



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Optimierung der Wärme- und Kälteversorgung eines Laborgebäudes
durch den Einsatz einer reversiblen Wärmepumpe

Bachelorarbeit
im Studiengang
Verfahrenstechnik
vorgelegt von
Bastian Mewes

2012598

Hamburg
am
09.05.2014

Gutachter: Prof. Dr.
Gutachter: Dipl.-Ing.

Armin Gregorzewski
Andy Tagoe

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in der Firma ZWP Ingenieur-AG

Zusammenfassung

Diese Arbeit betrachtet das wirtschaftliche und primärenergetische Verhalten einer Geothermie-Anlage mit reversibler Wärmepumpe, in Verbindung mit einer Bauteilaktivierung als thermische Übertragungsfläche.

Dafür wurden zwei Konzepte für die Wärme- und Kälteversorgung erstellt. Eine Variante beinhaltet die Versorgung mittels Geothermie und reversibler Wärmepumpe. Ergänzend wird die Wärmeversorgung mit der Fernwärme und die Kälteversorgung mit einer Kompressions-Kältemaschine realisiert. Die Grundlasten der werden mit der einer Bauteilaktivierung abgeführt.

Bei der Referenzvariante erfolgt die Wärmeversorgung ausschließlich über einen Fernwärmeanschluss und die Kälteversorgung mittels Kompressions-Kältemaschine. Der Wärmeaustausch erfolgt im Heizbetrieb über Heizkörper und im Kühlbetrieb mit Umluftkühlgeräten.

Die beiden Varianten werden wirtschaftlich und primärenergetisch gegeneinander verglichen. Bei der Betrachtung sind die Nutzeranforderungen eines Laborgebäudes in Hamburg Bahrenfeld berücksichtigt.

Mittels einer Gebäudesimulation sind die zu erwartenden Energie- und Lastenanforderungen für den speziellen Nutzen bestimmt worden. Die mit der Gebäudesimulation ermittelten Werte dienten zur Dimensionierung der Anlagenteile. Des Weiteren wurden die zu erwartenden Energiemengen zur Temperierung des Gebäudes mittels der Gebäudesimulation errechnet.

Über die von den einzelnen Komponenten zu erbringenden Nutzenergien werden die jeweiligen Endenergien, der verschiedenen Formen, ermittelt.

Der Primärenergiebedarf der Varianten und damit auch die Primärenergieeinsparungen wurden ebenfalls über die Endenergien berechnet und verglichen.

Um das wirtschaftliche- und primärenergetische Verhalten einer solchen Anlage bei veränderlicher Anlagengröße zu ermitteln wurde eine Parametervariation erstellt. Dabei wurde errechnet bei welcher Anlagengröße eine möglichst große finanzielle und primärenergetische Einsparung zu erwarten ist.

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema: „Optimierung der Wärme- und Kälteversorgung eines Laborgebäudes durch den Einsatz einer reversiblen WP“, ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema: „Optimierung der Wärme- und Kälteversorgung eines Laborgebäudes durch den Einsatz einer reversiblen WP“, darf in der Bibliothek der Fakultät Life Sciences der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg ausgelegt und Interessenten zugänglich gemacht werden. Ich bin damit einverstanden, dass diese Arbeit Interessenten auch auf elektronischem Weg z.B. Internet zugänglich gemacht wird

Datum: _____

Bastian Mewes

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Gebäude	4
2.1	Gebäudeanforderung	5
2.2	Energiekonzept	5
3	Theoretische Grundlagen	7
3.1	Kompressions-Kältemaschine	7
3.2	Geothermie	8
3.3	Wärmepumpe	10
3.3.1	Reversible Wärmepumpe	10
3.4	Fernwärme	11
3.5	Bauteilaktivierung	12
3.6	Umluftkühlgerät	12
3.7	Heizlast	13
3.8	Kühllast	15
3.9	Gebäudesimulation	17
3.10	Wirtschaftlichkeitsberechnung	17
3.10.1	Kapitalwertmethode	18
3.11	Primärenergie	19
3.11.1	Primärenergiefaktor	19
4	Varianten	20
4.1	Variante A	20
4.2	Variante B	21
5	Grundlagenermittlung	22
5.1	Heizlast	22
5.1.1	Ergebnis	23
5.2	Kühllast	24
5.2.1	Ergebnis	24
5.3	Gebäudesimulation	24
5.3.1	Ergebnis	26
5.4	Bodengutachten	30
6	Variantenvergleich	31

6.1	Auslegung	31
6.2	Energieaufwand	36
6.2.1	Variante A	36
6.2.2	Variante B	38
6.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	39
6.3.1	Investitionskosten	39
6.3.2	Betriebskosten	40
6.3.3	Betriebsgebundene Kosten.....	42
6.3.4	Kapitalwert	43
6.3.5	Auswertung	44
6.4	Primärenergiebetrachtung	45
6.4.1	Variante A	45
6.4.2	Variante B	46
6.4.3	Auswertung	46
7	Parametervariation	47
7.1	Auswertung	47
8	Fazit.....	50
9	Anhang.....	52
9.1	Architektur.....	52
9.2	Bedarfsermittlung.....	57
9.2.1	Heizlast	57
9.2.2	Kühllast	62
9.2.3	Gebäudesimulation	64
9.2.4	Bodengutachten	72
9.3	BTA.....	73
9.3.1	Leistung BTA	75
9.4	Kapitalwert	80
9.5	Berechnungen.....	81
9.5.1	Elektrische Energie	81
9.5.2	Betriebskosten	81
9.5.3	Primärenergiebedarf	82
9.5.4	Parametervariation.....	84

Abkürzungsverzeichnis

KM	Kältemaschine
KKM	Kompressions-Kältemaschine
WP	Wärmepumpe
RLT	Raumluftechnik
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
K(NT)	Kälte Niedertemperatur
K(HT)	Kälte Hochtemperatur
H(NT)	Heizung Niedertemperatur
H(HT)	Heizung Hochtemperatur
ULK	Umluftkühlgerät
HK	Heizkörper
EnEV	Energieeinsparverordnung
RK	Rückkühler
FW	Fernwärme
r.F.	relative Feuchte
TRY	Testreferenzjahr

Symbole und Indizes

P_{ab}	Leistungsabgabe der KM und WP
P_{zu}	Leistungsaufnahme der KM und WP
P_{el}	elektrische Leistungsaufnahme der KM und WP
E_{ab}	Energieabgabe der KM und WP
E_{zu}	Energieaufnahme der KM und WP
E_{el}	elektrische Energieaufnahme der KM und WP
ε	Leistungszahl/KältezahI
ε_m	Arbeitszahl
q	spezifische Leistung
\dot{m}	Massenstrom
c	spezifische Wärmekapazität
T_{RL}	Temperatur Rücklauf
T_{VL}	Temperatur Vorlauf
ϕ_i	Norm-Heizlast Raum i
$\phi_{T,i}$	Norm-Transmissionsheizlast Raum i
$\phi_{V,i}$	Norm Lüftungsheizlast Raum i
U	U-Wert Wärmedurchgangskoeffizient
A	Fläche
\dot{V}	Volumenstrom
ρ	Dichte
ξ	Gleichzeitig wirksamer Lüftungswärmeanteil
T	Temperatur
$\phi_{V,Su, i}$	Lüftungsheizlast durch Zuluft-Volumenstrom Raum i
$\phi_{V,inf, i}$	Lüftungsheizlast durch natürliche Infiltration Raum i
$\phi_{V,mech. inf, i}$	Lüftungsheizlast durch mechanische Infiltration Raum i

K	Kapitalwert
I_0	Investitionskosten
i	Zinsfaktor
t	Zeit
Q_P	Primärenergie
Q_f	Endenergie
$f_{p,i}$	Primärenergiefaktor von Endenergie i
E	Energie
n_{50}	Blower-door-Wert bei 50 Pa
$P_{i,j}$	Leistung, Komponente i , Betriebsart j
$\varepsilon_{i,j}$	Leistungszahl, Komponente i , Betriebsart j
$E_{i,j}$	Energie, Komponente i , Betriebsart j

1 Einleitung

Auf Grund der Nachhaltigkeit und aus ökonomischen Gründen ist ein Wandel der Energiegewinnung erkennbar. Der Verbrauch von Endenergie in Form von Prozess- und Raumwärme beträgt in Deutschland rund die Hälfte der gesamten Endenergie. In dem Zeitraum von 1990-2011 sank in der Energiebilanz für Deutschland der Brennstoffverbrauch zur Wärmebereitstellung um ca. 20% (1). Um diesen Trend fortzusetzen, wird weiterhin der Einsatz von erneuerbaren Energien und alternativen Energien in der Gebäudetechnik verfolgt und ausgebaut.

Zu regenerativen beziehungsweise alternativen Energien zählen Energieträger die in Bezug auf den menschlichen Zeithorizont praktisch unerschöpflich sind. Der Einsatz von erneuerbaren Energien ist die wichtigste Säule der nachhaltigen Energiegewinnung (2).

Die Investitionskosten von Anlagenteilen, die einen Energieeintrag aus erneuerbaren Energien leisten oder Nutzenergie durch alternative Energiegewinnung bereitstellen, sind oftmals höher als die der konventionellen Energieversorgungsmethoden. Aufgrund des anfänglich hohen finanziellen Aufwands ist im Planungsprozess die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage zu analysieren. Dabei gilt es zu untersuchen, ob sich die Investitionskosten mittels der jährlichen Einsparung in Form von Endenergie nach der rechnerischen Nutzungsdauer amortisieren. Neben der Wirtschaftlichkeit trifft der Primärenergiebedarf eine Aussage über das Verhalten der Anlage im Bereich der Ökologie.

Jedes Gebäude ist individuell und auf die speziellen Nutzeranforderung zu untersuchen. In dieser Arbeit wird anhand eines Laborgebäudes mit chemischen-, biochemischen- und physikalischen Laborräumen die Wirtschaftlichkeit einer reversiblen Wärmepumpe (WP) und Geothermie-Anlage in Verbindung mit einer Bauteilaktivierung (BTA) untersucht. Als Referenz wird der Eintrag von Heizenergie durch das öffentliche Fernwärmenetz betrachtet, die Referenz des Kühlbetriebs bildet eine Kompressions-Kältemaschine (KKM) mit freier Rückkühlung.

Um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten, muss der Bedarf der einzelnen Räume und des Gesamtgebäudes ermittelt werden. Neben den herkömmlichen Heiz- und Kühllastberechnung gilt es durch eine Gebäudesimulation die anfallenden Heiz- und Kühllasten einer jeden Stunde des Jahres zu errechnen. Anhand der Simulationsergebnisse werden die für die einzelnen Varianten zu erwartende Nutzenergien und die daraus resultierenden Erzeugungskosten ermittelt. Mittels der Erzeugungskosten der Varianten wird der Rückfluss berechnet.

Aus dem zu erwartenden Nutzenergieaufwand errechnet sich der Endenergieaufwand, mit Hilfe der Primärenergiefaktoren wird der Primärenergieeinsatz der jeweiligen Variante ermittelt und die Primärenergieeinsparung, durch eine reversible WP, bestimmt.

Um die ideale Dimension der Anlage zu ermitteln, bei der die größten Einsparungen zu erwarten sind, wird eine Parametervariation durchgeführt.

Diese Bachelorarbeit bietet einen Überblick über Einsparungsmöglichkeiten durch den Einsatz von Geothermie in Verbindung mit einer reversiblen WP und einer BTA. Darüber hinaus wird der primärenergetische Nutzen und die damit verbundene nachhaltige Energiegewinnung aufgezeigt. Neben dem Vergleich der Varianten wird das Verhalten einer Anlage dieser Art bei wechselnder Anlagengröße untersucht und aufgezeigt.

2 Gebäude

Auf dem Campus Hamburg-Bahrenfeld wird ein Laborgebäude mit der Bezeichnung „Neubau physikalisch-chemisches Forschungslabor in Hamburg“ (Abbildung 1) errichtet.

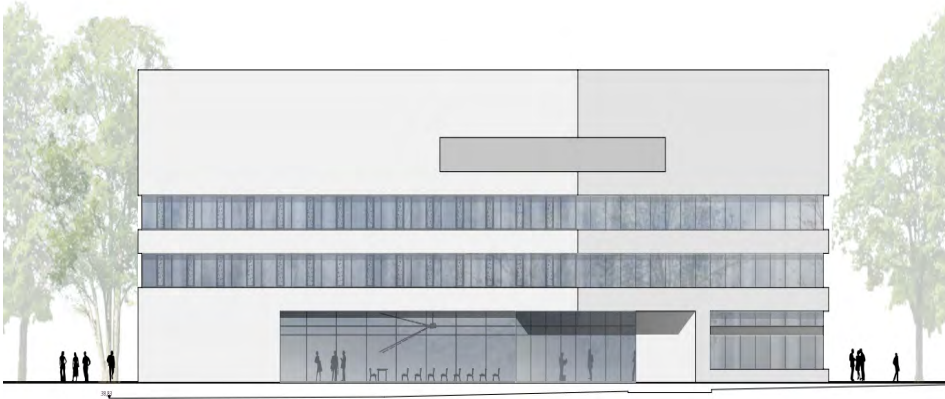


Abbildung 1 Ansicht des Gebäude

Als Nutzfläche werden ca. 2.300 m² benötigt. Diese Fläche teilt sich in ca. 46 % Laborfläche und ca. 54 % Bürofläche auf. Die Laborbereiche sind für Versuche im chemischen-, physikalischen- und biochemischen Bereich ausgelegt. Der Bürobereich wird für ca. 130 Arbeitsplätze ausgelegt.

Die Gesamtfläche erstreckt sich über fünf Etagen (Abbildung 18-Abbildung 22; S.52-54) mit einer Bruttogesamtfläche von ca. 6.800 m².

- Die Teilunterkellerung des Erdgeschosses dient als Technik- und Lagerbereich.
- Im Erdgeschoss sind Messräume angeordnet, die zum Teil als Laser-Messräume dienen. Räume für Elektronenmikroskope, Büroflächen mit Kombizonen und Konferenzräume sind außerdem im Erdgeschoss zu finden.
- Das 1. Obergeschoss wird mit chemischen und biochemischen Laborflächen, Büroflächen und Kombizonen ausgestattet.
- Das 2. Obergeschoss dient als Bürofläche und Kombizone.
- Im 3. Obergeschoss ist eine Dachterrasse angeordnet, außerdem fungiert es als Technikbereich. Ein Teil weist eine zweite Ebene für einen Rückkühler auf.

In den Laborräumen werden Fragestellungen zur Dynamik von Atomen, Molekülen und Nanoteilchen bis hin zu biomolekularen Komplexen und zellularen Funktionseinheiten bearbeitet. Dabei werden modernste ultraschnelle optische Methoden verwendet.

2.1 Gebäudeanforderung

Ein Laborgebäude hat, im Gegensatz zu einem Büro- oder Wohngebäude, wesentlich höhere Anforderungen. Das hängt an der Sensibilität einiger Mess- und Versuchseinrichtungen sowie an dem hohen Luftwechsel, der in Laboren vorzusehen ist. Besonders in den biochemischen und chemischen Laborräumen gilt es, einen hohen Luftwechsel mittels der Raumlufttechnischen (RLT)-Anlage zu erzeugen, um die bei Reaktionen entstehenden Gase aus den Laborräumen abzuführen. Daraus resultiert ein hoher energetischer Aufwand um die vereinbarten thermischen Raumbedingungen einzuhalten.

Die Lasermessapparate sind hoch sensible Messeinrichtungen, die bei kleinsten Bedingungsschwankungen eine Ungenauigkeit des Messergebnisses hervorrufen. Um die Messungengenauigkeit weitestgehend zu minimieren, wurden, in Abstimmung mit dem Nutzer, Randbedingungen mit 23 °C und einer relativen Luftfeuchte von 40 % festgelegt. Des Weiteren darf die Temperaturdifferenz 1 K betragen und die relative Luftfeuchte ist mit einer Konstanz von 5 % festgelegt.

2.2 Energiekonzept

Für die Anforderungen des Gebäudes und der Funktion der Räume wurde ein Energiekonzept (Abbildung 2) entworfen, welches den Energieeintrag und die Wärmeüberträger darstellt. Dieses Konzept stellt eine Energieversorgung dar, die es auf Wirtschaftlichkeit zu untersuchen gilt.

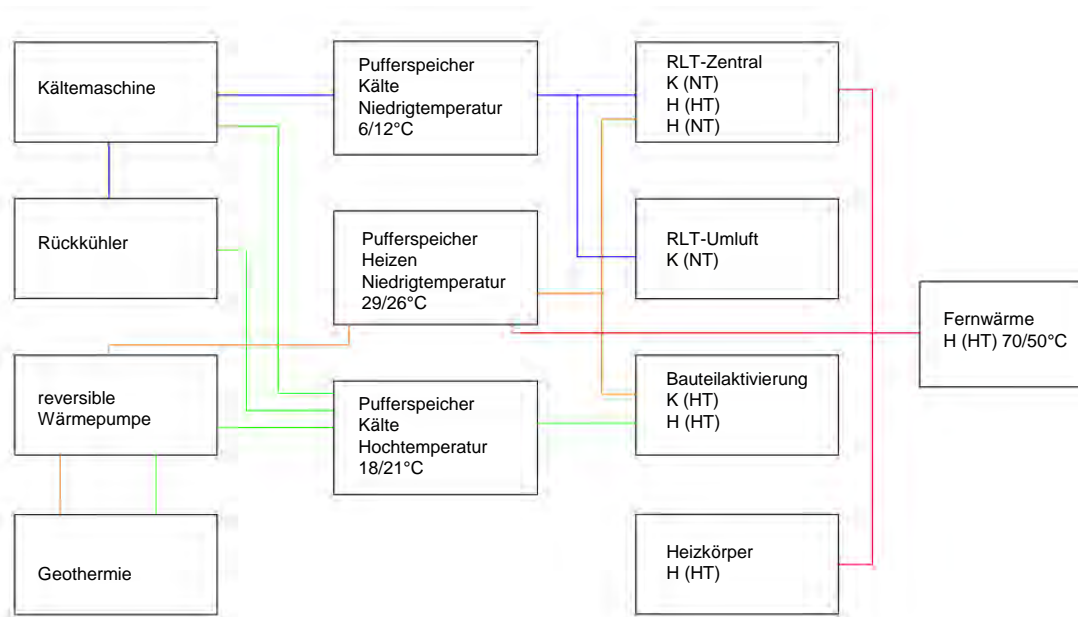


Abbildung 2 Energiekonzept

Die Grundlasten der einzelnen Räume werden über die BTA abgeführt, konservative Heizkörper (HK) werden zur Überbrückung der Regelträge der BTA eingesetzt. Um ein angenehmes Raumklima und die Anforderungen im Laborbereich zu erfüllen, wird die Zuluft mit wassergeführten Lüftungstechnischen Anlagen konditioniert. Die BTA wird im Heizbetrieb mittels der Geothermie mit reversibler WP betrieben, die Spitzenlasten sind über das öffentliche Fernwärmenetz zu kompensieren. Die Zuluft wird im Heizbetrieb mit der WP temperiert, zur Ergänzung bei Spitzenlasten ist die Versorgung mit FW vorgesehen.

Im Kühlbetrieb wird die BTA aus dem Erdreich direkt beschickt. Ergänzend zur direkten Kühlung kommt eine KM mit Rückkühler zum Einsatz. Überschreitet die Entzugstemperatur die Zulufttemperatur der BTA im Kühlbetrieb, arbeitet die reversible WP wie eine KM und die Geothermie hat die Wirkung eines Rückkühlers (RK). Die Zuluft wird über eine adiabatische Verdunstungskühlung der Fortluft vorgekühlt. Um die gewünschte Temperierung der Zuluft zu erreichen, ist der Einsatz einer KM vorgesehen. Als Rückkühlung für die KM wird der Einsatz von einem Hybridkühler untersucht.

Zur Speicherung der Energien und um kontinuierliche Betriebsbedingungen zu schaffen sind Pufferspeicher vorgesehen. Diese speichern die Energie in Form von temperiertem Wasser. Durch die unterschiedlichen Anforderungen ist es praktikabel mit drei Pufferspeichern¹ zu agieren.

¹ K(NT), K(HT), H(NT)

3 Theoretische Grundlagen

Die Grundlagen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Primärenergiebedarfs werden in dem folgenden Kapitel geklärt und festgelegt.

3.1 Kompressions-Kältemaschine

Als KM sind Aggregate zu verstehen, die unter Verwendung von mechanischer Arbeit und einem Kühlmedium einem Raum Wärme entziehen.

Die KKM ist eine von vielen Bauweisen, die mit einem Kompressor, einem Kondensator, einem Verdampfer und einem Drosselorgan ausgestattet sind. Das eingesetzte Kältemittel ist ein leichtsiedendes Medium.

KKM arbeiten nach dem Linksprozess² (Abbildung 3; Abbildung 4).

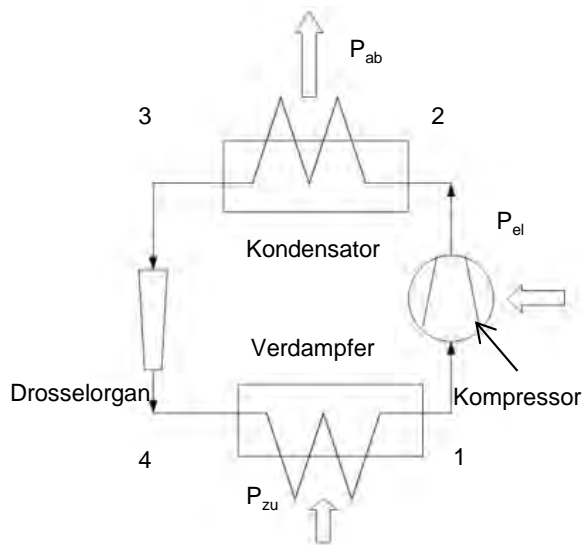


Abbildung 3 KKM-Schema (3)

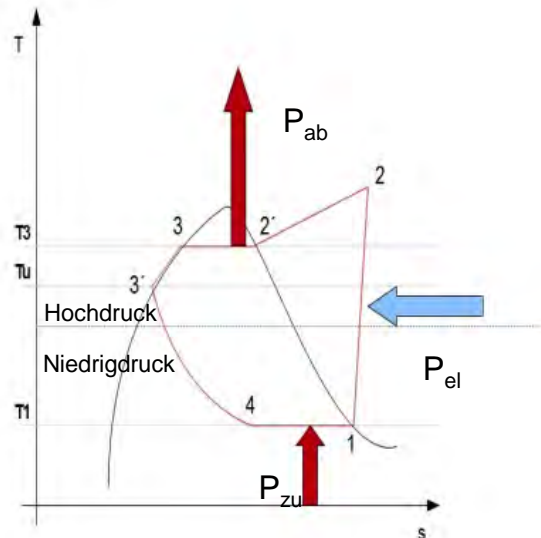


Abbildung 4 Angenäherter Kreisprozess (3)

² Der reale Prozess weicht dem idealen Kreisprozess aufgrund von Verlusten ab

1→2: Mit Hilfe des Kompressors³ wird der Kältemitteldampf auf den Kondensationsdruck verdichtet. Aufgrund der Druckerhöhung steigt die Temperatur des Kältemittels.

2→3: Im Kondensator kühlt der Kältemitteldampf ab und kondensiert. Mittels Wärmetauscher gibt das Kältemittel Wärmeenergie an den sekundären Kühlkreis ab.

3→4: Das Drosselorgan entspannt das Kühlmedium auf den Verdampfungsdruck. Der Druckabfall hat eine Temperatursenkung zur Folge.

4→1: Durch Wärmezufuhr verdampft das Kühlmedium. Dadurch erfolgt die Erzeugung von Kälte (4)

Die Kältezah ε einer KM gibt Aufschluss über die Effizienz. Bei einer KM wird die Kältezah über das Verhältnis von Kälteleistung zu dem Aufwand bestimmt (Gl. 3.1). Als Kälteleistung ist die Aufnahme von Wärmeenergie am Verdampfer zu verstehen, der Aufwand ist in diesem Fall elektrische Leistung.

$$\varepsilon = \frac{P_{zu}}{P_{el}} \quad 3.1$$

Neben der Kältezah ist in der Literatur auch noch die Arbeitszah ε_m zu finden. Von der Arbeitszah ist die Rede, wenn auf der rechten Gleichungsseite zeitlich integrierte Größen⁴ verwendet werden (Gl. 3.2).

$$\varepsilon_m = \frac{E_{zu}}{E_{el}} \quad 3.2$$

Sowohl die Arbeitszah als auch die Kältezah sind einheitenlose Größen (4).

3.2 Geothermie

Die oberflächennahe Geothermie setzt sich aus den in Abbildung 5 dargestellten Energien zusammen. Der aus dem Erdinneren an die Erdoberfläche dringende Energiestrom setzt sich aus drei verschiedenen Quellen zusammen⁵ (5).

³ Zufuhr von mechanischer Arbeit

⁴ Z.B. Wärmemenge, Arbeit

⁵ Gravitationsenergie resultierend aus der Erdentstehung, Ursprungswärme stammt aus der Zeit vor der Erdentstehung und durch Zerfall radioaktiver Isotope (5)

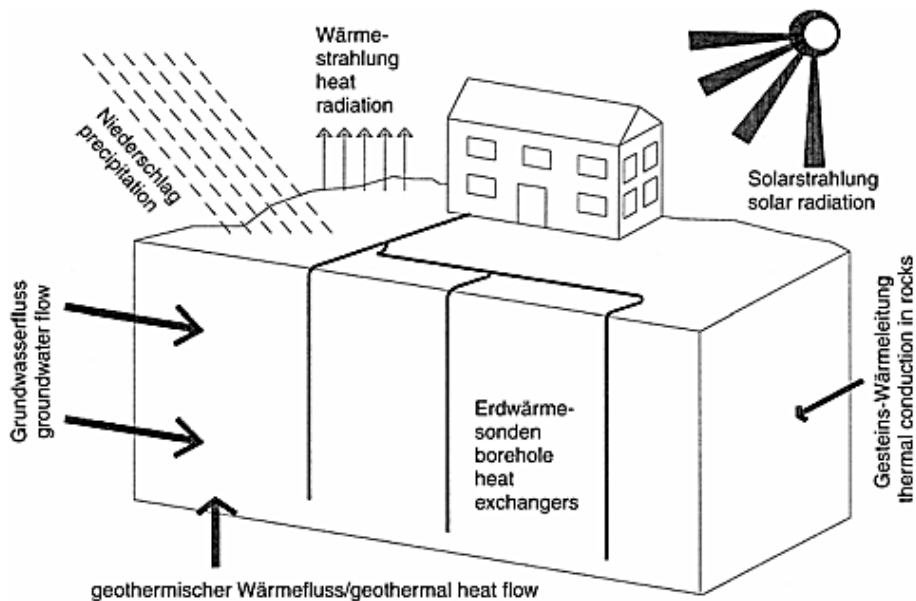


Abbildung 5 Wärmefluss im oberflächennahen Untergrund (6)

Das Erdreich ist keine unerschöpfliche Ressource. Die Regenerierung ist durch das Einleiten von Wärme im Sommer und Kälte im Winter zu realisieren. Dadurch fungiert das Erdreich im übertragenden Sinne als ein saisonaler Speicher. Dabei ist die Speicherkapazität des Erdbodens von geologischen Grundlagen wie zum Beispiel Wasseradern abhängig.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Erdenergie zu gewinnen, welche zwischen „offenen Systemen“ und „geschlossenen Systemen“ unterschieden werden.

Das offene System ist bei grundwasserführenden Schichten im Untergrund anwendbar, da das Grundwasser als Wärmeträgermedium fungiert. Über einen Brunnen wird das Grundwasser zum überirdischen Kreislauf gefördert und gibt mittels eines Wärmetauschers seine Energie ab. Durch einen Schluckbrunnen wird das Grundwasser der gleichen Schicht zugeführt.

Bei einem geschlossenen System werden Wärmeüberträger, deren Anordnung vertikal oder horizontal ist, in das Erdreich eingelassen. In diesen Sonden fließt das Wärmeträgermedium⁶. Durch die Wärmeleitfähigkeit der Erdsonden findet der Energieaustausch zwischen Wärmeträgermedium und Erdreich statt. (7)

In diesem Fall kommt ein geschlossenes System mit Doppelt-U-Sonden, die auf eine Tiefe von annähernd 100 m ins Erdreich eingelassen werden, zum Einsatz. Als oberflächennahe Geothermie werden Erdwärmesonden < 100 m betrachtet, ab einer Tiefe > 100 m kommt das Bergbaurecht zum Tragen und es bedarf einer zusätzlichen Genehmigung. Ei-

⁶ Frostsicheres Wärmeträgermedium

ne Erdwärmesonde setzt sich aus einem Sondenfuss und endlosen, vertikalen Sonden-Rohren⁷ zusammen.

Häufig wird für Doppelt-U-Rohr-Sonden mit einer mittleren Entzugsleistung von 55 W/m je Meter Sondenlänge gerechnet (8). Bei dieser Untersuchung stützen sich die Entzugsleistungen der Erdwärmesonden auf die im Bodengutachten ermittelten Leistungen.

3.3 Wärmepumpe

Zur Erhöhung des Temperaturniveaus der aus der Geothermie geförderten Wärmeenergie wird in der Regel eine WP eingesetzt. Bei oberflächennaher Geothermie ist die Temperatur zur direkten Einspeisung in das Heizungssystem zu gering. Mittels der WP wird die Medientemperatur auf ein für das Gebäude nutzbares Temperaturniveau gehoben.

3.3.1 Reversible Wärmepumpe

Bei einer reversibel arbeitenden WP ist, neben dem Heizeffekt im Winter, noch ein Temperaturhub im Kühlbetrieb zu erzeugen. Die Informationen in diesem Kapitel (3.3.1) sind der TI Energiebereitstellung Geozent der Firma Zent-Frenger (9) entnommen.

Durch eine integrierte Umschaltung ist es möglich vier verschiedene Betriebsarten zu erfüllen.

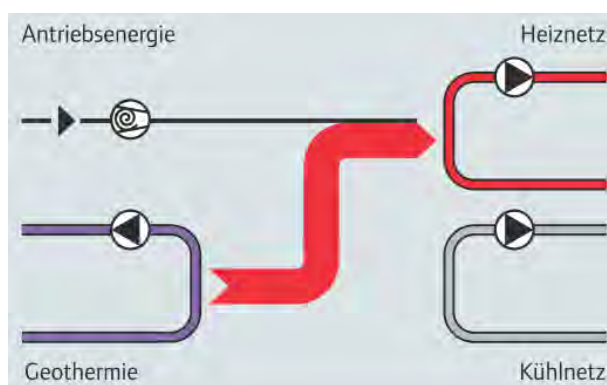


Abbildung 6 Heizbetrieb WP

Die Wärmeenergie aus der Geothermie dient als Energiequelle, die mit Hilfe der mechanischen Energie des Kompressors auf ein für das Gebäude nutzbares Temperaturniveau angehoben und dem Heizsystem zugeführt wird (Abbildung 6).

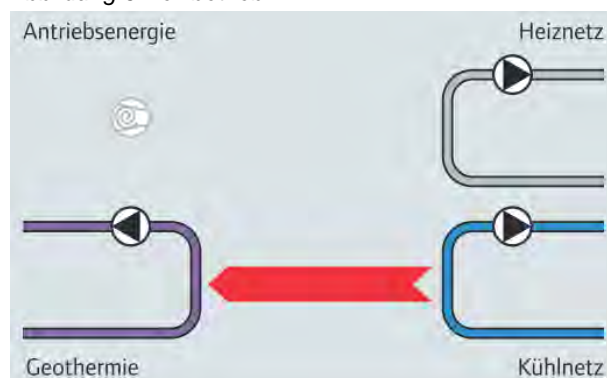


Abbildung 7 Direktkühlung WP

Bei der direkten Kühlung wird Kälteenergie aus der Geothermie direkt dem Kühlsystem zugeführt (Abbildung 7). Durch MSR wird geregelt, ob das Temperaturniveau zum Abführen der Kältebelastung ausreicht.

⁷ Bei einer Tiefe zwischen 60 m und 150 m ist $d = 32 \times 3 \text{ mm}$ (8)

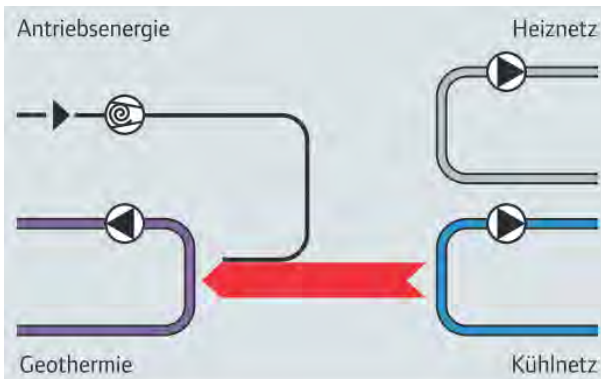


Abbildung 8 Mechanischer Kühlbetrieb WP

Ist die Entzugstemperatur der Geothermie höher als die Vorlauftemperatur der BTA, wird mit Hilfe der reversiblen WP ein Temperaturhub erzeugt und die Geothermie wirkt als Rückkühler, die WP arbeitet im KM-Betrieb (Abbildung 8).

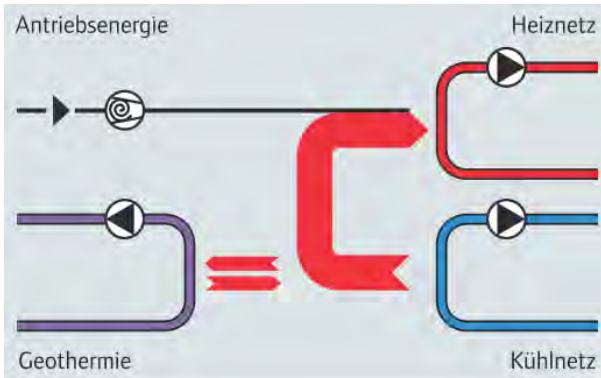


Abbildung 9 Dualbetrieb WP

Die MSR prüft ob im Gebäude netto ein Wärme- oder Kühlbedarf herrscht. Je nach Gegebenheit wird die Geothermie als zusätzliche Wärme- oder Kältequelle genutzt (Abbildung 9).

Die Funktionsweise einer reversiblen WP ist die einer KM. Die Berechnung der Arbeits- und Leistungszahl im Kühlbetrieb der WP ist, genau wie die Berechnung der Abgabe-, Aufnahme- und elektrischen Leistung, analog (Kap.: 3.1; S. 7).

Im Heizbetrieb der WP ändert sich das Verhältnis der Leistungs- und Arbeitszahl, da die Leistungsabgabe im Heizbetrieb die Effizienz der WP beschreibt (Gl. 3.3).

$$\varepsilon = \frac{P_{ab}}{P_{el}} \quad 3.3$$

Somit ergibt sich auch für die Arbeitszahl ein anderes Verhältnis wie in Gleichung 3.4 dargestellt.

$$\varepsilon = \frac{E_{ab}}{E_{el}} \quad 3.4$$

3.4 Fernwärme

Als FW bezeichnet man die Erzeugung von Wärmeenergie an zentralen Standorten. Die erzeugte Wärmeenergie wird über ein FW-Rohrnetz den einzelnen Verbrauchern zur Verfügung gestellt. Erzeugt wird die Wärmeenergie durch Heizkraftwerke und durch Heizwerke. Durch diese Kombination lässt sich der Primärenergieeinsatz für die Wärmeerzeugung gering halten.

Der regionale Fernwärmeanbieter ist die Vattenfall Europe Wärme AG. Die von Vattenfall bereit gestellte Wärme wird zu 90,4 % aus Kraft-Wärme-Kopplung und zu 13,8 % aus regenerativen Energien gewonnen. Der Primärenergiefaktor des Fernwärmeversorgungssystems ist mit 0,57 (Abbildung 35; S. 82) angegeben.

3.5 Bauteilaktivierung

Eine BTA ist ein Wärme- und Kälteüberträger. Dabei werden Rohrregister in die Raumbegrenzung, in diesem Fall die Massivdecke, eingelassen und mit temperiertem Wasser beschickt. Der Wärmeaustausch ist passiv, der Benutzer hat keinen unmittelbaren Einfluss auf die temporäre Leistung. Eine BTA wird meist zur Abfuhr der Wärme- und Kühlgrundlasten eingesetzt.

Die Wärmeübertragung zwischen Wärmeträgermedium und Raumluft erfolgt mittels der Wärmeleitfähigkeit der Massivdecke. Die Leistungsabgabe an den Raum ist abhängig vom Wärmeübergangskoeffizienten, von der minimalen und maximalen Oberflächentemperatur, von der Lufttemperatur und der Fläche (10). Mittels Massenstrom, der spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgermediums und der Temperaturdifferenz bestimmt man die Leistung der BTA (Gl.: 3.5).

$$P = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{RL} - T_{VL}) \quad 3.5$$

Aufgrund der unterschiedlichen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten im Heiz- und Kühlbetrieb⁸ gibt es Leistungsunterschiede zwischen den Betriebsarten (8). Die Leistungsabgabe an den Raum erfolgt nicht im gleichen Maße über Fußboden und Decke, in der Regel wird über den Deckenanteil mehr Leistung eingebracht.

Für den Wärmeaustausch muss eine signifikante Unter- bzw. Übertemperatur der Decke gegenüber dem Raum vorgehalten werden. Es ist aber darauf zu achten, die Vorlauftemperatur im Kühlbetrieb nicht zu gering zu wählen, um Kondensatbildung zu vermeiden. Im Heizbetrieb ist die Übertemperierung so zu wählen, dass bei plötzlicher Witterungsänderung keine Übertemperierung des Raumes auftritt.

Ein Nachteil der BTA ist die Trägheit der Regelung, daher wird in der Regel ein ergänzendes System⁹ vorgesehen.

3.6 Umluftkühlgerät

Ein ULK führt die Kühllast eines Raumes durch dynamische Funktionsweise ab.

Ein ULK besteht aus einem Ventilator, der die erwärmte Raumluft ansaugt, einem Wärmetauscher, welcher der Raumluft Wärmeenergie entzieht und einem

⁸ $\alpha_{K,Heizen} < \alpha_{K,Kühlen}$

⁹ z.B. RLT Anlagen und HK

Kühlwasseranschluss, durch den der Wärmetauscher mit, einem Kühlmedium versorgt wird (Abbildung 10).

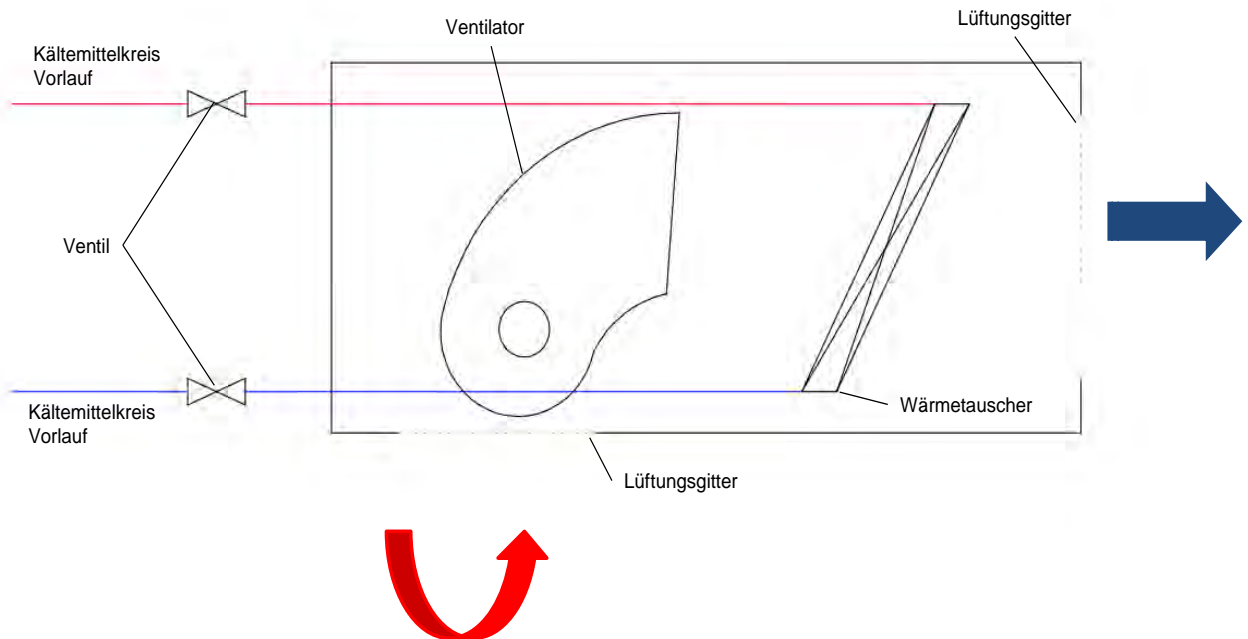


Abbildung 10 Funktionsschema eines ULK

Ein ULK erzeugt keinen Luftwechsel, sondern wälzt die Raumluft um und entzieht dabei der Raumluft Wärmeenergie.

3.7 Heizlast

Die Heizlastberechnung ist in der DIN 12831 definiert und wird auf Grundlage dieser Norm berechnet. In diesem Kapitel (3.7) beziehen sich die Angaben auf die DIN 12831 (11).

Die Heizlast versteht man als, die Wärmeleistung die einem Raum bei Norm-Umgebungsbedingungen zugeführt werden muss, um die thermisch vereinbarten Norm-Innenbedingungen herzustellen.

In Abbildung 11 ist aufgezeigt, welche Wärmeströme bei der Heizlastberechnung betrachtet werden.

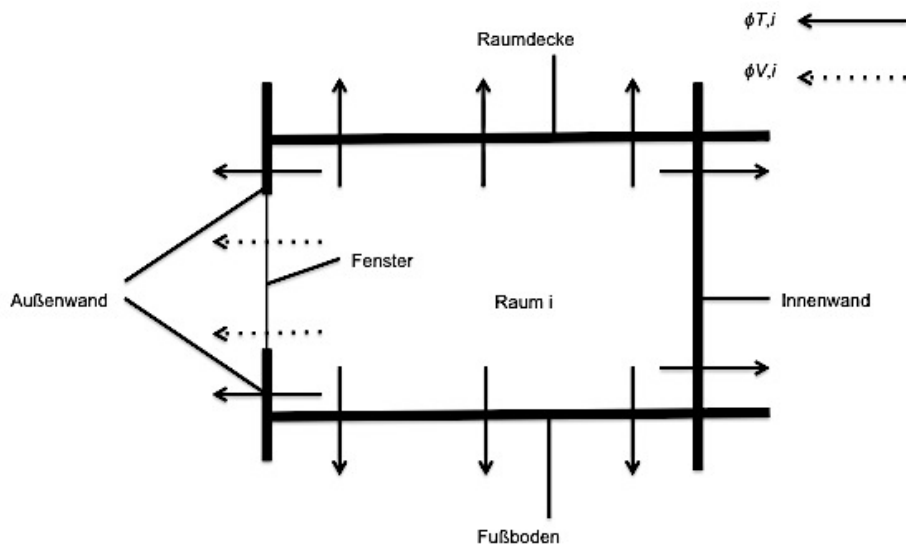


Abbildung 11 Wärmeverluste eines Raumes

Die Heizlast setzt sich aus der Transmissionsheizlast¹⁰ und der Lüftungsheizlast¹¹ zusammen (Gl. 3.6).

$$\phi_i = \phi_{T,i} + \phi_{V,i} \quad 3.6$$

Transmissionsverluste sind Wärmeverluste an die Umgebung. Dabei ist zu beachten:

- Wärmeverluste an das Erdreich
- Wärmefluss durch, an Aussenluft grenzende Wände
- Wärmeverluste durch unbeheizte Räume
- Wärmefluss zwischen unterschiedlich beheizten Räumen.

Über die Teilflächen mit ihren jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizienten und die Temperaturdifferenzen wird die Transmissionsheizlast errechnet (Gl.: 3.7). Bei massiven Bauteilen spricht man von U-Werten, die den Wärmedurchgang definieren. Glasflächen werden, neben den U-Werten, noch mit einem g-Wert, der den Energiefluss durch die Verglasung angibt, beschrieben.

$$\phi_{T,i} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad 3.7$$

Als Lüftungsheizlast bezeichnet man die Wärmeverluste, die durch das Lüften der Räumlichkeiten entsteht. Dabei wird zwischen der natürlichen Lüftung und der mechanischen Belüftung unterschieden. Dafür ist ein Mindestluftwechsel je nach Benutzungsart in der

¹⁰ Wärmestrom durch Wärmeleitung über die Umschließungsflächen

¹¹ Wärmestrom für Aufheizen eindringender Außenluft

Norm festgelegt. Die Lüftungsheizlast wird durch die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft, dem Mindestluftwechsel, den sich daraus ergebenden Massenstrom und der spezifischen Wärmekapazität der Luft bestimmt (Gl. 3.8).

$$\phi_{V,Su,i} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad 3.8$$

Der Massenstrom ist zu ersetzen durch Volumenstrom und Dichte der Luft (Gl. 3.9).

$$\phi_{V,Su,i} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \quad 3.9$$

Die Lüftungswärmeverluste setzen sich aus den Lüftungswärmeverlusten der Infiltration, der mechanischen Infiltration und dem Zuluftvolumenstrom zusammen (Gl. 3.10).

$$\phi_{V,i} = \xi \cdot \sum \phi_{V,inf,i} + \sum \phi_{V,Su,i} + \sum \phi_{V,mech,inf,i} \quad 3.10$$

Als natürliche Infiltration wird dabei der Luftwechsel betrachtet der durch Windanströmung und Auftriebskräften durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle in den Raum strömt.

Mechanische Infiltration ist die Differenz des, durch die RLT-Anlage, zugeführten Luftvolumenstrom und dem abgeführten Luftvolumenstrom. Diese Differenz findet ebenfalls seinen Weg durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle.

Heizlasten des Zuluftvolumenstromes verstehen sich als Leistung die aufgebracht werden muss um die Zuluft auf die gewünschte Raumtemperatur zu erwärmen.

3.8 Kühllast

Die Kühllast ist eine Größe zur Bestimmung der Energieabfuhr, um die vereinbarten thermischen Norm-Innenbedingungen herzustellen. Als Grundlage zur Kühllastberechnung dient die VDI 2078. Nach der VDI bezieht sich die Berechnung der Kühllast auf die Lasten, die über die Raumluft abzuführen sind (12).

In der angekündigten überarbeiteten Version der Kühllastberechnung wird auch die Abfuhr über die thermisch aktivierten Bauteile berücksichtigt, somit werden die gesamten Kühlleistungen, die dem Raum zuführen sind, betrachtet (13).

Im Vergleich zur Heizlast werden bei der Kühllast die sich im Raum befindlichen Wärmequellen in die Rechnung einbezogen, da man bei den Lastberechnungen stets den Fall betrachtet, im dem die größten abzuführenden Lasten auftreten. Die Kühllast setzt sich aus den inneren Lasten des Raumes und den von außen auf den Raum wirkenden Kühllasten zusammen.

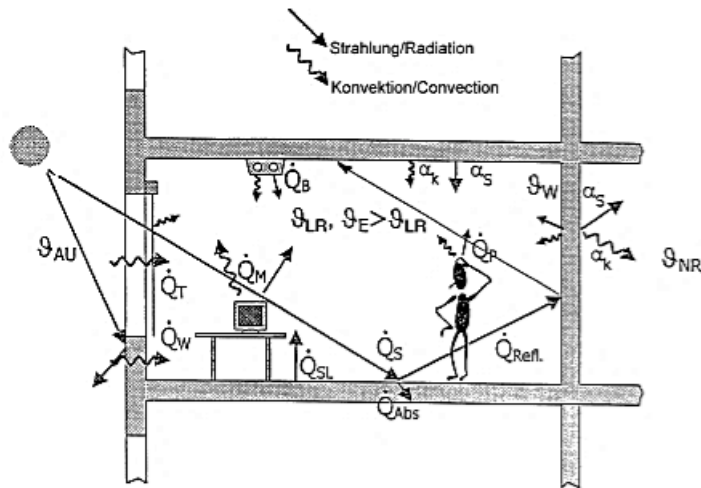


Abbildung 12 Wärmestrom am Beispiel eines Büroraumes (14)

Dabei ist:

ϑ_{Au}	Außentemperatur(A)
ϑ_W	Wandtemperatur(A)
ϑ_{NR}	Temperatur des Nebenraumes(A)
\dot{Q}_B	Wärmeabgabe der Beleuchtung(I)
\dot{Q}_T	Wärmestrom durch Fenster(A)
\dot{Q}_W	Wärmestrom durch Wände(A)
\dot{Q}_S	solarer Wärmestrom(A)
\dot{Q}_{SL}	Wärmestrom der Sole(A)
\dot{Q}_P	Wärmeabgabe der Person(I)
\dot{Q}_{Abs}	Absorbierter Wärmestrom(A)
$\dot{Q}_{Ref.}$	Reflektierter Wärmestrom(I)
α	Wärmeübergangskoeffizient(A)

I=innere Last

A=äußere Last

Die von außen auf den Raum wirkenden Lasten werden wie bei der Heizlast unter Betrachtung der U- und g- Werte berechnet. Neben den Wärmedurchgangskoeffizienten sind die Durchlassfaktoren der Fenster und Sonnenschutzeinrichtungen, sowie Kühllastfaktoren für äußere Strahlungslasten bei verglasten Oberflächen zu berücksichtigen.

3.9 Gebäudesimulation

Mit Hilfe einer Simulation wird der tatsächlich zu erwartende Energiebedarf eines Gebäudes ermittelt. Dabei werden, anders als bei der Kühl- und Heizlastberechnung, die individuellen Nutzungsbedingungen berücksichtigt. Neben den individuellen Nutzungsbedingungen werden die äußeren Einflüsse detailliert betrachtet.

Als äußere Einflüsse zählen Sonnenstrahlung und Außentemperatur. Die Grundlage für die Betrachtung bildet das Testreferenzjahr, in dem durch empirische Ermittlungen meteorologische Information¹² enthalten sind. Betrachtungsgrundlage bildet der Zeitraum 1988-2007, wodurch ein typischer Witterungsverlauf im Jahresgang generiert wurde (15).

Die Sonneneinstrahlung wird durch die Ortszeit ermittelt. Aus der Zeit lässt sich auf Sonnenhöhe und Sonnenstand schließen. Je nach Orientierung der zu betrachteten Fläche wird die Sonneneinstrahlung berücksichtigt.

Mit diesen Einflussgrößen wird für jede Stunde eines Jahres der tatsächliche Energiebedarf zum Kühlen und Heizen des Gebäudes beziehungsweise eines einzelnen Raumes berechnet.

Durch diese Aussage können die Energiekomponenten treffend dimensioniert werden. Eine Auslegung nach den Lastenberechnungen hat oft eine Überdimensionierung zur Folge. Dies lässt sich durch eine Simulation minimieren.

3.10 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung ist die finanzielle Betrachtung von Kosten zu Nutzen einer Investition. Berechnungsgrundlage der Wirtschaftlichkeitsberechnung bildet die VDI 2067.

Bei einer Anlage dieser Art spielen Investitionskosten, Betriebskosten und betriebsgebundene Kosten eine Rolle.

Es gilt, statische und dynamische Berechnungsweisen der Wirtschaftlichkeit zu unterscheiden. Die statischen Verfahren werden vorzugsweise in der Betriebswirtschaft angewandt, da diese eine kurze Periode betrachten. Dynamische Verfahren haben hingegen einen langen Betrachtungszeitraum von 20-30 Jahren (16), wobei die jeweiligen Berechnungsweisen noch verschiedene Methoden zur Grundlage nehmen.

So ergeben sich mehrere verschiedene Methoden zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit wie zum Beispiel Gewinnvergleichsrechnung, Rentabilitätsrechnung, Amortisationsrechnung, Annuitätsmethode und die Kapitalwertmethode.

¹² z.B. Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

In diesem Fall kommt die Kapitalwertmethode zum Einsatz, da bei diesem Projekt Reinvestitionen zu erwarten sind. Reinvestitionen lassen sich mit der Kapitalwertmethode treffen berücksichtigen.

3.10.1 Kapitalwertmethode

Der Kapitalwert ist eine Aussage über die finanzielle Auswirkung einer geplanten Investition zum Investitionszeitpunkt¹³. Bei dieser Betrachtung fließen sowohl die Zinsen als auch der Betriebs- beziehungsweise Betrachtungszeitraum¹⁴ ein.. Die in diesem Kapitel (3.10.1) getroffenen Aussagen basieren auf der Quelle: „Energiewirtschaft von Dittmann und Tscherning“ (16).

Zur Prüfung der Vorteilhaftigkeit einer Investition werden die Zahlungseingänge auf einen gemeinsamen Zeitpunkt, Kalkulationszeitpunkt genannt, festgelegt. In der Regel ist dieser Zeitpunkt mit $t=0$, Zeitpunkt der Investition, definiert. Der Kapitalwert ist das Ergebnis der Abzinsung auf den Kalkulationszeitpunkt. Kapitalwert einer Investition ist die Abzinsung innerhalb eines festgelegten Zeitraumes.

Wobei der Kapitalwert K über die Investition I_0 , die sich bei mehrjähriger Bauzeit aus der Aufzinsung der jährlichen Baukosten ergibt, sowie den Barwert B ermittelt wird (Gl. 3.11).

$$K = -I_0 + B \quad 3.11$$

Bei gleichbleibenden Einnahmen und Ausgaben ergibt sich:

$$K = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Z_t}{i^t} \quad 3.12$$

Für $Z_t = Z = \text{const.}$ und $i = \text{const.}$ ergibt sich:

$$K = -I_0 + Z \cdot \frac{(1+i)^t - 1}{i \cdot (1+i)^t} \quad 3.13$$

Mit dem Rentenbarwertfaktor RBF (Tabelle 21; S. 80) ergibt sich:

$$K = -I_0 + Z \cdot \text{RBF} \quad 3.14$$

Die Zahlung Z besteht aus den jährlichen Einnahmen und Ausgaben und stellt den Rückfluss (Gl.3.15) dar.

$$Z = \sum_i E_i - \sum_j A_j \quad 3.15$$

Ergibt die Berechnung eine positive Zahl ist die geplante Investition wirtschaftlich Sinnvoll.

¹³ Bezugspunkt

¹⁴ Meist die rechnerische Benutzungsdauer

3.11 Primärenergie

Der Primärenergiebedarf ist die Energiemenge, die neben dem Energieinhalt des Brennstoffes und der Hilfsenergie der Anlage auch die Energiemenge einbezieht, die zur Gewinnung, Umwandlung und Verteilung nötig ist.

Neben der Endenergie des Energieträgers ist der Primärenergiefaktor¹⁵ eine Einflussgröße für den Primärenergiebedarf. Es gilt, die brennwertbezogenen Primärenergien (Gl.: 3.16) und die heizwertbezogenen Primärenergien (Gl.: 3.17) zu unterscheiden (17). Dabei werden die Endenergien nach Energieträgern getrennt und mit den dazugehörigen Primärenergiefaktoren multipliziert. Bei der Heizwertbezogenen Primärenergie wird der Primärenergiefaktor zusätzlich mit einem Umrechnungsfaktor berechnet.

$$Q_P = \sum_j \left(Q_{f,j} \frac{f_{P,j}}{f_{HS} / HI_{f,j}} \right) \quad 3.16$$

$$Q_P = \sum_j (Q_{f,j} \cdot f_{p,j}) \quad 3.17$$

Der Heizwert gibt die maximal nutzbare thermische Energie an, die bei der Verbrennung eines Stoffes ohne Kondensation des Abgases frei wird. Beim Brennwert handelt es sich um die frei werdende thermische Energie einer Verbrennung mit Kondensation des Abgases.

3.11.1 Primärenergiefaktor

Die allgemeinen Primärenergiefaktoren und die Umrechnungsfaktoren für Endenergie sind in der DIN V 18599-1¹⁶ festgehalten.

Der Primärenergiefaktor ist das Verhältnis von der insgesamt aufgewendeten Primärenergie zur Endenergie (Gl. 3.18).

$$f_P = \frac{Q_P}{Q_f} \quad 3.18$$

¹⁵ Einheitenloser Faktor je Energieträger

¹⁶ S. 59; Tabelle A2

4 Varianten

In diesem Kapitel werden die zu vergleichenden Varianten definiert. Zur Veranschaulichung sind Energieflussdiagramme der Varianten dargestellt, in denen die Unterschiede in der Wärme- und Kälteerzeugung veranschaulicht sind.

4.1 Variante A

In der Variante A spiegelt sich das Energiekonzept (Abbildung 2; S. 6) wider. Der Wärmeaustausch wird im Kühl- und im Heizbetrieb über die BTA realisiert, zusätzlich werden Heizkörper(HK) eingesetzt.

Bei Wärmebedarf des Gebäudes wird die Energie aus der Geothermie unter Verwendung mechanischer Arbeit der WP auf ein höheres Temperaturniveau gehoben. Spitzenheizlasten werden über das öffentliche Fernwärmenetz zugeführt.

Die Kühllasten im Kühlbetrieb werden ebenfalls über die BTA abgeführt. Die Erzeugung der Kälteenergie erfolgt über direkte Kühlung aus der Geothermie, KKM und aktive Kühlung mittels reversibler WP.

Der Kühlbetrieb ist soweit möglich, mit der direkten Kühlung der Geothermie zu realisieren. Ist die Kühllast des Gebäudes größer als die Kühlleistung der Geothermie, arbeitet die KKM ergänzend. Im Spätsommer wird mit einer hohen Geothermie-Austrittstemperatur gerechnet, in diesem Fall erzeugt die reversible WP einen Temperaturhub, um die vereinbarten thermischen Bedingungen der Räume zu halten. Die reversible WP arbeitet im KM-Betrieb und die Geothermie hat die Funktion eines Rückkühlers.

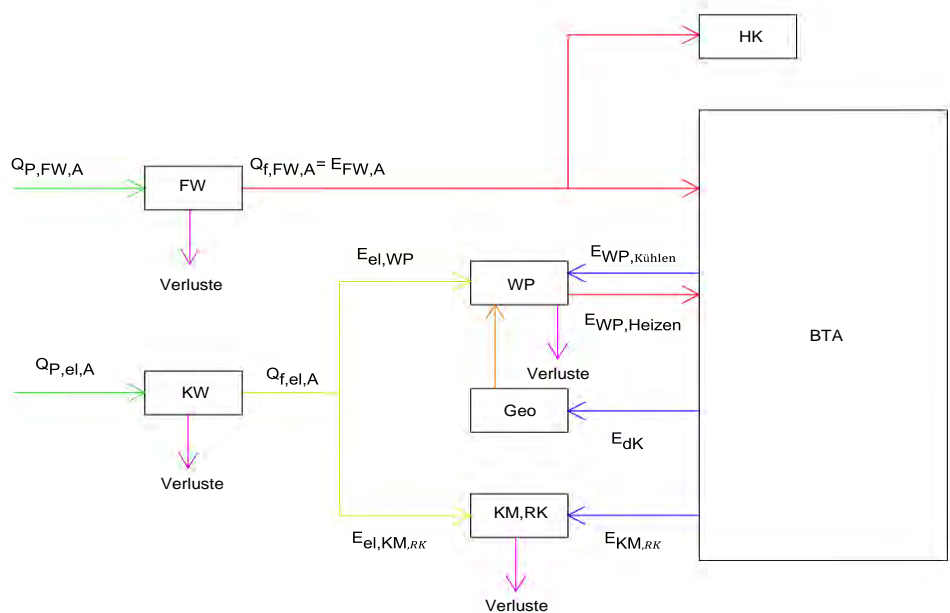


Abbildung 13 Energiefluss Variante A

4.2 Variante B

Die Wärmeenergie wird durch das öffentliche Fernwärmenetz der Vattenfall Europe AG dem System zugeführt. Wassergeführte KKM stellen die Kälteenergie im Kühlbetrieb zur Verfügung. Angetrieben werden die KKM über elektrische Leistung.

Eine BTA ist bei dieser Art von Kälte- und Wärmeversorgung ungeeignet, da das Temperaturniveau der FW zu hoch ist um die BTA zu speisen. Die BTA ist nur sinnvoll, wenn die Wärme- und Kälteversorgung auf niedrigen Temperaturen im Heizbetrieb, beziehungsweise auf hohen Temperaturen im Kühlbetrieb beruhen. Die Mehrkosten können in diesem Fall nicht durch Einsparung aufgefangen werden.

Im Heizbetrieb dienen konventionelle Plattenheizkörper als Wärmübertragungsflächen. Beim Kühlbetrieb sind ULK zur Abfuhr der Kühllasten vorgesehen. Für ULK sprechen die geringen Investitionskosten.

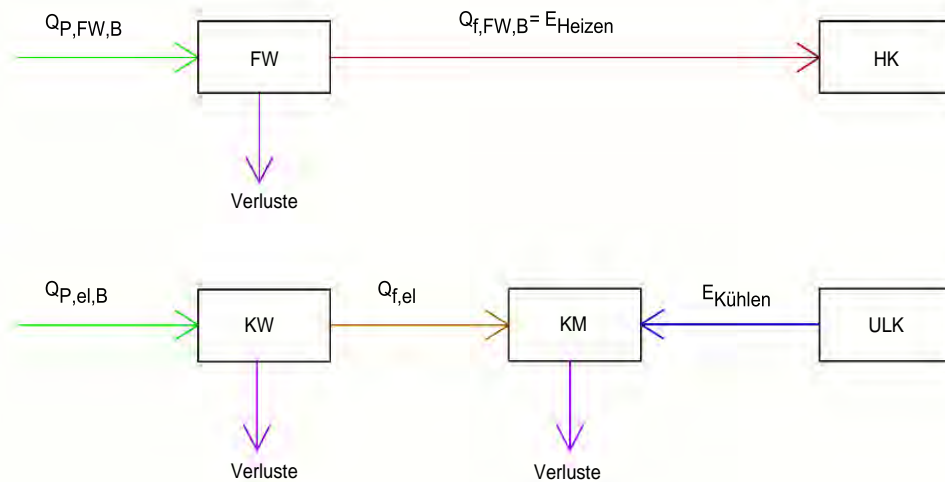


Abbildung 14 Energiefluss Variante B

5 Grundlagenermittlung

Im den folgenden Kapiteln werden die Lasten für das zu bestimmende Gebäude errechnet. Über die Bedarfsermittlung wird im ersten Schritt bestimmt welche maximalen Leistungen dem Gebäude zu- oder abzuführen sind. Im zweiten Schritt wird eine dezidierte Aussage über das tatsächlich zu erwartende Verhalten in Bezug auf die thermischen Leistungen getroffen.

5.1 Heizlast

Die Heizlast wird mit dem Programm MH-Software errechnet. Die Software legt die allgemeine Norm zur Heizlastberechnung¹⁷ zu Grunde.

Um die Transmissionswärmeverluste ermitteln zu können, ist die Gebäudegeometrie von entscheidender Bedeutung. Die Gebäudegeometrie wird im Berechnungs-Tool nach Vorgabe des Architekten (Abbildung 18-Abbildung 25; S. 52-54) generiert (Abbildung 15).

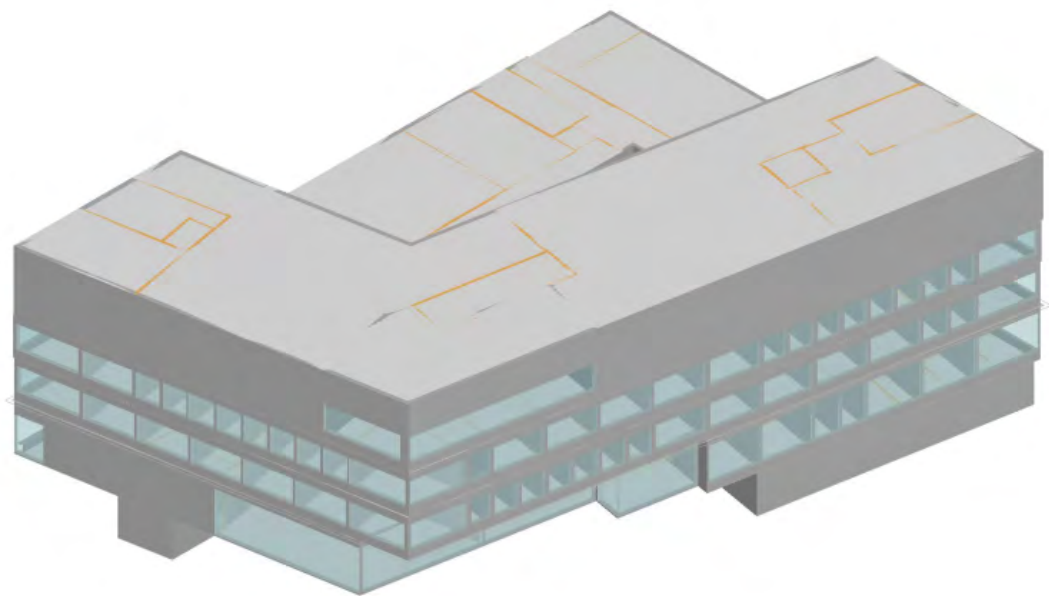


Abbildung 15 Generiertes Gebäude

Mittels der im Bauteilkatalog definierten Bauteile sind die U-Werte¹⁸ zu bestimmen. Die U- und g-Werte¹⁹ sind der EnEV, in der Mindestwerte des Referenzgebäudes festgelegt sind,

¹⁷ DIN 12831-1

¹⁸ Wärmedurchgangskoeffizienten

¹⁹ Energiedurchlass für transparente Bauteile

entnommen (Tabelle 14; S. 57). Zum gegenwärtigen Zeitpunkt der Planung liegen keine Angaben der U- und g-Werte vor, daher erfolgt die Bedarfsermittlung nach EnEV.

Mit Hilfe von Raumstempeln sind die Raumtemperaturen und Mindestluftwechsel zu definieren. Die zu berücksichtigenden Aussenlufttemperaturen sind der Norm entnommen. Für den Standort Hamburg ist eine Temperatur von -12 °C festgelegt (11).

Für die Innentemperaturen sind die Vorgaben des Bauherren beziehungsweise des Nutzers zu erfüllen. Je nach Nutzungsart des Raumes variieren die Innentemperaturen zwischen 15 °C und 23 °C.

Heizlasten, die durch den Luftwechsel anfallen, werden über den natürlichen Luftwechsel und den durch die RLT auftretende Luftaustausch bestimmt. In der Norm²⁰ ist der Mindestluftwechsel für die angegebenen Nutzungsarten mit $n=0,5 \frac{1}{h}$ festgelegt, demnach wird das Luftvolumen des Raumes pro Stunde ein halbes Mal gewechselt. In den RLT-Anlagen wird eine Wärmerückgewinnung von 80 % berücksichtigt. In dem Laborbereich, den sanitären Anlagen, den Kombizonen und den Technikräumen werden, anders als in den Büroräume, RLT-Anlagen eingesetzt. Die Luftwechselraten sind dem Lüftungskonzept zu entnehmen (Abbildung 29; S. 59). Auch für den Lüftungswärmeverlust ist die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur zu beachten.

Für die Infiltration wird mit $n_{50}=1,5 \frac{1}{h}$ angenommen. Dieser Wert ergibt sich aus der Norm und gilt für ein Gebäude errichtet nach EnEV mit RLT Anlagen.

Die Errechnung der Heizlast basiert auf den Gl. 3.6-3.10, die im Kapitel 3.7 beschrieben sind und nach den vorgestellten Angaben der Eingabewerte.

5.1.1 Ergebnis

Nach Definition der Eingangsgrößen für die Berechnung ergibt sich eine Norm-Heizlast von 371 KW. Der Wert setzt sich durch die Transmissionswärmeverluste und den Lüftungswärmeverlusten zusammen.

Die Transmissionswärmeverluste betragen 222 KW. Dieser Wert ergibt einen spezifischen Transmissionswärmeverlust 54,2 W/m². Der Transmissionswärmeverlust ist für ein EnEV-Gebäude vergleichsweise hoch, aber nachzuvollziehen. Als U- und g-Werte sind die maximalen Werte der EnEV entnommen, des Weiteren ist der Anteil von Außenfenster in der Fassade sehr hoch.

Die Lüftungswärmeverluste betragen 149 KW während sich aus natürlicher Infiltration ein Wärmeverlust von 1,8 KW ergibt. Die Wärmeverluste der RLT sind mit 129 KW berechnet, in den die Wärmerückgewinnung berücksichtigt ist. Wärmeverluste, die über den natürlichen Luftwechsel in Räumen auftreten, die nicht mit RLT-Komponenten ausgestattet sind, betragen 19 KW.

²⁰ DIN EN 12831 S.26

Demnach muss die Summe der Leistungen der Wärmeerzeuger $P_{\text{Heizen}} \geq 371 \text{ KW}$ sein.

5.2 Kühllast

Die Transmissionsverluste werden wie bei der Heizlast über das generierte Gebäude mit den entsprechenden U- und g-Werten berechnet. Über die Glaseigenschaften der Fenster und den Diffusen Himmelsstrahlungen des Standortes werden die Strahlungslasten ermittelt und fließen in die Rechnung ein. Die Glaseigenschaften geben Auskunft über den Wärmefluss durch Strahlung durch die Verglasung und Transmission.

Zur Bestimmung der Inneren Lasten sind Raumausstattung und die Anzahl der Personen zu bestimmen. Diese Angaben werden vom Bauherren beziehungsweise dem Nutzer gemacht. Für die im Bürobereich verwendete Ausstattung sind die Wärmeabgaben aus der VDI 2078 zu entnehmen (Tabelle 16; S. 62), die Wärmeabgabe der Beleuchtung wird mit $15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ angenommen und im Gerätelabor wurden Herstellerangaben von einer gesamten Kühllast von ca. 6,58 KW verwendet.

Je nach Aktivitätsgrad ist die Wärmeabgabe pro Person zu definieren. Für die Nutzungsart Büro und Labor ist in der VDI 2078²¹ eine Wärmeabgabe von 125 W pro Person angegeben.

5.2.1 Ergebnis

Die Spitzenkühllast des gesamten Gebäudes beträgt: 185,46 KW. Spitzenlasten werden nur erreicht wenn alle Inneren und Äußeren Kühllasten anfallen und abgeführt werden. Um diesen Fall zu erreichen werden die maximalen Außentemperaturen und maximale Sonneneinstrahlung angenommen.

Es gilt allerdings zu beachten, dass dieses Ergebnis für die Auslegung einer BTA nicht zu Grunde gelegt werden sollte. Bei der VDI 2078 handelt es sich um eine Richtlinie aus dem Jahr 1996, bei der die Betrachtung von aktivierten Bauteilen nicht zur Berücksichtigung kommt. Die Kühllast wird danach berechnet das die Kühllasten durch die Lüftungsanlage mit ihrer Wärmerückgewinnung dem Raum entzogen werden. Bei der Gebäudesimulation nach VDI 2067 werden die reinen Lasten des Raumes betrachtet ohne Kühlsystemberücksichtigung.

5.3 Gebäudesimulation

Zur genauen Bestimmung des Energie- und Leistungsbedarfes wurde eine Gebäudesimulation nach der VDI 2067 Blatt 10 und 11 durchgeführt.

Die Definition der inneren Lasten und Luftwechsel erfolgt nach den im Kapitel 9.2.3.1 abgebildeten Nutzerprofilen. Auf Grundlage der Nutzerprofile sind die Raumprofile zu Ver-

²¹ VDI 2078; S.14

stehen(Kap.: 9.2.3.1). Die Nutzerprofile wurden in Rücksprache mit den späteren Nutzern mit Blick auf den Nutzen der Räume erstellt.

Als Grundlage der Luftwechsel dient das Lüftungskonzept (Abbildung 29; S. 59). Die Angaben verstehen sich als Luftwechselrate pro Stunde, außer die Angaben bei den Diagramm 25; Diagramm 26; Diagramm 31; Diagramm 32; Diagramm 33. Die beziehen sich auf den Luftvolumenstrom pro Stunde.

Die Grundlage für die meteorologischen Bedingungen bildet das TRY (15) der Zone 3 (Abbildung 16).

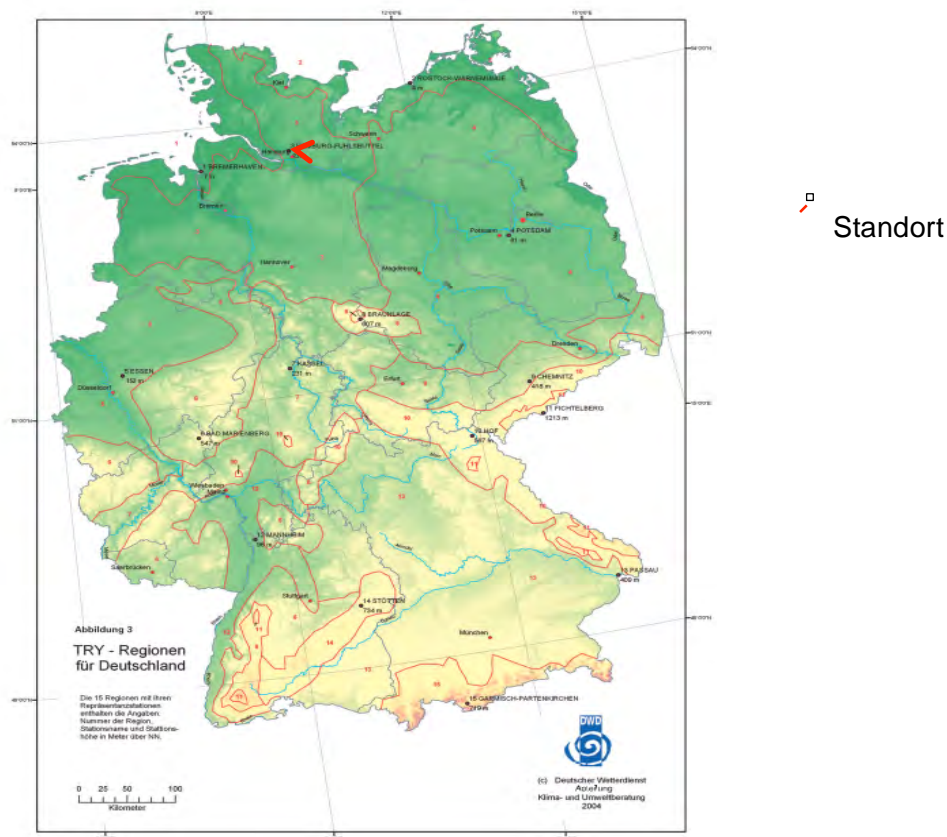


Abbildung 16 Zonen des Testreferenzjahr

Die maximale Außenlufttemperatur ist mit 29 °C angenommen, die minimale Außenlufttemperatur liegt bei -11 °C. Als Grundlage der Simulationsberechnung dient Häufigkeitsverteilung der Außenlufttemperatur (Diagramm 7).

5.3.1 Ergebnis

Das Simulationsergebnis wird in Form von Diagrammen und zur besseren Weiterbearbeitung im Tabellenformat²² ausgegeben. Aus den Diagrammen sind die Lasten in Abhängigkeit zu den Stunden pro Jahr zu entnehmen.

Bei der Gebäudesimulation wird für jede Stunde des TRY eine Heizlastberechnung (Kap.: 3.7) unter zusätzlicher Berücksichtigung der inneren Wärmequellen durchgeführt. Die auftretenden inneren Kühllasten sind unter Berücksichtigung der Zeitprofile zu betrachten. Daraus ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung der Heizlast (Diagramm 1).

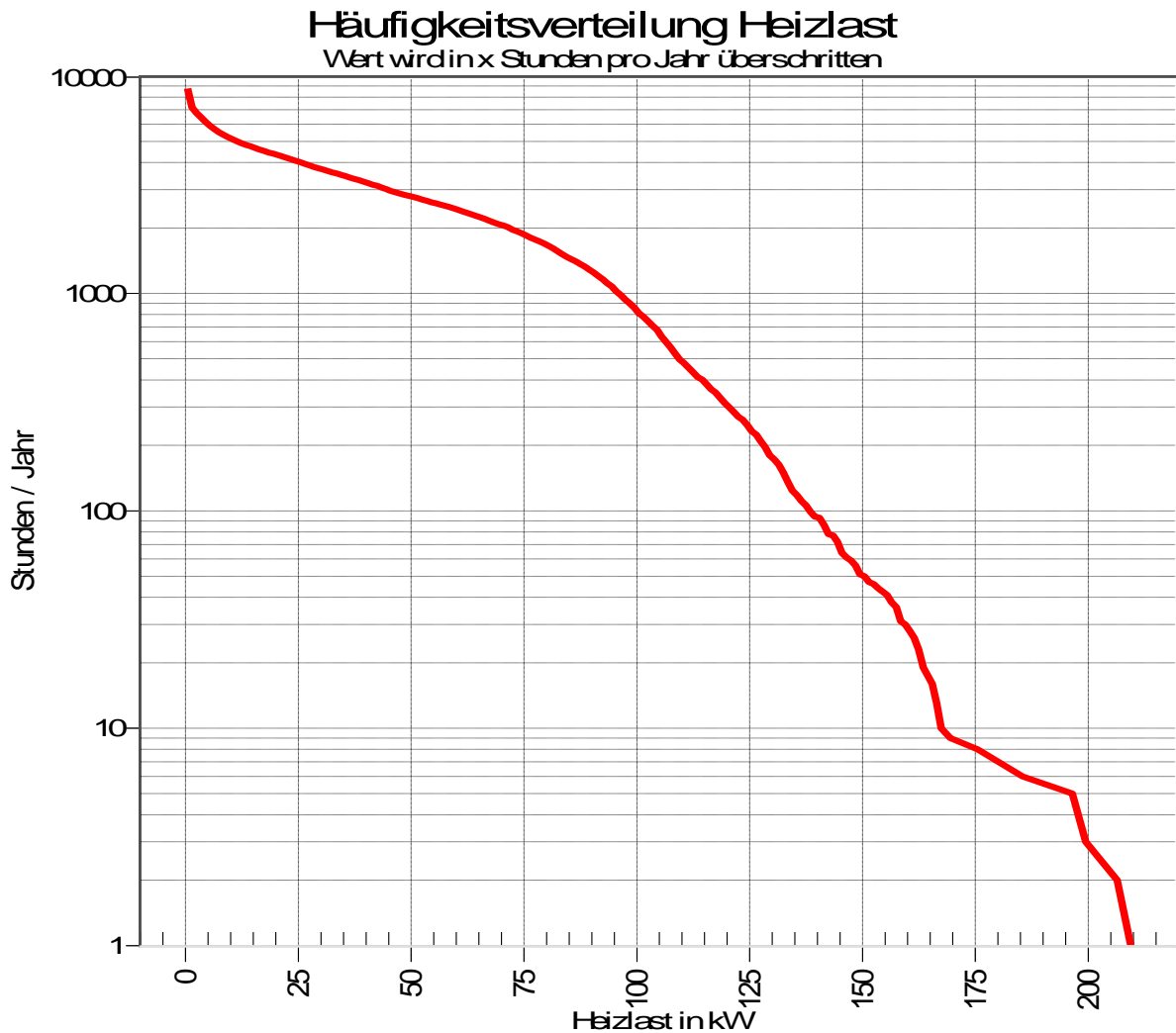


Diagramm 1 Häufigkeitsverteilung der Heizlast

Es wird für jede Stunde des TRY eine Kühllastberechnung (Kap.: 3.7), unter Berücksichtigung des individuellen Nutzen, durchgeführt. Die Zeitprofile der inneren Lasten sind im Anhang aufgeführt. Aus diesen Eingabewerten ergibt sich die Häufigkeitsverteilung der Kühllast (Diagramm 2).

²² In Microsoft-Excel

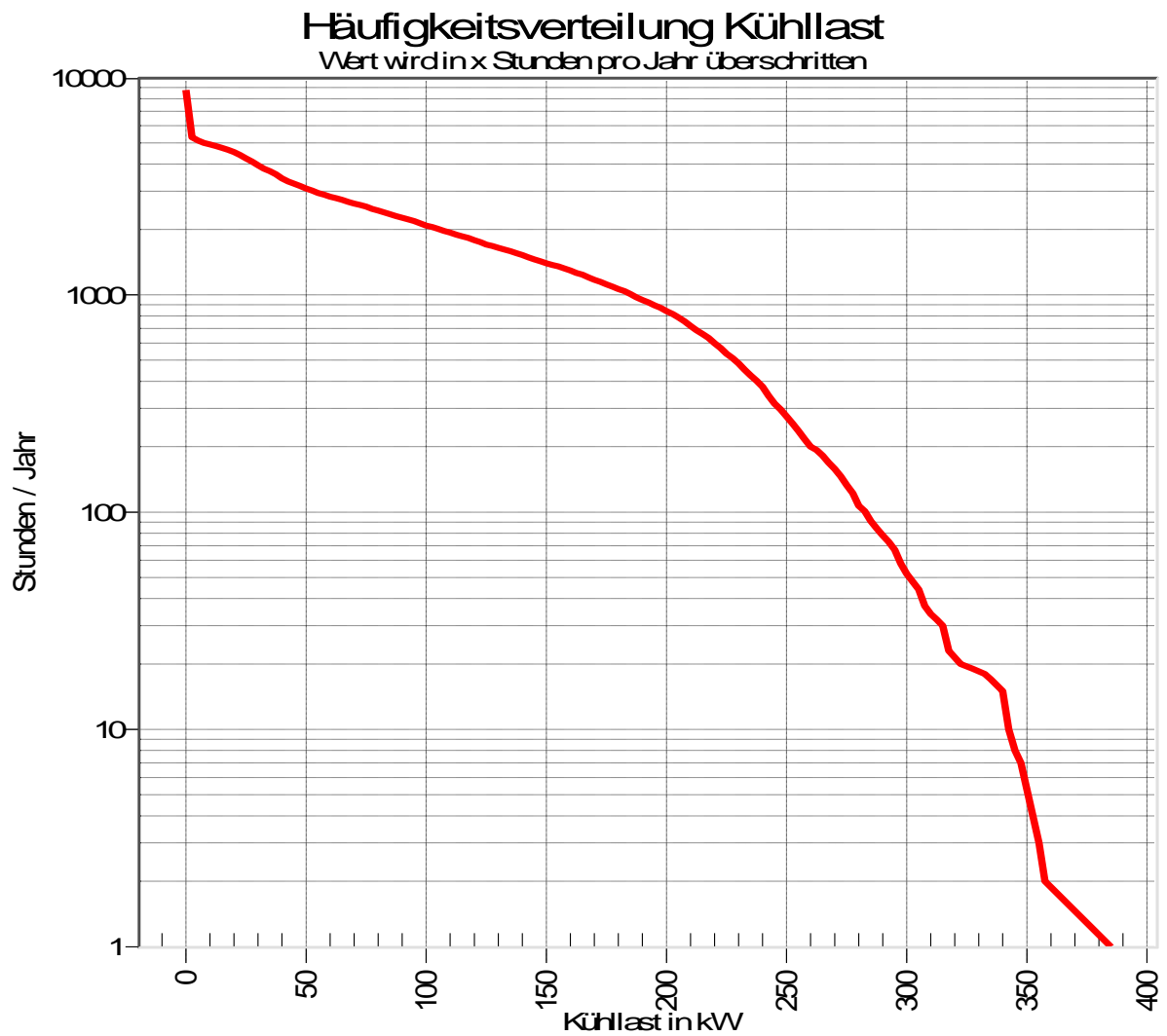


Diagramm 2 Häufigkeitsverteilung der Kühllast

Bei einer Gebäudesimulation wird der individuelle Nutzen betrachtet. Unter dieser Berücksichtigung ist es zu erklären, dass die maximalen Lasten bei der Simulation niedriger als bei der Heizlastberechnung nach DIN²³ und der Kühllastberechnung nach VDI²⁴ sind.

²³ DIN 12831-1

²⁴ VDI 2078

Als Jahresübersicht der auftretenden Heizlast dient das Diagramm 3. In diesem Diagramm ist aufgeführt, zu welcher Zeit eines Jahres eine errechnete Heizlast abzuführen ist. Es ist zu erkennen, dass in den vermeintlich wärmeren Sommermonaten zum Teil keine Heizlasten im Tagesverlauf abzuführen sind. Generell ist dem Diagramm eine geringere Heizlast im Zeitraum von 7-17 Uhr zu entnehmen, begründet mit dem Auftreten von inneren Wärmequellen im Büro- und Laborbetrieb. Durch die inneren Wärmequellen wird aus dem Raum eine durch diese definierte Heizlast abgeführt, die nicht mehr über das Heizsystem abzuführen ist.

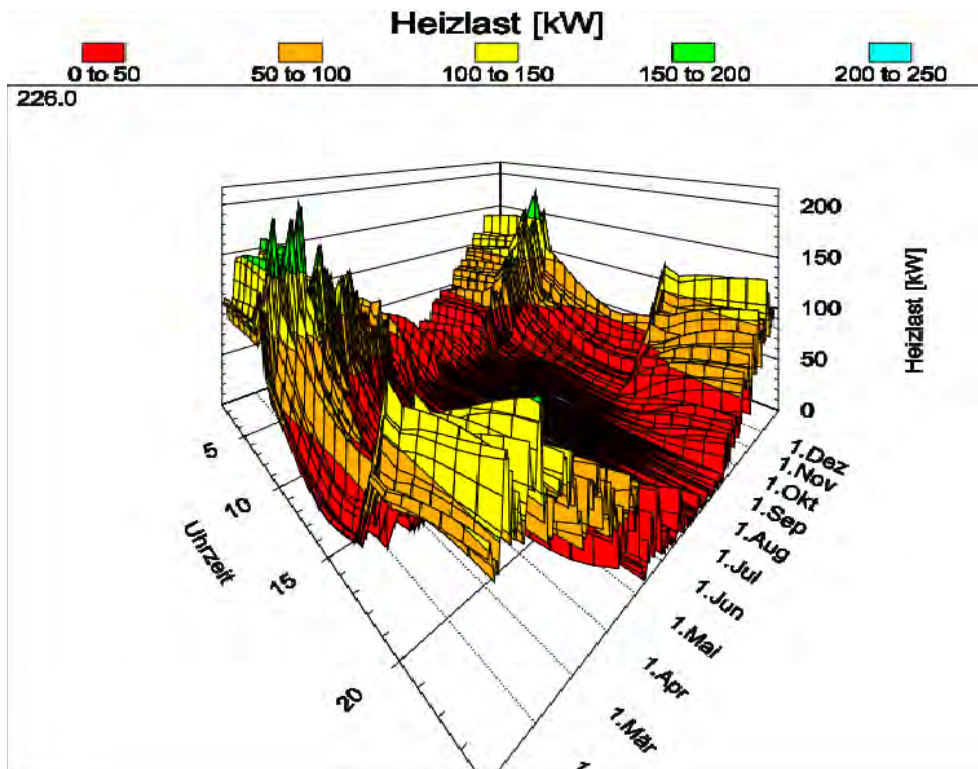


Diagramm 3 Jahresverlauf Heizlast

Im Diagramm 4 ist der Jahresverlauf der Kühllast aufgezeigt. Die abzuführende Kühllast im Winter ist im Vergleich zum Jahresmittelwert sehr niedrig. Die Kühllast im Winter bezieht sich größtenteils auf die inneren Lasten der Raumnutzung. Das ist daran zu erkennen, dass die Kühllasten im Betrieb von 7-17 Uhr erhöht sind. In den Zeiten nach 17 Uhr, beziehungsweise vor 7 Uhr, fallen keine bis wenig Lasten im Winter an. In den Sommermonaten ist die Kühllast im Vergleich zum Jahresmittelwert sehr hoch. Die hohen Kühllasten im Sommer beruhen auf höheren äußeren Lasten durch erhöhte Außenlufttemperaturen und erhöhter Sonnenstrahlung.

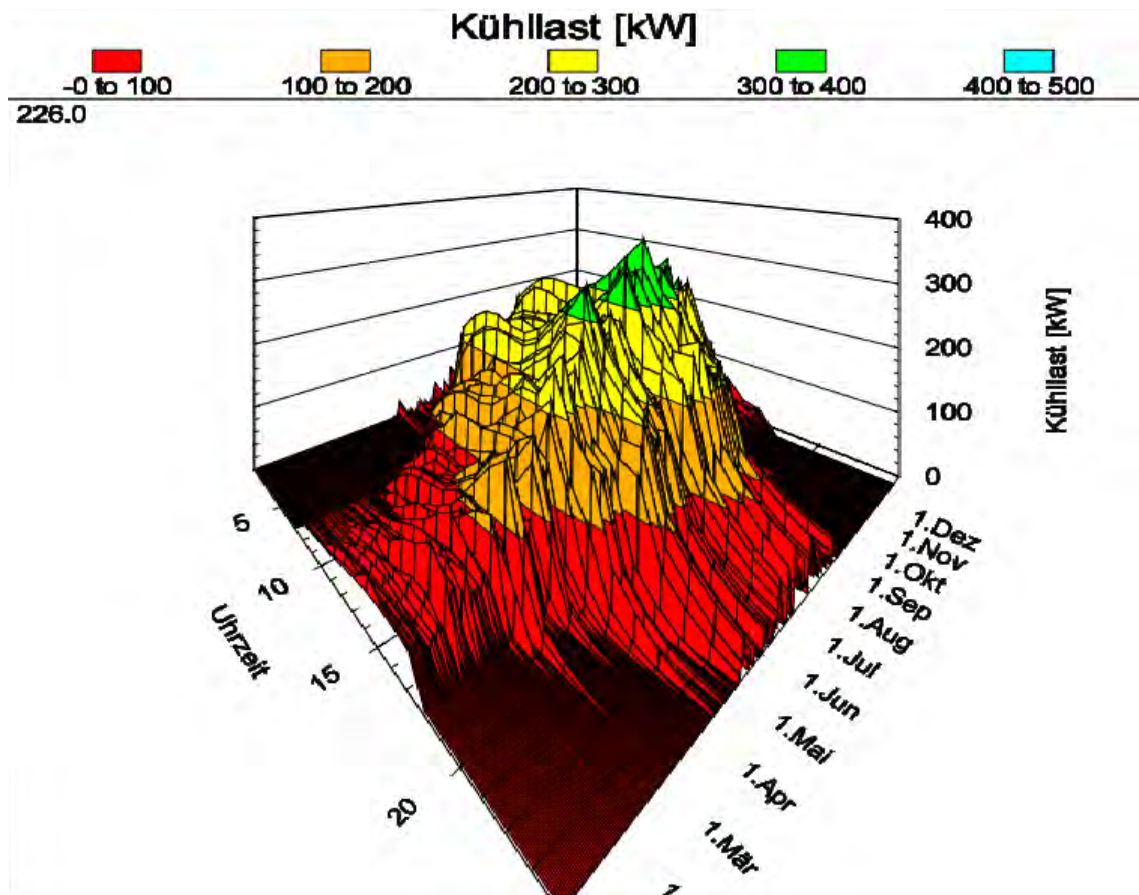


Diagramm 4 Jahresverlauf Kühllast

Zur besseren Weiterbearbeitung dient der Auswurf der Berechnungsergebnisse als Excel-Tabelle.

5.4 Bodengutachten

Für ein zurückliegendes Bauvorhaben in unmittelbarer Nähe²⁵ wurde im Zuge des damaligen Planungsprozesses ein Bodengutachten erstellt und liegt als Grundlage vor. Das Bodengutachten hat die Wärmeleitfähigkeiten des Bohrloches und des Bodens ermittelt.

Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit einem Geothermal Response Test ermittelt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit des Bodens liegt bei 2,64 W/(m K), außerdem wurde ein Bohrlochwiderstand von 0,0106 K/(W/m) ermittelt.

Die Wärmeleitfähigkeiten dienen als Grundlage der durchgeführten Bodensimulation. Damit ergibt sich eine spezifische Leistung der Erdwärmesonden im Kühlbetrieb von 39,49 W/m und im Heizbetrieb von 24,53 W/m.

Das Bodengutachten dient im Hinblick auf die spezifischen Leistungen der Erdwärmesonden als Grundlage, die durch eine Bodensimulation in Abhängigkeit mit der damaligen Gebäudesimulation ermittelten Geothermie-Austrittstemperaturen dienen als Richtwerte. Um eine dezidierte Aussage über das Verhalten der Geothermie bei den Anforderungen dieses Gebäudes treffen zu können, ist eine Bodensimulation in Verbindung mit der Gebäudesimulation zu empfehlen. Der Kühlbetrieb ist von der Geothermie-Austrittstemperatur abhängig.

²⁵ Ca. 100 m Entfernung

6 Variantenvergleich

Das folgende Kapitel beinhaltet die Betrachtung der einzelnen Varianten. Um detaillierte Aussagen treffen zu können, gilt es die Leistung der einzelnen Komponenten auf Grundlage der Gebäudesimulation und der Heiz- und Kühllastberechnung auszulegen. Nachdem die Komponenten dimensioniert sind werden die Nutz- und Endenergien ermittelt. Mit den ermittelten Energien werden die Kosten und der Primärenergiebedarf bestimmt.

6.1 Auslegung

Der FW-Anschluss wird nach der Heizlastberechnung (Kap. 5.1.1; S.23) ausgelegt. Aus den im Kapitel 5.2.1 aufgeführten Gründen kommt die Kühllastberechnung in diesem Fall nicht zur Betrachtung. Daher wird die KM nach der maximalen Kühllast aus der Simulation dimensioniert. Um die thermische Energieversorgung sicherzustellen werden die KM und der FW-Anschluss nach den maximalen Lasten ausgelegt. Die maximale Heizlast ergibt sich aus der Heizlastberechnung die maximale Kühllast wurde der Gebäudesimulation entnommen.

Im Idealfall wird die BTA nur mit der Leistung aus Geothermie mit WP gespeist. Dafür wird im ersten Schritt die Leistung der BTA ermittelt.

Als Grundlage zur Ermittlung der BTA-Flächen dienen Architekten-Grundrisse (S. 52 & 53), ein Materialkonzept (Abbildung 26-Abbildung 28; S. 56-57) des Architekten und die vom Hersteller gegebenen Angaben über eventuell auftretende Sperrzonen. Als Sperrzonen gelten, in diesem Fall, Bereiche von ca. 1 m, die um Stützen auszusparen sind.

Zur Ermittlung der Flächen wird mit dem Zeichenprogramm Auto-CAD MEP gearbeitet. Die Sperrzonen und Bereiche mit abgehängenen Decken werden definiert und gekennzeichnet. Bereiche in denen eine BTA vorgesehen werden soll, sind andersfarbig gekennzeichnet. Das Programm sieht eine Analysefunktion zur Ermittlung von Flächen vor, darüber werden die BTA-Flächen ermittelt (Abbildung 17).

Hierbei sind:

- Sperrflächen Gelb
- Abhangdecken Blau
- BTA-Fläche Orange

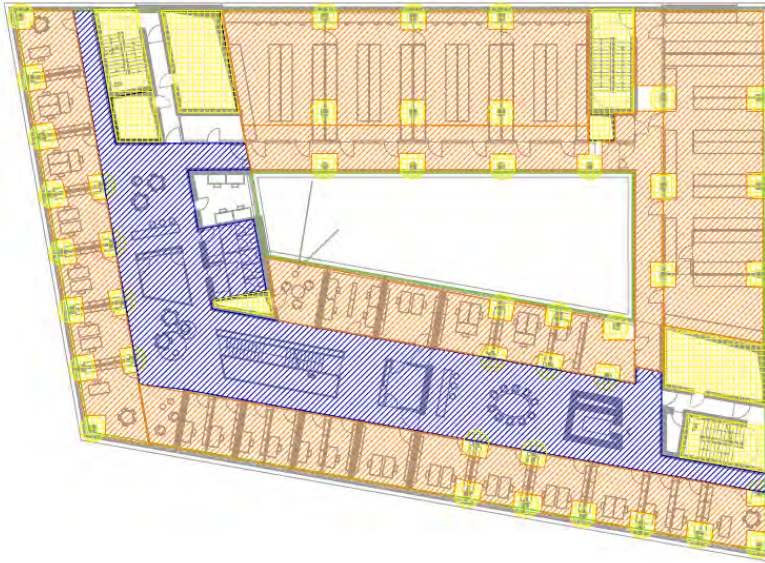


Abbildung 17 Ermittelte BTA-Fläche 1.OG

Nach dem gleichen Prinzip werden das EG & 2. OG (S. 73 ; 74) behandelt. Die Geschossdecken zwischen UG und EG sowie zwischen 2. OG und 3. OG werden nicht mit einer BTA ausgestattet.

Die ermittelten BTA-Flächen, pro Geschoss und nach Teilbereichen unterteilt, sind in der Tabelle 1 definiert.

	EG	1. OG	2. OG	Gesamt
BTA-Fläche (Geschossdecke) [m ²]	808	442	471	1721
BTA-Fläche (Decke gegen Außenluft) [m ²]	-	594	-	594

Tabelle 1 BTA-Fächen

Bei der Auslegung der Vorlauftemperatur der BTA gilt es zu beachten, die Kondensations-temperatur bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % nicht zu unterschreiten (S. 76). Die vorzuladende Temperatur im Kühlbetrieb wird mit Hilfe eines H-x-Diagramms der Luft ermittelt. Als Auslegungstemperatur im Kühlbetrieb wird 26 °C mit einer 50 % r.F. angenommen. Demnach ist eine Vorladung der BTA mit 16 °C möglich, bietet allerdings keinerlei Sicherheit. Um Feuchtigkeitsschwankungen ausgleichen zu können, wird die BTA mit 18 °C vorgeladen. Die Vorlauftemperatur der BTA wird, wie vorgehend beschrieben, mit einer Temperaturspreizung von $\Delta T = 3 \text{ K}$ im Kühlbetrieb auf 18 °C ermittelt.

Die Vorlauftemperatur im Heizbetrieb wird mit 29 °C mit einem $\Delta T = 3 \text{ K}$ festgelegt. Um bei plötzlichen witterungsbedingten Änderungen keine Übertemperierung des Raumes hervorzurufen, ist eine höhere Vorlauftemperatur im Heizbetrieb nicht zu empfehlen.

Daraus ergibt sich eine spezifische Leistung der BTA laut Herstellerangaben (Abbildung 34; S. 79) im Kühlbetrieb von 45 W/m² und im Heizbetrieb 44 W/m² bei freier Strahlung nach oben und unten. In dem Laborbereich und dem angrenzende Flur des 1. OG ist eine an Außenluftgrenzende Geschossdecke. In diesem Fall beträgt die Leistung der BTA 30 W/m² im Kühlbetrieb und 24 W/m² im Heizbetrieb. Bei einer BTA ohne darüber liegendem Geschoss wird die Strahlungswärme der BTA über den Fußboden vernachlässigt. Um die gesamte Leistung der BTA zu ermitteln, wird die BTA-Fläche mit der spezifischen Leistung multipliziert (Tabelle 2).

In der Tabelle 2 sind die Geschossflächen des EG und des 1. OG mit den entsprechenden spezifischen Leistungen aufgeführt. Das 1. OG teilt sich in die Flächen gegen an Außenluft grenzende Decken und in Geschossdecken auf.

	spez. Leistung [W/m ²]	Flächen [m ²]	Leistung [KW]
Kühlbetrieb	45	1721	77
	30	594	18
	-	-	<u>95</u>
Heizbetrieb	44	1721	76
	24	594	14
	-	-	<u>90</u>

Tabelle 2 Leistung der BTA

Im Kühlbetrieb gibt die BTA eine Leistung von $P_{\text{BTA-Kühlen}} = 95 \text{ KW}$ ab. Aufgrund des schlechteren Wärmeflusses gibt die BTA im Heizbetrieb eine Leistung von $P_{\text{BTA-Heizen}} = 90 \text{ KW}$ an die Raumluft ab.

Die BTA kann bis zu einer Geothermie-Austrittstemperatur von $T_{\text{Geo-RL}} \leq 18 \text{ °C}$ direkt mit dem Temperaturniveau der Geothermie betrieben werden. Aus der Bodensimulation wurde entnommen, dass zwischen der $t_{\text{WP-1}} = 3970 \text{ h}$ und der $t_{\text{WP-2}} = 6600 \text{ h}$ (Diagramm 34; S. 73) eines Jahres diese Austrittstemperatur überstiegen wird.

Über eine Wahrheitsfunktion²⁶, die als Ausgabe die zu der Stunde auftretende Kühllast ausgibt, lassen sich die Leistungen, die mittels reversibler WP und direkte Kühlung erbracht werden, errechnen.

Wenn man den Ansatz verfolgt, dass die BTA nur mit der Geothermie gespeist wird, muss die Geothermie im reversiblen Betrieb $P_{\text{WP-Kühlen}} = P_{\text{BTA-Kühlen}} = 95 \text{ KW}$ leisten. Über die Leistungszahl der WP im Kühlbetrieb $\epsilon_{\text{WP,Kühlen}} = 6,9^{27}$ lässt sich die Geothermie-Leistung und damit die Leistung im direkten Betrieb ermitteln.

²⁶ =wenn(Zelle<=Wert;1;0) (Microsoft-Excel)

²⁷ Herstellerangaben

$$P_{\text{Geo-Kühlen}} = P_{\text{BTA-Kühlen}} + \frac{P_{\text{BTA-Kühlen}}}{\epsilon - 1} \quad 6.1$$

Daraus ergibt sich eine direkte Kühlleistung von $P_{\text{Geo-Kühlen}} = 111 \text{ KW}$. Bei einer spezifischen Leistung der Geothermie von $q_{\text{ES-Kühlen}} = 39,49 \text{ W/m}$ (Tabelle 17; S. 72) im Kühlbetrieb, ergibt sich eine gesamte Länge der Erdwärmesonden von $l_{\text{ES}} = 2813 \text{ m}$. Damit sind $n_{\text{ES}} = 28$ Stk. Erdwärmesonden mit annähernd 100 m Tiefe vorzusehen. Die Überschussleistung bei direkter Kühlung wird zur Konditionierung der Zuluft verwendet.

Die spezifische Leistung im Heizbetrieb ist mit $q_{\text{ES-Heizen}} = 24,53 \text{ W/m}$ (Tabelle 17; S. 72) geringer und damit ist die Gesamtleistung im Heizbetrieb niedriger. Im Heizbetrieb wird dem Erdboden mittels der Erdwärmesonden $P_{\text{Geo-Heizen}} = 68 \text{ KW}$ entzogen.

Mittels der WP, mit einer Leistungszahl von $\epsilon_{\text{WP,Heizen}} = 5,2^{27}$, wird die Leistung die dem Erdboden entzogen wird auf $P_{\text{WP-Heizen}} = 85 \text{ KW}$ angehoben.

Mit Hilfe einer Wahrheitsfunktion werden aus dem Simulationsergebnis die Volllaststunden generiert. Für die Kühlleistung wird bei direktem Betrieb $P_{\text{Geo-Kühlen}} = 111 \text{ KW}$ und bei reversibler Betriebsweise eine Leistung von $P_{\text{WP-Kühlen}} = 95 \text{ KW}$ angesetzt. Die Leistung der WP im Heizbetrieb beträgt $P_{\text{WP-Heizen}} = 85 \text{ KW}$.

Mit Wahrheitsfunktionen werden aus der Simulationstabelle die Heiz- und Kühllasten ermittelt an denen die WP- und Geothermie-Leistung überschritten werden. Damit werden die Volllaststunden der Anlage ermittelt.

Daraus ergeben sich folgende Volllaststunden der Geothermie (Tabelle 3).

Volllaststunden Heizbetrieb	Volllaststunden Kühlbetrieb direkt	Volllaststunden Kühlbetrieb reversible	Volllaststunden Geothermie
1437	777	146	2360

Tabelle 3 Volllaststunden Geothermie und WP bei 111 KW Kühlleistung

Die Volllaststunden bei der Geothermie-Leistung sind zu niedrig um eine wirtschaftliche Anlage zu konzipieren. Bei 2360 h/a Volllastung ist keine Wirtschaftlichkeit zu erwarten.

Aufgrund der geringen Volllaststunden der Geothermie bei der Dimensionierung nach der BTA, wird die Geothermie mit einer geringeren Leistung untersucht. Mit den spezifischen Leistungen der Geothermie und den Leistungszahlen der WP wurde die Tabelle 4 generiert, um die von einander abhängigen Leistungen der Geothermie darzustellen.

Aufgrund der unterschiedlichen Entzugsleistungen und Leistungszahlen im Heiz- und Kühlbetrieb ergeben sich unterschiedliche Gesamtleistungen. Die in Tabelle 4 dargestellte Leistung beziehen sich auf die Leistungen bei 10-20 Erdwärmesonden.

Heizleistung [KW]	Geothermie-Entzugsleistung[KW]	Leistung direkte Kühlung [KW]	Leistung reversible Betriebsweise [KW]
37	30	48	41
40	32	52	44
42	34	55	47
45	36	59	50
47	38	61	52
50	40	65	56
52	42	68	58
55	44	72	61
57	46	74	63
59	48	77	66
62	50	81	69

Tabelle 4 Leistungen der Geothermie

Durch die in der Tabelle 4 dargestellten Abhängigkeiten der Leistungen kann man nun die Grafiken der Häufigkeitsverteilungen (Diagramm 1, Diagramm 2) auf eine zu erwartende hohe Vollauslastung beurteilen. Aus den Häufigkeitsverteilungen lässt sich schließen, dass der Bereich $40 \text{ KW} < P_{\text{Heizen}} < 60 \text{ KW}$ Heizleistung mit den entsprechenden Kühllasten näher zu untersuchen ist.

Die Leistungen in Tabelle 4 wurden nach der spezifischen Leistung der Erdsonden gewählt.

Mit einer Wahrheitsfunktion wie oben beschrieben werden die Volllaststunden der späteren Geothermie bei entsprechenden Leistungen ermittelt (Tabelle 5).

Leistung der Geothermie im Kühlbetrieb	Volllaststunden direkte Kühlung	Volllaststunden reversible WP	Volllaststunden WP Heizbetrieb	Volllaststunden Gesamt
36	2053	662	3877	6592
39	1901	637	3712	6250
43	1763	581	3563	5907
47	1666	507	3406	5579
51	1582	454	3265	5301
55	1503	422	3123	5048
59	1432	397	2962	4791
63	1369	363	2841	4573
67	1310	347	2740	4397
71	1259	313	2626	4198
75	1205	289	2528	4022

Tabelle 5 Volllaststunden in Abhängigkeit der Leistung

Unter der Annahme, dass eine Geothermie mindestens 4500 h/a bei maximaler Leistung arbeiten muss, um rentabel zu sein, wird die Geothermie mit 48 KW Heizleistung, 63 KW direkte Kühlleistung und 57 KW Kühlleistung mit reversibler WP dimensioniert.

6.2 Energieaufwand

Die Energie ist definiert als Leistung multipliziert mit der Zeit (Gl.: 6.2).

$$E=P \cdot t$$

6.2

Durch das Summieren des Leistungsbedarfes zu jeder Stunde, die durch die Simulation ausgegeben wurde, erhält man den Energiebedarf eines Jahres.

Zum Beheizen des Gebäudes werden insgesamt $E_{\text{Heizen}} = 319$ MWh/a Energie benötigt. Das Gebäude benötigt im Kühlbetrieb insgesamt eine thermische Energie von $E_{\text{Kühlen}} = 518$ MWh/a.

6.2.1 Variante A

Die Wärmebereitstellung bei der Variante A erfolgt über den FW-Anschluss und die WP. Die WP stellt eine Leistung von bis zu 48 KW zur Verfügung, die darüber hinaus anfallenden Lasten werden mit der FW gedeckt. Im Kühlbetrieb stellt die Geothermie Energie für eine direkte Kühlung zur Verfügung. Bei zu hohem Temperaturniveau wird die reversible WP betrieben um einen Temperaturhub zu erwirken. Maximal deckt die Geothermie eine Leistung von bis zu 63 KW ab. Fallen höhere Lasten an so arbeitet die KM ergänzend.

Die direkte Kühlung ist in den Zeiträumen $t_{dK} < 3970$ h und $t_{dK} > 6600$ h eines Jahres zu realisieren. Die in diesem Zeitraum anfallenden Kühllasten werden pro Stunde ermittelt. Aus den ermittelten Kühllasten werden die Kühllasten pro Stunde ermittelt, in denen 65 KW nicht überschritten werden. Die Kühllasten pro Stunde in Summe ergeben die Energie welche durch die direkte Kühlung bereitgestellt werden (Tabelle 6). Analog dazu erarbeitet man gleiches für die Leistung (57 KW) der reversibel arbeitenden WP im Zeitraum 4790 h $> t_{WP} < 6518$ h eines Jahres (Tabelle 6).

In den Stunden in den die Kühllasten die Leistung der Geothermie bzw. der reversiblen WP überschreiten, arbeitet ergänzend die KM. Die Energie der KM wird nach Abzug der Leistungen der reversiblen WP, beziehungsweise der direkten Kühlung, von den anfallenden Kühllasten ebenfalls durch das Summieren der Kühllasten aus der Simulation errechnet (Tabelle 6).

Energie der direkten Kühlung [MWh/a]	Energie der reversible WP [MWh/a]	Energie der KM [MWh/a]
217	59	275

Tabelle 6 Energiebereitstellung Kälteerzeugung

Über die Leistungszahl bei reversibler Betriebsweise der WP und der KM lässt sich die elektrische Energie zum Betrieb der Kompressoren ermitteln.

Die WP hat eine Leistungszahl von $\epsilon_{m,WP,K\u00fchlen} = 6,9^{27}$. Daraus ergibt sich einen elektrische Energieaufnahme des Kompressors von $E_{el,WP,K\u00fchlen} = 9 \text{ MWh/a}^{28}$.

F\u00fcr die KM ist es von Bedeutung an welchem Betriebspunkt sie arbeitet, da die Arbeitszahl $\epsilon_{m,KM}$ je nach Betriebspunkt variiert (Tabelle 7).

Betriebspunkt [KW]	400	300	200	100
Arbeitszahl	4,84	6,56	8,33	9,65

Tabelle 7 Betriebspunkte KM

Ermittelt man nun die erzeugte thermische Energie bei den jeweiligen Betriebspunkten, ergibt sich die zu erbringende elektrische Energie. Die Energie l\u00e4sst sich mit der Simulationsausgabe in Excel bestimmen, bei der die zu erbringende Leistung der jeweiligen Stunde aufgef\u00fchrt ist (Tabelle 8).

	Betriebspunkt	Betriebspunkt	Betriebspunkt	Betriebspunkt	Summe
Leistung [KW]	400-300	300-200	200-100	100-0	-
Arbeitszahl	4,84	6,56	8,33	9,65	-
K\u00e4lteenergie [kWh/a]	322	48373	157042	66717	275154
Elektrische Energie [kWh/a]	67	7374	18853	2561	<u>33207</u>

Tabelle 8 Elektrische Energie KM Variante A

Mit der Arbeitszahl beim jeweiligen Betriebspunkt l\u00e4sst sich die elektrische Energieaufnahme des Kompressors bestimmen (Tabelle 8). Bei geringerer K\u00e4lteleistung der KM wird die Arbeits- bzw. K\u00e4ltezahlgro\u00dfer, die KM hat bei geringerer Leistung eine h\u00f6here Effizienz. So erh\u00e4lt man die Endenergie pro Jahr in elektrischer Form zum Betrieb der KM $E_{el,KM} = 33 \text{ MWh/a}$. F\u00fcr den R\u00fcckk\u00fchler fallen nochmals $E_{el,RK} = 18 \text{ MWh/a}$ an. Der R\u00fcckk\u00fchler hat eine elektrische Leistungsaufnahme $P_{el,RK} = 6,5 \text{ kW}$ bei einer Betriebsdauer von $t_{\text{Betrieb}} = 2790 \text{ h/a}$.

Die WP deckt Heizlasten bis 48 KW ab. Daf\u00fcr werden die Heizlasten < 48 KW pro Stunde ermittelt und summiert, woraus sich die Nutzenergie $E_{WP,Heizen} = 206 \text{ MWh/a}$, die mittels WP dem Geb\u00e4ude zugef\u00fchrt wird, ergibt.

²⁸ Rechnung S. 83

Mit der Arbeitsszahl der WP $\epsilon_{WP,Heizen} = 5,2^{27}$ lässt sich die Endenergie in Form von elektrischer Energie errechnen. Der Kompressor der WP hat einen elektrischen Energiebedarf pro Jahr von $E_{el,WP,Heizen} = 39 \text{ MWh/a}$.

Wird die Heizlast einer Stunde nicht mit der Leistung der WP gedeckt, so wird ergänzend mit der FW geheizt. Die zu erbringende Energie pro Jahr der FW beträgt $E_{FW,A} = 112 \text{ MWh/a}$. Die Endenergie der FW lässt sich mit der Nutzenergie gleichsetzen, so ergibt sich ein Endenergieeintrag von $Q_{f,FW,A} = E_{FW,A} = 112 \text{ MWh}$.

Summiert man den Bedarf an elektrischer Endenergie zum Betrieb des Kompressors für die WP und dem der KM und den Antrieb des Rückkühlers erhält man $Q_{f,el,A} = 99 \text{ MWh/a}$.

6.2.2 Variante B

Nach gleicher Vorgehensweise wie bei der Variante A wird die elektrische Energieaufnahme des Kompressors der KM ermittelt (Tabelle 9).

	Betriebspunkt	Betriebspunkt	Betriebspunkt	Betriebspunkt	Summe
Leistung [KW]	400-300	300-200	200-100	100-0	-
Arbeitszahl	4,84	6,56	8,33	9,65	-
Kälteenergie [kWh/a]	16787	186992	182551	132133	518463
Elektrische Energie [kWh/a]	3468	28505	21915	13625	<u>67513</u>

Tabelle 9 Elektrische Energie KM Variante B

Über die Arbeitszahlen lässt sich die elektrische Energieaufnahme zum Betrieb der KM beim jeweiligen Betriebspunkt errechnen (Tabelle 9). So erhält man die Endenergie in elektrischer Form der Variante B.

Die Endenergie der FW lässt sich mit der Nutzenergie (Kap.: 6.2; S. 36) gleichsetzen, so ergibt sich ein Endenergieeintrag von $Q_{f,FW,B} = E_{Heizen} = 319 \text{ MWh}$.

6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Kosten der Wärme- und Kälteerzeugung teilen sich in

- Investitionskosten
- Betriebskosten
- Betriebsgebundene Kosten

auf.

Als Investitionskosten werden Kosten, die zur Anschaffung der Anlage beziehungsweise der einzelnen Komponenten aufzubringen sind, betrachtet. Als Betriebskosten werden die Kosten verstanden, die zum Betreiben der Anlage nötig sind. In diesem Fall handelt es sich um Endenergiekosten in Form von Strom und FW. Bei den Betriebsgebundenen Kosten werden Kosten wie Wartung, Instandsetzung und Bedienung, betrachten.

6.3.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten wurden mit Hilfe von Herstellerangaben definiert. Die Investitionskosten der Geothermie und der WP wurden mit Hilfe von Richtwerten in Abstimmung mit den Herstellern angesetzt.

Der folgenden Tabelle 10 sind die Investitionskosten der einzelnen Komponenten zu entnehmen.

Komponente	Kosten Gesamt [€]
Geothermiefeld	87.744
WP	37.200
BTA	47.444
KM	76.000
Rückkühler	60.000
FW-anschluss	10.000
Umluftkühler Einzelbüro	9.579
Umluftkühler Teambüro	15.539
Gesamtkosten Variante A	308.388
Gesamtkosten Variante B	171.118

Tabelle 10 Investitionskosten

Der Preis für die WP setzt sich aus den Kosten für Zubehörteile wie MSR-Komponenten, Inbetriebnahme und einer Visualisierung zusammen. Der Gesamtpreis dieser Positionen beläuft sich auf 13.200 €. Dazu kommen spezifische Kosten von 500 €/kW Leistung der WP im Heizbetrieb.

Die gesamten Investitionskosten der Variante A belaufen sich auf 308.388 €. Hauptkostenpunkt ist die Geothermie mit WP, außerdem wird die BTA nur bei der Variante A betrachtet.

In beiden Varianten wird die gleiche KM mit Rückkühler und der gleiche Fernwärmeanschluss vorgesehen. Bei wenig Entzugsleistung der Geothermie wird das Beheizen über die FW realisiert.

Diese Art der Versorgungssicherheit gilt auch für den Kühlbetrieb. Die KM der Variante A wird so ausgelegt, dass diese die maximal auftretende Kühllast abführen kann.

Variante B ist in der Investition $I_0=137.270$ € günstiger als die Variante A.

6.3.2 Betriebskosten

Auf Grundlage des in Kapitel 6.2 ermittelten Energiebedarfs wurden die in Tabelle 11 dargestellten Betriebskosten bestimmt.

Variante A	Komponente	Elektrische Energie [MWh]	Wärmeenergie [MWh]	Spez. Kosten [€/MWh]	Kosten Gesamt
Heizbetrieb	WP	40	206	180	7141
FW	Grundpreis	-	-	-	5596
	Arbeitspreis	-	112	63	7075
Kühlbetrieb	KM	34	280	180	6168
	Rückkühler	18	-	180	3240
	direkte Kühlung	-	-	-	-
	aktive Kühlung WP	14	94	180	2446
-	Gesamt	-	-	-	31667
Variante B	-	-	-	-	-
FW	Grundpreis	-	-	-	5596
	Arbeitspreis	-	319	63	20072
Kühlbetrieb	Kälte-maschine	68	519	180	12164
	Rückkühler	48	-	180	8561
-	-	-	-	-	46393
-	Differenz	-	-	-	<u>14727</u>

Tabelle 11 Betriebskosten

Der Preis für eine Kilowattstunde Strom ist mit 0,18 €, der Arbeitspreis pro Kilowattstunde FW mit 0,063 € festgelegt.

Bei der Variante A werden zur thermischen Temperierung des Gebäudes $E_{f,el,A} = 99$ MWh/a Strom benötigt. Ergänzend dazu kommen $E_{f,FW,A} = 112$ MWh/a, die durch die FW eingebracht werden. Die Variante B benötigt zum Kühlen des Gebäudes $E_{f,el,B} = 116$ MWh/a elektrische Energie, die für den Betrieb der KM und des Rückkühlers eingesetzt wird. Beheizt wird das Gebäude mit $E_{f,FW,B} = 319$ MWh Wärmeenergie, die mittels der FW bereitgestellt wird.

Eine MWh Wärme erzeugt durch die WP benötigt $0,192$ MWh²⁹ elektrische Energie. Bei dem Endenergiepreis von 180 €/MWh beträgt der Preis für eine MWh thermischer Nutzenergie $34,615$ €²⁹ bei der Bereitstellung mittels WP. Vernachlässigt man den Grundpreis der FW, da dieser bei beiden Varianten gleichermaßen auftritt, so kostet eine MWh thermischer Nutzenergie eingebracht durch die FW 63 €/MWh. Durch jede MWh thermischer Nutzenergie, erzeugt durch die WP, erhält man einen Rückfluss von 28,385 €. Bei einem

²⁹ Berechnung S. 84

Energieeintrag von $E_{WP,Heizen} = 206 \text{ MWh/a}$ (Kap.: 6.2; S. 36) durch die WP erzeugt man einen Rückfluss von 5.847 €/a .

Im Kühlbetrieb kostet eine MWh thermischer Nutzenergie, erzeugt durch die reversible WP, 26 €/MWh^{29} . Betrachtet man die gesamte erzeugte Kälteenergie erzeugt durch Geothermie und reversibler WP, betragen die Erzeugungskosten der Kühlung mittels Geothermie 10 €/MWh . Die Betriebskosten der KM hängen von den Betriebspunkten ab. Bei der Variante A kostet eine durchschnittliche MWh thermische Nutzenergie der mit Rückkühlung 34 €/MWh^{29} . Damit kommt man auf einen durchschnittlichen spezifischen Preis der Bereitstellung thermischen Nutzenergie bei der Variante A im Kühlbetrieb von 23 €/MWh . Bei der Variante B sind die Betriebspunkte der KM im höheren Leistungsbe- reich was die Effizienz der KM sinken lässt. Durch den höheren spezifischen Aufwand an Endenergie, sind die Betriebskosten der KM mit Rückkühler bei der Variante B, höher und belaufen sich auf 40 €/MWh^{29} . Bei 519 MWh/a im Kühlbetrieb errechnet sich ein Rückfluss von 8866 €/a . Die Einsparung im Kühlbetrieb ist somit größer als im Heizbetrieb, was auf den höheren Energiebedarf im Vergleich zum Heizbetrieb zurückzuführen ist.

Die Betriebskosten der Variante A belaufen sich auf 30.072 € pro Jahr und die Variante B hat Betriebskosten von 46.393 € pro Jahr.

Die Ersparnis der Betriebskosten durch Variante A belaufen sich auf 15.972 € pro Jahr.

6.3.3 Betriebsgebundene Kosten

Als Betriebsgebundene Kosten betrachtet man Wartungs-, Instandhaltungskosten und den finanziellen Aufwand für die Bedienung. Die Festlegung dieser Kosten erfolgt nach der VDI 2067. Dort ist festgelegt, welcher Mittelwert für die jährlichen Kosten anzunehmen ist. Der Aufwand für Instandsetzung und für die Wartung sind prozentuale Angaben in Abhängigkeit zu den Investitionskosten. Als Aufwand für die Bedienung sind Arbeitsstunden festgelegt, für eine Arbeitsstunde werden 50 €/h angenommen.

Komponente	Investitionskosten [€]	Aufwand Instandsetzung [%]	Aufwand Wartung [%]	Aufwand Bedienung [€]	Betriebsgebundene Kosten [€]
Geothermiefeld	87.744	2	1	-	2.632
WP	37.200	1	2	250	1.180
BTA	47.444	1		-	474
Kältemaschine	76.000	2	2	50	2.710
Rückkühler	60.000	2	2	-	2.100
FWanschluss	10.000	2	1	-	300
Umluftkühler Einzelbüro	9.579	2	4	-	575
Umluftkühler Teambüro	15.539	2	4	-	932
Variante A	-	-	-	-	9.397
Variante B	-	-	-	-	6.617

Tabelle 12 Betriebsgebundene Kosten

Die Betriebsgebundenen Kosten sind bei der Variante A höher als bei der Variante B, was auf die Anzahl der Komponenten und die wartungsintensiveren Komponenten zurückzuführen ist.

Variante B ist pro Jahr 2.780 € günstiger in den Betriebsgebundenen Kosten.

6.3.4 Kapitalwert

Der Rückfluss wird über die Zahlung "Z" (Gl.: 3.15; S. 18) bestimmt, die Einnahmen und Ausgaben setzen sich aus den jährlichen Einsparungen (Tabelle 11; S. 41) durch die Variante A und die Mehrausgaben durch die Betriebsgebundenen Kosten (Tabelle 12; S. 43) zusammen. Daraus ergibt sich ein Rückfluss von $Z = 11.947$ € pro Jahr.

Die Investition $I_0 = 137.270$ € ist die Differenz zwischen den Investitionskosten der Variante A zu Variante B.

Um den Rentenbarwertfaktor zu bestimmen, muss der Zinssatz in Abstimmung mit dem Bauherren definiert werden. Als Zinssatz wurde $i = 3,25$ % festgelegt und die rechnerische Nutzungsdauer beträgt 20 Jahre (18). Die rechnerische Nutzungsdauer bezieht sich auf die rechnerische Nutzungsdauer der WP, da diese nach VDI die kürzeste rechnerische Nutzungsdauer der Komponenten der Variante A hat, die nicht in der Variante B vorgesehen sind. Mittels Interpolation wurde der Rentenbarwertfaktor bei $i = 3,25$ % ermittelt und ergibt $RBF_{20} = 14,49$.

Setzt man die ermittelten Werte in die Gleichung 3.14 ein ergibt sich der Kapitalwert für einen Zeitraum von 20 Jahren.

$$K_{20} = -137.270 \text{ €} + 11.947 \text{ €} \cdot 14,555685$$

Daraus ergibt sich ein Kapitalwert von $K_{20} = 36.627 \text{ €}$ bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren.

Die Geothermie und BTA haben, im Gegensatz zur WP, eine rechnerische Nutzungsdauer von 50 Jahren. Somit kann man den Betrachtungszeitraum erweitern, nachdem man im 20. Betriebsjahr eine Reinvestition, in Form einer WP, tätigt. Nach der VDI fließen bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung keinen Preissteigerungen ein.

Nach den ersten 20 Betriebsjahren und dem Ende der rechnerischen Nutzungsdauer der WP erfolgt eine Reinvestition in Form einer WP. Die Investitionskosten der WP betragen $I_{20-WP} = 37.200 \text{ €}$ (Tabelle 10; S. 39), unter Berücksichtigung des Kapitalwert der ersten 20 Betriebsjahre ergibt sich $I_{20} = 37.200 \text{ €} - 36.627 \text{ €} = 573 \text{ €}$.

Der Betrachtungszeitraum beträgt, aufgrund der rechnerischen Nutzungsdauer der WP, erneut 20 Jahre. Daraus ergibt sich ein Kapitalwert von $K_{40} = 173.325 \text{ €}$ für den Betrachtungszeitraum von 40 Jahren nach der ersten Investition zum Zeitpunkt $t = 0$.

Erweitert man den Betrachtungszeitraum auf die rechnerische Nutzungsdauer der Geothermie und der BTA, erfolgt eine weitere Reinvestition nach 40 Jahren in Form einer WP. Verrechnet man den Kapitalwert nach 40 Jahren mit der Reinvestition der WP, erhält man die Investitionskosten zum Zeitpunkt des 40. Betriebsjahres.

$$I_{40} = I_{40-WP} - K_{40} = 37.200 \text{ €} - 173.325 \text{ €} = -136.125 \text{ €}$$

Der Rentenbarwertfaktor ändert sich entsprechend des Betrachtungszeitraum von 10 Jahren $RBF_{10} = 8,425$.

Mit diesen Werten erhält man den Kapitalwert von $K_{50} = 238.035 \text{ €}$ für 50 Betriebsjahre.

6.3.5 Auswertung

Aufgrund des konstanten Rückfluss von $Z = 11.947 \text{ €}$ nimmt der Kapitalwert mit zunehmenden Betrachtungszeitraum zu, auch wenn nach der rechnerischen Nutzungsdauer der WP, nach jeweils 20 Betriebsjahren, eine Reinvestition getätigt wird.

Durch die Verlängerung des Betrachtungszeitraum sind Unschärfen in den Bereichen der Energiepreisentwicklung, der Inflation und damit verbundene Investitionspreisentwicklung, der WP und Änderung der Nutzeranforderungen zu erwarten. Daher ist eine Betrachtung über die ersten 20 Betriebsjahre hinaus nicht mit der Genauigkeit der ersten 20 Betriebsjahre zu verstehen. Allerdings ist davon auszugehen das sich die Wirtschaftlichkeit aufgrund steigender Energiekosten positiver entwickelt als berechnet. Die angegebenen

Werte sind als Tendenz zu verstehen. Nach der rechnerischen Betriebsdauer einer WP kann mit einer verhältnismäßig geringen Investition ein großer Rückfluss erzielt werden.

Die Investition in eine WP mit Geothermie und BTA ist bei diesem Projekt eine wirtschaftlich sinnvolle Anlage.

6.4 Primärenergiebetrachtung

Es gilt neben der Wirtschaftlichkeit den Einsatz der Primärenergie zu untersuchen. Dabei wird zunächst der Einsatz von Primärenergie bei den einzelnen Varianten ermittelt, diese werden im Anschluss zu einander betrachtet. Bei beiden Varianten erfolgt die Energieversorgung ausschließlich über FW und Strom.

Der Strom wird zum Betrieb der WP und der KM benötigt, die FW wird zum heizen genutzt.

6.4.1 Variante A

Die Variante A wird mit elektrischer Energie zum Betrieb der WP und der KM mit Rückkühler versorgt. Ein Fernwärmeanschluss stellt die Wärmeversorgung des Gebäudes bei Spitzenlasten sicher.

Nach Aussage des Fernwärmeversorgers³⁰ wird ein Primärenergiefaktor für die Fernwärmeversorgung von $f_{p,FW} = 0,57$ festgelegt. Über die FW wird $Q_{f,FW,A} = 112$ MWh (Kap.: 6.2.1; S. 36) Wärmenergie zugeführt. Daraus lässt sich für die Fernwärmeversorgung ein Primärenergieaufwand von $Q_{P,FW,A} = 64$ MWh (S. 82) errechnen.

Zum Betrieb der WP und KM wird $Q_{f,el} = 99$ MWh (Kap.: 6.2.1; S. 36) elektrische Energie benötigt. Der Primärenergiefaktor für Strom-Mix wird nach der Norm mit $f_{p,el} = 3,0^{16}$ angenommen. Es ergibt sich ein Primärenergieaufwand von $Q_{P,el,A} = 300$ MWh.

Jede durch die WP im Heizbetrieb erzeugt thermische MWh benötigt einen Einsatz an Primärenergie von 0,58 MWh. Damit ist der Einsatz an Primärenergie zwischen FW und WP annähernd gleich³¹.

In der Summe wird bei dieser Variante $Q_{P,A} = 364$ MWh Primärenergie aufgewandt. Mehr als 2/3 der Primärenergie ist auf die elektrische Versorgung zurückzuführen, obwohl die Endenergie geringer als die der FW ist. Die Primärenergiefaktoren unterscheiden sich in hohem Maße, da die FW zu 90,4 % aus Kraft-Wärme-Kopplung und zu 13,8 % aus regenerativen Energien erzeugt wird³⁰. Aufgrund der Primärenergiefaktoren unterscheidet sich der Primärenergieaufwand von elektrischer Endenergie und der FW.

³⁰ Vattenfall Europe Wärme AG; S. 83

³¹ Berechnung S. 86

6.4.2 Variante B

Die KM mit Rückkühler in der Variante B werden mit elektrischer Energie gespeist, über den Fernwärmeanschluss wird das Gebäude mit Wärmeenergie versorgt.

Die KM und der Rückkühler benötigen $Q_{f,el} = 116$ MWh (Kap.: 6.2.2; S. 38) elektrische Energie. Multipliziert mit dem Primärenergiefaktor für Strom-Mix, ergibt sich der Primärenergiebedarf $Q_{P,el,B} = 348$ MWh.

Die FW liefert bei dieser Variante einen Energieeintrag von $Q_{f,FW,B} = 319$ MWh (Kap.: 6.2.2; S. 38) Daraus ergibt sich ein Primärenergiebedarf für die Fernwärmeversorgung von $Q_{P,FW,B} = 182$ MWh.

In der Summe bedarf es bei dieser Variante einem Primärenergiebedarf von $Q_{P,B} = 530$ MWh.

6.4.3 Auswertung

Stellt man den Primärenergiebedarf der einzelnen Varianten gegenüber, ist zu sehen, dass die Variante A weniger Primärenergieeinsatz benötigt.

	Strom	Wärme	Gesamt
Primärenergiefaktor	3,00	0,57	-
Endenergie Variante A [MWh]	78	112	-
Primärenergieaufwand Variante A [MWh]	235	64	<u>299</u>
Endenergie Variante B [MWh]	116	319	-
Primärenergieaufwand Variante B [MWh]	348	182	<u>530</u>
Differenz des Primärenergieaufwandes [MWh]	113	118	<u>231</u>

Tabelle 13 Primärenergiebedarf

Die Variante A benötigt im Vergleich zur Variante B $\Delta Q_P = 231$ MWh Primärenergie weniger. Wie in Tabelle 13 zusehen ist, wird bei der Variante A wesentlich weniger Endenergie zur Temperierung des Gebäudes eingesetzt, was auf den Eintrag der Geothermie-Energie zurückzuführen ist.

7 Parametervariation

Bei der Parametervariation wird die Größe der Geothermie als variabel angenommen und ermittelt, wie sich die Wirtschaftlichkeit und die Primärenergieeinsparung, bei gleichbleibender Variante B mit unterschiedlicher Geothermie-Leistung ändert.

Mit Größe der Geothermie und WP verändern sich die Investitions-, Betriebskosten und Betriebsgebundene Kosten. Dadurch variiert auch der Rückfluss der durch die Investition zu erwarten ist.

Die spezifischen Preise von Geothermie und WP sind der Tabelle 10 zu entnehmen, wobei neben der spezifischen Kosten für die WP, die fixen Kosten von 13.200 € zu beachten sind. Bei der Geothermie ist bei ca. 10-30 Erdwärmesonden eine Annahme von 55 €/m Erdwärmesonde realistisch, da der Preis inklusive aller Maßnahmen wie Baustelleneinrichtung, Verteilung etc. zu verstehen ist. Die spezifischen Kosten würden bei weniger Erdwärmesonden nach oben, beziehungsweise bei einer höheren Anzahl nach unten abweichen. Die spezifischen Preisangaben sind nach Aussage eines Herstellers angenommen.

Aufgrund dieses Spektrums der spezifischen Kosten bezieht sich die Parametervariation auf den Bereich von 10-30 Erdwärmesonden.

Die Berechnungen bei der Parametervariation erfolgen nach gleicher Vorgehensweise wie unter Kapitel 6 beschrieben.

So ergeben sich zu den Anlagengrößen die unter Tabelle 22 aufgeführten Investitionskosten mit Rückfluss. Dort ist zu erkennen, dass die Investitionskosten stetig steigen und der Rückfluss ab einer gewissen Anlagengröße nicht mehr in dem Maße steigt, wie die Investitionskosten.

Ermittelt man aus den Investitionskosten und dem Rückfluss den Kapitalwert, erhält man den Zusammenhang unter Tabelle 23.

Trägt man die Werte der Tabelle 23 in einem Diagramm auf, erhält man die Darstellung des Diagramm 5.

7.1 Auswertung

Dem Diagramm 5 ist das ökonomische Verhalten der Wärme- und Kälteerzeugung bei veränderlicher Geothermie-Größe zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass der Rückfluss mit wachsender Anlagengröße zunimmt, erst ab einer Größe von 22 Erdwärmesonden ist der Anstieg an Rückfluss weniger groß.

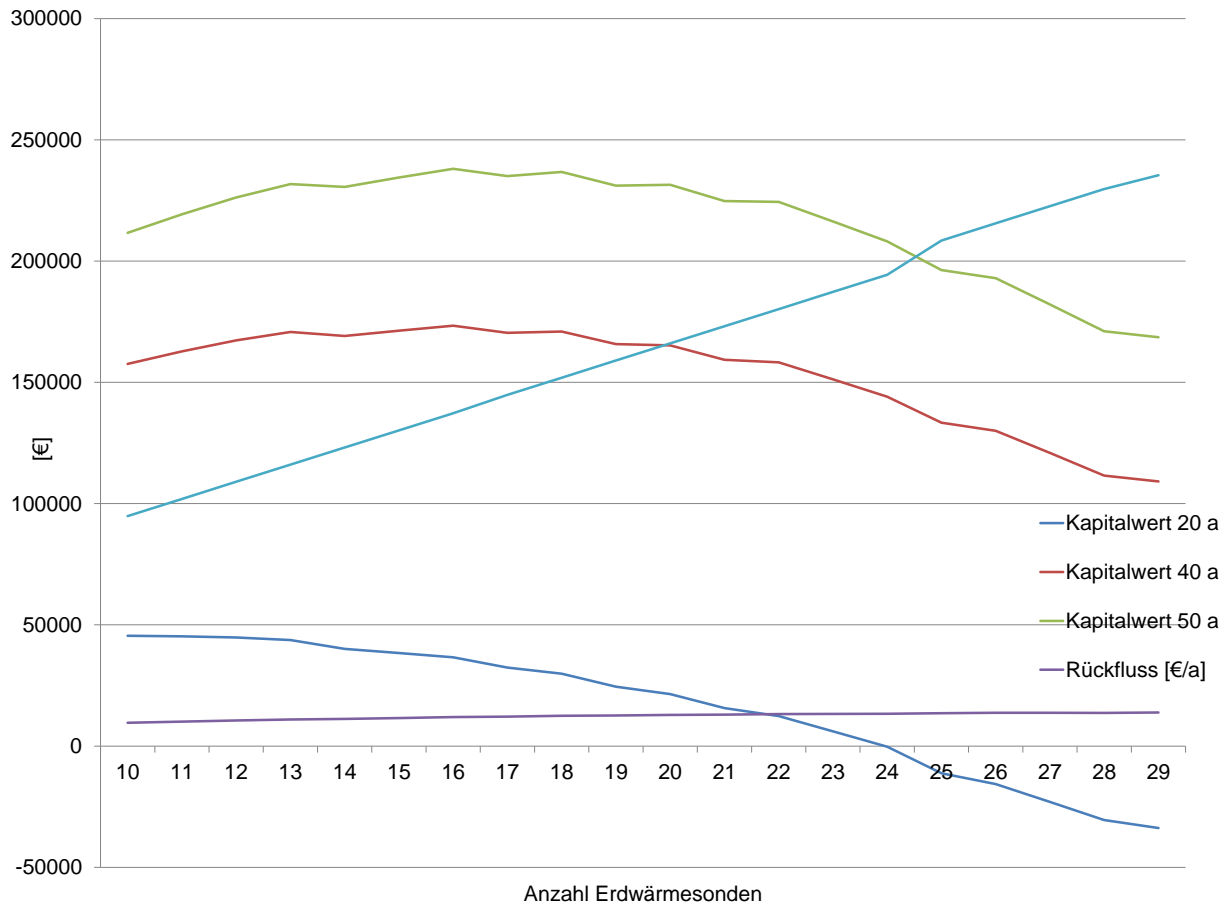


Diagramm 5 Parametervariation

Die Investitionskosten der Anlage wachsen wie erwartet ebenso mit der Größe der Geothermie und der WP. Der Kapitalwert nach $t=20$ a ist bei der kleinsten Anlagengröße am höchsten, da der Rückfluss bei diesem kurzen Betrachtungszeitraum, im Gegensatz zu den Investitionskosten, einen weniger großen Einfluss auf den Kapitalwert hat. Nach den Zeitpunkten $t=40$ a und $t=50$ a ist die Anlage am wirtschaftlichsten am Betriebspunkt mit 17 Erdwärmesonden und den untersuchten Dimensionen (Kap.6; S. 31). Größere Anlagen verlieren an Wirtschaftlichkeit, weil die Investitionskosten stärker wachsen als der Rückfluss. Durch den Rückfluss ist bei der rechnerischen Nutzungsdauer keine Amortisierung zu erwarten.

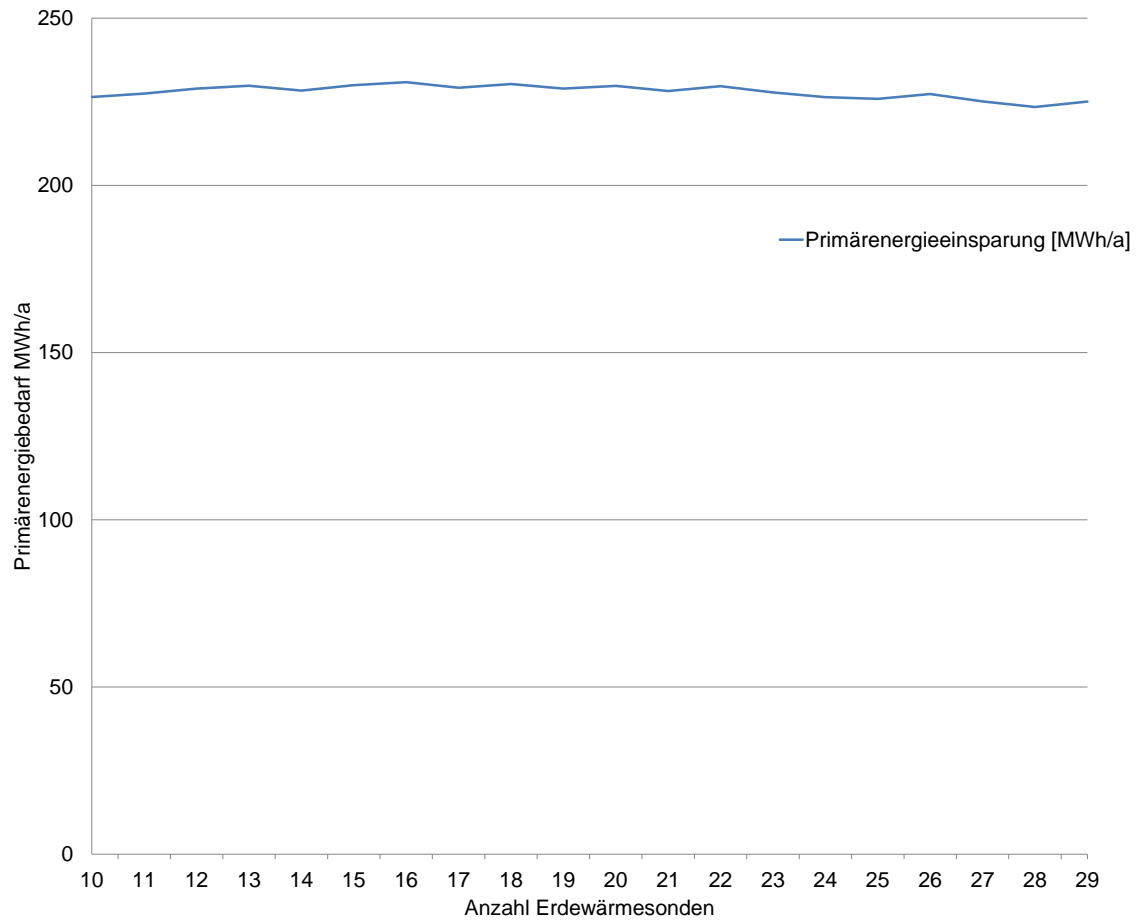


Diagramm 6 Primärenergieeinsatz in Abhängigkeit der Leistung

Der Einsatz an Primärenergie in Abhängigkeit zur Leistung ist im Diagramm 6 dargestellt. Daran ist zu sehen, dass die Leistung der Geothermieanlage wenig Einfluss auf den Primärenergiebedarf der Wärme- und Kälteerzeugung hat. Bei Zunahme der Anlagegröße wird die mittels der WP erzeugte Kälteenergie, ebenso wie der Einsatz von elektrischer Nutzenergie zum Betrieb der WP, größer. Gleichzeitig wird dadurch die Kälteenergieerzeugung der KM und auch der Einsatz von Nutzenergie geringer.

Bei dem Verhältnis der Wärmeerzeugung von FW zu WP ist es sich ähnlich. Je größer die Anlage, desto mehr Energiebereitstellung erfolgt durch die WP und desto kleiner die Energiebereitstellung durch FW. Berücksichtigt man die Erkenntnis, dass es annähernd keinen primärenergetischen Unterschied zwischen der Wärmeerzeugung durch FW und WP gibt, erzeugt eine veränderte Anlagengröße keinen unterschied im Primärenergiebereich der Wärmeerzeugung.

Aufgrund dieser Verhältnisse ist der relativ kontinuierliche Primärenergiebedarf, wie im Diagramm 6, dargestellt zu erklären.

8 Fazit

Es wurden zwei Varianten (Kap. 4; S. 20) zur Wärme- und Kälteversorgung eines Laborgebäudes auf ihre Wirtschaftlichkeit und ihr Primärenergieverhalten untersucht. Anhand der Gebäudesimulation und des Bodengutachtens, hat sich die im Kapitel 6 ermittelte Dimension der Geothermie, in Verbindung mit der reversiblen WP und der BTA, als eine wirtschaftlich sinnvolle Investition dargestellt. Es wurden die Kapitalwerte nach 20, 40, und 50 Betriebsjahren (Kap. 6.3.4; S. 43) untersucht. Nach der rechnerischen Nutzungsdauer der WP wird eine Reinvestition geleistet.

Die Aussagen bezüglich der Zeiträume größer 20 Betriebsjahre sind nicht mit einer Genauigkeit getroffen wie der Zeitraum kleiner 20 Betriebsjahre, da keine fundierte Annahme zur Energiepreisentwicklung getroffen werden kann. Es ist davon auszugehen dass die Energiepreisentwicklung positiven Einfluss auf die ermittelte Wirtschaftlichkeit nach 40 und 50 Betriebsjahren hat. Die errechneten Kapitalwerte nach 40 und 50 Jahren treffen Aussagen über die zu erwartende Wirtschaftlichkeit, diese kann aber abweichen.

Die untersuchte Anlage ist auch Primärenergetisch sinnvoll. Durch die Wärme- und Kälteerzeugung mittels WP wurde eine Primärenergieeinsparung von 231 MWh/a errechnet.

Ein Großteil der Einsparung sowohl im Wirtschaftlichen- wie im Primärenergetischen-Bereich, ist auf den Nutzen der direkten Kühlung mittels Geothermie zurückzuführen.

Eine wachsende Anlagengröße ist nicht gleichbedeutend mit einem höheren wirtschaftlichen Ertrag, viel mehr ist die Dimension individuell auf die Gegebenheiten des Gebäudes zu wählen und dadurch die ideale Dimension zu finden. Im Kapitel 7 wurde eine Parametervariation durchgeführt, um die bestmögliche Dimension der Anlage zu ermitteln. Es wurde, anhand der Grundlage in Form von Gebäudesimulation und Bodengutachten, die untersuchte Anlage bei einer Größe von 17 Erdwärmesonden zu annähernd 100 m Teufe als am wirtschaftlich sinnvollste Investition ermittelt. Diese Aussage bezieht sich auf einen Betrachtungszeitraum von 40 bzw. 50 Jahren. Nach der rechnerischen Nutzungsdauer der WP, ist die kleinstmögliche Anlage am wirtschaftlichsten da die Investitionskosten größeren Einfluss als der zu erwartende Rückfluss haben.

Bei größeren Anlagen nehmen die Investitionskosten schneller als der zu erwartende Rückfluss zu, daher nimmt die Wirtschaftlichkeit bei Anlagen größer als 17 Erdwärmesonden ab. Die untersuchten Anlagen mit weniger als 17 Erdwärmesonden sind bei einem Betrachtungszeitraum von 40 bzw. 50 Jahren weniger rentabel.

Die Parametervariation hat zusätzlich ergeben, dass der Primärenergieaufwand wenig von der Größe der Anlage abhängt. Erklärlich ist diese Erkenntnis dadurch, dass der Primärenergetische Aufwand im FW-Betrieb und WP-Betrieb³² annähernd gleich groß ist. Im Kühlbetrieb ist der Endenergieaufwand zwischen WP und KM annähernd identisch. Die

³² Heizbetrieb

Primärenergieeinsparung erfolgt fast ausschließlich durch die direkte Kühlung mittels Geothermie. Bei Veränderung der Anlagengröße verschieben sich nur die Verhältnisse der Energieerzeugung, der jährliche Primärenergiebedarf variiert ca. um 3,5 %.

Ein weiterer großer Einfluss ist der Zeitraum der direkten Kühlung. Mit einem größer werdenden Zeitraum der direkten Kühlung erhöht sich das wirtschaftliche Verhalten der Anlage. Auch Primärenergetisch wird die Einsparung durch einen größeren Zeitraum, in dem die direkte Kühlung genutzt werden kann, größer.

Abschließend wurde ermittelt, dass der Einsatz einer Geothermie in Verbindung mit einer WP und einer BTA wirtschaftlich sinnvoll ist, die ideale Dimension der Anlage liegt im Bereich von 17 Erdwärmesonde. Eine dezidierte Aussage über den wirtschaftlichsten Punkt der Anlage ist erst auf der Grundlage einer Bodensimulation nach der Gebäudesimulation zu treffen, da der Zeitraum der direkten Kühlung wesentlichen Einfluss auf den Rückfluss nimmt. Der Zeitraum der direkten Kühlung hängt wesentlich von den über das Erdreich abzuführenden Leistungen, die in der Gebäudesimulation ermittelt wurden, ab.

9 Anhang

9.1 Architektur

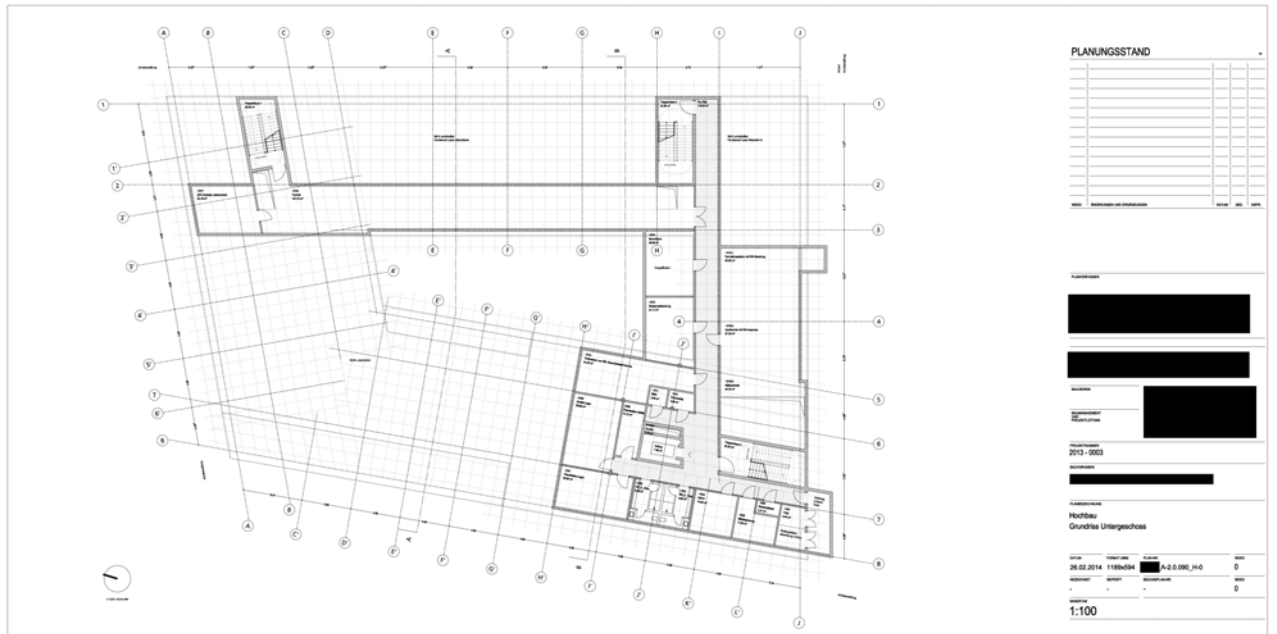


Abbildung 18 Grundriss UG.

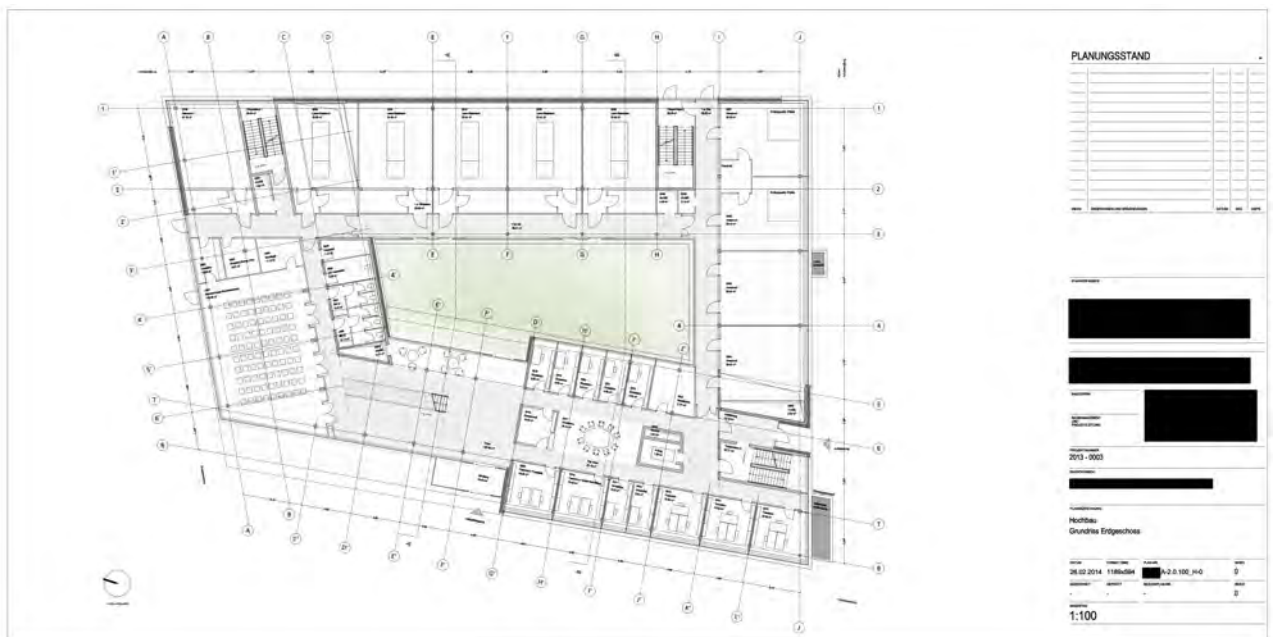


Abbildung 19 Grundriss EG.

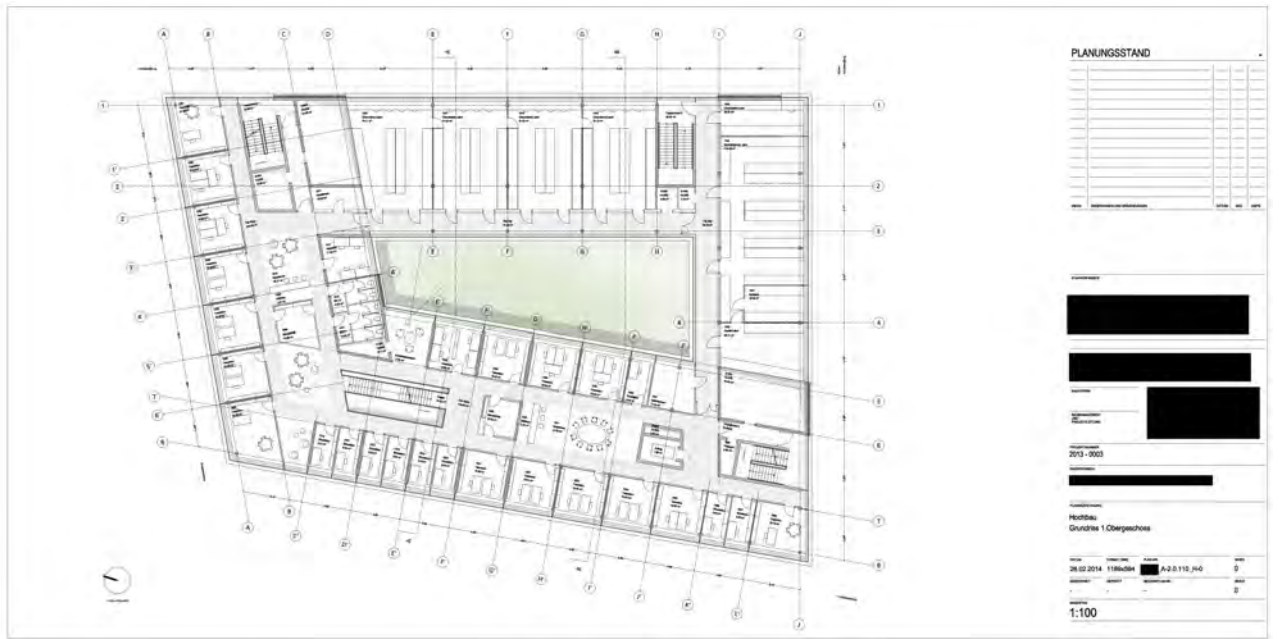


Abbildung 20 Grundriss 1. OG.

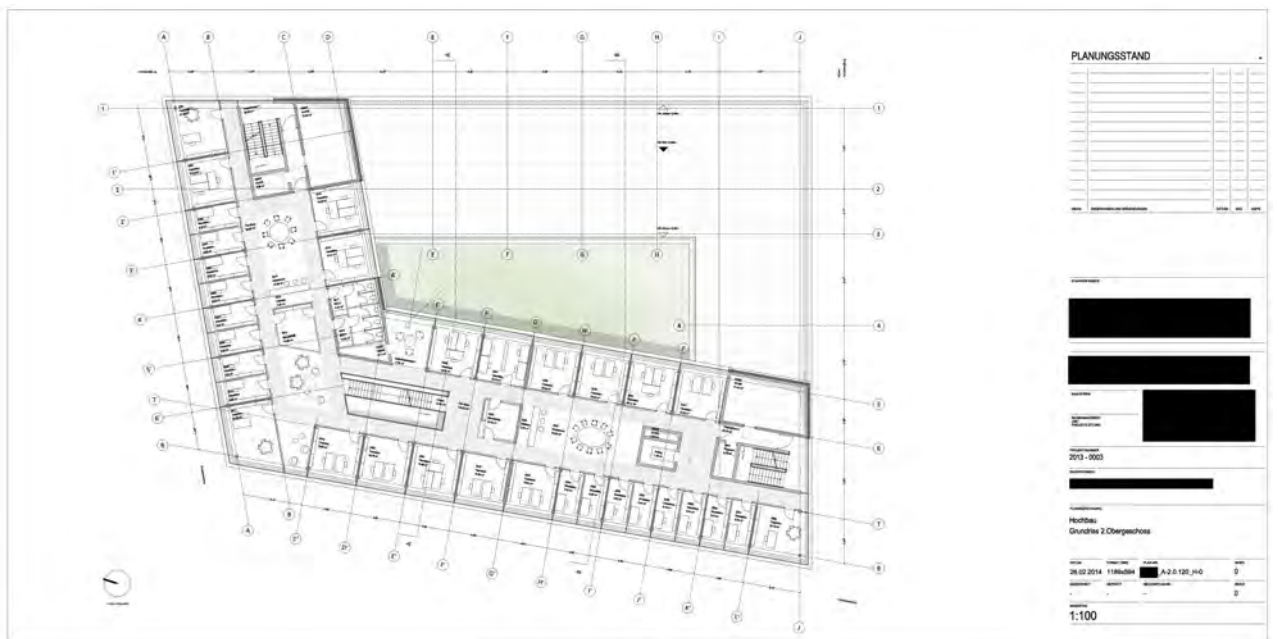


Abbildung 21 Grundriss 2. OG.

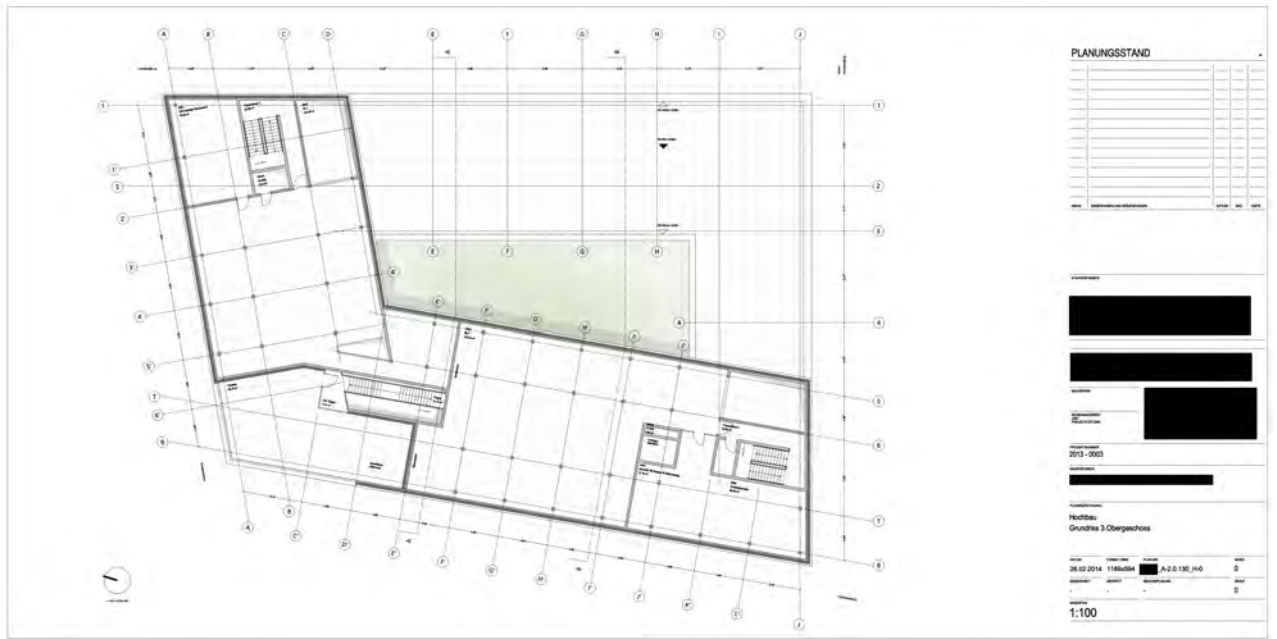


Abbildung 22 Grundriss 3. OG.

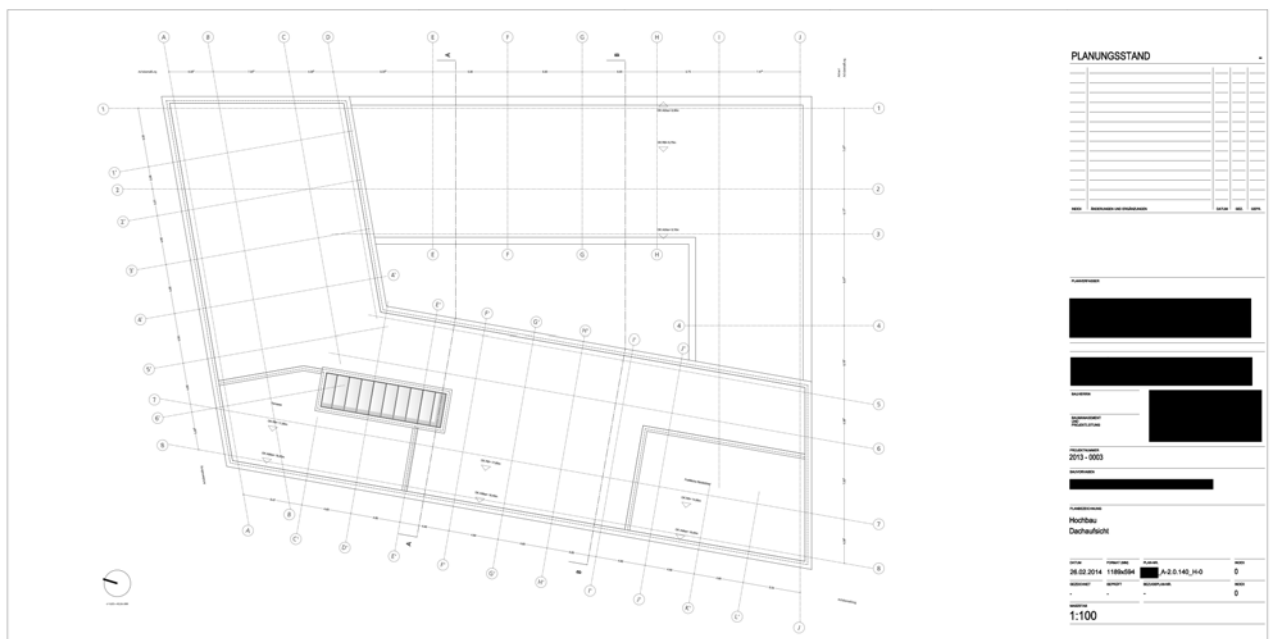


Abbildung 23 Dachaufsicht



Abbildung 26 Materialkonzept EG



Abbildung 27 Materialkonzept 1. OG

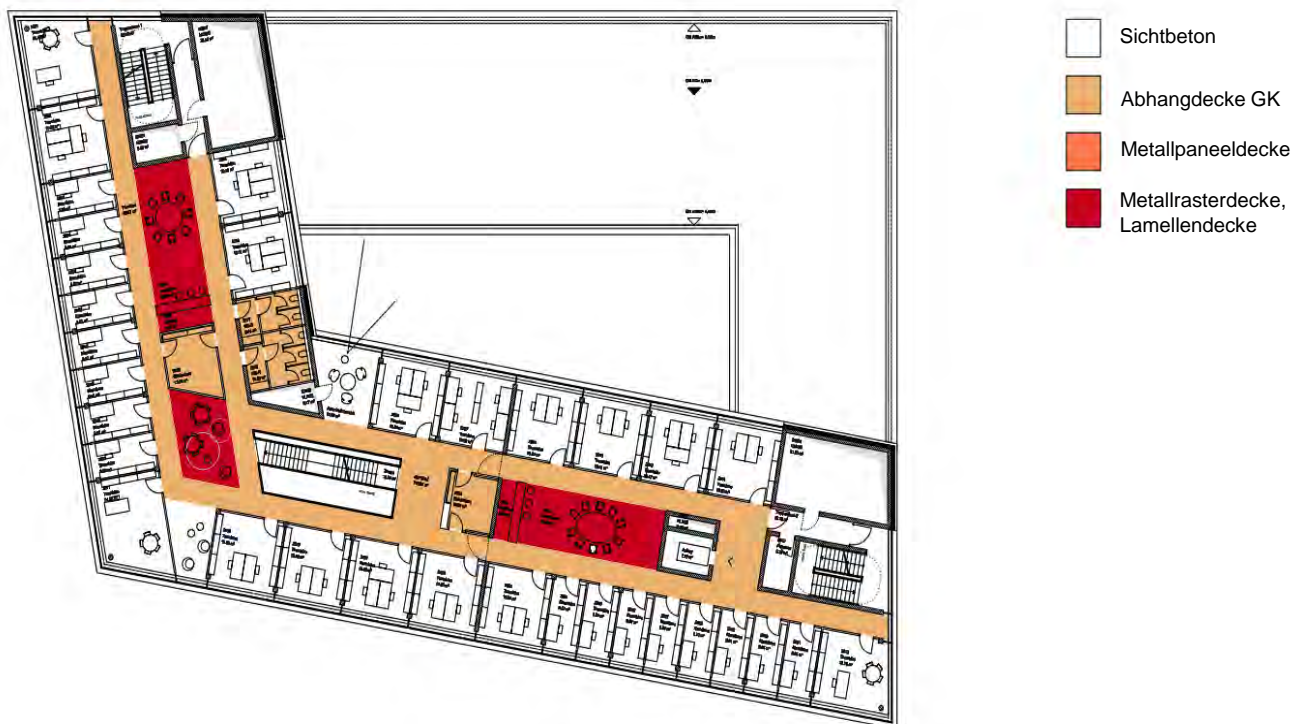


Abbildung 28 Materialkonzept 2. OG

9.2 Bedarfsermittlung

9.2.1 Heizlast

Element:	Wärmedurchgangskoeffizient $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$:
Außentür	1,80
Außenfenster	1,30
Außenwand	0,28
Innenwand	0,57
Innentür	2,00
Decken/Fußböden	0,86
Boden und Wand zum Erdreich	0,53
Dach zur Außenluft	0,20

Tabelle 14 Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte)

Raumtyp:	Raumtemperatur °C:
Bürräume	20
Lasermesslabore	23; Temperaturkonstanz +/- 1 Kelvin
Sonstige Physik Labore	20
Chemie Labore	20
Bio-Chemie Labore	20
Lagerräume	20
Flure	15
Treppenhäuser	15
WC-Räume	15
Umkleiden	24

Tabelle 15 Raumtemperaturen

Aufgrund unterschiedlicher Geschosshöhen wurde das Gebäude zur Bedarfsermittlung in zwei Gebäudeteile getrennt.

Gebäudeteil A Büro & Kombizone

GEBÄUDEZUSAMMENSTELLUNG			
Gebäude(-teil)	a	Büro & Kombizone	
WÄRMEVERLUST-KOEFFIZIENTEN			
Transmissionswärmeverlust-Koeffizient	$\Sigma H_{T,e}$		4844,4 W/K
Lüftungswärmeverlust-Koeffizient	ΣH_V		1697,5 W/K
Gebäude-Wärmeverlust-Koeffizient	H_{Geb}		6541,8 W/K
WÄRMEVERLUSTE			
Transmissionswärmeverluste (nach außen)	$\Phi_{T,Geb}$		153452 W
Lüftungswärmeverluste			
Mindest-Luftvolumenstrom	$\Phi_{V,min,Geb} = 0,5 * \Sigma \Phi_{V,min}$		22477 W
aus natürliche Infiltration	$\Phi_{V,inf,Geb} = \zeta * \Sigma \Phi_{V,inf}$		702 W
aus mechanischem Zuluftvolumenstrom	$\Phi_{V,su,Geb}$		46600 W
aus mech. Infiltriertem Volumenstrom	$\Phi_{V,mech,inf,Geb}$		1861 W
Lüftungswärmeverluste	$\Phi_{V,Geb}$		71640 W
NORM-GEBÄUDEHEIZLAST		$\Phi_{HL,Geb}$	225092 W
ZUSATZ-AUFHEIZLEISTUNG		$\Phi_{RH,Geb}$	0 W
AUSLEGUNGS-HEIZLEISTUNG		$\Phi_{Ausleg, Geb}$	225092 W
BEZOGENE WERTE			
Heizlast / beheizte Gebäudefläche	$A_{N,Geb}$	3941,5 m ²	$\Phi_{HL,Geb} / A_{N,Geb}$ 57,1 W/m ²
Heizlast / beheiztes Gebäudevolumen	$V_{N,Geb}$	20084,5 m ³	$\Phi_{HL,Geb} / V_{N,Geb}$ 11,2 W/m ³
wärmeübertragende Umfassungsfläche	A	6289,6 m ²	
spez. Transmissionswärmeverlust-Koeffizient	H_T'		0,77 W/(m²K)

Gebäudeteil B Laborbereich

GEBÄUDEZUSAMMENSTELLUNG			
Gebäude(-teil)	B	Laborbereich	
WÄRMEVERLUST-KOEFFIZIENTEN			
Transmissionswärmeverlust-Koeffizient	$\Sigma H_{T,e}$		1841,1 W/K
Lüftungswärmeverlust-Koeffizient	ΣH_V		101,7 W/K
Gebäude-Wärmeverlust-Koeffizient	H_{Geb}		1942,8 W/K
WÄRMEVERLUSTE			
Transmissionswärmeverluste (nach außen)	$\Phi_{T,Geb}$		56759 W
Lüftungswärmeverluste			
Mindest-Luftvolumenstrom	$\Phi_{V,min,Geb} = 0,5 * \Sigma \Phi_{V,min}$		880 W
aus natürliche Infiltration	$\Phi_{V,inf,Geb} = \zeta * \Sigma \Phi_{V,inf}$		282 W
aus mechanischem Zuluftvolumenstrom	$\Phi_{V,su,Geb}$		79927 W
aus mech. infiltriertem Volumenstrom	$\Phi_{V,mech,inf,Geb}$		0 W
Lüftungswärmeverluste	$\Phi_{V,Geb}$		81090 W
NORM-GEBÄUDEHEIZLAST		$\Phi_{HL,Geb}$	137849 W
ZUSATZ-AUFHEIZLEISTUNG		$\Phi_{RH,Geb}$	0 W
AUSLEGUNGS-HEIZLEISTUNG		$\Phi_{Ausleg, Geb}$	137849 W
BEZOGENE WERTE			
Heizlast / beheizte Gebäudefläche	$A_{N,Geb}$	1466,6 m ²	$\Phi_{HL,Geb} / A_{N,Geb}$ 94,0 W/m ²
Heizlast / beheiztes Gebäudevolumen	$V_{N,Geb}$	4985,1 m ³	$\Phi_{HL,Geb} / V_{N,Geb}$ 27,7 W/m ³
wärmeübertragende Umfassungsfläche	A	2849,4 m ²	
spez. Transmissionswärmeverlust-Koeffizient	H_T'		0,65 W/(m²K)

Gesamtgebäude

Geb	Raumbezeichnung	ζ	ηV	ΦZ	ΦRH	ΦV	$\Phi T,e$	ΦHL
			[%]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
A	Büro & Kombizone	0,50	80,0	0	0	71640	153452	22506
B	Laborbereich	0,50	80,0	0	0	81090	56759	13784
Summe				0	0	152730	210212	36290

9.2.2 Kühllast

Komponente:	Wärmeabgabe (Richtwerte) [W]:
Arbeitsplatzrechner	130
Office Server	500
Flachbildschirm 15-17"	25
Bürokopierer	1100
Laserdrucker Abteilung	550

Tabelle 16 Wärmeabgabe von Bürokomponenten (22)

Kühllast nach VDI 2078 Gebäudeteil A Büro- und Kombizonen:

Kühllast Projekt

für die abgeführten Lasten an einem heiteren Tag im Monat Juli

Raubereich von Raum-Nr. A 3.OG 1 5 bis Raum-Nr. A 1.UG # 22

wahre Ortszeit	Kühl-last	Heiz-last	externe Kühl-last	externe Heiz-last	T Aussen
[h]	[W]	[W]	[W]	[W]	[°C]
1	14952	0	0	0	18,5
2	10246	85	0	0	17,5
3	6472	173	0	0	16,6
4	3777	296	0	0	16,2
5	2251	869	0	0	15,9
6	2831	473	0	0	17,3
7	12879	181	0	0	20,1
8	81124	0	0	0	22,0
9	89606	0	0	0	24,0
10	96816	0	0	0	25,9
11	103253	0	0	0	27,4
12	108741	0	0	0	28,8
13	113385	0	0	0	30,0
14	117399	0	0	0	30,9
15	120784	0	0	0	31,6
16	123500	0	0	0	32,0
17	125068	0	0	0	31,7
18	81718	0	0	0	31,1
19	45845	0	0	0	29,8
20	40089	0	0	0	27,9
21	34420	0	0	0	25,9
22	29768	0	0	0	24,7
23	25573	0	0	0	23,1
24	21758	0	0	0	21,9

Die maximale trockende Last mit 125068 W wird um 17 Uhr abgeführt.

Kühllast nach VDI 2078 Gebäudeteil B Laborbereich:

Kühllast Projekt

für die abgeführten Lasten an einem helteren Tag im Monat Juli

Raubereich von Raum-Nr. B 1.OG 1 10 bis Raum-Nr. B 1.UG 1 1051

wahre Ortszeit	Kühl-last	Heiz-last	externe Kühl-last	externe Heizlast	T Aussen
[h]	[W]	[W]	[W]	[W]	[°C]
1	8905	0	0	0	18,5
2	4849	0	0	0	17,5
3	3101	0	0	0	16,6
4	1958	138	0	0	16,2
5	1378	507	0	0	15,9
6	1650	255	0	0	17,3
7	3478	0	0	0	20,1
8	38774	0	0	0	22,0
9	43426	0	0	0	24,0
10	47436	0	0	0	25,9
11	50772	0	0	0	27,4
12	53662	0	0	0	28,8
13	56073	0	0	0	30,0
14	57934	0	0	0	30,9
15	59312	0	0	0	31,6
16	60209	0	0	0	32,0
17	60392	0	0	0	31,7
18	28992	0	0	0	31,1
19	23560	0	0	0	29,8
20	20121	0	0	0	27,9
21	16872	0	0	0	25,9
22	14409	0	0	0	24,7
23	12047	0	0	0	23,1
24	10049	0	0	0	21,9

Die maximale trockende Last mit 60392 W wird um 17 Uhr abgeführt.

9.2.3 Gebäudesimulation

Aussenluftteperatur:

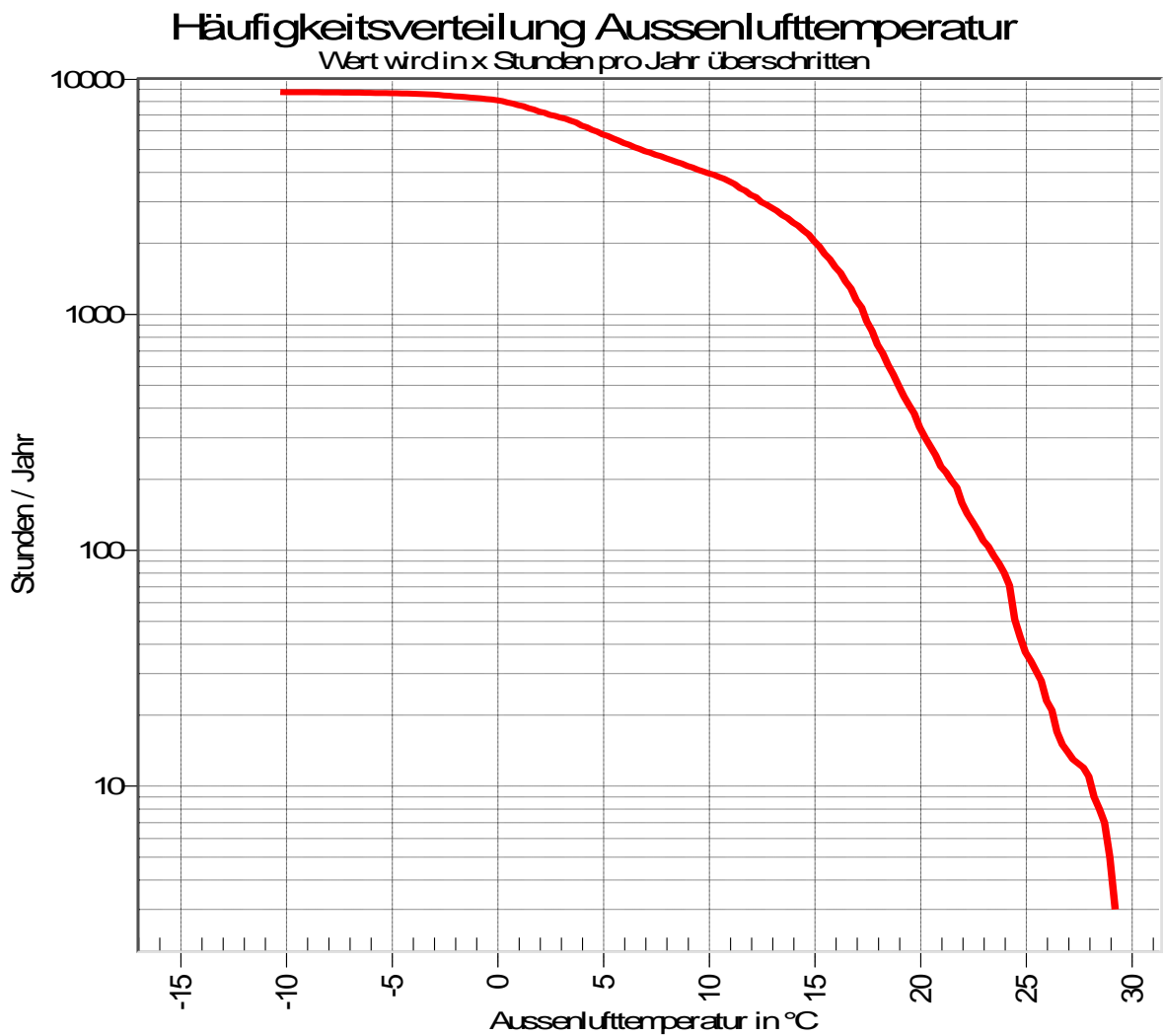


Diagramm 7 Häufigkeitsverteilung der Aussenlufttemperatur

9.2.3.1 Nutzprofile

Wärme erzeugt durch Geräte:

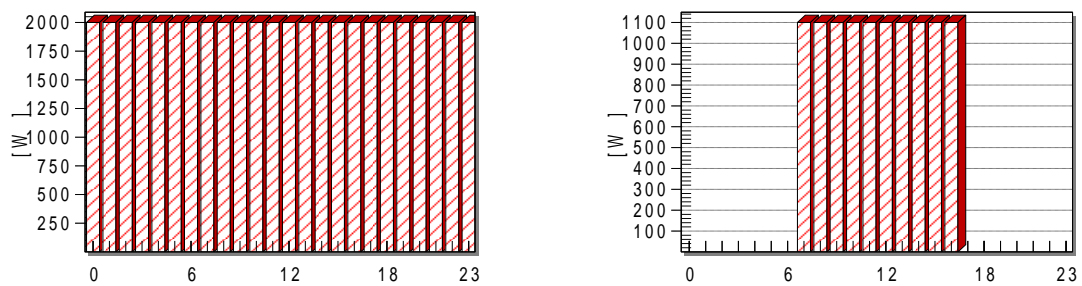


Diagramm 8 TEC Technik

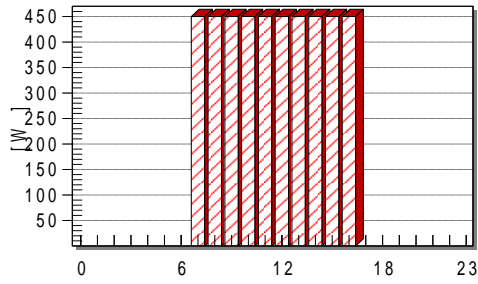


Diagramm 10 TEB Teambüro

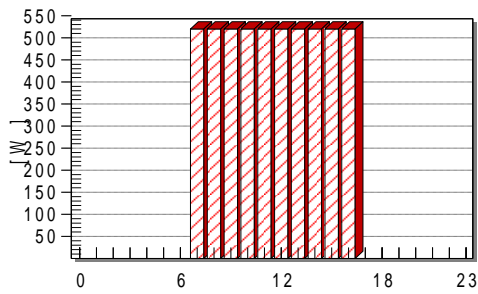


Diagramm 12 Mes Messraum

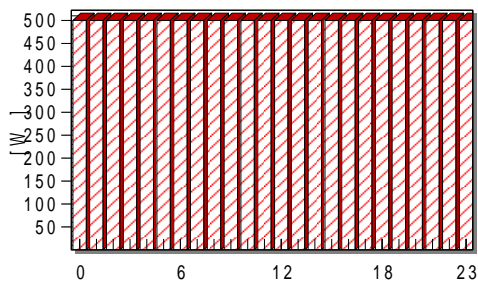


Diagramm 14 SER Server

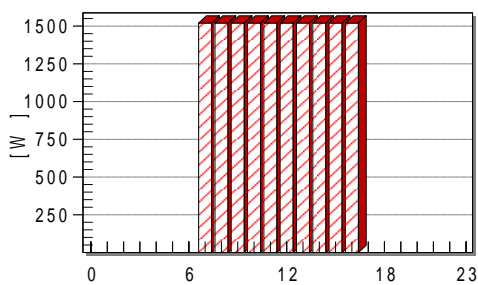


Diagramm 16 GLA Gerätelabor

Diagramm 9 KOP Kopierer

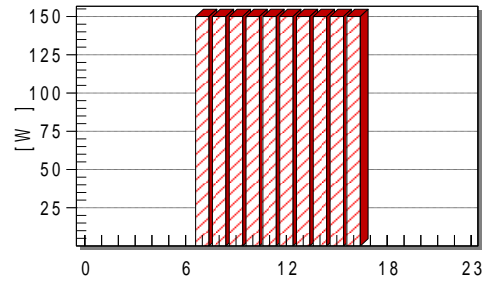


Diagramm 11 STD Geräte

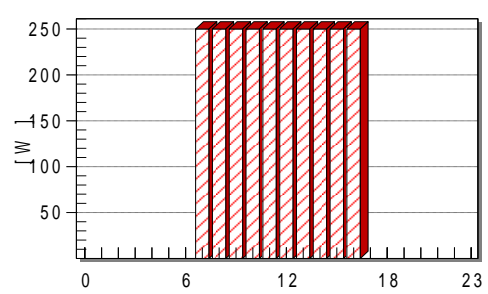


Diagramm 13 LTB Laptop und Beamer

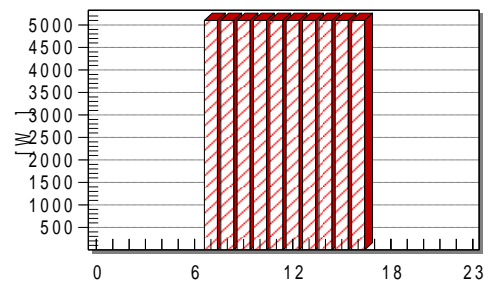


Diagramm 15 GLA Gerätelabor

Wärme erzeugt durch Beleuchtung:

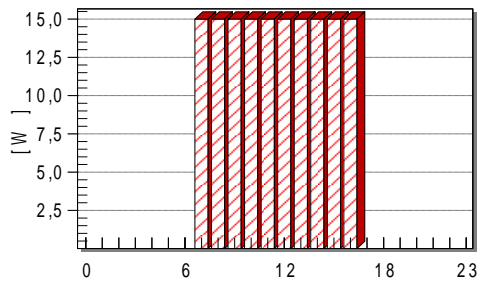


Diagramm 17 STD Beleuchtung

Wärmeabgabe durch Personen:

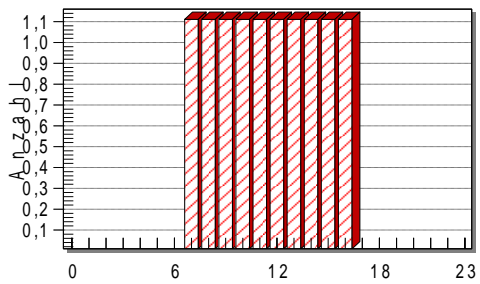


Diagramm 18 STD Standard

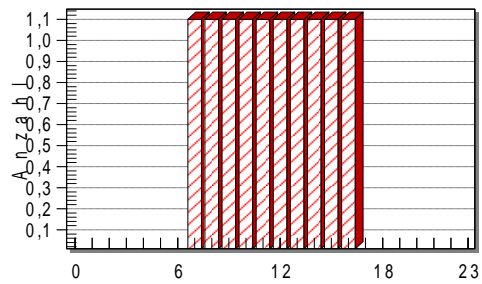


Diagramm 19 LAB Laborbereich

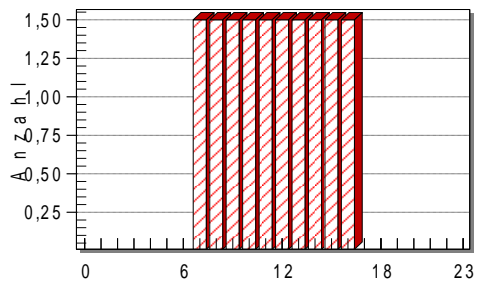


Diagramm 20 KON Konferenzraum

Luftwechsel durch RLT anhand des RLT-Konzepts:

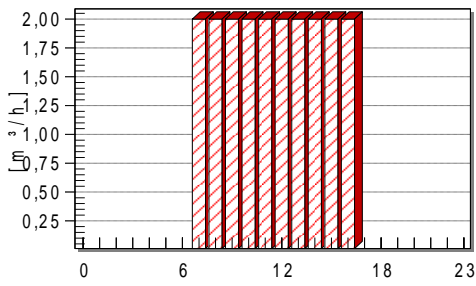


Diagramm 21 BTE

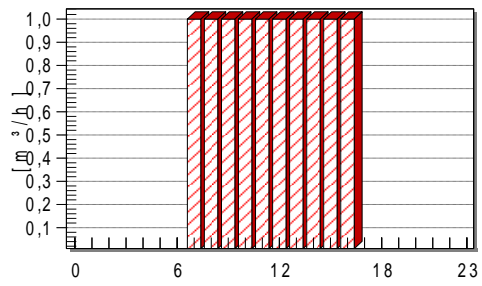


Diagramm 22 KOM Kombizone

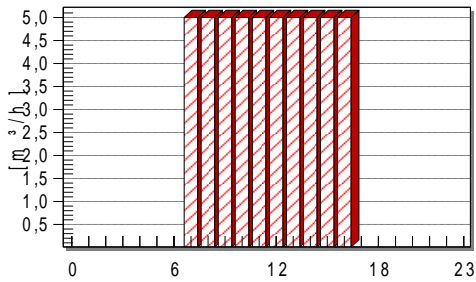


Diagramm 23 WC WC-Räume

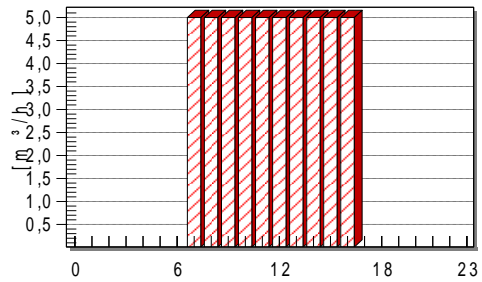


Diagramm 24 ABS Lager

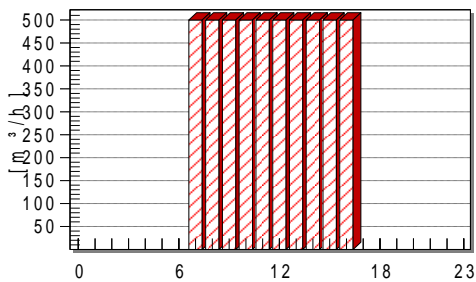


Diagramm 25 LMR Lasermessraum

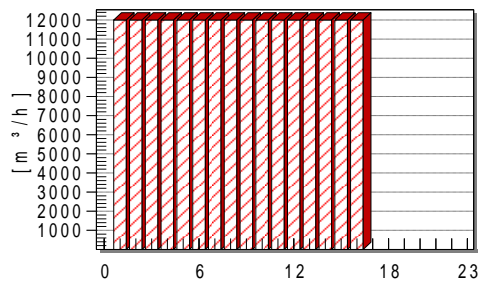


Diagramm 26 KON Konferenz

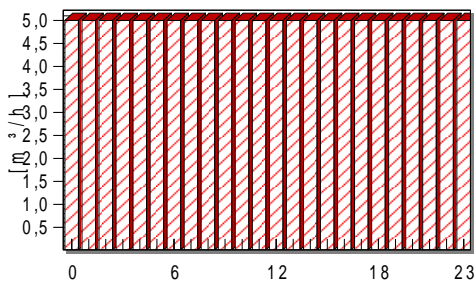


Diagramm 27 CHL Chemie-Abfall/Lager

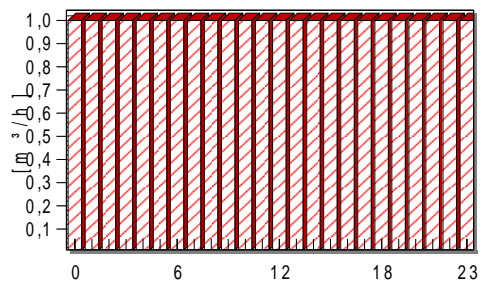


Diagramm 28 UG1 Untergeschoss 1-Fach

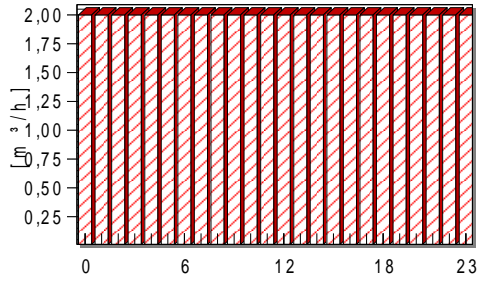


Diagramm 29 SER Server

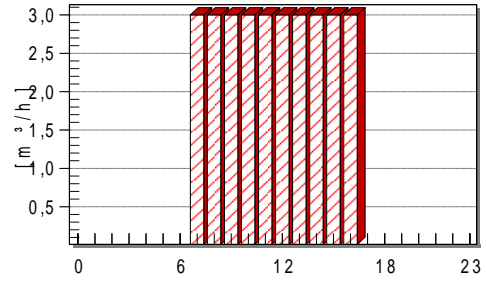


Diagramm 30 GLA Geräte Labor

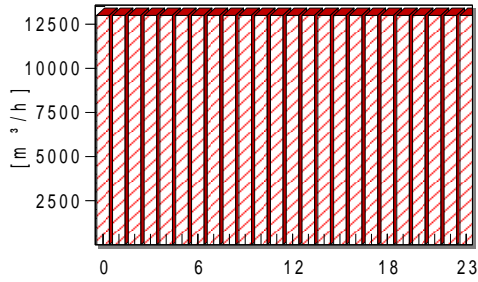


Diagramm 31 BLA Biochemisches-Labor

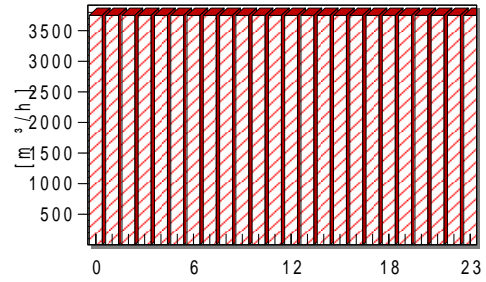


Diagramm 32 CLA Chemische Labor

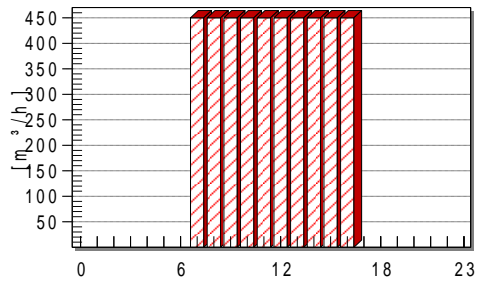


Diagramm 33 MSR Messraum

Raumprofil OHN

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung		Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen		Maschinen	KOP
Personen		Personen	
Raumluft	GRD	Raumluft	GRD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft		Zuluft	BTE
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil BT

Raumprofil TB

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil2	KB3
Anlagenleistung		Anlagenleistung	12T
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung	STD	Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen	TEB	Maschinen	STD
Personen	STD	Personen	STD
Raumluft	GRD	Raumluft	GRD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft		Zuluft	STD
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil EB

Raumprofil KOM

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung	STD	Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen		Maschinen	
Personen	STD	Personen	STD
Raumluft	GRD	Raumluft	GRD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft	KOM	Zuluft	WC
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	

Raumprofil WC

Raumprofil LAG

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung		Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen		Maschinen	
Personen		Personen	STD
Raumluft	GRD	Raumluft	GRD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft	ABS	Zuluft	
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil KAR

Raumprofil FOY

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung	STD	Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen		Maschinen	
Personen	STD	Personen	STD
Raumluft	GRD	Raumluft	
Gleitung		Gleitung	
Zuluft	KOM	Zuluft	
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil FL

Raumprofil LMR

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	STD
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	STD
Beleuchtung	STD	Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen	Mes	Maschinen	LTB
Personen	LAB	Personen	KON
Raumluft	LMR	Raumluft	STD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft	LMR	Zuluft	KON
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil KON

Raumprofil TK

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung	STD	Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen		Maschinen	
Personen		Personen	STD
Raumluft	GRD	Raumluft	GRD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft		Zuluft	ABS
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil UMK

Raumprofil TRH

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung	STD	Beleuchtung	
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen		Maschinen	
Personen		Personen	
Raumluft	GRD	Raumluft	
Gleitung		Gleitung	
Zuluft		Zuluft	CHL

Raumprofil CHL

Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil UG1

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung		Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen		Maschinen	
Personen		Personen	
Raumluft	GRD	Raumluft	
Gleitung		Gleitung	
Zuluft	UG1	Zuluft	UG1
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil TEC

Raumprofil EDV

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung		Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen	SER	Maschinen	GLA
Personen		Personen	STD
Raumluft	GRD	Raumluft	GRD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft	SER	Zuluft	GLA
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil GLA

Raumprofil BLA

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung	STD	Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen	CLA	Maschinen	CLA
Personen	LAB	Personen	LAB
Raumluft	GRD	Raumluft	GRD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft	BLA	Zuluft	CLA
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

Raumprofil CLA

Raumprofil LAB

Nutzenprofil	KB	Nutzenprofil	KB
Anlagenleistung		Anlagenleistung	
Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)		Aussenluft (Infiltration / Nachtlüftung)	
Beleuchtung	STD	Beleuchtung	STD
Externe Anlage		Externe Anlage	
Maschinen		Maschinen	Mes

Raumprofil MES

Personen	LAB	Personen	LAB
Raumluft	GRD	Raumluft	GRD
Gleitung		Gleitung	
Zuluft	STD	Zuluft	MSR
Zus. Feuchte		Zus. Feuchte	
Zus. Luft		Zus. Luft	

9.2.4 Bodengutachten

Die folgenden Aussagen beruhen auf dem Bodengutachten für ein nahegelegenes Projekt. Nach Aussage des Geologen lassen sich die Angaben zu der Bodenbeschaffenheit auf dieses Projekt projizieren. Mittels eines Geothermal Response Test wurde die lokale effektive Wärmeleitfähigkeit und der lokale thermische Bohrlochwiderstand bestimmt.

Der Geothermal Response Test ergab eine effektiven Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,64 W/(m K) und den thermischen Bohrlochwiderstand von 0,106 K/(W/m)

Für das untersuchte Projekt wurde eine Bodensimulation durchgeführt. Als Grundlage dafür dienen die Ergebnisse des Geothermal Response Test und eine Gebäudesimulation für den individuellen Nutzen des Gebäudes. Die folgenden Angaben dienen als Anhalt und diente in der Auslegung als Grundlage.

Leistungen	Untergrund			
	Wärmeentzugsbedarf	Wärmeentzugsangebot	Kälteentzugsbedarf	Kälteentzugsangebot
Jan	65.63 kW	72.54 kW	0.00 kW	0.00 kW
Feb	63.89 kW	76.48 kW	0.00 kW	0.00 kW
Mar	46.80 kW	75.37 kW	-19.91 kW	0.00 kW
Apr	50.77 kW	30.65 kW	-86.66 kW	-69.83 kW
May	37.15 kW	0.00 kW	-140.52 kW	-107.36 kW
Jun	25.26 kW	0.00 kW	-159.26 kW	-145.72 kW
Jul	20.55 kW	0.00 kW	-169.80 kW	-165.03 kW
Aug	22.54 kW	0.00 kW	-156.92 kW	-168.12 kW
Sep	28.23 kW	0.00 kW	-103.05 kW	-138.15 kW
Oct	36.65 kW	69.42 kW	-49.18 kW	-5.96 kW
Nov	43.83 kW	104.44 kW	0.00 kW	0.00 kW
Dec	56.71 kW	97.18 kW	0.00 kW	0.00 kW
Max	65.63 kW	104.44 kW	-169.80 kW	-168.12 kW
spez. Lst.	15.42 W/m	24.53 W/m	-39.89 W/m	-39.49 W/m

Tabelle 17 Entzugsleistung der Erdwärmesonden

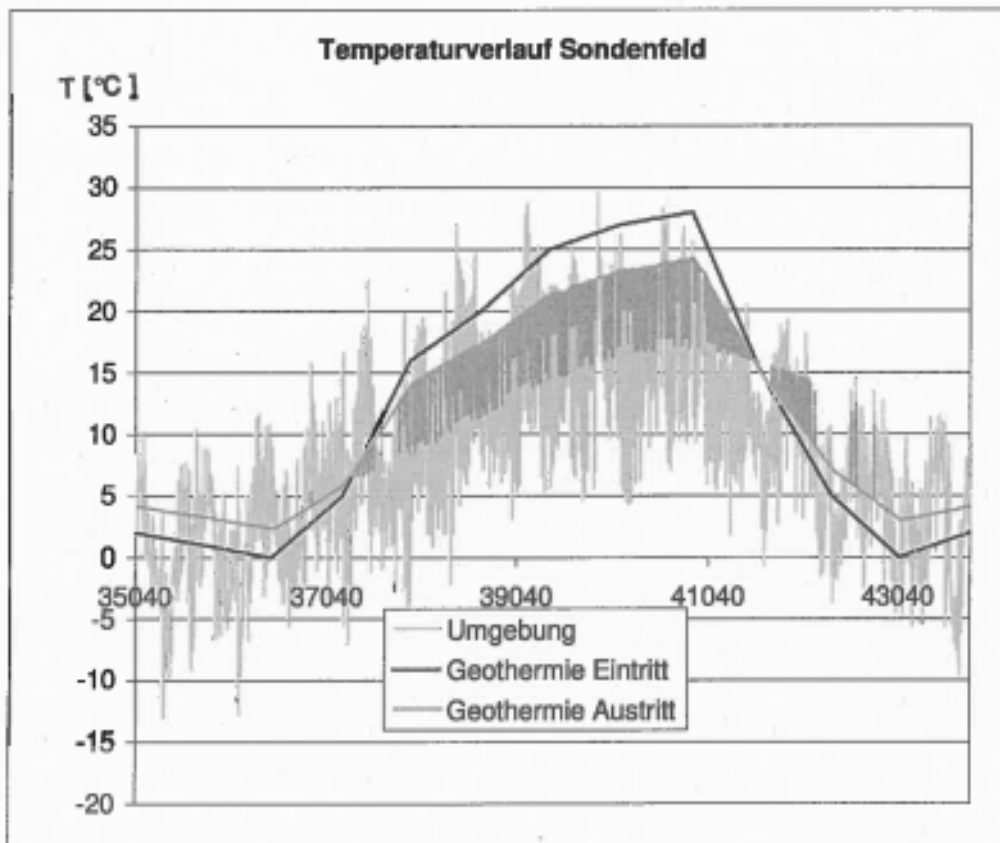


Diagramm 34 Temperaturverlauf im Sondenfeld des fünften Betriebsjahres

9.3 BTA



Abbildung 30 BTA-Flächen EG

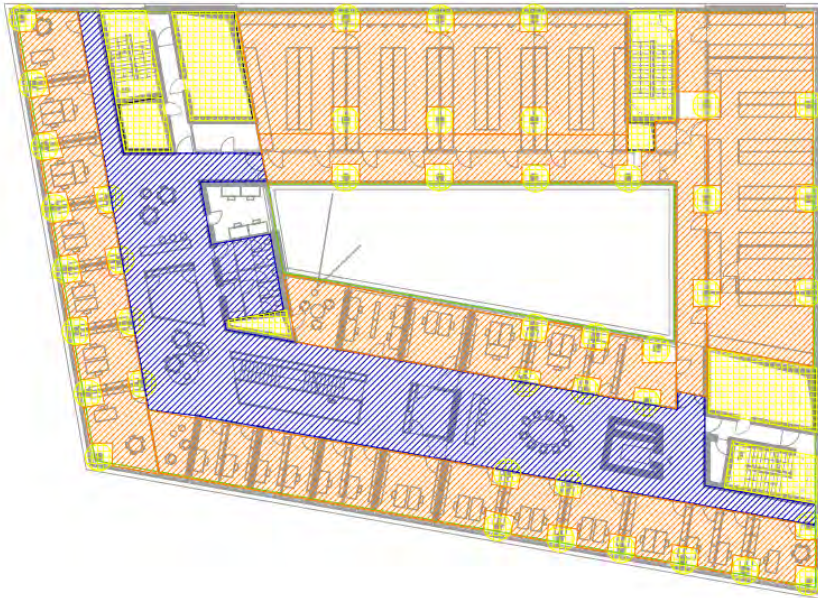


Abbildung 31 BTA-Flächen 1. OG



Abbildung 32 BTA Flächen 2. OG

9.3.1 Leistung BTA

Nach den Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32 ergeben sich die Flächen aus der Tabelle 18.

Geschoss	EG	1. OG	2. OG	Gesamt
Gesamtfläche [m ²]	1674	1814	1200	4688
Abhangdecke [m ²]	540	426	430	1396
Angenommene Sperrflächen [m ²]	261	307	298	694
BTA-Fläche Büro [m ²]	150	442	121	713
BTA-Fläche Labor [m ²]	475	426	-	901
BTA-Fläche Flur [m ²]	172	136	-	309
Wirksame BTA-Fläche [m ²]	797	1004	121	1922

Tabelle 18 Flächen der BTA

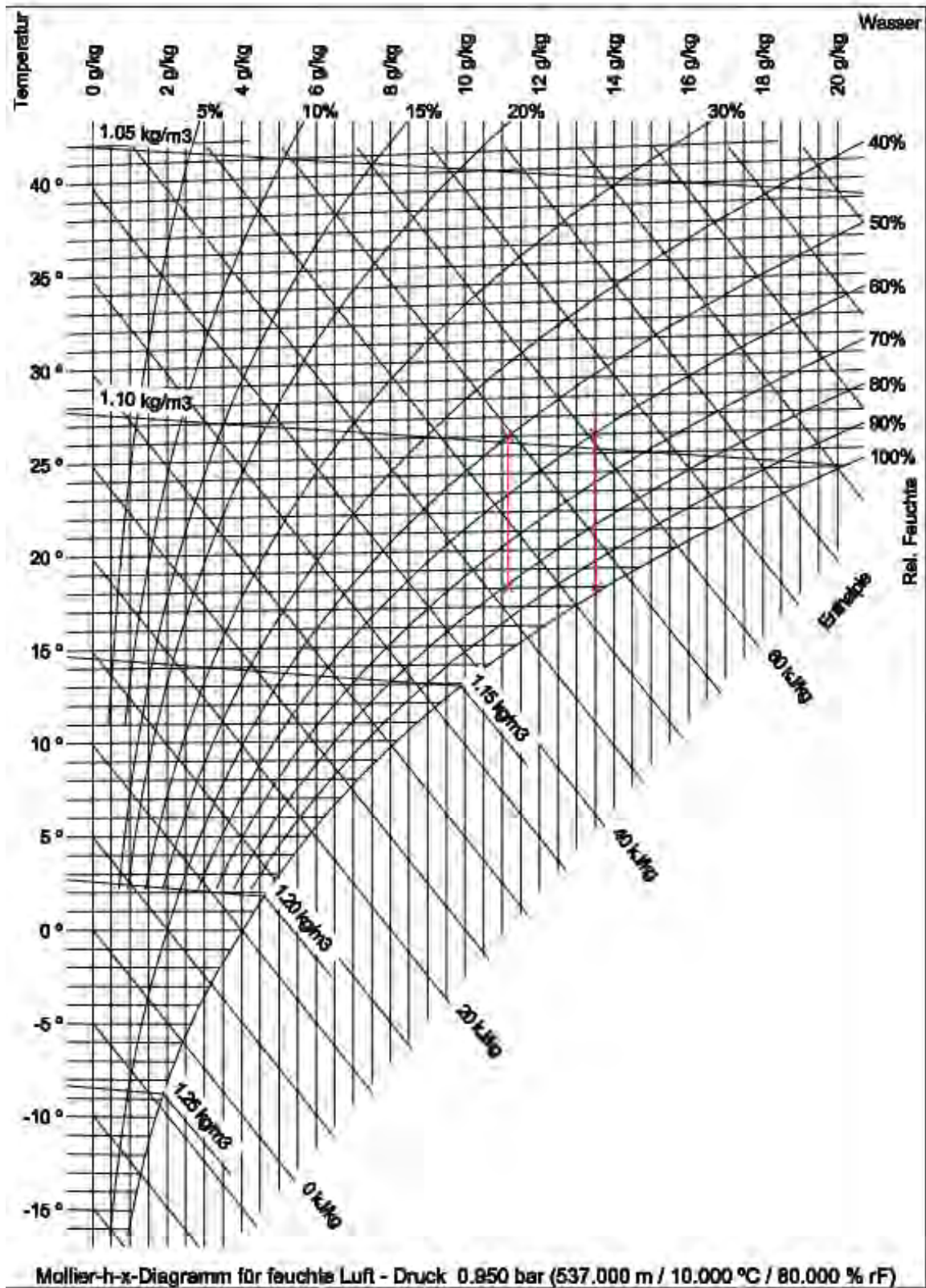


Abbildung 33 h-x Diagramm zur Ermittlung der Kondensationstemperatur

Spez. Leistung \dot{q} (Kühlbetrieb)

Vorlauftemperatur: $t_{VL} = 18 \text{ °C}$

Rücklauftemperatur: $t_{RL} = 21 \text{ °C}$

Spez. Massenstrom Wärmeträgermedium: $\dot{m} = 12,93 \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$

Wärmekapazität Wärmeträgermedium: $c_p = 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{RL} - t_{VL})$$

$$q_{\text{Kühlen}} = 45 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Die spez. Leistung im Heizbetrieb wird nach der gleichen Methode berechnet.

$$q_{\text{Heizen}} = 44 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Nach Angaben des Herstellers teilen sich die Leistungen nach Tabelle 19 spez. Leistung der BTA auf.

	spez. Leistung Kühlbetrieb [W/m ²]	spez. Leistung Heizbetrieb [W/m ²]
Fußboden	15	20
Decke	30	24
Gesamt	45	44

Tabelle 19 spez. Leistung der BTA

Die Gesamtleistung der BTA ergibt sich durch das multiplizieren der spez. Leistungen (Tabelle 19) mit der BTA wirksamen Fläche (Tabelle 18).

$$P = q \cdot A$$

	Ge- schoss	EG	1. OG gegen AL	1. OG	1. OG Gesamt	2. OG	Gesamt
Kühlfall	Spez. Leistung BTA [W/m ²]	45	30	45	-	45	-
	Leistung BTA [W]	36365	17810	19908	37718	14123	88205
Heizfall	Spez. Leistung BTA [W/m ²]	44	24	44	-	44	-
	Leistung BTA [W]	35556	14248	19466	33714	11298	80568

Tabelle 20 Leistung der BTA

Technische Betrachtung



Betonkernaktivierung mit Uponor Contec

BV : ■■■ Laborgebäude
Projekt- Nr. : B-0054288
Erstellt von : Kirsten Kuchta
Datum : 07.04.2014

Berechnung der Auslastungswerte für Kühlung und Heizung

300 mm Decke, Rohrlage mittig Deckenaufbau:

Bodenbelag : Teppich
(Annahme): $R_{s,d} = 0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$
Verbundestrich : 60 mm
Betonüberdeckung : 140 mm
Betonunterdeckung : 140 mm
Wärmeleitfähigkeit Beton : 2,1 W/mK

System: Uponor Contec

Berechnungsparameter:	Kühlung	Heizung
Vorlauftemperatur	18°C	29°C
Rücklauftemperatur	21°C	26,1°C
Raumtemperatur	26°C	20°C
Rel. Feuchte	50%	
Ergebnis:		
Auslastung über Fußboden	$q_{Fb} = \text{ca. } 15 \text{ W/m}^2$	$q_{Fb} = \text{ca. } 20 \text{ W/m}^2$
Auslastung über Decke	$q_{De} = \text{ca. } 30 \text{ W/m}^2$	$q_{De} = \text{ca. } 24 \text{ W/m}^2$
Deckenoberflächentemperatur	$\theta_{De} = \text{ca. } 23,2^\circ\text{C}$	$\theta_{De} = \text{ca. } 24,1^\circ\text{C}$
spez. Massenstrom pro m^2	$m = \text{ca. } 12,93 \text{ kg/h m}^2$	
Rohrlänge bei max. $\Delta p = 300 \text{ mbar}$	$l = \text{ca. } 135 \text{ m}$	

Abbildung 34 Auslegung der BTA

9.4 Kapitalwert

Jahre	Zinssatz									
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
1	0,99010	0,98039	0,97087	0,96154	0,95238	0,94340	0,93458	0,92593	0,91743	0,90909
2	1,97040	1,94156	1,91347	1,88609	1,85941	1,83339	1,80802	1,78326	1,75911	1,73554
3	2,94099	2,88388	2,82861	2,77509	2,72325	2,67301	2,62432	2,57710	2,53129	2,48685
4	3,90197	3,80773	3,71710	3,62990	3,54595	3,46511	3,38721	3,31213	3,23972	3,16987
5	4,85343	4,71346	4,57971	4,45182	4,32948	4,21236	4,10020	3,99271	3,88965	3,79079
6	5,79548	5,60143	5,41719	5,24214	5,07569	4,91732	4,76654	4,62288	4,48592	4,35526
7	6,72819	6,47199	6,23028	6,00205	5,78637	5,58238	5,38929	5,20637	5,03295	4,86842
8	7,65168	7,32548	7,01969	6,73274	6,46321	6,20979	5,97130	5,74664	5,53482	5,33493
9	8,56602	8,16224	7,78611	7,43533	7,10782	6,80169	6,51523	6,24689	5,99525	5,75902
10	9,47130	8,98259	8,53020	8,11090	7,72173	7,36009	7,02358	6,71008	6,41766	6,14457
11	10,36763	9,78685	9,25262	8,76048	8,30641	7,88687	7,49867	7,13896	6,80519	6,49506
12	11,25508	10,57534	9,95400	9,38507	8,86325	8,38384	7,94269	7,53608	7,16073	6,81369
13	12,13374	11,34837	10,63496	9,98565	9,39357	8,85268	8,35765	7,90378	7,48690	7,10336
14	13,00370	12,10625	11,29607	10,56312	9,89864	9,29498	8,74547	8,24424	7,78615	7,36669
15	13,86505	12,84926	11,93794	11,11839	10,37966	9,71225	9,10791	8,55948	8,06069	7,60608
16	14,71787	13,57771	12,56110	11,65230	10,83777	10,10590	9,44665	8,85137	8,31256	7,82371
17	15,56225	14,29187	13,16612	12,16567	11,27407	10,47726	9,76322	9,12164	8,54363	8,02155
18	16,39827	14,99203	13,75351	12,65930	11,68959	10,82760	10,05909	9,37189	8,75563	8,20141
19	17,22601	15,67846	14,32380	13,13394	12,08532	11,15812	10,33560	9,60360	8,95011	8,36492
20	18,04555	16,35143	14,87747	13,59033	12,46221	11,46992	10,59401	9,81815	9,12855	8,51356

Tabelle 21 Rentenbarwertfaktor

9.5 Berechnungen

9.5.1 Elektrische Energie

Am folgenden Beispiel der Kompressorenergie der reversible WP wird exemplarisch die Rechnung verdeutlicht. Die Kompressorenergien der WP im Heizbetrieb und der KM sind analog zum Beispiel berechnet.

Nach Gl. 3.1:

$$E_{f,el,WP,K\u00fchlen} = \frac{E_{f,th,WP,K\u00fchlen}}{\epsilon_m} = \frac{59 \text{ MWh/a}}{6,9} = 9 \text{ MWh/a}$$

9.5.2 Betriebskosten

Berechnung der elektrischen Energieaufnahme der WP im Heizbetrieb bei einer MWh thermischer Nutzenergie:

$$E_{f,el,WP,Heizen} = \frac{E_{f,th,WP,Heizen}}{\epsilon_m} = \frac{1 \text{ MWh}}{5,2} = 0,192 \text{ MWh}$$

Endenergiekosten pro thermischer Nutzeneinheit erzeugt durch die WP:

$$k_{WP,Heizen} = 0,192 \text{ MWh} \cdot 180 \text{ €/MWh} = 35 \text{ €}$$

Analog zur Berechnung der Endenergiekosten im Heizbetrieb der WP, erfolgt die Berechnung der Endenergiekosten im K\u00fchlbetrieb der WP.

Berechnung der elektrischen Energieaufnahme von KM und R\u00fcckk\u00fchler pro MWh thermischer Nutzenergie Variante A:

$$E_{f,el,KM,RK} = \frac{E_{f,el,KM,RK}}{E_{f,th,KM,RK}} = \frac{34 \text{ MWh} + 18 \text{ MWh}}{280 \text{ MWh}} = 0,187 \text{ MWh}$$

Endenergiekosten pro thermischer Nutzenergie erzeugt durch die KM und den RK:

$$k_{WP,Heizen} = 0,187 \text{ MWh} \cdot 180 \text{ €/MWh} = 34 \text{ €}$$

Analog zur Berechnung der Endenergiekosten der Variante A erfolgt die Berechnung der Variante B.

9.5.3 Primärenergiebedarf

	TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN	Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung
<h1>Zertifikat</h1>		
Hiermit wird bescheinigt, dass auf Grundlage der im Zertifizierungsbericht ¹ genannten Betriebsdaten der Jahre 2009 - 2011		
das Fernwärmeversorgungssystem Hamburg der Vattenfall Europe Wärme AG durch das		
Institut für Energietechnik der TU Dresden, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung		
geprüft und nach AGFW Arbeitsblatt FW 309 - Teil 1 folgendermaßen bewertet wurde:		
Primärenergiefaktor des Fernwärmeversorgungssystems:		0,57
Die Wärmebereitstellung erfolgte mit einem Anteil von aus in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugter Wärme.		90,4 %
Die Wärmebereitstellung erfolgte mit einem Anteil von aus regenerativ erzeugter Wärme.		13,8 %
Diese Bescheinigung ist gültig bis zum 23.07.2022.		
Technische Universität Dresden Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann 01062 Dresden		
 Prof. Dr.-Ing. C. Felsmann Leiter der Professur	Stempel	 Dr.-Ing. T. Sander Bearbeiter f-Gutachter-Nr.: FW 609-010
Dresden, 24.07.2012		
¹ Kurzbericht - Zertifizierung des Primärenergiefaktors nach FW 309 Teil 1 für das Fernwärmeversorgungssystem Hamburg der Vattenfall Europe Wärme AG. Dresden, 24.07.2012		

Abbildung 35 Zertifikat FW (19)

Berechnung des Primärenergiebedarfs am Beispiel der FW bei Variante A, weitere Primärenergieberechnungen werden analog zu diesem Beispiel durchgeführt:

$$Q_{P,FW,A} = Q_{f,FW,A} \cdot f_{P,FW} = 112 \text{ MWh} \cdot 0,57 = 64 \text{ MWh}$$

Berechnung des Primärenergiebedarfes bei Erzeugung einer thermischen MWh, durch die WP im Heizbetrieb:

$$Q_{f,el,WP,Heizen} = \frac{E_{WP,Heizen}}{\varepsilon_{WP,Heizen}} = \frac{1 \text{ MWh}}{5,2} = 0,19 \text{ MWh}$$

$$Q_{P,el,WP,Heizen} = Q_{f,el,WP,Heizen} \cdot f_{P,el} = 0,19 \text{ MWh} \cdot 3 = 0,58 \text{ MWh}$$

Primärenergiebedarf einer MWh erbracht durch die FW:

$$Q_{P,FW} = Q_{f,FW} \cdot f_{P,FW} = 1 \text{ MWh} \cdot 0,57 = 0,57 \text{ MWh}$$

9.5.4 Parametervariation

Anzahl Erdwärmesonden	Geothermieleistung direkte Kühlung [kW]	Leistung aktive Kühlung [kW]	Leistung WP [kW]	Rückfluss [€/a]	differenz der Investitionskosten [€]
11	39	33	30	9641	94844
12	43	37	33	10111	101915
13	47	40	36	10563	108986
14	51	44	39	10977	116057
15	55	47	42	11213	123128
16	59	50	45	11584	130199
17	63	54	48	11947	137270
18	67	57	52	12176	144841
19	71	61	55	12488	151912
20	75	64	58	12606	158983
21	79	68	61	12882	166054
22	83	71	64	12971	173125
23	87	74	67	13231	180196
24	91	78	70	13284	187267
25	95	81	73	13332	194338
26	103	88	79	13554	208480
27	107	91	82	13732	215551
28	111	95	85	13713	222622
29	115	98	88	13686	229693
30	118	101	91	13851	235371

Tabelle 22 Investitionskosten und Rückfluss bei veränderlicher Anlagengröße

Anzahl Erdwärmesonden	Kapitalwert 20 a	Kapitalwert 40 a	Kapitalwert 50 a	Primärenergieeinsparung [MWh/a]
11	45487	157617	211656	226
12	45263	162740	219291	227
13	44767	167321	226226	229
14	43716	170788	231721	230
15	40088	169104	230555	228
16	38408	171316	234426	230
17	36627	173325	238035	231
18	32385	170411	235072	229
19	29858	170927	236751	230
20	24503	165789	231119	229
21	21447	165248	231431	230
22	15680	159284	224731	228
23	12385	158265	224425	230
24	6087	151242	216355	228
25	-278	144083	208109	226
26	-11197	133387	196303	226
27	-15676	129999	192934	227
28	-23027	120868	182138	225
29	-30488	111518	171060	223
30	-33768	109136	168583	225

Tabelle 23 Kapitalwert im Zusammenhang mit der Anlagengröße

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Ansicht des Gebäude	4
Abbildung 2 Energiekonzept	6
Abbildung 3 KKM-Schema (3).....	7
Abbildung 4 Angenäherter Kreisprozess (3)	7
Abbildung 5 Wärmefluss im oberflächennahen Untergrund (6)	9
Abbildung 6 Heizbetrieb WP	10
Abbildung 7 Direktkühlung WP.....	10
Abbildung 8 Mechanischer Kühlbetrieb WP	11
Abbildung 9 Dualbetrieb WP	11
Abbildung 10 Funktionsschema eines ULK.....	13
Abbildung 11 Wärmeverluste eines Raumes	14
Abbildung 12 Wärmestrom am Beispiel eines Büroraumes (14).....	16
Abbildung 13 Energiefluss Variante A.....	20
Abbildung 14 Energiefluss Variante B.....	21
Abbildung 15Generiertes Gebäude.....	22
Abbildung 16 Zonen des Testreferenzjahr	25
Abbildung 17 Ermittelte BTA-Fläche 1.OG.....	32
Abbildung 18 Grundriss UG.	52
Abbildung 19 Grundriss EG.....	52
Abbildung 20 Grundriss 1. OG.	53
Abbildung 21 Grundriss 2. OG.	53
Abbildung 22 Grundriss 3. OG.	54
Abbildung 23 Dachaufsicht.....	54
Abbildung 24 Schnitt A-A	55
Abbildung 25 Schnitt B-B	55
Abbildung 26 Materialkonzept EG	56
Abbildung 27 Materialkonzept 1. OG	56
Abbildung 28 Materialkonzept 2. OG	57
Abbildung 29 RLT-Konzept	59
Abbildung 30 BTA-Flächen EG	73
Abbildung 31 BTA-Flächen 1. OG.....	74
Abbildung 32 BTA Flächen 2. OG	74

Abbildung 33 h-x Diagramm zur Ermittlung der Kondensationstemperatur	76
Abbildung 34 Auslegung der BTA	79
Abbildung 35 Zertifikat FW (19).....	82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 BTA-Fächen.....	32
Tabelle 2 Leistung der BTA.....	33
Tabelle 3 Volllaststunden Geothermie und WP bei 111 KW Kühlleistung	34
Tabelle 4 Leistungen der Geothermie	35
Tabelle 5 Volllaststunden in Abhängigkeit der Leistung.....	35
Tabelle 6 Energiebereitstellung Kälteerzeugung.....	36
Tabelle 7 Betriebspunkte KM	37
Tabelle 8 Elektrische Energie KM Variante A	37
Tabelle 9 Elektrische Energie KM Variante B	38
Tabelle 10 Investitionskosten	39
Tabelle 11 Betriebskosten.....	41
Tabelle 12 Betriebsgebundene Kosten	43
Tabelle 13 Primärenergiebedarf	46
Tabelle 14 Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte)	57
Tabelle 15 Raumtemperaturen.....	58
Tabelle 16 Wärmeabgabe von Bürokomponenten (22)	62
Tabelle 17 Entzugsleistung der Erdwärmesonden.....	72
Tabelle 18 Flächen der BTA.....	75
Tabelle 19 spez. Leistung der BTA	77
Tabelle 20 Leistung der BTA	78
Tabelle 21 Rentenbarwertfaktor	80
Tabelle 22 Investitionskosten und Rückfluss bei veränderlicher Anlagengröße	84
Tabelle 23 Kapitalwert im Zusammenhang mit der Anlagengröße	85

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1 Häufigkeitsverteilung der Heizlast	26
Diagramm 2 Häufigkeitsverteilung der Kühllast	27
Diagramm 3 Jahresverlauf Heizlast	28
Diagramm 4 Jahresverlauf Kühllast	29
Diagramm 5 Parametervariation	48
Diagramm 6 Primärenergieeinsatz in Abhängigkeit der Leistung	49
Diagramm 7 Häufigkeitsverteilung der Aussenlufttemperatur	64
Diagramm 8 TEC Technik	65
Diagramm 9 KOP Kopierer.....	65
Diagramm 10 TEB Teambüro	65
Diagramm 11 STD Geräte.....	65
Diagramm 12 Mes Messraum	65
Diagramm 13 LTB Laptop und Beamer.....	65
Diagramm 14 SER Server.....	65
Diagramm 15 GLA Gerätelabor.....	65
Diagramm 16 GLA Gerätelabor.....	65
Diagramm 17 STD Beleuchtung.....	66
Diagramm 18 STD Standard	66
Diagramm 19 LAB Laborbereich	66
Diagramm 20 KON Konferenzraum	66
Diagramm 21 BTE.....	67
Diagramm 22 KOM Kombizone.....	67
Diagramm 23 WC WC-Räume	67
Diagramm 24 ABS Lager	67
Diagramm 25 LMR Lasermessraum	67
Diagramm 26 KON Konferenz.....	67
Diagramm 27 CHL Chemie-Abfall/Lager.....	67
Diagramm 28 UG1 Untergeschoss 1-Fach	67
Diagramm 29 SER Server.....	68
Diagramm 30 GLA Geräte Labor	68
Diagramm 31 BLA Biochemisches-Labor	68
Diagramm 32 CLA Chemische Labor.....	68

Diagramm 33 MSR Messraum	68
Diagramm 34 Temperaturverlauf im Sondenfeld des fünften Betriebsjahres.....	73

Literaturverzeichnis

1. Umwelt Bundesamt. [Online] 18. Juli 2013. [Zitat vom: 26. Februar 2014.] <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/anteile-der-energieformen-strom-waerme-kraftstoffe>.
2. Wikipedia Erneuerbare Energien. [Online] 29. April 2014. [Zitat vom: 29. April 2014.] http://de.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare_Energien.
3. geothermiewiki. [Online] 11. September 2013. [Zitat vom: 19. Februar 2014.] <http://geothermiewiki.iai.kit.edu/index.php/Prozess>.
4. **Urbaneck, Thorsten.** *Kältespeicher*. München : Oldenbourg Verlag, 2012. S. 15.
5. **Martin Kaltschmitt, Ernst Huenges, Helmut wolff.** Energie aus Erdwärme. Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 1999, S. 9.
6. **Entwurf, VDI 4640 Blatt 1.** Thermische Nutzung des Untergrunds Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. 2008, S. 6.
7. **M. Kaltschmitt, W. Streicher, A. Wiese.** Erneuerbare Energie. Berlin, Heidelberg : Springer, 1993 (4), S. 408.
8. **Schramek, Prof. Dr.-Ing Ernst-Rudolf.** Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. München : Oldenbourger Industrie Verlag, 2009/2010 (74), S. 496; 807; 808; 971.
9. **Uponor.** Energiebereitstellung Geozent. [Online] März 2013. [Zitat vom: 19. Februar 2014.] <http://www.uponor.de/loesungen/energiebereitstellung/geozent-profi.aspx>.
10. —. Gebäudetechnik Technischer Gesamtkatalog 2013/14. [Online] 2014. [Zitat vom: 20. Februar 2014.] http://www.uponor.de/~media/countryspecific/central-europe/___downloadcenter-ce/ti_technical-information/de-at-ch/ti_uponor-gebuedetechnik_1059201_1_2014_linked.pdf?version=2.
11. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN EN12831-1 Norm zur Heizlastberechnung. s.l. : Beuth Verlag GmbH, 2008, S. 11,5.
12. **Verein Deutscher Ingenieure.** VDI 2078. *Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume*. Düsseldorf : Beuth Verlag GmbH, 1996, S. 2; 93. Tabelle A2.
13. —. VDI 2078 Entwurf. *Berechnung von Kühllas und Raumtemperaturen von Räumen und Gebäuden*. Düsseldorf : Beuth Verlag GmbH, 2012, S. 6; 74; 75.
14. —. VDI 2078-1. Berlin : Beuth Verlag GmbH, S. 4.
15. **Deutscher Wetterdienst.** dwd. [Online] 2014. [Zitat vom: 24. Februar 2014.] <http://www.dwd.de/TRY>.
16. **Dittmann/J.Zschernig, A.** Energiewirtschaft. Stuttgart : B.G. Teubner Stuttgart, 1998, S. 192.

17. **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN V 18599-1 Energetische Bewertung von Gebäuden. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2007, S. 40, 59, 60.

18. **Verein Deutscher Ingenieure.** VDI 2067 Blatt1. *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen*. Düsseldorf : Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000, S. 20, 21-25. Tabelle A2.

19. **Felsmann, Prof. Dr.-Ing. Clemens.** Vattenfall. [Online] 24. Juli 2012. [Zitat vom: 19. Februar 2014.]
http://www.vattenfall.de/de/file/Zertifikat_FW309_Verbundnetz_Hamburg_26133046.pdf_38215345.pdf.

20. **Breidert, Hans-Joachim.** Projektierung von Kälteanlagen. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg : C.F. Müller, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2009, S. 3.

