

Machbarkeitsstudie Thermalwasserwärmenutzung Römerthermen Bad Breisig



Auftraggeber: Kurbetriebe der Stadt Bad Breisig GmbH
Projektnummer: 1611
Datum: 19. Januar 2009

Mit freundlicher Unterstützung des



Rheinland-Pfalz

Ministerium für Umwelt, Forsten
und Verbraucherschutz

Transferstelle Bingen · Am Langenstein 21 · 55411 Bingen · www.tsb-energie.de

Dipl.-Ing. (FH) C. Pohl

Tel: 06721 / 98 4 24 0

Fax: 06721 / 98 4 24 29

pohl@tsb-energie.de

Dipl.-Ing. (FH) M. Münch

Tel: 06721 / 98 4 24 24

Fax: 06721 / 98 4 24 29

muench@tsb-energie.de

Dipl.-Ing. (FH) J. Himmel

Tel: 06721 / 98 4 24 0

Fax: 06721 / 98 4 24 29

himmel@tsb-energie.de

im

Institut für Innovation, Transfer und Beratung gGmbH · Berlinstraße 107a · 55411 Bingen am Rhein

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 Veranlassung	4
2 Ist-Analyse	6
2.1 Gas- und Wärmebedarf der Römerthermen in Bad Breisig	7
2.2 Anlagentechnik zur Wärmebereitstellung	9
2.3 Wärmeverteilung.....	11
2.4 Aufteilung der Wärme auf die Verbraucher	13
2.5 Einsparpotential durch Verwirklichung einer Abdeckung der Außenbecken	15
3 Wärmepotential des Thermalwassers	18
4 Erschließung der Thermalwasserwärme	22
5 Voraussetzungen zur Nutzung der Wärme in den Römerthermen	28
6 Variantenauswahl zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	30
7 Energiebilanz / Emissionsbilanz	33
8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	38
9 Zusammenfassung	48
10 Literaturangaben	52

Einleitung

Die Römerthermen wurden in der derzeitigen Form im Dezember 1991 eröffnet. Das Thermalbad bietet den Besuchern verschiedene Thermalwasserbecken mit Temperaturen von 28 bis 34 °C im Innen- und Außenbereich. Balneologische Anwendungen werden in der Form von Wannenbädern mit naturbelassenem Thermalwasser („braune Grotte“) geboten. Weiter finden sich in den Römerthermen ein Sauna- sowie ein Fitnessbereich und ein Restaurant.

In der Kurstadt Bad Breisig wurden in den Jahren 1914 bis 1959 verschiedene Thermalwasserquellen durch Bohrungen gefasst:

Geiersprudel 1914	etwa 70.000 l/h	bis zu 32 °C
Gertrudisquelle 1925	bis 20.000 l/h	etwa 15 °C
Mariensprudel 1927	z. Zt. etwa 56.000 l/h	bis zu 33 °C
Ludgerussprudel 1914	etwa 40.000 l/h	bis zu 30 °C
Rudolph-Halpaus-Quelle 1957	etwa 4.000 l/h	etwa 12 °C
Michaelisquelle 1959	etwa 18.000 l/h	etwa 12 °C

Die Quelle mit der derzeit größten Schüttung ist der Geiersprudel. Der Geiersprudel versorgt die Römertherme mit Thermalwasser.

Schon unmittelbar nach dem Datum der Erbohrung wurde das Wasser des Geiersprudels zu Badezwecken genutzt. 1936 wurde der Badebetrieb unter Johann-Martin Schuh professionalisiert und das „Heilbäderhaus Geiersprudel“ eröffnet.



Abb. 1 – Thermalbad „Römerthermen“ in der Kurstadt Bad Breisig

1 Veranlassung

Schwimm- und Freizeitbäder sind durch Ihre hohen, anwendungsbedingten, spezifischen Energieverbräuche in besonderem Maße von den steigenden Energiekosten betroffen.

Tab. 1 – spezifische Energieverbrauchskennwerte von Hallenbädern¹

	spez. Wärmeverbrauchskennwert [kWh _{Ho} /(m ² _{NGF} *a)]	spez. Stromverbrauchskennwert [kWh _{el} /(m ² _{NGF} *a)]
Schwimmbädern	775	220

Die Römerthermen nutzen das mit bis zu 32°C anstehende Thermalwasser des Geiersprudels zum Austausch des Wassers in den großen Schwimm- und Thermalbecken.

Dadurch kann eine gewisse Energiemenge zur Erwärmung des Beckenwassers eingespart werden. In wesentlich größerem Maßstab kann aber die Wärme der Quelle auf niedrigerem Temperaturniveau mit einer Wärmepumpe auf ein Niveau angehoben werden, welches einen aktiven Beitrag zur Beheizung des Thermalbades leisten kann. In dieser Machbarkeitsstudie soll die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Optimierung der Thermalwassernutzung zur Wärmebereitstellung betrachtet und abgeschätzt werden.

Im April 2008 erfolgte eine Ortsbegehung durch zwei Fachingenieure der Transferstelle Bingen (TSB), auf welche ein Angebot der TSB zur Erstellung der Machbarkeitsstudie erfolgte. Am 4. Juli 2008 wurde der Auftrag zur Erstellung der Machbarkeitsstudie durch die Kurbetriebe der Stadt Bad Breisig erteilt, die 50 % des kalkulierten Aufwands als Eigenanteil trägt. Die verbleibenden 50 % des wurden freundlicherweise als Zuschuss durch das rheinland-pfälzische Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz (MUFV) bewilligt.

Der Bearbeitungszeitraum beginnt mit dem Termin der zweiten Ortsbegehung am 19. September 2008 und endet mit dem 19. Dezember 2008.

Die vorliegende Studie untersucht marktverfügbare Möglichkeiten die Thermalwasserwärme wirtschaftlich zur Wärmebereitstellung für die Römerthermen zu nutzen. Die Wärme kann direkt aus dem Thermalwasser oder auch aus dem Beckenüberlauf entzogen werden.

In einem ersten Schritt wird der Grundlastbedarf an Wärme der Römerthermen über Daten des Energieversorgungsunternehmens (EVM) ermittelt. Da in den Römerthermen keine Wärmemengenzähler installiert sind, welche die Aufteilung der Wärme an die verschiedenen Wärmeübergeber (Beckenwassererwärmung, Lüftung, Fußbodenheizung, Heizkörper)

¹ nach: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichskennwerte im Nichtwohngebäudebestand, 26.07.2007

dokumentieren, wird im nächsten Schritt die Aufteilung der Wärme an die Verbraucher abgeschätzt. Basierend auf dieser Abschätzung wird anhand von Kennwerten und / oder Herstellerangaben die Verminderung des Jahreswärmebedarfs durch Umsetzung von Einsparmaßnahmen (Abdeckung des großen Außenbeckens außerhalb der Öffnungszeiten) überschlägig ermittelt. Mit der so für die weiteren Berechnungen festgelegten Wärmeaufteilung kann die Einbindung einer Wärmeerzeugungsanlage auf Basis der Thermalwasserwärme dimensioniert werden.

Das Thermalwasser aus dem Geiersprudel neigt aufgrund seiner chemischen und physikalischen Beschaffenheiten zu Korrosion und Inkrustation in und an den Rohrleitungen und technischen Einbauten. Für den Transport der Wasser kann auf Rohrleitungen aus Polyethylen (PE) zurückgegriffen werden. Für die Übertragung der Wärme aus dem Thermalwasser an einen Sekundärkreislauf wird ein Wärmetauscher benötigt.

Da der Wärmetauscher neben den PE-Leitungen das einzige Bauteil mit direktem Kontakt zum Thermalwasser ist, soll im Rahmen dieser Studie mit einem Fragebogen an die Hersteller geeigneter Wärmetauschern herangetreten werden. In dem Fragebogen werden die Hersteller gebeten, uns ihre Einschätzung zu der Problematik mitzuteilen.

Nach Auswertung des Rücklaufs der Fragebögen und Klärung weiterer Rückfragen mit den Herstellern wird eine Zusammenfassung der Umfrage erstellt.

In einem weiteren Schritt wird geprüft, ob es sinnvoll ist das Beckenüberlaufwasser für die Wärmeerzeugung nutzbar zu machen.

Nach der erfolgten Einschätzung der technischen Machbarkeit und der Dimensionierung der Wärmenutzungsanlage wird im nächsten Kapitel die Umsetzbarkeit nach ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet.

In der Zusammenfassung der Studie wird eine Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise zur Umsetzung einer Thermalwasserwärmenutzungsanlage gegeben.

2 Ist-Analyse

In diesem Kapitel werden der Wärmebedarf der Römerthermen sowie das Einsparpotential durch Verwirklichung einer Beckenabdeckung für das große Außenbecken abgeschätzt. In einem nächsten Schritt wird eine Aufteilung der erzeugten Wärme an die Verbraucher in den Römerthermen als Grundlage für die anschließenden Energiebilanzen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen angenommen.

Thermalwassernutzung

Die Römerthermen nutzen das durch den „Geiersprudel“ bereitgestellte Thermalwasser als Beckenwasser für die großen Becken. Für die Beckenwassererneuerung wird das Thermalwasser wie folgt aufbereitet:

Das Thermalwasser wird durch eine im Erdreich verlegte PE-Leitung in den Keller des Bades befördert. Die PE-Rohrleitung ist beginnend am Geiersprudel in DN 200 ausgeführt. Bei Erreichen des Gebäudes wird die Leitung auf DN 80 reduziert.²

Im Keller durchläuft es als erste Aufbereitungsstufe eine Oxidationsschleife. Diese hat eine Gesamtlänge von etwa 20 Meter. Das Rohwasser wird dabei mehrmals umgelenkt. Am Anfang der Schleife wird das Rohwasser mit Luft bzw. Sauerstoff geimpft. Durch Oxidation fallen Partikel aus, die mit der Strömung gerissen werden und sich teilweise auch in den tiefsten Stellen der Rohrumlenkung der Oxidationsschleife absetzen. Einmal im Jahr werden die Ausfällungen dort entfernt. Am Ende der Oxidationsschleife, wird das Ganze dann entlüftet. Anschließend wird das Rohwasser in zwei großen zylindrischen Behältern gefiltert. Hier werden Arsen-, Eisen- und Manganverbindungen abgeschieden. In dem ersten Behälter wird Eisenoxid abgeschieden. In dem zweiten Behälter wird durch Zugabe von Kaliumpermanganat das Mangan aus dem Rohwasser gefällt. Die Filter werden regelmäßig rückgespült. Das Rückspülwasser mit den partikulären Frachten wird in einem Sedimentationsbecken gesammelt. Das gefilterte Rohwasser steht nun als Frischwasser für die Beckenwassererneuerung zur Verfügung. Das Frischwasser (Thermalwasser) wird für das Innenbecken und für die beiden Außenbecken genutzt.

Weiter wird das Thermalwasser in unbehandelter Form für die „Braune Grotte“ (Thermalwasser-Wannenbäder) verwendet. Dieses Rohwasser wird vorher in einem Rohrbündelwärmetauscher mit Heizwasser erwärmt. Der Rohrbündelwärmetauscher muss einmal wöchentlich mit verdünnter Salzsäure gespült werden, um zwangsläufig entstehende Ablagerungen auf Basis von Carbonaten zu beseitigen.

Dabei ist dieser Rohrbündelwärmetauscher ca. eine Stunde außer Betrieb.

² Vergleiche zur Verfügung gestellten „Auszug aus der Grundkarte“ mit handschriftlich eingetragenen Leitungsverläufen & -dimensionen.

Abschätzung des Wärmebedarfs der Römerthermen

Zur Abschätzung des Wärmebedarfs der Römerthermen lagen den Autoren folgende Unterlagen³ vor:

- Erdgasbezug der Erdgaskessel der Römerthermen von Januar 2003 bis Juli 2008 ⁴
- Erdgasbezug der BHKWs der Römerthermen von Januar 2003 bis Juli 2008 ⁵
- Schornsteinfegerprotokolle der Messungen der Erdgaskessel 17. Juni 2008
- Handschriftliche Zählerstandserfassung der BHKWs ⁶
- Lastgänge des Erdgasbezugs der Kessel und BHKWs des Energieversorgers vom 1. Oktober 2007 bis zum 30. September 2008
- Menge und Temperatur des erneuerten Beckenwassers
 - Innenbecken (1. Januar bis 7. September 2008)
 - Außenbecken groß (1. Januar bis 7. September 2008)
 - Außenbecken klein (1. Januar bis 7. September 2008)
 - Kinderbecken (23. April bis 7. September 2008)
 - Hotwhirlpool (1. Januar bis 7. September 2008)

Der Berechnung liegen folgende Annahmen zu Grunde:

Jahresnutzungsgrad der Erdgaskessel ⁷	90 %
thermischer Nutzungsgrad der BHKWs	66 %

2.1 Gas- und Wärmebedarf der Römerthermen in Bad Breisig

Der Wärmeverbrauch der Römerthermen in Bad Breisig wurde aus den Daten des Erdgasbezugs des Energieversorgers⁸ abgeschätzt. Anhand dieser Daten kann die Menge Erdgas mit entsprechenden Ausnutzungsgraden auf die bereitgestellte Wärmemenge bezogen werden.

³ Vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und von den Autoren nicht auf Richtigkeit überprüft

⁴ erfasst durch den Auftraggeber

⁵ erfasst durch den Auftraggeber

⁶ erfasst durch den Auftraggeber

⁷ in Summe

⁸ EVM – Energieversorgung Mittelrhein

Für den Gasbezug stehen Daten aus den Jahren 2003 bis 2007 und der Beginn 2008 zur Verfügung.

Jahres-Gasverbrauch [kWh_{th}/a]

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	Mittelwert
Summe	4.781.000	5.152.000	5.121.000	4.850.000	4.666.000	4.915.000

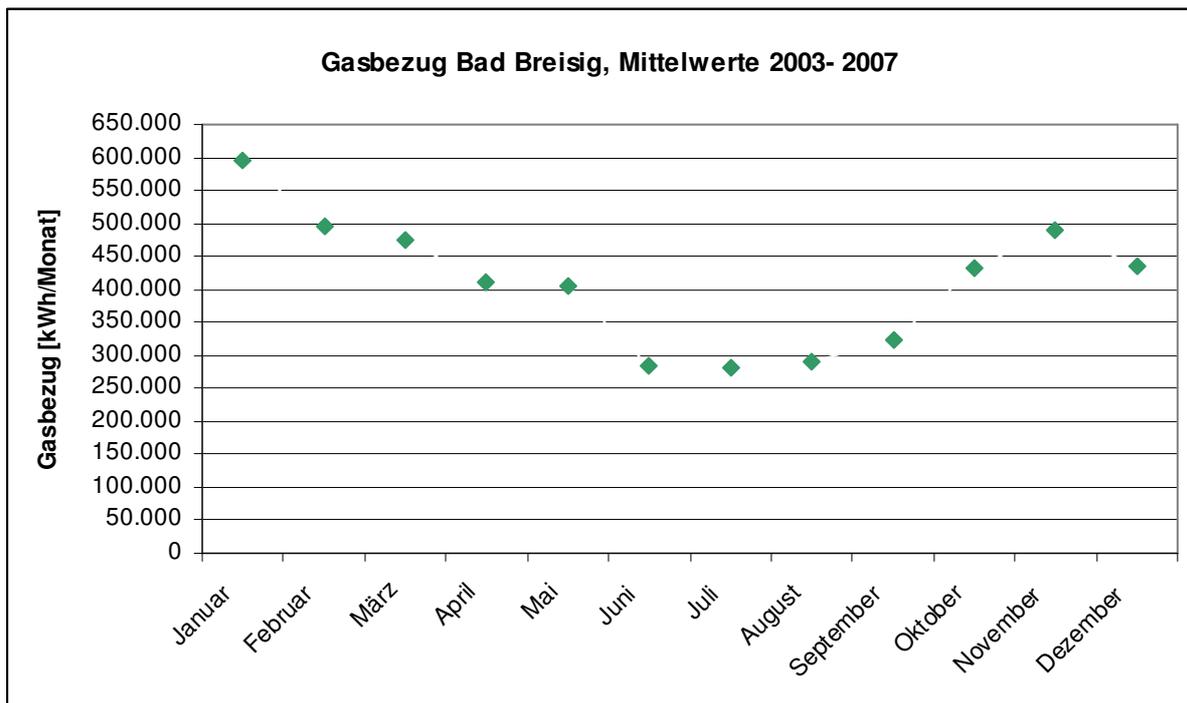


Abb. 2 – Monatlicher Gasbezug der „Römerthermen“ in Bad Breisig

Jahres-Wärmeverbrauch [kWh_{th}/a]

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	Mittelwert
Summe	3.511.000	3.771.000	3.777.000	3.547.000	3.453.000	3.615.000

Aus den Daten lässt sich ein Diagramm mit dem Jahreswärmeverbrauch zeichnen. Der Wärmeverbrauch wird kumuliert, woraus sich eine Jahresdauerlinie ergibt. Die Jahresdauerlinie ist für die Einbindung von weiteren Wärmeerzeugern das maßgebende Kriterium.

Um den Deckungsgrad der in den Römerthermen bereits installierten BHKWs bezogen auf Wärme darzustellen findet sich eine gesonderte (rote) Linie wieder.

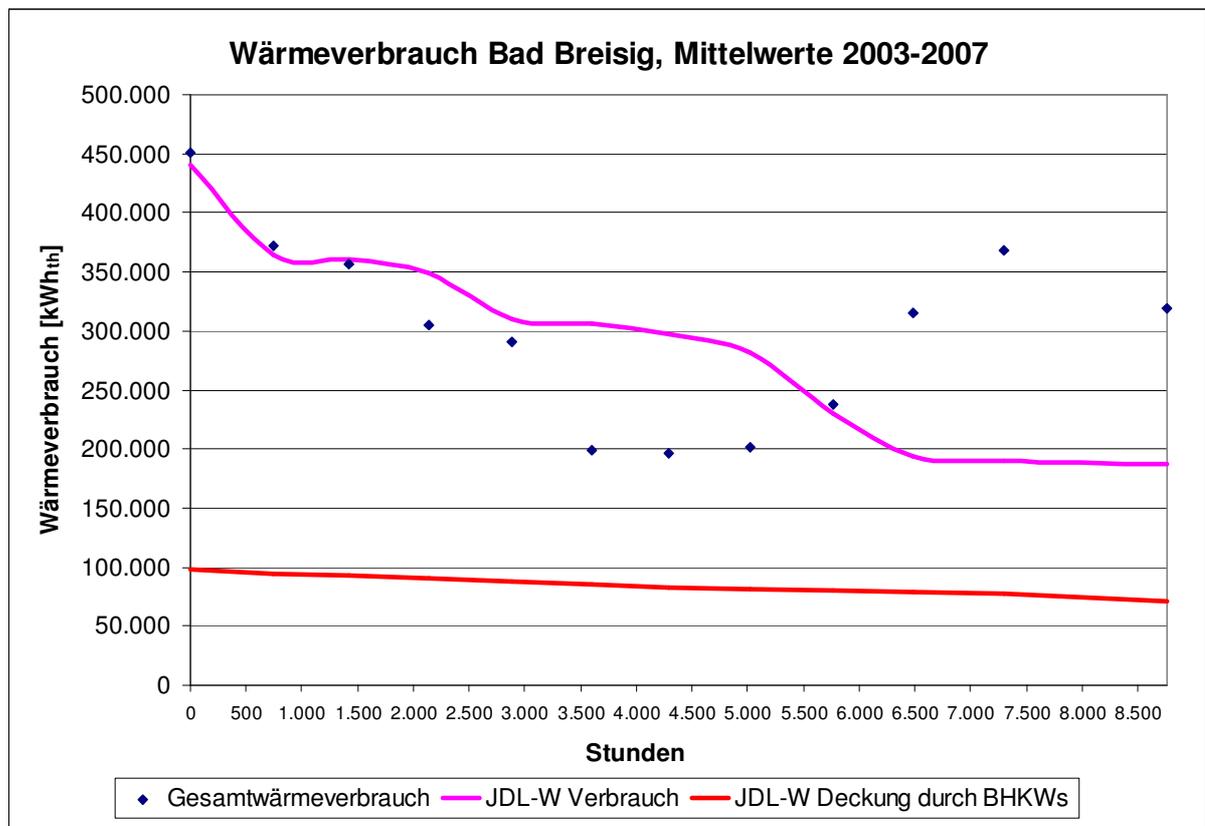


Abb. 3 – Jahreswärmeverbrauch der „Römerthermen“ in Bad Breisig

Der Jahreswärmebedarf der Römerthermen in Bad Breisig beträgt 3.615.000 kWh_{th}/a.

Nach der Vorstellung der Anlagentechnik zur Wärmebereitstellung wird diese Wärmemenge zur weiteren Berechnung auf die entsprechenden Teile des Thermalbades aufgeteilt.

2.2 Anlagentechnik zur Wärmebereitstellung

Derzeit wird die in den Römerthermen benötigte Wärme durch folgende Wärmeerzeuger zur Verfügung gestellt:

- Thermalwasser des Geiersprudels (Eigenwärme bei Beckenwassererneuerung)
- zwei Erdgas-Blockheizkraftwerke (BHKWs), jeweils max. 77 kW_{th} (Grundlast)
- Erdgas-Brennwertkessel (BW), 600 kW_{th} (Mittellast)
- Erdgas-Niedertemperaturkessel (NT), 760 kW_{th} (Spitzenlast und Redundanz)

In den folgenden Tabellen sind die für diese Studie relevanten Daten der einzelnen Wärmeerzeuger aufgeführt:

Tab. 2 – Daten BHKWs (beide BHKWs sind identische Modelle)

Hersteller:	Energiewerkstatt - Gesellschaft für rationelle Energieverwendung mbH Hannover
Gerätetyp:	Blockheizkraftwerk ASV 30/63 P
Elektrischer Leistungsbereich:	15...33 kW _{el}
Thermischer Leistungsbereich:	54...77 kW _{th}
zul. Rücklauftemperatur:	60...70 °C
max. zul. Vorlauftemperatur:	90 °C
Baujahr	2002
Abgeschätzter therm. Nutzungsgrad	68%
Abgeschätzter elektr. Nutzungsgrad	30%
abgeschätzter Gesamtnutzungsgrad (Brennstoffausnutzungsgrad)	98%
Gelaufene Betriebsstunden	jeweils ca. 50.000 h

Tab. 3 – Daten Erdgas-Brennwertkessel

Heizungsanlage mit Brennwertkessel und externen Brenner	
Kessel	
Fabrikat	Fröhling GmbH & Co, Overath
Kessel	Erdgas-Brennwert-Kessel
Gerätetyp	Eurotwin K 600
Baujahr	1999
Wärmeleistung	600 kW _{th}
bei Temperaturspreizung	(80/60) °C
Brenner	
Fabrikat	Weishaupt
Typ	G5/1-D
Baujahr	2000
Leistung	160...830 kW _{BS}

Tab. 4 – Daten Erdgas-Niedertemperaturkessel

Heizungsanlage mit Niedertemperaturkesseln und externen Brenner	
Kessel	
Fabrikat	Fröhling GmbH & Co, Overath
Kessel	Erdgas-NT-Kessel
Gerätetyp	FSM-NT 650
Baujahr	2000
Wärmeleistung	580 ... 760 kW _{th}
bei Temperaturspreizung	(80/60) °C
Brenner	
Fabrikat	Weishaupt
Typ	G7/1-D
Baujahr	1991 ⁹
Leistung	300...1.750 kW _{BS}

2.3 Wärmeverteilung

Die erzeugte Wärme muss auf verschiedene Verbraucher aufgeteilt werden. Grundsätzlich sind drei Punkte zu nennen:

- Beckenwassererwärmung
- Raumheizung
- Lüftungsanlagen

Beckenwassererwärmung

Den weit größten Anteil am Wärmeverbrauch der Römerthermen verursachen die Schwimmbecken (Frischwassererwärmung, Transmission, Verdunstung, Strahlungsemission). Insbesondere durch den ganzjährigen Betrieb und die Außenbecken. Aus dem Gasbezug, wird ein Wärmebedarf für alle Becken in den Römerthermen abgeschätzt. Grundlage hierfür bietet die Simulationssoftware (SW-Simu) und Kenndaten für Schwimmbäder. Diese Daten ermöglichen eine überschlägige Ermittlung des jahreszeitlichen Wärmebedarfs.

⁹ laut Schornsteinfegerprotokoll, Bezirksschornsteinfegermeister HECK, Messung vom 17. Juni 2008

Die Sommermonate entsprechen dabei einer Grundlast, die das gesamte Jahr hindurch zur Verfügung gestellt werden muss. Für die Übergangs- und Wintermonate ergeben sich entsprechende Mehrverbräuche. Die Heizungsanlage stellt genügend Reserven für entsprechenden kurzfristigen Mehrbedarf zur Spitzendeckung (Beckenaufheizung etc.) zur Verfügung.

Abgeschätzt wird der IST-Zustand der Becken, baulich unverändert. Dem gegenüber steht die Basisvariante der Studie, bei der das große Außenbecken mit einer isolierenden Nachtdeckung versehen wird und die Wärmeverluste mindert. Die betrachteten Wärmeversorgungsvarianten werden mit der Basisvariante verglichen.

Bei dem Beckenwasser handelt es sich um gereinigtes (enteisent, entmanganisiert) Thermalwasser des Geiersprudels, welches zu Reinigungs- und Erwärmungszwecken im Umlauf gefahren wird. Ein geringer Teil des Thermalwassers wird aus hygienischen Gründen gegen Frischwasser ausgetauscht.

Die Erwärmung des Beckenwassers erfolgt nach einer Reinigung durch einen Kiesfilter mit Plattenwärmetauschern. Der Heizkreis an den die verschiedenen Wärmeerzeuger angeschlossen sind, übergibt die Wärme an einen Heizkreislauf, der über verschiedene Vorlauf-Verteiler (VL-Verteiler) die Wärme an die entsprechenden Verbraucher übergibt.

Raumheizung

Die Raumheizung erfolgt ebenfalls über das oben genannte Heizsystem. Bei der Raumheizung wird zwischen der Fußbodenheizung mit niedrigen Vorlauftemperaturen im Schwimmhallenbereich und der statischen Radiatorenheizung im Altbaubereich, wie sie in den Verwaltungs-, bzw. Anwendungsräumen zum Einsatz kommt, unterschieden.

Lüftung

Die Lüftungsanlage dient der Einstellung einer gemäßigten Luftfeuchtigkeit und entsprechender Temperierung der einströmenden Frischluft. Die Vorlauftemperatur der Lüftungsanlage beträgt 80°C.

Nach Aussagen des Haustechnikers (Ortsbegehung am 19. September 2008) – Lüftung weit geringerer Anteil als Beckenwasser an Wärmeverteilung – Diese Aussage deckt sich mit unserer Einschätzung.



Abb. 4 – Wärmerückgewinnung an der Ablufteinheit der Lüftung der Schwimmhalle

Die Lüftungsanlage in der Sauna, wurde zuvor genutzt, um die Schwimmhalle des ehemaligen Wellenbades zu entfeuchten und zu beheizen. Die Schwimmhalle existiert nicht mehr, das Wellenbad wurde zum Außenschwimmbaden umfunktioniert.

Die Lüftungsanlage der Sauna ist somit überdimensioniert. Bei einem Austausch der Anlage ist auf eine bedarfsgerechte Neudimensionierung der Anlage zu achten.

Die beiden großen Lüftungsanlagen (Schwimmhalle & Sauna) besitzen eine Wärmerückgewinnungsstufe (WRG) in Form eines wasserführenden Kreislaufverbundsystems.

2.4 Aufteilung der Wärme auf die Verbraucher

Da in den Römerthermen keine Wärmemengenzähler installiert sind, kann die Verteilung der von den Wärmeerzeugern bereitgestellten Wärme auf die verschiedenen Verbraucher nur abgeschätzt werden.

Für die Abschätzung wurden folgende Annahmen getroffen, bzw. folgende Berechnungen des theoretischen Wärmebedarfs der einzelnen Verbraucher durchgeführt:

Tab. 5 – Daten BHKWs (beide BHKWs sind identische Modelle)

Außenbecken	Berechnung des Wärmebedarfs mit der Simulation Software „SW-Simu“ ¹⁰ ;danach Anpassung der Ergebnisse an den tatsächlichen Gesamtwärmeverbrauch der Römerthermen
Innenbecken	Berechnung des Wärmebedarfs anhand Annahmen aus und nach Recknagel et al. (Kap. 2.5.6.2.2), Überprüfung mit Kubessa 1998
Raumheizung (Fußboden, Lüftung, Radiatoren)	Abschätzung anhand Werten und Angaben aus Recknagel sowie Überprüfung mit Kubessa 1998
Brauchwarmwasser (Duschwasser)	Annahme über Recknagel und Überprüfung anhand der Besucherzahlen

Aus Kapitel 2.1 werden die Gas- und Wärmeverbräuche entnommen. Der Erdgasverbrauch der letzten Jahre beträgt durchschnittlich 4.915.000 kWh_{tr}/a pro Jahr. Demgegenüber besteht ein durchschnittlicher Wärmebedarf von 3.615.000 kWh_{tr}/a an Wärme.

Dieser Wärmebedarf wird für die Verbraucher der obigen Tabelle abgeschätzt und ergibt die nachfolgende Abbildung.

¹⁰ SW-Simu: Software zur Simulation des Wärmebedarfs von Freibädern (IST Energietechnik GmbH), Version 3.04

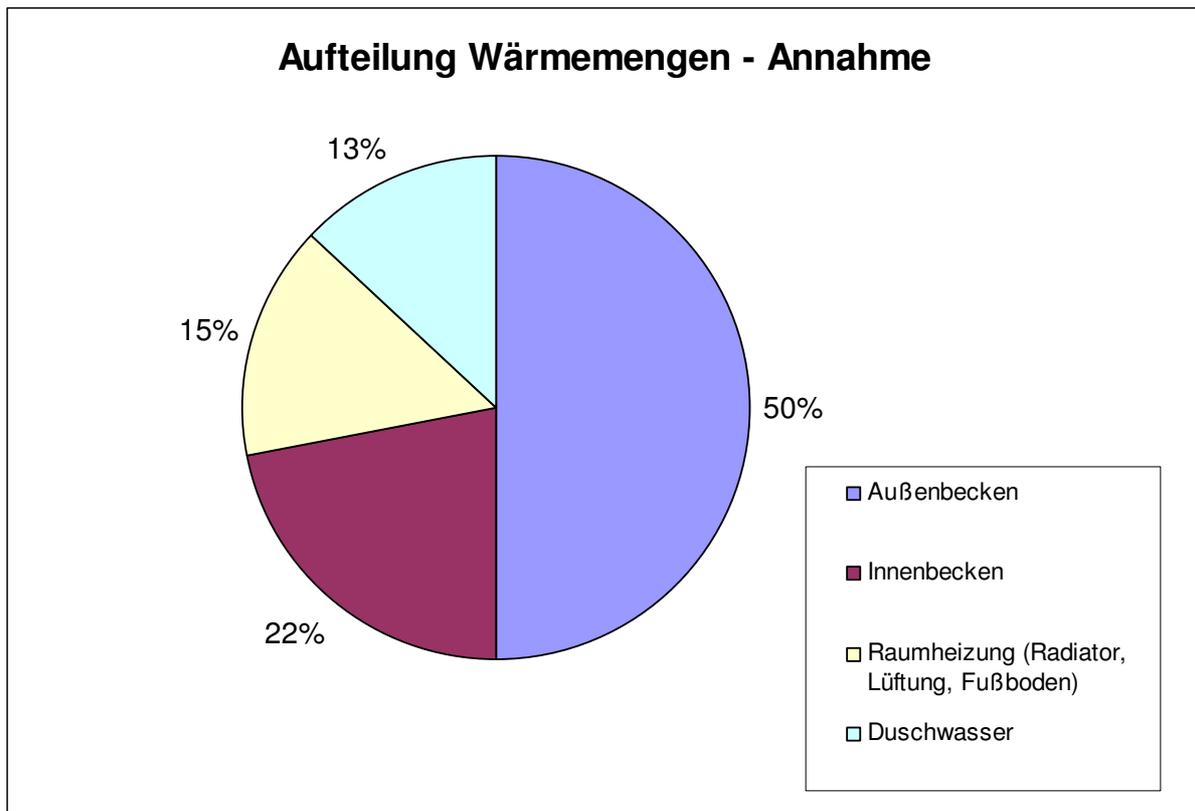


Abb. 5 – Verteilung der Wärme auf die verschiedenen Verbraucher

Etwa 50 % der Wärmemenge verteilt sich auf die Außenbecken, die Innenbecken benötigen etwa 22 %. Mit 15 % kann die Raumheizung angenommen werden und 13 % genügen zur Duschwassererwärmung.

2.5 Einsparpotential durch Verwirklichung einer Abdeckung der Außenbecken

Der Wärmebedarf für die Außenbecken trägt einen großen Anteil am Gesamtwärmebedarf der Römerthermen. Insbesondere durch die hohen Wassertemperaturen, den ganzjährigen Betrieb und die langen Öffnungszeiten der Therme ergibt sich per se ein hoher Bedarf.

Diesem Bedarf kann mit einer Abdeckung von Außenbecken begegnet werden. Für Abdeckungen ergeben sich verschiedenen Möglichkeiten. Die einfachste Möglichkeit stellen Kunststofffolien / Luftpolsterfolien dar. Eine größere Einsparung ermöglichen Rollläden, wahlweise mit Schaumfüllung. Zu den genannten Vorteilen haben einige Abdeckungen eine Sicherheitsfunktion, als dass Personen getragen werden und nicht unbeabsichtigt ins Becken stürzen können.

In der Einsparungsberechnung wird davon ausgegangen, dass nach der Öffnungszeit die Rollladenabdeckung zugefahren wird und zu den Öffnungszeiten geöffnet wird.

In Abhängigkeit der folgenden Parameter wurde die Einsparung durch Installation einer Beckenabdeckung für das große Außenbecken simuliert:

Beckenwassersolltemperatur (Stütztemperatur)	28 °C ganzjährig
Thermalbadöffnungszeiten	08:00 Uhr bis 22:00 Uhr täglich
Schwimmsaison	ganzjähriger Betrieb des Außenbeckens
Geometrie des Außenbeckens	(B x L x T) 12m x 20 m x 1,35 m
Beckenoberfläche	240 m ²

Die Simulation wurde mit dem Ziel ganzjährig die Stütztemperatur von 28 °C zu halten, bzw. die Beckentemperatur zu keinem Zeitpunkt unter 27 °C abfallen zu lassen.

Als Ergebnis der Simulation wird folgend das Einsparpotential an Zuheizwärmebedarf ermittelt:

Zuheizwärmebedarf ohne Abdeckung	~1.250.000 kWh _{th} /a
Zuheizwärmebedarf mit Abdeckung (rollbare Lamellenausführung)	~800.000 kWh _{th} /a
Einsparpotential (simuliert)	~450.000 kWh _{th} /a

Herstellieranfragen ergaben Investitionskosten für die Abdeckung des großen Außenbeckens von etwa 36.000 € ohne MwSt. für die Abdeckung in Rollladenausführung mit Sitzfläche auf einem an einem Beckenkopf anzubringenden Gehäuse.

Bei einem hierfür angesetzten Wärmepreis von 5,4 Ct/kWh_{th} netto ergeben sich jährliche Einsparungen von etwa 20.000 €/a netto.

Mit dieser Einsparung lässt sich die Investition statisch betrachtet in etwa 1,8 Jahren amortisieren.

Eine Abdeckung für das kleine Becken ist prinzipiell ebenfalls möglich, gestaltet sich aber schwieriger. Das Einsparpotential lässt sich gerade vor dem Hintergrund einer höheren Beckentemperatur (32°C) als im Schwimmerbecken steigern. Die Geometrie gibt jedoch keine einfache Abdeckung wie bei einem rechteckigen Becken her.

Daraus ergeben sich folgende Probleme: Um das Becken optimal abzudecken müssen verschiedenen Motoren und Rollladenvorrichtungen installiert werden. Dadurch steigen die

Kosten der Abdeckung an und es wird schwierig überhaupt einen Hersteller zu finden; auch weil für die Planung im Verhältnis ein großer Aufwand betrieben werden muss.

Sollte eine Abdeckung realisiert werden, empfehlen wir mit Herstellern Kontakt aufzunehmen und eine konkrete Abdeckung für das kleine Außenbecken zu besprechen. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie ist eine genauere Beschäftigung mit dieser Problematik nicht möglich. Eine Abdeckung für das kleine Becken wurde (aus den oben genannten Gründen) nicht in die Berechnung aufgenommen.

Die folgende Abbildung zeigt das Einsparpotenzial an Wärme durch die Abdeckung des großen Außenbeckens.

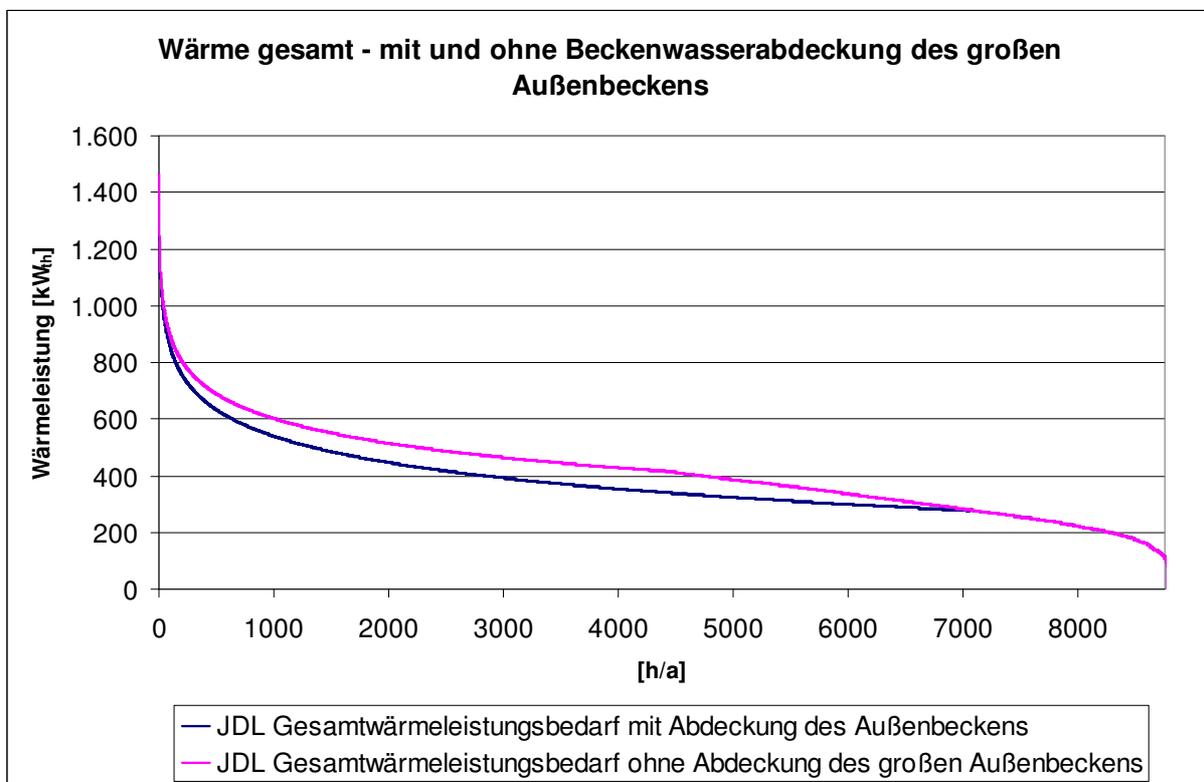


Abb. 6 – Verminderung des Wärmebedarfs durch Abdeckung des großen Außenbeckens

3 Wärmepotential des Thermalwassers

Der Geiersprudel dient dem Thermalbad „Römerthermen“ als Quelle zur Beckenwassererneuerung. Es wird ein geringer Teilstrom benötigt.

Der nicht genutzte Volumenstrom und der Beckenüberlauf fließen derzeit auf einem Temperaturniveau von etwa 30 °C ungenutzt in den Rhein. In diesem Kapitel soll das Wärmepotential des Thermalwassers zu Heizzwecken mittels Einsatz einer Wärmepumpe abgeschätzt werden. Dazu soll zunächst das Wärmepotenzial der Quelle ermittelt werden, wie es mit einer Wärmepumpe nutzbar gemacht werden kann.

Tab. 6 – Thermalwassers des Geiersprudels

Thermalwasserquelle	Geiersprudel
Bohrteufe	etwa 605 m
abgeteuft in	1912-1914
durchschnittliche Schüttung	70.000 l/h
durchschnittliche Temperatur am Brunnenkopf	bis 32 °C

Wasser/Wasser-Wärmepumpen (W/W-WP) kühlen durch Wärmeentzug am Verdampfer den Primärkreislauf üblicherweise um 3 bis 5 K ab. Bei dem gegebenen Volumenstrom des Geiersprudel von etwa 70.000 l/h bedeutet dies eine theoretisch mögliche Entzugsleistung von:

$$\dot{Q}_{\text{Entzug}} = c_{p,\text{Wasser}} * \dot{m}_{\text{Wasser}} * \Delta T$$

mit:

$$\dot{Q}_{\text{Entzug}} = \text{Wärmeentzugsleistung aus dem Thermalwasser}$$

$$c_{p,\text{Wasser}} = \text{spez. Wärmekapazität des Wassers}^{11}$$

$$\dot{m}_{\text{Wasser}} = \text{Massenstrom des Thermalwassers}$$

$$\Delta T = \text{Temperaturdifferenz durch Wärmeentzug (gerechnet mit 4 K)}$$

$$\dot{Q}_{\text{Entzug}} \approx 300 \text{ kW}_{\text{th}}$$

¹¹ Die spezifische Wärmekapazität von Wasser bei 30°C liegt bei 4,177 kJ/(kg*K). Die spezifische Wärmekapazität ändert sich mit den gelösten Stoffen im Thermalwasser. Die vereinfachte Berechnung mit der spezifischen Wärmekapazität von Wasser reicht für eine überschlägige Betrachtung aus.

Neben der dem Thermalwasser entzogenen Wärmemenge wird auch die elektrische Antriebsarbeit des Verdichters der Wärmepumpe in Wärme umgewandelt und steht zu Heizzwecken zur Verfügung.

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \dot{Q}_{\text{Entzug}} + \dot{Q}_{\text{Verdichter}}$$

mit:

$$\dot{Q}_{\text{Verdichter}} = \text{Wärmeleistung, die durch Umwandlung der elektrischen Leistung des Verdichters in einen Wärmestrom entsteht}$$

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \text{am Kondensator der Wärmepumpe abgreifbare Heizleistung}$$

Das Verhältnis der Heizleistung zur elektrischen Leistung des Verdichters bestimmt die Effizienz einer Wärmepumpe. Diese Kennzahl wird als Leistungszahl (COP^{12}) bezeichnet.

Bei einer angenommenen Leistungszahl von 5,0 kann theoretisch folgende Heizleistung durch Nutzung des Thermalwasserstromes genutzt werden:

$$\dot{Q}_{\text{Verdichter}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Entzug}}}{(COP - 1)} = 75 \text{ kW}_{th}$$

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = (300 + 75) \text{ kW}_{th} = 375 \text{ kW}_{th}$$

Damit beträgt die maximal theoretisch mögliche Wärmebereitstellung durch eine Wärmepumpenstufe etwa 375 kW_{th} . Da der Thermalwasserstrom auch nach Passieren des Verdampfers der Wärmepumpe noch auf hohem Temperaturniveau vorliegt, können mehrere Wärmepumpen in Serie geschaltet eingesetzt werden, wobei die Effizienz einer jeden nachgeschalteten Wärmepumpe mit jedem Schritt, jeder Stufe etwas abnimmt.

Somit ist theoretisch eine sehr große Wärmeleistung durch Wärmepumpeneinsatz mit Thermalwasser denkbar.

Beckenüberlauf

Eine weitere Wärmequelle besteht in der Nutzung des Beckenüberlaufs. Der Beckenüberlauf besteht im Wesentlichen aus aufbereitetem Thermalwasser, das als Frischwasser zum Beckenwassertausch verwendet wird. Der Vorteil in der Nutzung des Beckenüberlaufes besteht darin, dass bereits Eisen- und Manganoxide abgeschieden sind und somit das Maß der möglichen Ausfällungen in Form von Inkrustation an den Wandungen des Wärmetauschers geringer als beim frischen Thermalwasser liegen dürfte.

¹² COP = coefficient of performance (bee (W25/W55) eta 5,0)

Der Beckenüberlauf wird zentral in einem Sammelbecken im Keller der Römerthermen gefasst. Dort läuft er mit dem nicht genutzten Teil der Schüttung des hauseigenen Brunnen¹³ zusammen.

Der Beckenüberlauf wird teilweise, vor der Entsorgung in die öffentliche Kanalisation oder Entsorgung durch einen eigenen Kanal in den Rhein¹⁴, als Rückspülwasser für die installierten Filter für Beckenwasserumwälzung und –aufbereitung¹⁵ sowie der Filter zum Abscheiden der gefällteten Eisenoxid-, Manganoxid- sowie arsenhaltigen Verbindungen nach der Oxidationsschleife genutzt.

Eine separate Erfassung des Beckenüberlaufes ist für die Verwirklichung des Wärmeentzugs zwingend notwendig, da bei einer Durchmischung mit der Schüttung des hauseigenen Trinkwasserbrunnen das Temperaturniveau extrem abnimmt.

Abschätzung des Wärmepotentials des Beckenüberlaufes

Durch die Mitarbeiter der Römerthermen erfolgt eine tägliche Dokumentation der Beckenwassererneuerung (als Schüttung in m³/d) sowie der Wassertemperaturen folgender Becken:

- Innenbecken (Thermalwasserbecken)
- Großes Außenbecken
- Kleines Außenbecken
- Kinderbecken
- Hot-Whirlpool (2x)

Den Verfassern dieser Machbarkeitstudie liegen folgende Daten dazu vor¹⁶:

- Schüttungsdaten der Beckenüberläufe in Summe aller Becken
- Minimal 59 m³/d entspr. 0,68 kg/s
- Maximal 221 m³/d entspr. 2,55 kg/s

¹³ Der hauseigene Brunnen dient zur Versorgung von Duschen, Toilettenanlagen und weiteren Wasserverbrauchern, nicht aber zur Versorgung der Küche. Es handelt sich um eine Kaltwasserquelle.

¹⁴ je nach Zustand des Wassers: im Rückspülbetrieb Entsorgung in die öffentliche Kanalisation, bei Normalbetrieb direkt in den Rhein (Genehmigung)

¹⁵ Kiesfilterkaskade

¹⁶ Vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und von den Autoren nicht auf Richtigkeit überprüft

Als Temperaturdifferenz wird angenommen, dass die Wärme des ablaufenden Thermalwassers an das zugeführte/umlaufende Thermalwasser abgegeben werden kann. Die dafür angenommene Temperaturdifferenz beträgt max. 4K.

Recknagel et al. gibt in Kapitel 2.5.6.2.1 je Quadratmeter Beckenfläche eine Frischwasserbedarf¹⁷ von 50 kg/m²d an.

Bei einer Gesamtfläche der Becken von 630 m² ergibt sich daraus einen Frischwasserbedarf von 31,5 m³/d → 0,36 kg/s.

Der ermittelte Beckenüberlauf liegt über dem Frischwasserbedarf nach Recknagel. Diese Differenz lässt sich durch einen bedarfsabhängigen, den Besucherzahlen angepassten Wasserwechsel erklären. Dies entspricht einem vermehrten Wasseraustausch und gleichfalls einer größeren Wärmemenge.

Nutzbare Wärmemenge:

$$\dot{Q}_{\text{Nutz_Überlauf}} = c_{p,\text{Wasser}} * \dot{m}_{\text{Wasser}} * \Delta T$$

Die nutzbare Wärmemenge liegt im Bereich zwischen etwa 10 und maximal 40 kW_{th} bei Betrachtung der niedrigsten und maximalen Tagesfrischwassermenge.

Die Wärmenutzung des Beckenüberlaufs wird in dieser Studie nicht weiter untersucht. Zum Einen weil die Schüttung zu gering ist. zum Anderen kommt hinzu, dass die angegebene Schüttmenge (vgl. Recknagel et al.) deutlich überschritten wird, was bei einer Reduzierung der Frischwassermenge einer weiteren Minderung des Wärmepotentials im Überlauf gleichkommt. Weiter gestaltet sich eine Einbindung auch baulich schwierig.

¹⁷ Aufgrund von Verdunstung entspräche der Überlauf einem geringeren Wert. Die Leistung soll an dieser Stelle aber positiv gerechnet werden. Deshalb wird der Überlauf mit dem Zulauf gleichgesetzt.

4 Erschließung der Thermalwasserwärme

Zur Wärmebereitstellung unter Einbeziehung des Thermalwassers kommt eine Wärmepumpe zum Einsatz. Diese Wärmepumpe versorgt die Schwimmbecken mit Grundlastwärme. Das vorliegende Temperaturniveau des Thermalwassers aus dem Geiersprudel (bis 32 °C) reicht nicht aus, um das benötigte Wärmeniveau für die Becken zur Verfügung zu stellen. Die Wärmepumpe kann bei der vorliegenden Quellentemperatur die Wärme effizient¹⁸ auf eine bereitgestellte Vorlauftemperatur von etwa 55 °C heben.

Probleme bei der Erschließung der Thermalwasserwärme zu Heizzwecken können insbesondere durch Korrosion und Inkrustation an Bauteilen mit direktem Thermalwasserkontakt nicht ausgeschlossen werden.

Das System der Heizwärmebereitstellung sollte daher in jedem Fall möglichst am Anfang der Kette der benötigten Komponenten stofflich von der Thermalwasserströmung getrennt werden. Um dieser Forderung gerecht zu werden, übergibt ein Wärmetauscher im Thermalwasserstrom die Wärme an einen Wärmetauscher über einen Sekundärkreislauf, welcher die Wärme dem Verdampfer der Wärmepumpe zuliefert.

Die folgende Abbildung zeigt einen möglichen (im Rahmen dieser Studie betrachteten Systemaufbau):

¹⁸ geschätzte Jahresarbeitszahl (JAZ) bei COP=5,0 (W25/W55): JAZ=4,4

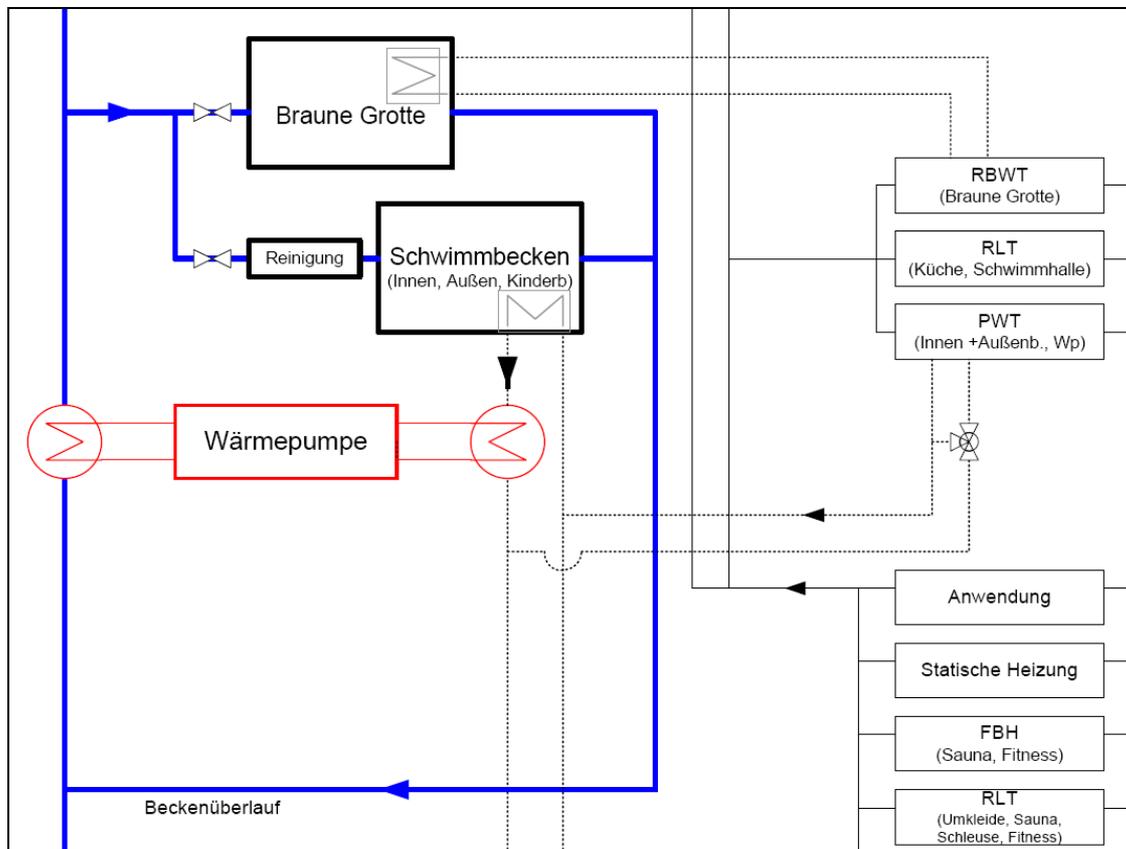


Abb. 7 Einbindung der Thermalwasserwärmenutzung

Die Bewertung der denkbaren Probleme (Korrosion und Inkrustation durch Inhaltsstoffe des Thermalwassers) ist durch die direkte Systemtrennung nur für den Wärmetauscher notwendig, der an die Wärmepumpe angeschlossen ist. Die Thermalwasser führenden Rohrleitungen sind in den Römerthermen in PE ausgeführt, nach Aussage des Haustechnikers bestehen keine Materialprobleme in diesem Bereich.

Dieselbe Problematik tritt ebenfalls bei dem vorhandene Rohrbündelwärmetauscher der „Braunen Grotte“ auf. Durch wöchentliches Spülen mit einer sauren Lösung wird nach Aussage der Römertherme ein störungsfreier Betrieb gewährleistet.



Abb. 8 – Rohrbündelwärmetauscher „Braune Grotte“ Betrieb mit unbehandeltem Thermalwasser

Plattenwärmetauscher kommen bisher nur mit gereinigtem Thermalwasser in Kontakt. Auch hier treten nach Aussage der Hausmeister keine Probleme auf.



Abb. 9 – Plattenwärmetauscher Betrieb mit gereinigtem Thermalwasser

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde versucht durch Herstellerkontakte die beschriebenen Problematik zu bewerten. Es wurde ein Fragebogen (siehe Anhang) erstellt, der verschiedenen Herstellern zugesandt wurde. Erfragt wird die Eignung von Wärmetauschern, die Reinigungsmöglichkeit und die entstehenden Kosten für Anschaffung und Betrieb der Wärmetauscher. Anschließend wird das Ergebnis der Befragung dargestellt.

Die Hersteller wurden unter Kenntnis der chemischen und physikalischen Parameter des Thermalwassers nach ihren Einschätzungen/ Erfahrungen mit folgenden Fragestellungen beauftragt:

- Welche Bauarten von Wärmetauschern wären geeignet, ggf. Produktbezeichnung aus Ihrem Hause?
- Welcher Werkstoff kommt zum Einsatz?
- Bewertung von Korrosionsanfälligkeit
- Bewertung von Inkrustationsanfälligkeit
- Wie hoch würde der Reinigungsaufwand bzgl. Inkrustation sein [in h/a]? In diesem Zusammenhang, wäre eine Spülung mit HCl zur Carbonatentfernung möglich bzw. notwendig?
- Mit welchen Betriebskosten (besonders Wartungs-, und Reinigungskosten) ist zu rechnen?

Auswertung

Die Bewertung der genannten Aspekte erfolgte durch Telefonate mit verschiedenen Wärmetauscher-Herstellern, durch die beschriebenen Fragebögen, die von den Herstellern beantwortet wurden, Aussagen und Betriebserfahrungen der Römertherme sowie der darauf basierenden Einschätzung der Autoren.

Grundsätzlich muss zwischen Platten- und Rohrbündelwärmetauschern unterschieden werden. Für den angefragten Fall wurden von den Herstellern ausschließlich Plattenwärmetauscher angeboten. Der einzige Wärmetauscher der bisher direkt mit dem Thermalwasser in Berührung kommt (Braune Grotte) ist ein Rohrbündelwärmetauscher, der unter Inkaufnahme des vergleichsweise hohen Spülaufwandes problemlos funktioniert. Welche Art von Wärmetauschern in einer möglichen Umsetzung Verwendung findet ist daher in der Detailplanung vorzusehen. Preislich sind letztgenannte Wärmetauscher kostenintensiver und erfordern eine größere Aufstellfläche.

Die Hersteller von Wärmetauscher empfehlen den Werkstoff Titan. Dieser ist unanfällig gegenüber dem Thermalwasser. Insbesondere wegen des hohen Chloridgehalts sollte Edelstahl nicht verwendet werden. Damit sollte in erster Einschätzung die Korrosionsgefahr gebannt sein. Dem Problem der Inkrustation kann zum Einen mit einer hohen Durchströmgeschwindigkeit begegnet werden (gleichzeitig größerer Druckverlust). Zum Anderen ist eine Spülmöglichkeit vorzusehen. Säuren lösen Carbonate, die Eignung des empfohlenen Dichtmaterials (NBR) muss aber noch geprüft bzw. vom Hersteller bestätigt werden.

Als Alternative wird von einem Hersteller auch Demontage genannt. Ungenau werden die Aussagen bei der Wartungsdauer, diese reichen von keiner Aussage zu 30 min über mehrere Stunden. Preislich sind derartige Wärmetauscher ab etwa 6.000 Euro (110 kW) zu erwerben (+ MwSt.). Dabei spielen Schwankungen in der zu übertragenden Leistung eine untergeordnete Rolle.

Ungenau Aussagen sind von den Kunststoffwärmetauscher-Herstellern zu bekommen. Grundsätzlich kosten diese jedoch deutlich mehr und haben einen geringeren Wärmeübergang was größere Bauteile erforderlich macht. Korrosion kann wie bei Titan-Wärmetauschern ausgeschlossen werden, die Problematik der Inkrustation bleibt jedoch bestehen zudem ist der Wärmeübergang bei Kunststoffwandungen geringer als bei metallenen Wandungen.

Es lassen sich nach den Rückläufen der Fragebögen keine Vorteile erkennen, die einen wesentlich gestiegenen Preis rechtfertigen.

Der Berechnung der Wirtschaftlichkeit liegt aus den genannten Gründen ein Plattenwärmetauscher aus Titan zugrunde:

Tab. 7 – Investition Plattenwärmeüberträger

Investitionskosten der Plattenwärmetauscher für die Wärmepumpe aus Titan		
Anzahl	2 Redundanz	
Kosten	Wärmetauscher	6.000 €/St
	Anbindung	1.600 €/St
Gesamtkosten Investition	15.200 €	

Tab. 8 – Zu erwartende Wartungskosten des Wärmetauschers zur Systemtrennung

Angabe zum Wartungsaufwand der Plattenwärmetauscher aus Titan		
Aussage Hausmeister	Spülen 1 x wöchentlich 20 kg HCl (33%) + 20 l Wasser 15-20 min Spülen je Monat 10 kg HCL (33%) frisch hinzu Lösung 3 Monate verwenden	
Kosten	Salzsäure	0,135 Euro / kg ¹⁹

¹⁹ Angabe Römerthermen

40kg HCl / 3 Monate	22 Euro / Jahr
Arbeitsaufwand	2 Std/Woche ²⁰
	40 €/a
je Wärmetauscher	4.160 €/a
Gesamt	4.182 €/a
Gesamtwartungskosten	
	8.364 €/a

Die Gesamtkosten der Investition für die beiden, redundanten Wärmetauscher zur Einbindung einer Wärmepumpe betragen etwa 15.200 €.

Die jährlichen Wartungskosten belaufen sich bei einer Spülung mit HCl auf etwa 8.350 €/a. Der Wert ist pessimistisch abgeschätzt, weil bei einer redundanten Auslegung die Betriebszeit und damit der Wartungsaufwand geringer ausfallen.

Die Neutralisation erfolgt wie bei dem bestehenden Wärmetauscher mit der vorhandenen Technik und demselben Verfahren. (Mit der Hebeanlage im Abwasserstrom über die Kanalisation zur Kläranlage)

Fazit

Zur näheren Bewertung der Problematik müsste eine Versuchsstrecke vor Ort installiert und deren Betrieb bewertet werden. Eine Zusammenarbeit mit Herstellern wäre denkbar.

In den Römerthermen wird seit 15 Jahren ein Plattenwärmetauscher ohne Probleme betrieben. Der äußere Zustand kann als korrodiert beschrieben werden, dennoch treten im Betrieb keine Probleme auf.

Ebenfalls findet sich bereits ein Wärmetauscher in direktem Kontakt mit unbehandeltem Thermalwasser aus der Quelle. Bei diesem Wärmetauscher handelt es sich jedoch anders als meist vorgeschlagen um einen Rohrbündelwärmetauscher. Bei diesem Bauteil bestehende ebenfalls keine Probleme, auf der anderen Seite wird dieser Wärmetauscher auch jede Woche mit einer Säurelösung gespült.

Bei Rohrbündelwärmetauschern ergeben sich bei der Wartung weitere Vorteile. Sollte es notwendig werden den Wärmetauscher auseinander zu nehmen, so vereinfacht sich die Prozedur gegenüber einem Plattenwärmetauscher erheblich auch in Bezug auf den zeitlichen Aufwand. Vorteilhaft wirkt sich aus, dass die Temperaturen beim Wärmetauscher der Wärmepumpe auf geringerem Temperaturniveau liegen als in der „Braunen Grotte“, wodurch sich die Löslichkeit von Salzen im Thermalwasser vergrößert, wodurch die Bildung von Inkrustation langsamer abläuft.

Mit Herstellen muss ein Wartungsplan entwickelt werden, der einen sicheren Betrieb ermöglichen wird. Dieser Plan ist abhängig Faktoren und Betriebszuständen, die im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nicht getroffen werden können.

²⁰ Annahme TSB

5 Voraussetzungen zur Nutzung der Wärme in den Römerthermen

Die Wärmeverteilung in den Römerthermen erfolgt mit folgenden Systemen:

- Beckenwassererwärmung
- Verteilung durch Erwärmen der Zuluft in den Lüftungsanlagen
- Fußbodenheizung in den neueren Gebäudeteilen
- Heizkörper in den älteren Gebäudeteilen

Durch den Einsatz einer Wärmepumpe mit der Wärmequelle Thermalwasser können effizient Heizwassertemperaturen bis maximal 55 °C bereitgestellt werden. Es folgt eine Aufstellung, die qualitativ bewertet, wie sich dieses Temperaturniveau auf die Wärmeverteilung der eingesetzten Verteilsysteme auswirkt:

Beckenwassererwärmung

Das Beckenwasser weist Temperaturen zwischen 28 °C und 34 °C auf. Die Erwärmung des Beckenwassers erfolgt durch Erwärmung des umgewälzten Beckenwassers sowie der Erwärmung der Schüttung des Frischwasserstromes zur Beckenwassererneuerung. Über die Beckenwassererwärmung werden sämtlich Wärmeverluste des Beckens ausgeglichen.

Wärmeverteilung über die Lüftungsanlagen

Die Erwärmung der Zuluft in Lüftungsanlagen geschieht über Heizregister. Heizregister sind Wasser/Luft-Wärmetauscher, die primärseitig mit Heizwasser aus der Zentralheizungsanlage versorgt werden.

Baugrößenbedingt werden Heizregister mit relativ hohen Temperaturen angefahren, üblicherweise etwa 80 °C.

Eine gleichwertige Verteilung der Heizwärme ist in den bestehenden Lüftungsanlagen bei vorliegenden Temperaturen von 55 °C nicht möglich.

Fußbodenheizung

Fußbodenheizungen benötigen ein Vorlauftemperaturniveau von etwa 35 bis 45 °C. Diese Temperaturen können durch die Wärmepumpe bereitgestellt werden.

Heizkörper

Die in den Altbaubereichen installierten Heizkörper (Gliederradiatoren) benötigen im Auslegungsfall²¹ ein höheres Temperaturniveau als durch die Wärmepumpe bereitgestellt werden kann.

Wie in der Aufstellung ersichtlich ist, müssen zur Verteilung der Wärme Änderungen an den Verteilsystemen Lüftung und Heizkörper vorgenommen werden.

²¹ maximaler Wärmeleistungsbedarf bei Außentemperatur = -12 °C

Die Auslegung der neuen oder geänderten Verteilsysteme übersteigt den Rahmen dieser Studie. Daher werden Grenzkosten für mögliche Investitionen ermittelt, die durch die Einsparung durch die Thermalwassernutzung zu erwarten sind.

Der Anteil der über die Fußbodenheizung verteilten Wärme am Gesamtwärmeverbrauch wird als sehr gering eingeschätzt. Die günstigste Wärmesenke für die mittels Wärmepumpen bereitgestellte Wärme und gleichzeitig der größte Verbraucher ist die direkte Erwärmung des Beckenwassers.

Um diese Verschaltung zu ermöglichen, muss vor dem bestehenden Wärmetauscher des Heizungssystems ein neuer Wärmetauscher für die Wärmepumpe eingebunden werden. Die folgende Abbildung stellt eine Schaltungsmöglichkeit dar.

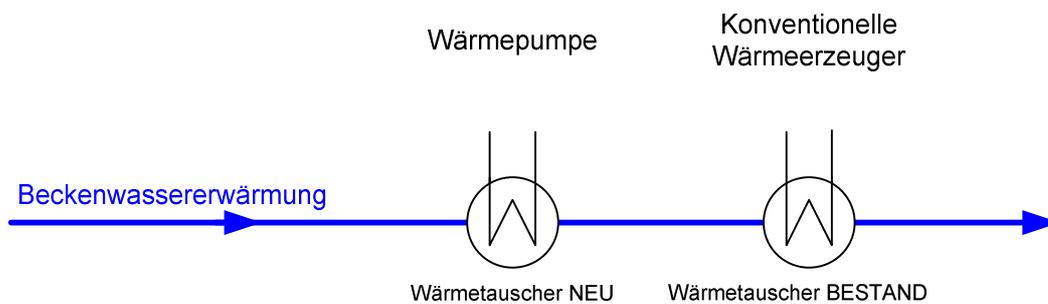


Abb. 10 – Einbindung des Wärmetauschers für die Wärmepumpe

6 Variantenauswahl zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Nach Auswertung des Wärmebedarf und der Verteilung des Wärmebedarfs übers Jahr wurden unter Berücksichtigung der Wärmeeinsparung durch Abdeckung des großen Außenbeckens folgende Varianten in die Betrachtung mit aufgenommen:

- Ist-Zustand: Derzeitige Heiztechnik, diese Betrachtung dient lediglich der Darstellung der Vergleichskosten der Beheizung der Römerthermen
- Basisvariante: Wärmebereitstellung erfolgt mit vorhandener Technik. Das große Becken wird in dieser Variante nachts abgedeckt. Die folgenden drei Varianten werden ebenfalls mit dem durch Abdeckung des großen Außenbeckens verminderten Jahreswärmebedarf gerechnet. Die Basisvariante dient dem Vergleich der unterschiedlichen Heiztechniken bei identischem Wärmebedarf
- Variante 1: Zur Wärmeversorgung wird eine Wärmepumpe mit etwa 110 kW_{th} eingebunden.
- Variante 2: Zu den vorhandenen BHKWs wird ein kleines BHKW neu hinzuge stellt, dessen elektrische Leistung an den Bedarf einer 110kW_{th} Wärmepumpe angepasst ist (20kW_{el})
- Variante 3: ein zusätzliches BHKW bis 50 kW_{el} wird installiert. Es erfolgt keine Thermalwasserwärmenutzung.

Tab. 9 –Betrachtete Varianten

	IST	Basisvariante	Var 1	Var 2	Var 3
Abdeckung	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Alte BHKWs	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Neues BHKW Für WP (20 kW _{el})	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Neues BHKW (50 kW _{el})	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
Eine Wärmepumpe	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein

BHKW-Einsatz

Die Römerthermen nutzen den mit den Bestandsanlagen erzeugten BHKW-Strom zu 100 % selbst. Dies ist sehr wirtschaftlich, da mit Eigennutzung des Stroms an anderer Stelle Strombezugskosten von 8,72 Ct/kWh (o. MwSt.) im HT-Bereich und 7,42 Ct/kWh (o. MwSt.) im NT-Bereich für elektrische Arbeit vermieden werden.

Dies schon gibt Grund zu der Annahme, dass jede Nutzung der BHKW-Wärme bei gleichzeitiger **Eigennutzung des erzeugten Stroms** günstiger als die Alternativen Erdgaskessel und auch Thermalwasserwärmenutzung ist. Die derzeitigen Wärmegestehungskosten mit dem BHKW-Einsatz liegen (unter Ansetzen eines Wertes für den Strom von 8,23²² Ct/kWh_{el} o. MwSt.) bei 5,48 Ct/kWh_{th} (nur Betrachtung der Verbrauchskosten).

Die Wirtschaftlichkeit des BHKW-Einsatzes ist somit direkt mit einem ansetzbaren Wert des produzierten Stroms verbunden. Die folgende Aufstellung zeigt den abgeschätzten Wert (ohne MwSt.) für Strom, welcher mit einem BHKW erzeugt wird, welches ab 2009 erstmalig in Betrieb genommen wird und eine elektrische Leistung von maximal 50 kW_{el} hat:

Tab. 10 –Stromkosten

Strombezugskosten NT & Zuschuss o. MwSt	$7,42 + 5,11 = 12,53$	Ct/kWh _{el}
Strombezugskosten HT & Zuschuss o. MwSt	$8,72 + 5,11 = 13,83$	Ct/kWh _{el}
Strombezugskosten Mischpreis ²³ (Annahme TSB)	$8,23 + 5,11 = 13,34$	Ct/kWh _{el}
BHKW Strom „zur Einspeisung“	$6,801^{24} + 0,5^{25} + 5,11 = 12,41$	Ct/kWh _{el}

In den folgenden Betrachtungen (Varianten 1 bis 3) wird davon ausgegangen, dass neben der bisherigen Stromeigennutzung kein weiteres Potential an Strom zur Eigennutzung vorhanden ist und der Wärmebedarf mit der Wirtschaftlichkeit entsprechend hohen Ausnutzungsdauern der Wärmeerzeuger gedeckt wird.

Die Variante 2 untersucht die Wirtschaftlichkeit eines BHKWs in Verbindung mit einer Wärmepumpe. Das BHKW ist so ausgelegt, dass der erzeugte zusätzliche Strom in der Wärmepumpe genutzt wird.

²² Der Mischpreis errechnet sich aus der Annahme, dass die Pumpen und BHKWs rund um die Uhr betrieben werden. Der NT-Preis liegt von 21-6h täglich an und trägt somit einen Anteil von 37,5%.

²³ Siehe Fußnote 20

²⁴ KWK-Index an der EEX ein Leipzig (Quartal 4 2008)

²⁵ Vermiedene Netznutzung nach Verbändeverordnung II Plus (geschätzt)

In der Variante 3 wird ein großes BHKW installiert, dessen Wärmeleistung an den Bedarf der Römerthermen angepasst ist.

Seit dem 1. Januar 2009 gilt das novellierte Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG 2009). Wesentliche Änderung des Gesetzes ist, dass fortan auch der eigen genutzte Strom bezuschusst wird. Bei Anlagen kleiner 50 kW_{el} beträgt die Zuschlagshöhe 5,11 Ct/kWh_{el}.

Für die Bestandsanlagen kann ein Antrag gestellt werden, dass der erzeugte Strom für die Jahre 2009 und 2010 ebenfalls bezuschusst werden kann. Die Bezuschussung der Bestandsanlagen geht nicht in die Berechnungen der Wirtschaftlichkeit ein.

Um den BHKW-Einsatz weitergehend zu Optimieren, müsste das Potential an lastganggerecht möglicher Stromeigennutzung anhand vom Stromversorger zur Verfügung gestellten kontinuierlicher Stromverbrauchsdaten ermittelt werden. Dies kann im notwendigen Umfang nicht im Rahmen dieser Studie durchgeführt werden.

7 Energiebilanz / Emissionsbilanz

Energiebilanz

In der Energiebilanz sind die umgesetzten Energie- und Brennstoffmengen für die Wärmeversorgung der Römerthermen aufgeführt.

Die erforderliche Wärmeleistung der Heizungsanlage wird wie folgt aufgeteilt.

Alle Varianten	bestehende Erdgaskessel bestehende Blockheizkraftwerke
Variante 1	110 kW _{th} Wärmepumpe mit Wärmequelle Thermalwasser
Variante 2	110 kW _{th} Wärmepumpe mit Wärmequelle Thermalwasser angetrieben durch 20 kW _{el} / 45 kW _{th} BHKW
Variante 3	BHKW 50 kW _{el} / 95 kW _{th}

Die Energiebilanz wird aus Anschaulichkeitszwecken in zwei Tabellen dargestellt: einer Wärme- und einer Strombilanz.

Tab. 11 – Wärmebilanz

		Ist-Zustand	Basisvariante Referenz	Variante 1 WP	Variante 2 BHKW&WP	Variante 3 BHKW
Nennwärmeleistung Erdgaskessel	kW_{th}	1.360	1.360	1.360	1.360	1.360
Nennwärmeleistung BHKWs (Bestand)	kW_{th}	154	154	154	154	154
Nennwärmeleistung BHKWs neu	kW_{th}	0	0	0	45	95
Nennwärmeleistung Wärmepumpen	kW_{th}	0	0	110	110	0
Nennwärmeleistung gesamt	kW_{th}	1.514	1.514	1.624	1.669	1.609
Wärmebedarf Römerthermen	kWh_{th}/a	3.613.000	3.284.000	3.284.000	3.284.000	3.284.000
Wärmeerzeugung Erdgaskessel	kWh_{th}/a	2.491.000	2.052.000	1.238.000	1.014.000	1.297.000
Wärmeerzeugung BHKWs	kWh_{th}/a	1.122.000	1.232.000	1.232.000	1.592.000	1.986.000
Wärmeerzeugung Wärmepumpe	kWh_{th}/a	0	0	814.000	677.000	0
Anteil Erdgaskessel an Wärmeerzeugung		69%	62%	38%	31%	39%
Anteil BHKWs an Wärmeerzeugung		31%	38%	38%	48%	60%
Anteil Wärmepumpe an Wärmeerzeugung		0%	0%	25%	21%	0%
Vollbenutzungsstunden Erdgaskessel	h/a	1.830	1.510	910	750	950
Vollbenutzungsstunden BHKWs	h/a	7.290	8.000	8.000	8.000	7.980
Vollbenutzungsstunden Wärmepumpe	h/a	0	0	7.400	6.150	0
Brennstoffbedarf Erdgas (Kessel)	kWh_{Ho}/a	3.045.000	2.508.000	1.513.000	1.240.000	1.585.000
Brennstoffbedarf Erdgas (BHKWs)	kWh_{Ho}/a	1.898.000	2.085.000	2.085.000	2.694.000	3.362.000
Strombedarf Wärmepumpe	kWh_{elWP}/a	0	0	185.000	154.000	0
Hilfsenergiebedarf	kWh_{el}/a	47.300	45.200	53.300	55.500	52.700

Tab. 12 – Strombilanz BHKWs

		Ist-Zustand	Basisvariante Referenz	Variante 1 WP	Variante 2 BHKW&WP	Variante 3 BHKW
Installierte elektrische Leistung						
Bestands-BHKWs	kW _{el}	66	66	66	66	66
neue BHKWs	kW _{el}	0	0	0	20	49
Stromerzeugung						
mit den BHKWs erzeugter Strom	kWh _{el} /a	483.000	531.000	531.000	686.000	856.000
Stromverwendung						
Eigennutzung "Normalstrom"	kWh _{el} /a	483.000	531.000	531.000	532.000	464.000
Eigennutzung "Wärmepumpenstrom"	kWh _{el} /a	0	0	0	154.000	0
Netzeinspeisung (EEX)	kWh _{el} /a	0	0	0	0	392.000

Emissionsbilanz

Eine ökologische Bewertung der Wärmeversorgungsvarianten erfolgt mithilfe einer Kohlendioxid-Äquivalent-Emissionsbilanz. Dazu wird je nach eingesetztem Brennstoff bzw. Strom das spezifische CO₂-Äquivalent nach GEMIS¹ zu Grunde gelegt.

Die spezifische CO₂-Äquivalent-Emission beträgt für Erdgas 254,1 g CO₂/kWh_{Hu} und für Strom (Stromnetz Deutschland) 682,6 g CO₂/kWh_{el}. Neben den CO₂-Äquivalent-Emissionen sind außerdem NO_x- und Staubemissionen in einer umfassenden Emissionsbetrachtung zu beachten.

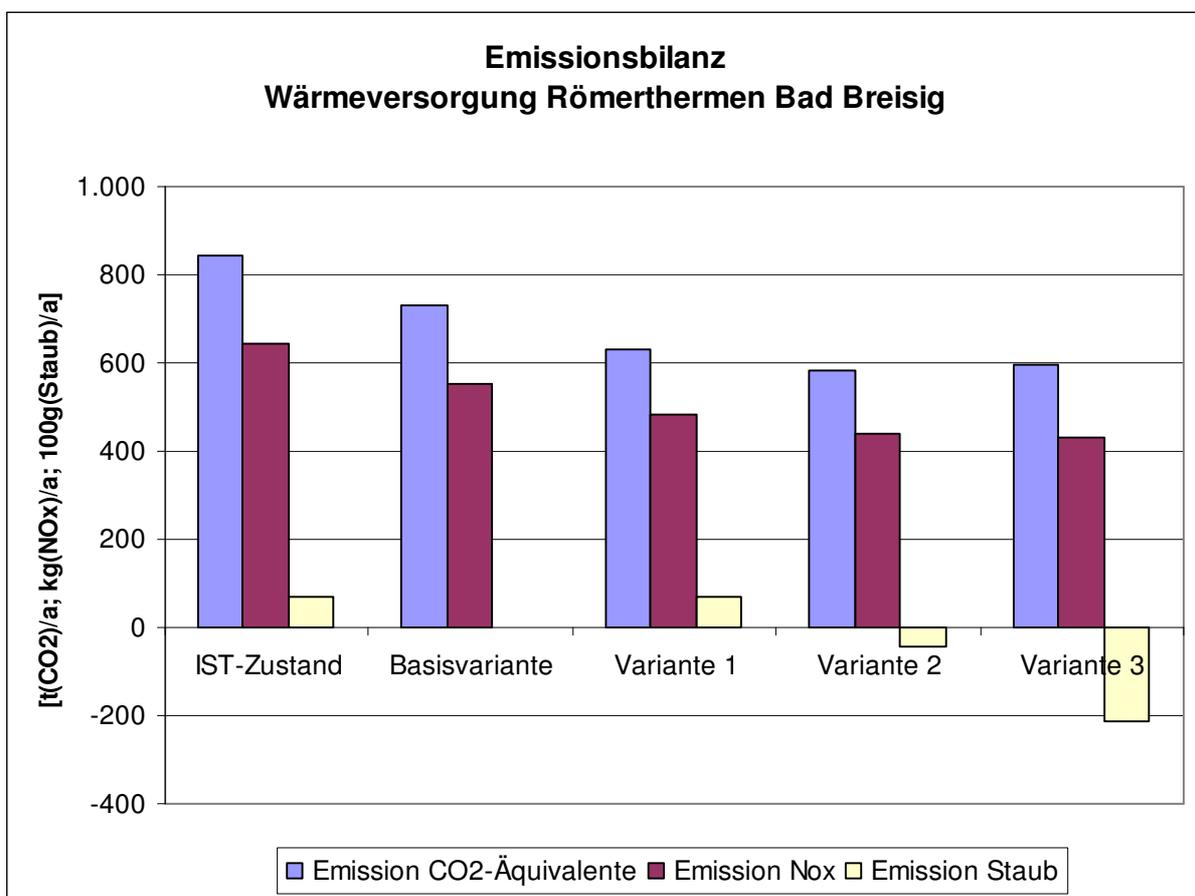


Abb. 11 – ökologische Bewertung – Emissionsbilanz

Aus ökologischer Sicht sind alle drei Varianten gegenüber dem Ist-Zustand und der Basisvariante zu bevorzugen. Bezüglich der Emission an CO₂-Äquivalenten können Einsparungen in der Höhe von etwa 15 % bis 20 % erreicht werden.

Die Emission von NO_x kann durch Umsetzung jeder einzelnen Variante verringert werden. Da bei der Verbrennung von Erdgas nur sehr geringe Massen von Staub entstehen, ist die

¹ GEMIS 4.14 Stand September 2002 und GEMIS 4.2 Stand Oktober 2004

Emission von Stäuben eng mit dem Verbrauch und der Erzeugung von elektrischer Energie verknüpft. Die Emission von Feinstäuben entsteht im großen Rahmen bei der Verbrennung von Kohle in thermischen Großkraftwerken. Bilanziell betrachtet wird durch Erzeugung von Strom in KWK-Anlagen auf Basis des Energieträgers Erdgas in Bezug auf Staub sehr reiner Strom erzeugt, welcher Staub belasteteren Strom aus dem deutschen Kraftwerkpark verdrängt. Daher ergeben sich in der Darstellung bilanziell negative Staubemissionen.

In Bezug auf Staub werden lokal Emissionen in der Kurstadt durch den Einsatz von Wärmepumpen vermieden.

8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die dargestellten Varianten der Wärmeversorgung der Römerthermen miteinander verglichen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird anhand der Rentabilitätsrechnung in Anlehnung an die VDI 2067 durchgeführt. Ergebnis der Betrachtung ist die Gegenüberstellung der Aufwendungen für den Bau und Betrieb neuer Wärmeversorgungsanlagen gegen die Beheizung der Gebäude auf Basis der bestehenden Wärmeversorgungsanlagen.

Die Berechnung beinhaltet verschiedene Stromverwertungsstrategien: Der Strom der Bestands-BHKWs wird in jeder betrachteten Variante weiterhin selbst genutzt. Der mit dem neuen BHKW in Variante 2 erzeugte Strom wird zum Antrieb der Wärmepumpe verwendet. Der in Variante 3 mit dem neuen BHKW erzeugte Strom wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

Investitionskosten

Die Investitionskosten beinhalten alle für den Bau erforderlichen Positionen einschließlich Planungsaufwendungen. Dazu sind unter Anderem folgende Punkte heranzuziehen:

- Maschinen- und Bautechnik
- Montage
- Planung, Unvorhergesehenes

Nicht beinhaltet sind Kapitalkosten für bestehende Anlagen, die sich noch innerhalb ihres jeweiligen Abschreibzeitraumes befinden.

In dieser Position werden auch anzusetzende Fördermittel angegeben, die als Gutschrift in die Kostenaufstellung eingehen.

Nicht betrachtet werden hier Investitionskosten für die Abdeckung des großen Außenbeckens.

Fördermittel

In die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind folgende Fördermittel mit eingerechnet:

Gegenstand der Förderung	Förderprogramm	Förderung	
BHKW	BAFA ¹	bis 4 kW _{el}	1.550 €/kW _{el}
		bis 6 kW _{el}	775 €/kW _{el}
		bis 12 kW _{el}	250 €/kW _{el}
		bis 25 kW _{el}	125 €/kW _{el}
		bis 50 kW _{el}	50 €/kW _{el} ²
BHKWs	RLP ³	Basisförderung bis 3 kW _{el} : 500 € zzgl. 100 €/kW _{el} für weitere Leistung	
Wärmepumpen (Neubau)	BAFA ⁴	20 €/m ² _{beheizteFläche} ; maximal aber 15 % der Nettoinvestitionskosten der Wärmepumpenanlage	

Tab. 13 – Eingerechnete Fördermaßnahmen

Mini-BHKWs mit einer elektrischen Leistung bis 50 kW_{el} sind unter Beachtung einiger Bedingungen durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) förderbar. Die für die beispielhaften Berechnungen in dieser Studie erzielbaren Förderzuschüsse sind in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit eingerechnet.

Antragsberechtigt für beide Förderprogramme sind unter anderem „Unternehmen, an denen mehrheitlich Kommunen beteiligt sind und die gleichzeitig die KMU-Schwellenwerte unterschreiten“.

¹ Klimaschutz Impulsprogramm für Mini-KWK

² Kumulierbar mit vorherigen Leistungsstufen

³ Förderprogramm der rheinland-pfälzischen Energieversorgungsunternehmen für Erdgas-Blockheizkraftwerke

⁴ Marktanreizprogramm Erneuerbare Energien

Jahreskosten

Die Jahreskosten setzen sich aus den kapitalgebundenen, den verbrauchsgebundenen, den betriebsgebundenen und den sonstigen Kosten zusammen.

Kapitalgebundene Kosten

Für die Berechnung der kapitalgebundenen Kosten ist abhängig von der gewählten Berechnungsmethode der Zinssatz und entweder die rechnerische Nutzungsdauer nach VDI 2067 oder die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer nach AfA-Tabelle für die entsprechenden Investitionen zu bestimmen. Außerdem ist zu prüfen, ob Fördermittel oder ein Teilschulderlass nach entsprechenden Förderprogrammen angerechnet werden können. Hier wird jeweils mit der rechnerischen Nutzungsdauer gerechnet.

Verbrauchsgebundene Kosten

Diese sind Energiekosten, Hilfsenergiekosten und Kosten für Betriebsstoffe. Hier werden insbesondere Kosten für den Strombedarf der Wärmepumpenanlagen und in der Vergleichsvariante Kosten für den Bezug des Erdgases angesetzt.

Betriebsgebundene Kosten:

Dies sind Wartungskosten. Für die Wartungskosten in den betriebsgebundenen Kosten ist der prozentuale Aufwand bezogen auf die Investition in Anlehnung an die VDI 2067 angegeben. Weiter werden Kosten für die Emissionsüberwachung von Kleinf Feuerungsanlagen angesetzt.

Sonstige Kosten

Hierunter fallen Kosten für Versicherung, Steuern, allgemeine Abgaben und Aufwendungen für die Verwaltung. Die sonstigen Kosten werden in den Betriebskosten verrechnet.

Rahmenbedingungen

Bestimmung kapitalgebundene Kosten

Allgemeiner Zinssatz	5 %
Abschreibungsdauer Heizcontainer	20 Jahre
Abschreibungsdauer BHKW-Anlagen	10 Jahre
Abschreibungsdauer Wärmepumpen	15 Jahre
Abschreibungsdauer Wärmetauscher (Systemtrenner)	10 Jahre
Abschreibungsdauer Wärmetauscher (weitere)	15 Jahre
Abschreibung Nahwärmenetz (Thermalwasser)	40 Jahre
Abschreibungsdauer Planung, Unvorhergesehenes	15 Jahre

Bestimmung verbrauchsgebundene Kosten

Arbeitspreis Erdgas	5,491 Ct/kWh _{Ho} o. MwSt. ¹
Grundpreis Erdgas	8.952 €/a o. MwSt.
Erdgassteuer (nach EnergieStG §2 Absatz 3)	0,55 Ct/kWh _{Ho}
Strom Arbeitspreis HT	8,72 Ct/kWh _{el} o. MwSt.
Strom Arbeitspreis NT	7,42 Ct/kWh _{el} o. MwSt.

Bestimmung betriebsgebundene Kosten

Wartung Wärmetauscher	siehe Kapitel 4
Wartung Wärmepumpe	jährlich 2 % der Nettoinvestition
Wartung BHKWs	2 bis 3 Ct/kWh _{el} je nach Größe ²
Emissionsüberwachung BHKWs (neu)	100 €/a zzgl. MwSt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die durchschnittlichen Investitionskosten für die Umsetzung der jeweiligen Maßnahmen dargestellt. Die Investitionskosten nach angeforderten Angeboten können niedriger und höher sein. Sie hängen vom jeweiligen Hersteller und dem gewählten Modell sowie von der Detailausführung in dem jeweiligen Gebäude ab.

Der für den Betrieb der BHKWs genutzte Brennstoff ist nach § 53 des Energiesteuergesetzes (2006; EnergieStG) von der Energiesteuer befreit. Praktisch heißt das, dass die mit dem Brennstoffbezug gezahlte Energiesteuer am Anfang des folgenden Jahres auf Antrag (Stichtag: 31. März) durch Antrag beim Zollamt erstattet wird.

¹ Arbeitspreis nach EVM-Erdgaspreismitteilung Juli 2008

² ASUE e.V. (2005): „BHKW-Kenndaten 2005“

Alle aufgeführten Beträge sind ohne die gesetzliche Mehrwertsteuer von derzeit 19 %.

Die abgeschätzten Investitionskosten sind inklusive der gesetzlichen Mehrwertsteuer (19 %) angegeben.

In der folgenden Tabelle folgt eine abgeschätzte Aufstellung der Kosten zur Einbindung der zusätzlichen Wärmeerzeuger in das bestehende Heizsystem der Römerthermen. Dargestellt sind die Varianten 1 bis 3. Der Ist-Zustand und die Basisvariante erfordern keine neuen Investitionen in die Wärmeerzeugung.

Tab. 14 – Investitionen

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
	WP	WP & BHKW	BHKW
Maschinentchnik Errichtung Fertiggarage als Heizhaus inkl. Abgasführung; Wärmepumpe mit wärmequellenseitiger Systemtrennung, ausgeführt als redundant installierter Plattenwärmeüberträger; Erneuerung Wärmeüberträger zur Beckenwassererhitzung; BHKWs und Einbindung in das bestehende Heizsystem	€ 113.000	173.000	109.000
Planung, Unvorhergesehenes Planung, Unvorhergesehenes (20%)	€ 23.000	34.000	22.000
Gesamtinvestition	€ 136.000	207.000	131.000

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Wärmeversorgungsvarianten ist in folgender Tabelle aufgeführt:

		Ist-Zustand	Basisvariante Referenz	Variante 1 WP	Variante 2 BHKW&WP	Variante 3 BHKW
Investition o. MwSt.	€	0	0	113.000	173.000	110.000
Förderung Wärmepumpe	€	0	0	9.100	9.100	0
Förderung BHKWs	€	0	0	0	12.450	15.195
Investitionskosten inkl. Zuschuss o. MwSt.	€	0	0	104.000	152.000	95.000
Kapitalkosten o. MwSt.	€/a	0	0	12.000	19.000	14.000
Verbrauchskosten o. MwSt.	€/a	285.000	265.000	227.000	243.000	285.000
Erlöse Stromerzeugung (-1) o. MwSt.	€/a	-51.000	-56.000	-56.000	-80.000	-106.000
Betriebskosten o. MwSt.	€/a	11.000	12.000	21.000	28.000	21.000
Jahresgesamtkosten o. MwSt.	€/a	245.000	221.000	204.000	210.000	214.000
Kapitalkosten inkl. Förderung und o. MwSt.	€/a	0	0	11.000	17.000	12.000
Verbrauchskosten o. MwSt.	€/a	285.000	265.000	227.000	243.000	285.000
Erlöse Stromerzeugung (-1) o. MwSt.	€/a	-51.000	-56.000	-56.000	-80.000	-106.000
Betriebskosten o. MwSt.	€/a	11.000	12.000	21.000	28.000	21.000
Jahresgesamtkosten inkl. Förderung und o. MwSt.	€/a	245.000	221.000	203.000	208.000	212.000
Jahreswärmebedarf	kWh _{th} /a	3.613.000	3.284.000	3.284.000	3.284.000	3.284.000
Wärmepreis inkl. Förderung und o. MwSt.	Ct/kWh_{th}	6,8	6,7	6,2	6,3	6,5

Tab. 15 - Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgungsvarianten

Alle betrachteten Varianten inkl. der Basisvariante weisen erwartungsgemäß günstigere Jahresgesamtkosten als der Ist-Zustand auf. Die Variante 3 weist höhere Jahresgesamtkosten als die anderen Varianten auf. Die Varianten 1 und 2 fallen als günstigste Varianten aus. Die beiden Varianten unterscheiden sich in der Installation eines zusätzlichen kleinen BHKWs (Variante 2) gegenüber einer Wärmepumpe (Variante 1).

Ein deutliches Optimierungspotential der Variante 3 würden wir durch die Untersuchung der Möglichkeit, mehr Strom selber zu nutzen, sehen.

Zu beachten bei den Ergebnissen der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist, dass für die bestehenden Anlagen nur Kosten im Betrieb (Verbrauchs- und Wartungskosten) einkalkuliert sind, da diese für alle betrachteten Varianten identisch sind. Das heißt, es sind weder Kapitalkosten für die laufenden Abschreibungen der Wärmeerzeuger noch für den möglichen Ersatz der bestehenden BHKWs und Heizkessel einkalkuliert.

Die derzeitigen Wärmegestehungskosten mit dem BHKW-Einsatz liegen (unter Ansetzen eines Wertes für den Strom im Durchschnitt³³ von 8,23 Ct/kWh_{el} o. MwSt.) bei 6,8 Ct/kWh_{th} (nur Betrachtung der Verbrauchskosten). Die Wärmegestehungskosten für das Referenzszenario liegen bei 6,7 Ct/kWh_{th}. Dagegen liegen die Kosten zur Erzeugung der Wärme mit der Wärmepumpe (Variante 1) bei etwa 6,2 Ct/kWh_{th}, unter Einsatz von BHKW und Wärmepumpe (Variante 2) bei 6,3 Ct/kWh_{th} und bei der Verwendung eines großen BHKWs (Variante 3) betragen die Wärmegestehungskosten 6,5 Ct/kWh_{th}.

Ohne Förderung durch das BAFA-Amt erhöhen sich die Wärmegestehungskosten bei der Wärmepumpen-Variante um 0,03 Ct/kWh_{th}, und bei den BHKW-Varianten um 0,06 Ct/kWh_{th}.

Die folgenden Abbildungen stellen einmal die Jahresgesamtkosten dar und einmal die Kosten und Erlöse der betrachteten Varianten gegenüber:

³³ Berechnung vgl. Kapitel 6, Tabelle 10

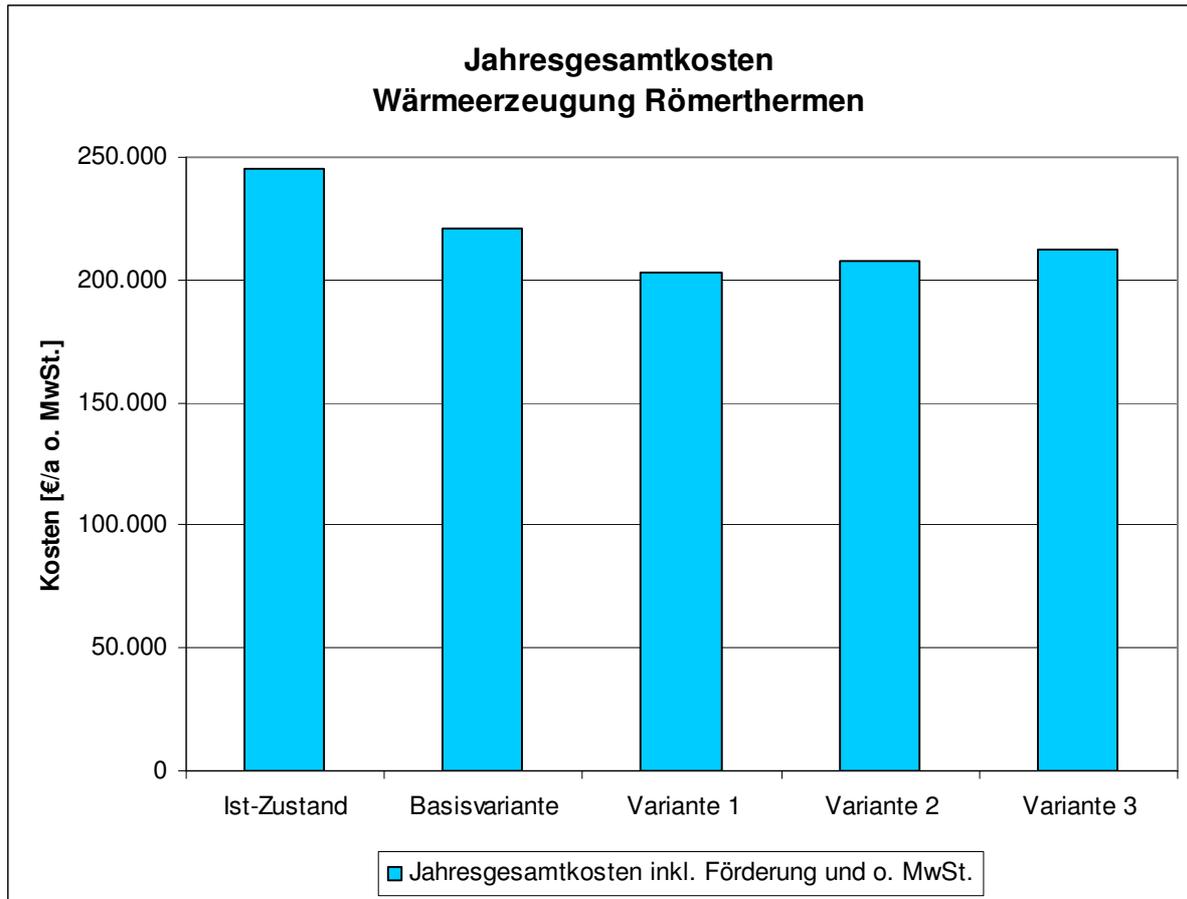


Abb. 12 – Wirtschaftlichkeit inkl. Förderung und o. MwSt.

Die Jahresgesamtkosten betragen für den IST-Zustand fast 245.000 €/a, mit einer Abdeckung im Referenzszenario belaufen sich die Jahreskosten auf etwa 221.000 €/a. Variante 3 verursacht Kosten in Höhe von ca. 212.000 €/a. In Variante 2 entstehen durch die Wärmepumpe und das BHKW entsprechend hohe Investitionskosten, weshalb Jahreskosten von etwa 208.000 €/a anfallen.

In der kostengünstigsten Variante 1 liegen die Jahreskosten bei ca. 203.000 €/a und damit 9% unter der Basis-Variante.

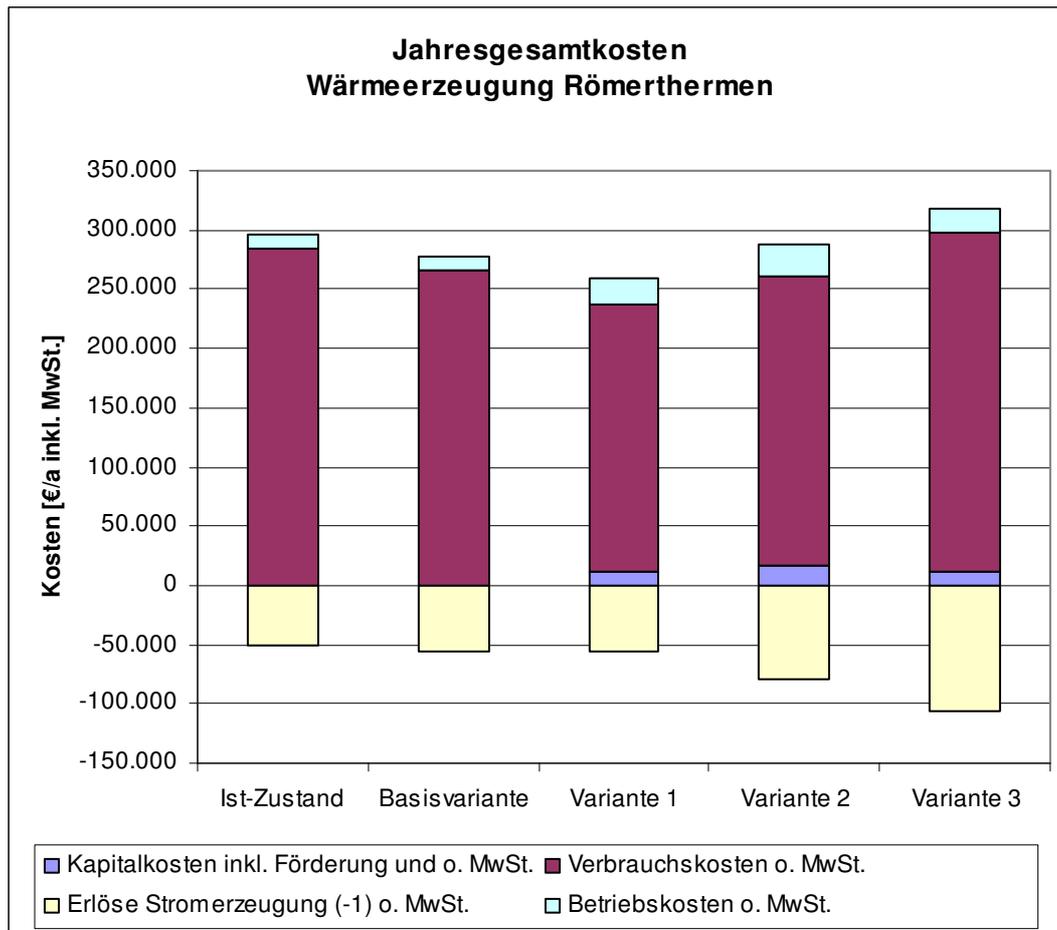


Abb. 13 – Wirtschaftlichkeit inkl. Förderung und o. MwSt.

In diesem Diagramm sind die Jahresgesamtkosten inklusive Förderung, aufgeschlüsselt auf die Kapital-, Verbrauchs- und Betriebskosten, den Erlösen durch Stromerzeugung gegenübergestellt.

Hier ist zu sehen, dass Variante 3 mit einem großen BHKW die höchsten Kosten erzeugt, aber durch die vermehrte elektrische Stromerzeugung auch die größeren Erlöse erwirtschaftet. Dennoch bleibt Variante 1 mit der Wärmepumpe, die wirtschaftlichste Variante.

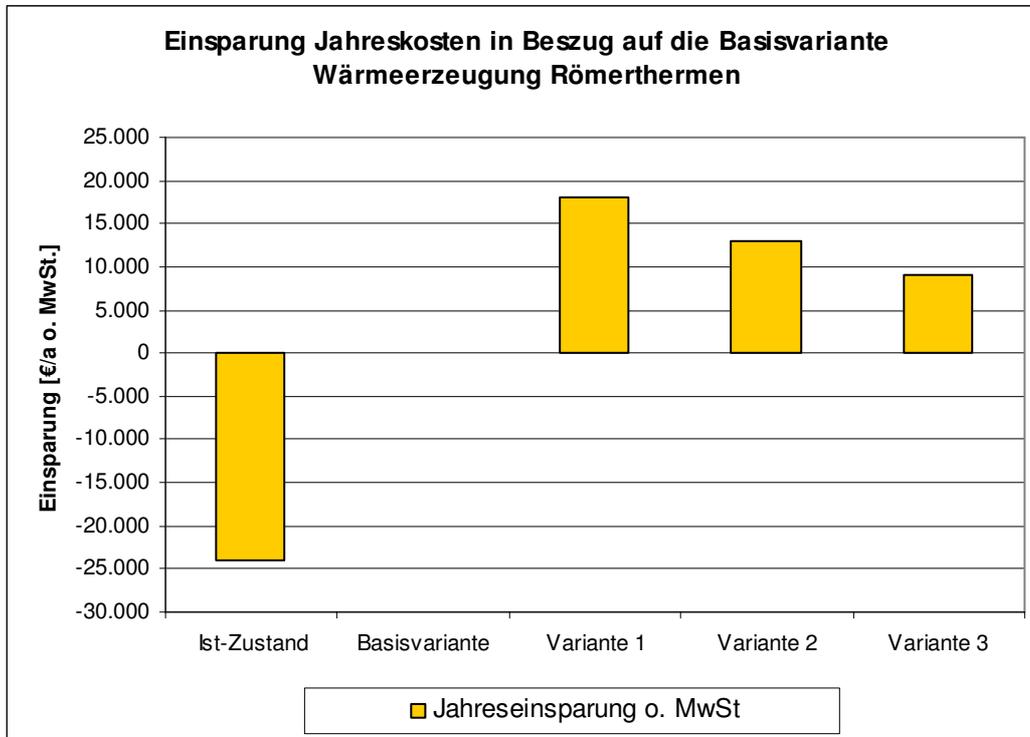


Abb. 14 – Einsparungen im Vergleich mit der Basisvariante

In diesem Diagramm wurden die Jahreskosten der verschiedenen Varianten mit der Basisvariante verglichen. Positive Zahlen stehen für eine Einsparung, negative Einsparungen stehen für höhere Jahreskosten gegenüber der Basisvariante.

Die IST-Variante verursacht demnach gegenüber der Basis-Variante etwa 24.000 €/a (11%) höhere Kosten. Die Variante 3 spart etwa 9.000 €/a (4%), die Variante 2 etwa 13.000 €/a (6%), am meisten kann mit der Variante 1 eingespart werden. Hier belaufen sich die jährlichen Einsparungen auf ca. 18.000 €/a (8%).

9 Zusammenfassung

Schwimm- und Freizeitbäder wie die Römerthermen, sind durch Ihre hohen, anwendungsbedingten Energieverbräuche in besonderem Maße von den steigenden Energiekosten betroffen. In dieser Machbarkeitsstudie wird untersucht, inwiefern sich Energiekosten durch Ertüchtigung der Wärmeenergie des Geiersprudels reduzieren lassen. Es wird die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Optimierung der Thermalwassernutzung zur Wärmebereitstellung betrachtet und abgeschätzt.

Weil es sich beim Geiersprudel um Thermalwasser handelt, welches mit bis zu 32°C und einem Volumen von etwa 70.000 l/h aus dem Geiersprudel strömt, stellt sich die Frage inwieweit diese Quelle zur Beheizung der Römerthermen genutzt werden kann. Die bisherige Verwendung beschränkt sich auf den hygienischen Frischwasseraustausch der großen Schwimm- und Thermalbecken.

Aus der IST-Analyse besteht ein Wärmebedarf von etwa 3.615.000 kWh/a für die Römerthermen. Davon werden in der IST-Variante übers Jahr gesehen etwa 1/3 mit den bestehenden BHKWs erzeugt. Die Grundlast beträgt nach unserer Einschätzung etwa 200 kW_{th}.

Etwa 50 % der Wärmemenge verteilt sich auf die Außenbecken, die Innenbecken benötigen ca. 22 %. Mit 15 % kann der Anteil für die Raumheizung (Radiatoren, Lüftung, Fußbodenheizung) angenommen werden und 13 % genügen zur Duschwassererwärmung.

Die Ermittlung des Potenzials ergibt, dass der Beckenüberlauf für eine Wärmenutzung zu gering ist. Das einzige im technischen Maßstab nutzbare Wärmepotenzial ist die Wärme des kompletten Volumenstromes des Geiersprudels. Die Wärme kann auf niederem Temperaturniveau mit einer Wärmepumpe auf ein Niveau angehoben werden, welches einen Beitrag zur Beheizung des Thermalbades leisten kann. Mit einer Wärmepumpe und einem Wärmetauscher als Systemtrenner könnte je Stufe bis 375 kW_{th} zu Heizzwecken bereitgestellt werden.

Diese Wärme steht aber nicht für alle Bereiche in den Römerthermen zur Verfügung, weil die Maximaltemperatur 55°C beträgt. Um eine hohe Betriebsdauer der Wärmepumpe zu erhalten ist ein Grundlastbetrieb für die Beckenwassererwärmung oder Fußbodenheizung anzustreben.

Aufgrund des Thermalwassers sollte die Wärmepumpe über Wärmetauscher von dem direkten Kontakt mit dem Thermalwasser getrennt werden. Die Probleme, die sich aus der Verwendung von Thermalwasser ergeben, verlagern sich so auf den Wärmetauscher, welcher redundant ausgeführt werden sollte. Laut Hersteller kann die Problematik der Korrosion mit dem Werkstoff Titan am besten begegnet werden, die der Inkrustation kann mit einer säurehaltigen Spülung gelöst werden. Beide Lösungen wirken sich zugleich auf die Wirtschaftlichkeit aus.

Aus einer Ermittlung des Lastgangs des Wärmebedarfs ergibt sich, dass für eine genügende Ausnutzungsdauer der Wärmepumpe sich eine Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 110 kW am besten eignet. Dieses ist die untersuchte Variante 1.

Die zweite Variante ergibt sich daraus, dass die elektrische Versorgungssituation unverändert bleiben soll. Zu der Wärmepumpe in Variante 1 gesellt sich ein BHKW dessen elektrische Leistung an den Bedarf der Wärmepumpe angepasst ist und diesen deckt.

In der Variante 3 wird die Wärmepumpe von einem größeren BHKW mit einer thermischen Leistung von 95 kW_{th} ersetzt. Diese Wärme auf hohem Temperaturniveau kann problemlos in das bestehende System eingebunden werden. Zugleich geht eine Vergrößerung dieses BHKWs mit einer unwirtschaftlichen Minderung der Ausnutzungsdauer einher. Das KWKG 2009 regelt eine an der Leistung gestaffelten Zusatzvergütung für BHKWs, bis zu dem Bereich von < 50kW_{el} ist die Vergütung maximal.

Daneben besteht eine IST-Variante, welche dem aktuellen Zustand der Römerthermen entspricht. Diese Varianten werden jeweils verglichen mit der Basis-Variante. In der Basis-Variante wird von einer unveränderten Technik zur Wärmebereitstellung ausgegangen, jedoch wird das große Becken außerhalb der Öffnungszeiten abgedeckt. Diese Abdeckung findet ebenfalls in den Varianten 1-3 Anwendung.

Alle Varianten	bestehende Erdgaskessel bestehende Blockheizkraftwerke
Variante 1	110 kW _{th} Wärmepumpe mit Wärmequelle Thermalwasser
Variante 2	110 kW _{th} Wärmepumpe mit Wärmequelle Thermalwasser angetrieben durch 20 kW _{el} / 45 kW _{th} BHKW
Variante 3	BHKW 50 kW _{el} / 95 kW _{th}

Mit einer Beckenabdeckung kann der Wärmebedarf der Römerthermen auf etwa 3.300.000 kWh/a reduziert werden.

Daraus ergeben sich in der Emissionsbilanz geringere Emissionen bezogen auf CO₂-Äquivalent, NO_x und Staub. Bezüglich der Emission an CO₂-Äquivalenten können Einsparungen in der Höhe von etwa 15 % bis 20 % erreicht werden. Die Emission von NO_x kann durch Umsetzung jeder einzelnen Variante verringert werden. Da bei der Verbrennung von Erdgas in den BHKWs zur Strom- und Wärmeerzeugung geringere Massen von Staub entstehen als im Rahmen des durchschnittlichen Kraftwerksparks, ergeben sich bilanziell auch negative Staubemissionen. Dadurch entstehen Vorteile der Varianten mit zusätzlichem BHKW gegenüber den Varianten mit Wärmepumpe.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgt in Anlehnung an die VDI 2067. Die Investitions-, Verbrauchs- und Betriebskosten werden ermittelt, wobei die vorhandene Anlagentechnik nicht in Bezug auf Investitionskosten untersucht wird, weil sie ohnehin für jede Variante bestehen bleiben.

Zu den Kosten werden Förderungen angerechnet und Erlöse aus der Stromproduktion der BHKWs zugerechnet.

Die Investitionskosten für die Variante 1 betragen etwa 104.000 €, für die Variante 2 etwa 152.000 €, Variante 3 verursacht die geringsten Investitionskosten mit ca. 95.000 €.

Nachfolgende Tabelle gibt die Wärmegestehungskosten der unterschiedlichen Varianten an:

	Ist-Zustand	Basis-Variante	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Wärmepreis inkl. Förderung und o. MwSt. Ct/kWh _{th}	6,80	6,70	6,20	6,30	6,50

Die Basisvariante verursacht Jahreskosten von etwa 221.000 €. In Bezug auf diese Basisvariante, verursacht die IST-Variante etwa 24.000 €/a höhere Kosten. Die Variante 3 spart etwa 9.000 €/a, die Variante 2 etwa 13.000 €/a, am meisten kann mit der Variante 3 eingespart werden. Hier belaufen sich die jährlichen Einsparungen auf ca. 18.000 €/a, die einer Reduzierung um 6% entsprechen.

Empfehlung

Die Variante mit der einfachsten Umsetzbarkeit ist Variante 3 mit einem großen BHKW. Der Vorteil besteht zum einen darin, dass es sich um eine Technik handelt, für die sich die Umbauarbeiten auf ein Minimum reduzieren, zum anderen ist das nutzbare Temperaturniveau hoch, so dass es problemlos in der bestehenden Heizungsanlage genutzt werden kann. Die Aufstellung kann wie bei den bestehenden BHKWs in einem Außencontainer erfolgen.

Für die Wärmepumpenvarianten sind umfangreiche bauliche Maßnahmen erforderlich. Zudem muss das Heizsystem an die beschränkte Temperatur angepasst werden. Das größte Problem und damit mehr Unvorhersehbarkeit stellen jedoch die Korrosion und Inkrustation des Thermalwassers in den Wärmetauschern dar. Seitens der Hersteller war keine klare Aussage diesbezüglich zu erhalten. Wir gehen davon aus, dass die Wartungskosten einen nicht unerheblichen Betrag pro Jahr erfordern (ca. 9.000 €/a), es wird empfohlen einen Versuchstand aufzubauen um die Eignung von Plattenwärmetauschern zu prüfen.

Aus ökologischer Sicht, sind die untersuchten Varianten vergleichbar. Eine wesentliche Verbesserung in Bezug auf Staubemissionen stellen die BHKW-Varianten dar, weil sie den durchschnittlich „staubhaltigeren“ Strom aus der Stromerzeugung verdrängen.

Wirtschaftlich ist unter den getroffenen Annahmen die Variante 1 mit der Wärmepumpe als beste Variante hervorgegangen. Die Jahreskosten betragen hier etwa 203.000 €/a. Die Variante 2 verursacht um 3% gestiegene Jahreskosten (+5.000 €), Variante 3 verursacht um 5% (+ 9.000 €) gestiegene Jahreskosten. Nicht berücksichtigt sind hier Schwankungen des Gas- oder Strompreises.

Die Änderungen der Energiepreise beeinflusst das wirtschaftliche Ergebnis sensibel. Beispielsweise schon bei gering steigenden Strompreisen und/oder sinkenden Gaspreisen verschiebt sich die Wirtschaftlichkeit in Richtung der BHKW-Variante.

Die Nutzung der Thermalwasserwärme aus dem Geiersprudel ist technisch möglich, aber begleitet von einer Reihe von ungünstigen Faktoren. Im wirtschaftlichen Vergleich ist die Nutzung der Thermalwasserwärme mit einer Wärmepumpe die erste Wahl, ökologisch ist eine Variante mit einem Erdgas-BHKW besser

Wir empfehlen zur Umsetzung dennoch die Variante 3 mit einem großen BHKW mit einer thermischen Leistung von $95 \text{ kW}_{\text{th}}$ und einer elektrischen Leistung von $50 \text{ kW}_{\text{el}}$, weil die Installation einfacher gestalten und der besonders, weil sich der Umfang der Wartungsarbeiten an den Wärmetauschern im Thermalwasserkreis nicht genau bestimmen lassen.

Zu der Variante 3 sehen wir zudem ein Optimierungspotenzial, welches im Besonderen von der Deckung der Heizwärme und des elektrischen Bedarfs ausgeht. Die vorgeschlagene Größe des BHKWs ergibt sich aus dem nutzbaren Grundlastbedarf der Römerthermen. Änderungen in der Art eines Mehr-, oder Minderbedarfs wirken sich auf die Laufzeit bzw. die Größe des BHKWs aus. Die $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ sind als Größe angestrebt, weil hier die Vergütung maximal ist.

10 Literaturangaben

- [1: BMVBS] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichskennwerte im Nichtwohngebäudebestand, 26.07.2007
- [2: KUBESSA] Energiekennwerte – Handbuch für Beratung, Planung, Betrieb. ZukunftsAgentur Brandenburg GmbH (1998)
- [3: RECKNAGEL] Recknagel, Sprenger, Schramek; Taschenbuch für Heizung, Klima und Sanitär; 71. Auflage 03/04, Oldenbourg Industrieverlag
- [4: IST-GmbH] SW-Simu: Software zur Simulation des Wärmebedarfs von Freibädern (IST-Energietechnik GmbH), Version 3.04