

Energetische Analyse zu einem Hybridheizungssystem für Kirchen

- Abschlussbericht -

Auftraggeber **Theod. Mahr Söhne GmbH**
Postfach 10 12 26
52012 Aachen
Ansprechpartner:
Dipl.-Ing. J. Reinecke



**MOONICH Produktkonzepte und
-realisierung GmbH**
Kramergasse 32
82054 Sauerlach
Ansprechpartner:
Herr L. Keussen



**Ausführende
Stelle** **Technische Universität Dresden**
Institut für Energietechnik
Helmholtzstraße 14
D - 01062 Dresden
Ansprechpartner:
Prof. Dr.-Ing. habil. J. Seifert
Dipl.-Ing. L. Schinke



Bearbeiter Dipl.-Ing. A. Meinzenbach
Dipl.-Ing. L. Schinke
Dr.-Ing. R. Gritzki
Dr.-Ing. M. Rösler

Datum 05.02.2026

Inhalt

1	Einleitung und Motivation	3
2	Ableitung einer Referenzkirche und typischer Randbedingungen	4
2.1	Beschreibung Beispielkirche St. Walburga	5
2.2	Messdaten St. Walburga	6
3	Numerische Simulationen	9
3.1	Simulationsprogramm TRNSYS	9
3.2	Ableitung Simulationsmodell.....	9
3.3	Definition von Randbedingungen.....	11
3.4	Nutzungsszenarien.....	13
3.5	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen	13
4	Bewertung des Einflusses heatme.....	18
4.1	Beschreibung heatme.....	18
4.2	Energiebilanz am Menschen und thermische Behaglichkeit	18
4.3	Ergebnisse	21
5	Einfache wirtschaftliche Bewertung	25
5.1	Randbedingungen / Szenarien	25
5.2	Monetäre Bewertung	26
5.3	Auswirkungen auf die CO ₂ - Emissionen	28
6	Zusammenfassung	30
7	Literaturverzeichnis.....	33
8	Anhang	35
8.1	Daten: Bausubstanz	35
8.2	Messdaten der Beispielkirche.....	36
8.3	Randbedingungen Simulation.....	37
8.4	Ergebnisse der Simulationen (Standort: Garmisch-Partenkirchen)	37
8.5	Wirtschaftliche Bewertung (Standort: Garmisch-Partenkirchen)	37
8.5.1	Monetäre Bewertung (Garmisch-Partenkirchen)	37
8.5.2	Auswirkungen auf die CO ₂ - Emissionen (Garmisch-Partenkirchen)	39

1 Einleitung und Motivation

Kirchengebäude sind auf Grund ihrer Kubatur, der oft historischen Bausubstanz und ihrer unregelmäßigen Nutzung eine anspruchsvolle Aufgabe mit Blick auf die Raumklimagestaltung. Zusätzlich befinden sich in Kirchen oft historische Güter sowie Musikinstrumente (Orgel), welche ein bestimmtes, idealerweise gleichbleibendes Raumklima zur Werterhaltung benötigen. Bislang wurden diese Raumklimaanforderungen meist durch eine Raumbeheizung in Verbindung mit speziellen, für den Kirchenbetrieb optimierten, Regelungstechniken erfüllt. Gleichzeitig wurde die Heizungstechnik oft genutzt, um den thermischen Komfort der Kirchenbesucher zu verbessern.

Durch die aktuell sehr hohen Kosten der Energieträger und politische Anforderungen an eine möglichst CO₂-sparende Beheizung, stehen Kirchengemeinden vor einigen Herausforderungen. Ziel der Überlegungen in den Kirchengemeinden ist es, die Beheizung von Kirchengebäuden auf neue und effizientere Systeme umzurüsten bzw. bestehende Systeme mit neuen Lösungsansätzen zu erweitern. Neben dem Fokus, die CO₂-Emissionen zu senken, soll die Änderung, Ergänzung oder Erneuerung der Anlagentechnik auch möglichst kostengünstig realisiert werden.

Um die genannten Anforderungen zu erfüllen, wird ein Hybridheizungssystem vorgeschlagen. Diese Kombination bestehend aus einer Basisheizung, welche die Grundtemperierung der Kirche sicherstellt, und elektrisch beheizbaren, langlebigen Akku-Heizkissen, welche von den Kirchenbesuchern während des Aufenthalts in der Kirche genutzt werden. Damit soll zum einen die Grundtemperierung zum Werterhalt der historischen Güter sichergestellt werden und zum anderen der persönliche thermische Komfort während der Nutzungszeit verbessert werden. Durch geeignete Anpassungen/Umbauten an den vorhandenen Heizsystemen, kann hierbei die gewünschte CO₂-Reduktion ohne eine vollständige Erneuerung der Heizungstechnik erreicht werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde eine energetische Analyse zu dieser Hybridheizung für Kirchen mittels numerischer Simulationen durch die TU Dresden durchgeführt. Weiterhin erfolgte eine Bewertung des thermischen Komforts bei der Nutzung von elektrisch beheizten Akku-Heizkissen bei verschiedenen Temperaturen während der Kirchennutzung. Eine vereinfachte Bewertung der Betriebskosten auf Grundlage der für verschiedene Szenarien, berechneten energetischen Aufwendungen sowie die Analyse der Auswirkungen verschiedener Betriebsweisen auf die CO₂-Emissionen schließt das Projekt ab.

2 Ableitung einer Referenzkirche und typischer Randbedingungen

Laut der erhobenen Statistik der evangelischen Kirche (Stand: 31.12.2022) gibt es in Deutschland insgesamt 20.469 Kirchen und Kapellen. Davon stehen 16.814 Gebäude unter Denkmalschutz. Die Aufteilung nach dem Baualter dokumentiert Tabelle 1. Die Anzahl der katholischen Kirchengebäude beträgt 22.200. Es ist davon auszugehen, dass sich die Baualtersklassen ähnlich verhalten. Ebenso der Anteil der denkmalgeschützten Gebäude.

Tabelle 1: Anzahl der Kirchengebäude in Deutschland (Stand: 31.12.2022) [1]

Kirchen und Kapellen	Evangelisch
Insgesamt	20.361
Denkmalgeschützt	16.850
Erbaut vor 1945	17332
1945 – 1990	2908
Nach 1990	121

Grundsätzlich gibt es nicht die eine Referenzkirche in Deutschland. Aufgrund der Statistik sollte allerdings von einem Altbau ausgegangen werden. In Absprache mit den Projektpartnern wurden folgende Eckdaten für eine repräsentative Kirche definiert.

- Volumen des Gebäudes: 3000 m³ bis 4000 m³
- Baukonstruktion:
 - Altbau (U-Wert der Außenwand ca. 1 W/(m²K))
 - Wandaufbau: massiv
 - Material: Backstein, o. ä.
 - Fenster: 1fach verglast
 - Altar/Chor gen Osten
 - ohne Keller, Betonplatte oder Lehm als Bodenplatte
 - Kirchendecke: Holz-Decke bzw. -Gewölbe (geringe, schadhafte Dämmung)
- Heizleistung für konventionelle Heizungsanlage: 100 kW bis 120 kW

Neben der Wahl von charakteristischen Randbedingungen bezüglich der Architektur und Bausubstanz erfolgte außerdem eine Recherche zu den allgemeinen Empfehlungen zum anzustrebenden Raumklima und zum Betrieb von Heizsystemen innerhalb von Kirchen. Hierbei wird fast durchgehend eine Beobachtung und Einregulierung der relativen Luftfeuchte auf einen Bereich von 45% bis 70% gefordert. Für die Winterperiode in Kirchen bedeutet dies, dass aktiv auf das Raumklima eingewirkt werden muss, da sonst Raum-

luftfeuchten weit über 70% zu erwarten sind [2]. Die für den Betrieb von Kirchenheizungen formulierten Empfehlungen, verfolgen somit den langfristigen Schutz von Gebäude und Einrichtung.

Nach [3] gibt es folgende Empfehlungen bezüglich des richtigen Raumklimas und der Betriebsweisen von Anlagen in Kirchen und Kapellen:

- Grundsätzlich sollte die Temperatur und die relative Luftfeuchte in der Kirche (z.B. im Altarraum, auf der Orgelempore, in Orgelgehäusen) gemessen und dokumentiert werden. Die relative Luftfeuchte darf den Bereich von 45% bis 70 % dauerhaft nicht unter- bzw. überschreiten. Akzeptabel ist ein Zeitraum von max. 1-2 Stunden. Auch schnelle Veränderungen der Luftfeuchte müssen vermieden werden.
- In Kirchen ohne Aufheizautomatik sollte die Temperatur nicht schneller als 1 K/h steigen oder fallen. Als Solltemperatur während der Nutzungszeit werden maximal 16 °C ausgewiesen, außerdem wird eine Aufheizautomatik der heizungstechnischen Anlage dringend empfohlen.
- Innerhalb der Kirchen mit Aufheizautomatik sollten Temperaturänderungen mit Gradienten von 0,5-1 K/h erfolgen. Die Solltemperatur während der Gottesdienste wird mit maximal 16 °C (bei Konzerten max. 18 °C) und die Grundtemperatur außerhalb der Nutzungszeit mit 8 °C angegeben. Die Temperatur sollte mindestens 1 h vor der Veranstaltung erreicht sein, damit insbesondere die empfindliche Orgeltechnik sich auf die veränderte Temperatur einstellen kann. Idealerweise erfolgt das Erreichen der Solltemperatur bereits 2 bis 3 h vorher, um mögliche Verstimmungen der Orgel zu vermeiden.
- Es wird eine Kombination aus niedriger Raumtemperatur (z.B. 12 °C) und dem Einsatz von körpernahen Heizungen empfohlen.
- Bei wiederholter Unter- oder Überschreitung der Grenzwerte für die Temperatur oder relative Luftfeuchtigkeit ist das zuständige Amt für Bau- und Kunstpflege einzuschalten.
- Der natürliche Luftwechsel beträgt 0,2 bis 0,5 1/h.
- Bei längeren Zeiten ohne Nutzung (Winter) sollte eine Grundtemperatur von 2 °C nicht unterschritten werden.

Weiterführende und sehr ähnliche Randbedingungen für die Beheizung von Kirchen sind in [4], [5] sowie [6] zu finden.

2.1 Beschreibung Beispielkirche St. Walburga

Im Rahmen des Projektes wurde auf Basis der beschriebenen Eckdaten eine charakteristische Beispielkirche ausgewählt. Die Wahl fiel auf die Kirche St. Walburga der Gemeinde Bornheim-Walberberg (Erzbistum Köln). Die Kirche ist im Wesentlichen ein Bau aus dem

frühen 11. Jahrhundert und geht zurück auf eine Klosterkirche der Zisterzienserinnen, mit Erweiterungen aus der 2. Hälfte des 12. Jahrhunderts und einem Chorabschluss, der um 1230 entstand. Die Kirche wurde am 17. Oktober 1944 schwer kriegszerstört und nach dem Krieg wieder aufgebaut. 1962 erhielt die Kirche neben dem Kirchenschiff einen neuen Turm. In den 1980er Jahren erfuhr die Kirche eine umfassende Renovierung. Die Außenansicht der Kirche dokumentiert Abbildung 1.



Abbildung 1: Außenansicht der Beispielkirche St. Walburga (Quelle: [7])

2.2 Messdaten St. Walburga

Für die gewählte Beispielkirche wurden von der Firma Theod. Mahr Söhne GmbH ausgewählte Messdaten zur Verfügung gestellt. Dazu zählen sowohl Temperaturverläufe innerhalb des Mittelschiffes sowie energetische und bauphysikalische Kennwerte.

Die Abbildung 2 und Abbildung 3 dokumentieren beispielsweise einen charakteristischen Temperaturverlauf inklusive der entsprechenden Aufheizvorgänge Ende Dezember 2024. Dargestellt sind die Ist-Temperatur (rot), die Soll-Temperatur (schwarz) und die Außentemperatur (grün). Die durchschnittliche Außentemperatur beträgt ca. 1,6 °C. Hierbei ist insbesondere die hohe Trägheit des Gebäudes gut erkennbar. Trotz relativ geringer Außentemperaturen sinkt die Ist-Temperatur im betrachteten Zeitraum kaum

Energetische Analyse zu einem Hybridheizungssystem für Kirchen

unter 10 °C. Begründet werden kann dies mit der typischen baulichen Schwere von Kirchengebäuden sowie den vorhandenen Einbauten wie z.B. Säulen, Altar und Orgel.

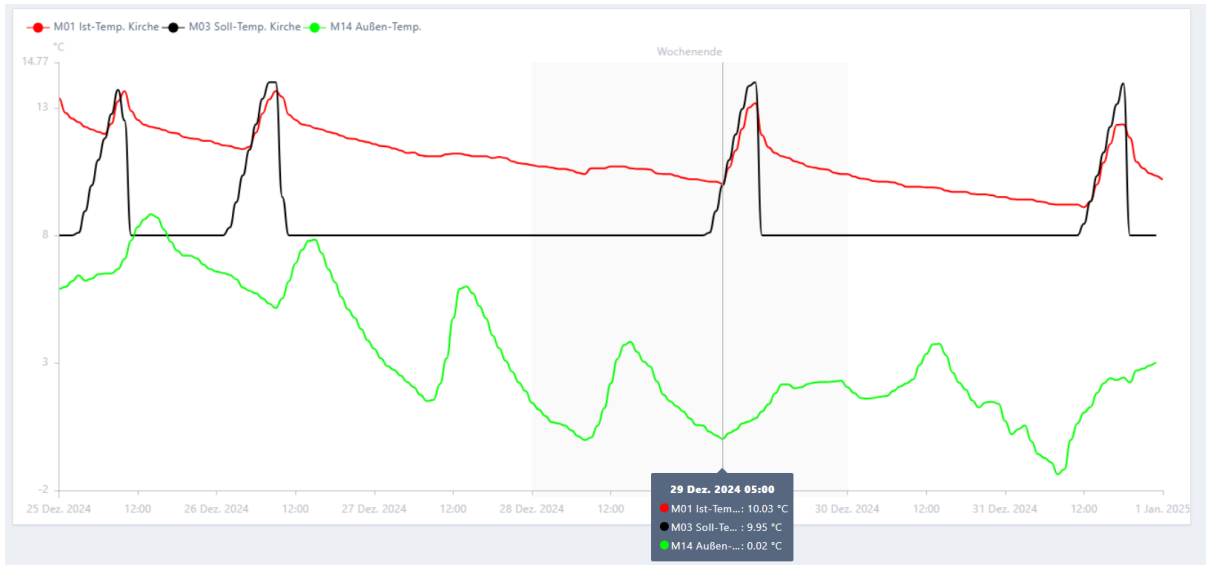


Abbildung 2: Messdaten der Temperaturverläufe (29.12.2024)



Abbildung 3: Messdaten der Temperaturverläufe (30.12.2024)

Neben den Messungen der Temperaturverläufe standen auch Angaben hinsichtlich der Daten zum Energieverbrauch seit der Inbetriebnahme der installierten Wärmepumpenanlagen zur Verfügung. Daraus lässt sich folgendes ableiten: Die Inbetriebnahme erfolgte am 01.11.2023. Die Gesamtwärmemenge der zwei Heizperioden (2023/2024 und 2024/2025) beträgt 65850 kWh. Dies ergibt einen Jahresmittelwert von 32925 kWh/a.

Aus den Laufzeiten der Ventilatoren kann abgeschätzt werden, dass ca. 75% für die Kirche aufgewendet wurden. Dies entspricht rund 24.700 kWh/a für die Beheizung der Kirche (ohne Turm und ohne Sakristei). Der Klimafaktor für das Klima in Walberberg beträgt lt. Deutschem Wetterdienst (DWD) ca. 1,3 gegenüber dem Testreferenzjahr (TRY) aus Potsdam, welches für die numerischen Simulationen zu Grunde gelegt wird. Damit ergibt sich ein Wert von rund 32.100 kWh/a für die Kirchenheizung bezogen auf den Standort Potsdam.

Weitere Messdaten können dem Anhang unter Kapitel 8.2 entnommen werden.

3 Numerische Simulationen

3.1 Simulationsprogramm TRNSYS

Für die Erstellung des Gebäudemodells sowie die Umsetzung der numerischen Simulationen im Rahmen der vorliegenden Studie kommt das numerische Simulationsprogramm TRNSYS-TUD [8] zum Einsatz. Es handelt sich dabei um eine umfassend überarbeitete und erweiterte Programmversion des kommerziellen Simulationsprogrammes TRNSYS, wobei TRNSYS für „*Transient System Simulation Program*“ steht. Das Programm besitzt eine offene und modulare Struktur, wodurch es besonders für Forschungszwecke geeignet ist. Jeder Baustein eines Gebäudes (z. B. Gebäudehülle, technische Anlage) kann mittels sogenannter „*Types*“ nachgebildet werden, die miteinander im Informationsaustausch stehen. Die innerhalb der Module hinterlegten Algorithmen basieren dabei auf analytischen bzw. numerischen Verfahren, auf Kennlinienmodellen oder einer Kombination der Möglichkeiten. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Version basiert auf dem Standard Quellcode der Version 14.2. Die Zuverlässigkeit des genannten Quellcodes ist in zahlreichen Arbeiten ausführlich getestet worden ([9], [10], [11]) und soll daher hier nicht weiter kommentiert werden.

3.2 Ableitung Simulationsmodell

Für die Zielstellung dieser Arbeit ist es notwendig, die realen Verhältnisse in ein numerisches Modell zu überführen, bei dem die wichtigsten Wechselwirkungen dynamisch exakt wiedergegeben werden. Hierzu wird ein Modell der repräsentativen Beispielkirche St. Walburga erstellt, welches nachfolgend beschrieben werden soll. Auf Basis der zur Verfügung gestellten Planungsunterlagen sowie ergänzenden Informationen bezüglich der Baumaterialien entstand das verwendete Gebäudemodell (siehe Abbildung 4 bis Abbildung 7). Die zugrunde liegenden Eckdaten der Bausubstanz sowie die verwendeten Baustoffe innerhalb der Simulation können dem Anhang unter Kapitel 8.1 entnommen werden.

Das Gebäudemodell besteht insgesamt aus 13 Zonen, es werden allerdings nur 5 beheizt. Dazu zählen das Mittelschiff (bestehend aus 2 übereinander liegenden Zonen), die beiden Seitenschiffe sowie die Sakristei. Die beheizte Fläche¹ beträgt ca. 550 m² und das beheizte Volumen ca. 4400 m³.

¹ Die Werte der beheizten Fläche sowie des Volumens beziehen sich auf die Berechnung mit Achsmittenmaßen, d.h. die Werte der Innenabmessungen sind geringer.

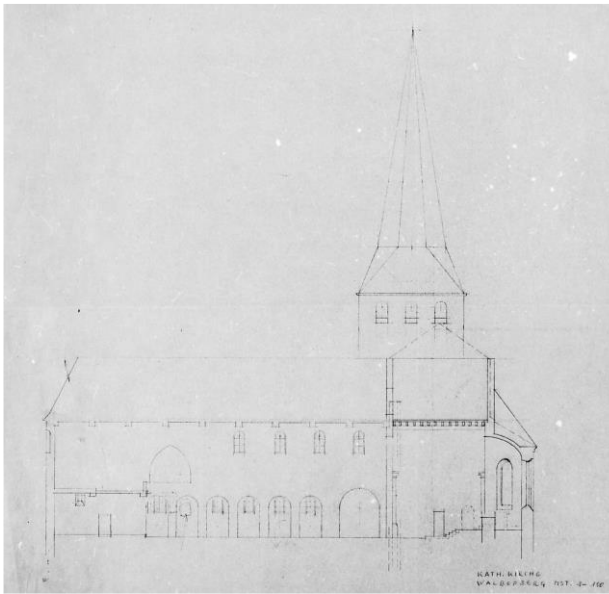


Abbildung 4: Ansicht (Planungsunterlagen)

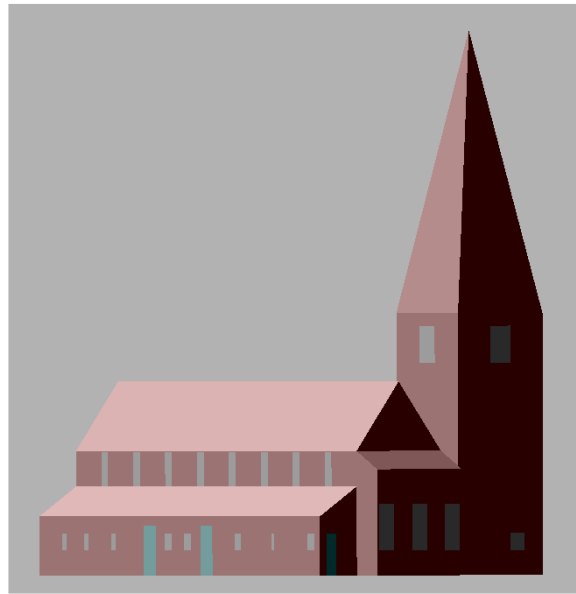


Abbildung 5: Gebäudemodell (TRNSYS-TUD)

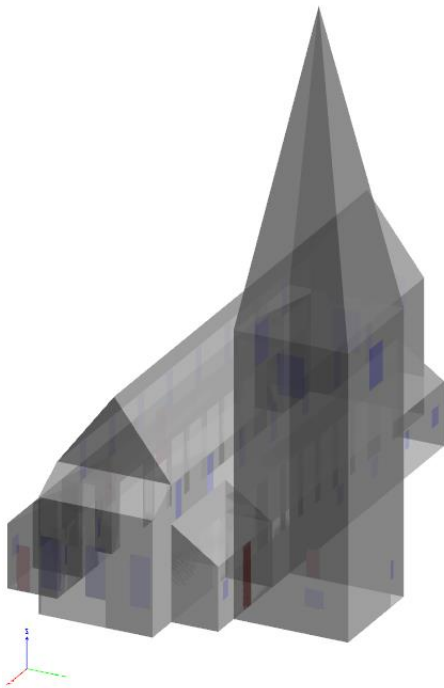


Abbildung 6: Modell (13 Zonen)

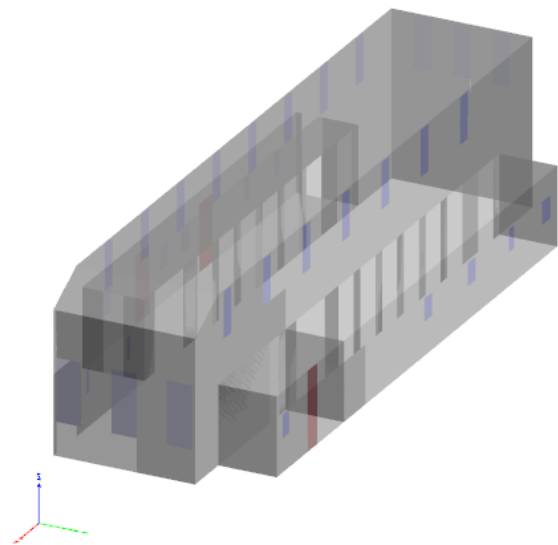


Abbildung 7: Modell (5 beheizte Zonen)

Für die Dimensionierung der Basisheizung erfolgte zunächst eine stationäre Berechnung der Heizlast² wurde für eine Solltemperatur von 15°C und bei einem 0,5-fachen Luftwechsel berechnet. Dies erfolgte sowohl für eine Außentemperatur von

² Innerhalb der stationären Heizlastberechnung werden keine inneren Gewinne berücksichtigt, das heißt es gibt weder einen Wärmeeintrag über solare Gewinne noch durch anwesende Personen.

-14°C als auch für -16°C, um die numerischen Simulationen für unterschiedliche Standorte (Potsdam und Garmisch-Partenkirchen) realisieren zu können. Die Ergebnisse dokumentiert Tabelle 2. Die Spalte $\dot{Q}_{stationär}$ enthält den berechneten Wert der benötigten Heizlast bei der entsprechenden Außentemperatur, allerdings ist in diesem Fall nicht die stark intermittierende Betriebsweise innerhalb der Kirche berücksichtigt. Die Spalte $\dot{Q}_{instationär}$ enthält den innerhalb der Simulation umgesetzten Wert der Heizleistung, hier wurde die Heizlast mit einem Faktor von 35 % Leistungsreserve beaufschlagt. So kann sichergestellt werden, dass die Leistung ausreichend dimensioniert ist um die zum Gottesdienst gewünschten Solltemperaturen zu Beginn der Nutzungszeit zu erreichen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Heizlastberechnung

	$\dot{Q}_{stationär}$	$\dot{Q}_{instationär}$
Potsdam	67,2 kW	90,7 kW
Garmisch-Partenkirchen	71,6 kW	96,7 kW

Innerhalb der numerischen Simulationen wird eine idealisierte Heizungsanlage genutzt. Im Detail erfolgt dies in den fünf zu beheizenden Zonen durch die Definition innerer Wärmequellen. Die maximal zur Verfügung stehende Leistung entspricht der Heizlast der Zone plus der Leistungsreserve, aufgerundet auf „glatte“ Werte.

Tabelle 3: Leistung der internen Wärmequellen (je Zone)

Zone	Potsdam	Garmisch-Partenkirchen
Mittelschiff (EG)	23.000 W	25.000 W
Seitenschiff Nord	11.000 W	11.000 W
Sakristei	4.000 W	4.300 W
Seitenschiff Süd	13.000 W	14.000 W
Mittelschiff (OG)	42.000 W	45.000 W
Summe	93.000 W	99.300 W

3.3 Definition von Randbedingungen

Für die numerischen Analysen erfolgt zur Modellierung der klimatischen Bedingungen die Verwendung von (mittleren) Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes für die zwei Standorte Potsdam und Garmisch-Partenkirchen. Die Tabelle 5 zeigt einen kurzen Überblick der Wetterdaten beider Städte. Die Verläufe der Außenlufttemperatur dokumentieren Abbildung 8 sowie Abbildung 9.

Tabelle 4: Übersicht TRY 2015 (DWD)

Kennwert	Potsdam	Garmisch-Partenkirchen
Maximaltemperatur	35,7 °C	29,3 °C
Minimaltemperatur	-10,9 °C	-16,6 °C
Mittelwert (Jahr)	10,0 °C	7,4 °C
Mittelwert (Heizperiode)	4,9 °C	3,7 °C

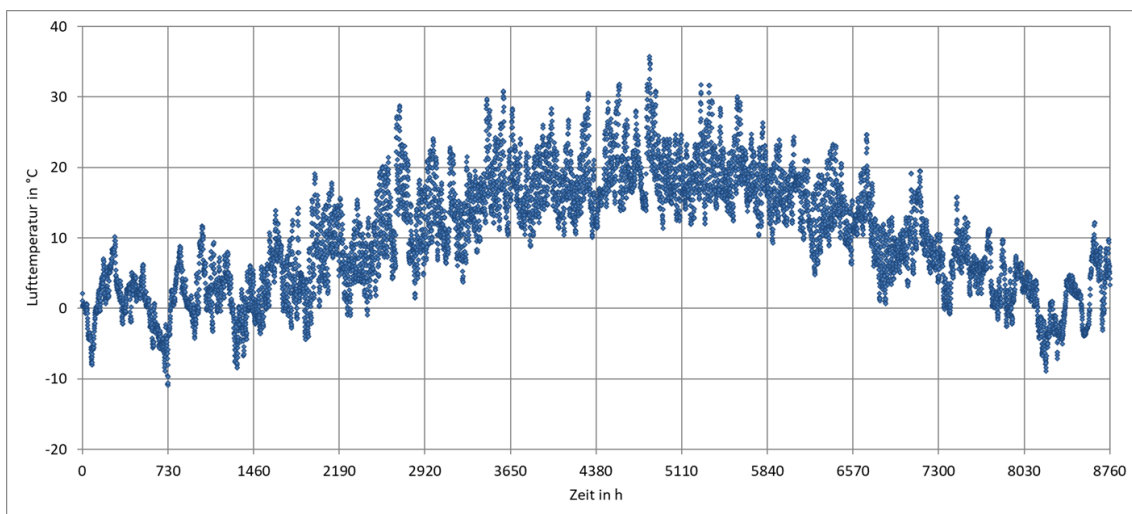


Abbildung 8: Verlauf der Lufttemperatur, Standort: Potsdam

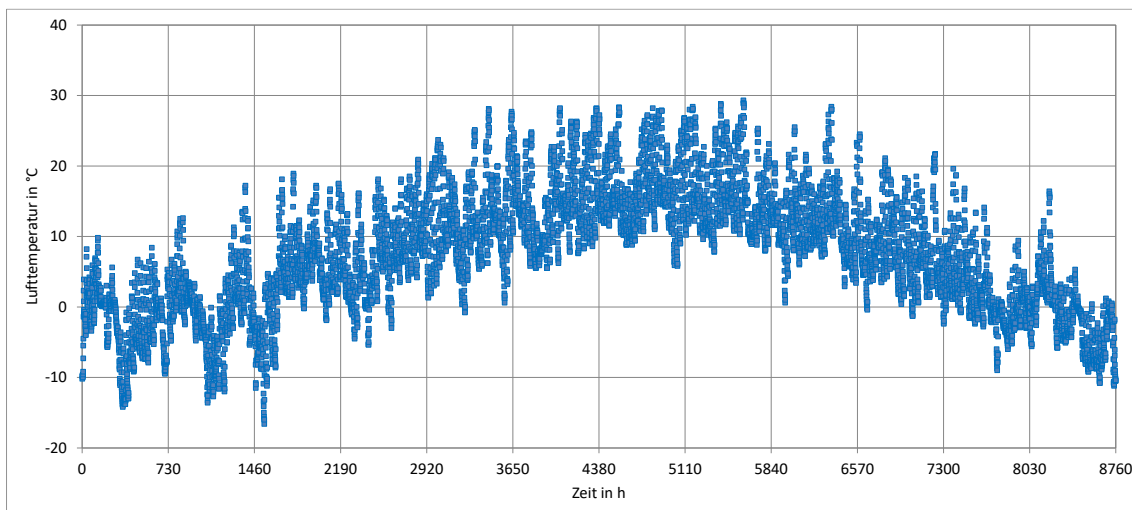


Abbildung 9: Verlauf der Lufttemperatur, Standort: Garmisch-Partenkirchen

3.4 Nutzungsszenarien

Für die Nutzungszeiten innerhalb der Kirche wird von drei regelmäßigen Veranstaltungen (z.B. Sonntagsgottesdienst, Werktagsgottesdienst und Schulgottesdienst) pro Woche sowie eine unregelmäßig stattfindende Veranstaltung (z.B. Taufe, Hochzeit, Trauerfeier, Konzert) ausgegangen. Folglich wurden 4 Ereignissen pro Woche definiert, wobei jede Woche des Jahres identisch ist:

- Dienstag: 18:00 – 19:00 Uhr
- Donnerstag: 08:00 – 09:00 Uhr
- Samstag: 14:00 – 15:30 Uhr
- Sonntag: 09:30 – 11:15 Uhr

Während der genannten Nutzungszeiten beträgt der Sollwert der operativen Temperatur 14 °C (Basisvariante). Die Grund- oder Stütztemperatur außerhalb der Nutzungszeiten wurde mit 8 °C definiert. Außerdem wird innerhalb der Aufheizphase der Raumheizung eine kontrollierte Aufheizung mit 1 K/h (Heizautomatik) berücksichtigt.

Neben der beschriebenen Basisvariante wurden weitere Simulationen mit variierenden Temperaturen während der Nutzungszeiten umgesetzt. Zusätzlich wurde eine Variante im durchgehenden Komfortbetrieb betrachtet, d.h. die Kirche wird 24 h am Tag und 7 Tage die Woche auf 14 °C beheizt. Eine Übersicht der Variantenmatrix zeigt Tabelle 5. Diese Matrix wurde für beide Standorte realisiert.

Hinsichtlich der relevanten Wärme- und Feuchtequellen wird in allen Veranstaltungen von 50 anwesenden Personen während der Nutzungszeit ausgegangen.

Tabelle 5: Variantenmatrix

Variante	Grundtemperatur	Solltemperatur (Nutzungszeit)
Basis	8 °C	14 °C
VAR008	8 °C	8 °C
VAR012	8 °C	12 °C
VAR016	8 °C	16 °C
VAR014	14 °C	14 °C

3.5 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Für die Auswertung der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen lag der Fokus zum einen auf der Auswertung der Temperaturen innerhalb der beheizten Zonen mit dem Ziel der Einhaltung der definierten Sollwerte während der Nutzungszeit sowie auf der Analyse und dem Vergleich des energetischen Heizaufwandes. Die Abbildung 10 dokumentiert den Verlauf der Zone 1 (entspricht dem Mittelschiff) für einen charakteristischen

Tag der Heizperiode bei mittleren, winterlichen Verhältnissen (Außentemperaturen liegen im Bereich von 0 °C, siehe Anhang: Abbildung 24). Die Nutzungszeit dauert von 18:00 bis 19:00 Uhr und es ist gut erkennbar, dass während dieser Zeit die Solltemperatur von 14 °C erreicht wird. Die definierte Aufheizphase beginnt bereits 12:15 Uhr und der Sollwert steigt um 0,25 K im Viertelstundentakt. So wird sichergestellt, dass die Temperatur nicht schneller als 1 K/h ansteigen kann.

Neben den taggenauen Verläufen erfolgte die Auswertung der Empfindungstemperaturen innerhalb der beheizten Räume auch für die gesamte Heizperiode. Dies wurde über die Summenhäufigkeiten realisiert. Die Abbildung 11 dokumentiert den Verlauf am Beispiel des Mittelschiffes. Es wird deutlich, dass nur minimale negative Abweichungen (- 0,5 K) vom Sollwert auftreten, d.h. das während der gesamten Heizperiode die Solltemperaturen während der Nutzungszeit eingehalten werden. Zusätzlich ist zu erkennen, dass es zum Teil zu positiven Abweichungen des Sollwertes kommt. Dies lässt sich durch solare bzw. innere Gewinne begründen.

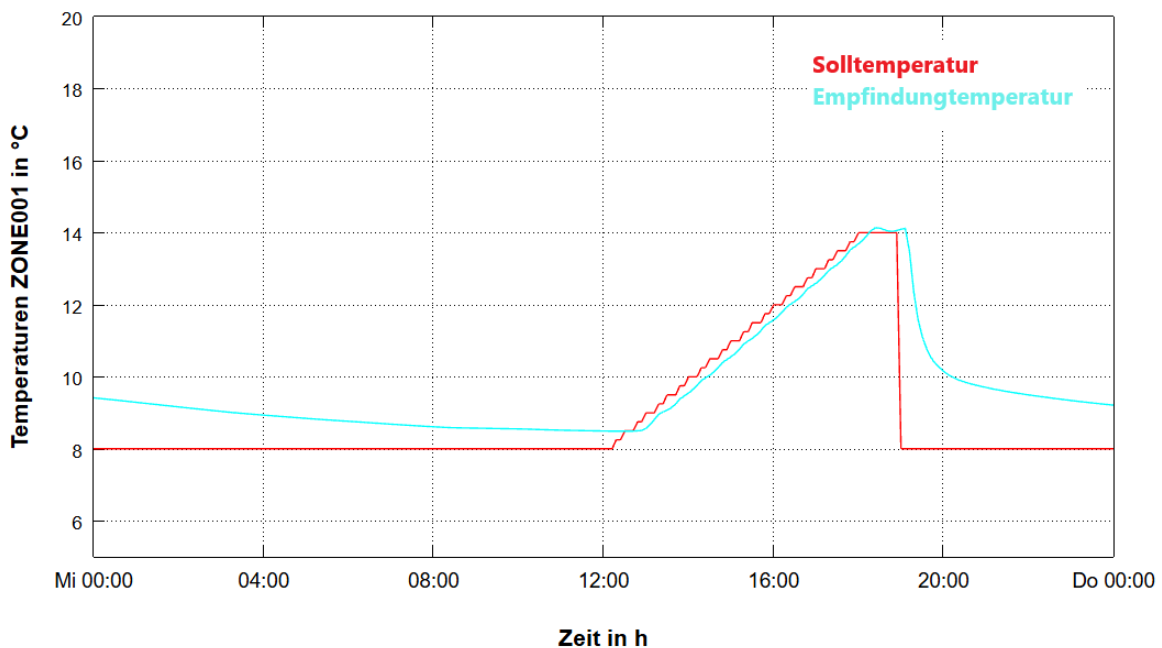


Abbildung 10: Verlauf der Empfindungstemperatur des Mittelschiffes inkl. vorgegebener Solltemperatur für die Regelung (Potsdam)

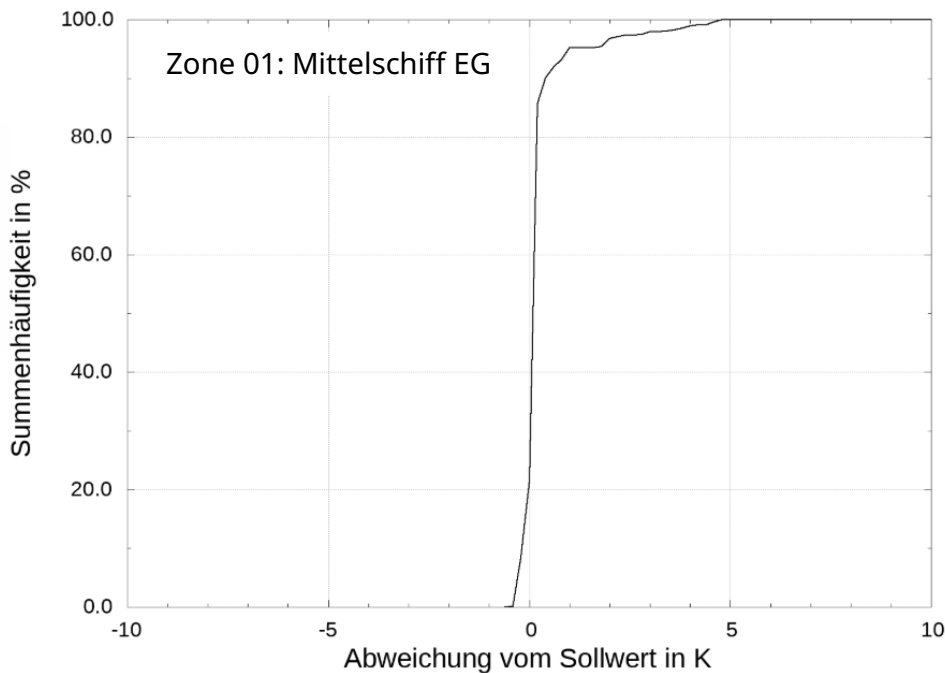


Abbildung 11: Summenhäufigkeit - Mittelschiff EG (Zone 01)

Hinsichtlich des Vergleichs der Ergebnisse der numerischen Simulation der Basisvariante mit den zur Verfügung gestellten Temperaturverläufen (vgl. Kapitel 2.2) konnte eine hinreichend genaue Übereinstimmung erreicht werden. Ähnlich den Verläufen der Messwerte zeigt sich auch innerhalb der Simulation ein sehr träges Verhalten während der Abkühlphase.

Auch der Vergleich der errechneten energetischen Kennwerte mit den angegebenen Verbrauchsdaten der Fa. Mahr (vgl. Kapitel 2.2) ergibt nur geringe Differenzen. Diese liegen für die Basisvariante in einem Bereich von ca. 5 %.

Die energetischen Kennwerte der durchgeführten Varianten dokumentiert die Tabelle 6 für den Standort Potsdam und Tabelle 7 für Garmisch-Partenkirchen. Die Tabellen zeigen jeweils in der 1. Ergebnisspalte die Werte der Basisvarianten, aufgeteilt in die abgegebene thermische Energie der einzelnen Zonen sowie die Summe für die gesamte Kirche. Zusätzlich sind in den rechten Spalten die Ergebnisse der Variantenrechnungen enthalten. Es zeigt sich, dass sich in der VAR008 und VAR012 energetische Einsparungen und in den VAR016 und VAR014 Mehraufwendungen aufgrund der Absenkung bzw. Anhebung der Solltemperaturen ergeben. Die beiden untersten Zeilen der Tabelle weisen die auftretenden Differenzen als Absolutwert sowie die prozentuale Differenz bezogen auf die Basisvariante aus.

Tabelle 6: Vergleich der energetischen Kennwerte der Variantenmatrix (Potsdam)

	Einheit	Basis	VAR008	VAR012	VAR016	VAR014
$Q_{\text{Mittelschiff}}$	kWh	21.998	15.136	18.007	27.843	43.862
$Q_{\text{Seitenschiff (N)}}$	kWh	3.404	2.310	2.765	4.328	6.985
$Q_{\text{Seitenschiff (S)}}$	kWh	5.153	4.306	4.693	6.039	12.314
$Q_{\text{Sakristei}}$	kWh	1.289	877	1.042	1.658	2.705
Q_{Gesamt}	kWh	31.844	22.629	26.507	39.868	65.865
q_{Gesamt}	kWh/m ²	57,7	41,0	48,0	72,3	119,4
ΔQ_{Gesamt} (absolut)	kWh		-9.215	-5.337	8.024	34.021
ΔQ_{Gesamt} (relativ)	%		-28,9	-16,8	25,2	106,8

Tabelle 7: Vergleich der energetischen Kennwerte der Variantenmatrix (Garmisch-Partenkirchen)

	Einheit	Basis	VAR008	VAR012	VAR016	VAR014
$Q_{\text{Mittelschiff}}$	kWh	28.811	21.624	24.702	34.734	53.210
$Q_{\text{Seitenschiff (N)}}$	kWh	4.405	3.363	3.812	5.259	8.346
$Q_{\text{Seitenschiff (S)}}$	kWh	6.885	5.787	6.282	7.725	14.623
$Q_{\text{Sakristei}}$	kWh	1.654	1.235	1.417	2.012	3.209
Q_{Gesamt}	kWh	41.755	32.009	36.213	49.729	79.388
q_{Gesamt}	kWh/m ²	75,7	58,0	65,6	90,1	143,9
ΔQ_{Gesamt} (absolut)	kWh		-9746	-5541	7975	37633
ΔQ_{Gesamt} (relativ)	%		-23,3	-13,3	19,1	90,1

Ein Vergleich der Varianten VAR008 und VAR014 zeigt, dass sich erwartungsgemäß niedrigere Raumtemperaturen auch in niedrigeren Energiebedarfen widerspiegeln. Interessant ist hierbei, dass die häufig genannte Faustregel »Absenken der Raum-Mitteltemperatur um 1 °C spart rund sechs Prozent Energie« hier deutlich zu gering angesetzt ist. Für den Vergleich der obigen Varianten ergibt sich unter den definierten Randbedingungen eine durchschnittliche Reduktion der Energiemenge von bis zu 11% je reduziertem Kelvin in der Raum-Mitteltemperatur³.

Dies begründet sich mit dem insgesamt niedrigeren Raum-Temperaturniveau (Kirche: 8°C bis 14°C; Wohnraum: ca. 21°C) und bestätigt entsprechende Vermutungen aus [4]. Deutlich widerlegt werden kann anhand der Simulationsergebnisse die gelegentlich anzutreffende Aussage, dass eine konstante Beheizung im Vergleich zu einer instationären Beheizung nur geringfügig höhere Betriebskosten verursacht.

Der Vergleich der Basis-Variante mit VAR014 zeigt, dass die dauerhafte Beheizung bei 14°C in etwa doppelt so viel Energie benötigt, wie die instationäre Beheizung mit einer

³ Operative Raumtemperatur (Empfindungstemperatur), Sensorwert der Raumdiagonalen

Basistemperatur von 8°C und einer Nutzungstemperatur von 14°C. Wichtig ist es hierbei, darauf hinzuweisen, dass innerhalb des Simulationsmodells die Empfindungstemperatur als Solltemperatur geregelt wird. Die Empfindungstemperatur und damit der Komfort der Kirchenbesucher zu den Nutzungszeiten ist demnach in beiden Varianten gleich.

Es treten in beiden Städten identische Tendenzen auf. Die energetischen Kennwerte sind in Garmisch-Partenkirchen aufgrund der tieferen Außentemperaturen höher. Die auftretenden absoluten Differenzen der einzelnen Varianten liegen jedoch in der gleichen Größenordnung. Hinsichtlich der prozentualen Differenzen treten niedrigere Werte auf, dies kann mit den höheren energetischen Kennwerten der Basisvariante begründet werden. Grundsätzlich ist anzumerken, dass sowohl die VAR008 (Grund- und Nutztemperatur betragen durchgehend 8 °C) als auch die VAR014 (Grund- und Nutztemperatur betragen durchgehend 14 °C) jeweils als Extremfälle zu betrachten sind.

Neben den energetischen Verbrauchswerten erfolgte die Analyse der maximal abgerufenen Heizleistung der Basisvariante. Das Ergebnis zeigt einen Maximalwert von $\dot{Q}_{\max} = 88,02 \text{ kW}$ für den Standort Potsdam, dies entspricht einem Leistungsverhältnis von 1,31 bezogen auf den Wert der stationären Heizlastberechnung von $\dot{Q}_{\text{stationär}} = 67,2 \text{ kW}$ und bestätigt folglich die getroffene Annahme der Leistungsreserve von 35% als sinnvollen Wert. Die maximale Heizleistung der Basisvariante des Standortes Garmisch-Partenkirchen können dem Anhang unter Kapitel 8.4 (Tabelle 13) entnommen werden.

4 Bewertung des Einflusses *heatme*

4.1 Beschreibung *heatme*

heatme ist ein elektrisch betriebenes Heizkissen der Fa. MOONICH. Es verfügt über drei Leistungsstufen, wobei bei der höchsten Leistungsstufe 15 W thermische Energie über die Oberfläche (Sitzseite) abgegeben werden. Die Abmaße betragen 40 cm x 30 cm x 4 cm oder 40 cm x 40 cm x 4 cm. Das Laden des Akkus des Sitzkissens erfolgt induktiv. Das Heizkissen ist sehr langlebig und es wird eine garantierte Reparaturfähigkeit über 10 Jahre gewährt. Die Abbildung 12 zeigt exemplarisch ein Heizkissen des Types „*heatme smart*“. Unter [12] können weitere technische Daten entnommen werden.



Abbildung 12: Beispielhafte Darstellung *heatme*, [12]

Mit Hilfe von *heatme* soll dem Kirchenbesucher lokal thermische Energie in Rumpf und Oberschenkel zugeführt und so seine thermische Behaglichkeit erhöht werden. Die grundsätzliche Funktionalität der körpernahen Wärmeeinbringung ist z.B. von der Sitzheizung im Auto bekannt.

4.2 Energiebilanz am Menschen und thermische Behaglichkeit

Thermische Behaglichkeit beschreibt das subjektive Wohlbefinden eines Menschen in Bezug auf seine thermische Umgebung. Sie ist erreicht, wenn weder ein Wärme- noch ein Kältegefühl besteht – also ein Zustand der thermischen Neutralität. Ziel ist es durch die Beheizung von Räumen diesen Zustand zu erreichen. Wesentliche Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit sind:

- Lufttemperatur
- Strahlungstemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Luftbewegung
- Kleidung
- Aktivität des Menschen

Um die thermische Behaglichkeit des Menschen beschreiben bzw. über Ansätze berechnen zu können, lassen sich die Berechnungsverfahren der ISO 7730 [13] nutzen.

Der oben beschriebene Zustand der thermischen Neutralität liegt vor, wenn die Energiebilanz des Menschen ausgeglichen ist. Das bedeutet, dass der Bruttoenergieumsatz (je nach Aktivität) gleich der Summe aus feuchter und trockener Wärmeabgabe ist. Die feuchte Wärmeabgabe setzt sich aus Atmung, Diffusion und Verdunstung zusammen. Die trockene Wärmeabgabe wird durch Konvektion und Strahlung beschrieben. Hauptinflussgrößen auf diese beiden Effekte sind zum einen die Lufttemperatur sowie die Strahlungstemperatur. Wird die Energiebilanz des Menschen nicht erfüllt, kann die Bilanz durch die Einbringung weiterer thermischer Energie, beispielsweise über *heatme* geschlossen, bzw. die Differenz verringert werden. Die Abbildung 13 illustriert die Energiebilanz am Menschen.

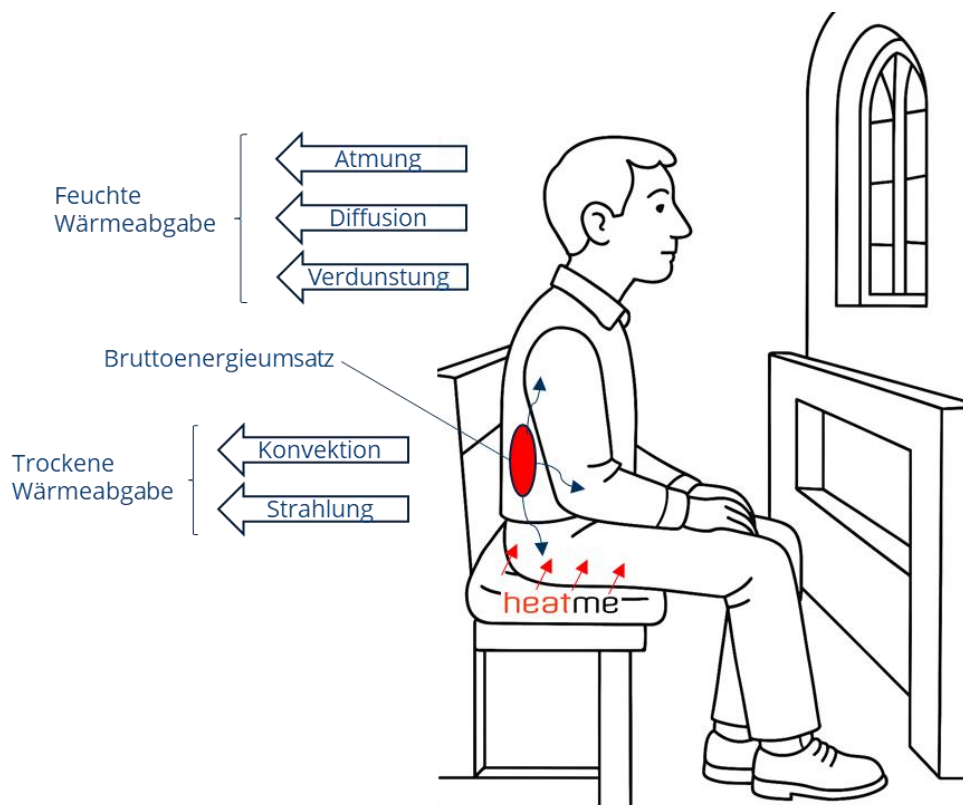


Abbildung 13: Energiebilanz am Menschen mit Einsatz von *heatme*

Basierend auf den oben genannten sechs Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit wurde das international anerkannte Verfahren zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen, das PMV/PDD-Modell entwickelt. Dabei beschreiben die beiden Größen PMV und PPD folgendes:

- PMV (Predicted Mean Vote): Gibt an, wie eine große Gruppe von Personen das thermische Empfinden eines Raums durchschnittlich bewertet. Es wird eine Skala von -3 (kalt) bis +3 (heiß) definiert, wobei 0 der thermischen Neutralität entspricht.
- PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied): Schätzt den Prozentsatz der Personen, die trotz optimaler Bedingungen thermisch unzufrieden sein werden. Selbst bei PMV = 0 liegt der PPD-Wert aufgrund individueller Unterschiede in der Wahrnehmung mindestens bei etwa 5 %.

Der Zusammenhang zwischen den beiden Kenngrößen ist in Abbildung 14 dargestellt.

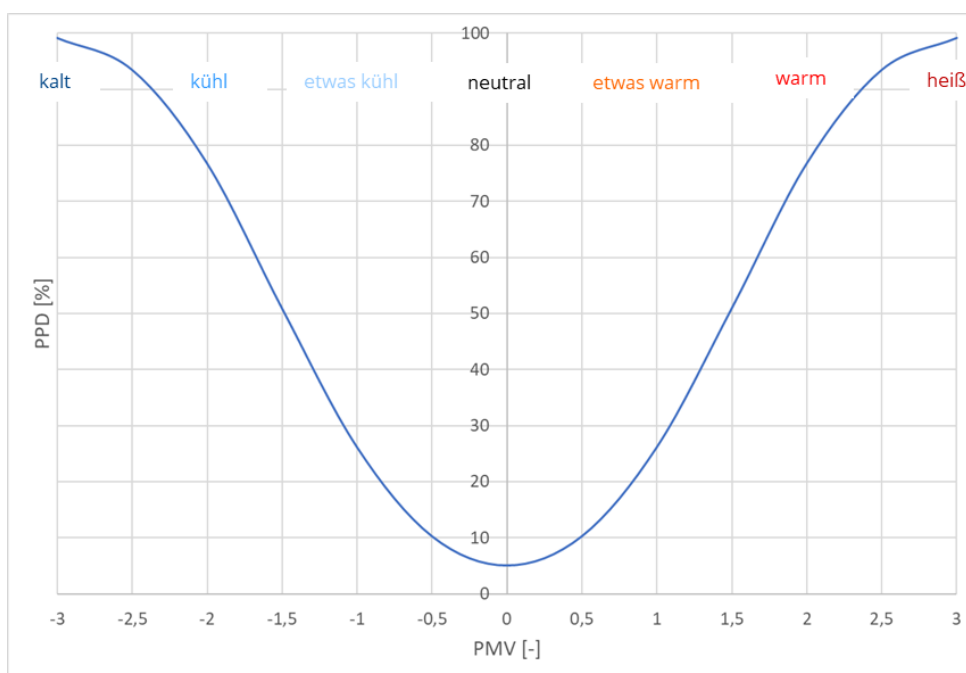


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen PMV- und PDD-Index

Für die Analysen in dem hier untersuchten Fall der hybriden Kirchenheizung erfolgte eine Modifikation des Verfahrens dahingehend, dass der Energieeintrag *heatme* direkt in die thermische Bilanz des Menschen integriert wurde. In den Untersuchungen wurden dann die Einflussgrößen Bruttoenergieumsatz, Bekleidung sowie Luft- und Strahlungstemperatur näher betrachtet und variiert.

Der Bruttoenergieumsatz kann aus der DIN EN ISO 7730 – Anhang B für verschiedene Aktivitäten entnommen werden. Für die Kirchenbesucher wird von folgenden Aktivitäten ausgegangen:

- entspannt sitzende Tätigkeit: 58 W/m^2 - z.B. während des Gottesdienstes
- sitzende Tätigkeit: 70 W/m^2 - z.B. wechselnde Positionen beim Sitzen. Knien, Stehen während des Gottesdienstes

Werte für den Isolationswert der Bekleidung können ebenfalls der DIN EN ISO 7730 – Anhang C entnommen werden. In den Untersuchungen werden folgende zwei Bekleidungsarten unterschieden:

- winterliche Kleidung (z.B. Unterwäsche mit kurzen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Weste, Jacke, Mantel, Socken, Schuhe) mit einem Isolationswert von 1,50 clo
- tiefwinterliche Kleidung (z.B. Unterwäsche mit kurzen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, schwere Steppjacke und Overall, Socken, Schuhe) mit einem Isolationswert von 2,0 clo

Die Werte für die sich in der Kirche einstellenden Luft- und Strahlungstemperaturen werden aus den durchgeführten numerischen Simulationsrechnungen (vgl. Kapitel 3) anhand der Variantenmatrix für die Empfindungstemperatur während der Nutzungszeit (siehe Tabelle 5) übernommen und in der Analyse berücksichtigt. Eine Unterscheidung in der Betrachtung der Basisvariante und der VAR014 erfolgt nicht, da in beiden Varianten zur Nutzungszeit eine Empfindungstemperatur von 14 °C vorliegt.

4.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse der thermischen Behaglichkeit dargestellt. Dabei wird immer zwischen der Empfindungstemperatur (Zahl vor /) während der Nutzungszeit und dem Betrieb *heatme* (Zahl nach / mit 0 ... *heatme* aus, 1 ... *heatme* an) unterschieden.

In Abbildung 15 ist für den entspannt sitzenden Kirchenbesucher mit winterlicher Kleidung die Analyse der thermischen Behaglichkeit mittels des PMV- und PPD-Index dargestellt. Es ist zu erkennen, dass für den Fall, abgeschalteter *heatme* in Abhängigkeit der Empfindungstemperaturen ein thermisches Gefühl von etwas kühl bis kalt vorliegt. Einher geht damit eine große Anzahl von zu erwartenden unzufriedenen Personen – bei einer Empfindungstemperatur von ca. 20 % bei 16 °C bis zu 95 % bei 8 °C. Das bedeutet, dass bei einer Empfindungstemperatur von 8 °C 95 von 100 Kirchenbesuchern das Raumklima als kalt und unbehaglich empfinden werden. Bei der Basisvariante mit einer Empfindungstemperatur von 14 °C wird ein kühles Empfinden sowie ein Prozentsatz an Unzufriedenen von 38 % erwartet. Wird in diesem Fall *heatme* genutzt, ändert sich das Empfinden zu etwas kühl und der Prozentsatz Unzufriedener sinkt auf 15 %. Das bedeutet, dass durch den Einsatz *heatme* nur noch 15 statt 38 von 100 Kirchenbesuchern das Raumklima als etwas kühl bewerten. Dieser Effekt ist für alle untersuchten Empfindungstemperaturen ersichtlich. Durch den Betrieb *heatme* kann bei jeder Empfindungstemperatur eine Verbesserung des PMV-Index um 0,55 erzielt werden. Auf Grund des nicht linearen Zusammenhangs zwischen PMV- und PPD-Index ist der Einfluss des Betriebes *heatme* in

Bezug auf den Prozentsatz der Unzufriedenen bei kühleren Empfindungstemperaturen entsprechend größer.

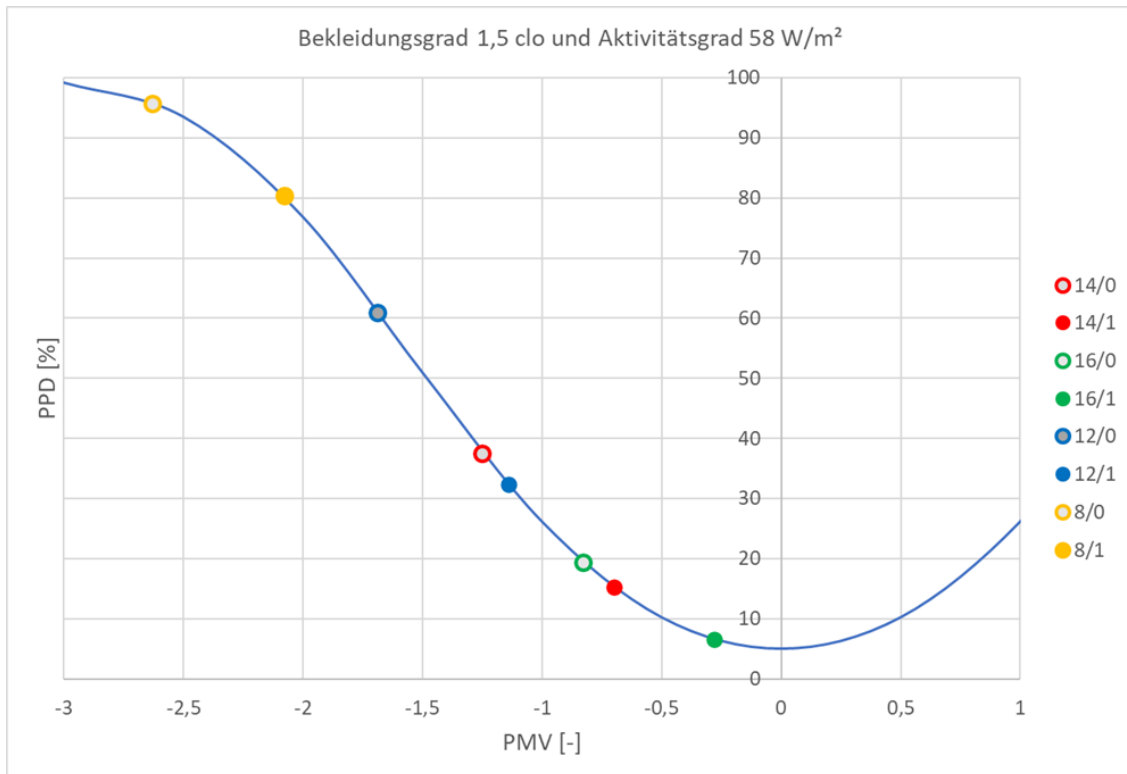


Abbildung 15: Darstellung der Ergebnisse für den PMV- und PPD-Index für entspannt sitzend, winterliche Kleidung und Variation der Empfindungstemperatur sowie Betrieb *heatme*

Nimmt man für den Kirchenbesucher eine etwas höhere Aktivität (sitzende Tätigkeit) an, so ist erkennbar, dass sich das thermische Empfinden ohne *heatme* in Richtung „etwas kühl“ verschiebt, siehe Abbildung 16. Für die Basisvariante mit einer Empfindungstemperatur von 14 °C beträgt der PMV-Index -0,63 (etwas kühl) und der PPD-Index 14 %. Durch den Einsatz *heatme* findet eine Verbesserung des thermischen Komforts auf -0,19 statt, was nah dem neutralen thermischen Empfinden ist. Der Prozentsatz der Unzufriedenen verkleinert sich auf 6 %. Durch den Betrieb *heatme* kann bei jeder Empfindungstemperatur eine Verkleinerung/Veränderung des PMV-Index von 0,44 erzielt werden.

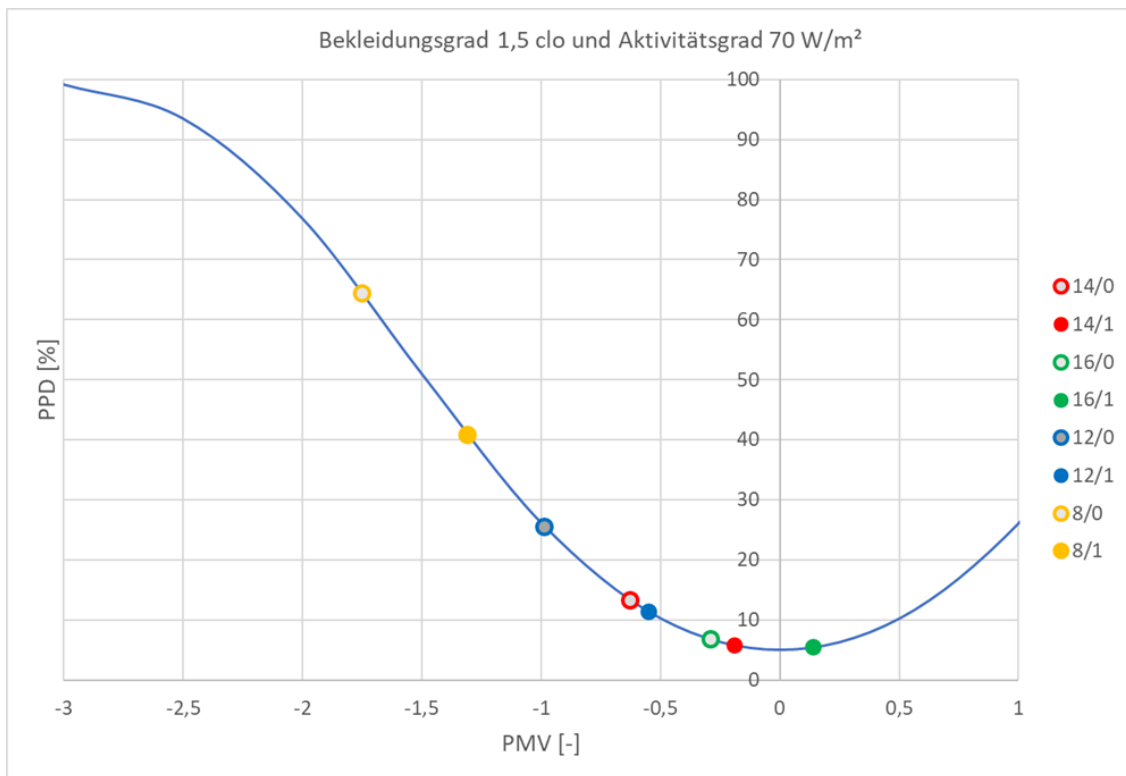


Abbildung 16: Darstellung der Ergebnisse für den PMV- und PPD-Index für sitzende Tätigkeit, winterliche Kleidung und Variation der Empfindungstemperatur sowie Betrieb *heatme*

Im Fall der 16 °C Empfindungstemperatur kann durch den Einsatz der *heatme* das etwas kühle thermische Empfinden zu etwas warmem Empfinden verschoben werden. Abschließend soll noch der Einfluss der Bekleidung beschrieben werden. Für diesen Fall wird eine entspannt sitzende Aktivität zu Grunde gelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt. Wie zu erwarten, sorgt eine Bekleidung mit höherem Isolationswert für grundsätzlich besseren thermischen Komfort als Bekleidung mit geringerem Isolationswert, vgl. Abbildung 15. Wie schon bei den Berechnungen davor sind die Zusammenhänge und Tendenzen sehr ähnlich. Bei der Basisvariante von 14 °C Empfindungstemperatur beträgt das thermische Empfinden -0,58 (etwas kühl) und der Prozentsatz der Unzufriedenen 12 %. Mit dem Einsatz *heatme* werden für den PMV-Index -0,03 und für den PPD-Index 5 % erreicht. Durch den Betrieb *heatme* kann bei jeder Empfindungstemperatur eine Verkleinerung/Veränderung des PMV-Index von 0,55 erzielt werden.

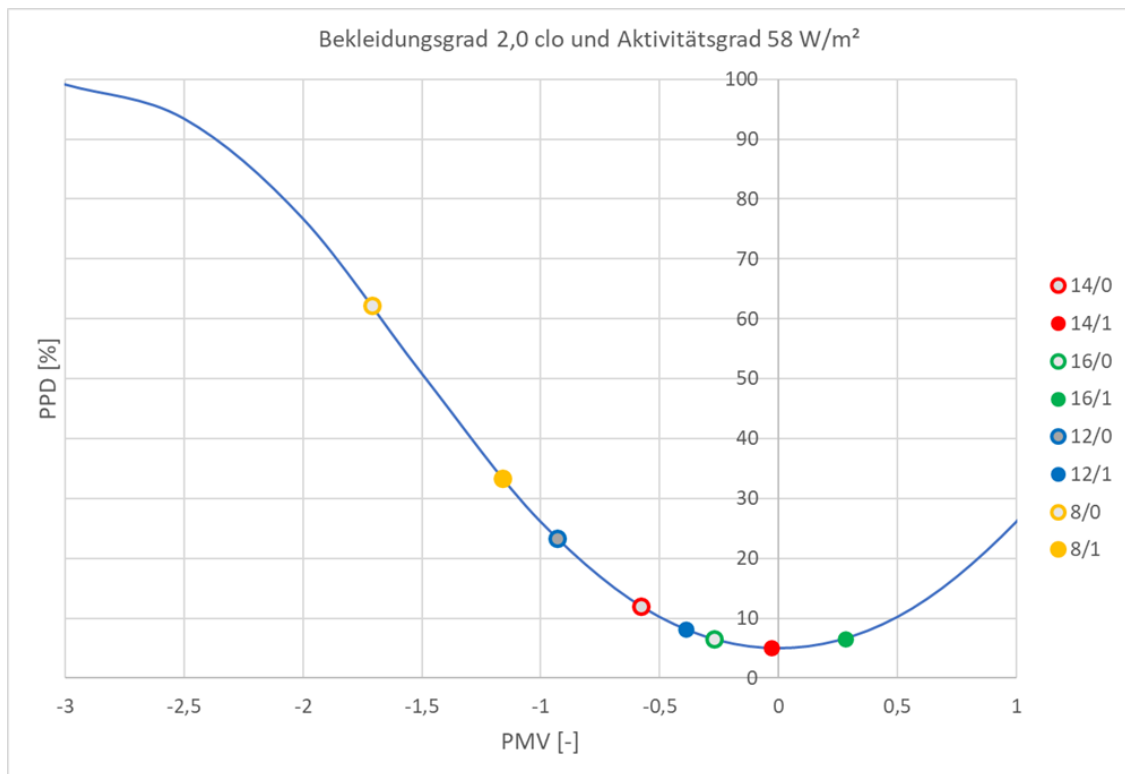


Abbildung 17: Darstellung der Ergebnisse für den PMV- und PPD-Index für entspannt sitzend, tiefwinterliche Kleidung und Variation der Empfindungstemperatur sowie Betrieb *heatme*

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass für alle untersuchten Punkte der Einsatz *heatme* eine Verbesserung des thermischen Komforts sowie eine Reduzierung des Prozentsatzes an unzufriedenen Kirchenbesuchern erzielt.

Neben der globalen thermischen Behaglichkeit, die durch den PMV-Index ausgedrückt wird, sind noch lokale Kriterien, wie Strahlungsasymmetrien und das Zugluftrisiko zu beachten. Für die Situation in Kirchen muss berücksichtigt werden, dass männliche Kirchenbesucher aufgefordert sind, ihre Kopfbedeckung abzunehmen und auch beim Gottesdienst ohne Kopfbedeckung zu bleiben. Da gerade männliche Personen in fortgeschrittenem Alter zu einem weniger ausgeprägtem Haarschopf neigen, ist dies eine gewisse Grenze für die Raumtemperatur bei Gottesdiensten und Veranstaltungen. In [4] wird empfohlen, die Temperatur nicht unter 13 °C abzusenken, da es sonst zu unangenehmem Kälteempfinden kommen kann, der unbedeckte Kopf wird allerdings nicht direkt erwähnt. Unter Beachtung dieser Hinweise ist es nicht empfehlenswert, mit einer durchgehenden Temperatur von 8 °C zu arbeiten. Stattdessen erscheint die Variante mit einer Aufheizung auf 12 °C Empfindungstemperatur bei Gottesdiensten und Veranstaltungen als geeigneter Kompromiss.

5 Einfache wirtschaftliche Bewertung

5.1 Randbedingungen / Szenarien

Neben der energetischen Bewertung sowie den Auswirkungen auf die Behaglichkeit erfolgt abschließend eine einfache wirtschaftliche Bewertung der Betriebskosten der unterschiedlichen Varianten sowie der Berücksichtigung der CO₂-Emissionen.

Die zugrunde gelegten Annahmen beinhaltet Tabelle 8. Es wird zwischen den Energieträgern Erdgas, Fernwärme sowie Elektroenergie unterschieden bzw. den Wärmeerzeugersystemen:

- Brennwerttherme,
- Hausanschlussstation (Fernwärme) und
- Wärmepumpe.

Tabelle 8: Annahmen für die wirtschaftliche Bewertung

	Einheit	Erdgas (BW-Kessel)	Fernwärme (HAST)	Elektroenergie (WP)
Jahresnutzungszahl / Jahresarbeitszahl		0,9	1	3
Preis 2025	€ / kWh	0,1126	0,1302	0,3034
Preis 2035	€ / kWh	0,1339	0,1438	0,3189
Emissionsfaktor	kg _{CO2} / kWh	0,201	0,129	0,0053 (Ökostrom)

Für die Prognose der Preise der Energieträger wird im Rahmen des Projektes auf eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums aus dem Jahr 2023 [14] zurückgegriffen. Die prognostizierte Entwicklung für Nichtwohngebäude zeigt Abbildung 18.

Die Prognose der Preise beinhaltet den CO₂-Preis basierend auf den Langfristszenarien (Non-ETS) des Fraunhofer ISI [15]⁴.

⁴ Innerhalb der Langfristszenarien 2022 (LFS3) für den Non-ETS-Bereich (Gebäude und Verkehr) wurde ein harmonisierter CO₂-Preisfad bis 2035 festgelegt, der auf einen Angleich der Preise an den ETS-Sektor abzielt und eine Angleichung auf 200 €/tCO₂ bis 2035 vorsieht

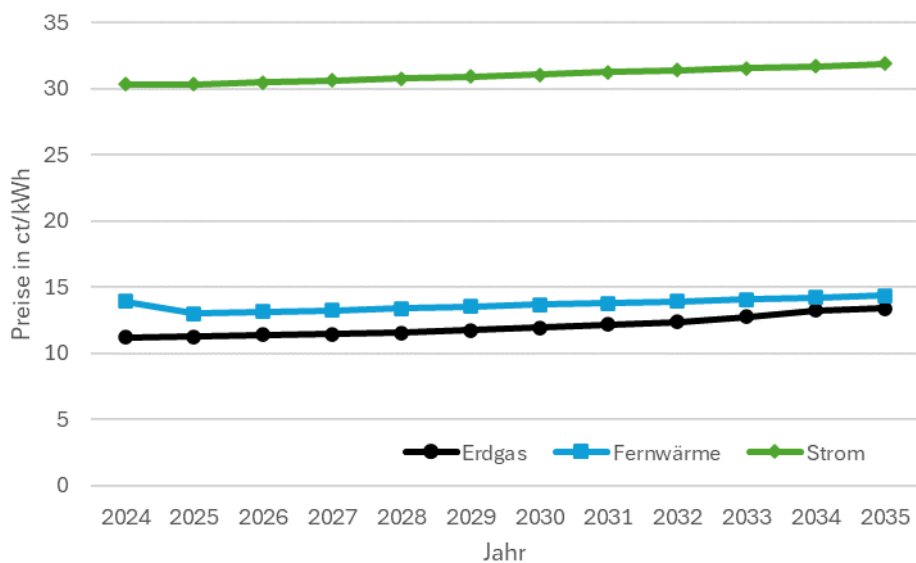


Abbildung 18: Prognosen für Strom-, Fernwärme- & Erdgaspreise bis 2035 (für Nichtwohngebäude)

5.2 Monetäre Bewertung

Basierend auf den definierten Werten ergeben sich für den Standort Potsdam folgende monetäre Einsparungen bzw. Mehraufwendungen für die analysierten Varianten. Die Tabelle 9 sowie die Abbildung 19 beinhalten die Kosten der Basisvariante für den Betrieb der Heizungsanlage bei unterschiedlichen Energieträgern für das Jahr 2025 sowie die auftretenden Differenzen der Variantenrechnungen. Analog zu den energetischen Kennwerten können für die Varianten VAR008 und VAR012 (Solltemperatur während der Nutzungszeit 8 °C bzw. 12 °C) Einsparungen von bis zu 1200 € jährlich ausgewiesen werden. Für die Variantenrechnungen mit höheren Solltemperaturen (VAR016 und VAR014) ergeben sich deutlich höhere Energiekosten. Insbesondere für die Variante VAR014 mit durchgehendem Heizbetrieb auf 14 °C resultiert eine Kostensteigerung um bis zu 4430 € pro Jahr im Vergleich zur Basisvariante.

Tabelle 9: Jährliche Heizkosten der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Mehrkosten der Variantenrechnungen für das Jahr 2025 (Standort: Potsdam)

	Erdgas	Fernwärme	Elektroenergie	
Basisvariante	3.985 €/a	4.146 €/a	3.221 €/a	Heizkosten
VAR008	-1.153 €/a	-1.200 €/a	-932 €/a	± Abweichung
VAR012	-668 €/a	-695 €/a	-540 €/a	± Abweichung
VAR016	+1.004 €/a	+1.045 €/a	+811 €/a	± Abweichung
VAR014	+4.257 €/a	+4.430 €/a	+3.441 €/a	± Abweichung

Energetische Analyse zu einem Hybridheizungssystem für Kirchen

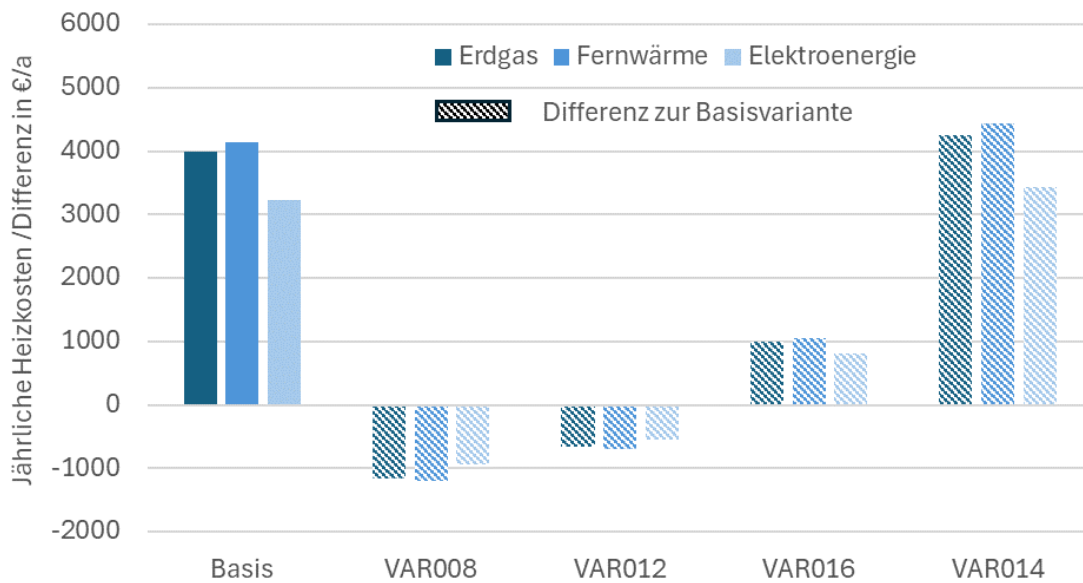


Abbildung 19: Heizkosten der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Mehrkosten der Variantenrechnungen für das Jahr 2025 (Standort: Potsdam)

Zusätzlich zu den Einsparungen eines Jahres erfolgte eine Summierung der Heizkosten für einen Zeitraum von 11 Jahren (2025 – 2035)⁵. Hierbei werden die Kostensteigerungen der Abbildung 18 berücksichtigt. Die Tabelle 10 enthält die Ergebnisse der Basisvariante sowie der Variantenrechnungen am Beispiel des Energieträgers Erdgas.

Wie zu erwarten weist für den gewählten Zeitraum die VAR008 die höchste Einsparung von 13.660 € und die VAR014 die höchste Kostensteigerung von 50.433 € aus.

Tabelle 10: Heizkosten der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Mehrkosten der Variantenrechnungen für 2025 bis 2035 für den Energieträger Erdgas (Standort: Potsdam)

	Basis	VAR008	VAR012	VAR016	VAR014
2025	3.985 €	-1.153 €	-668 €	+1.004 €	+4.257 €
2026	8.022 €	-2.321 €	-1.345 €	+2.021 €	+8.571 €
2027	12.083 €	-3.497 €	-2.025 €	+3.044 €	+12.909 €
2028	16.170 €	-4.679 €	-2.710 €	+4.074 €	+17.275 €
2029	20.329 €	-5.883 €	-3.407 €	+5.122 €	+21.719 €
2030	24.561 €	-7.107 €	-4.116 €	+6.188 €	+26.240 €
2031	28.871 €	-8.355 €	-4.839 €	+7.274 €	+30.845 €
2032	33.264 €	-9.626 €	-5.575 €	+8.381 €	+35.538 €
2033	37.782 €	-10.933 €	-6.332 €	+9.520 €	+40.365 €
2034	42.468 €	-12.289 €	-7.118 €	+10.700 €	+45.371 €
2035	47.206 €	-13.660 €	-7.912 €	+11.894 €	+50.433 €

⁵ Grundlage für diesen Zeitraum ist die garantierte Reparaturfähigkeit einer heatme von 10 Jahren

Die Abbildung 20 dokumentiert die grafische Auswertung der aufsummierten Einsparung bzw. die Kostensteigerung von 2025 – 2035 für die Varianten VAR008, VAR012 und VAR016.

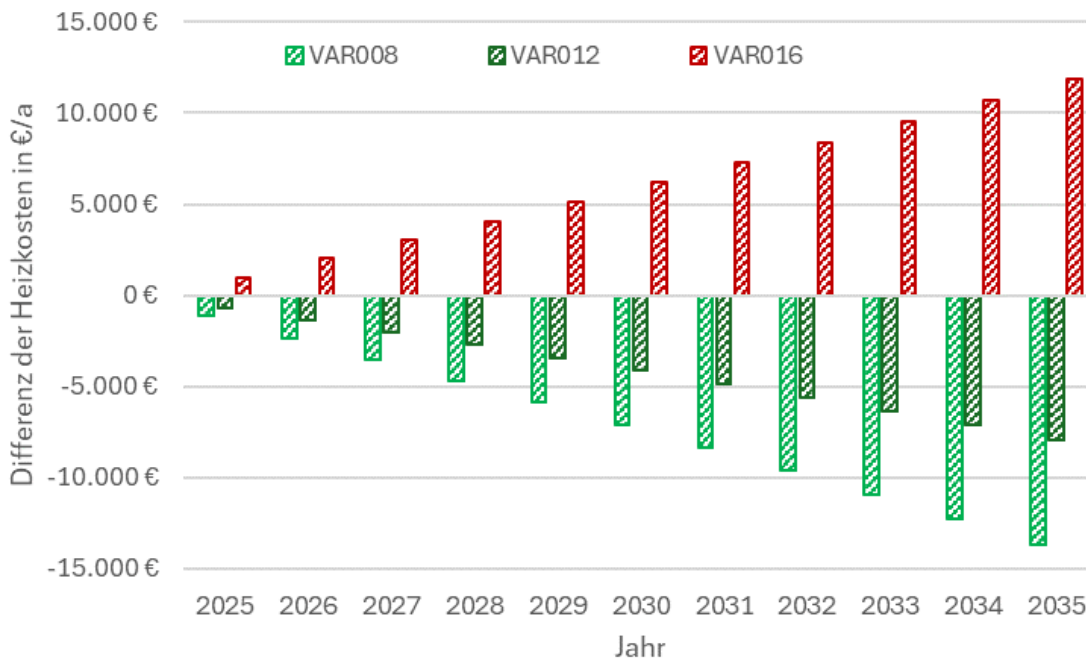


Abbildung 20: Aufsummierte Einsparungen der Heizkosten für ausgewählte Varianten von 2025 bis 2035 für den Energieträger Erdgas (Standort: Potsdam)

5.3 Auswirkungen auf die CO₂ - Emissionen

Neben den finanziellen Bewertungen der numerischen Simulationen erfolgte die Bilanzierung der jährlichen CO₂-Emissionen für die verschiedenen Energieträger. Die errechneten Werte können der Tabelle 11 sowie der Abbildung 21 entnommen werden. Analog zu den bislang gezeigten Ergebnissen weisen die Varianten VAR008 und VAR012 eine Reduktion der CO₂-Emissionen von bis zu 1852 kg_{CO2}/a auf während die Varianten VAR016 und VAR014 deutlich höhere Werte bezogen auf die Basisvariante erzielen. Im durchgängigen Betrieb (VAR014) werden bis zu 6838 kg_{CO2} jährlich mehr CO₂-Emissionen erzeugt.

Tabelle 11: Jährliche CO₂-Emissionen der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Steigerungen der Variantenrechnungen (Standort: Potsdam)

	Einheit	Erdgas	Fernwärme	Elektroenergie	
Basis	kg _{CO2} /a	6.401	4.108	169	CO ₂ -Emissionen
VAR008	kg _{CO2} /a	-1.852	-1.189	-49	± Abweichung
VAR012	kg _{CO2} /a	-1.073	-688	-28	± Abweichung
VAR016	kg _{CO2} /a	+1.613	+1.035	+43	± Abweichung
VAR014	kg _{CO2} /a	+6.838	+4.389	+180	± Abweichung

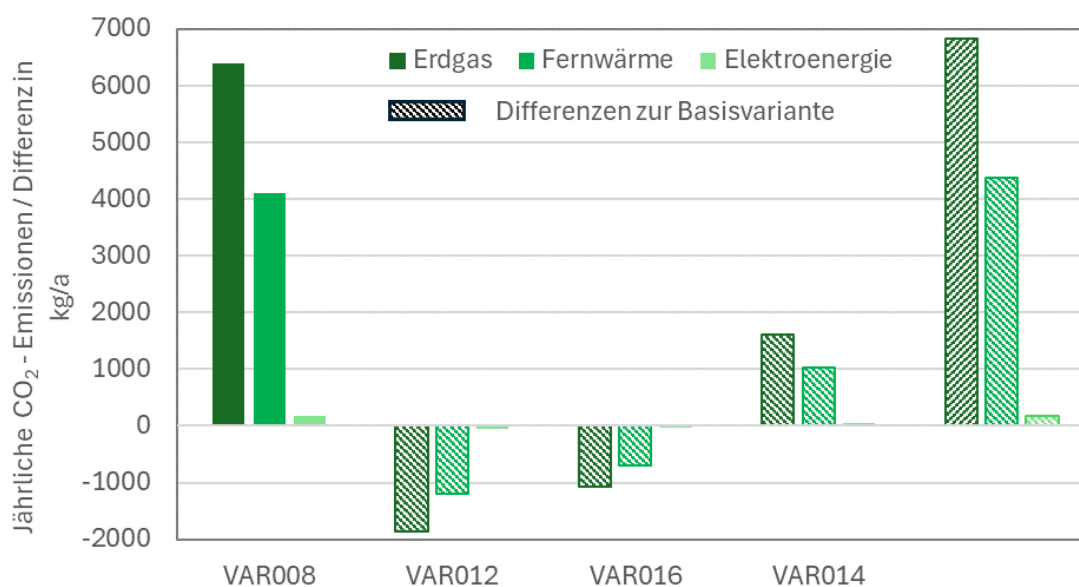


Abbildung 21: Jährliche CO₂-Emissionen der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Steigerungen der Variantenrechnungen für das Jahr 2025 (Standort: Potsdam)

Die Ergebnisse bezüglich der wirtschaftlichen Bewertung sowie der Einordnung der CO₂-Emissionen für den Standort Garmisch-Partenkirchen können dem Anhang unter Kapitel 8.5 entnommen werden.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des FuE-Projektes wurde eine hybride Kirchenheizung bestehend aus einer Basisheizung zur Grundtemperierung der Kirche und *heatme* (elektrisch beheizte, langlebige Akku-Heizkissen), welche von den Kirchenbesuchern während des Aufenthalts in der Kirche genutzt werden, energetisch sowie hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit analysiert.

Dafür wurde eine Referenzkirche abgeleitet und für die numerischen Simulationen in ein Simulationsmodell überführt. Anschließend wurden Randbedingungen, wie z.B. Temperaturen, Nutzungszeiten, Wetter und Standorte festgelegt und eine umfangreiche Simulationsstudie durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Basisvariante (Empfindungstemperatur 14°C während der Nutzungszeit, Grundtemperatur: 8°C) ein Wärmebedarf von 31.844 kWh pro Jahr für die Referenzkirche benötigt wird. Dies ergibt eine sehr gute Übereinstimmung mit realen Verbrauchswerten der ausgewählten Beispielkirche.

Unter Berücksichtigung verschiedener Energieträger ergeben sich für diese Basisvariante jährliche Heizenergiekosten von 3221 € (Wärmepumpe) über 3985 € (Gasheizung) bis 4146 € (Fernwärme). Beim Einsatz von Erdgas werden dabei pro Jahr 6,4 Tonnen CO₂ emittiert.

Die Analyse des Komforts in der Basisvariante zeigt, dass bei diesem Raumklima in der Kirche mit nicht mehr als 35% unzufriedenen Kirchenbesuchern zu rechnen ist. Durch angepasste winterliche Kleidung, eine höhere Aktivität und insbesondere den Einsatz von Heizkissen, kann der Komfort der Kirchenbesucher sogar auf ein Optimum (nur ca. 5% Unzufriedene) gesteigert werden.

In weiteren Simulationsvarianten werden die konkreten Änderungen aufgezeigt, welche sich bei geänderten Nutzungstemperaturen ergeben. Obwohl Kirchengebäude sehr unterschiedlich sind, zeigen die Simulationsergebnisse generelle Tendenzen auf und ermöglichen die Abschätzung von konkreten Energie-, Kosten- und CO₂-Einsparpotentialen für unterschiedliche Kirchen und Nutzungen. Die parallele Bewertung der thermischen Behaglichkeit ermöglicht zudem eine Einschätzung der Reaktion von Gottesdienst-Besuchern auf die unterschiedlichen Raumklimaverhältnisse.

Die Ergebnisse der Simulationsvarianten mit um 2 K geringerer und um 2 K höherer Nutzungstemperatur (12°C bzw. 16°C) zeigen auf, wie groß die jeweiligen Abweichungen zur Basisvariante sind und wie sich dies auf den Komfort der Besucher auswirkt. Eine Absenkung der Nutzungstemperatur um 2 K führt zu einem um 5.337 kWh bzw. -16,8 % (Standort: Potsdam) reduzierten Energieeinsatz, was aktuell einer Reduktion der Heizkosten von bis zu 695,- € pro Jahr entspricht. Gemäß einer Projektion der Kosten auf 10 Jahre sind mit dieser Temperaturanpassung ca. 8000,- € einzusparen. Bei einer Anhebung um 2 K ist ein Energiemehrbedarf von 8.024 kWh bzw. +25,2 % zu erwarten.

Während die Anhebung der Raumtemperatur um +2 K in allen Komfortbetrachtungen zu sehr guten Ergebnissen führt, ergibt sich bei einer Reduktion der Raumtemperatur um -2 K ein deutlich reduzierter Komfort und damit eine höhere Unzufriedenheitsquote von bis zu 60 %. Nur durch den Einsatz von Akku-Heizkissen ist hier die Anzahl der Unzufriedenen auf unter 15 % zu begrenzen.

Diese Ergebnisse bestätigen die in [4] getroffene Empfehlung einer Kombination aus niedriger Raumtemperatur (z.B. 12 °C) und dem Einsatz von körpernahen Heizungen.

Eine noch weitergehende Reduzierung der Raumtemperatur auf 8 °C führt zu einem jährlichen Heizenergiebedarf von nur noch 22.629 kWh (ca. -29 % im Vergleich zur Basisvariante). Die durchgehende Beheizung auf 8 °C wird aber, wie in der Literatur beschrieben, nicht empfohlen, da es zu Schädigungen am Inventar sowie der Bausubstanz der Kirche kommen kann und Einschränkungen der thermischen Behaglichkeit sehr deutlich sind. Die berechneten Unzufriedenheitsquoten liegen hier bei 95 % bis 62 % und können durch den Einsatz von Heizkissen auf bestenfalls 40 % reduziert werden.

Ein besonders hohes Einsparpotential kann anhand der Simulationsergebnisse für Kirchen aufgezeigt werden, welche über die ganze Woche auf der Nutzungstemperatur gehalten werden. Wird die definierte Referenzkirche nicht nur während der Nutzungszeit, sondern dauerhaft auf 14 °C beheizt ist ein Energiebedarf von 65.865 kWh erforderlich, dies entspricht einer Verdoppelung gegenüber dem intermittierenden Betrieb der Basisvariante sowohl in den Energiekosten als auch im CO₂-Ausstoß. Die Prognose bezogen auf einen Zeithorizont bis 2035 ergibt für diesen Betrieb Mehrkosten von 50.400 € und damit mehr als verdoppelte Energiekosten, im Vergleich zur Basisvariante.

Anhand der durchgeführten Simulationsrechnungen wurden die sich einstellenden Luft- und Strahlungstemperaturen berechnet, welche, neben der Bekleidung und Aktivität des Kirchenbesuchers, für die Betrachtung der thermischen Behaglichkeit eine große Rolle spielen. Diese Faktoren und die thermische Leistung von *heatme* wurden anhand der thermischen Energiebilanz am Menschen berücksichtigt. Dabei lässt sich zusammenfassen, dass sich *heatme* unter allen gewählten und untersuchten Randbedingungen positiv auf den thermischen Komfort der Kirchenbesucher auswirkt.

Auf Grund des gewählten Analyseverfahrens können jedoch keine Aussagen auf lokale Effekte der thermischen Behaglichkeit (z.B. kalte Füße, kalter Kopf) getroffen werden. Dafür wären weiterführende Analysen mittels CFD und Feldtests vielversprechend.

Abschließend lässt sich als Fazit festhalten, dass über die vorliegenden Analysen das Konzept der Hybridheizung bestätigt wird. Einerseits kann damit, unter Beachtung der Werterhaltung von Gebäude und Einrichtung, eine deutliche Energie- und CO₂-Einsparung erreicht werden, andererseits wird der Komfort für die Kirchenbesucher durch den Ein-

satz von Heizkissen gehalten. Mit den aufgezeigten Ergebnissen wird es Kirchengemeinden ermöglicht, die potenziellen Einsparungen zusammen mit dem Komfort der Kirchenbesucher zu betrachten und somit einen individuellen Weg festzulegen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] EKD, „Kirchen und weitere Gottesdienststätten in der evangelischen Kirche im Jahr 2022,“ Evangelische Kirche in Deutschland, 30. Mai 2025.
- [2] H. Künzel, „Kirchenheizung - Was ist zu beachten?,“ Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart, 1998.
- [3] W. Lemke, „Richtlinien für die Beheizung und Lüftung von Kirchen und Kapellen,“ 01/2016.
- [4] C. Dahm, „Beheizen und Temperieren von Kirchen - Von Energieeffizienz, Erhaltung des Kulturerbes und Nutzerakzeptanz,“ Initiative Energie & Kirche, Mülheim an der Ruhr, 2017.
- [5] S. Jellinghaus, „Energiespar-Ratgeber,“ Evangelisch-Lutherische Kirche in Norddeutschland. Fachstelle Energie & Kirche, Hagen, 2023.
- [6] Evangelische Kirche im Rheinland, „Merkblatt: Beheizen und Temperieren von Kirchenräumen,“ 2021.
- [7] W. Horsch, „[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4521118,](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4521118)“ Selbst fotografiert, CC BY-SA 4.0,, [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/St._Walburga_\(Walberberg\)#/media/Datei:Ehem._Klosterkirche_St._Walburga_\(S-O\),_Walberberg.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/St._Walburga_(Walberberg)#/media/Datei:Ehem._Klosterkirche_St._Walburga_(S-O),_Walberberg.jpg). [Zugriff am 6 11 2025].
- [8] A. Perschk, „Gebäude und Anlagensimulation - Ein "Dresdner Modell".,“ *Gesundheitsingenieur*, Nr. 4, 2010.
- [9] C. Felsmann, „Ein Beitrag zur Optimierung der Betriebsweise heizungs- und raumluftechnischer Anlagen,“ 2002.
- [10] A. Perschk, „Gebäude-Anlagen-Simulation unter der Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden,“ 2000.
- [11] J. Seifert, „Zum Einfluss von Luftströmungen auf die thermischen und aerodynamischen Verhältnisse in und an Gebäuden,“ 2005.
- [12] MOONICH Produktkonzepte und -realisierung GmbH, „heatme,“ [Online]. Available: <https://www.heatme.com/heizkissen-kabellos-angenehme-waerme-kalte-tage/innovatives-heizkissen-smart-induktion-waerme/>. [Zugriff am 10 11 2025].
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 7730 Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit,“ Beuth Verlag, Berlin, 2025.

- [14] M. Pehnt, P. Mellwig, K. Lambrecht und e. al, „Heizen mit 65 % erneuerbaren Energien – Begleitende Analysen zur Ausgestaltung der Regelung aus den Koalitionsvertrag 2021,“ ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2023.
- [15] M. Frömel, C. Luderer, W. Männer, F. Sensfuß und G. Deac, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland,“ Karlsruhe, 2024.

8 Anhang

8.1 Daten: Bausubstanz

Angaben bezüglich der Beispielkirche St. Walburga:

- Luftraum (innen) ca. 3850 m³
- Holz-Tonnengewölbe im Hauptschiff
- Seitenschiffe mit gerader Holzdecke
- in beide Bereichen existierte eine 6-10 cm starke Dämmung, üblicherweise wird nach Angaben der Fa. Mahr trotz der Dämmung von einem U-Wert = 1 W/(m² K) ausgegangen, da die frei aufgelegten Dämmungen auf Gewölben und Decken nach Jahrzehnten oft sehr schadhaft sind
- im Chor gibt es ein Kreuzgewölbe (Massiv 12,5 cm Stein)
- Decke insgesamt ca. 620 m²
- Außenwand: Stärke 70 cm (Tuffstein/Bruchstein), ca. 960 m²; U-Wert = ca. 2 W/(m² K)
- Fenster: Einfachverglasung (Summe ca. 58 m²; U-Wert = ca. 5,5 W/(m² K))
- Türen: 2 Stück 1,73 m x 3,00 m; U-Wert = ca. 3,5 W/(m² K)
- Fußboden: Steinboden/ohne Dämmung ca. 520 m²
- Lüftungwärmebedarf: 0,5-facher Luftwechsel (Auslegungswert für die Dimensionierung der Heizungsanlage)

Die definierten Wandaufbauten innerhalb der Simulation können der Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12: Wandaufbauten / Gebäudekonstruktion

Wandtyp	Material	Dicke d in m	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)	Wärmekapazität c in J/(kgK)	Dichte ρ in kg/m ³	U-Wert W/(m ² K)
Außentür	Holz	0,04	0,35	2100	700	3,518
Außenwand	Innenputz	0,015	0,87	1000	1800	0,619
	Tuffstein	0,685	0,48	900	1450	
Bodenplatte	Kalksandstein	0,08	0,93	1000	1700	0,228
	Sand	0,02	0,7	835	1800	
	Erdreich	5,0	1,25	2000	1500	
Decke	Diele	0,02	0,13	2100	600	0,928
	Mineralwolle	0,02	0,04	1000	150	

Energetische Analyse zu einem Hybridheizungssystem für Kirchen

	Holzsparren	0,02	0,13	1700	600	
Dach	Holzsparren	0,024	0,13	1700	600	2,925
	Luft	0,01	1,66	2100	1	
	Dachziegel	0,01	0,89	1100	1800	
Fenster	Einfachverglasung	0,012				5,5

8.2 Messdaten der Beispielkirche



Abbildung 22: Messdaten der Temperaturverläufe (13.12.2024)

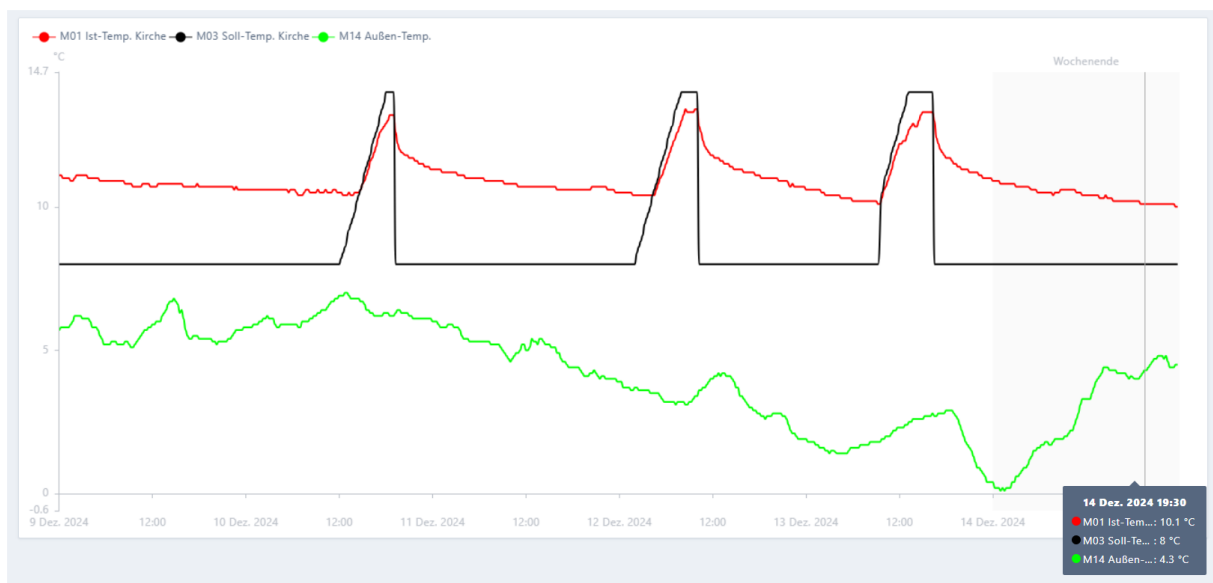


Abbildung 23: Messdaten der Temperaturverläufe (14.12.2024)

8.3 Randbedingungen Simulation

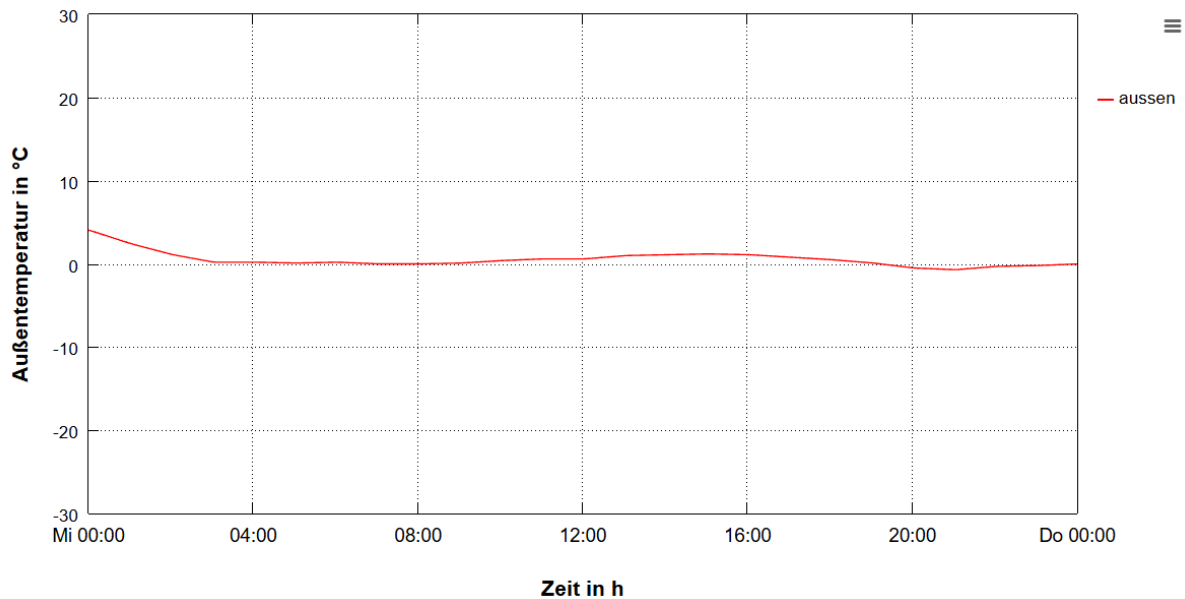


Abbildung 24: Außentemperaturverlauf für einen repräsentativen Tag der Heizperiode

8.4 Ergebnisse der Simulationen (Standort: Garmisch-Partenkirchen)

Tabelle 13: Maximalwert der Heizleistung (Standort: Garmisch-Partenkirchen)

Variante	\dot{Q}_{\max}	Leistungsverhältnis $\dot{Q}_{\max}/\dot{Q}_{\text{stationär}}$
Auslegung ($\dot{Q}_{\text{stationär}}$)	71.600 W	-
Basis	85.864 W	1,20

8.5 Wirtschaftliche Bewertung (Standort: Garmisch-Partenkirchen)

8.5.1 Monetäre Bewertung (Garmisch-Partenkirchen)

Tabelle 14: Heizkosten der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Mehrkosten der Variantenrechnungen für das Jahr 2025 (Standort: Garmisch-Partenkirchen)

	Erdgas	Fernwärme	Elektroenergie
Basis	5.225,02 €	5.436,44 €	4.222,78 €
VAR008	-1.219,54 €	-1.268,89 €	-985,61 €
VAR012	-693,44 €	-721,50 €	-560,43 €
VAR016	997,93 €	1.038,31 €	806,51 €

Energetische Analyse zu einem Hybridheizungssystem für Kirchen

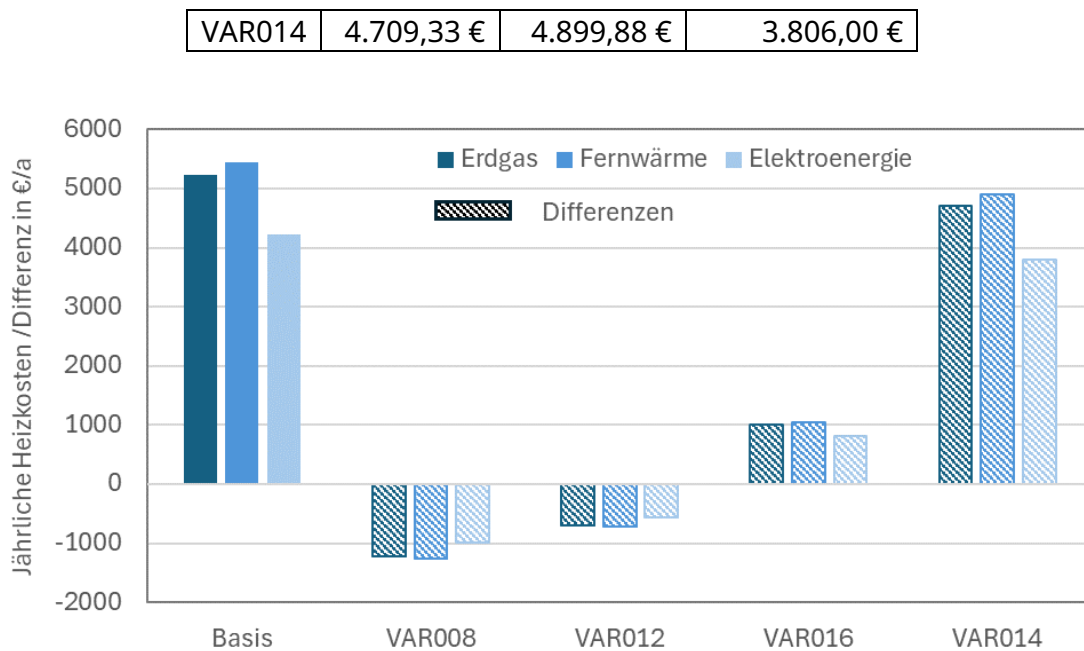


Abbildung 25: Heizkosten der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Mehrkosten der Variantenrechnungen für das Jahr 2025 (Standort: Garmisch-Partenkirchen)

Tabelle 15: Heizkosten der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Mehrkosten der Variantenrechnungen für 2025 bis 2035 für den Energieträger Erdgas (Standort: Garmisch-Partenkirchen)

	Basis	VAR008	VAR012	VAR016	VAR014
2025	5.225 €	-1.220 €	-693 €	998 €	4.709 €
2026	10.519 €	-2.455 €	-1.396 €	2.009 €	9.481 €
2027	15.843 €	-3.698 €	-2.103 €	3.026 €	14.280 €
2028	21.202 €	-4.949 €	-2.814 €	4.049 €	19.110 €
2029	26.656 €	-6.222 €	-3.538 €	5.091 €	24.025 €
2030	32.204 €	-7.517 €	-4.274 €	6.151 €	29.026 €
2031	37.857 €	-8.836 €	-5.024 €	7.230 €	34.120 €
2032	43.617 €	-10.180 €	-5.789 €	8.330 €	39.312 €
2033	49.541 €	-11.563 €	-6.575 €	9.462 €	44.651 €
2034	55.685 €	-12.997 €	-7.390 €	10.635 €	50.189 €
2035	61.898 €	-14.447 €	-8.215 €	11.822 €	55.789 €



Abbildung 26: Aufsummierte Einsparungen der Heizkosten für ausgewählte Varianten von 2025 bis 2035 für den Energieträger Erdgas (Standort: Garmisch-Partenkirchen)

8.5.2 Auswirkungen auf die CO₂ - Emissionen (Garmisch-Partenkirchen)

Tabelle 16: Jährliche CO₂-Emissionen der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Steigerungen der Variantenrechnungen (Standort: Garmisch-Partenkirchen)

	Einheit	Erdgas	Fernwärme	Elektroenergie
Basis	kg _{CO2} /a	8393	5386	221
VAR008	kg _{CO2} /a	-1959	-1257	-52
VAR012	kg _{CO2} /a	-1114	-715	-29
VAR016	kg _{CO2} /a	1603	1029	42
VAR014	kg _{CO2} /a	7564	4855	199

Energetische Analyse zu einem Hybridheizungssystem für Kirchen

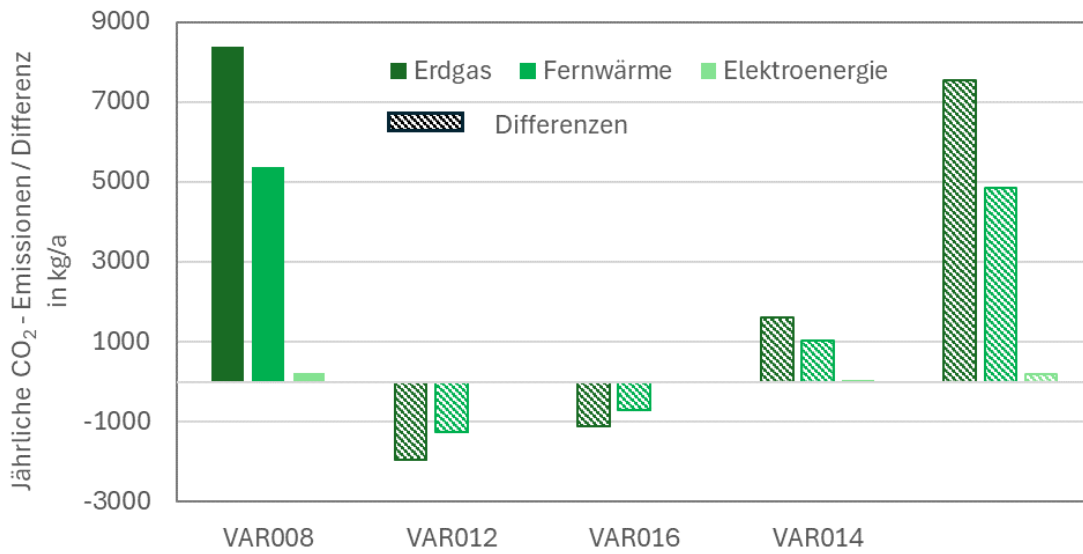


Abbildung 27: Jährliche CO₂-Emissionen der Basisvariante sowie die Einsparungen bzw. Steigerungen der Variantenrechnungen für das Jahr 2025 (Standort: Garmisch-Partenkirchen)