

Abschlussbericht

zum Teilvorhaben der Geodynardo GmbH

Modellierung, Kalibrierung, Potentialoptimierung der Wärmeerzeugung aus Speläothermie

Innerhalb des Verbundprojektes SPELÄOTHERMIE – Thermische Nutzung von Hohlräumen und Kelleranlagen für die Wärmenutzung von Gebäuden im Förderprogramm Thüringen Verbund Dynamisch mit der Verbund-ID 1002414.

Zusammenfassung

Im Förderprojekt konnte erfolgreich eine Parametrik der Geometrien untersuchter Hohlräume (ehemalige Bierkeller, Keller und Höhlen) entwickelt werden, welche es erlaubt, mögliche geometrische Abmessungen auf das Potential der Wärmeerzeugung mittels Luftwärmepumpen zu untersuchen. Mittels Metamodellierung im definierten Variationsraum möglicher Geometrien und weiterer Variationen standortabhängiger Parameter konnte die Potentialabschätzung prototypenhaft als Webservice bereitgestellt werden. Dabei wurden mittels Optimierung der Stromkostenvorteil eines Betriebes der Wärmepumpe im Hohlraum gegenüber einem Betrieb an der Oberfläche optimiert und das dazugehörigen wirtschaftliche Potential der Wärmeerzeugung ausgewiesen.

Geht man davon aus, dass Jahreswärmeleistungen >20 MWh notwendig sind, um für ein modernes Einfamilienhaus die Wärmeversorgung zu sichern, zeigten von den untersuchten Objekten nur ehemalige Brauereikeller (Weimar Humboldtstraße und Ehringsdorf) und eine Höhle des Stufensandabbaus in Jena Dornheim mit Oberflächen jeweils größer als 1000 m² ausreichendes Potential für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Wärmepumpe im Hohlraum.

Für gedrungene Geometrien, wie die Bierkeller in Weimar Humboldtstraße (Bild 2, Summe Oberflächen 2200 m²) konnte mittels einer 24kW Wärmepumpe ein Einsparpotenziale der Stromkosten von 12% (383 €) bei Bereitstellung von 50M Wh Jahreswärmeleistung ermittelt werden. Das entspricht einer Jahresentzugsleistung von ca. 23 kW pro m² Oberfläche im Hohlraum.

Für langgestreckte Geometrien, wie die Bierkeller in Weimar Ehringsdorf (Bild 3, Summe Oberflächen 7.800 m²) konnte mittels einer 100kW Wärmepumpe ein Einsparpotenziale der Stromkosten von 16% (2.162 €) bei Bereitstellung von 220 MWh Jahreswärmeleistung ermittelt werden. Das entspricht einer Jahresentzugsleistung von ca. 29 kW pro m² Oberfläche im Hohlraum.

In der Höhle des Stufensandabbaus in Jena Dornheim (Bild 4, Summe Oberflächen 2.300 m²) konnte mittels einer 24kW Wärmepumpe ein Einsparpotenziale der Stromkosten von 13% (470 €) bei Bereitstellung von 59 MWh Jahreswärmeleistung ermittelt werden. Das entspricht einer Jahresentzugsleistung von ca. 29 kW pro m² Oberfläche im Hohlraum.

Für eine erste grobe Potentialabschätzung kann für Hohlräume ab 500 m² Oberfläche die mittels Luftwärmepumpen wirtschaftlich vorteilhaft adressierbare Jahreswärmemenge mit 30 kW/m² angenommen werden. Wird z.B. für ein Einfamilienhaus eine Jahreswärmemenge von 30 MWh benötigt, sollte der Hohlraum zum Betrieb der Wärmepumpe eine Oberfläche zum Wärmeentzug aus dem Untergrund von 1000 m² besitzen.

Im Rahmen des Teilprojektes der Geodynardo GmbH wurden 3 Arbeitspakete bearbeitet. Die wesentlichen Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete werden im Folgenden dargestellt.

Arbeitspaket 5: Modellierung, Kalkulation und Ermittlung des Potenzials der Wärmeerzeugung

Im AP5 wird eine parametrische Beschreibung der Geometrie der Hohlräume zur automatisierten Generierung entwickelt. Die parametrische Modellierung des Hohlraumes im Untergrund wird in Ansys Programming Design Language (APDL) umgesetzt. Die thermische und energetische Nutzung wird dem FEM Programm Ansys Mechanical simuliert und an den Messungen kalibriert.

Parametrische Beschreibung der Geometrie der Hohlräume und Kelleranlagen

Im Projekt wurden vom Projektpartner Jena-Geos Hohlräume und Kelleranlagen mittels Laserscan Technologie geometrisch aufgenommen. Dabei sind für die Potentialberechnungen der Wärmeerzeugung Insbesondere die **Oberflächen** der Hohlräume und Keller als maßgebende Wärmetauscher Fläche wichtig.

Um in der Folge geometrische Variation im Vorfeld untersuchen zu können und Metamodelle der geometrischen Variation zu generieren, wurde eine geometrische Parametrik abgeleitet, welche den Variationsraum der untersuchten Hohlräume und Keller abdecken kann. Weil die vermessenen Hohlräume in der Regel Gewölbetonnen, bzw. Höhlen mit Gewölbe und Fußboden hatten, wurde die Parametrik eines Zylindersegmentes gewählt.

Zylinder-Segment berechnen

Eingabe

Einträge löschen

Radius	r	5
Höhe	h	7
Länge	l	10
Dezimalstellen	2	Rechnen

Resultate		
Breite	s	9,17
Bogenlänge	b	19,82
Oberfläche	A	407,33
Mantelfläche	L	198,23
Seitenfläche	S	58,72
Volumen	V	587,23

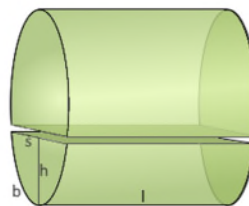


Bild 1: Parametrik eines Zylindersegmentes

Bild 1 dokumentiert die gewählte Parametrik mit den Freiwerten Radius der Gewölbetonne, Länge der Gewölbetonne und Höhe der Gewölbetonne vom Fussboden bis zum Scheitel. Das Zylindersegment wird im Geometriemodell des umgebenden Felsen so platziert, dass die vorhandene Überdeckung (Abstand Scheitel Gewölbetonne) bis zur Oberfläche Gelände eingestellt wird.

Weil in den Nachrechnungen des Wärmeentzuges aus Hohlräumen zu beobachten war, dass schlanke Höhlen (z.B. Bild 2, Bild 5) gegenüber gedrunenen Höhlen (z.B. Bild 3, Bild 7) bei gleicher Oberfläche mehr Energie aus dem Gebirge aufnehmen, wurden die Längen der Haupthöhlen aus den Scans abgeschätzt und als Parameter festgelegt.

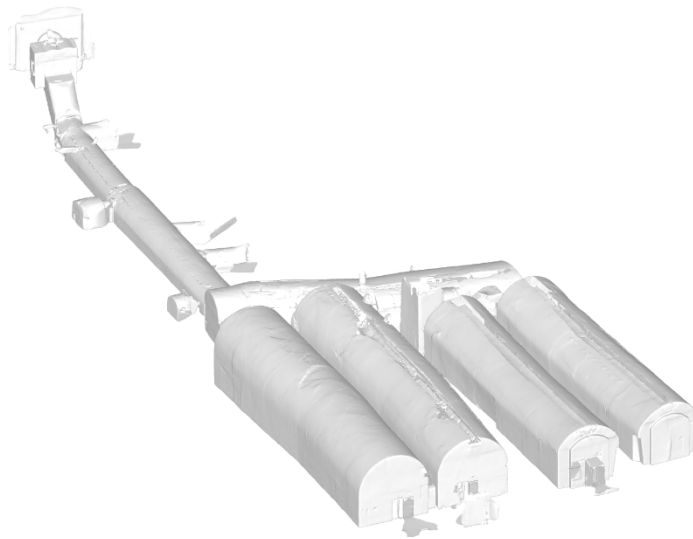


Bild 2: Vermessung der Bierkeller in Weimar Ehringsdorf (Länge Hauptgewölbetonnen= $3 \cdot 26 + 2 \cdot 29 + 33 = 169$ m, Oberfläche 7800 m²)

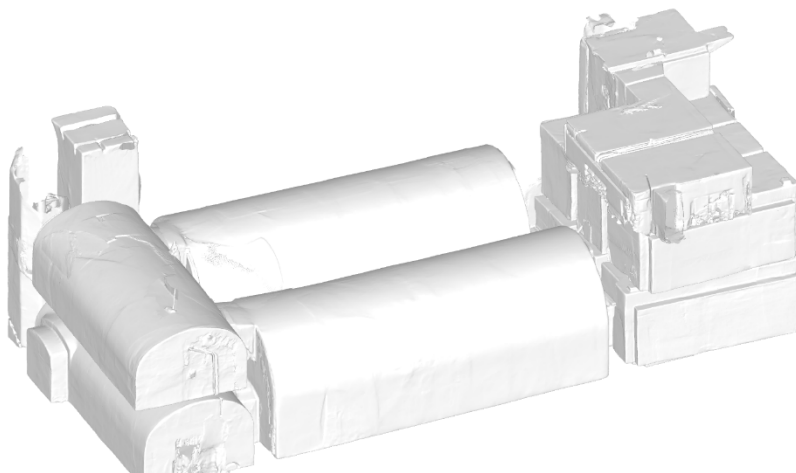


Bild 3: Vermessung der Bierkeller in Weimar Humboldtstraße (Länge Hauptgewölbetonnen= $2 \cdot 15 + 3 \cdot 11.5 = 64.5$ m, Oberfläche 2200 m²)

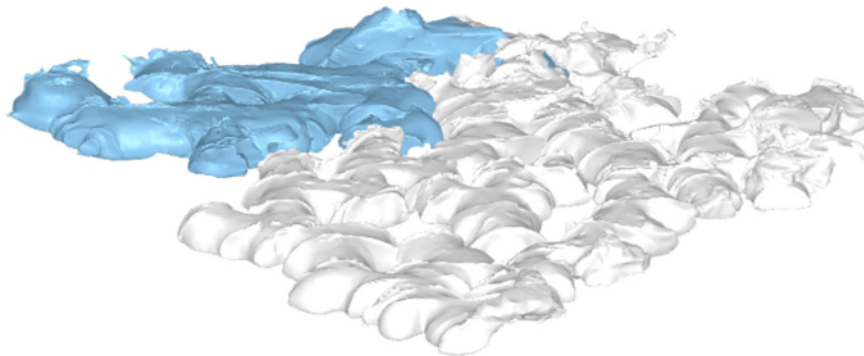


Bild 4: Vermessung der Hohlräume des Stufensandabbaus in Jena Dornheim (Länge Hauptgewölbetonnen= 90 m, Oberfläche 2300 m²)



Bild 5: Vermessung der Hohlräume de Garküche Leutenberg (Länge Hauptgewölbetonnen=25 m, Oberfläche 316 m²)



Bild 6: Vermessung der Gewölbetonne Sonneberg Biergarten (Länge Hauptgewölbetonnen=10 m, Oberfläche 160 m²)

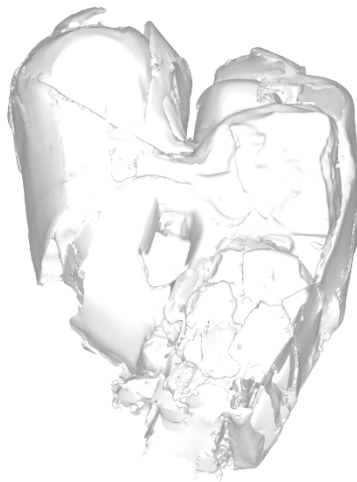


Bild 7: Vermessung der Hohlräume Großeuterdorf (Länge Hauptgewölbetonnen= 6.5+5.5=12 m, Oberfläche 219 m²)

Damit verbleiben 2 Freiwerte, der Radius und die Scheitelhöhe der Gewölbetonnen um die vermessenen Oberflächen an den vermessenen Hohlräumen zu fitten.

Weil die Oberflächen für den Energieaustausch aus dem Gebirge maßgebend sind, wurde die Nebenbedingung eingeführt, dass keine idealisierten Tonnen größere Oberflächen als vermessen aufweisen dürfen.

Bei Ehringsdorf, Jena Dornheim, Sonneberg Baudler und Großeutersdorf gibt es Oberflächen deren Energieaustauschrichtungen sich kreuzen und somit gegenseitig beeinflussen. In diesen Hohlräumen wurde das Volumen abgeglichen und kleinere Oberflächen erzeugt.

Bei Stradtroda, Tröbnitz, Sonneberg Biergarten und Weimar Humboldtstraße wurde die Oberfläche bevorzugt gefittet und dabei Abweichungen im Volumen in Kauf genommen.

Bild 8 dokumentiert den Fit der gewählten Geometrieparametrik unter den oben ausgeführten Randbedingungen an den vermessenen Oberflächen der Hohlräume. Es kann festgestellt werden, dass die gewählte Parametrik ausreichend flexibel ist, um die Oberflächen unter den gewählten Randbedingungen in sehr guter Näherung zu repräsentieren.

	Weimar Humboldtstrasse	Ehringsdorf Brauerei	Jena Dornheim	Sonneberg Baudler	Sonneberg Biergarten	Großeutersdorf	Leutenberg Garküche	Stradtroda Fam. Mädel	Tröbnitz, Kinderarche
Radius (r)	14,420	22,950	11,460	2,700	3,590	3,300	3,145	4,700	4,250
Länge (l)	64,500	169,000	90,000	11,000	10,000	12,000	25,000	5,000	5,500
Scheitelhöhe (h)	2,428	2,708	1,433	1,499	1,939	1,247	1,573	1,739	1,785
Oberfläche (A)	2.181,198	7.541,064	2.062,580	129,474	159,856	142,239	313,004	95,966	99,918
Volumen (V)	1.702,828	6.681,725	966,307	57,024	88,201	53,901	151,873	44,179	47,644
Schätzung Länge Hauptgewölbe	64,5	169	90	11	10	12	25	5	5,5
Oberfläche A Messung	2.183,000	7.801,000	2.307,000	171,000	160,000	219,000	316,000	96,000	100,000
Volumen V Messung	1.974,000	6.676,000	965,000	57,000	110,000	54,000	152,000	25,000	30,000
%tuelle Abweichung V	-13,74%	0,09%	0,14%	0,04%	-19,82%	-0,18%	-0,08%	76,71%	58,81%
%tuelle Abweichung A	-0,08%	-3,33%	-10,59%	-24,28%	-0,09%	-35,05%	-0,95%	-0,04%	-0,08%

Bild 8: Fit der Geometrieparametrik zu den vermessenen Hohlräumen

Annahmen zu den Berechnungen zum Potential der Wärmeerzeugung aus Speläothermie

Maßgebliches Phänomen der Berechnung zum Potential der Wärmeerzeugung ist die Wärmeleitung im Gestein/Boden sowie der Wärmeeintrag/-abfluss im Luftvolumen des Hohlraumes durch den Betrieb der Wärmepumpe. Wärmezufuhr oder Wärmeabgang durch Belüftung der Hohlräume wird in den folgenden Rechnungen vernachlässigt.

Zur transienten thermischen Berechnung wird das FEM Programm Ansys Mechanical verwendet. In der thermischen Berechnung wird ausschließlich Wärmeleitung berücksichtigt. Es wird keine explizite Luftströmungsberechnung im Hohlraum durchgeführt. Zur Berechnung des Wärmezufuhr (WP heizt die Luft auf) oder des Wärmeabfluss (WP kühlt die Luft ab) wird im Hohlraumvolumen eine über das Luftvolumen gleichmäßig verteilte Wärme- oder Kältequelle modelliert. Für den Übergang der Wärme/Kälte in den Untergrund wird ein stoffschlüssiger Verbund des Luftvolumens zum Felsvolumen angenommen. Damit sind die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität des Gesteins und der Luft im Hohlraum die entscheidenden Materialparameter der Berechnung. Standortabhängige Werte für die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der anstehenden Felsgesteine wird aus den Abschätzungen des Projektpartners Jena-Geos entnommen (Bild 9). Als wichtigste Ergebnisgrößen werden die maximale und mittlere Temperaturdifferenz im Luftvolumen ausgewertet.

Unter den gewählten Modellierungsannahmen des stoffschlüssigen Verbundes von Luft- und Felsvolumen und der ausschließlichen Modellierung der Wärmeleitung ist der wichtigste Parameter zum Abgleich der Versuchsergebnisse die (von der Luftzirkulation abhängige) Wärmeleitfähigkeit der Luft im Hohlraum.

Klassifizierung geeigneter Strukturen

Nr.	Bezeichnung	Wände	Gestein		Nutzung	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]		Volumenbezogene spez. Wärmekapazität $\rho \cdot C_p$ [MJ/(m³K)]	Dichte ρ [kg/m³]	Bemerkung
			Stratigraphie	Lithologie		Wertebereich	empfohlener Rechenwert			
1	Weimar, Humboldtstraße	gemauert	kmGr	Ton (Kalkstein)	Partykeller, Wärmetausch	1,1-3,1 (2,0-3,9)	1,8 (2,7)	2,0-2,8 (2,1-2,4)	2,0-2,2 (2,4-2,7)	ehem. Eiskeller mit Kalkstein ausgemauert
2.1	Ehringsdorf, Brauerei Teil 1									
2.2	Ehringsdorf, Brauerei Teil 2	gemauert	qsTr	Kalkstein	keine Nutzung	2,0-3,9	2,7	2,1-2,4	2,4-2,7	ehem. Bierkeller
2	Ehringsdorf, Brauerei gesamt									
3	Jena, Dornheim	natürlich	smS	Sandstein	Lagerraum	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6	2,2-2,7	Stubensandsteinabbau
4	Sonneberg, Sputnik Biergarten	gemauert	cuZW1	Tonschiefer	Lagerraum	1,5-2,6	2,1	2,2-2,58	2,4-2,7	Lagerkeller
5	Sonneberg, Baudler	gemauert	cuZW1	Tonschiefer	Wasserreservoir (hinten)	1,5-2,6	2,1	2,2-2,58	2,4-2,7	ehem. Fasslager
6	Großbeutersdorf, Dorfstraße 20	natürlich	smVS	Sandstein	keine Nutzung	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6	2,2-2,7	in Nutzung
7	Tröbnitz, Kinderarche	gemauert	smVS	Sandstein	Mülltonnenlager	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6	2,2-2,7	in Nutzung
8	Stadtroda, Mädels	natürlich	smVS	Sandstein	Abstellkammer	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6	2,2-2,7	in Nutzung
9	Leutenberg, Garküche	natürlich	cuR	Siltschiefer	Gästestollen	1,5-2,6	2,1	2,2-2,58	2,4-2,7	in Nutzung
10	Großbeutersdorf, Krypta	natürlich	smVS	Sandstein	Lagerraum	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6	2,2-2,7	in Nutzung
11	Großbeutersdorf, Luftschutzkeller	natürlich	smVS	Sandstein	Lagerraum	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6	2,2-2,7	in Nutzung
12	Jena, Schott	natürlich	smS	Sandstein	Lagerraum	1,9-4,6	2,8	1,8-2,6	2,2-2,7	ungenutzt

25.10.2024

JENA-GEOS-INGENIEURBÜRO GMBH - SPELÄOTHERMIE ZWISCHENBERICHT TAB

10

Bild 9: Kennwerte zu den untersuchten Standorten

Nachrechnung Kühlversuch Kammer Dornheim

In der Höhle Dornheim wurde eine Kammer für einen Kühlversuch abgetrennt (Oberfläche 40 m²). Es wurde ein Kühlversuch (3 Stunden Betrieb einer Microwärmepumpe mit durchschnittlich 250 W Leistung) nachgerechnet. Die initiale Temperatur wurde mit 13,3°C vermessen.

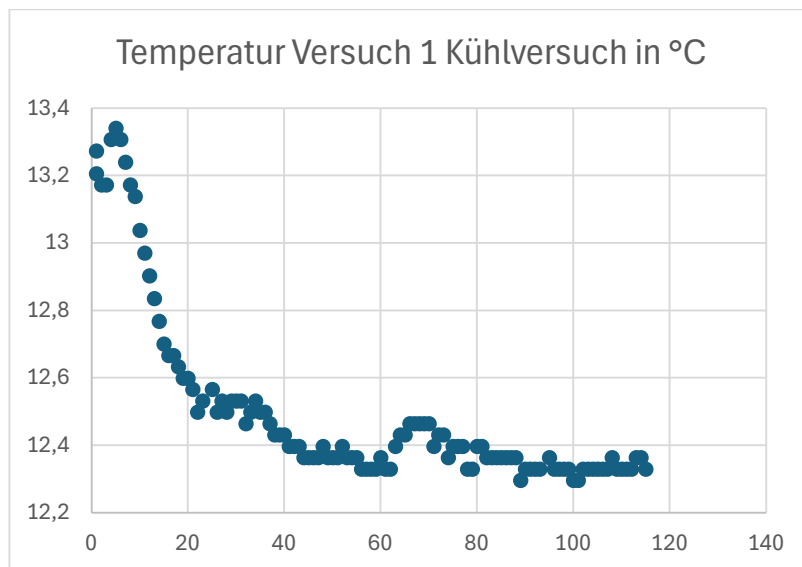


Bild 10: Temperaturverlauf Kühlversuch

Bild 10 zeigt den Verlauf Messung. Die Raumluft in der Kammer kühlte sich dabei in der Mitte der Kammer um ca. 1 °C ab.

Die Kammer wurde idealisiert mit einer Oberfläche von 40m² mit einer Überdeckung von 7 m modelliert. Es wurden die standortspezifischen Kennwerte für den Fels nach Bild 9 verwendet. Mittels einer identifizierten Wärmeleitfähigkeit der Luft von 2 W/m/K konnte der Temperaturverlauf in guter Näherung nachgerechnet werden. Die Luft im Zentrum der Kammer kühlt sich in der Nachrechnung um 1°C ab (Bild 11).

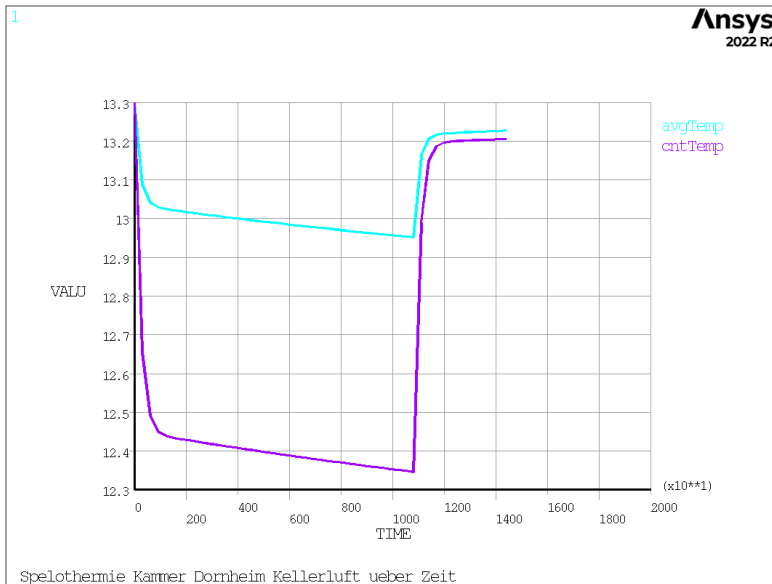


Bild 11: Temperaturverlauf 3 Stunden Kühlen und 1 Stunde Regeneration

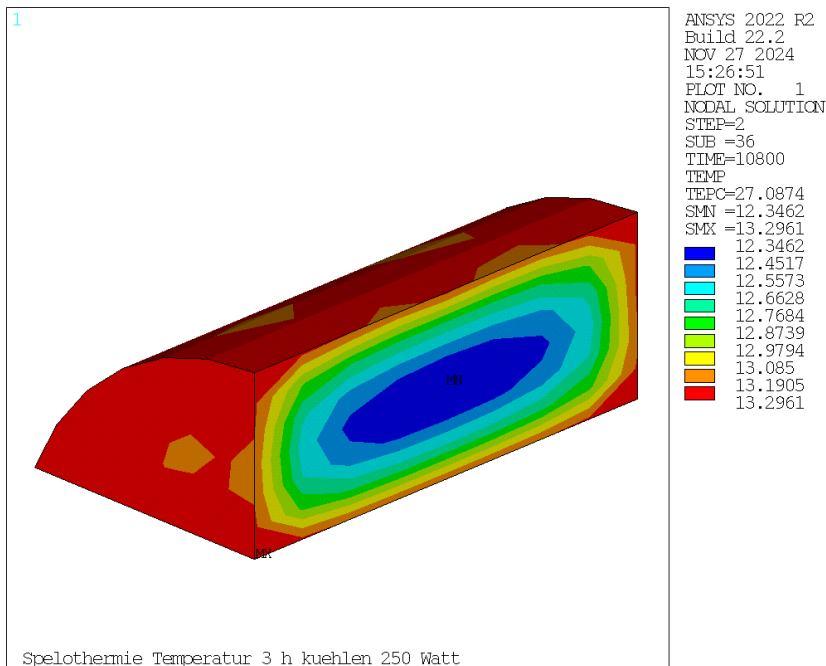


Bild 12: Temperaturverteilung im Luftvolumen nach 3 Stunden Kühlen

Nachrechnung Heizversuch Kammer Dornheim

Weil die Wärmeableitung der Wärmepumpe bei höheren Leistungen aus der Höhle zu aufwändig war, wurde für weitere Versuche ein Heißlüfter mit einer Leistung von 2kW. Für die Kammer Dornheim wurde der Heizversuch (Betrieb Heizer mit durchschnittlich 2000 W Leistung) nachgerechnet. Die initiale Temperatur wurde mit 13.5°C angenommen. Die Raumluft in der Kammer erhöht sich dabei maximal um ca. 8 °C auf 21.5 °C (Bild 13).

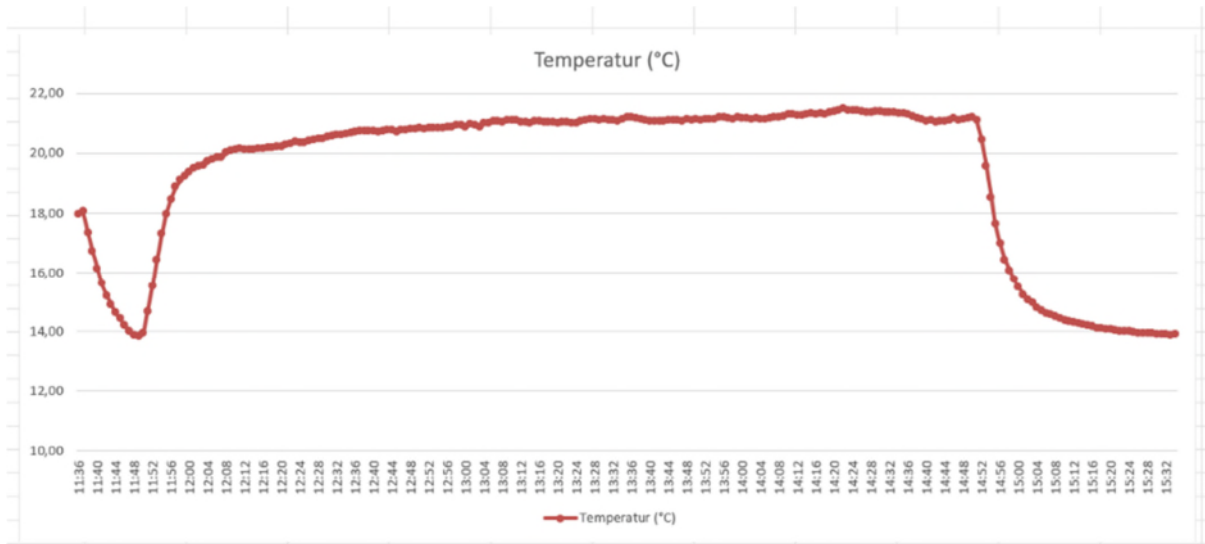


Bild 13: Temperaturverlauf Heizversuch

Mittels der im Kühlversuch identifizierten Wärmeleitfähigkeit der Luft von 2 W/m/K konnte der Temperaturverlauf wiederum in sehr guter Näherung nachgerechnet werden (Bild 14). Die Luft im Zentrum der Kammer heizt sich in der Nachrechnung auf 21°C auf (Bild 15).

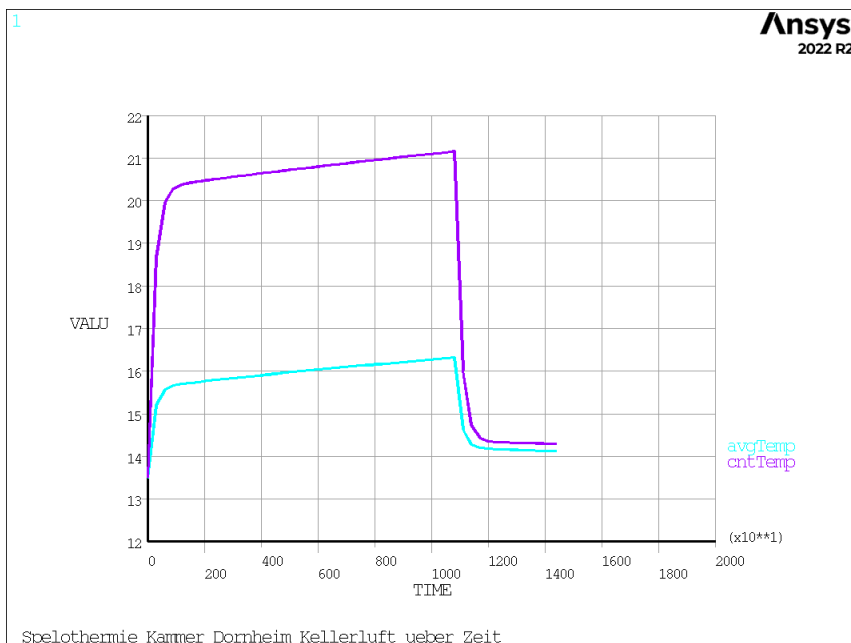


Bild 14: Temperaturverlauf 3 Stunden Heizen und 1 Stunde Regeneration

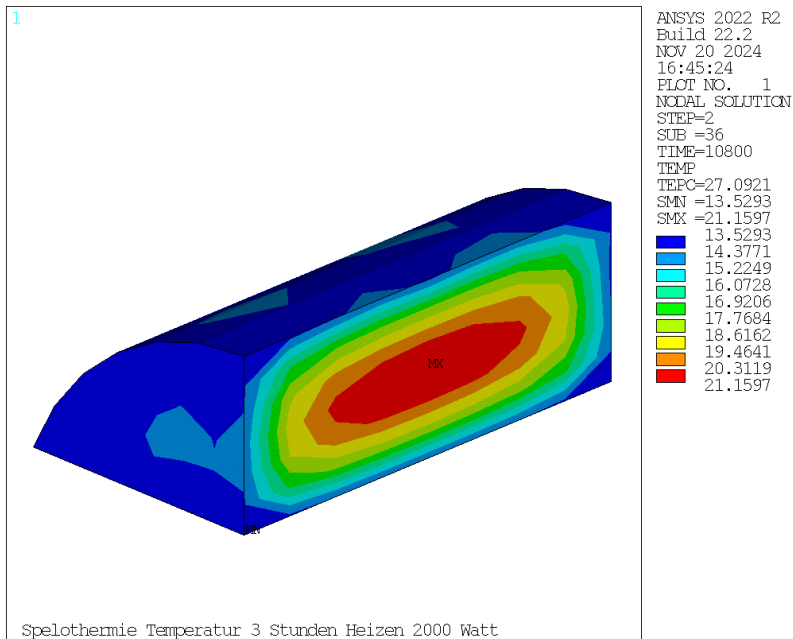


Bild 15: Temperaturverteilung im Luftvolumen nach 3 Stunden Heizen

Nachrechnung Langzeitheizversuch Garküche Leutenberg.

In der Garküche Leutenberg wurde vom Betreiber ein Langzeitheizversuch durchgeführt. Es wurden 2 Heißluftgebläse von je 18kW Leistung im vorderen und hinteren Bereich des Hohlraumes platziert und 43,5 h betrieben.

Temperatur Grotte Garküche in Grad C					
Bemerkungen	Datum / Uhrzeit 2024	Innenseite Glas- Tür vorn MP 1	1.Felsbogen linke Seite MP 2	Letzte Kammer rechte Seite MP 3	Letzte Kammer Rückwand , unten MP 4
Beginn Heizung	15.01. / 13.30	11,3	9,7	10,1	12,7
2 Heißluftgebläse mit	21.00	24,8	18,7	23,6	22,9
je 18 KW	16.01. / 11.30	29,0	26,2	28,0	27,2
nach 43,5 h Ende Heizung	17.01. / 09.00	29,7	27,3	32,0	33,0
Gesteinsoberfläche 27,0	10.15	22,3	20,1	24,2	26,2
	11.30	20,8	19,2	22,8	24,8
	18.00	18,8	16,6	19,8	21,4
21,8	18.01. / 12.00	16,9	14,1	17,1	19,0
21,4	18.00	16,9	13,5	16,6	18,5
19,1	19.01. / 12.00	15,9	13,2	15,2	17,5
17,5	20.01. / 12.00	15,1	10,9	14,0	16,7
	21.01. / 15.00	14,7	10,3	13,6	16,1
16,5	22.01. / 15.00	13,9	9,8	13,2	15,7

Bild 16: Protokoll Langzeitmessung Grotte Garküche Leutenberg

Die Raumluft wurde an 4 Positionen (Innenseite Eingangstür, Erster Felsbogen, hintere Kammer unten und mittig) gemessen. Danach wurde die Relaxation der Lufttemperaturen über 5 Tage aufgenommen. Die durchschnittliche Ausgangstemperatur der 4 Positionen betrug 11°C.

Die 4 Messpunkte zeigen deutlich, dass es nach einem sprunghaften Anstieg der Lufttemperatur bei zu Beginn (nach 7.5 h um ca. 13°C) eine weitere kontinuierliche Erwärmung der Höhle über den Heizversuch gibt (ca. 5 °C pro Tag). Die Raumluft erwärmt sich nach 43,5 Stunden Betrieb um ca. 22°C auf maximal 33°C.

Der Hohlraum Garküche Leutenberg wurde mittels der geometrischen Parameter nach Bild 8 mit einer Überdeckung von 12 m modelliert. Es wurden die standortspezifischen Kennwerte für den Fels nach Bild 9 verwendet.

Unter Annahme der von der Luftzirkulation abhängigen Wärmeleitfähigkeit der Luft von 2.5 W/m/K kann die Nachrechnung des Gradienten der Erwärmung gut abgebildet werden. Die maximalen Temperaturen der Messung in Hohlraummitte von 34°C (Bild 17 und Bild 18) weichen ca. 1°C vom Maximalwert der Messung ab. Auf eine Feinetuning der Wärmeleitfähigkeit der Luft wird verzichtet. Bei einer Gesamterwärmung von insgesamt 22°C sind Abweichungen von 1°C eine sehr gute Übereinstimmung.

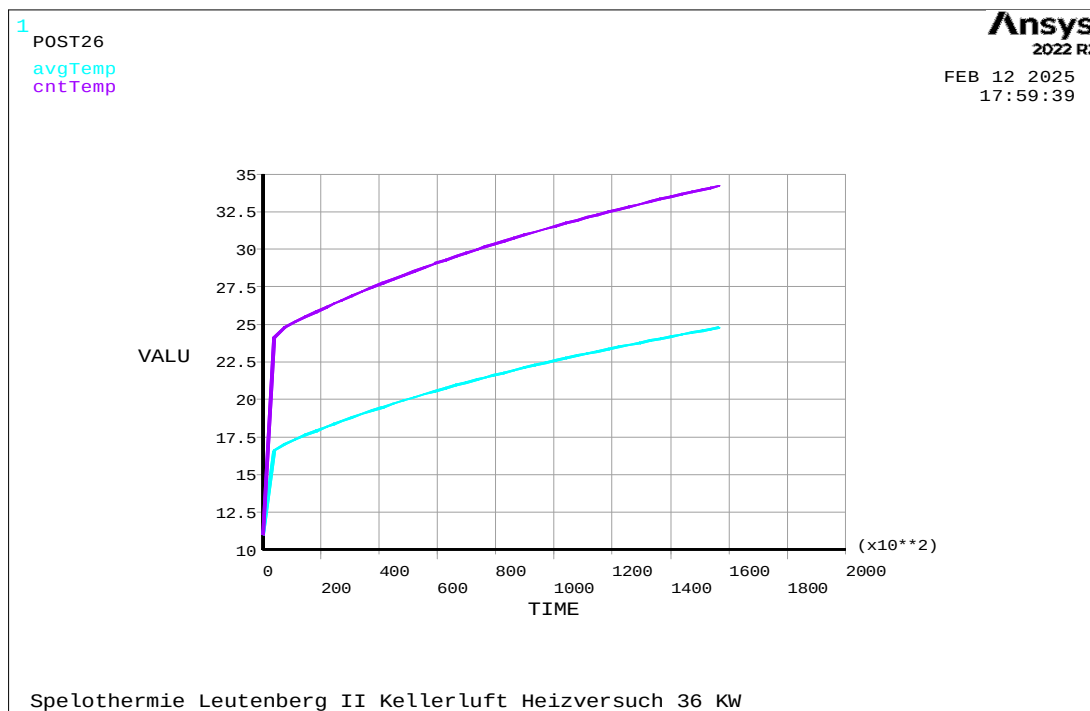


Bild 17: Temperaturverlauf nach 43.5 h Heizen

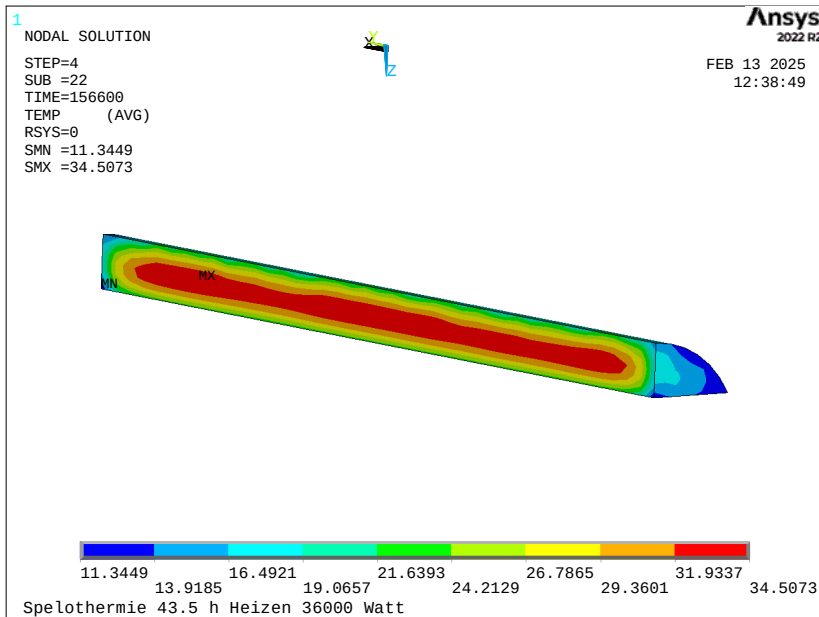


Bild 18: Temperaturverteilung im Luftvolumennach 43.5 h Heizen

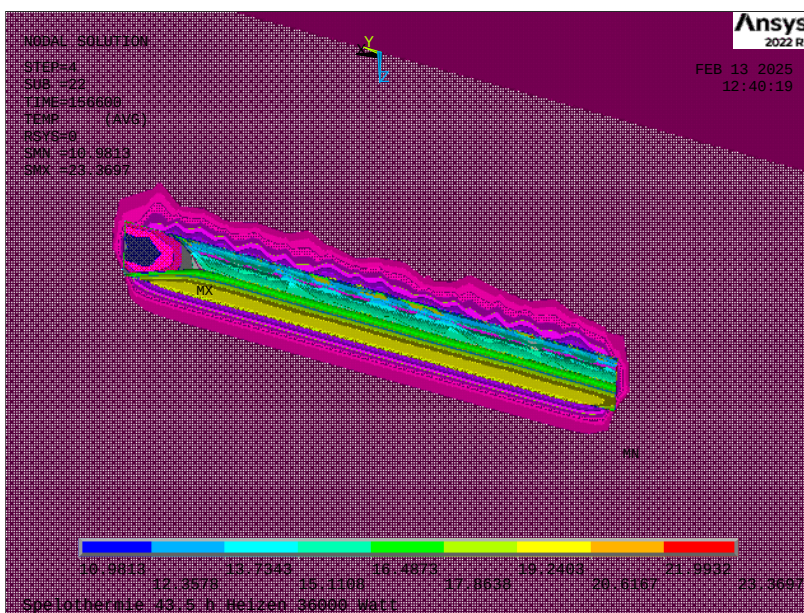


Bild 19: Temperaturverteilung im Felsen nach 43.5 h Heizen

Nach dem Heizversuch wurde die Abkühlung des Luftvolumens über 5 Tage aufgenommen. Deutlich ist wiederum der Sprung um 13°C beim Abschalten der Heißluftgebläse zu sehen (Bild 16). Danach kühlt die Luft weiter kontinuierlich ab. Nach 5 Tagen betrug die Lufttemperatur im Mittel 13°C (max. Temperatur am Höhlenende 15.7°C).

Es wird der Temperaturverlauf während der Abkühlphase verglichen. Mittels einer unveränderten Wärmeleitfähigkeit der Luft von 2.5 W/m/K beträgt die mittlere Lufttemperatur am Ende der 5-tägigen Relaxationsphase 14.2°C sowie die maximale Lufttemperatur am Ende der Relaxationsphase 15.4 °C (Bild 20). Die maximalen Temperaturwerte der Nachrechnung liegen zwischen Maximum und Mittelwert der Messung. Weil der Hohlraum zum Ende ansteigt und an der Eingangstür Wärmeverluste eintreten, erscheint

plausibel, dass die maximalen Werte der Nachrechnung zwischen den Mittel- und Maxwerten der Messung liegen.

Neben der Höhlenluft wird in der Abkühlphase auch eine Temperatur an der Felsoberfläche gemessen. Weil in der Nachrechnung kein expliziter Wärmeübergang modelliert ist, wird die gemessene Felsoberflächentemperatur mit der maximalen Temperatur im Felsen verglichen. Die Temperatur an der Felsoberfläche beträgt am Ende der Heizphase 27°C und kühlt sich in den 5 Tagen Relaxation auf 16.5 °C ab (Bild 16).

Die maximalen Temperaturen der Nachrechnung im Felsen sind am Ende der Heizperiode bei 23.5°C (Bild 19) und am Ende der Relaxation bei 14.8°C (Bild 22) und sind damit ca. 2..3 °C niedriger als die Temperaturen der Felsoberfläche. Berücksichtigt man, dass die Temperaturmessung an der Felsoberfläche vermutlich von den (höheren) Lufttemperaturen beeinflusst wird, erscheint es plausibel, dass am Ende des Heizens (bei 33°C Lufttemperatur) sowie auch in der Relaxationsphase eine höhere Oberflächentemperatur gemessen wird als im Felsen herrscht.

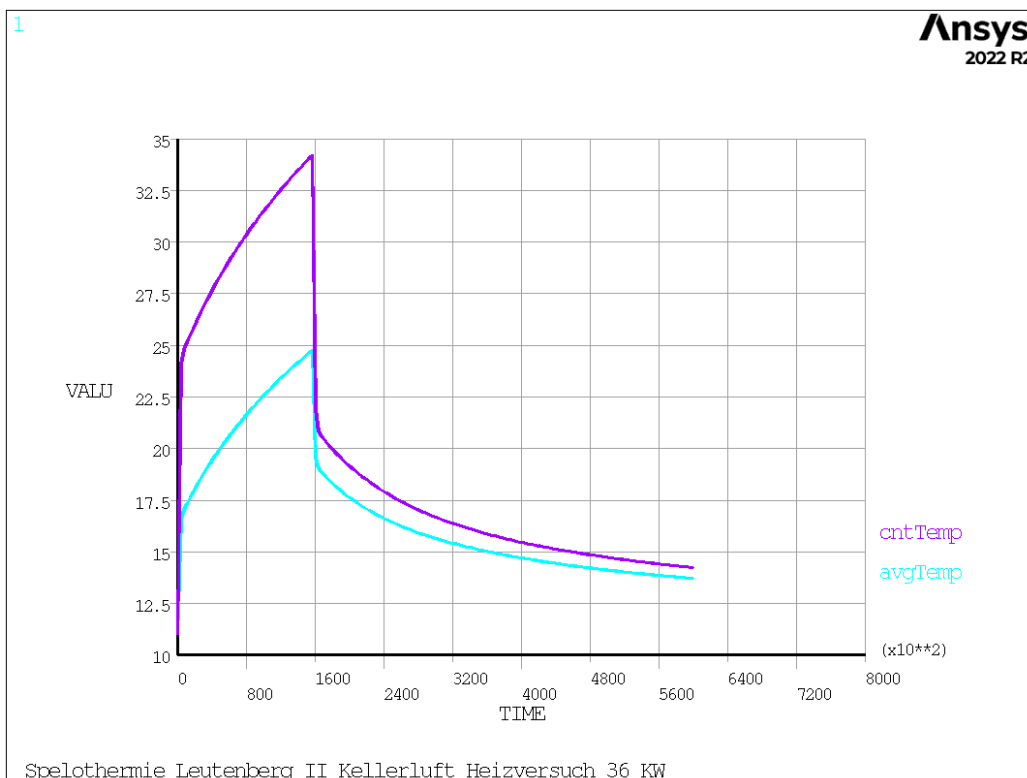


Bild 20: Temperaturverteilung im Luftvolumen nach 43.5

Stunden Heizen und 5 Tagen Relaxation

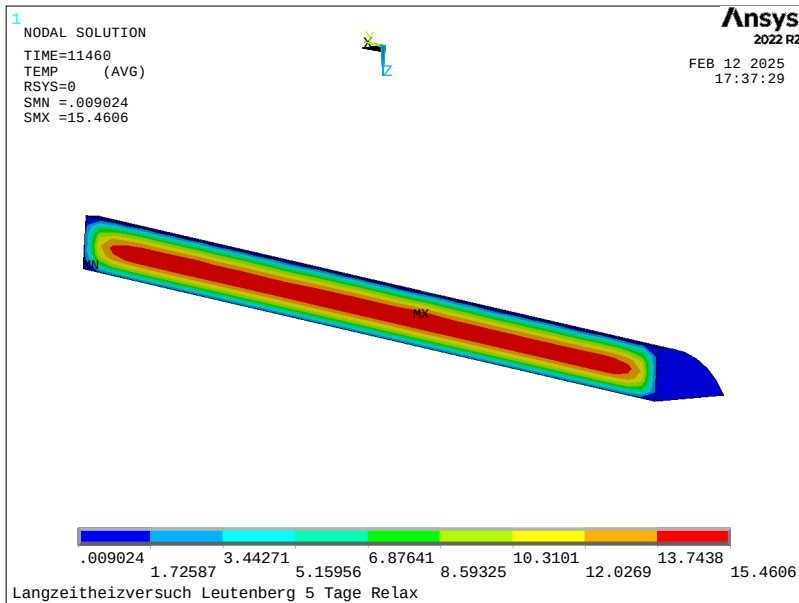


Bild 21: Temperaturverteilung im Luftvolumen nach 43.5 Stunden Heizen und 5 Tagen Relaxation

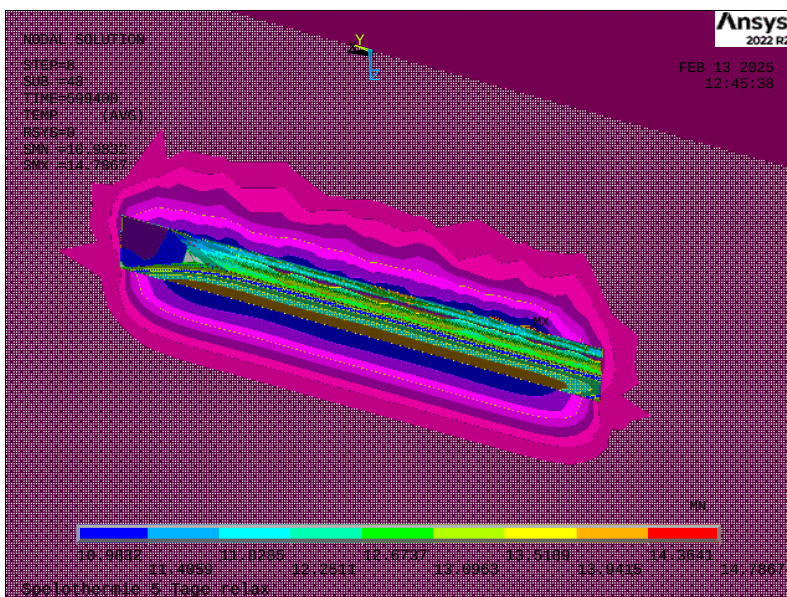


Bild 22: Temperaturverteilung im Felsen nach 43.5 Stunden Heizen und 5 Tagen Relaxation

Weil davon ausgegangen werden kann, dass im Betrieb höhere Luftzirkulationen als in der Relaxationsphase stattfinden, wurde untersucht, ob eine Variation der (zirkulationsabhängigen) Wärmeleitfähigkeit der Luft einen besseren Abgleich der Temperaturen am Ende der Relaxationsphase ermöglichen. Weil Variationen der Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 0.1 bis 2.5 W/m/K nur Änderungen im Zentel Grad Bereich ergaben wurde auf eine gesonderte Identifikation der zirkulationsabhängigen Wärmeleitfähigkeit für die Relaxationsphase verzichtet.

Zusammenfassung der Nachrechnung der Kühl- und Heizversuche

Unter Verwendung der idealisierten Geometrien und den standortabhängigen Kennwerten der felsmechanischen Kennwerte können mit einer Spanne der zirkulationsabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Luft von 2.0 bis 2.5 W/m/K alle Kühl- und Heizversuche erfolgreich nachberechnet werden.

Es erscheint plausibel, dass ein 18 kW Heißluftgebläse mit 2.5 W/m/K eine größere zirkulationsluftabhängige Wärmeleitfähigkeit der Luft erzeugt als ein 2kW Heißlüfter mit 2.0 W/m/K.

Für die Sensitivitätsstudie zur Erzeugung der Metamodelle im AP 6 wird deshalb als Wertebereich für die Wärmeleitfähigkeit der Luft eine Spanne von 1.0 W/m/K (relativ geringe Luftzirkulation mit kleiner WP und ungünstiger Höhlengeometrie) bis 3.0 (relative große Luftzirkulation mit großer WP und günstiger Hohlraumgeometrie) angenommen.

Anmerkung: Die Variation der zirkulationsabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Luft in den Hohlräumen spielt bei den Kurzzeitversuchen (Stunden) eine größere Rolle als im Betrieb der Wärmepumpen über die gesamte Heizperiode (Monate). An den MOP-Plots der Sensitivitätsstudien im AP 6, im Variationsbereich zusammen mit Geometrien, Felseigenschaften und Außentemperaturen, zeigt die gewählte Variation der zirkulationsabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Luft nur noch geringe Beiträge zur Gesamtvariation der resultierenden Lufttemperaturen in den Hohlräumen von 1-2% und ist somit für den Betrieb nicht maßgebend. Wesentlich maßgebender werden Variationen der Energieaustragsflächen und der Energieausträge durch den Betrieb der Wärmepumpe.

Betriebsszenarien der Wärmepumpe im Heizbetrieb

Für den wirtschaftlichen Betrieb der Wärmepumpe wird angenommen, dass die Wärmepumpe im kältesten Monat der Heizperiode (Januar) durchläuft und in den anderen Monaten der Heizperiode mit gedrosselter Leistung betrieben wird. Die Heizperiode wird von Oktober bis April, insgesamt 7 Monate angenommen.

Die gedrosselten Leistungsfaktoren werden aus dem 20-jährigen Mittel des Temperaturgang mittlerer Tages- und Nachttemperaturen für Thüringen ermittelt (Bild 23 und Bild 24).

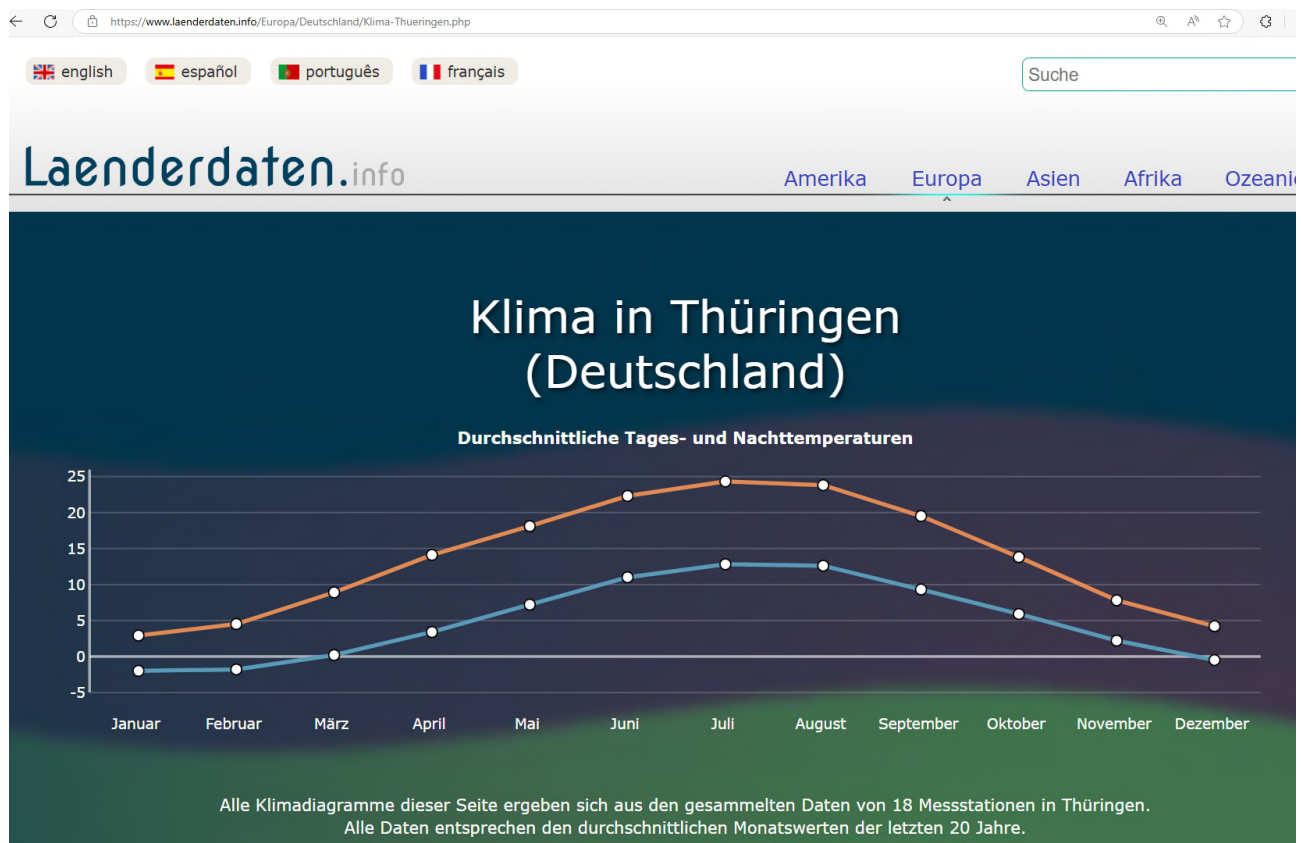


Bild 23: Durchschnittliche Tages- und Nachttemperaturen der letzten 20 Jahre

	Tagestemp	Nachttemp	durchschnittliche Temp	Leistung WP
Januar	2,9	-2	0,6	1,00
Februar	4,5	-1,8	1,3	0,94
März	8,9	0,2	4,5	0,68
April	14,1	3,4	8,8	0,32
Mai	18,1	7,2	12,8	
Juni	22,3	11	16,8	
Juli	24,3	12,8	18,6	
August	23,8	12,6	18,1	
September	19,5	9,3	14,3	
Oktober	13,8	5,9	9,7	0,25
November	7,8	2,2	5	0,64
Dezember	4,2	-0,5	2	0,88
			Summe	4,72

Bild 24: Durchschnittliche Monatstemperaturen und dazugehörige Leistungsfaktoren der Wärmepumpe

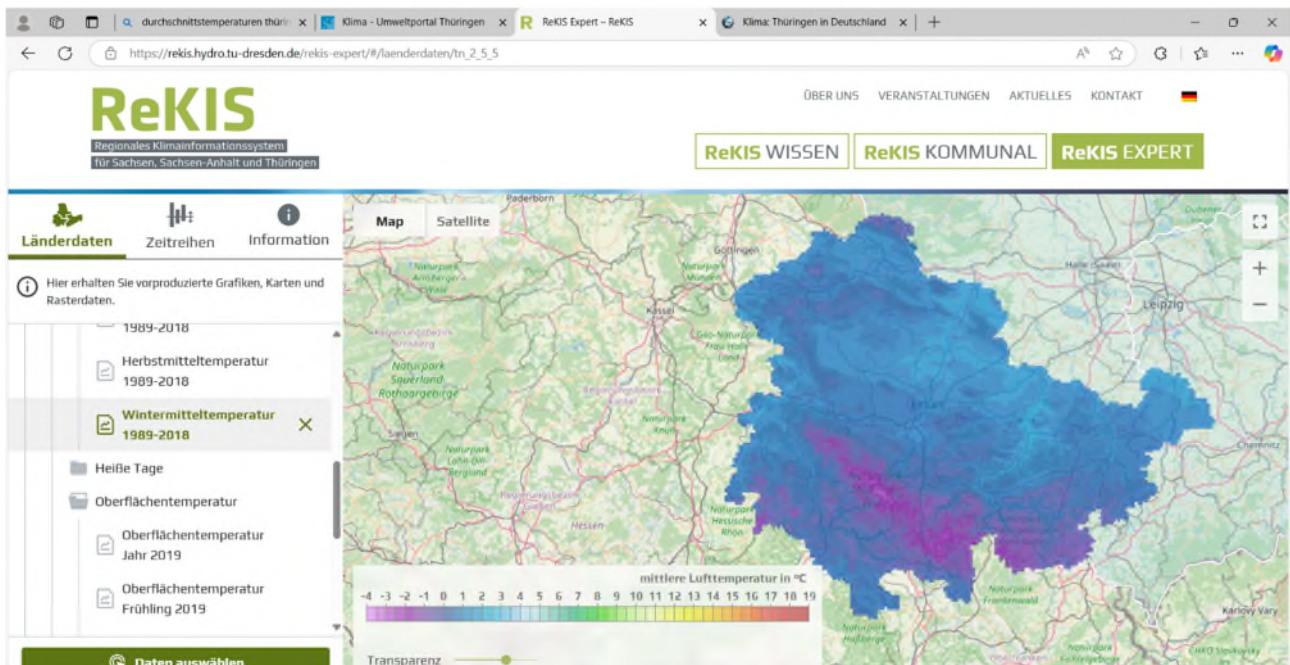


Bild 25: Standortbezogene Abweichungen der Wintertemperaturen in Thüringen

Bild 25 zeigt die standortabhängigen Abweichungen der Wintertemperaturen vom Thüringer Mittel. Erwartungsgemäß ist es in den Höhenlagen des Thüringer Waldes kälter (z.B. Oberhof bis zu minus 3°C) und in den Tallagen bei dichter Besiedlung wärmer (z.B. Jena bis zu plus 3°C). Diese standortspezifischen Temperaturabweichungen werden in den folgenden standortabhängigen Berechnung berücksichtigt.

Berechnung des maximalen Energieaustrages für den Standorte

Um im AP 6 automatisiert die Stützstellen für die Metamodellierung berechnen zu können, muss die gesamte thermische Berechnung einer Heizperiode automatisiert erfolgen. Alle variablen Parameter müssen parametrisch definiert sein und automatisiert aktualisiert werden können. Zum Test der Parametrik werden für alle Standorte mit den standortspezifischen Parametern Berechnungen des maximalen Energieaustrages durchgeführt. Exemplarisch werden diese Berechnungen für den Standort Weimar Humboldtstraße dokumentiert.

Berechnung des maximalen Energieaustrages für den Standort Weimar Humboldtstraße

Für den Standort Weimar Humboldtstraße wird eine transiente Berechnung über die gesamte Heizperiode durchgeführt. Als Nebenbedingung eines maximalen Energieaustrages wird angenommen, dass die mittleren Temperaturen im Hohlraum nicht unter 0°C fallen dürfen. Damit wird sichergestellt, dass es am Felsen nicht zur Eisbildung kommen kann.

Weil der Jahresgang der Außentemperaturen in Hohlräumen mit Überdeckungen im einstelligen Meterbereich erfahrungsgemäß zu Schwankungen um 1 bis 2°C führt wird die Rechnung 8 Monate vor Beginn des Betriebes der Wärmepumpe begonnen. Inklusiv der 7 Monate Heizbetrieb werden 15 Monate simuliert.

Der Hohlraum Bierkeller Weimar Humboldtstraße wurde mittels der geometrischen Parameter nach Bild 8 mit einer Überdeckung von 6 m modelliert. Es wurden die standortspezifischen Kennwerte für den Fels nach Bild 9 verwendet. Die initiale Temperatur im Hohlraum am Beginn der thermischen Berechnung beträgt 12°C.

Bild 26 zeigt den Temperaturgang der 15 Monate für eine auf maximalen Energieentzug optimierte Leistung der Wärmepumpe von 33kW. Die Jahreswärmeentzugsleistung beträgt 112 MWh. Die minimalen Temperaturen werden im Februar erreicht und liegen im Mittel der Lufttemperaturen knapp über Null. Bild 27 zeigt die Temperaturverteilung im Luftvolumen der idealisierten Geometrie sowie im umliegenden Felsen im Monat Februar.

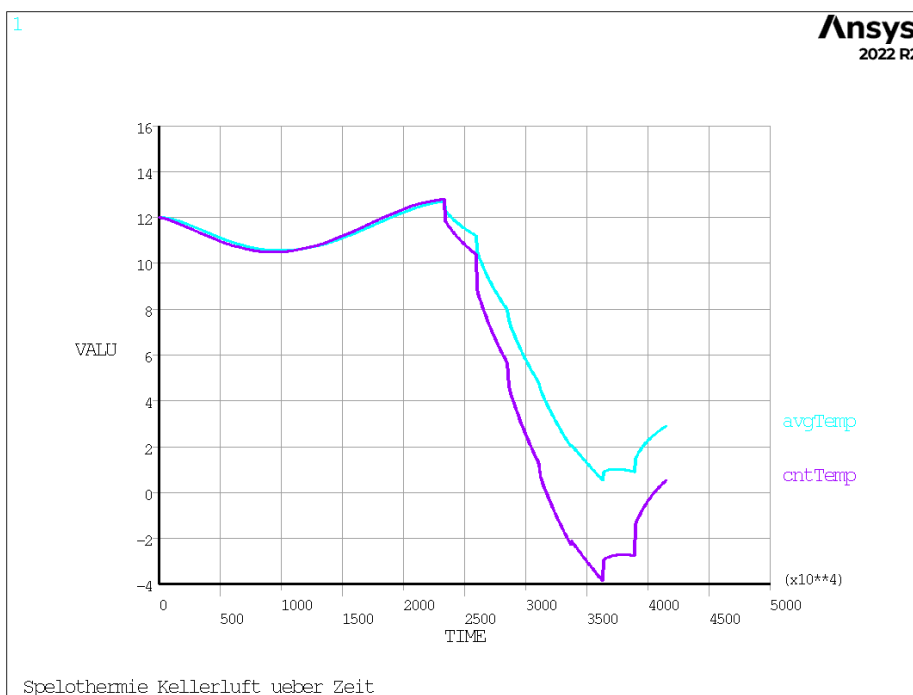


Bild 26: Temperaturgang Hohlraum Weimar Humboldtstraße

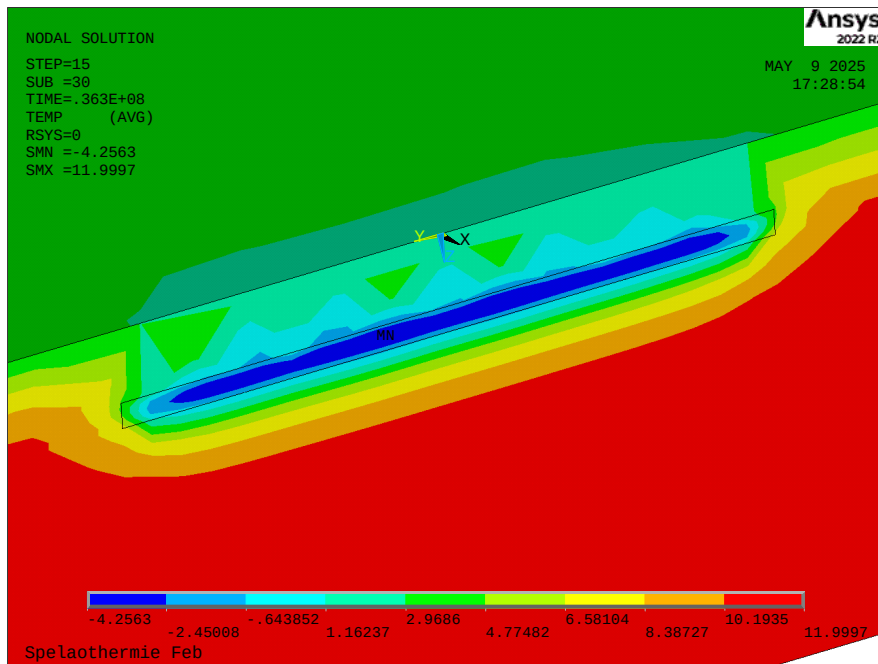


Bild 27: Temperaturverteilung idealisierte Geometrie Keller Weimar Humboldtstraße im Februar

Arbeitspaket 6: Wirtschaftlichkeit

Im AP6 wird eine Potenzialermittlung und wirtschaftliche Optimierung durchgeführt. Dabei werden Metamodelle zur Potentialermittlung der Wärmezeugung generiert und mit den Excel Dateien der Kostenermittlung sowie der ökonomischen Kenngrößen zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit verknüpft. Danach werden Optimierungen des Jahreswärmeaustragspotentials und der damit verbundenen Stromkosten für alle Standorte durchgeführt.

Generierung der Metamodelle

Weil die transienten FE-Berechnungen des Wärmeentzuges in einem Optimierungsprozess der Wirtschaftlichkeit viele Male wiederholt werden müssen, müssen die Berechnungen, um im AP7 als Web-Applikation zur Verfügung gestellt werden zu können, deutlich beschleunigt werden. Dafür werden in den vordefinierten Variationsräumen aller variierender Parameter sogenannte Metamodelle erstellt. Im Gegensatz zu den FE-Berechnungen, welche Minuten/Stunden Rechenzeit aufweisen, können mit Metamodellen wichtige vordefinierte Ergebnisgrößen mehr oder weniger in Echtzeit berechnet werden. Diese Beschleunigung erst ermöglicht die Bereitstellung der Potentialberechnung als Web-Applikation in AP 7.

Zur automatisierten Metamodellgenerierung wird Ansys optiSlang verwendet. Die parametrischen transienten Berechnungen mit Ansys Mechanical werden an optiSlang angeschlossen. Zur Generierung der Metamodelle erzeugt optiSlang in den Variationsräumen der Höhlengeometrie, der Umgebungstemperaturen, der Parameter der Wärmeleitung des Felsen und des Betriebes der Wärmepumpe einen Satz von 1000 Stützstellen, und berechnet diese Stützstellen automatisiert. Nach der Berechnung der Stützstellen werden automatisiert Metamodelle generiert, die bei gegebener Stützstellenanzahl die größte Vorhersagefähigkeit der Variation der Ergebnisgrößen (gemessen mit dem Coefficient of Prognosis –CoP) erreichen. Dazu wird der optiSlang Workflow Metamodel of optimal Prognosis (MOP) verwendet. Im MOP workflow werden verschiedene Regressionsmodelle (lineare Regression, Moving Least Square – MLS und Kriging) an einem Trainingsdatensatz trainiert und an einem Testdatensatz auf Ihre Prognosefähigkeit getestet. Trainings- und Testdatensätze werden dabei automatisch aus der Gesamtheit der 1000 Stützstellen generiert.

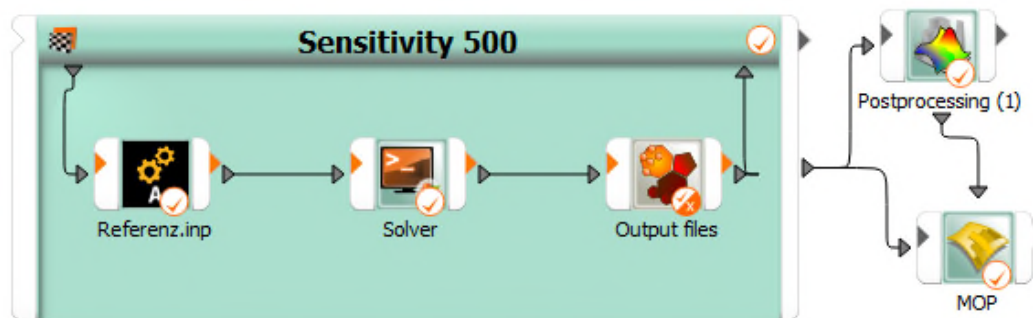


Bild 28: optiSlang workflow zur Metamodellgenerierung

Die Metamodelle stellen grundsätzlich Approximationen der Variation vordefinierter Antwortgrößen (z.B. der mittleren monatlichen Temperaturen im Luftvolumen) dar, welche einen Fehler gegenüber den Ergebnisse aus detaillierten FEM Berechnungen aufweisen. Das globale Fehlermaß wird mittels des CoP ausgewertet. Für die Potentialbewertungen wurde ein Prognosemaß von 95% angestrebt, also ein Fehler von max. 5% toleriert.

Weil in dem sehr großen Variationsraum der Geometrie (kleine Hohlräume mit 100 m² Oberfläche bis Kellersysteme mit tausenden m² Oberfläche) die bestmöglichen Metamodelle größere Approximationsfehler als 5% aufwiesen, wurden separate Metamodelle für kleine/mittlere Hohlräume mit Oberflächen bis 500 m² und große Hohlräume >500m² erzeugt.

Metamodellierung für kleine und mittelgroße Hohlräume

Bild 29 dokumentiert den Variationsraum für kleine/mittlere Hohlräume. Die Parametrik der Höhlengeometrie wird so gewählt, dass kleine Höhlen (Sonneberg, Großeutersdorf, Stadtroda, Tröbnitz) und mittelgroße Höhlen (Leutenberg) abgebildet werden. Zusätzlich wird eine Variation der Temperaturabweichung zum 20-jährigen Thüringer Mittel, der Wärmeleitung sowie Dichte/spezifische Wärmekapazität im Felsen und der Höhlenluft und der Überdeckung hinzugefügt. Für den variablen Betrieb der Wärmepumpe wird der Energieaustrag variiert.

Sensitivity kleine mittlere Keller - Sensitivity

Parameter	Start designs	Criteria	Dynamic sampling	Other	Result designs		
Name	Parameter type	Reference value	Constant	Value type	Resolution	Range	Range plot
1 Abw_Temp	Optimization	0	☐	REAL	Continuous	-3 3	
2 L	Optimization	25	☐	REAL	Continuous	5 30	
3 R	Optimization	3.145	☐	REAL	Continuous	2.5 6	
4 SH	Optimization	1.57	☐	REAL	Continuous	1.2 2.5	
5 kxxFels	Optimization	2.5	☐	REAL	Continuous	1 5	
6 kxxLuft	Optimization	2.5	☐	REAL	Continuous	1 3	
7 Ueberdeckung	Optimization	12	☐	REAL	Continuous	1 15	
8 Energieaustrag	Optimization	51.453	☐	REAL	Continuous	10 80	
9 Dichte_Fels	Optimization	2500	☐	REAL	Continuous	2000 2700	
10 c_Fels	Optimization	900	☐	REAL	Continuous	800 1000	

Bild 29: Variationsraum Metamodellierung kleine/mittlere Hohlräume

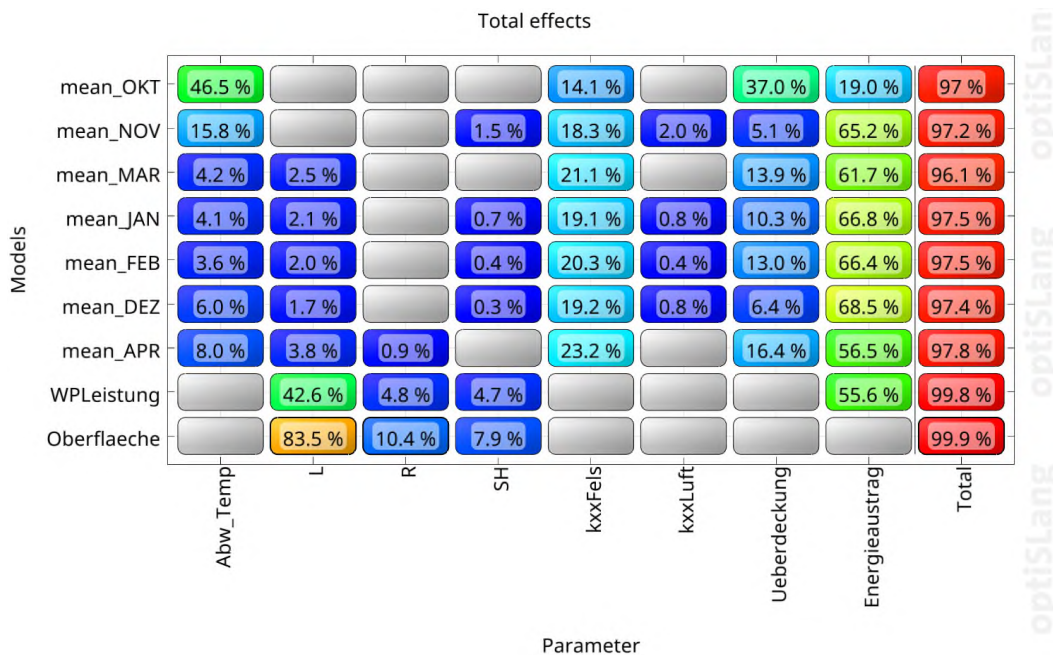


Bild 30: Korrelationsmatrix der Eingangsvariationen zu den Variationen wichtiger Ergebnisgrößen kleine/mittlerer Hohlräume

Bild 30 zeigt in einer Korrelationsmatrix, wie die Eingangsvariationen die Variation wichtiger Ergebnisgrößen beeinflussen. Dabei werden sowohl nichtlineare paarweise Zusammenhänge als auch nichtlineare mehrdimensionale Zusammenhänge berücksichtigt. 8 Eingangsparameter haben nennenswerten Einfluss (>1%) auf die Gesamtvariation der Ergebnisgrößen. Die Variation der Dichte/spezifische Wärmekapazität im Felsen hat keinen signifikanten Einfluss auf die Variation der Ergebnisgrößen und wird vom MOP-Algorithmus herausgefiltert. Alle Ergebnisgrößen können mit einer Prognosefähigkeit von $\geq 95\%$ (Lufttemperaturen und Oberfläche/WP-Leistung) mittels Metamodellierung abgebildet werden.

Bild 31 dokumentiert Barcharts der Quantifizierung wieviel Variation der Ergebnisgröße aus der Variation der Eingangsgrößen resultiert. Bild 32 dokumentiert wie die wichtigsten Eingangsvariation die Ergebnisgrößen beeinflussen. Erwartungsgemäß führt ein geringerer Energieaustrag zu einer höheren Temperatur. Die Variation des Energieaustrag setzt sich dabei aus der Variation der Oberfläche (die Oberfläche ändert sich in Abhängigkeit der Geometrieviation) sowie der Variation des Energieaustrag pro m2 Oberfläche. Der Gesamteinfluss aus Variation des Energieeintrag und Geometrie beträgt $66+2=68\%$. Erwartungsgemäß führt eine höhere Wärmeleitfähigkeit des Felsen zu höheren Temperaturen. Erwartungsgemäß führt ein kälterer Jahresgang zu niedrigeren Temperatur. Erwartungsgemäß führt eine größere Überdeckung zu einer höheren Temperatur.

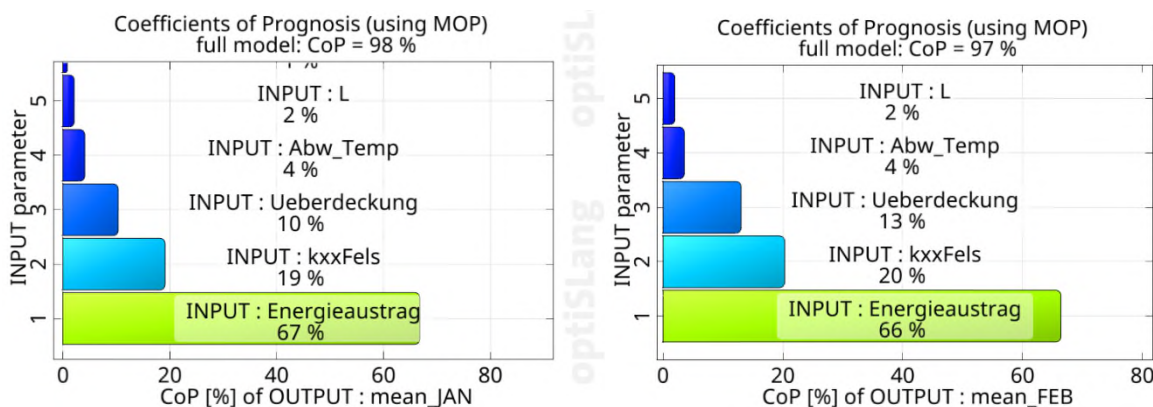


Bild 31: COP Plots der Einflussgrößen auf die mittleren Monatstemperaturen im Januar und Februar, kleinere/mittlere Hohlräume

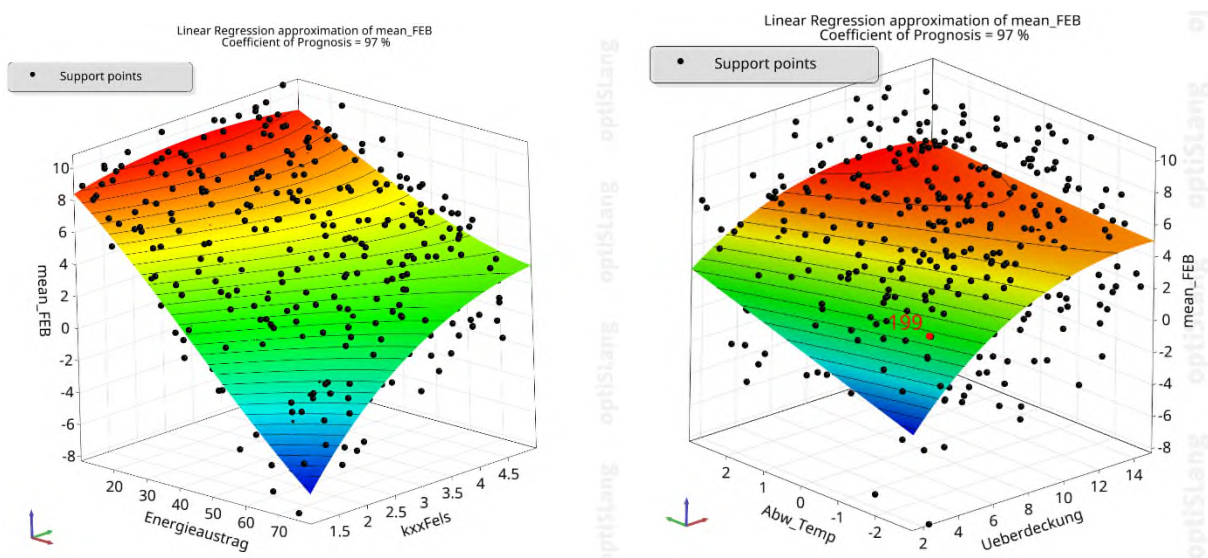


Bild 32: MOP Plots der Einflussgrößen auf die mittleren Monatstemperaturen im Januar und Februar, kleine/mittlere Hohlräume

Um neben der globalen Approximationsgenauigkeit (COP-Wert) auch lokale Approximationsgenauigkeiten zu verifizieren, wurden für die 6 kleineren/mittleren Hohlräume (Leutenberg, Senneberg Baudler, Senneberg Biergarten, Großeutersdorf und Tröbnitz) die Approximation und FE-Berechnung der WP-Leistung bei maximalem Energieausttrag verglichen. Die Prognosen für die WP-Leistung für kleine und mittelgroße Hohlräume weichen max 3% von den Werten der FE-Berechnung ab (Bild 33). Damit stellen die Metamodelle ausreichend gute Approximation der Ergebnisgrößen dar.

optiSLang MOP solver version 24.1.2									
Meta model database was imported from:									
C:\Daten\Geodynamdo\Projekte\Förderprojekte\Speläothermie Jena-Geos\Metamodellierung\mop kmK.omdb									
Extrapolate	0								
	Abw_Temp	L	R	SH	kxxFels	kxxLuft	Ueberdec	Energieaust	Full model
mean_OKT	46,5%				14,1%		37,0%	19,0%	97,0%
mean_NOV	15,8%			1,5%	18,3%	2,0%	5,1%	65,2%	97,2%
mean_MAR	4,2%	2,5%			21,1%		13,9%	61,7%	96,1%
mean_JAN	4,1%	2,1%		0,7%	19,1%	0,8%	10,3%	66,8%	97,5%
mean_FEB	3,6%	2,0%		0,4%	20,3%	0,4%	13,0%	66,4%	97,5%
mean_DEZ	6,0%	1,7%		0,3%	19,2%	0,8%	6,4%	68,5%	97,4%
mean_APR	8,0%	3,8%	0,9%		23,2%		16,4%	56,5%	97,8%
WPLeistung		42,6%	4,8%	4,7%				55,6%	99,8%
Oberflaeche		83,5%	10,4%	7,9%					99,9%
	Parameters								Responses
Lower Bound	-2,994	5,025	2,5035	1,2013	1,004	1,002	1,014	10,07	
Upper Bound	2,994	29,975	5,9965	2,4987	4,996	2,998	14,986	79,93	FE-Rechnung MOP
ID	Abw_Temp	L	R	SH	kxxFels	kxxLuft	Ueberdec	Energieaust	Oberflaeche WP Leistung WP Leistung Abweichunge
Leutenberg	1,50	25,00	3,15	1,57	3,00	2,00	7,00	65,50	311 6.030 5.987 -1%
Sonneberg Baudler	1,50	11,00	2,72	1,50	3,00	2,00	7,00	75,75	135 2.896 3.000 3%
Sonneberg Biergarten	1,50	10,00	3,59	1,94	3,00	2,00	7,00	68,00	158 3.200 3.159 -1%
Grosseutersdorf	1,50	12,00	3,30	1,25	3,00	2,00	7,00	76,00	146 3.174 3.270 3%
Stadtroda	1,50	5,17	4,70	1,74	3,00	2,00	7,00	74,00	98 2.089 2.125 2%
Tröbnitz	1,50	5,50	4,25	1,79	3,00	2,00	7,00	74,00	99 2.155 2.156 0%

Bild 33: Vergleich Ergebnisgröße WP-Leistung bei maximalem Energieaustrag kleine/mittlere Hohlräume

Metamodellierung für große Hohlräume

Bild 34 dokumentiert den Variationsraum für große Hohlräume. Die Parametrik der Höhlengeometrie wird so gewählt, dass große Keller und Hohlräume (Ehringsdorf, Humboldtstraße, Dornheim) abgebildet werden. Zuzüglich wird eine Variation der Temperaturabweichung zum 20-jährigen Thüringer Mittel, der Wärmeleitung sowie Dichte/spezifische Wärmekapazität im Felsen und der Höhlenluft und der Überdeckung hinzu-gefügt. Für den variablen Betrieb der Wärmepumpe wird der Energieaustag variiert.

	Name	Parameter type	Reference value	Constant	Value type	Resolution	Range	Range plot
1	Abw_Temp	Optimization	0	☐	REAL	Continuous	-3 3	
2	L	Optimization	25	☐	REAL	Continuous	20 200	
3	R	Optimization	3.145	☐	REAL	Continuous	2.5 25	
4	SH	Optimization	1.57	☐	REAL	Continuous	1.2 3	
5	kxxFels	Optimization	2.5	☐	REAL	Continuous	1 5	
6	kxxLuft	Optimization	2.5	☐	REAL	Continuous	1 3	
7	Ueberdeckung	Optimization	12	☐	REAL	Continuous	1 15	
8	Energieaustag	Optimization	51.453	☐	REAL	Continuous	10 70	
9	Dichte_Fels	Optimization	2500	☐	REAL	Continuous	2000 2700	
10	c_Fels	Optimization	900	☐	REAL	Continuous	800 1000	

Bild 34: Variationsraum Metamodellierung große Hohlräume

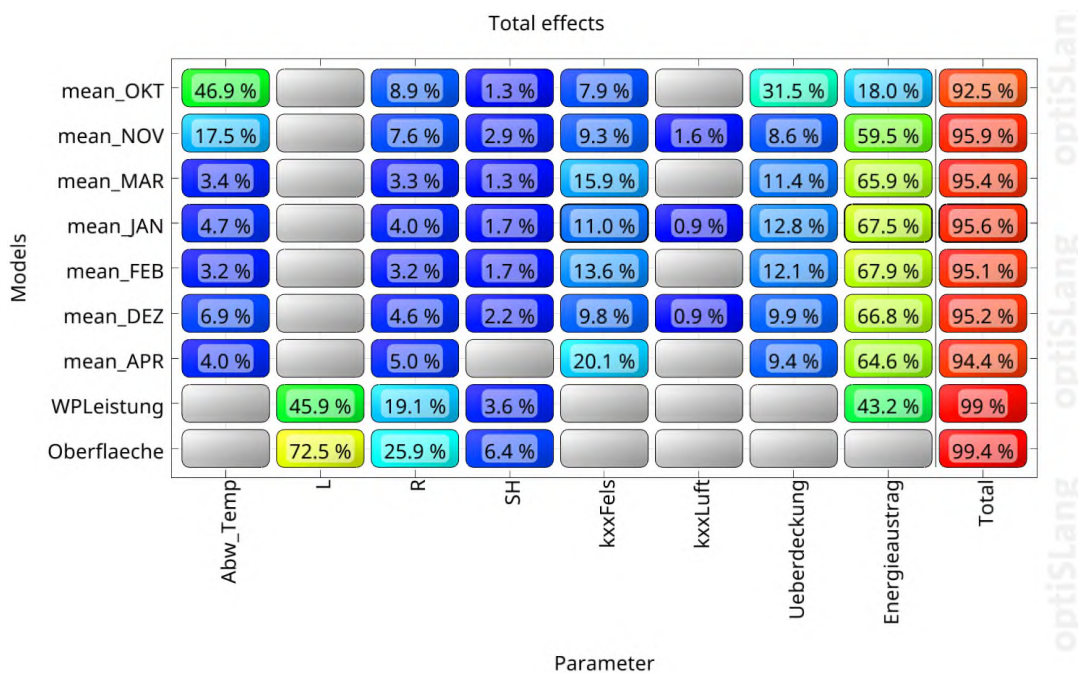


Bild 35: Korrelationsmatrix der Eingangsvariationen zu den Variationen wichtiger Ergebnisgrößen, große Hohlräume

Bild 35 zeigt in einer Korrelationsmatrix wie die Eingangsvariationen die Variation wichtiger Ergebnisgrößen beeinflussen. Dabei werden sowohl nichtlineare paarweise Zusammenhänge als auch nichtlineare mehrdimensionale Zusammenhänge berücksichtigt. 8 Eingangsparameter haben nennenswerten Einfluss (>1%) auf die Gesamtvariation der Ergebnisgrößen. Die Variation der Dichte/spezifische Wärmekapazität im Felsen hat keinen signifikanten Einfluss auf die Variation der Ergebnisgrößen und wird vom MOP-Algorithmus herausgefiltert. Alle Ergebnisgrößen können mit einer Prognosefähigkeit von $\geq 95\%$ (Lufttemperaturen und Oberfläche/WP-Leistung) mittels Metamodellierung abgebildet werden.

Bild 36 dokumentiert Barcharts der Quantifizierung wieviel Variation der Ergebnisgröße aus der Variation der Eingangsgrößen resultiert. Bild 37 dokumentiert wie die wichtigsten Eingangsvariation die Ergebnisgrößen beeinflussen. Erwartungsgemäß hat auf die Variation der Hohlraumtemperatur der Energieaustrag einen großen Einfluss. Erwartungsgemäß führt ein geringerer Energieaustrag zu einer höheren Temperatur. Die Variation des Energieaustrag setzt sich dabei aus der Variation der Oberfläche (die Oberfläche ändert sich in Abhängigkeit der Geometrievariation) sowie der Variation des Energieaustrag pro m2 Oberfläche. Der Gesamteinfluss aus Variation des Energieeintrag und Geometrie beträgt $68+3+2=73\%$. Erwartungsgemäß führt eine höhere Wärmeleitfähigkeit des Felsen zu höheren Temperaturen. Erwartungsgemäß führt ein kälterer Jahresgang zu niedrigeren Temperatur. Erwartungsgemäß führt eine größere Überdeckung zu einer höheren Temperatur.

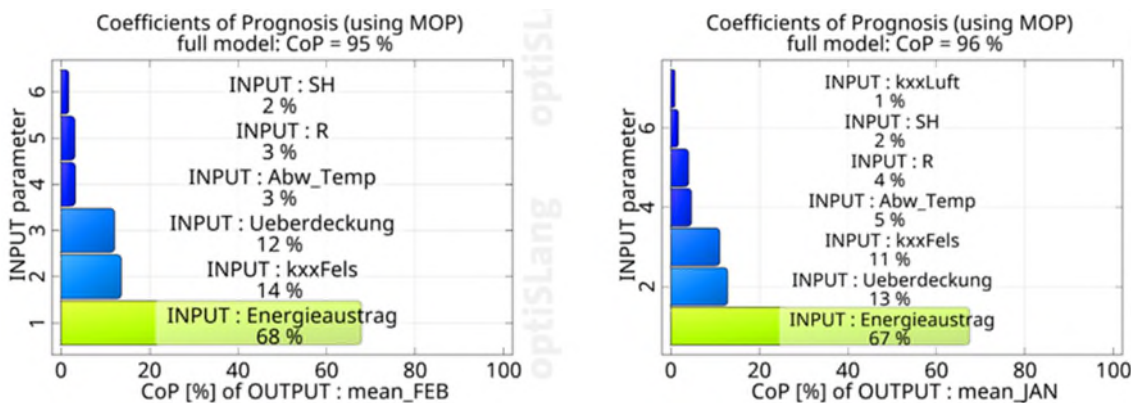


Bild 36: COP Plots der Einflussgrößen auf die mittleren Monatstemperaturen im Januar und Februar, große Hohlräume

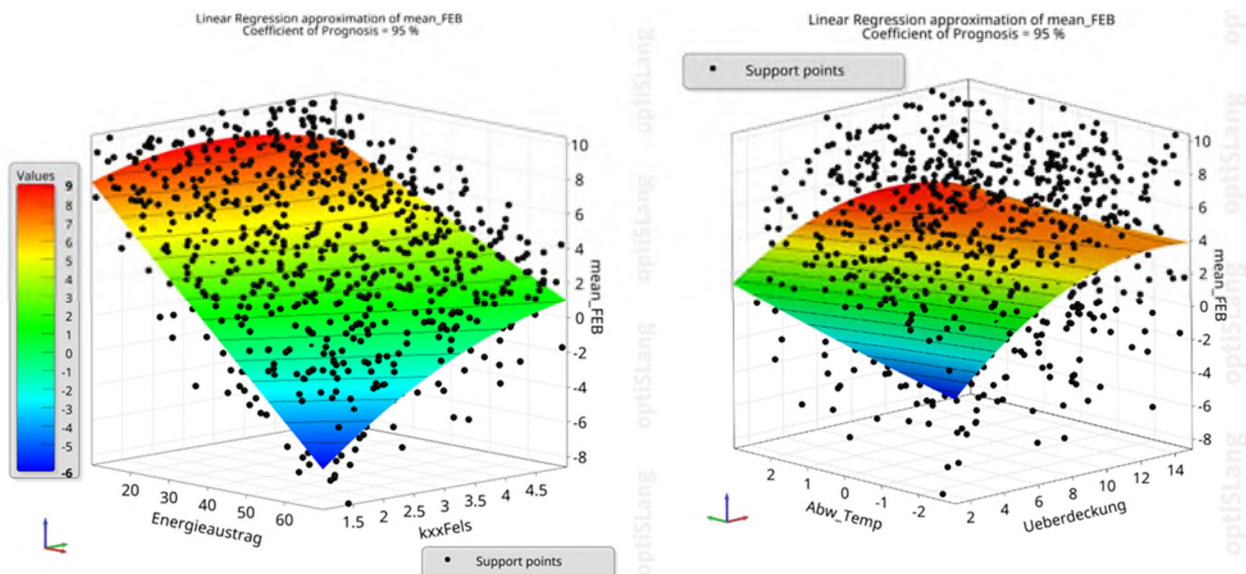


Bild 37: MOP Plots der Einflussgrößen auf die mittleren Monatstemperaturen im Januar und Februar, große Hohlräume

Um neben der globalen Approximationsgenauigkeit (COP-Wert) auch lokale Approximationsgenauigkeiten zu verifizieren, wurden für die 3 großen Hohlräume (Weimar Ehringsdorf, Weimar Humboldtstraße, Jena Dornheim) die Approximation und FE-Berechnung der WP-Leistung bei maximalem Energieaustrag verglichen. Die Prognosen für die WP-Leistung für kleine und mittelgroße Hohlräume weichen max. 3% von den Werten der FE-Berechnung ab (Bild 38). Damit stellen die Metamodelle ausreichend gute Approximation der Ergebnisgrößen dar.

optiSLang MOP solver version 24.1.2														
Meta model database was imported from:														
C:\Daten\Geodynamdo\Projekte\Förderprojekte\Speläothermie Jena-Geos\Metamodellierung\mop gK.omdb														
Extrapolate	0													
	Abw_Temp_L	R	SH	kxxFels	kxxLuft	Ueberdeckt	Energieaus	Full model						
mean_OKT	46,9%		8,9%	1,3%	7,9%		31,5%	18,0%	92,51%					
mean_NOV	17,5%		7,6%	2,9%	9,3%	1,6%	8,6%	59,5%	95,93%					
mean_MAR	3,4%		3,3%	1,3%	15,9%		11,4%	65,9%	95,40%					
mean_JAN	4,7%		4,0%	1,7%	11,0%	0,9%	12,8%	67,5%	95,58%					
mean_FEB	3,2%		3,2%	1,7%	13,6%		12,1%	67,9%	95,06%					
mean_DEZ	6,9%		4,6%	2,2%	9,8%	0,9%	9,9%	66,8%	95,20%					
mean_APR	4,0%		5,0%		20,1%		9,4%	64,6%	94,35%					
WPLeistung		45,9%	19,1%	3,6%			43,2%	99,00%						
Oberflaeche		72,5%	25,9%	6,4%				99,44%						
	Parameters								Responses					
Lower Bound	-2,997	20,09	2,5113	1,2009	1,002	1,001	1,007	10,03						
Upper Bound	2,997	199,9	24,989	2,9991	4,998	2,999	14,993	69,97						
ID	Abw_Temp_L	R	SH	kxxFels	kxxLuft	Ueberdeckt	Energieaus	Oberflaeche	FE-Rechnung	MOP				
Humboldtstraße	1,50	64,50	14,42	2,43	3,00	2,00	7,00	51,45	2.109	33.021	31.917			-3%
Ehringsdorf	1,50	169,00	22,95	2,70	3,00	2,00	7,00	52,75	7.639	116.996	118.512			1%
Dornheim	1,50	90,00	11,46	1,43	3,00	2,00	7,00	56,70	1.998	34.387	33.317			-3%

Bild 38: Vergleich Ergebnisgröße WP-Leistung bei maximalem Energieausttrag große Hohlräume

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Motivation des Fördervorhabens zur thermischen Nutzung von Hohlräumen und Kelleranlagen für die Wärmeerzeugung für Gebäude war die Annahme, dass die Wärmepumpen in den Hohlräumen im Heizbetrieb im Schnitt höhere Lufttemperaturen als an der Oberfläche ausnutzen können und damit wirtschaftlicher betrieben werden können.

Dieser Stromkostenvorteil im Betrieb wurde in Excel programmiert. Um die Kostenberechnung in die Web-Applikation integrieren zu können, müssen alle variablen Parameter der Metamodellierung definiert und parametrisch abgebildet werden. Neben den Stromkosten pro kWh sind das die monatlichen mittleren Temperaturen an der Oberfläche und in der Luft im Hohlraum sowie die Leistung der Wärmepumpe. Die Abhängigkeit der Performance der Wärmepumpe von den Lufttemperaturen wird im Excel Sheet an Hand der Kenn-daten einer Wärmepumpe mit 35kW Leistung berücksichtigt.

Berechnung der Stromkosten									
WP Leistung [W]	33.000								
Energieaustrag kWh/m2	51,49								
Oberfläche m2	2.180								
WP Leistung (berechnet aus Oberfläche*Energieaustrag [W])	33.014								
monatlicher Leistungsfaktor WP	0,25	0,64	0,88	1,0	0,94	0,68	0,32	4,71	
Jahresleistung Wärme [mW]	111,91								
Abw. Temp	1,5								
Außenluft-Wasser-Wärmepumpe:									
	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Summe	Quelle:
Durchschnittliche Außentemperatur [° C]:	11,2	6,5	3,5	2,1	2,8	6,0	10,3		
COP der Wärmepumpe [-]:	6,2	5,3	4,7	4,5	4,6	5,2	6,1	Betriebskosten	interpoliert aus COP-Kennfeld
Strombedarf der Wärmepumpe im Monat [kWh]:	951	2.854	4.407	5.313	4.846	3.088	1.253	22.712	7.722
Spekthiermie-Wärmepumpe:									
	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April	Summe	Quelle:
Durchschnittliche Höhlentemperatur [° C]:	11,8	9,2	6,1	3,3	1,3	1,0	2,3		
COP der Wärmepumpe [-]:	6,4	5,9	5,3	4,7	4,3	4,3	4,5	Betriebskosten	interpoliert aus COP-Kennfeld
Strombedarf der Wärmepumpe im Monat [kWh]:	934	2.597	3.982	5.057	5.167	3.800	1.689	23.227	7.897
Strompreis €/kWh	0,34							-2,3%	Betriebskostenvorteil
COP-Kennfeld:								-175	Stromkostenvorteil €
	Außentemperat	COP							
A-7/W35	-7,0	2,7							
A2/W35	2,0	4,6							
A7/W35	7,0	5,4							
Diff A-7 / A7	12,0	6,4							
Gradient diffTemp/diffCOP		5,13513514							

Bild 39: Berechnung des Stromkostenunterschiedes im Vergleich Betrieb Wärmepumpe an der Außenluft sowie im Hohlraum in Excel

Bild 39 dokumentiert die Berechnung des Stromkostenunterschiedes für den maximalen Energieaustrag für den Standort Weimar Humboldtstraße. Das Betriebsszenario Weimar Humboldtstraße mit einer 33 kW Wärmepumpe und einer Jahresentzugsleistung von 112 MWh verursacht 175€ höhere Stromkosten im Betrieb im Hohlraum, verglichen mit einem Betrieb der Wärmepumpe an der Oberfläche. Die höheren Stromkosten resultieren aus im Mittel niedrigeren Hohlraumlufttemperaturen als an der Außenluft. Dieser Umstand zeigt sehr deutlich, dass für einen wirtschaftlichen Betrieb eine geringere Jahresentzugsleistung mit damit verbundenen höheren Hohlraumlufttemperaturen anzustreben ist, als im Szenario der maximalen Jahresentzugsleistung berechnet wurde. Die zwei gegenläufigen Zielfunktionen maximaler Energieaustrag und maximale Hohlraumlufttemperatur führen auf ein sogenanntes Pareto-Optimierungsproblem.

Pareto-Optimierung des Jahreswärmeaustrages und des Stromkostenvorteils des Betriebes der WP im Hohlraum.

In einem optiSLang workflow werden die Metamodelle und die Excel Kostenprogrammierung verknüpft (Bild 40). Die Parametrik des Workflows beinhaltet die Geometrie, Überdeckung, Abweichung vom 20-jährigen Thüringer Temperaturmittel, Wärmeleitfähigkeit Felsen und Luft, der Energieaustrag pro m2 Oberfläche sowie den Strompreis.

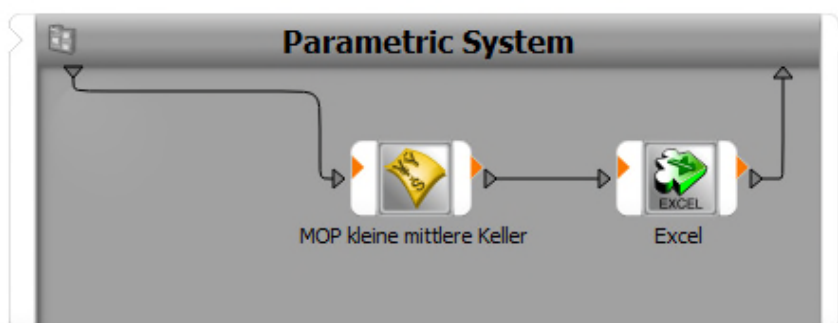


Bild 40: optiSLang Parametrik System

In der Folge wurde für jeden Standort eine Pareto-Optimierung durchgeführt.

Optimierung für den Standort Brauerkeller Weimar Ehringsdorf

Für den Standort Ehringsdorf wurden idealisierte Geometrien aus Bild 8, standortspezifische Kennwerte aus Bild 9, eine Überdeckung von 6 m, und eine Abweichung vom Thüringer Mittel von +1°C angenommen.

Ehringsdorf 1°C - One-Click Optimization								
Parameter Start designs Criteria Settings Other Result designs								
	Name	Parameter type	Reference value	Constant	Value type	Resolution	Range	Range plot
1	Strompreis	Optimization	0.34	☒	REAL	Continuous	0.306 0.374	
2	Abw_Temp	Optimization	1	☒	REAL	Continuous	-3 3	
3	kxxLuft	Optimization	2.5	☒	REAL	Continuous	1 3	
4	kxxFels	Optimization	2.7	☒	REAL	Continuous	1 5	
5	SH	Optimization	2.708	☒	REAL	Continuous	1.2 3	
6	Ueberdeckung	Optimization	6	☒	REAL	Continuous	1 15	
7	R	Optimization	22.95	☒	REAL	Continuous	2.5 25	
8	Energieaustrag	Optimization	51.453	☐	REAL	Continuous	10 70	
9	L	Optimization	169	☒	REAL	Continuous	20 200	

Bild 41: Parametrik für den Standort Ehringsdorf

Bei der Paretooptimierung wird einzig der Eingangsparameter Energieaustrag pro m2 Oberfläche variiert.

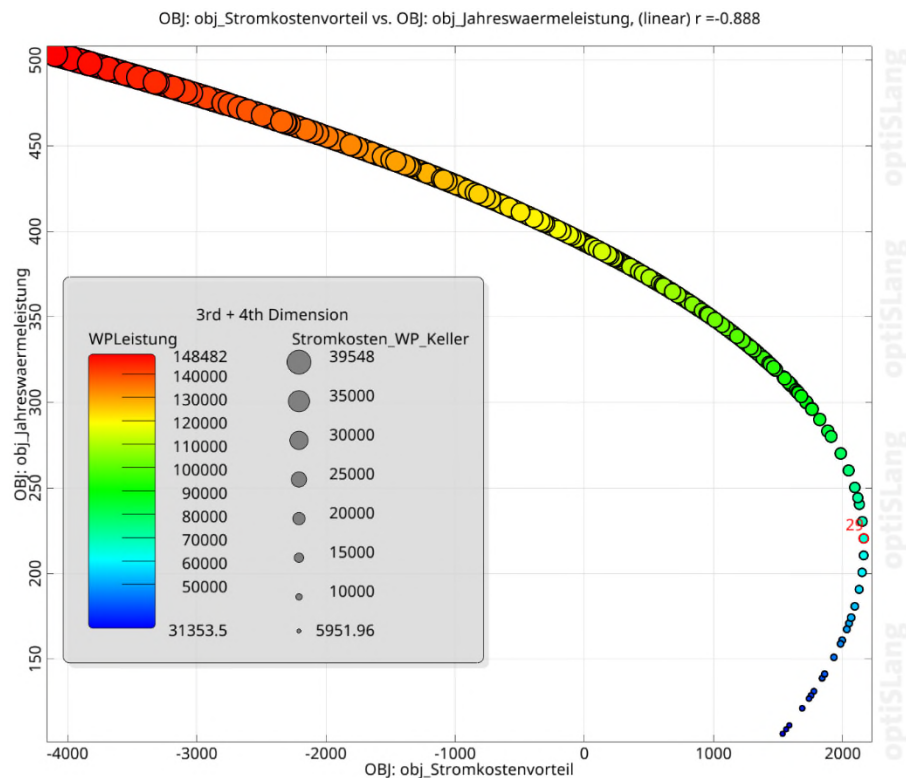


Bild 42: Paretofront der Jahreswärmestromleistung und des Stromkostenvorteils für den Standort Ehringsdorf

Bild 42 zeigt die Paretofront der beiden in Konflikt stehenden Zielfunktionen Maximierung der Jahreswärmeproduktion und des Stromkostenvorteils. Der maximale jährliche Stromkostenvorteil (2.162€) kann mit einer Wärmepumpenleistung von 65 kW bei einer Jahreswärmemenge von 220 MWh erzielt werden (Bild 43-linke Seite).

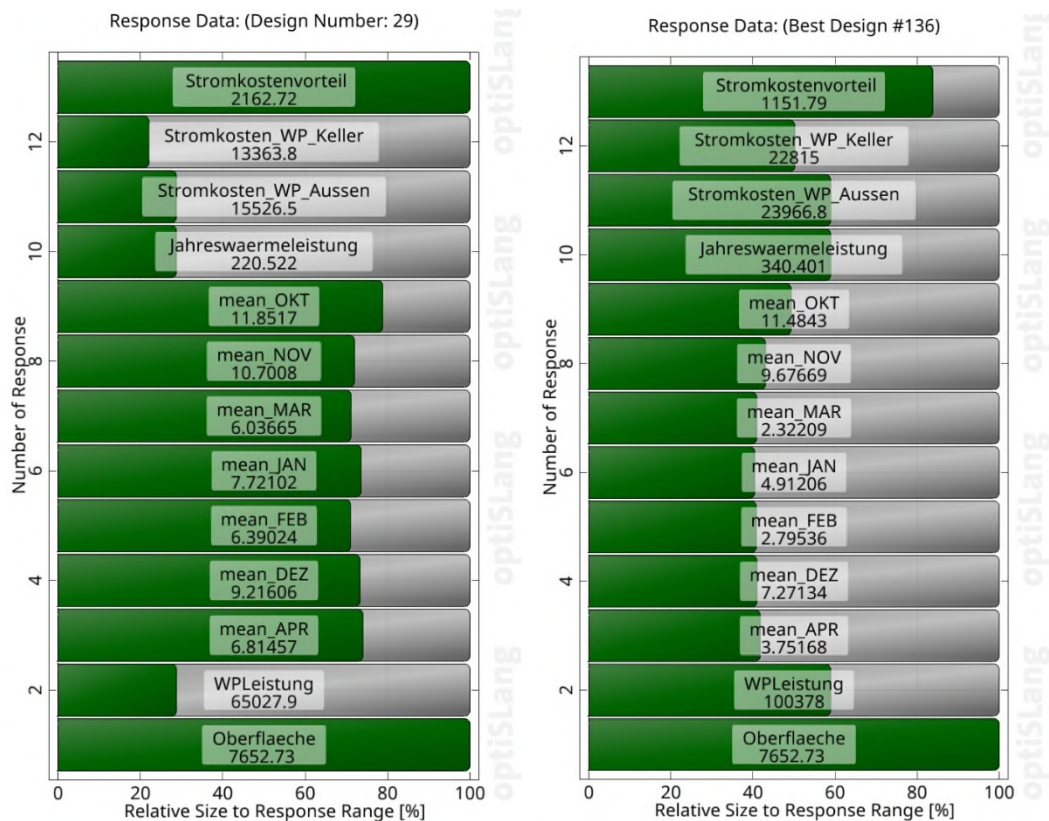


Bild 43: Ergebnisschart für das kostenoptimale Design (links) und eines Designs mit optimierter Jahreswärmeeinzugsleistung für den Standort Weimar Ehringsdorf

Bild 43-rechte Seite zeigt ein Design der Paretofront mit immer noch akzeptablem Stromkostenvorteil von 1152 € mit einer Wärmepumpenleistung von 100 kW bei einer Jahreswärmemenge von 340 MWh.

Optimierung für den Standort Jena Dornheim

Für den Standort Jena Dornheim wurden idealisierte Geometrien aus Bild 8, standortspezifische Kennwerte aus Bild 9, eine Überdeckung von 10 m, und eine Abweichung vom Thüringer Mittel von +2°C angenommen.

Jena Dornheim 2°C - One-Click Optimization

Parameter	Start designs	Criteria	Settings	Other	Result designs		
Name	Parameter type	Reference value	Constant	Value type	Resolution	Range	Range plot
1 Strompreis	Optimization	0.34	☒	REAL	Continuous	0.306 0.374	
2 SH	Optimization	1.433	☒	REAL	Continuous	1.2 3	
3 Abw_Temp	Optimization	2	☒	REAL	Continuous	-3 3	
4 kxxLuft	Optimization	2.5	☒	REAL	Continuous	1 3	
5 kxxFels	Optimization	2.8	☒	REAL	Continuous	1 5	
6 Ueberdeckung	Optimization	10	☒	REAL	Continuous	1 15	
7 R	Optimization	11.46	☒	REAL	Continuous	2.5 25	
8 Energieaustrag	Optimization	51.453	☐	REAL	Continuous	10 70	
9 L	Optimization	90	☒	REAL	Continuous	20 200	

Bild 44: Parametrik für den Standort Jena Dornheim

Bei der Paretooptimierung wird einzig der Eingangsparameter Energieaustrag pro m2 Oberfläche variiert.

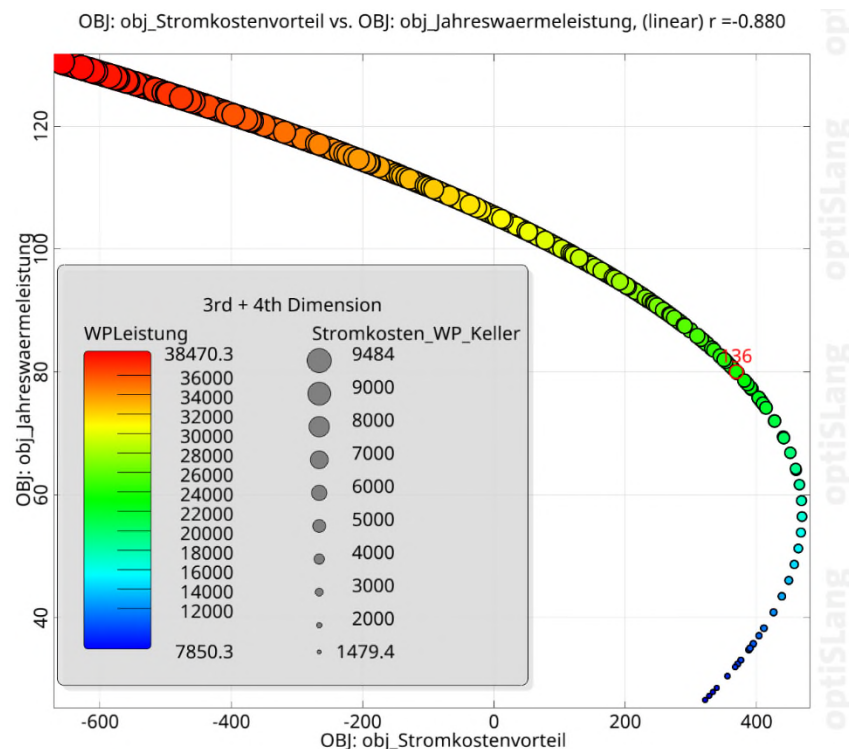


Bild 45: Paretofront der Jahreswärmestromleistung und des Stromkostenvorteils für den Standort Jena Dornheim

Bild 45 zeigt die Paretofront der beiden in Konflikt stehenden Zielfunktionen Maximierung der Jahreswärmeproduktion und des Stromkostenvorteils. Der maximale jährliche Stromkostenvorteil (468€) kann mit einer Wärmepumpenleistung von 17.5 kW bei einer Jahreswärmemenge von 59 MWh erzielt werden (Bild 46-linke Seite).

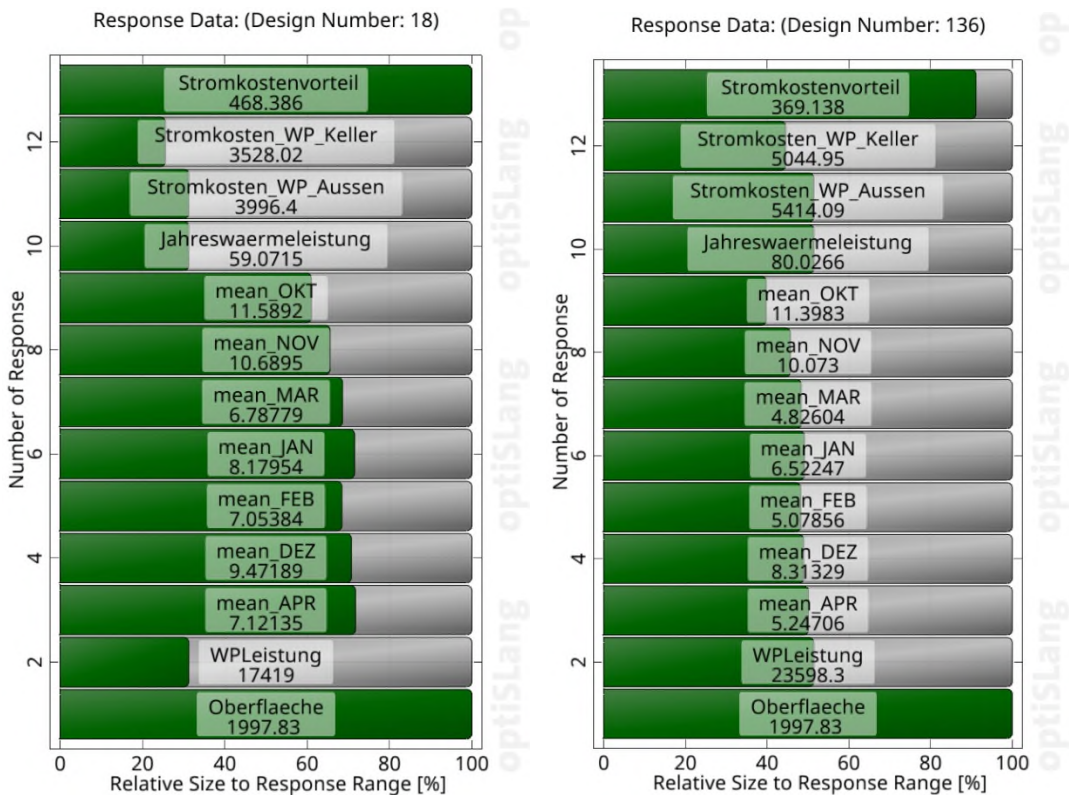


Bild 46: Ergebnischart für das kostenoptimale Design (links) und eines Designs mit optimierter Jahreswärmeeinzugsleistung für den Standort Jena Dornheim

Bild 46-rechte Seite zeigt ein Design der Paretofront mit immer noch akzeptablem Stromkostenvorteil von 370 € mit einer Wärmepumpenleistung von 24 kW bei einer Jahreswärmemenge von 80 MWh.

Optimierung für den Standort Weimar Humboldtstraße

Für den Standort Weimar Humboldtstraße wurden idealisierte Geometrien aus Bild 8, standortspezifische Kennwerte aus Bild 9, eine Überdeckung von 6 m, und eine Abweichung vom Thüringer Mittel von +1°C angenommen.

Humboldtstrasse 1°C - One-Click Optimization

Parameter	Start designs	Criteria	Settings	Other	Result designs		
Name	Parameter type	Reference value	Constant	Value type	Resolution	Range	Range plot
1 Strompreis	Optimization	0.34	☒	REAL	Continuous	0.306 0.374	
2 Abw_Temp	Optimization	1	☒	REAL	Continuous	-3 3	
3 kxxFels	Optimization	1.8	☒	REAL	Continuous	1 5	
4 SH	Optimization	2.428	☒	REAL	Continuous	1.2 3	
5 kxxLuft	Optimization	2.5	☒	REAL	Continuous	1 3	
6 Ueberdeckung	Optimization	6	☒	REAL	Continuous	1 15	
7 R	Optimization	14.42	☒	REAL	Continuous	2.5 25	
8 Energieaustrag	Optimization	51.453	☐	REAL	Continuous	10 70	
9 L	Optimization	64.5	☒	REAL	Continuous	20 200	

Bild 47: Parametrik für den Standort Weimar Humboldtstraße

Bei der Paretooptimierung wird einzig der Eingangsparameter Energieaustrag pro m2 Oberfläche variiert.

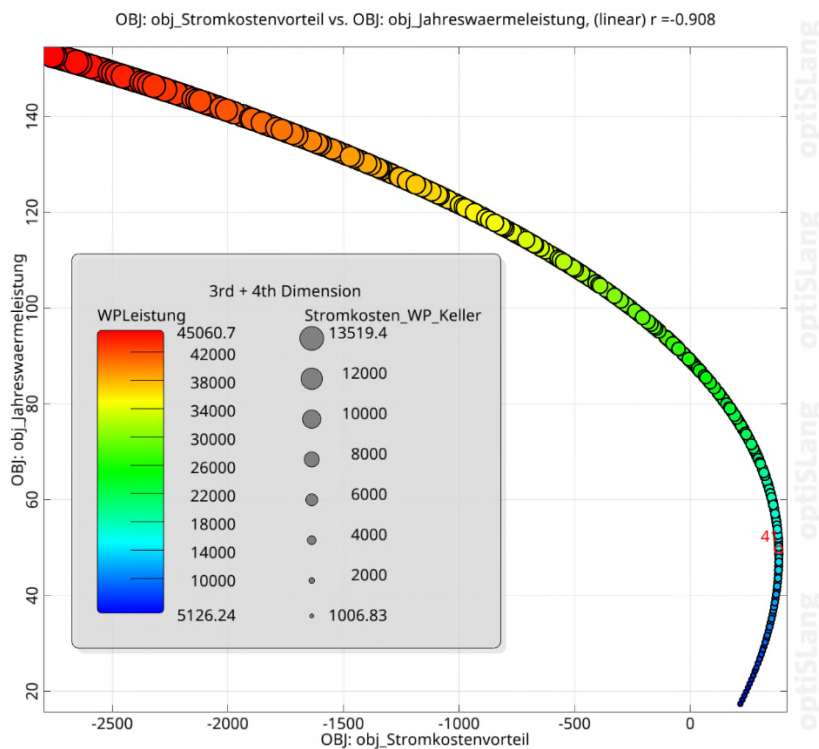


Bild 48: Paretofront der Jahreswärmestromleistung und des Stromkostenvorteils für den Standort Weimar Humboldtstraße

Bild 48 zeigt die Paretofront der beiden in Konflikt stehenden Zielfunktionen Maximierung der Jahreswärmeproduktion und des Stromkostenvorteils. Der maximale jährliche Stromkostenvorteil (383€) kann mit einer Wärmepumpenleistung von 14.6 kW bei einer Jahreswärmemenge von 50 MWh erzielt werden (Bild 49-linker Seite).

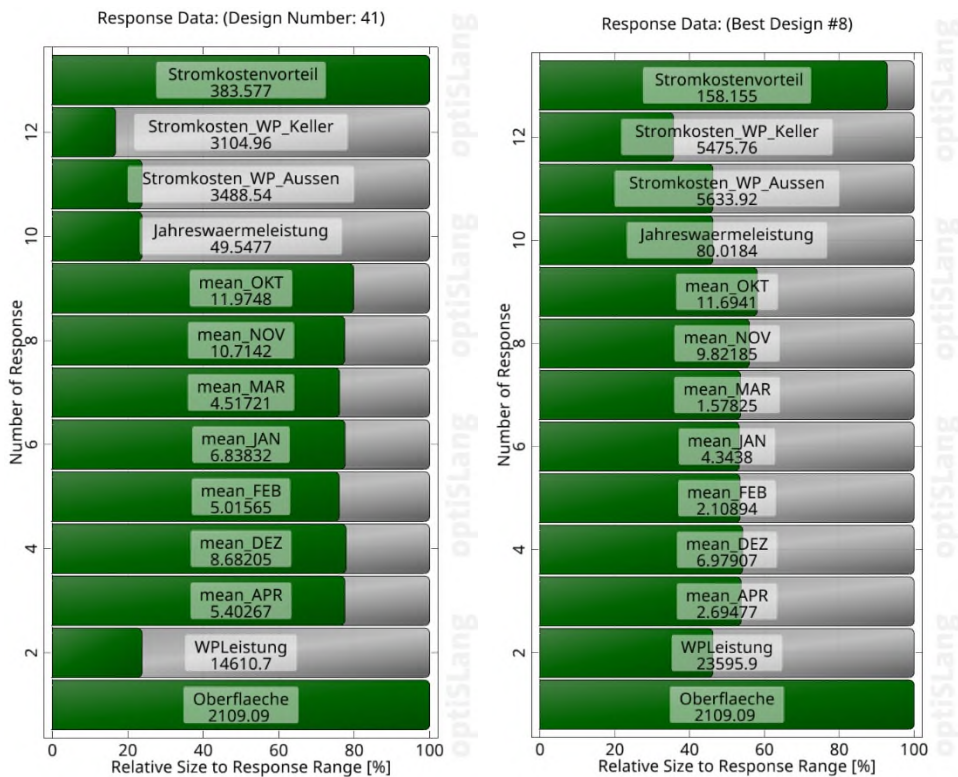


Bild 49: Ergebnisschart für das kostenoptimale Design (links) und eines Designs mit optimierter Jahreswärmeeinzugsleistung für den Standort Weimar Humboldtstraße

Bild 49-rechte Seite zeigt ein Design der Paretofront mit immer noch akzeptablem Stromkostenvorteil von 160 € mit einer Wärmepumpenleistung von 24 kW bei einer Jahreswärmemenge von 80 MWh.

Optimierung für den Standort Leutenberg

Für den Standort Leutenberg wurden idealisierte Geometrien aus Bild 8, standortspezifische Kennwerte aus Bild 9, eine Überdeckung von 12 m, und eine Abweichung vom Thüringer Mittel von -1°C angenommen.

Leutenberg -1°C - One-Click Optimization								
Parameter	Start designs	Criteria	Settings	Other	Result designs			
Name	Parameter type	Reference value	Constant	Value type	Resolution	Range	Range plot	
1 Strompreis	Optimization	0.34	☒	REAL	Continuous	0.306 0.374		
2 Abw_Temp	Optimization	-1	☒	REAL	Continuous	-3 3		
3 L	Optimization	25	☒	REAL	Continuous	5 30		
4 R	Optimization	3.145	☒	REAL	Continuous	2.5 6		
5 SH	Optimization	1.57	☒	REAL	Continuous	1.2 2.5		
6 kxxFels	Optimization	2.1	☒	REAL	Continuous	1 5		
7 kxxLuft	Optimization	2.5	☒	REAL	Continuous	1 3		
8 Ueberdeckung	Optimization	12	☒	REAL	Continuous	1 15		
9 Energieaustrag	Optimization	51.453	☐	REAL	Continuous	10 80		

Bild 50: Parametrik für den Standort Leutenberg

Bei der Paretooptimierung wird einzig der Eingangsparameter Energieaustrag pro m2 Oberfläche variiert.

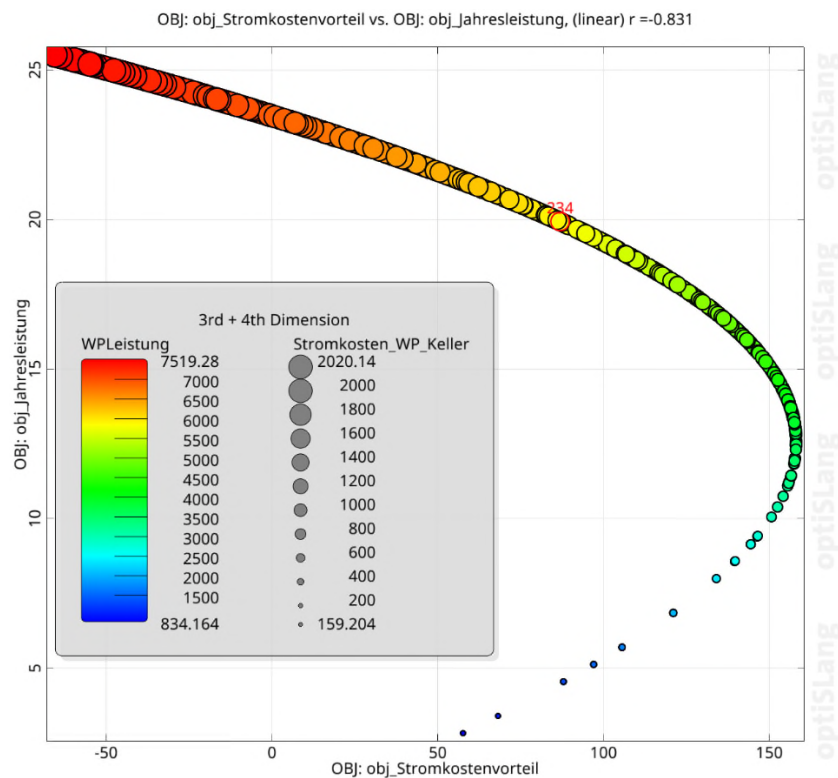


Bild 51: Paretofront der Jahreswärmentzugsleistung und des Stromkostenvorteils für den Standort Leutenberg

Bild 51 zeigt die Paretofront der beiden in Konflikt stehenden Zielfunktionen Maximierung der Jahreswärmeproduktion und des Stromkostenvorteils. Der maximale jährliche Stromkostenvorteil (158€) kann mit einer Wärmepumpenleistung von 3.7 kW bei einer Jahreswärmemenge von 13 MWh erzielt werden (Bild 52-linker Seite).

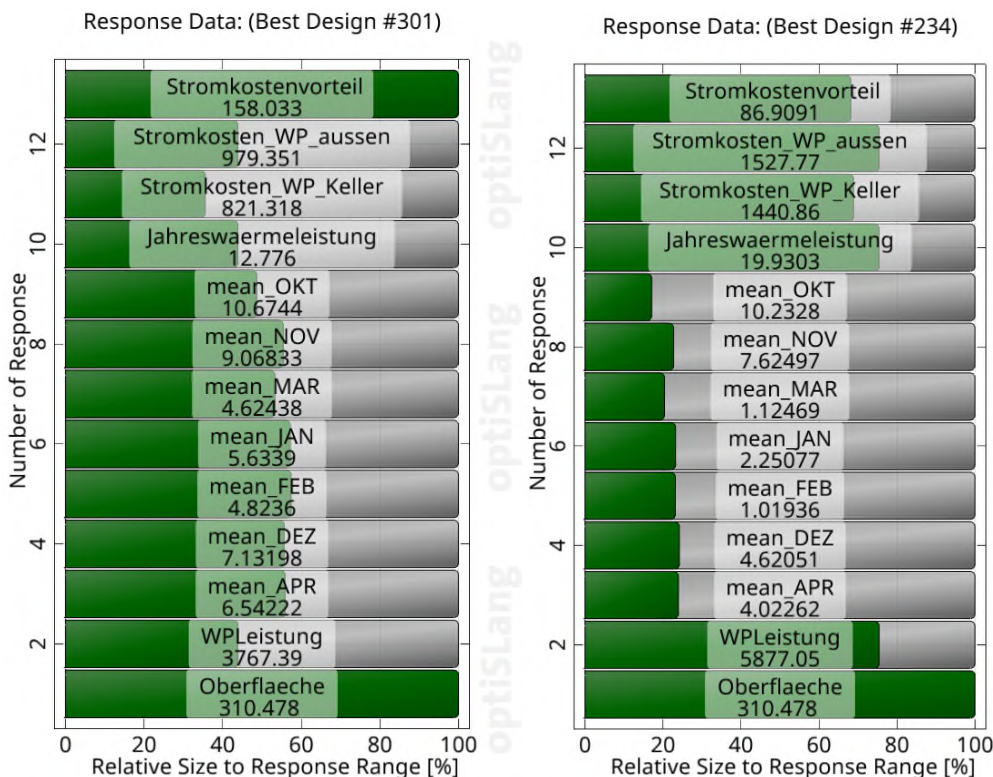


Bild 52: Ergebnisschart für das kostenoptimale Design (links) und eines Designs mit optimierter Jahreswärmeeinzugsleistung für den Standort Leutenberg

Bild 52-rechte Seite zeigt ein Design der Paretofront mit immer noch akzeptablem Stromkostenvorteil von 87 € mit einer Wärmepumpenleistung von 5.9 kW bei einer Jahreswärmemenge von 20 MWh.

Weil ab der Höhle Leutenberg mit einer Oberfläche von 300 m² kein ausreichendes Potential einer Wärmeversorgung mehr erzielt werden kann, wurden die Optimierungsergebnisse kleinerer Hohlräume im Bericht nicht dokumentiert.

Zusammenfassung der Optimierung

Unter Annahme eines Strompreises von 34 ct/kWh wurde eine Optimierung der Kostenvorteile des Betriebes einer Luftwärmepumpe in den Keller und Höhlen gegenüber einem Betrieb an der Oberfläche durchgeführt. Dabei wurden die Geometrien, die Untergrundeigenschaften und die Außentemperaturen der verschiedenen Standorte berücksichtigt.

Kleine und Mittlere Höhlen und Keller (Höhlen und Keller mit bis zu 500 m² Oberfläche) haben ein begrenztes Potential Luftwärmepumpen kostengünstiger als an der Außenluft zu betreiben. In Leutenberg (Oberfläche 300m²) spart ein kostenoptimaler Betrieb 160 € Stromkosten pro Jahr mit einer maximalen WP-Leistung von 3.8 kW und einem Jahresenergieertrag von 12.8 MWh.

Größer Höhlen (ehemalige Brauereikeller) >1000 m² Oberflächen konnten größere Potentiale bereitstellen. Für Weimar Humboldtstraße und Jena Dornheim (jeweils ca 1000 m² Oberfläche konnten für einen kostenoptimalen Betrieb ca. 400 € Stromkosten pro Jahr mit einer maximalen WP-Leistung von 16 kW und einem Jahresenergieertrag von ca. 55 MWh ermittelt werden.

Im den Bierkellern Weimar Ehringsdorf (Oberfläche 2200 m²) konnten im kostenoptimalen Betrieb 2160 € Stromkosten pro Jahr mit einer maximalen WP-Leistung von 65 kW und einem Jahresenergieertrag von ca. 220 MWh ermittelt werden. Betriebsstromkostenersparnisse können bis zu einem Jahresenergieertrag von 400 MWh mit einer maximalen WP-Leistung von 116 kW erzielt werden.

Arbeitspaket 7: Umsetzungsanforderungen für eine Web Applikation zur Potentialabschätzung der Speläothermie

Im AP 7 werden die Anforderungen an eine Web Applikation festgelegt und es wird eine prototypenhafte Implementation eines Webservice zur parametrischen Potentialabschätzung für einen Standort durchgeführt.

Die Bereitstellung eines Webservice wurde prototypenhaft mit Funktionalitäten des optiSLang Webservices umgesetzt. Aus den optiSLang Projekten zur Paretooptimierung wurden optiSLang web Applikationen generiert.

Arbeitspaket 7: Umsetzungsanforderungen für eine Web Applikation zur Potentialabschätzung der Speläothermie

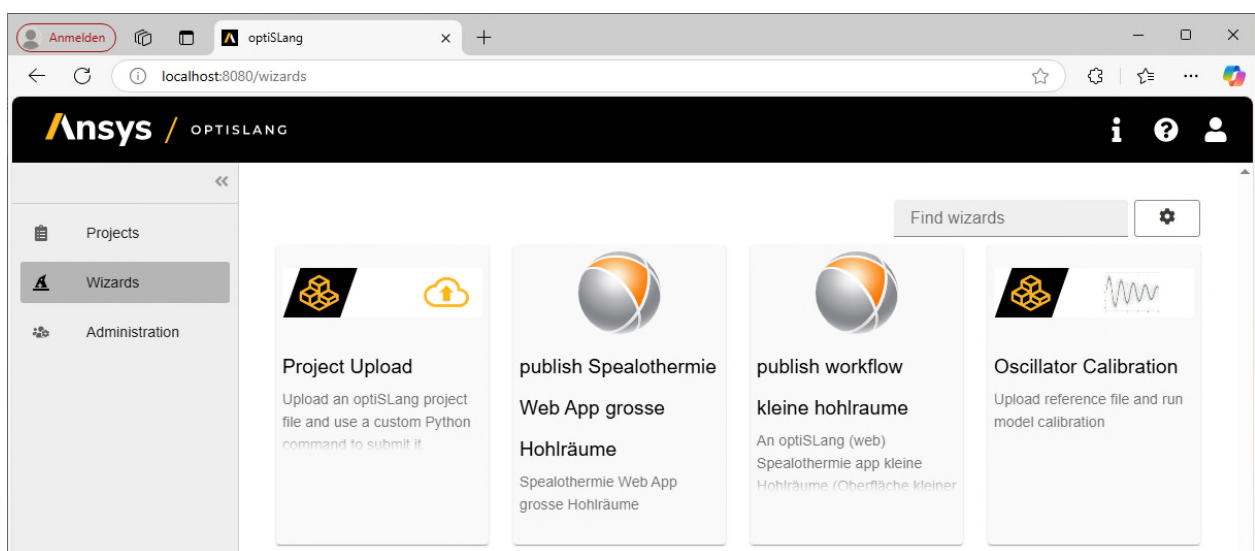


Bild 53: optiSLang Web Apps für den Optimierungsworkflow kleiner/mittlerer und großer Hohlräume

Es wurden eine Web App für kleine und mittlere Hohlräume bis 500 m² Oberfläche sowie eine Webapp für große Hohlräume ab 500 m² konzipiert und erstellt (Bild 53).

Beim Generieren der Web Apps werden alle Parameter, die in der Applikation frei wählbar sein sollen, als sogenannte Platzhalter definiert. Bild 54 zeigt die Parameter der Web App für große Hohlräume, welche nach dem Start des optiSLang Web Service sowie der Webapp im Webbrowser befüllt werden können. Die standortabhängige Parametrik beinhaltet die Geometrie, die Überdeckung, die Abweichung vom 20-jährigen Thüringer Temperaturmittel, die Wärmeleitfähigkeit des Felsen und der Luft sowie den Strompreis. Nach Eingabe der Parametrik und eines Projektnamen wird der optiSLang workflow zur Optimierung der Jahresleistung sowie der Stromkostenersparnis im Browser gestartet. Der Workflow wird auf dem Host-Server des optiSLang Web Service ausgeführt und es wird im Browser ein online Monitoring zur Verfügung gestellt (Bild 55).

Jede Ausführung eines Parametersatzes wird im optiSLang Web Service als Projekt hinterlegt. Jedes Projekt wird gespeichert und das optiSLang Postprocessing kann vom lokalen Rechner gestartet werden.

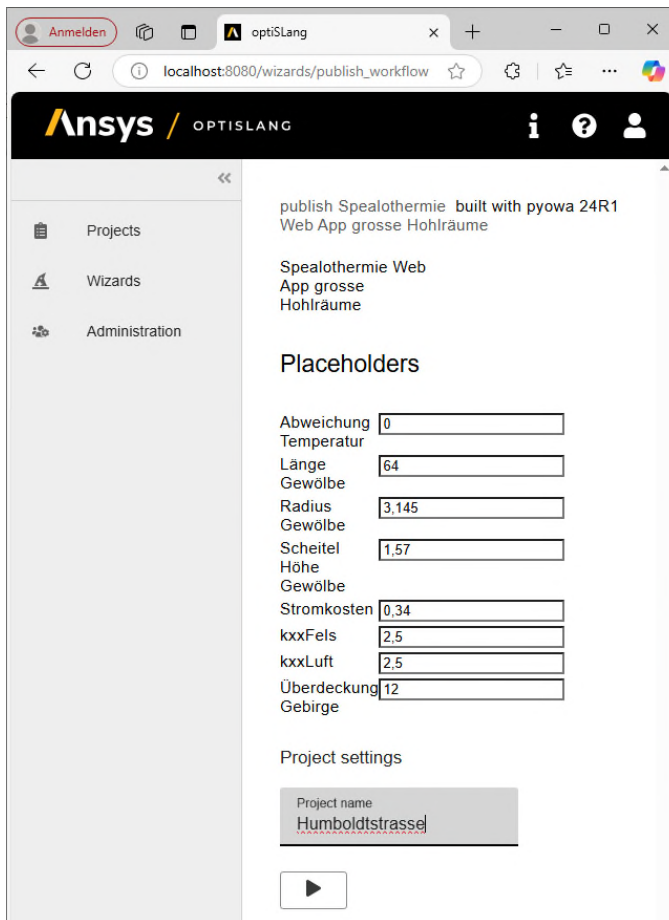


Bild 54: Parametrik der Web App

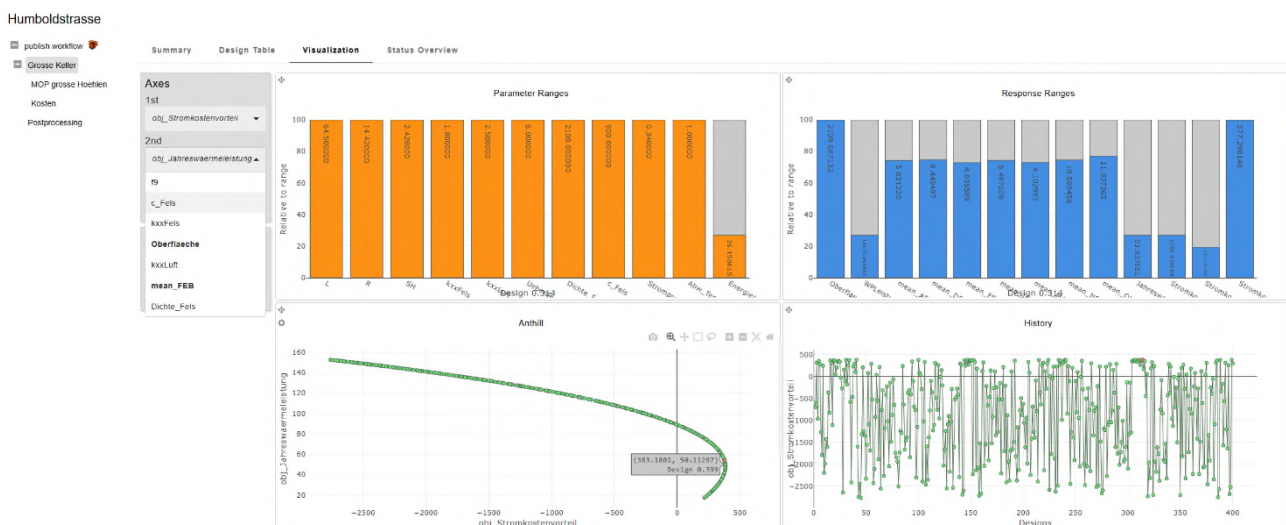


Bild 55: Interaktives online Monitoring im Webservice

Die Prototypenhafte Implementierung mit verfügbaren Konfigurationen des optiSlang Web Service ist momentan nur von Nutzern sicher anzuwenden, welche die zu Grunde liegenden optiSlang Workflows

beherrschen. In der momentanen Web Oberfläche zur Eingabe der Parametrik stehen noch keine Hilfen und Erklärungen zur Verfügung, die einen barrierefreien Zugang für zukünftige adressierbare Nutzer der Potentialabschätzung ohne Wissen um die zu Grunde liegenden optiSLang workflows ermöglichen. Deshalb wurde ein Layout einer barrierefreien, interaktiven Parametereingabe in Excell konzipiert.

Weimar Humboldtstrasse						Vergleich Quader	
Tonne							
Hohlraumgeometrie							
Radius (r) m	14,42	Breite	Min 2,5	Max 25			
Länge (l) m	64,50	Länge	Min 5	Max 200	Länge	64,50	
Scheidelhöhe (h) m	2,43	Höhe	Min 1,2	Max 3	Höhe	2,43	
Segment Breite (s) m	16,02				Breite	16,02	
Kreisbogenlänge (b) m	16,98						
Mantelfläche (L) m ²	1.095,22						
Seitenfläche (S) m ²	26,40						
Oberfläche (A) m ²	2.181,05				Oberfläche	2.457,05	
Volumen (V) m ³	1.702,49				Volumen	2.508,21	
Verifikation Hohlraumgeometrie							
Oberfläche A Messung m ²	2.183,00						
Volumen V Messung m ³	1.974,00						
%tuelle Abweichung Volumen	-13,75%						
%tuelle Abweichung Oberfläche	-0,09%						
Überdeckung (m)	6,00	Min 1		Max 15			
Wärmeleitfähigkeit Fels (W/(mK))	1,80	1 sehr gering Ton trocken		5 sehr gut Fels wassergesättigt			
Wärmeleitfähigkeit Luft (Zirkulation) (W/(mK))	2,50	1 schlechte Zirkulation		3 sehr gute Zirkulation			
Abweichung Thüringer Mittel °C	1,00	(-3) Höhenlage Rennsteig		3 Tal & Stadt z.B. Jena			
Strompreis (€/kWh)	0,34						

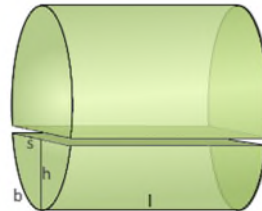


Bild 56: Interaktives Eingabeformat einer barrierefreien Web Applikation

Bild 56 zeigt ein Layout einer möglichst barrierefreien Eingabemaske für notwendige Parameter zur Potentialabschätzung der Speläothermie. Alle einzugebenden Parameter sind gelb hinterlegt. Für alle Parameter sind minimale und maximale Werte hinterlegt, für welche die Metamodellierung durchgeführt worden ist.

In Realität stehen dem Anwender idealerweise Scans der Höhlen mit Gesamtoberfläche und Volumina zur Verfügung und er kann die Maße der idealisierten Geometrie so einstellen, dass die Gesamtoberfläche und Volumen möglichst gut approximiert ist. Alternative stehen dem Anwender Maße von Länge/Höhe/Breite der Keller zur Verfügung, aus denen sich die Gesamtoberfläche approximieren lässt. In jedem Fall ist eine interaktive Eingabe der Geometrie des idealisierten Hohlraumes mit einer Berechnung von Oberfläche und Volumina für den Abgleich mit vorhandenen Maßen notwendig.

Darüber hinaus ist eine interaktive Definition von Standort für eine interaktive Bereitstellung der Abweichungen vom Thüringer Mittel und eine interaktive Definition wichtiger Parameter des anstehenden Felsen wünschenswert.

Literaturverzeichnis

<https://www.ansys.com/products/connect/ansys-optislang>

Ansys optiSLang User Documentation, 2023R1 ed., Weimar, Germany, Ansys Dynardo GmbH, Accessed April 18, 2024.

https://rekis.hydro.tu-dresden/rekis-expert/#/laenderdaten/tn_2_5_5

Temperaturabweichungen Wintermitteltemperatur in Thüringen

<https://www.laenderdaten.info/Europa/Deutschland/Klima-Thueringen.php>

durchschnittliche monatliche Temperaturen in Thüringen