

Wirtschaftlichkeitsabschätzung der Erdwärmenutzung in Oberbayern

Diplomarbeit

An der Universität der Bundeswehr München
Fachhochschulstudiengang Maschinenbau
Wissenschaftliche Einrichtung 5/1
„Thermische Maschinen und Geräte“
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur (FH)

vorgelegt von
Jens Junkersdorf
Studienjahrgang 2004
Fachbereich Maschinenbau

Dezember 2007

Aufgabensteller: Prof. Dr. Stefan Lecheler
Zweitkorrektor: Prof. Dr. Wieland Meyer

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Jens Junkersdorf, erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt und keine anderen als die gekennzeichneten Quellen oder Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

München, den 21. Dezember 2007

Danksagung

Mein Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr. Stefan Lecheler und den Mitarbeitern der Wissenschaftlichen Einrichtung WE 5/1 „Technische Thermodynamik“ für die Ermöglichung und Förderung dieser Diplomarbeit.

Ich danke Herrn André Münchow vom Bergamt Südbayern, der als Technischer Amtmann die hiesigen Risswerke aller Bergwerke in Südbayern verwaltet. Er war mir unbürokratisch und kompetent mit Fachwissen bei der Einsichtnahme in vorhandenes Kartenwerk behilflich. Seine Erklärungen machten das komplizierte Risswerk für einen Nicht-Bergmann verständlich, so dass ich die notwendigen Daten den Zeichnungen entnehmen konnte.

Für die hilfsbereite Unterstützung bei der Behandlung der Bohrparameter und insbesondere der Bohrkosten, danke ich der Firma Daldrup & Söhne AG Bohrtechnik, namentlich vertreten durch das Mitglied des Vorstandes, Herrn Andreas Tönies.

Besonderer Dank gebührt meiner Frau Mandy und meinem Sohn Lukas Maximilian, die mir stets die Zeit und Ruhe gegeben haben, die ich für die Erstellung der Diplomarbeit benötigt habe und dabei familiäre Bedürfnisse hinten angestellt haben.

Prolog



**„Naturae vero rerum vis atque maiestas
in omnibus momentis fide caret,
si quis modro partes eius
ac non totam complectatur animo.“**

*„Der Gewalt und Majestät der Natur
wird wahrlich in jedem Moment misstraut,
wenn man nur ihre Teile
und nicht das Ganze mit dem Geiste umfasst.“*

Plinius der Ältere (23-79 n.Chr.)
Römischer Gelehrter, Prokurator, Ritter und Naturwissenschaftler

aus „Naturgeschichte“

Kurzfassung

Das vorliegende Werk behandelt die Nutzung von Energie aus Erdwärme. Zunächst einleitend erklärt sind Begrifflichkeiten der Geothermie, der Ursprung von Erdwärme und die Möglichkeiten der Nutzung für den Menschen.

Im weiteren Verlauf wird die mögliche Nutzung von Erdwärme aus einem stillgelegten Bergwerk im süddeutschen Molassebecken betrachtet. Hierbei geht es primär um die Abschätzung der vorhandenen Ressourcen an geothermalen Wässern, die Förderung und Nutzung der Ressourcen und die daraus resultierende Gegenüberstellung der zu erwartenden Aufwendungen und Erträge. Eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung wird vorgenommen.

Die Arbeit soll die Machbarkeit eines derartigen Projektes darstellen und in einer weiteren Betrachtung eventuell als konzeptionelle Grundlage für eine mögliche Umsetzung dienen. Mit einer Investitionssumme von ca. 4,5 Millionen Euro für die Errichtung der Produktionsbohrungen und die wichtigsten Anlagen, ist das Projekt bei Kapitalmarktzinsen von 4% zwar eine unvorteilhafte Investition. Jedoch wurden bei der Abschätzung Fördermittel nicht betrachtet. Es zeigt sich in erster Abschätzung der Investitionen, dass bei einer Nutzungszeit von 30 Jahren die Vorteilhaftigkeit durch Einbeziehung von Unterstützungen, durchaus eine Chance für die Umsetzung besteht. Eine Realisierung könnte somit z.B. im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Interregionalen Projektes stattfinden oder aber mit Mitteln des Bundes und/oder des Land Bayern mitfinanziert werden. Eine Förderung auf kommunaler Ebene ist anzustreben.

In diesem Zusammenhang kann diese Arbeit der Gemeinde Hausham als Anstoß dienen, um dass Interesse innerhalb der Gemeindeführung und unter den Bürgern zu wecken.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagung	II
Prolog	III
Kurzfassung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Nomenklatur	VII
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Geothermie	4
2.1 Definition von Geothermie	4
2.2 Ursprung von Geothermie	5
2.3 Nutzung von Geothermie	8
3 Bergbau	14
3.1 Definition von Bergbau	14
3.2 Bergbau in Deutschland	16
3.3 Bergbau und Geothermie	17
3.4 Bergwerk Hausham	21
4. Einflussfaktoren	23
4.1 Tiefe	24
4.2 Volumen	27
4.3 Fördermenge	36
4.4 Temperatur	41
5. Energiebetrachtung	45
5.1 Systemabgrenzung	46
5.2 Systembetrachtung	47
5.3 Kostenfaktoren	69
6. Bohrung	79
6.1 Bohrmodelle	80
6.2 Bohrlochbergbau in Grubensystemen	84
6.3 Das Bohrgerät und die technische Ausstattung	90
6.4 Datenherkunft	91
6.5 Bohrkosten	92
7. Infrastruktur und Verbraucher	101
7.1 Krankenhaus Agathried	101
7.2 Schulen	102
7.3 Haushalte	104
7.4 Nahwärmennetz	108

8.	Wirtschaftlichkeit	109
8.1	Kosten	110
8.2	Erträge	115
8.3	Wirtschaftlichkeit und Amortisation	116
8.4	Sensitivitätsstudie	120
8.5	Zusammenfassung	132
8.6	Ausblick und Verbesserungen	134
A	Quellenverzeichnis	
B	Abbildungsverzeichnis	
C	Tabellenverzeichnis	
D	Gleichungenverzeichnis	

Nomenklatur

A	Querschnitt, Fläche	$[m^2]$
A	Ausgaben	$[\text{€}]$
a	Abstand	$[m]$
α	Kostenexponent	
c	spezifische Wärmekapazität	$\left[\frac{kJ}{kg * K} \right]$
C_w	spezifische Kosten einer Komponente	
d	Durchmesser	$[m]$
ρ	Dichte	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$
E	Energie	$[kW]$
E	Ertrag	$[\text{€}]$
ε	Leistungsziffer	
G	Grädigkeit	$[K]$
g	Erdbeschleunigung	$\left[\frac{m}{s^2} \right]$
H	Höhe	$[m]$
h	spezifische Enthalpie	$\left[\frac{kJ}{kg} \right]$
I	Investition	$[\text{€}]$
i	Kalkulationszinssatz	$[%]$
K	Kosten	$[\text{€}]$
k	spezifische Kosten	$\left[\frac{\text{€}}{\text{Einheit}} \right]$
L	Länge	$[m]$
M	Mächtigkeit	$[m]$
m	Massenstrom	$\left[\frac{kg}{s} \right]$
η	Wirkungsgrad	$[%]$
P	Leistung	kW
p	Druck	$[bar]$
p_o	oberer Prozessdruck	$[bar]$
p_u	unterer Prozessdruck	$[bar]$
Q	Wärmemenge	$[kW]$

q	Heizlast	$\left[\frac{W}{m^2} \right]$
s	Entropie	$\left[\frac{kJ}{kg * K} \right]$
T	Temperatur	$[^\circ C], [K]$
T_{grad}	geothermischer Gradient	$\left[\frac{^\circ C}{m} \right]$
t	Zeit	$[s], [h]$
$t_{Durchlauf}$	Durchlaufzeit	$[h]$
t_{VB}	Vollbenutzungsstunden	$\left[\frac{h}{a} \right]$
t_b	Thermische Durchbruchzeit	$[h]$
V	Volumen	$[m^3]$
\dot{V}	Volumenstrom	$\left[\frac{m^3}{h} \right]$
v	spezifisches Volumen	$\left[\frac{m^3}{kg} \right]$
x	Dampfgehalt	$\left[\frac{kg}{kg} \right]$
z	Prozentsatz	$[\%]$

Indizes

1 – n	Punkte im Kreisprozess
A	Aquifere
ab	abgeführt, abgehend
AP	Arbeitspreis
el	elektrisch
F	Fluid
GP	Grundpreis
in	Eintritt
is	Isentrop
M	Aquiferematrix
m	Mittelwert
mech	mechanisch
out	Austritt
P	Pumpe
RL	Rücklauf
S	Umgebungsgestein
T, TW	Thermalwasser
Ü	Überhitzung
UK	Unterkühlung
V	Verdichter
VL	Vorlauf
zu	zugeführt

Abkürzungen

CO ₂	Kohlendioxid
D	Deutschland
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
GOK	Geländeoberkante
GWP	Großwärmepumpe
HFKW	Hydrofluorkohlenwasserstoff
HWP	Hauswärmepumpe
KOP	Kick off point
Nfl.	Nutzfläche
NL	Niederlande
R134a	Kältemittel Frigen
RSS	Rotary Steerable System
TP	Tiefenpumpe
Wfl.	Wohnfläche
WP	Wärmepumpe

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Globale Erwärmung und Klimaschutz – diese zwei Begriffe prägen täglich unsere Medienlandschaft. Mehr denn je rückt uns der Klimawandel Jahr für Jahr näher und wir bekommen die Auswirkungen in Form von immer häufigeren und extremen Wettererscheinungen hautnah zu spüren. Ein Grund hierfür ist Experten zufolge der weltweite Ausstoß von CO₂.

Neben der globalen Erwärmung durch die Folgen des Ausstoßes von CO₂, sind Verknappung der Ressourcen und steigende Energiepreise Grund für die Suche nach neuen Formen der Energieherkunft und innovativen Ideen zur Umsetzung. Ziel ist dabei, unabhängig von fossilen Brennstoffen zu werden und die Produktion von CO₂, auf ein Minimum zu reduzieren.

Inzwischen planen immer mehr Kommunen den Bau von Geothermiekraftwerken für die Versorgung ihrer Bürger mit Strom und Wärme. Dabei werden Quellen in der Tiefe, mit Temperaturen von 80°C und mehr, für die Produktion von Ökostrom und die Speisung von Nahwärmenetzen genutzt. An dieser Stelle ist, exemplarisch für die vielen geplanten oder bereits umgesetzten Projekte in Deutschland, die Geothermieanlage in Unterhaching / Bayern zu nennen.

Was jedoch, wenn in der Tiefe keine ausreichende Wärmequelle von mehr als 100 °C vorhanden ist? Auch geringere Temperaturen in oberflächennaher Tiefe können und werden für die Versorgung mit Wärme genutzt. Vom Einfamilienhaus bis hin zu Nahwärmenetzen werden zum Beispiel über Erdsonden und Erdkollektoren dem Erdreich Wärme zur Energiegewinnung entzogen.

Die Überlegungen der Wissenschaftler und Ingenieure gehen aber auch in die Richtung, vorhandene Bauwerke für die Energiegewinnung zu nutzen. **Tunnel-Geothermie** und **Mine Water** sind in diesem Zusammenhang die Schlagwörter. Gegenstand der Betrachtung ist es, ob Wässer aus Tunneln oder alten Bergwerken für die energetische Ausbeutung verwendet werden können. Intensiv wird die Nutzung von Tunnelwässern insbesondere in der Schweiz verfolgt. Mit über 700 Straßen- und Eisenbahntunneln, gehört sie zu den tunnelreichsten Ländern der Welt gehört.

In Anlehnung an die Diplomarbeit von Herrn Dipl.Ing. (FH) Christian Stöckle [1] über die „Wirtschaftlichkeit von Geothermiekraftwerken“, soll in dieser Arbeit die Nutzung der Erdwärme aus ehemaligen Bergwerken betrachtet werden.

Die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit ist es daher, festzustellen, ob eine energetische Nutzung von Bergbauwässern an einem ausgewählten Bergwerk prinzipiell möglich ist.

Der Vergleich zwischen einem derzeit aktuellen Projekt in Heerlen (NL) und einem, seit mehr als 40 Jahren stillgelegtem Pechkohlebergwerk in Hausham / Obb. (D) dient dabei der Beweisführung für die Machbarkeit. Die Aufgabenstellung umfasst dabei neben der Analyse einer generellen Machbarkeit eines derartigen Projektes, auch die energetische Ausbeute und eine Abschätzung der wirtschaftlichen Kosten und Erträge.

Die Förderung des Grubenwassers, die Aufbereitung in einer Energiezentrale, sowie die dabei entstehenden Kosten sollen erfasst und in Gegenüberstellung mit den erreichbaren Energiewerten und möglichen Erträgen im Wärmeverkauf gebracht werden. Abbildung 1.1 zeigt die Gliederung der Diplomarbeit. Sie dient gleichzeitig der Darstellung der Komplexität der vorliegenden Arbeit.

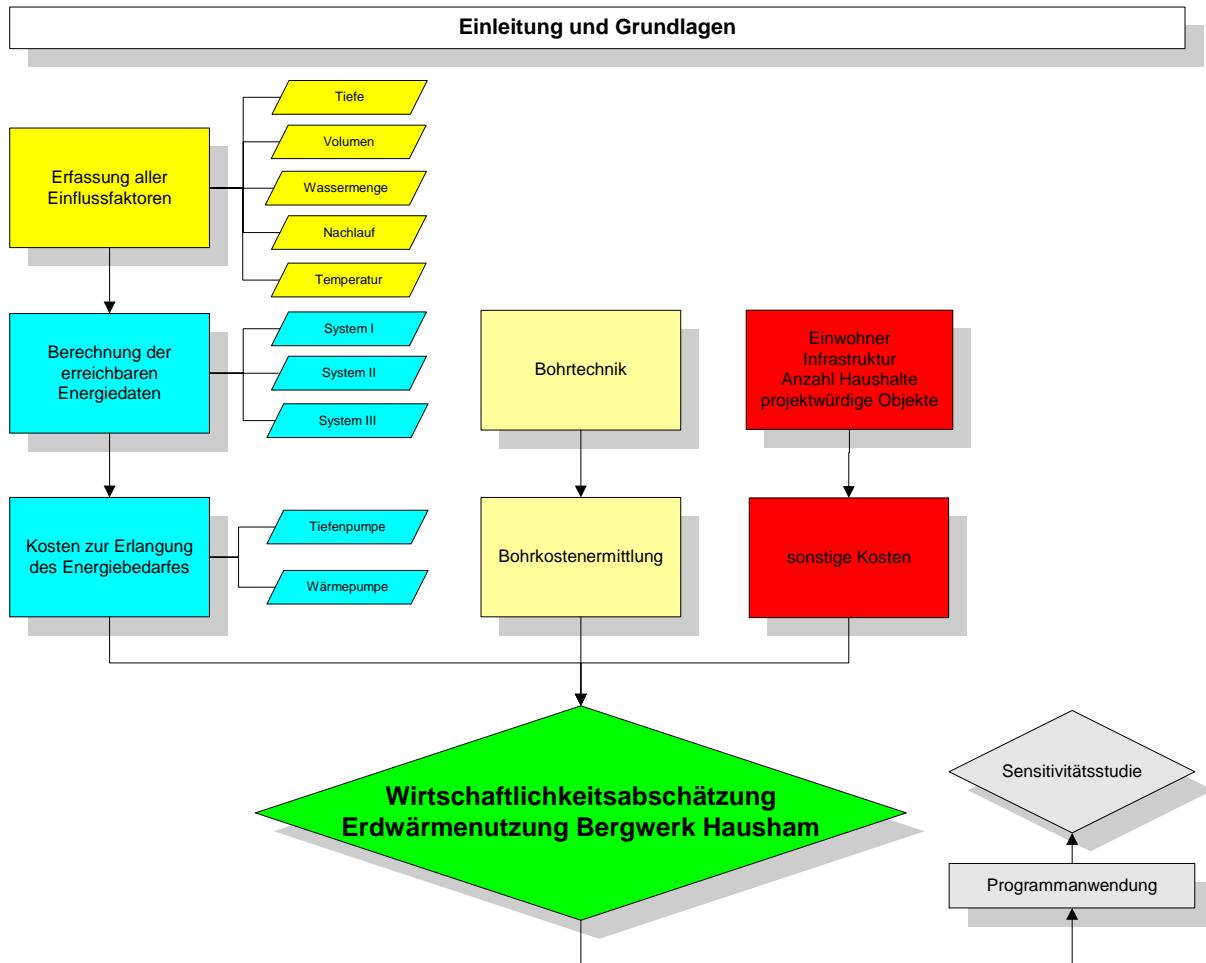


Abbildung 1.1: Flussdiagramm zur Aufgabenstellung

Für die Berechnung der Energien wird die Microsoft® Office Anwendung Excel™, Version 2002 verwendet. Die Stoffwerte des verwendeten Kältemittels R134a, werden einer digitalen Stoffwertbibliothek entnommen, die als Add-In in die Office Anwendung Excel™ eingepflegt wurde. Der Ermittlung von Kosten liegen, soweit nicht anders vermerkt, Angebote von ausführenden Firmen oder Herstellern aus dem Jahre 2007 zugrunde.

2 Geothermie

2.1 Definition von Geothermie

Als Geothermie oder auch Erdwärme bezeichnet man die in der Erdkruste gespeicherte Wärme [2]. Die Schicht der Erdkruste reicht bis in circa 40 Kilometer Tiefe¹ und macht in etwa 6 Prozent der Erdmächtigkeit aus. Von der Erdoberfläche bis zur Grenze des Oberen Mantels nimmt die Temperatur pro 1000 Meter um 30°C zu. Diese Temperaturzunahme bezeichnet man als Temperaturgradient oder auch geothermischer Temperaturgradient. Abweichungen von einem Temperaturgradienten von 3 bezeichnet man als Anomalie² [3]. Diese Anomalien sind insbesondere durch die Geologie des jeweiligen Ortes bestimmt.

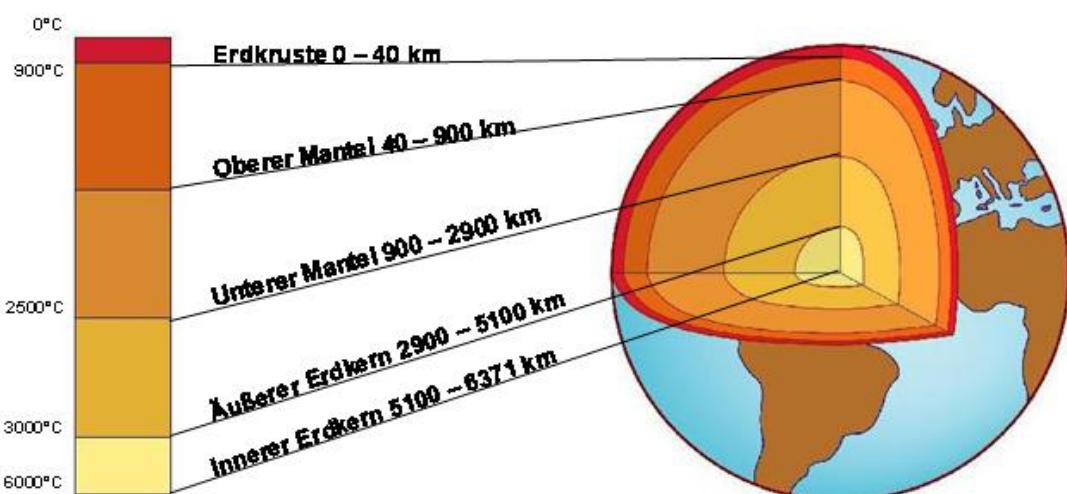


Abbildung 2.1: Aufteilung der Erdschichten

¹ Vgl:

² Anomalie:

Abbildung 2.1

(griech.: Unebenheit, Unregelmäßigkeit)

2.2 Ursprung von Geothermie

Der Ursprung von Erdwärme lässt sich im Wesentlichen auf zwei Gegebenheiten zurückführen. Zum einen ist der Grund für die heutige Erscheinung der Erdwärme in der Entstehungsgeschichte der Erde zu finden, zum anderen entsteht durch die fortwährenden radioaktiven Zerfälle langlebiger Isotope Wärme. Diese Wärme macht den Großteil der vorhandenen Erdwärme aus [2, 3, 4].

Die prozentuale Aufteilung der Herkunft der gespeicherten Energie zeigt die Abbildung 2.2.

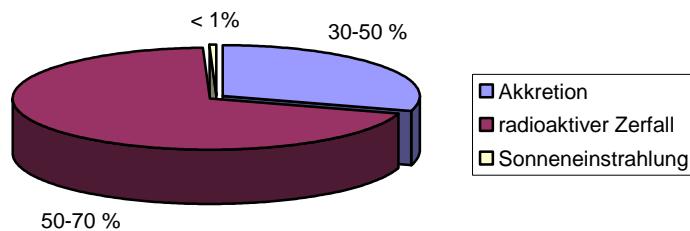


Abbildung 2.2: Herkunft der gespeicherten Erdwärme

2.2.1 Erdentstehung (Akkretion³)

Vor zirka 4,5 Milliarden Jahren entstand durch die Akkretion von Materie die Erde. Dabei wurde durch die Gravitations- und Adhäsionskräfte Materie auf einer ellipsenförmigen Umlaufbahn konzentriert und angelagert. Damit verbunden wurde thermische Energie von mehreren Millionen Grad Celsius umgesetzt, die jedoch aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Gesteine nicht oder nur geringfügig in den Weltraum abgegeben werden konnte [4].

Somit kann diese Wärme heute als Restwärme der Erdentstehung bezeichnet werden und macht in etwa 30 bis 50 Prozent der Erdwärme aus [4].

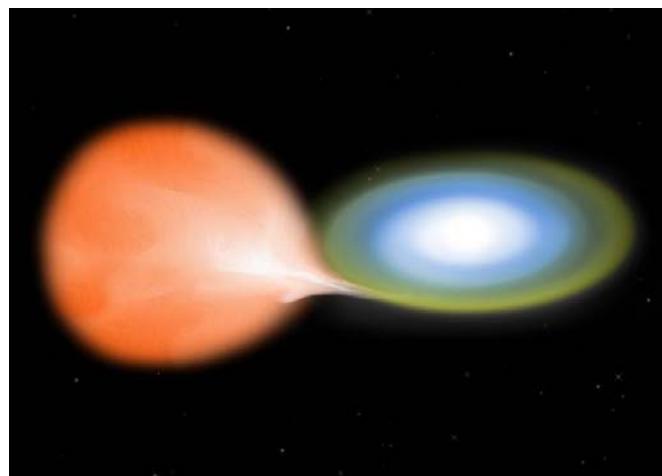


Abbildung 2.3: Illustration einer Akkretionsscheibe [6]

In Abbildung 2.3 wird eine Akkretionsscheibe um ein schwarzes Loch dargestellt. Schwarze Löcher sind neben gewöhnlichen Sternen, weißen Zwergen und anderen astronomischen Objekten aufsammelnde Zentralobjekte von Materie [7].

Gase und Materie werden durch die immer schneller werdenden Rotationskräfte um das schwarze Loch in einer Art Scheibe dargestellt und es entsteht aufgrund der hohen Reibungskräfte eine hohe Temperatur.

Auf ähnliche Weise entstanden ist, nach dem Zusammenbruch eines Sonnennebels und der anschließenden Ansammlung von Materie, unser Sonnensystem und damit verbunden auch die Erde [6 7].

³ Akkretion: (lat.: accretion = Zunahme) bedeutet Wachstum durch Anlagerung; Astronomie: Anwachsen eines astronomischen Objektes – hier: Anlagerung von Materie durch Gravitations- und Bindungskräfte

2.2.2 Radioaktive Zerfallsreihen

Der größte Anteil der in der Erdkruste gespeicherten Wärmemenge ist aus den radioaktiven Zerfallsprozessen der Vergangenheit entstanden. Auch heute kommt es durch natürliche Zerfallsreihen der langlebigen radioaktiven Isotope wie z.B. Uran (U_{235} , U_{238}), Thorium (Th_{232}) und Kalium (K_{40}) zur Freisetzung von Wärme. Diese Isotope sind zumeist in sauren Gesteinen (Granit) anzufinden [4].

2.2.3 Wärmeeinstrahlung

Oberflächennah kommt es durch die Sonneneinstrahlung zur Aufwärmung der Erde. Diese Aufwärmung ist jedoch zu vernachlässigen, da bereits ab einer Tiefe von 10 bis 20 Metern jahreszeitlich und durch Sonneneinstrahlung bedingte Temperaturschwankungen nicht mehr vorkommen, wie Abbildung 2.4 darstellt [8, 9].

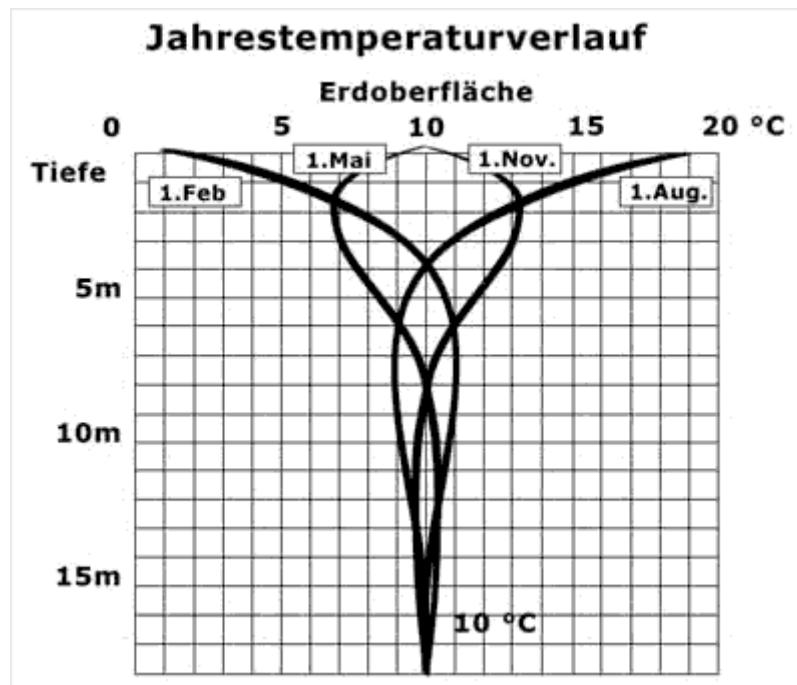


Abbildung 2.4: Oberflächennaher Jahrestemperaturverlauf [9]

2.3 Nutzung von Geothermie

Bereits seit mehr als 10.000 Jahren wird Erdwärme durch den Menschen und seine Vorfahren genutzt. Geothermische Wasserquellen wurden vermutlich schon früh zum Kochen, Baden und Heizen verwendet. So ist zum Beispiel belegt, dass bereits die Bäder des Römischen Reiches mit Thermalquellen versorgt wurden und bis in das 14. Jahrhundert lässt sich das erste Fernwärmennetz zurückverfolgen, welches im Zentrum Frankreichs in Chaudes-Aigues⁴ installiert war [3, 4, 8].

Abbildung 2.5 stellt die Einteilung von Geothermie nach der Tiefe und seiner Nutzung dar, wobei bei letzterer grundsätzlich unterschieden werden muss zwischen bodennaher und tiefer Erdwärmennutzung. Die tiefe Erdwärmennutzung unterteilt sich wiederum in Hoch- und Niedrigenthalpie-Lagerstätten⁵ mit den entsprechenden Vorkommensarten geothermischer Nutzung [3, 8].

Heutige Verfahren der Geothermie beschränken sich jedoch nicht mehr nur auf die Nutzung natürlich hervortretender Quellen, wie das Verfahren „HDR“ in Kapitel 2.3.4 aufzeigt.

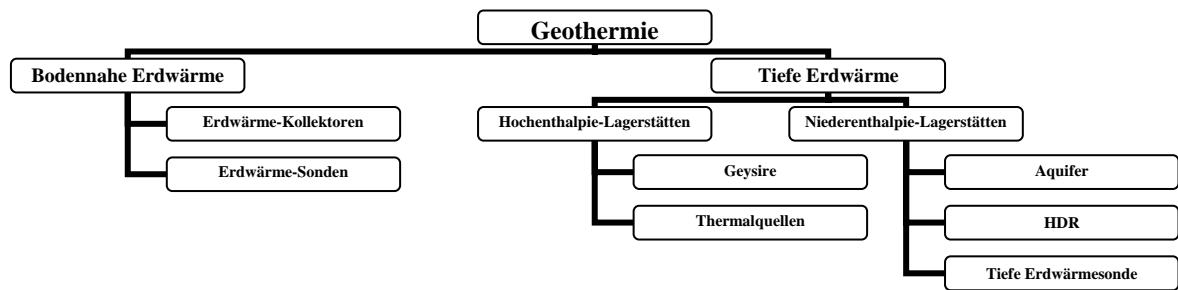


Abbildung 2.5: Einteilung der Geothermie nach der Tiefe und Nutzung

⁴ Chaudes-Aigues: Kanton und Ort in der Region Auvergne/Zentralfrankreich; 450 km südlich Paris

⁵ Enthalpie: Maß für die Energie eines thermodynamischen Systems (Einheit: h, H $\left[\frac{kJ}{kg} \right]$); hier bezeichnet die Enthalpie das Maß für die vorherrschende Temperaturbereitstellung

2.3.1 Erdsonden / Erdkollektoren

Als Erdsonden werden Erdreich-Wärmetauscher bezeichnet. Mittels einer in das Erdreich eingebrachten Rohrkonstruktion (meist U-Rohr) und einer Wärmeträgerflüssigkeit, lässt sich Energie zum Heizen und als Warmwasser für Haushalte gewinnen. Diese Erdsonden finden Anwendung in Tiefen von 30 bis 300 Metern. Anders als die Erdsonden werden Erdkollektoren nicht in die Tiefe, sondern flächendeckend nur wenige Meter unter der Erde verlegt. Hier ist es die große Fläche die die Energie für die Heizung oder das Warmwasser liefert [11].

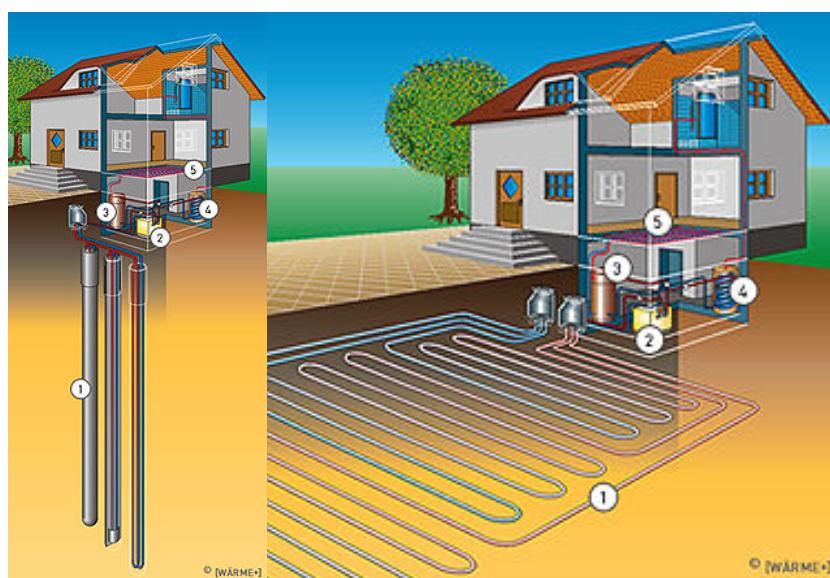


Abbildung 2.6: Vergleich Erdsonde (li) und Erdkollektor (re) [11]

In Abbildung 2.6 wird die Verwendung einer Erdsonde und eines Erdkollektors für die bodennahe Erdwärmemenutzung dargestellt.

2.3.2 Aquifer

Als ein Aquifer oder auch Wasserleiter ist die Gesteinsschicht zu bezeichnen, die sich als Leitung für Grundwasser eignet. In Tiefen von 200 bis 4000 Metern ist das Wasser ähnlich wie bei Thermalquellen aufgeheizt und kann über eine Förderbohrung zu Tage gepumpt und über einen Wärmetauscher zur Heizung von Wohnhäusern und zur Warmwasserversorgung genutzt werden. Auch ist je nach Wärmemenge eine Nutzung zu Stromproduktion möglich, zumal neuartige Turbinen auch geringere Temperaturen zulassen [12, 13]. Das Wasser wird nach der Wärmeabnahme mittels einer Injektionsbohrung dem Aquifer wieder zugeführt.

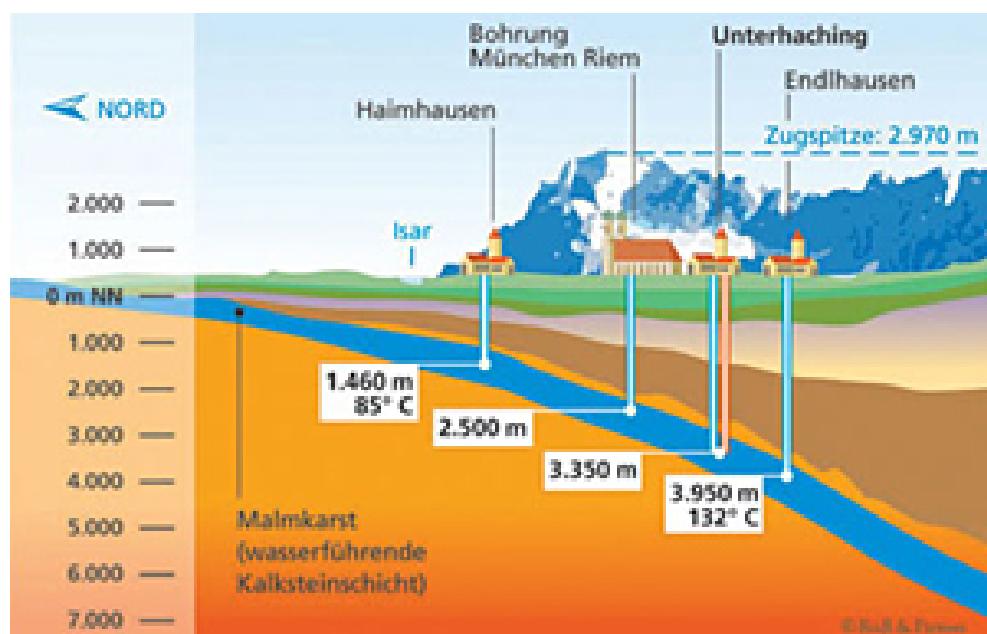


Abbildung 2.7: Darstellung Aquifer im Voralpenland [14]

Exemplarisch für einen Aquifer wird in Abbildung 2.7 schematisch die wasserführende Schicht im oberbayerischen Voralpenland gezeigt. Dieser Aquifer wird derzeit bereits geothermisch ausgenutzt. So wird in Unterhaching nahe München ein Nahwärmenetz ausgebaut und zusätzlich eine Kalina-Anlage zur Stromproduktion installiert. Beide Anlagen werden mit Thermalwasser aus dem Malmkarst⁶ gespeist [14].

⁶ Malmkarst: Bezeichnung für die zerklüftete Kalksteinschicht im Voralpenland

2.3.3 Thermalquellen / Geysire⁷

Geothermische Anomalien in der Erdkruste sind die Ursache für Thermalquellen und Geysire. Abweichend von der in Kapitel 2.1 beschriebenen Tatsache, dass pro 1000 Meter die Erdtemperatur um 30°C zunimmt, findet sich bei Thermalquellen und Geysiren eine große Wärmequelle innerhalb der Erdkruste wieder. Diese großen Wärmequellen sind zumeist vulkanischem Ursprung. Junge Vulkanität oder auch aktive Vulkane in Verbindung mit einem ausreichenden Zufluss von Wasser lassen bereits seit frühester Menschheit die Nutzung von Erdwärme zu [15].

Heutzutage wird diese Wärmequelle genutzt als:

- Fernwärme (Heizung / Warmwasser)
- Thermalbäder
- Prozesswärme in der Industrie



Abbildung 2.8: Geysire auf Island [16]

⁷ Geysir: (isländisch geysan = wirbeln, strömen) Als Geysir bezeichnet man eine heiße Quelle aus der regelmäßig oder unregelmäßig Dampf oder heißes Wasser in Fontänen herausschießt.

Wie ein eruptiver Geysir heißes Wasser als Fontäne ausstößt, verdeutlicht die Abbildung 2.8. Aus einem Grundwasserleiter beispielsweise fließt unterirdisch Wasser über ein heißes Gestein oder Magma und verdampft. Der Wasserdampf steigt in einem Eruptionskanal auf und kondensiert zum Teil. Abhängig von der lichten Weite des Kanals und seiner Länge baut sich eine mehr oder minder starke Wassersäule auf.

In dieser Wassersäule steigen bei Erreichen des Siedepunktes Gasblässchen nach oben und verdrängen die Wassersäule aufwärts treibend. Durch das Hinaufsteigen der Dampfblasen entsteht ein Druckabfall und überhitztes Wasser wird schlagartig in Dampf umgewandelt. Dabei wird Wasser und Wasserdampf an der Erdoberfläche herausgeschleudert. Dieser Vorgang wiederholt sich je nach Geysir spontan oder in regelmäßigen Abständen [15].

2.3.4 Hot-Dry-Rock (HDR)

Beim Hot-Dry-Rock Verfahren wird in eine Tiefe von 4000 bis 5000 Meter gebohrt. Über einen Zulauf wird in die ca. 200°C heiße Felszone unter hohem Druck mit bis zu 150 bar Wasser gepumpt. Dadurch bricht das Gestein auf, die Durchlässigkeit und somit die Oberfläche werden vergrößert, das Wasser verdampft und kann über ein weiteres Bohrloch Übertage geführt werden. Mit diesem Wasserdampf lässt sich dann Strom oder Fernwärme produzieren [17]. Das Prinzip einer Hot-Dry-Rock Anlage wird schematisch in Abbildung 2.9 dargestellt.

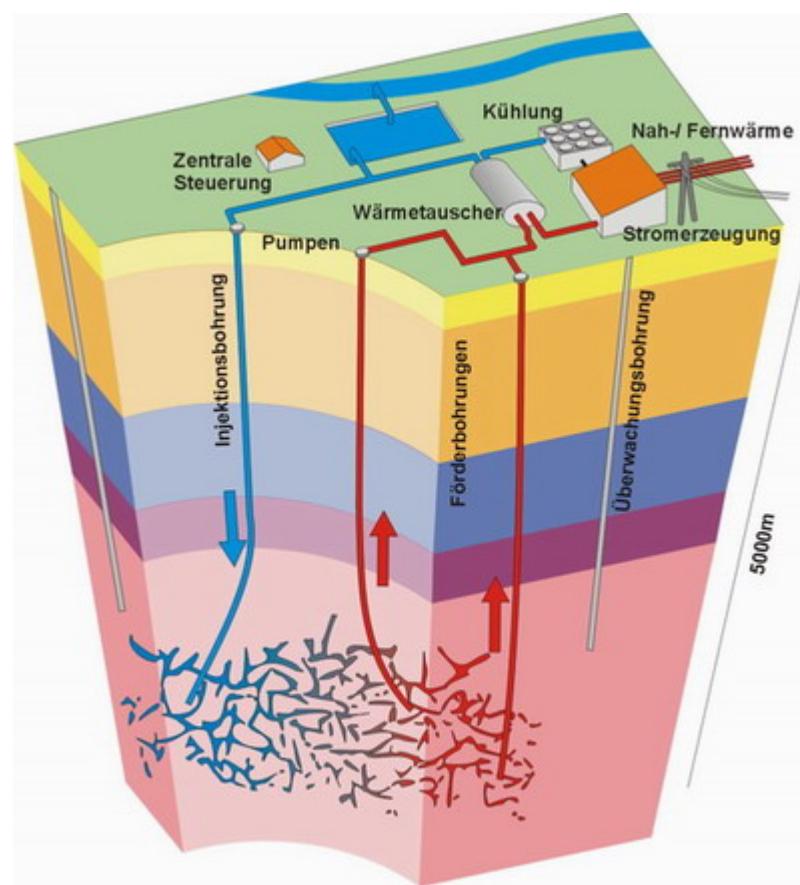


Abbildung 2.9: Funktionsprinzip des Hot-Dry-Rock-Verfahrens [18]

Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Gesteins und des somit verbundenen geringen Wärmenachflusses, die Wärmeerzeugung nur periodisch, das heißt einige Jahre, nutzbar ist. Danach muss das Kraftwerk u.U. versetzt werden.

3 Bergbau

3.1 Definition von Bergbau

Als Bergbau bezeichnet man den Abbau und die Gewinnung von Rohstoffen mineralischen Ursprungs aus der Erdkruste. Man unterscheidet dabei grundsätzlich drei Arten von Bergbau:

- Übertagebergbau
- Untertagebergbau
- Bohrlochbergbau

Techniken des modernen Bergbaus werden zudem im Bereich des Tiefbaus eingesetzt, beispielsweise beim Bau von Tunneln im Straßen- und Verkehrsnetzausbau [19].

3.1.1 Übertagebergbau

Beim Übertagebergbau oder auch Tagebau, wird der Rohstoff in offenen Gruben abgebaut. Beispielhaft für den Übertagebergbau sind der Torfstich, Sand- und Kiesgruben oder der Braunkohletagebau. Aber auch Diamanten oder Kupfer werden im Tagebau gefördert. In Deutschland sind für den Übertagebergbau die Abbaufelder Garzweiler I und II im Raum Jüchen bei Aachen am bekanntesten.



Abbildung 3.1: Braunkohleabbau im Tagebau – Garzweiler I [20]

3.1.2 Untertagebergbau

Beim Untertagebergbau werden durch das Graben von Schächten und Stollen Rohstofflagerstätten freigelegt und systematisch abgebaut. So gefördert werden unter anderem Kohle und Erz, aber auch zum Beispiel Salz oder Gold. Die Abbildung 3.3 zeigt einen schematischen Querschnitt durch ein Bergwerk, beispielsweise zur Kohleförderung.

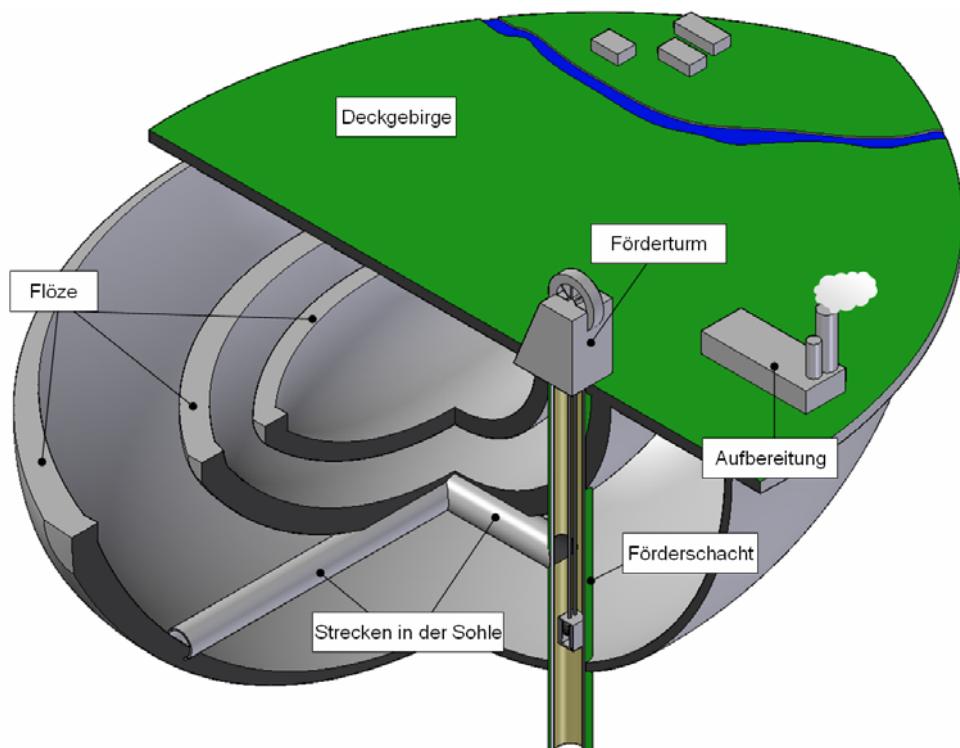


Abbildung 3.2: schematische Querschnittsdarstellung eines untertägigen Bergwerkes

Als Flöze bezeichnet man dabei die Schichten, in denen Rohstoffe zu finden sind, die Dicke der Schicht als Mächtigkeit. Als Sohle bezeichnet man eine Ebene in der Tiefe. Dabei kann eine Sohle in der ein Rohstoff abgebaut wird, mehrere Flöze „schneiden“. Von der Hauptstrecke einer Sohle ausgehend, wird der Rohstoff entlang der Flöze in Querschlägen und Bremsen abgebaut. Da die Form der Flözlage stark an eine Schüssel oder Mulde erinnert, tragen die Namen von abbaufähigen Lagerstätten oftmals den Beinamen zur oberirdischen Ortschaft „Mulde“, wie zum Beispiel die „Haushamer Mulde“, die „Murnauer Mulde“ und „Peißenberger Mulde“.

3.1.3 Bohrlochbergbau

Als Bohrlochbergbau bezeichnet man die Förderung von Rohstoffen durch ein Übertrage in die Tiefe gebohrtes Loch. Mit diesem Verfahren werden Rohstoffe, wie Erdöl und Erdgas, sowohl zu Lande, als auch im Wasser (Erdgas-/Erdölplattform) gefördert. Aus den Erfahrungen der Erdgas und Erdölförderung heraus, wird der Bohrlochbergbau auch zur Förderung von Wasser für Geothermieprojekte eingesetzt.

3.2 Bergbau in Deutschland

In Deutschland ist der Bergbau erstmals im 10. Jahrhundert schriftlich bezeugt. Während des Mittelalters wurden auch die ersten Bergbauordnungen und Bergbaugesetzte schriftlich festgehalten. Vor allem Erze wie Kupfer und Silber, aber auch Eisen wurden zu dieser Zeit gefördert. Später kamen Rohstoffe wie Steinkohle, Braunkohle, Salze, Erdöl und Erdgas hinzu [19].

In vielen Regionen Deutschlands entwickelten sich über die Jahrhunderte Zentren des Bergbaus. Als solches wohl bekanntestes ist das Ruhrgebiet, umgangssprachlich auch der „Kohlenpott“, zu nennen. Nachdem in vielen Regionen die Lagerstätten ausgeschöpft oder eine wirtschaftliche Förderung der Rohstoffe nicht mehr gegeben waren, mussten viele Bergwerke und Förderstätten schließen [19]. Verblieben sind bis heute das Ruhrgebiet mit seinen Kohlebergwerken, der Braunkohletagebau in Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Niedersachsen, die Nordsee und der Raum Niedersachsen mit den Rohstoffen Erdöl und Erdgas und der Steinsalzabbau im Raum Magdeburg.

3.3 Bergbau und Geothermie

Der Bergbau und der Bereich der Geothermie hat in den letzten Jahren seine Verbindung gefunden. Auf der Suche nach neuen Energien und vor allem erneuerbaren Energien, ist man auf die Nutzung vorhandener, stillgelegter Bergwerke als potentielle Energiequellen gestoßen.

Je nach geografischer Lage und Tiefe der stillgelegten Bergwerke, ist die Nutzung von sogenannten Formationswässern als Wärmeträger möglich. Als Formationswässer bezeichnet man die Ansammlung und Speicherung von Wasser in Gesteinsporen. Ausgetretene und angesammelte Formationswässer in der Tiefe werden als Lagerstättenwässer bezeichnet. Aufgrund der geothermischen Tiefenstufe und dem damit verbundenen Temperaturgradienten, erwärmt sich das Wasser. Je nach Tiefe erreicht das Wasser Temperaturen von 30°C bis 120°C.

Vorteilhaft für die Nutzung der Bergwerke ist, dass vorhandene Wetterbohrungen, Schächte und Versorgungsbohrungen oftmals noch intakt sind und somit kostensparend genutzt werden könnten.

Neben der Nutzung alter Bergwerke sind auch Bauwerke neuerer Art interessant für die Geothermie. So werden im Bereich des Schweizer Gotthart-Tunnels Forschungen zur Nutzung von Tunnelwässern betrieben [21]. Die Möglichkeit der Gewinnung eines Energieträgers aus Tunneln findet jedoch keine weitere Betrachtung und soll an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

3.3.1 Projekt Minewater

Das Projekt *Minewater* ist Teil des INTERREG III B Programm der Europäischen Union. Ziel des Projektes ist es, langfristig Lagerstättenwässer und Formationswässer aus Bergwerken zur Energiegewinnung bzw. für die Einsparung von Energie zu nutzen. Abbildung 3.3 zeigt die ursprünglichen Partner im INTERREG III B NWE Programm, von denen inzwischen die Pilotprojekte in Großbritannien (Midlothian) und Deutschland (Bönen) eingestellt worden sind. [23, 29]

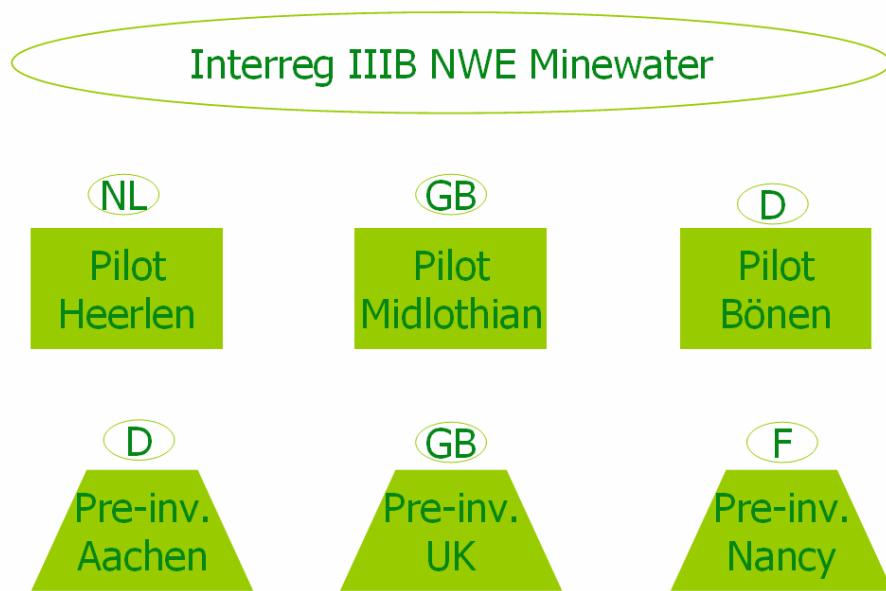
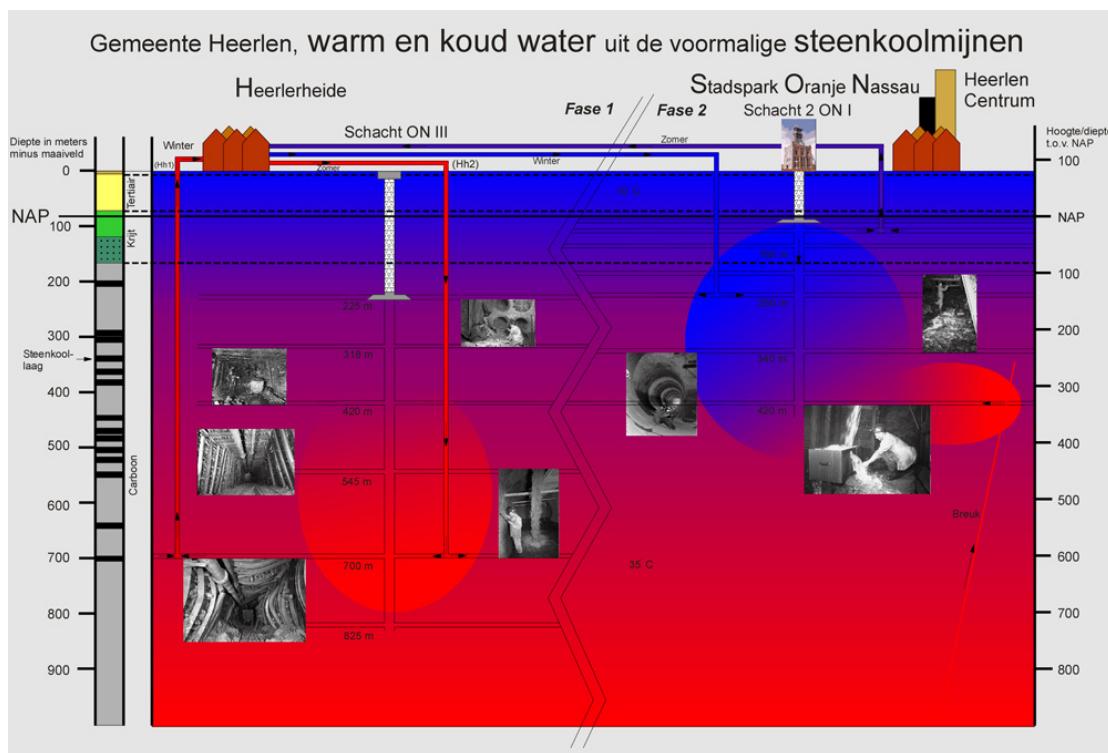


Abbildung 3.3: Partner des INTERREG III B Programm [29]

In Heerlen / Niederlande wurden hierzu insgesamt fünf Bohrungen abgeteuft¹. Dabei handelt es sich um zwei Bohrungen bis in 700 Meter im ersten Abschnitt, sowie 2 Bohrungen auf 250 Meter und eine weitere auf 400 Meter. Die Bohrungen sind neben der Förderung von Warmwasser (700m), für die Förderung von kaltem Wasser (250m) und zur Reinjektion (400m) vorgesehen. Einen Überblick über die Bohrungen beziehungsweise die geplante Verwendung ist aus Abbildung 3.4 zu entnehmen [22, 29].



**Abbildung 3.4: Übersicht über die verschiedenen Verwendungen von Minenwasser
Minewater Project, Heerlen/NL [29]**

Das *Minewater Project* in Midlothian wurde eingestellt, da bei den geförderten Wässern eine starke Kontaminierung festgestellt wurde. Zur weiteren Nutzung hätten diese kostenintensiv gereinigt werden müssen. Man entschloss sich jedoch weiterhin in enger Zusammenarbeit mit den Projektleitern in Heerlen zu verbleiben und den dortigen Verlauf als Pilotprojekt weiter zu fördern [23].

¹ Abteufen: bermännischer Ausdruck für das Herstellen eines seigeren Grubenbaus wie Schacht, Blindschacht, Bohrloch oder Bunker durch z.B. Sprengen oder Bohren (Großbohrlöcher)

In Bönen war es aus finanziellen Gründen nicht möglich, das Projekt weiter zu forcieren, so dass auch hier die energetische Ausnutzung des Grubenwassers vorerst nicht stattfindet.

Das *Minewater Project* in Heerlen wird mit 48 % der Gesamtinvestitionen durch das Programm der Europäischen Union gefördert. Neben der Versorgung von Haushalten und Gewerbe mit Wärme, soll auch die Möglichkeit der Kühlung von Gebäuden gegeben werden. Damit wird das Wasser aus der ehemaligen Grube in zweierlei Hinsicht umweltfreundlich und ressourcenschonend genutzt.

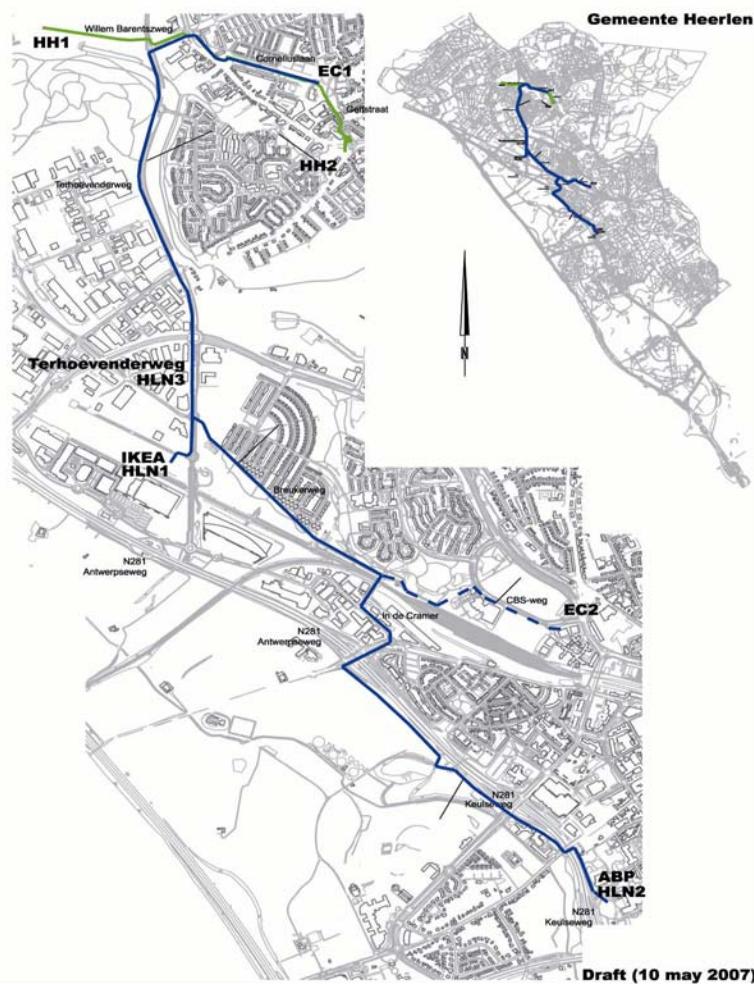


Abbildung 3.5: geplanter Ausbau des Wärme-/Kältenetzes in Heerlen [29]

Aufgrund der Ähnlichkeit der Kohlenbergwerke Hausham und Heerlen wurden die Daten aus dem laufenden *Minewater Project* in Heerlen in Teilen für die Betrachtung des Pechkohlebergwerkes Hausham herangezogen.

3.4 Bergwerk Hausham

Der Ort Hausham ist ein oberbayerischer Ort mit ca. 8500 Einwohnern. In südlicher Richtung ist die Entfernung zum Schliersee mit drei Kilometern gegeben und in nordwestlicher Richtung liegt in etwa 50 Kilometer Entfernung die Stadt München. Geprägt wurde Hausham durch den in der Region im 19. Jahrhundert expandierenden Kohlebergbau.

Das Bergwerk Hausham ist, in der Haushamer Mulde angelegt, geographisch mit seinen ehemaligen Förder- und Betriebsstätten im Kern des Ortes Hausham angesiedelt. Es wurde von 1860 bis 1966 betrieben und war eines von zahlreichen Kohlebergwerken im Bereich des süddeutschen Molassebeckens².

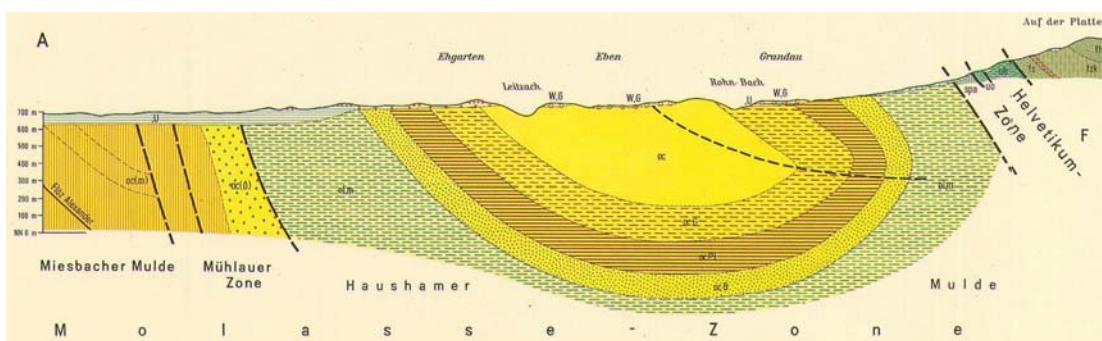


Abbildung 3.6: Geologischer Querschnitt der Haushamer Mulde [24]

Abgebaut wurde Pechkohle, eine im üblichen Sprachgebrauch Glanzkohle bezeichnete Hartbraunkohle mit einem Heizwert von ca. 5500 kcal/kg³. Gegenüber der einfachen Braunkohle handelt es sich also um eine Braunkohle, die in ihrer Entstehung nochmals „frittiert“ wurde. Dies kann auf die Möglichkeit einer positiven Temperaturanomalie im Bereich der Haushamer Mulde in der zu betrachtenden Tiefe hindeuten.

Die Stilllegung der Förderstätten in Oberbayern Mitte der 60'er und 70'er Jahre des letzten Jahrhunderts erfolgte aus rein wirtschaftlichen Aspekten. Obwohl die Lagerstätten der Kohle längst nicht ausgeschöpft waren, war eine Förderung aus zwei Hauptgründen nicht mehr rentabel.

² Molasse: romanischer Herkunft, vermutlich von molare = mahlen;

als Molasse bezeichnet man das Abtragungsmaterial (Sediment) eines Gebirges

³ vgl: Braunkohle 2000 kcal/kg und Steinkohle 7000 kcal/kg

Zum einen war die Pechkohle gegenüber Heizöl nicht mehr konkurrenzfähig und zum anderen waren die Vorkommen nur von geringer Mächtigkeit⁴, was eine wirtschaftliche Förderung erschwerte [25].



Abbildung 3.7: Klenzeschacht (li.) und Aufbereitung um 1960 (Ansicht von Norden) [26]

Heute ist vom ehemaligen Bergwerk Hausham lediglich der Förderturm des Klenze-Schachtes [siehe Abbildung 3.7] verblieben. Alle Schächte wurden verfüllt und zuvor im Bereich der Zugänge zu Strecken mit Mauern verbaut, währenddessen die alten Strecken Untertage bis auf das Niveau der Leitzach⁵ mit Grundwasser vollgelaufen sind. Noch heute fließt Wasser aus dem Bereich der Haushamer Mulde und des Bergwerkes in die Leitzach ab.

Die Geländeoberkante, nachfolgend abgekürzt mit GOK, von Hausham liegt auf einer Höhe von 765 Metern über dem Meeresspiegel.

⁴ Mächtigkeit: Mächtigkeit bezeichnet bergmännisch die Dicke einer geologischen Schicht gemessen in senkrechter Richtung zum Verlauf

⁵ Die Leitzach: 33,5 km langer Zufluss der Mangfall in den Bayerischen Voralpen

4 Erfassung Einflussfaktoren

Für die Berechnung der Prozessdaten und der anschließenden Wirtschaftlichkeitsabschätzung sind zunächst die in der Aufgabenstellung (siehe Kapitel 1) beschriebenen Einflussfaktoren zu erfassen, zu beschreiben und zu dokumentieren.

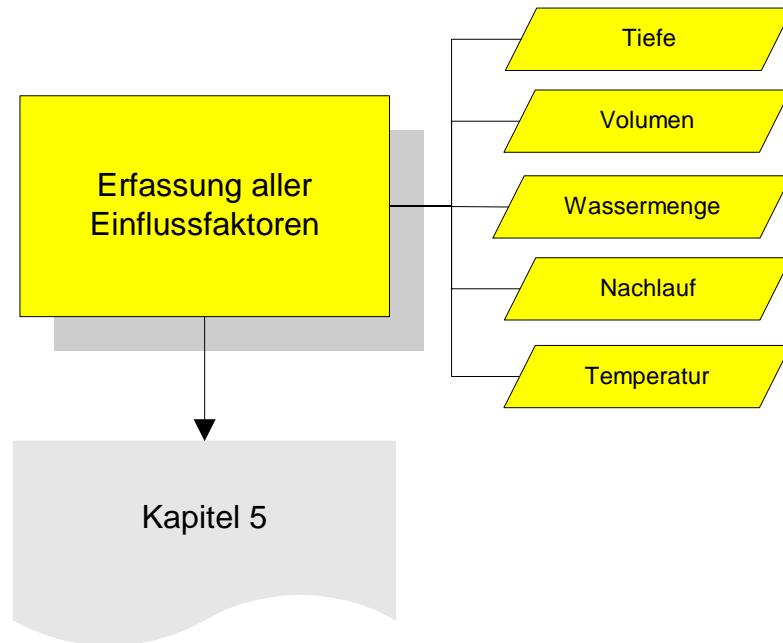


Abbildung 4.1: Gliederungsansicht Kapitel 4

Abbildung 4.1 zeigt die Gliederungsansicht dieses Kapitels und ist ein Auszug aus der Abbildung 1.1. Das Organigramm verdeutlicht, dass in diesem Kapitel die Ausgangsdaten für die späteren Berechnungen beschrieben werden.

Die Faktoren:

- Tiefe,
- Volumen,
- Wassermenge,
- Nachlauf und
- Temperatur

werden dabei maßgeblich durch die Lage des Bergwerkes sowohl geographisch als auch geologisch bestimmt.

4.1 Tiefe

Das Bergwerk Hausham erstreckt sich über mehrere vertikal angeordnete Sohlen. Diese wurden im Laufe der Jahre durch Abteufung der Förderschächte erreicht und erstrecken sich entlang der Flöze der Haushamer Mulde. Für die Berechnung einer möglichen wirtschaftlichen Nutzung des Bergwerkes wurde die 6. Sohle in Betracht genommen.

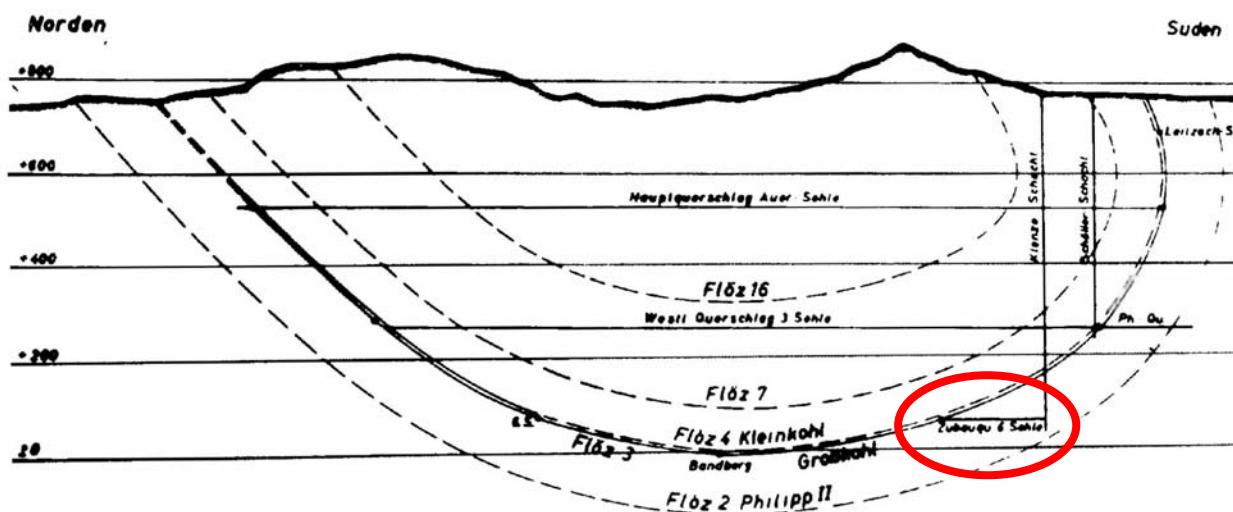


Abbildung 4.2: Querprofil der Haushamer Mulde [27]

In Abbildung 4.2 ist das Querprofil¹ der Haushamer Mulde dargestellt. Eingezeichnet sind zudem die bauwürdigen Flöze, sowie die beiden Schächte „Klenze-Schacht“ und „Schöller-Schacht“ mit den jeweiligen Querschlägen zu den Sohlen.

¹ vgl:

Gesamttrisswerk Bergwerk Hausham, Bergamt Südbayern (Archiv)

Risswerkdaten² [28]

Aufgrund der Auswertung vorhandener Risswerkaufzeichnungen konnte eine Abteufung des Klenze-Schachtes bis auf + 772,73 Meter zur 6. Sohle ermittelt werden. Von hier aus wurde ein Ausbauquerschlag bis zur eigentlichen Hauptstrecke in nördliche Richtung vorangetrieben. Entlang der Flöze 3 (Kleinkohl) und 4 (Großkohl) fand dann in westliche und östliche Richtung der Abbau der Kohle statt.

Abbildung 4.3 zeigt den Ausschnitt einer Schnittdarstellung des Risswerkes, dem folgende Angaben für die 6. Sohle entnommen wurden:

- GOK Klenze-Schacht +772,73 m
- Tiefster Punkt Hauptstrecke +59,5 m (Bereich Klenze-Schacht)
- Höchster Punkt +78,7 m (Bereich östliche Grenze)
- Ausdehnung vom Zubau Klenze-Schacht gesehen
 - Richtung Osten ~ 6250 m
 - Richtung Westen ~ 2000 m
- maximale Tiefe absolut 713 m
- minimale Tiefe absolut 694 m

² Risswerk: Als Risswerk bezeichnet man die kartographische Darstellung aller Schächte, Strecken, Stollen, Bremsberg etc.

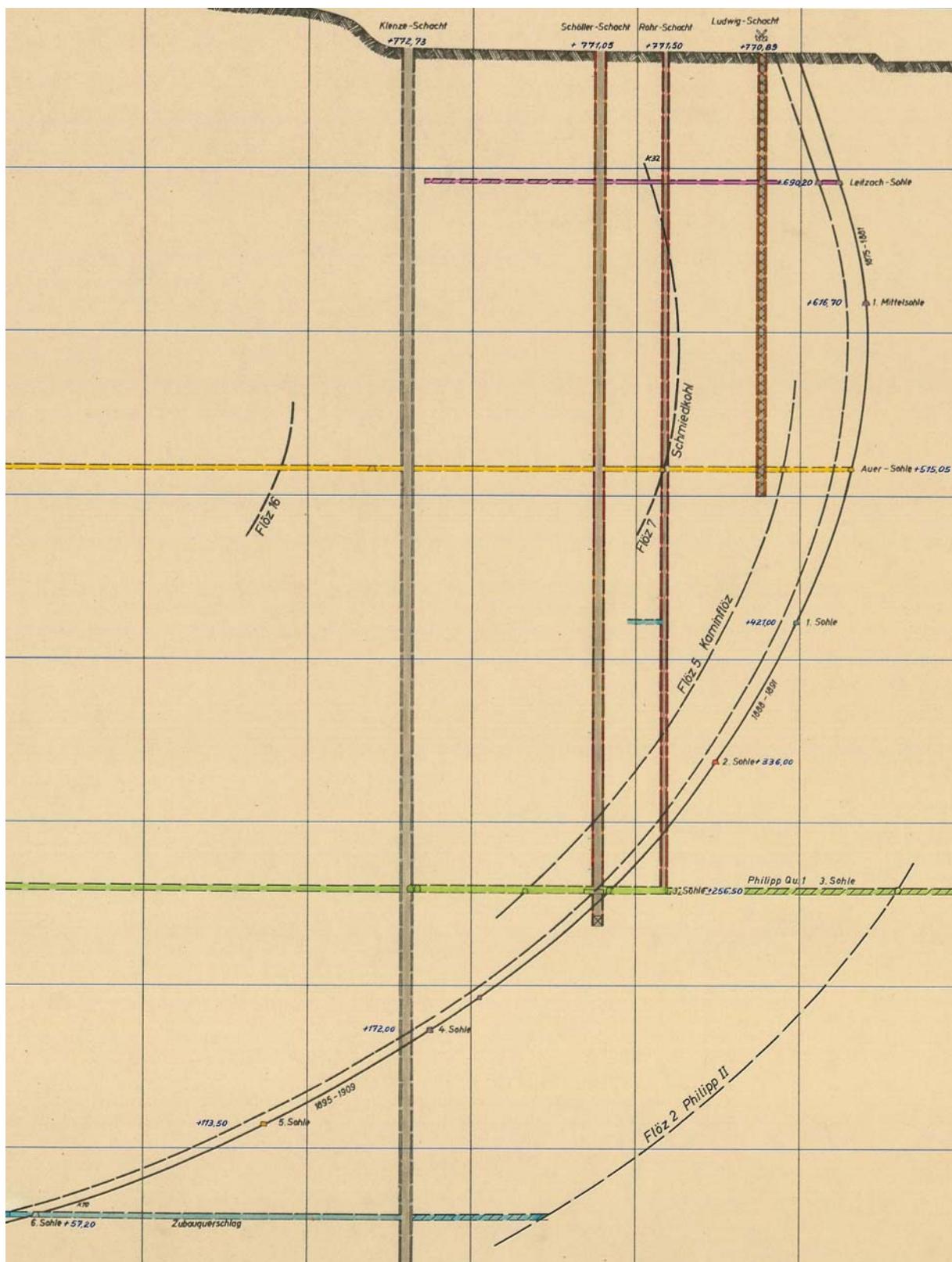


Abbildung 4.3: Schnittdarstellung (Ausschnitt) aus dem Bereich der Schächte [28]

4.2 Volumen

Das Volumen, welches für eine geothermische Nutzung Untertage zur Verfügung steht, kann nur ideal angenommen werden. Nach nunmehr über 40 Jahren Stillstand des Bergwerkes ist eine hundertprozentige Aussage über die Standhaftigkeit des Ausbaues³ nicht zu treffen. Daher kann lediglich vom Idealfall eines intakten Ausbaues ausgegangen werden.

4.2.1 Ausbau

Nach Aussagen ehemaliger Bergleute des Bergwerkes Hausham ist der Ausbau der Hauptstrecken mit einem Querschnitt von 7 bis 16 Quadratmeter erfolgt. Angenommen wurde für die in Frage kommende Strecke und den nachfolgenden Berechnungen daher ein mittlerer Querschnitt von 11,25 Quadratmeter. Des Weiteren wird nach Aussage von Zeitzeugen die Hauptstrecke der 6. Sohle als die am Besten ausgebauten Strecke Untertage benannt, wodurch für die Abschätzung auszugehen ist, dass diese noch weitestgehend intakt ist.



Abbildung 4.4: Beispiel für den Streckenausbau [27]

³ Ausbau: Als Ausbau bezeichnet man die verbauten Stützelemente zum Offthalten des bergmännischen Hohlraumes

4.2.2 Abschnitt / Strecke

Für die Wahl des Abschnittes zwischen Extraktionsbohrung und Reinjektionsbohrung wird die in 4.2.1 beschriebene Hauptstrecke der 6. Sohle vom Klenzeschacht in ostwärtige Ausdehnung in einer Länge von 3000 Metern betrachtet.

Für die Wahl der Förderbohrung oder auch Extraktionsbohrung genannt, wurde die als stabil zu vermutende 6. Sohle für die nachfolgenden Betrachtungen herangezogen.

Des Weiteren ergeben sich für die Wahl der Förderung und anschließenden Wieder-einspeisung verschiedene Modelle. Diese werden im Anschluss beschrieben, Vor- und Nachteile werden verglichen und es wird ein Entschluss für die Form der weiterzuverfolgenden Strategie getroffen und begründet. Eine Reinjektion des geförderten Thermalwassers hat zweierlei Bedeutungen. Zum einen würden bei einem Nichteinspeisen des genutzten Wassers in das Bergwerk, die Strecken mit der Zeit leergepumpt werden, da der natürliche Nachlauf geringer als die letztendliche Förderung sein wird⁴. Zum anderen ist es notwendig, das Wasser wieder zu reinjizieren, da hierdurch das untertägige Druckverhältnis nicht gestört werden würde. Die bestehende Systematik aus Wasserdruck und Gebirgsdruck hält das Bergwerk stabil und bis nach Übertage reichende Bergschäden können weitestgehend vermieden werden.

Es werden nun folgende Strategien diskutiert:

- 1-Bohrloch-Strategie
- 2-Bohrloch-Strategie
- 2+2-Ebenen-Bohrloch-Strategie

⁴ vgl: Abschnitt 4.3.2

1-Bohrloch-Strategie

Bei der 1-Bohrloch-Strategie wird mit nur einem Bohrloch bis zur 6. Sohle gearbeitet. Dabei kommt die aus dem Bereich der Verwendung von Erdsonden kommende U-Rohr-Technik zur Anwendung, wie in Abbildung 4.4 gezeigt wird.

Vorteile:

- + Verringerung der Bohrkosten durch Einsparung einer weiteren Bohrung
- + Gute Umweltverträglichkeit, da Thermalwasser nicht direkt genutzt wird

Nachteile:

- geringe Übertragungsfläche (Oberfläche U-Rohr)
- Verringerung der Energieausbeutung durch eine doppelten Wärmeübergang; die Wärme des Umgebungsgesteins wird auf das Medium innerhalb der Bohrung übertragen und anschließend erst durch die Wandung der Rohre auf das Medium im U-Rohr
- Geringe Wärmeübertragungsfläche allgemein
- Geringe Ausbeutung der Wärmequelle

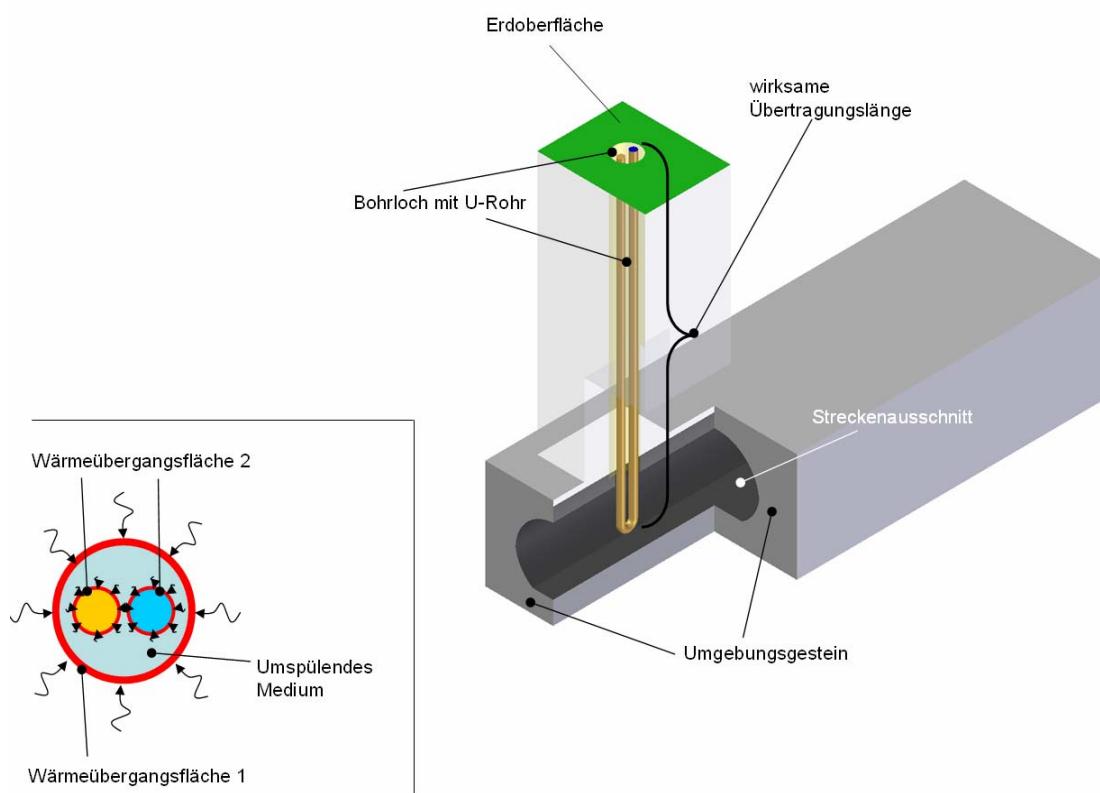


Abbildung 4.5.: schematische Darstellung der 1-Bohrloch-Strategie

2-Bohrloch-Strategie

Bei der 2-Bohrloch-Strategie werden zwei Bohrungen bis auf die 6.Sohle abgeteuft. Die eine Bohrung dient als Extraktionsbohrung und die zweite als Reinjektionsbohrung. Die Entfernung beider Bohrung beträgt die Entfernung der untertägigen Entnahmestrecke von 3000 Metern. Die Verbindung der Extraktionsbohrung und der Reinjektionsbohrung erfolgt Über Tage durch eine Rohrvernetzung. Hierbei handelt es sich um die klassische Variante der Geothermie-bohrungen und wird im Allgemeinen als Dublette bezeichnet.

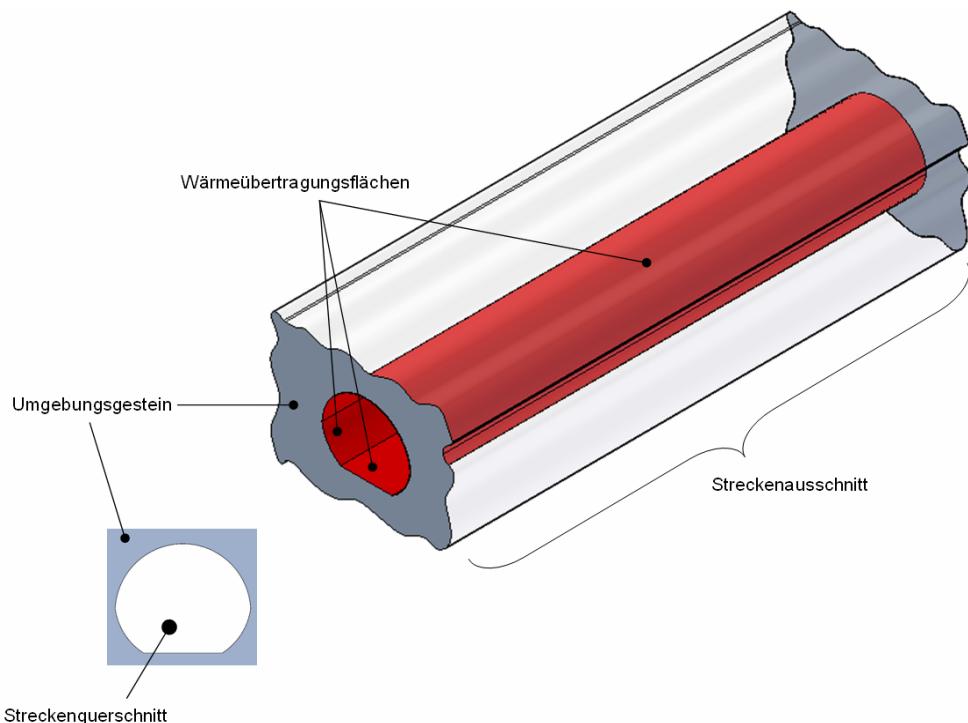


Abbildung 4.6: schematische Darstellung der Wärmeübertragungsfläche

Vorteile:

- + Hohe Wärmeübertragungsfläche,
- + Lange Übertragungsstrecke, dadurch
- + Hohe Durchlaufzeiten,
- + Gute Energieausbeute
- + Keine Volumenänderung, da genutztes Thermalwasser wieder eingespeist wird
- + Zustand der Entnahmestrecke als stabil anzunehmen, durch guten Ausbau

Nachteile:

- Thermalwasser wird direkt genutzt
- Bei hohen Fördermengen, rasches Fortschreiten der Abkühlungsfront

2+2-Ebenen-Bohrloch-Strategie

Auf zwei unterschiedlichen Ebenen wird je eine Bohrung abgeteuft. Die Bohrung zur 6. Sohle hin, dient als Extraktionsbohrung, während die zweite Bohrung zur 3. Sohle als Reinjektionsbohrung genutzt wird. Die Verbindung zwischen der 3. und 6. Sohle ist über sogenannte Bremsen und Gesenke aus der Zeit der Kohleförderung gegeben. Dadurch erhöht sich die Entnahmestrecke und somit die Aufwärmstrecke. Die Verbindungen von verschiedenen Sohlen bestehen an mehreren Stellen im Bergwerk. Sie entstanden beim Vorantreiben der Abbaugebiete Untertage.

Vorteile:

- + Hohe Wärmeübertragungsfläche,
- + Lange Übertragungsstrecke, dadurch
- + Hohe Durchlaufzeiten,
- + Gute Energieausbeute
- + Keine Volumenänderung, da genutztes Thermalwasser wieder eingespeist wird

Nachteile:

- Thermalwasser wird direkt genutzt,
- Zustand der Bremsen und Gesenke nicht abzuschätzen (Ausbau nicht wie bei Hauptstrecken) dadurch
- Genauer Verlauf des eingespeisten Wassers nicht vorhersehbar,
- Kosten für Bohrung im Vergleich mit 2-Bohrloch-Strategie nahezu gleich, daher kein direkter Vorteil der Kosten

Beispielhaft für eine Verbindung der 3. und 6. Sohle gibt die Grafik in Abbildung 4.7 wieder. Mit der Lage im Raum stellt sich der Ausschnitt aus dem Bereich der Verbindungen in einer 3-D-Vorstellung dar. Die seitliche Verschiebung der Bremsen und Gesenke beträgt in etwa 20-30 Meter. Die Höhenangaben der Sohlen beziehen sich auf die Null-Tiefe und nicht auf die Geländeoberkante, dass heißt die 6. Sohle liegt tiefer als die 3. Sohle.⁵

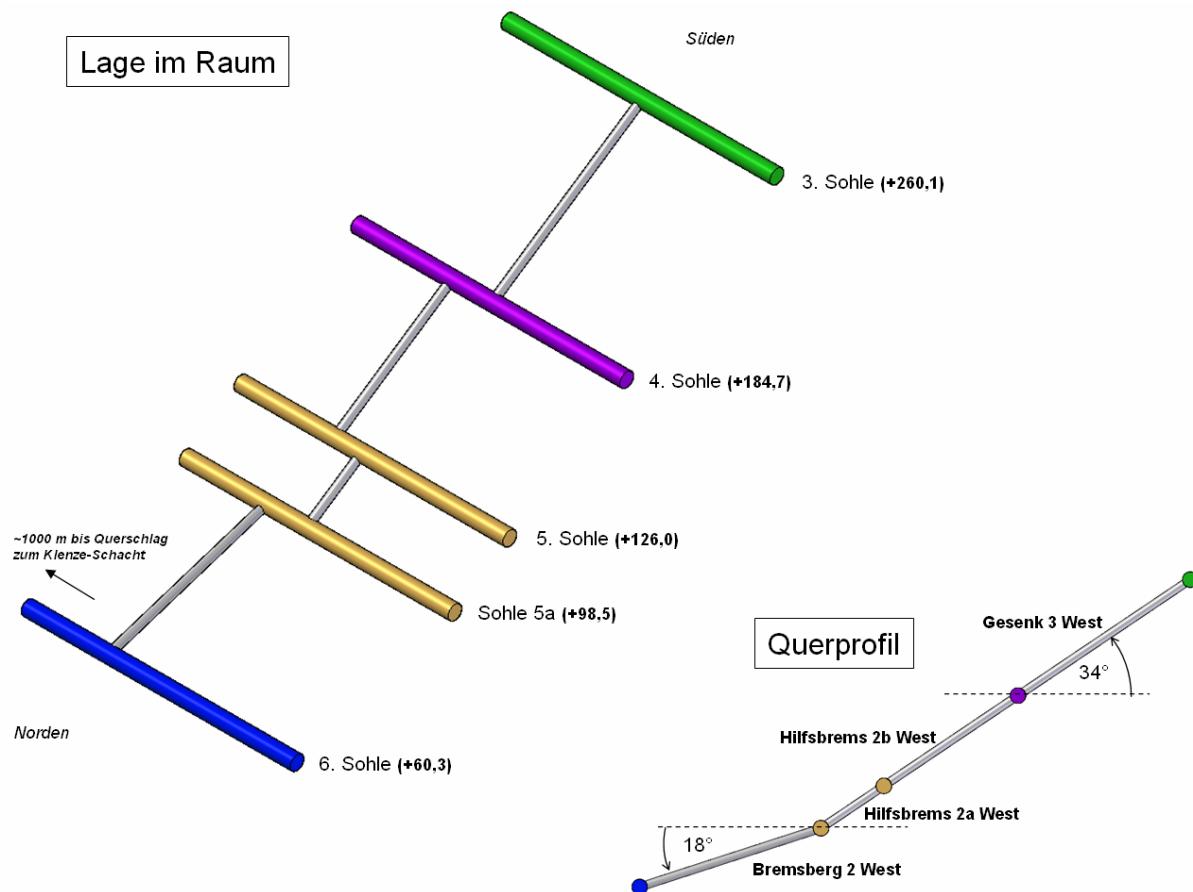


Abbildung 4.7: Verbindung der 3. und 6. Sohle über Gesenke und Bremsen im Flöz 3 – Großkohl

Die Daten für die Erstellung sind den Risswerkaufzeichnungen für diesen Bereich entnommen, welches in Abbildung 4.8 gezeigt wird.

⁵ vgl: Abbildung 4.3



Abbildung 4.8: Ausschnitt der Risswerkaufzeichnung aus dem Bereich Flöz 3 – Großkohl (Ansicht von oben) [28]

Zusammenfassung

Nachdem die drei Strategien in ihrer Aufbauart erklärt und die jeweiligen Vor- und Nachteile aufgezeigt sind, müssen diese nun vergleichend beurteilt werden. Der Entschluss für eine Strategie im Anschluss hieran wird maßgeblich sein für die weitere Vorgehensweise zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung.

Die 1-Bohrloch Variante kann gegenüber den beiden verbleibenden Strategien nur geringe Vorteile vorweisen. Diese sind jedoch nicht auf die Ausbeute bezogen, sondern beschreiben lediglich die Verringerung der Bohrkosten um die Hälfte. Die Nachteile hingegen überwiegen und ganz besonders ist die geringe Übertragungsfläche und somit geringe Energieausbeute Hauptmerkmal für den Ausschluss dieser Variante.

Die 2-Bohrloch-Strategie hat gegenüber den beiden anderen Modellen die geringsten Nachteile und überwiegt zudem bei den Vorteilen. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Wahrscheinlichkeit, auch nach über 40 Jahren noch ein weitestgehend intakte Strecke Untertage vorzufinden. Diese Aussage stützt sich auf die Beschreibung von Zeitzeugen, die aktiv am Ausbau der Strecken beteiligt waren.

Die 2+2-Ebenen-Bohrloch Variante erscheint im ersten Ansatz ebenso vorteilhaft wie das 2-Bohrloch Modell in einer Ebene. So verfügt diese Strategie über die identische Energieausbeute, den ebenfalls hohen Durchlaufzeiten und der großen Wärmeübertragungsstrecke. Negativ erscheint aber die Tatsache, dass die nur mäßig und zu ihrem Zweck ausreichend ausgebauten Bremsen und Gesenke in der Verbindung der 3. und 6. Sohle über die Zeit gesehen zusammengestürzt sein werden oder bereits zu Betriebszeiten des Bergwerkes verfüllt wurden. Aufzeichnungen, die dies belegen könnten sind nicht vorhanden. Da diese Verbindungen in einer Vielzahl errichtet worden sind, ist zwar nicht auszuschließen eine intakte Verbindung zu finden. Dies kann dazu führen, dass unter Umständen mehrere Bohrungen abgeteuft werden müssen um eine geeignete Verbindung zu finden. Die Tatsache hierüber steht in keinem Verhältnis zu dem letztendlichen Vorteil der höheren Übertragungsfläche.

Zusammenfassend ist daher zu entscheiden, dass einzig die klassische Variante der Entnahmebohrung und Reinjektionsbohrung in einer Ebene für ein derartiges Projekt in Frage kommt. Zudem sind die erreichbaren Energiedaten vergleichbar mit denen des zuletzt beschriebenen Modells, da erst bei Erreichen der Abkühlungsfront nahe der Extraktionsbohrung eine Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche bedeutsam werden würde. Die Erfahrung mit bereits bestehenden Geothermie-Projekten⁶ zeigt, dass selbst bei einem Erreichen der Abkühlungsfront an der Extraktionsbohrung die Auswirkungen gering sind.

4.2.3 Volumenberechnung

Bei der Berechnung der Untertage zur Verfügung stehenden Wassermenge wird lediglich der Bereich der 6. Sohle und dessen Hauptstrecke in Betracht genommen⁷.

Es ergeben sich für die Volumenberechnung der Hauptstrecke folgende Berechnungsgrundlagen:

- Länge der Entnahmestrecke

$$L : 3000 \text{ m}$$

- Mittlere Querschnittsfläche

$$A : 11,25 \text{ m}^2$$

Das zur Entnahme zur Verfügung stehende Volumen V_{Ent} berechnet sich somit:

$$\boxed{V = A * L} \quad [\text{Gl. 4-1}]$$

daraus folgt:

$$V = 3.000 \text{ m} * 11,25 \text{ m}^2 = \underline{\underline{33.750 \text{ m}^3}}$$

Das zur Verfügung stehende Volumen entspricht der Grundfläche eines Fußballfeldes bei einer darüber stehenden Wassersäule von vier Metern.

⁶ vgl: [1], Seite 17ff

⁷ vgl: Abschnitt 4.2.2

4.3 Fördermengen

Die Fördermenge, die zu einer energetischen Nutzung dem Bergwerk entnommen werden kann, richtet sich nach der jeweiligen Durchlaufzeit einer bestimmten Menge Wasser, dem eventuellen Nachfluss, dem vorherrschenden Temperaturgradienten, der Wahl der Methode für die Extraktion und Reinjektion und nach der energetischen Nutzung Übertage.

4.3.1 Durchlaufzeiten

Die Durchlaufzeit beschreibt die Zeit, die das Wasser nach der Reinjektion benötigt, um die gesamte Entnahmestrecke bis zur Extraktionsbohrung zurückzulegen. Sie ist insofern von Bedeutung, als dass in dieser Zeit ein Wärmeübergang von dem durch die geothermische Tiefenstufe erhitztem Gestein auf das Wasser stattfinden kann. Die Durchlaufzeit ist abhängig von der Entnahme- bzw. Fördermenge.

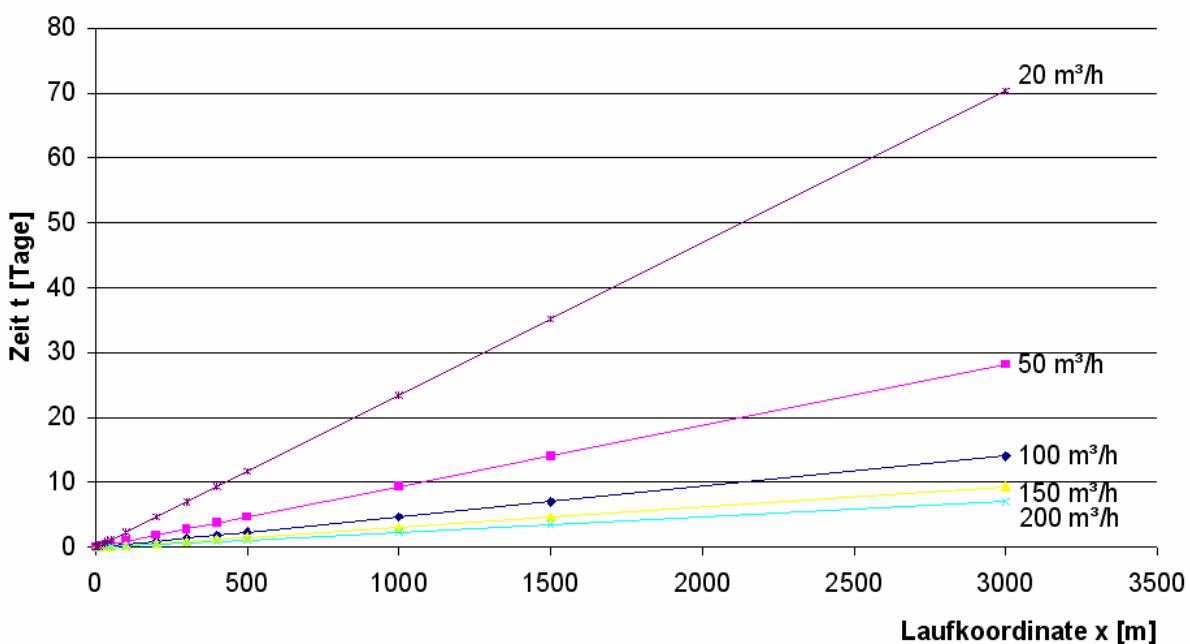


Abbildung 4.9: Durchlaufzeit bei verschiedenen Entnahmemengen

In Abbildung 4.9 werden die Durchlaufzeiten verschiedener Entnahmemengen grafisch gegenübergestellt. Mit zunehmender Entnahmemenge verringert sich die über den Querschnitt berechnete Durchlaufzeit. Dies wiederum beeinflusst die zur Verfügung stehende Wärmemenge und das Verhalten der Abkühlungsfront⁸.

Die Funktion, nach der sich die Durchlaufzeit berechnen lässt lautet:

$$t_{\text{Durchlauf}} = \frac{A * L}{\dot{V}} \quad [\text{Gl. 4-2}]$$

Exemplarisch für die Entnahmemenge von 100 m³/h bei 3000 Metern Entnahmestrecke und 11,25 m² Querschnitt ergibt sich somit:

$$t_{\text{Durchlauf}} = \frac{11,25 \text{ m}^2 * 3000 \text{ m}}{100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \underline{\underline{337,5 \text{ h}}} \approx 14 \text{ Tage}$$

4.3.2 Nachfluss

Der Nachfluss beschreibt den natürlichen Nachfluss von Wasser. Nach Aussagen von damaligen Bergleuten, mussten bis zur Stilllegung 1966 täglich ca. 3.500 m³ Wasser als Lagerstättenwasser, Formationswasser und Grundwasser nach Übertage gepumpt werden. Nach Stilllegung des Bergwerkes 1966 dauerte es Zeitzeugen zufolge ein Jahr, bis das Bergwerk auf das Niveau der Leitzach⁹ vollgelaufen war. Aus Aufzeichnungen im Bayrischen Staatsarchiv geht hervor, dass zu Beginn der `70er Jahre des vorherigen Jahrhunderts, aus einem Ventilatorstollen¹⁰ des Bergwerkes Hausham bei Wörnsmühl täglich $800 - 1.000 \frac{l}{\text{min}}$ Wasser in die Leitzach einfloss. Dies entspricht einer Tagesmenge von $1.152 - 1.440 \text{ m}^3$ [29].

⁸ vgl:

Abschnitt 4.3.3

⁹ vgl.:

Kapitel 2

¹⁰ Ventilatorstollen:

gleichzusetzen mit Wetter- / Bewetterungsstollen;

Bewetterungsstollen dienen der Zuführung von Frischluft nach Untertage

4.3.3 Abkühlungsfront

Eine Problematik bei der Wahl der Fördermenge stellt das Voranschreiten der Temperaturgrenze dar. Nach der ersten Entnahme von Wasser aus der Tiefe mit einem bestimmten Energiegehalt, der Nutzung Übertage und der anschließenden Reinkjection mit einem energetisch niedrigeren Niveau sinkt die Entnahmetemperatur gegenüber der ersten Entnahme ab. Wie weit diese herabsinkt, hängt von der Fördermenge ab.

Je mehr Wasser entnommen und abgekühlt wieder injiziert wird umso höher ist die Temperaturdifferenz und desto weniger Zeit hat das Wasser Energie durch den Wärmeübergang aufzunehmen. Die Veränderung der Entnahmetemperatur an der Extraktionsbohrung gegenüber der ungestörten Umgebungstemperatur nennt man thermischen Durchbruch.

Nach den Modellbildungen von R. Schulz in „Analytische Modellberechnung zum Wärmeaustausch beim Dublettenbetrieb“¹¹ [30] lässt sich die thermische Durchbruchzeit, also die Zeit bei der frühestens eine Änderung der ungestörten Temperatur erfolgen kann, vereinfacht mit folgenden Annahmen berechnen:

- Unendlicher Aquifer bei konstanter Mächtigkeit
- Vertikale Wärmeleitung bei impermeablen¹² Deck- und Grundgebirge

Die thermische Durchbruchzeit wird nach [30] wie folgt berechnet¹³:

$$t_B = \frac{\rho_A * c_A}{\rho_F * c_F} * \frac{4\pi}{3} * \frac{M * a^2}{Q} \quad [\text{Gl. 4-3}]$$

wobei gilt:

$$\begin{aligned} \rho_A * c_A &= (1-n) * \rho_M * c_M + n * \rho_F * c_F \\ \rho_M * c_M &= \rho_S * c_S \end{aligned} \quad [\text{Gl. 4-4}]$$

daraus folgt:

$$t_B = \frac{(1-n) * \rho_S * c_S + n * \rho_F * c_F}{\rho_F * c_F} * \frac{4\pi}{3} * \frac{M * a^2}{Q} \quad [\text{Gl. 4-5}]$$

¹¹ Die Berechnungen stehen im Zusammenhang mit dem Hot-dry-Rock Projekt Bad Urach

¹² Impermeabel: undurchlässig

¹³ Indizes: A = Aquifer, M = Aquifermatrix, F = Fluid, S = Umgebungsgestein

Bezogen auf das Bergwerk Hausham erfolgen die Annahmen folgender konstanter Werte¹⁴:

Spezifische Wärmekapazität	$c_s = 710 \frac{J}{kg * K}$
Dichte	$\rho_s = 2400 \frac{kg}{m^3}$
Mächtigkeit Entnahmestrecke	$M = d = \sqrt{\frac{A * 4}{\pi}} = 3,8m$
Porosität	$n = 0$, da das Wasser kein Gestein innerhalb der Strecke durchdringt
Bohrlochdistanz	$2 * a = 3000m$

Die thermische Durchbruchzeit $f(t,x)$ verschiedener Entnahmemengen wird in Abbildung 4.10 dargestellt.

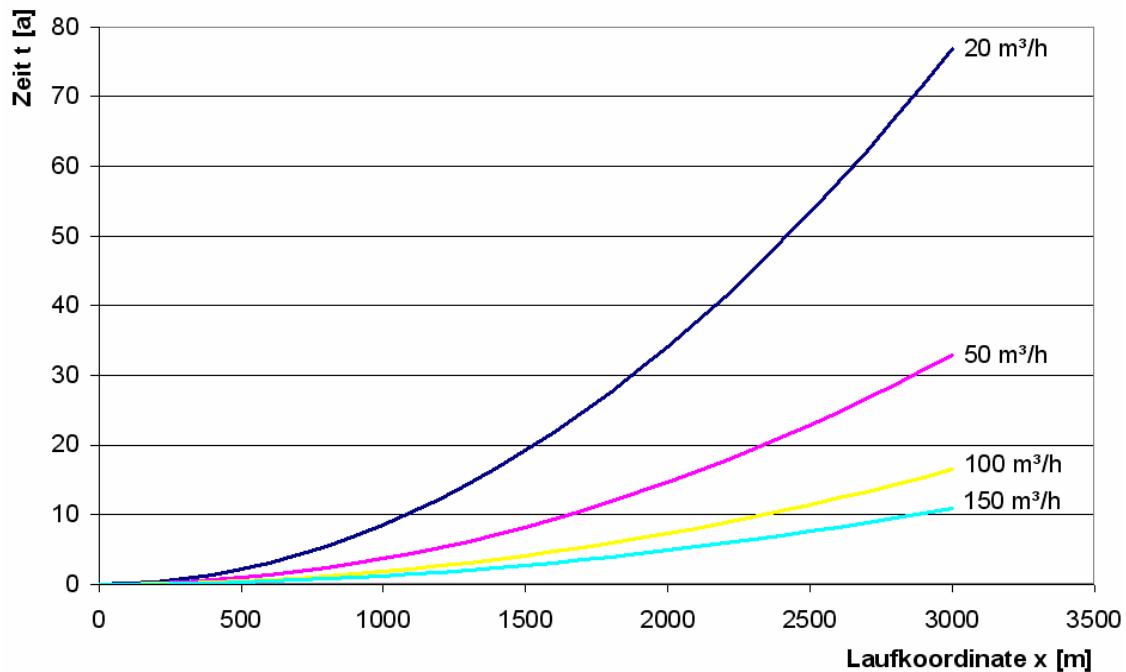


Abbildung 4.10: Thermische Durchbruchzeit verschiedener Entnahmemengen in Jahren

¹⁴ Als Umgebungsgestein wird Tonmergel (Gemisch aus u.a. Sandstein, Ton, Kalk) angenommen

Die tatsächliche thermische Durchbruchzeit ist jedoch wesentlich höher, da bei der Betrachtung die konstante Wärmezufuhr durch das Gestein keine Beachtung fand. Ebenso wurde nur eine vertikale Wärmeleitung angenommen, jedoch findet diese in 360° Lage um die Entnahmestrecke statt.

Über die Annahme, dass mit einem thermischen Durchbruch an der Extraktionsbohrung eine thermische Veränderung eingetreten ist und ein stationäres Verhältnis des Wärmeüberganges besteht, lässt sich wie Abbildung 4.11 grafisch darstellen, die Temperaturveränderung über die Entnahmestrecke vereinfacht aufzeigen.

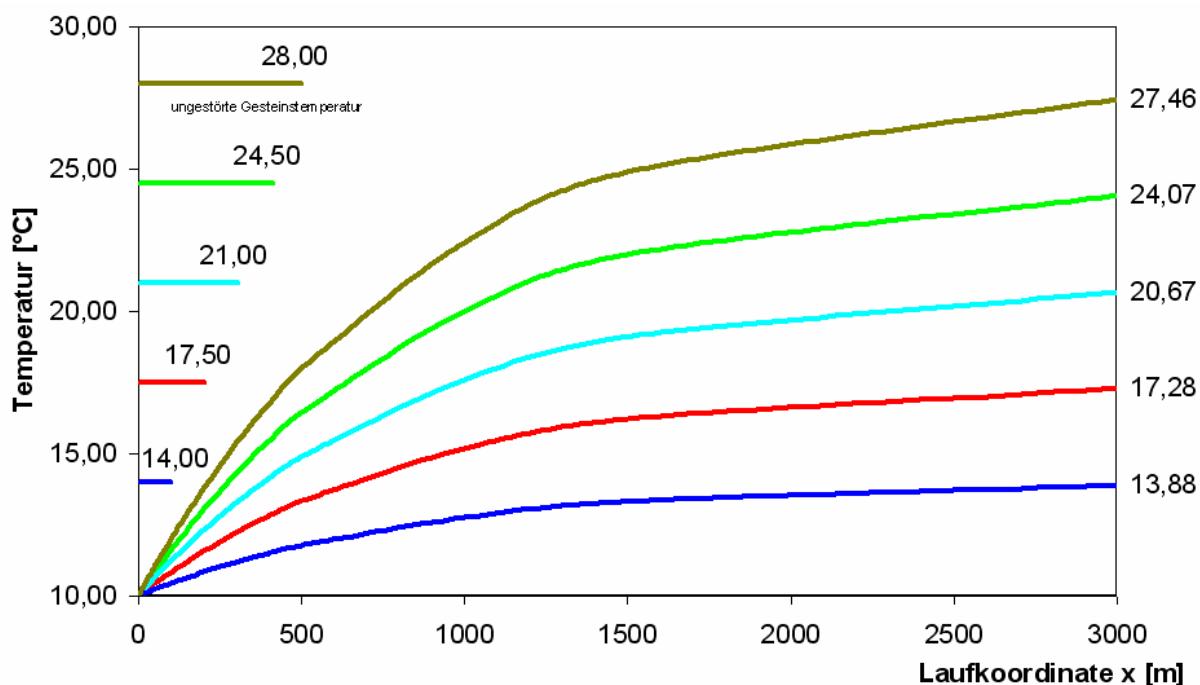


Abbildung 4.11: Temperaturkurven nach Reinjektion mit 10°C über die Strecke x

4.4 Temperatur

Die in der Tiefe vorherrschende Temperatur ist stark abhängig von den tektonischen und geophysikalischen Bedingungen. Eine hundertprozentige Aussage über den exakten Temperaturgradienten kann nur ein geologisches Gutachten erbringen. Daher wird in dieser Arbeit eine Fallbetrachtung durchgeführt.

Unabhängig von dem vorherrschenden Temperaturgradienten stehen die Aussagen von Zeitzeugen zur Verfügung, nach denen trotz intensiver Bewetterung¹⁵ die Temperatur im Bereich der 6. Sohle um die 30°C und höher gewesen sei.

Einem Beitrag von Dr. Peter Geißler^{16, 17} zufolge, ist „*die geothermische Tiefenstufe in der Grube Hausham mit bis zu 50 m/°C vergleichsweise groß, gegen die der anderen oberbayerischen Bergwerke...*“ [31].

Demnach beträgt der geothermische Gradient $T_{grad} = 2 \frac{^{\circ}\text{C}}{100m}$.

Diese negative Anomalie wird ebenfalls deutlich, wenn man die geothermischen Übersichtskarten des Bayerischen Landesamts für Umwelt auswertet. Für den Bereich Hausham wird dies aus der Abbildung 4.11 ersichtlich.

¹⁵ Bewetterung: bergmännischer Begriff; Bewetterung bedeutet die untertägige Versorgung mit Frischluft; notwendig um u.a. Schlagwetter (untertägiges Austreten von entzündlichen Grubengasen, z.B. Methan) zu vermeiden; Wetter allgemein bezeichnet die sich im Bergwerk befindliche Luft

¹⁶ Geissler, Dr. Peter: Markscheider der Kohlenbergwerke Hausham und Penzberg von 1957 bis 1967;

¹⁷ Markscheider: bergmännisch: Vermessingenieur im Bergbau (früher: Bergnotar); verantwortlich u.a. für das Führen von Risswerken (vgl. Kapitel 2)

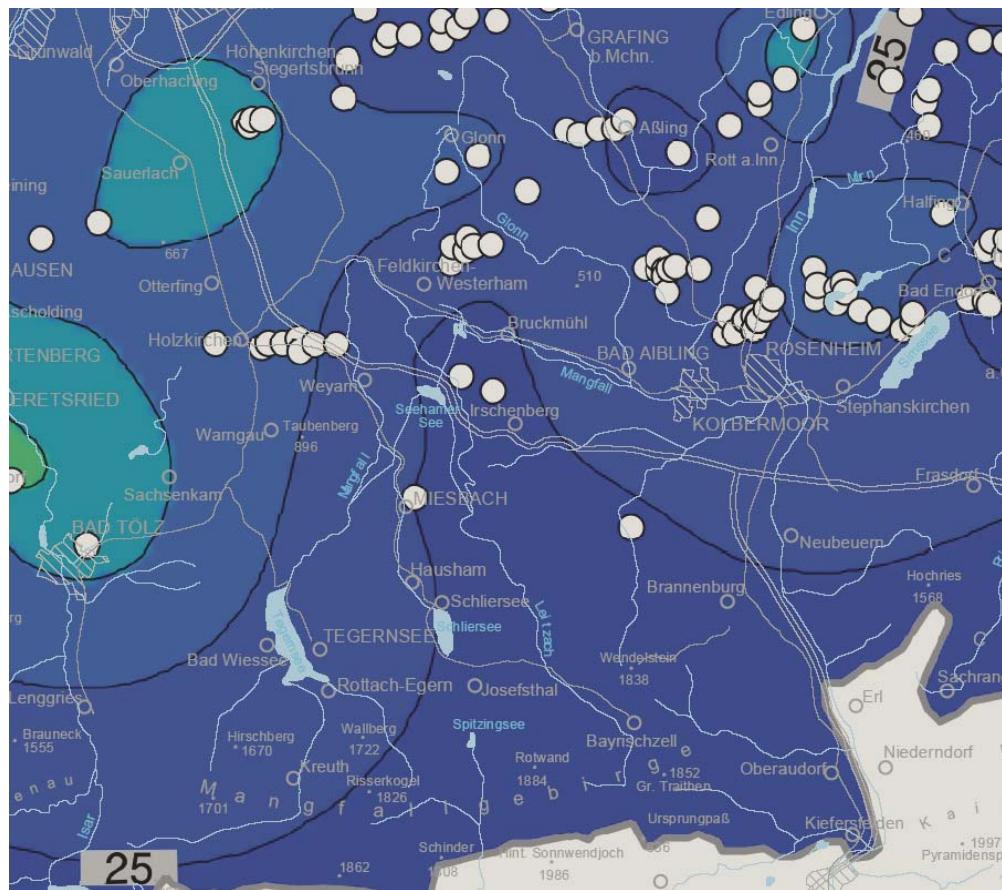


Abbildung 4.12: Temperaturverteilung in 750 m Tiefe unter Geländeoberkante (GOK) [32]

Die Darstellung wurde durch Extrapolation vorhandener Temperaturdaten aus Bohrungen erstellt. Referenzpunkte der Extrapolation sind mit einem \square in der Karte gekennzeichnet. Die Grundlage für die Referenzpunkte kann dabei aus einem einzigen Messwert bestehen. Möglich ist jedoch ebenso eine Evaluierung von mehrfach durchgeföhrten Messungen. Dadurch lassen sich Messwerte korrigieren und genauere Aussagen bezüglich der Temperatur machen.

Für die weitere Betrachtung wird eine Fallunterscheidung durchgeführt für folgende geothermische Tiefenstufen:

$$\text{Fall 1: } T_{grad} = 2 \frac{^{\circ}\text{C}}{100m}$$

$$\text{Fall 2: } T_{grad} = 2,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{100m}$$

$$\text{Fall 3: } T_{grad} = 3 \frac{^{\circ}\text{C}}{100m}$$

Fall 1

In der ersten Annahme wird von Temperaturzunahme von $2,0 \frac{^{\circ}C}{100m}$ ausgegangen. Dies bedeutet, dass mit einer Zunahme der Tiefe um 100 Meter, die Temperatur um $2^{\circ}C$ zunimmt.

Für die Berechnung wird die maximale Tiefe im Bereich des Klenzeschachtes mit 713 Metern angenommen.

Die Temperatur ergibt sich aus Gleichung 4-6:

$$T = T_{grad} * H + 10^{\circ}C \quad [\text{Gl. 4-6}]$$

daraus folgt:

$$T = 2,0 * \frac{1}{100} \frac{^{\circ}C}{m} * 713m + 10^{\circ}C = \underline{\underline{24,26^{\circ}C}}$$

Wird die Förderung aus 713 Metern Tiefe als verlustfrei angenommen, so steht in diesem Fall eine Temperatur des Thermalwassers von $24^{\circ}C$ zur Übergabe an das Heizwerk zur Verfügung.

Analog zu der oberen Berechnung ergeben sich in der weiteren Fallbetrachtung folgende Ergebnisse:

Fall 2

$$T_{grad} = 2,5$$

$$\begin{aligned} T &= 2,5 * \frac{1}{100} \frac{^{\circ}C}{m} * 713m + 10^{\circ}C \\ &= \underline{\underline{27,83^{\circ}C}} \end{aligned}$$

Fall 3

$$T_{grad} = 3,0$$

$$\begin{aligned} T &= 3,0 * \frac{1}{100} \frac{^{\circ}C}{m} * 713m + 10^{\circ}C \\ &= \underline{\underline{31,39^{\circ}C}} \end{aligned}$$

Der Einfluss des geothermischen Gradienten bei gleichbleibender Tiefe auf die Endtemperatur, wird nochmals vergleichend in Abbildung 4.13 aufgezeigt. Dargestellt ist die Temperaturrentwicklung in Abhängigkeit der Tiefe und des geothermischen Gradienten.

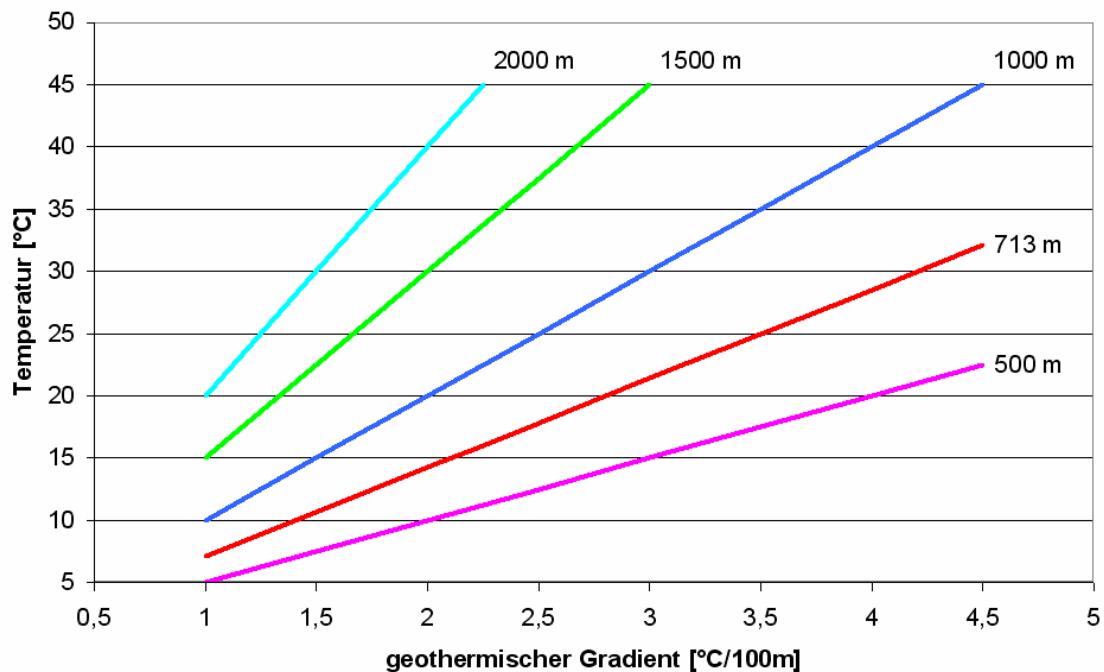


Abbildung 4.13: Temperaturrentwicklung als Funktion der Tiefe und des geothermischen Gradienten

Für die tatsächliche Temperatur ist zudem noch die Jahresdurchschnittstemperatur, in diesem Fall die Annahme von 10°C, hinzuzufügen. Für den Tiefenbereich der 6. Sohle des Bergwerks Hausham ergibt sich zwischen dem minimal und maximal anzunehmenden Gradienten ein Temperaturdelta von 3,5 K. Die energetischen Auswirkungen werden in Kapitel 5 betrachtet.

5 Energiebetrachtungen

Für die Betrachtung der energetischen Nutzung des vorhandenen Thermalwassers ist dieses Kapitel in zwei Teilabschnitte unterteilt. Zunächst sollen die erreichbaren Energiezustände berechnet werden. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird auf die Kosten eingegangen, die zur Erlangung des gewünschten Energiebedarfes benötigt werden. Eine Übersicht dieses Kapitels gibt die Abbildung 5.1 wieder.

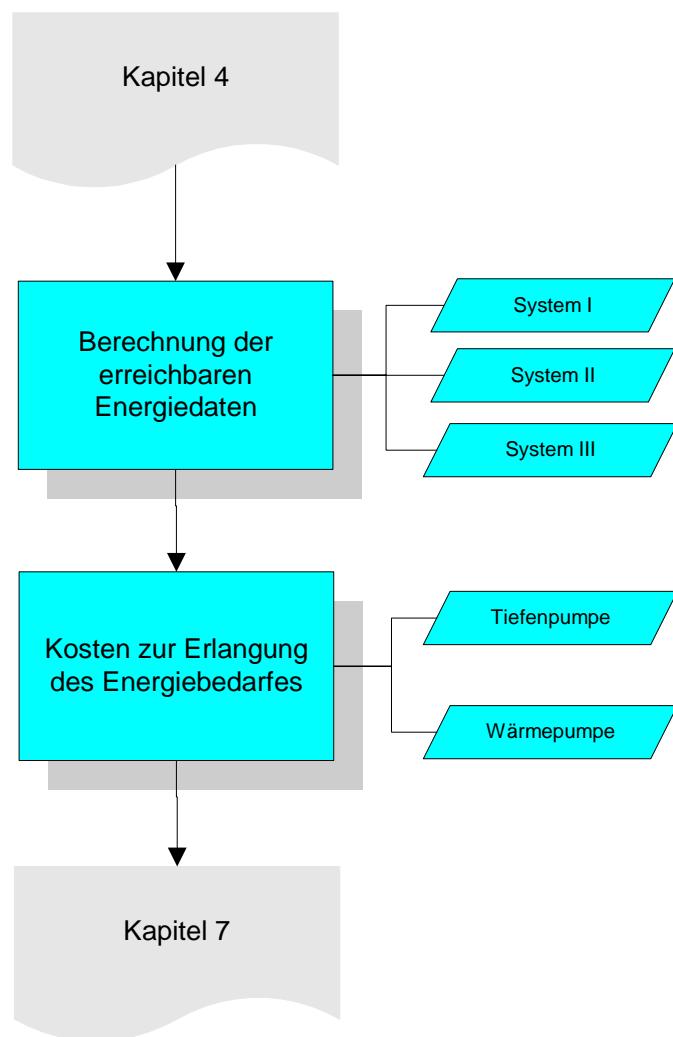


Abbildung 5.1: Gliederung Kapitel „Energiebetrachtung“

Die Berechnungen erfolgen mit der Microsoft© Office Anwendung Excel® 2002.

5.1 Systemabgrenzung

Für eine übersichtliche Berechnung der erreichbaren Energiedaten und besseren Darstellung des komplexen Prozesses der Erdwärmemenutzung, ist eine Unterteilung in drei unterschiedliche Systeme notwendig (Abbildung 5.2). Sie zeigt den Weg der energetischen Ausbeutung des Thermalwassers vom Bergwerk (System I) über die Wärmepumpe im Heizwerk (System II) bis zur Abgabe der Energie an den Verbraucher über das Nahwärmenetz (System III) auf.

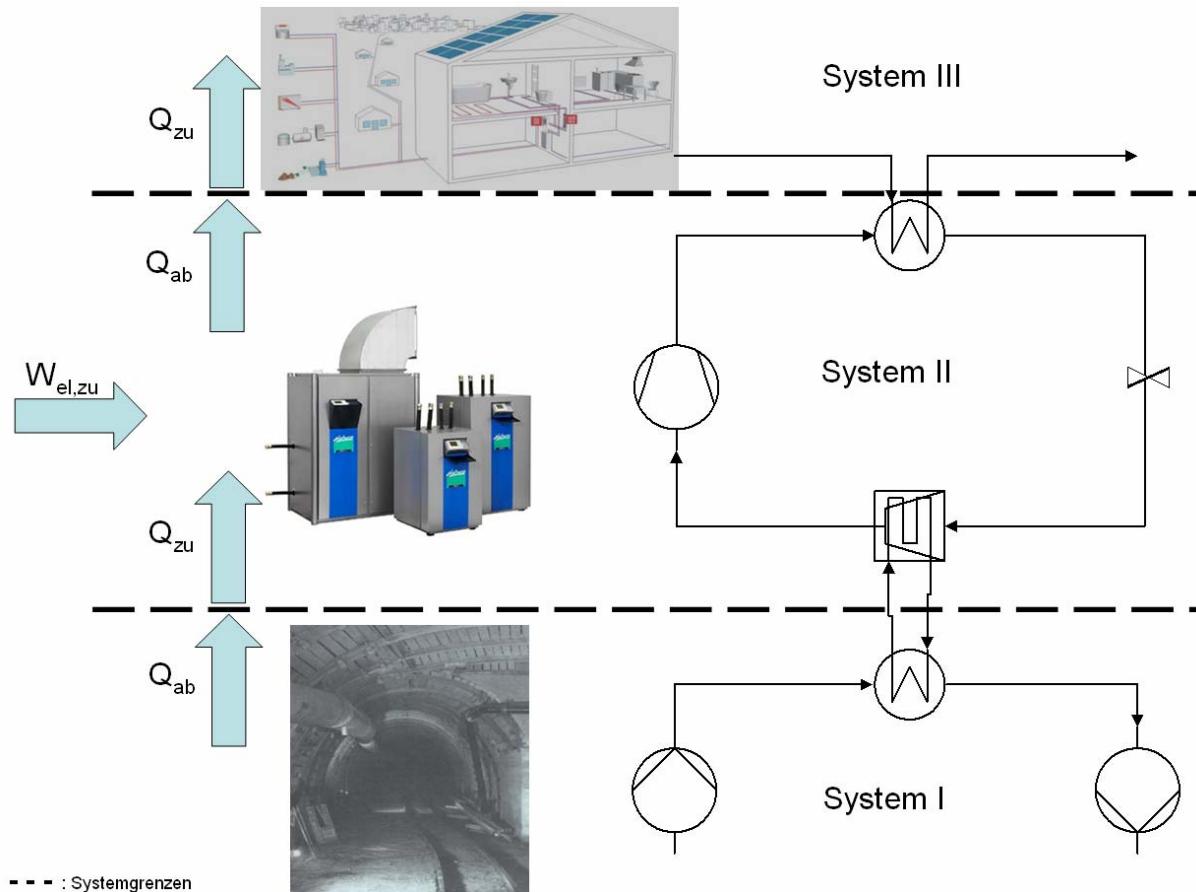


Abbildung 5.2: Darstellung der Systemgrenzen

Die jeweiligen Systeme werden nachfolgend zunächst theoretisch betrachtet, das heißt deren Herleitung im Bezug auf die Energiezustände aufgezeigt. Anschließend erfolgt die Ermittlung der erreichbaren Energiebeträge.

5.2 Systembetrachtung

In diesem Abschnitt werden die theoretischen technischen Grundlagen für die in Kapitel 8 betrachtete wirtschaftliche Abschätzung der Erdwärmennutzung des Bergwerkes Hausham dargestellt und beschrieben. Die einzelnen Systeme werden beschrieben, ihre theoretische Betrachtung anhand von Formeln wiedergegeben und die Grundlagen durch Abbildungen ergänzt. Die in Kapitel 4 erlangten Erkenntnisse über die Temperatur dienen als Grundlage für die Betrachtung des ersten Systems.

5.2.1 System I

Das System I beschreibt die Zusammenhänge der untertägigen Energievorkommen und die maximal mögliche energetische Ausnutzung der Thermalquelle nach der Förderung an die Erdoberfläche. Die Tabelle 5-1 gibt die Berechnungsgrößen des System I in einer Übersicht wieder.

Beschreibung	Formelzeichen	Einheit	Herkunft	Gewählt
Temperatur Extraktion	$T_{T,out}$	°C	Tiefe / Gradient	24 °C
Temperatur Reinjektion	$T_{T,in}$	°C	variabel	10 °C
Volumenstrom / Fördermenge	$\dot{V}_{T,out}$	$\frac{m^3}{h}$	variabel	100 $\frac{m^3}{h}$
spezifische Wärmekapazität	$c_{iT,m}$	$\frac{kJ}{kg * ^\circ K}$	Trendlinie	Konstante.
Dichte	$\rho_{T,out}$	$\frac{kg}{m^3}$	Virial-Gleichung	Konstante
Wärmemenge Thermalwasser	$Q_{b,out} = Q_{HW,zu}$	kW	berechnet	Output

Tabelle 5-1: Übersichtstabelle der Berechnungsgrößen im System I

Die temperaturbezogene Dichte kann Tabellen [vgl. Tabelle 5-2] entnommen werden. Ist der gesuchte Wert allerdings nicht in der Tabelle zu finden, kann man den Wert mittels der Virialgleichung Gl.5-1 lösen.

T in °C	Dichte [kg/m³]
10	999,7
20	998,3
30	995,7
40	992,3
50	988,0
60	983,2
70	977,7
80	971,6
90	965,2
100	958,1
110	950,7
120	942,9
130	934,6
140	925,8
150	916,8
160	907,3
170	897,3
180	886,9
190	876,0
200	864,7

Tabelle 5-2: Wertetabelle der Dichte

in Abhängigkeit der Temperatur

$$\rho = \frac{a_0 + a_1 * T + a_2 * T^2 + a_3 * T^3 + a_4 * T^4 + a_5 * T^5}{1 + b * T} \quad [\text{Gl. 5-1}]$$

mit den Koeffizienten:

$$a_0 = 999,83952$$

$$a_1 = 16,952577 \frac{1}{\text{°C}}$$

$$a_2 = -7,9905127 * 10^{-3} \frac{1}{(\text{°C})^2}$$

$$a_3 = -4,6241757 * 10^{-5} \frac{1}{(\text{°C})^3}$$

$$a_4 = 1,0584601 * 10^{-7} \frac{1}{(\text{°C})^4}$$

$$a_5 = -2,8103006 * 10^{-10} \frac{1}{(\text{°C})^5}$$

$$b = 0,0168872$$

Die spezifische Wärmekapazität ist ebenfalls temperaturabhängig.

T [°C]	spezifische Wärme [kJ/kg/K]
10	4,187
20	4,183
30	4,181
40	4,180
50	4,181
60	4,184
70	4,189
80	4,196
90	4,205

**Tabelle 5-3: Wertetabelle der spezifischen Wärmekapazität
in Abhängigkeit der Temperatur**

Mit Hilfe der Excel-Funktion der Trendlinie und den dazugehörigen Werten (vgl. Tabelle 5-3) lässt sich die Funktion der spezifischen Wärmekapazität ermitteln und grafisch darstellen, wie aus Abbildung 5.3 ersichtlich wird.

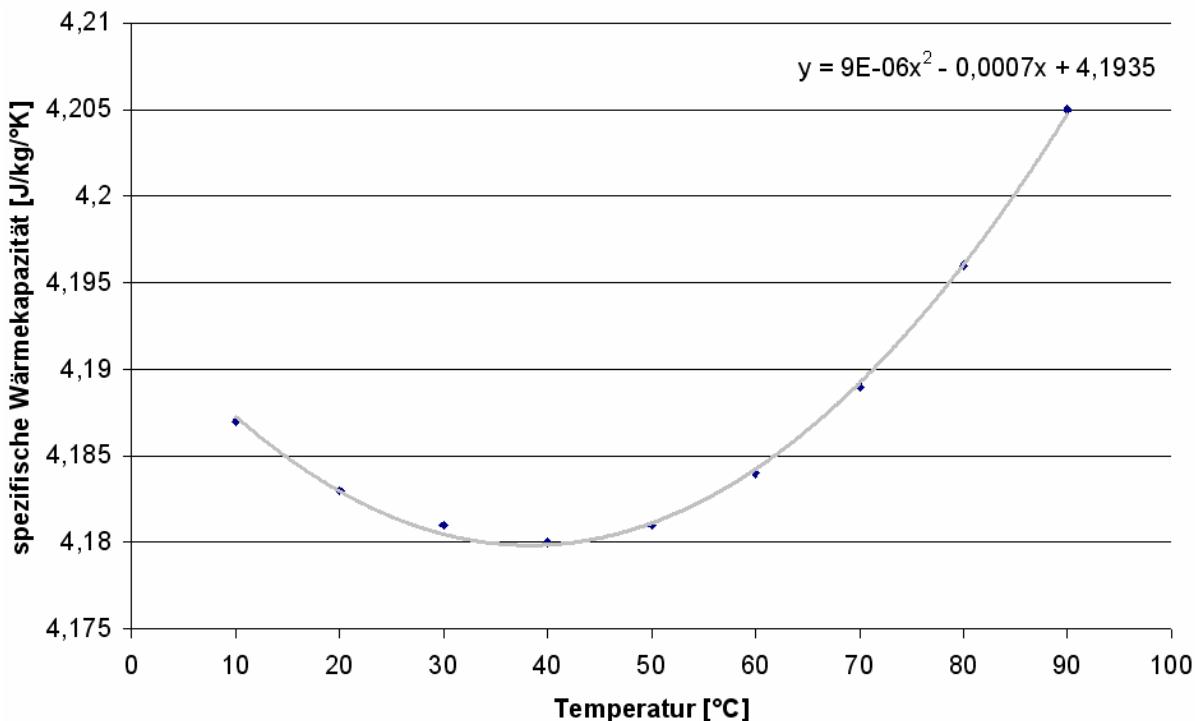


Abbildung 5.3: Trendlinie der spezifischen Wärmekapazität

Die Funktion zur Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität einer bestimmten Temperatur lautet demzufolge:

$$c_T = \left(9 \times 10^{-6} * T^2 - 0,0007 * T + 4,1935 \right) \quad [\text{Gl. 5-2}]$$

Die mittlere spezifische Wärmekapazität $c_{T,m}$ zwischen der Extraktionstemperatur $T_{T,out}$ und der Reinjektionstemperatur $T_{T,in}$ ermittelt sich aus der Gl. 5-2, angewendet auf beide Temperaturen und dem aus der Summe gebildeten Mittelwert [Gl. 5-3].

$$c_{T,m} = 0,5 * \left[\frac{\left(9 \times 10^{-6} * T_{T,out}^2 - 0,0007 * T_{T,out} + 4,1935 \right)}{\left(9 \times 10^{-6} * T_{T,in}^2 - 0,0007 * T_{T,in} + 4,1935 \right)} \right] \quad [\text{Gl. 5-3}]$$

Die aus den Größen und Hilfsgrößen zu ermittelnde Wärmemenge $Q_{T,out}$ ergibt sich nun wie folgt:

$$Q_{T,out} = \dot{V} * \rho_{T,out} * c_{T,m} * (T_{T,out} - T_{T,in}) \quad [\text{Gl. 5-4}]$$

Mit den gewählten Werten aus Tabelle 5-1, eingesetzt in die Gleichungen 5-1 und 5-3 ergibt sich:

I. Dichte $\rho_{T,out}$

$$\rho_{T,out} = \frac{a_0 + a_1 * 24^\circ C + a_2 * (24^\circ C)^2 + a_3 * (24^\circ C)^3 + a_4 * (24^\circ C)^4 + a_5 * (24^\circ C)^5}{1 + b * (24^\circ C)}$$

$$= 997,2 \frac{kg}{m^3}$$

II. Spezifische Wärmekapazität $c_{T,m} = c_{T,out}$

$$c_{T,out} = 0,5 * \left[\begin{array}{l} \left(9 \times 10^{-6} * (24^\circ C)^2 - 0,0007 * (24^\circ C) + 4,1935 \right) \\ + \left(9 \times 10^{-6} * (10^\circ C)^2 - 0,0007 * (10^\circ C) + 4,1935 \right) \end{array} \right] = 4,182 \frac{J}{kg * K}$$

III. I./II. in Gleichung 5-4

$$Q_{T,out} = 100 \frac{m^3}{h} * 997,2 \frac{kg}{m^3} * 4,182 \frac{J}{kg * K} * (24^\circ C - 10^\circ C) = \underline{\underline{1.622 kW}}$$

5.2.2 System II

In der Systembeschreibung des zweiten Systems wird vor allem auf den Wärmepumpen-Prozess eingegangen. Dieser findet im Heizwerk statt, welches neben der eigentlichen Bohrung, das elementare Herzstück der Geothermieanlage darstellt. Im Heizwerk wird das geförderte Thermalwasser energetisch betrachtet aufgebessert und zur Endnutzung dem Wärmenetz übergeben. In Abbildung 5.4 werden in einer schematischen Darstellung die Abläufe im Heizwerk wiedergegeben.

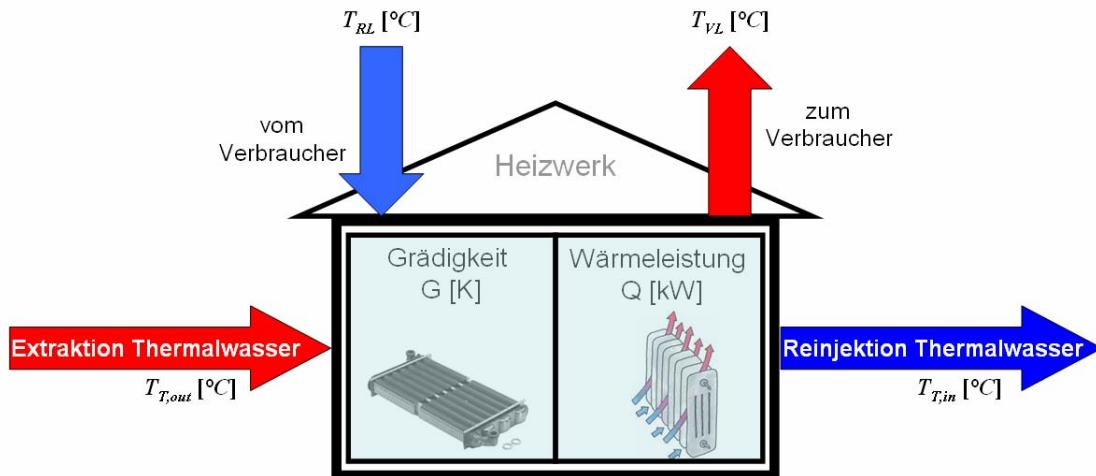


Abbildung 5.4: schematische Darstellung der Abläufe im Heizwerk und deren bestimmenden Größen

Von der Extraktionsbohrung kommend wird das Thermalwasser in das Heizwerk zu einem Wärmetauscher gefördert. Im Wärmetauscher wird die Energie des Thermalwassers dem Wärmepumpen-Kreislauf übergeben. Dabei bestimmt die Grädigkeit des Wärmetauschers, also die aufgrund der endlichen Wärmeübertragungsfläche auftretenden Verluste, die Eingangstemperatur für die Wärmepumpe. Nach dem Durchlaufen des Wärmepumpenprozesses wird eine bestimmte Wärmeleistung an das Nahwärmenetz übergeben, währenddessen das Thermalwasser nach dem Energieentzug wieder reinjiziert wird.

Die für dieses System geltenden Eingangsgrößen sind in der Tabelle 5-4 übersichtlich zusammengefasst und beschrieben.

Beschreibung	Indizes	Einheit	Herkunft	Gewählt
Temperatur Extraktion	$T_{T,out}$	°C	Tiefe / Gradient	24 °C
Temperatur Reinjektion	$T_{T,in}$	°C	variabel	10 °C
Grädigkeit	G	K	variabel	5 K
Wärmetauscher				
Vorlauftemperatur Wärmenetz	T_{VL}	°C	variabel	60 °C
Rücklauftemperatur Wärmenetz	T_{RL}	°C	variabel	40 °C
Isentroper Verdichterwirkungsgrad	$\eta_{V,is}$	%	60-80 %	75 %

Tabelle 5-4: Eingangsgrößen für das System II - Wärmepumpenprozess

Für den Wärmepumpenprozess gilt ein Prozessablauf in 4 Stufen:

- Verdampfen: die Umweltwärme (z.B. Thermalwasser) überträgt über einen Wärmetauscher seine Wärme auf ein Kühlmittel im Primärkreislauf der Wärmepumpe, welches verdampft
- Verdichten: über einen Verdichter wird unter Zugabe von elektrischer Energie das Temperatur- und Druckniveau erhöht
- Verflüssigen: über einen weiteren Wärmetauscher wird die aus der Verdichterstufe hinzugefügte Energie in Form von Wärme auf das Trägermedium des Wärmenetzes übertragen
- Entspannen: in einer Drossel wird das Druck- und Temperaturniveau wieder auf die Ausgangswerte der Verdampferstufe heruntergedrosselt.

Nach dem Entspannen wird das Kältemittel wieder zum Verdampfer geführt und der Wärmepumpenprozess beginnt von neuem. Da der Ablauf in einem T-s-Diagramm gegen den Uhrzeigersinn dargestellt wird, spricht man hierbei von einem „linkslaufenden Kreisprozess“.

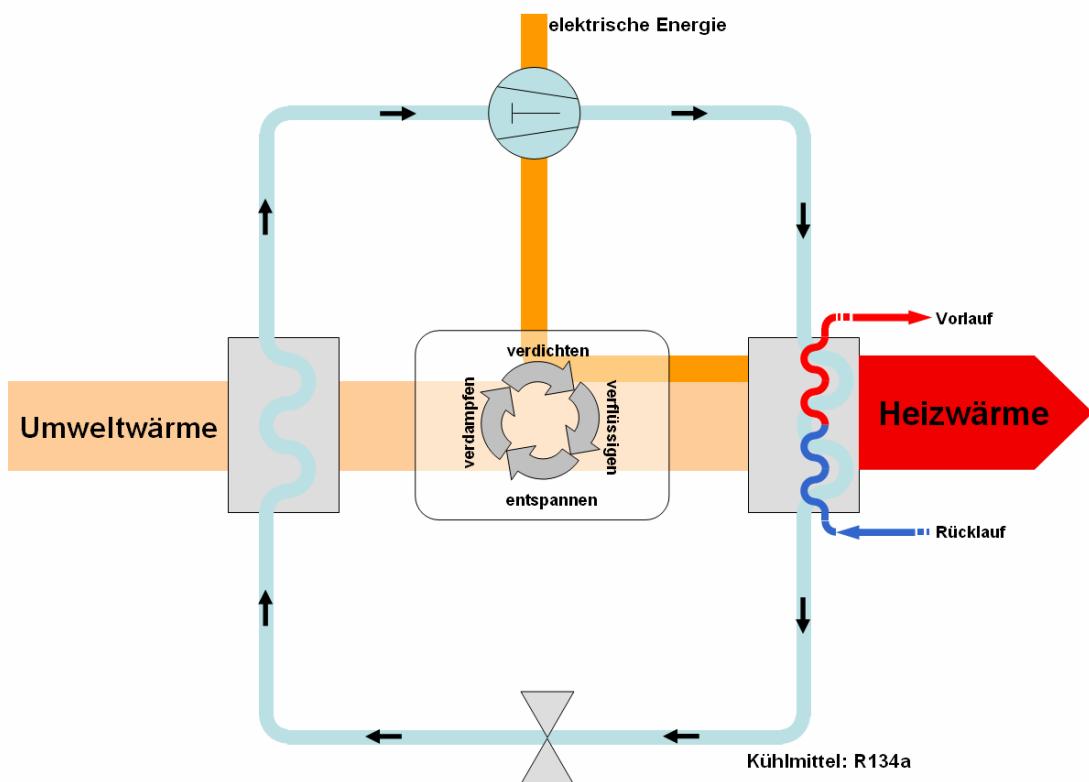


Abbildung 5.5: schematische Darstellung des Wärmepumpenprozesses

Abbildung 5.5 zeigt schematisch die Abläufe in einer Wärmepumpe. Als Kühlmittel wird R134a verwendet. Dieses Kühlmittel zählt zu der Familie der Hydrofluorkohlenwasserstoffe (HFKW) und zeichnet sich durch das Fehlen der Chloratome aus. Dadurch gilt es nicht als Ozon-Killer, im Gegensatz zu den Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW).

Die chemische Bezeichnung für R134a lautet C₂H₂F₄ oder 1,1,1,2-Tetrafluorethan. Die Strukturformel ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

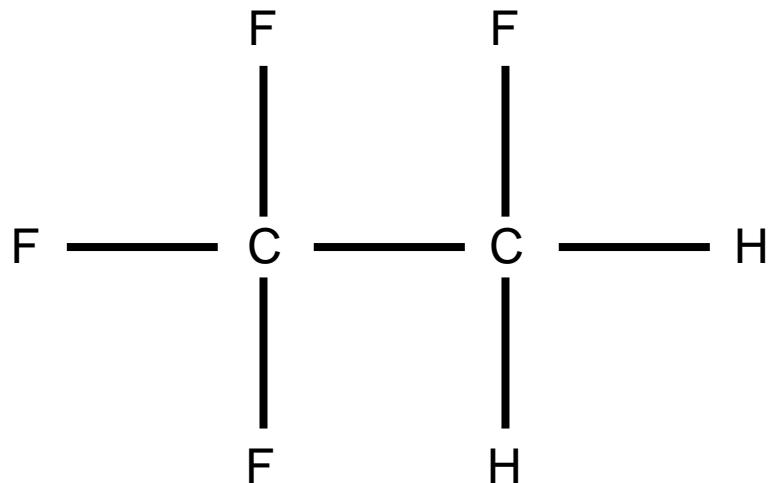


Abbildung 5.6: Strukturformel des Kältemittels R134a [33]

Zustandsgrößen des Wärmepumpenprozess

Zur Beschreibung der Zustandsgrößen gelten folgende Zusammenhänge:

$$1) \quad T_C = T_1 = T_{T,out} - G \quad [\text{Gl. 5-5}]$$

$$2) \quad T_4 = T_{1,g} = T_{T,in} + T_U \quad [\text{Gl. 5-6}]$$

$$3) \quad \eta_{V,is} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad [\text{Gl. 5-7}]$$

Abbildung 5.7 zeigt das Temperatur-Entropie-Diagramm des Wärmepumpenprozesses mit den Ein- und Ausgängen des jeweiligen Bauteiles der Wärmepumpe.

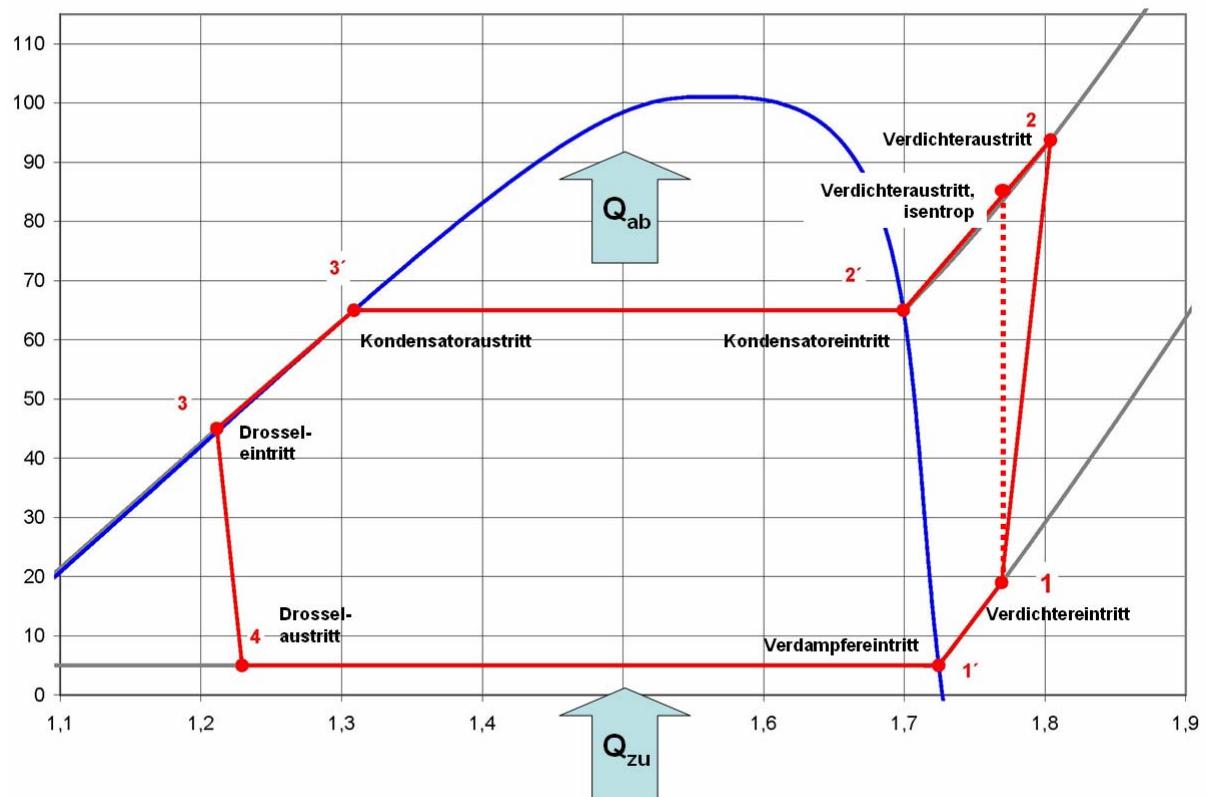


Abbildung 5.7: T-s-Diagramm des Wärmepumpenprozesses mit Ortsbezug

Zustand 1: Verdichtereintritt (gesättigtes Gas)

Die am Verdichtereintritt wirkenden Größen und deren Ermittlung sind der Tabelle 5-5 zu entnehmen.

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Berechnung
Dampfgehalt	x_1		$x_1 = -1$
Druck	$p_1 = p_u$	bar	P_u = unterer Prozessdruck, iterativ
Temperatur	T_1	°C	G1. 5-5
Spezifisches Volumen	v_1	$\frac{m^3}{kg}$	$= v_{ptx_R134a}(p_1; T_1; x_1)$
Spezifische Enthalpie	h_1	$\frac{kJ}{kg}$	$= h_{ptx_R134a}(p_1; T_1; x_1)$
Spezifische Entropie	s_1	$\frac{kJ}{kg * K}$	$= s_{ptx_R134a}(p_1; T_1; x_1)$

Tabelle 5-5: Darstellung der Zustandsgrößen am Verdichtereintritt

Über ein Makro werden der untere und obere Prozessdruck auf die vordefinierten Startwerte 5 bar und 20 bar gesetzt. Am Anschluss werde die gesuchten Drücke iterativ, das heißt in schrittweiser Annäherung, ermittelt. Dabei wird solange der untere Prozessdruck p_u berechnet, bis der Soll-Ist-Vergleich des Thermalwasser-Rücklaufes $\Delta T_{T,out}$ zu Null gesetzt ist. Analog wird dieses bei dem oberen Prozessdruck ebenfalls durchgeführt.

Die Zustandsgrößen können auch entsprechenden Tabellenwerken entnommen werden. Hierzu ist in Abbildung 5.8 ein Ausschnitt aus den zu verwendenden Tabellen abgebildet. Zunächst muss über die Temperatur in der Sättigungstabelle der Druck abgelesen werden. Anders als bei der Verwendung der Stoffwerttabellen-Bibliothek in der Anwendung Excel, muss hierbei jedoch zunächst die Temperatur am Verdampferaustritt verwendet werden. Über den abgelesenen Druck können dann in der Tabelle für überhitzten Dampf die Werte für die spezifische Entropie, dem spezifischen Volumen und der spezifischen Enthalpie abgelesen werden. Ist für den ermittelten Druck keine Tabelle vorhanden, so muss der Wert hierfür interpoliert werden.

Sättigungswerte - Temperaturtabelle

Temp. °C	Druck bar	spez. Vol. m³/kg		Enthalpie kJ/kg		Verd.-Enth. kJ/kg	Entropie kJ/(kg K)	
ϑ_s	p_s	$10^3 \cdot v'$	$10^3 \cdot v''$	h'	h''	r	s'	s''
0	2,9277	0,7721		69,29	100,000	298,540	198,540	1,000
2	3,1458	0,7761		64,650	102,681	299,706	197,025	1,010
4	3,3763	0,7802		60,376	105,376	300,863	195,488	1,019
6	3,6194	0,7843		56,437	108,083	302,012	193,929	1,029
8	3,8757	0,7886		52,801	110,805	303,152	192,347	1,039
10	4,1457	0,7929		49,441	113,540	304,281	190,741	1,048
12	4,4298	0,7973		46,335	116,289	305,400	189,111	1,058
14	4,7284	0,8018		43,456	119,054	306,508	187,455	1,068
16	5,0421	0,8064		40,788	121,833	307,605	185,772	1,077
18	5,3714	0,8112		38,310	124,627	308,689	184,062	1,087
								1,719

Werte von überhitztem Dampf

$p = 4 \text{ bar} = 0,4 \text{ MPa}$				$p = 4,5 \text{ bar} = 0,45 \text{ MPa}$			
$\vartheta_s = 8,93 \text{ }^\circ\text{C}$				$\vartheta_s = 12,48 \text{ }^\circ\text{C}$			
T	v	h	s	T	v	h	s
°C	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	°C	m³/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)
10	0,05150	304,68	1,726	20	0,04751	312,84	1,746
20	0,05422	314,03	1,759	30	0,04989	322,30	1,777
30	0,05681	323,33	1,790	40	0,05218	331,71	1,808
40	0,05931	332,61	1,820	50	0,05440	341,13	1,838
50	0,06174	341,93	1,849	60	0,05656	350,59	1,866
60	0,06412	351,31	1,878	70	0,05867	360,12	1,895
70	0,06646	360,78	1,906	80	0,06075	369,75	1,922
80	0,06876	370,34	1,933	90	0,06279	379,48	1,949

Abbildung 5.8: Auszug aus den Stoffwerttabellen für Frigen134a [34]

Für die Berechnung werden folgende Werte der Tabelle 5-4 entnommen:

- $T_{T,out} = 24^\circ C$
- $G = 5K$

Eingesetzt in die Gleichung 5-5 ergibt sich:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{T,out} - G \\ &= 24^\circ C - 5^\circ C = \underline{\underline{19^\circ C}} \end{aligned}$$

Mit den Funktionen aus Tabelle 5-5 und dem Excel™ - Programm berechnen sich die Zustandsgrößen zu:

$$\begin{aligned} p_1 &= 3,50 \text{ bar} \\ v_1 &= 0,06 \frac{m^3}{kg} \\ h_1 &= 414,24 \frac{kJ}{kg} \\ s_1 &= 1,77 \frac{kJ}{kg * K} \end{aligned}$$

Die Eingangs beschriebene iterative Druckermittlung für das obere Druckniveau, ergibt bei

- einer Vorlauftemperatur des Wärmenetzes $T_{VL} = 60^\circ C$,
- einer Grädigkeit im Wärmetauscher $G = 5K$,
- einer Überhitzung im Verdampfer $T_{UV} = 5K$ und
- einer Unterkühlung im Kondensator $T_{UK} = 5K$,

einen Druck von $p_2 = 18,90 \text{ bar}$.

Zustand 2s: Verdichteraustritt isentrop (überhitztes Gas)

Die Zustandsgrößen des gasförmigen Arbeitsmittels am isentropen Verdichteraustritt, werden wie in Tabelle 5-6 abgebildet berechnet.

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Berechnung
Dampfgehalt	$x_{2,s}$		$x_1 = -1$
Druck	$p_{2,s}$	bar	$p_{2,s} = p_2$
Spezifische Entropie	$s_{2,s}$	$\frac{kJ}{kg * ^\circ K}$	$s_{2,s} = s_1$
Temperatur	$T_{2,s}$	$^\circ C$	$= t_ps_R134a(p_{2,s}; s_{2,s})$
Spezifische Enthalpie	$h_{2,s}$	$\frac{kJ}{kg}$	$= h_ptx_R134a(p_2; T_{2,s}; x_{2,s})$

Tabelle 5-6: Darstellung der isentropen Zustandsgrößen am Verdichteraustritt

Neben der Verwendung der Excel-Funktion können die Temperatur und die spezifische Enthalpie auch einem logarithmischen p-h-Diagramm für R134a entnommen werden.

Mit den, für den Zustand 1 ermittelten Werten und dem iterativ berechneten oberen und unteren Druckniveau, ergeben sich am isentropen Verdichteraustritt folgende Zustandswerte:

$$T_{2s} = 83^\circ C$$

$$h_{2s} = 452,05 \frac{kJ}{kg}$$

Zustand 2: Verdichteraustritt

Das immer noch gasförmige, aber überhitzte Arbeitsmittel am realen Verdichteraustritt wird wie in Tabelle 5-7 berechnet.

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Berechnung
Dampfgehalt	x_2		$x_2 = -1$
Druck	p_2	bar	$P_o = \text{oberer Prozessdruck, iterativ}$
Temperatur	T_2	°C	$= t_ph_R134a(p_2; h_2)$
Spezifische Entropie	s_2	$\frac{kJ}{kg * K}$	$= s_ptx_R134a(p_2; T_2; x_2)$
Spezifische Enthalpie	h_2	$\frac{kJ}{kg}$	$= \frac{(h_{2,s} - h_1)}{\eta_{V,is}} + h_1$

Tabelle 5-7: Darstellung der Zustandsgrößen am realen Verdichteraustritt

Folgende Werte werden in die Funktionen der Tabelle 5-7 eingesetzt:

$$p_2 = 18,90 \text{ bar}$$

$$\eta_{V,is} = 75\%$$

Mit der Gleichung 5-7 und den im Zustand 1 und 2s ermittelten Werten für die Enthalpien, ergibt sich eine Enthalpie:

$$\begin{aligned}
 h_2 &= \frac{(h_{2,s} - h_1)}{\eta_{V,is}} + h_1 \\
 &= \frac{452,05 \frac{kJ}{kg} - 414,24 \frac{kJ}{kg}}{75\%} + 414,24 \frac{kJ}{kg} = 464,65 \frac{kJ}{kg}
 \end{aligned}$$

Über die Funktionen für die Temperatur und Entropie nach Tabelle 5-7, ergeben sich die Werte der Zustandsgrößen zu:

$$T_2 = 94^\circ C$$

$$s_2 = 1,80 \frac{kJ}{kg * K}$$

Zustand 2': Kondensatoreintritt

Nachdem das Arbeitsmittel auf ein höheres Temperaturniveau durch den Verdichter gebracht wurde, erreicht es nun den Kondensator. Der Zustand des Arbeitsmittel R134a hat wieder die Sättigungslinie auf der Gas-Seite erreicht. Die Zustandsgrößen sind gemäß der Tabelle 5-8 zu ermitteln.

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Berechnung
Dampfgehalt	$x_{2,g}$		$x_{2,g} = 1$
Druck	$p_{2,g}$	bar	$p_{2,g} = p_2$
Temperatur	$T_{2,g}$	°C	$= t_ph_R134a(p_2; h_2)$
Spezifische Entropie	$s_{2,g}$	$\frac{kJ}{kg * ^\circ K}$	$= s_ptx_R134a(p_2; T_2; x_2)$

Tabelle 5-8: Darstellung der Zustandsgrößen am Kondensatoreintritt

Die Temperatur $T_{2,g}$ ist über die Funktion der Enthalpie am Verdichteraustritt und dem entsprechenden Druck $p_{2,g} = p_2$, mit $65^\circ C$ berechnet.

Die Entropie beträgt $s_{2,g} = 1,70 \frac{kJ}{kg * K}$.

Zustand 3': Kondensatoraustritt

Vom gasförmigen Zustand in den flüssigen Zustand gewechselt, befindet sich das Arbeitsmedium bei gleichgebliebenem Druck und Temperatur nun am Kondensatoraustritt.

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Berechnung
Dampfgehalt	$x_{3,f}$		$x_{3,f} = 0$
Druck	$p_{3,f}$	bar	$= p_2$
Temperatur	$T_{3,f}$	°C	$= ts_p_R134a(p_{3,f})$
Spezifische Entropie	$s_{3,f}$	$\frac{kJ}{kg * K}$	$= v_ptx_R134a(p_{3,f}; T_{3,f}; x_{3,f})$
Spezifische Enthalpie	$h_{3,f}$	$\frac{kJ}{kg}$	$= h_ptx_R134a(p_{3,f}; T_{3,f}; x_{3,f})$
Spezifisches Volumen	$v_{3,f}$	$\frac{m^3}{kg}$	$= s_ptx_R134a(p_{3,f}; T_{3,f}; x_{3,f})$

Tabelle 5-9: Darstellung der Zustandsgrößen am Kondensatoraustritt

Über die in Tabelle beschriebenen Excel™-Funktionen und Gleichung 5-8, errechnen sich die gesuchten Zustandsgrößen zu:

$$T_{3,f} = 65^\circ C$$

$$s_{3,f} = 1,31 \frac{kJ}{kg * K}$$

$$h_{3,f} = 295,76 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_{3,f} = 0,0010 \frac{m^3}{kg}$$

Zustand 3: Drossleintritt

Das Arbeitsmedium tritt nun in die Drossel ein. Bis zum Drossleintritt ist das Medium bei weiterhin gleichbleibendem Hochdruck abgekühlt und erreicht die Drossel als unterkühlte Flüssigkeit mit denen nach Tabelle 5-10 berechneten Zustandsgrößen.

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Berechnung
Dampfgehalt	x_3		$x_3 = -1$
Druck	p_3	bar	$= p_2$
Temperatur	T_3	°C	Gl. 5-8
Spezifische Entropie	s_3	$\frac{kJ}{kg * K}$	$= v_ptx_R134a(p_3; T_3; x_3)$
Spezifische Enthalpie	h_3	$\frac{kJ}{kg}$	$= h_ptx_R134a(p_{3,f}; T_{3,f}; x_{3,f})$
Spezifisches Volumen	v_3	$\frac{m^3}{kg}$	$= s_ptx_R134a(p_3; T_3; x_3)$

Tabelle 5-10: Darstellung der Zustandsgrößen am Drossleintritt

Die berechneten Werte der Zustandsgrößen ergeben:

$$s_3 = 1,21 \frac{kJ}{kg * K}$$

$$h_3 = 263,75 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_{3,f} = 0,0009 \frac{m^3}{kg}$$

Zustand 4: Drosselaustritt

In der Drossel wurde das Kühlmittel weiter herabgekühlt und es erreicht den Drosselaustritt mit herabgesetztem Druck als Gemisch von Flüssigkeit und Dampf. Das Arbeitsmedium befindet sich im Zweiphasengebiet und erreicht die Zustandsgrößen mit den in Tabelle 5-11 gezeigten Formeln.

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Berechnung
Druck	p_4	bar	p_1
Spezifische Enthalpie	h_4	$\frac{kJ}{kg}$	$= h_3$
Dampfgehalt	x_4		$x_4 = x_ph_R134a(p_4; h_4)$
Temperatur	T_4	$^{\circ}C$	$= t_ph_R134a(p_4; h_4)$
Spezifische Entropie	s_4	$\frac{kJ}{kg * ^{\circ}K}$	$= s_ptx_R134a(p_4; T_4; x_4)$

Tabelle 5-11: Darstellung der Zustandsgrößen am Drosselaustritt

Das in der Drossel auf $p_4 = 3,50\text{ bar}$ entspannte Kältemittel, ist auf $T_4 = 5^{\circ}C$ abgekühlt. Da das Kältemittel sich nun im Nassdampfgebiet befindet, hat es einen Dampfgehalt von $x_4 = 0,29$. Die Enthalpie und Entropie berechnen sich nach den Funktionen der Tabelle zu $h_4 = 263,75 \frac{kJ}{kg}$ und $s_4 = 1,23 \frac{kJ}{kg * K}$.

Zustand 1': Verdampferaustritt

Nachdem das Kältemittel aus der Drossel über den Wärmetauscher erneut Wärme aus dem Minenwasser entzogen hat, erreicht es am Verdampferaustritt im gesättigten Zustand die Sattdampfelinie. Im Übergang an den Verdichter wird es mit T_{UV} überhitzt und der Kreisprozess beginnt von neuem. Die Zustandsgrößen am Verdampferaustritt werden in Tabelle 5-12 dargestellt.

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Berechnung
Dampfgehalt	$x_{1,g}$		$x_{1,g} = 1$
Druck	$p_{1,g}$	bar	$p_{1,g} = p_1$
Temperatur	$T_{1,g}$	°C	$= t_ph_R134a(p_{1,g}; h_4)$
Spezifische Enthalpie	$h_{1,g}$	$\frac{kJ}{kg}$	$= h_ptx_R134a(p_{1,g}; T_{1,g}; x_{1,g})$
Spezifische Entropie	$s_{1,g}$	$\frac{kJ}{kg * K}$	$= s_ptx_R134a(p_{1,g}; T_{1,g}; x_{1,g})$

Tabelle 5-12: Darstellung der Zustandsgrößen am Verdampferaustritt

Mit dem Erreichen der Sattdampfelinie steigen die Werte der Enthalpie und Entropie

$$\text{auf } h_{1,g} = 401,49 \frac{kJ}{kg} \text{ und } s_{1,g} = 1,72 \frac{kJ}{kg * K}.$$

Die Temperatur an dieser Stelle ist gleich der Temperatur am Verdichtereintritt. Diese berechnet sich nach Gleichung 5-5 bzw. gemäß der Funktion aus Tabelle 5-12.

Es lassen sich nun die nachfolgenden Leistungsdaten des Wärmepumpenprozesses berechnen:

- Massenstrom $\dot{m} = \frac{Q_{zu}}{h_1 - h_3}$ [Gl. 5-8]

- Verdichterleistung $P_V = \dot{m} * (h_2 - h_1)$ [Gl. 5-9]

- Leistungsziffer $\varepsilon = \frac{Q_{zu}}{P_V}$ [Gl. 5-10]

mit den errechneten Werten für:

$$Q_{zu} = 1.622 \text{ kW}$$

$$h_1 = 414,24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 464,65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 = 263,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Der Massenstrom beträgt demnach:

$$\dot{m} = \frac{1.622 \text{ kW}}{414,24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 263,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 10,78 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

bei einer Verdichterleistung von:

$$P_V = 10,78 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(464,65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 414,24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = \underline{\underline{543 \text{ kW}}}$$

und einer Leistungsziffer von:

$$\varepsilon = \frac{1.622 \text{ kW}}{543 \text{ kW}} = \underline{\underline{2,99}}$$

5.2.3 System III

Für die Übergabe der Wärme an das Wärmenetz sind vor allem die in Tabelle 5-13 aufgeführten Angaben entscheidend. Sie sind bestimmd für den zuvor berechneten Wärmepumpenprozess.

Beschreibung	Nomenklatur	Einheit	Herkunft	Wert
Vorlauftemperatur Wärmenetz	T_{VL}	°C	variabel	60°C
Rücklauftemperatur Wärmenetz	T_{RL}	°C	variabel	40°C
Grädigkeit	G	K	variabel	5 K
Thermalwasserenergie	Q_{zu}	kW	5.2.2	
Verdichterleistung	P_V	kW	5.2.2	

Tabelle 5-13: Übersichtstabelle der relevanten Eingangsdaten

Die in das Wärmenetz einzuspeisende Energie wird entsprechend der Gleichung 5-11 berechnet.

$$\boxed{Q_{ab} = Q_{zu} + P_V \\ = \dot{m}_{R134a} * (h_4 - h_2)}$$

[Gl. 5-11]

Mit den errechneten Werten aus Kapitel 5.2.2 ergibt sich eine einzuspeisende Energie von:

$$\begin{aligned} Q_{ab} &= Q_{zu} + P_V \\ &= 1.622 \text{ kW} + 543 \text{ kW} = \underline{\underline{2.165 \text{ kW}}} \\ &\text{oder} \\ Q_{ab} &= \left| \dot{m}_{R134a} * (h_4 - h_2) \right| \\ &= \left| 10,78 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \left(263,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 464,65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \right| = \underline{\underline{|-2.165 \text{ kW}|}} \end{aligned}$$

5.3 Kostenfaktoren

Zur Erlangung der in das Wärmenetz einzuspeisenden Energie wird in der Wärmepumpe elektrische Energie eingesetzt, um die Temperatur auf ein höheres Niveau zu bringen.

Diese zusätzlich eingebrachte Energie muss entsprechend dem Verbrauch aufgebracht werden und mindert den Ertrag durch den Wärmeverkauf um den Betrag der einzusetzenden Mittel für Strom. Die Ermittlung der hierfür anzusetzenden Kosten hängt von den in Tabelle 5-14 aufgeführten Faktoren ab.

Einflussfaktor	Nomenklatur	Einheit	Wert
Vollbenutzungsstunden	t_{VB}	$\frac{h}{a}$	1.900
Pumpenleistung	P_{TP}	kW	Gl. 5-14
Verdichterleistung	P_V	kW	Kap. 5.2
Strompreis (Brutto)	k_{Strom}	€	variabel

Tabelle 5-14: Einflussfaktoren zur Berechnung der Kosten für die Wärmepumpe

Die Berechnung der Aufwendungen für Strom erfolgt nach Gleichung 5-12:

$$K = \frac{W_V * t_{VB} + P_{TP} * t_{VB}}{k_{Strom}} \quad [\text{Gl. 5-12}]$$

Die Vollbenutzungsstunden, bezeichnet als die Stunden, in denen ein Wärmeerzeuger mit maximaler Leistung arbeitet, sind empirisch ermittelt und im Mittel aus dem „Kennziffernkatalog für die Energiewirtschaft“ [35] zu entnehmen. Dabei wurden deutschlandweit die Verbrauchskennwerte für Wärme von Ein- und Mehrfamilienhäusern, Krankenhäusern und Schulen arithmetisch gemittelt und der Wert als Anhalt für die Berechnung herangezogen. Zusätzlich zu diesen Aufwendungen müssen noch die einmaligen Kosten für die Tiefenpumpe, Wärmepumpe, Verrohrung, Installation und sonstigem Zubehör aufgebracht werden.

5.3.3 Tiefenpumpe

Die Tiefenpumpe fördert das Thermalwasser aus der Tiefe an die Erdoberfläche. Für die Auslegung der Tiefenpumpe, sind neben der Höhendifferenz H des dynamischen Wasserspiegels zur Geländeoberkante, noch die Druckverluste im Wärmetauscher Δp_V der Wärmepumpe (Verdampfer) zu betrachten. Die erforderliche Druckerhöhung Δp_{TP} wird nach Gleichung 5-13 ermittelt.

$$\boxed{\Delta p_{TP} = \Delta p_V + \rho_{TW} * g * H} \quad [\text{Gl. 5-13}]$$

Die Druckverluste können nach von Baatz [36] durchgeführten Messungen mit 2 Bar angesetzt werden.

Die mit H bezeichnete Höhendifferenz des dynamischen Wasserspiegels hängt im Wesentlichen von vier Faktoren ab:

- geförderter Thermalwasserstrom
- Durchlässigkeit des Reservoirs
- Reibungsverluste
- Stoffparameter des Thermalwassers.

Als dynamischer Wasserspiegel wird ein konstanter Wert von 200 Metern unter GOK angenommen¹. Die Dichte des Thermalwassers wird den Berechnungen aus Kapitel 5.2 entnommen.

Die erforderliche Druckerhöhung nach Gleichung 5-13 beträgt also:

$$\begin{aligned} \Delta p_{TP} &= \Delta p_V + \rho_{TW} * g * H \\ &= 2\text{bar} + 997,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 200\text{m} = \underline{\underline{21,57\text{bar}}} \end{aligned}$$

¹ Vergleiche Dissertation von Köhler, Silke [37], Seite 164

Den Einfluss von dynamischen Wasserspiegel, Temperatur, Druckverlusten und der Fördermenge auf die erforderliche Pumpenleistung P_{TP} wird in Abbildung 5.9 gezeigt.

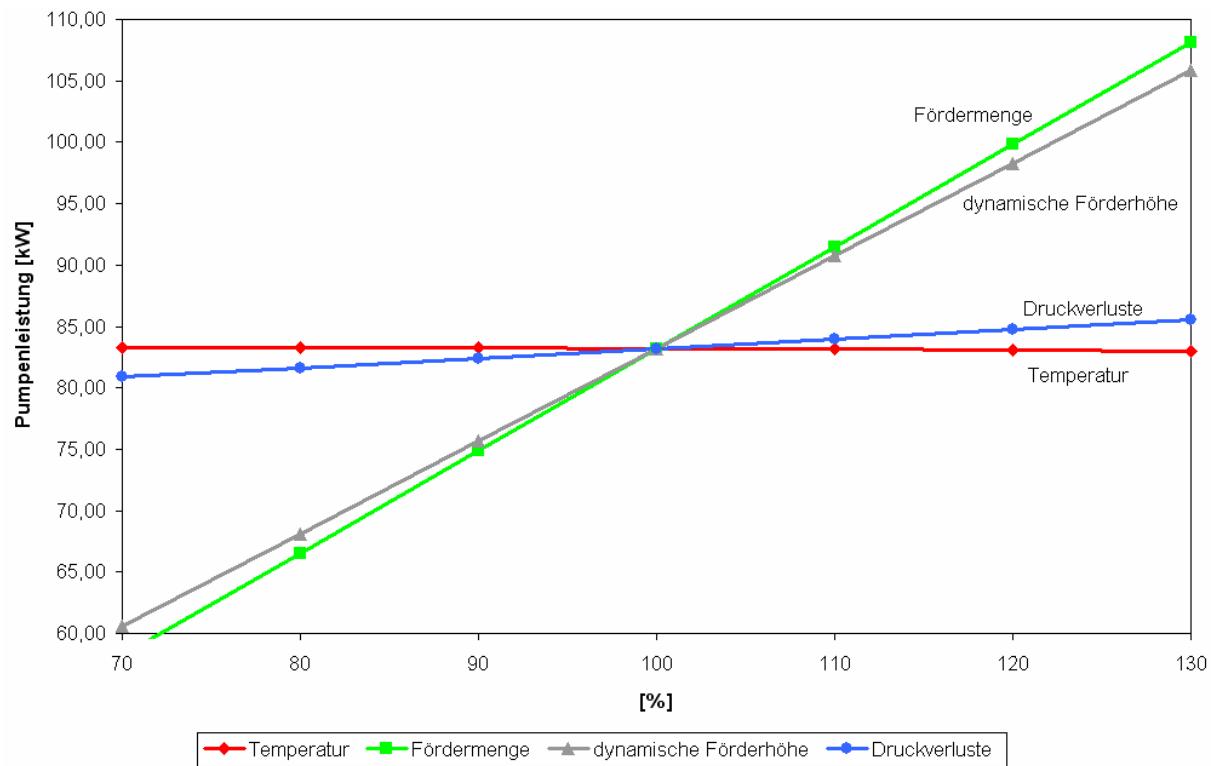


Abbildung 5.9: Sensitivitätsstudie der Tiefenpumpe
Basis bei 200 m unter GOK, 100m³/h Fördermenge bei 25 °C,
konstante Druckverlusten im Verdampfer von 2 bar

Die erforderliche Pumpenleistung P_{TP} kann nach Gleichung 5-14 errechnet werden.

$$P_{TP} = \frac{\Delta p_{TP} * \dot{V}_{TW}}{\eta_{is} * \eta_{el}}$$

[Gl. 5-14]

Mit der in Gleichung 5-13 berechneten Druckerhöhung, einer Förderrate von $100 \frac{m^3}{h}$

und mit einem Pumpenwirkungsgrad $\eta_{is} * \eta_{el} = 0,72$, ergibt sich nach Gleichung 5-14 eine erforderliche Pumpenleistung von:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{21,57 \text{ bar} * 100 \frac{m^3}{h}}{0,72} \\
 &= \frac{21,57 * 10^5 \text{ Pa} * 100 \frac{m^3}{3600s}}{0,72} \\
 &= \underline{\underline{83,22 \text{ kW}}}
 \end{aligned}$$

Ebenso lässt sich die erforderliche Pumpenleistung aus dem Datenblatt für Pumpen des VDI²-Wärmeatlas herauslesen, wie Abbildung 5.10 zeigt.

² VDI: Verein Deutscher Ingenieure

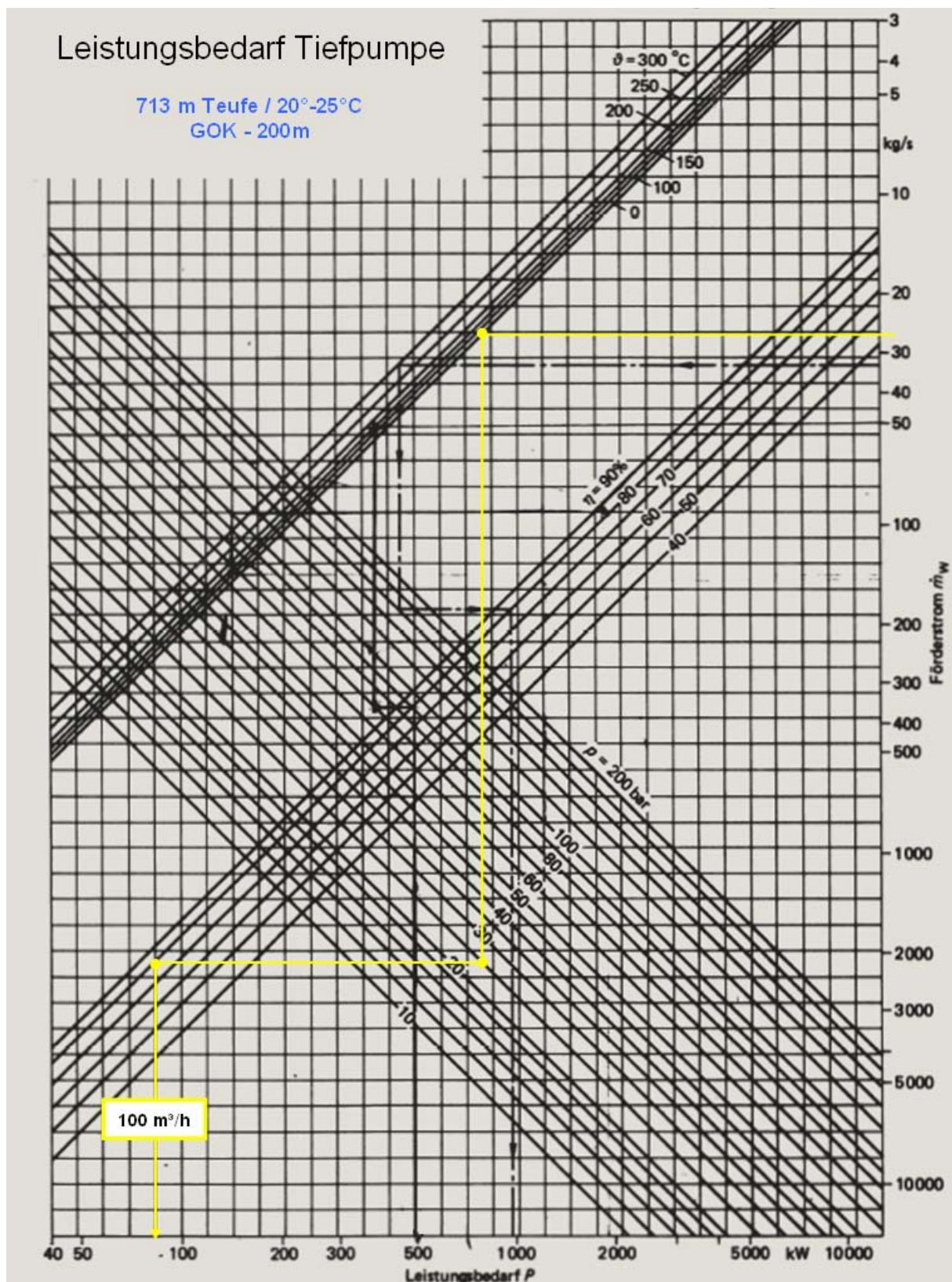


Abbildung 5.10: Auslesen des Leistungsbedarfs für die Tiefpumpe aus dem Datenblatt [38]

Für die Ermittlung der einmaligen Anschaffungskosten in Abhängigkeit der erforderlichen Pumpenleistung bzw. Fördertiefe liegen die Angebote der Herstellerfirmen Lowara und Grundfos zugrunde (siehe Tabelle 5-15).

Hersteller	Tiefe [m]	Preis [€]
Lowara	36	5000
Lowara	73	7.800
Lowara*	110	10.800
Lowara	146	11.900
Grundfos	150	13.200
Grundfos	160	15.100
Grundfos	170	14.200
Grundfos	180	14.500
Lowara	184	15.700
Grundfos	190	17.000
Grundfos	200	17.200
Lowara	220	17.900
Lowara	257	19.500

*Bezugspunkt

Tabelle 5-15: Preisangebote für Tiefenpumpen (2007)

Die in Tabelle 5-15 genannten Preise, beziehen sich auf einen Förderstrom von $100 \frac{m^3}{h}$.

Aufgetragen in ein Diagramm, lässt sich mittels einer potentiellen Entwicklung der Kosten, der Kostenexponent α ermitteln. Die Kostenkurve für die tiefenabhängige Betrachtung und der sich ergebende Kostenexponent α zeigt die Abbildung 5.11. Ebenso sind die Preiskurven abweichender Förderströme aufgetragen.

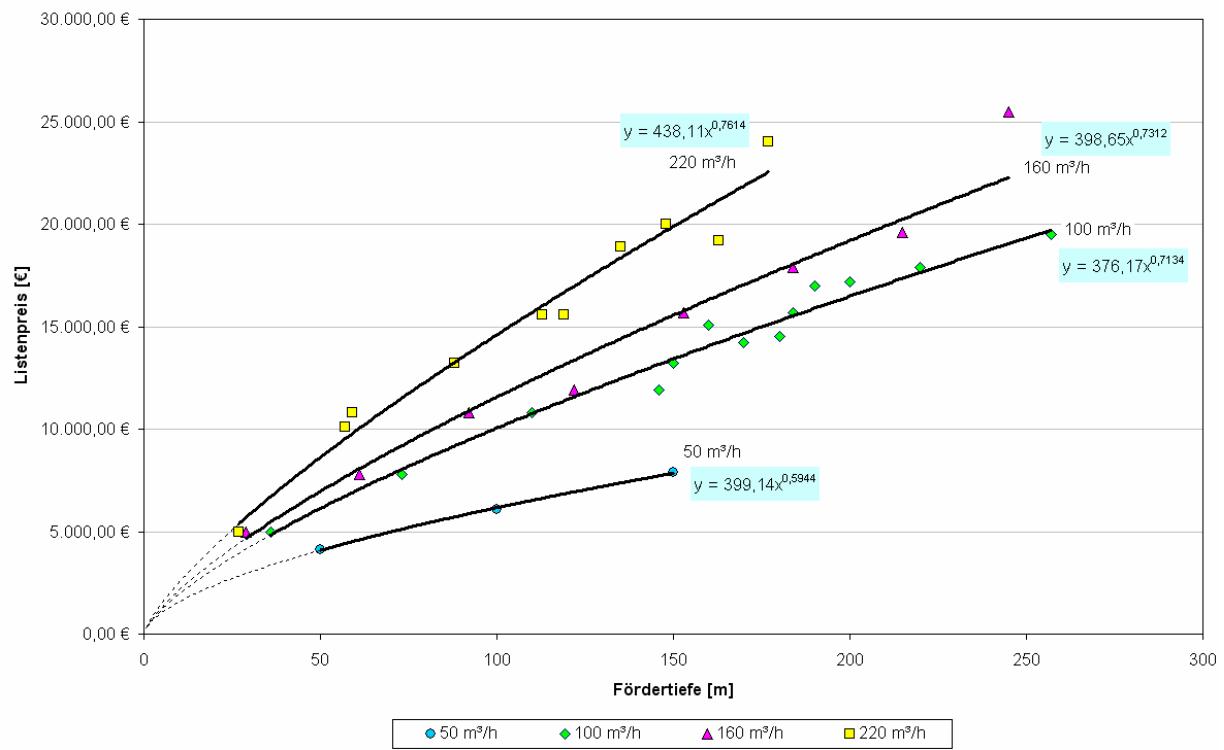


Abbildung 5.11 Kostenkurven von Tiefenpumpen in Abhängigkeit der Fördertiefe für verschiedene Fördervolumen

Für die Preisfunktion wird die Annahme getroffen, dass zu einem Basiswert X_Y , die spezifischen Kosten einer zugeordneten Fördertiefe C_Y anhand einer Exponentialfunktion dargestellt werden können. Als bekannter Bezugspunkt aus dem Angebot mit der Größe X_w und den dazugehörigen spezifischen Kosten C_w , dienen diese zur Berechnung der spezifischen Kosten. Die Berechnung der spezifischen Kosten erfolgt nach Gleichung 5-15 [39].

$$C_Y = C_w * \left(\frac{X_Y}{X_w} \right)^\alpha \quad [\text{Gl. 5-15}]$$

mit:

$$X_w = 110m$$

$$C_w = 10.800\text{€}$$

$$\alpha = 0,71$$

$$X_Y = H = 200m$$

$$C_Y = C_w * \left(\frac{X_Y}{X_w} \right)^\alpha = 10.800\text{€} * \left(\frac{200m}{110} \right)^{0,71} = \underline{\underline{16.500\text{€}}}$$

5.3.4 Wärmepumpe

Die Ermittlung der spezifischen Kosten für die Anschaffung der Wärmepumpe ergibt sich in ähnlicher Weise, wie dies zuvor bereits für die Tiefenpumpe beschrieben wurde. Die erforderlichen Eingangsparameter ergeben sich aus den, in vorherigen Kapiteln durchgeführten Berechnungen. Die dabei errechnete erforderliche Verdichterleistung ist ausschlaggebend für die Abschätzung der Beschaffungskosten der Wärmepumpe.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Hauswärmepumpen (HWP), findet die Herstellung von Großwärmepumpen (GWP) nicht in Serienfertigung oder Massenproduktion statt. Vielmehr müssen Großwärmepumpen projektspezifisch konzipiert werden. Daher ist eine generelle Aussage über die Anschaffungskosten nur schwerlich zu treffen und kann nur anhand bestehender Anlagen abgeschätzt werden. Für die Abschätzung der Kosten, wurden Angebote der Firma Zent-Frenger eingeholt. Die Leistungsdaten und Preise (siehe Tabelle 5-16) wurden dann in einem Diagramm dargestellt (Abbildung 5.12) und die Kostenkurve ermittelt.

Leistung [kW]	Preis [€]
33	87.900,00
41	95.000,00
49	97.200,00
62	107.500,00
75	109.000,00
87	114.000,00
107	122.500,00
130	128.900,00
173	142.700,00
216	154.200,00
265	166.200,00

Tabelle 5-16: Preisangebot für Wärmepumpen

der Firma Zent-Frenger (2007)

Zusätzlich wurden zum Vergleich, die Kostenentwicklung und spezifischen Kosten von Hauswärmepumpen dargestellt. Wie zu sehen ist, ist der Übergang von der Hauswärmepumpe zur Großwärmepumpe nicht fließend. Vielmehr ist ein Sprung der Kosten von mehr als 60.000,00 € zu erkennen. Dies ist zum einen mit dem Einsatzbereich der Wärmepumpe zu begründen. Weiterhin sind die Entwicklungskosten für Großwärmepumpen um ein vielfaches höher, da hier zum Teil technische Grenzen (z.B. Verdichterleistung) erreicht werden.

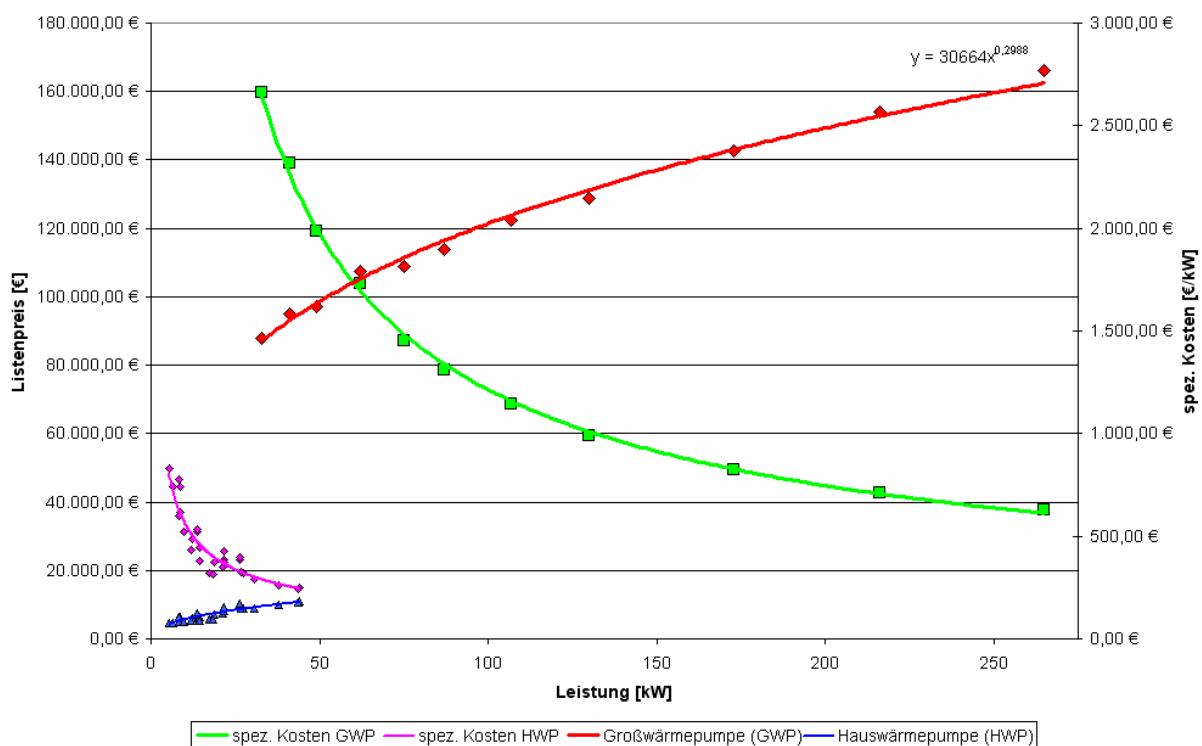


Abbildung 5.12 Kostenkurve der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Verdichterleistung

Bei höherem Leistungsbedarf müssen unter Umständen mehrere Wärmepumpen in Kaskade geschaltet werden. Hierzu ist jedoch eine projektspezifische Produktanalyse notwendig.

Für die in dieser Arbeit abzuschätzenden Kosten ergibt sich nach Auswertung der Abbildung 5.12 ein Kostenexponent von $\alpha = 0,30$.

Als Bezugswerte werden angenommen:

$$X_w = 173kW$$

$$C_w = 142.700,00\text{€}$$

Nach Gleichung 5-15 und den in Gleichung 5-19 errechnetem Leistungsbedarf, ergibt sich ein Anschaffungspreis von:

$$\begin{aligned} C_Y &= C_w * \left(\frac{X_Y}{X_w} \right)^\alpha \\ &= 142.700,00\text{€} \left(\frac{543kW}{173kW} \right)^{0,30} \\ &= \underline{\underline{201.100\text{€}}} \end{aligned}$$

Der Preis beinhaltet das Kompaktmodul Wärmepumpe mit Verdichter, Wärmetauscher und Drossel, sowie die Steuerung/Regelung und sämtliche Anschlüsse ohne Mehrwertsteuer.

6 Bohrung

Die Gliederung dieses Kapitels wird in Abbildung 6.1 gezeigt.

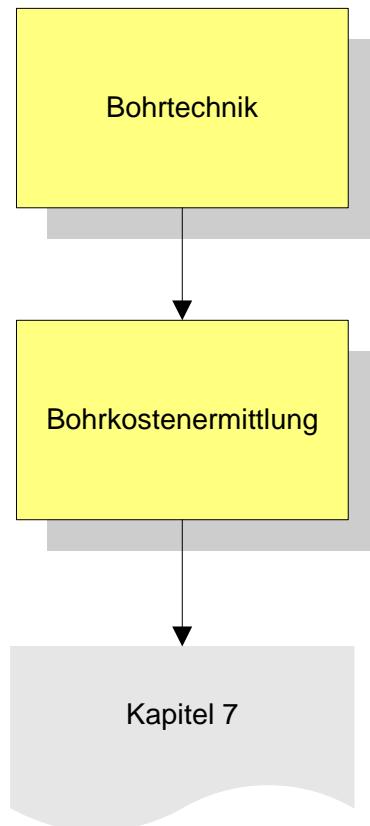


Abbildung 6.1: Gliederung des Kapitel 6 „Bohrung“

Für die Ermittlung der Daten in diesem Kapitel werden zunächst die Bohrtechniken grundsätzlich erläutert. Im Anschluss wird der Bohrlochbergbau in bestehenden Grubensystemen betrachtet und im letzten Abschnitt werden die Kosten für Bohrungen mit einer Teufe von 200 bis 1000 Meter behandelt.

6.1 Bohrmodelle

Zur Vermeidung eines thermischen Kurzschlusses wird bei der Abteufung von Geothermie-Bohrungen ein Abstand zwischen der Förderbohrung und der Reinjektionsbohrung gewählt. Der Abstand beträgt in der Regel 2000 Meter. Dieser kann jedoch je nach Anlage unterschiedlich ausgelegt werden und zum Beispiel abhängig vom Förderstrom oder den untertägigen Temperaturverhältnissen sein. In jedem Fall ist die durchzuführende Tiefenbohrung projektspezifisch in ihrer Art zu wählen. Hierfür stehen drei Varianten zur Verfügung:

- Zwei Vertikalbohrungen
- eine Vertikal- und eine Ablenkbohrung
- Zwei Ablenkbohrungen

Die verschiedenen Möglichkeiten sollen im Folgenden beschrieben und dargestellt werden.

6.1.1 Zwei Vertikalbohrungen

Bei dem Modell der zwei Vertikalbohrungen, werden an zwei räumlich voneinander getrennten Punkten je eine Bohrung auf die Zielteufe erstellt. Zum einen handelt es sich dabei um den Platz für die Förderbohrung und zum anderen ist eine Bohrung für die Reinjektion vorgesehen. Ein Modell der zwei Vertikalbohrungen ist in der Abbildung 6.2 zu sehen.

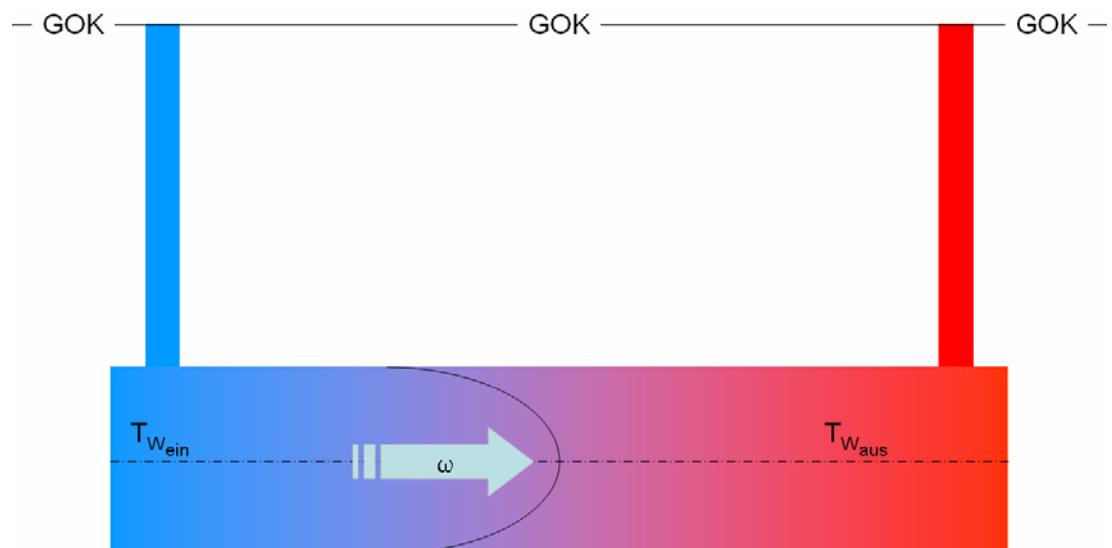


Abbildung 6.2: Modell zweier Vertikalbohrungen mit räumlicher Trennung

Merkmale der Vertikalbohrung:

- Zwei Bohrplätze
- Lange Verbindungsleitung Übertage
- Kurze Gesamtbohrstrecke
- Keine Richtbohrkosten

6.1.2 Vertikal- und Ablenkbohrung

Bei der Vertikalbohrung in Verbindung mit einer Ablenkbohrung, werden von einem Bohrplatz aus, zunächst zwei Bohrungen abgeteuft. Am Ort der Ablenkung, dem Kick-off-point (KOP) trennen sich die beiden Bohrungen und eine der beiden wird in Richtung des zweiten Bohrziels abgelenkt. Dies gibt die Abbildung 6.3 wieder.

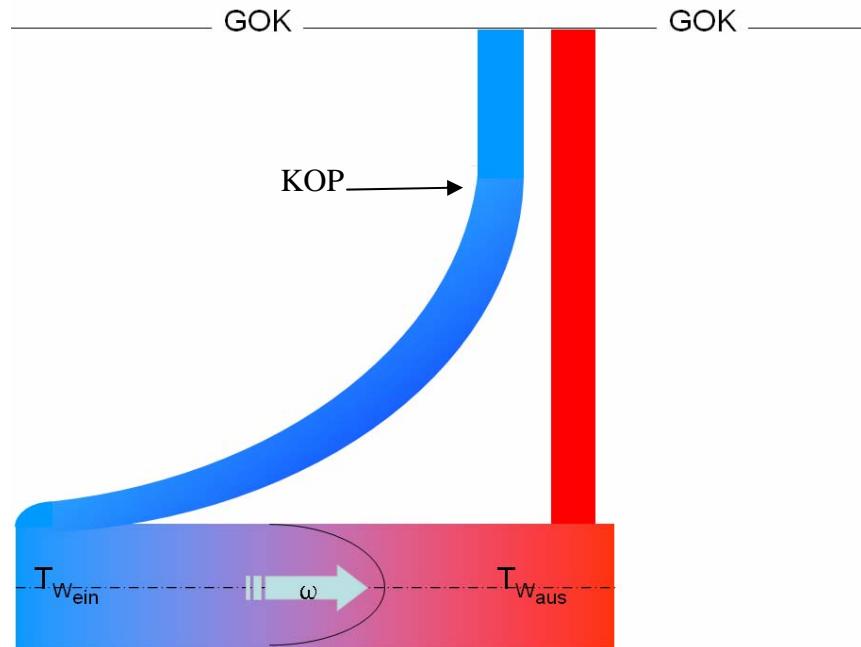


Abbildung 6.3: Modell der Vertikal- und Ablenkbohrung von einem Bohrplatz

Merkmale der Vertikalbohrung in Verbindung mit der Ablenkbohrung:

- Ein Bohrplatz
- Kurze Verbindungsleitung Übertage
- Lange Gesamtbohrstrecke
- 1 x hohe Richtbohrkosten

6.1.3 Zwei Ablenkbohrungen

Wie schon bei der Vertikalbohrung in Verbindung mit der Ablenkbohrung, werden von einem Bohrplatz zwei Bohrungen zu den Zielen hin abgeteuft. Bei der Variante der doppelt abgelenkten Bohrungen jedoch, wird nach dem Erreichen des KOP zu beiden Seiten hin abgelenkt. Der Bohrplatz kann somit frei gewählt werden und liegt zum Beispiel an einem zentralen Punkt zwischen der Reinjektions- und der Förderbohrung. Eine Modelldarstellung zeigt die Abbildung 6.4.

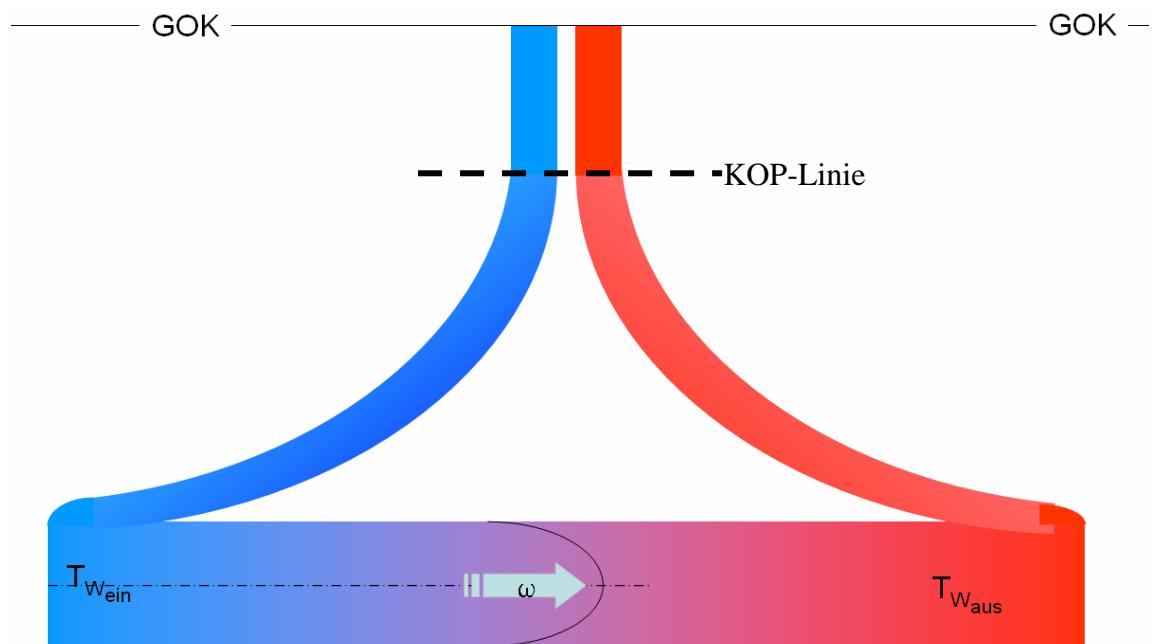


Abbildung 6.4.: Modell von zwei Ablenkbohrungen von einem Bohrplatz

Merkmale der zwei Ablenkbohrungen:

- Ein Bohrplatz
- Kurze Verbindungsleitung Übertage
- Mittlere Gesamtbohrstrecke
- 2 x moderate Richtbohrkosten

Von allen dargestellten Modellen kann es weitere Abwandlungen geben. Aufgrund der verschiedenen örtlichen Gegebenheiten, insbesondere bei geothermischen Vorkommen und Nutzungsformen (Aquifere, Minenwasser, etc.), muss dies individuell bestimmt werden.

6.2 Bohrlochbergbau in Grubensystemen

Bei Bohrungen in bestehende Hohlräume in der Tiefe sind eine gründliche Planung auf der Grundlage der vorhandenen Risswerke, eine ausgefeilte Technik und die Möglichkeit einer ständigen Korrektur des Bohrverlaufes während der Bohrung Grundvoraussetzungen für die spätere Nutzung des Bohrloches. Daher wird in diesem Abschnitt besonders auf die Technik und das untertägige Gebäude eingegangen.

6.2.1 Richtbohrsysteme

Die angestrebte Abteufung eines Bohrloches auf ein bestehendes untertägiges Streckensystem eines stillgelegten Bergwerkes bedarf einer besonderen Technik. Die Größe des Ziels ist im Verhältnis zur zurückgelegten Strecke verschwindend klein und muss bis auf den Meter genau getroffen werden. Um dies gewährleisten zu können, ist es erforderlich ein Bohrsystem zu verwenden, welches im Verlauf der Bohrung bei zunehmender Abteufung immer wieder nachsteuert und dabei die zielgenaue Richtung beibehält.

Beispielhaft hierfür genannt seien die Systeme der Firma Smart Drilling GmbH, die mit ihren ZBE¹-Bohrsystemen die Möglichkeit haben alle gewünschten Neigungen zu bohren. Selbst horizontale zielgenaue Bohrungen sind mit dem selbständig steuernden vertikalen Bohrsystem möglich. Das System wird in Abbildung 6.5 dargestellt.

¹ ZBE = Zielbohrseinheit

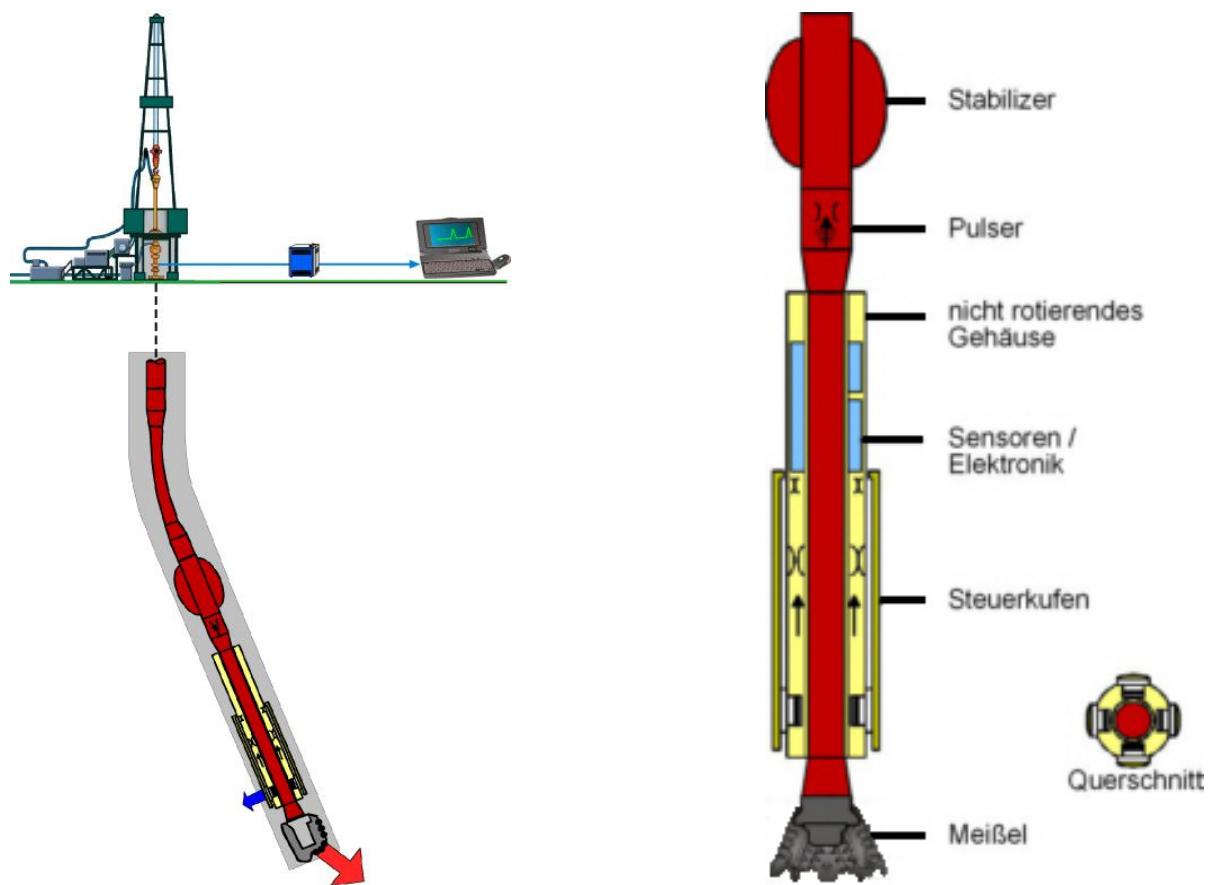


Abbildung 6.5: SCOUT 2000 RSS - steuerbares "closed-loop" Rotary Steerable System (RSS) der Firma Smart Drilling GmbH [40]

6.2.2 Der Zielraum

Während der Abteufung der Pilotbohrung erreicht das Bohrgerät zunehmend den Zielraum. Bei Erreichen des Zielraumes kommt es zu einem plötzlichen Durchbrechen des Bohrkopfes durch die Decke des Gebäudes². Nachdem die Zielteufe erreicht ist, wird mittels einer herabgelassenen Kamera der Hohlraum untersucht und vermessen. Die Daten sind für die spätere Aufweitung und Verrohrung, sowie für die Einbringung des „Slotted Liner“³ (siehe Abbildung 6.7) notwendig.



Abbildung 6.6: Bild eines Slotted Liner [41]

² untertägiger Hohlraum

³ Slotted Liner: geschlitztes Rohr zur Sammlung und Förderung des Grubenwasser

Das Ergebnis einer solchen Zielbohrung zeigt die Abbildung 6.7. Dabei wurde nach Abschluss der Bohrarbeiten eine Unterwasserkamera über das Bohrloch herabgelassen, um die örtlichen Gegebenheiten (Zustand des Gebäudes, Verschmutzungen, etc.) festzustellen. Zu sehen ist die Bruchkante an der Gebäude-decke einer Bohrung in einen Hohlraum (Streckenabschnitt) in 223 m unter GOK.

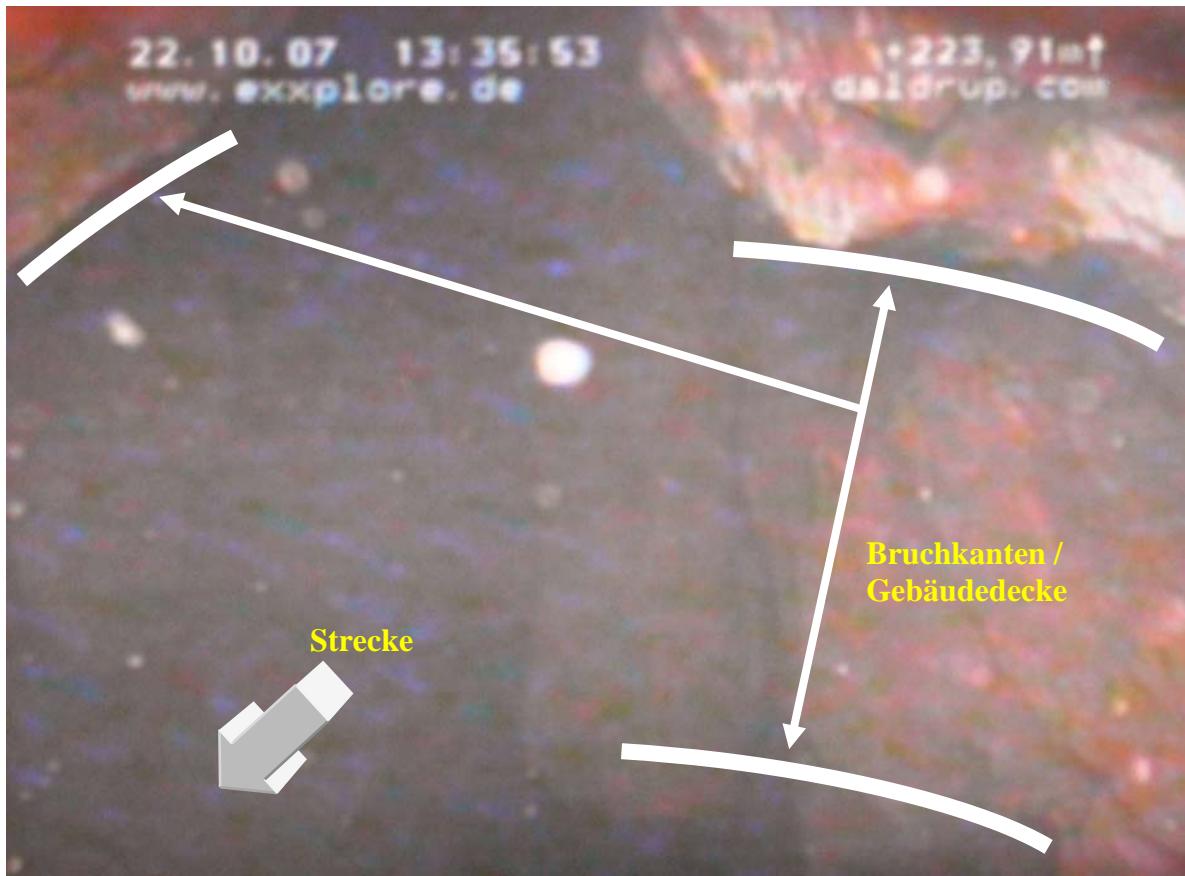


Abbildung 6.7: Kameraaufzeichnung der Durchbruchkante in einem bestehenden Streckenabschnitt in 223m unter GOK

Die schematische Darstellung des Durchbruches in einen Hohlraum kann der Abbildungen 6.8 entnommen werden. Neben der unterschiedlichen Bauweise der Strecken, ist auch mit Überresten aus dem Bergbaubetrieb zu rechnen. So kann es durchaus möglich sein, dass Schrott, Ablagerungen, Schlamm und Gesteinsansammlungen aus Einbrüchen, den Lagerstättenraum des Wassers verringern oder das Wasser durch die Sedimente verunreinigt ist. Dies ist im Vorfeld jedoch nicht zu ermitteln. Ebenso kann ein Ausbau der Strecke mit Stahlverstrebungen und Blechen unter Umständen für Schwierigkeiten beim Bohrvorgang sorgen.

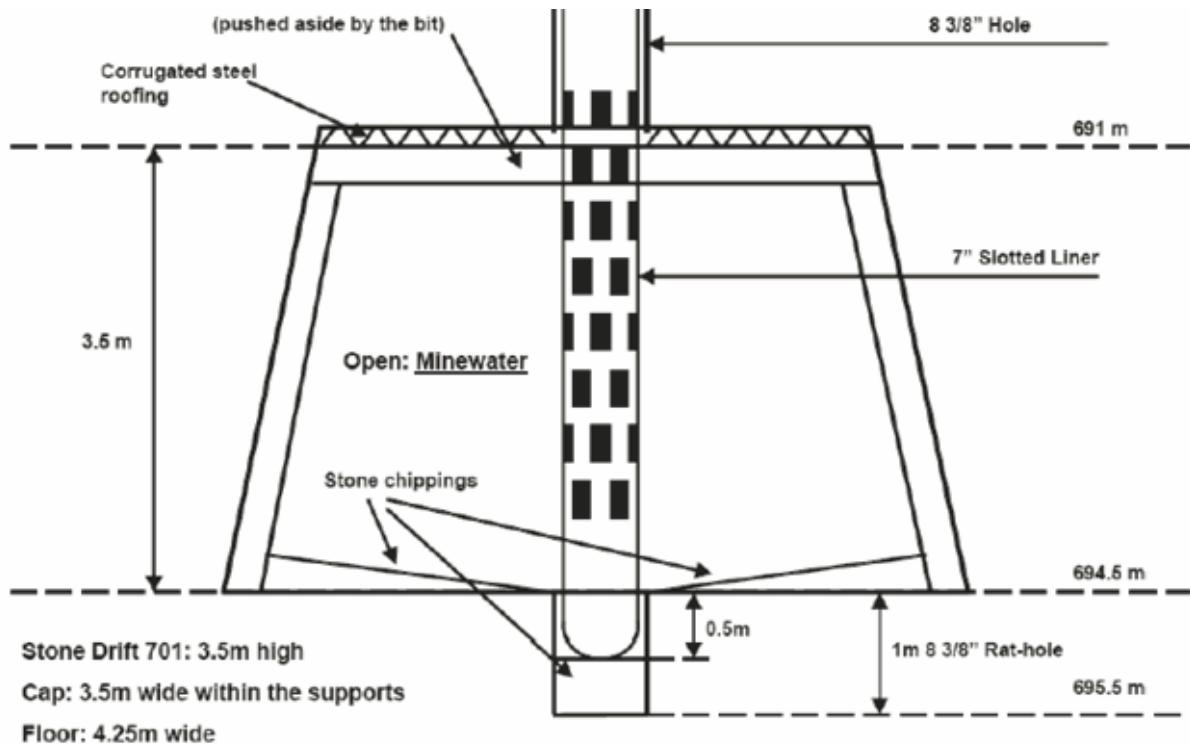


Abbildung 6.8: schematische Darstellung eines Durchbruches in ein altes Grubengebäude [41]

6.2.3 Komplettierung⁴

Nach der Abteufung der Pilotbohrung und anschließenden Erkundung, muss das Bohrloch zunächst aufgeweitet und anschließend verrohrt werden. Bei der konventionellen Art der Bohrlochabteufung, fängt man zunächst mit einem großen Durchmesser an und verringert diesen mit zunehmender Tiefe. Es gibt jedoch auch die Technik, dass das Bohrloch mit einem durchgängigen Bohrlochdurchmesser abgeteuft wird. (siehe Abbildung 6.9)

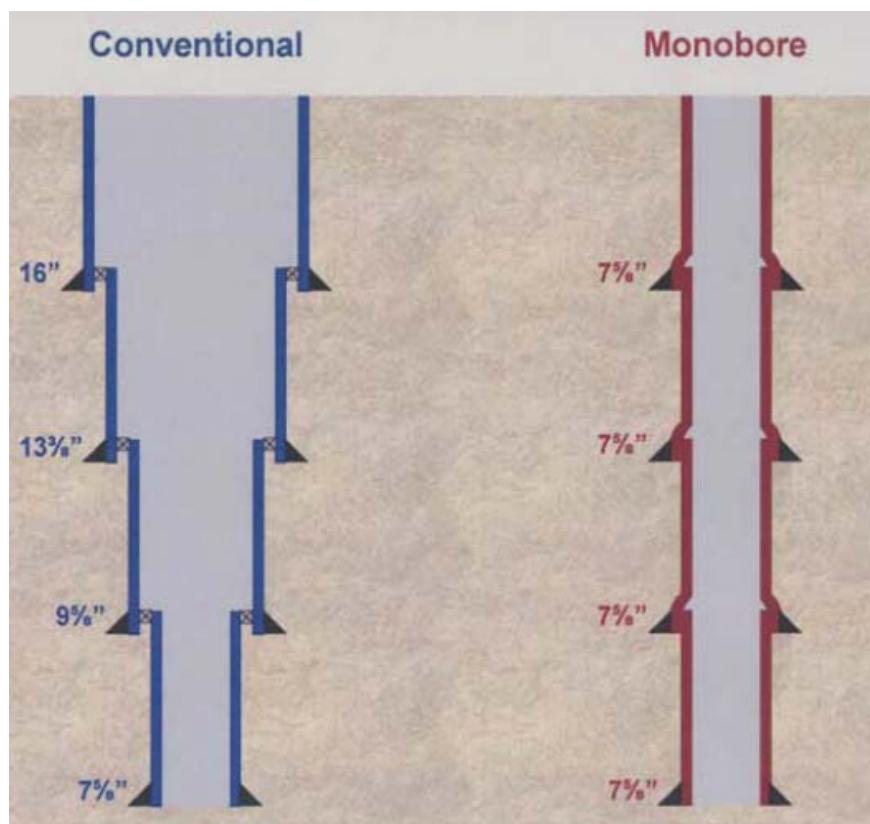


Abbildung 6.9: Gegenüberstellung der Bohrungsdurchmesser [43]

Während der Einbringung der Verrohrung wird das Bohrloch zementiert und die Rohre mittels sogenannter Packer verbunden.

⁴ Als Komplettierung bezeichnet man das Setzen von Stahlrohren bereits während des Aufbohrens zum Schutz des Bohrloches und die Zementation als Massenanschluss des Bohrloches mit dem Gebirge und zum Schutz der Casings (Bohrrohre) vor Korrosion

6.3 Das Bohrgerät und die technische Ausstattung

Die für die Geothermie und besonders Tiefengeothermie verwendete Technik ist zum größten Teil aus den Techniken der Erdöl- und Erdgasindustrie entnommen und weiterentwickelt worden. Das Einsatzgerät richtet sich dabei nach der Bohrungsteufe und dem Einsatzbereich. Tabelle 6-1 zeigt eine Auswahl verschiedener Bohrgeräte und deren Einsatzbereiche.

Fabrikat	Hakenlast	Einsatzbereich
Hersteller: IDECO, Texas		
H-30-FD	73,00 to	Tiefbohrungen bis 2000m, Zielbohrungen, großdimensionierte Brunnenbohrungen
Hersteller: Celler Maschinenfabrik, Gebrüder Schäfer, Celle		
CM 810.1	46,00 to	Tiefbohrungen bis 1000m, großdimensionierte Brunnenbohrungen
Hersteller: Wirth Maschinen und Bohrgerätefabrik GmbH, Erkelenz		
B3A	35,00 to	Tiefbohrungen bis 800 m, Trockenbohrungen
B2A	28,00 to	Tiefbohrungen bis 600 m, Trockenbohrungen
B1A / B2A	19,00 to	Tiefbohrungen bis 750 m, verrohrte Trockenbohrungen

Tabelle 6-1: Auszug aus dem Gerätelpark der Fa. Daldrup und Söhne AG [22]

Die notwendige weitere Ausstattung für die Erstellung einer Bohrung, zeigt die nachfolgende Aufstellung und kann je nach Projekt und ausführende Bohrfirma variieren:

- Spülsystem
- autarke Energieversorgung
- Mess- und Steuergeräte
- Sicherheitseinrichtungen und –ausstattung
- Aufbau- und Transportgerätschaften
- Wohn-/Arbeits-/Sanitärcontainer

6.4 Datenherkunft

Die nachfolgenden Daten beziehen sich allesamt auf die bereits durchgeführten Bohrungen aus dem *Minewater Project* der Stadt Heerlen, Niederlande. Die dort ausführende Bohrtechnik-Firma ist die Daldrup & Söhne AG.

Die Daten wurden als vertrauliche Informationen der Firma Daldrup & Söhne AG für die Bearbeitung in der Diplomarbeit zur Verfügung gestellt.

Die Betrachtungen der geothermischen Nutzung der untertägigen Wässer im Bereich Hausham sind in Anlehnung an das bestehende Projekt der Stadt Heerlen sowohl in der Tiefe, als auch in Art und Umfang ähnlich. Daher können diese für eine erste Abschätzung, beziehungsweise Machbarkeitsstudie, für das Pechkohlenbergwerk Hausham herangezogen werden [35].

6.5 Bohrkosten

Für die Betrachtung der Bohrkosten sind zunächst nachfolgende Tatsachen zu betrachten, um die Komplexität dieses Aufgabengebietes grob zu umschreiben.

Die Kosten hängen von verschiedenen Faktoren ab:

- Teufe
 - In welcher Tiefe liegt die Bergwerksstrecke / der Aquifere?
 - Wie tief soll gebohrt werden?
- Gesteinsformationen
 - Wie ist das Grund- und Deckgebirge beschaffen?
 - Welche Gesteinsformen liegen vor?
- Schüttung
 - Welchen Durchmesser soll die Bohrung haben?
- Bohrfortschritt
 - Wie schnell kann gebohrt werden?
 - Ist Reparaturzeit eingeplant?
 - Wie hoch ist der Verschleiß?
- Unvorhergesehene Probleme
 - mit übertätigem Gerät: Pumpen, Bohrgerät, etc.
 - mit untertätigem Gerät: Meißel, Sonden, Rohre etc.

Zusätzlich zu den äußereren Faktoren, die die Bohrkosten beeinflussen können, kann man unterscheiden zwischen [36]:

- Vorbereitungskosten
 - Planungskosten
 - Bereitstellungskosten (Gebäude, Infrastruktur, etc)
- Tiefenbezogenen Kosten
 - Zementierung
 - Drilling Fluid
 - Bohrer / sonstige Gerätschaften
 - Bohrkleinentsorgung⁵
- Einmalige Kosten
 - Bohrlochausstattung
 - Casing⁶ / Liner⁷
- Zeitbezogene Kosten
 - Bohreinheit
 - Bohrlochmessungen

Da die Bohrkosten individuell und projektbezogen ermittelt werden müssen, ist eine generelle Aussage zu den Bohrkosten nur schwerlich zu treffen. Jedoch wird aufgrund der Ähnlichkeit des Projektes in Heerlen und der Betrachtung in Hausham eine ähnliche Bohrkostenzusammenstellung angenommen.

Für die nachfolgende Ermittlung der spezifischen Bohrkosten wurden Daten der Bohrfirma Daldrup & Söhne AG verwendet, sowie Erkenntnisse aus dem Projekt-management des *Minewater Project* der Stadt Heerlen / Niederlande für die Betrachtung herangezogen.

⁵ Bohrklein: Als Bohrklein bezeichnet man das vom Bohrmeißel zertrümmerte und zerkleinerte Gestein

⁶ Casing: Bohrrohr, Mantelrohr

⁷ Liner: Kernrohr

6.5.1 Angebot Fa. Daldrup & Söhne AG

Für die Planungskosten liegen zwei Angebote zugrunde. Sie umfassen die schlüsselfertige Herstellung zweier Bohrungen.

Die Angebote beziehen sich auf zwei unterschiedliche Standorte und werden nachfolgend bezeichnet mit:

- Heerlerheide 1, Lokation 1b
- Heerlerheide 2, Lokation 2

Vertraglich festgelegt war die schlüsselfertige Bohrung von 2 Bohrungen bis zu einer Tiefe von 700 m in die ehemalige Minenanlage des Kohlenbergwerkes Heerlen, sowie einem anschließenden Pumpversuch bis zu 100 m³ je Stunde.

Die prozentuale Aufteilung der Kosten ist in Abbildung 6.10 dargestellt und bezieht sich auf die Angebotssummen der Angebote für Heerlerheide 1 und 2 der Firma Daldrup & Söhne AG an die Gemeinde Heerlen, Niederlande. [41]

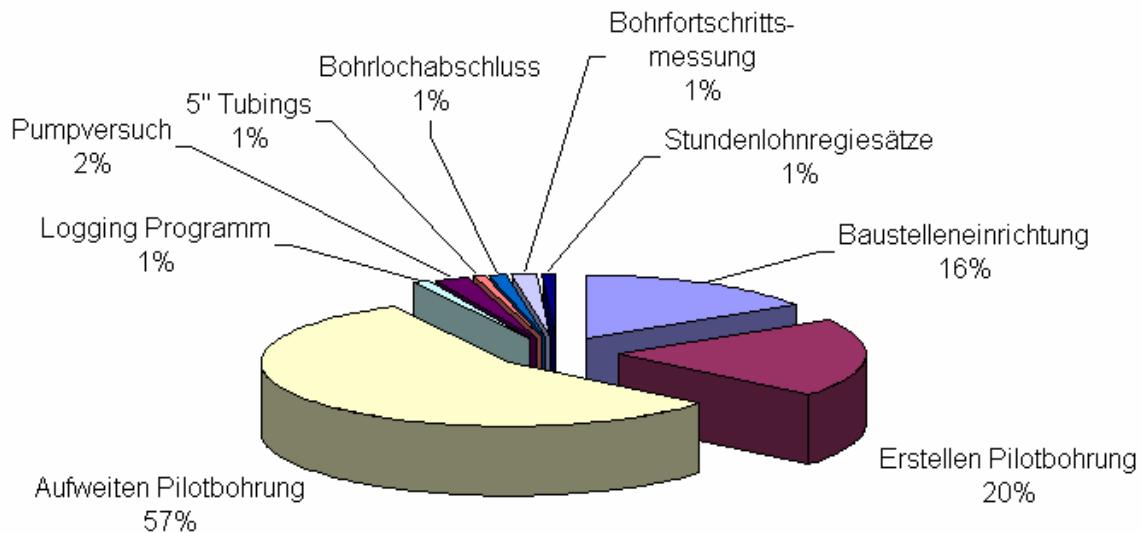


Abbildung 6.10: Aufteilung der Bohrkosten nach Fa. Daldrup & Söhne AG [35]

6.5.2 Bohrkostenväldierung

Um die Bohrkostenaufteilung der Firma Daldrup & Söhne AG überprüfen zu können, wurde sie mit Daten von Prof. Dr. Gunter Schaumann von der Fachhochschule Bingen verglichen.

Der Vergleich der Bohrkosten nach *Daldrup* mit denen von *Schaumann* (vgl. Abbildung 6.11), ergibt eine auf den ersten Blick annähernd gleiche Aufteilung der Bohrkosten.

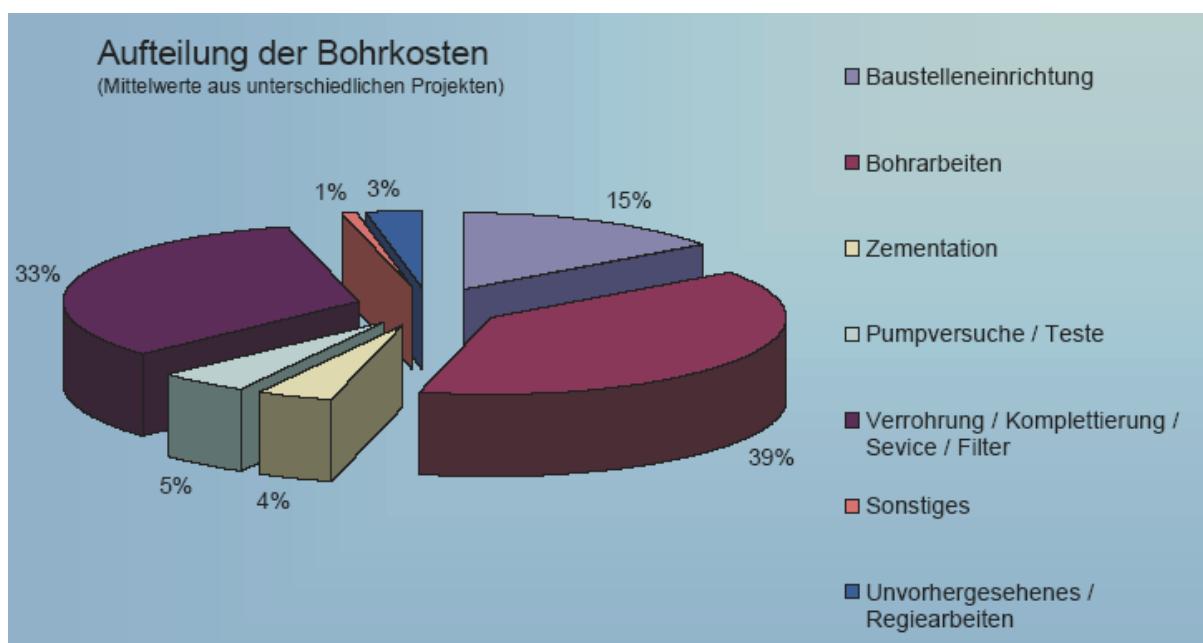


Abbildung 6.11: Bohrkostenaufteilung nach Prof. Dr. Gunter Schaumann [44]

Für die gemeinsame Betrachtung ist es notwendig, die einzelnen Betrachtungsparameter unter Umständen zusammenzufassen. So sind demnach unter den Bohrarbeiten bei *Schaumann* auch die Zementation und Verrohrung, sowie die Komplettierung zusammengefasst.

Bei der Aufteilung der Bohrkosten von *Daldrup* sind die Loggings und 5'' Tubings sowie die Bohrfortschrittsmessung zu den Pumpversuchen und Tests zusammengefasst.

In der gemeinsamen vergleichenden Betrachtung ergibt sich somit eine Abweichung von einem Prozent nach unten bei der Einrichtung der Baustelle und den Bohrarbeiten von *Schaumann* gegenüber *Daldrup*.

Die Annahmen zum Pumpversuch und sonstigen Tests im Bezug auf die Bohrung, sind bei beiden Aufstellungen gleich hoch.

Die Gegenüberstellung beider Bohrkostenaufteilungen ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

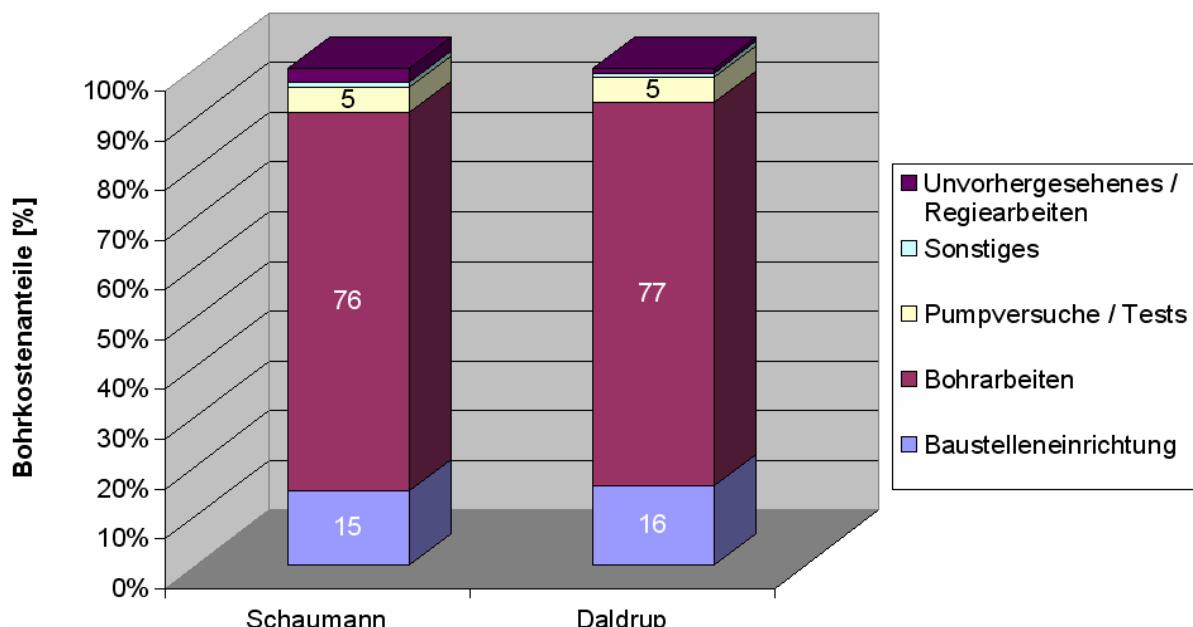


Abbildung 6.12: Validierung der Bohrkostenaufteilung

Es ergibt sich eine nahezu identische Aufstellung der Bohrkosten.

6.5.3 Preisfunktion

Eine generelle Aussage zu den Bohrungskosten in Abhängigkeit der Teufe zu machen ist insofern schwierig, da die Bohrkosten prinzipiell abhängig sind von verschiedenen Einflussfaktoren, wie bereits Eingangs dieses Kapitels beschrieben wurde.

In der Regel ist die Erstellung einer Pilotbohrung mit einem fixen Wert zu berechnen. Bei der anschließenden Aufweitung der Bohrung und Komplettierung ist jedoch ein genauer Aufschluss über geologische Verhältnisse im Bohrlochbereich notwendig. Weiterhin spielt die Schüttung zur Entnahme eine wichtige Rolle, da sich nach ihr der letztendliche Bohrdurchmesser richtet. Demnach bemessen sich auch das benötigte Material und die Werkzeugkosten.

Diese Faktoren gehen also unmittelbar in die Kostenberechnung der Bohrung ein.

Die Abschätzung der Bohrkosten erfolgt aufgrund von Angebotsdaten und tatsächlichen Kosten. Die Kostenkurve wurde aus den Angebotswerten der Tabelle 6-2 erstellt. Der Kostenexponent ist der Abbildung 6.13 zu entnehmen und die Berechnung der spezifischen Kosten erfolgt nach Gleichung 5-15.

	Angebot 1*	Angebot 2*	Angebot 3*	Bohrung HLN 1**	Bohrung HLN 2**	Bohrung HLN 3**
Teufe	660 m	660 m	650 m	250 m	250 m	400 m
				340 €/ m		
Pilotbohrung	224.400 €	224.400 €	221.000 €	85.000 €	85.000 €	136.000 €
Aufweitung & Komplettie- rung	635.700 €	627.900 €	617.500 €	331.800 €	362.700 €	443.700 €
spezifischen Kosten	963 €	951 €	950 €	1327 €	1451 €	1109 €
Gesamt	860.100 €	852.300 €	838.500 €	416.800 €	447.700 €	579.700 €

* [41], ** [42]

Tabelle 6-2: Kostenvoranschläge für Bohrungen und tatsächliche Bohrkosten

Zur Abschätzung der tiefenspezifischen Kosten wurden 3 Angebote der Firma Daldrup & Söhne AG, sowie die tatsächlichen Bohrkosten für drei getätigte Bohrungen des zweiten Bohrabschnittes in Heerlen / Niederlande zu Grunde gelegt.

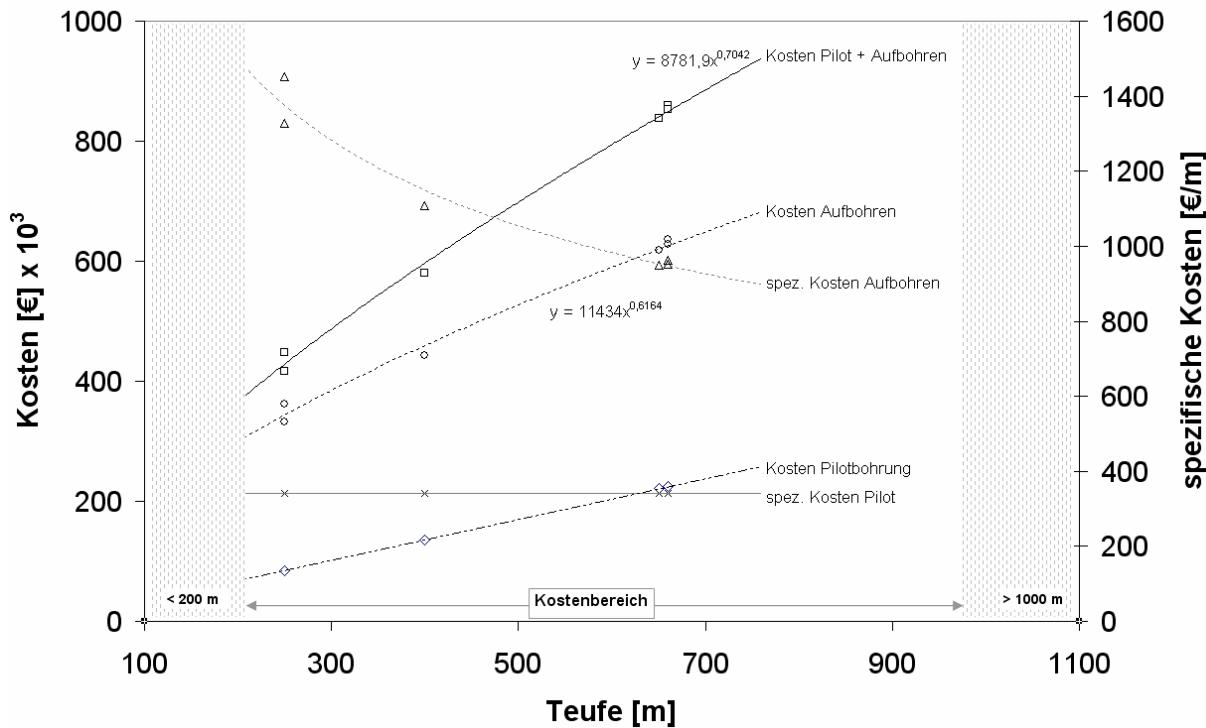


Abbildung 6.13: Kostenkurven zur Ermittlung des Exponenten; Kostenbezugspunkt bei 650 m

Als Bezugspunkte C_w und X_w wurden die Werte aus Angebot 3 mit $C_w = 617.500 \text{ €}$ und $X_w = 650 \text{ m}$ gewählt. Die Kosten für die Pilotbohrung fließen linear mit $K_{Pilot} = 340 \frac{\text{€}}{\text{m}}$ in die Berechnung mit ein. Die Kosten für die Abteufung der Aufbohrung und Komplettierung, d.h. Verrohrung und Zementation, errechnen sich mit dem Kostenexponent $\alpha = 0,62$

Für die in Kapitel 4 ermittelte Tiefe von $X_y = 713 \text{ m}$ für das Bergwerk Hausham, ergeben sich somit Pilotbohrkosten K_{Pilot} ⁸ von:

$$K_{Pilot} = 340 \frac{\text{€}}{\text{m}} * 713 \text{ m}$$

$$= \underline{\underline{242.400 \text{ €}}}$$

⁸ Ergebnis gerundet

Nach Gleichung 5-15 und den oben genannten Bezugswerten und Exponent, ergeben sich Investitionskosten $K_{Aufbohr}$ ⁹ für die Erweiterungsbohrung und Komplettierung von:

$$K_{Aufbohr} = 617.500 \text{€} * \left(\frac{713m}{650m} \right)^{0,62} = \underline{\underline{654.000 \text{€}}}$$

Die Kosten für die Baustelleneinrichtung $K_{Baustelle}$ ⁹ richten sich nach den Gesamtkosten für die Bohrung. Sie betragen $z_{Baustelle} = 16\%$. Für die Baustelleneinrichtung errechnen sich die Kosten nach Gleichung 6-1.

$$K_{Baustelle} = \frac{K_{Pilot} + K_{Aufbohr}}{z_{Pilot} + z_{Aufbohr}} * z_{Baustelle}$$

[Gl. 6-1]

Mit den in Abbildung 6.10 gezeigten Prozentsätzen für die Pilot- und Komplettierungsbohrung ergeben sich demnach Kosten von:

$$\begin{aligned} z_{Pilot} &= 20\% \\ z_{Aufbohr} &= 57\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{Baustelle} &= \frac{K_{Pilot} + K_{Aufbohr}}{z_{Pilot} + z_{Aufbohr}} * z_{Baustelle} \\ &= \frac{(242.420,00 \text{€} + 653.934,47)}{(20\% + 57\%)} * 16\% = \underline{\underline{186.255,48 \text{€}}} \end{aligned}$$

⁹ Ergebnis gerundet

Analog zur Gleichung 6-1 ergeben sich die sonstigen Bohrkosten $K_{sonstiges}$ nach Gleichung 6-2.

$$\begin{aligned} K_{sonstiges} &= \frac{K_{Pilot} + K_{Aufbohr}}{z_{Pilot} + z_{Aufbohr}} * z_{sonstiges} \\ &= \frac{K_{Pilot} + K_{Aufbohr} + K_{Baustelle}}{z_{Pilot} + z_{Aufbohr} + z_{Baustelle}} * z_{sonstiges} \end{aligned}$$

[Gl. 6-2]

Mit anteilmäßigen Kosten von $z_{sonstiges} = 7\%$, ergeben sich die sonstigen Kosten¹⁰ mit:

$$K_{sonstiges} = \frac{(242.400 + 654.000)}{(20\% + 57\%)} * 7\% = \underline{\underline{81.500 \text{€}}}$$

Die Gesamtkosten errechnen sich nach Gleichung 6-3.

$$K_{Bohrloch} = K_{Pilot} + K_{Aufbohr} + K_{Baustelle} + K_{sonstiges}$$

[Gl. 6-3]

Für die Bohrlocherstellung ergibt sich mit der Annahme von zwei erforderlichen Abteufungen, gleicher Tiefe zur Extraktion und Reinjektion, nach Gleichung 6-3 ein Gesamtinvestitionsvolumen¹⁰ für die Bohrungen von:

$$\begin{aligned} K_{Bohrloch} &= K_{Bohrloch,1} + K_{Bohrloch,2} \\ &= 2 * (K_{Pilot} + K_{Aufbohr} + K_{Baustelle} + K_{sonstiges}) \\ &= 2 * (242.400 \text{€} + 654.000 \text{€} + 186.300 \text{€} + 81.500 \text{€}) \\ &= 2 * 1.164.200 \text{€} = \underline{\underline{2.328.400 \text{€}}} \end{aligned}$$

¹⁰ Ergebnis gerundet

7 Infrastruktur und Verbraucher

Dieses Kapitels soll die geeignete Abnehmerstruktur für die Wärme aus dem Bergwerk Hausham analysieren. Nachstehende Objekte kommen für die Betrachtung in Frage und sollen im Weiteren diskutiert werden:

- Kreiskrankenhaus Agathried,
- eine Grundschule,
- eine Grund- und Hauptschule und
- ein sonderpädagogischen Förderzentrum.

Daneben sind in Hausham mit ca. 8.200 Einwohnern entsprechend private Abnehmer vorhanden, die ebenfalls mit in die Betrachtung einbezogen werden.

7.1 Krankenhaus Agathried

Zur Infrastruktur von Hausham gehört ein Kreiskrankenhaus in Agathried. Dieses verfügt über ca. 510 Betten. Somit ist es theoretisch möglich, eine Aussage über den Wärmebedarf anhand des Kennziffernkataloges zu treffen (siehe Abbildung 7.1).

Heizenergieverbrauchskennwerte von Krankenhäusern, bezogen auf die Planbetten in kWh / a nach VDI 3807		
Gebäude	Heizenergieverbrauchskennwert Richtwert [kWh / (m ² a)]	Mittelwert [kWh / (m ² a)]
Grundversorgung bis 250 Betten	14200	19800
Regelversorgung von 251 bis 450 Betten	14600	20100
Zentralversorgung von 451 bis 650 Betten	18000	28100
Zentralversorgung von 651 bis 1000 Betten	18200	30000
Maximalversorgung über 1000 Betten	23200	37200

Abbildung 7.1: Heizenergieverbrauchskennwerte von Krankenhäusern [35]

Das Krankenhaus Agathried wird über ein eigenes Blockkraftwerk und zusätzlichen Kesselfeuerungen mit ca. $10 - 15 \frac{GWh}{a}$ Wärme versorgt, wobei ca. $3 \frac{GWh}{a}$ für die Kälteversorgung bereitgestellt wird [45].

Ein Krankenhaus ist allerdings sehr ein komplexer Wärmeverbraucher, den es sehr differenziert zu betrachten gilt. Temperaturen unterschiedlichster Art (z.B. Dampf für Küche und Sterilisation von medizinischem Gerät, Heizwärme für Patientenzimmer, Klimatisierung von Intensiv- und Operationsbereichen usw.) werden für alle Bereiche benötigt, so dass eine Aussage über Versorgung mit einer bestimmten Wärmemenge von außen nicht pauschaliert möglich ist. Für die Betrachtung einer möglichen Versorgung mit Wärme aus dem Haushamer Pechkohlenbergwerk, ist das Krankenhaus Agathried daher zunächst ungeeignet und wir nicht näher behandelt.

7.2 Schulen

Für die drei Schulen in der Ortschaft Hausham lässt sich der Wärmebedarf anhand der Heizenergieverbrauchskennwerte für Schulen [35], ein Auszug hieraus ist in der Abbildung 7.2 zu sehen, und der Gleichung 7-1 berechnen. Zur Berechnung wird der höhere Mittelwert der Heizenergieverbrauchskennwerte angesetzt.

Heizenergieverbrauchskennwerte von Schulen in kWh / (m ² a) nach VDI 3807		
Gebäude	Heizenergieverbrauchskennwert Richtwert [kWh / (m ² a)]	Mittelwert [kWh / (m ² a)]
Grundschule	70	140
Grundschule/Hauptschule	75	110
Gymnasium	65	80
Berufsschule	30	90
Fortbildungs- und Weiterbildungsstätten	96	312

Abbildung 7.2: Heizenergieverbrauchskennwerte von Schulen [35]

$$Q_{Bedarf} = K * A_{Nfl} \quad [\text{Gl. 7-1}]$$

Grund- und Hauptschule

Die Grund- und Hauptschule Hausham am Agathrieder Weg verfügt über Geschossflächen von insgesamt 7.200 m². Mit dem Heizenergieverbrauchskennwert K für Grund-/Hauptschulen aus Abbildung 7.2 ergibt sich als Mittelwert ein Energiebedarf nach Gleichung 7-1 von:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Bedarf}} &= K * A_{Nfl} \\ &= 110 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 * a} * 7.200 \text{m}^2 = 792.000 \frac{\text{kWh}}{a} \end{aligned}$$

Montessori Grundschule

Die Montessori Grundschule Hausham in der Naturfreunde Straße verfügt über eine Gesamtfläche von 1350 m². Daraus ergibt sich nach Gleichung 7-1 und den Kennwerten aus Abbildung 7-1 ein mittlerer Energiebedarf von:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Bedarf}} &= K * A_{Nfl} \\ &= 140 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 * a} * 1.350 \text{m}^2 = 189.000 \frac{\text{kWh}}{a} \end{aligned}$$

Pädagogisches Förderzentrum

Mit einer zu beheizenden Fläche von 3000 m² errechnet sich für das Sonderpädagogische Förderzentrum Anton-Weilmair-Schule Hausham ein Energiebedarf von:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Bedarf}} &= K * A_{Nfl} \\ &= 110 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 * a} * 3.000 \text{m}^2 = 330.000 \frac{\text{kWh}}{a} \end{aligned}$$

Als Kennwert K wurde der Mittelwert für die Grund-/ Hauptschule aus Abbildung 7-1 gewählt.

Der Gesamtverbrauch aller drei Schulen ergibt sich in der Addition ein Bedarf nach Mittelwerten zu:

$$792.000 \frac{\text{kWh}}{a} + 189.000 \frac{\text{kWh}}{a} + 330.000 \frac{\text{kWh}}{a} = 1.311.000 \frac{\text{kWh}}{a}$$

Die aus dem Wärmenetz zur Verfügung stehende Wärmemenge über das Jahr betrachtet, lässt sich mit Gleichung 7-2 berechnen.

$$Q_{ab,Jahr} = t_B * Q_{ab} \quad [\text{Gl. 7-2}]$$

Aus Kapitel 5 ist eine Wärmeabgabe an das Heiznetz von $Q_{ab} = 2.165\text{kW}$ bekannt. Bezo- gen auf die Vollbenutzungsstunden $t_B = 1.900 \frac{\text{h}}{\text{a}}$ ergibt sich eine mögliche Jahreswärme- abgabe von:

$$Q_{ab,Jahr} = 1.900 \frac{\text{h}}{\text{a}} * 2.165\text{kW} = 4.114.000 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Die benötigten $1.311.000\text{kWh}$ pro Jahr lassen sich somit ohne weiteres aus dem Wärmenetz decken.

7.3 Haushalte

Zur Betrachtung der Haushalte sei zunächst angemerkt, dass auch dieser Bereich sehr komplex erscheint. Die Gebäudestruktur der Wohnhäuser ist im Gemeindegebiet Hausham nicht homogen. Der unterschiedliche Wärmebedarf von Ein- und Mehrfamilienhäu- sern erfordert ebenfalls eine differenzierte Betrachtung. Hinzu kommt, dass Altbauten mit einer zeitgemäßen Wärmedämmung einen höheren Wärmebedarf haben, als Häuser neuerer Bauart mit guter Wärmedämmung oder gar Niedrigenergiehäuser. Zur Vereinfachung wird daher eine Modellbildung vorgenommen, wie in Abbildung 7.3 zu sehen ist. Danach wird die maximal mögliche Anzahl zu versorgender Haushalte mit der vorhandenen Wärmemenge berechnet.

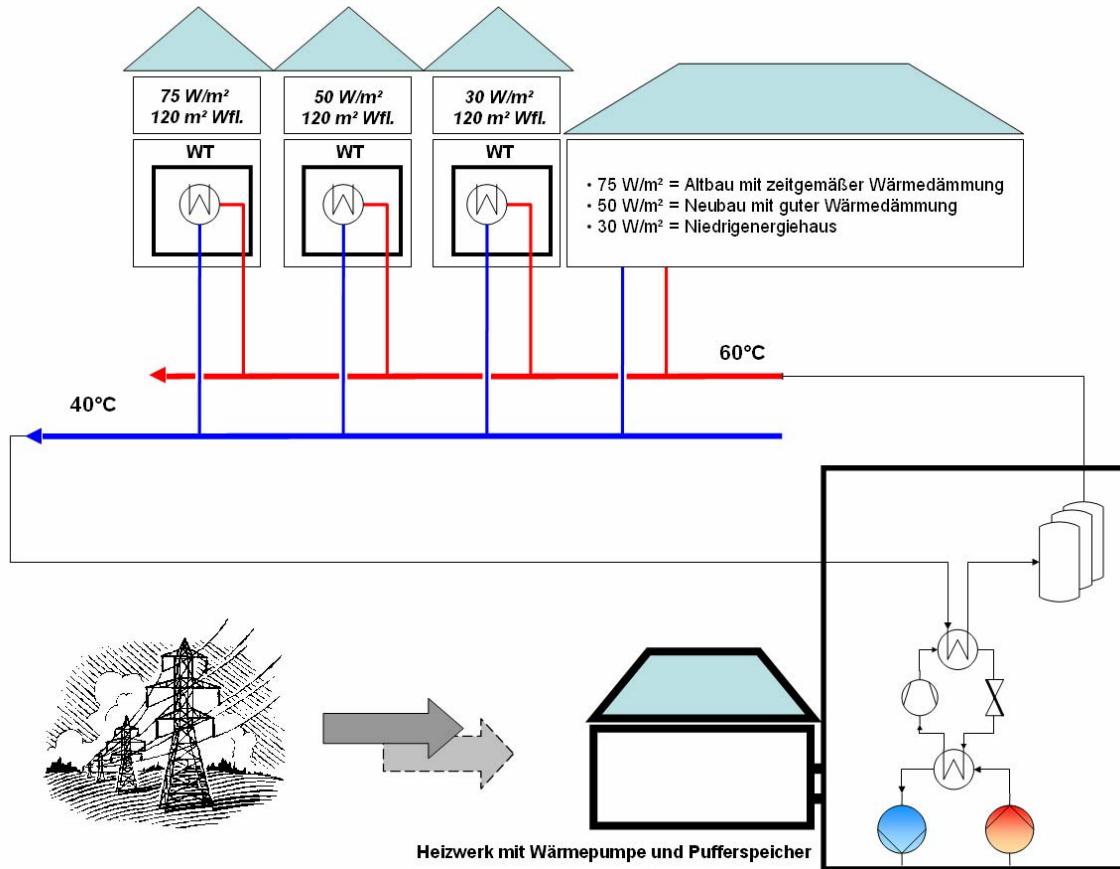


Abbildung 7.3: Versorgungsmodell von Haushalten mit Nahwärme

Folgende Annahmen werden getroffen:

- die Wohnfläche beträgt einheitlich 120 m^2
- die spezifischen Heizlasten q betragen für:
 - einen Altbau mit zeitgerechte Wärmedämmung $75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
 - einen Neubau mit guter Wärmedämmung $50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
 - ein Niedrigenergiehaus $30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- der Wärmebedarf ergibt sich als Produkt der durchschnittlichen Heizlast und der Nutz- bzw. Wohnfläche
- die Wärme wird komplett verkauft

Der Wärmeverkaufspreis wird mit $60 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$ angenommen. Die Vollbenutzungsstunden t_B sind für ein mittleres Klima dem Kennziffernkatalog 2004 [33] entnommen. Sie richten sich nach den dort beschriebenen Werten an der Stadt München mit gerundeten $1.900 \frac{\text{h}}{\text{a}}$.

Die Anschlussleistung errechnet sich als Durchschnittswert der Heizlasten für verschiedene Gebäudearten (siehe Annahmen) nach Gleichung 7-3 und 7-4.

Durchschnittliche Heizlast:

$$q_{mix} = \frac{q_{75} + q_{50} + q_{30}}{3} \quad [\text{Gl. 7-3}]$$

Anschlussleistung:

$$P_{Anschluss} = A_{Wfl} * q_{mix} \quad [\text{Gl. 7-4}]$$

mit $q_{75} = 75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, $q_{50} = 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, $q_{30} = 30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ergibt sich:

$$q_{mix} = \frac{75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{3} = 51,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \approx 52 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Bei einer mittleren Wohnfläche von $A_{Wfl} = 120 \text{m}^2$ errechnet sich nach Gleichung 7-4 eine durchschnittliche Anschlussleistung von

$$P_{Anschluss} = 120 \text{m}^2 * 51,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 6,2 \text{kW}$$

Der Jahreswärmeverbrauch errechnet sich aus der Anschlussleistung $P_{Anschluss}$ und den Vollbenutzungsstunden t_B (Gleichung 7-5).

$$Q_{Jahr} = t_B * P_{Anschluss} \quad [\text{Gl. 7-5}]$$

es folgt demnach:

$$Q_{Jahr} = 1.900 \frac{\text{h}}{\text{a}} * 6,2 \text{kW} = 11.780 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Mit den Gleichungen 7-2 und 7-6 lässt sich die maximal mögliche Versorgung von Haushalten mit Wärme errechnen. Dabei ist das Ergebnis abzurunden.

$$x_H = \frac{Q_{ab,Jahr}}{Q_{Jahr}}$$

[Gl. 7-6]

Die zuvor berechneten Werte eingesetzt ergeben:

$$H = \frac{Q_{ab,Jahr}}{Q_{Jahr}} = \frac{4.114.000 \frac{kWh}{a}}{11.780 \frac{kWh}{a}} = \underline{\underline{349}}$$

Es können also 349 Haushalte mit einer mittleren Anschlussleistung von 6,2 kW versorgt werden.

Mitversorgung der Schulen

Bei der in Kapitel 7.2 berechneten Möglichkeit der Versorgung dreier Schulen wird nicht die gesamte Wärmemenge verbraucht. Mit der verbleibenden Energie können noch Haushalte versorgt werden. Unter den bisherigen Annahmen für die Versorgung von Haushalten, ergibt sich somit eine mögliche zusätzliche Versorgung von 254 Haushalten:

$$H = \frac{Q_{ab,Jahr} - Q_{Bedarf,Schulen}}{Q_{Jahr}} = \frac{4.114.000 \frac{kWh}{a} - 1.113.500 \frac{kWh}{a}}{11.780 \frac{kWh}{a}} = \underline{\underline{254}}$$

7.4 Nahwärmenetz

Das Nahwärmenetz, welches für die Versorgung der errechneten Haushalte erstellt werden muss, ist von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Der Anschlussgrad gibt an, wie viele Einwohner an das Wärmenetz angeschlossen sind. Daraus resultierend ergibt sich die Ausbaustufe eines Wärmenetzes mit einer bestimmten Länge und versorgten Straßenzügen. Ein weiterer Punkt, der die Kosten eines Nahwärmenetzes beeinflusst, ist der Wärmebedarf. Hiernach richtet sich der Durchmesser der Vor- und Rücklaufleitung. Da für die Kostenbetrachtung des Wärmenetzes eine abgestimmte Nutzungsanalyse notwendig ist und diese nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, werden die Investitionskosten für ein Wärmenetz nicht behandelt.

Die Kosten für den laufenden Meter Trasse¹ betragen in etwa 800 bis 1000 €

¹ Als Trasse bezeichnet man die Vor- und Rücklaufleitung eines Wärmenetzes.

8 Wirtschaftlichkeit

Nachdem in den Kapiteln 4 bis 7 die Einflussparameter beschrieben und berechnet wurden, stellt das Kapitel 8 schließlich die Zusammenfassung der Ergebnisse dar. Dazu zeigt die Abbildung 8.1 das Fließbild der Gliederung. Die Hauptansatzpunkte einer Investitionsrechnung bzw. Wirtschaftlichkeitsabschätzung sind die Investitionskosten, der durch das Objekt verursachte Aufwand und der mit dem Objekt erwirtschaftete Ertrag.

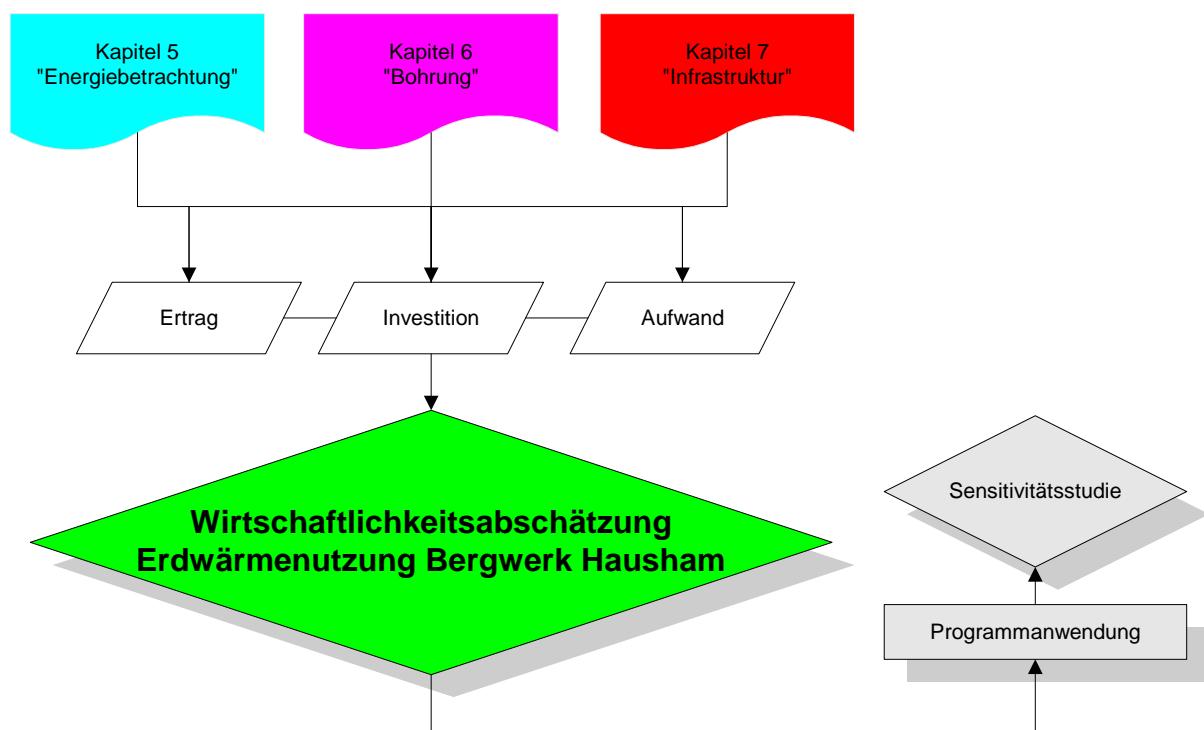


Abbildung 8.1: Fließbild zur Gliederung des Abschnittes Wirtschaftlichkeit

Die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsabschätzung basiert danach auf einen bestimmten Fall. Aufgrund festgelegter Annahmen und Vereinbarungen wird eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit getroffen. Veränderungen und dessen Auswirkungen werden in der angeschlossenen Sensitivitätsstudie vorgenommen.

8.1 Kosten

Als Kosten bezeichnet man betriebswirtschaftlich gesehen den Verbrauch an Geldeinheiten, der zur Erstellung einer betrieblichen Leistung in einer Abrechnungsperiode notwendig ist. Der Begriff der Investitionskosten ist betriebswirtschaftlich gesehen im Grunde falsch, da es sich dabei nicht um Kosten im eigentlichen Sinne handelt, sondern um eine Umwandlung des Vermögen. Die investierten Geldeinheiten zur Schaffung eines Produktionsmittels verbleiben dem Unternehmen als Sachanlage. Er wird jedoch häufig genannt, wenn in der Investitionsrechnung der Anschaffungswert eines Produktionsmittels verdeutlicht werden soll [47].

In diesem Abschnitt sollen die für die wirtschaftliche Betrachtung wichtigen Kosten dargestellt werden. Da es sich um eine Abschätzung für eine generelle Machbarkeit des Projektes handelt, ist es notwendig die Aufstellung der zu betrachtenden Kosten einzugrenzen¹. Die Bestimmung der zu betrachtenden Kosten und Kostendetails sind in Abbildung 8.2 zu erkennen. Die Abstimmung der Kostenaufstellung erfolgt in Anlehnung an die Kostenaufteilung von Adrian Bejan et al² [39].

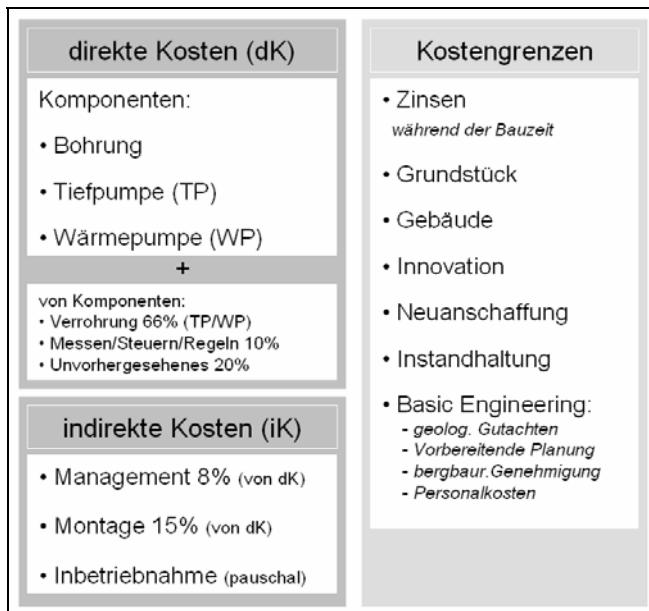


Abbildung 8.2: Kostenaufstellung in Anlehnung an A. Bejan et al [39]

¹ siehe dazu auch Kapitel 8.1.1

² et al.: (lat.) und auf andere Weise; die Schreibweise von Namen, insbesondere Namen ausländischer Herkunft, können in Literaturangaben mitunter abweichen. Mit der Bezeichnung „et.al“, weist der Verfasser somit darauf hin, dass auch andere Schreibweisen mit gleicher Gültigkeit vorliegen können.

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Erdwärmennutzung aus dem Bergwerk Hausham werden die in den vorherigen Kapitel festgelegten Eingabeparameter und die erarbeiteten Größen herangezogen. Die Größen und Ausgangswerte sind als Übersicht in Tabelle 8-1 dargestellt.

Größe	Wert	Einheit
Eingabegrößen		
Geothermischer Gradient	2,0	$\frac{^{\circ}C}{100m}$
Temperatur Thermalwasser	24	$^{\circ}C$
Fördertiefe	713	m
Fördermenge Thermalwasser	100	$\frac{m^3}{h}$
Reinjektionstemperatur	10	$^{\circ}C$
Dynamischer Wasserspiegel	200	m
Vorlauf-/Rücklauftemperatur Wärmenetz	60/40	$^{\circ}C$
Vollbenutzungsstunden	1.900	$\frac{h}{a}$
Grundpreis Wärme	40	$\frac{\epsilon}{a * kW * Anschluss}$
Arbeitspreis Wärme	50	$\frac{\epsilon}{MWh}$
Strompreis	100	$\frac{\epsilon}{MWh}$
Berechnung		
Wärmemenge Thermalwasser	1622	kW
Verdichterleistung	543	kW
Wärmemenge Heiznetz	2165	kW

Tabelle 8-1: Parametereinstellung zur Berechnung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit

8.1.1 Kostengrenzen

Für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des geothermischen Projektes sind bestimmte Rahmenbedingungen festgelegt. Hierzu zählen neben den bisher getroffenen Annahmen auch bestimmte Kostengrenzen. Eine Betrachtung der Machbarkeit und wirtschaftlichen Aspekte findet außerhalb dieser Grenzen nicht statt.

Wie auch aus Abbildung 8.2 ersichtlich, sind für die weitere Reflexion ausgeschlossen:

- Subventionen, Fördergelder, Auffangkredite
- Zinsen während der Bauzeit,
- Kosten für Gebäude und Grundstücke,
- Kosten zur Sicherung von bergbaurechtlichen Genehmigungen,
- Kosten für Genehmigungen und damit verbundene Verwaltungskosten,
- Kosten für Verbesserungen nach der Inbetriebnahme, Forschung und Entwicklung, sowie
- Kosten für Instandhaltung und Erneuerung von Bauteilen.

8.1.2 Direkte Investitionskosten

Die direkten Kosten beinhalten die Kosten, welche mit der unmittelbaren Herstellung oder Bereitstellung der zu nutzenden Wärme im Zusammenhang stehen. Hierzu zählen absolute Kosten für die Komponenten:

- Bohrung
- Tiefenpumpe
- Wärmepumpe

Weiterhin fließen in die direkten Kosten prozentual von den Komponentenkosten gesehen mit ein, Kosten für:

- Verrohrung (ausgenommen Bohrlochverrohrung) 66%,
- Steuerung- und Regelungskomponenten 10%,
- Sonstiges und Unvorhergesehenes 20%.

Tabelle 8-2 zeigt die direkten Kosten der Investition in absoluten Zahlenwerten als einen Teilbereich der Gesamtinvestitionskosten.

Komponenten	Bezugsgröße	Kosten
Bohrung (inkl. Komplettierung)	713 m	2.328.400 €
Tiefenpumpe (TP)	200 m	16.500 €
Wärmepumpe (WP)	543 kW	201.100 €
Anteilig der Komponentenkosten		
Verrohrung (nur TP/WP)	66 %	143.600 €
Steuerung und Regelung	10 %	254.600 €
Sonstiges/Unvorhergesehenes	20 %	509.200 €
		<u>3.453.000 €</u>

Tabelle 8-2: direkte Kosten der Investition in absoluten Werten

8.1.3 Indirekte Investitionskosten

Die indirekten Kosten beinhalten die Kosten für die planerischen und organisatorischen Zusammenhänge. Neben den Kosten für das Projektmanagement, sind die Kosten für die Montage der gesamten Anlage und spätere Inbetriebnahme berücksichtigt. Zur Kalkulation wurden die Kosten prozentual abhängig von den direkten Kosten veranschlagt mit:

- Projektmanagement 8%,
- Montage 15%,
- Inbetriebnahme pauschal 20.000,00 €

Wieder in absoluten Werten betrachtet, ist dies in Tabelle 8-3 ersichtlich. Die Summe aus direkten Kosten und indirekten Kosten ergeben die für die Investitionsrechnung anzusetzenden Gesamtinvestitionskosten.

	Bezug	Kosten
Projektmanagement	8 %	276.300 €
Montage / Installation	15 %	518.000 €
Inbetriebnahme	Pauschal	20.000 €
		<u>814.300 €</u>
Gesamtinvestitionskosten		
Direkte Kosten		3.453.000 €
Indirekte Kosten		814.300 €
		<u>4.267.300 €</u>

Tabelle 8-3: indirekte Investitionskosten und Gesamtinvestitionskosten in absoluten Werten

8.1.4 Betriebskosten

Die Betriebskosten beschreiben die laufenden Ausgaben für das Betreiben der Wärmepumpe und Tiefenpumpe. Wird davon ausgegangen, dass beide Komponenten mit Strom betrieben werden, ergibt sich bei einem Basispreis von $100 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$ und einem Gesamtverbrauch von $1.190 \frac{\text{MWh}}{a}$, ein jährlicher Aufwand von 119.000 € Dies wird in Tabelle 8-4 dargestellt.

	Strom	Leistung	Kosten
	$\left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$	$\left[\frac{\text{MWh}}{a} \right]$	
Wärmepumpe	100	1.032	103.200 €
Tiefpumpe	100	158	15.800 €
			<u>119.000 €</u>

Tabelle 8.4: Betriebskostenaufstellung für die Wärme- und Tiefenpumpe

Für die Berechnung der Betriebskosten wird ab dem 2. Jahr mit einer Verteuerung der Energiepreise von durchschnittlich 1 % jährlich ausgegangen.

8.2 Erträge

Im Sinne der Betriebswirtschaftslehre sind Erträge die Mehrung des Unternehmenserfolges durch Zugang von Werten aus Erstellung (Produktion), Bereitstellung (Dienstleistung) oder Absatz (Verkauf). Die Betrachtung erfolgt periodisch und behandelt in diesem Fall die Veräußerung der Wärme [48]. Der Gesamtertrag ergibt sich aus der Addition der Erträge für die Bereitstellung der Wärme (Wärmegrundpreises) und dem Absatz der Wärme (Wärmearbeitspreis), wie Gleichung 8-1 zeigt.

$$E_G = E_{GP} + E_{AP} \quad [\text{Gl. 8-1}]$$

8.2.1 Wärmegrundpreis

Der Wärmegrundpreis beschreibt die verbrauchsunabhängigen Kosten für die Lieferbereitschaft, die Messeinrichtungen (Zähler und Zubehör), die Verbrauchsmessungen sowie die Rechnungsstellung und das Inkasso. Der Wärmegrundpreis wird vom bereitstellenden Versorgungsunternehmen festgelegt und kann gestaffelt nach Anschlussleistung variieren. Für die Berechnung wird zunächst ein Wert von $K_{GP} = 40 \frac{\text{€}}{\text{kW} * a}$ festgelegt. Dieser Wert ist ein ermittelter Durchschnittswert von verschiedenen Tarifen wärmeverkaufender Energieversorger in Deutschland. Die Anschlussleistung ergibt sich aus Gleichung 7-4 mit $P_A = 6,2\text{kW}$. Bei komplett verkaufter Wärme von $Q_{WN} = 2.165\text{kW}$ ergibt sich nach Gleichung 7-6 eine mögliche Versorgung von $H = 349$ Haushalten. Die Gesamterträge aus dem Wärmegrundpreis ergeben sich nach Gleichung 8-2.

$$E_{GP} = K_{GP} * P_A * H \quad [\text{Gl. 8-2}]$$

$$E_{GP} = 40 \frac{\text{€}}{\text{kW} * a} * 6,2\text{kW} * 349 = 87.100 \frac{\text{€}}{a}$$

8.2.2 Wärmearbeitspreis

Der verbrauchsabhängige Arbeitspreis ist das Entgelt je verbrauchter Einheit an Wärme in Euro pro Kilowattstunde. Als Basis für die Berechnung wird von einem Arbeitspreis von $K_{AP} = 50 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$ ausgegangen. Bei vollständigem Wärmeverkauf ergibt sich der Ertrag nach Gleichung 8-3.

$$E_{AP} = K_{AP} * Q_{WN} * t_B \quad [\text{Gl. 8-3}]$$

$$E_{AP} = 50 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * \frac{2.165}{1000} \text{MW} * 1.900 \frac{\text{h}}{a} = \underline{\underline{205.700 \text{€}}}$$

8.3 Wirtschaftlichkeit und Amortisation

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit stehen in der Betriebswirtschaft verschiedene Methoden der Investitionsrechnung zur Verfügung, mit der die Vorteilhaftigkeit einer Investition abgeschätzt werden kann. Eine Übersicht wird in Abbildung 8.3 gezeigt.

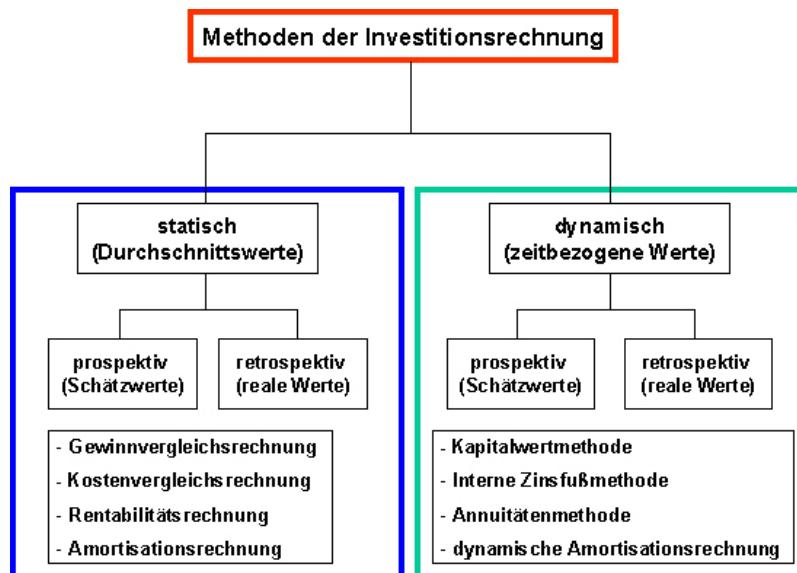


Abbildung 8.3: Schema der Methoden der Investitionsrechnung [49]

Zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung der Erdwärmemenutzung aus dem Bergwerk Hausham wird das Verfahren der dynamischen Amortisationsrechnung mittels der Kapitalwertmethode ausgewählt. Die Kapitalwertmethode ist ein leicht zu interpretierendes Verfahren, da der Kapitalwert in Geldeinheiten ausgedrückt wird. Es ermöglicht auch verschiedene Kapitalverzinsungen und unterschiedliche Zahlungsströme in unterschiedlichen Perioden einheitlich zu bewerten. Um die Zeitabhängigkeit (Periode) des Kapitalwertes zu beseitigen, werden alle der Investition zuzurechnenden Einnahmen und Ausgaben mit einem Kapitalzinsfuß abgezinst. Dadurch werden die Kapitalwerte zu unterschiedlichen Zeiten auf die Bezugszeit gestellt und können so miteinander verglichen werden. Die Investition ist dann vorteilhaft, wenn der Kapitalwert mindestens Null beträgt. Gleichzeitig wird die Amortisationszeit dann erreicht, wenn der Kapitalwert der Investitionen nicht mehr negativ ist [49].

Für die Betrachtung werden folgende Annahmen getroffen:

- Investitionsvolumen $I_0 = 4.267.700\text{€}$
- Kalkulationszinssatz $i = 4\%$
- Einnahmen $E = E_{GP} + E_{AP} = 292.800\text{€}$
- Ausgaben $A = 119.000\text{€}$
- jährliche Einnahmenanpassung $+1\%$
- jährliche Ausgabenanpassung $+1\%$
- Finanzierungszeitraum 30 Jahre
 $= \text{Anlagennutzungszeit}$

Gesucht sind die dynamische Amortisationszeit und der Beginn der Vorteilhaftigkeit der Investition. Dazu muss der Kapitalwert der Investition aus dem Abzinsungsfaktor und dem Rückfluss nach Gleichung 8.4 errechnet werden.

$$\text{Abzinsungsfaktor} = \frac{1}{q^n} = \frac{1}{(i+1)^n}$$

$$\text{Barwert} = \frac{(E_n - A_n)}{q^n}$$

$$C_0 = \sum_{t=1}^n (E_n - A_n) * \frac{1}{q^n} = \sum_{t=1}^n (E_n - A_n) * \frac{1}{(1+i)^n}$$

[Gl. 8-4]

Mit Hilfe einer Excel™ Tabelle lassen sich die Kapitalwerte ausrechnen. Abbildung 8.4 zeigt einen Ausschnitt der Berechnungstabelle und den Verlauf der Kapitalwertkurve in Abhängigkeit der Zeit.

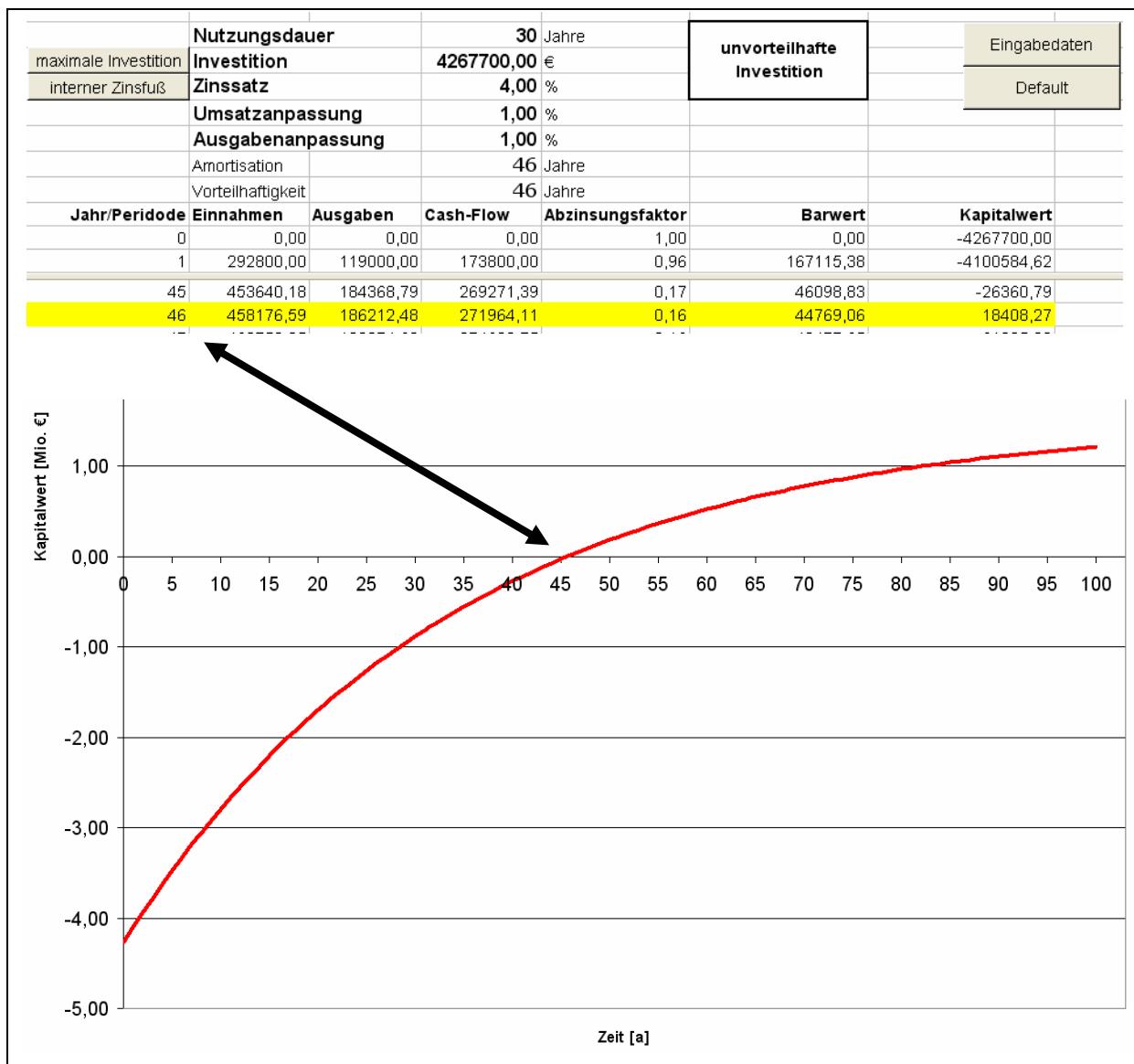


Abbildung 8.4: Ermittlung der Vorteilhaftigkeit der Amortisationszeit bei 4%

Gelb markiert ist in der Tabelle der Übergang der Investition zu einem positiven Kapitalwert nach 46 Jahren. In der Annahme wurde eine Anlagennutzungsdauer von 30 Jahren festgelegt. Die Investition amortisiert sich zwar nach 46 Jahren, da der Kapitalwert zu diesem Zeitpunkt erstmals einen positiven Wert annimmt. Für den betrachteten Zeitraum ist diese Investition jedoch unvorteilhaft.

Über eine Zielwertsuche lässt sich nun bei gegebenem Cash-Flow und Zinssatz für den Zeitraum von 30 Jahren die Investitionssumme herausfinden, bis zu der eine Vorteilhaftigkeit innerhalb 30 Jahren gegeben ist. Abbildung 8.5 verdeutlicht dies.

	Nutzungsdauer	30 Jahre	
maximale Investition	Investition	3385815,28 €	
interner Zinsfuß	Zinssatz	4,00 %	
	Umsatzanpassung	1,00 %	
	Ausgabenanpassung	1,00 %	

Abbildung 8.5: Grenzinvestition der eben noch vorteilhaften Investition

Der maximale Zinssatz bei dem die Investition gerade noch vorteilhaft ist, ermittelt man durch die Zielwertsuche des internen Zinsfußes, wie in Abbildung 8.6 zu sehen ist.

	Nutzungsdauer	30 Jahre	
maximale Investition	Investition	4267700,00 €	
interner Zinsfuß	Zinssatz	2,29 %	
	Umsatzanpassung	1,00 %	
	Ausgabenanpassung	1,00 %	

Abbildung 8.6: Grenzzinssatz der eben noch vorteilhaften Investition

Die nicht vorteilhafte Investition wird also vorteilhaft bei:

- einer Reduzierung der Investitionen um 882.000 € oder
- einem Zinssatz auf dem Kapitalmarkt von 2,29 %

Andernfalls erweist sich die Investition als unvorteilhaft und das Projekt ist unter den gegebenen Eingangsparametern unwirtschaftlich.

8.4 Sensitivitätsstudie

Die Sensitivitätsstudie soll die Einflüsse von veränderten Eingangsparametern auf die Wärmemenge, dem Energiebedarf, den Investitionen und der Wirtschaftlichkeit zeigen. Als 100 Prozent – Basis sind die bisher betrachteten Parameter zu setzen. Veränderungen werden prozentual angegeben. Für die Betrachtungen in der Sensitivitätsstudie, wird unterschieden zwischen technischen Einflüssen mit physikalisch messbaren Veränderungen und betriebswirtschaftlichen Einflüssen.

Als technische Einflüsse werden bezeichnet:

- der geothermische Gradient
- die Förder- oder Bohrungstiefe
- die Fördermenge
- die Reinjektionstemperatur
- die Höhe des dynamischen Wasserspiegel (GOK)

Betriebswirtschaftliche Einflüsse sind:

- die Laufzeit oder Finanzierungszeitraum
- der Zinssatz am Kapitalmarkt
- der Arbeitspreis der Wärme
- der Grundpreis der Wärme
- der Strompreis

8.4.1 Amortisation und Vorteilhaftigkeit

Definitionen

Zur Bewertung der Amortisation bezieht die dynamische Amortisationsrechnung nach der Kapitalwertmethode, entgegen der statischen Amortisationsrechnung, die durch die unterschiedlichen Zahlungsströme zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehenden Zinsen mit in die Betrachtung ein. Die Dauer der vollständigen Deckung der anfänglichen Investition, wird dabei als Amortisationszeit bezeichnet.

Eine vorteilhafte Investition beschreibt den Kapitalwert einer zum Vergleich angesetzten Nutzungsdauer einer Investition. Unterhalb der betrachteten Periode gilt die Vorteilhaftigkeit. Eine vorteilhafte Investition hat dabei immer auch eine Amortisationszeit innerhalb der betrachteten Nutzungsperiode, während eine amortisierte Investition nicht zwingend als vorteilhaft bezeichnet werden muss. Liegt die Amortisationszeit über der Nutzungsdauer ist sie zwar gedeckt, jedoch unvorteilhaft.

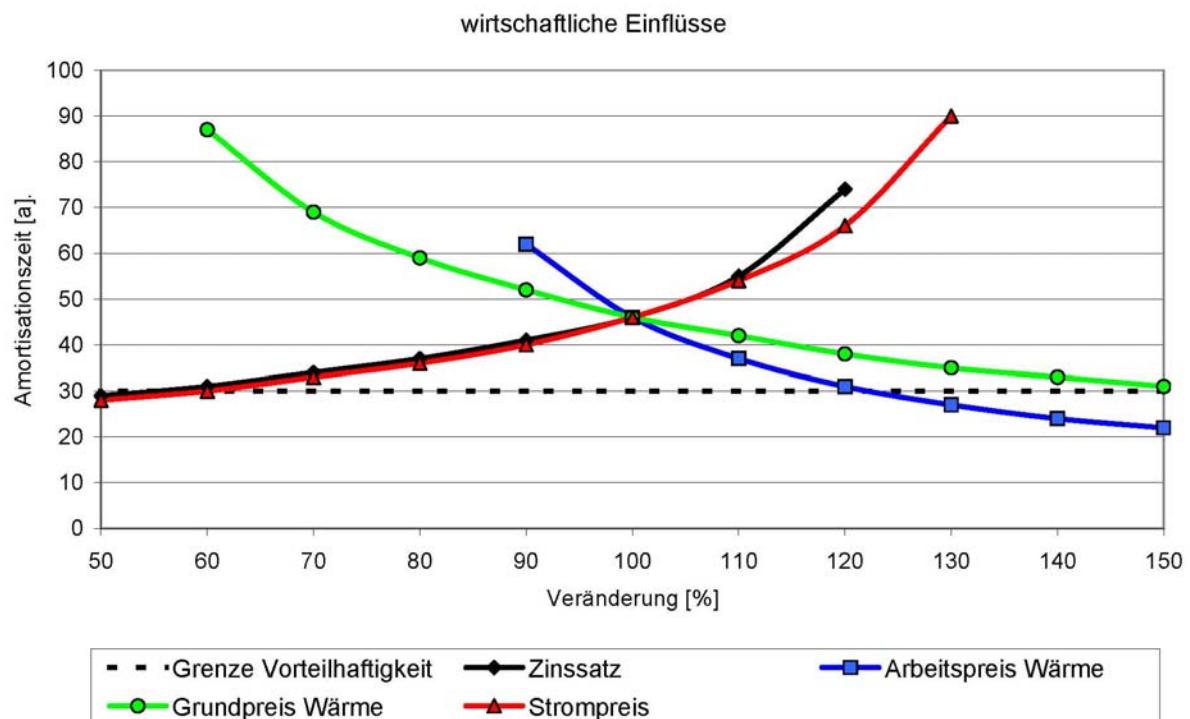


Abbildung 8.7: wirtschaftliche Einflüsse auf die Entwicklung der Amortisationszeit

Sensitivität

Die wirtschaftlichen Einflüsse auf die Amortisationszeit sind in Abbildung 8.7 grafisch zusammengefasst. Dabei ist zu erkennen, dass mit zunehmend prozentualer Veränderung des Strompreises und des Zinssatzes am Kapitalmarkt (Eingangzinssatz) die Amortisationszeit steigt. Gegenläufig wirken sich die zunehmenden Veränderungen des Grund- und Arbeitspreises für Wärme auf die Amortisationszeit aus. Diese sinkt und erreicht bei einer Anhebung des Arbeitspreises für Wärme um 20 Prozentpunkte die Grenze zur Vorteilhaftigkeit. Bei Anhebung des Grundpreises erfolgt dies bei mehr als 150 % des Ausgangspreises. Über die Herabsetzung des Zinssatzes oder des Strompreises erreicht man die Grenze der Vorteilhaftigkeit bei gleichermaßen ca. 60% der als Basis angenommenen Werte.

Die Sensitivität der technischen Einflüsse auf die Amortisationszeit wird in Abbildung 8.8 verdeutlicht.

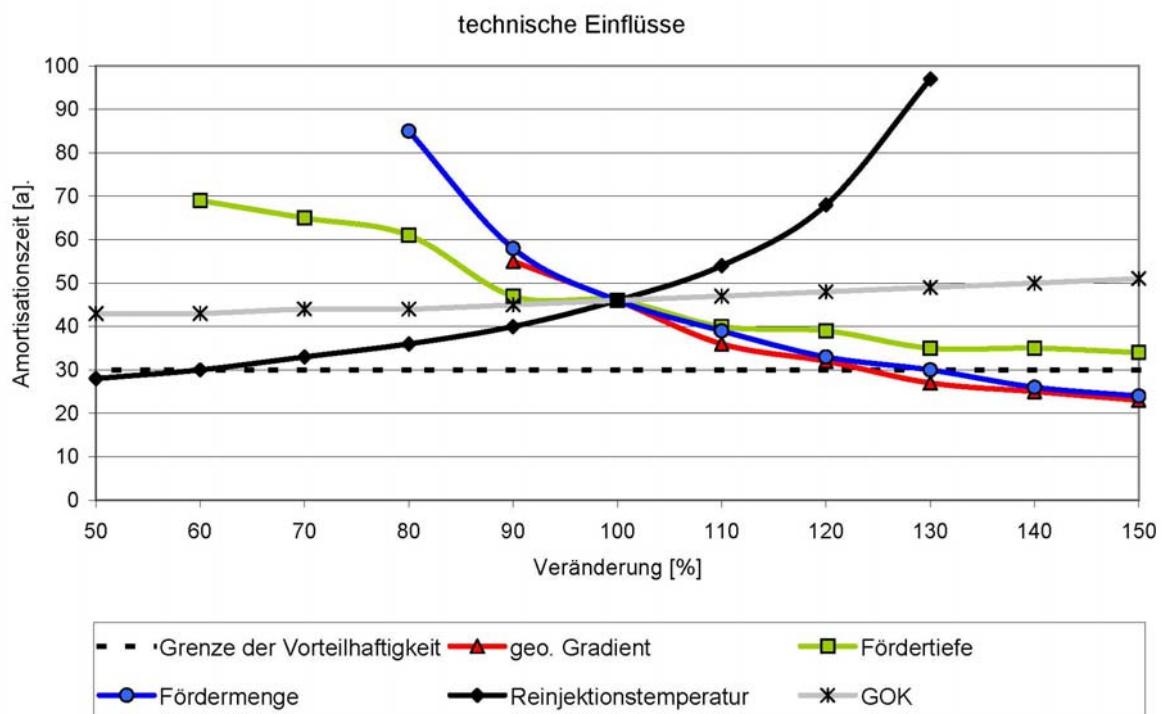


Abbildung 8.8: technische Einflüsse auf die Entwicklung der Amortisationszeit

Es zeigt sich, dass der Einfluss der Veränderung des dynamischen Wasserspiegels auf die Amortisationszeit sehr gering ist. Dies liegt im geringen Kostenverhältnis der Tiefenpumpe, die von diesem Faktor bestimmt wird, zu den übrigen Investitionskosten des Projektes.

Als große Einflussfaktoren sind die Entwicklungen der Fördermenge und gegenteilig hierzu die Reinjektionstemperatur zu erkennen. Mit steigender Reinjektionstemperatur sinkt die zum Absatz zur Verfügung stehende Wärmemenge, was wiederum den Umsatz senkt. Daraus resultierend verringert sich das zur Deckung und Verzinsung zur Verfügung stehende Kapital und die Amortisationszeit erhöht sich. Die steigende Fördermenge wirkt sich ebenfalls auf die Wärmemenge aus. Es kann mehr Wärme verkauft werden, was zu einem höheren Gewinn führt. Die Erhöhung der Investitionskosten aufgrund der Einflüsse auf die Kosten der Wärmepumpe wirkt sich dabei nicht negativ auf die Gewinnentwicklung aus. Der Vergleich der Entwicklung der Fördertiefe und des geothermischen Gradienten auf die Amortisationszeit zeigt welchen Einfluss die Tiefe auf die Bohrkosten hat. Trotz gleichwertig steigender Energieausbeute wirkt sich das Vorfinden eines höheren geothermischen Gradienten mehr auf die Entwicklung der Amortisationszeit aus. Ein Anstieg des Gradienten um 20 % lässt die Investition bereits vorteilhaft werden. Bei 130 Prozent der Fördermenge wird die Investition ebenfalls vorteilhaft, wohingegen dieser Umstand bei der Verringerung der Reinejektionstemperatur erst bei weniger als 60 % auftritt.

8.4.2 Interner Zinsfuß

Definition

Der interne Zinsfuß einer Investition ist der Zinssatz, bei dessen Verwendung als Kalkulationszinssatz sich ein Kapitalwert von Null ergibt. Auch der interne Zinsfuß gibt Auskunft über die Vorteilhaftigkeit einer Investition. Hierzu stellt man den internen Zinsfuß dem Zinssatz i gegenüber. Dabei gilt, dass alle diejenigen Investitionen durchzuführen sind, deren interner Zinsfuß größer ist als der Zinssatz der Investition. Ist der Zinsfuß kleiner als der Zinssatz auf dem Kapitalmarkt, so gilt die Investition als unvorteilhaft. Bei Gleichheit von Zinssatz und Zinsfuß ist die Investition weder vorteilhaft noch unvorteilhaft. Veränderungen von Einnahmen und Ausgaben, sowie Einflüsse auf das Investitionsvolumen wirken sich aufgrund der unmittelbaren Abhängigkeit auf die Entwicklung des internen Zinsfußes aus. Zunehmende Einnahmen sind dabei ebenso Positiv zu bewerten, wie die Abnahme von Investitionen und Ausgaben.

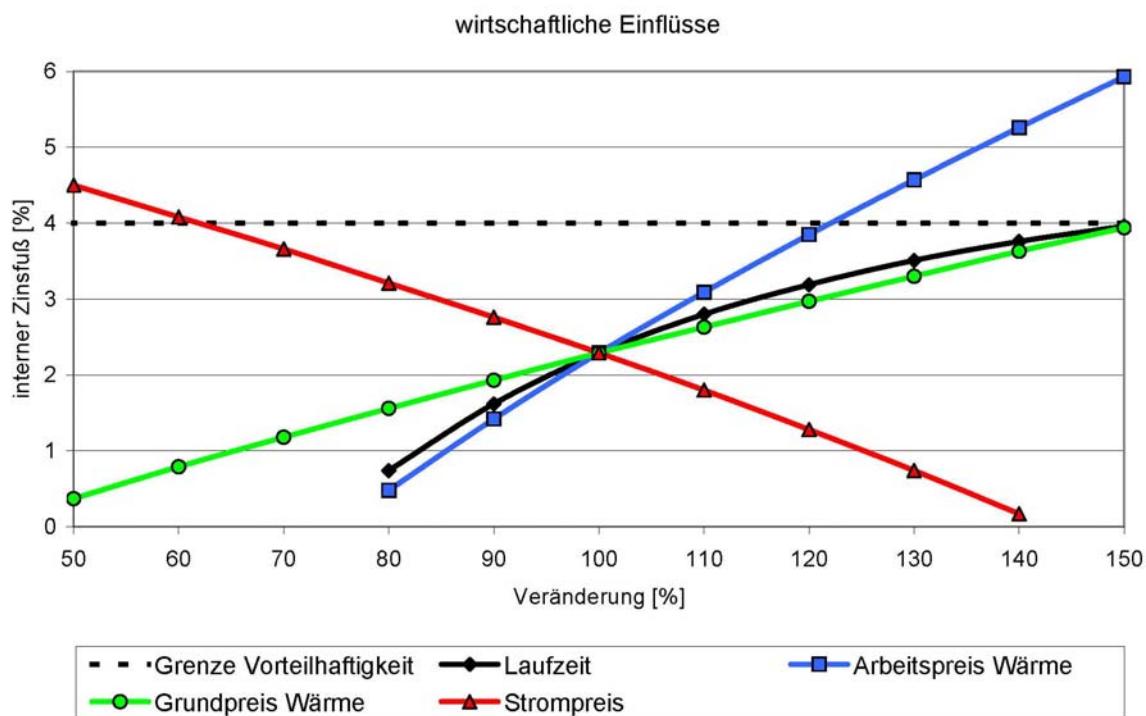


Abbildung 8.9: wirtschaftliche Einflüsse auf die Entwicklung des internen Zinsfußes

Sensitivität

Wie aus Abbildung 8.9 zu erkennen ist, bedeutet eine steigende Veränderung der Einflussfaktoren der Finanzierungslaufzeit und dem Arbeits- und Grundpreis für Wärme, eine ebenso ansteigende Tendenz des internen Zinsfußes. Gegenläufig wirkt sich die Sensitivität des Strompreises aus. Strom und Wärmepreise haben einen direkten Einfluss auf die Gewinnentwicklung und sind somit entscheidend für die Entwicklung des Kapitalwertes. Im Bezug auf die Wärmepreise zeigt ein steigender Arbeitspreis einen höheren Einfluss, als ein steigender Grundpreis. Die Laufzeitveränderung wirkt sich hingegen nur mäßig auf die interne Zinsfußentwicklung aus. Dies liegt bei steigender Laufzeit an der längerfristigen Bindung des Kapitals in der Investition. Der am Bezugswert bei 100 % vorherrschende Zinsfuß, ist mit 2,3 % unter dem angesetzten Zinssatz des Kapitalmarktes von 4 % angesiedelt. Daraus ergibt sich, dass die Investition zu diesem Zeitpunkt unvorteilhaft ist. Sie wird vorteilhaft, bei:

- einer Strompreisabsenkung um 40 % und mehr
- einer Arbeitspreisanhebung für Wärme um ca. 20% und mehr
- einer Laufzeitanhebung um mehr als 50 %
- einer Grundpreisanhebung für Wärme von mehr als 50 %

Abbildung 8.10 zeigt die technischen Einflüsse auf den internen Zinsfuß.

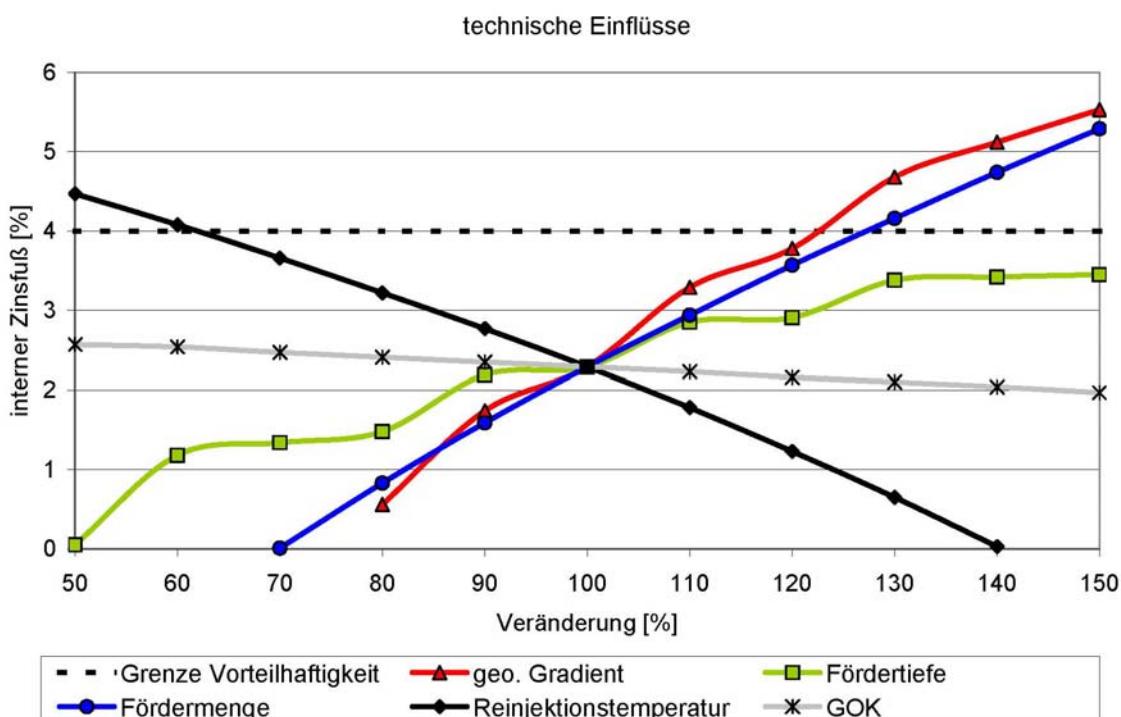


Abbildung 8.10: technische Einflüsse auf die Entwicklung des internen Zinsfußes

Bei der Auswertung der grafischen Sensitivitätsstudie der technischen Einflüsse auf das Verhalten des internen Zinsfußes, erkennt man bei prozentual steigender Veränderung des geothermischen Gradienten, der Fördermenge sowie der Fördertiefe, ein Ansteigen des internen Zinsfußes. Die Temperatur des Thermalwassers erhöht sich mit zunehmendem Gradienten und zunehmender Tiefe gleichermaßen. Durch das höhere Wärmepotential, werden die Verkaufserlöse gesteigert. Mit einer größeren Fördertiefe wird jedoch auch das für die Bohrung gebundene Anlagenkapital größer, wohingegen dies bei gleicher prozentualer Veränderung des Gradienten entfällt. Dadurch ist der Verlauf des internen Zinsfußes im Bezug auf die Fördertiefe flacher. Die Zunahme der Fördermenge wirkt sich nahezu linear mit einem steigenden Zinsfuß aus. Umgekehrt wirksam werden die Einflüsse von Reinjektionstemperatur und Förderhöhe vom dynamischen Wasserspiegel (GOK) deutlich. Erhöht man den Wert der Thermalwasser-temperatur zur Reinjektion, sinkt das entnommene Wärmepotential des Thermalwas-sers und dadurch der Verkaufserlös von Wärme. Vom Bezugspunkt aus gesehen, füh-ren folgende Veränderungen zu einer Vorteilhaftigkeit der Investition:

- Zunahme des geothermischen Gradienten und Fördermenge um mehr als 25 %
- Abnahme der Reinjektionstemperatur um 60 % und mehr

8.4.3 Investition

Die Sensitivität der Investitionen für die Anlage ruht einzig aus technischen Einflüssen her. Diese sind in Abbildung 8.11 dargestellt.

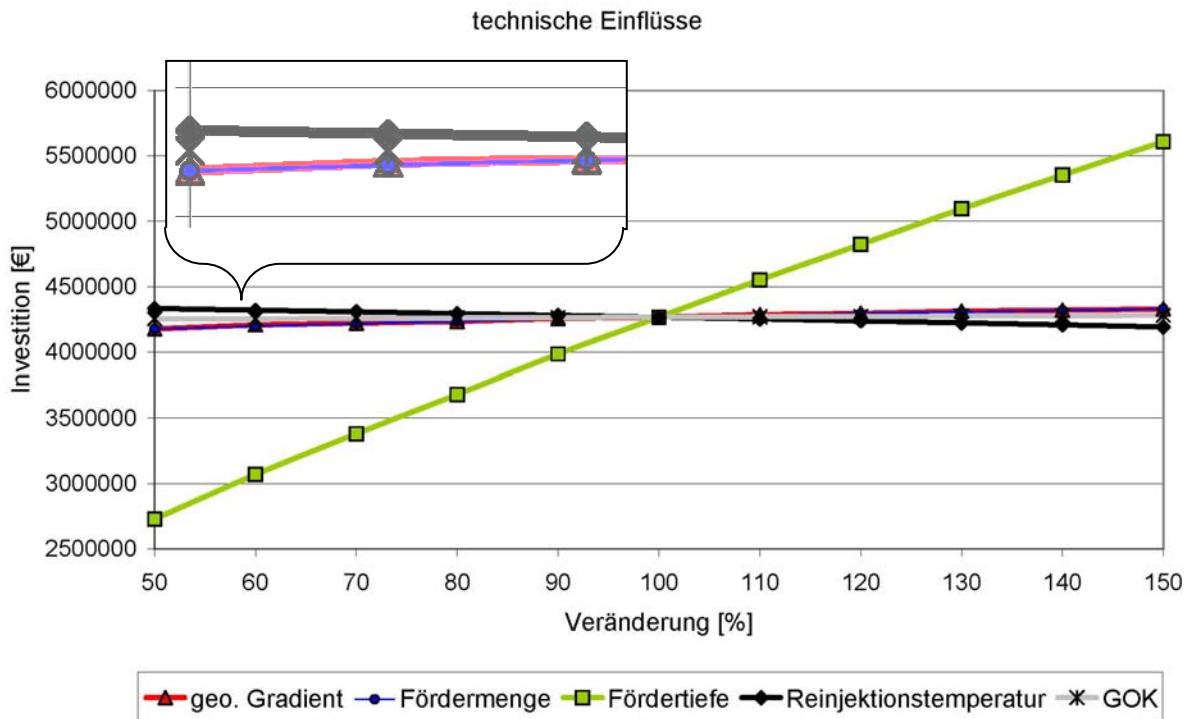


Abbildung 8.11: technische Einflüsse auf die Höhe der Investition

Der Einfluss des geothermischen Gradienten, der Reinjektionstemperatur, der Fördermenge und der Höhe des dynamischen Wasserspiegels auf die Entwicklung der Investitionen, ist vernachlässigbar gering. Dies liegt an den Kosten für die Abteufung der Produktionsbohrungen, die den größten Anteil an den gesamten Investitionen einnehmen. Daher ist auch die Fördertiefe entscheidend für die Höhe der Investitionen. Mit steigender Fördertiefe steigt das gebundenen Anlagenkapital.

8.4.4 Gewinn

Der Gewinn bezeichnet das positive Betriebsergebnis. Er ist die Differenz zwischen Ertrag und Aufwand. Der Gewinn als absoluter Wert oder verallgemeinert, hat für sich allein gestellt wenig Aussagekraft. Er muss daher immer in Verbindung mit anderen Größen gebracht werden. In dieser Betrachtung sollen die prozentualen Veränderungen der Einflussgrößen auf die prozentuale Veränderung der Gewinnentwicklung zurückgeführt werden. Damit wird anhand des Gewinnes eine Aussage zu der Gewichtigkeit einer Einflussgröße gemacht.

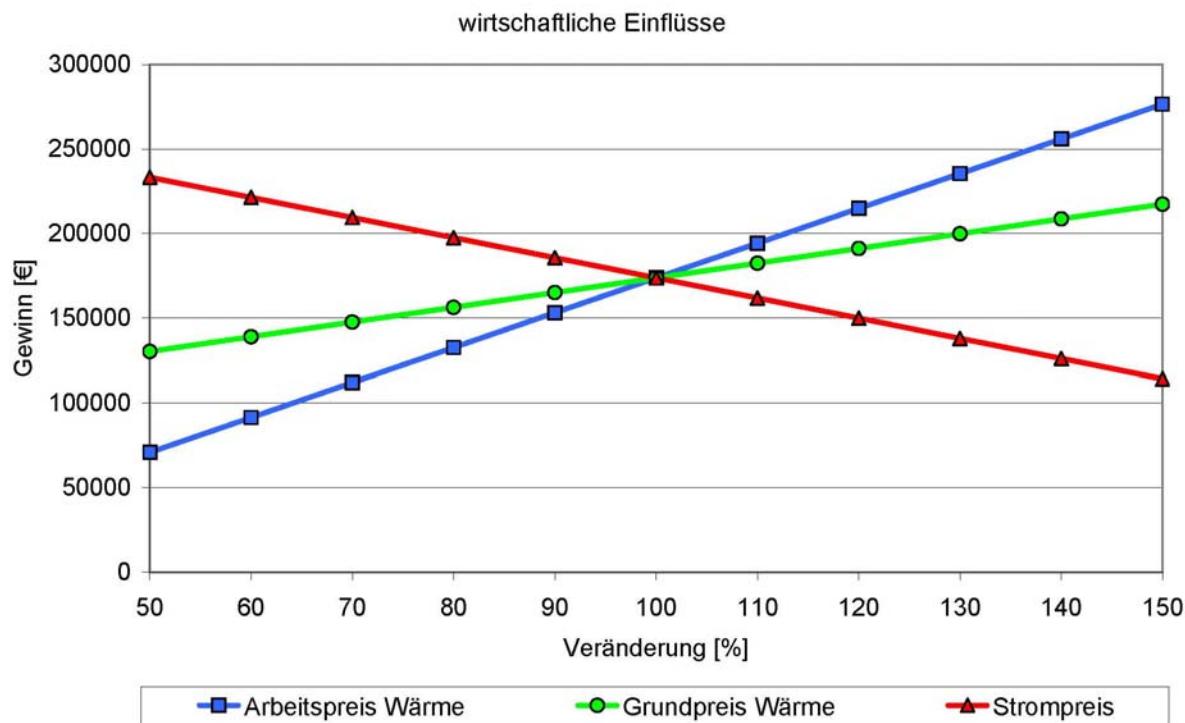


Abbildung 8.12: wirtschaftliche Einflüsse auf die Gewinnentwicklung

Es ist aus der Abbildung 8.12 für die wirtschaftlichen Einflüsse eine lineare Veränderung festzustellen. Der Grund- und Arbeitspreis wirken sich dabei mit positiver Veränderung auch auf den Gewinn positiv aus, wohingegen bei zunehmender Veränderung des Strompreises sich ein negativer Gewinnverlauf ergibt. Für den Grundpreis der Wärme gilt, dass bei einer Veränderung um 10 % eine 5%ige Gewinnsteigerung bzw. -minderung erfolgt. Für den Arbeitspreis ist die Steigerung oder Minderung mit 12 % je 10 % Veränderung am deutlichsten. Der lineare Einfluss des Strompreises beträgt 7% je Veränderungsschritt.

Die technischen Einflüsse auf den Gewinn sind in Abbildung 8.13 grafisch aufbereitet. Die Fördertiefe und der geothermische Gradient wirken sich gleichermaßen mit absoluten Werten identisch auf die Gewinnentwicklung aus. Dabei ist der Verlauf im Einzelnen nicht linear, jedoch verhält sich die Gewinnentwicklung tendenziell identisch mit dem linearen Verlauf der Veränderungen der Fördermenge. Hier ist bei 10%iger Veränderung der Fördermenge eine ebenfalls 10%ige Gewinnveränderung zu erkennen. Der Einfluss der Höhe des dynamischen Wasserspiegels ist wiederum zu vernachlässigen auf die Gewinnentwicklung. Die geringe Zunahme der Aufwendungen bei der Steigerung der Förderhöhe für die Tiefenpumpe, mindert den Gewinn nur um 1% je 10% Veränderung. Die Zunahme der Reinjektionstemperatur hingegen führt zu einem deutlichen Absinken der Gewinne. 7 Prozent Verlust je 10% höherer Temperatur sind einzuplanen. Dies ist auf die Einbußen beim Wärmeverkauf aufgrund der geringen Wärmemenge zurückzuführen.

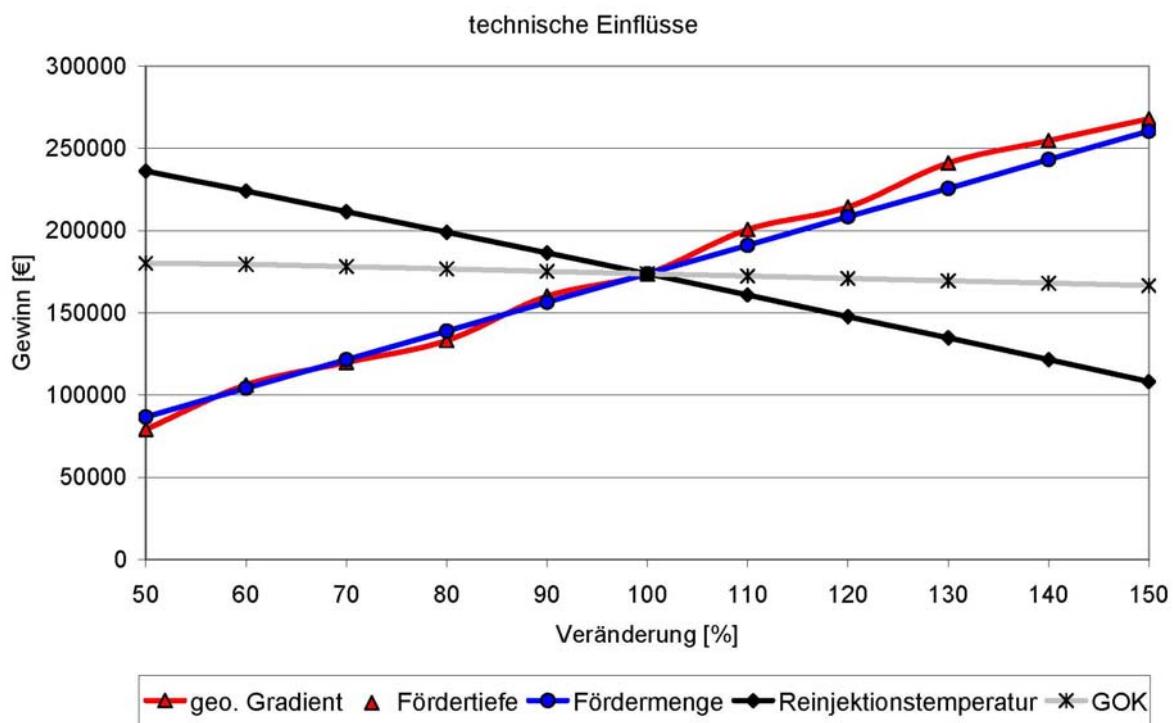


Abbildung 8.13:technische Einflüsse auf die Gewinnentwicklung

8.4.5 Wärmemenge

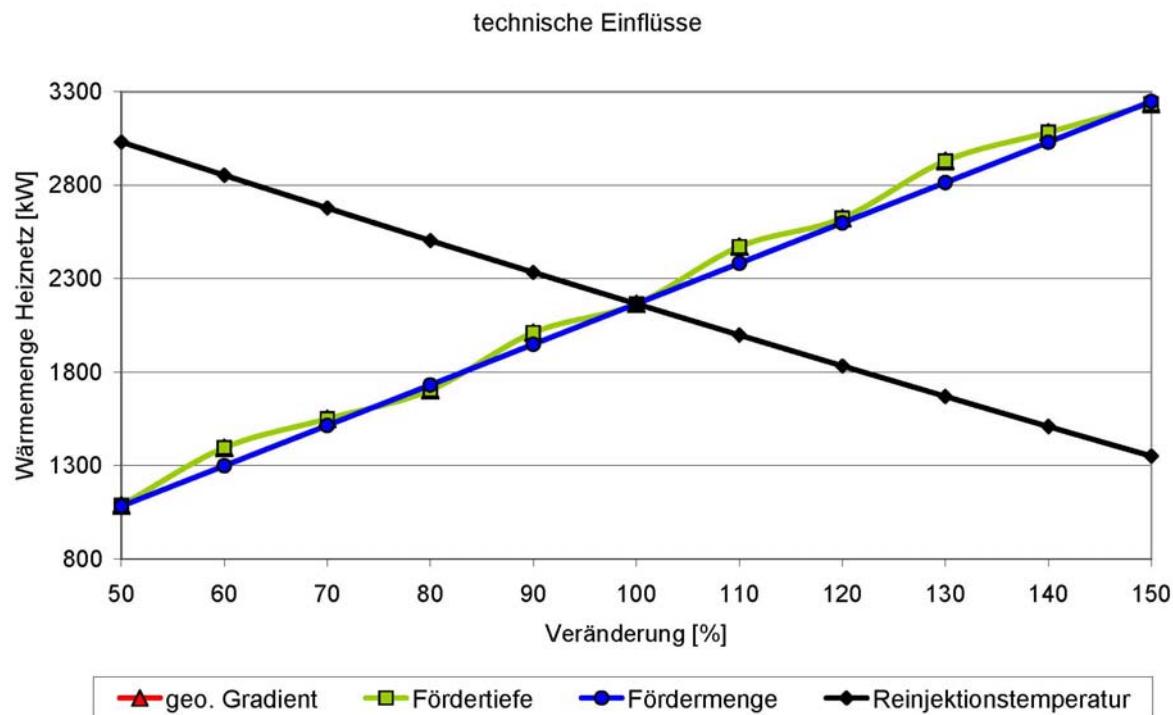


Abbildung 8.14: technische Einflüsse auf die Entwicklung der Wärmemenge des Heiznetzes

Die in Abbildung 8.14 gezeigten technischen Einflüsse auf die Wärmemenge verhalten sich wie die zuvor beschriebene Gewinnentwicklung. Da die Gewinnentwicklung aufgrund der technischen Einflüsse einzig auf dem Verkauf der Wärme ruht, ist eine andersartige Bewertung auch nicht möglich. Die in der Abbildung gezeigten Veränderungen geben also lediglich den Verlauf der absoluten Wärmemengen, die dem Heiznetz zur Verfügung stehen, wieder.

8.4.6 Energiebedarf

Der Einfluss technischer Größen auf den Verlauf des Energiebedarfs zeigt die Abbildung 8.15. Mit steigender Fördermenge und Fördertiefe steigt der Energiebedarf für die Wärmepumpe. Die Höhe des dynamischen Wasserspiegels geht zwar auch mit steigender Tendenz einher, bei zunehmender Veränderung jedoch, wirkt sich dies nur wenig auf Steigerung des Energiebedarfs für die Tiefenpumpe im Verhältnis zu den übrigen Einflüssen aus. Eine steigende Reinjektionstemperatur hat zur Folge, dass der Energiebedarf für die Wärmepumpe sinkt, da weniger Wärme zur Übergabe an die Wärmepumpe und somit an das Heizwerk zur Verfügung steht.

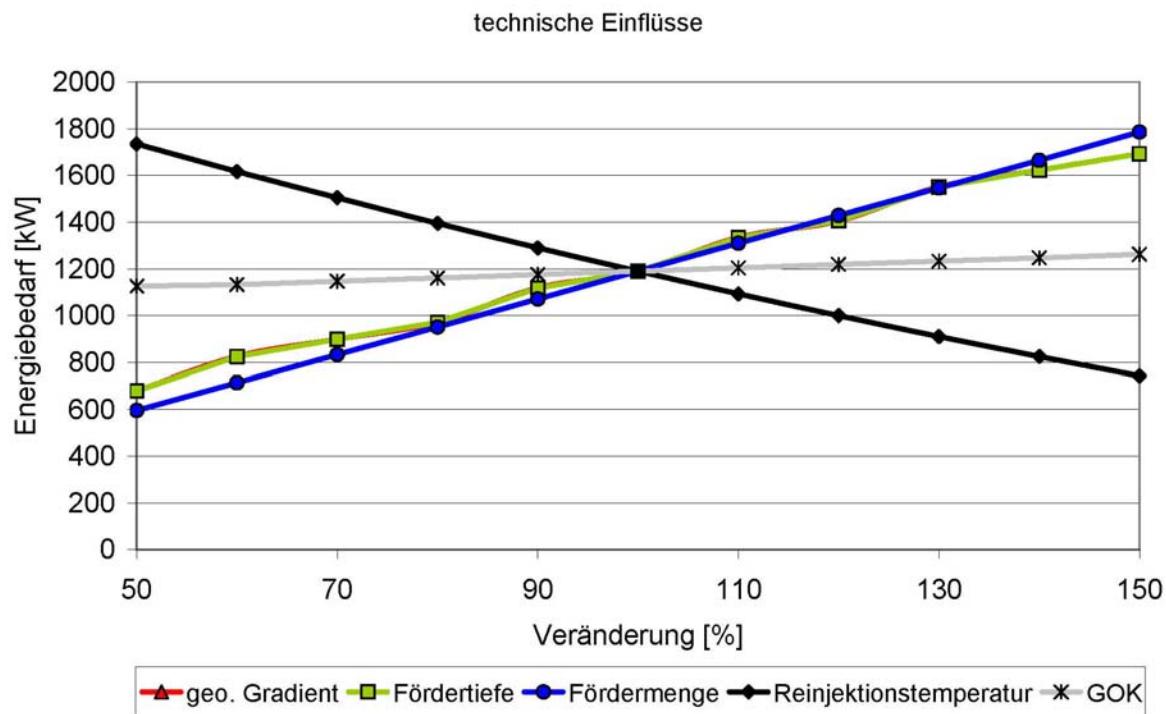


Abbildung 8.15: technische Einflüsse auf die Entwicklung des Energiebedarfs

8.5 Zusammenfassung

Die Machbarkeit einer energetischen Nutzung von Wässern aus ehemaligen Grubenwerken hängt von einigen entscheidenden Faktoren ab. Zunächst einmal muss ein ausreichend verzweigtes untertägiges Streckennetz vorhanden sein, welches zudem mit ausreichend Wasser gefüllt ist. In der Regel ist dies jedoch gegeben, da die Bergwerke über mehrere Jahrzehnte entstanden sind und damit verbunden auch der Ausbau der Strecken sich verbessert hat. Je weiter ein Bergwerk ausgebaut ist, umso größer werden die Möglichkeiten für die Entnahme von warmen Wässern, der Reinjektion und der anschließenden natürlichen Aufwärmung des Wassers.

Ein weiteres Kriterium ist die Temperaturstruktur. Befindet man sich mit dem Bergwerk in einer geothermisch negativen Anomalie, so sind die zu erwartenden Temperaturen zu niedrig, um sie nach heutigen Gesichtspunkten wirtschaftlich sinnvoll für eine Verwendung als Wärmequelle zu nutzen. Bei normalem Gradienten oder positiver Anomalie verbessert sich das vorhandene Energiepotential und die Nutzung wird wirtschaftlicher. Dies geht mit zunehmender Tiefe soweit, dass neben Wärme sogar Strom produziert werden kann³.

Sind die technischen Voraussetzungen erfüllt, bedeutet dies nicht zwangsläufig eine Möglichkeit der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit. Aktuelle Zinsstrukturen auf dem Kapitalmarkt, Zukunftsprognosen über Gewinn und Verlust und die finanziellen Randbedingungen für die Produktion, Förderung, Aufbereitung und Verteilung der Wärme in Form von Anlageninvestitionen, können ein Projekt trotz positiver Grundvoraussetzungen zum Kippen bringen.

³ vgl. Geothermie Unterhaching / Bayern o.ä. Projekte

Für das in dieser Arbeit betrachtete Konzept der Nutzung der Erdwärme aus einem ehemaligen Bergwerk im oberbayerischen Pechkohlerevier sei an dieser Stelle folgendes angemerkt. Die Grundvoraussetzung aller Überlegungen, nämlich das Vorhandensein einer ausreichend groß dimensionierten Quelle mit entsprechend großem Wärmepotential muss erfüllt sein – dies war nur in der Abschätzung möglich. Da das Bergwerk stillgelegt und das untertägige Streckennetz nicht zugänglich ist, kann eine definitive Erkenntnis über Temperaturverhältnisse nur eine Probebohrung bringen. Alle weiteren Betrachtungen berufen sich auf der Tatsache, dass ein untertägiges Wärmepotential von mindestens 24°C vorhanden wird.

In der Abschätzung der Wirtschaftlichkeit konnte keine lohnenswerte oder vorteilhafte Investition für ein derartiges Projekt erarbeitet werden. Dies soll jedoch die Euphorie an der möglichen Nutzung nicht schmälern. Bislang wurden keine Subventionen und Fördergelder aus Förderprogrammen von Europäischer Union, Bund, Ländern und Kommunen mit in die Überlegung einbezogen. Wie die Sensitivitätsstudie zeigt, kann bei Absenken des Investitionsumfangs durchaus eine vorteilhafte Entwicklung des Kapitalwertes erlangt werden.

In Hinsicht auf die langfristige Nutzung eines solchen Geothermieprojektes sollten auch ökologische Aspekte, wie Schonung der Ressourcen, Einsparung von Treibhausgasen und Innovation mit einbezogen werden. Wirtschaftlichkeit heisst nicht unbedingt nur rein finanziellpolitisch wirtschaftlich zu denken und zu sein, sondern auch im Bezug auf Verantwortung den nachfolgenden Generationen gegenüber, eine ökologische Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Das Ergebnis für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit kann nach Abschluss aller Betrachtungen daher nur lauten, dass zum derzeitigen Zeitpunkt eine finanzielle Wirtschaftlichkeit auf Basis der eigenverantwortlichen Finanzierung der Investitionen nicht gegeben ist. Ohne Subventionen oder Fördergelder ist eine Umsetzung und Finanzierung zurzeit nicht möglich. Bei einer festgelegten Nutzungsdauer von 30 Jahren und bei einem Zinssatz von 4 % kann keine vorteilhafte Investition ermittelt werden. Erst nach 46 Jahren erfolgt eine Amortisation des Projektes.

Eine Verbesserung bezüglich Amortisation und Vorteilhaftigkeit kann nur durch eine markante Erhöhung der Einnahmen durch Preiserhöhungen von mehr als 20 Prozent erfolgen. Dann sinkt die Amortisationsdauer in den Bereich der Nutzungsdauer von 30 Jahren. Das Vorfinden eines höheren geothermischen Gradienten und somit einer höheren Temperatur hätte zwar gleiche Auswirkungen, jedoch ist dies geologisch gesehen unwahrscheinlich.

Die technischen Möglichkeiten zur Minderung der Amortisationszeit sind ebenfalls begrenzt. Die Fördermenge von 100 m^3 je Stunde ist durchaus realistisch. Eine höhere Förderrate würde zu einem frühzeitigeren Auskühlen der Quelle mit 24°C bedeuten. Ebenso ein Herabsetzen der Reinjektionstemperatur. Beides wäre jedoch wirtschaftlich gesehen zunächst von Vorteil, betrachtet man nur die Finanzierung des Projektes.

Eine Minimierung der bisherigen Investitionssumme um ca. 1 Millionen Euro, beispielsweise durch die Zahlung von Fördergeldern, würde zu einer positiven Aussage für die Projektierung führen. Dann sinkt die Amortisationszeit unter die Grenze der Vorteilhaftigkeit von 30 Jahren und der interne Zinsfuß steigt über die angesetzten 4 %.

8.6 Ausblick und Verbesserungen

Die weitergehenden Überlegungen und Themen die auf dieser Arbeit aufbauen, könnten sein:

- Betrachtungen zum Ausbau eines Niedrigtemperaturnetzes:

Das vorhandene Thermalwasser wird nicht über eine zentrale Wärmepumpe genutzt, sondern direkt in ein Verteilernetz eingespeist. Die Abnehmer der Wärme nutzen die Wärme des Wassers zur Speisung einer hausinternen Wärmepumpe.

 - + Betrachtung zu Wärmeverlusten gegenüber eines Heizwärmennetzes,
 - + Kosten und Wirtschaftlichkeit eines Niedrigtemperaturnetzes
 - + Erhebungen zur Abnehmerstruktur
- Planung eines Nahwärmennetzes

Aufbau und Umfang des Wärmenetzes, technische Voraussetzungen und Grenzen, Finanzierungsmodell
- Optimierung des Berechnungsprogramms für weitere Kältemittel, z.B. R407c
- Nutzung anderer Niedrigenergiequellen:

Die Nutzung von Erdwärme wird ausgeweitet auf die Betrachtung und den Vergleich anderer Quellen, wie z.B. Tunnelgeothermie, Abwasserentwärmung, u.ä. Betrachtung von CO₂ Einsparungen
- Parameterstudien zu vorhandenen artverwandten oder gleichartigen Projekten in Nordrhein-Westfalen und den Niederlanden
- Zukunftsstudien für postmontane Nutzung von Bergwerken:

Die Entwicklung der deutschen Kohlereviere im Hinblick auf kommende Schließungen, soll für die alternative Nutzung untersucht werden. Dabei steht im Vordergrund:

 - + Nutzung vorhandener Strukturen und Einrichtungen
 - + Zunahme der nutzbaren Objekte in der Zukunft
 - + Abschätzung von Möglichkeiten, Risiken und Chancen

Quellenverzeichnis

Quellenangaben erfolgen gemäß:

- 1) Niederhauser, J.: *Die schriftliche Arbeit* 2., überarb. Aufl. Mannheim etc.: Dudenverlag 2000.
- 2) Friedrich, C.: *Schriftliche Arbeiten im technisch-naturwissenschaftlichen Studium*. Mannheim etc.: Dudenverlag, 1997.

- [1] Stöckle, Christian:
Wirtschaftlichkeit von Geothermiekraftanlagen.
Universität der Bundeswehr München, Diplomarbeit.
Neubiberg, 2007
- [2] Bußmann/Kabus/Seibt (Hrsg.):
Geothermie, Wärme aus der Erde (Technologie-Konzepte-Projekte).
1.Auflage. Karlsruhe: Verlag C.F. Müller GmbH, 1991
- [3] Rau, Hans:
Geothermische Energie, Weltweite Nutzung der Erdwärme.
1. Auflage. München: Udo Pfriemer Verlag, 1978
- [4] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Geothermie“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Geothermie>
[Stand: 16.04.2007].
- [5] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Erdentstehung“. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Entstehung_der_Erde
[Stand: 29.04.2007].
- [6] Junglas, Peter (2007): „Sterbende Sterne“. URL: <http://www.peter-junglas.de/pers/astro/Roentgen/html/text6.html>
[Stand: 21.07.2007].
- [7] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Akkretion“. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Akkretion_%28Astronomie%29
[Stand: 28.04.2007].
- [8] Buntebarth, G.:
Geothermie.
Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag, 1980
- [9] Stoltenberg Energie GmbH, Schönberg (2006). URL: http://www.stoltenberg-energie.de/glossar_-_o+M54a708de802.html
[Stand: 10.07.2007].

- [10] Gudden, Helmut: „Über Nutzungsmöglichkeiten von Erdwärme in Bayern“. In Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland [Hg]: *Geologisches Jahrbuch*. Hannover: Münstermann Druck KG, 1983 (=Reihe C – Heft 33). S. 5-25.
- [11] Öko Energy Systems, Strasburg: „Erdwärme“. URL: <http://www.waermepumpe24.de/erdsonden.htm> [Stand: 18.04.2007].
- [12] Redaktion: Energiewende Oberland e.V. - Bürgerstiftung für Erneuerbare Energien und Energieeinsparung (2006). URL: <http://energiewende-oberland.de> [Stand: 19.04.2007].
- [13] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Grundwasserleiter“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Grundwasserleiter> [Stand: 29.04.2007].
- [14] Roedl & Partner GbR URL: <http://www.roedl.de/pressecenter/index.htm> [Stand: 29.04.2007].
- [15] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Geysir“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Geysir> [Stand: 29.04.2007].
- [16] Redaktion Sunshine Radio (2006): „Nordeuropa via Mountainbike - Martin Sitzmann tritt in die Pedale“. URL: http://www.ex-press.it/montagstreff/motreff_sitzmann_island_geysir.jpg [Stand: 18.06.2007].
- [17] Deutsche Energie Agentur (2007): „Was versteht man unter dem Hot-Dry-Rock-Verfahren?“. URL: http://www.thema-energie.de/article/show_article.cfm?id=3350 [Stand: 29.04.2007].
- [18] Prof. Dr. Henk, Andreas, Geologisches Institut Universität Freiburg (2007): „Tiefengeothermie“. URL: http://www.tiefegeothermie.uni-freiburg.de/artikel/02-Geothermie-A0007/02-Natur-A0014/hdr_block.jpg [Stand: 07.07.2007].
- [19] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Bergbau“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bergbau> [Stand: 30.05.2007].

-
- [20] Hansen, Nicolas (2007): „Das Ende ist der Anfang – der Umzug des Dorfes Otzenrath“. URL: <http://nicolashansen.de> [Stand: 21.07.2007].
- [21] Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2006): „Der Berg heizt“. URL: <http://archiv.ethlife.ethz.ch/articles/news/geothermie.html> [Stand: 28.06.2007].
- [22] Daldrup & Söhne AG
URL: <http://www.daldrup.com>
[Stand: 30.05.2007].
- [23] Redaktion MinewaterProject (2007)
URL: <http://www.minewaterproject.info>
[Stand: 10.07.2007].
- [24] Pflaumann, Uwe/Stephan, Walter:
Geologische Karte von Bayern – Nr. 8237 Miesbach.
Bayerisches Landesamt für Geologie, 1968
- [25] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Pechkohle“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Pechkohle> [Stand: 20.04.2007].
- [26] Wember, Heinrich Paul: „Bergwerk Hausham, Fotos von Übertage“. Aus: Nachlass von Wember, Heinrich (*1910-†1985), Kraftwerksleiter Hausham URL: <http://www.gen.heinz-wember.de/hohenwmaxlr/Bergwerk/Thum1.html> [Stand: 01.07.2007].
- [27] Interessenkreis Bergbaumuseum Hausham e.V. (Archiv): „Erdgeschichte – Paläontologie“. In: Bergbaumuseum Hausham (Informationsheft), S. 6, 10.
- [28] Regierung von Oberbayern - Bergamt Südbayern:
Risswerkaufzeichnungen Bergwerk Hausham
mit freundlicher Genehmigung durch E.ON Montan – Herr Mühlenbeck
- [29] Bayerisches Hauptstaatsarchiv, Oberbergamt:
Nr.: 712, 433, 822, 823, 888, 889
- [30] Schulz, Rüdiger: „Analytische Modellberechnung zum Wärmeaustausch beim Dublettenbetrieb“. In: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung [Hg]: *Programm Energieforschung und Energietechnologien. Statusreport Geotechnik und Lagerstätten*
Jülich, 1988

- [31] Geissler, Peter: „Räumliche Veränderung und Zusammensetzung der Flöze in den Kohlebergwerken Hausham und Penzberg“. In: Bayerisches Geologisches Landesamt [Hg]: *Geologica Bavaria Nr. 73* München: Bayrisches Geologisches Landesamt, 1975
- [32] Landesamt für Umweltschutz Bayern. „Geologie – Daten“ URL: <http://www.lfu.bayern.de/geologie/daten/index.htm> [Stand: 05.11.2007]
- [33] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Tetrafluorethan“. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Tetrafluorethan> [Stand: 28.04.2007].
- [34] Prof. Dr. Ing. Lecheler, Stefan:
„Tabellen und Diagramme – Frigen 134a“. Aus: *Skriptum zur Vorlesung Thermodynamik* Neubiberg, März 2007
- [35] Gesellschaft für Energiemanagement mbH:
Kennziffernkatalog URL: <http://www.kennziffernkatalog.de/html/Seite2.htm> [Stand: 01.10.2007]
- [36] Baatz, E.:
Verstromung von Niedertemperaturwärme mit Hilfe einer ORC-Anlage im Zementwerk Lengfurth. Abschlußbericht Z 2.3 70441-2/3 des Programms: „Investitionen zur Verminderung von Umweltbelastungen“. Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Dezember 1999, 86p.
- [37] Köhler, Silke:
Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse – Analyse und Prozessvergleich binärer Kraftwerke. Scientific Technical Report STR 06/02, Geoforschungszentrum Potsdam. Technische Universität Berlin, Dissertation. Berlin/Potsdam, 2006
- [38] Verein Dt. Ingenieure (Hg.):
Wärmetechnische Arbeitsmappe. 13. neubearbeitete und erweiterte Auflage Düsseldorf: VDI. 1988
- [39] Bejan, Adrian:
Thermal Design and Optimization. New York/Chichester/Brisbane/Toronto/Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1996

-
- [40] Smart Drilling GmbH: „Richtbohrtechnik“.
URL: <http://www.smart-drilling.de/richtbohrtechnik.html>
[Stand: 22.10.2007]
 - [41] Daldrup & Söhne AG:
Arbeitspapier zum Minewater Project Heerlen (Niederlande).
Nicht veröffentlicht
 - [42] Van Bergermeer, Jan-Jaap und Swart, Dick:
Präsentation anlässlich der 7.Bohrlochbergbau-Tagung vom 22.10.2007 in Heerlen/Niederlande.
Nicht veröffentlicht
 - [43] Beyer, Joep (KCA Deutag):
„Innovative Bohrkonzepte / Aktuelle Kostenaufteilung“.
Von: Institut für Energetik und Umwelt gGmbH.
Download-Portal:
Workshop „Senkung des bohrtechnischen Anteils an den geothermischen Stromgestehungskosten“
URL: <http://www.ie-leipzig.de/Geothermie/Portal/downloads/KCA.pdf>
[Stand: 05.11.2007]
 - [44] Prof. Dr. Schaumann, Gunter:
Vortrag Symposium – Geothermische Stromerzeugung
Von: Institut für Innovation, Transfer und Beratung - ITB GmbH
Transferstelle Bingen
URL: www.tsb-energie.de/service/publikationen/2002/tsb_geostrom_landau.pdf
[Stand: 05.11.2007]
 - [45] Krankenhaus Agathried
Leiter Abteilung „Technik“
persönliches Gespräch, 06.12.2007
 - [46] Gemeinde Hausham, Bauamt
persönliches Gespräch, 11.02.2007
 - [47] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Kosten“.
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kosten>
[Stand: 14.12.2007].
 - [48] Wikimedia Foundation Inc., St.Petersburg, Florida/USA: „Ertrag“.
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Ertrag>
[Stand: 14.12.2007].
 - [49] Forschungszentrum Informatik (FZI) an der Universität Karlsruhe
Forschungsbereich Prozess- & Datenbankmanagement im Engineering (PDE):
„PLM – Product Lifecycle Management“
URL: <http://www.plmlabor.de>
[Stand: 12.12.2007]

Abbildungsverzeichnis (Abb.)

Lfd. Nr.	Seite	Quelle	Titel
Kapitel 1			
Abb.: 1.1	3	Eigene Grafik	<i>Flussdiagramm zur Aufgabenstellung</i>
Kapitel 2			
Abb.: 2.1	4	Eigene Grafik	<i>Aufteilung der Erdschichten</i>
Abb.: 2.2	5	Eigene Grafik	<i>Herkunft der gespeicherten Erdwärme</i>
Abb.: 1.3	6	[6]	<i>Illustration einer Akkretionsscheibe</i>
Abb.: 2.4	7	[9]	<i>Oberflächennaher Jahrestemperaturverlauf</i>
Abb.: 2.5	8	Eigene Grafik	<i>Einteilung der Geothermie nach der Tiefe und Nutzung</i>
Abb.: 2.6	9	[11]	<i>Vergleich Erdsonde und Erdkollektor</i>
Abb.: 2.7	10	[14]	<i>Darstellung Aquifer im Voralpenland</i>
Abb.: 2.8	11	[16]	<i>Geysir auf Island</i>
Abb.: 2.9	13	[18]	<i>Funktionsprinzip des Hot-Dry-Rock-Verfahrens</i>
Kapitel 3			
Abb.: 3.1	14	[20]	<i>Braunkohleabbau im Tagebau – Garzweiler I</i>
Abb.: 3.2	15	Eigene Grafik	<i>schematische Querschnitts-darstellung eines untertägigen Bergwerkes</i>
Abb.: 3.3	18	[29]	<i>Partner des INTERREG III B Programm</i>
Abb.: 3.4	19	[29]	<i>Übersicht über die verschiedenen Verwendungen von Minenwasser / Minewater Project, Heerlen/NL</i>
Abb.: 3.5	20	[29]	<i>Geplanter Ausbau des Wärme-/Kältenetzes in Heerlen</i>
Abb.: 3.6	21	[24]	<i>Geologischer Querschnitt der Haushamer Mulde</i>

Abb.: 3.7	22	[25]	Klenzeschacht (li.) und Aufbereitung um 1960 (Ansicht von Norden)
-----------	----	------	--

Kapitel 4

Abb.: 4.1	23	Eigene Grafik	Gliederungsansicht Kapitel 4
Abb.: 4.2	24	[27]	Querprofil der Haushamer Mulde
Abb.: 4.3	26	[28]	Schnittdarstellung (Ausschnitt) aus dem Bereich der Schächte
Abb.: 4.4	27	[27]	Beispiel für den Streckenausbau
Abb.: 4.5	29	Eigene Grafik	Schematische Darstellung der 1-Bohrloch-Strategie
Abb.: 4.6	30	Eigene Grafik	Schematische Darstellung der Wärmeübertragungsfläche
Abb.: 4.7	32	Eigene Grafik	Verbindung der 3. und 6. Sohle über Gesenke und Bremsen im Flöz 3 – Großkohl
Abb.: 4.8	33	[28]	Ausschnitt der Risswerkauf-zeichnungen aus dem Bereich Flöz 3 – Großkohl (Ansicht von oben)
Abb.: 4.9	36	Eigene Grafik	Durchlaufzeiten bei verschiedenen Entnahmemengen
Abb.: 4.10	39	Eigene Grafik	Thermische Durchbruchzeit verschiedener Entnahmemengen in AJahren
Abb.: 4.11	40	Eigene Grafik	Aufwärmkurve nach Reinjektion mit 10°C über die Strecke x
Abb.: 4.12	42	[32]	Temperaturverteilung in 750 m Tiefe unter Geländeoberkante (GOK)
Abb.: 4.13	44	Eigene Grafik	Temperaturentwicklung als Funktion der Tiefe und des geothermischen Gradienten

Kapitel 5

Abb.: 5.1	45	Eigene Grafik	Gliederung des Kapitel „Energiebetrachtungen“
Abb.: 5.2	46	Eigene Grafik	Darstellung der Systemgrenzen
Abb.: 5.3	49	Eigene Grafik	Trendlinie der spezifischen Wärmekapazität

Abb.: 5.4	52	Eigene Grafik	<i>Schematische Darstellung der Abläufe im Heizwerk und deren bestimmenden Größen</i>
Abb.: 5.5	54	Eigene Grafik	<i>Schematische Darstellung des Wärmepumpenprozesses</i>
Abb.: 5.6	55	[33]	<i>Strukturformel des Kältemittels R134a</i>
Abb.: 5.7	56	Eigene Grafik	<i>T-s-Diagramm des Wärmepumpenprozesses mit Ortsbezug</i>
Abb.: 5.8	58	[34]	<i>Auszug aus den Stoffwerttabellen für Frigen134a</i>
Abb.: 5.9	71	Eigene Grafik	<i>Sensitivitätsstudie der Tiefenpumpe / Basis bei 200m unter GOK, 100 m³/h Fördermenge bei 25°C, konstante Druckverluste im Verdampfer von 2 bar</i>
Abb.: 5.10	73	[38]	<i>Auslesen des Leistungsbedarfes für die Tiefpumpe aus dem Datenblatt</i>
Abb.: 5.11	75	Eigene Grafik	<i>Kostenkurven von Tiefenpumpen in Abhängigkeit der Fördertiefe für verschiedene Fördervolumen</i>
Abb.: 5.12	77	Eigene Grafik	<i>Kostenkurve der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Verdichterleistung</i>

Kapitel 6

Abb.: 6.1	79	Eigene Grafik	<i>Gliederung des Kapitel 6 „Bohrung“</i>
Abb.: 6.2	81	Eigene Grafik	<i>Modell zweier Vertikalbohrungen mit räumlicher Trennung</i>
Abb.: 6.3	82	Eigene Grafik	<i>Modell der Vertikal- und Ablenkbohrung von einem Bohrplatz</i>
Abb.: 6.4	83	Eigene Grafik	<i>Modell von zwei Ablenkbohrung von einem Bohrplatz</i>
Abb.: 6.5	85	[40]	<i>Scout 2000 RSS – steuerbares „closed-loop“ Rotary Steerable System (RSS) der Firma Smart Drilling GmbH</i>
Abb.: 6.6	86	[41]	<i>Bild eines Slotted Liner</i>
Abb.: 6.7	87	Eigenes Bild	<i>Kameraaufzeichnung der Durchbruchkante in einem bestehenden Streckenabschnitt in 223 unter GOK</i>
Abb.: 6.8	88	[41]	<i>Schematische Darstellung eines Durchbruches in ein altes Grubengebäude</i>

Abb.: 6.9	89	[43]	<i>Gegenüberstellung der Bohrugsdurchmesser</i>
Abb.: 6.10	94	[35]	<i>Aufteilung der Bohrkosten nach Fa. Daldrup & Söhne AG</i>
Abb.: 6.11	95	[44]	<i>Aufteilung der Bohrkosten nach Prof. Dr. Gunter Schaumann</i>
Abb.: 6.12	96	Eigene Grafik	<i>Validierung der Bohrkostenaufteilung</i>
Abb.: 6.13	98	Eigene Grafik	<i>Kostenkurven zur Ermittlung der Exponenten; Kostenbezugspunkt bei 650 m</i>

Kapitel 7

Abb.: 7.1	101	[35]	<i>Heizenergieverbrauchskennwerte von Krankenhäusern</i>
Abb.: 7.2	102	[35]	<i>Heizenergieverbrauchskennwerte von Schulen</i>
Abb.: 7.3	105	Eigene Grafik	<i>Versorgungsmodell von Haushalten mit Nahwärme</i>

Kapitel 8

Abb.: 8.1	109	Eigene Grafik	<i>Fließbild zur Gliederung des Abschnittes Wirtschaftlichkeit</i>
Abb.: 8.2	110	[39]	<i>Kostenaufstellung in Anlehnung an A. Bejan et al</i>
Abb.: 8.3	116	[49]	<i>Schema der Methoden der Investitionsrechnung</i>
Abb.: 8.4	118	Eigene Grafik	<i>Ermittlung der Vorteilhaftigkeit der Amortisation bei 4%</i>
Abb.: 8.5	119	Eigene Grafik	<i>Grenzinvestition der eben noch vorteilhaften Investition</i>
Abb.: 8.6	119	Eigene Grafik	<i>Grenzzinssatz der eben noch vorteilhaften Investition</i>
Abb.: 8.7	121	Eigene Grafik	<i>Wirtschaftliche Einflüsse auf die Entwicklung der Amortisation</i>
Abb.: 8.8	122	Eigene Grafik	<i>Technische Einflüsse auf die Entwicklung der Amortisation</i>
Abb.: 8.9	124	Eigene Grafik	<i>Wirtschaftliche Einflüsse auf die Entwicklung des internen Zinsfußes</i>

Abb.: 8.10	125	Eigene Grafik	<i>Technische Einflüsse auf die Entwicklung des internen Zinsfußes</i>
Abb.: 8.11	127	Eigene Grafik	<i>Technische Einflüsse auf die Höhe der Investition</i>
Abb.: 8.12	128	Eigene Grafik	<i>Wirtschaftliche Einflüsse auf die Gewinnentwicklung</i>
Abb.: 8.13	129	Eigene Grafik	<i>Technische Einflüsse auf die Gewinnentwicklung</i>
Abb.: 8.14	130	Eigene Grafik	<i>Technische Einflüsse auf die Entwicklung der Wärmemenge des Heiznetzes</i>
Abb.: 8.15	131	Eigene Grafik	<i>Technische Einflüsse auf die Entwicklung des Energiebedarfs</i>

Tabellenverzeichnis (Tb.)

Lfd. Nr.	Seite	Titel
Kapitel 5		
Tb.: 5-1	47	<i>Übersichtstabelle der Berechnungsgrößen im System I</i>
Tb.: 5-2	48	<i>Wertetabelle der Dichte in Abhängigkeit der Temperatur</i>
Tb.: 5-3	49	<i>Wertetabelle der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur</i>
Tb.: 5-4	53	<i>Eingangsgrößen für das System II - Wärmepumpenprozess</i>
Tb.: 5-5	57	<i>Darstellung der Zustandsgrößen am Verdichtereintritt</i>
Tb.: 5-6	60	<i>Darstellung der isentropen Zustandsgrößen am Verdichteraustritt</i>
Tb.: 5-7	61	<i>Darstellung der Zustandsgrößen am realen Verdichteraustritt</i>
Tb.: 5-8	62	<i>Darstellung der Zustandsgrößen am Kondensatoreintritt</i>
Tb.: 5-9	63	<i>Darstellung der Zustandsgrößen am Kondensatoraustritt</i>
Tb.: 5-10	64	<i>Darstellung der Zustandsgrößen am Drosseleintritt</i>
Tb.: 5-11	65	<i>Darstellung der Zustandsgrößen am Drosselaustritt</i>
Tb.: 5-12	66	<i>Darstellung der Zustandsgrößen am Verdampferaustritt</i>
Tb.: 5-13	68	<i>Übersichtstabelle der relevanten Eingangsdaten</i>
Tb.: 5-14	69	<i>Einflussfaktoren zur Berechnung der Kosten für die Wärmepumpe</i>
Tb.: 5-15	74	<i>Preisangebote für Tiefenpumpen (2007)</i>
Tb.: 5-16	76	<i>Preisangebot für Wärmepumpen der Firma Zent-Frenger (2007)</i>
Kapitel 6		
Tb.: 6-1	90	<i>Auszug aus dem Gerätelpark der Fa. Daldrup & Söhne AG</i>
Tb.: 6-2	97	<i>Kostenvoranschläge für Bohrungen und tatsächliche Bohrkosten</i>

Kapitel 8

- | | | |
|----------|-----|--|
| Tb.: 8-1 | 111 | <i>Parametereinstellung zur Berechnung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit</i> |
| Tb.: 8-2 | 113 | <i>Direkte Kosten der Investition in absoluten Werten</i> |
| Tb.: 8-3 | 114 | <i>Indirekte Investitionskosten und Gesamtinvestitionskosten in absoluten Werten</i> |
| Tb.: 8-4 | 114 | <i>Betriebskostenaufstellung für die Wärme- und Tiefenpumpe</i> |

Gleichungenverzeichnis (Gl.)

Lfd. Nr.	Seite	Formel
----------	-------	--------

Kapitel 4

Gl.: 4-1 35 $V = A * L$

Gl.: 4-2 37 $t_{Durchlauf} = \frac{A * L}{\dot{V}}$

Gl.: 4-3 38 $t_B = \frac{\rho_A * c_A}{\rho_F * c_F} * \frac{4\pi}{3} * \frac{M * a^2}{Q}$

Gl.: 4-4 38 $\begin{aligned} \rho_A * c_A &= (1-n) * \rho_M * c_M + n * \rho_F * c_F \\ \rho_M * c_M &= \rho_S * c_S \end{aligned}$

Gl.: 4-5 38 $t_B = \frac{(1-n) * \rho_S * c_S + n * \rho_F * c_F}{\rho_F * c_F} * \frac{4\pi}{3} * \frac{M * a^2}{Q}$

Gl.: 4-6 43 $T = T_{grad} * H + 10^\circ C$

Kapitel 5

Gl.: 5-1 48 $\rho = \frac{a_0 + a_1 * T + a_2 * T^2 + a_3 * T^3 + a_4 * T^4 + a_5 * T^5}{1 + b * T}$

Gl.: 5-2 50 $c_T = (9 \times 10^{-6} * T^2 - 0,0007 * T + 4,1935)$

Gl.: 5-3 50 $c_{T,m} = 0,5 * \left[\begin{aligned} &(9 \times 10^{-6} * {T_{T,out}}^2 - 0,0007 * T_{T,out} + 4,1935) \\ &+ (9 \times 10^{-6} * {T_{T,in}}^2 - 0,0007 * T_{T,in} + 4,1935) \end{aligned} \right]$

Gl.: 5-4 50 $Q_{T,out} = \dot{V} * \rho_{T,out} * c_{T,m} * (T_{T,out} - T_{T,in})$

Gl.: 5-5 56 $T_C = T_1 = T_{T,out} - G$

Gl.: 5-6 56 $T_4 = T_{1,g} = T_{T,in} + T_{\ddot{U}}$

Gl.: 5-7 56 $\eta_{V,is} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1}$

Gl.: 5-8 67 $\dot{m} = \frac{Q_{zu}}{h_1 - h_3}$

Gl.: 5-9 67 $P_V = \dot{m} * (h_2 - h_1)$

Gl.: 5-10 67 $\varepsilon = \frac{Q_{zu}}{P_V}$

Gl.: 5-11 68
$$\begin{aligned} Q_{ab} &= Q_{zu} + P_V \\ &= \dot{m}_{R134a} * (h_4 - h_2) \end{aligned}$$

Gl.: 5-12 69
$$K = \frac{W_V * t_{VB} + P_{TP} * t_{VB}}{k_{Strom}}$$

Gl.: 5-13 70 $\Delta p_{TP} = \Delta p_V + \rho_{TW} * g * H$

Gl.: 5-14 71 $P_{TP} = \frac{\Delta p_{TP} * \dot{V}_{TW}}{\eta_{is} * \eta_{el}}$

Gl.: 5-15 75 $C_Y = C_W * \left(\frac{X_Y}{X_W} \right)^\alpha$

Kapitel 6

Gl.: 6-1 99 $K_{Baustelle} = \frac{K_{Pilot} + K_{Aufbohr}}{z_{Pilot} + z_{Aufbohr}} * z_{Baustelle}$

Gl.: 6-2 100
$$\begin{aligned} K_{sonstiges} &= \frac{K_{Pilot} + K_{Aufbohr}}{z_{Pilot} + z_{Aufbohr}} * z_{sonstiges} \\ &= \frac{K_{Pilot} + K_{Aufbohr} + K_{Baustelle}}{z_{Pilot} + z_{Aufbohr} + z_{Baustelle}} * z_{sonstiges} \end{aligned}$$

Gl.: 6-3 100 $K_{Bohrloch} = K_{Pilot} + K_{Aufbohr} + K_{Baustelle} + K_{sonstiges}$

Kapitel 7

Gl.: 7-1 102 $Q_{Bedarf} = K * A_{Nfl}$

Gl.: 7-2 104 $Q_{ab,Jahr} = t_B * Q_{ab}$

Gl.: 7-3 106 $q_{mix} = \frac{q_{75} + q_{50} + q_{30}}{3}$

Gl.: 7-4 106 $P_{Anschluss} = A_{Wfl} * q_{mix}$

Gl.: 7-5 106 $Q_{Jahr} = t_B * P_{Anschluss}$

Gl.: 7-6 107 $x_H = \frac{Q_{ab,Jahr}}{Q_{Jahr}}$

Kapitel 8

Gl.: 8-1 115 $E_G = E_{GP} + E_{AP}$

Gl.: 8-2 115 $E_{GP} = K_{GP} * P_A * H$

Gl.: 8-3 116 $E_{AP} = K_{AP} * Q_{WN} * t_B$

Gl.: 8-4 117 $C_0 = \sum_{t=1}^n (E_n - A_n) * \frac{1}{q^n} = \sum_{t=1}^n (E_n - A_n) * \frac{1}{(1+i)^n}$