



## MODELLGESTÜTZTE BETRIEBSOPTIMIERUNG EINES BODENABSORBERS ZUR GEBÄUDEHEIZUNG UND –KÜHLUNG

Maximilian Friebe<sup>1</sup>, Felix Schumann<sup>2</sup>, Max Bachmann<sup>1</sup>, Martin Kriegel<sup>1</sup>, Tomás Fernandez-Steeger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin, Deutschland,

E-Mail: [maximilian.friebe@tu-berlin.de](mailto:maximilian.friebe@tu-berlin.de)

<sup>2</sup>FG Ingenieurgeologie, Technische Universität Berlin, Deutschland,

E-Mail: [felix.schumann@tu-berlin.de](mailto:felix.schumann@tu-berlin.de)

### Kurzfassung

In diesem Beitrag werden verschiedene Betriebsszenarien für einen Bodenabsorber zur Gebäudeheizung- und Kühlung anhand eines validierten Simulationsmodells untersucht und hinsichtlich ihrer Auswirkung auf den Boden analysiert. Es zeigt sich, dass ein balancierter Heiz- und Kühlbetrieb des Bodenabsorbers, aufgrund des erheblichen Wärmeeintrags, durch den Keller des Gebäudes in den Untergrund, nicht möglich ist. Ein auf den Gebäudeheizbetrieb optimierter Bodenabsorber-Betrieb weist signifikante Einsparpotentiale im Vergleich zum derzeitigen Gebäudebetrieb auf und hält die Grenzwerte der Bodentemperaturen ein. Aufgrund der erhöhten Bodentemperatur ist ein Kühlbetrieb über den Bodenabsorber erst nach 3 Jahren reinem Wärmeentzug möglich.

### Abstract

In this paper, different operating scenarios for a ground absorber used for building heating and cooling are investigated. The impact on the surrounding earth is analysed using a validated simulation model. It is shown that a balanced heating and cooling operation of the ground absorber is not possible due to the considerable heat input through the basement of the building into the ground. A ground absorber which is optimised for building heating has significant savings potentials compared to the current building operation and complies with the limits of the ground temperature. Due to the increased ground temperature, cooling the building using the ground absorber would only be possible after 3 years of heat extraction without returning heat to the ground via cooling.

### Einleitung

Mit einer Gesetzesnovelle ist 2021 eine Verschärfung des Bundesklimaschutzgesetzes (KSG) beschlossen worden. Diese sieht bis zum Jahr 2030 eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands von mindestens 65 % im Vergleich zu 1990 vor. Mit

einem Anteil von ca. 30 % (Umweltbundesamt, 2020) hat der Gebäudesektor dabei einen erheblichen Anteil an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland. Eine Ursache dafür ist der geringe Anteil erneuerbarer Energien in der Wärmeversorgung der aktuell bei nur ca. 15 % liegt (Umweltbundesamt, 2021)

Geothermische Systeme bieten die Möglichkeit erneuerbare Energie für die Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden zu nutzen und somit die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

Ein Praxisbeispiel für ein solches System findet sich in der 2004 errichteten Universitätsbibliothek (BIB) der TU und UDK in Berlin. Den Kern des Energiekonzeptes der BIB bildet ein Fundament-Bodenabsorber (BA) zur Gebäudekühlung und -heizung. Dabei handelt es sich um einen Flachkollektor, der sich unterhalb des Fundaments befindet. Zwischen BA und Kellerfundament befinden sich 10 cm Dämmung (Wärmeleitfähigkeitsgruppe 050). Wie in Abbildung 1 dargestellt, dient der BA im Winter als Wärmequelle für eine Wärmepumpe (WP), welche über eine Betonkerntemperierung (BKT) die Grundwärmelast des Gebäudes abdecken soll.

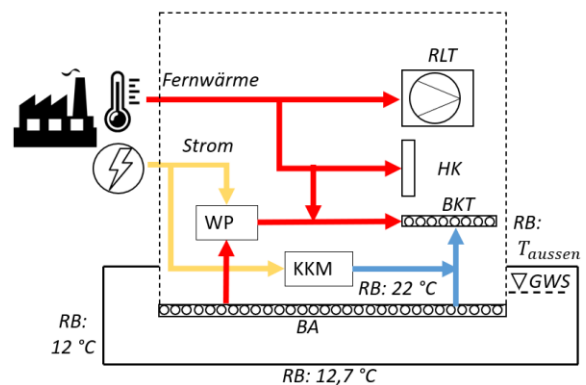


Abbildung 1: Schema Wärme- und Kälteversorgung der BIB (Wärme: rot, Strom: gelb, Kälte: blau) und Temperaturrandbedingungen (RB)

Als zweite Wärmequelle dient Fernwärme, welche die Heizkörper (HK) im Gebäude versorgt und bei

Bedarf zur Nachheizung der BKT dient. Im Kühlfall soll der BA als Kältequelle für eine freie Kühlung über die BKT genutzt werden. Reicht die freie Kühlung nicht aus, kann zusätzliche Kälte über Kompressions-Kältemaschinen (KKM) bereitgestellt werden. Bei der Gebäudeplanung ist von ausgeglichenen Wärmeentzugs- und Wärme-einbringungsmengen des BA ausgegangen worden. Die Bodentemperaturen werden während des Betriebs über fünf Messstellen, die sich an den Ecken des Gebäudes und in der Mitte befinden, meterweise jeweils in der Tiefe von 1 bis 9 m unterhalb des BA, überwacht. In den ersten beiden Jahren nach Fertigstellung der BIB sind aufgrund von Problemen bei der Heizungsregelung nur geringe Wärmemengen entzogen worden und somit fast ausschließlich Wärme im Kühlbetrieb in den Untergrund eingetragen worden. Das hat dazu geführt, dass die Bodentemperaturen stark angestiegen sind und der BA nicht mehr für den Kühlbetrieb genutzt werden konnte. Bis 2010 ist der BA dann ausschließlich zum Heizen verwendet worden und ist seitdem außer Betrieb gewesen. Im Oktober 2020 ist der BA wieder in einen Heizbetrieb überführt worden.

Ziel dieser Untersuchungen ist es gewesen einen optimierten und nachhaltigen Betriebsmodus für den BA zu identifizieren, bei dem das Verhalten des Untergrundes und die Gebäudetechnik zusammen betrachtet werden.

Zu diesem Zweck sind detaillierte thermische Modelle für das Gebäude und den Untergrund erstellt, mit Messdaten validiert und anschließend über Lastprofile und die Kellertemperatur gekoppelt worden. Damit sind ausgewählte Betriebsszenarien untersucht und analysiert worden. Außerdem ist bewertet worden, um zu prüfen, ob langfristig auch eine nachhaltige Bereitstellung von Kälte über den BA realisierbar ist.

## Methoden

### Untergrundmodell

Um das Verhalten des Untergrundes durch die Nutzung des Bodenabsorbers zu verstehen und Wärmeentzugs- und -Eintragslasten zu bestimmen, wurde ein Untergrundmodell mit den geologischen Schichten unterhalb des Gebäudes mitsamt Fundament- und Bodenabsorberplatte erstellt. Da sich Gebäudeteile und Geologie in ihrer Mächtigkeit und Ausdehnung stark unterscheiden, wurde mittels der Software MeshIt vom GFZ Potsdam ein unstrukturiertes Delaunay-Tetraedernetz für eine Finite-Elemente (FE)- Modellierungen erstellt (siehe Abbildung 2). Aufbau und Parameter des Untergrundes sind aus dem Baugrundgutachten, sowie Profilen aus der Bohrdatenbank „FIS-Broker“ des Berliner Senats abgeleitet worden. Das Modell besteht aus 3 Bodenschichten (1-3) und dem Fundament samt Bodenabsorber (siehe Tabelle 1). Das Untergrundmodell hat eine Grundfläche von

320 x 270 m und reicht bis in eine Tiefe von 30 m. Die wichtigsten Parameter für die Berechnung des Wärmetransportes im Untergrund sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Modellierung und die verschiedenen Simulationen wurden mit der Software FeFlow von DHI durchgeführt.

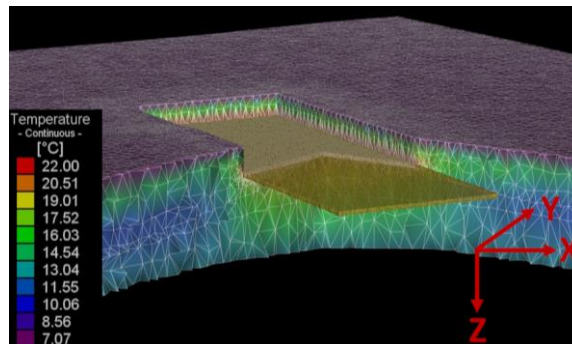


Abbildung 2: Ausschnitt unstrukturiertes Untergrundmodell samt Bodenabsorber (gelb) mit Untergrundtemperaturverteilung vom Oktober 2020; erstellt in FeFlow (in z-Richtung 1,5-fach überhöht)

Tabelle 1: bei der Simulation verwendete Bodenparameter

Aufbau	Porosität	Wärmeleitfähigkeit in W/(mK)	Spez. Wärmekapazität in MJ/(m³K)
1	0,3	2,7	2,5
2	0,4	2,9	2
3	0,25	2,7	2,5
BA	0,025	0,4	1,85

### Rechtliche und Technische Rahmenbedingungen:

Nach VDI 4640 Blatt 1 sollte die Speichertemperatur im Untergrund nicht auf mehr als 20 °C erhöht werden. Für die Abkühlung des Untergrundes gibt es keine Festlegungen, welche diese begrenzen. Wichtig ist nur, dass der Untergrund nicht gefroren wird. Die Temperatur des durch den Bodenabsorber fließenden Wassers sollte aus technischen Gründen nicht unter 4° C sinken, da dem Wasser im BA kein Frostschutzmittel zugesetzt ist. Aufgrund der durchschnittlichen Temperaturspreizung von 2 K zwischen Austrittstemperatur der Wärmepumpe und Untergrundtemperatur, in den Messungen, wurde die untere Temperaturgrenze 1 m unterhalb des BA auf 6 °C festgelegt.

### Ausgangszustand:

Der BA befindet sich im Grundwasser auf einer Tiefe von 30 NHN. Die durchschnittliche Grundwassertemperatur im Berliner Raum liegt bei 10 – 12 °C (Henning & Limberg, 2012). Aus hydrogeologischen Karten wurde für das Untersuchungsgebiet eine sehr geringe Grundwasserfließgeschwindigkeit bestimmt, was eine gute Voraussetzung für die Speicherung von Wärme/Kälte darstellt. Der Keller oberhalb des BA weist im Jahresdurchschnitt eine Temperatur von 22 °C auf. Dieser Wärmeeintrag wurde bei der Planung des BA scheinbar nicht berücksichtigt. Es wird jedoch vermutet, dass der Keller des Gebäudes

den Bereich unterhalb des BA kontinuierlich erwärmt. Im Oktober 2020 lag die Grundwassertemperatur 1 m unterhalb des Bodenabsorbers bei durchschnittlich 19,4 °C. Diese Temperatur wurde als Startbedingung bei der instationären Simulation des Bodens verwendet.

#### Randbedingung:

Für das Modell wurden verschiedene vereinfachte Randbedingungen festgelegt, die sich aus den natürlichen Bedingungen ergeben. In Abbildung 1 sind die Temperaturrandbedingungen dargestellt. Für die Außentemperatur wurde eine Zeitreihe der Tagesdurchschnittstemperatur in Berlin angesetzt. Als Temperatur auf den vertikalen Grenzflächen wurde die durchschnittliche oberflächennahe Grundwassertemperatur, welche 12 °C beträgt, festgesetzt (Henning & Limberg, 2012). Die Temperaturrandbedingung an der unteren Grenzfläche des Modells entspricht mit konstant 12,7 °C der Grundwassertemperatur in 30 m Tiefe (Senat für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, 2021). Die Temperaturrandbedingung für den Keller wurde mit 22 °C festgelegt. Auf der Bodenabsorberseite wurde eine Wärme-Senken/Quellen Randbedingung gesetzt, um die Entzugs- und Eintragsleistung des Bodenabsorbers darzustellen. Die Entzugs- und Eintragsenergien wurden dabei in monatlicher Auflösung hinterlegt.

#### Gebäudemodell

Mithilfe der Software IDA-ICE wurde ein detailliertes Gebäudemodell der BIB erstellt und mit vorhandenen stündlichen Verbrauchsdaten aus dem Jahr 2018 validiert. Der „root-mean-square error“ (RMSE) zwischen Simulation und Messung beträgt weniger als 15 %. Damit ist das Modell als ausreichend genau anzusehen.

Bei Analyse der Messdaten der BIB wurden fehlerhafte Einstellungen der Heizkurven der Wärmeübergabesysteme identifiziert, welche dafür sorgten, dass nur ein sehr geringer Teil der Wärmeübergabe (< 5 %) im Gebäude über die BKT erfolgte. Um das Potenzial des BA als Wärmequelle zu nutzen, war daher eine gebäudeseitige Optimierung der Heizungsregelung notwendig. Dafür wurden in einer separaten Parameterstudie verschiedene Heizkurveneinstellungen untersucht und die Einstellung, bei denen die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen auftreten, identifiziert. Aus diesen Untersuchungen resultierte ein Wärmeentzugsprofil des Bodenabsorbers (für ein Testreferenzjahr) für einen optimierten Heizbetrieb, welches im Folgenden als mögliches Betriebsszenario genutzt wurde.

Beim Kühlbetrieb konnten keine regelungstechnischen Probleme bei der Nutzung der BKT-Kälte identifiziert werden. Daher konnten Messdaten genutzt werden, um den Kühlbetrieb des Gebäudes abzubilden. Eine Gebäudesimulation zur Abbildung des Kühlbetriebs war daher nicht notwendig.

## Ökologische und ökonomische Analyse

Um verschiedene Betriebsszenarien auf Gebäudeebene bewerten zu können, wurde eine ökologische und ökonomische Betrachtung des BA-Betriebs durchgeführt. Dabei wurde ermittelt, welche Einsparungen durch einen BA-Betrieb im Vergleich zum Betrieb ohne BA möglich sind. Dafür war im ersten Schritt eine energetische Analyse des BA-Betriebs notwendig.

Grundsätzlich lässt sich im Gebäude durch die Nutzung des BA als Wärmequelle Fernwärme einsparen. Dafür entsteht ein zusätzlicher Strombedarf für die WP und die integrierte Pumpe, welche den BA im Heizbetrieb durchströmt. Während der Heizperiode 20/21 konnte anhand von Messdaten eine Arbeitszahl der WP von 4,7 errechnet werden. Diese ist aufgrund der fehlenden Regelbarkeit der WP über den Betriebszeitraum annähernd konstant.

Durch die Nutzung des BA im Kühlbetrieb kann Strom für KKM eingespart werden. Dabei entsteht ein zusätzlicher Strombedarf für die BA-Pumpe, welche für die Durchströmung des BA im Kühlbetrieb sorgt. Die elektrische Leistung der BA-Pumpe liegt im freien Kühlbetrieb mit einem konstanten Volumenstrom von 100 m<sup>3</sup>/h bei 11 kW.

Zur Ermittlung des Strombedarfs der KKM wurde der SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) der Kühlperiode 2016 verwendet, welcher bei 3,13 lag.

Als ökologisches Bewertungskriterium wurden die jährlichen Einsparungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen genutzt und als ökonomisches Kriterium die jährlichen Einsparungen von Energiekosten. Als Referenzwert zur Berechnung der Einsparungen dienten die CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. Energiekosten durch statische Heiz- (BKT und HK) und Kühlsysteme (BKT) ohne Betrieb des BA.

In Tabelle 2 sind die verwendeten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren der verwendeten Energieträger dargestellt. Dabei wurde für Fernwärme ein statistischer Wert für Fernwärmeversorgung in Berlin verwendet. Für Strom wurde der Emissionsfaktor für den deutschen Strommix 2019 angesetzt. Als Energiekosten wurden 0,08 €/kWh für Fernwärme und 0,17 €/kWh für Strom verwendet.

Tabelle 2: verwendete Emissionsfaktoren

	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor in kg/kWh
Fernwärme	0,2935 (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2019)
Strom	0,408 (Umweltbundesamt, 2021)

#### Untersuchte Betriebsszenarien

Für den Optimierungsprozess wurden verschiedene Betriebsszenarien definiert und simuliert, um das Verhalten von BA und Untergrund besser zu

verstehen und die Kopplung zwischen Untergrundmodell und Gebäudemodell herzustellen.

#### Ausgangszustand: Kein Betrieb des BA

In diesem Szenario wird der Bodenabsorber nicht betrieben. Dies soll Rückschlüsse über Ursachen der Temperaturerhöhung des Untergrunds ermöglichen. Als Anfangsbedingung dient eine ungestörte Temperatur des Bodens von 12 °C.

#### Betriebsszenario 1: Wärmeeinbringung – und Entzug nach Planung

In diesem Szenario wird der Betrieb, entsprechend der ursprünglichen Planung, mit einem Wärmeentzug von 142 MWh/a in der Heizperiode und identischem Wärmeeintrag durch die Kühlung in der warmen Jahreszeit (bilanzierter Betrieb) untersucht. Das entspricht jährlich 1.775 Vollbenutzungsstunden (VBH) der WP.

#### Betriebsszenario 2: maximaler Verbrauch im Gebäude

Im zweiten Szenario wird der maximal mögliche Heizwärmebedarf der BIB mithilfe des Bodenabsorbers gedeckt. Begrenzt wird dies durch die Verdampferleistung der Wärmepumpe (80 kW), sowie das Wärmelastprofil des Gebäudes. Beschränkungen durch die Regelbarkeit der BKT werden hierbei außer Acht gelassen, so dass alle Wärmelasten bis zu 80 kW von der Wärmepumpe gedeckt werden. Der Wärmeentzug liegt bei diesem Szenario bei 329 MWh/a. Das entspricht 4.114 VBH der WP im Jahr.

#### Betriebsszenario 3: optimierter Heizbetrieb

In diesem Szenario wird das auf einen optimalen Gebäudebetrieb abgestimmte Wärmeentzugsprofil verwendet. Dieses wurde mithilfe des Gebäudemodells identifiziert. Das entspricht 3.695 VBH der WP im Jahr.

#### Betriebsszenario 4: optimierter Heizbetrieb + Kühlbetrieb

In Betriebsszenario 4 wird untersucht, ob und ab wann es möglich ist, im Rahmen des optimierten Heizbetriebs, unter Beachtung der vorher beschriebenen Temperaturgrenzwerte, auch einen Teil der Gebäudekühlung der BIB wieder über den BA zu realisieren.

In den Betriebsszenarien 1-4 stellt der Oktober 2020 den Simulationsbeginn dar. Die Betriebsszenarien werden jeweils für 7 Jahre simuliert.

## Ergebnisse

### Boden

Im Ausgangszustand wurde der Boden nicht durch Heiz- und Kühlzwecke beeinflusst. Bei anfangs ungestörten Untergrundtemperaturen (12°C) erreichte der Boden über den Kellerwärmeeintrag schon nach 3 – 4 Jahren einen quasi-stationären Zustand von ca.

19.4 °C 1 m zentral unterhalb des BA (siehe Abbildung 3). Dieser Wert liegt innerhalb des Temperaturbandes des Messwertes an dieser Position von 2018-2019, nachdem der BA acht Jahre außer Betrieb war. Anhand des Kurvenverlaufs ist zu erkennen, dass die jahreszeitlichen Außentemperaturschwankungen keine signifikanten Auswirkungen auf die Bodentemperaturen im zentralen Bereich unterhalb des BA haben.

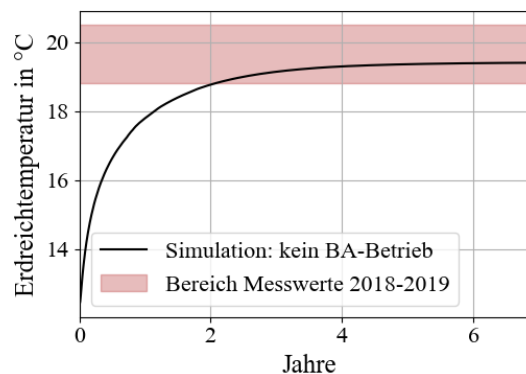


Abbildung 3: Erwärmung Bodentemperaturen (1 m unterhalb des BA) mittels Wärmeeintrag über den Keller der BIB

Die Simulationen der einzelnen Szenarien wurden auf einen Zeitraum von 7 Jahren begrenzt, da schon nach 3–4 Jahren ein gleichmäßiger Zyklus der Untergrundtemperaturen erreicht wurde. Die Untergrundtemperaturen auf der Abbildung 4 beziehen sich auf die Temperaturen in 1 m Tiefe zentral unterhalb des BA, da hier der Einfluss des BA auf den Untergrund am größten ist.

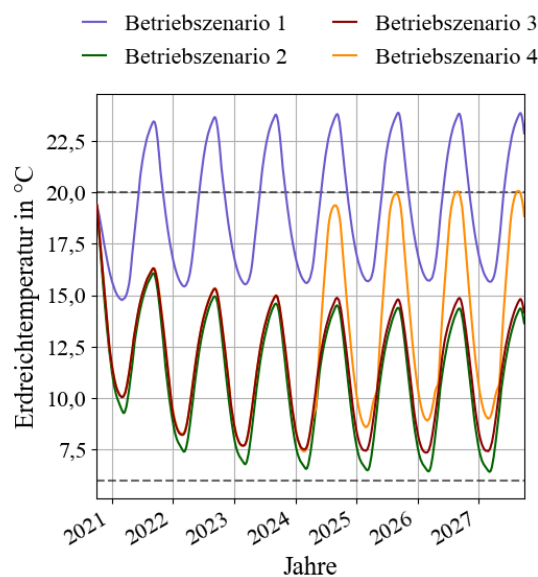


Abbildung 4: simulierte Bodentemperaturen (1 m unter Bodenabsorber) der verschiedenen Szenarien, gestrichelte Linien: Temperaturgrenzen



Das Szenario 1 stellt den ursprünglich geplanten Heiz- und Kühlzyklus der BIB dar. Hierbei wird der obere Grenzwert von 20 °C nicht eingehalten. Zum Ende jeder Kühlperiode erreichten die Temperaturen ca. 24 °C. Die Temperaturspreizung zwischen Heiz- und Kühlperiode lag bei ca. 8,6 K.

In den Szenarien 2 und 3 werden sowohl die rechtlichen als auch die technischen Grenztemperaturen eingehalten. Grundsätzlich wichen die simulierten maximalen und minimalen Temperaturen zwischen den beiden Szenarien nur wenig voneinander ab. Das resultierte aus dem geringen Unterschied an VBH zwischen beiden Szenarien. Die Erwärmung des Bodens um ca. 7 K ist vollständig auf den Wärmeeintrag über den Keller zurückzuführen, da der BA in der Simulation nicht zur freien Kühlung genutzt wurde und dadurch kein Wärmeeintrag in den Sommermonaten erfolgte.

Im Betriebsszenario 4 wurde das Szenario 3 ab dem vierten Jahr um freie Kühlung erweitert, da nach 3 Jahren im Betriebsszenario 3 die maximale Abkühlung des Bodens erreicht wurde. Ab dem 4. Jahr wurde über den BA eine Wärmemenge von 120 MWh/a in den Untergrund eingespeichert. Das entspricht der, unter Einhaltung der Grenztemperaturen, maximal möglichen Wärmemenge (siehe Abbildung 4). Ab dem vierten Jahr stiegen die Temperaturen in der Zeit der freien Kühlung deutlich an. Beim jahreszyklischen Wechsel zwischen Kühl- und Heizperiode pendelte sich die maximale Untergrundtemperatur bei 20 °C ein.

### Ökologische und ökonomische Analyse

Die Energieeinsparpotentiale der betrachteten Betriebsszenarien sind in Tabelle 3 dargestellt. Bei allen Szenarien wird durch Wärmeentzug des Bodenabsorbers Fernwärme eingespart. Gleichzeitig entstand ein zusätzlicher Strombedarf für die WP. In den Szenarien 1 und 4 wurde zusätzlich auch ein Teil des Kühlbetriebs mithilfe des Bodenabsorbers realisiert. Dadurch wurde Strom für die KKM eingespart. Aufgrund der geringen Kältemenge und der hohen Anzahl an Kühlstunden (> 3000 h/a) in der BIB fiel der Strombedarf für die BA-Pumpe jedoch übermäßig stark ins Gewicht, so dass der SEER der freien Kühlung mit 3,46 (Szenario 1) und 2,93 (Szenario 4) nur leicht über bzw. sogar unter dem SEER der KKM lag.

Tabelle 3: energetische Analyse der betrachteten Betriebsszenarien

Betriebs-szenarien	Einsparungen Fernwärme in MWh/a	Mehraufwand Strom in MWh/a
1	142	26
2	329	70
3	296	63
4	296	60

Auf Abbildung 5 sind die daraus resultierenden Einsparungspotentiale von CO<sub>2</sub>-Emissionen und

Energiekosten für die betrachteten Betriebsszenarien dargestellt. Es zeigt sich ein signifikantes Einsparpotential von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energiekosten durch den Betrieb des BA. Bei einem optimierten Gebäudebetrieb (Szenario 3) lag das Einsparpotential sowohl für die CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch für die Energiekosten mehr als doppelt so hoch wie beim Betrieb entsprechend der Planung (Szenario 1). Das größte Einsparpotential zeigte Szenario 2, da hier die größte Wärmemenge entzogen wird. Durch die freie Kühlung in Szenario 4 verringerten sich Energiekosten- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Vergleich zu Szenario 3 leicht.

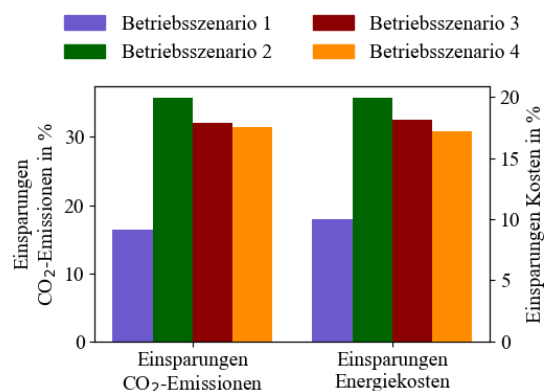


Abbildung 5: Einsparpotential von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Energiekosten (für stat. Kühl- und Heizsysteme)

### Diskussion

Die simulierten Bodentemperaturen der Betriebsszenarien ohne Wärmeeintrag durch den BA zeigen außerhalb der Heizperiode einen deutlichen Anstieg der Bodentemperaturen, jenseits der natürlichen Grundwassertemperaturrandbedingungen. Wie Abbildung 3 zeigt, haben die jahreszeitlichen Schwankungen der Außenlufttemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Bodentemperaturen im zentralen Bereich unter dem BA. Somit sind die erhöhten Bodentemperaturen auf den Einfluss der Kellertemperatur zurückzuführen, welche deutlich oberhalb der umgebenden Untergrundtemperatur liegt.

In Szenario 4 konnte entsprechend der Simulation im Sommer über den Bodenabsorber eine maximale Wärmemenge von 120 MWh/a aus dem Gebäude entzogen werden. Allerdings ist dabei zu beachten, dass in der Simulation der optimierte Heizbetrieb für ein Testreferenzjahr berücksichtigt wurde. Je nach Klima kann der Wärmeentzug dabei auch deutlich von den ermittelten 296 MWh jährlich abweichen und somit auch die maximal mögliche Wärmeeinbringung variieren. In einem besonders milden Winter besteht die Möglichkeit, dass der BA in der folgenden Kühlperiode nicht zur Kühlung verwendet werden kann. Daher muss durch die Gebäudeautomation gewährleistet werden, dass der

Bodenabsorber nur innerhalb der Grenztemperaturen betrieben wird.

Anhand der Simulationsergebnisse des Szenarios 1 ist außerdem zu erkennen, dass mit den in der Planung des Gebäudes angesetzten Wärmeentzugs- und Wärmeeinbringungsmengen, unter dem Einfluss der Kellertemperatur, kein nachhaltiger BA-Betrieb möglich ist.

Die Ergebnisse aus Szenario 4 zeigten, dass mit einem optimierten Betrieb der WP nahezu das gesamte Wärmeentzugspotential des BA ausgeschöpft ist. Es ist somit kaum möglich durch zusätzlichen Wärmeentzug im Winter (z.B. für andere Gebäude) eine höhere Wärmemenge im Sommer einzuspeichern. Es ist, bei einer Steigerung des Wärmeentzugs auf 208 % der ursprünglich geplanten Menge, nur die Einbringung von 85 % der geplanten Wärmemenge in den Untergrund möglich.

Beim Betriebsszenario 2 wurden die höchsten Einsparungen bezüglich Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht. Dieses Szenario stellt auf Gebäuseite jedoch einen theoretischen Fall dar, weil hierfür eine ideale Regelbarkeit der trägen BKT notwendig wäre, um die gesamte Wärmeentzugsmenge nutzen zu können.

Aus den Ergebnissen zum SEER, lässt sich schließen, dass ein freier Kühlbetrieb mit dem derzeitigen BA-Volumenstrom, innerhalb der erlaubten Temperaturgrenzen, des BA keine Verbesserung zum KKM-Betrieb bringt. Das liegt am hohen Stromverbrauch der BA-Pumpe. Im Kühlbetrieb muss der BA-Volumenstrom daher deutlich verringert werden. Durch die Abhängigkeit der Pumpenleistung in dritter Potenz vom Volumenstrom kann der Strombedarf damit signifikant verringert werden. Dadurch ist ein höherer SEER der freien Kühlung möglich.

## Fazit & Ausblick

Aus den vorliegenden Ergebnissen zeigt sich, dass ein ausgeglichener Heiz- und Kühlbetrieb mithilfe des BA, wie in der Planung angedacht, aufgrund des Kellereinflusses, nicht möglich ist.

Ein gebäudeseitig optimierter Heizbetrieb bietet ein Einsparpotenzial von 32 % CO<sub>2</sub>-Emissionen und 18 % Energiekosten und liegt innerhalb der technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen für den Boden. Aufgrund der erhöhten Bodentemperaturen und der Wechselwirkung Keller-Untergrund ist ein Kühlbetrieb erst nach 3 Jahren reinem Wärmeentzug möglich. Für einen effizienten freien Kühlbetrieb ist außerdem eine Anpassung des BA-Volumenstrom notwendig.

Das Beispiel der BIB zeigt, dass der Wärmeeintrag von Gebäuden durch den Keller in den Untergrund einen erheblichen Einfluss auf die Bodentemperatur

nehmen kann und somit bei der Planung von horizontalen Erdwärmeeinrichtungen beachtet werden muss.

In der kommenden Heizperiode soll der gebäudeoptimierte Heizbetrieb im realen Gebäude getestet und einem Monitoring unterzogen werden. Außerdem werden weitere Maßnahmen untersucht, um den Wärmeeintrag des Kellers in den Boden zu reduzieren, mit dem Ziel mehr Kühlleistung für die BKT bereitzustellen. Zusätzlich soll der Fragestellung nachgegangen werden, ob und wie Fundament-Bodenabsorber allgemein als nachhaltige Wärme-/ Kältequelle betrieben werden können.

## Danksagung

Diese Arbeit ist als Teil des vom BMWi geförderten Forschungsprojektes EnEff:Stadt: EnEff HCBC 1 (Förderkennzeichen: 03ET1632) Umsetzungsphase entstanden.

## Literaturverzeichnis

- Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. (2019). *Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz in Berlin 2016*. Potsdam.
- Henning, A., & Limberg, A. (2012). Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, S. 81-92.
- Senat für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz. (20. Januar 2021). *FIS Broker*. Von <https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp> abgerufen
- Umweltbundesamt. (29. Mai 2020). *Gebäude: Wichtig für den Klimaschutz!* Von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebaeude#studien> abgerufen
- Umweltbundesamt. (2021). *Erneuerbare Energien in Deutschland: Daten zur Entwicklung im Jahr 2020*. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt. (Januar 2022). Von Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix> abgerufen
- Umweltbundesamt. (9. Februar 2022). *Treibhausgas-minderungsziele Deutschlands*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-minderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg> abgerufen
- Umweltbundesamt. (2021). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020*. Dessau-Roßlau.