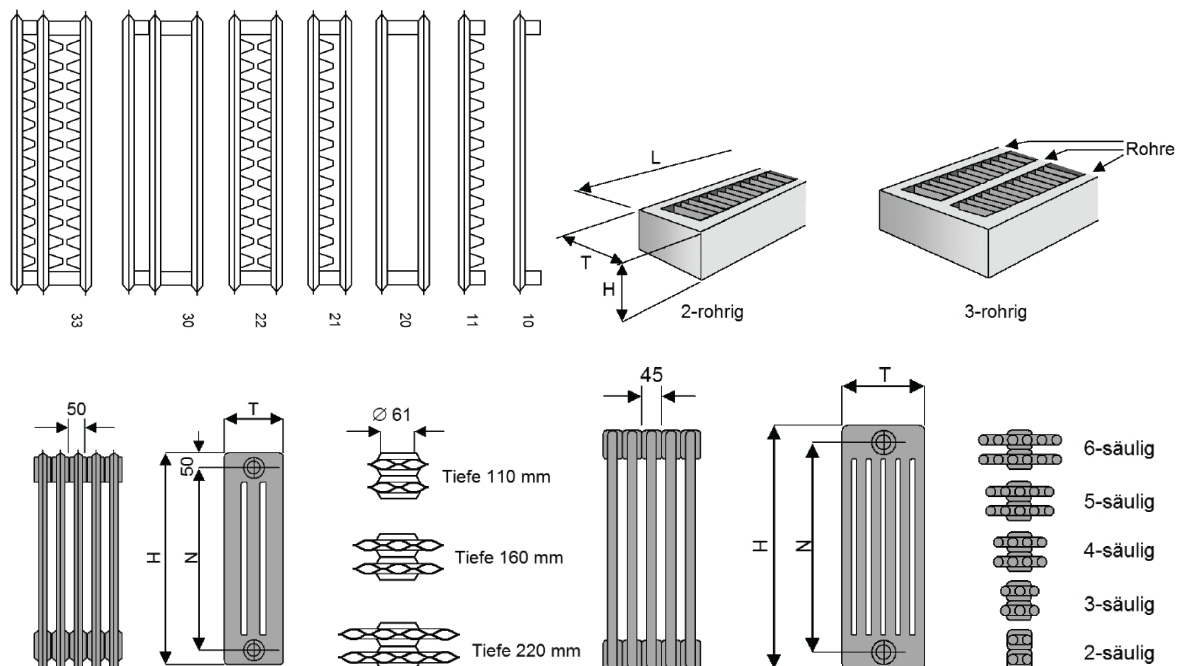


Abbildung C-12: In den Gebäuden Gemeindehaus, Kindergarten und Grundschule identifizierte Heizkörpertypen. Typenbezeichnung für Flachheizkörper (links oben), Konvektoren (rechts oben), Stahlradiator (links unten), Stahlrohrradiator (rechts unten). (Recknagel et al. 2020)

Anschließend können aus den entsprechenden Tafeln aus dem Taschenbuch für HEIZUNG+KLIMATECHNIK nach Recknagel et al. (2020) Werte für die Heizkörperexponenten n

und für die Normheizleistungen \dot{Q}_{Norm} [W_{th}/m] bzw. [$W_{\text{th}}/\text{Heizungsglied}$] für vertikal profilierte (also mit profilierten Platten) und für glattwandig profilierte (also mit glatten Platten) Flachheizkörper, für Konvektoren, für Stahlradiatoren und für Stahlrohrradiatoren über vor Ort abgemessene Höhen und Tiefen der Heizkörper entnommen werden.

Durch die Berücksichtigung der Heizkörperbreiten bzw. der Anzahl der Heizkörperglieder wird die Normheizleistung pro Heizkörper bestimmt. Da in den im Recknagel aufgeführten Tafeln für Normheizleistungen nicht alle in den Gebäuden vorkommenden Maße der Heizkörperhöhen und -tiefen angegeben sind, werden fehlende Werte interpoliert. Eine Auftragung der im Recknagel verzeichneten Normheizleistungen von den Heizkörpertypen mit fehlenden Maßen gegen die jeweiligen Heizkörperhöhen zeigt eine eindeutige Linearität. Es kann also geschlossen werden, dass die Interpolation der fehlenden Werte für die Normheizleistungen im Falle der betrachteten Heizungstypen zulässig ist. Für den Fall von Herstellerangaben, die nicht den Normtemperaturen entsprechen, wird die Normheizleistung über Gleichung (0-1) berechnet.

Anschließend wird ausgehend von den flächenbezogenen Normheizleistungen pro Heizkörper und Heizkörperart unter Einbezug der Heizkörperanzahl die raumweise Normheizleistung pro Heizkörperart berechnet.

Um daraufhin die raumweisen Heizlasten pro Heizkörperarten bei Betriebsbedingungen zu erhalten, erfolgt eine Umrechnung der zuvor beschriebenen raumweisen Normheizleistungen pro Heizkörperarten nach Gleichung (0-1). Für die Betriebsbedingungen der Heizkörper werden Vor- und Rücklauftemperaturen von 35/ 30 °C, 45/ 35 °C und 55/ 45 °C (definierte Bedingungen laut Kapitel 3.3 für Kalte Nahwärme in Gödenroth) sowie 70/ 55 °C (Biomassekessel und aktueller Bestand) berücksichtigt. Zusätzlich werden die Raumsolltemperaturen, wie sie in der modellierten Wärmebedarfsbestimmung in Anhang A definiert werden, einbezogen. Über eine Aufsummierung über die Heizkörperarten pro Raum werden die finalen raumweisen Heizlasten berechnet.

Abschließend können nun die raumweisen Heizlasten bei den jeweiligen Betriebsbedingungen mit den in mh-software modellierten raumweisen Wärmebedarfen, also den raumweisen Nennheizleistungen der Heizkörper, pro Szenario verglichen werden. Hiermit können Aussagen über die hin- oder unzureichende Wärmeübertragung der aktuell verbauten Heizkörper bei Betrachtung der Szenarien getroffen werden, siehe Kapitel 4.2.2.

Anhang D Kritische Heizkörper

Tabelle D-4: Übersicht über kritische Heizkörper der Szenarien für das Gemeindehaus

Referenzszenario Gemeindehaus						Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast			
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
FUH	EG	1	1	FUHRPARK/GERÄTE	5	661	1369	2419	3816
GEM	EG	1	1	SITZUNGSZIMMER	10	-200	139	647	1325
GEM	EG	1	2	KLEINER SAAL	20	-3996	-3269	-2109	-530
GEM	EG	1	3	ABST.R.	0				
GEM	EG	1	4	KÜCHE	20	-1691	-1346	-792	-30
GEM	EG	1	5	KÜHLRAUM	10	671	1010	1518	2196
GEM	EG	1	6	Treppenhaus Flur (Treppenhaus) Flur 1. OG (Treppenhaus)	15	-8318	-7209	-5502	-3204
GEM	EG	1	7	WC D	15	-197	-89	76	298
GEM	EG	1	8	BEH.WC	15	66	324	722	1257
GEM	EG	1	9	WC H	15	-486	-378	-213	9
GEM	EG	1	10	FLUR	0				
GEM	1.OG	1	1	Großer Saal und Bühne	20	-14697	-12922	-10078	-6190
GEM	1.OG	1	2	F/T	5				
GEM	1.OG	1	3	Treppenhaus	15				
GEM	1.OG	1	4	Küche	22	-3253	-2701	-1795	-548
GEM	1.OG	1	5	Stuhllager	15	-932	-558	13	776
GEM	2.OG	1	1	Treppenhaus	15				
GEM	2.OG	1	2	Vorraum	-4				
GEM	2.OG	1	3	Dachspeicher	0				
GEM	2.OG	1	4	Sitzungszimmer	10	-2751	-1924	-690	947

Szenario Orange Gemeindehaus						Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast			
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
FUH	EG	1	1	FUHRPARK/GERÄTE	5	729	1437	2487	3884
GEM	EG	1	1	SITZUNGSZIMMER	10	439	778	1286	1964
GEM	EG	1	2	KLEINER SAAL	20	-3228	-2501	-1341	238
GEM	EG	1	3	ABST.R.	0				
GEM	EG	1	4	KÜCHE	20	-1258	-913	-359	403
GEM	EG	1	5	KÜHLRAUM	10	837	1176	1684	2362
GEM	EG	1	6	Treppenhaus	15	-8209	-7100	-5393	-3095
GEM	EG	1	7	WC D	15	-197	-89	76	298
GEM	EG	1	8	BEH.WC	15	66	324	722	1257
GEM	EG	1	9	WC H	15	-381	-273	-108	114
GEM	EG	1	10	FLUR	0				
GEM	1.OG	1	1	Großer Saal und Bühne	20	-14687	-12912	-10068	-6180
GEM	1.OG	1	2	F/T	5				
GEM	1.OG	1	3	Treppenhaus	15				
GEM	1.OG	1	4	Küche	22	-3253	-2701	-1795	-548
GEM	1.OG	1	5	Stuhllager	15	-932	-558	13	776
GEM	2.OG	1	1	Treppenhaus	15				
GEM	2.OG	1	2	Vorraum	-4				
GEM	2.OG	1	3	Dachspeicher	0				
GEM	2.OG	1	4	Sitzungszimmer	10	-2751	-1924	-690	947

Szenario Schwarz Gemeindehaus						Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast			
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
FUH	EG	1	1	FUHRPARK/GERÄTE	5	661	1369	2419	3816
GEM	EG	1	1	SITZUNGSZIMMER	10	373	712	1220	1898
GEM	EG	1	2	KLEINER SAAL	20	-3228	-2501	-1341	238
GEM	EG	1	3	ABST.R.	0				
GEM	EG	1	4	KÜCHE	20	-1258	-913	-359	403
GEM	EG	1	5	KÜHLRAUM	10	837	1176	1684	2362
GEM	EG	1	6	Treppenhaus	15	-8318	-7209	-5502	-3204
GEM	EG	1	7	WC D	15	-197	-89	76	298
GEM	EG	1	8	BEH.WC	15	66	324	722	1257
GEM	EG	1	9	WC H	15	-381	-273	-108	114
GEM	EG	1	10	FLUR	0				
GEM	1.OG	1	1	Großer Saal und Bühne	20	-14687	-12912	-10068	-6180
GEM	1.OG	1	2	F/T	5				
GEM	1.OG	1	3	Treppenhaus	15				

Szenario Schwarz Gemeindehaus					Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast				
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
GEM	1.OG	1	4	Küche	22	-3253	-2701	-1795	-548
GEM	1.OG	1	5	Stuhllager	15	-932	-558	13	776
GEM	2.OG	1	1	Treppenhaus	15				
GEM	2.OG	1	2	Vorraum	-4				
GEM	2.OG	1	3	Dachspeicher	0				
GEM	2.OG	1	4	Sitzungszimmer	10	-2751	-1924	-690	947
Szenario Grün Gemeindehaus					Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast				
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
FUH	EG	1	1	FUHRPARK/GERÄTE	5	766	1474	2524	3921
GEM	EG	1	1	SITZUNGSZIMMER	10	456	795	1303	1981
GEM	EG	1	2	KLEINER SAAL	20	-3211	-2484	-1324	255
GEM	EG	1	3	ABST.R.	0				
GEM	EG	1	4	KÜCHE	20	-1253	-908	-354	408
GEM	EG	1	5	KÜHLRAUM	10	845	1184	1692	2370
GEM	EG	1	6	Treppenhaus	15	-5468	-4359	-2652	-354
GEM	EG	1	7	WC D	15	-195	-87	78	300
GEM	EG	1	8	BEH.WC	15	67	325	723	1258
GEM	EG	1	9	WC H	15	-378	-270	-105	117
GEM	EG	1	10	FLUR	0				
GEM	1.OG	1	1	Großer Saal und Bühne	20	-13750	-11975	-9131	-5243
GEM	1.OG	1	2	F/T	5				
GEM	1.OG	1	3	Treppenhaus	15				
GEM	1.OG	1	4	Küche	22	-3186	-2634	-1728	-481
GEM	1.OG	1	5	Stuhllager	15	-889	-515	56	819
GEM	2.OG	1	1	Treppenhaus	15				
GEM	2.OG	1	2	Vorraum	-4				
GEM	2.OG	1	3	Dachspeicher	0				
GEM	2.OG	1	4	Sitzungszimmer	10	-351	476	1710	3347

Tabelle D-5: Übersicht über kritische Heizkörper der Szenarien für den Kindergarten

Referenzszenario Kindergarten					Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast				
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
K	EG	1	1	TOILETTEN / WASCHEN	20	-1966	-1589	-986	-165
K	EG	1	2	LEITERIN	22	-724	-289	419	1389
K	EG	1	3	SPRECHZIMMER	22	-467	-241	127	631
K	EG	1	4	ABST.R.	10				
K	EG	1	5	WC	20	-549	-513	-456	-377
K	EG	1	6	HALLE	22	-1220	383	2993	6567
K	EG	1	7	Ausgang Garten	18				
K	EG	1	8	GRUPPE 2	22	-2374	-1571	-262	1531
K	EG	1	9	FÖRDERRAUM	22	-131	713	2142	4164
K	EG	1	10	SPIELECKE	22				
K	EG	1	11	GRUPPE 1	22	-4057	-3126	-1608	469
K	EG	1	12	Anbau Gruppe 1	22				
K	EG	1	13	WINDFANG	18	-745	-492	-94	446
K	EG	1	14	Lesecke Gruppe 3	22	-1452	-1352	-1189	-966
K	EG	1	15	Küche	20	-1277	-1023	-620	-75
K	EG	1	16	GRUPPE 3	22	-5010	-3477	-981	2437
K	1.OG	1	1	GESPRÄCHSZIMMER	20	-778	-551	-189	305
K	1.OG	1	2	FLUR	15				
K	1.OG	1	3	PERSONALRAUM	22	-957	-785	-509	-135
K	1.OG	1	4	ABST.RAUM	10				
K	1.OG	1	5	Mehrzweckraum	22	-9073	-7948	-6051	-3378
K	1.OG	1	6	GALERIE	22				
K	1.OG	1	7	GRUPPENRAUM	22	-2068	-1710	-1119	-304
K	1.OG	1	8	Gruppenraum 4	22	-4754	-4113	-3060	-1609
K	1.OG	1	9	Sanitärbereich	18	-535	-371	-114	235
K	1.OG	1	10	Ruhe-/Schlafraum	22	-1994	-1573	-881	75
K	1.OG	1	11	Abstellraum	22				
K	1.OG	1	12	Einzel-/Gruppenbüro	20				

Szenarien Orange & Grün Kindergarten					Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast				
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
K	EG	1	1	TOILETTEN / WASCHEN	20	-1707	-1330	-727	94
K	EG	1	2	LEITERIN	22	-724	-289	419	1389
K	EG	1	3	SPRECHZIMMER	22	-467	-241	127	631
K	EG	1	4	ABST.R.	10				
K	EG	1	5	WC	20	-549	-513	-456	-377
K	EG	1	6	HALLE	22	-711	892	3502	7076
K	EG	1	7	Ausgang Garten	18				
K	EG	1	8	GRUPPE 2	22	-2374	-1571	-262	1531
K	EG	1	9	FÖRDERRAUM	22	-131	713	2142	4164
K	EG	1	10	SPIELECKE	22				
K	EG	1	11	GRUPPE 1	22	-1375	-444	1074	3151
K	EG	1	12	Anbau Gruppe 1	22				
K	EG	1	13	WINDFANG	18	-745	-492	-94	446
K	EG	1	14	Lesecke Gruppe 3	22	-1169	-1069	-906	-683
K	EG	1	15	Küche	20	-756	-502	-99	446
K	EG	1	16	GRUPPE 3	22	-1578	-45	2451	5869
K	1.OG	1	1	GESPRÄCHSZIMMER	20	-778	-551	-189	305
K	1.OG	1	2	FLUR	15				
K	1.OG	1	3	PERSONALRAUM	22	-957	-785	-509	-135
K	1.OG	1	4	ABST.RAUM	10				
K	1.OG	1	5	Mehrzweckraum	22	-5590	-4465	-2568	105
K	1.OG	1	6	GALERIE	22				
K	1.OG	1	7	GRUPPENRAUM	22	-2068	-1710	-1119	-304
K	1.OG	1	8	Gruppenraum 4	22	-4754	-4113	-3060	-1609
K	1.OG	1	9	Sanitärbereich	18	-535	-371	-114	235
K	1.OG	1	10	Ruhe-/Schlafraum	22	-1994	-1573	-881	75
K	1.OG	1	11	Abstellraum	22				
K	1.OG	1	12	Einzel-/Gruppenbüro	20				

Szenario Schwarz Kindergarten					Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast				
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
K	EG	1	1	TOILETTEN / WASCHEN	20	-1707	-1330	-727	94
K	EG	1	2	LEITERIN	22	-724	-289	419	1389
K	EG	1	3	SPRECHZIMMER	22	-467	-241	127	631
K	EG	1	4	ABST.R.	10				
K	EG	1	5	WC	20	-549	-513	-456	-377
K	EG	1	6	HALLE	22	-711	892	3502	7076
K	EG	1	7	Ausgang Garten	18				
K	EG	1	8	GRUPPE 2	22	-2374	-1571	-262	1531
K	EG	1	9	FÖRDERRAUM	22	-131	713	2142	4164
K	EG	1	10	SPIELECKE	22				
K	EG	1	11	GRUPPE 1	22	-1375	-444	1074	3151
K	EG	1	12	Anbau Gruppe 1	22				
K	EG	1	13	WINDFANG	18	-815	-562	-164	376
K	EG	1	14	Lesecke Gruppe 3	22	-1169	-1069	-906	-683
K	EG	1	15	Küche	20	-756	-502	-99	446
K	EG	1	16	GRUPPE 3	22	-1578	-45	2451	5869
K	1.OG	1	1	GESPRÄCHSZIMMER	20	-778	-551	-189	305
K	1.OG	1	2	FLUR	15				
K	1.OG	1	3	PERSONALRAUM	22	-957	-785	-509	-135
K	1.OG	1	4	ABST.RAUM	10				
K	1.OG	1	5	Mehrzweckraum	22	-5590	-4465	-2568	105
K	1.OG	1	6	GALERIE	22				
K	1.OG	1	7	GRUPPENRAUM	22	-2138	-1780	-1189	-374
K	1.OG	1	8	Gruppenraum 4	22	-4851	-4210	-3157	-1706
K	1.OG	1	9	Sanitärbereich	18	-535	-371	-114	235
K	1.OG	1	10	Ruhe-/Schlafraum	22	-1994	-1573	-881	75
K	1.OG	1	11	Abstellraum	22				
K	1.OG	1	12	Einzel-/Gruppenbüro	20				

Tabelle D-6: Übersicht über kritische Heizkörper der Szenarien für die Grundschule

Referenzszenario Grundschule					Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast				
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
Ost	EG	1	1	KLASSENRAUM	22	-4882	-3949	-2429	-348

Referenzszenario Grundschule					Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast				
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
Ost	EG	1	2	Lehrmittel	15				
Ost	EG	1	3	FLUR	20	-10997	-8093	-3454	2870
Ost	EG	1	4	KLASSENRAUM	22	-5028	-4950	-4824	-4650
Ost	EG	1	5	LEHRERZIMMER	22	-1394	-1003	-366	507
Ost	EG	1	6	SCHULLEITER	22	-1335	-944	-307	566
Ost	EG	1	7	MEHRZWECKRAUM	22	-3224	-1600	1046	4670
Ost	EG	1	8	KLASSENZIMMER	22	-2899	-1946	-394	1731
Ost	EG	1	9	ARZT- UND	22	-1109	-728	-107	743
Ost	EG	1	10	KLASSENZIMMER	22	-3128	-2175	-623	1502
Ost	EG	1	11	PAUSENHALLE	15				
Ost	EG	1	12	BEH. WC	20	-297	57	619	1382
Ost	EG	1	13	WC JUNGEN	15	-220	-23	280	688
Ost	EG	1	14	WC MÄDCHEN	15	-454	-257	46	454
Ost	EG	1	15	KÜCHE	20	-714	-498	-154	312
Ost	EG	1	16	(WOHNEN)	22	-2268	-2164	-1994	-1762
Ost	EG	1	17	FLUR 1	15	-101	105	425	859
Ost	EG	1	18	ARBEITSRAUM	22	-805	-625	-330	77
Ost	EG	1	19	SCHLAFEN	20	-503	-287	57	523
Ost	EG	1	20	WOHNEN	22	-2082	-1978	-1808	-1576
Ost	EG	1	21	KÜCHE	20	-272	-177	-27	178
Ost	EG	1	22	BAD	24	-975	-778	-450	0
Ost	EG	1	23	FLUR	15				
Ost	EG	1	24	GARAGE	10				
Ost	EG	1	25	PUTZM.	15	-388	-270	-88	157
Ost	EG	1	26	WC/H	15	-167	-49	133	378
Ost	EG	1	27	WC/D	15	-374	-256	-74	171
Ost	1 OG	1	1	Decke Eingangsbereich	15				
Wst	1.OG	1	1	BAD	24	-577	-399	-103	306
Wst	1.OG	1	2	Bad	22				
Wst	1.OG	1	3	BÜCHEREI	20	-1090	-854	-479	30
Wst	1.OG	1	4	BÜCHEREI (Leseraum)	22	-1013	-787	-420	80
Wst	1.OG	1	5	ARCHIV	10				
Wst	1.OG	1	6	ARCHIV (Spielraum)	22	-2008	-1530	-751	316
Wst	1.OG	1	7	SPEICHER	10				
Wst	1.OG	1	8	FLUR	15				
Wst	1.UG	1	1	KELLER	22				

Szenarien Orange & Grün Grundschule					Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast				
Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
					[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
Ost	EG	1	1	KLASSENRAUM	22	-4003	-3070	-1550	531
Ost	EG	1	2	LEHRZIMMER	15				
Ost	EG	1	3	FLUR	20	-9298	-6394	-1755	4569
Ost	EG	1	4	KLASSENRAUM	22	-4147	-4069	-3943	-3769
Ost	EG	1	5	LEHRERZIMMER	22	-1061	-670	-33	840
Ost	EG	1	6	SCHULLEITER	22	-1009	-618	19	892
Ost	EG	1	7	MEHRZWECKRAUM	22	-2465	-841	1805	5429
Ost	EG	1	8	KLASSENZIMMER	22	-2899	-1946	-394	1731
Ost	EG	1	9	ARZT- UND	22	-1109	-728	-107	743
Ost	EG	1	10	KLASSENZIMMER	22	-3128	-2175	-623	1502
Ost	EG	1	11	PAUSENHALLE	15				
Ost	EG	1	12	BEH. WC	20	-356	-2	560	1323
Ost	EG	1	13	WC JUNGEN	15	-254	-57	246	654
Ost	EG	1	14	WC MÄDCHEN	15	-489	-292	11	419
Ost	EG	1	15	KÜCHE	20	-786	-570	-226	240
Ost	EG	1	16	(WOHNEN)	22	-2474	-2370	-2200	-1968
Ost	EG	1	17	FLUR 1	15	-73	133	453	887
Ost	EG	1	18	ARBEITSRAUM	22	-899	-719	-424	-17
Ost	EG	1	19	SCHLAFEN	20	-503	-287	57	523
Ost	EG	1	20	WOHNEN	22	-2082	-1978	-1808	-1576
Ost	EG	1	21	KÜCHE	20	-297	-202	-52	153
Ost	EG	1	22	BAD	24	-975	-778	-450	0
Ost	EG	1	23	FLUR	15				
Ost	EG	1	24	GARAGE	10				
Ost	EG	1	25	PUTZM.	15	-250	-132	50	295
Ost	EG	1	26	WC/H	15	-39	79	261	506
Ost	EG	1	27	WC/D	15	-230	-112	70	315
Ost	1 OG	1	1	Decke Eingangsbereich	15				
Wst	1.OG	1	1	BAD	24	-577	-399	-103	306

Wst	1.OG	1	2	Bad	22				
Wst	1.OG	1	3	BÜCHEREI	20	-1188	-952	-577	-68
Wst	1.OG	1	4	BÜCHEREI	22	-1013	-787	-420	80
Wst	1.OG	1	5	ARCHIV	10				
Wst	1.OG	1	6	ARCHIV	22	-2157	-1679	-900	167
Wst	1.OG	1	7	SPEICHER	10				
Wst	1.OG	1	8	FLUR	15				
Wst	1.UG	1	1	KELLER	22				

Szenario Schwarz Grundschule

Differenz zw. Nennleistung Heizkörper und raumweiser Heizlast

Geb	Stock	Einh.	Raum	Bezeichnung	Raumtemp.	35 °C / 30 °C	45 °C / 35 °C	55 °C / 45 °C	70 °C / 55 °C
						[°C]	[W _{th}]	[W _{th}]	[W _{th}]
Ost	EG	1	1	KLASSENRAUM	22	-4003	-3070	-1550	531
Ost	EG	1	2	LEHRZIMMER	15				
Ost	EG	1	3	FLUR	20	-9399	-6495	-1856	4468
Ost	EG	1	4	KLASSENRAUM	22	-4147	-4069	-3943	-3769
Ost	EG	1	5	LEHRERZIMMER	22	-1061	-670	-33	840
Ost	EG	1	6	SCHULLEITER	22	-1009	-618	19	892
Ost	EG	1	7	MEHRZWECKRAUM	22	-2465	-841	1805	5429
Ost	EG	1	8	KLASSENZIMMER	22	-2899	-1946	-394	1731
Ost	EG	1	9	ARZT- UND	22	-1109	-728	-107	743
Ost	EG	1	10	KLASSENZIMMER	22	-3128	-2175	-623	1502
Ost	EG	1	11	PAUSENHALLE	15				
Ost	EG	1	12	BEH. WC	20	-356	-2	560	1323
Ost	EG	1	13	WC JUNGEN	15	-254	-57	246	654
Ost	EG	1	14	WC MÄDCHEN	15	-489	-292	11	419
Ost	EG	1	15	KÜCHE	20	-786	-570	-226	240
Ost	EG	1	16	(WOHNEN)	22	-2474	-2370	-2200	-1968
Ost	EG	1	17	FLUR 1	15	-101	105	425	859
Ost	EG	1	18	ARBEITSRAUM	22	-899	-719	-424	-17
Ost	EG	1	19	SCHLAFEN	20	-503	-287	57	523
Ost	EG	1	20	WOHNEN	22	-2082	-1978	-1808	-1576
Ost	EG	1	21	KÜCHE	20	-297	-202	-52	153
Ost	EG	1	22	BAD	24	-975	-778	-450	0
Ost	EG	1	23	FLUR	15				
Ost	EG	1	24	GARAGE	10				
Ost	EG	1	25	PUTZM.	15	-250	-132	50	295
Ost	EG	1	26	WC/H	15	-39	79	261	506
Ost	EG	1	27	WC/D	15	-230	-112	70	315
Ost	1.OG	1	1	Decke Eingangsbereich	15				
Wst	1.OG	1	1	BAD	24	-577	-399	-103	306
Wst	1.OG	1	2	Bad	22				
Wst	1.OG	1	3	BÜCHEREI	20	-1188	-952	-577	-68
Wst	1.OG	1	4	BÜCHEREI	22	-1013	-787	-420	80
Wst	1.OG	1	5	ARCHIV	10				
Wst	1.OG	1	6	ARCHIV	22	-2157	-1679	-900	167
Wst	1.OG	1	7	SPEICHER	10				
Wst	1.OG	1	8	FLUR	15				
Wst	1.UG	1	1	KELLER	22				

Anhang E Rohrdimensionen Wärmenetz

Tabelle E-7: Kunststoffmediumrohr PMR: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20- DN150. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von folgenden Herstellern berücksichtigt: Brugg Pipesystems und Isoplus (Nussbaumer et al. 2017)

Nennweite	Medium-Innenrohr				Außendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke)			Spez. Wärmeverlust pro Trassenmeter		
	Außendurchmesser	Wandstärke	Innendurchmesser	Volumen Innenrohr	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
					mm	Mm	Mm	l/m	mm	mm
20	25,0	2,30	20,40	0,33	75	90	-	0,264	0,235	-
25	32,0	2,90	26,20	0,54	75	90	-	0,321	0,279	-
32	40,0	3,70	32,60	0,83	90	110	-	0,332	0,284	-
40	50,0	4,60	40,80	1,31	110	125	-	0,341	0,307	-
50	63,0	5,80	51,40	2,07	125	140	-	0,378	0,340	-
65	75,0	6,80	61,40	2,96	140	160	-	0,405	0,356	-
80	90,0	8,20	73,60	4,25	160	180	-	0,429	0,380	-
100	110	10,00	90,00	6,36	160	180	-	0,557	0,476	-
125	125,0	11,40	102,20	8,20	180	-	-	0,567	-	-
150	160,0	14,60	130,80	13,44	250	-	-	0,511	-	-

Tabelle E-8: Kunststoffmediumrohr PMR-Duo: Abmessungen und spezifischer Wärmeverlust für die Nennweiten von DN20-DN50. Für die Erstellung der Tabelle wurden Daten von folgenden Herstellern berücksichtigt: Brugg Pipesystems und Isoplus (Nussbaumer et al. 2017)

Nennweite	Medium-Innenrohr				Außendurchmesser Mantelrohr (Dämmstärke)			Spez. Wärmeverlust pro Trassenmeter		
	Außendurchmesser	Wandstärke	Innendurchmesser	Volumen Innenrohr	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
					mm	Mm	Mm	l/m	mm	mm
20	25,0	2,30	20,40	0,33	90	110	-	0,211	0,174	-
25	32,0	2,90	26,20	0,54	110	125	-	0,215	0,198	-
32	40,0	3,70	32,60	0,83	125	140	-	0,235	0,222	-
40	50,0	4,60	40,80	1,31	160	180	-	0,264	0,21	-
50	63,0	5,80	51,40	2,07	180	-	-	0,246	-	-

Anhang F Daten zur Bodenbeschaffenheit Gödenroth

Tabelle F-9: Bodenbeschaffenheit einer Erdbohrung in Gödenroth

Tiefe	Mächtigkeit	Gesteinstyp	zugeordneter Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Wärmekapazität
[m]	[m]	[-]	[-]	[W _{th} /mK]	[kg/m ³]	[J _{th} /kgK]
(LGB-RLP 2021)			(VDI-Richtlinie VDI 4640 Blatt 1)			
0	3	Schluff, steinig, Schluff	Schluff tr., Steine tr., Schluff tr.	0,47	1.933	784
3	8	Tonstein, Sandstein, Sandstein, Tonstein, Schluff	Tonstein, Sandstein, Sandstein, Tonstein, Schluff tr.	2,10	2.360	886
11	11	Tonstein	Tonstein	2,20	2.500	900
22	4	Tonstein	Tonstein	2,20	2.500	900
26	44	Tonstein, Quarzit, Tonstein, Quarzit	Tonstein, Quarzit, Tonstein, Quarzit	3,85	2.550	853
70	19	Tonstein, Quarzit, Tonstein, Quarzit	Tonstein, Quarzit, Tonstein, Quarzit	3,85	2.550	853
Gesamt				3,30	2.504	861

Anhang G Annahmen PV-Module

Tabelle G-10: Eingangsparmeter zur Auslegung der PV-Anlagen Gemeindehaus

Dachfläche	
Dachneigung	50 [°]
Ausrichtung	25 [°] nach Ost
Dachfläche	158 [m ²]
Faktor Nutzbare Fläche	0,7 [-]
Modulfläche	110 [m ²]
Annahmen	
Modultyp	jkm335m-60h-v (5bb) cheetah hc
Peakleistung	335 [W _p] STC
Maße Modul	1.684*1.002*35 [mm]
Anzahl Module	65 [-]
Leistungsverluste	2 [%]
keine Verschattung	
Verbrauchsprofil	
Strom Dorfladen	13.500 [kWh _{el}] Stromprofil Handel
Strom Gemeindehaus	3.000 [kWh _{el}] Abendstunden

Tabelle G-11: Eingangsparmeter zur Auslegung der PV-Anlagen Kindergarten

Dachfläche	
Dachneigung	35 [°]
Ausrichtung	10 [°] nach Ost
Dachfläche	88 [m ²]
Faktor Nutzbare Fläche	0,7 [-]
Modulfläche	61 [m ²]
Annahmen	
Modultyp	jkm335m-60h-v (5bb) cheetah hc
Peakleistung	335 [W _p] STC
Maße Modul	1.684*1.002*35 [mm]
Anzahl Module	35 [-]
Leistungsverluste	2 [%]
keine Verschattung	
Verbrauchsprofil	
Strom Kindergarten	12.663 [kWh _{el}]

Anhang H Mengen und Kostengerüst der jeweiligen Szenarien

Tabelle H-12: Mengen und Kosten für das Szenario Orange

Szenario Orange	Kategorie	Komponente	Ort	Beschreibung	Menge	Kosten [€/Stück]	Inst.Kosten [€/Stück]	Gesamt- kosten [€]
	Netz	Rohre			DN65	20	8,46 €	13,00 €
Rohre				DN50	20	5,85 €	13,00 €	377,00 €
Rohre				DN40	90	4,20 €	2,89 €	637,91 €
Rohre				DN32	130	2,65 €	2,00 €	604,76 €
Übergabestation		alle Gebäude			3	5.500,00 €	303,45 €	17.410,35 €
Gebäude	Fenster	Kindergarten		teilsaniert	23	500,00 €	175,00 €	15.525,00 €
	Fenster	Gemeindehaus		vollsaniiert	53	500,00 €	175,00 €	35.775,00 €
	Fenster	Grundschule		teilsaniert	49	500,00 €	175,00 €	33.075,00 €
	Heizkörper	Kindergarten		situativ	7	250,00 €	250,00 €	3.500,00 €
	Heizkörper	Gemeindehaus		situativ	13	250,00 €	250,00 €	6.500,00 €
	Heizkörper	Grundschule		situativ	7	250,00 €	250,00 €	3.500,00 €
Wärmeerzg.	Wärmepumpe	Gemeindehaus		Wasser/Wasser 27,3 kW _{th}	1	17.631,25 €	1.410,50 €	19.041,75 €
	Wärmepumpe	Kindergarten		Wasser/Wasser 40 kW _{th}	1	20.961,25 €	1.676,90 €	22.638,15 €
	Wärmepumpe	Grundschule		Wasser/Wasser 60,5 kW _{th}	1	30.232,50 €	2.418,60 €	32.651,10 €
	Erdwärmesonden	Grundschule		für 55 °C Heizvorlauf	14		6.000,00 €	84.000,00 €
	Pufferspeicher	alle Gebäude		2000 L	3	1.557,00 €	311,40 €	5.605,20 €
PV	Photovoltaikanlagen	Kindergarten			11,73	1.440,00 €		16.891,20 €
	Photovoltaikanlagen	Gemeindehaus			21,77	1.300,00 €		28.301,00 €
	Batteriespeicher	Kindergarten			5	1.000,00 €		5.000,00 €
	Batteriespeicher	Gemeindehaus			15	750,00 €		11.250,00 €
Summe								342.712,68 €

Tabelle H-13: Mengen und Kosten für das Szenario Schwarz

Szenario Schwarz	Kategorie	Komponente	Ort	Beschreibung	Menge	Kosten [€/Stück]	Inst.Kosten [€/Stück]	Gesamt- kosten [€]
	Netz	Rohre			DN65	20	8,46 €	13,00 €
Rohre				DN50	20	5,85 €	13,00 €	377,00 €
Rohre				DN40	90	4,20 €	2,89 €	637,91 €
Übergabestation		alle Gebäude			2	5.500,00 €	303,45 €	11.606,90 €
Gebäude	Fenster	Kindergarten		teilsaniert	23	500,00 €	175,00 €	15.525,00 €
	Fenster	Gemeindehaus		vollsaniiert	53	500,00 €	175,00 €	35.775,00 €
	Fenster	Grundschule		teilsaniert	49	500,00 €	175,00 €	33.075,00 €
	Heizkörper	Kindergarten		situativ	7	250,00 €	250,00 €	3.500,00 €
	Heizkörper	Gemeindehaus		situativ	13	250,00 €	250,00 €	6.500,00 €
	Heizkörper	Grundschule		situativ	7	250,00 €	250,00 €	3.500,00 €
Wärmeerzg.	Wärmepumpe	Gemeindehaus		Luft/Wasser 27,5 kW _{th}	1	22.200,00 €	1.776,00 €	23.976,00 €
	Wärmepumpe	Kindergarten		Wasser/Wasser 40,5 kW _{th}	1	20.961,25 €	1.676,90 €	22.638,15 €
	Wärmepumpe	Grundschule		Wasser/Wasser 60,8 kW _{th}	1	30.232,50 €	2.418,60 €	32.651,10 €
	Erdwärmesonden	Grundschule		für 55 °C Heizvorlauf	12		6.000,00 €	72.000,00 €
	Pufferspeicher	alle Gebäude		2000 L	3	1.557,00 €	311,40 €	5.605,20 €
PV	Photovoltaikanlagen	Kindergarten			11,73	1.440,00 €		16.891,20 €
	Photovoltaikanlagen	Gemeindehaus			21,77	1.300,00 €		28.301,00 €
	Batteriespeicher	Kindergarten			5	1.000,00 €		5.000,00 €
	Batteriespeicher	Gemeindehaus			15	750,00 €		11.250,00 €
Summe								329.238,72 €

Tabelle H-14: Mengen und Kosten für das Szenario Grün

Szenario Grün	Kategorie	Komponente	Ort	Beschreibung	Menge	Kosten [€/Stück]	Inst. Kosten [€/Stück]	Gesamtkosten [€]	
	Netz	Rohre			DN65	20	8,46 €	13,00 €	429,26 €
		Rohre			DN50	20	5,85 €	13,00 €	377,00 €
		Rohre			DN40	90	4,20 €	2,89 €	637,91 €
		Rohre			DN32	130	2,65 €	2,00 €	604,76 €
		Übergabestation	alle Gebäude			3	5.500,00 €	303,45 €	17.410,35 €
	Gebäude	Fenster	Kindergarten		teilsaniert	23	500,00 €	175,00 €	15.525,00 €
		Fenster	Gemeindehaus		vollsaniiert	53	500,00 €	175,00 €	35.775,00 €
		Fenster	Grundschule		teilsaniert	49	500,00 €	175,00 €	33.075,00 €
		Heizkörper	Kindergarten		situativ	7	250,00 €	250,00 €	3.500,00 €
Heizkörper		Gemeindehaus		situativ	9	250,00 €	250,00 €	4.500,00 €	
Heizkörper		Grundschule		situativ	7	250,00 €	250,00 €	3.500,00 €	
Dämmung		Gemeindehaus		vollsaniiert	620	80,00 €		49.600,00 €	
Dach		Gemeindehaus		vollsaniiert	480	135,00 €		64.800,00 €	
Wärmeerzg.	Wärmepumpe	Gemeindehaus		Wasser/Wasser 20 kW _{th}	1	17.631,25 €	1.410,50 €	19.041,75 €	
	Wärmepumpe	Kindergarten		Wasser/Wasser 40 kW _{th}	1	20.961,25 €	1.676,90 €	22.638,15 €	
	Wärmepumpe	Grundschule		Wasser/Wasser 60.5 kW _{th}	1	30.232,50 €	2.418,60 €	32.651,10 €	
	Erdwärmesonden	Grundschule		für 55 °C Heizvorlauf	14		6.000,00 €	84.000,00 €	
	Pufferspeicher	alle Gebäude		2000 L	3	1.557,00 €	311,40 €	5.605,20 €	
PV	Photovoltaikanlagen	Kindergarten			11,73	1.440,00 €		16.891,20 €	
	Photovoltaikanlagen	Gemeindehaus			21,77	1.300,00 €		28.301,00 €	
	Batteriespeicher	Kindergarten			5	1.000,00 €		5.000,00 €	
	Batteriespeicher	Gemeindehaus			15	750,00 €		11.250,00 €	
Summe								455.112,68 €	

Tabelle H-15: Mengen und Kosten für das Referenzszenario Blau

Referenzszenario	Kategorie	Komponente	Ort	Beschreibung	Menge	Kosten [€/Stück]	Inst. Kosten [€/Stück]	Gesamtkosten [€]	
	Wärmeerzg.	Pelletkessel + Pufferspeicher	Gemeindehaus		29.5 kW _{th}	1	17.000,00 €	4.000,00 €	21.000,00 €
		+ Pelletlager	Kindergarten		48 kW _{th}	1	20.000,00 €	4.500,00 €	24.500,00 €
		Pelletkessel + Pufferspeicher + Pelletlager	Grundschule		65.4 kW _{th}	1	23.000,00 €	5.000,00 €	28.000,00 €
Summe								73.500,00 €	