

Langzeitbeobachtung der Temperatur im Nutzhorizont während des Betriebes des Geothermischen Heizwerkes

Kuno Schallenberg, GeoForschungsZentrum Potsdam

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	104
2 Temperaturabsenkung als Funktion des Fördervolumenstroms	105
3 Weitere Ableitungen aus den Meßergebnissen	107
4 Ursachen der abweichenden Horizonttemperaturbestimmung	109
5 Verfeinertes Bilanzverfahren.....	110
6 Ergebnis des Vergleiches der Bilanzverfahren	114
7 Ausblick	115
8 Literatur.....	115

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit soll der Einfluß des geregelten Volumenstroms auf die Temperaturabsenkung am Sondenkopf quantifiziert werden. Es sind insbesondere Werte des Förder­volumenstroms und der Sondenkopftemperatur eingegangen (siehe Abbildung 3-1 des Berichtes *Das geothermische Heizwerk in Neustadt-Glewe im Betriebsjahr 1996* in diesem Band).

Mit Hilfe einer einfachen Wärmebilanz wird der Verlauf der Sondenkopftemperatur in Ab­hängigkeit vom Volumenstrom des Thermalwassers berechnet. Die im Rahmen der geologi­schen Untersuchungen ausgewiesene Horizonttemperatur [Rockel, 1995] müssen auf Basis der Betriebsdaten nach oben korrigiert werden.

Abstract

This paper deals with data, which are taken from a geothermal heating plant in operation. The long-term temperature observation during production allows to determine the virgin for­mation temperature. Variable production rates due to controlled pump were used. Earlier data in the geological preside investigations must be corrected.

1 Einleitung

In der Geothermischen Heizzentrale (GHZ) Neustadt-Glewe werden an verschiedenen Meß­stellen der obertägigen Anlage Daten erfaßt, die täglich als maximale, minimale und durch­schnittliche Werte dokumentiert werden (siehe Bericht *Das geothermische Heizwerk in Neu­stadt-Glewe im Betriebsjahr 1996* in diesem Band, hier: *Betriebsdaten*). Die Dokumentation dieser Meßdaten umfaßt unter anderem auch den Volumenstrom und die Sondenkopftempe­ratur. Die hier verwendeten Datensätze sind im Betriebsjahr 1996 erfaßt worden.

Die Förderung hydrothermalen Wässers einer GHZ erfordert in der Regel den Einsatz von Unterwassermotorpumpen (UWP). In einer modernen Anlage besteht die Möglichkeit, den För­dervolumenstrom der Pumpe in Abhängigkeit vom Wärmebedarf im Heiznetz zu beeinflus­sen. Dazu ist die Pumpe mit einer Steuerung versehen, die aufgrund eines Steuersignals eine Veränderung der Frequenz des Antriebsstromes durchführt. Mit dieser Frequenzänderung wird unmittelbarer Einfluß auf die Drehzahl des Antriebsmotors der Pumpe und damit auf die Drehzahl ihres Laufrades genommen. Dadurch wird die Anpassung des Fördervolumenstroms des Thermalwassers an den aktuellen Bedarf erreicht.

Neben der Tatsache, daß Betriebszustände außerhalb des Auslegungspunktes zu einer Verrin­gerung des Wirkungsgrades der Pumpe führen, wird durch verminderte Volumenströme eine Absenkung der Thermalwassertemperatur im Sondenkopf verursacht.

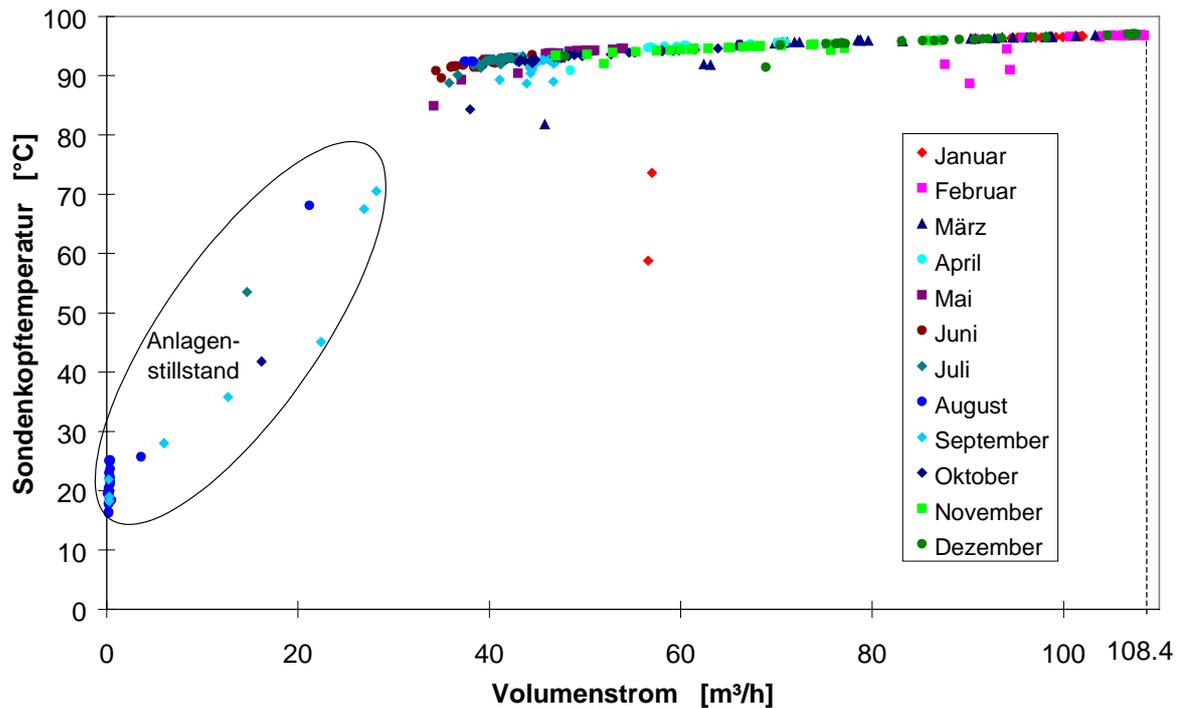


Abb. 1-1: Basisdaten des Meßwerterfassungssystems zur Sondenkopftemperatur in Abhängigkeit vom Fördervolumenstrom.

Abbildung 1-1 gibt den Datensatz in seiner ursprünglichen Form wieder. Alle Werte, die auf der Abszisse einem Wert von $35 \text{ m}^3/\text{h}$ und weniger zugeordnet sind, sind vor der Auswertung entfernt worden. Es muß sich hier um Effekte aus der Mittelwertbildung handeln, denn Volumenströme kleiner als $35 \text{ m}^3/\text{h}$ sind durch die Regelung nicht zu erreichen.

2 Temperaturabsenkung als Funktion des Fördervolumenstroms

Zur Analyse der Temperaturabsenkung wird aus den durchschnittlichen Meßergebnissen des Fördervolumenstroms an der Produktionsbohrung zunächst das Maximum des Betriebsjahres 1996 mit $97 \text{ }^\circ\text{C}$ bestimmt. Auf diesen Wert werden alle anderen Meßergebnisse normiert. Dadurch erhält man die prozentualen Anteile des aktuellen Volumenstromes am maximalen. Ebenso wird der Maximalwert der Sondenkopftemperatur bestimmt.

Zur Auswertung wird die Differenz zwischen diesem Maximalwert und der aktuellen Sondenkopftemperatur berechnet.

Diese als „Temperaturabsenkung“ bezeichnete Größe ist ein Maß für die pro Volumen Thermalwasser abgeführte Wärme¹.

¹ Die Temperaturabsenkung entsteht aufgrund des Wärmeflusses über die Bohrungsrohrwand in das angrenzende Gebirge. Sie wird durch die Wärmeübergangszahl, die Durchtrittsfläche und die treibende Temperaturdifferenz bestimmt. Als treibende Temperaturdifferenz ist hier die Differenz der Thermalwassertemperatur und der Gebirgetemperatur maßgeblich.

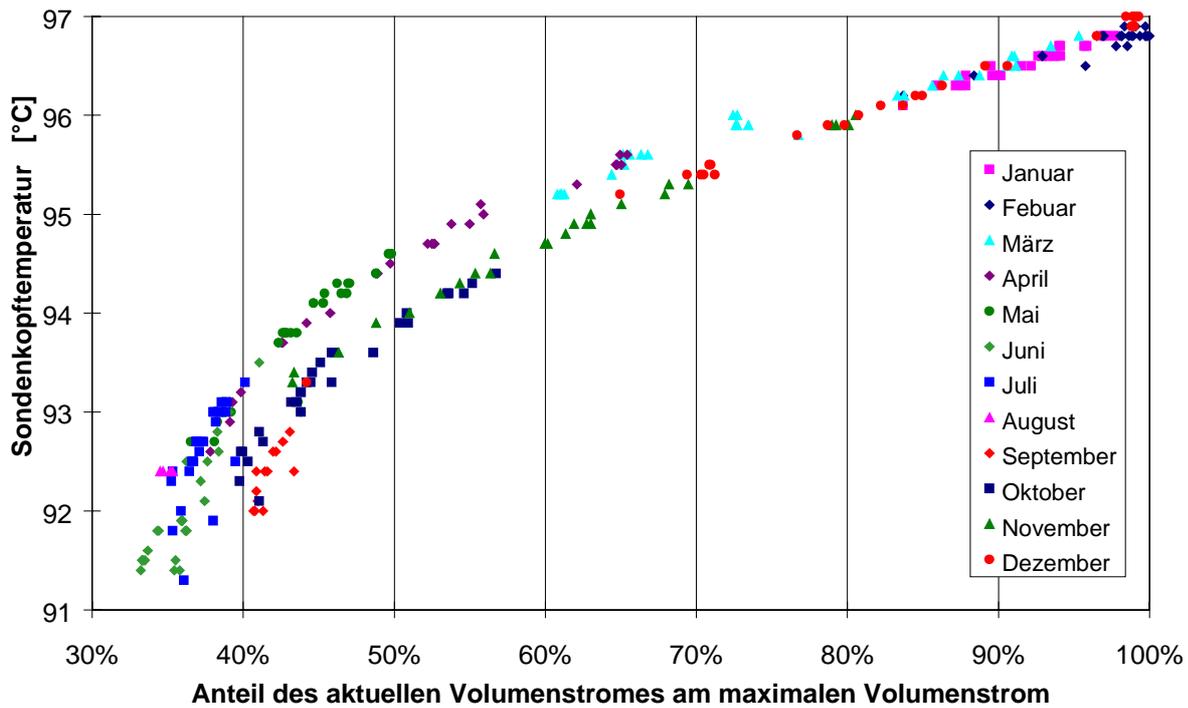


Abb. –2-1: Meßwertfolge des Temperaturverlustes in Abhängigkeit vom Volumenstromanteil.

Die Auftragung der derart aufbereiteten und von offensichtlichen Meßfehlern bereinigten Daten ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Die zur Bestimmung der Meßfehler angewendeten Kriterien sind in der Tabelle 2-1 dargestellt. Sie sind als Differenz der maximalen und der aktuellen Temperatur in Abhängigkeit des Volumenstromanteils an der maximalen Förderrate festgelegt.

Intervall: \dot{V}/\dot{V}_{\max}	Maximale Temperaturdifferenz [K]
0,9.....1	0,7
0,8.....0,9	1,2
0,7.....0,8	1,8
0,6.....0,7	2,3
0,5.....0,6	3,3
0,4.....0,5	5
< 0,4	6

Tab. 2-1: Kriterien zur Bestimmung der Meßfehler

Abbildung 2-1 zeigt eine deutliche Zweiteilung der Sondenkopftemperaturen bei gleichen Volumenstromanteilen. Offensichtlich muß diese Teilung im August erfolgen. Zu dieser Zeit war die GHZ für ca. einen Monat wegen Wartungsarbeiten außer Betrieb (siehe Bericht *Das geothermische Heizwerk in Neustadt-Glewe im Betriebsjahr 1996*, hier: *Ausfallzeiten* in diesem Band). Es zeigt sich deutlich, daß sich die Meßfolge der Monate der zweiten Jahreshälfte mit steigendem Volumenstrom und damit mit steigender Betriebsdauer derjenigen der ersten

Jahreshälfte annähert. Die Werte aus dem Dezember 1996 liegen nahe an der Trendlinie der ersten Kurve.

Es liegt die Vermutung nahe, daß offenbar die Ruhezeit im August zu einer Temperaturabsenkung im Gebirge in der Nähe der Bohrungsverrohrung geführt hat. Diese Anpassung sorgt zeitweise für eine erhöhte Temperaturdifferenz zwischen Thermalwasser und unmittelbarer Umgebung der Verrohrung und damit für einen erhöhten Wärmestrom aus dem System hinaus. Ein größerer Wärmestrom bei gleichem Volumenstrom bedeutet eine größere Temperaturabsenkung im Förderstrom.

Mit steigender zeitlicher Entfernung von diesem „Ereignis“ wird der Zustand im Gebirge wiederhergestellt und der Verluststrom verringert.

In der Folge der Meßwerte wird durch die Werte aus der ersten Jahreshälfte ein Zustand wiedergegeben, der nach einer größeren Betriebszeit aufgenommen ist. Daher muß also eher der untere Teil der Kurve für die Beschreibung des stationären Betriebsfalles herangezogen werden.

Ob und inwieweit sich der stationäre Zustand erst bei einer neuerlichen Temperaturabsenkung einstellt, muß die Auswertung weiterer Meßwertfolgen in der Zukunft zeigen.

3 Weitere Ableitungen aus den Meßergebnissen

Um die zitierten Meßergebnisse für weitere Ableitungen zu nutzen, ist es notwendig, eine Beschreibung der Verhältnisse am Bohrloch vorzunehmen. Dazu wird eine Wärmebilanz erstellt.

Aus der Kontinuitätsgleichung:

$$(1) \quad \dot{m} = \dot{V} * \rho$$

läßt sich bei Vorgabe einer konstanten Dichte ableiten, daß:

$$(2) \quad \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2},$$

also daß mit steigendem Volumenstrom auch der Massenstrom steigt.

Setzt man einen Wärmestrom über die Außenfläche des Tubings (\dot{Q}_{Verlust}) und unter Mißachtung des veränderlichen Wirkungsgrades ebenso die Verlustleistung der Pumpe als konstant an:

$$(3a) \quad \dot{Q}_{\text{Verlust}} = \text{konst.} \quad (3b) \quad \dot{Q}_{\text{Pumpe}} = \text{konst.},$$

so kann die Wärmebilanz des Bilanzraumes „Bohrung“ nach der Abbildung 3-1 erstellt werden:

Die Wärmebilanz lautet:

Eintretende Wärmeströme:

$$(4) \quad \dot{Q}_{\text{Hor}} = \dot{m}_{\text{Hor}} * c_p * (T_{\text{Hor}} - T_0) \quad (5) \quad \dot{Q}_{\text{Pumpe}}$$

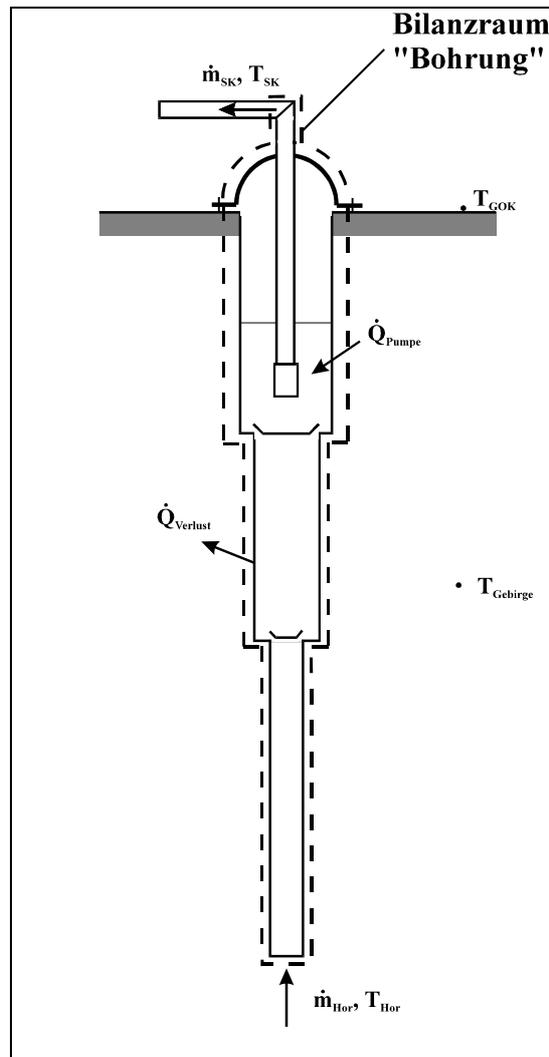


Abb. 3-1: Bilanzraum Bohrung, alle ein- und austretenden Wärmeströme sind wiedergegeben.

Austretende Wärmeströme:

(6) $\dot{Q}_{SK} = \dot{m}_{SK} \cdot c_p \cdot (T_{SK} - T_0);$ (7) $\dot{Q}_{Verlust}$

Gesamtbilanz:

aus: (4), (5), (6), (7)

⇒

(8) $\dot{m}_{Hor} \cdot c_p \cdot (T_{Hor} - T_0) + \dot{Q}_{Pumpe} = \dot{m}_{SK} \cdot c_p \cdot (T_{SK} - T_0) + \dot{Q}_{Verlust}$

Es gilt wegen einer ausgeglichenen Massenbilanz: (9) $\dot{m}_{Hor} = \dot{m}_{SK} = \dot{m}$

Daher, nach Umformung, mit (8), (9), unter Beachtung von (3a) und (3b):

(10) $\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{Hor} - T_{sk}) = \dot{Q}_{Verlust} - \dot{Q}_{Pumpe}$

Erstellt man nun die Bilanz für zwei Fördervolumenströme (Index 1 und Index 2) und setzt die Bilanzen über die konstanten Wärmestrom der rechten Gleichungsseite gleich, so erhält man:

$$(11) \quad \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{(T_{\text{Hor}} - T_{\text{Sk}})_2}{(T_{\text{Hor}} - T_{\text{Sk}})_1}$$

Das bedeutet, daß sich die Temperaturabsenkung gegenüber dem Volumenstrom entgegengesetzt verhält, daß also bei Halbierung des Volumenstroms sich die Absenkung verdoppelt. Nutzt man diese vereinfachenden, theoretischen Betrachtungen, so kann man für die Meßfolge des Volumenstroms eine Folge von Rechenwerten erzeugen, welche den für die Temperaturabsenkung bestimmten Meßwerten entsprechen muß. Hierbei ist die Vorgabe einer Horizonttemperatur vonnöten, denn Gleichung (11) zeigt, daß diese Größe in der Abschätzung enthalten ist. Bei Vorgabe der Horizonttemperatur von 99,6 °C wird eine gute Annäherung an die Meßwerte erreicht. Dieser Wert ist im Falle Neustadt-Glewe für die im Rahmen der geologischen Untersuchungen im Horizont an der Injektionsbohrung bestimmt worden. Förderseitig wurde eine Temperatur von 98 °C bestimmt, die rechnerisch zu der in Abbildung 3-2 mit $T_{\text{Hor}} = 98 \text{ °C}$ bezeichneten Folge führt.

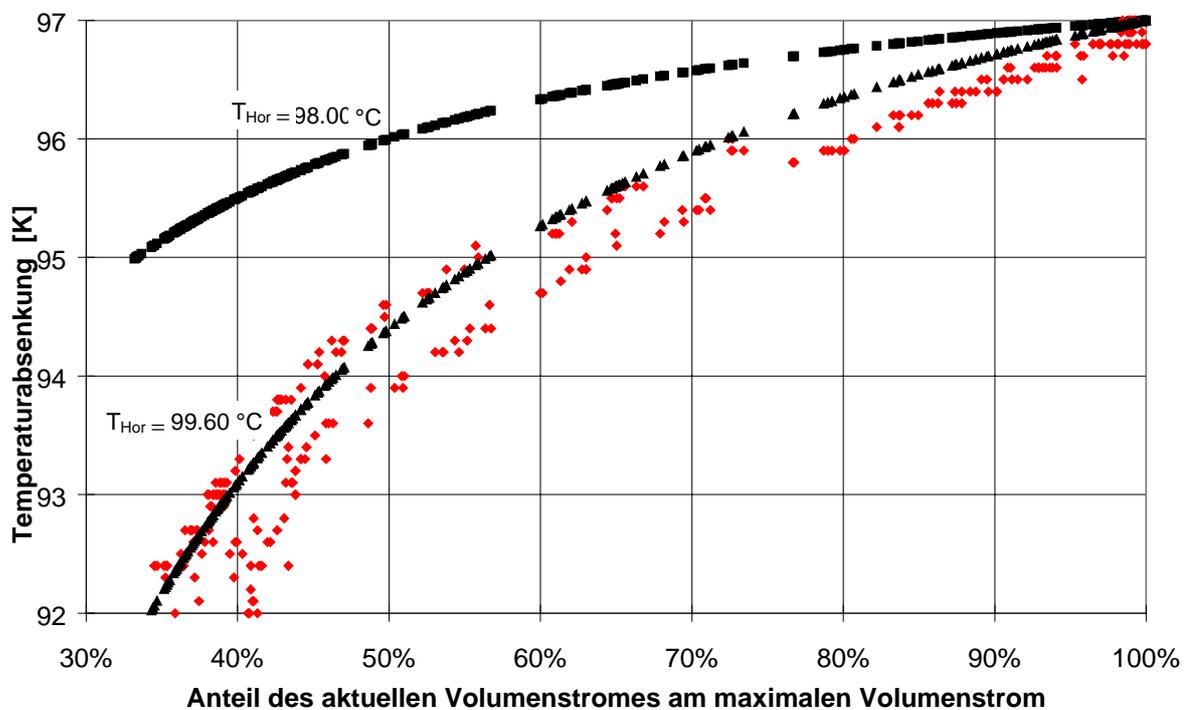


Abb. 3-2: Meßwertfolge des Temperaturverlustes in Abhängigkeit vom Volumenstrom und Darstellung der mittels Wärmebilanz berechneten Kurven

4 Ursachen der abweichenden Horizonttemperaturbestimmung

Was können die Ursachen für diese von den Ergebnissen der geologischen Untersuchung abweichende Horizonttemperatur sein?

Drei mögliche Erklärungen werden angesprochen:

- Die Vereinfachungen im Rahmen der Wärmebilanz können sich in Richtung einer erhöhten Horizonttemperatur auswirken und müssen überprüft werden.
- Die Meßteufe für die Temperatur ist in der Injektionsbohrung um 40 Meter größer angegeben als in der Produktionsbohrung [Rockel, 1995]. Die für den Bereich der Injektionsbohrung angegebenen Werte können auch produktionsseitig Gültigkeit haben, wenn der produktive Speicherbereich in entsprechenden Tiefen liegt.
- Die vorliegende Meßfolge gibt eine Aufnahme mit einiger zeitlicher Entfernung vom stationären Zustand für den Wärmefluß ins Gebirge wieder. Schon bei Betrachtung der Meßdatenfolge aus der zweiten Jahreshälfte muß eine Horizonttemperatur von 100,3 °C vorgegeben werden, um mit den rechnerischen Ergebnissen eine gute Wiedergabe der Meßergebnisse zu erreichen.

5 Verfeinertes Bilanzverfahren

Eine Betrachtung der möglichen Fehlerquellen der Wärmebilanz und deren Einfluß auf das Ergebnis zeigt, daß eine Aussage zur Zuverlässigkeit erst möglich ist, wenn das Bilanzverfahren mit einer verbesserten Version verglichen wird. Hierzu müssen die als konstant angenommenen Werte des Wärmeverlustes und des Wärmeeintrags aus dem UWP-Antrieb genauer beschrieben werden.

Im Bereich des **Wärmeverlustes über die Rohrtour** ins Gebirge kann ein weiteres Modell eingesetzt werden, was aber wieder nicht die exakten Verhältnisse berücksichtigt.

Exakte Rechnungen würden über die gesamte Lauflänge des Rohres genaue Daten zum Wärmeübergangskoeffizienten (Stichworte: Wärmeleitung, konvektiver Transport und Kontaktwiderstand) und korrekte Daten zur lokalen Gebirgstemperatur erfordern.

Um mit den vorhandenen Daten eine dennoch ausreichend genaue Bilanz zu erstellen, wird aus der den Wärmeübergang beschreibenden Gleichung der Anteil $k \cdot A$ als konstant angenommen:

$$(12) \quad \dot{Q}_{\text{Verlust}} = k \cdot A \cdot (T_{\text{TW}} - T_{\text{Gebirge}})$$

Diese Vereinfachung ist im Rahmen der Betrachtung ausreichend exakt, denn die Rohroberfläche ist mit variierendem Volumenstrom unverändert. Geringe Einflüsse können aus dem Wärmeübergangsfaktor entstehen. Da jedoch die Änderungen der Temperatur innerhalb der Bohrung gering ist, ist auch die Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten zu vernachlässigen.

Somit:

$$(13) \quad k \cdot A = \text{konst.}$$

Um eine Beschreibung der Temperaturen des Thermalwassers und des Gesteins zu erstellen, wird für beide vereinfachend ein linearer Temperaturverlauf zwischen dem Nutzhorizont und der Erdoberfläche vorausgesetzt. Dieser Verlauf führt nach Mittelwertbildung in beiden Fällen zur gesuchten Temperaturdifferenz (Indizierung wie vorstehend bzw. wie in Bild 1):

$$(14) \quad T_{\text{TW}} = \frac{T_{\text{TW,Hor}} + T_{\text{Sk}}}{2} \quad \text{und} \quad T_{\text{Gebirge}} = \frac{T_{\text{Gebirge,Hor}} + T_{\text{GOK}}}{2}$$

mit $T_{\text{TW,Hor}} = T_{\text{Gebirge,Hor}}$

⇒

$$(15) \quad (T_{TW} - T_{G\text{ebirge}}) = \frac{T_{Sk} - T_{GOK}}{2}.$$

Der Wert für T_{GOK} wird als mittlere Jahrestemperatur eingesetzt. Er läßt sich ebenfalls aus den Jahressmitschriften der GHZ in Neustadt-Glewe bestimmen. Sein Wert wird zu $T_{GOK} = 7,4 \text{ °C}$ errechnet.

Zur Beschreibung des durch die **UWP eingetragenen Wärmestroms** wird die mit der Regelung der Pumpe verbundene Wirkungsgradänderung kalkuliert.

Angaben hierzu entstammen den Betrachtungen des Pumpenherstellers (Tabelle 5-1). Diese Tabelle bietet die Grundlage, eine volumenstromabhängige, in den Bilanzraum eingetragene Wärmemenge zu beschreiben. Hierzu wird mit den Angaben zur elektrischen Leistung an der Oberfläche und den Wirkungsgraden „M+P EFF. %“ aus der Tabelle die eingetragene Wärmeleistung bestimmt. Die Wärmeleistung als Funktion des Volumenstromanteils ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Sie ergibt sich aus:

$$(16) \quad \dot{Q}_{\text{Pumpe}} = (1 - \eta) * P_{\text{Pumpe}},$$

also als der Teil der aufgewendeten elektrischen Energie, der nicht in Strömungsenergie umgewandelt wird.

Rate	[m³/h]	70	80	90	100	110	120	125
TDH	[m]	172	175	178	182	186	190	192
Range 0 - 1.0		0,2	0,33	0,45	0,56	0,65	0,73	0,76
Frequency	[Hz]	43,8	45,0	46,3	47,8	49,5	51,5	52,5
Volts		770	791	814	840	871	905	924
L. F.		0,53	0,58	0,63	0,68	0,74	0,80	0,83
Amps		67	70	74	79	83	88	91
P. F. (cos)		0,74	0,76	0,78	0,8	0,81	0,82	0,83
Motor eff. %		85	86	87	87	87	88	88
Pump eff. %		67	69	71	72	72	71	71
M + P EFF. %		57	60	61	63	63	63	62
surface kVA		91	99	107	117	129	142	149

Tab. 5-1: Datenblatt der Pumpenauslegung, basierend auf Informationen der Herstellerfirma *CENTRILIFT 97*

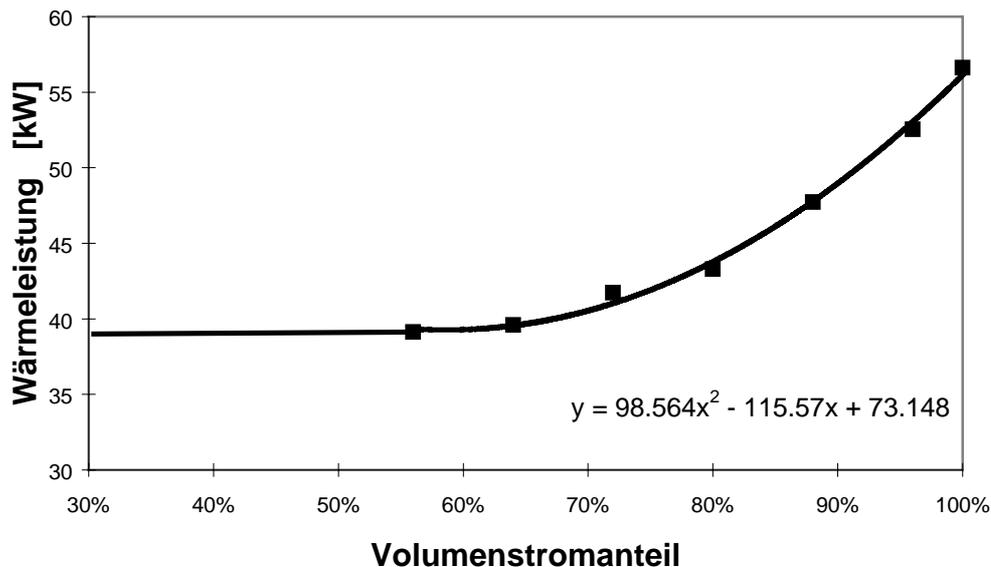


Abb. 5-1: Aufgrund der Leistungsverhältnisse an der UWP in den Thermalwasserstrom eingetragener Wärmestrom; im Bereich *Volumenstromanteil* > 55 % wurde die Kurve mit der im Bild dargestellten Funktion angenähert. Für den Bereich 30 % < *Volumenstromanteil* < 55 % wird mit einem konstanten Wärmeeintrag gerechnet.

Die Wärmebilanz lautet unter Betrachtung der Gleichungen (8), (9), (10), (12) und (16) nach Umformung:

$$(17) \quad k * A = \frac{2 * (\dot{m} * c_p * (T_{Hor} - T_{Sk}) + (1 - \eta) * P_{Pumpe})}{T_{Sk} - T_{GOK}}$$

Nach (13) muß diese Gleichung für alle Volumenstromverhältnisse zu einem konstanten Wert führen. Leider führt die vorhergehende Verfahrensweise der Verhältnisbildung für zwei Datenpunkte hier nicht zu weiteren Vereinfachungen. So ist die Vorgabe der Wärmekapazität und einer Dichte erforderlich. Sie läßt sich aus Tabellenwerken [VDI-Wärmeatlas, 1984] für reine Gemische aus Wasser und Natrium-Chlorid bestimmen und wird mit $c_p = 3,5 \text{ kJ/kg}$ ausgelesen. Die Dichte wird mit $\rho = 1113 \text{ kg/m}^3$ in Anlehnung an die im Bericht *Ganglinien des Betriebsjahres 1996* durchgeführten Betrachtung angenommen.

Mit dieser Angabe und unter Vorgabe einer Horizonttemperatur erfolgt die Berechnung des Wertes $k * A$ für alle Datenpunkte. Aus der Berechnung ist die Folge der gemittelten, der maximalen und der minimalen Werte für $k * A$ in Abbildung 5-2 aufgetragen. Die beste Übereinstimmung unter der Voraussetzung eines zeitlich konstanten Wertes für $k * A$ (Gleichung (13)) erhält man, wenn die Abweichung vom Mittelwert ein Minimum erreicht. Hier liegt diese Situation im grau markierten Bereich zwischen 99,4 °C und 100 °C vor.

Anschließend wird aus der Reihe der 366 Werte für $k \cdot A$ die Standardabweichung nach

$$\text{Standardabweichung} = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}}$$

bestimmt.

Wird nun diese Rechnung für variierende Horizonttemperaturen erstellt (siehe Abbildung 5-3), so zeigt sich ein Minimum in der Nähe von 99,5 °C. Dieses Minimum stellt sich an der Stelle ein, wo der rechnerisch beste Startwert gewählt wurde, denn hier wird am besten die Forderung der Gleichung (13) nach konstanten Wert für $k \cdot A$ erfüllt.

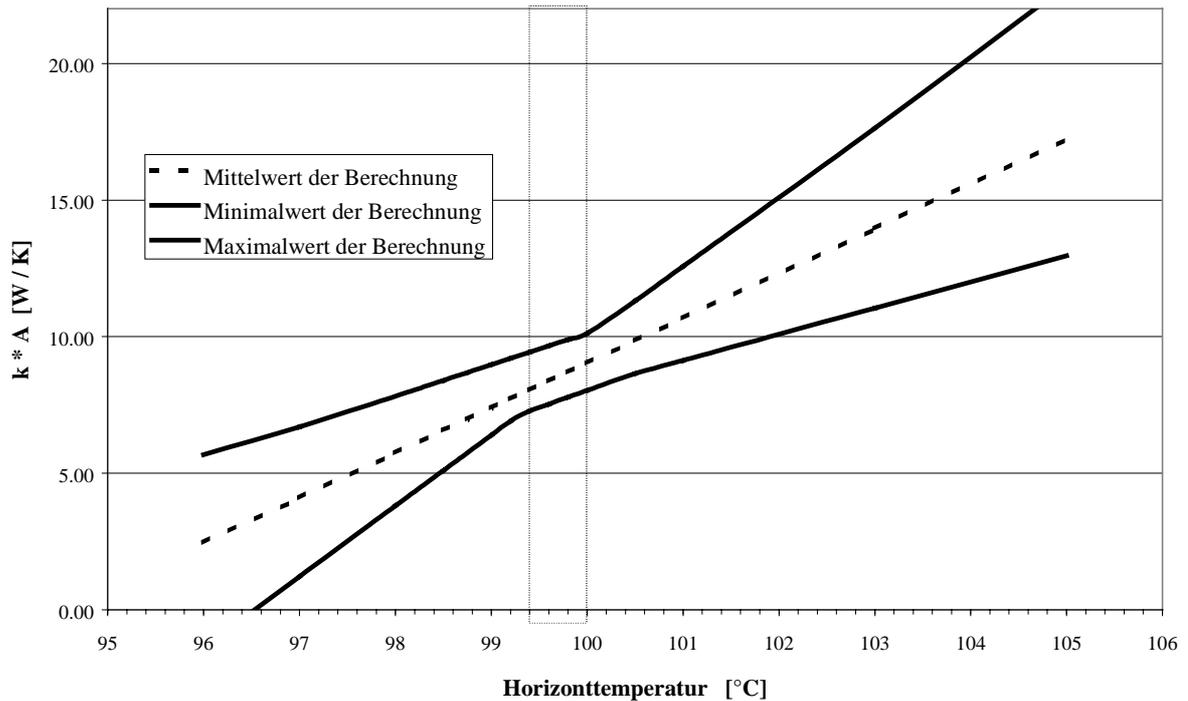


Abb. 5-2: Berechnete Werte für $k \cdot A$ in Abhängigkeit der vorgegebenen Horizonttemperatur

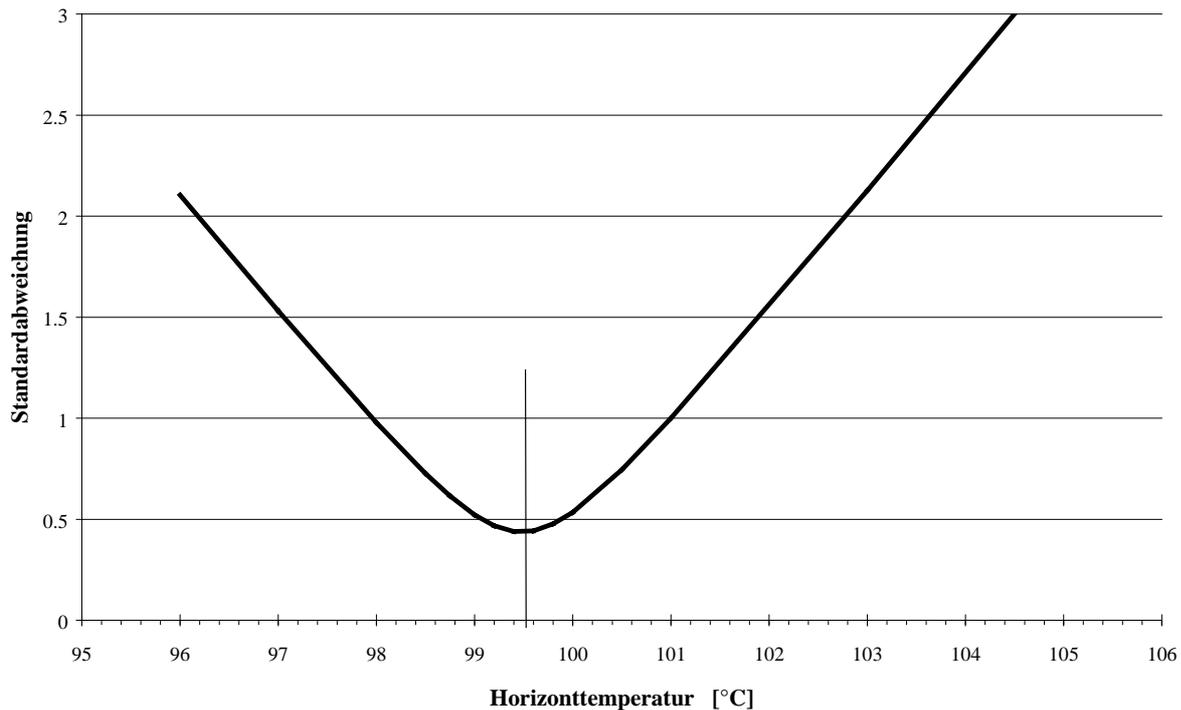


Abb. 5-3: Auftragung der Kennzahl über der Horizonttemperatur. Die Kennzahl wurde als Quotient aus der Differenz von Maximal- und Minimalwert (Breite der Streuung) und dem Mittelwert des Wertes $k \cdot A$ gebildet.

6 Ergebnis des Vergleiches der Bilanzverfahren

Aus diesem Ergebnis ist abzuleiten, daß das aufwendigere, zweite Bilanzverfahren keine wesentlichen Abweichungen zum ersten, sehr einfachen aufweist. Insgesamt führt jedoch bei beiden Auswerteverfahren die Annahme einer Horizonttemperatur von etwa 99,5 °C zu guten Rechenergebnissen.

Geologisch erkundet war für die betrachtete Bohrung ein Wert von 98 °C. Für die nicht weit entfernt liegende Injektionsbohrung wurde schon in der geologischen Testphase ein Wert von 99,5 °C ausgewiesen. Da dieser nach den Bilanzierungen nun auch auf der Förderseite anzunehmen ist, wird möglicherweise bereits jetzt aus aktiven Bereichen des Horizontes Wasser gefördert, welche zur Zeit der Anlagenerstellung nicht vermessen wurden.

Auch die dritte angesprochene Fehlerquelle kann nicht ausgeräumt werden. Für den Erfassungszeitraum der Datenreihe könnte eine „große zeitliche Entfernung“ vom stationären Zustand angenommen werden. Betrachtung der Meßwerte aus der zweiten Jahreshälfte 1996 erfordern eine um 0,7 Kelvin erhöhte Horizonttemperatur zum Erreichen eines guten Abgleiches. Dennoch scheint sich die Meßfolge recht schnell wieder den vorherigen Werten zu nähern.

7 Ausblick

Eine Beobachtung des Kurvenverlaufs in der Zukunft wird Aussagen über die Entwicklung der Horizonttemperatur liefern. Ein derartiges Auswerteverfahren eignet sich somit zur Detektierung von Temperaturschwankungen an Stellen, an denen keine Messung erfolgt. Eventuell lassen sich so Hinweise auf geologischen Inhomogenitäten und Temperaturdurchbruchzeiten ableiten.

Sicherlich muß zur vertiefenden geologischen Beschreibung einer Inhomogenität eine exakte Abbildung der bis zum Zeitpunkt der Feststellung abgelaufenen Betriebsfolgen mathematisch abgebildet und simuliert werden. Nur so können örtliche Zuordnungen in die Bereiche zwischen Produktions- und Injektionssonde erfolgen.

Sollte eine weitere Verringerung des Temperaturverlustes mit der Betriebszeit in der Zukunft festgestellt werden, so kann ein Teil des beschriebenen Effekts hierauf zurückzuführen sein. Interessant kann bei diesen Bedingungen eine ausführliche Beschreibung dieses „Einlaufzustandes“ bis zum stationären Zustand sein, um die Dauer dieser Phase zu erfassen.

Es muß aus diesen Gründen zu einer weiteren wissenschaftlichen Begleitung derartiger Projekte geraten werden.

8 Literatur

Rockel, W. und R. Werner, Die geologischen Bedingungen für die Thermalwassergewinnung und -verpressung, Geothermische Energie, Heft 11, Seite 20 ff, Mai 1995.

VDI-Wärmeatlas, Abschnitt Dd, Stoffwerte von technischen Wärmeträgern, Seite 8, 1984.

CENTRILIFT, Auskunft des Mitarbeiters Herr de Bie, basierend auf Datenblättern von 1994, März 1997.

Formelzeichen

A	Oberfläche des Tubings
\dot{c}_p	Wärmekapazität des Thermalwassers
k	Wärmedurchgangskoeffizient Bohrung \rightarrow Gebirge
\dot{m}	Massenstrom Thermalwasser
\dot{m}_{Hor}	Massenstrom Thermalwasser im Horizont
\dot{m}_{SK}	Massenstrom Thermalwasser am Sondenkopf
n	Anzahl der berechneten Werte
P_{Pumpe}	elektrische Leistung Unterwassermotorpumpe
\dot{Q}_{Hor}	aus dem Horizont eintretender Wärmestrom
\dot{Q}_{Pumpe}	Verlustleistung der Unterwassermotorpumpe
\dot{Q}_{SK}	aus dem Sondenkopf austretender Wärmestrom
\dot{Q}_{Verlust}	Wärmefluß über Außenfläche des Tubings
T_0	beliebige Bezugstemperatur
T_{Gebirge}	Gebirgstemperatur im unbeeinflußten Bereich
$T_{\text{Gebirge, Hor}}$	Gebirgstemperatur im Horizont
T_{GOK}	durchschnittliche Temperatur an der Oberfläche
T_{Hor}	Horizonttemperatur
T_{SK}	Sondenkopftemperatur
T_{TW}	beliebige Bezugstemperatur
$T_{\text{TW, Hor}}$	Thermalwassertemperatur im Horizont
\dot{V}	Volumenstrom Thermalwasser
\dot{V}_{max}	maximaler Volumenstrom Thermalwasser
x	berechneter Wert für $k \cdot A$
ρ	Dichte des Thermalwassers
η	Wirkungsgrad der Unterwassermotorpumpe

Indices:

1,2	Meßwerte zu unterschiedlichen Zeiten
-----	--------------------------------------